

# هندسة القوى الكهربائية

دراسات في توليد و نقل و توزيع الطاقة الكهربائية

2019

أ.د. محمود جيلاني

كلية الهندسة - جامعة القاهرة



**لمتابعة التحديثات و الإستفسارات الخاصة بهذا الكتاب  
يرجى متابعة الموقع الخاص بي**

**[www.drgilany.com](http://www.drgilany.com)**

---

# هندسة القوى الكهربائية

Power System Engineering

دراسات فى توليد ونقل وتوزيع الطاقة الكهربائية

2019



أ.د. محمود جيلانى

الأستاذ بكلية الهندسة - جامعة القاهرة

[drgilany@gmail.com](mailto:drgilany@gmail.com)

حقوق الطبع محفوظة للمؤلف

---

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



اللهم لك الحمد كله ، ولك الملك كله ، وبيدك الخير كله ،  
وإليك يرجع الأمر كله ، اللهم صل على محمد خاتم أنبيائك  
ورسلك . اللهم إني أبرأ من الثقة إلا بك . ومن الأمل إلا فيك  
، ومن التسليم إلا لك ، ومن التفويض إلا إليك ، ومن التوكل  
إلا عليك ، ومن الرضا إلا عنك ، ومن الطلب إلا منك ،  
ومن الرجاء إلا فيك ، اللهم تتابع على برك ، واتصل خيرك ، وكمل عطائك  
، وعمت فواضلك ، وتمت نوافلك ، فاللهم أحسن ختامنا يا أرحم الراحمين .



## مقدمة الطبعة الثانية-2019

هذا الكتاب كان الرابع في سلسلة الكتب التي تعنى بتقديم الهندسة الكهربائية باللغة العربية ، كما أنه الأكبر حجماً بين كل الكتب التي كتبتها ، وهو أيضاً الأقرب إلى قلبي ، فقد تعلمت الكثير أثناء كتابته ، وتعلمت أكثر أثناء تدريسي لأجزاء منه في أماكن مختلفة ولمستويات مختلفة (طلاب - مهندسين - ) من خلال المناقشات والاستفسارات.

### ما الجديد في نسخة 2019؟

رغم تنوع الإضافات في هذه النسخة ، فقد لا تبدو ملحوظة للبعض ؛ وذلك بسبب حجم الكتاب الذي يجعل نسبة أي إضافة غير محسوسة. لذا أردت فقط أن أكتب هذه السطور لتنبه القارئ إلى مواضع التغييرات الكبيرة فقط في هذه النسخة ، أما التغييرات البسيطة في الصياغة أو في الشرح أو في الترتيب فهي كثيرة لدرجة يصعب حصرها .

والفصول التي تغيرت بشكل كبير هي:

- 1- الفصل السادس ، حيث أضيف ما يقرب من 40 صفحة حول ربط المحطات الشمسية الكبيرة بالشبكة العامة.
- 2- الفصل السابع وقد أعيد صياغته بالكامل.
- 3- باب محطات التحويل هو أكثر الأبواب التي اشتملت على تغييرات خاصة في الجزء الخاص بالوصف العام للمحطة وكذلك الفصل الخامس عشر الخاص بالتأريض والجزء الخاص بالبطاريات في الفصل السادس عشر.
- 4- أضيف جزء هام جداً في الفصل السادس عشر ، عن الـ Automation في المحطات وتطبيق الـ IEC 61850 والتي عرضت في أكثر من 20 صفحة جديدة.
- 5- الفصل التاسع والعشرون والخاص بدراسة الـ Stability هو أيضاً من الفصول التي تغيرت بشكل كبير .

### النسخة الورقية من الكتاب

للأسف لا توجد نسخة مطبوعة من هذا الكتاب حتى الآن ، فقد وجدت طريقتين للطباعة : الأولى مكتبات تعرض سعراً معقولاً لكن مستوى رديء للطباعة ، أما الطريق الثاني فهي طباعة جيدة لكن

بسعر مرتفع ، وفي هذه الحالة سيكون الكتاب الورقى غير متاح سوى للقادرين ، وهذا ما لا أقبله ، ومن هنا سيظل الكتاب متاحا على النت للجميع ، ومن أراد أن يطبع لنفسه نسخة ورقية فليفعل بالمستوى الذى يرضاه لنفسه فقط. مع الإشارة إلى وجود بعض المكتبات للأسف تطبع الكتاب دون موافقة منى ودون مراجعة منى وهذا ما لا يليق بالمكتبات المحترمة

# المقدمة

هذا الكتاب هو محاولة لسد الفجوة بين الجانب الأكاديمي الذي يغلب على الكتب الجامعية ، وبين الواقع العملي الذي يعيشه المهندس بعد التخرج ، وقد كتبت له لأفهم ما صعب على فهمه أو تخيله من مواضيع القوى الكهربائية حين كنت طالبا ، أو حتى بعد تخرجي ، وربما هذا ما يفسر لك نوعية الموضوعات التي درست في فصول هذا الكتاب ، فهي لا تتشابه مع الكتب التقليدية في هذا المجال ، فلست أهدف إلى مجرد جمع معلومات عن كل موضوع ، وإنما كان لي أثناء كتابة أى موضوع هدفان أساسيان:

- 1- الهدف الأول هو توضيح الرؤية الشاملة للموضوع ، فأحيانا يكون توضيح الرؤية باختصار أصعب من كتابة الموضوع نفسه. وأشير هنا مثلا إلى مقدمة الباب الرابع في هذا الكتاب وهو خاص بشبكات التوزيع الكهربائية ، فمقدمة هذا الباب لا تتعدى بضع صفحات لكنى كتبتها في عدة أسابيع ، وقد حاولت فيها أن أخص المهام والمفاهيم والدراسات التي يجب أن يلم بها أى مهندس يعمل في مجال "شبكات التوزيع" في منظومة القوى الكهربائية ، ومثلها مقدمة الباب الثالث التي حاولت فيها أن أخص ماذا يعنى تصميم محطة محولات فرعية "Substation" ، وما هي الخلفيات العلمية التي يحتاجها المهندس الذي يعمل في هذه المجالات.
- 2- الهدف الثانى ، وهو يتعلق بالتفاصيل ، وكان هدفى فيها أن أربط الجانب النظرى بالواقع العملى ، سواء من خلال عرض مشاكل حقيقية من المواقع والمحطات ، أو من خلال العديد من البيانات والصور الواقعية ، أو من خلال نقل الخبرة العملية للقارئ عند الحديث عن بعض الجزئيات ، حتى يعيش القارئ الجو الواقعى لما هو مكتوب.

## لغة الكتاب

وحاولت فى سبيل تحقيق تلك الأهداف استخدام لغة عربية سلسة ، وأسلوب هندسى منظم فى العرض ، ومن هنا كان عنوان الكتاب : "هندسة القوى الكهربائية" . وأشير هنا إلى ما قاله العلامة ابن خلدون مؤسس علم الاجتماع فى وصف معنى أن تكون مهندسا:

... "واعلم أن الهندسة تفيد صاحبها إضاءة في عقله ، واستقامة في فكره ؛ لأن براهينها كلها بينة الانتظام ، جلية الترتيب ، لا يكاد الغلط يدخل أقيستها لترتيبها وانتظامها ، فيبعد الفكر بممارستها عن الخطأ ، وينشأ لصاحبها عقل منتظم ، وقد زعموا أنه كان مكتوبا على باب أفلاطون: من لم يكن

مهندساً فلا يدخل منزلاً ، وكان شيوخنا رحمهم الله يقولون : ممارسة الهندسة للفكر بمثابة الصابون للشوب الذي يغسل منه الأقدار وينقيه من الأوزار والأدران ، وإنما ذلك لما أشرنا إليه من ترتيبه وانتظامه .  
ومن هنا كان هذا الكتاب محاولة عربية من أجل " هندسة " القوى الكهربائية .

## ما هي منظومة القوى الكهربائية ؟

تتكون هذه المنظومة من ثلاثة منظومات أساسية وهي :

- 1- منظومة توليد القدرة الكهربائية (Generation System) وهي المنظومة التي تشتمل عند دراستها على عدة موضوعات من أهمها : الشبكات الموحدة ، والتحكم في القدرة المولدة ، و أنواع المحطات ، واقتصاديات التوليد .
  - 2- منظومة نقل القدرة الكهربائية (Transmission System) وهذه المنظومة تنقسم إلى قسمين : الشبكات الهوائية Overhead Transmission System ، والكابلات الأرضية Underground Cables . والدارس لهذا الموضوع يجب عليه أن يلم بموضوعات من قبيل دراسة أنواع الموصلات وأنواع العوازل وأعطال الكابلات واختباراتها واكتشاف أماكنها ، وحسابات القدرة الفعالة المنقولة ، وكذلك دراسة القدرة غير الفعالة Reactive Power وعلاقتها بتغير وثبات الجهد في الشبكات ، إلى آخر ذلك من موضوعات .
  - 3- منظومة توزيع القدرة الكهربائية (Distribution System) وتختص هذه المنظومة بنقل الطاقة إلى المستهلكين من خلال شبكة الجهد المتوسط وأيضاً شبكة الجهد المنخفض . والدارس لهذا الموضوع يجب عليه أن يلم بموضوعات كثيرة متعلقة بتخطيط شبكات التوزيع ومكونات شبكة التوزيع ، وأنظمة التوزيع والتحكم المختلفة إلخ .
- وينظم عمل هذه المنظومات الثلاثة مجموعة من المنظومات الفرعية مثل منظومة الحماية ، ومنظومة التحكم ، ومنظومة القياس ، ومنظومة الاتصالات .
- وتعتبر محطات التحويل Substations بمثابة مفاصل الربط الأساسية بين المنظومات الثلاثة الرئيسية ، حيث تتواجد بداخل محطات التحويل جميع المنظومات المساعدة السابقة (الحماية - القياس - الاتصالات - التحكم) .
- وبالطبع فكل المنظومات تتعاون معاً للوصول إلى جودة الخدمة المطلوبة ، مع التحقق من استقرار الشبكة (Power System Stability) ، والتي يقصد بها مدى قدرة الشبكة على سرعة استعادة

القيم الطبيعية للتشغيل (سواء للتردد أو للجهد) بعد حدوث هزات عابرة بالشبكة Transients سواء كانت هذه الهزات بسيطة أو هزات ضخمة.

وهذا الكتاب مكون من ستة أبواب ، تغطي كثيرا من الموضوعات الهامة التي يجب أن يلم بها مهندس القوى الكهربائية. وقد أشرت لعناوين هذه الأبواب الستة ضمن المقدمة السابقة وذلك بخط تقيل نسبيا ، علما بأن المنظومات الفرعية سيتم الحديث عنها أيضا ضمن أبواب الكتاب.

## لن هذا الكتاب؟

هذا الكتاب كتب أساساً لمهندسي الكهرباء بصفة عامة ، وكذلك لطلاب أقسام الكهرباء سواء في الجامعة أو ما يعادله من التعليم التطبيقي والفنى . ولذا فأنا أفترض أن المصطلحات الكهربائية الأساسية معروفة للقارئ ، ولا تحتاج لشرح ، كما أفترض أن كثيرا من هذه المصطلحات معروفة باللغة الإنجليزية أيضا.

ونظراً لأهمية الموضوع فقد روعي في أسلوب كتابته أن يكون بعيدا عن أى تعقيدات رياضية من غير إخلال بعمق الدراسة ، كما أن كتابته باللغة العربية جعلته أيضا مناسباً لقطاع عريض من الفنيين المتخصصين الباحثين عن فهم أساسيات ما يقومون به من أعمال فنية دون معوق من لغة أو تعقيد في الشرح.

## ماذا ينقص هذا الكتاب؟

هذا الكتاب ربما يكون الأول باللغة العربية فى تنوع مجالاته ، وكبر حجمه (حوالى 800 صفحة) ، وسهولة أسلوبه فى تناول الموضوعات ، والمزج بين الجانب الأكاديمي والجانب العملى فى الشرح. ومع ذلك فليس كل أحد سيجد فيه غايته الكاملة .

- فالطالب سيجد أن الأمثلة المحلولة فيه قليلة. (ويمكن تعويض ذلك بالرجوع إلى الكتب التى تشتهر بكثرة الأمثلة المحلولة وخاصة الكتب الهندية ، وقد أخذت بعض الأمثلة المحلولة فى بعض الفصول "نسخا" من كتاب V.K. Mehta ويمكن الرجوع إليه للمزيد ، ويمكن أيضا الرجوع لكتاب Theraja ، وهما من أفضل الكتب التى تقدم أمثلة محلولة تفيد الطالب) .
- و المهندس فى المحطات سيجد أن الكتاب ينقصه التفاصيل العملية للتشغيل ، وشرح مراحل التحكم فى المعدات بالتفصيل ، إلخ. (ويمكن استكمال ذلك بالرجوع للكتالوجات أو إلى ملفات موجودة على منتديات القوى الكهربائية تشرح هذه الأمور ، وتعالج هذه النقطة).

- والأستاذ الجامعي سيد الكتاب ينقصه إثباتات تفصيلية للمعادلات الرياضية المستخدمة في الشرح حتى يمكن للطلاب معرفة الأساس الرياضي لبعض القضايا مثل دراسات ال Transients الواردة في الباب الأخير ، ومثل حسابات استنتاج ال TL Parameters في الباب الثاني مثلا. والحق أن تعمدت ذلك ، لأن أغلب المراجع تستخدم هذا الأسلوب في الشرح ، ولن أقدم جديدا إذا سرت على نفس المنوال ، فاخترت أن استخدم المعادلة في صورتها النهائية ولا أتبع طريقة استنتاجها ، وفضلت بعد ذلك أن أهتم بشرح Physical Meaning للموضوع ، وبهذه الطريقة في تحليل وفهم المشاكل يمكن فهم الأساسيات دون معوق من إثباتات لمعادلات رياضية تستهلك جهدا كبيرا في فهمها ثم لا تقدم فائدة مباشرة سوى للأكاديميين والباحثين. وعموما يمكن استكمال هذا الجانب بالرجوع للمراجع التي تهتم بهذا الجانب مثل الموجودة في قائمة المراجع الأجنبية في نهاية الكتاب .
- و الطلاب من بعض الدول العربية سيجدون بعض المشاكل في عدم استخدام اللغة العربية في كافة المواضيع ، وسيجدون أنني أعتمد على المصطلح الإنجليزي كثيرا بدلا من ترجمته. وهذه المشكلة قد يعانى منها بالفعل بعض القراء . لكنى وجدت أن شيوع المصطلحات الإنجليزية جعلت معظم العاملين في المجال يفضلون التعامل بالمصطلح الإنجليزي ، و ربما لا يفهمون الترجمة العربية للمصطلح ، وهذا واقع يجب الاعتراف به ، وقد استخدمت الترجمة العربية بجوار المصطلح الأجنبي في كثير من المواضيع ، والتزمت بذكر المصطلح باللغة الإنجليزية فقط - وبدون ترجمة - في بعض الأحيان ، إما لشيوع المصطلح ، أو لأنه سبق ترجمته في موضع آخر . وعالجت هذه المشكلة جزئيا بعمل قاموس صغير في نهاية الكتاب للمصطلحات الأجنبية التي استخدمتها دون ترجمة. مع ملحوظة أن هذا القاموس لا يشمل كل الكلمات الإنجليزية في الكتاب ، ولكنه يشمل فقط الكلمات التي استخدمت أحيانا دون ترجمة أما الكلمات التي ترجمتها بالكتاب فلم أضعها بالقاموس).
- وينقص هذا الكتاب أيضا وضع المراجع التفصيلية لكل الأجزاء أولا بأول ، والسبب في ذلك يرجع إلى أنى كنت منذ البداية قد عزمت على كتابة المراجع مجمعة في نهاية الكتاب كما في كتبي السابقة ، ولكنى وجدت ملاحظات من بعض الأساتذة أثناء المراجعة تطلب منى وضع المراجع مع كل جزئية ، ورغم اقتناعى بوجهة نظر هؤلاء الأساتذة والزملاء إلا أن الوقت قد فات لتدارك هذا الأمر ، فالكتاب استغرق إعداده وكتابته عدة سنوات ، ورجعت خلالها إلى عشرات إن لم تكن مئات المراجع والمواقع على شبكة الإنترنت ، وللأسف فات الوقت لأتذكر المرجع الخاص ببعض الجزئيات ومن ثم ظلت هذه السلبية باقية ، وإن كانت المراجع في نهاية الكتاب تمثل أهم المراجع فعلا التي استقدت منها بدرجة كبيرة.

- أخيرا ، سيجد البعض أن هناك موضوعات لم يتم التطرق إليها في هذا الكتاب رغم أهميتها القصوى ، على سبيل المثال فإن الباب الثالث يتناول محطات التحويل الكهربائية ولا يوجد فيه أى حديث عن محولات القوى الكهربائية التى هى عصب هذه المحطات ، كما أن الكتاب يخلو من الحديث عن نظم الحماية الكهربائية. وظنى أن من سيرى هذا النقص فى الكتاب هم فقط الذين لم يطلعوا على الكتب السابقة التى كتبتها منذ سنوات (كتاب المرجع فى محولات القوى الكهربائية ، وكتاب نظم الحماية الكهربائية ، وكتاب المرجع فى التركيبات والتصميمات الكهربائية) . فقد خصصت كتابا منفصلا لمحولات القوى الكهربائية ، وكتابا منفصلا لنظم الوقاية ، وبالطبع أشرت إلى الرجوع إليهم فى ثنايا الكتاب.
  - وإن كنت أجد للبعض عذرا فيما يتعلق بنظم الحماية التى أجد أن كتابى : نظم الحماية الكهربائية ، علم وفن ، يحتاج لبعض الإضافات ، وإن شاء الله لو بقى لى عمر سأكتب نسخة معدلة من كتاب الحماية تعالج كثيرا من أوجه النقص فيه ، خاصة أنه كان أول كتاب أكتبه ، ويحتاج فعلا للتوسع فى شرح بعض الموضوعات.
- ملحوظة : ربما أيضا تجد بعض الأخطاء الإملائية أو النحوية ، وهذا غير مستبعد ، فقد تجد بعضا من هذه الأخطاء ، والتى يمكن تجميعها لاحقا فى ملحق للتصويبات الإملائية أو النحوية إن وجدت.

أ.د محمود جيلانى

زهراء المعادى -2019 .

للتواصل مع المؤلف:

[drgilany@gmail.com](mailto:drgilany@gmail.com)

# تَصْدِيرٌ



في أواخر عام 1992 كنت على موعد مع مناقشة رسالة الدكتوراه الخاصة بي ، وكانت في مجال الوقاية الرقمية Digital Protection ، وكنت أدرس بجامعة Calgary بكندا تحت إشراف أستاذي الكبير Om Prakash MALIK (الصورة المجاورة للدكتور مالك).

وقد جلست معه في ذلك الوقت لنتفق على أسماء الممتحنين ، وكانت المشكلة في الممتحن الخارجي ، وكان رأي الدكتور مالك صادما لي ، إذ رشح لي البروفسور Mohindar S. Sachdev الأستاذ بجامعة Saskatoon. ولمن لا يعرف هذا الاسم يكفي أن يتابع منشورات الـ IEEE ليكتشف أن هذا الأستاذ هو رقم واحد في العالم في مجال الـ Digital Protection ، وكنت قبل هذا الاجتماع بشهور قد حضرت معه دورة لمدة أسبوع دارت حول الجديد في عالم الـ Digital Protection ، وكان هو المحاضر الأساسي في هذه الدورة ، وكان معه في هذه الدورة أيضا تلميذه النجيب الذي صار الآن واحدا من ألمع الأساتذة في مجال الوقاية الرقمية ، وهو البروفسور Tarlochan Sidhu ، (الأساتذة الثلاثة المذكورين هنا من الهند) . وكنت خلال الدورة مبهورا بأسلوبيهما وغزارة علمهما ، وأدركت حينها لماذا اختارت الـ IEEE البروفسور Sashdev ليكون هو المنسق لأشهر Two Tutorials في مجال الـ Digital Protection ، ولكن أن يكون هو ممتحنا لي في الدكتوراه فهذا شيء آخر ، ولكن لم يسعني أن أعترض على اختيار د مالك .

وجاء يوم المناقشة ، وقدمه الدكتور مالك ليبدأ الأسئلة ، وكنت متوقعا أن يبدأ بسؤال في أهمية موضوع الرسالة مثلا ، ففوجئت به يصدمني بأول سؤال ، وكان سؤالاً عاما في موضوع الوقاية الرقمية لا علاقة له بالرسالة ، وكان السؤال تحديدا هو : Digital Protection is a Digital Filter. Explain ، وبالطبع أخذتني الصدمة من هذا السؤال الأول ، ولم تحضرني أي إجابة ، فقلت في نفسي لماذا لا أستعمل معه خطة الطلبة لدينا حين لا يعرف أحدهم إجابة السؤال فيلج ويدور في الحديث حول الموضوع ويسترسل حتى يظن المستمع أن هذا الطالب بحر علم ، ولكن الخطة فشلت ، والرجل في كل مرة يتركني أقول ما شئت ثم أفاجأ به يقول لكنك لم تجب على

السؤال ويعيده بنصه مرة أخرى ، وبدا الارتباك واضحا على ، ففتدخل د مالك بصرامة ، ووجه الكلام للبروفسور Sashdev فى جملة واضحة: Mohendar, that is enough .

فالدكتور مالك تدخل ليدافع عن تلميذه حتى لا أفقد تركيزى تماما ونحن مازلنا فى بداية المناقشة ، وطلب تغيير السؤال إلى وجهة جديدة ، وكان البروفسور Sashdev لا يقل احترافية عن أستاذى فبدأ يسألنى أسئلة فى موضوع الرسالة مباشرة وترك الأسئلة الكبيرة العامة ، لأنه من واقع إجابتى عن السؤال الأول عرف أن الواقف أمامه طالب دكتوراه عادى ليس بهذا التميز الذى ظنه حين قرأ الرسالة.

### لماذا أبدأ الكتاب بهذه القصة؟

فى اليوم التالى بعد انتهاء المناقشة استدعاني د. مالك منفردا لمكتبه ، وهو الذى كان بالأمس يدافع عنى ، ففوجئت به يعاتبى على أسلوبى فى الرد على السؤال الأول ، وقال ما معناه لماذا تخجل أن تقول لا أعرف.

وتذكرت الإمام مالك بن أنس رحمه الله حين سئل عن ثلاثين مسألة فأجاب عن عشرة وقال فى الباقي لا أعلم ، فقال له السائل : وماذا أقول للناس الذين أرسلونى إليك لأسألك ؟ فقال فى ثقة : قل لهم مالك بن أنس لا يعلم.

تعلمت هذا الدرس ، وأصبحت من وقتها ليس فقط لا أخجل أن أقول لطالب يسألنى فى المحاضرة سؤالاً ما لا أعرفه فأقول له لا أعرف ، بل صار أحب شئ إلى أن يسألنى الطالب سؤالاً لا أعرفه حتى أبحث عن إجابته وأرجع الأسبوع التالى بالإجابة فأفيد الطلبة بمعلومة كنت أنا وهم لا نعرفها.

وهذا الكتاب نتاج هذه المدرسة ، مدرسة الطلاب المميزين الذين يجلسون فى المحاضرة ويسألون بعمق ، فمفتاح العلم هو السؤال ، وكان هؤلاء الطلاب المميزون خلال سنوات عملى فى هندسة القاهرة ، أو فى كلية الدراسات التكنولوجية بالكويت ، أو خلال عملى بالجامعة الأمريكية بالقاهرة ، هم أصحاب هذا الكتاب ، وكل معلومة جديدة فيه أصلها يرجع لهؤلاء الطلاب ، ولذا كان تصدير الكتاب موجه لهم.

# شكرو تقدير

لا أبالغ إن قلت أن من أهم ما يميز هذا الكتاب تنوع فريق المراجعة ، فقد تعاون معي في مراجعة هذا الكتاب:

- 1- العديد من أساتذتي بهندسة القاهرة ، الذين شارك كل منهم في مراجعة جزء من الكتاب ، منهم أ.د. حسين أنيس ، و أ.د. زينب هانم عثمان ، وأ.د. عصام أبو الذهب ، وأ.د. حسام كمال ، مع شكر خاص للأ.د. دعاء خليل ، التي راجعت بعناية ودقة جميع أبواب الكتاب.
- 2- وقد شارك في المراجعة أساتذة كبار من جامعات أخرى ، منهم أ.د. مصطفى عيسى (هندسة حلوان) ، أ.د. نبيل عباسي (هندسة الإسكندرية) ، أ.د. تامر كوادى (هندسة المنوفية) ، أ.د. سعيد المصري (هندسة حلوان) .
- 3- ومن أهم فئات المراجعين لهذا الكتاب نخبة مميزة من كبار المهندسين العاملين بقطاعات وزارة الكهرباء المختلفة في مصر ودول الخليج ، منهم م. موسى سعيد أبو خطوة رئيس قطاع الوقاية بشركة توزيع وسط الدلتا ، م. كامل بدرخان كبير مفتشى الكابلات الكهربائية بشركة النقل السعودية ، م. أحمد نصر (شركة الفجار السعودية) .
- 4- وبالطبع كعادته في كل الكتب السابقة فقد قام بالمراجعة أ. م. سيد سعد صاحب المنتدى المشهور والصديق القديم ، وكذلك المهندسة المميزة شامية الزونة شريكته في الحياة ، وفي إدارة الموقع.
- 5- وشاركت أيضا مجموعة رائعة من المهندسين في مصر من ذوي الخبرات العملية ، و كل واحد منهم له مجال تخصصي مختلف وبيئة عمل في مجال القوى الكهربائية مختلفة عن الآخر ، وقد شاركوا إما بالمراجعة أو بإمدادى ببعض الخبرات العملية ، منهم م. أحمد الرفاعي (محطة توليد غرب القاهرة) ، وم. أحمد فؤاد ، و م. حسين شمعة (شركة النقل المصرية) و م. حسام صبرة و م. أحمد الحناوى (شركة توزيع جنوب القاهرة) ، والمهندس الاستشارى عبد الله الطوخى (شركة سمارت بور للاستشارات) ، وكان لكل منهم جهد مميز في المراجعة والإضافات.
- 6- ولأن الطلاب هم فئة رئيسية مستهدفة فقد شارك ممثل لهم ، وهو أحد الطلاب المميزين بالسنة الثالثة 2015-2016 بهندسة القاهرة (م أحمد طالب) ، مشكورا في مراجعة الكتاب.

7- وأجدنى أختم سجل الشكر والتقدير باثنين من كبار الأساتذة فى مصر ، توفيا إلى رحمة الله ، وكانا يسعيان بحماس لمراجعة الكتاب ، هما : أ.د. محمد مصطفى سلام (رحمه الله) الأستاذ بجامعة حلوان وقد ناقشت معه بعضا من نقاط الباب السادس فى الكتاب ، وأ.د. رشدى رضوان أستاذى بهندسة القاهرة ، الذى طلب منى أن أطبع له الباب الثالث فى الكتاب ليراجعه مكتوبا ، و لكنه توفى إلى رحمة الله قبل أن يستلمه منى بيوم واحد. رحمهما الله رحمة واسعة.

8- شكر خاص لفنان غير مشهور : يوسف محمود جيلانى على تصميم الغلاف فى طبعتيه الأولى 2016 ثم الثانية 2019.

# الباب الأول

## توليد الطاقة الكهربائية

## مقدمة عامة

عملية توليد أو إنتاج الطاقة الكهربائية هي في الحقيقة عملية تحويل للطاقة Energy Conversion من شكل إلى آخر ، فلا يمكن بحال من الأحوال توليد طاقة كهربية من لا شيء ، أو من العدم ، فالطاقة لا تبنى ولا تخلق من عدم كما نص على ذلك مبدأ بقاء الطاقة. وهذه مقدمة ضرورية في بداية هذا الباب ، لاسيما بعد انتشار ظاهرة الاختراعات الوهمية والاكتشافات الخادعة في الصحف ، ومعظمها يدور حول طرق وهمية لتوليد الطاقة الكهربائية. فمن الأهمية بمكان أن نؤكد هنا أنه لا يمكن الحصول على طاقة كهربية إلا من طاقة أخرى من الطاقات الموجودة بالكون .

### أهم مصادر الطاقة

مصادر الطاقة المتوفرة نوعان :

1- الوقود الأحفوري Fossil Fuel : هو عبارة عن بقايا الكائنات الحية من نباتات و حيوانات دُفنت عميقا في باطن الأرض منذ سنين طويلة ، و تعرضت إلى درجات حرارة و ضغط مرتفعين جداً ، مما أدى إلى تركيز مادة الكربون فيها و تحويلها إلى وقود أحفوري يتم حرقه في محطات التوليد بعد ذلك للحصول على الطاقة الحرارية التي ستتحول لاحقاً إلى طاقة كهربية. و من أهم الأمثلة على الوقود الأحفوري : الفحم الحجري ، والنفط ، والغاز الطبيعي .

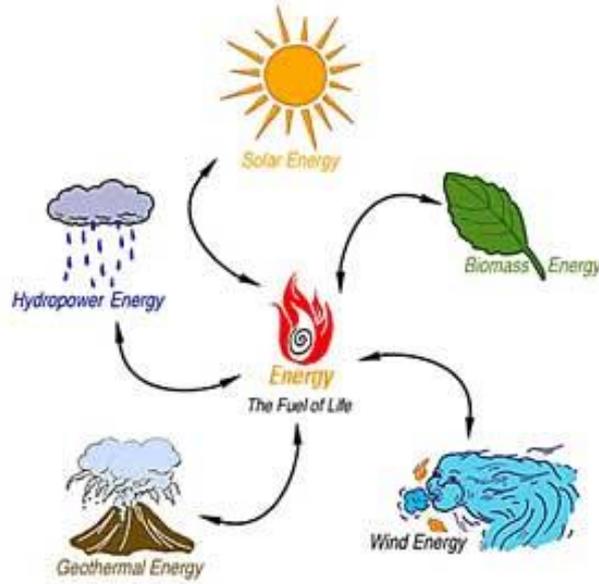


وقد سمي الوقود الأحفوري بهذا الاسم إما لأنه يستخرج من الأحفوريات ( والأحفوريات عبارة عن كائنات ماتت منذ ملايين السنين ودُفنت بقاياها في باطن الأرض ) ، أو لأنه يحتاج إلى أدوات حفر ليتم استخراجها من باطن الأرض. و يشكل الوقود الأحفوري ما نسبته 90% من مجمل الطاقة المستخدمة في حياتنا اليومية. و من أكثر مميزات الوقود الأحفوري التي جعلت منه مصدراً مهماً لإنتاج الطاقة ، أنه يمتلك كثافة طاقة عالية ، وأنه سهل النقل و التخزين ، و عندما تتم معالجته بتروكيميائياً فإننا نحصل منه على أنواع مختلفة من الوقود التي لها استخدامات متعددة .

و بالرغم من كل هذه الفوائد والحسنات للوقود الأحفوري إلا أنه من أكثر الأسباب التي تؤدي إلى دمار البيئة ، فهو من أهم الأسباب التي أدت إلى ظهور ظاهرة (الاحتباس الحراري) ، و تلوث الهواء بفعل الغازات الضارة و المواد المتطايرة الناتجة عن حرقه .

2- الطاقات المتجددة Renewable Energy : مثل الطاقة الشمسية و طاقة الرياح و الطاقة المستخرجة من باطن الأرض Geothermal و الطاقة الحيوية Biomass ، وغيرها .

## Renewable Energy

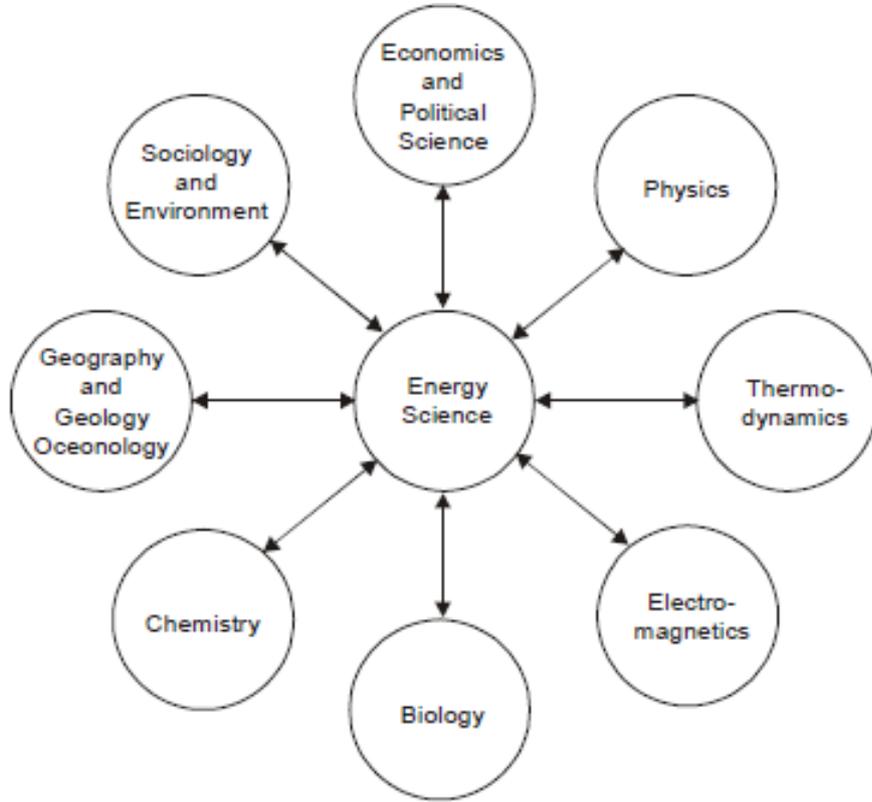


ويمكن أن نقول أن أصل معظم هذه المصادر (سواء التقليدية أو المتجددة) هو الشمس التي تعتبر تقريبا مصدر لكل الطاقات على سطح الأرض ، فالرياح لا تتحرك سوى من ضغط مرتفع لضغط منخفض ، والذي يتحكم في هذه الضغوط هو حرارة الشمس ، والـ Biomass هي طاقة حيوية مخزنة في أوراق وأغصان النباتات يتم حرقها للحصول على طاقة حرارية لتوليد الكهرباء ، وقس على ذلك باقى الطاقات مثل المد والجزر ، وطاقة الأمواج و طاقة باطن الأرض إلخ . كما أن الوقود الأحفوري كما ذكرنا يعود أصله إلى النبات ، وأصل الطاقة التي وضعت في النبات هي الشمس ، ومن ثم ستجد دائما هناك علاقة مباشرة أو غير مباشرة بين مصدر الطاقة والشمس .

3- الطاقة النووية: ربما يشذ عن القاعدة السابقة أنواع محددة مثل الطاقة النووية ، فهذه لا علاقة لها بالشمس .

## علم الطاقة

فى رأيى أن علم الطاقة هو أم كل العلوم ، فالباحث فى علم الطاقة (وخاصة توليد الطاقة الكهربائية) سيحتاج إلى دراسة علوم متنوعة وكثيرة كما يبدو واضحا فى الشكل التالى الذى يثبت أن هذا العلم له علاقات تبادلية مع خلاصة العديد من العلوم. وهذا منطقي ، فالإنسان منذ بدء الخليقة يبحث عن الطاقة ، منذ زمن الإنسان الأول الذى اكتشف النار ، إلى إنسان العصر الحديث الذى اكتشف المصادر الجديدة والمتجددة لتوليد الطاقة ، فكان البحث عن الطاقة محفزاً لنشوء علوم كثيرة من أجل استخراج وتجويد وتحسين وتعظيم الاستفادة من هذه الطاقات.



## وحدات قياس الطاقة

بما أن توليد الطاقة الكهربائية هى عملية من عمليات تحويل الطاقة فيجب أن نشير هنا إلى وحدات قياس الطاقة. فالطاقة عموماً (سواء ميكانيكية أو كهربية أو حرارية) تقاس بوحدة الجول Joule .

ففي حالة الطاقة الميكانيكية

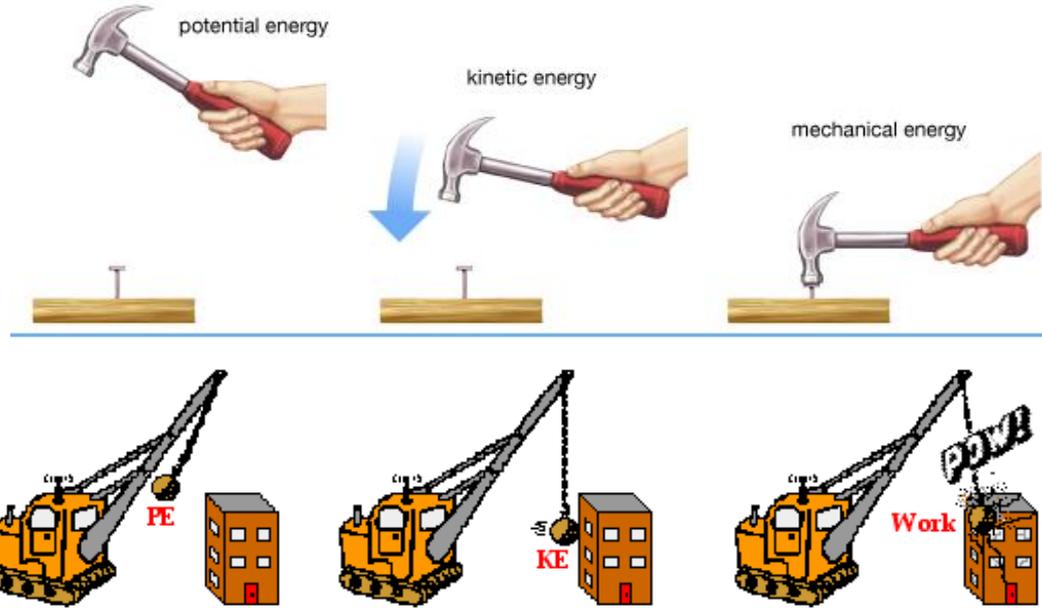
يمكن التعبير عن الطاقة الميكانيكية بثلاث صور مختلفة (كلها صور لنفس الطاقة ولكن بتحويلات مختلفة):

• طاقة الوضع, Potential Energy, :  $PE = \text{mass} \times \text{gravity acceleration} \times \text{height}$

• وطاقة الحركة, Kinetic Energy, :  $KE = 0.5 \text{ mass} \times \text{velocity}^2$

• والشغل, Work, : وهو الإنجاز النهائي المطلوب من هذه الطاقة الميكانيكية ، وهو عبارة عن تحريك شيء ما لمسافة معينة ،  $\text{Work} = \text{Force} \times \text{distance}$ .

وجميعها يقاس بوحدة الجول. والشكل التالي يمثل ثلاث صور للطاقة الميكانيكية وصور مختلفة للشغل.



والجول يعبر عن كمية الشغل Work الذي تبذله قوة قدرها واحد نيوتن حين تدفع جسما لمسافة قدرها متر واحد:

$$\text{Work} = \text{Mechanical Energy (J)} = \text{Force (N)} \times \text{Distance (mt)} = \text{Joules}$$

وفي حالة الطاقة الكهربائية

فإن نفس الوحدة (الجول) تمثل الطاقة الكهربائية المستهلكة في الثانية داخل أى جهاز كهربى له قدرة Power تساوى واحد وات:

$$\text{Electrical Energy} = \text{Power (watt)} \times \text{time (sec)} = \text{Volt} \times \text{Amp} \times \text{Sec} = \text{Joules}$$

وحيث أن هذه الوحدة تمثل كمية ضئيلة من الطاقة فإننا يمكن أن نستخدم وحدات أكبر مثل kWatt-Hour, kWh

$$1 \text{ (kWh)} = 1000 \times 60 \times 60 = 36 \times 10^5 \text{ Joule}$$

$$1 \text{ W.H} = 3600 \text{ Joule}$$

**ملحوظة : الجول يعادل أيضا كهربيا:**

- الطاقة التي تكتسبها شحنة كهربية مقدارها 1 كولوم عند تحركها بين فرق جهد مقداره 1 فولت.
- الطاقة اللازمة لتسيير تيار كهربائي قدره 1 أمبير بين فرق جهد قدره 1 فولت مدة 1 ثانية وأصل الطاقة الكهربائية يمكن أن يكون كيميائيا كما في البطاريات ، أو حراريا ميكانيكيا كما في محطات التوليد ، أو ضوئيا كما في الخلايا الشمسية . والمهم هنا التأكيد على أن الطاقة الكهربائية لا تأتي إلا من طاقة أخرى.

أما في حالة الطاقة الحرارية

فإن الطاقة تقاس في الغالب بوحدة تسمى كالورى Calorie (وفي النظام الإنجليزي تقاس بوحدة أخرى هي الـ British Thermal Unit, BTU) ، والجول يمثل الطاقة المستهلكة Q لرفع درجة حرارة جرام واحد من الماء درجة مئوية واحدة .

$$\text{Amount of Heat} = Q = m(\text{kg}) \times c(\text{Specific Heat const}) \times \Delta T(^{\circ}\text{C})$$

والعلاقة بين الجول والكالورى هي :

$$1 \text{ Calorie} = 4.18 \text{ Joule}$$

علما بأن درجات الحرارة يمكن أن يعبر عنها بثلاث طرق مختلفة :

- الطريقة الأولى باستخدام درجة الحرارة المئوية .
- الطريقة الثانية باستخدام درجة الحرارة المطلقة أو مقياس كلفن Ko ، Absolute Temperature) ، ونحصل عليها بإضافة 273 إلى الدرجة المئوية.
- والطريقة الثالثة هي قياس الحرارة بالفهرنهايت (الأكثر استخداماً في أمريكا) .

والمعادلة التالية تعبر عن طريقة التحويل من درجة مئوية إلى فهرنهايت.

$$F = 32 + 1.8 \text{ times } ^\circ\text{C}$$

## تصنيف محطات التوليد الكهربائية

الجزء الأكبر من هذا الباب سيكون حول دراسة محطات توليد الكهرباء بأنواعها ، وجزء آخر حول ربط هذه المحطات ببعضها . وعموماً يمكن تصنيف محطات التوليد إلى نوعين : محطات تقليدية ، ومحطات الطاقة المتجددة .

ومن أشهر أنواع محطات التوليد التقليدية :

Thermal Power Stations	محطات التوليد البخارية
Gas Turbine & Combined cycle	المحطات الغازية والدورة المركبة
Diesel Power Stations	محطات توليد الديزل
Nuclear Power Stations	محطات التوليد النووية
Hydroelectric Power stations	محطات التوليد المائية

ومن أشهر أنواع محطات الطاقة الجديدة والمتجددة :

Wind Power stations	محطات الرياح
Solar Power stations	محطات الطاقة الشمسية
Tidal Power stations	محطات المد والجزر
Geothermal Power Stations	محطات طاقة باطن الأرض

Biomass Power Stations	محطات الطاقة الحيوية
Wave Power stations	محطات موجات البحر
Ocean Thermal Energy Conversion	تحويل طاقة المحيط الحرارية
Fuel Cells Power Plants	محطات خلايا الوقود

## فصول هذا الباب

فصول هذا الباب تسير على النحو التالي:

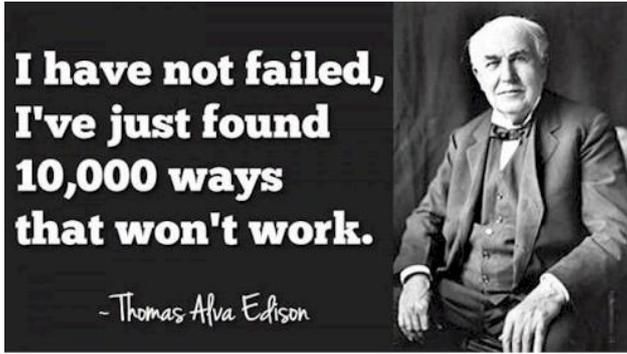
- الفصل الأول : يعرض مفهوم الشبكة القومية الموحدة ، وتفاصيل ربط وحدات التوليد معا والتحكم فيها.
- الفصل الثانى : المحطات الحرارية بأنواعها المختلفة (البخارية - الغازية - المركبة)
- الفصل الثالث : شرح تفصيلى للقسم الكهربى بمحطات التوليد عموما
- الفصل الرابع : المحطات النووية
- الفصل الخامس : المحطات المائية
- الفصل السادس : بعض المحطات المعتمدة على الطاقة الغير تقليدية (الشمسية - طاقة باطن الأرض - المد والجزر ، ومحطات طاقة الرياح) .
- ملحق الباب الأول : دراسة عن اقتصاديات محطات التوليد ، وأسعار إنشائها.

## 1

## الشبكات الكهربائية الموحدة

## 1-1 مقدمة

أنشأ توماس إديسون أول محطة لتوليد الكهرباء في العالم في نيويورك بأمريكا في 1882 ، وقد نجح أخيرا ، بعد محاولات عديدة



فاشلة ، في توليد تيار كهربى مستمر . وهو صاحب العبارة الأشهر : **"أنا لم أفشل ولكنى نجحت فى اكتشاف عشرة آلاف طريقة فاشلة"**.

وكانت مصر أول دولة عربية دخلتها الكهرباء على شكل مولدات ديزل (وليس محطات توليد) فى 1863 فى عهد الخديوى إسماعيل ، لكن أول محطة توليد كهربية عمومية كانت فى 1895 زمن الاحتلال الإنجليزى .

أما الدول العربية ، فالعراق عرف الكهرباء فى 1917 خلال فترة الاحتلال الإنجليزى أيضا ، وكانت بغداد مضاءة بالكامل فى 1928 ، أما السعودية فقد بدأت باستخدام مولدات الديزل فى أوائل العشرينات .

واستخدمت الكهرباء ضمن شبكة كهربية عمومية فى الكويت فى عام 1934م بعد أن كانت لسنوات تستخدم مولدات الديزل فى استخدامات محدودة ، و فى عام 1951م تم إنشاء أول محطة توليد بمنطقة الشويخ ، وكان جهد الشبكة الكهربائية حينها لا يتجاوز (11000) فولت ، ومع التطور الزمنى أصبح الآن بالكويت رغم صغر مساحتها شبكة قوية بقدرة تتجاوز 13 جيجاوات ويجهد يصل إلى 400 kV .

وأول شبكة كهربية عربية موحدة تضم مستويات مختلفة من الجهود ووحدات توليد متعددة ومتنوعة كانت في مصر ، فقبل إنشاء وزارة الطاقة الكهربائية في مصر عام 1964 كان هناك العديد من الشركات والهيئات المسؤولة عن توليد الكهرباء. وكانت بعض أنواع التيارات المستخدمة في مجال التوزيع من النوع الـ DC ، والبعض الآخر كان AC بنوعيه (1-phase) و (3-phase) . بل كان البعض منهم يعمل على تردد (40Hz) ، والبعض الآخر على تردد (50Hz) . وكان جهد التوزيع في بعض المناطق مثل الإسكندرية (110 V) ، وفي مناطق أخرى كان الجهد 220V. وبالتالي كان لابد قبل إنشاء شبكة الكهرباء الموحدة التي بإمكانها ربط جميع الشبكات مع بعضها البعض أن يتم أولاً توحيد وتنسيق الترددات والجهود التي تأتي من محطات توليد الكهرباء المختلفة ، وكذلك توحيد وتنسيق الجهود المستخدمة في النقل والتوزيع.

والآن ، فإن أكبر شبكة كهربية موحدة في الشرق الأوسط هي الشبكة السعودية ، حيث بلغت قدرات التوليد المتاحة من الكهرباء في السعودية 65506 ميغاوات بنهاية 2014 ، وبذلك تعد السعودية أكبر منتج للطاقة الكهربائية في الشرق الأوسط وشمال أفريقيا (تمتلك السعودية أكثر من 50 محطة توليد بأنواع وقود متنوعة ، ويشكل إنتاج المملكة أكثر من 25% من إنتاج 18 دولة عربية مجتمعة) بينما تأتي مصر في المرتبة الثانية من حيث قدرات التوليد بالشبكة الموحدة ، حيث يبلغ إجمالي القدرة المركبة بها حوالي 43000 ميغاوات (2018) ، وتقوم بإنتاج ونقل وتوزيع الطاقة على مستويات الجهود المختلفة (500 ، 400 ، 220 ، 132 ، 66 ، 33 ، 22 ، 11 ك فولت) من خلال محطات التوليد المختلفة بالشبكة (بخارية ، غازية ، مركبة ، مائية ، رياح ، شمسية). وتأتي بعد ذلك الإمارات والعراق والكويت والجزائر على الترتيب ثم بقية الدول العربية.

### 1-1-1 أهمية الشبكات الكهربائية الموحدة

في كل دول العالم يتم ربط محطات التوليد داخل كل دولة معا بشبكة نقل جهد عالي ، بحيث تصبح جميع المولدات تصب في شبكة واحدة ، وجميع الأحمال تأخذ من نفس هذه الشبكة ، وبالتالي فأنت في مصر مثلا عندما تقول مثلا أن الكهرباء في بيتي تأتي من محطة شبرا الخيمة لأنك تسكن بجوار هذه المحطة فهذا خطأ ، والصحيح أن الكهرباء تأتيك من الشبكة الموحدة .

والهدف واضح من هذا الأسلوب في ربط محطات التوليد معا ، فلو كانت كل محطة مسؤولة عن مدينة معينة ، فإن خروج هذه المحطة من الخدمة لأي سبب يعني فقد الطاقة الكهربائية بالكامل في هذه المدينة ، بينما في حال ربط المحطات معا ، فإن خروج وحدة توليد يمكن في معظم الأحيان تعويضها بسهولة من الاحتياطي الموجود في بقية المحطات المتصلة بالشبكة.

وتتمثل الفائدة الأساسية لربط عدة شبكات كهربية معا في تقليل القدرة الاحتياطية المركبة في كل شبكة ، وبالتالي إلى تخفيض الاستثمارات التي تنفق لبناء محطات جديدة لتلبية الطلب ، دون المساس بدرجة الأمان والاعتمادية في الشبكات المرتبطة. ويؤدي الربط إلى التقليل من الاحتياطي spinning reserve الذي سنتحدث عنه لاحقا ، ويهدف الربط أيضا إلى الاستفادة من إقامة محطات التوليد في المواقع المناسبة لها ، بحيث تكون أكثر جدوى من الناحية الاقتصادية نتيجة مثلا لتوفر وقود رخيص فائض صعب التصدير أو صعب التخزين في إحدى الدول المرتبطة .

ويهدف الربط أيضا إلى التقليل من تلوث البيئة ، فالجدير بالملاحظة أن معظم محطات التوليد الجديدة في أوروبا على سبيل المثال تنشأ في شرق أوروبا الفقير وليس في غربها الغني الذي يريد الكهرباء دون تلوث .

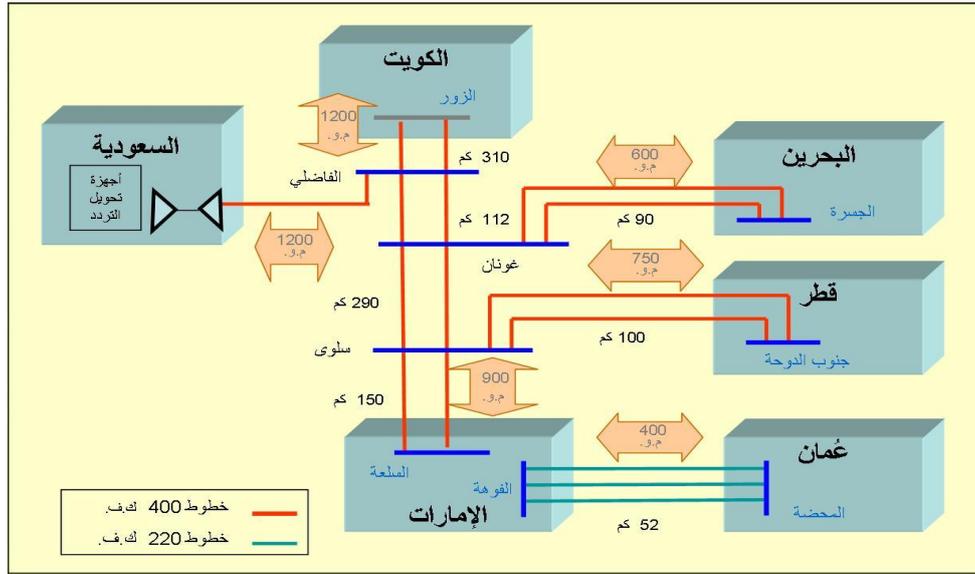
### 1-1-2 الربط الكهربائي بين الدول العربية

وإدراكاً لهذه الفوائد ، فقد قام عدد محدود من الدول العربية منذ أوائل الخمسينيات بربط شبكاتهم الكهربائية معا. ودول المغرب العربي كان لها السبق في ذلك ، فعلى سبيل المثال ، تم ربط الجزائر بتونس بدءاً من عام 1952 بخط ربط على جهد 90 kV. وذلك لأغراض الطوارئ فقط ، مثل حدوث أعطال فنية أو عند ارتفاع الطلب بصورة مفاجئة في إحدى الشبكات يمنعها من توفير الطاقة للأحمال الموجودة على شبكتها. وتم ربط المغرب والجزائر بخط ربط على جهد 220 kV في عام 1979. وبالإضافة إلى الربط القائم بين الجزائر والمغرب على جهد 220 kV ، قامت الدولتان أيضا بربط شبكات الكهرباء فيهما ، على جهد 400 kV ، وذلك من خلال خط هوائي بقدرة حوالي 900 MW. وقد دخل هذا الخط في الخدمة عام 2009.

أما دول الخليج فإنهم يرتبطون معا بشبكة واحدة أيضا ، ويوضح الشكل 1-1 المخطط العام لشبكة الربط لدول مجلس التعاون الخليجي. وقد نفذ مشروع الربط على ثلاث مراحل ، بحيث تم في المرحلة الأولى ربط محطة الزور في الكويت بمحطة الفاضلي في المملكة العربية السعودية ، وبمحطة الجسرة في البحرين ، ومحطة الدوحة الجنوبية في قطر ، كل ذلك على جهد 400 kV وتشكل هذه الخطوط الجزء الشمالي من الربط. أما في المرحلة الثانية ، فتم ربط شبكات الإمارات وعمان ، التي تشكل الجزء الجنوبي. وفي المرحلة الثالثة ، يتم ربط الجزء الشمالي بالجزء الجنوبي.

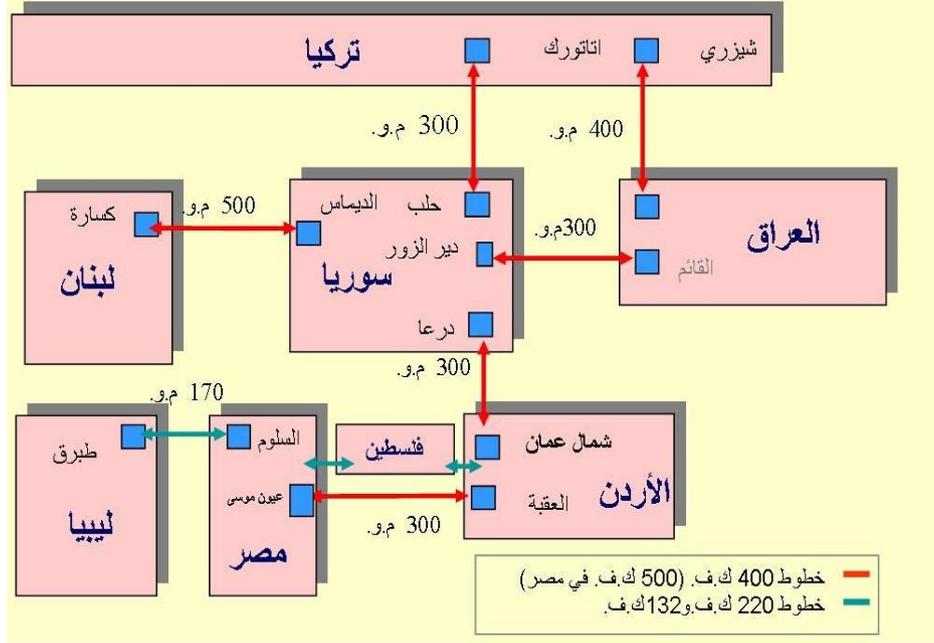
## ملحوظة:

لا توجد خطوط HVDC فى أى جزء من الشبكة لأن الشبكة كلها تردد 50HZ ، رغم أن هناك اختلاف فى التردد بين السعودية وبقية الدول ، إلا أن ربط السعودية بالشبكة يتم داخل محطة الفاضلى نفسها بواسطة Back to Back Inverter/Converter sets بدون أى مسافة بينهما.



شكل 1-1 :

وتوجد حاليا شبكة ربط للكهرباء في مصر والأردن وسوريا ولبنان وليبيا وفلسطين (تم الربط بين الشبكة الكهربائية الأردنية مع الشبكة الفلسطينية من خلال مغذي 33 kV من محطة تحويل السويمة بالأردن إلى أريحا بفلسطين ، وهناك ربط كهربى محدود بين غزة مع مصر) ، وكان يفترض ضم العراق وتركيا ولكن حالت الظروف السياسية دون ذلك ، والشكل 1-2 يمثل المخطط العام المفترض لمشروع الربط بين هذه الثمانية دول.



شكل 1-2

وتصلياً، ترتبط مصر كهربياً بالأردن منذ عام 1998، عن طريق خط هوائي جهد 500 kV يعبر إلى سيناء من السويس ويمتد حتى الحدود المصرية في طابا، وداخل محطة طابا يوجد محول بقدرة 750 ميجا، وجهد 400/500 kV، ثم تتصل في المرحلة الأخيرة بشبكة الأردن من خلال كابل بحري بطول 13.3 كم لعبور خليج العقبة على عمق 850 م إلى نقطة الربط بالشبكة الأردنية على جهد 400 kV، وهذا الكابل البحري مكون من أربعة فازات (ثلاثة في الخدمة والرابع احتياطي يستخدم عند خروج أى Phase لدواعى الصيانة أو بسبب عطل). وتتضمن منظومة الربط أيضاً محطات محولات بكل من السويس و طابا.

ملحوظة : الأردن مرتبط بسوريا، وسوريا مرتبطة بلبنان، وهذا يعنى أن جميع هذه الدول مرتبطة بمصر. كما تم تنفيذ الربط أيضاً بين مصر و ليبيا على جهد 220 KV، و تم التشغيل في 28 مايو 1998، و كان بين محطة مطروح في مصر و محطة طبرق في ليبيا.

### 3-1-1 أهم ميزات الربط الكهربى

الميزة الأساسية لهذا الربط يظهر بقوة عند حالات الـ Blackout (الإفلام التام) حيث يفيد هذا الربط في عملية الـ Restoration (استعادة الطاقة). وأحياناً تظهر أهميتها في تبادل الطاقة وقت الذروة، لكن هذه الميزة الأخيرة لا تظهر إلا إذا كانت الدول المشتركة متباعدة في خطوط الطول

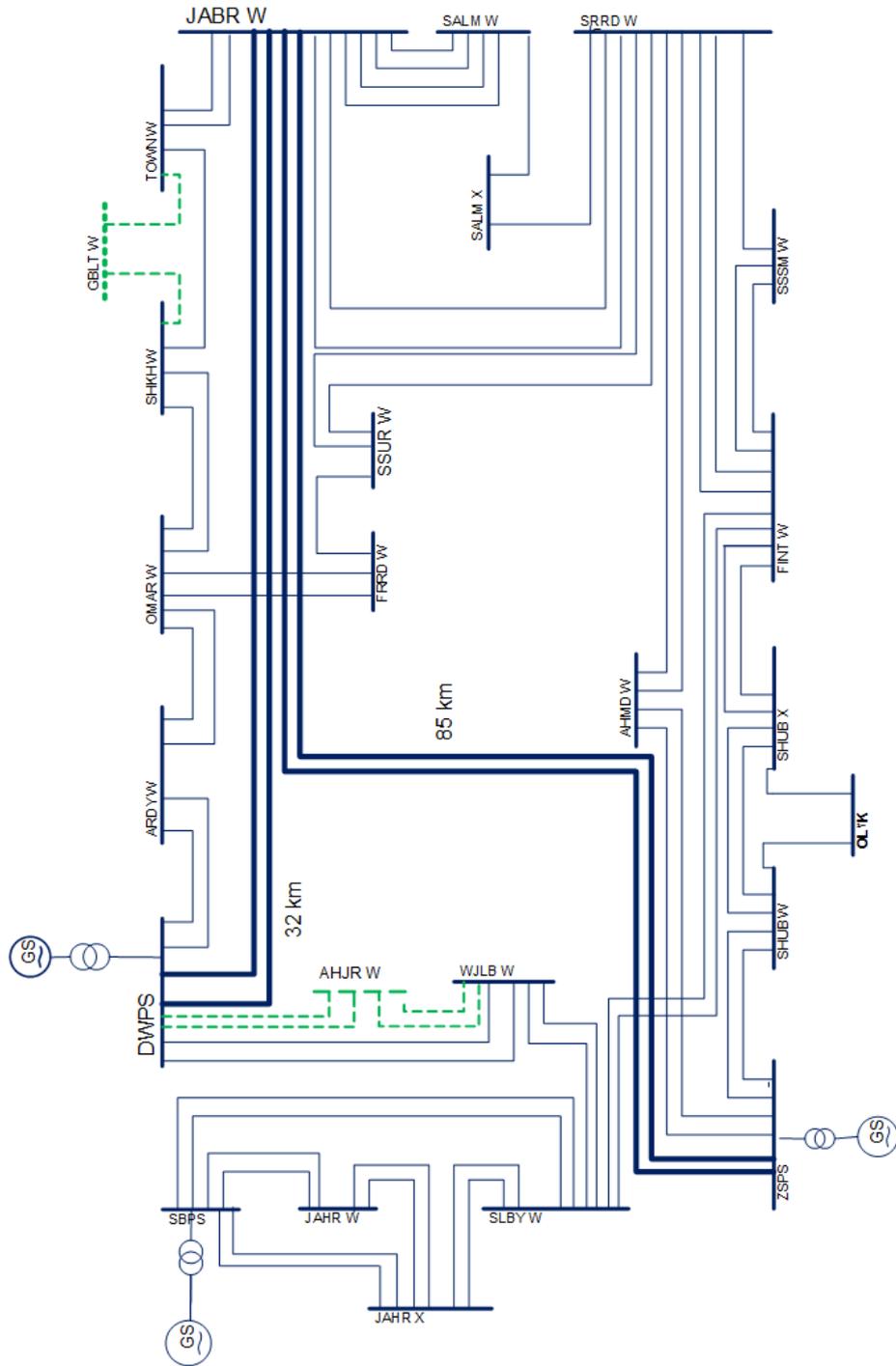
حتى لا تحدث الذروة فيها في وقت واحد فتصعب عملية التبادل (مالم تكن الدولة لديها إنتاج كبير يفوق استهلاكها الأقصى ، كما هو الحال مثلا في قطر التي لديها حوالي 3 جيجاوات فائض إنتاج وهي أكبر دولة عربية في فائض الإنتاج ) ، أما في الظروف العادية فحجم التبادل بين الدول محدود كما يظهر من الجدول 1-1 الذي يمثل الطاقة المباعة والواردة لمصر من ليبيا والأردن وسوريا ولبنان.

جدول 1-1:

خط الربط المصري الأردني			خط الربط المصري الليبي			البيان
400			220			جهد الربط (ك.ف)
لبنان	سوريا	الأردن	ليبيا			دول الربط
82	220	1277	100			الطاقة المباعة (صادرة) (ج.و.س)
-	2	26	64			الطاقة الواردة (ج.و.س)

#### 4-1-1 نماذج للشبكات الموحدة

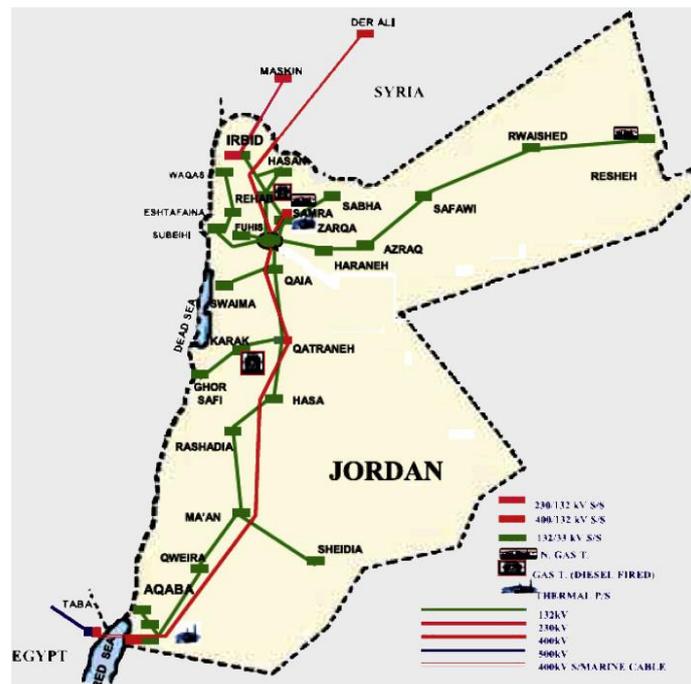
الأشكال التالية تمثل نماذج لشبكات بعض الدول (هذه الأشكال تحتاج لتحديث لأن معظم الدول تتطور فيها شبكات الكهرباء سنويا). فالشكل 1-3 يمثل جزءا من شبكة الـ 300kV بالكويت ، ويلي ذلك الشكل 1-4 الذي يمثل أجزاء من الشبكة السعودية والشكل 1-5 يمثل جزءا من الشبكة الأردنية ، ثم الشكل 1-6 وفيه الخطوط العامة لشبكة الولايات المتحدة الأمريكية ، وأخيرا الشكل 1-7 والذي يمثل الشبكة المصرية (جهد 500 وجهد 220 kV) التي ندرسها بعد ذلك بشيء من التفصيل.



شكل 3-1 :



شكل 4-1 :

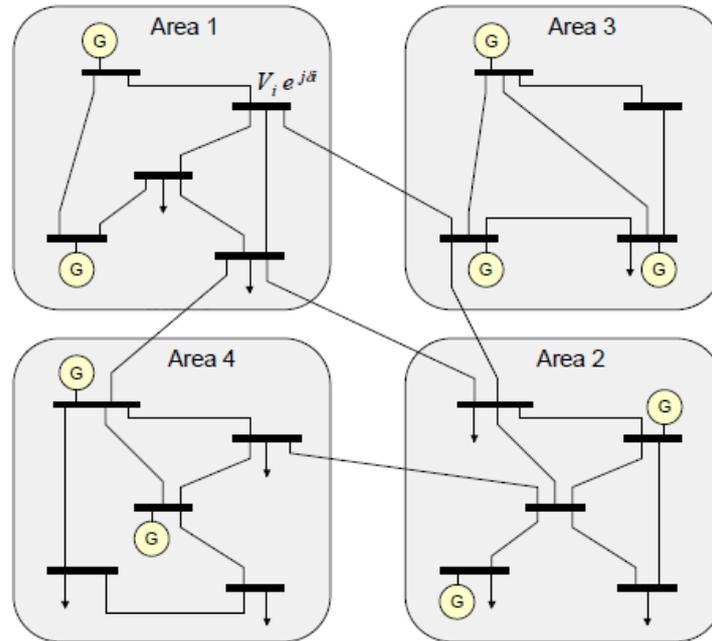
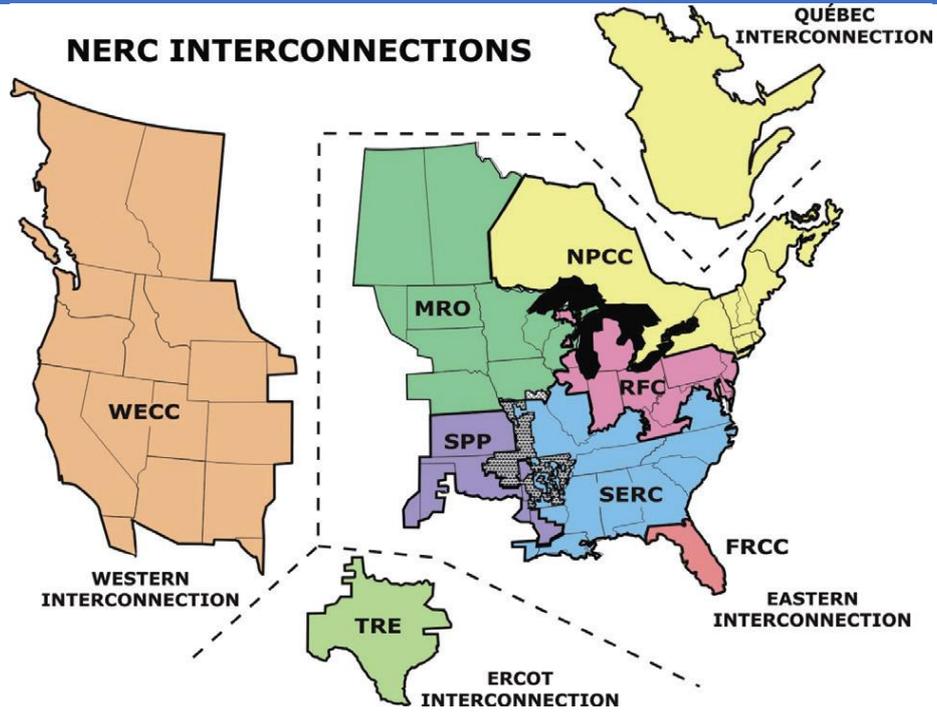


شكل 5-1 :

لاحظ في الشبكة السعودية أنها مقسمة إلى عدة شبكات موحدة مرتبطة معا ، فكلما تضخمت الشبكة صعب أن يقوم مركز واحد بمتابعتها كوحدة واحدة ، ولكن بالطبع يوجد ربط بين هذه الشبكات المنفصلة.

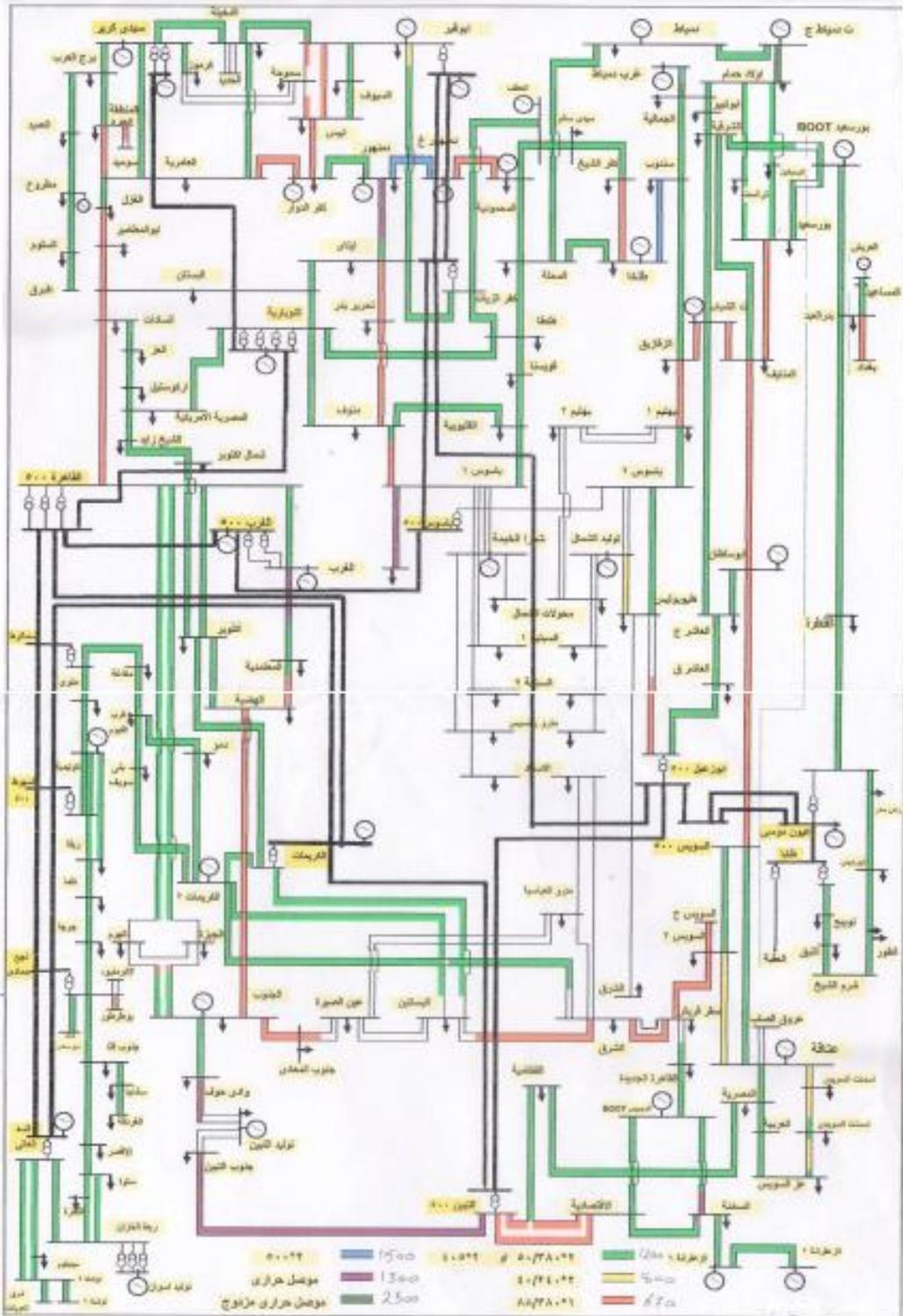
وهذه النقطة تظهر بوضوح أكثر في شبكة أمريكا الشمالية (شرق أمريكا و كندا) وهما معا يمثلان أكبر شبكة كهربية موحدة في العالم ، مع ملاحظة أنها في الواقع تتكون من أربع شبكات شبه معزولة عن بعضها ، وأقول ذلك لأنه بالفعل هناك خطوط ربط HVDC بين الشبكات الأربعة ، كما في الشكل 1-6.

ملحوظة : في الفصل السابع سنتعرف على السبب في استخدام الـ HVDC في الربط بين هذه الشبكات وليس باستخدام HVAC .

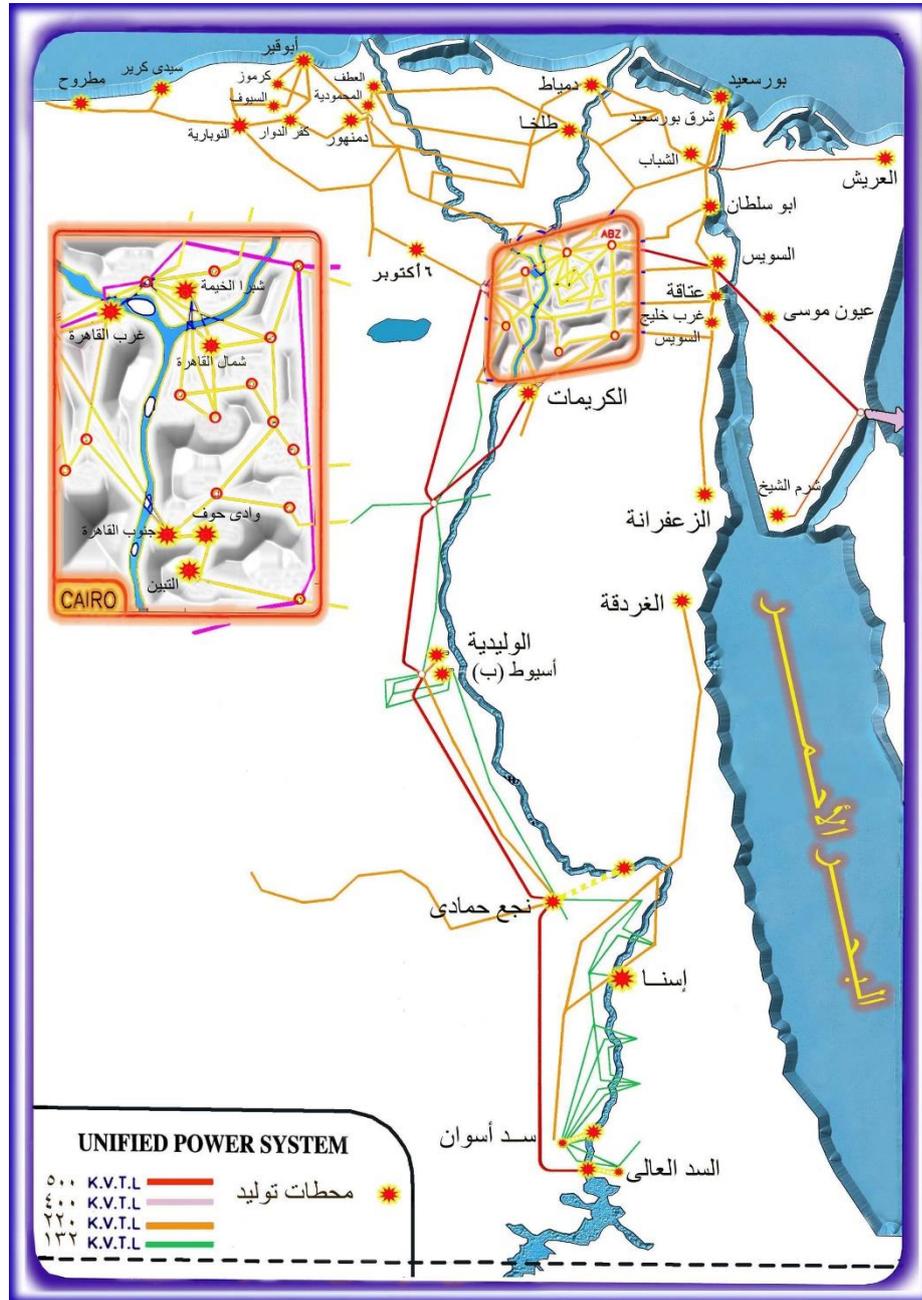


شكل 6-1 :

في الشكل 7-1 نجد الشبكة الموحدة في مصر ، والتي ندرسها هنا بشيء من التفصيل.



والشكل 8-1 يمثل أماكن المحطات جغرافيا في مصر ومسارات خطوط الجهد العالي.



شكل 8-1 :

لاحظ في الشبكة المصرية أن جميع محطات التوليد فيها (34 محطة في مصر) مرتبطة جميعا معا بخطوط نقل كما في الشكل 7-1، وتظهر بعض محطات التوليد متصلة بالخطوط جهد

500kV (الخط الأسود العريض في الشكل 1-7) ، والبعض الآخر بالخطوط جهد 220kV (خطان رفيعان).

ومعظم جهود التوليد في المحطات الكبرى في مصر تكون 15.75kV سواء كانت وحدات مائية مثل السد العالي ، أو بخارية مثل أبوقير وسيدى كرير ، وحتى المركبة مثل شمال الجيزة و النوبارية) ، أما جهد شبكة النقل الرئيسية في مصر فهو إما 220kV أو 500kV ، ومعظم محطات التوليد في مصر تتصل على شبكة الـ 220kV ، والنسبة الأقل تتصل على شبكة الـ 500 kV (عدد المحطات الموجودة على شبكة الـ 500 kV هو 9 محطات فقط في الشبكة المصرية .

#### ملحوظة:

لا يوجد سوى عدد قليل من محطات التوليد التي تتصل مباشرة بجهد 66 kV في مصر مثل وادى حوف - الشباب - السيوف - مرسى مطروح - الكريماش الشمسية ، وهناك عدد محدود جدا من محطات التوليد الصغيرة التي تتصل على شبكة الـ 11kV مثل كرموز - سمالوط - الشرق - البساتين ، واستخدامهم الأساسى لتحسين انتظام الجهد فى شبكة التوزيع.

### 5-1-1 ملاحظات على الشبكة الموحدة المصرية

- 1- معظم الطاقة الكهربائية المولدة في مصر تأتي من الشمال (أبو قير والنوبارية وسيدى كرير ودمياط والمحمودية إلخ) بينما تعتبر القاهرة ، وهى العاصمة ، بمثابة مصب لمعظم الطاقة المولدة.
- 2- أكثر المناطق تأمينا هى وسط البلد (داخل القاهرة) حيث كل محطة محولات Substation يأتيها التغذية من جهتين مختلفتين.
- 3- مناطق الصعيد الأكثر فقرا فى الطاقة ، فقبل افتتاح محطة الوليدية كانت المحطات المائية فى أقصى الجنوب تمثل المصدر الوحيد للتغذية فى هذه المناطق ، وكان هذا يمثل عيبا كبيرا فى الشبكة ، وقد بدأ علاج ذلك جزئيا ، لاسيما بعد افتتاح محطة أسبوط الجديدة.

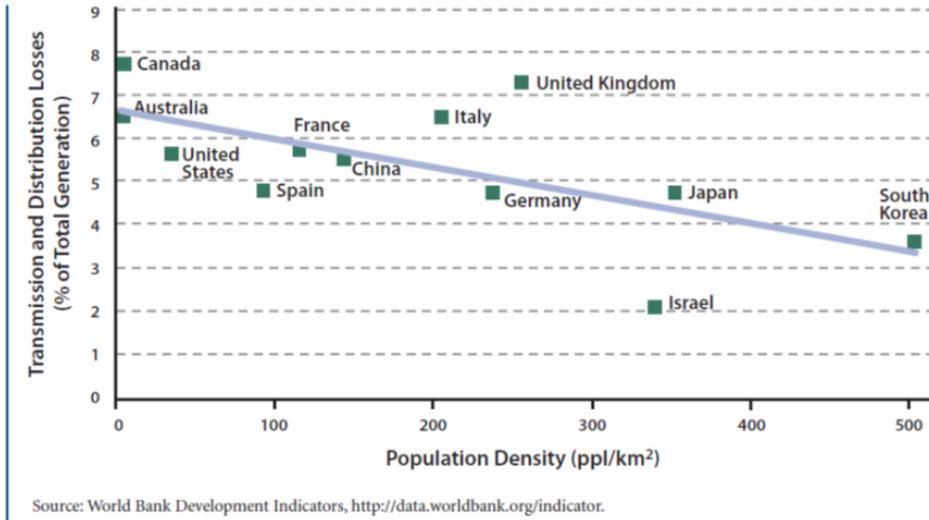
### 6-1-1 الفقد الـ Losses فى الشبكات

قد يسأل سائل : أليس من المتوقع أن يكون هناك فقد كبير فى القدرة الكهربائية نتيجة طول الخطوط وامتدادها لربط هذا العدد الكبير من محطات التوليد ؟ والإجابة نعم هناك LOSS فى الطاقة لكن هناك

أيضا إجراءات لتخفيض هذه الـ Losses ، منها بالطبع استخدام الجهود الفائقة في النقل ، فكلما زاد الجهد انخفض التيار ، وانخفضت الـ Losses .

وأقل دولة عربية في نسبة الفقد في الطاقة حسب إحصائيات البنك الدولي هي قطر ( 2% فقط ) ، بينما تبلغ نسبة الـ Losses في الطاقة في مصر حوالي 11% ، وهي نسبة مرتفعة جدا مقارنة بالمعدل في كثير من الدول الذي يدور حول 5% كما في الشكل 1-9.

ويرجع السبب في ارتفاع نسبة الـ Losses إلى عوامل فنية مثل الـ Power Losses لاسيما في خطوط ومحولات التوزيع ، وكذلك تأثير كفاءة المعدات وقدم المحطات ، ولكن النسبة الأكبر منه ترجع (لاسيما في حالة النسب المرتفعة جدا) إلى عوامل غير فنية مثل السرقات والعشوائيات وأخطاء العدادات وعدم التحصيل ، إلخ. وبسبب هذه العوامل غير الفنية تصل نسبة الـ Losses في دول أخرى إلى أكثر من 40% .



شكل 1-9 :

### 1-1-7 هل كل المولدات المتصلة بالشبكة تعمل طوال الوقت؟

بالطبع سيتوقف ذلك على حجم الحمل المتصل ، حيث يقوم مركز التحكم يوميا بعمل دراسة للحمل المتوقع ، وتحديد عدد وحدات التوليد وعدد المحطات الكافية لتغذية هذا الحمل المتوقع ، ووضع هذه المحطات في الخدمة حتى لو كانت تعمل No Load ، بحيث إذا زاد الحمل فجأة يجد الشبكة جاهزة لتغذيته لحظيا ، وهذا ما يعرف بالـ Hot Spinning Reserve ، وسمى

كذلك لأنه يمثل قدرة توليدية in operation لكنها ليست in service ، أى ليست فى الخدمة رغم أنها تدور ، علما بأن اختيار عدد ونوعية المحطات يخضع لمتغيرات عديدة أهمها :

1- الحمل المتوقع هذا اليوم ، وهذا يتوقف على تسجيلات الأحمال فى اليوم السابق وقيمة الحمل المقابل فى نفس هذا اليوم من الأسبوع الماضى (لتشابه الأنشطة) وكذلك بيانات الأرصاد التى تصل لمركز التحكم يوميا.

2- تكلفة التشغيل ، فالمحطات التى تنتج kWh رخيصة تكون دائما مخصصة لتغذية ما يعرف بالـ Base Load وهو الحد الأدنى من الأحمال المتصلة بصفة دائمة بالشبكة على مدار الـ 24 ساعة يوميا وطوال السنة مثل المحطات الحرارية والنووية. تستخدم أيضا فى تغذية الـ Base Load المحطات التى تحتاج لوقت طويل حتى تبدأ فى إنتاج الطاقة .

3- سرعة الاستجابة ، فالمحطات الغازية والمائية تعرف بسرعة دخولها فى الخدمة (عدة دقائق) فهذه دائما تخصص لتغذية أحمال الـ Peak Load وهى الأحمال التى تدخل للخدمة وقت الذروة لعدة ساعات وربما لعدة دقائق فقط. مع ملاحظة أن الوحدات المائية هى الأسرع على الإطلاق فى الدخول للخدمة ، فهى تحتاج فقط إلى 3 أو 4 دقائق ، أما الغازية فتحتاج حوالى 15 إلى 30 دقيقة حتى تعطى قدرتها كاملة .

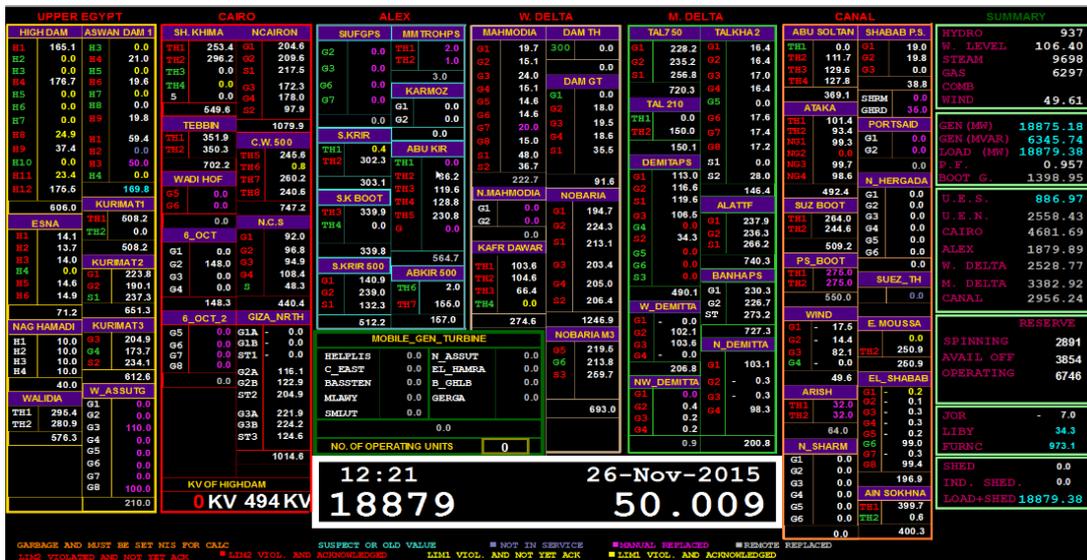
وعلى سبيل المثال ، فعند حدوث أى تغير فى التردد نتيجة دخول أحمال مفاجئة (مثل الأحمال الصناعية) فإن المركز القومى للتحكم فى الطاقة National Energy Control Center (NECC) يبدأ بتشغيل المحطات المائية (السد العالى) أولا ، إن كان ذلك متاحا طبقا للترتيبات مع وزارة الرى ، وإلا فسيلجأ للمحطات الغازية لسرعة ضبط التردد.

والعاملين السابقين أساسيين فى حساب ما يعرف بالـ Unit Commitment أى تحديد الوحدات المناسبة لحمل ما ، وهى عملية رياضية معقدة نسبيا لذا تحتاج إلى ما يعرف بالـ Optimization Techniques من أجل تنظيم جدول تحميل الوحدات المختلفة بالشبكة. ولتحديد الحمل الاقتصادى على المولد نلجأ إلى ما يعرف بحسابات الـ Economic Load Dispatch .

4- تقليل الـ Losses فى الشبكات ، فاختيار المحطات القريبة من الأحمال سيوفر فى كمية الـ Power Loss

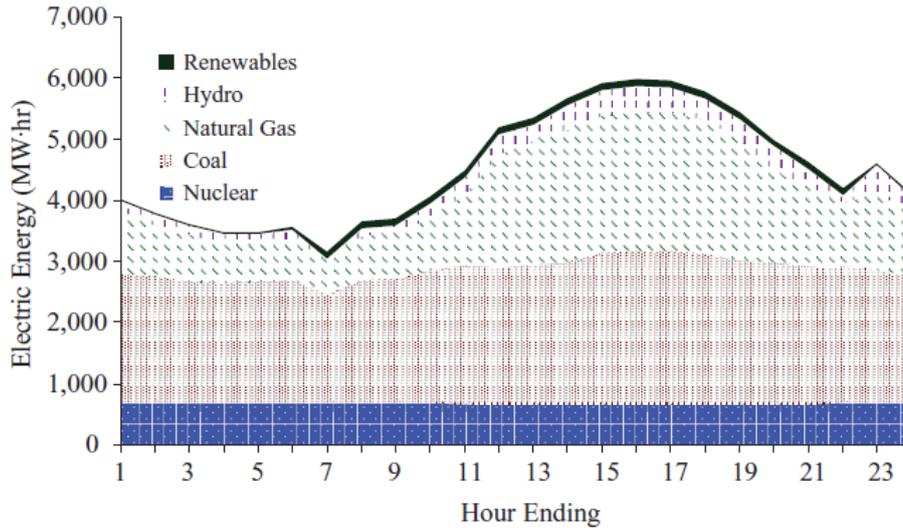
5- نوعية الوقود ، أحيانا تكون مضطرا لتشغيل محطة ما لا تحقق كل المكاسب السابقة لأن البديل لها غير متوفر بسبب نقص الوقود المتاح مثلا ، كأن تلجأ لتشغيل محطات بالمازوت بدلا من الغاز لعدم توافر الغاز الطبيعي أو نقص إمداداته.

والشكل 1-10 يمثل نمودجا لنسبة مشاركة كل محطة كهربية في القدرة الكهربائية الإجمالية (القدرة الفعالة وغير الفعالة ) في يوم ( 26 نوفمبر 2015 ) طبقا لمركز التحكم القومي في مصر لنقل الكهرباء .



شكل 1-10 :

والشكل 1-11 يعطى نمودجا لما يعرف بالـ Daily Load Curve أى منحنى التحميل اليومي . والشكل خاص بمنحنى الحمل في أمريكا ، وفيه يظهر ترتيب دخول نوعيات محطات التوليد في الخدمة حسب تزايد الحمل في يوم من أيام الصيف في أمريكا. لاحظ أن المحطات التي تخدم الـ Peak load أهمها المائية ومحطات الطاقة المتجددة.



شكل 1-11:

لاحظ في الشكل السابق أيضا حجم التنوع في مصادر الطاقة هناك: نووى وغازى ومتجدد ومائى. والشكل 1-12 يؤكد هذه الملحوظة .

وأهمية هذه الملحوظة تظهر من معرفة أن نقطة الضعف الأساسية في معظم الشبكات العربية ومنها مصر ، هو أنها تعتمد تقريبا على مصدر واحد للطاقة الكهربائية (المحطات الحرارية التى تعمل بالغاز أو المازوت) ، وبالتالي حين نفقد هذا المصدر الوحيد لأي سبب تحدث أزمة كما حدثت في مصر صيف 2013 و 2014 . بينما احتمالية حدوث ذلك فى شبكة مثل أمريكا مستبعد تماما كما هو واضح من المخطط السابق.

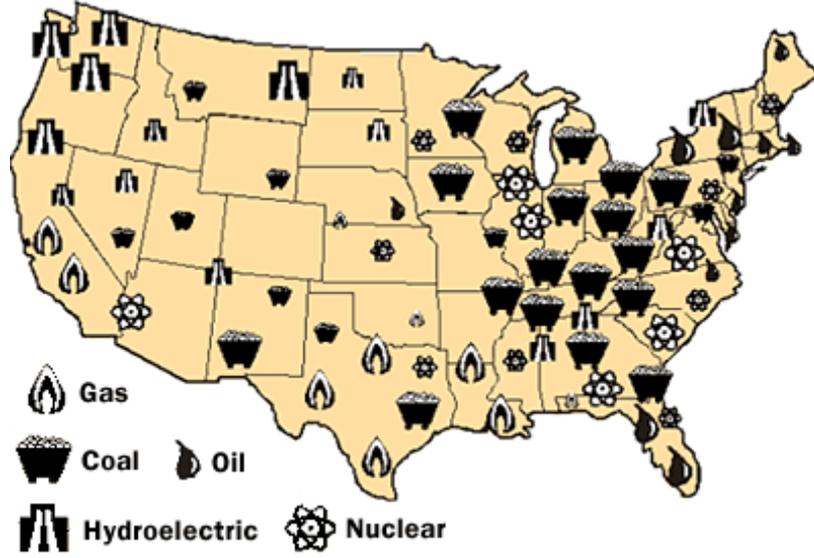


Photo courtesy U.S. Department of Energy

شكل 1-12 :

### 1-1-8 ما المقصود بالـ Spinning Reserve ؟

المقصود هو أنه لو كان لدينا مولد مثلاً بقدرة 100 ميغاوات مثلاً ويغذى فقط حمل قدره 40 ميغاوات ، و كان بالشبكة محطة توليد أخرى صغيرة بقدرة 30 ميغاوات وتعمل متزامنة مع المحطة الأولى وتعرضت لعطل فخرجت من الخدمة فإننا نقول أن المولد الأول لديه فائض قدرة Hot Spinning Reserve يقدر ب 40-50 ميغاوات ومن ثم يستطيع أن يعوض بسرعة خروج هذه المحطة الصغيرة (لكن بالطبع سيتوقف ذلك على الـ Inertia الخاصة به كعنصر ثانى بالإضافة للقدرة المتوفرة).

لاحظ أنه يسمى Hot Spinning reserve لأنه يمثل قدرة توليدية in operation ، لكنها ليست in service ، أى ليست فى الخدمة. وبالطبع هذا يختلف عن Cold Spinning Reserve ، والذي يقصد به المحطات المفصولة لكن يمكن استدعائها للخدمة.

مزيد من التفصيل حول هذا الموضوع تجده بالباب السادس من هذا الكتاب.

بالطبع لو كان المولد محملاً بقدرة 90 ميغاوات مثلاً فلا نستطيع أن نقول أن لدينا أى فائض Reserve ، ونكون أمام مشكلة استقرار حقيقية قد يكون حلها هو الـ Load Shedding .

## 2-1 كيف يتم التحكم فى العلاقة بين الأحمال والتوليد؟

بالرجوع إلى الشكل 1-10 و المأخوذ من المركز القومى للتحكم بمصر يتبين أن كل محطة تشارك بنسبة معينة من الحمل الكلى على الشبكة ، وسنحاول هنا أن نجيب على سؤالين مهمين:

- السؤال الأول : كيف يعرف المولد أن الحمل المتصل عليه قد زاد أو نقص؟
- والسؤال الثانى : كيف يمكنه أن يغير ظروف تشغيله بعد أن عرف أن الحمل قد زاد أو نقص؟

نعلم أن العلاقة بين القدرة المولدة من هذا المولد والحمل Load المتصل به تحكمها العلاقة التالية:

$$P \text{ (mechanical)} = T \text{ (mechanical)} \times \omega = P \text{ (Electrical)}$$

ومن هذه المعادلة يمكن فهم ما يحدث عند تغير الأحمال (وسنأخذ المحطات البخارية كمثال هنا) . ففى الوضع الطبيعى يكون العزم الكهربي والميكانيكى متساويين عند سرعة الدوران الثابتة  $\omega$  ، ثم عند زيادة الحمل فإن Electric Torque يصبح أكبر من Mechanical Torque ، وينشأ عن ذلك انخفاض فى السرعة يتم اكتشافه بسرعة ويعالج بمرور كمية أكبر من البخار إلى التربينه ، ومن ثم يزداد Mechanical Torque حتى يتساوى مع Electric torque فى قيمته الجديدة ويعود المولد إلى الاتزان مرة أخرى.

ويجب أن تظل السرعة ثابتة لأنها مرتبطة بعلاقة وثيقة بـ Frequency حسب المعادلة:

$$f = \frac{p \times n}{120}$$

حيث  $f$  هى التردد و  $p$  عدد الأقطاب و  $n$  هى السرعة.

### 1-2-1 التردد وعلاقته بالتغير فى الأحمال

يعتبر التردد هو المؤشر الحقيقى على حالة التوازن بين الـ Load Demand و بين الـ Supplied Power.

وكما ذكرنا ، فإن ثبات التردد يدل على وجود اتزان بينهما واستقرار في الشبكة ، غير أن التغير البسيط في التردد شيء طبيعي ومقبول إذا كان في مدى صغير ، فإذا زاد عن ذلك المدى الصغير فيمكن التحكم فيه أوتوماتيكيا بواسطة الـ Governor ، فإذا زاد مدى التغير أكثر من ذلك فربما نصل إلى مرحلة فصل بعض الأحمال أو ما يعرف بـ Load Shedding ، فإذا زاد مدى التغير جدا فربما نصل في النهاية إلى الفصل التام للمولدات نفسها وهو ما يؤدي إلى حدوث الإظلام التام .Blackout.

مع ملاحظة أن الحد المسموح به لتغير التردد وكذلك جدول نسب فصل الأحمال عند كل تغير في التردد يختلف من بلد لآخر . والجدول 1-2 يمثل حدود ونسب الفصل في مصر .

جدول 1-2 :

التردد Hz	نسبة فصل الحمل
49.2	%2
49.1	%3
49	%4
48.9	%7
48.8	%15
48.7	%20
48.6	%22

### 1-2-2 كيف يحدث الـ Blackout ؟

من الأخطار التي تهدد الشبكة الكهربائية حدوث ما يسمى بالإظلام التام أو الـ Blackout ، وتمثل حالة فشل الشبكة في الحفاظ على ثبات الجهد والتردد مما يؤدي إلى خروج كل وحدات التوليد من الخدمة ومن ثم انقطاع الكهرباء عن كل الأحمال .

والشبكة الكهربائية كما نعلم مكونة من محطات توليد متصلة ببعضها البعض لتغذي الأحمال الكهربائية ، لكن الشيء الغريب فيها أنه لا يوجد عنصر واحد من عناصر الشبكة الكهربائية يمكنه أن يخزن الطاقة ، وبالتالي ففترة تخزين الكهرباء هي صفر ، بمعنى أن الطاقة المولدة مستنفذة

دائماً لحظياً ، وسرعة مرور الكهرباء من المصدر للحمل هي سرعة الضوء ، أى أن كل شيء يتم لحظياً .

ولابد من استمرار التوازن بين الطلب والتوليد : فهناك طلب من ملايين المستهلكين الذين لديهم أحمال تحتاج إلى قدرة فعالة (MW) P ، وأحمال أخرى تحتاج إلى قدرة غير فعالة (MVAR) Q و في نفس اللحظة مطلوب من محطات التوليد توفير هذه الطلبات لحظياً . إذن فهو نظام شديد التعقيد ، وبمجرد أن يختل هذا التوازن تسقط المنظومة كلها ويحدث الإظلام التام .

ولنفترض على سبيل المثال أنه في وقت من أوقات الذروة ، حيث الشبكة تعمل على أقصى قدرة توليد ممكنة ، ثم لسبب ما حدث عطل في محطة من محطات التوليد فتوقفت وخرجت من الخدمة فجائياً . فعندما تخرج هذه المحطة يجب على المحطات الأخرى أن تعمل وبسرعة على توفير الطاقة اللازمة لتعويض النقص الناشئ عن خروج تلك المحطة ، ولكننا في وقت الذروة كما ذكرنا وكل الوحدات تعمل بأقصى قدرة ولا تستطيع أن تتحمل أي زيادة في الأحمال ، وعندما يبدأ حدوث زيادة في تحميل المولدات (over load) تضطر نظم حماية هذه الوحدات إلى إخراجها من الشبكة حتى لا يحترق المولد فيزداد الوضع تعقيداً ، وقد تتوالى عمليات الخروج حتى نصل إلى الـ Blackout ، وهذا أحد سيناريوهات حدوث الـ Blackout .

### 1-2-3 أشهر أسباب حدوث الـ Blackout

ومن أشهر أسباب حدوث الـ Blackout أن تخرج محطة من محطات الربط الرئيسية في الشبكة ، كأن تخرج محطة من محطات ربط شبكتي الـ 220/500 والتي تعمل على ربط الشبكتين الكبيرتين في مصر (كمحطة باسوس أو سمالوط مثلاً في الشكل 1-7) ، وهذه المحطات تساعد في تبادل الطاقة بين الشبكتين الكبيرتين حسب الحاجة ، فخرج واحدة من هذه المحطات الرئيسية تعنى حدوث نوع من الانفصال بين الشبكتين ، بل إن خروج محطة مثل سمالوط في شكل 1-7 يعنى فصل الوجه البحرى عن الوجه القبلى في مصر ، ومن ثم يمكن أن يتغير التردد في أحدهما أو كلاهما بالزيادة أو النقصان حسب نسبة الأحمال على كل شبكة ، فإذا وصلت قيمة التغير في التردد لقيمة خطيرة فسيتم فصل المولدات بهذه الشبكة (تفسير ذلك لاحقاً في هذا الفصل) ، مما يعنى إظلام جزئي قد يتحول إلى كلى .

وقد نصل لنفس النتيجة السابقة إذا كانت المشكلة في خروج خط أو أكثر من خطوط الربط الرئيسية بين الشبكتين ، فعندها يمكن أن تحدث Power Swing عالية وتخرج خطوط أخرى بالوقاية المسافية أو تخرج مولدات بواسطة الـ Out of Step protection وتتعدد المشكلة .

وأشهر حوادث الـ Blackout ترتبط دائماً بفترات الصيانة أو عمل مناورات خاطئة ، ومفهوم المناورة أن يتم فصل خط معين وتوزيع أحماله على خطوط أخرى بناء على دراسة مسبقة تؤكد تحمل هذه الخطوط للحمل الزائد المتوقع عليها ، وتؤكد أيضاً تحمل وحدات التوليد في بعض المحطات للتوزيع الجديد للحمل ، ولكن أحيانا ونتيجة أخطاء قاتلة في حساب الـ Load Flow يتم السماح بعمل المناورات ثم نتفاجأ بأن الخطوط أو وحدات التوليد لا تتحمل الحمل الجديد وتبدأ في الخروج بصورة متتابعة .

### 1-2-4 خطوات إعادة تشغيل الشبكة Restoration

أهم ملحوظة هنا أن تعرف أنك لكي تولد كهرباء فإنك تحتاج لكهرباء ، بمعنى أنه بعد حدوث الـ Blackout فإنه ليس بالسهولة أن تبدأ مرة أخرى في تشغيل محطات التوليد ، لأن أي محطة لكي تبدأ في إنتاج الكهرباء فإنها تحتاج لقدرة كهربية قد تصل لعدة ميجاوات لمجرد بدء تشغيل مساعدات المحطة (الإضاءة وأنظمة التبريد والمحركات ، Motors ، والمضخات Pumps ، والضواغط Compressor ، وأجهزة التحكم .... الخ). وحيث أننا في حالة انقطاع تام للكهرباء فليس أمامك سوى طريقتين لاستعادة الشبكة:

- أ- إما بتشغيل المحطات التي بها وحدات توليد ديزل خاصة بفترة الـ black start ، فهذه الوحدات تبدأ بالتوليد ذاتيا ، فتساعد في بدء تشغيل المحطة ، ومن ثم يظهر إنتاج هذه المحطة على الشبكة ، فتستخدمه المحطات الأخرى في تغذية أحمال المساعدات Auxiliaries بها.
- ب- أو يمكن في هذه المرحلة الاستفادة من الربط الدولي لتمرير كمية من الطاقة إلى الشبكة من إحدى الدول المجاورة تكفي لبدء تشغيل مساعدات محطات التوليد لكي تستطيع المحطات أن تبدأ .

ويتم استعادة الشبكة بعد حدوث الإلزام التام باتباع الخطوات التالية :

- 1- التوسع في إدخال وحدات التوليد الغازية حيث أن مساعداتها لا تحتاج لقدرة عالية لبدء التشغيل.
- 2- تشغيل المحطات البخارية الضخمة بواسطة القدرة المولدة من وحدات التشغيل الغازية في الخطوة السابقة.

3- إطلاق الجهد على شبكة الـ 500 kv وشبكة الـ 220 kv دون توصيل ، أى أحمال in operation ، وهذا معناه تشغيل المولدات وتوصيل المحولات ولكن على وضع no load .

4- البدء فى توصيل الأحمال تدريجياً لضمان ثبات الجهد والتردد.

5- التوسع فى إدخال محطات التوليد تدريجياً مع تقسيم الشبكة إلى جزر منفصلة ، بمعنى تقسيم الأحمال على المحطات الأقرب لها دون اتصال بين هذه الجزر ، ثم تجهيز الجزر المنفصلة للربط و إعادة تكوين الشبكة مع مراعاة شروط التوافق Synchronization كما سنرى لاحقاً حين الحديث عن ربط المولدات معا على التوازي. (قد تستغرق هذه العملية عدة ساعات وقد تصل إلى يوم كامل أو أكثر لأنه فى بعض الأحيان يكون من الصعوبة بمكان تحقيق شروط التوافق Synchronization فى هذه الظروف ، ويكون التأخر أحيانا مرجعه إلى وجود مشكلة أخرى فى شركات الاتصالات التى تأثرت هى الأخرى بانقطاع الكهرباء) ومن ثم يصعب التواصل بين المحطات وبين مركز التحكم.

## 3-1 استخدام الـ GOVERNOR فى التحكم فى التردد

هو مكون من مكونات أى نظام كهربى متصل بالشبكة الموحدة ، ودوره أن يحافظ على تردد المولد متساوياً مع تردد الشبكة الموحدة . و الـ governor ليس له شكل ثابت ولكنه دائماً يظهر فى المحطة مع الجزء المسئول عن إدارة التربينه ، وفى المحطة البخارية يكون الـ governor عبارة عن صمام Valve للتحكم فى كمية البخار ، و فى المحطة الغازية يكون الـ governor عبارة عن بوابات للتحكم فى غرف الاحتراق ، أما فى المحطات الهيدروليكية فيمثل الـ Governor ببوابات التحكم فى المياه و لكن يتطلب من الـ Governor فى هذه المحطات قوة كبيرة جداً للتحكم فى هذه البوابات.

### 1-3-1 طريقة عمل الـ Governor فى المحطات البخارية:

يقوم الـ governor بدور المتحكم فى السرعة عن طريق المقارنة بين إشارتين : الإشارة الأولى تتناسب قوتها مع سرعة المولد ، و الإشارة الثانية تتناسب مع تردد الشبكة الموحدة ، فإذا كان تردد المولد متساوي تماماً مع تردد الشبكة فإن الـ governor لا يتدخل ، و لكن فى حالة زيادة تردد المولد عن تردد الشبكة فإن الـ governor يقوم بتضييق فتحة صمامات البخار Governor Valves لترجع السرعة للسرعة التزامنية و بالتالى يتساوى التردد مع تردد الشبكة.

وفي حالة نقصان تردد المولد عن تردد الشبكة فإن الـ governor يقوم بتوسيع فتحات صمامات البخار لترجع السرعة لطبيعتها و تتساوى مع تردد الشبكة.

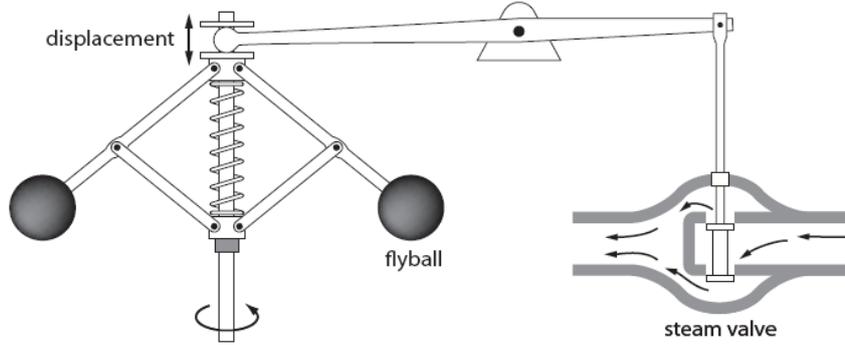
### 1-3-2 أنواع الـ Governor :

1. النوع الميكانيكى و هو أقدم الأنواع و لم يعد يستخدم بكثرة . فعند حدوث over load تنقل السرعة فتقل قوة الطرد المركزي بين الكرتين Fly ball فى الشكل 1-13 ، وتقل المسافة بينهما مما يؤدي إلى زيادة فتحة الـ steam valve فتزداد كمية البخار وتعود السرعة والتردد إلى القيم الأصلية.

وعندما يقل الحمل تزداد السرعة وتزداد قوة الطرد المركزية بين الكرتين Fly ball فتزيد المسافة بينهما مما يؤدي إلى ضيق فتحة الصمام البخارى فتقل كمية البخار وتعود السرعة والتردد إلى القيم الأصلية.

2. النوع الكهربى : ويكون التحكم هنا عن طريق استخدام سرفو-موتور و ذلك لاستجابته العالية و هو المستخدم بكثرة الآن .

3. النوع الإلكتروني و يتميز بالدقة العالية و لكنه غير عملى نظرا لأنه يوجد صعود و هبوط للحمل بصورة مستمرة و قد يسبب تلف للأجزاء الميكانيكية نظرا لعدم التكيف مع سرعة الأجزاء الإلكترونية.



شكل 1-13:

### 1-3-3 لماذا الخوف من تغير التردد؟

ارتفاع قيمة التردد تعنى زيادة سرعة دوران المولد ، مما قد يؤدي إلى تحطم المولد. أما انخفاض التردد فيعنى انخفاض الجهد (تذكر أن  $E = k f \varphi$ ) ، وانخفاض الجهد يؤثر بشدة على

مساعداات المحطة Auxiliaries (مثل المحركات وخلافه) والتي يمكن أن تحترق ( لأنها تعتبر أجهزة ثابتة القدرة Constant Power Devices وهذا يعنى أن انخفاض الجهد عليها يؤدي حتما لارتفاع التيار بها) ، علما بأن انخفاض الجهد قد يتسبب أيضا في احتراق الـ Rotor ، لأنه عند انخفاض الجهد سيتدخل الـ AVR ، Automatic Voltage Regulator ليرفع قيمة الجهد من خلال زيادة قيمة تيار الـ Rotor لينتج فيضا بكمية أكبر ، وهذا يمكن أن يتسبب في احتراق ملفات الـ Rotor . ولاحقا سيتم شرح تفصيل هذه النقطة.

### 1-3-4 لماذا نستخدم نظام الـ 50 أو 60 هيرتز؟

هناك بعض الأسباب التي أدت إلى استخدام هذه القيم تحديدا ، وعدم استخدام ترددات أعلى في أنظمة القوى الكهربائية. ويمكن فهم ذلك بالنظر للمعادلة

$$F = \frac{n_s * p}{120}$$

فإذا أردنا رفع التردد إلى 200 هيرتز مثلا فلدينا طريقان لتحقيق ذلك:

- الطريق الأول هو زيادة السرعة  $n_s$  التي يدور بها الـ shaft ، وهذا يعنى أننا سنحتاج لكمية طاقة أكبر لزيادة السرعة لنفس كمية الكهرباء المتولدة ، كذلك سنحتاج لتصميم أقوى للـ shaft لتحمل القوة الناتجة من السرعة العالية.
- الطريق الثانى هو زيادة عدد الأقطاب  $p$  فى المولد ، وبزيادته يزيد حجم المولد بشكل كبير.

لاحظ أن كلا الطريقين مسدودان ، ناهيك عن تأثير كفاءة النقل باستخدام ترددات عالية حيث سيؤدى ذلك إلى ازدياد الـ Losses وانخفاض الكفاءة وانخفاض الجهد وذلك لأن قيم المعاوقات فى خطوط النقل ستزيد (تذكر أنها تتناسب طرديا مع التردد) وبالتالي سيزيد الهبوط فى الجهد الذى يحسب من المعادلة :

$$voltage\ drop = I * Z, \quad X \propto F$$

كذلك سيؤثر على ازدياد تأثير ظاهرتى الـ skin effect , corona وهما مشروحتان تفصيلا لاحقا فى الفصل التاسع.

لذلك استقرت معظم الدول على استخدام 50 أو 60 هرتز . فهناك دول كالولايات المتحدة تعمل على 60 هرتز ، أما أوروبا و دول أفريقيا ، ومنها مصر فتستخدم 50 هرتز ، و يوجد بعض الدول كاليابان والسعودية بها النظامان.

## 1-4 ربط المولدات على التوازي بالشبكة

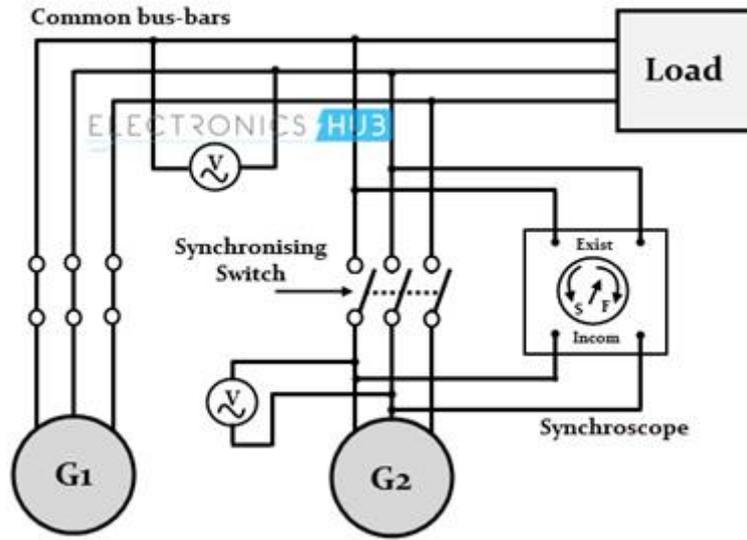
قبل بناء الشبكة الموحدة كانت دائما فكرة توصيل المولدات على التوازي تجذب الاهتمام ، فنحن نحتاج في كثير من الأحيان إلى تشغيل مولدين أو أكثر على التوازي للحصول على عدة ميزات منها:

- 1- أن وجود العديد من المولدات يقلل كثيرا من احتمالية حدوث انقطاع للتيار الكهربى عن الأحمال ، بمعنى تحسين الاعتمادية Reliability لمنظومة الكهرباء ، فعند تعطل أو حدوث خروج فجائى لأي مولد لا يتسبب فى فقدان التغذية الكهربائية للأحمال.
  - 2- أن تشغيل عدة وحدات على التوازي يسمح بإجراء الصيانة الدورية دون حدوث ارتباك في تغذية الأحمال المطلوبة ، كما يساهم فى التقليل من تكاليف الصيانة وقطع الغيار.
  - 3- سهولة تعديل القدرة المولدة تبعاً لزيادة الأحمال وحتى الوصول إلى الحمل الأقصى ، بمعنى أنه في بعض الأوقات تكون الأحمال ليست بحاجة إلى القدرة المركبة للتوليد بالكامل وعليه يمكن فصل بعض المولدات طالما أن بقية المولدات تلبى الحمل في هذه اللحظة وهذا الأسلوب يهدف لرفع الكفاءة.
  - 4- التقليل من استهلاك الوقود (يلاحظ أن كمية الوقود المستهلك لوحدة توليد قدرة 400 كيلو وات مثلا تعمل عند 80% من السعة الكاملة ( أي تغذي حمل قدرة 320 كيلو وات) ، هذه الكمية أقل من استهلاك الوقود فى وحدة توليد قدرتها 800 كيلو وات وتغذي نفس الحمل (320 كيلو وات) والذي يمثل في هذه الحالة 40% فقط من سعتها الكاملة.
  - 5- لا يشترط أن تكون وحدات التوليد المتصلة على التوازي لها نفس السعة ، مما يحقق استخدام الماكينات بأقصى كفاءة لها مع تغير الأحمال على مدار الوقت .
- وهو نفس المنطق ونفس الميزات حين الحديث عن ربط محطة توليد بشبكة الكهرباء موحدة.

### 1-4-1 ما المقصود بعملية التزامن للمولدات ؟

وفي كلتا الحالتين سواء عند ربط مولدات معا على التوازي فى منطقة معزولة عن الشبكة أو ربط المولدات معا داخل الشبكة الموحدة فلا بد من تحقق شروط معينة لتنفيذ عملية الربط على التوازي ، وذلك من أجل ضمان أن يساهم المولد المضاف بجزء من القدرة الكلية المطلوبة لتغذية الأحمال ، وتسمى عملية الربط هنا بعملية التزامن ويطلق عليها فى مصر عملية "التسنينك" وهو اشتقاق

مصرى من كلمة Synchronization ، وتعرف علميا بأنها عملية ربط كهربية بين المولدات و جعلها متطابقة فى الجهد و التردد و زاوية الطور Phase Angle و ترتيب الأوجه Phase Sequence . والجهاز المستخدم لإتمام هذه العملية يسمى Synchro scope ، فعلى سبيل المثال عند ربط المولد G2 فى الشكل 1-14 على التوازي مع المولد G1، فإن هذا الجهاز يقوم بالتأكد من تحقق شروط التزامن التى سنتحدث عنها فى الجزء التالى قبل أن يغلق مفتاح ربط .



شكل 1-14

### 2-4-1-1 شروط تحقق تزامن المولدات:

الشروط التالية ضرورية و لازمة لتحقيق التزامن بين المولدات المتصلة معا على التوازي:

#### 1- تساوى فرق الجهد الخارج من المولدات

من المعروف أن الجهد الخارج من المولد يساوى:

$$E_o = \frac{N_{sta} \Phi_{rot} \omega}{\sqrt{2}}$$

وهذا يعنى أن العوامل التى تؤثر فى قيمة جهد المولد هى:

1. سرعة دوران العضو الدوار بالمولد  $\omega$
2. عدد لفات العضو الثابت Stator ،  $N_{sta}$

3. شدة المجال المغناطيسي الناتج من الـ Rotor ،  $\phi_{rot}$ 

و بما أن سرعة العضو الدوار rotor يجب أن تكون ثابتة للحفاظ على ثبات التردد ، و بما أن عدد اللفات ثابتة حسب التصميم الأساسي ، ومن ثم لم يتبق لضبط قيمة الجهد الخارج من المولد عند ظروف التحميل المختلفة سوى التحكم في تيار المجال المغناطيسي المار بالـ Exciter المركب على الـ Rotor ، ومن ثم التحكم في شدة المجال و يتم ذلك بواسطة جهاز AVR (Automatic Voltage Regulator) و الذي يزيد من تيار Exciter عند نقصان جهد المولد والعكس بالعكس ، و ذلك للحفاظ على الجهد الخارج ثابت ( مثلا 20 kV ). راجع تفصيل ذلك في الشكل 3-7 بالفصل الثالث.

2- تساوى تردد الجهد من جميع المولدات

و من المعروف أن التردد Frequency الخاص بالجهد الناتج من المولد تتحدد قيمته حسب المعادلة التالية :

$$f = \frac{p \times n}{120}$$

هي السرعة. وهذا يعنى أنه يعتمد على عاملين n عدد الأقطاب و p هي التردد وحيث أساسيين هما:

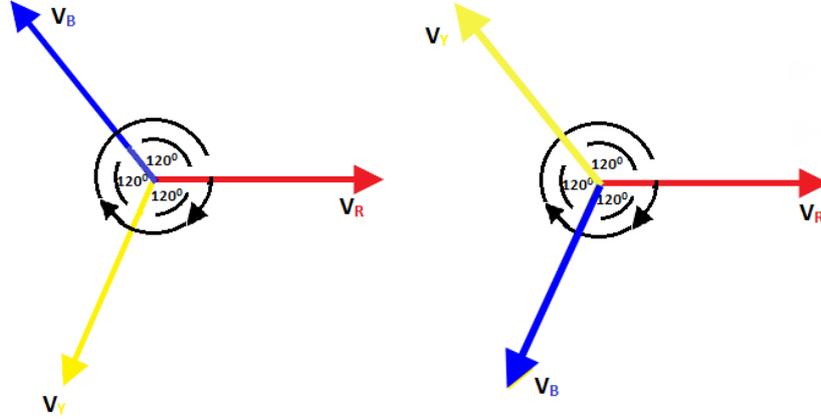
- عدد الأقطاب p
- سرعة دوران الـ rotor ، n

وبما أن عدد الأقطاب ثابت ، فبالتالي لا يمكن التحكم في التردد إلا عن طريق التحكم في سرعة عمود دوران المولد ، وهذا يتم من خلال الـ Governor المسئول عن التحكم في كمية الوقود المحترق للوصول للتردد المطلوب ، وقد سبق شرح طريقة عمله.

3- تطابق الـ phase sequence فى جميع المولدات

ويسمى تعاقب الطور ، أى يجب توصيل الـ Phases بالترتيب بحيث لو تخيلت أن أحد المولدين كان ترتيب الـ Phases هو R-Y-B ، بينما كان الترتيب فى المولد الثانى هو R-B-Y ، فهذا يعنى أن المولدين لا يمكن أن يصلوا لحالة التزامن بسبب اختلاف قيمة الجهد as magnitude

and angle بين وجهين two phases من الثلاثة. تذكر أن 100 فولت بزاوية 120 درجة مثلا لا يساوي 100 فولت بزاوية 240 مثلا.



#### 4- تطابق الـ phase shift بين جميع المولدات

الشرط الرابع من شروط التزامن وهو تساوي زاوية الترحيل بين الأطوار (الـ Phase angle الموجودة بين الـ Phases ) لجميع المولدات الموصلة على التوازي ، ويقصد بها الزاوية بين Phase-A مثلا في مولد و Phase-A في المولد الآخر المتصل به على نفس الـ Bus bar .  
و يتم التأكد من جميع الشروط السابقة إما يدويا بنظام اللمبات ، أو عن طريق جهاز يسمى الـ Generator Synchro scope (شكل 1-15) ، و هو جهاز يقوم بإغلاق القاطع CB أوتوماتيكيا (وبالتالي ربط المولدات معا على التوازي ) فقط عند تحقق جميع الشروط السابق ذكرها .



شكل 1-15:

## 5-1 خطوات توصيل مولد بالشبكة الموحدة يدويا

الجزء التالي يشرح كيفية تحقيق الشروط الأربعة السابقة عمليا:

### 1-5-1 الخطوة الأولى: ضبط السرعة

نقوم بتدوير التربيننة والتحكم فى كمية البخار حتي تصل سرعتها إلى قيمة أعلى قليلا من الـ synchronous speed ( $N_s$ ) التي تحقق تردد الشبكة والذي يتم حسابه من المعادلة

$$N_s = \frac{120 \times f}{P}$$

حيث  $P$  هو عدد الأقطاب. والهدف من ذلك التأكد من أن سرعة المولد الداخل على الشبكة لن تكون بأى حال أقل من سرعة المولد التزامنية ، وإلا فالشبكة القوية ستعتبره كأنه موتور. وبضبط السرعة وتساوى التردد يتم تحقيق الشرط الأول. ويمكن ملاحظة ضبط السرعة من خلال الـ Synchro scope .

### 2-5-1 الخطوة الثانية: ضبط الجهد

بزيادة تيار الـ DC في الـ exciter (وهو تيار المجال  $I_f$ ) وبالتالي يتولد الـ flux ،  $\Phi_{rot}$  اللازم للوصول بقيمة جهد المولد للجهد المساوى للمولد الآخر إذا كان الأمر يتعلق بربط مولدين معا ، أو مساويا لجهد الشبكة إذا كان الأمر يتعلق بربط مولد بالشبكة العامة. (تذكر أن الجهد على أطراف المولد يحسب طبقا للمعادلة):

$$E_o = \frac{N_{sta} \Phi_{rot} \omega}{\sqrt{2}}$$

ومن ثم فمع تزايد  $I_f$  يصل الجهد على أطراف المولد إلى جهد يساوي جهد الشبكة . وبذلك يتم تحقيق الشرط الثاني.

### 3-5-1 الخطوة الثالثة : ضبط الـ phase sequence

وهي تطابق الـ Phases للمولد بالضبط مع الشبكة (same phase sequence) وهذا الشرط يمكن التأكد من تحققه عن طريق ملاحظة اللمبات فلو كانت الـ Phases فى الناحيتين غير

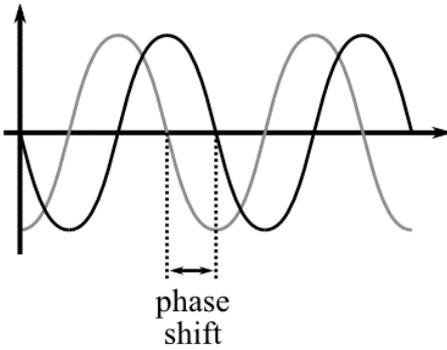
متطابقة (كأن يتم مثلاً توصيل phase a من المولد مع phase b للشبكة) فإن اللمبات لا تضيئ وتطفئ مع بعضها في نفس الوقت ولكن تضيئ واحدة بعد الأخرى . لكن إذا تطابقت ترتيب الـ Phases فستجد اللمبات تضيئ وتطفئ مع بعضها في نفس الوقت (بالطبع ستكون شدة الإضاءة ضعيفة بسبب تقارب إن لم يكن تساوى جهدي المولد الأول الموجود أصلاً بالخدمة والمولد الثاني المراد إدخاله للخدمة) وبذلك نكون حققنا الشرط الثالث.

### 4-5-1 الخطوة الرابعة : ضبط الـ phase shift

وهي أن نجعل الـ  $phase\ shift = 0$  ، وليس كما في الصورة المجاورة التي بها  $phase\ shift$  بين المولدين.

وحتى نحقق ذلك لابد من جعل سرعة التربينه تساوي  $N_s$  بالضبط . وللتوضيح فإن ما يحدد هذه الزاوية هو موضع الأقطاب الـ Field Poles الخاصة بالمولد في الفراغ بالنسبة للـ Stator Phases . وعند اختلاف موضع الأقطاب في المولدين تنشأ هذه الزاوية ، وللتغلب على هذه الزاوية فإننا نزيد أو ننقص سرعة المولد لحظياً ثم نعود إلى نفس السرعة .

لاحظ أنه عند زيادة السرعة لحظياً لضبط الـ  $phase\ shift$  نجد أن إضاءة اللمبات تزداد وتنقص



بشكل متتابع بحيث يبدو الضوء كما لو أنه يدور في اتجاه عقارب الساعة. وعندها سنجد أن اللمبات تومض مع بعضها بشكل بطيء (تتوقف سرعة الإضاءة على فرق السرعة بين المولد الأول والثاني) . وهنا نستطيع أن نقول أن الشرط الرابع تحقق وبالتالي يمكن أن نغلق المفتاح لتوصيل المولد بالشبكة ، وبالطبع يغلق المفتاح في لحظة انطفاء اللمبات.

### 5-5-1 الطريقة الآلية: (Automatic Synchronization)

يُفضل دائماً العمل بالنظام الآلي إذا لم يتوافر عمالة مدربة ، وذلك باستخدام الـ (synchronizer) وهو مسئول عن أداء جميع وظائف الرصد والمراقبة اللازمة لعملية التزامن في المولدات الكهربائية وإغلاق الـ breaker دون تدخل مهندس التشغيل ، حيث يحدد المهندس فقط القيم الأولية اللازمة لبدء عمل المولد بينما يقوم الـ (synchronizer) بقياس تردد المولد كما يقوم بالتحكم في الـ (governor) وكذلك التحكم في الـ (AVR) من أجل أن يضبط قيم الجهد magnitude وقيمة

زاوية الطور (phase angle) ، وعندما تكون شروط التزامن متحققة يقوم الـ (synchronizer) بغلاق الـ Synchronizer switch وإتمام عملية التزامن.

ويوجد أيضا جهاز يسمى (synchro-check relay) للتأكد من استيفاء شروط التزامن جميعها وهذا زيادة في الأمان ، ويستخدم هذا الجهاز أيضا في الطريقة اليدوية للأمان.

### 1-5-6 ماذا يحدث لو تمت عملية الربط بدون هذه الشروط؟

بداية تذكر أن تردد الـ induced Emf المتولدة على الـ stator winding تتناسب مع سرعة دوران الـ Rotor ، فإذا ربطنا المولد مع الشبكة بتردد مختلف عنها مثلا فإن الشبكة ستجبر المولد على ترددها ، بمعنى أنه لو كانت سرعة تربية المولد 2400 RPM أى ما يعادل تردد يساوى 40 Hz فإنه بمجرد الربط مع الشبكة سيرتفع تردده إلى 50 Hz وهذا يعنى أن الشبكة ستجذب المولد لتردها فيحدث تسارع مفاجئ للـ turbine shaft مما قد يؤدي إلى تدمير الـ shaft ، بالإضافة إلى أن القوة التي ستتولد على الـ shaft تعني زيادة العزم مما يعني ارتفاع مفاجئ في التيار المار في ملفات الـ stator.

أما في حالة الربط على جهد مختلف فإن المولد - والذي يعتبر مصدرا للقدرة غير الفعالة (Reactive power) - إذا كان جهده أقل من جهد الشبكة ، فلن يستطيع إنتاج الـ Reactive Power اللازمة لرفع الجهد ، وبالتالي ينخفض الجهد بشكل كبير ، ويدور المولد وكأنه موتور وليس مولد. كما سيمر تيار Circulating current بين المولدات مما يؤدي إلى احتمالية احتراق أحد المولدات أو جميعها.

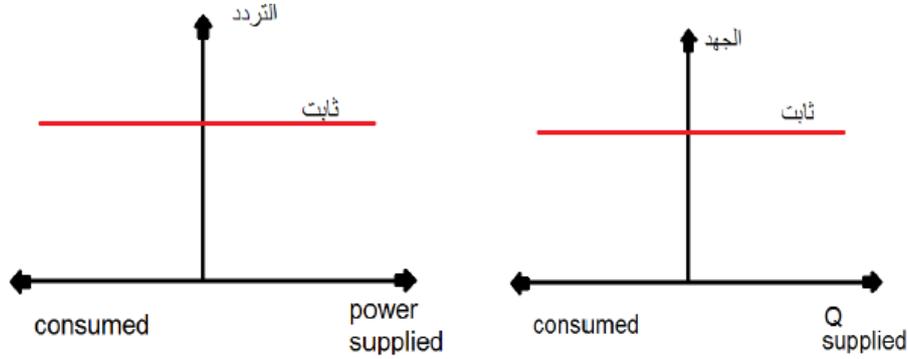
وهذا كله يمثل خطرا أكيدا على المولد ، ومن هنا جاءت أهمية عملية التزامن.

## 1-6 توزيع القدرة بين المولدات فى الشبكة

ونقصد به التقسيم النسبي للـ kW و kVAR الكلية المطلوبة لتغذية الأحمال بين العديد من المولدات المتصلة على التوازي ، وهذا التقسيم ضروري لتجنب مشاكل over loading و مشاكل الـ stability في منظومة التوليد.

بداية ، فإن الشبكة الكهربائية Grid يمكن أن تعرف بأنها — infinite Bus Bar, BB وهذا يعني أنها تشبه محطة كبيرة جدا ولن يؤثر دخول أو خروج حمل ما ( سواء كان هذا الحمل P or Q )

على قيمة الجهد أو التردد الخاص بها كما في الشكل 1-16. والخط الأحمر في الشكل يمثل العلاقة بين الجهد والـ Q أو العلاقة بين التردد والـ P في هذه الشبكة العامة.

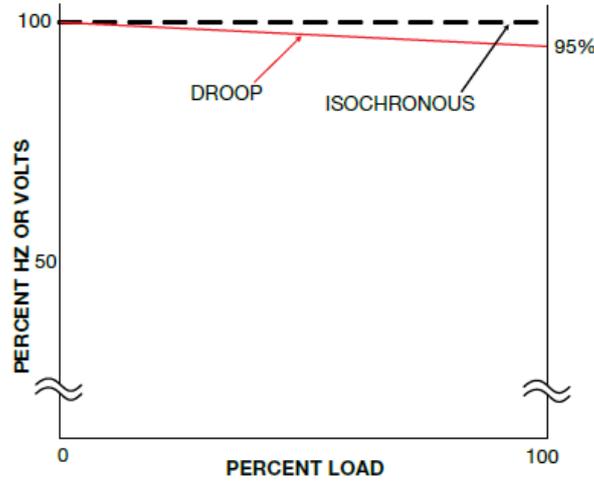


شكل 1-16:

### 1-6-1 توصيل المولد منفردا على حمل معين

العلاقة بين الجهد والـ Q ، أو العلاقة بين التردد والـ P في المولدات المنفردة لا يمكن تمثيلها بخط مستقيم أفقي كما في الشكل السابق بل تمثل بعلاقة عكسية لها ميل يسمى الـ Droop ، وهذا يعني انخفاض التردد مع زيادة التحميل وانخفاض الجهد مع زيادة سحب الـ Q في المولدات المنفردة والتي سنحاول توصيلها على الشبكة العامة لتشارك في تغذية الأحمال كما سنرى.

وعمليا يطلق على النظام الذى لا تتغير فيه قيم الجهد أو التردد مع زيادة التحميل اسم Isochronous ، بينما يطلق على خاصية الانخفاض فى الجهد والتردد مع التحميل بخاصية الـ Droops . والشكل 1-17 يظهر الخاصيتين معا.



شكل 1-17

وليس بالضرورة أن يكون Voltage Droop وكذلك Frequency Droop متساويين في الميل بل يمكن أن يكون لكل واحد منهما معادلته الخاصة به ، وهذه المعادلات تكون على الصورة التالية:

$$\text{Frequency (Hz) droop: } (100)[(Hz_{NL} - Hz_{FL}) / Hz_{FL}]$$

$$\text{Voltage (V) droop: } (100)[(V_{NL} - V_{FL}) / V_{FL}]$$

NL = no load

FL = full load

وتستخدم قيمة الميل هذه بعد ذلك ضمن معادلة معروفة لتحديد قيمة الـ Active Power, P المسحوبة من المولد عند توصيله على حمل معين كما في المعادلة التالية (توجد معادلة شبيهة للقدرة غير الفعالة لكن يستخدم فيها قيم الجهد بدلا من التردد ، ويستخدم فيها Voltage droop بدلا من الـ Frequency Droop )

$$P = s_p (f_{nl} - f_{sys})$$

Slope of curve, W/Hz                      Operating frequency of the system

والمثال التالي يوضح كيفية تأثر قيمة التردد النهائي بعد توصيل المولد منفردا على حمل ما بقيمة الـ Droop وتأثره أيضا بقيمة تردد البدء No load Frequency .

## مثال 1-1

A generator with no-load frequency of 61.0 Hz and a slope  $s_p$  of 1 MW/Hz is connected to Load 1 consuming 1 MW of real power at 0.8 PF lagging. Load 2 (that to be connected to the generator) consumes a real power of 0.8 MW at 0.707 PF lagging.

- Find the operating frequency of the system before the switch is closed.
- Find the operating frequency of the system after the switch is closed.
- What action could an operator take to restore the system frequency to 60 Hz after both loads are connected to the generator?

الحل:

The power produced by the generator is

$$P = s_p (f_{nl} - f_{sys})$$

$$f_{sys} = f_{nl} - \frac{P}{s_p}$$

- The frequency of the system with one load is

$$f_{sys} = f_{nl} - \frac{P}{s_p} = 61 - \frac{1}{1} = 60 \text{ Hz}$$

- The frequency of the system with two loads is

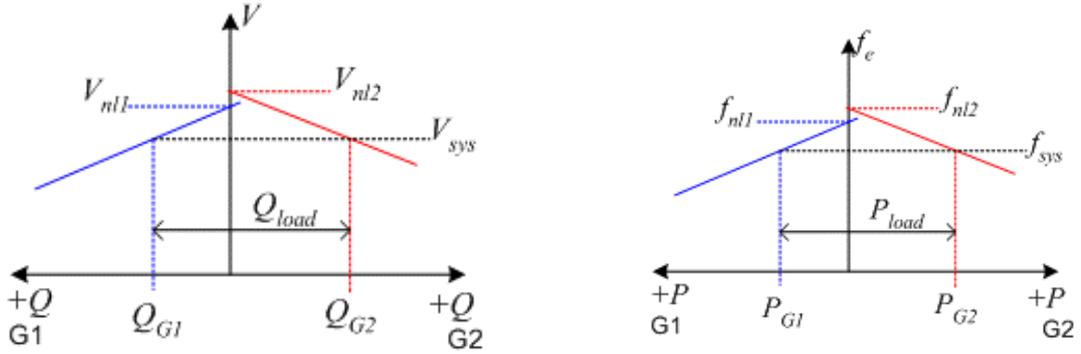
$$f_{sys} = f_{nl} - \frac{P}{s_p} = 61 - \frac{1.8}{1} = 59.2 \text{ Hz}$$

- To restore the system to the proper operating frequency, the operator should increase the governor no-load set point by 0.8 Hz, to 61.8 Hz. This will restore the system frequency of 60 Hz.

## 1-6-2 توزيع الأحمال بين المولدات المتصلة على التوازي

إذا كان لدينا مولدين متصلين معا على التوازي فيجب أن يتحقق شرطان حتى يتساوى توزيع الحمل بينهما:

1. أن يكون لهما نفس الـ Voltage Droop ، و نفس الـ Frequency Droop حتى لو اختلف ميل النوعين كما ذكرنا في المقطع السابق .
  2. وأن تكون نقطة البدء لهما واحدة حتى يمكن تقسيم الحمل بينهما بالتساوى .
- فإذا اختلف الميل أو نقطة البدء فسيكون تحميل أحد المولدين دائما أكبر من الآخر كما في الشكل 1-18.

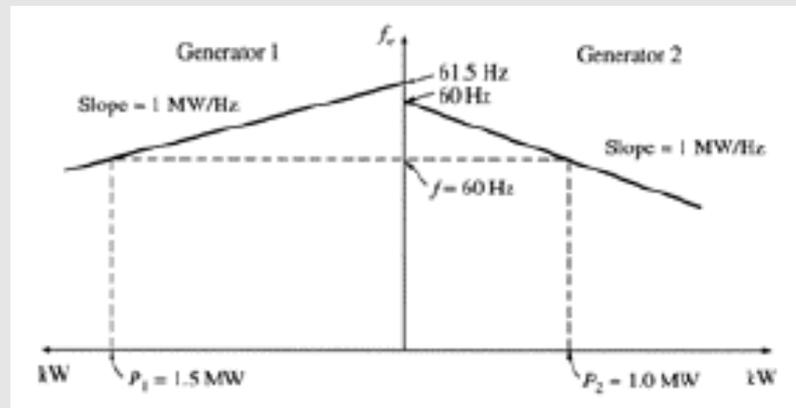


شكل 1-18

والمثال التالي يوضح كيفية توزيع حمل معين بين مولدين على التوازي .

## مثال 1-2

Two generators are set to supply the same load. Generator 1 has a no-load frequency of 61.5 Hz and a slope  $sp_1$  of 1MW/Hz. Generator 2 has a no-load frequency of 61.0 Hz and a slope  $sp_2$  of 1 MW/Hz. The two generators are supplying a real load of 2.5 MW at 0.8 PF lagging.



- Find the system frequency and power supplied by each generator.
- Assuming that an additional 1 MW load is attached to the power system, find the new system frequency and powers supplied by each generator.
- With the additional load attached (total load of 3.5 MW), find the system frequency and the generator powers, if the no-load frequency of G2 is increased by 0.5 Hz.

الحل

The power produced by a synchronous generator with a given slope and a no-load

frequency is

$$P = s_p (f_{nl} - f_{sys})$$

The total power supplied by the generators equals to the power consumed by the load:

$$P_{load} = P_1 + P_2$$

a. The system frequency can be found from:

$$P_{load} = P_1 + P_2 = s_{p1}(f_{nl,1} - f_{sys}) + s_{p2}(f_{nl,2} - f_{sys})$$

as  $f_{sys} = \frac{s_{p1}f_{nl,1} + s_{p2}f_{nl,2} - P_{load}}{s_{p1} + s_{p2}} = \frac{1 \cdot 61.5 + 1 \cdot 61.0 - 2.5}{1 + 1} = 60.0 \text{ Hz}$

The powers supplied by each generator are:

$$P_1 = s_{p1}(f_{nl,1} - f_{sys}) = 1 \cdot (61.5 - 60) = 1.5 \text{ MW}$$

$$P_2 = s_{p2}(f_{nl,2} - f_{sys}) = 1 \cdot (61.0 - 60) = 1 \text{ MW}$$

b. For the new load of 3.5 MW, the system frequency is

$$f_{sys} = \frac{s_{p1}f_{nl,1} + s_{p2}f_{nl,2} - P_{load}}{s_{p1} + s_{p2}} = \frac{1 \cdot 61.5 + 1 \cdot 61.0 - 3.5}{1 + 1} = 59.5 \text{ Hz}$$

The powers are:

$$P_1 = s_{p1}(f_{nl,1} - f_{sys}) = 1 \cdot (61.5 - 59.5) = 2.0 \text{ MW}$$

$$P_2 = s_{p2}(f_{nl,2} - f_{sys}) = 1 \cdot (61.0 - 59.5) = 1.5 \text{ MW}$$

c. If the no-load frequency of G2 increases, the system frequency is

$$f_{sys} = \frac{s_{p1}f_{nl,1} + s_{p2}f_{nl,2} - P_{load}}{s_{p1} + s_{p2}} = \frac{1 \cdot 61.5 + 1 \cdot 61.5 - 3.5}{1 + 1} = 59.75 \text{ Hz}$$

The powers are:

$$P_1 = P_2 = s_{p1}(f_{nl,1} - f_{sys}) = 1 \cdot (61.5 - 59.75) = 1.75 \text{ MW}$$

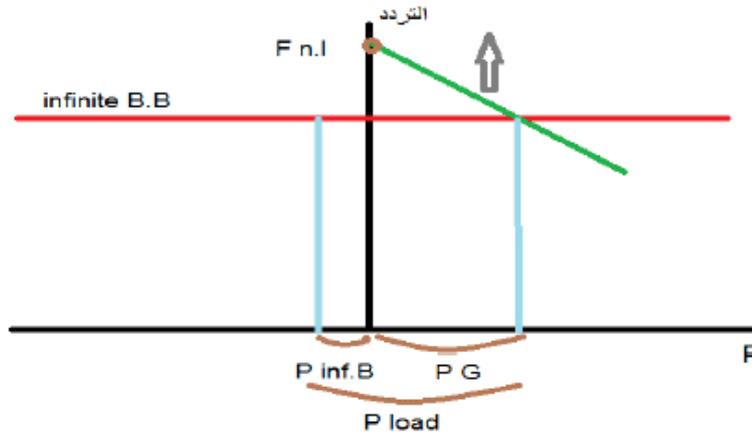
### 1-6-3 توزيع القدرة الفعالة بين المولد والشبكة العامة

وينقسم توزيع الأحمال أو الـ load sharing إلى نوعين :

## Active power (KW) load sharing -1

## Reactive power (KVAR) load sharing -2

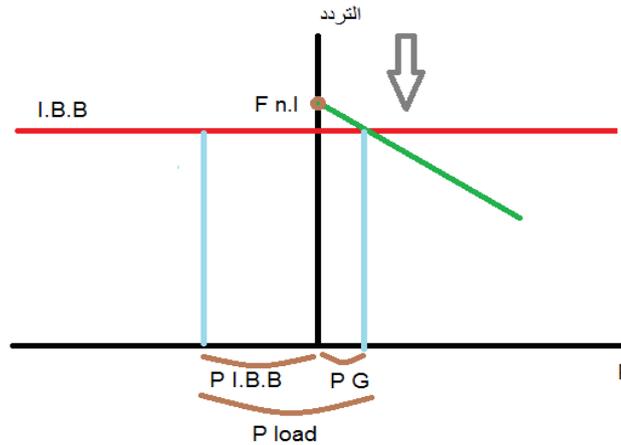
يتم ذلك بضبط Governor الخاص بوحدة التوليد المتصلة بالشبكة العامة لتغيير الـ no-load Frequency ،  $f_n$  ، وذلك للتحكم في كمية Power ،  $P-G$  ، التي يشارك بها مولد معين متصل على الشبكة العامة في تغذية الحمل الإجمالي  $P_{load}$  (شكل 1-19) علما بأن علاقة القدرة والتردد للشبكة العامة تمثل بالخط الأحمر كما ذكرنا سابقا بينما علاقة القدرة والتردد في المولد تمثل بالخط الأخضر.



شكل 1-19:

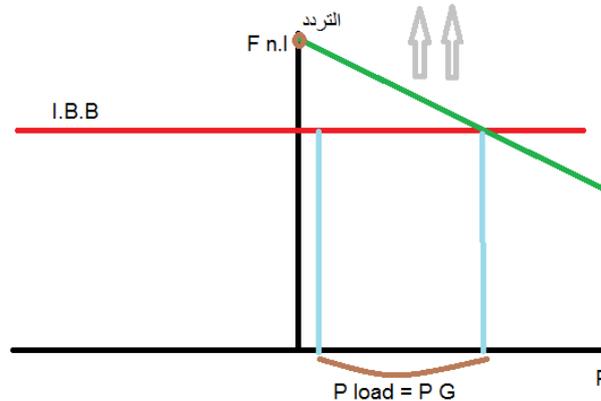
فعند رفع قيمة Governor set point for  $F_n$  تزداد قيمة الـ Power المسحوبة من ذلك المولد وتقل قيمة الـ Power المسحوبة من الشبكة العامة (تعرف الشبكة العامة بأنها الشبكة متناهية القدرة ثابتة الجهد ، فمهما أخذت منها لا يتغير ترددها ولذا تسمى Infinite Bus Bar لأن ترددها دائما ثابت).

أما عند إنزال Governor set point for  $F_n$  قيمة الـ Power المسحوبة (شكل 1-20) من ذلك المولد وستزيد قيمة الـ Power من الشبكة لأن الحمل ثابت.



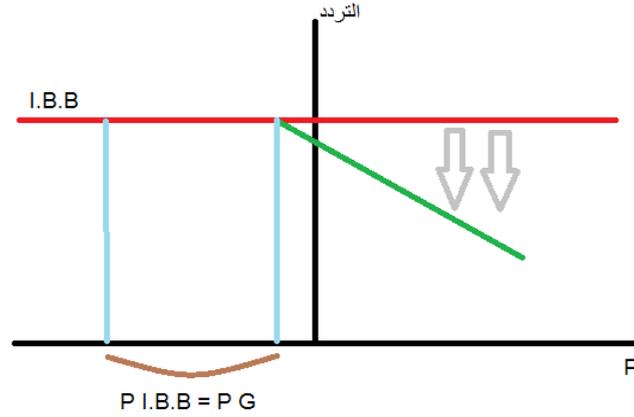
شكل 1-20:

و عند رفع Governor set point for  $F_n.I$  بصورة كبيرة (شكل 1-21) فيمكن حينئذ تغذية الحمل بالكامل من المولد فقط بل ربما تزيد القدرة المسحوبة من المولد عن حاجة الحمل فيصبح المولد وكأنه يشارك أيضا في التغذية العمومية للشبكة ولكن عمليا يتم فصل المولد عن الشبكة في هذه الحالة.



شكل 1-21:

أيضا عند إنزال Governor set point for  $F_n.I$  بصورة كبيرة (شكل 1-22) فإن القدرة التي يشارك بها المولد  $P_G$  ستكون أقل من الصفر في تلك الحالة وسيسحب power من الشبكة وسيعمل كموتور ولكن في هذه الحالة سيفصل reverse power relay المولد.



شكل 1-22:

### 1-6-4 توزيع القدرة غير الفعالة بين المولدات

عندما يتصل أكثر من مولد معا على التوازي ، فإننا يمكننا التحكم في مقدار Reactive Power KVAR الخارجة من كل مولد عن طريق Field Excitation System .

فعند زيادة field excitation المتولدة فإن ذلك يؤدي إلى زيادة (KVAR) المتولدة من هذا المولد (Over Excitation) ولكن سوف يؤدي إلى تقليل power factors لأن الـ Active power ستخف. والعكس بالعكس. ويحسن أن تراجع منظومة الـ Excitation system في الفصل السادس من النسخة المعدلة من كتاب نظم الحماية الكهربائية.

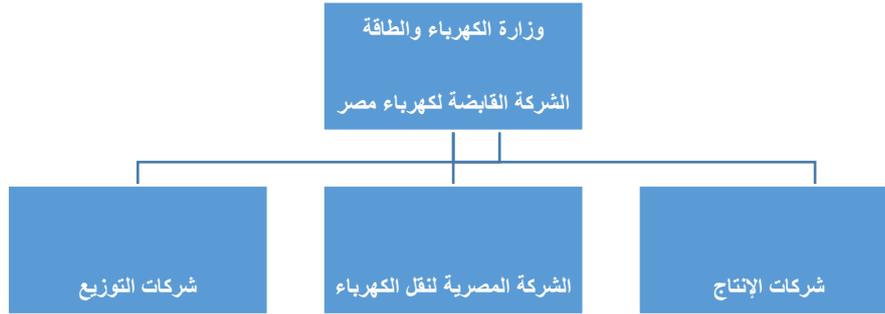
**ملحوظة:**

استخدام معوضات القدرة غير الفعالة Reactive Power Compensators سيحسن بشكل كبير المنحنى السابق حيث يمكن الحصول على قدر أكبر من الـ Q دون حدوث تغييرات كبيرة في الـ P. وسيدرس ذلك تفصيلاً في الباب الثاني من هذا الكتاب.

## معلومات إضافية عن الشبكة المصرية

### منظومة الكهرباء في مصر

تتكون منظومة الكهرباء في مصر من ست شركات لإنتاج الكهرباء وشركة واحدة لنقل الطاقة وتسع شركات لتوزيع الكهرباء كما في المخطط التالي. وجميعهم يتبعون الشركة القابضة لكهرباء مصر التي تتولى مسئولية توليد ونقل وتوزيع الطاقة الكهربائية.



- |                |                        |                   |
|----------------|------------------------|-------------------|
| • شمال القاهرة | • المركز القومي للتحكم | • القاهرة         |
| • جنوب القاهرة | • تحكم القاهرة         | • شرق الدلتا      |
|                | • تحكم الإسكندرية      |                   |
| • الإسكندرية   | • تحكم وسط الدلتا      | • وسط الدلتا      |
|                | • تحكم غرب الدلتا      |                   |
| • البحيرة      | • تحكم القناة          | • غرب الدلتا      |
|                | • تحكم الوجه القبلي    |                   |
| • شمال الدلتا  |                        | • الوجه القبلي    |
| • جنوب الدلتا  |                        | • المحطات المائية |
| • القناة       |                        | • الطاقة المتجددة |
| • مصر العليا   |                        |                   |
| • مصر الوسطى   |                        |                   |

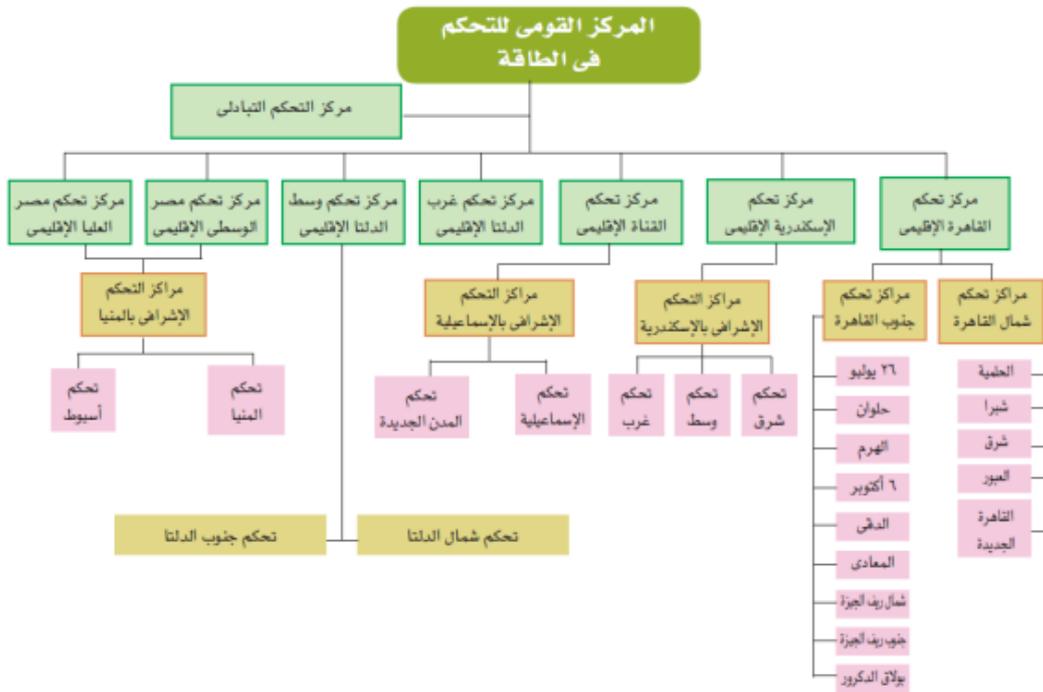
ويقوم المركز القومي للتحكم في الطاقة (ومقره مدينة سقيل التابعة للوراق - بالجيزة) بالإضافة إلى سبعة مراكز تحكم إقليمية (شكل 1-23) (تحكم القاهرة - تحكم الإسكندرية - تحكم وسط الدلتا - تحكم غرب الدلتا - تحكم القناة - تحكم مصر الوسطى - تحكم مصر العليا) بدور

أساسي في التحكم في الطاقة الكهربائية من لحظة توليدها وحتى تصل إلى مستهلكها أخذاً في الاعتبار أمان واستمرارية واقتصاديات التشغيل.

فالمستوى الأول من التحكم في الطاقة هو الخاص بمركز التحكم القومي ، وهو المركز الوحيد الذي يمكنه المراقبة و التحكم في محطات التوليد بالإضافة للتحكم في محطات التحويل الموجودة على شبكة الـ 500kV ، أو الموجودة على شبكة الـ 220kV.

أما المستوى الثاني من التحكم فيشمل مراكز التحكم الإقليمية ، وهذه لها القدرة على المراقبة والتحكم في فصل وتشغيل المحطات جهد 66kV أو أقل ، لكن لا يمكن لهذه المراكز الإقليمية فصل أو تشغيل أى محطة في شبكة الـ 500kV أو شبكة الـ 220kV.

ثم المستوى الثالث ويشتمل على مراكز تحكم في شبكات التوزيع بالمدن. و تتبع مراكز التحكم الإقليمية السبعة السابقة.



شكل 1-23:

## تطور الحمل الكهربى على الشبكة :

لا يسير الطلب على الكهرباء بمعدل ثابت يومياً أو أسبوعياً أو شهرياً أو فصلياً ، فالطلب على الكهرباء يتأثر بنوع الأحمال ، من حيث كونه صناعياً أو زراعياً أو تجارياً أو منزلياً ، كما يتأثر

بالأحوال الجوية و درجات الحرارة صيفاً و شتاءً ، و يتأثر بالمناسبات المختلفة كالأجازات و الأعياد ، و بالمواسم كشهر رمضان مثلاً ، كما يتأثر باختلاف الوقت على مدى اليوم ليلاً و نهاراً .

و يعد الحمل الأقصى في السنة أحد المؤشرات الهامة لتطور استهلاك الكهرباء ، و يجب أن تكون منظومة الكهرباء مصممة للاستجابة لذروة الأحمال .

#### ملحوظة :

يعتبر الرقم الممثل لنصيب الفرد من الطاقة الكهربائية أحد مقاييس ارتفاع مستوى المعيشة في البلاد ، و يساوي هذا الرقم في مصر تقريباً 1830 kWh للفرد سنوياً (إجمالي الطاقة المولدة في 2014 = 164836 جيجا وات ساعة فإذا قسمنا هذا الرقم على 90 مليون فرد = 1830kWh ) . وهذا أقل من المعدل العالمي الذي يبلغ 2800 ك وات ساعة للفرد.

والجدول 1-3 يعطى إحصائية من البنك الدولي بمتوسط استهلاك الكهرباء السنوى لكل فرد kWh/person في بعض الدول.

## جدول 3-1

البلد	÷ 2011	÷ 2012
إثيوبيا	56	57
أذربيجان	1,705	2,053
أرمينيا	1,752	1,832
أروبا		
إريتريا	60	62
إسبانيا	5,599	5,573
أستراليا	10,712	10,398
إستونيا	6,314	6,689
إسرائيل	6,930	7,189
أفغانستان		
إكوادور	1,219	1,282
الأرجنتين	2,901	2,955
الأردن	2,289	2,357
الإمارات العربية المتحدة	10,537	10,463
ألبانيا	2,195	2,118
البحرين	17,093	17,395
البرازيل	2,394	2,462
البرتغال	4,848	4,736
جمهورية كوريا الديمقراطية الشعبية	657	654
جمهورية لاو الديمقراطية الشعبية		
جمهورية مصر العربية	1,701	1,700
جمهورية مقدونيا يوغوسلافية السابقة	3,895	3,690
جنوب أفريقيا	4,606	4,405

## تطور نمو الطلب في مصر

يمكن تقسيم النمو في الحمل الأقصى في مصر تاريخيا ( وبالتالي نمو القدرة الكهربائية المركبة ) إلى ثلاث مراحل:

- المرحلة الأولى 1952 – 1970 : حيث بلغ معدل الزيادة السنوية في الحمل الأقصى في بدايات هذه المرحلة حوالي 12 ، 3% .
- المرحلة الثانية 1970 – 1985 : لم يزد معدل زيادة الحمل الأقصى في الفترة بين (1970-1971)-(1973-1974) عن 4 ، 4% سنوياً بسبب ظروف الحرب ، إلا أنه في العقد الثاني ( 1974-1985) زاد الحمل الأقصى أكثر من ثلاث مرات بمعدل زيادة قدره 5% سنوياً ، و قد اقترن ذلك بفترة النمو غير العادي في التوليد الكهربائي ، و الذي اقترن بالنمو غير العادي في إنتاج البترول و الغاز الطبيعي و اعتمد عليه اعتماداً شبيه مطلق و قد بلغ معدل الزيادة في الحمل الأقصى طوال المرحلة الثانية حوالي 4% سنوياً.
- المرحلة الثالثة 1985 – حتى الآن : استمر فيها تزايد الحمل الأقصى وإن كان بمعدلات أقل بكثير من المرحلة السابقة حيث ارتفع الحمل الأقصى من 5361 ميغاوات عام 1985-1986 إلى 9850 ميغاوات عام 1997-1998 ، بمعدل زيادة قدره 2% سنوياً ، واستمرت معدلات الزيادة حتى وصل إلى ما يقرب من 30000 ميغاوات في 2015.

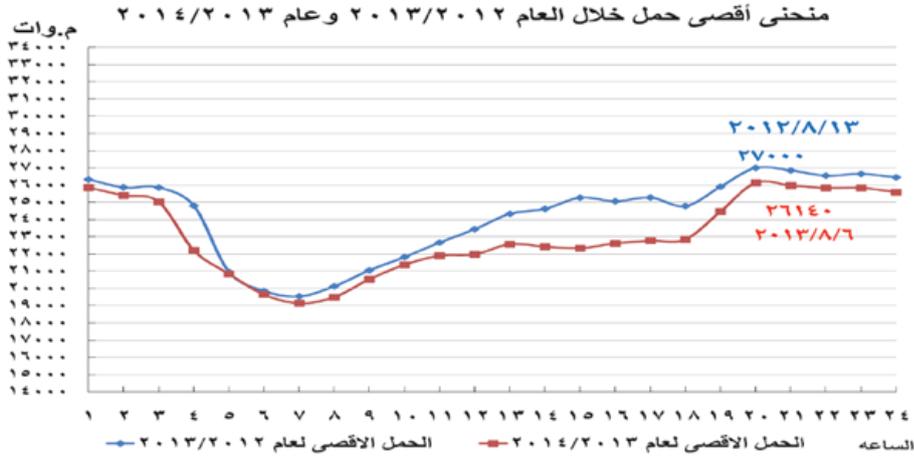
و قد حدث في هذه المرحلة تغيير دراماتيكي وتاريخي في نمط الأحمال عما كان في المرحلتين السابقتين ، فقد كان الحمل الأقصى دائماً يحدث في الشتاء في فترة ما قبل الثمانينيات نظراً لطول ساعات الليل وما يتبع ذلك من استخدام أكبر للإنارة سواء في المنازل أو الشوارع أو المحلات التجارية أو المصانع...إلخ ، ولكن منذ أوائل الثمانينيات ومع تزايد تركيب أجهزة التكييف في المنازل أصبح الحمل الأقصى يحدث صيفا وتزايد بمعدلات عالية حتى وصل كما ذكرنا إلى ما يقرب من 30000 ميغا وات في 2015.

وكان أقصى حمل للشبكة في مصر هو 28750 ميغاوات.(2015) . والشكل 1-24 يوضح توزيع الأحمال على ساعات اليوم . واضح أن الحمل الأقصى في حدود التاسعة مساء ، وبالطبع هذا التوقيت يختلف من دولة لأخرى حسب الظروف المناخية ، فالكويت مثلا يحدث فيها الحمل الأقصى في الفترة من 2 ظهرا إلى السادسة مساء حيث تصل درجة الحرارة صيفا إلى فوق الخمسين درجة مئوية.

#### ملحوظات:

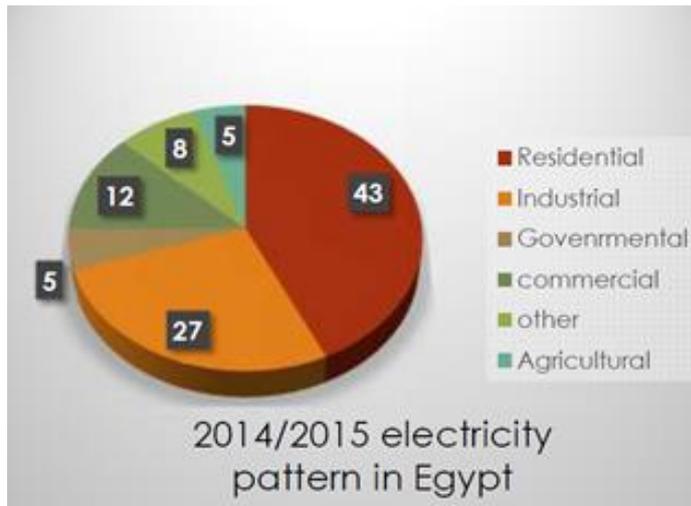
نمط توزيع الأحمال يعطى تصورا للأنشطة الاقتصادية بالدولة ، ففي معظم دول العالم المتقدم تكون الأحمال الصناعية فيها أكبر من السكنية ، لكن للأسف لدينا في مصر 43% أحمال

سكنية مقارنة بحوالي 27% أحمال صناعية (والباقي تجارية وخدمات عامة كما في الشكل 1-25).



شكل 1-24:

1- إذا استمر نمو الأحمال بهذا المعدل فلن يكون هناك حل سوى إنشاء محطات نووية مع التوسع في استخدامات الطاقة الجديدة و المتجددة لسد العجز في الكهرباء ، فالطاقة النووية هي الوحيدة القادرة على الإنتاج الكثيف بكميات محدودة من الوقود (الوقود النووي هنا) ، فالطاقة المحررة من كيلو جرام واحد من الفحم يمكن أن تنتج 8 كيلو وات ساعة ، أما الطاقة الناتجة من كيلو جرام واحد من اليورانيوم 235 ، فيمكن أن تنتج ما يقارب 24 مليون كيلو وات ساعة.



شكل 1-25:

2- لابد أن نأخذ في الاعتبار أن هناك احتمالاً كبيراً لحدوث فقر مائي في مصر (سواء بسبب سد النهضة الأثيوبي أو بسبب الزيادة السكانية) وهذا قد يستلزم اللجوء لتحلية ماء البحر ، وبالطبع هذه العملية ستستهلك طاقة كهربائية إضافية وحمل كهربى جديد لم يكن يوماً في الحسبان ، فتحلية المتر المكعب من الماء تحتاج لحوالى 4 kWh ، وهذا يعنى أن تحلية 40 بليون متر مكعب من الماء (النقص المتوقع حتى 2030) يحتاج لطاقة كهربائية تعادل تقريباً كل الطاقة الكهربائية المتاحة الآن في مصر !!!!. بمعنى آخر أن من يفكر في تحلية الماء عليه أولاً أن يضاعف الطاقة الكهربائية المنتجة.

### محطات التوليد المتصلة بالشبكة الموحدة المصرية

جميع محطات التوليد في مصر بمختلف أنواعها (مائية ، بخارية ، هوائية إلخ) مرتبطة بالشبكة الموحدة ونسب مشاركة كل نوع يظهر في الجدول 1-4:

جدول 1-4 :

البيان	% إجمالي الطاقة الكهربائية المنتجة
الطاقة المائية	7.94
طاقة الرياح	0.79
الطاقة الشمسية	0.07
كهرباء مولدة من المحطات الحرارية المربوطة بالشبكة	91.02
كهرباء مولدة من المحطات الغير مربوطة بالشبكة	0.14
كهرباء مشتتة من فائض الشركات الصناعية	0.04

وهذه نبذة عن بعض المحطات المستخدمة في توليد الكهرباء في مصر:

1- محطة الكريمات : هناك أربع محطات في منطقة الكريمات :

- محطة الكريمات : وهي تحتوي على عدد 2 وحدة بخارية ، قدرة كل واحدة 627 ميجاوات بإجمالى قدرة 1254 ميجاوات ، والوقود المستخدم هو مازوت وغاز طبيعي.

- **محطة الكريمات المركبة 1 :** و تحتوي على عدد 2 وحدة غازية قدرة كل منهما 250 ميغاوات وعدد 1 وحدة بخارية قدرتها 250 ميغاوات ، بإجمالى قدرة 750 ميغاوات و الوقود المستخدم هو غاز طبيعي وسولار .
- **محطة الكريمات المركبة 2 :** وهي تحتوي على عدد 2 وحدة غازية قدرة كل واحدة 250 ميغاوات وعدد 1 وحدة بخارية قدرتها 250 ميغاوات بإجمالى قدرة 750 ميغاوات و الوقود المستخدم هو غاز طبيعي وسولار .
- **محطة الكريمات الشمسية :** وفيها 20 ميغاوات هو قدرة الجزء المعتمد على الطاقة الشمسية فى التسخين ، إلى جانب 120 ميغاوات هي قدرة الجزء الحراري العادى .
- 2 **محطة مرسى مطروح البخارية :** و تحتوي على عدد 2 وحدة بخارية قدرة كل منهما 30 ميغاوات ، بإجمالى قدرة 60 ميغاوات ، و الوقود المستخدم هو مازوت وغاز طبيعي .
- 3 **محطة كفر الدوار البخارية :** وهي تحتوي على عدد 4 وحدة بخارية ، قدرة كل منهما 110 ميغاوات ، بإجمالى قدرة 440 ميغاوات ، و الوقود المستخدم هو مازوت وغاز طبيعي .
- 4 **محطة كهرباء النوبارية :** هناك منطقتان لتوليد الكهرباء فى النوبارية. هما :
- **النوبارية المركبة (2و1) :** وهي تحتوي على عدد 2 نموذج يتضمن كل منهما ( عدد 4 وحدة غازية قدرة كل منهما 250 ميغاوات إلى جانب عدد 2 وحدة بخارية بنظام الدورة المركبة بقدرة 250 ميغاوات ) بإجمالى قدرة مركبة 1500 ميغاوات ، و الوقود المستخدم هو غاز طبيعي وسولار .
- **النوبارية المركبة 3 :** وهي تشتمل على عدد 2 نموذج يتضمن كل منهما ( عدد 1 وحدة غازية قدرة كل منهما 250 ميغاوات إلى جانب عدد 2 وحدة بخارية بقدرة 250 ميغاوات بنظام الدورة المركبة ) بإجمالى قدرة مركبة 750 ميغاوات ، و الوقود المستخدم هو غاز طبيعي و سولار
- 5 **محطة الزعفرانة :** تشتمل المحطة على عدد 105 ترابينة هوائية ، قدرة كل واحدة 0.6 ميغاوات ، إلى جانب عدد 117 ترابينة هوائية قدرة كل منهما 0.66 ميغاوات ، إلى جانب عدد 478 ترابينة هوائية قدرة كل منهما 0.85 ميغاوات ، بإجمالى قدرة 547 ميغاوات .

## المحطات المائية في مصر

محطة كهرباء السد العالي

السد العالي عبارة عن سد ركامي طوله عند القمة 3830 متراً منها 520 متراً بين ضفتي النيل ويمتد الباقي على هيئة جناحين على جانبي النهر ، ويبلغ ارتفاع السد 111 متراً فوق منسوب قاع نهر النيل وعرضه عند القمة 40 متراً.

يُمثل توليد الكهرباء من السد العالي في مصر حوالي من 6 ٪ من إجمالي الطاقة بمصر ، وكان هذا الرقم منذ سنوات يصل إلى 40% لكن مع التوسع في بناء المحطات الغازية والبخارية انخفضت النسبة.

- تعتبر محطة كهرباء السد العالي (شكل 1-26) واحدة من أكبر محطات التوليد الكهرومائية في العالم.
- تشمل المحطة 12 وحدة قدرة كلها منها 175 MW ، وجهد التوليد هو 15.75kV ، ويتم نقل الطاقة الكهربائية المولدة من وحداتها إلى مراكز الأحمال على خطوط جهد 500 kV و 220 kV.
- أقصى طاقة مولدة سنوياً 10000 مليون ك.و.س.



شكل 1-26:

### محطة كهرباء أسوان الأولى

- بدأ العمل في مشروع محطة كهرباء أسوان الأولى عام 1956 .
- تشتمل المحطة على سبع وحدات بقوة 46 ميغاوات لكل وحدة والتي انخفضت إلى 40 ميغاوات بعد بناء السد العالي .
- أقصى طاقة مولدة سنوياً 1750 مليون ك.و.س.

### محطة كهرباء أسوان الثانية 4 x 67.5 ميغاوات

- المحطة تضم 4 وحدات بقوة 67.5 ميغاوات لكل وحدة.
- أقصى طاقة مولدة سنوياً 1800 مليون ك.و.س.

### محطة كهرباء إسنا

- هي أول محطة كهرباء مائية أنشأت شمال مدينة أسوان لاستغلال مساقط النيل عند إسنا ، و ذلك ضمن مشروع قناطر إسنا الجديدة.

- تضم المحطة 6 وحدات توليد قدرة الواحدة منها 14.28 ميجا وات ، و قدرة إجمالية 85.68 ميجاوات ، و قد بدأت وحداتها في الدخول على الشبكة الموحدة في يولييه عام 1993 م.
- أقصى طاقة مولدة سنوياً 643 مليون ك.و.س.

#### محطة كهرباء نجع حمادي

- تضم المحطة 4 وحدات توليد قدرة الواحدة منها 16 ميجاوات.
- أقصى طاقة مولدة سنوياً 470 مليون ك.و.س.

#### محطة كهرباء أسيوط

محطة توليد كهرباء مائية عند قناطر أسيوط ، و تم افتتاحها في 2013.

والجدول 1-5 يبين أسماء وقدرات كل محطات التوليد في مصر.

جدول 5-1 :

شركات الإنتاج	اسم المحطة	بيان الوحدات	إجمالي القدرة الاسمية م.و	نوع الوقود المستخدم	تاريخ التشغيل التجاري
القاهرة	شبرا الخيمة	(ب) 310X4	1260	مازوت - غاز طبيعي	1988-85-84
	شبرا الخيمة	(ع) 30X1	30	غاز طبيعي - سولار	1986
	توسيع شرب <sup>(1)</sup>	(ب) 30 X2 + 33 X2	1360	مازوت - غاز طبيعي	2011 - 1995
	جنوب القاهرة المركبة 1	60 X2 + 110 X2	40	مازوت - غاز طبيعي	1989-1975
	جنوب القاهرة المركبة 2	50X1+110 X1	1650	غاز طبيعي	1995
	شمال القاهرة المركبة	20 X2 + 20 X4	1000	غاز طبيعي - سولار	2008-2007/2005-2004
	العين	(ب) 30 X2	700	مازوت - غاز طبيعي	2010
	وادي حشوف	(ع) 33, 33X2	100	غاز طبيعي - سولار	1985
	6 أكتوبر <sup>(2)</sup>	(ع) 100 X4	600	غاز طبيعي - سولار	2012
	دمياط المركبة	131X3 + 132X6	1200	غاز طبيعي - سولار	1993 - 1989
شرق الدلتا	عسافنة	(ب) 30 X2 + 100 X2	900	مازوت - غاز طبيعي	1987-87-85
	ابوسلطان	(ب) 100 X4	600	مازوت - غاز طبيعي	1987-85-83
	الشباب	(ع) 33, 0X2	1000	غاز طبيعي - سولار	1982
	الشباب الغازية الجديدة	(ع) 120X8	1000	غاز طبيعي - سولار	2011
	دمياط الغازية الجديدة	(ع) 120X4	500	غاز طبيعي - سولار	2011
	غرب دمياط <sup>(3)</sup>	(ع) 120X4	500	غاز طبيعي - سولار	2012
	بور سعيد <sup>(4)</sup>	(ع) 23, 96X2	48	غاز طبيعي - سولار	1977
	العريش	(ب) 23X2	66	مازوت - غاز طبيعي	1996-95
	عين موسى	(ب) 22 X2	66	مازوت - غاز طبيعي	2001
	شرم الشيخ <sup>(5)</sup>	(ع) 24, 27X4 + 23, 27X1	104	سولار	1997-94-90
وسط الدلتا	المرديفة	(ع) 24, 27X6	142	سولار	1979-1977
	الزعفرانة (رياح)	0, 66X117 + 0, 66X105	567	رياح	2010 - 2009-2008-2007
	قطاع خاص				
	خليج السويس	(ب) 241, 20X2	682, 0	مازوت - غاز طبيعي	2002
	شرق بورسعيد	(ب) 241, 20X2	682, 0	مازوت - غاز طبيعي	2002
	طنطا المركبة	45, 94 X2 + 24, 72X8	290	غاز طبيعي - سولار	1989-88-79
	طنطا - 210 توسيع	(ب) 210 X2	420	مازوت - غاز طبيعي	1995-1993
	طنطا 750 المركبة	250 X1 + 250 X2	750	غاز طبيعي - سولار	2010-2006
	النيوبارية المركبة 1, 2	250 X2 + 250 X4	1000	غاز طبيعي - سولار	2007-2005
	النيوبارية المركبة 3	250 X1 + 250 X2	750	غاز طبيعي - سولار	2010 - 2009
المحمودية المركبة	58, 77 X2 + 20X8	216	غاز طبيعي - سولار	1995-1983	
المنطقا المركبة	250 X1 + 250 X2	750	غاز طبيعي - سولار	2010 - 2009	
كفر السدواز	(ب) 110 X4	440	مازوت - غاز طبيعي	1987-85-80	
دمههور توسيع	(ب) 300 X1	300	مازوت - غاز طبيعي	1991	
دمههور	(ب) 70X2	190	مازوت - غاز طبيعي	1978-78	
دمههور المركبة	58X1 + 20X4	108	غاز طبيعي - سولار	1995-1985	
غرب الدلتا	السيوف	(ع) 33, 27X6	200	غاز طبيعي - سولار	1982-82-82-81
	كريمون	(ع) 11, 28X1 + 11, 27X1	230, 0	سولار	1980
	ابوقير	(ب) 311X1 + 100 X4	911	مازوت - غاز طبيعي	1991-85-82
	ابوقير	(ع) 24, 27X1	24	غاز طبيعي - سولار	1982
	ابوقير الجديدة <sup>(1)</sup>	(ب) 60 X2	1300	غاز طبيعي - مازوت	2013-2012
	سيدى كزير 2, 1	(ب) 22 X 2	660	مازوت - غاز طبيعي	2000-1999
	سيدى كزير المركبة	(ب) 250 X1 + 250 X2	750	غاز طبيعي - سولار	2010
	مطروح	(ب) 30 X2	60	مازوت - غاز طبيعي	1990
	قطاع خاص				
	سيدى كزير 4, 3	(ب) 241, 20 X 2	682, 0	مازوت - غاز طبيعي	2001
الوجه القبلى	الوليدية	(ب) 312X2	624	مازوت	1997-1992
	الكريسات	(ب) 67X2	134	غاز طبيعي	1998-1997
	الكريسات المركبة (1)	250 X1 + 250 X2	750	غاز طبيعي - سولار	2009-2007
	الكريسات المركبة (2)	250 X1 + 250 X2	750	غاز طبيعي - سولار	2011-2009
	اسيوط	(ب) 30 X2	60	مازوت	1977-1976
	الكريسات الشمسية/ الحرارية	20 X1 + 50 X1 + 70 X1	140	شمس - غاز طبيعي	2011
	السد العالى	170X12	2100	مائي	1977
	خزان اسوان (1)	40 X7	280	مائي	1970
	خزان اسوان (2)	67, 0X4	268	مائي	1987-1985
	اسنا	14, 28X6	86	مائي	1993
المحطات المائية	نجم حمادى	16X4	64	مائي	2008

## 2

## محطات التوليد الحرارية

هناك أربعة أنواع رئيسية لهذه المحطات :

1. وفي المحطات البخارية
2. المحطات الغازية البسيطة
3. المحطات الغازية المركبة
4. محطات الديزل

مصر يمكن اعتبار النوع الأول (البخارية) هو الأهم والأضخم ضمن منظومة التوليد ، أما الغازية بنوعها (بسيطة ومركبة) فهي الأكثر انتشارا ، ( عدد المحطات البخارية : 17 ، الغازية المركبة : 14 ، الغازية البسيطة : 17 ) ، بالإضافة إلى المحطات الصغيرة الموجودة على شبكات التوزيع جهد 22 kV و 11 kV لضبط الجهود.

و المحطة البخارية تتداخل فيها مكونات تنتمي لثلاثة أقسام (ميكانيكي وكيميائي وكهربي ) .

وهذا الفصل مقسم إلى جزئين:

- الجزء الأول ، وفيه ندرس بالتفصيل المحطات البخارية (القسمين الميكانيكي والكيميائي فقط).
- الجزء الثاني ، يخصص للأنواع الثلاثة الباقية من أنواع المحطات الحرارية (الغازية البسيطة و الدورة المركبة ومحطات الديزل).

أما القسم الكهربى فى المحطات الكهربائية عموما فنخصص له الفصل التالى مباشرة (الثالث).

علما بأنه يمكن تصنيف المحطات النووية على أنها محطات بخارية ، ولكن حيث أن مصدر الحرارة فيها مختلف تماما عن الأنواع السابقة لذا سنفرد لها فصلا خاصا وهو الفصل الرابع.

## الجزء الأول من الفصل الثاني

## محطات التوليد البخارية

تسمى هذه المحطات بمحطات توربينات البخار لاعتمادها على ضغط البخار لتحريك التوربينات. وتستعمل هذه المحطات أنواعا مختلفة من الوقود حسب الأنواع المتوفرة ، مثل الفحم الحجري أو البترول السائل أو الغاز الطبيعي أو الصناعي .

تمتاز المحطات البخارية بكبر مساحتها وكبر حجم إنتاجها (يمكن أن تنتج الوحدة الواحدة 600 ميغا وات) ، وتتميز أيضا برخص تكاليفها مقارنة بإمكاناتها الضخمة ، وعمرها الافتراضي الكبير ، كما تمتاز بإمكانية استعمالها لتحلية المياه المالحة ، الأمر الذي يجعلها ثنائية الإنتاج خاصة في البلاد التي تقل فيها مصادر المياه العذبة.

ولكن أبرز عيوبها أن تكلفة الإنشاء عالية ، وأنها تحتاج لمساحة كبيرة ، إضافة إلى بطء دخولها على الشبكة (5-7 ساعات) .

## 1-2 أساسيات المحطات البخارية

تعتمد محطات التوليد البخارية على استعمال نوع الوقود المتوفر ، وحرقة في أفران خاصة لتحويل الطاقة الكيميائية في الوقود إلى طاقة حرارية في اللهب الناتج من عملية الاحتراق ، ثم استعمال الطاقة الحرارية في تسخين المياه في غلايات خاصة ( Boilers ) لتحويل الماء المقطر إلى بخار في درجة حرارة وضغط مرتفعين (تصل درجة الحرارة إلى 540 درجة وقيمة الضغط 160 بار ) ، ثم يتم تسليط هذا البخار على ريش توربينات بخارية صممت لهذه الغاية ، فيقوم البخار المندفع بتدوير محور التوربينات ، وبذلك تتحول الطاقة الحرارية إلى طاقة ميكانيكية على محور هذه التوربينات .

يرتبط عمود المولد الكهربائي ربطا مباشرا مع عمود التوربينات البخارية فيدور الجزء الدوار في المولد الذي يسمى بالـ Rotor - وهو الذي يحمل منظومة المجال المغناطيسي للمولد Electric field - بنفس سرعة دوران التريينة ، فيقطع هذا المجال ملفات الجزء الثابت (Stator) ، وبذلك تتحول الطاقة الميكانيكية إلى طاقة كهربية .

لا يوجد فوارق أساسية بين محطات التوليد البخارية التي تستعمل أنواعا مختلفة من الوقود إلا من حيث طرق نقل وتخزين وتداول وحرق الوقود . وقد كان استعمال الفحم الحجري شائعا في أواخر القرن الماضي وأوائل هذا القرن ، إلا أن اكتشاف واستخراج البترول ومنتجاته أحدث تغييرا جذريا في محطات التوليد الحرارية ، حيث أصبح يستعمل بنسبة تسعين بالمئة لسهولة نقله وتخزينه وحرقه سواء كان بصورة وقود سائل أو غازي.

وقد يبدو غريبا أن الفحم لا يزال يستخدم عالمياً على نطاق واسع في توليد الكهرباء ، ففي بريطانيا يسهم الفحم بأكثر من الثلث في توليد الطاقة الكهربائية ، وتبلغ هذه النسبة نحو 50% في الولايات المتحدة ، 59% في الهند ، ونحو 78% في الصين . ولكن يجب ملاحظة أن السبب في ارتفاع نسبة استخدام الفحم في هذه الدول تحديدا هو أن لديها احتياجات ضخمة جدا من الفحم.

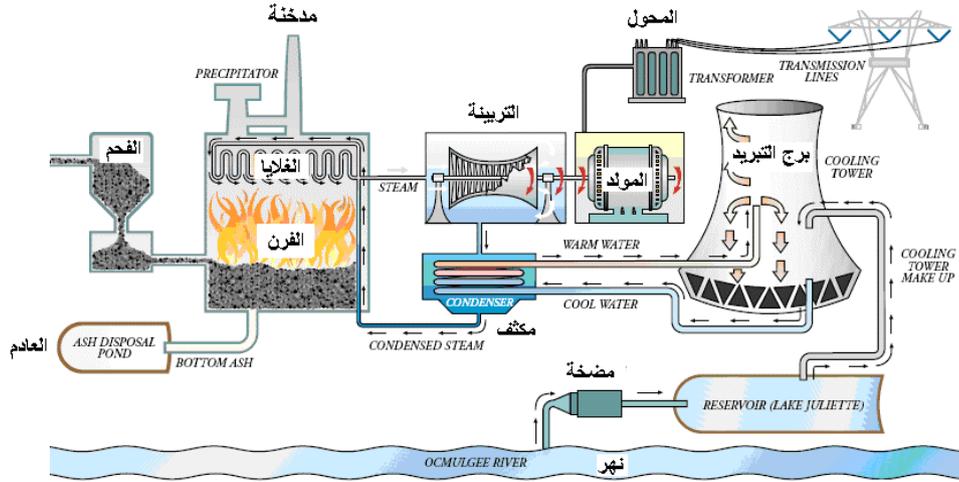
### ملحوظة:

توجد مشكلتان أساسيتان لاستخدام الفحم في مصر .

- أولا أن الفحم حتى الآن لا يمثل أكثر من 1% من إجمالي مصادر الطاقة في مصر (مصدره الأساسي في مصر من منجم المغارة بسيينا).
- ثانيا. الفحم كمصدر للوقود هو من أكثر المصادر تلويثا للبيئة ، والبيئة في مصر ملوثة بشكل لا يحتمل المزيد ، فإنتاج 1 جيجاوات ساعة من محطة تعمل بالفحم ينتج عنها انبعاث 1041 طن من CO<sub>2</sub>.

## 2-1-1 ملخص الدورة البخارية

يمكن مبدئيا متابعة هذه الدورة بصورة مبسطة من خلال الشكل 2-1 الذي يمثل محطة في ولاية جورجيا بأمريكا. وكما هو واضح في الشكل ، فإن مصدر الطاقة الأساسية في هذا المثال تحديدا هو الفحم ، الذي يحترق بالغلاية لإنتاج الحرارة المستخدمة في إنتاج البخار الذي يندفع لتدوير التربينات ، التي تتصل بالمولد كما ذكرنا سابقا. ويظهر بالشكل بعض المكونات المساعدة لإتمام هذه الدورة مثل المكثف الذي يدخل عليه البخار الخارج من التربينات فيتكثف ويتحول لماء مرة أخرى لبدء دورة جديدة. كما يظهر برج التبريد الذي يستخدم في عملية التكتيف السابقة ساحبا الماء من النهر الموجود هناك.



شكل 1-2:

أما الدورة التفصيلية فنعرضها لاحقا بعد شرح مكونات المحطة.

## 2-1-2 اختيار مواقع المحطات البخارية

يتحكم في اختيار المواقع المناسبة لمحطات التوليد الحرارية عدة عوامل مؤثرة نذكر منها:

1. القرب من مصادر الوقود وسهولة نقله إلى هذه المواقع وتوفير وسائل النقل الاقتصادية .
2. القرب من مصادر مياه التبريد لأن المكثف يحتاج إلى كميات كبيرة من مياه التبريد . لذلك تبنى هذه المحطات عادة على شواطئ البحار أو بالقرب من الأنهار ، كما في الصورة.
3. القرب من مراكز استهلاك الطاقة الكهربائية لتوفير تكاليف إنشاء خطوط النقل . ومراكز الاستهلاك هي عادة المدن والمناطق السكنية والمجمعات التجارية والصناعية.



## 2-1-3 كفاءة المحطات البخارية

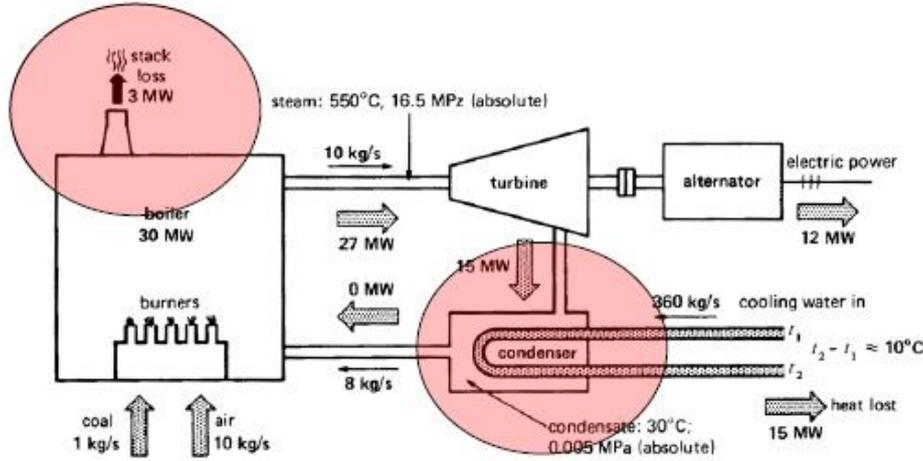
العيب الرئيسي لهذه المحطات هو انخفاض كفاءتها ، ويمكن توقع أو استنتاج ذلك بطريقتين :

- الأولى من خلال دراسة مخطط المحطة والتي يلخصها الشكل 2-2 ، ومنه يتضح حجم الطاقة المفقودة سواء في الهواء الساخن الناتج عن حرق الوقود ، أو خلال المكثفات التي تسترجع البخار لحالته السائلة تمهيدا لإعادة الدورة من جديد.
- الطريقة الثانية وذلك من خلال دراسة طبيعة الآلات الحرارية ، فالكفاءة الحرارية للمحطة تساوى :

$$\eta = \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \times 100$$

حيث  $T_1$  درجة حرارة البخار الداخل و  $T_2$  درجة حرارة البخار الخارج (كلاهما بمقياس كلفن) ، وحيث أنه حرارة الغازات الخارجة لا يمكن أن تكون أقل من حرارة الهواء الخارجى المحيط (لاعتبارات تخص القانون الثانى للديناميكا الحرارية) ، وحرارة الغازات الداخلة لا يمكن أن تتجاوز 550 درجة مئوية لاعتبارات تصنيعية ، فبالتعويض فى المعادلة السابقة نجد أن أعلى كفاءة نظرية لا تتجاوز 64%.

- ▶  $T_2 = 20 + 273 = 293 \text{ K}$
- ▶  $T_1 = 550 + 273 = 823 \text{ K}$
- ▶ Efficiency =  $\left(1 - \frac{293}{823}\right) * 100 = 64.4 \%$



شكل 2-2:

## 2-1-4 الأقسام الرئيسية بالمحطات البخارية

تعتمد فكرة توليد الكهرباء في المحطات البخارية على التكامل بين أقسام المحطة الأساسية:

1. القسم الكيميائي المسئول أساساً عن تجهيز ومراقبة منظومة المياه المستخدمة في الدورة البخارية.
  2. القسم الميكانيكي المسئول عن تحويل الطاقة الحرارية إلى طاقة حركية بتدوير التربينات التي ستقوم بتدوير المولد.
  3. القسم الكهربائي المسئول عن تحويل الطاقة الميكانيكية (الحركية) إلى طاقة كهربائية.
- فيما يلي نشرح بالتفصيل مهام القسمين الكيميائي والميكانيكي في المحطات البخارية. أما الجزء الكهربائي فيدرس لاحقاً بالتفصيل في الفصل الثالث.

## 2-2 القسم الكيميائي في المحطات البخارية

الهدف الرئيسي من هذا القسم هو إمداد جميع مرافق المحطة وبالأخص الغلاية بالماء النقي الذي تصل درجة نقائه إلى 99.5% بحيث يكون هذا الماء خالياً تماماً من الشوائب والأملاح حتى لا يؤثر على كفاءة الغلاية والتربينة ، لأن هذه الشوائب تؤدي إلى تآكل (نحر) ريش التربينات مما يؤدي إلى انخفاض العمر الافتراضي لريش التربينات ، ومن ثم تقليل الكفاءة العامة للمحطة.

وتتضح أهمية هذا القسم في مشكلة محطة توليد معروفة بمصر والتي تسبب ارتفاع نسبة الأملاح والشوائب في البخار في إخراج وحدة توليد كاملة منها بعد سنة واحدة من بداية تشغيل المحطة. وهذا القسم في دول الخليج يكتسب أهمية خاصة لأنه ليس فقط مسئولاً عن توفير المياه المقطرة للمحطة ولكنه أيضاً مسئولاً عن إنتاج مياه عذبة للشرب ، ففي دول الخليج لا يوجد أنهار ، والمصدر الوحيد لمياه الشرب هو تقطير مياه الخليج العربي بواسطة وحدات التقطير distillation units ، ولعلك لا تستغرب إذا علمت أن ثلث الطاقة الكهربائية المولدة هناك في محطات الكهرباء تستهلك مرة أخرى داخل المحطة لإنتاج مياه عذبة بالتقطير (وزارة الكهرباء هناك تسمى دائماً وزارة الكهرباء والماء ، وأعتقد الآن أن السبب صار واضحاً لهذه التسمية) .

### 2-2-1 نظرية عمل القسم الكيميائي:

يتم سحب الماء من النهر بواسطة ظلمبات سحب المياه ، وبالطبع فهذه المياه تحتوي على كميات هائلة من الشوائب التي تتمثل في الأغصان والأسماك والطين والأملاح ، فيتم التخلص أولاً من الأغصان والأسماك عن طريق بعض الشبكات المعدنية ثم يتم التخلص من الطين عن طريق المرشحات ، أما المشكلة الكبرى فتتمثل في الأملاح التي تنقسم إلى جزئين (أملاح ذائبة و أملاح غير ذائبة).

فأما الأملاح الذائبة فيتم التخلص منها عن طريق إضافة بعض المكونات الكيميائية لتحويلها إلى أملاح غير ذائبة وهي التي يتم التخلص منها بعد ذلك عن طريق المرشحات Filters الكيميائية . وأما الشوائب غير الذائبة فهي غالباً تكون عبارة عن أكاسيد المعادن الناتجة عن تآكل المواد المصنوع منها المكثف و مواسير التغذية وهذه يسهل التخلص منها باستخدام الـ Filters.

### 2-2-2 ما هو الرقم الهيدروجيني PH ؟

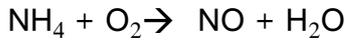
هو بالإنجليزية (power of hydrogen or pH) وهي المقياس الذي يحدد ما إذا كان السائل حمضاً أم قاعدة أم متعادلاً.

- فتعتبر السوائل التي لها درجة PH أقل من 7 أحماضاً مثل عصير الليمون ( 2.4 ) ، الكولا ( 2.5 ) ، الخل ( 2.9 ) ، الحليب ( 6.5 ) .
- وتعتبر السوائل التي لها درجة PH أعلى من 7 محلولاً قلويًا أو قواعد. مثل ماء البحر ( 7.7 ) وصابون اليد ( 9 ) .

- أما درجة الـ  $PH = 7$  فهي تعتبر متعادلة ، وهي تساوي حموضة الماء النقي عند درجة حرارة 25 مئوية.

### 2-2-3 تحسين معامل الـ PH للماء

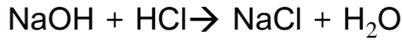
وتتم معالجة مياه التغذية عن طريق إضافة مادة قلوية للماء (غالبا النشادر  $NH_4$ ) لجعل الـ PH للمياه يساوي تقريبا (9.2→9) ، و عندها يقل معدل التآكل ، وبالتالي تقل الشوائب. وتعتبر النشادر أكثر القلويات استخداما في هذه العملية نظرا لقلّة تكلفتها ولاستقرارها عند درجات الحرارة المرتفعة. حيث تتفاعل الأمونيا مع الأكسجين و تمنع تكون أكاسيد المعادن و وبالتالي يقل معدل التآكل.



وتتم معالجة مياه الغلاية لزيادة كفاءة التوربينات والغلايات وذلك بمنع تآكل التوربينات أو تكون القشور على الأسطح الناقلة للحرارة. وتتم معالجة المياه عن طريق التحكم في الـ PH الخاص بمياه الغلاية باستخدام مركب ثلاثي فوسفات الصوديوم  $Na_3PO_4$  الذي يتفاعل مع الماء و ينتج القلويات التي تساعد على تقليل معدل التآكل.



وبالتالي إذا تكونت الأحماض في المياه فسوف يتم معادلتها عن طريق هيدروكسيد الصوديوم



### 2-2-4 اختبارات القسم الكيميائي

بعد ذلك يتم إجراء بعض الاختبارات على الماء للتأكد من درجة نقائه وهي:

#### 1- اختبار التوصيلية:

حيث أن الماء يعتمد في درجة توصيلته على نسبة الأملاح و المعادن الموجودة به ، ولذلك فالتوصيلية العالية تعنى وجود نسبة أملاح ومعادن عالية ، والتوصيلية المنخفضة تعنى قلة نسبة هذه الأملاح والمعادن.

#### 2- اختبار الحامضية:

ومن خلاله يتم اختبار درجة الحامضية والقلوية للماء.

## ثانياً: مكونات القسم الميكانيكي في المحطات البخارية

الهدف الرئيسي من هذا القسم هو تحويل الطاقة الحرارية الكامنة في الوقود إلى طاقة حركية. وتتحوّل هذه الطاقة الحركية بعد ذلك إلى طاقة كهربائية ، وسندرس ذلك في الفصل الثالث.

ملحوظة هامة جداً: الأرقام الواردة في شرح الأجزاء التالية مأخوذة من محطات حقيقية ، وهي بمثابة مثال فقط وليس بالضرورة أن تكون كل المحطات لها نفس القيم ، فأرجو ملاحظة ذلك.

والمكونات الأساسية للقسم الميكانيكي تشمل :

- الغلاية وملحقاتها
- التربينات البخارية وملحقاتها
- المكثف
- مساعدات المحطة Auxiliaries

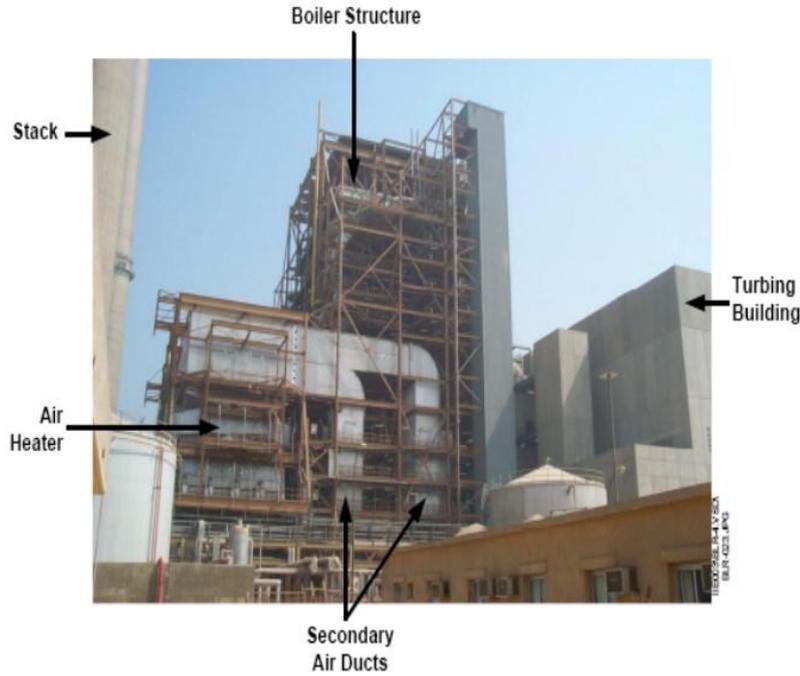
وسنبدأ بعرض العناصر الأساسية يليها الملحقات المتصلة بها.

## 2-3 الغلاية (BOILER)

الغلاية عبارة عن مبنى معزول حرارياً يتكون من عدة (ثلاث) طوابق كما في الشكل 2-3 وهو أكبر مبنى بالمحطة ، ويتميز بوجود مداخن عالية لخروج عوادم الاحتراق . وتعمل الغلاية على توليد البخار المحمص ذو الضغط العالي ، عن طريق حرق الوقود .

و يختلف شكل الغلاية باختلاف الوقود المستخدم ، و يكون البخار الناتج عند درجة 540 درجة مئوية تقريباً و يكون ضغطه في حدود 160 بار . تعمل على توليد البخار المحمص ذو الضغط العالي ، عن طريق حرق الوقود .

وكل وحدة توليد لها غلاية خاصة بها ، وكل غلاية لها مدخنة ، وبالتالي يمكنك معرفة عدد وحدات التوليد بأي محطة من عدد المداخن العالية بها (شكل 2-9 كما سيأتي لاحقاً).



شكل 2-3:

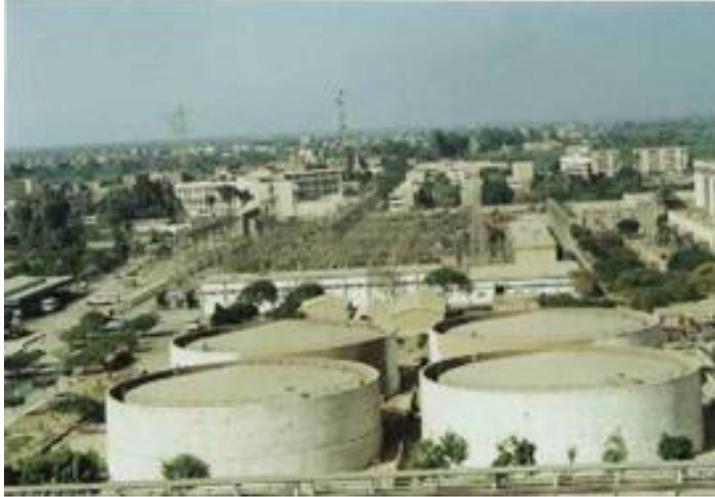
وتتكون الغلاية أساسا من عدد من المهمات ( Equipment ) نوجزها فيما يلي:

### 2-3-1 الفرن (Furnace)

كل غلاية تحتوي على فرن متعدد الوقود يتم تشغيله إما بالمازوت أو بالغاز الطبيعي.

- درجة حرارة الفرن تصل إلى 1500 درجة مئوية.
- الفرن يحتوي على عدد من الحارقات Burners يصل في بعض المحطات إلى 18 حارق مثبتين في جدار الفرن ومقسمين إلى ثلاث مجموعات كل مجموعة في طابق.
- كل حارق يحتوي على أداة إشعال تستخدم لبدء تشغيل الفرن وتستخدم أداة الإشعال السولار كوقود لبدء التشغيل.
- كل وحدة تحتوي على مروحتين Draft Fans وهما المسئولتان عن إمداد عملية الاحتراق بما تحتاجه من هواء مضغوط.
- لابد للمحطة من الاحتفاظ بكمية كبيرة من الوقود مخزنة في خزانات كما في الشكل 2-4. وتكون مواصفات خط تغذية المحطة بالغاز الطبيعي في حدود قطر 30 بوصة وضغط الغاز

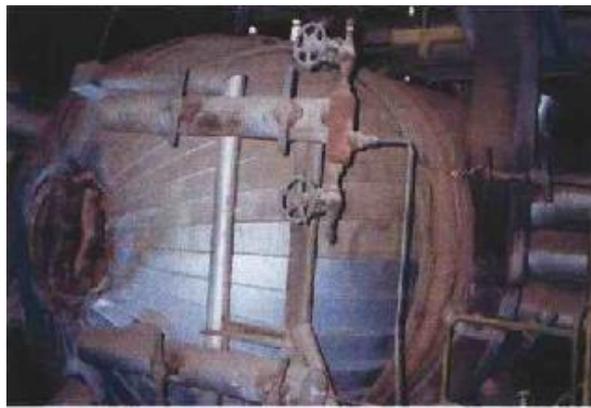
20 بار . وفي الغالب سيكون هناك خط أو خطين آخرين لتوصيل النوع الثاني من الوقود (مازوت مثلاً) .



شكل 2-4 :

### 2-3-2 الدرم (Drum)

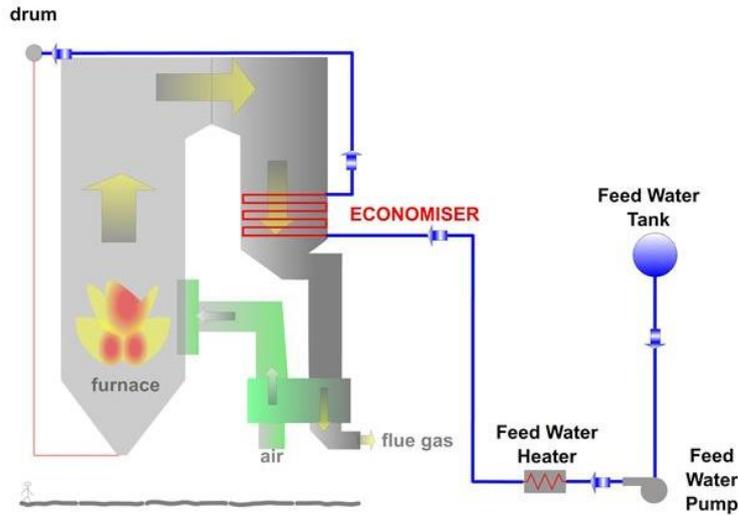
وهو عبارة عن وعاء أسطواني ضخم كما في الشكل 2-5 يتم من خلاله فصل قطرات الماء عن البخار عن طريق إمراره على ألواح مائلة ، ويحتوى الدرم على ست فتحات سفلية من خلالها يتم سحب المياه إلى أنابيب على جدار الفرن والتي تكون مرتبة بحيث تغطي معظم الجدار الداخلي للفرن. كما توجد أربعة صمامات للأمان تفتح في حالة زيادة الضغط داخل الدرم كما توجد في الدرم فتحة دخول للصيانة (man-hole).



شكل 2-5:

## 3-3-2 الموقر (Economizer)

الغازات والعامد التي تنتج من الاحتراق داخل الغلاية تكون درجة حرارتها عالية فيقوم الموقر باستخدام هذه الغازات في تسخين المياه تسخيناً مبدئياً قبل دخولها إلى الغلاية حتى نقلل من كمية الوقود المستهلكة داخل الغلاية. ويظهر الـ Drum and Economizer في الشكل 2-6 ضمن منظومة مصغرة للدورة الحرارية.

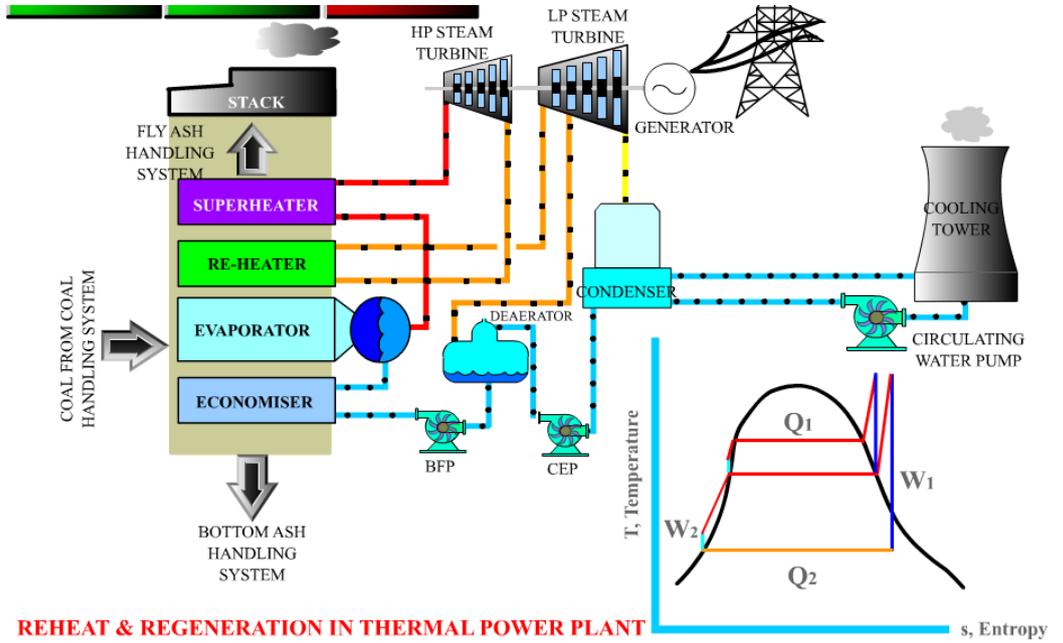


شكل 2-6:

## 4-3-2 المسخنات ( Heaters )

يوجد لدينا نوعان من الـ Heaters ، يمكن من الدورة البخارية الكاملة المرسومة في الشكل 2-7 تمييزهما:

- 1- (Low Pressure Heaters) ، وهي ضمن مجموعة المسخنات المبدئية للماء قبل دخولها إلى الغلاية وتستخدم في عملية تسخين الماء عن طريق استغلال حرارة البخار المستنزف (exhausted steam) وهو البخار الذي خرج من تربية الضغط المنخفض ولا يزال يحتفظ ببعض الحرارة ، فنستفيد من هذه الحرارة في تسخين الماء قبل مروره على الـ (deaerator) كما في الشكل 2-7.
- 2- (High Pressure Re-Heaters) ، وهذه يتم من خلالها تسخين الماء عن طريق البخار المستنزف من تربية الضغط المنخفض وتربية الضغط العالي.



شكل 2-7:

### 5-3-2 وظيفة الـ Deaerator

الدور الأساسي للـ Deaerator (شكل 2-8) ، هو نزع الأكسجين و ثاني أكسيد الكربون وغيرها من الغازات الأخرى التي قد تكون مذابة في الماء الداخل على الغلاية والذي يمكن أن يسبب حدوث عمليات الصدأ في المكونات المعدنية. حيث يخفض نسبة الأكسجين إلى حوالي 7ppm .



شكل 2-8:

## 2-3-6 المدخنة Chimney

تكون المدخنة أسطوانية الشكل مصنوعة من الطوب الحرارى ومرتفعة جدا كي تعمل على طرد الدخان و الأبخرة السامة إلى الهواء على ارتفاع عالي بعيدا عن العمال و البيئة المحيطة بالمحطة . ونظرا لخروج العادم من الغلاية عند درجة حرارة عالية تصل إلى 390 درجة مئوية مما قد يؤدي إلى زيادة التلوث الجوي بالإضافة إلى كونه عادما يحتوي على كميات هائلة من غاز أول أكسيد الكربون ، فإننا نلجأ إلى إمرار العادم على Air Pre-heater حيث يستفاد من درجة الحرارة العالية في تسخين الهواء قبل دخوله للغلاية كما ذكرنا حين الحديث عن الموفر Economizer ، وبعد ذلك نمرر العادم النهائي على مرشحات Filters لاستخلاص الغازات الضارة منه قبل الخروج من المدخنة ذات الارتفاع الشاهق. ودرجة حرارة العادم فى النهاية تخرج عند درجة لا تتعدى 100 درجة مئوية ، وإلا فإن الوحدة يمكن أن تخرج من الخدمة بسبب ارتفاع حرارة العادم.

والشكل 2-9 لمداخن محطة شبرا الخيمة ، التى يراها كل من يمر بطريق إسكندرية الزراعى. (أربع وحدات قدرة كل منها 315 ميجا وات)



شكل 2-9 :

## 2-3-7 الآلات والمعدات المساعدة

وهذه عبارة عن عدد كبير من المضخات Pumps ، والضواغط Compressors و أجهزة القياس الميكانيكية مثل أجهزة قياس الضغط ، و درجة الحرارة في كل مرحلة و بعض الأجهزة الكهربائية مثل أجهزة قياس فرق الجهد ، وأجهزة قياس التيار ، وقياس القدرة ، وغيرها.

وهناك عدة أنواع من مضخات المياه بالمحطات فمنها مضخات سحب الماء من البحر/النهر ، ومنها المضخات التي تقوم برفع ضغط الماء إلى قيمة عالية ليتم تسخينه تحت الضغط المرتفع ويتحول إلى بخار محمّص وهي ظلمبات التغذية Feeding Pumps التي تعمل على ضغط 180-225 بار ، وهذا الضغط يدخل به الماء للغلاية. وغالبا تكون 3 ظلمبات اثنان منهم مضخات تعمل بالديزل والثالثة تعمل بالكهرباء كاحتياطي.

## 4-2 التربينه (TURBINE)

هي الجزء المسئول عن دوران عمود المولد عن طريق تمدد البخار المحمّص الذي يدخل لتدوير التربينه على ضغط عالي وحرارة عالية. وتتكون من عدد من الريش كما في الشكل 2-10 تتحرك بشكل دائري حول محورها و موصلة ميكانيكيا بالمولد حيث يدور المولد بنفس سرعة التربينه ، لذلك يجب أن تدور التربينه بسرعة ثابتة حتى يظل التردد ثابت على المولد . ويتم التحكم في ذلك عن طريق ال Governor الذي سبق الحديث عنه .

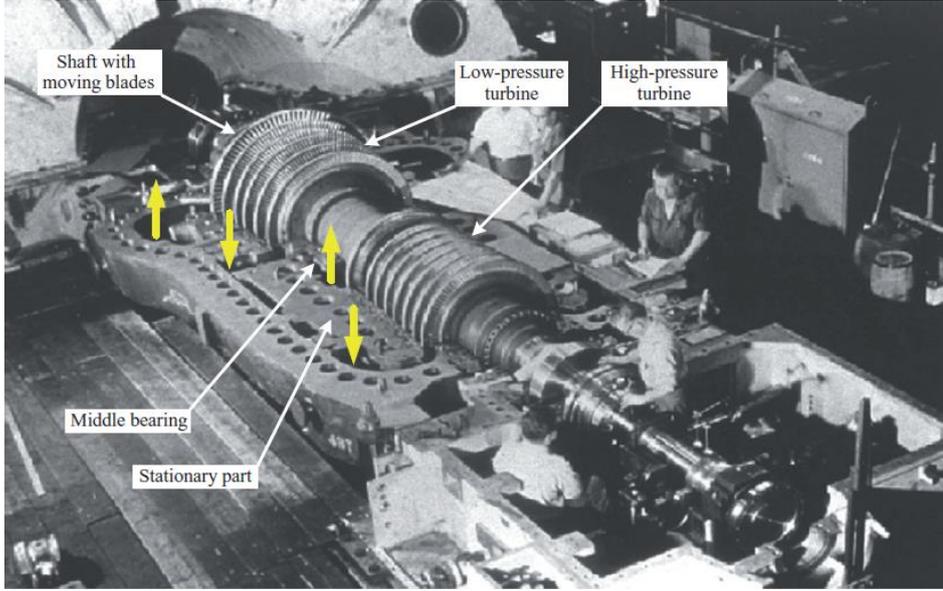
وهذه نموذج لمواصفات إحدى التربينات بقدره 150 ميغاوات:

RATED OUTPUT====>	150000 KW
STEAM PRESSURE->	88 BAR
STEAM TEMPERATURE=>	799
RATED SPEED=====>	3000 rpm
MANUFACTURED IN 1975 TOKYO JAPAN	

والتربينه مقسمة إلى ثلاثة أقسام:

- تربينه الضغط العالي .
- تربينه الضغط المتوسط.
- تربينه الضغط المنخفض.

وكل قسم فى التربيننة يكون عبارة عن عدة دوائر عليها زعانف كما فى الصورة ، و يدخل البخار المرحلة الأولى بضغط 160 بار ، ودرجة حرارة 540 مئوية ، ويخرج البخار بعد المرحلة الأولى إلى الغلاية مرة أخرى ليكتسب مزيدا من الطاقة ، ثم يعود ليدخل المرحلة الثانية على ضغط 40 بار ونفس درجة الحرارة. ويدخل على التربيننة ما يقرب من 800 طن بخار بالساعة.



شكل 2-10:

## 2-4-1 نظام التزييت Lubrication فى التربيننة

يوجد خلوص (فراغ) بين التربيننة وجسمها ، ويتم ملاً ذلك الفراغ بالزيت لمنع الاحتكاك وتجنب الحرارة العالية ، والمساعدة على تبريد هذه الأجزاء وكذلك تساعد على سهولة حركة عمود التربيننة . ويوجد نظام خاص بالتزييت يتكون من خزان زيت يحتوى بداخله على الزيت ، ومضخات رئيسية مركبة على عمود التربيننة وتعمل على سحب الزيت من الخزان ودفعه إلى أماكن معينة بالتربيننة ، كما يوجد أيضا مضخات مساعدة تستخدم فى بداية التشغيل ويوجد أيضا مضخة الطوارئ التي تعمل عند انقطاع التيار الكهربى عن الوحدة حيث تقوم بسحب الزيت من الخزان وتدفعه إلى مجمع الزيت بعد مروره بمبردات الزيت.

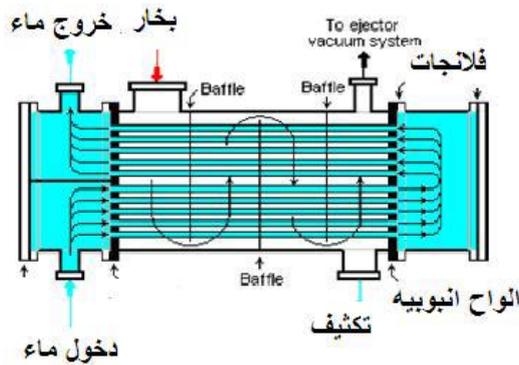
وهذا النظام يعتبر من الأنظمة الحرجة فى المحطة ، وحدث أى مشكلة فيه تؤدي إلى توقف الوحدة تماما.

## 2-4-2 عملية تدوير Rotation التريينة

يجب بقاء عمود إدارة التريينة مستقيماً خلال فترات توقف الوحدة عن العمل ، والسبب في ذلك أنه عند إيقاف عمود دوران التريينة نجد أن النصف السفلي من العمود يبرد بمعدل أسرع من النصف العلوي وهذا يؤدي إلى حدوث التواء أو إنحناء في عمود دوران التريينة ، ولذلك يتم دوران عمود التريينة ببطء حتى تتساوى درجة الحرارة على جميع نقاط العمود من أعلى ومن أسفل (عملية إيقاف دوران التريينة تستغرق ساعات).

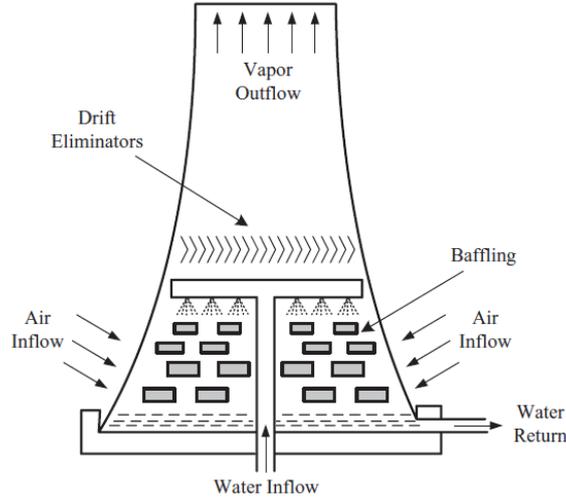
## 2-5 المكثف (CONDENSER)

وهو المسئول عن تكثيف البخار Condensation الخارج من التريينة قبل أن يضخ مجدداً للغلاية حيث أنها تقوم بخفض ضغطه ودرجة حرارته عن طريق مياه تبريد تسحب من النهر/ الخليج. وفكرة عمل المكثف (شكل 2-11) هو أنه يأخذ المياه الباردة من المحيط أو البحر أو النهر ويمر البخار المراد تكثيفه في مواسير تمر عليها هذه الكمية من المياه الباردة - في مواسير أخرى - وعن طريق التبادل الحراري يكتسب الماء البارد الحرارة الموجودة في البخار حتى يتكثف. مع ملاحظة أن دورة التبريد دورة مفتوحة أي أن الماء يتغير بشكل مستمر حتى يطرد الحرارة التي اكتسبها في النهر أو البحر ثم ينتقل البخار المكثف إلى المضخة الذي يعيد ضخه للغلاية .



شكل 2-11:

وفي حالة عدم وجود مصدر مائي للتبريد (نهر مثلا ) يمكن استخدام أبراج التبريد كما في الشكل 12-2 ، حيث يدخل الماء من أعلى على شكل رذاذ Shower ويدخل تيار هواء من أسفل للتبريد فيتكثف الماء البارد لأسفل.



شكل 12-2:

وبالتبع سنفقده بعضا من الماء على صورة بخار وهذا هو السبب في رؤية الدخان الأبيض من هذه الأبراج كما في الشكل 13-2.



شكل 13-2:

وهذه صورة لإحدى المحطات فى أوهايو بأمريكا (وحدتين فقط بقدرة 2600 ميغاوات) وتظهر فيها بعض العناصر التى ذكرناها فى الجزء السابق.



## 2-6 الدورة البخارية تفصيليا

بعد عرض المكونات التفصيلية للقسم الميكانيكى بالمحطة ، يمكن الآن دراسة الدورة البخارية بصورة أكثر تفصيلا من خلال الشكل 2-14. وسوف نعتبر مجازاً أن بداية رحلة الماء داخل المحطة تبدأ داخل الغلاية حيث يدخل الماء بعد مروره على الـ Economizer إلى الـ (Drum) داخل الغلاية والذي يغذي مواسير المياه التي تغطي السطح الداخلي للغلاية ويتم تسخين الماء عن طريق الـ Burner يدخل إليه الوقود و الهواء الساخن المضغوط بحيث يحقق النسبة النظرية (Air/Fuel).

وبعد ذلك ينتقل البخار من (الدرم) ليمر خلال محمصات Super heaters لزيادة درجة حرارة وضغط البخار بمقدار كبير حينئذ يسمى هذا البخار بالبخار المحمص حيث تصل درجة حرارته إلى (542 درجة مئوية) وضغطه إلى (105 كجم/سم<sup>2</sup>)

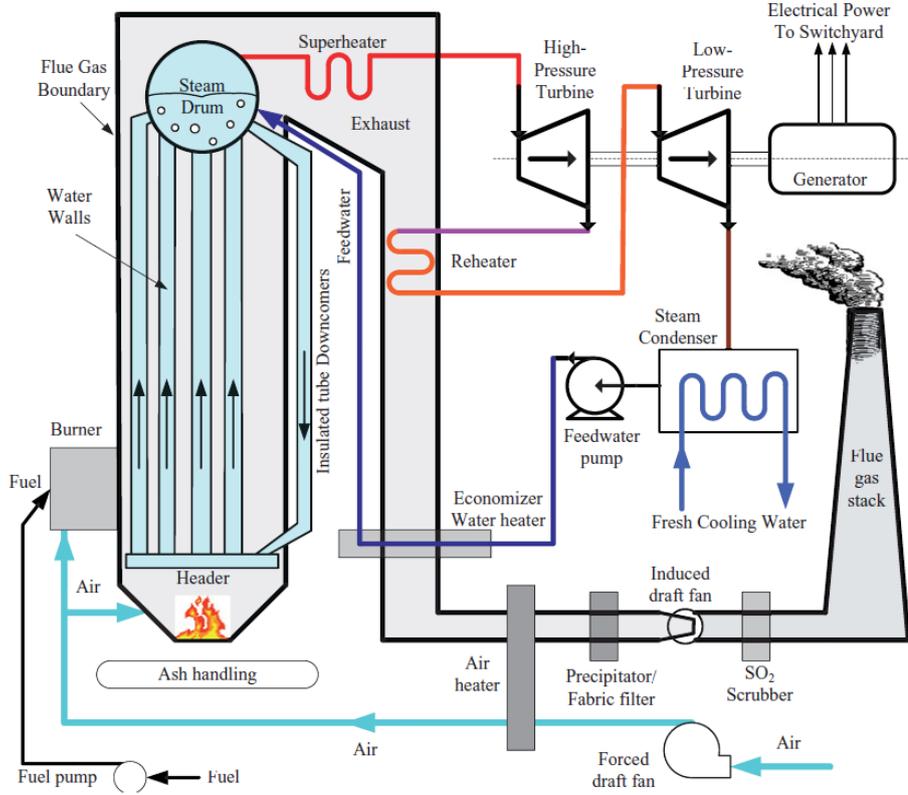
ثم يمر هذا البخار المحمّص من خلال صمامات الـ Governor التي تفتح حسب الحمل المطلوب ليدخل إلى تربينة الضغط العالي ، فيتم تدوير الـ Shaft بواسطة هذا البخار المندفع ، بعد أن يتم البخار عمله داخل تربينة الضغط العالي يخرج البخار في درجة حرارة (320 درجة) ويكون الضغط أيضا قد انخفض إلى (30 كجم/سم<sup>2</sup>)

ثم يمر هذا البخار المستنزف (الذي فقد معظم طاقته) Exhausted مرة أخرى إلى الغلاية لإعادة تسخينه عن طريق ملفات تسخين Reheater ، حيث يخرج منها البخار في درجة حرارة عالية ولكن عند ضغط أقل من تربينة الضغط العالي ، ويدخل هذا البخار إلى تربينة الضغط المتوسط ويعمل على إدارتها. لاحظ أن ريش تربينة المرحلة الثانية أكبر من ريش المرحلة الأولى بسبب نقص الضغط.

و في بعض المحطات يدخل البخار من المرحلة الأولى من التربينة مباشرة إلى المرحلة الثانية مع التعزيز بكمية أخرى من البخار ، ثم يخرج البخار مباشرة إلى مرحلة الضغط المنخفض حيث تكون التربينة قد وصلت إلى أقصى عزم مرجو منها ويكون الناتج عن مرور البخار بمراحل التربينة الثلاثة هو وصول سرعة التربينة إلى 3000 لفة في الدقيقة وهي سرعة الدوران المطلوبة للحصول على التردد المطلوب (50 هرتز) وذلك تبعاً للقانون:

$$f = \frac{p \times n}{120}$$

وعند هذه السرعة يتم ربط التربينة بالمولد فيؤدي إلى دوران الـ Rotor ومن ثم توليد الكهرباء.



شكل 2- 14:

ينتقل بعد ذلك البخار بعد أن يكون استنفذت تقريباً كل طاقته إلى المكثف حيث يتم تكثيف البخار عن طريق خفض ضغطه وتبريده بماء بارد يسحب من النهر ويمر خلال مرشحات Filters. ويخرج الماء المتكثف Condensed Water إلى مضخات ترفع ضغطه استعداداً لمروره على مسخنات الضغط المنخفض ومنها إلى الـ Deviator الذي يعمل على تعويض الفاقد من الماء في هذه الدورة.

ويخرج الماء في هذه المرحلة عند درجة حرارة 270 درجة ويدخل إلى طلمبة تغذية الغلاية لرفع ضغط الماء إلى الضغط المطلوب داخل الغلاية ثم يمر بعد ذلك إلى الموفر (Economizer) الذي يساهم أيضاً في رفع درجة حرارة الماء والبخار. ثم يعود الماء إلى داخل الدرم ليقوم بدورة جديدة.

## 2-6-1 تغير الحمل على الوحدة

يتم اكتشاف أية زيادة أو نقص في الحمل بسرعة ، بواسطة (Management System) الذى يقوم بإرسال إشارة إلى كل من ( Feed Water Control Valve ) لدخول كمية مياه أكثر إلى الغلاية ، كما يتم إرسال نفس الإشارة إلى (Forced Draft Fan) وهي مراوح كبس الهواء لزيادة كمية أكثر من الهواء لاحتراق الوقود ، ومن ثم فإن الـ (Governor Valve) يسمح بمرور كمية أكبر من البخار إلى التربينه ، ومن ثم يزداد Mechanical Torque حتى يتساوى مع Electric torque فى قيمته الجديدة ويعود المولد إلى الاتزان مرة أخرى كما سبق أن ذكرنا في الفصل الأول.

## 2-6-2 فصل الوحدة Shut Dawn

إذا تم فصل التربينه بسبب حدوث خطأ ما يستدعى الفصل ( مثل زيادة سرعة الدوران أو نقصها بدرجة كبيرة ) فإن الغلاية بعد الفصل ستكون لاتزال تولد كمية بخار بدرجة حرارة وضغط عاليين ولا يوجد تصريف ، وهذا قد يؤدي إلى انفجار الغلاية. وللتغلب على ذلك يتم عمل مسار فرعي يسمى By-pass لإكمال الدورة دون المرور على التربينه ويكون هذا المسار به صمامات مغلقة لا تفتح إلا عند فصل التربينه.

## محطات التوليد ذات الاحتراق الداخلي

### Internal Combustion Engines

محطات التوليد ذات الاحتراق الداخلي هي عبارة عن آلات تستخدم الوقود السائل ( Fuel Oil ) حيث يحرق داخل غرف احتراق بعد مزجه بالهواء بنسب معينة ، فتتولد نواتج الاحتراق وهي عبارة عن غازات على ضغط مرتفع تستطيع تحريك المكبس كما في حالة ماكينات الديزل ، أو تستطيع تدوير التوربينات في حركة دورانية كما في حالة التوربينات الغازية .

وهي نوعان :

- النوع الأول: محطات التوليد الغازية (البسيطة والمركبة)
- النوع الثاني : مولدات الديزل.

النوع الأول من محطات الاحتراق الداخلي:

## محطات التوليد الغازية

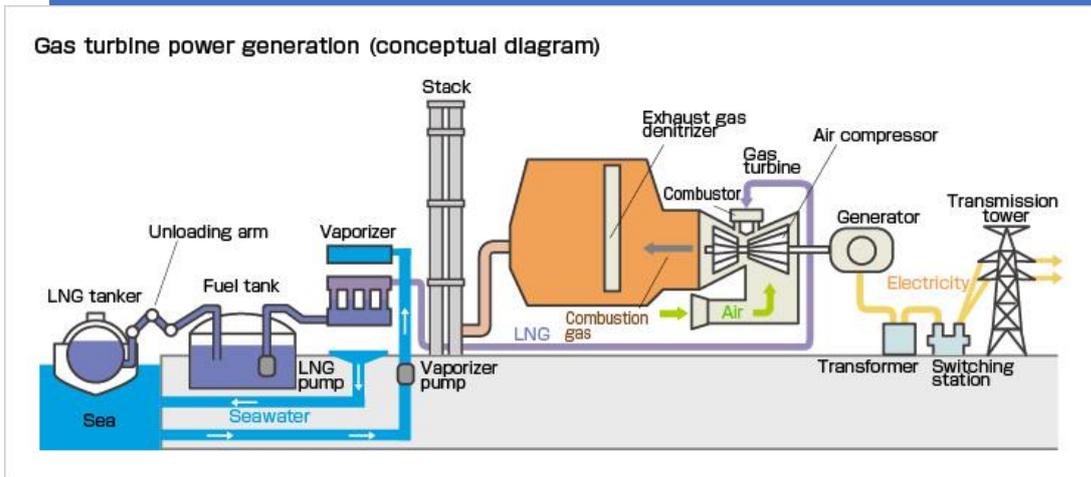
تعتبر محطات توليد الكهرباء الغازية حديثة العهد نسبيا ، ويعتبر الشرق الأوسط من أكثر البلدان استعمالا لها ، وهي ذات ساعات مختلفة من 1 ميجاوات إلى 250 ميجاوات (وحدات سيمنس الجديدة تصل إلى 400 ميجاوات) ، و تستعمل عادة عند زيادة الحمل.

و يعمل التوربين الغازي على أنواع كثيرة من الوقود ، فهو يعمل على الغاز الطبيعي وعلى الديزل والجازولين وحتى على النفط الخام ، ومن مزاياه سرعة التشغيل (عدة دقائق) بعكس التوربين البخاري الذي يحتاج إلى تجهيز وإعداد لعدة ساعات. ومن مزاياها أيضا أنها لا تحتاج لعمالة كثيرة ، وتشغل حيزا أصغر من المحطات البخارية.

ولكن يعيب هذه المحطات احتياجها لكميات كبيرة من الوقود وانخفاض كفاءتها ما لم تكن جزءا من محطة دورة مركبة. إضافة إلى أن عمرها الافتراضي ( 15 : 25 ) سنة يعتبر صغيرا نسبيا مقارنة بالبخارية.

## 7-2 مكونات محطات التوليد الغازية :

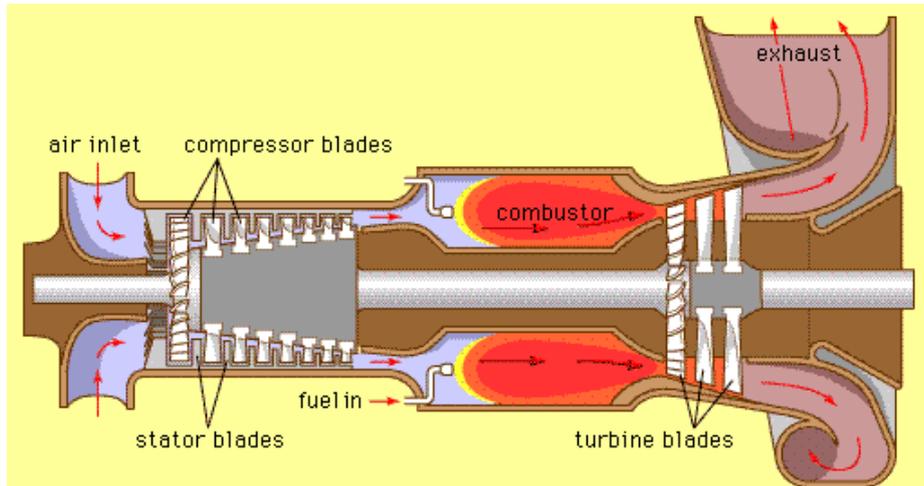
الأجزاء الرئيسية التي تتكون منها محطة التوليد الغازية تظهر في الشكل 2-15 . و فيما يلي سنشرح أجزائها بصورة تفصيلية:



شكل 2-15:

### 2-7-1 الكباس الرئيسي للوحدة

يعتبر كباس الهواء الرئيسي - Air Compressor هو المحطة الأولى لدخول الهواء اللازم لإتمام عملية الاحتراق ، حيث يدخل إليه الهواء بضغط 1 بار ويقوم هو بضغط الهواء في مراحل متعددة تصل إلى 16 مرحلة في بعض الأنواع حتى يصل الضغط إلى 10.5 بار تقريباً في المرحلة الأخيرة ، ثم يدخل الهواء إلى غرف الاحتراق ليختلط مع الوقود وتتم عملية الاحتراق (شكل 2-16).



شكل 2-16:

## ملحوظة:

يدخل الهواء أولاً إلى الوحدة عن طريق الكباس الرئيسي من خلال مجموعة من الفلاتر التي تعمل على تنقية الهواء الداخل إلى الكباس لأن دخول الأتربة على ريش الكباس ستتسبب في تدمير الريش ، ويوجد أيضاً نظام للتنظيف الذاتي يقوم بتنظيف فلاتر الهواء من الأتربة المتراكمة فيها .

## 2-7-2 غرفة الاحتراق

وفيها يختلط الهواء المضغوط الآتي من مكبس الهواء مع الوقود ويحترقان معا بواسطة وسائل خاصة بالاشتعال. وتكون نواتج الاحتراق من الغازات المختلفة على درجات حرارة عالية جدا و ضغط مرتفع.

يدخل الهواء إلى غرف الاحتراق الداخلي الموضوعه بشكل حلقي Annular بحيث يقوم الهواء بعمل وظيفتين :

- الاختلاط مع الوقود لإتمام عملية الاحتراق
- تبريد الجدران المحيطة بالغرفة

و الغرفة لها جدار داخلي يتكون من بلاطات مقاومة حراريا ثم مدخل الهواء الخارج من الكباس ثم نظام الوقود ويوجد على الغرفة نظام بادئ الإشعال Ignition system كما يوجد نظامين للحريق وهما Diffusion و الـ Premix

يقوم محول بادئ الإشعال بإعطاء إشارة الإشعال على المواقد Burners في نفس الوقت التي تقوم فيه المواسير الخاصة بالإشعال بإخراج الغاز إلى أن يتكون الحريق الأساسي Main Flame" وفي بداية تشغيل الوحدة يكون نظام الحريق Diffusion وهو عبارة عن لهب طويل ومركز يمر من أعلى نقطة في غرفة الحريق بعد الموقد إلى قرب نهاية الغرفة ليضمن وجود حريق في جميع أنحاء الغرفة.

وبعد أن تدخل الوحدة على الشبكة عند تردد 50 هرتز 3000 RPM وترتفع الميجاوات للوحدة تزداد درجة الحرارة إلى أن تصل إلى 470 درجة وعندها يتم التحويل من نظام الحريق Diffusion إلى نظام الحريق premix.

**نظام الحريق : Premix**

هو لهب قصير وموزع بانتظام على الغرفة و يقوم بعملية الاحتراق دون أن يؤثر على الغرفة كنظام الـ Diffusion وهو يدخل من بعد درجة حرارة 470 درجة إلى أن تصل الحرارة إلى 500 درجة وهي أقصى درجة حرارة تتحملها الوحدة.

بعد أن تتم عملية الاحتراق داخل غرفة الاحتراق الداخلي نتيجة خلط الهواء المضغوط بضغط عالي مع الوقود سواء كان هذا الوقود وقوداً غازياً أو وقوداً سائلاً تكون نواتج الاحتراق غازات بدرجة حرارة تصل إلى 1050 درجة مئوية ومضغوطة بضغط عالي قد يصل إلى 10.5 بار عندها تدخل هذه الغازات إلى التربيننة حيث يحدث تمدد لها داخل التربيننة وتبدأ التربيننة في الدوران.

**2-7-3 التربيننة الغازية Gas Turbine**

و هي عبارة عن تربينة محورها أفقى (شكل 2-17) مربوط من ناحية مع محور مكبس الهواء Air compressor مباشرة و من ناحية أخرى مع المولد الكهربى فتدخل الغازات الناتجة عن الاحتراق في التوربين فتصطدم بريشها الكثيرة العدد من ناحية الضغط المنخفض وتخرج إلى الهواء عن طريق المدخنة .



شكل 2-17:

## 2-7-4 المولد الكهربى

يتصل المولد الكهربى مع التوربين بواسطة صندوق تروس لتخفيف السرعة لأن سرعة التوربين عالية جدا بالنسبة لسرعة المولد. والمولد الكهربى يستخدم لتحويل الطاقة الميكانيكية الناتجة عن دوران الـ shaft بين التوربين و المولد الكهربى إلى الطاقة الكهربائية. وسنعرض بمزيد من التفصيل للمولد فى الفصل الخاص بالقسم الكهربى فى المحطات.

## 2-7-5 الآلات والمعدات المساعدة للتربينة الغازية

تحتاج محطات التوليد الغازية إلى بعض المعدات و الآلات المساعدة مثل:

- 1- مساعد التشغيل الأولى ، وهو إما محرك ديزل أو محرك كهربى
- 2- وسائل مساعدة على الاحتراق
- 3- آلات تبريد مياه لتبريد المحطة
- 4- معدات قياس الحرارة والضغط فى كل مرحلة من مراحل المحطة
- 5- معدات القياس الكهربائية المختلفة مثل: الأميتر - الفولتميتر - الواتميتر.

## 2-7-6 طريقة البدء فى المحطات الغازية

فى المحطات الغازية لا يتم عمل إشعال Fire للغاز الداخلى على المولد من الثبات (بمعنى لا يبدأ الاحتراق إذا كانت التربينه لم تبدأ الدوران بعد ) ، ولكن يتم تشغيل المولد باستخدام Starting Motor منفصل ، ويبدأ المولد يبدأ العمل كموتور ثم بعد الوصول لسرعة 550 لفة فى الدقيقة تقريبا يتم عمل Fire ودخول الغاز على التربينه.

ملحوظة:

البلاد التى تعتمد على استيراد الغاز لتشغيل محطات الكهرباء بها يجب أن تتوفر لديها البنية التحتية الخاصة بإعادة تحويل الغاز المسال إلى حالته الغازية *Regasification* ، وهذه البنية الأساسية تشمل إنشاء ميناء ومحطات تخزين (هناك أنواع من السفن تعمل كمصنع متحرك لإسالة الغاز المستورد وتستأجرها بعض الدول لحل أزمة الغاز فى محطات الكهرباء لديها).

## 2-7-8 صمامات طرد الهواء BLOW OFF VALVES

لإيقاف الحمل على ضاغط الهواء Compressor فى التربينه الغازية أو لإيقاف التربينه يتم فتح صمامات تسمى صمامات طرد (نرف) الهواء والتي بدورها تقوم بطرد الهواء إلى خارج

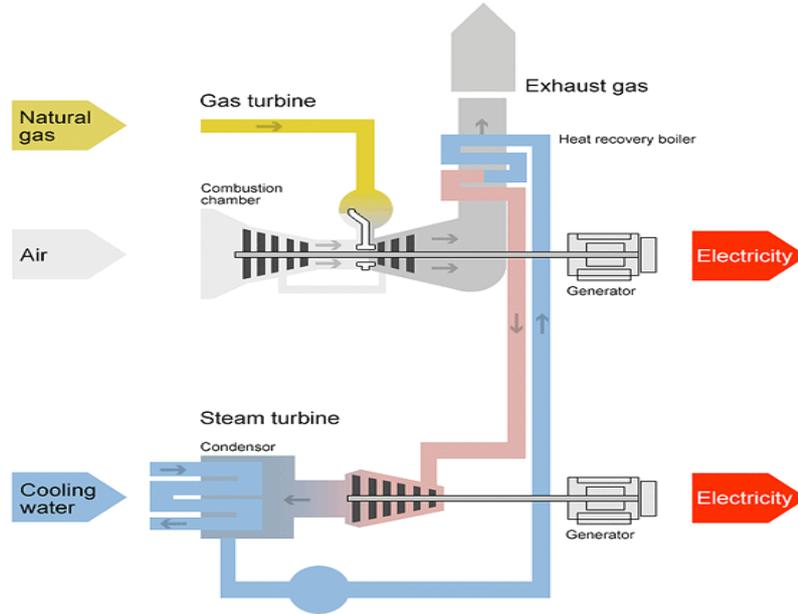
الضاغط ليكون حمل الضاغط أقل من 30% . والهدف من ذلك تفادى حدوث surge في الضاغط بسبب اختلاف عزم الضاغط وعزم التربينه ، ويتم تمرير الهواء المطرود إلى مجرى العادم. مع ملاحظة أنه إذا حدث زيادة في فرق الضغط ما بين فلاتر الكباس و مدخل الكباس فسيؤدي ذلك إلى وجود ضغط عكسي Back pressure يمكن أن يعمل على تدمير ريش الكباس الرئيسي.

## محطات الدورة المركبة

تتكون المحطات ذات الدورة المركبة Combined Cycle من وحدة غازية ووحدة بخارية ، حيث ينتج عن الوحدة الغازية نواتج احتراق تصل درجة حرارتها إلى 500 درجة مئوية ، وهذه النواتج تهدر في الجو دون استعادة منها. و السؤال هنا كيف نستفيد من هذه الطاقة المهدرة؟

## 8-2 فكرة عمل الدورة المركبة COMBINED CYCLE

تقوم فكرة عمل الوحدات المركبة (شكل 2-18) على الاستفادة من الطاقة المهدرة في الغازات الساخنة الخارجة من التربينات الغازية من خلال إنتاج كمية البخار اللازمة لتشغيل تربينة البخارية تضاف إلى الوحدة ، وتتم هذه العملية من خلال وحدات استعادة الطاقة Heat Recovery Steam Generator ، HRSG ، وهذه الوحدات تقوم مقام الغلاية والفرن في الوحدات التقليدية ، مما يحقق توليد طاقة إضافية وتوفر ثلث كمية الوقود المستخدمة بالمقارنة بالوحدات البخارية. لاحظ أن الوحدة البخارية في محطات الدورة المركبة لا تستخدم أى وقود ، وإنما فقط تستخلص الطاقة من غازات الوحدة الغازية.



شكل 2-18:

يبدأ العمل من الوحدة الغازية بأخذ الهواء الجوي بعد مروره على الفلاتر لتتقيته ، ثم يدخل على الضاغط الذى يقوم بضغط الهواء ، ثم يمر على غرف الاحتراق وتخرج الغازات المحترقة من غرفة الاحتراق للدخول على التربينه الغازية وبعد ذلك يدور المولد وتولد الكهرباء (من الوحدة الغازية كما فى المحطة الغازية البسيطة).

أثناء ذلك تمر الغازات الساخنة الخارجة من التربينه الغازية إلى وحدة الـ HRSG لتحويل المياه إلى بخار كما سبق شرحه فى المحطات البخارية.

## 2-8-1 وحدة الـ HRSG:

وحدات استعادة الطاقة Heat Recovery Steam Generator ، HRSG والتي تظهر فى الشكل 2-19 تقوم مقام الغلاية والفرن فى الوحدات التقليدية فى آن واحد وهو بالفعل كذلك حيث يتكون داخليا من :

- Economizer
- Super heater and Water preheater
- Evaporator

ووظيفة الـ HRSG هى استخلاص الحرارة من الغازات القادمة من الوحدة الغازية فى توليد البخار اللازم للوحدة البخارية.

ومن مهام الـ HRSG الأخرى أنه يتم من خلالها التحكم فى الانبعاثات الناتجة من العوادم التي تخرج للهواء عن طريق نوعين من المحفزات Catalysts متواجدين فى الـ Heat Recovery Steam Generator (HRSG) ، أولهم يتحكم فى مقدار أول أكسيد الكربون الموجود فى العوادم ، و الآخر يتحكم فى أكاسيد النيتروجين .

وبعض أنواع من الـ HRSG تكون مزودة بـ duct firing من أجل إعطاء مزيد من الطاقة أكثر من التي حصل عليها من خرج الوحدة الغازية من أجل الحصول على كمية أكبر من البخار.

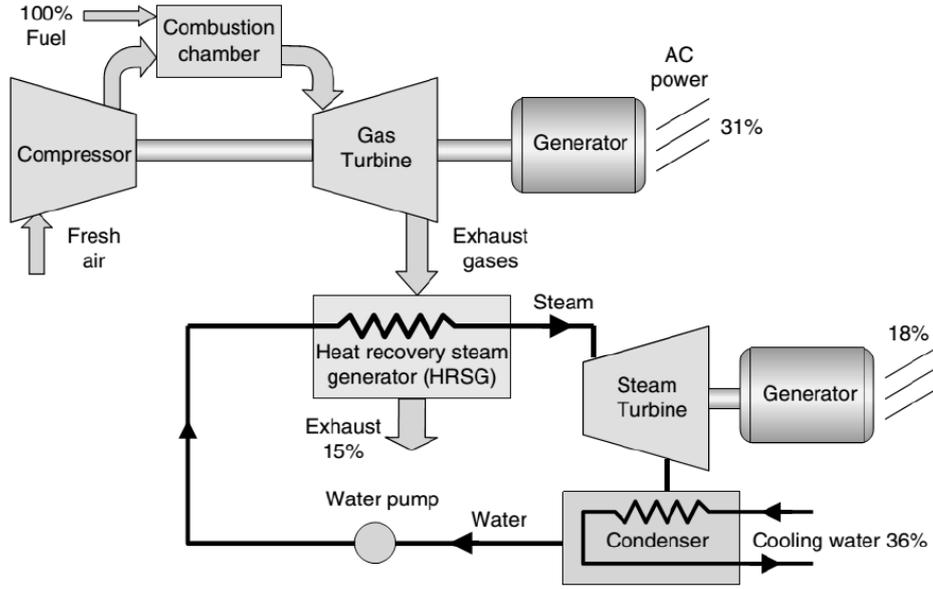


شكل 2-19:

### 2-8-2 كفاءة محطات الدورة المركبة:

كفاءة المحطات الغازية بمفردها لا تتعدى 30% كما في الشكل 2-20 ، لكن عند تركيب وحدة بخارية معها تزيد الكفاءة للإثنين معا إلى ما يقرب 52% . (وحدات الجيل الجديد تصل إلى 61% ) . حيث يساهم هذا الأسلوب في رفع كفاءة المحطة ، علما بأن ثلث القدرة تنتج من البخار (18%) و الثلثين (31%) من الغاز أو الوقود الحفري المستخدم .

و يمكن الاستفادة أيضا من درجة حرارة هواء العادم الذي يخرج من الـ HRSG و التي تصل إلى 140 درجة في الاستخدامات الصناعية الأخرى .



شكل 2-20:

### 2-8-3 مزايا محطات الدورة المركبة :

- تكلفة محطات الدورة المركبة أقل بكثير من نظيرتها من المحطات التي تعتمد فقط على البخار Steam power plants لنفس القدرة الكهربية.
- لا تحتاج الكثير من الوقت للصيانة.
- المخلفات الصلبة تعتبر أقل بكثير من المحطات الأخرى .
- المحطة لا تحتاج إلى مصدر طاقة خارجي لبدء التشغيل في حالة خروجها عن العمل للصيانة.
- سرعة الدخول على الشبكة حين الحاجة إليها.

### 2-8-4 أمثلة لمحطات الدورة المركبة في مصر:

1. محطة طلخا في المنصورة - سعة : 750 ميغاوات
  - تتكون من وحدتين غازيتين كلا منها 250 ميغاوات بالإضافة إلى وحدة بخارية بسعة 250 ميغاوات.
2. محطة دمنهور - سعة 158 ميغاوات
  - عدد 4 توربينات غازية قدرة كل منها 25 ميغاوات + ترينة بخارية بقدرة 58 ميغاوات.

## 3. محطة الكريما المركبة 1 و 2 :

○ كلا منها يتكون من 2 ترينة غازية بقدرة 250 لكلا منها + ترينة بخارية 250 ميغاوات. وهي تعمل بوقود الغاز الطبيعي كوقود أساسي ووقود السولار كوقود بديل وترتبط هذه الوحدات المركبة بالشبكة الكهربائية الموحدة من خلال ست دوائر كهربائية جهد 220 كيلو فولت و تغذي محطات محولات دمو و بني سويف و البساتين.

والشكل 2-21 يمثل صورة لإحدى محطات الدورة المركبة في فرنسا.



شكل 2-21:

النوع الثاني من محطات الاحتراق الداخلي:

## توليد الكهرباء بواسطة الديزل

### Diesel Power Station

تستعمل ماكينات الديزل (شكل 2-22) في توليد الكهرباء في أماكن كثيرة وخاصة في المدن الصغيرة والقرى . وهي تمتاز بسرعة التشغيل وسرعة الإيقاف ولا تحتاج إلى مساحة كبيرة من الأرض لقلّة المساعدات فيها ، ولا تحتاج لأعمال مدنية كثيرة عند الإنشاء .



شكل 2-22:

ولكنها تحتاج إلى كمية مرتفعة من الوقود نسبياً وبالتالي فإن كلفة الطاقة المنتجة منها تتوقف على أسعار الوقود . ومن ناحية أخرى لا يوجد منها وحدات ذات قدرات كبيرة . أما في محطات القوى فتستخدم ماكينات الديزل ذات القدرات الكبيرة والتي تتراوح من 3 إلى 5 ميغاوات .

وهذه المولدات سهلة التركيب وتستعمل كثيراً في حالات الطوارئ أو أثناء فترة ذروة الحمل . في هذه الحالة يعمل عادة عدد كبير من هذه المولدات بالتوازي لسد احتياجات مراكز الاستهلاك .

كما أن منها نوع يحمل على سيارات كما فى الشكل 2-23 . ويمكن نقله إلى الأماكن التى تحدث بها مشكلة كبيرة فى التغذية الرئيسية ، وتحتاج لتوليد مؤقت ، فىمكن بسهولة نقل هذه المولدات إليها (سعر الميجاوات من هذه الوحدات يصل إلى حوالى مئة ألف دولار).



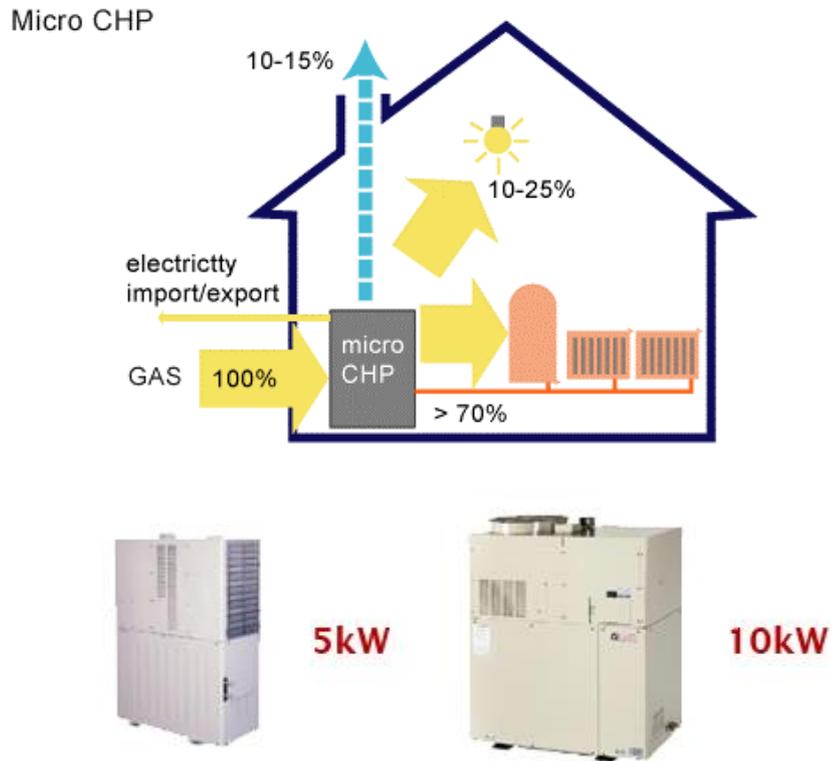
شكل 2-23:

ومن عيوب هذه المحطات احتياجها لصيانة متكررة بسبب كثرة الأجزاء المتحركة فيها . وكعادة المحطات الحرارية لا تتجاوز كفاءتها 35% .

## 9-2 توليد الكهرباء بواسطة MICRO CHP

نفس الفكرة السابقة فى محطات التوليد الغازية المركبة تستعمل الآن على نطاق واسع ولكن بأحجام توليد صغيرة ضمن تكنولوجيا تسمى Micro Combined Heat and Power, والفكرة فيها هى استخدام مولد صغير للكهرباء يعمل بالغاز فى منزل أو مؤسسة صغيرة لتوليد الكهرباء (متاح بالسوق من 1 وحتى 50 kW )، ثم يتم الاستفادة من الفوائد الحرارية له فى تسخين المياه بالمنزل ، وبالتالي تصبح كفاءة المنظومة أعلى من مجرد توليد الكهرباء فقط وتصل إلى 85%.

والشكل 2-24 يشرح ببساطة فكرة هذه المنظومة.



شكل 2-24:

## 3

## القسم الكهربى فى محطات التوليد

هو الجزء المسئول عن إنتاج الطاقة الكهربائية فى منظومة القوى ، بمعنى آخر هو الجزء المسئول عن تحويل الطاقة الحركية الدورانية إلى طاقة كهربية . وفيما يلى أهم العناصر والمنظومات فى القسم الكهربى بمحطات التوليد :

- 1- المولد الكهربى (Generator)
- 2- المحولات (Transformers)
- 3- منظومة المجال المغناطيسى (Excitation System)
- 4- دوائر الـ Power Circuits التى تقوم بنقل القدرة من المولدات إلى محولات الرفع
- 5- دوائر القدرة المساعدة لتغذية جميع مساعدات المحطة
- 6- خلايا الجهد المتوسط (Switch Gear 6.3 KV)
- 7- حوش المفاتيح ( Switch Yard )
- 8- خلايا الجهد المنخفض عالية القدرة (Power Center)
- 9- خلايا الجهد المنخفض ( MCC ، Motor Control Center )
- 10- منظومة الجهد الغير منقطع ( Ups ، Uninterruptable Power Supply )
- 11- دوائر الإنارة لإضاءة المحطة وإمداد القدرة لأجهزة الخدمة والصيانة
- 12- منظومة البطاريات والشواحن (Battery & Battery charger)
- 13- منظومة القياس (measurement system)
- 14- منظومة الاتصالات: (Communication System)
- 15- نظام تحكم إشرافى عن بعد SCADA System
- 16- نظام التحكم: (Control System)
- 17- منظومة الحماية: (Protection System)

وفيما يلى نتحدث بشيء من التفصيل عن بعض العناصر السابقة الممثلة للقسم الكهربى فى المحطات ، ويستكمل الحديث عن البعض الآخر فى الباب الثالث الخاص بمحطات التحويل . Substations

## 1-3 مكونات المولد الكهربى

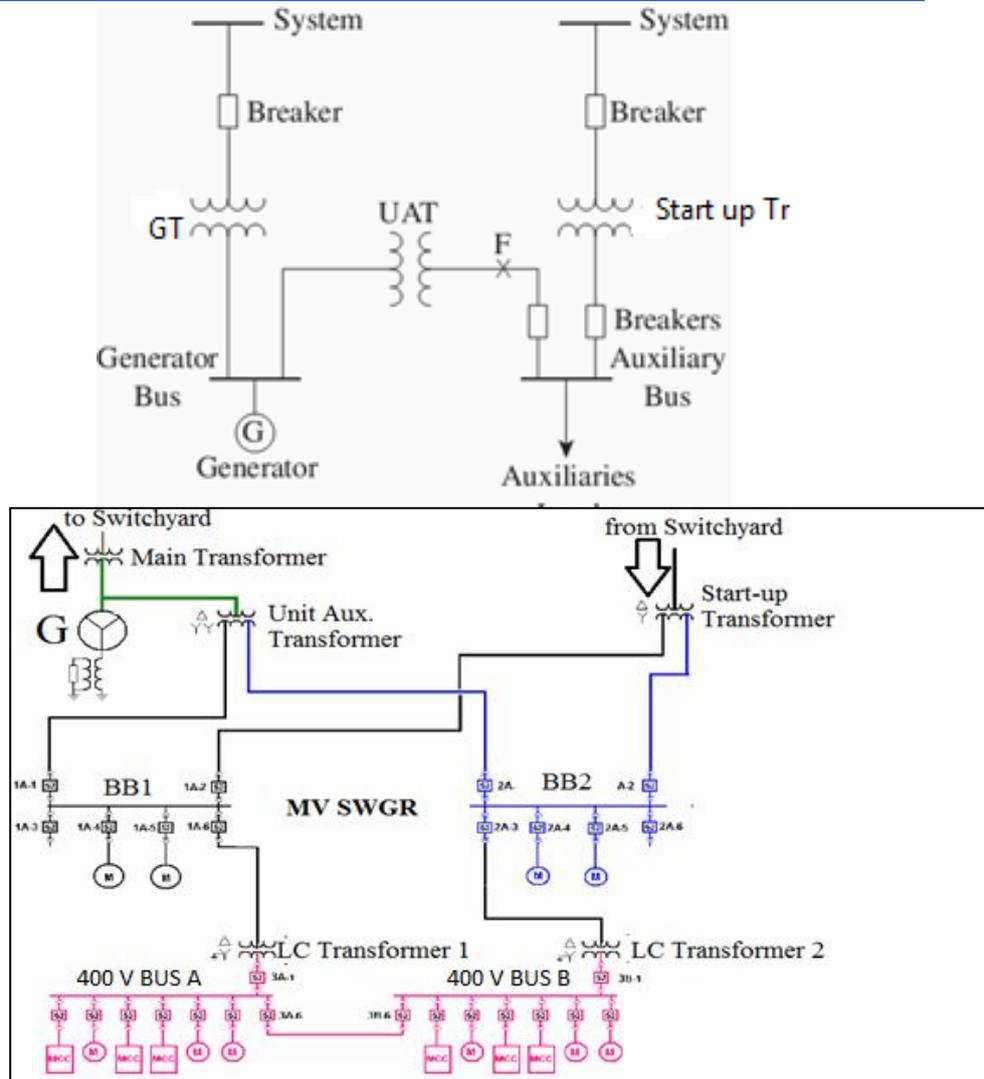
أهم عنصر فى القسم الكهربى هو بالتأكيد المولد. وهو دائما من النوع المعروف بالـ Synchronous Generator . ويتكون Synchronous Generator من جزئيين أساسيين هما Rotor and Stator ، حيث توضع ملفات الـ Field فى الجزء الدوار Rotor الذى يتصل بالتربينة مباشرة ، وهى التى تعطيه الحركة فيدور ، فيقطع الفيض المتولد فيه الملفات الموجودة داخل Stator ، فيتولد بها جهد كهربى ، أو بمعنى آخر تتولد القدرة الكهربائية التى ينتجها المولد والتى تستخدم فى تغذية الأحمال.

و يتم تغذية ملفات المجال (field) بتيار مستمر ( dc voltage ) عن طريق منظومة Excitation System التى سنتحدث عنها لاحقا .

والشكل 1-3 يمثل أهم الأجهزة المتصلة بالمولد كما يظهر فى مخططات المحطة ، ومعه شكل أكثر تبسيطا .

وفيه تلاحظ أن المولد يغذى المحول الرئيسى للوحدة Generator Step Up Transformer ، كما يغذى أيضا مباشرة كلا من المحول المساعد Unit Auxiliary Transformer ، و UAT و يغذى كذلك محول تغذية منظومة المجال المغناطيسى Excitation transformer .

لاحظ وجود مصادر تغذية خارجية External Source مركبة على دوائر المساعدات للمولد ، لأنه فى حالة خروج المولد من الخدمة لا يمكنه أن يسترجع التشغيل دون وجود المساعدات أولا ، وهذه المساعدات تحتاج لمصدر طاقة ، وبما أن المولد لم يرجع للخدمة بعد فلذلك احتجنا لوجود هذه المصادر الخارجية ، التى قد تكون مجرد اتصال بالشبكة العامة أو اتصال بمولد طوارئ بالمحطة.



شكل 1-3 :

وهذه بعض مواصفات للعناصر التي ظهرت في الشكل السابق:

- Main generator: Turbo generator ، 19KV ، 0.85 pf ، 440 MVA ، 3000 rpm ، 50 Hz
- Main Step-Up Transformer: 19/500 KV ، 480 MVA ، two winding ، Shell Type ، ONAF
- Auxiliary Transformer: 19/6.6/6.6 KV ، 40 MVA ، Three winding ، Core Type ، ONAF
- Medium voltage switchgear: 6.6KV ، 2500 A ، 40KA short circuit capacity

- Isolated Phase Bus duct (IPB): that connecting Generator ، Aux Transformer and Main Transformer ، 19KV ، 16000A.

وفىما يلى بعض التفاصيل عن مكونات المولد.

### 1-1-3 العضو الثابت Stator والعضو الدوار Rotor

أما الـ stator فهو عبارة عن رقائق من الصلب السليكونى معزولة عن بعضها بمادة الميكا مكونة معاً مجارى أو slots ملفات العضو الثابت كما فى الشكل 2-3.



شكل 2-3 :

وهناك ملفات العضو الثابت Stator Windings : وهى الملفات التى تنشأ بداخلها القدرة الكهربائية المتولدة وتتصل بالمحول الرئيسى مباشرة لنقل هذه القدرة للشبكة الكهربائية الموحدة عن طريق محطة المحولات.

وأما الـ Rotor فهو أيضا عبارة عن رقائق من الصلب السليكوني معزولة عن بعضها بمادة الميكا مضغوطة ومركبة على عمود Shaft مكونة معا مجارى العضو الدوار كما فى الشكل 3-3.



شكل 3-3 :

وملفات المجال Field Windings : موجودة بالعضو الدوار وتتغذى من منظومة Excitation System لتكوين المجال الكهربائي اللازم لعملية توليد الكهرباء ، وتتم عملية نقل الكهرباء إليها عن طريق فرش من الكربون Brushes تنقل التيار Field Current إلى الملفات الموجودة بالعضو الدوار.

### 3-1-2 منظومة التبريد

يحتاج المولد إلى منظومة تبريد بسبب الحرارة الناتجة عن المفاقد Losses الكهربائية والمغناطيسية الناتجة عن مرور التيار الكهربائي . ويتم التبريد عن طريق منظومتين :

- منظومة الهيدروجين Hydrogen Plant .
- ماء منزوع الأملاح Demi Water ضمن منظومة Stator Cooling

واستخدام الهيدروجين فى التبريد له ميزات وعيوب ، فمن ميزاته القدرة التبريدية العالية وأنه عازل جيد وأيضا له قدرة عالية على التوصيل الحرارى أكثر من أى غاز آخر ، لكن العيب الخطير أنه يشتعل وينفجر إذا اتحد مع الأكسجين حين تزيد نسبته فى الحيز المغلق عن 14% (لاحظ أنه

معزول تماما عن الأكسجين داخل المولد) . ومن هنا كان من أهم إجراءات السلامة عند حدوث عطل بالمولد سرعة طرد الهيدروجين من المولد وذلك بتوصيله بـ Vents عالية خارج المحطة فى الهواء الطلق وتسمى باللهجة المصرية عملية "التقنيت" ، وإلا ستفجر الوحدة.

ودائما يكون هناك داخل محطة التوليد معمل لفصل الهيدروجين من الماء بالتحليل الكهربى ، ثم تعبئته فى أسطوانات كما فى الشكل 3-4 لاستخدامه إذا حدث تسريب للهيدروجين الأسمى.



شكل 3-4 :

### 3-1-3- كيف يتم توليد المجال المغناطيسى؟

وبصفة عامة فإن الـ Generator عمليا يحتاج إلى ثلاث عناصر إضافية أخرى (سوى الـ Rotor and stator) ليعمل بصورة صحيحة وهم :

- Exciter
- Permanent Magnet
- Automatic Voltage Regulator

## 3-1-4 العناصر المرتبطة بمنظومة الـ Excitation

أما الـ Exciter ، فهو عبارة عن 3-phase generator صغير نسبيا مقارنة بالمولد الأسمى ، وهو ينتج جهد منخفض (حوالي 500 فولت) ، وتيار عالى جدا (حوالي 5000 أمبير) ، ويركب هذا المولد الصغير على نفس الـ Shaft الخاص بالمولد الأسمى الكبير . ووظيفته هو تغذية الـ Field الخاص بالمولد الأسمى بتيار DC ، وهو التيار الذى ينتج الفيض المغناطيسى الذى سيقطع ملفات الـ Stator لينتج فيها الكهرباء .

وهنا يبرز سؤالان:

• الأول: كيف نحصل على تيار DC من داخل الـ Exciter رغم أنه مولد 3-phase ؟

• الثانى : من أين يحصل المولد الصغير " Exciter " على تيار الـ Field الخاص به ؟

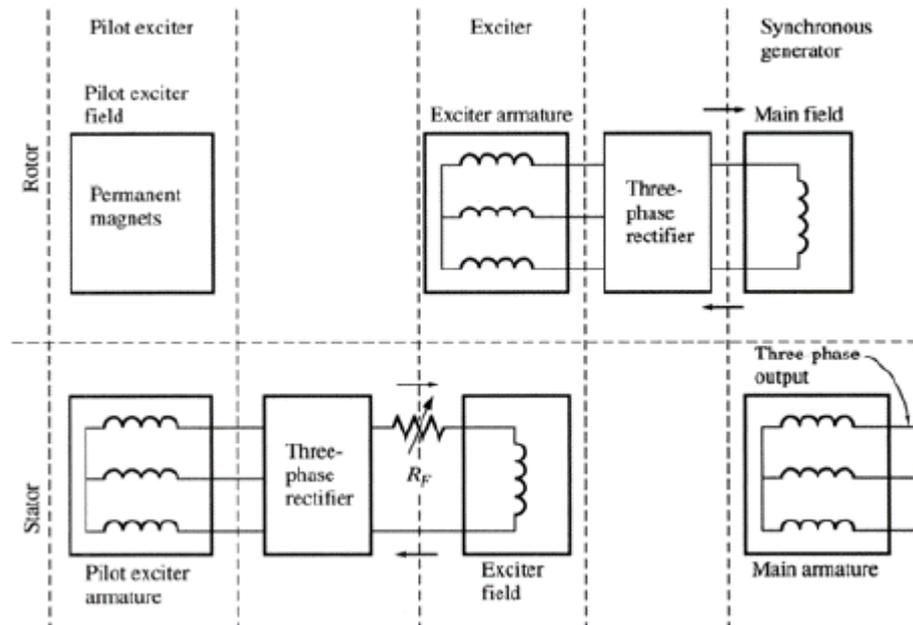
بالنسبة للسؤال الأول فإن التيار الـ 3-phase المولد من مغذى المجال ( الـ Exciter ) يتم عمل Rectification له لتحويله من تيار متردد إلى تيار مستمر عن طريق وحدة تحويل تركيب داخل المولد .

أما بالنسبة للسؤال الثانى فإن ملفات الـ Field الخاصة بالـ Exciter فى الوضع الطبيعى تحصل على تيارها من المولد الأسمى .

و لكن المولد الأسمى لم يبدأ العمل بعد انتظارا للتيار القادم من الـ Exciter ، وهو ما يشبه الفزورة القديمة : من جاء أولا البيضة أم الدجاجة؟.

ولحل هذه المشكلة تزود المولدات بـ 3-Phase Generator آخر قبل الـ Exciter ، وهو أصغر منه حجما (جهد حوالى 100 فولت ) ، لكنه يتميز بأنه مزود بمغناطيس دائم قوى Permanent Magnet ويسمى هذا المولد بـ PMG ، حيث يولد هذا المغناطيس الدائم فيضا مغناطيسيا يكفى لبدء تشغيل الـ PMG الذى سينتج 3-phase current يتم توحيدده بواسطة دائرة توحيد مشابهة للمستخدمة مع الـ Exciter ليقوم بتغذية ملفات الـ Field الخاصة بالـ Exciter .

وبالتالى فالقصة تبدأ كما فى الشكل 3-5 من الـ PMG الذى يغذى الـ Exciter الذى سينتج تيارا يتم توحيدده ليكون هو تيار الـ Field للمولد الأسمى الكبير . مع ملاحظة أن التيار الناتج من المولد الأسمى سيخصص جزء منه لتغذية ملفات الـ Field للـ Exciter بدلا من الـ PMG الذى يتم فصله بعد مرحلة البدء . والشكل يلخص هذه المراحل جميعا .



شكل 3-5 :

أما الشكل الحقيقي لهذه العناصر فتظهر في الشكل 3-6 .



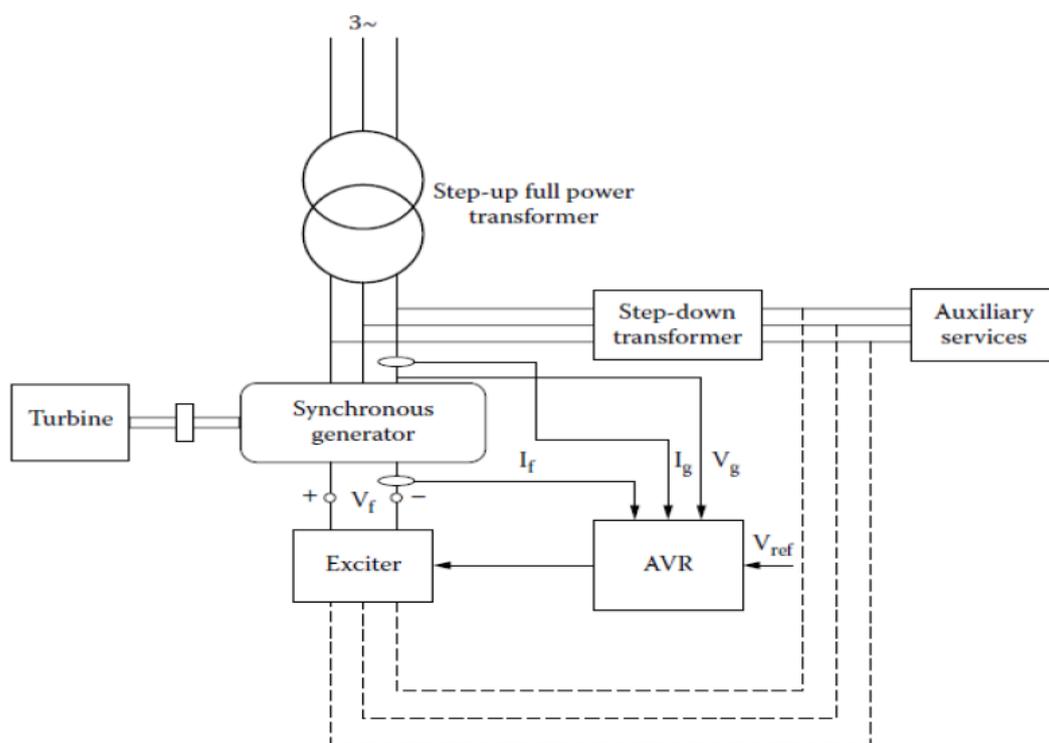
شكل 3-6 :

## 3-1-5 كيف يتم التحكم أوتوماتيكيا في قيمة الجهد؟

أثناء التشغيل الطبيعي فإننا نحتاج إلى الـ Automatic Voltage Regulator (AVR) الذى يقوم بضبط قيم الجهد عند أطراف المولد عند حدوث أى تغيرات غير طبيعية. وهو عبارة عن لوحة إلكترونية تحتوي على دوائر لتوحيد التيار وتحويله من تيار متردد AC (قادم من ملفات العضو الثابت) ، إلى تيار مستمر (DC) يتصل بنظام الـ Excitation الرئيسى للمولد حيث تستخدم بعد رفع قيمة الجهد للمولد إلى القيمة المقننة كما فى الشكل 7-3.

والـ AVR يتحكم أوتوماتيكيا فى نظام الـ Excitation بغرض تثبيت جهد المولد والتغلب على التغيرات المحدودة نسبيا فى قيمة الجهد.

إذا استشعر الـ AVR وجود تغير فى الفولت على أطراف المولد فإن حجم هذا التغير فى الجهد يترجم إلى تيار و إشارة للثريستور SCRs ويغير قيمة الـ Firing angle للثريستور داخل الـ Exciter من أجل زيادة قيمة تيار المجال ، وبذلك يزداد الفيض المغناطيسى ، ومن ثم يتم تعويض نقص جهد المولد الرئيسى كما فى الشكل 7-3.



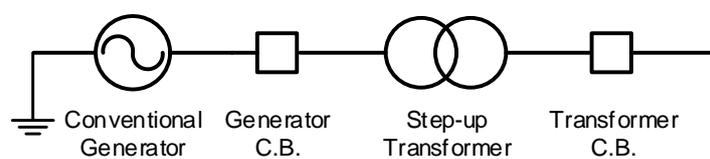
شكل 7-3 :

## 6-1-3 الجيل الجديد من المولدات

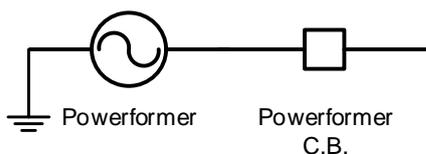
جميع المولدات الكهربائية المستخدمة فى الأنواع السابقة تصمم بحيث يكون جهد التوليد فى المحطات التقليدية فى حدود 20 kV ، أما فى محطات الطاقة الجديدة فىكون غالبا أقل من ذلك (فى محطات الرياح يصل إلى 690V فقط) .

لكن الجديد الآن أن بعض الشركات بدأت فى إنتاج مولدات الجهد العالى (High Voltage Generators) ويطلق عليها اسم Powerformers .

والمولد ذو الجهد العالى (Powerformer) كما فى الشكل 3-8 والشكل 3-9 ، هو أحد التقنيات الحديثة فى مجال توليد الطاقة الكهربائية ، وقد تم تصميم أول Powerformer بواسطة شركة ABB بسويسرا فى الخامس والعشرين من فبراير عام 1998 . وتعتمد فكرة عمل الـ Powerformer على تصميم مولد لتوليد الطاقة على جهود عالية تصل إلى 400 كيلوفولت. ويتيح هذا التصميم توصيل الـ Powerformer على الشبكة الموحدة مباشرة دون الحاجة لاستخدام المحول الرافع للجهد (Step-up Transformer) .



(a)



(b)

شكل 3-8 :

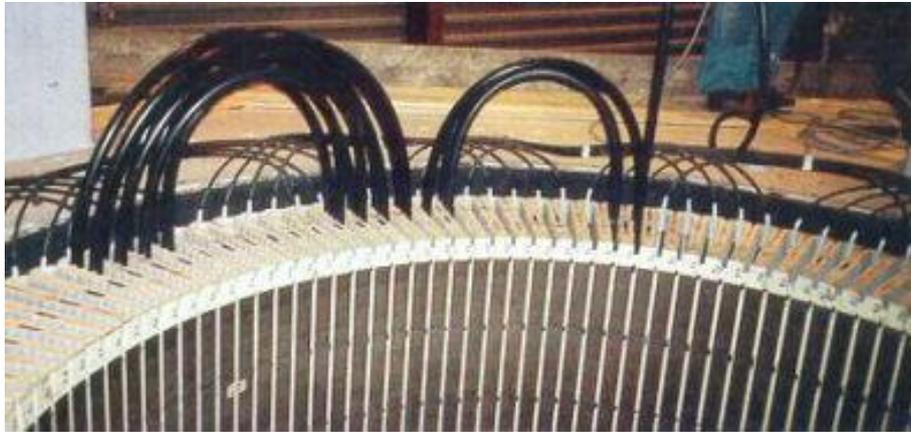
A نظام التوليد التقليدى باستخدام مولد ومحول رافع للجهد

B نظام التوليد باستخدام المولد ذو الجهد العالى (Powerformer)



شكل 3-9 :

ويستخدم هذا المولد في ملفات الجزء الثابت (Stator) كابلات XLPE تتحمل الجهود العالية كما في الشكل 3-10 ، بدلا من استخدام الملفات ذات المقطع المستطيل (Rectangular Conductors) والتي تستخدم في المولدات التقليدية. أما بالنسبة للملف الدوار (Rotor) فلا يوجد أى فرق بينه وبين المولدات التقليدية من حيث التصميم.



شكل 3-10 :

وفيما يلي بعض من المميزات الناتجة من استخدام الـ Powerformer:

1. الكفاءة الكلية لمحطات التوليد التي تستخدم الـ Powerformer تزيد قليلا (بنسبة 1.5 بالمئة تقريبا) عن المحطات ذات المولدات التقليدية.

2. لكن الميزة الأساسية هى أن التكلفة الكلية الثابتة (Total Fixed Cost) لمحطات التوليد التى تعتمد على الـ Powerformer أقل بكثير من التكلفة للمحطات ذات المولدات التقليدية لنفس قدرات التوليد. فعلى سبيل المثال فقد تم عمل دراسة على محطة مائية فى الهند إنتاجها السنوى حوالى 3200 جيجاوات ساعة. المحطة التقليدية تتكون من 4 ترينيات مائية و 4 مولدات ، و 12 محول أحادى الوجه رافع للجهد ( Single-phase Step-up Transformer). وتم عمل الدراسة عن طريق استبدال المولدات والمحولات بـ 4 من الـ Powerformers مما أدى إلى توفير ما يقرب من 24 بالمئة من التكلفة الكلية الثابتة وكذلك تكلفة الصيانة للمحطة.
3. استخدام الـ Powerformer يؤدي إلى توفير القدرة الكهربائية غير الفعالة التى كانت ستضيع داخل محولات رفع الجهد.
4. استخدام الكابلات ذات المقطع الدائرى فى ملفات الـ Stator بدلا من الموصلات ذات المقطع المستطيل يؤدي إلى توزيع منتظم للمجال الكهربى على الكابلات داخل الـ Stator للمولد مما يؤدي للاستغلال الأمثل للمولد وإمكانية رفع جهود التوليد دون ظهور إجهادات زائدة على العزل للكابلات.

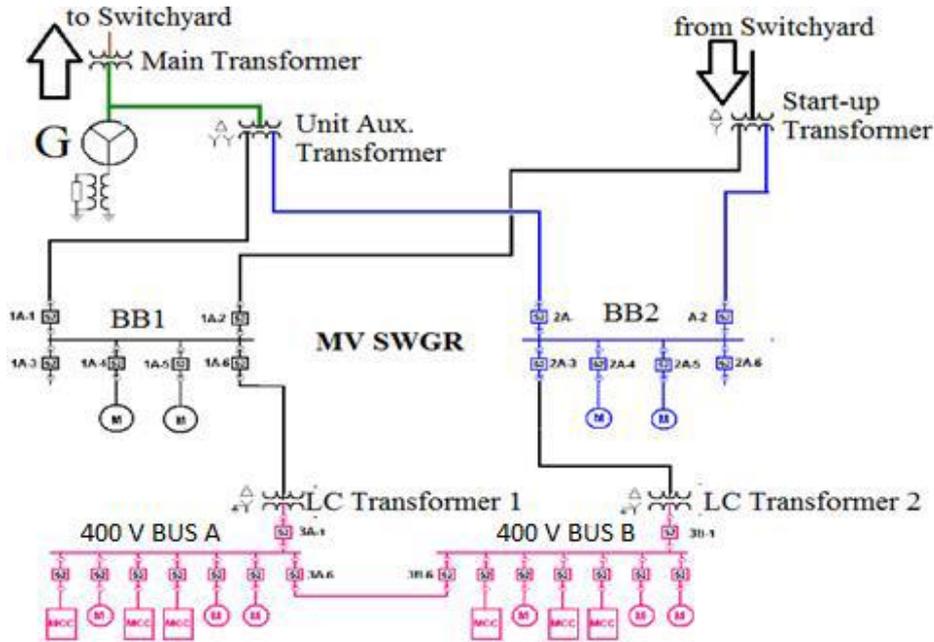
## 2-3 المحولات فى القسم الكهربى فى محطات التوليد

توجد أربعة أنواع رئيسية من المحولات بمحطات التوليد:

- 1- محول الرفع الرئيسى main transformer ويسمى أيضا Generator Transformer, GT
- 2-2 المحول المساعد (محول خفض) Unit Auxiliary Transformer, UAT يأخذ جزء من القدرة المولدة ليقوم بتغذية مساعدات المحطة على الـ BB1 and BB2 كما فى الشكل 3-11 واللذان يغذيان أيضا أحمال الجهد المنخفض.
- 3- محول بدء التشغيل (محول خفض) startup transformer ويستخدم فى حالة حدوث Blackout أو خروج كامل للوحدة حيث يأخذ قدرة من الشبكة العامة لتغذية مساعدات المحطة تمهيدا لإعادة التشغيل.

4- محول المجال المغناطيسي (محول خفض) excitation transformer وهو الوحيد الذى لا يظهر فى الشكل.

ويظهر الثلاثة الأول منهم فى الشكل 3-11 الذى يمثل SLD لإحدى المحطات.



شكل 3-11 :

ويوجد أيضا محولات القياس التي تستخدم في قياس الجهد والتيار عن طريق تحويلهم لقيم مناسبة لاستخدامها عن طريق أجهزة القياس وأجهزة الوقاية.

وفى الجزء التالى نستعرض بعض تفاصيل هذه المحولات (الأرقام الواردة تخص إحدى محطة التوليد كنموذج وليس بالضرورة أن تتكرر هذه الأرقام فى كل المحطات).

### 3-2-1 محول الرفع الرئيسى Step up Transformer

وهو المحول الرئيسى للوحدة حيث أنه المسئول عن رفع الجهد الخارج من المولد إلى جهد شبكة النقل وأحيانا يسمى Generator Transformer وهو أكبر المحولات الأربعة السابقة من حيث القدرة وبالتالي من حيث الحجم (600 ميغا فولت أمبير فى ال SLD).

ومعلوم أن جهد المولد يتراوح بين 15.75 إلى 23kV وغالبا يتم توصيل المولد على محول الرفع مباشرة بدون قاطع للدائرة بينهما (فى كثير من المحطات وليس كلها) ومن هنا كان المسمى . Generator-Transformer set

وتتكون منظومة التبريد للمحول الرئيسى من مجموعة من مبردات الزيت يصل عددهم فى بعض الحالات إلى حوالى 22 ، بالإضافة إلى عدد 8 مراوح التبريد ، وعدد 2 مضخة لتقليب الزيت لزيادة كفاءة التبريد (الأرقام تخص محول معين وليست ثابتة فى كل المحولات) ، كما يحتوى المحول على مغير جهد من النوع off load tap changer .



### 2-2-3 المحول المساعد Unit Auxiliary Transformer

المحول المساعد هو المحول المسئول عن تخفيض جهد المولد لتوفير القدرة الكهربائية اللازمة لتغذية خلايا الجهد المتوسط 6.3 kV والمسئولة عن تغذية مساعدات الوحدة. والمحول يتصل بشكل مباشر مع المولد بدون قاطع دائرة (C.B). وقدرته 50 ميجا فولت أمبير فى الـ SLD. ويغذى هذا المحول أيضا أحمال الجهد المنخفض بالمحطة من خلال محولين لخفض الجهد إلى 400 فولت (قدرة 2.5MVA فى الـ SLD شكل 3-11).



### 3-2-3 محول بدء التشغيل Start Up Transformer

هو المحول المسئول عن تخفيض جهد الشبكة 220 kV لتوفير القدرة الكهربائية عند بدء التشغيل أو عند حدوث عطل في المحول المساعد أو منظومة التحويل بينهم لتغذية خلايا الجهد المتوسط 6.3 kV وهي المسئولة عن تغذية مساعدات الوحدة والتي لا تستطيع الوحدة أن تبدأ أو تعمل بدونها ، والمحول يتصل بقاطع دائرة (C.B) مع بارة الـ 220 kV بمحطة المحولات. وهو أقل بالطبع فى الحجم من المحول الرئيسى (قدرة 50 ميجا فولت أمبير فى الـ SLD شكل 3-11).



### 3-2-4 محول المجال المغناطيسي Excitation transformer

ويسمى أيضا محول الإثارة هو المحول المسئول عن تخفيض جهد المولد من مثلا 23 kV إلى 900 فولت لتوفير القدرة الكهربائية اللازمة لتغذية منظومة المجال المغناطيسي Excitation والمسئولة عن توفير تيار المجال اللازم للمولد. وهذا المحول يتصل بشكل مباشر مع المولد بدون قاطع دائرة (C.B) (لم يظهر في الأشكال السابقة لأنه يعتبر من ضمن أجزاء المولد نفسه).

## 3-3 الغرف والعنابر الرئيسية بمحطة التوليد

(أ) غرفة التحكم الرئيسية : ويتم منها التحكم فى جميع أجزاء المحطة عن بعد (عمليات المناورات) ومراقبة تحميل الدوائر والمحولات الموصلة بالمحطة .

(ب) غرفة قواطع الجهد المنخفض (400 فولت متردد): وهى التى تمد محطة المحولات بمصدر التغذية للإنارة ، ودوائر التبريد للمحولات ومخارج الاستخدام للأفراد بالمحطة.

(ت) عنبر قواطع الجهد المتوسط (11 kV) : ويوجد به قضبان وقواطع الجهد المتوسط التى يتم توصيلها مع محولات مساعدة لخفض قيم الجهد واستخدامها لتغذية المساعدات بمحطة المحولات.

(ث) غرفة منظومة إطفاء الحريق:

وتوجد بها مجموعة ظلمبات ضخ المياه لأغراض الحماية من الحريق سواء على منظومة إطفاء الحريق للمحولات الرئيسية أو لمأخذ المياه العمومية بالمحطة والمخصصة لتوصيل خراطيم مكافحة الحريق. وتوجد بها بيارة رئيسية لإمداد المنظومة بالمياه وبيارة تعويض للحفاظ على ضغط المياه فى الأنابيب فى حالة استعداد دائم لحالات الحريق.

### ج) عنبر خلايا الجهد المتوسط 6.3 kV

- هي عبارة عن خلايا تتكون من القضبان و مجموعة من القواطع الكهربائية معزولة بسادس فلوريد الكبريت (SF6) لتغذية مساعدات الوحدة.
- تتغذى المنظومة من أحد مصدرين : إما المحول المساعد في حالة التشغيل الطبيعي وإما محول بدء التشغيل في حالة خروج الوحدة أو حدوث عطل في المحول المساعد.

## 3-4 منظومات الجهد المنخفض بمحطات التوليد

فيما يلي بعض أجزاء هذه المنظومة ، فمنها:

### خلايا الجهد المنخفض عالية القدرة Power Center

هي المنظومة المسؤولة عن تغذية الأحمال عالية القدرة من 100-250 حصان ومراكز الأحمال MCC ، وتتغذى عن طريق Dry Transformer جهد 6.3kV / 400V فولت وهو محول خفض له مراوح تبريد ومصدر تغذيته من خلال خلايا الجهد المتوسط 6.3 kV. وكل منظومة تتكون من أربع أو خمس خلايا ، ثم تغذى كل خلية مجموعة من الأحمال.

### 3-4-2 خلايا الجهد المنخفض Motor Control Center

تتكون من مجموعة من قواطع الجهد المنخفض كما فى الشكل 3-12 ذات سعة القطع المختلفة لتغذية الأحمال المنخفضة التي تقل عن 100 حصان مثل

- المحركات و البلوف Motor& Valve's
- لوحات الإنارة
- لوحات التوزيع (PDP)

- شواحن البطاريات Battery Charger

- منظومة الجهد الغير منقطع UPS

تتغذى خلايا الجهد المنخفض عن طريق مفتاح 800 أمبير يتغذى من خلايا الجهد المنخفض ذات القدرة العالية.



شكل 3-12 :

### 3-4-3 غرفة الشواحن والبطاريات :

غرفة الشواحن: وفيها يتم تحويل الجهد المتردد إلى جهد مستمر يستخدم فى تغذية دوائر الوقاية والتحكم والطوارئ بالمحطة .

غرفة البطاريات : بها مجموعات البطاريات الحمضية المستخدمة فى تغذية دوائر الوقاية والتحكم والطوارئ (110ف) وكذلك دوائر الاتصالات ( 48ف).

**ملحوظة هامة:**

العديد من الأجهزة الموجودة داخل محطة الإنتاج من أجهزة تحكم أو أجهزة وقاية تعمل بالتيار المستمر و ليس التيار المتردد ، وعند عزل المحطة عن الشبكة الكهربائية تكون البطاريات هي مصدر التيار الوحيد المتاح ، و لذلك يجب الاهتمام بصيانة البطاريات و التأكد من صلاحيتها.

بعض المحطات فى الصين بدأت فى جعل تغذية مساعدات المحطة كلها على الـ DC system بدلا من الاعتماد على الديزل وذلك لعمل Starting للمحطة بعد الـ Blackout ، لكن هذا بالطبع سيستلزم لذلك مساحات كبيرة لتخزين البطاريات. كما فى النظام التالى الذى يمثل منظومة بطاريات بقدرة 15 MW. فى الشكل 3-13.



شكل 3-13 :

لمزيد من التفاصيل حول البطاريات والشواحن راجع الباب الثالث من هذا الكتاب.

### 3-5 المنظومات المساعدة فى القسم الكهربى

يوجد داخل المحطة العديد من الأنظمة المساعدة Auxiliary Systems ، منها:

#### 3-5-1 منظومة القياس (Measurement System)

وتستخدم فى المحطات لقياس كل من القدرة الفعالة والقدرة غير الفعالة والتيار والجهد ، كما توجد العديد من القياسات الأخرى التى يتم إجرائها إما على المولد مثل درجات الحرارة الملفات ، أو قياسات على المحولات مثل قياس درجة حرارة الزيت و منسوب الزيت بواسطة مرحل بوخلز . والهدف من كل أجهزة القياس هذه ومن عدادات القدرة والطاقة هو مراقبة أداء المنظومة. وأجهزة القياس المستخدمة تتوقف على طبيعة العنصر المركبة عليه . مثل:

#### أجهزة القياس المركبة على المولد هي:

1. جهاز قياس الجهد (فولتمتر) ويتغذى من V.T
2. جهاز قياس شدة التيار (الأميتر) ويتغذى من C.T

3. جهاز قياس معامل القدرة (P.F) ويتغذى من  $V.T + C.T$
4. جهاز قياس الطاقة الفعالة (وات ساعة ميتر) ويتغذى من  $V.T + C.T$
5. جهاز قياس الطاقة غير الفعالة (فار ساعة ميتر) ويتغذى من  $V.T + C.T$
6. جهاز قياس الذبذبة (HZ) ويتغذى من  $V.T$

#### أجهزة القياس المركبة على خلايا الدخول

1. جهاز قياس الجهد (فولتميتر) ويتغذى من  $V.T$
2. جهاز قياس شدة التيار (الأميتر) ويتغذى من  $C.T$
3. جهاز قياس القدرة الفعالة (وات ميتر) ويتغذى من  $V.T + C.T$
4. جهاز قياس القدرة الغير الفعالة (فار ميتر) ويتغذى من  $V.T + C.T$
5. جهاز قياس معامل القدرة (P.F) ويتغذى من  $V.T + C.T$
6. جهاز قياس الطاقة الفعالة (وات ساعة ميتر) ويتغذى من  $V.T + C.T$
7. جهاز قياس الطاقة الغير فعالة (فار ساعة ميتر) ويتغذى من  $V.T + C.T$
8. جهاز قياس الذبذبة (HZ) ويتغذى من  $V.T$

#### أجهزة القياس المركبة على خلايا الخروج

1. جهاز قياس شدة التيار (الأميتر) ويتغذى من  $C.T$
2. جهاز قياس الطاقة الفعالة (وات ساعة ميتر) ويتغذى من  $V.T + C.T$
3. جهاز قياس الطاقة الغير فعالة (فار ساعة ميتر) ويتغذى من  $V.T + C.T$

### 3-5-2 منظومة الاتصالات (Communication System)

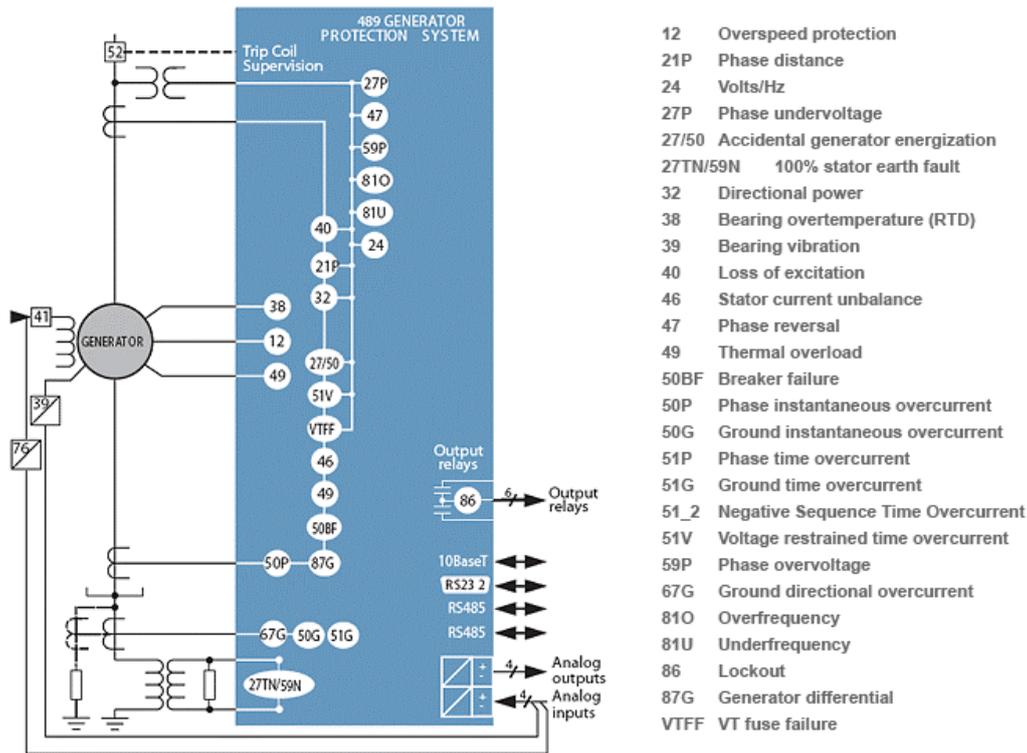
يتم عمل شبكة اتصالات بين وحدات المحطة نفسها ، وأيضاً بين المحطة وغيرها من المحطات ، وهذه المنظومة هي التي تقوم بنقل البيانات من كافة أجزاء المحطة إلى غرفة التحكم بالمحطة ، كما تنتقل أوامر التشغيل من مركز التحكم القومى إلى المحطة. راجع تفاصيل ذلك فى الباب الثالث من الكتاب.

## 3-5-3 نظام التحكم (Control System)

من خلاله يتم التحكم في كل المعدات والعناصر الهامة في المحطة حيث يتم التحكم في المولدات وفي معدل سريان القدرة والقدرة المتولدة من الوحدة وغيرها تبعا للتحميل على الشبكة. وهناك نظامان للتحكم (قديم وحديث) ويحسن الرجوع للتفاصيل في الفصل الخاص بنظم التحكم الموجود بالباب الثالث من هذا الكتاب. وكل دوائر التحكم يتم توصيلها في النهاية إلى غرفة التحكم المركزي بالمحطة للمتابعة والمراقبة.

## 3-5-4 منظومة الحماية:- (Protection System)

منظومة الحماية هي من أهم المنظومات بالمحطة. والشكل 3-14 يمثل نموذجا لمنظومة الحماية الكاملة على أحد المولدات. ويحسن الرجوع لكتاب نظم الحماية لتفصيل هذا الموضوع.



شكل 3-14 :

## نموذج للقسم الكهربى فى محطة توليد غازية

المحطة التى نعرض تفاصيلها هنا مكونة من أربع وحدات توليد غازية (Simple Cycle) قدرة كل وحدة 150 ميجا وات ، وأربعة محولات رافعة للجهد من 66kV إلى 220kV للربط بالشبكة ، مع نظام لتوزيع الجهد المنخفض والجهد المتوسط والجزء الخاص بالـ common service building هو موضح بالـ Single Line Diagram الخاص بالمحطة.

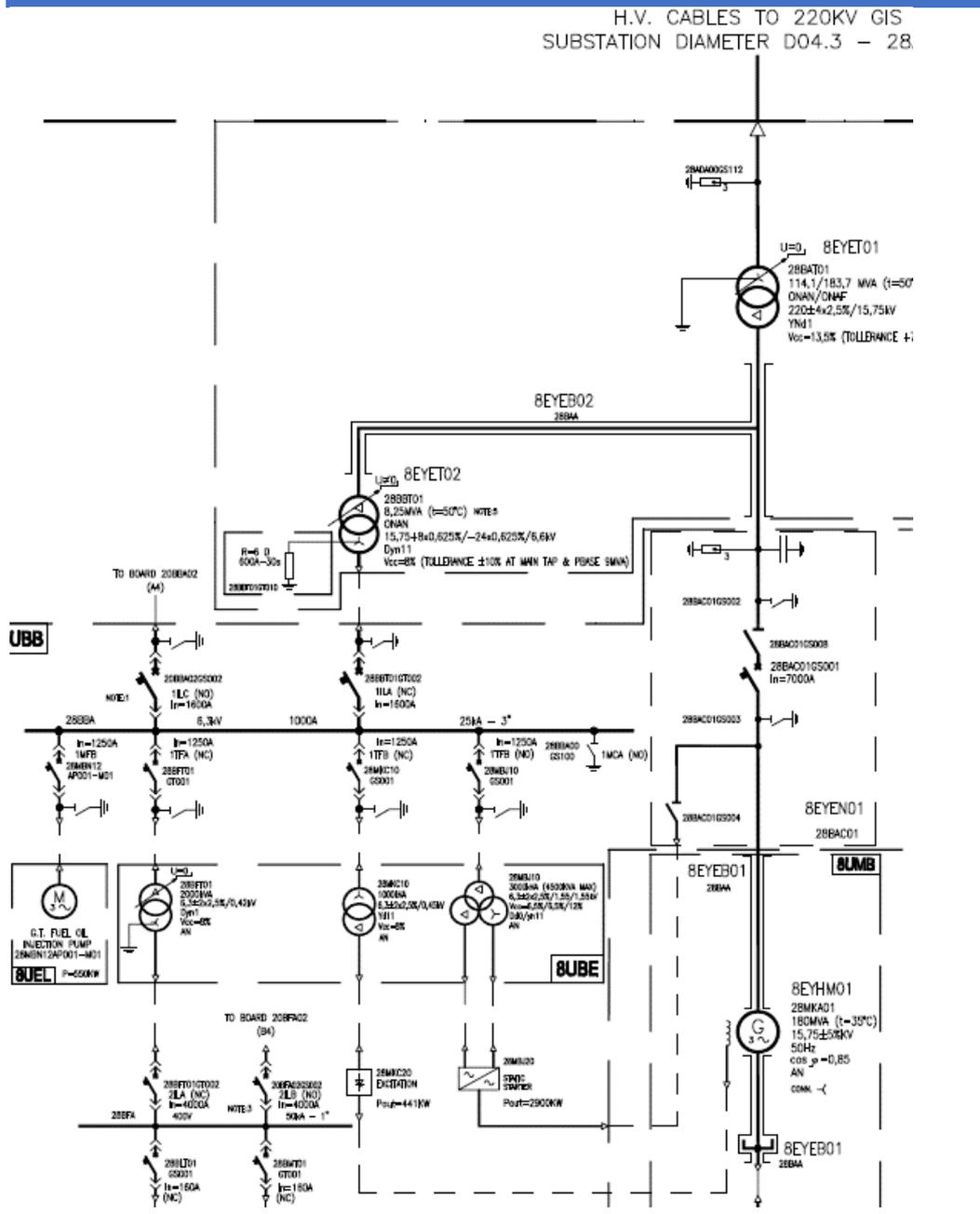
### 6-3 مكونات النظام الكهربى فى محطة توليد غازية:

- مولدات
- قواطع كهربية خاصة بكل مولد
- محولات رافعة للجهد
- يفصل بين كل مولد ومحول bus duct
- محولات خافضة للجهد من 15.75 KV إلى 6.3 KV (MV TR.)
- محولات خاصة بنظام الـ (excitation) للمولد ومتصلة أيضا بالـ (exciters) الخاص بالمولد
- محولات (3 winding) خاصة بتشغيل المولد (static starter) متصلة بـ bus bar الجهد المتوسط
- مضخات لضخ الوقود (3-phase Motor 550KW) UEL –
- USG – Firefighting pump 200KW
- محولات خافضة للجهد من 6.3KV إلى 400 فولت (LV TR.)
- وحدات توزيع للجهد المتوسط MV bus bar لتغذية محولات الخاصة بتشغيل المولد والخاصة بالـ (excitation) ومحولات الجهد المنخفض وتغذية الـ motors الخاصة بالـ oil pumps و الـ motor الخاص بـ firefighting pump
- وحدات توزيع للجهد المنخفض LV bus bar لتغذية الـ Rectifiers المسئولة عن شحن بطاريات تغذية نظام الـ UPS ليدخل الخدمة فى حالات الطوارئ
- نظام الـ UPS يتم تغذيته عن طريق DC bus bar الذى يغذي بدوره الـ inverters الذى يقوم بتغذية نظام الـ UPS
- مولد ديزل للطوارئ

## 3-6-1 كيفية عمل المحطة من الناحية الكهربائية:

كما ذكرنا في السابق في نظرية عمل المحطة أن الـ compressor مرتبط مع الـ turbine والمولد على نفس الـ shaft فيجب علينا بدء تحريك الـ turbine ولتحريك الـ turbine يلزم تشغيل الـ compressor لبدء عملية الاحتراق الداخلي فتكون خطوات التشغيل كالتالي ( الحديث عن وحدة التوليد 28MKA01 فى الشكل 3-15):

- نقوم بفتح C.B الخاص بالمولد 2XBAC01GS001 الذي يربط بينه وبين المحول الخاص بالربط بالشبكة 2XBAT01
- نقوم بغلق C.B الخاص بالمولد 2XBAC01GS004 الذى يربط بينه وبين المحول المسئول عن بدء تشغيل المولد 2XMBJ01
- يقوم المحول 2XBAT01 بتغذية المحول الخاص بشبكة الجهد المتوسط 2XBBT01 (بسحب Power من الشبكة) فتتم تغذية المحول 2XMBJ01 المسئول عن تشغيل المولد فتتم تغذية المولد ليعمل كموتور (motor) فيدور الـ shaft ويتم تحريك الـ turbine فيبدأ الـ compressor بالعمل فيتم ضخ الهواء إلى الـ combustion room فيبدأ احتراق الوقود فتبدأ الـ turbine بالحركة من تأثير العادم الخاص بالوقود و نقوم بفصل الـ Power عن المولد عن طريق فتح الـ C.B 2XBAC01GS004 فتقوم الـ turbine بلف الـ shaft حتى يصل للـ rated speed الخاصة بالمولد ثم نقوم بتغذية المحول الخاص بالـ 2XMKC10 excitation عن طريق غلق الـ C.B 2XBBT01GT001 & 2XMKC01GT001 فيبدأ المولد بالعمل ليصل إلى الـ synchronous speed ويبدأ بعملية التوليد حتى يصل المولد إلى لحظة التزامن بالشبكة فيتم الربط بالشبكة.
- في حالة الـ black out أو عدم وجود Power في الشبكة يقوم مولد الديزل XJ\*0120 بدور المحول 2XBAT01.



شكل 3-15 :

## 4

## محطات التوليد النووية

محطات التوليد النووية هي نوع من محطات التوليد الحرارية ، لأنها تعمل بنفس المبدأ وهو توليد البخار بالحرارة ثم يقوم هذا البخار بتدوير التوربينات التي بدورها تدير الجزء الدوار من المولد الكهربائي وتتولد الطاقة الكهربائية على أطراف الجزء الثابت من هذا المولد.

والفرق الرئيسي بين المحطات البخارية التقليدية والمحطات النووية هو أنه في محطات التوليد النووية يستبدل الفرن الذي يحترق فيه الوقود بمفاعل نووي Reactor تتولد فيه الحرارة نتيجة انشطار ذرات اليورانيوم وتستغل هذه الطاقة الحرارية الهائلة في تبخير المياه في الغلايات وتحويلها إلى بخار ذي ضغط عالٍ ودرجة حرارة مرتفعة جداً .

والعجيب أن حقيقة أن الحجارة يمكن أن تصبح وقوداً ل نار جهنم كانت شيئاً مستغرباً في قول الله سبحانه وتعالى في كتابه العزيز : ( يَا أَيُّهَا الَّذِينَ آمَنُوا قُوا أَنفُسَكُمْ وَأَهْلِيكُمْ نَارًا وَقُودُهَا النَّاسُ وَالْحِجَارَةُ عَلَيْهَا مَلَائِكَةٌ غِلَاطٌ شِدَادٌ لَا يَعْصُونَ اللَّهَ مَا أَمَرَهُمْ وَيَفْعَلُونَ مَا يُؤْمَرُونَ (6) )) التحريم . وها نحن اليوم نعيش في العصر الذي استخدم البشر فيه الحجارة التي تحتوي على عناصر اليورانيوم والثوريوم كوقود ينتج كميات هائلة من الحرارة التي تحول هنا في المحطات النووية إلى طاقة كهربائية.

و الـ Reactor يحتاج إلى جدار عازل وواق من الإشعاع الذري ولذا فهو يتكون من طبقة من الأجر الناري وطبقة من المياه وطبقة من الحديد الصلب ثم طبقة من الأسمنت تصل إلى سمك مترين وذلك لحماية العاملين في المحطة والبيئة المحيطة من التلوث بالإشعاعات الذرية.

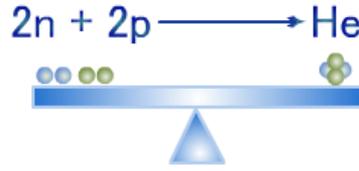
وكانت أول محطة توليد حرارية نووية في العالم نفذت في عام 1954 وكانت في الاتحاد السوفيتي بطاقة 5 ميجاوات . ولا توجد محطات توليد نووية مستعملة في البلاد العربية حتى الآن.

## 1-4 أساسيات المحطات النووية

فيما يلي بعض الأساسيات الخاصة بدراسة الطاقة

### 1-1-4 طاقة الربط النووي

تتكون نواة الهيليوم من بروتونين ونيوترونين ، وكان من المفترض أن يكون العلاقة بينهم كما في الشكل 1-4:



شكل 1-4:

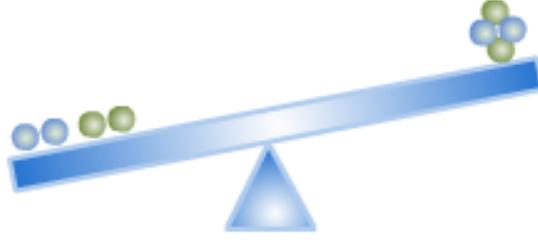
ولكن بمراجعة الأوزان الفعلية تبين أن:

- تبلغ كتلة نواة الهيليوم 4.0015 وحدة كتلة ذرية .
- تبلغ كتلة البروتون 1.0073 وحدة كتلة ذرية .
- تبلغ كتلة النيوترون 1.0087 وحدة كتلة ذرية .

وبما أن نواة الهيليوم تتألف من بروتونين ونيوترونين ، لذا يمكن حساب كتلة نواة الهيليوم على النحو التالي :

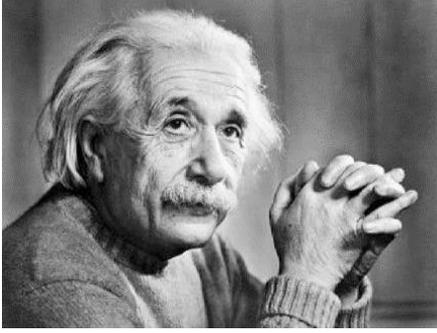
- كتلة بروتونين =  $1.0073 \times 2 = 2.0146$  كتلة نيوترونين =  $1.0087 \times 2 = 2.0174$
- كتلة بروتونين = 2.0146 كتلة نيوترونين = 2.0174

مجموع كتل البروتونات والنيوترونات =  $2.0146 + 2.0174 = 4.0320$  وحدة كتلة ذرية ، وبمقارنة كتلة الهيليوم الفعلية بمجموع كتل مكونات نواتها يلاحظ أن هنالك فرقاً في الكتلة كما في الشكل 2-4 :



شكل 4-2:

يبلغ الفرق في الكتلة بين نواة الهيليوم الفعلية ومجموع مكوناتها 0.0305 وحدة كتلة ذرية ، وقد تمكن



الفيزيائي الألماني الأمريكي الشهير ألبرت أينشتاين ( Albert Einstein 1879-1955) في عام 1907م من خلال التحليل الرياضي البحت أن يثبت أن الطاقة (energy) ، والمادة (mass) ما هما إلا وجهان لعملة واحدة أي أن المادة يمكن أن تتحول إلى طاقة والطاقة يمكن أن تتحول إلى مادة.

ولقد تمكن أينشتاين من وضع معادلته المشهورة

$$E = m C^2$$

وتدعى هذه الطاقة بطاقة الربط النووي BINDING ENERGY.

فعلى سبيل المثال فإن الطاقة النووية الناتجة عن تحويل جرام واحد من المادة بكامله إلى طاقة يساوي 85 ألف مليون وحدة حرارية بريطانية BTU ، والذي يساوي 25 مليون كيلوات ساعة ، أو ما يعادل الطاقة الناتجة عن حرق ما يقرب من خمسة آلاف طن من الفحم الحجري.

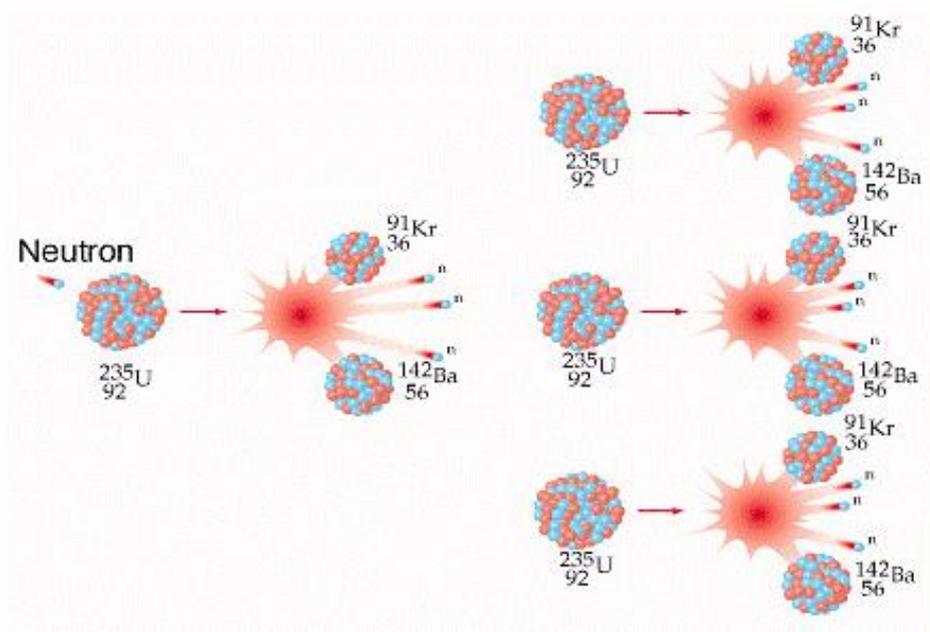
#### ملحوظة هامة:

1. عند انشطار كيلوجرام واحد من اليورانيوم 235 فإن الفرق بين كتلة المادة قبل وبعد عملية الانشطار يساوي جرام واحد أي أن جراما واحدا تحول إلى طاقة وبقي 999 جرام كنفائيات ، ولذا قد تجد نفس العبارة السابقة مذكورة في مرجع آخر ولكن بدلا من كلمة جرام ستجد كلمة كيلو جرام ولذا يجب التمييز.
2. محطة توليد كهربائية بقدرة ألف ميغاوات تحتاج يوميا لتشغيلها إلى كيلوجرامين فقط من اليورانيوم 235 القابل للانشطار (المخصب فعليا). وهذه الكمية من الوقود يمكن توفيرها من خلال تزويد المفاعل بخمسين كيلوجرام من اليورانيوم المخصب بنسبة أربعة بالمائة (18 طن سنويا وتصل إلى 30 طن إذا

نسبة التخصيب أقل) ، وتبقى هذه الكمية من الوقود قليلة جدا بالمقارنة مع 3 مليون طن من الفحم الحجري تلزم لتشغيل نفس المحطة سنويا.

#### 4-1-2 فكرة الطاقة النووية

تفاعل الانشطار النووي هو التفاعل الذي يتم من خلاله إنتاج طاقة حرارية وضوئية عالية بالإضافة إلى جسيمات مثل بيتا ( $\beta$ ) وألفا ( $\alpha$ ). ويتم تحرير الطاقة النووية من خلال قصف نواة اليورانيوم  $^{235}\text{U}$  بنيوترون كما في الشكل 3-4 ، ينتج عن هذا التصادم جزيء جديد غير مستقر سرعان ما تنشط إلى جزيئين ، بالإضافة إلى 2 إلى 3 نيوترونات ، و التي بدورها ستصطدم بذرات يورانيوم أخرى ، وبالإضافة إلى المنتج الأهم وهو الطاقة الحرارية.



شكل 3-4:

وهكذا تستمر عملية تحرير الطاقة وإنتاج نيوترونات ضمن ما يعرف بالتفاعل المتسلسل. وتبلغ كمية الطاقة التي تنبعث جراء انشطار ذرة واحدة من اليورانيوم  $^{235}\text{U}$  حوالي مائتين وإثنين مليون إلكترون فولت

( $1 \text{ MeV} = 10^6 \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$ ). والأمثلة التالية هامة جدا في تقدير حجم الطاقة المحررة من هذه التفاعلات النووية.

**Example 2.17.** An atomic power reactor can deliver 300 MW. If due to fission of each atom of  ${}_{92}\text{U}^{235}$ , the energy released is 200 MeV, calculate the mass of uranium fissioned per hour.

**Solution.**

Energy received from the reactor

$$= 300 \text{ MW} = 3 \times 10^8 \text{ W (or Js}^{-1}\text{)}$$

$$\text{Energy received/hour} = (3 \times 10^8) \times 3600 = 108 \times 10^{10} \text{ J}$$

$$\text{Energy released/fission} = 200 \text{ MeV} = 200 \times 10^6 \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ J} = 3.2 \times 10^{-11} \text{ J}$$

Number of atoms fissioned per hour

$$= \frac{108 \times 10^{10}}{3.2 \times 10^{-11}} = 33.75 \times 10^{21}$$

Now 1 gram-atom (*i.e.*, 235g) has  $6.023 \times 10^{23}$  atoms.

∴ Mass of Uranium fissioned per hour

$$= \frac{235}{6.023 \times 10^{23}} \times 33.75 \times 10^{21} = \mathbf{13.17g}$$

**Example 2.18.** What is the power output of a  ${}_{92}\text{U}^{235}$  reactor if it takes 30 days to use up 2 kg of fuel? Given that energy released per fission is 200 MeV and Avogadro's number =  $6.023 \times 10^{26}$  per kilomole.

**Solution.**

$$\text{Number of atoms in 2 kg fuel} = \frac{2}{235} \times 6.023 \times 10^{26} = 5.12 \times 10^{24}$$

These atoms fission in 30 days. Therefore, the fission rate (*i.e.*, number of fissions per second)

$$= \frac{5.12 \times 10^{24}}{30 \times 24 \times 60 \times 60} = 1.975 \times 10^{18}$$

$$\text{Energy released per fission} = 200 \text{ MeV} = (200 \times 10^6) \times 1.6 \times 10^{-19} = 3.2 \times 10^{-11} \text{ J}$$

∴ Energy released per second *i.e.*, power output  $P$  is

$$\begin{aligned} P &= (3.2 \times 10^{-11}) \times (1.975 \times 10^{18}) \text{ W} \\ &= 63.2 \times 10^6 \text{ W} = \mathbf{63.2 \text{ MW}} \end{aligned}$$

تنتج مفاعلات الطاقة النووية كمية هائلة من الطاقة الكهربائية من كمية صغيرة من الوقود فبضعة جرامات من اليورانيوم تعطى كمية من الطاقة تكافئ ما ينتجه طن واحد من الفحم. وهي كمية تكفي لتشغيل كهرباء منزل لمدة أربعة أشهر تقريباً ، دون أي انبعاث للكربون. (ملحوظة : إنتاج 1 جيجاوات ساعة من محطة تعمل بالفحم ينتج عنها انبعاث 1041 طن من  $\text{CO}_2$ ).

#### 3-1-4 تخصيب اليورانيوم

على الرغم من أن جميع أنوية ذرات العناصر تحتوي على كميات متفاوتة من هذه الطاقة الكامنة إلا أن العلماء لم يتمكنوا من الحصول عليها إلا من خلال شطر أنوية بعض العناصر الثقيلة كاليورانيوم 235

(Uranium 235) المتوفر في الطبيعة ، والبلوتونيوم 239 (Plutonium 239) المصنع من اليورانيوم 238 ، واليورانيوم 233 (Uranium 233) المصنع من الثوريوم 232 (Thorium) ، وذلك من خلال عمليات الانشطار النووي (nuclear fission) .

ويتميز اليورانيوم 235 عن غيره بأن انشطار ذرته لا يتطلب طاقة عالية للنيوترونات المقذوفة بل أن الانشطار قد يتم بالنيوترونات الحرارية أو البطيئة والتي تقل طاقتها عن نصف إلكترون فولت.

وبصفة عامة ، تعتمد شدة التفاعل النووي المتسلسل على نسبة اليورانيوم - 235 في الوقود النووي ، فكلما كان اليورانيوم نسبته عالية كانت كمية الطاقة الناتجة أعلى ، ومن هنا تكمن الحاجة لفصل نظائر اليورانيوم عن بعضها للحصول على اليورانيوم - 235 أنقى وهذه العملية تسمى بعملية تخصيب اليورانيوم (enrichment process).

#### ملحوظة:

أن نسبة اليورانيوم القابل للانشطار وهو اليورانيوم 235 في اليورانيوم الطبيعي نسبة متدنية لا تتجاوز سبعة بالعشرة بالمئة ولهذا فإنه يلزم رفع هذه النسبة بمقدار يتحدد من نوع الاستعمال. ففي القنابل الذرية يلزم أن تكون النسبة أعلى من تسعين بالمئة بينما تحتاج المفاعلات النووية الصغيرة ( compact nuclear reactors) المستخدمة في الغواصات وحاملات الطائرات إلى نسب تصل إلى عشرين بالمئة وأما معظم أنواع المفاعلات النووية والتي تعمل بالماء الخفيف فتعمل بنسب تتراوح بين 3% و 5% بينما يعمل بعضها باستخدام اليورانيوم الطبيعي كمفاعلات الماء الثقيل.

ومن الصعب فصل نظائر اليورانيوم عن بعضها بطرق كيميائية لأن نظائر العنصر الواحد متشابهة في السلوك الكيميائي ، إلا أن اختلاف النظائر في السلوك الفيزيائي يسهل علينا فصلها عن بعضها ، فالنظيرين اليورانيوم - 235 ، واليورانيوم - 238 يختلفان عن بعضهما في الكتلة.

والعلماء الذين عملوا على صناعة القنبلة النووية اكتشفوا العديد من الطرق لفصل نظائر اليورانيوم ، منها



آلات الطرد المركزي التي استخدمها العلامة عبد القدير خان (أبو القنبلة الذرية في باكستان) ، ومنها أيضا طريقة الانتشار الغازي والتي تعتمد على الاختلاف البسيط في الانتشار خلال غشاء شبه منفذ بين اليورانيوم - 235 <sup>235</sup>U<sup>92</sup> ، و اليورانيوم - 238 <sup>238</sup>U<sup>92</sup> مما يؤدي إلى اتخاذ كل منهما مسارين

مختلفين عند التأثير عليهما بمجال كهرومغناطيسي مما يؤدي إلى فصلهما.

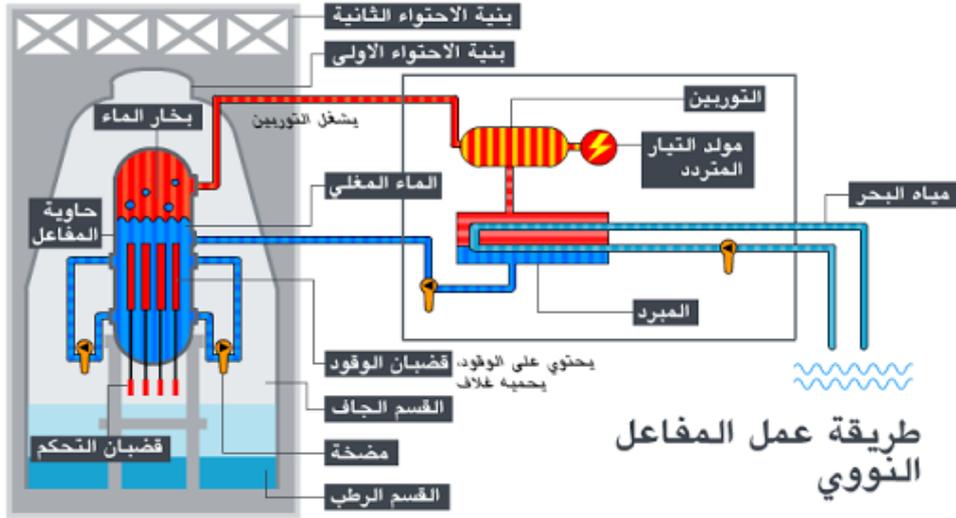
ويتطلب تخصيب كيلوجرام واحد من اليورانيوم بنسبة 5% حوالى عشرة كيلوجرامات من اليورانيوم الطبيعي بينما يلزم لتخصيب كيلوجرام واحد من اليورانيوم بنسبة 90% إلى ما يزيد عن 150 كيلوجرام من اليورانيوم الطبيعي. ويطلق على اليورانيوم الطبيعي غير المخصب الناتج عن عملية التخصيب باليورانيوم المنضب (depleted Uranium) حيث أنه يحتوي على نسبة متدنية من اليورانيوم 235 لا تتجاوز ثلاثة بالعشرة بالمئة أي أنها أقل من تلك في اليورانيوم الطبيعي. وعملية التخصيب مكلفة جدا ولذلك فإن سعر الكيلوجرام الواحد من اليورانيوم المخصب بنسبة 5% قد يصل إلى ألفي دولار.

#### 4-1-4 مكونات المفاعل النووي

الشكل 4-4 يظهر فيه مكونات المفاعل كما يلي:

1. مركز المفاعل أو قلب المفاعل وهو الجزء الذي يحتوي على وحدات الوقود النووي وتتم فيه سلسلة الانشطار النووي.
2. السائل المهدئ moderator ويسعمل الماء عادة لخفض سرعة النيوترونات وبالتالي معدل الانشطار النووي كما أنه ينقل الحرارة الناتجة من التفاعل النووي ويتحول جزء منه إلى بخار عالى الضغط ، يستغل في تشغيل التوربين .
3. هيكل الاحتواء : يحتاج المفاعل إلى جدار عازل وواق من الإشعاع الذري وهو يتكون من طبقة من الأجر الناري وطبقة من المياه وطبقة من الحديد الصلب ثم طبقة من الأسمنت تصل إلى سمك متر ونصف أو مترين وذلك لحماية العاملين في المحطة والبيئة المحيطة من التلوث بالإشعاعات الذرية .
4. مبادلات حرارية يخرج بخار الماء بضغط يبلغ 400 ضغط جوي وتكون درجة حرارته نحو 450 درجة مئوية بواسطة أنابيب متينة من المفاعل إلى المبادلات لفصل دائرتي الماء ، فالدائرة الأولى التي تلف في المفاعل وهذه تكون عالية الإشعاع نظرا لتلامسها مع الوقود النووي .لذلك تُفصل عن الدائرة الثانية للماء الساخن المضغوط ، ويتحول هذا الماء في الدائرة الثانية عند مغادرته المبادل الحراري إلى بخار ماء عالى الضغط والحرارة ويوجه إلى توربين لتوليد الكهرباء .

5. مولد كهربائي عملاق يديره التوربين ويولد التيار الكهربائي.

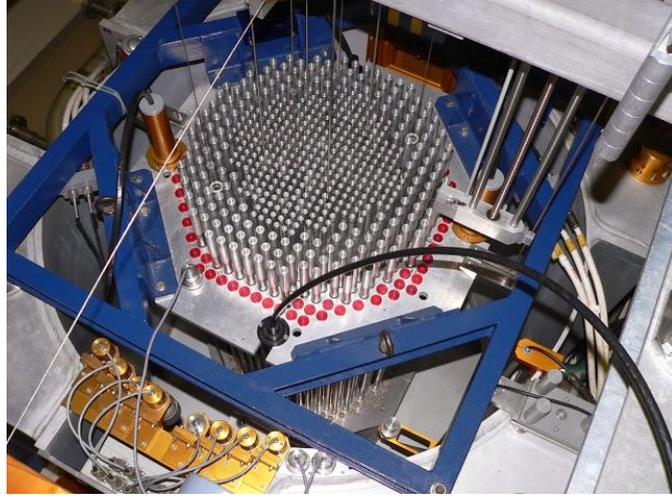


شكل 4-4:

وبذلك تتحول الطاقة النووية إلى طاقة حرارية ثم إلى طاقة حركة للتوربين والمولد الكهربائي الذي يحولها إلى طاقة كهربائية لتشغيل المصانع وإنارة المنازل.

وداخل المفاعل النووي من الداخل توجد أيضاً أعمدة الوقود (شكل 4-5) ، وهي تحتوي على نسبة تخصيب 3 إلى 5 في المئة من اليورانيوم 235 . وداخل المفاعل أيضاً يوجد المهدئ وهو أما الماء الخفيف أو الثقيل ووظيفته أنه يقوم بتقليل سرعة النيوترونات لغرض الوصول إلى السرعة المطلوبة لحدوث التفاعل المتسلسل. فالنيوترونات السريعة جداً لا يمكن لها أن تتشطر نواة اليورانيوم 235.

ويتكون قضيب الوقود من أنبوبة من الفولاذ لا يتجاوز قطرها الداخلي السنتمتر الواحد وسمكها عدة ملليمترات وبطول قد يصل إلى خمسة أمتار وتعبأً بقطع من المخصب على شكل أقراص أسطوانية صغيرة (pellets) حيث يصل وزن القضيب بعد التعبئة إلى عدة كيلوغرامات. وعادة ما يتم جمع قضبان الوقود على شكل حزم (fuel assemblies) تتألف الحزمة الواحدة ما بين 200 و 300 قضيب وقود ليسهل إدخالها وإخراجها من قلب المفاعل دفعة واحدة. ويتراوح عدد الحزم ما بين 150 و 250 حزمة أي أن المفاعل قد يحتوي على 50 إلى 150 طن من اليورانيوم الطبيعي أو المخصب. وهذه الكمية من الوقود تكفي لتشغيل المفاعل لمدة قد تصل إلى سنتين مما يعني أن تغذية المفاعل تتم كل سنة أو سنتين وعادة ما يتم إيقاف المفاعل بشكل كامل لتزويده بالوقود.



شكل 4-5:

## 2-4 مخاطر المفاعلات

حدوث خلل فني في نظامي التهدة والتبريد يمكن أن يؤدي إلى ارتفاع درجة الحرارة إلى 1200 درجة مئوية ، ويمكن عندها أن تنفصل جزيئات الهيدروجين عن الماء. وإذا ما تم إطلاق البخار المحمل بالهيدروجين من المفاعل فإنه يتفاعل مع الأكسجين في الهواء ويؤدي إلى حدوث انفجار ، مثلما حدث مؤخرا في مفاعل فوكوشيما الياباني.

أما ارتفاع درجة الحرارة في قلب المفاعل إلى 2200 درجة مئوية فسيؤدي إلى انصهار أعمدة الوقود النووي. مثلما كان عليه الحال في مفاعل تشيرنوبل الروسي.

وهناك مشكلة أخرى تكمن في كيفية التخلص من المخلفات النووية الناتجة في المفاعلات النووية. وعادة ما يوضع اليورانيوم المستهلك في أحواض مائية كبيرة لمدة عشرات السنين لغرض تخفيض إشعاعها النووي إلى حد يسهل معاملتها صناعيا بعد ذلك

علما بأن كمية النفايات المشعة نتيجة الانشطار النووي بمحطات إنتاج الكهرباء بالمفاعلات النووية محدودة مقارنة بكمية النفايات بالمحطات الحرارية التي تعمل بالطاقة الأحفورية كالنفط أو الفحم. فالنفايات النووية تصل 3 ميليجرام لكل كيلو وات ساعة ( 3mg/kWh ) مقابل حوالي 700 جرام ثاني أكسيد الكربون لكل كيلو وات ساعة بالمحطات الحرارية العادية لكن هذه الكمية الصغيرة جدا من

الإشعاع النووي قد تكون قاتلة أو قد تتسبب في عاهات وتشوهات لا علاج لها. لهذا فإن جميع الدول التي تستخدم الطاقة النووية لإنتاج الطاقة الكهربائية تعمل على التخلص من تلك النفايات المشعة بدفنها في الطبقات الجيولوجية العميقة تحت سطح الأرض بعيدا عن الناس

#### 4-2-1 هل يمكن أن تنفجر المفاعلات النووية كالتنابل؟

لا يمكن أن ينفجر المفاعل النووي مثل القنبلة ، فمستوى تخصيب اليورانيوم منخفض جداً ، وهو أقل بكثير من عملية التخصيب المطلوبة لإنتاج الأسلحة النووية. وقد تم تصميم هذه المفاعلات لإنتاج الطاقة الكهربائية بشكل آمن وموثوق.

#### 4-2-2 ما هو الماء الثقيل؟

كيميائياً الماء الثقيل هو نفس الماء الخفيف (العادي) ولكن الاختلاف هو في أن ذرتي الهيدروجين في الماء العادي ( $H_2O$ ) تستبدل بذرتي ديوتيريوم (deuterium atoms) ويرمز له بالرمز  $(D_2O)$  .  
الديوتيريوم هو عبارة عن نظير للهيدروجين وهو يحتوي على نيوترون إضافي ولذلك فإن ذرة الديوتيريوم تتكون من بروتون ونيوترون وحيدتين في نواة الذرة والإلكترون واحد يدور حولها. إذا فالنيوترون الزائد هو الذي يجعل من الماء الثقيل ثقيلًا فهو تقريباً أثقل من الماء العادي بمقدار 10%.

وفائدة الماء الثقيل - في المفاعلات الذرية - تكمن في قدرته العالية على التحكم بطاقة النيوترونات المنطلقة من التفاعل الذري. كما أنه يعمل كمبرد لقلب المفاعل وينقل الحرارة بفعالية لتحويلها إلى طاقة بخارية مفيدة. ورغم قدرة الماء العادي على لعب هذه الأدوار إلا أن الماء الثقيل أكثر منه سرعة وفعالية.

#### 4-2-3 مفاعل كندو

مفاعل كندو هو مفاعل نووي ينتج الطاقة الكهربائية باستخدام الطاقة النووية وصممه وشيدته كندا . وهو يعمل باليورانيوم الطبيعي غير المخصب مع الماء الثقيل. واسم CANDU هو اختصار للاسم الكامل  
Canada Deuterium Uranium reactor

يتميز الماء الثقيل بأنه ضعيف الامتصاص للنيوترونات مما يحافظ على كثافة النيوترونات في قلب المفاعل، أما الماء العادي فهو يمتص النيوترونات، ولذا كان لا بد في مفاعلات الماء الخفيف أن يعوض المفاعل تلك النيوترونات المفقودة عن طريق زيادة نسبة اليورانيوم-235 لإبقاء معدل التفاعل على مستواه.

والفكرة هنا أن اليورانيوم الطبيعي يتكون من مخلوط لعدة نظائر ويغلب فيه اليورانيوم-238 ونسبة صغيرة من اليورانيوم-235 . ينشط اليورانيوم-238 بالنيوترونات السريعة ذات طاقة أكبر من 1 مليون إلكترون فولت . ولكن لا يمكن أن يستمر التفاعل مع اليورانيوم-238 حيث يمتص نيوترونات أكثر مما يصدره ، فلا يمكن لليورانيوم الطبيعي القيام بتفاعل تسلسلي بمفرده .

وحل هذه المشكلة يكون عن طريق تهدئة سرعة النيوترونات بحيث يرتفع احتمال اصطدامها بأنوية اليورانيوم-235 مما يتيح الفرصة لاستمرار التفاعل في المفاعل . ولهذا نحتاج إلى مهدئ لسرعة النيوترونات، الذي يقوم بامتصاص جزءا من طاقة حركة النيوترونات فتتخفف سرعتها إلى سرعة جزيئات المهدئ نفسها . وهذا هو دور الماء الثقيل .

## 3-4 نبذة عن تاريخ القنبلة الذرية

في عام 1934 اكتشف عالم ألماني أن انشطار ذرة اليورانيوم يحدث بسرعة ، ويولد كمية هائلة من الطاقة ، ويمكن أن يحدث انفجاراً هائلاً . أخذ الألمان بتطوير هذه الفكرة والاستفادة منها في تصنيع القنبلة النووية ، لم يستترع ذلك اهتمام أحد إلى أن قامت ألمانيا بإيقاف تصدير اليورانيوم من مناجم تشيكوسلوفاكيا المحتلة من قبل الألمان .

في الثاني من أغسطس 1939 ، وقبل بدء الحرب العالمية الثانية ، قام البرت أينشتاين Albert Einstein بكتابة رسالة إلى الرئيس الأمريكي فرانكلين روزفلت Franklin D . Roosevelt واصفاً فيها الطاقة الهائلة التي تنتج عن الانشطار النووي ، ومعبراً فيها وزملاءه عن قلقهم الشديد من إمكانية تحويل ألمانيا النازية الانشطار النووي إلى قنبلة نووية . (أينشتاين عالم ألماني المولد ، يهودي الديانة ، وكان معارضا لاستغلال الطاقة النووية لتصنيع الأسلحة ) .

عقد قادة الجيش الأمريكي العزم على امتلاك هذه التقنية مهما كلف الأمر ، فأخذوا يبحثون عن بناء يصلح كمختبر لإنتاج القنبلة النووية ، بحيث يبعد الموقع (200) ميل على الأقل عن الحدود البحرية والدولية ، ويجب أن يبعد كثيراً عن التجمعات السكانية ، لأن أي خطأ قد يكلفهم الكثير من الخسائر البشرية .

استقر رأيهم على منطقة في أرض صحراوية في ولاية نيومكسيكو في منطقة تعرف باسم Jornada Muerto del وتعني رحلة إلى الموت ، في مشروع عرف باسم مشروع مانهاتن السري Manhattan Project .

عمل في هذا المشروع العديد من العلماء ، وأغلبهم من ألمانيا. لم يكن أحد من العلماء على دراية بما سيحدث بعد بدء التفاعل النووي ، حتى أن أحد العلماء اعتقد أن ولاية نيومكسيكو ستختفي حينئذ من الوجود .

أخيراً وبعد سلسلة من النجاحات والفشل ، وبعد ست سنوات من بداية المشروع عام 1939 ، وبعد إنفاق أكثر من (2) بليون دولار ، أصبح العلماء جاهزين لاختبار نتائج عملهم ، وقبل شروق شمس السادس عشر من يوليو عام 1945 وفي الساعة 5:30 غطى السماء ضياء برتقالي ساطع يشبه حبة المشروم ( الفطر ) كما في الشكل المجاور ، في مشهد لم يكن لأحد أن يراه من قبل ، سمع دوي الانفجار على مسافة (150) ميل بعيداً عن الموقع ، وتحولت الرمال في موقع الانفجار إلى زجاج أخضر من شدة الحرارة



وكان الرئيس الأمريكي روزفلت قد مات فجأة في الثاني عشر من أبريل 1945 ، وأصبح بعده هاري ترومان Harry Truman رئيساً ، وكان العديد من الأمريكيين يعتقدون أنه غير مؤهل لتولي هذا المنصب ، وبالفعل ارتكب هذا الرئيس أكبر مذبحة في القرن العشرين .

فقد كانت الحرب شبه محسومة لصالح الحلفاء ، وأخذ اليابانيون يقاتلون بشكل انتحاري . وكان الاعتقاد السائد عند بعض الأمريكيين حينئذ أن الحرب لن تحسم إلا باجتياح اليابان ، ولكن هذه المغامرة ستكلف الأمريكيين الملايين من الأرواح فكان البديل أن تحسم باستخدام القنبلة النووية .

كان كثير من الأشخاص قد نصحوا الرئيس بعدم استخدام القنبلة النووية ضد اليابان ، وعلى رأسهم الجنرال دوايت أيزنهاور Dwight Eisenhower قائد قوات الحلفاء في أوروبا وذلك لسببين: الأول أن اليابان كانت على وشك الاستسلام ، ولا يوجد ضرورة لضربهم بشيء مروع مثل هذا ، والثاني الكره أن يستخدم الحلفاء هذا السلاح لأول مرة . وللأسف ، أعطى الرئيس ترومان قراره بإسقاط القنبلة النووية فوق مدينة هيروشيما اليابانية في أغسطس 1945 .

وقد فكر الأمريكيون في إنذار اليابانيين أولاً ولكن خوفهم من نقل اليابانيين لأسرى الحرب من الحلفاء لموقع الانفجار ، والرغبة في إظهار قوة الأمريكيين وإرهاب اليابانيين والسوفييت - القوة الجديدة على الساحة - حال دون ذلك .

في الساعة 2:45 من صباح يوم السادس من أغسطس 1945 ، أُلقت القاذفة B-29 محملة بقنبلة نووية من قاعدة أمريكية في جزيرة تينيان Tinian Island في غرب المحيط الهادي . وبعد ست ساعات ونصف ، وفي الساعة 8:15 صباحاً بالتوقيت الياباني أُلقيت القنبلة من على ارتفاع 580 متر تقريباً فوق مركز مدينة هيروشيما ، وانفجرت بعد ذلك بدقة ، لتحصد أكبر مجزرة في تاريخ الإنسانية. ثم في التاسع من أغسطس أُلقيت القنبلة الثانية على مدينة ناجازاكي ، وقد قتلت القنابل ما يصل إلى 140000 شخص في هيروشيما، و80000 في ناجازاكي ، متأثرين بالجروح أو بسبب الصدمات والحروق الإشعاعية ، ليسجل شهر أغسطس نفسه شهراً للمذابح عبر التاريخ.



## 4-4 كارثة تشيرنوبيل

كارثة تشيرنوبيل هي أكبر حادثة نووية إشعاعية في التاريخ ، وقعت هذه الكارثة في المفاعل رقم 4 من محطة تشيرنوبل للطاقة النووية يوم السبت 26 أبريل من عام 1986، قرب مدينة بريبيات في شمال أوكرانيا السوفيتية ، وذلك أثناء إجراء عملية محاكاة وتجربة لأحد اختبارات الأمان (كان من المفترض القيام بها في بداية تشغيل المفاعل إلا أن المسؤولين عنه - طمعا في تقدير زائف بسرعة الإنجاز وطمعا في أوسمة حصلوا عليها بالفعل بسبب انتهائهم من بناء المفاعل في وقت قياسي ظاهريا

- أما في الواقع فإنهم أجّلوا اختبار الأمان هذا حتى وقت الكارثة في الوحدة الرابعة التي وقع فيها الانفجار .

وفكرة هذا الاختبار تتلخص في أن المحطة تنتج طاقة كهربية من الطاقة الحرارية الناتجة داخل المفاعل نتيجة انشطار ذرات قضبان وقود اليورانيوم الموجودة بقلب المفاعل. لكن هناك سؤال: ماذا لو حدث Blackout وتوقف إمداد الكهرباء فجأة بدون سابق إنذار؟ في هذه الحالة ستتوقف مضخات مياه تبريد المفاعل أيضا وتزداد درجة حرارة المفاعل ، ولذا كان الحل المقترح هو وجود مولدات ديزل لتشغيل هذه المضخات لضمان استمرار تبريد قلب المفاعل.

لكن هناك أيضا مشكلة وهي أن مولدات الديزل تأخذ دقيقة أو أكثر حتى تدخل في الخدمة فكيف سيتم تغذية مضخات المياه خلال هذه الفترة؟ كان اختبار الأمان الهدف منه دراسة هذه الحالة ودراسة توليد الكهرباء خلال الفترة قبل تشغيل مولد الديزل من حركة المولد الأصلي بالقصور الذاتي. وحتى يتم هذا الاختبار يجب تخفيض إنتاج المحطة إلى أقل قدر ممكن ليماثل حالة الانقطاع التام أو يشابهها.

وما حدث في هذه الليلة أن مركز التحكم في الطاقة الكهربائية رفض تخفيض الأحمال أثناء النهار وطلب إجراء الاختبار أثناء الليل وهنا كان أول المشاكل فجميع مهندسي المناوبة الليلة لم يكن من بينهم أحد ذو خبرة في هذا الاختبار ، ومع ذلك أصر مدير المحطة على إجراء الاختبار أثناء الليل وكلف مهندسا عمره 25 سنة وحديث التعيين بالمحطة ( خبرته لا تتجاوز 4 أشهر ) بالقيام بعملية تخفيض الأحمال.

وما حدث أن التخفيض كان أكبر من اللازم فارتفعت درجة حرارة المفاعل لدرجة شديدة الخطورة مما اضطر المسؤولين إلى ضغط زرار الطوارئ الخاص بفصل المفاعل نهائيا عن طريق انزال كل أعمدة البورون لامتصاص النيوترونات وتوقف التفاعل لكن كان هناك مشكلة أخرى في تصميم هذا المفاعل الروسي وهي أن قضبان البورون تنزل برؤوس من الجرافيت أولا (لأنها أرخص من غيرها ) ولأسف هذه الطريقة جعلت الحرارة تزداد لثواني قبل أن تشرع في الانخفاض وهذه الزيادة في الثواني الأولى بعد ضغط زرار الطوارئ كانت كافية لاجتاج أعمدة الجرافيت وعدم إمكانية إسقاطها في قلب المفاعل وجعل الحرارة ترتفع بعد ذلك بشكل هائل دون تحكم أي أن المفاعل تحول إلى قنبلة ذرية وتتسبب في الانفجار .

نتج إذن هذا الخلل عن تراكم أخطاء بشرية وقلّة خبرة مهندسين شبان قاموا بالمناوبة تلك الليلة بالإضافة إلى عيوب تصميم في المفاعل الروسي. وأدى ذلك إلى حدوث اضطراب في إمدادات الطاقة في جمهورية أوكرانيا السوفيتية، كما أدى إلى إغلاق المصانع وتجريف المزارع بسبب تلوث التربة بالإشعاع ، وتقرر أيضا إعدام كافة الحيوانات الأليفة وكذلك الطيور في المنطقة المنكوبة وبلغت الخسائر المادية ما قيمته

أكثر من ثلاثة مليارات دولار أمريكي. وقد لقي 36 شخصا مصرعهم حسب الرواية الرسمية السوفيتية بينما قدرت الأمم المتحدة عدد من قتلوا بسبب الحادث في الأيام الأولى فقط بأربعة آلاف شخص، وقالت السلطات الأوكرانية إن عدد الضحايا يبلغ ثمانية آلاف شخص. وشككت منظمات دولية أخرى في هذه الأرقام وتوقعت وفاة ما بين عشرة آلاف وأكثر من تسعين ألف شخص نتيجة إصابتهم بسرطان الغدة الدرقية المميت. وتبأت منظمة السلام الأخضر بوفاة 93 ألف شخص بسبب الإشعاعات الناشئة عن الحادث، وقد تم إجلاء أكثر من 100 ألف شخص من المناطق المحيطة بالمفاعل.

وبعد حدوث الانفجار بدأت عمليات دفن وتغليف المفاعل بالخرسانة المسلحة لمنع تسرب الإشعاع الناجم عنه والذي أدى إلى وفاة عدد كبير في السنوات اللاحقة متأثرين بالإشعاع وخاصة أمراض سرطان الغدة الدرقية. وقد لوحظ في الأعوام الأخيرة وجود تشقق في الغلاف الخرساني ، ولذلك هناك دراسات لعمل غلاف جديد أكثر سماكة وأفضل عزلاً.

وربما كان قيام الاتحاد السوفيتي بالإعلان عن حدوث هذا الانفجار على أرضيه، ثم طلب المعونة من دول العالم، أحد مظاهر التغيير في سياسة الدولة الذي كان تتزعم الكتلة الشيوعية والتي كان لا يكشف عن مثل تلك الأحداث فيها أبداً.

### ملحوظة:

في مايو 2019، عرض مسلسل تلفزيوني أمريكي باسم تشيرنوبيل Chernobyl وهو مسلسل درامي تاريخي قصير مكون من خمس حلقات فقط ، والمسلسل من أروع ما أنتجته السينما الأمريكية (حصل على المركز الأول في تاريخ المسلسلات الأمريكية بمجرد البدء في عرضه) ، وأنا أنصح بمشاهدته حيث أن جميع المعلومات العلمية فيه صحيحة وتم مراجعتها بدقة من قبل لجنة علمية وهو منتج في إطار درامي مشوق.

# 5

## محطات التوليد المائية

### Hydropower Power Stations

حيث توجد المياه في أماكن بها فروق ارتفاعات كالبحيرات ومجاري الأنهار يمكن التفكير بتوليد الطاقة الكهربائية ، خاصة إذا كانت طبيعة الأرض التي تهطل فيها الأمطار أو تجري فيها الأنهار جبلية ومرتفعة. ففي هذه الحالات يمكن توليد الكهرباء من مساقط المياه. أما إذا كانت مجاري الأنهار ذات انحدار خفيف فيقتضي عمل سدود في الأماكن المناسبة من مجرى النهر لتخزين المياه. وتنشأ محطات التوليد عادة بالقرب من هذه السدود كما هو الحال في مجرى نهر النيل وعلى نهر الفرات في شمال سوريا.

هذا بالإضافة إلى الشلالات الطبيعية التي تستخدم مباشرة لتوليد الكهرباء كما هو حاصل في شلالات نياجرا بين كندا والولايات المتحدة . وبصورة عامة فإن أية كمية من المياه موجودة على ارتفاع معين تحتوي على طاقة كامنة في موقعها ، فإذا هبطت كمية المياه إلى ارتفاع أدنى تحولت الطاقة الكامنة إلى طاقة حركية . وإذا سلطت كمية المياه الساقطة على تربينة مائية دارت بسرعة كبيرة وتكونت على محور التربينه طاقة ميكانيكية . وإذا ربطت التربينه مع محور المولد الكهربى تولد على أطراف العضو الثابت من المولد طاقة كهربية .

وهذه صورة جوية لأكبر سد مائى فى أمريكا (سد هوفر بولاية كولورادو) .



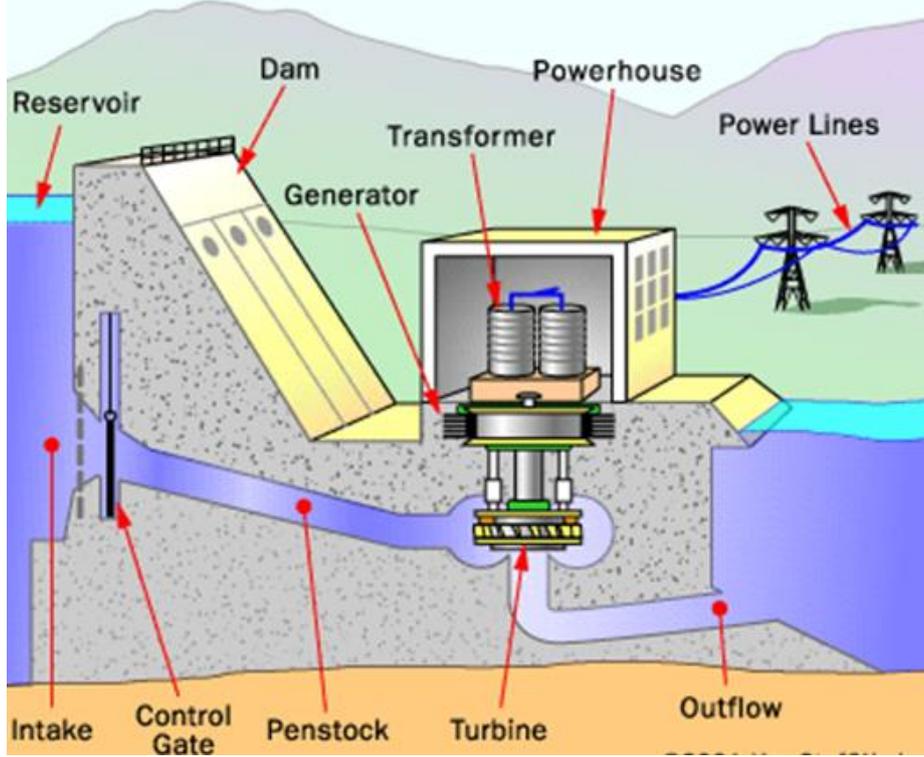
## 1-5 محطات التوليد المائية

تتميز هذه المحطات عموماً بأنها تنتج طاقة نظيفة ، وتستغرق عدة دقائق في الدخول على الشبكة ، ولها عمر افتراضي كبير ، وتكلفة التشغيل بسيطة ، ولها معدل الاستجابة على الشبكة عالي جداً (يمكن أن ترفع الإنتاج من 20MW إلى 150 MW مباشرة)

لكن يعيبها أنها تحتاج إلى تكلفة إنشاء عالية ، وأن عملها مرتبط بكمية المياه المتوفرة أمام السد ، وبالتالي فالذي يتحكم في عملها مؤثرات خارجية مثل منسوب المياه المنصرف و احتياجات وزارة الري.

### 1-1-5 طريقة توليد الطاقة الكهرومائية

أي كمية ماء موجودة على ارتفاع معين تحتوى على طاقة كامنة في موقعها ، فإذا هبطت كمية المياه إلى ارتفاع أدنى تحولت طاقة الوضع إلى طاقة حركة وإذا سلطت على توربين مائي فإنه يدور بسرعة كبيرة ، وإذا ربطت التوربين مع محور المولد الكهربائي ، تولد على أطراف العضو الثابت من المولد طاقة كهربائية كما في الشكل 1-5.



شكل 1-5 :

تتألف محطة توليد الكهرباء المائية بصورة عامة من الأجزاء الرئيسية التالية.

1. السد Dam
2. الخزان Reservoir
3. المجرى المائل Penstock: وهو عبارة عن أنبوب كبير أو أكثر من أسفل السد إلى مدخل التوربين وتسيل المياه فيها بسرعة كبيرة يوجد فيها بوابات Control gates للتحكم في كمية المياه المارة.
4. التوربين Turbine: تكون التربينه والمولد عادة في مكان واحد مركبين على محور رأسي واحد كما في الشكل 2-5.

5. ويركب المولد Generator فوق التربيننة . وعندما تفتح البوابة في أسفل الأنابيب المائلة تتدفق المياه بسرعة كبيرة في تجاويف مقعرة فتدور بسرعة وتدير معها العضو الدوار في المولد حيث تتولد الطاقة الكهربائية على أطراف هذا المولد .

:2-5



شكل

6. أنبوب السحب outflow: بعد أن تعمل المياه المتدفقة في تدوير التربين فلابد من سحبها للخارج بسرعة ويسر حتى لا تعوق الدوران.

7. المعدات و الآلات المساعدة: مثل المضخات و المفاتيح ومعدات تنظيم سرعة الدوران.

### 5-1-2 نظرية العمل

يبنى سد على مجرى مائي ، فيحجز الماء خلفه لتتكون بحيرة اصطناعية بسعة مائية كبيرة. وتعتمد كمية الطاقة الكهربائية المولدة من المحطة على عنصرين أساسيين هما:

- ارتفاع المياه خلف المحطة (فرق المنسوب بين سطح المياه خلف السد ومنسوب التوربينات).
- معدل تدفق كمية المياه خلال التوربينات .

ويمكن حساب القدرة الكهربائية كالاتي :

القدرة (وات) = الارتفاع (م) x كمية التدفق (م<sup>3</sup>/ث) x عجلة الجاذبية (9.81 م/ث<sup>2</sup>) x كثافة المياه (1000 كجم/م<sup>3</sup>) x كفاءة المحطة

وبالنسبة إلى الكفاءة فهي تحسب بالتقريب بنحو 85% بالنسبة لمحطات القوى المائية .  
وتختلف قدرة كل سد مائي في توليد الكهرباء بحسب ارتفاع منسوب الماء فيه وكمية الماء التي  
تندفع في التوربين أو التوربينات وكفاءة التوربين والمولد الكهربائي ، كما تقول لنا معادلة القدرة. أكبر  
محطة لتوليد الكهرباء من سد مائي هي 18.000 جيجاوات وتوجد في الصين الشعبية.

**Example 2.8.** Water for a hydro-electric station is obtained from a reservoir with a head of 100 metres. Calculate the electrical energy generated per hour per cubic metre of water if the hydraulic efficiency be 0.86 and electrical efficiency 0.92.

**Solution.**

$$\begin{aligned} \text{Water head, } H &= 100 \text{ m ; discharge, } Q = 1 \text{ m}^3/\text{sec} ; \eta_{\text{overall}} = 0.86 \times 0.92 = 0.79 \\ \text{Wt. of water available/sec, } W &= Q \times 1000 \times 9.81 = 9810 \text{ N} \\ \text{Power produced} &= W \times H \times \eta_{\text{overall}} = 9810 \times 100 \times 0.79 \text{ watts} \\ &= 775 \times 10^3 \text{ watts} = 775 \text{ kW} \\ \therefore \text{ Energy generated/hour} &= 775 \times 1 = \mathbf{775 \text{ kWh}} \end{aligned}$$

**Example 2.10.** A hydro-electric power station has a reservoir of area 2.4 square kilometres and capacity  $5 \times 10^6 \text{ m}^3$ . The effective head of water is 100 metres. The penstock, turbine and generation efficiencies are respectively 95%, 90% and 85%.

- (i) Calculate the total electrical energy that can be generated from the power station.  
(ii) If a load of 15,000 kW has been supplied for 3 hours, find the fall in reservoir level.

**Solution.**

$$\begin{aligned} \text{(i) Wt. of water available, } W &= \text{Volume of reservoir} \times \text{wt. of } 1\text{m}^3 \text{ of water} \\ &= (5 \times 10^6) \times (1000) \text{ kg} = 5 \times 10^9 \times 9.81 \text{ N} \\ \text{Overall efficiency, } \eta_{\text{overall}} &= 0.95 \times 0.9 \times 0.85 = 0.726 \\ \text{Electrical energy that can be generated} &= W \times H \times \eta_{\text{overall}} = (5 \times 10^9 \times 9.81) \times (100) \times (0.726) \text{ watt-sec.} \\ &= \frac{(5 \times 10^9 \times 9.81) \times (100) \times (0.726)}{1000 \times 3600} \text{ kWh} = \mathbf{9,89,175 \text{ kWh}} \end{aligned}$$

- (ii) Let  $x$  metres be the fall in reservoir level in 3 hours.

$$\begin{aligned} \text{Average discharge/sec} &= \frac{\text{Area of reservoir} \times x}{3 \times 3600} = \frac{2.4 \times 10^6 \times x}{3 \times 3600} = 222.2x \text{ m}^3 \\ \text{Wt. of water available/sec, } W &= 222.2x \times 1000 \times 9.81 = 21.8x \times 10^5 \text{ N} \\ \text{Average power produced} &= W \times H \times \eta_{\text{overall}} \\ &= (21.8x \times 10^5) \times (100) \times (0.726) \text{ watts} \\ &= 15.84x \times 10^7 \text{ watts} = 15.84x \times 10^4 \text{ kW} \\ \text{But kW produced} &= 15,000 \text{ (given)} \\ \therefore 15.84x \times 10^4 &= 15,000 \\ \text{or } x &= \frac{15,000}{15.84 \times 10^4} = 0.0947 \text{ m} = \mathbf{9.47 \text{ cm}} \end{aligned}$$

### 5-1-3 ما هو الارتفاع الحرج ؟

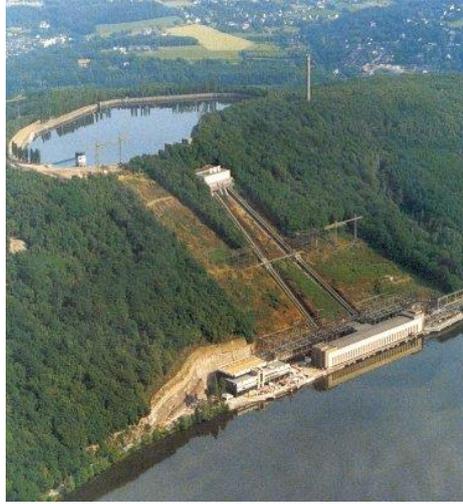
الارتفاع الحرج هو أقصى ارتفاع لسطح المياه في خزان السد بعده يتوقف تشغيل المحطة ، وذلك لحدوث ظاهرة التكيف (Cavitation) . و سبب حدوث ظاهرة التكيف هو أنه عند زيادة الضغط

المائي في الخزان تزيد سرعة المياه داخل التوربينات ويقل ضغط المياه ( Bernoulli equation ) ، وعند هذه النقطة تتحول المياه من الحالة السائلة إلى الحالة الغازية (غليان السائل) مكونة فقاعات غازية ، ومع زيادة سرعة التوربينات تنفجر هذه الفقاعات محدثة تآكل في ريش التوربينات ، لذلك لابد من إيقاف التشغيل عند هذه السرعات العالية .

#### 4-1-5 محطات الضخ والتخزين

نشير هنا إلى أن أفضل طريقة حالياً تستعمل في تخزين الطاقة الكهربائية بكميات هائلة ، هي طريقة ضخ المياه إلى خزان علوي محفور بصورة طبيعية فوق جبل كما في الشكل 3-5 ثم استرجاع الطاقة بعد ذلك من خلال محطات توليد مائية ، فعند توفر فائض من الإنتاج يتم استعماله لرفع المياه بواسطة المضخات الكهربائية للتخزين أعلى الجبل (تخزين في صورة طاقة وضع) ، ثم استعمال هذه المياه المخزنة لتولد الطاقة عند ذروة الطلب ، حيث تندفع من أعلى الجبل لتصطدم بتربينات هيدروليكية لإنتاج الطاقة الكهربائية .

وهذه الدورة يمكن أن تكون يومية أو أسبوعية أو فصلية. وتسمى بتقنية الضخ والتخزين Pumping Storage . وحالياً تتم دراسة تنفيذ مشروع مشابه في جبل عتاقة بمصر .



شكل 3-5:

## 6

## محطات التوليد بالطاقة المتجددة

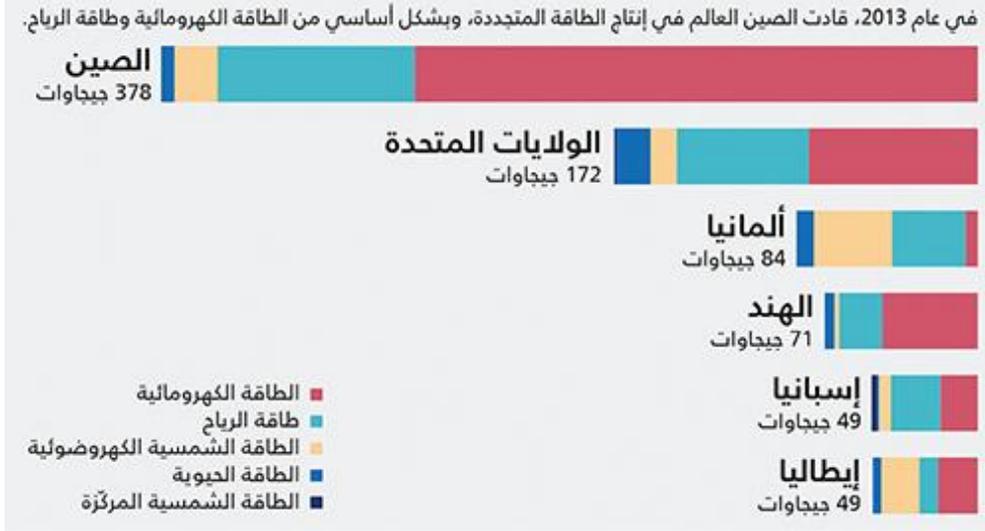
مع تقدم تقنيات التصنيع في مجال محطات التوليد بالطاقة الجديدة أصبحت أسعار إنشاء هذه المحطات متقاربة مع أسعار المحطات التقليدية ، حيث وصل السعر في 2015 إلى 4 سنت لكل ك وات ساعة من الخلايا الشمسية (مشروع شركة أكوا-بور في محطة شمسية بدبي) ، وبلغ نفس السعر في محطة رياح بمصر في نفس العام 2015 (شركة EDF المنفذة لمزرعة رياح قدرة 250 ميغا وات بمصر).

هذا الانخفاض يصاحبه عدم الحاجة لمد شبكات كهربية لأن التوليد يصبح محلي ، ومع الأخذ في الاعتبار حجم التقليل من الانبعاثات الكربونية ، وهذا ما يؤكد أهمية هذا النوع من الطاقات الذي ندرسه في هذا الفصل.

وسيتم التركيز على خمسة أنواع كمثال فقط ، وهى:

- محطات الخلايا الكهروضوئية
- المحطات الشمسية الحرارية
- محطات الـ Geothermal
- محطات التوليد من المد والجزر
- محطات الرياح

والشكل 1-6 يبين حجم التطور الهائل في إنتاج الطاقة الجديدة في بعض الدول الكبرى.



شكل 6-1:

## محطات الخلايا الكهروضوئية

### PV Power Plant

الشمس هي مفاعل نووي عملاق يقوم على مبدأ الاندماج النووي وليس الانشطار النووي ، فالشمس تتكون أساسا من الهيدروجين والهيليوم والكربون ، ويحدث داخلها اندماج بين أنوية اثنين من ذرات الهيدروجين لتشكيل نواة الهيليوم وينتج عن هذه العملية طاقة هائلة باستمرار .

والطاقة المنبعثة من الشمس لا تصل إلى الأرض بالتساوي بل تختلف حسب الوقت من اليوم ، وفقا للإمالة الموسمية من الكرة الأرضية بالنسبة للشمس ، وفقا لتوزيع المناطق المناخية على سطح الأرض ، وما إلى ذلك .

و التقديرات تشير إلى أن كل متر مربع على الأرض يتلقى من الشمس ما بين 1000 إلى 1300 وات . وحيث أن معظم الخلايا الشمسية في السوق لها كفاءة لا تتعدى في المتوسط 10% فهذا يعني أن كل متر مربع من الخلايا يمكن أن يولد تقريبا 100 وات (تزيد أو تنقص حسب كفاءة الخلايا المستخدمة).

## 6-1 قواعد أساسية في الطاقة الشمسية

أشير في المقدمة التالية إلى بعض المعلومات عن الطاقة الشمسية التي يحتاجها المتعاملون معها والتي قد تبدو للبعض غريبة في بعض جزئياتها. وسأعرض ذلك من خلال بعض الأسئلة:

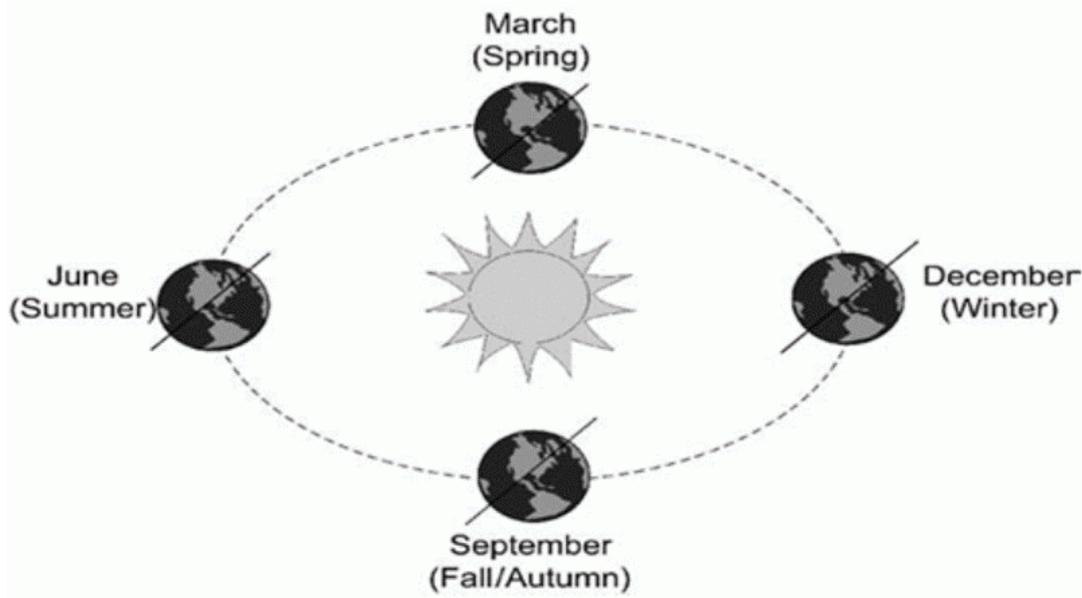
### 6-1-1 لماذا يكون الصيف أعلى في درجة الحرارة؟

البعض يظن أن ذلك بسبب أن الشمس تكون أقرب للأرض في هذا الفصل ولذا تكون الحرارة أعلى. والحقيقة أن الإجابة ليست فقط خطأ بل معكوسة. بمعنى أن الصحيح أن الشمس تكون في الصيف أبعد عن الأرض منها الشتاء . إذن فلماذا تكون الحرارة أعلى؟

لمعرفة السبب لابد من فهم طريقة دوران الأرض حول نفسها (كل 24 ساعة مسببة ظاهرة الليل والنهار) ، وطريقة دورانها حول الشمس (كل 365 يوم وربع مسببة ظاهرة الفصول الأربعة). فالأرض أولا تدور حول نفسها ولكن محور دورانها يكون مائلا بزاوية 23 درجة تقريبا كما في الشكل 6-2 . كما أن دورة الأرض حول الشمس تكون في مسار إهليجي elliptical وليس دائريا . بمعنى أنها لا تدور في دائرة لها نصف قطر ثابت ، بل تدور في مدار له قطر Diameter أطول من القطر الآخر .

فلو أخذنا نصف الكرة الشمالي (الذى تقع فيه كل الدول العربية) ستجد أن الصيف يحدث كما فى الشكل 2-6 حين يكون نصف الكرة الشمالى مواجهاً للأرض ، ولكن فى نفس الوقت حين تكون الكرة الأرضية تقع على القطر الأكبر من مسار الدوران أى عندما تكون أبعد عن الشمس. فلماذا ترتفع الحرارة ؟ هل فقط لأنها تواجه الشمس ؟ هذا جزء من الإجابة ، وباقى الإجابة لأنها تواجه الشمس لمدة طويلة من اليوم ، فزيادة البعد عن الشمس يجعل منطقة التغطية أطول زمنياً كما لو أخذت ورقة وقربتها لمصباح ستجد أن ضوء المصباح يغطى مساحة معينة من الورقة ، لكن لو أبعدت الورقة ستجد أن المصباح أصبح يغطى مساحة أكبر. وهذا هو السر فى حرارة الصيف ، ليس لأن الأرض أقرب للشمس بل العكس لأن الأرض أبعد عن الشمس (وبالتبع تواجه الشمس) ولذا يكون نهار الصيف أطول وكمية الحرارة التى تصل للأرض أكبر.

لاحظ فى الشكل أن الشتاء يقع فى نصف الكرة الشمالى أيضاً حين تكون الأرض على القطر الأكبر لكن الفرق هنا أن الشمس لا تواجه نصف الكرة الشمالى ، ولذا يكون ليل الشتاء طويلاً وكمية الحرارة أقل.



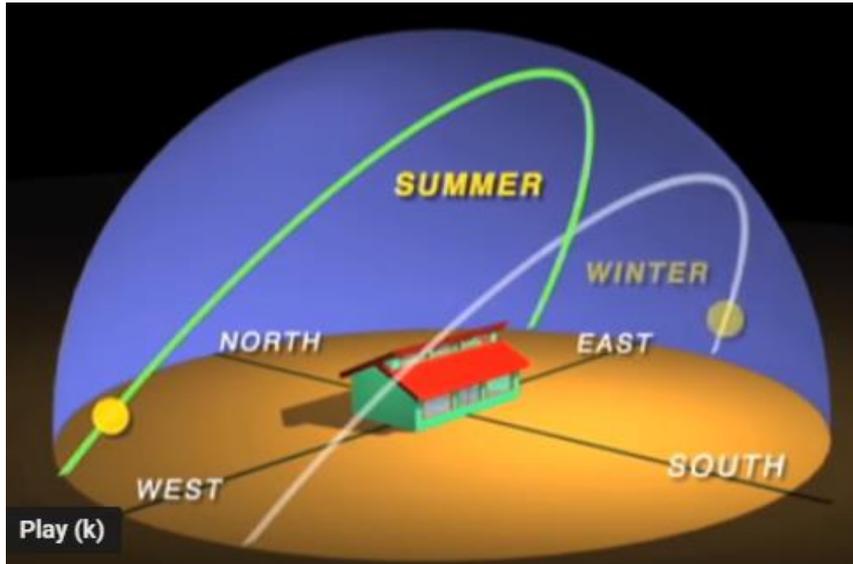
شكل 2-6:

## 6-1-2 إلى أي جهة توجه الألواح الشمسية؟

معلوم أن الألواح الشمسية ستنتج أقصى قدر من الطاقة لو كانت أشعة الشمس عمودية عليها ، وبالطبع هذا لا يمكن أن يحدث طوال اليوم إلا باستخدام أجهزة solar tracking ، فإن لم تستخدم هذه التقنية فيجب أن توجه الألواح إلى الجهة التي تضمن سقوط الأشعة المباشرة أطول فترة ممكنة على الألواح.

لاحظ في الشكل 3-6 أن الألواح جهة الجنوب تتمتع بإضاءة أكبر من الألواح المتجهة إلى الشمال وذلك بسبب ميل مسار الشمس جهة الجنوب قليلا.

و أيا كان مكانك في نصف الكرة الشمالي فإن الشمس في أي فصل من فصول السنة تكون دائما مائلة ناحية الجنوب ، لذا فإن جميع الألواح الشمسية في البلاد التي تقع في نصف الكرة الشمالي يجب أن توجه جهة الجنوب. ويبقى السؤال التالي:



شكل 3-6 :

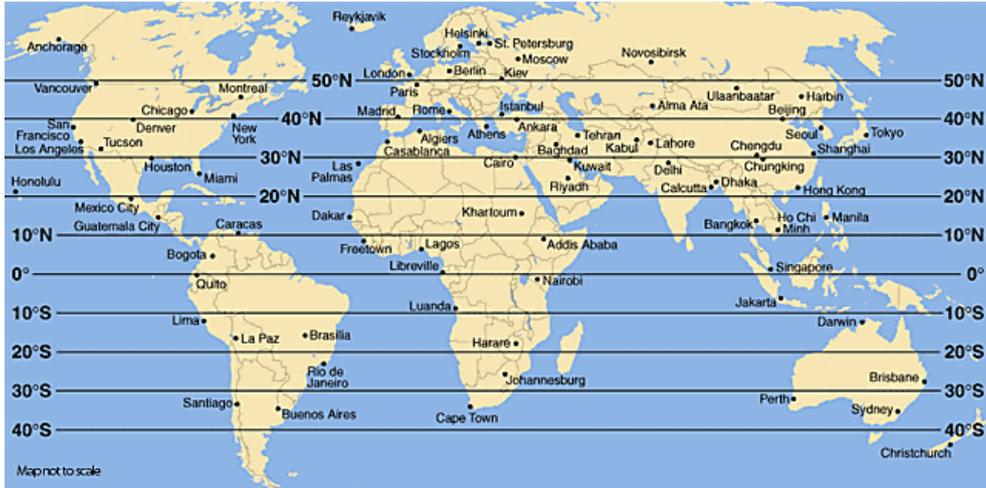
## 6-1-3 كيف أختار زاوية الميل جهة الجنوب؟

الحقيقة أنه لو كنت تعيش على خط الاستواء نفسه فإن زاوية الميل المثلى هي صفر ، بمعنى أن الألواح توضع أفقية ، ولو كنت تعيش في أقصى طرفي الكرة الشمالي أو الجنوبي فإن أنسب زاوية هي 90 درجة. أما إذا كنت كما في الدول العربية فإن أنسب زاوية للميل (جهة الجنوب كما ذكرنا) تتوقف على موقعك الجغرافي وتحديدًا على قيمة خط العرض الذي تقع عليه.

وهذا السؤال (زاوية الميل) أصعب من السؤال السابق (الجهة) ، لأن المسار الإهليجي elliptical لدوران الأرض حول الشمس يتغير زاوية ميله هو الآخر حسب الفصل كما في الشكل 6-3. وبالتالي فالإجابة ليست رقما ثابتا ، بل كل فصل له زاوية ميل مثلى. وهناك قاعدة مبسطة يمكن استخدامها في تحديد زاوية الميل التي تحقق أعلى استفادة من الإشعاع الشمسي في كل الفصول في السنة . وهذه القاعدة هي :

- في فصل الصيف : ( درجة خط العرض - 15 درجة ) = زاوية الميل المثالية
- في الخريف والربيع : ( درجة خط العرض ) = درجة الميل المثالية
- في فصل الشتاء : ( درجة خط العرض + 15 درجة ) = درجة الميل المثالية.

والشكل 6-4 فيه خطوط العرض التي تقع عليها عواصم العالم



شكل 6-4 :

### 6-1-4 الاستفادة من الطاقة الشمسية في توليد الكهرباء

يتم الاستفادة من الطاقة الشمسية في أغراض توليد الطاقة الكهربائية عبر طريقتين أو نظامين:

- 1- النظام الكهروضوئي: وذلك عبر استخدام الخلايا الكهروضوئية PV Cells تحويل الطاقة الضوئية الشمسية بشكل مباشر إلى كهرباء من خلال تعريض هذه الخلايا للطاقة الضوئية . ويمكن بهذه الطريقة أن نحصل على ما يقرب من 10-15% من الطاقة الساقطة على المتر المربع في صورة كهرباء مباشرة كما في الأمثلة الموجودة في الجزء التالي.

2- كما يمكن استخدام نظام المركبات الشمسية وهي أنظمة تستخدم العدسات والمرآيا لتركيز الأشعة الشمسية المتناثرة الحاملة للطاقة الحرارية نحو بقعة معينة ، ووفقاً لآليات متعددة و متنوعة يتم تحويل هذه الحرارة المركزة إلى طاقة كهربية وبالتالي ففي هذا النظام يتم الحصول على الطاقة الكهربائية بشكل غير مباشر من الطاقة الشمسية. ونعرض هذا في المثال الثاني من محطات الطاقة الجديدة.

## 2-6 أمثلة للمحطات الكهربائية الكهروضوئية

نستعرض هنا أكبر محطات الطاقة الشمسية في العالم التي تستخدم الألواح الكهروضوئية بناءً على القدرة المنتجة من كل محطة:

### 1- محطة ولاية أريزونا

تقع محطة (Agua Caliente Solar Project) (شكل 5-6) في مدينة يوما في ولاية أريزونا في الولايات المتحدة الأمريكية وهي إلى حد الآن أكبر محطة طاقة شمسية تعمل بتقنية الخلايا الكهروضوئية (PV Photovoltaic solar cell) وتمتد على مساحة تصل إلى 9.7 كم مربع ، و القدرة المركبة إلى الآن هي 400 ميغا وات ، وقد تم تركيب هذه المحطة من قبل شركة (First Solar) حيث تتألف هذه المحطة من 5 مليون لوح من الخلايا الشمسية الرقيقة (thin film) بقدرة تقريبية بين 75-77 وات لكل لوح .



شكل 5-6 :

## 2- محطة شارنكا الهندية

تقع محطة (Charanka Solar Park) (شكل 6-6) في مدينة شارنكا في الهند ، وتمتد على مساحة تصل إلى 19.8 كم مربع ، تعمل أيضا بتقنية الخلايا الكهروضوئية و القدرة المركبة فيه في نهاية عام 2014 وصلت إلى 300 ميغا وات وبتكلفة 280 مليون دولار.



شكل 6-6 :

## 3- محطة في الصين

تقع محطة Huanghe Golmud Solar Park (شكل 7-6) في صحراء جولمود في مقاطعة (Qinghai) في الصين ، وتمتد على مساحة 5.64 كم مربع. كانت أكبر محطة خلايا شمسية في العالم (PV Photovoltaic solar cell) عندما تم تركيبها في 2011 وتبلغ قدرتها 200 ميغا وات .



شكل 7-6 :

## 4- محطة بنبان للطاقة الشمسية بمصر

يقع مجمع "بنبان" لإنتاج الكهرباء بالطاقة الشمسية على بعد 30 كلم شمال مدينة أسوان في صعيد مصر. ويضم المشروع 32 محطة بقدرة إنتاج 1465 ميغاوات، أي ما يعادل 90 بالمئة من إنتاج السد العالي. بلغ حجم الألواح الشمسية المستخدمة في كل محطة نحو 200 ألف لوحة شمسية تنتج 50 ميغاوات ويقام المشروع على مساحة قدرها 37 كلم مربع، في موقع قوة سطوع الشمس فيه تستمر طيلة أيام السنة، ما أهله لإقامة المحطة فيه. وقدرت تكلفة المشروع الذي تشارك فيه 39 شركة متخصصة ويعد الأكبر في العالم على الإطلاق، ثلاثة مليارات وأربعة مئة مليون يورو.

يربط المشروع بعدد 19 محطة طاقة شمسية من المشروع بإجمالي قدرات 930 ميغاوات بمحطات المحولات «بنبان» 1 و2 و3 و4 جهد 220/22 kV منها عدد 16 محطة طاقة شمسية تعمل بشكل تجاري بإجمالي قدرات 780 ميغاوات وعدد 3 محطات في مرحلة اختبارات التشغيل .

قامت الشركة المصرية لنقل الكهرباء بإنشاء وتشغيل 4 محطات محولات سعة 3x175 م. ف. أ للمحطة الواحدة جهد 220/22/22 kV وتم الانتهاء من جميع الخطوط جهد 220 لربط محطات المحولات الأربعة بعضها البعض وكذلك ربطها بالشبكة الموحدة جهد 220 kV ، ويتم تفريغ الطاقة المولدة من مشروع بنبان من خلال 4 دوائر .



## المحطات الشمسية الحرارية

### Solar Thermal Power Plant

يمكن توليد الكهرباء باستغلال الحرارة المباشرة لأشعة الشمس ، باتباع تقنية الكهرباء الحرارية الشمسية solar thermal electricity. وهذه المحطات البخارية تقوم بتركيز أشعة الشمس فوق مساحات شاسعة بواسطة مرايا مقعرة أو عدسات لامة هائلة ، وتركز الأشعة الشمسية لتقع فوق مستقبلات خاصة بها سائل كالزيت يمتص الحرارة ويدور في الأنابيب لتسخين الماء وتحويله لبخار ، وهذا البخار يدير توربينات توليد الكهرباء. ويمكن الاستعانة في الأيام الغائمة أو بالليل بالمرحوقات التقليدية كالفحم والنفط والغاز الطبيعي. ويتم بهذه الطريقة تقليل استخدام الوقود الملوث للبيئة.

## 3-6 الأنواع المختلفة من محطات الشمسية الحرارية

ومحطات التوليد هذه تعتمد واحدة من منظومات ثلاث مشهورة:

### 1-3-6 منظومة القطع المكافئ

هذا النوع يظهر في الشكل 6-8 ، وفيه يكون سطح المركبات الشمسية العاكس على شكل قطع مكافئ ويتم تركيز الإشعاع المباشر على مستقبل حراري طولي مركب في بؤر المركبات لتسخين الزيت (ناقل الحرارة). والصورة لمحطة في أسبانيا وتعتبر أول محطة في أوروبا تستخدم تقنية المركبات الشمسية parabolic trough solar thermal حيث تم بناءها في 2009 وبقدرة مركبة تقدر ب 150 ميغاوات وتمتلك هذه المحطة خزان ملح مذاب ، يتم فيه تخزين الطاقة الحرارية الناتجة عن الشمس خلال النهار لتبقى المحطة عاملة حتى في ساعات عدم وجود الشمس ، وقد بلغ إنتاج هذه المحطة 540 ميغا وات ساعة سنويا.



شكل 6-8 :

وأول محطة في الشرق الأوسط من هذا النوع أنشئت في مصر (الكريمت - جيزة) (شكل 6-9) باستخدام تكنولوجيا القطع المكافئ وتصل المساحة الإجمالية للمركزات الشمسية إلى حوالي 220 ألف متر مربع ويتم توصيلها على التوالي والتوازي للحصول على درجة الحرارة المطلوبة ، ثم ينتقل الزيت الحراري المغلي من هذه المركزات إلى مولد البخار التقليدي بالمحطة لإنتاج بخار مشبع بضغط حوالي 20 جوى ودرجة حرارة 400 درجة ، ثم يتم نقله كما في المحطات البخارية العادية إلى المحمصات ليتكامل مع البخار الذى أنتج فى نفس المحطة ولكن بالوقود العادى (الغاز الطبيعى) ، وبالتالي تنخفض نسبة الوقود العادى فى النهاية والأهم من ذلك انخفاض كمية الغازات المنبعثة من احتراقه.



شكل 6-9 :

ويوجد أيضا في أبو ظبي محطة شمس 1 بالقرب من مدينة زايد وقد تم تشغيلها في 2013 وهي تتألف من 258000 ، مرآة على مساحة 2.5 كيلومتر مربع بقدرة إنتاجية تبلغ 100 ميغاوات.

### 6-3-2 منظومة البرج المركزي

وفيها تستخدم أعداد هائلة من المرايا المسطحة الموزعة حول البرج المركزي (شكل 6-10) بحيث تنعكس الأشعة الساقطة على المرايا إلى البرج الذي يحتوي على الزيت (ناقل الحرارة).



شكل 6-10 :

وبالطبع يمكن إنتاج الكهرباء من هذه المحطات في الليل و بكفاءة عالية ، و ذلك بتخزين الفائض الحراري الكبير من الطاقة الشمسية في مادة ملحية تسمى الملح المذاب ( Molten Salt ) الذي يمكنه تخزين

الطاقة الحرارية في خزانات و من ثم يتم إعادة استخدامها في الليل في عملية إنتاج البخار عن طريق عملية التبادل الحراري. كما يمكن إضافة الغاز أو مشتقات النفط كوقود ثانوي في حالة هبوب العواصف و الغبار و الأمطار و تسمى هذه العملية بـ ( Hybrid System ) أى النظام المزدوج للتوليد.

### 3-3-6 منظومة القطع الدائري

وفيها يتم تركيز الإشعاع الشمسي على المبادلات الحرارية في بؤر المركزات الشمسية شكل 6-11. والمجمع Collector هو جهاز يستخدم لتحويل الطاقة الموجودة في أشعة الشمس أو الإشعاع الشمسي إلى صورة أكثر قابلية للاستخدام والتخزين .



شكل 6-11 :

## توليد الطاقة الكهربائية من حرارة باطن الأرض

### Geothermal Power Plant

## 4-6 طاقة باطن الأرض

تتأثر تربة الأرض بتغيير درجة حرارة الجو اليومية على عمق 30-70 سم ، وتتأثر بتغيير حرارة الفصول على عمق 10-20 متر ، لكن يزول تأثير حرارة الشمس عند عمق أبعد من 15-20 متر ، ويكون التأثير الوحيد الباقي هو تأثير حرارة باطن الأرض Magma ، وبسبب حرارة مركز الأرض الهائلة فإن درجة الحرارة في باطن الأرض تزداد 3 درجات مئوية لكل 100 متر عمقاً ، فإذا كان متوسط درجة حرارة السطح 20 درجة مئوية فإننا يمكن أن نبلغ درجة غليان الماء ( 100 درجة مئوية ) عند عمق 2.7 كم تقريباً. ولو افترضنا إطراد الزيادة في الحرارة بإطراد العمق لبلغنا عند عمق 50 كم عن سطح الأرض درجة انصهار الصخر وهي تقع ما بين 1200 - 1800 درجة مئوية. ولكن بالطبع هناك صعوبات فنية للوصول إلى أعماق كبيرة في باطن الأرض ، وأقصى عمق وصل إليه الإنسان هو تقريباً 8 كم.

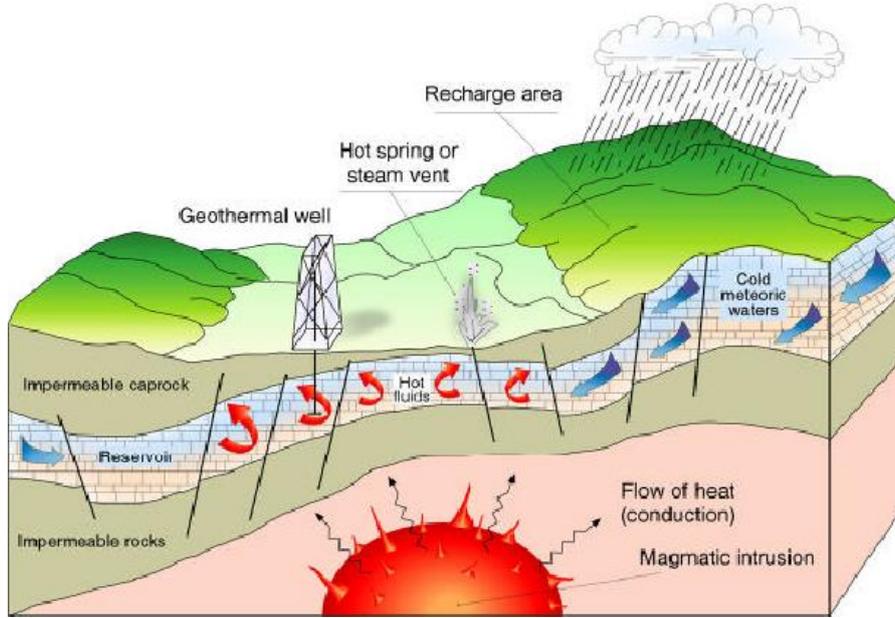
### 1-4-6 من أين جاءت حرارة باطن الأرض؟

وفي تفسير سبب هذه الطاقة الكامنة يقول العلماء أن الأرض كانت جزءاً من الشمس ، فانفصلت عنها وبردت قشرتها الأرضية خلال ملايين السنين ، ولكن بقي القلب في حالة ذوبان وانصهار . فالأرض بشكلها الأول كانت عبارة عن كتلة نارية مشعة عملاقة ، ونتيجة لانخفاض درجة الحرارة بدأت تتشكل القشرة الأرضية التي قامت بعزل حرارة باطن الأرض مما أدى إلى حصر كل المواد المنصهرة في باطن الأرض. وبسبب شدة الضغط المتولد نتيجة العزل وتكون القشرة بدأت عمليات الاندماج النووي مما ضاعف درجات الحرارة إلى حوالي 6700 درجة مئوية في مركز الأرض.

وبالتأكيد فنحن قد رأينا كيف تتحدر المياه نزولاً في الشلالات، لكن السؤال الأصعب هو : ما الذي يدفع بها صعوداً لأعلى من باطن الأرض؟

إن الينابيع الحارة التي نراها في بعض الأماكن هي أعمدة من البخار والمياه الساخنة تتفجر كالبراكين المائية. فالصخور البركانية في باطن الأرض هي التي ترفع حرارة المياه المتجمعة تحت سطحها ، ويتأثر

الضغط القوي، تغلي المياه ، فتتمدد ويندفع مزيج البخار والماء نحو سطح الأرض، فنراها على شكل أعمدة ترتفع إلى 5000 متر أحياناً! . وقد تصل في بعض الأماكن إلى مرحلة Flashover وتخرج في هيئة بخار مباشرة. والشكل 6-12 يظهر هذه الحالات حسب بعدها عن مركز الأرض وذلك في مقطع رأسى من الكرة الأرضية.



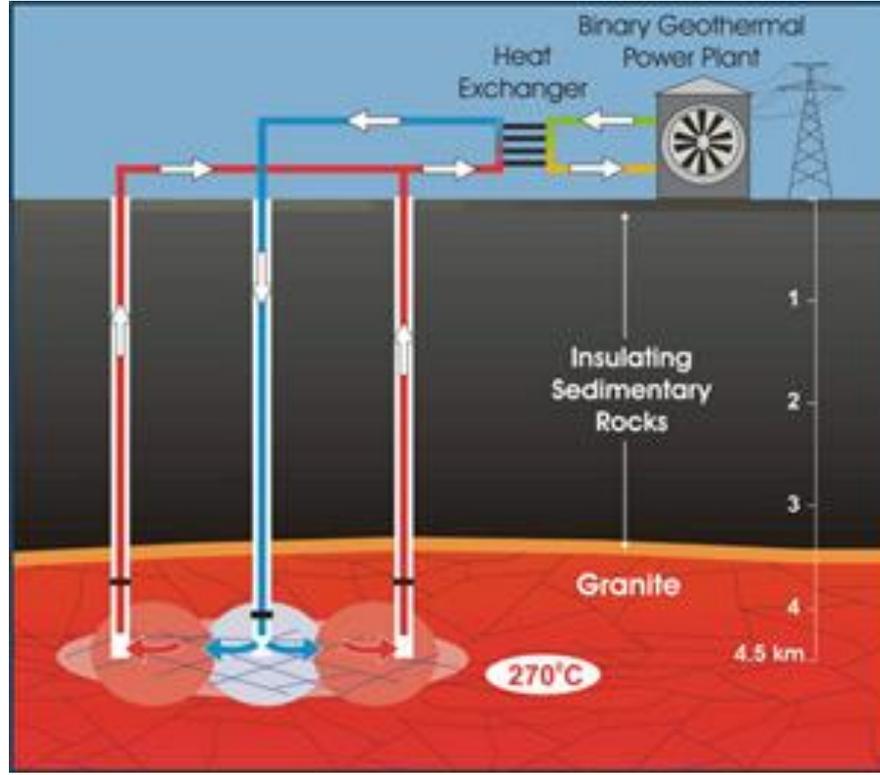
شكل 6-12 :

والحرارة الكامنة في باطن الأرض تسبب ارتفاع درجة حرارة الماء الموجود حول الصخور الأرضية إلى درجة الغليان في بعض الأماكن وإلى درجة التبخر في أماكن أخرى (شكل 6-13) . وبالتالي تستخدم هذه المياه الساخنة مباشرة كما في آيسلندا ، أو يستخدم البخار في توليد الكهرباء كما في إيطاليا أو يستخدم الماء الساخن كمرحلة أولى ضمن محطة توليد الكهرباء لتوفير الطاقة المستخدمة من الوقود الملوث للبيئة .

## 6-4-2 استخلاص الحرارة

يتم الوصول لعمق الأرض بمد أنبوب دخول لدفع الماء لأسفل يسمى أنبوب الحقن Injection Well ، وأنبوب خروج لاستقبال الماء المغلي المندفع لأعلى يسمى أنبوب الإنتاج Production Well ، حيث يتم ضخ مياه عادية عبر الأنبوب الأول إلى أسفل ، وعندما تصل المياه إلى الأسفل ونتيجة احتكاكها مع الحرارة العالية ، يتبخر الماء بشدة (حيث تبلغ الحرارة 1000 درجة) ليخرج البخار من الأنبوب الآخر

مشكلاً ضغطاً هائلاً ، فيصعد البخار بقوة نحو الأعلى ، وفي نهاية الطرف الذي يصعد منه البخار ، توضع توربينات ضخمة من شأنها توليد الطاقة من ذلك البخار (شكل 6-16) .



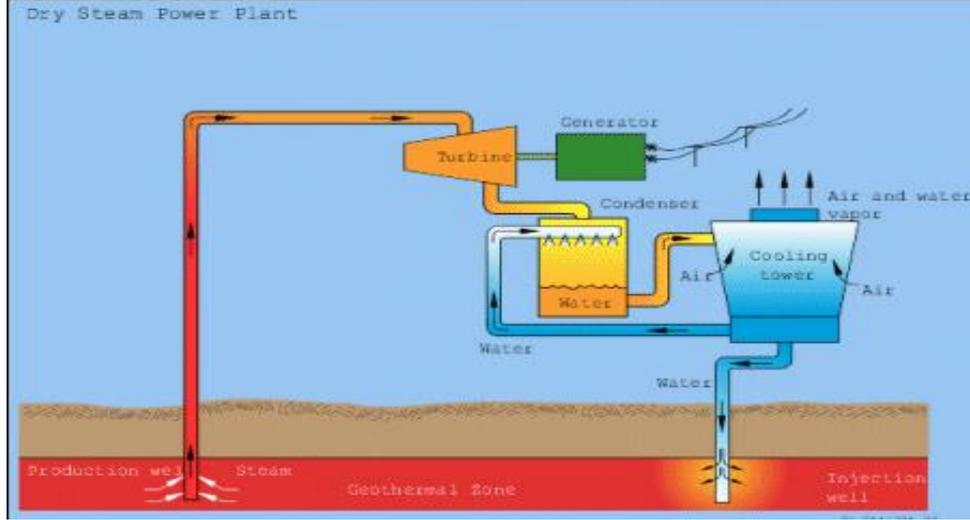
شكل 6-13 :

## 5-6 أنواع محطات الـ GEOTHERMAL

### 1-5-6 محطات البخار الجاف:

هذه الطريقة هي أقدم الطرق وأكثرها انتشاراً ، وهي نفس الطريقة التي استخدمت في إيطاليا منذ سنة 1904م ، حيث تستخدم هذه المحطات الماء الموجود بشكل طبيعي في الطبقات الأرضية العميقة والموجود تحت تأثير ضغط وحرارة عاليين ، فيتم استخراجها بواسطة حفر آبار عميقة فيخرج على شكل بخار ماء بسبب حرارته العالية وبسبب فرق الضغط يسير هذا البخار في أنابيب ثم يصطدم بتوربينات تدير المولدات

الكهربية التي تنتج الطاقة الكهربائية. يضخ الماء المتكثف إلى الأرض عبر بئر آخر يسمى بئر الحقن Injection Well (شكل 14-6).

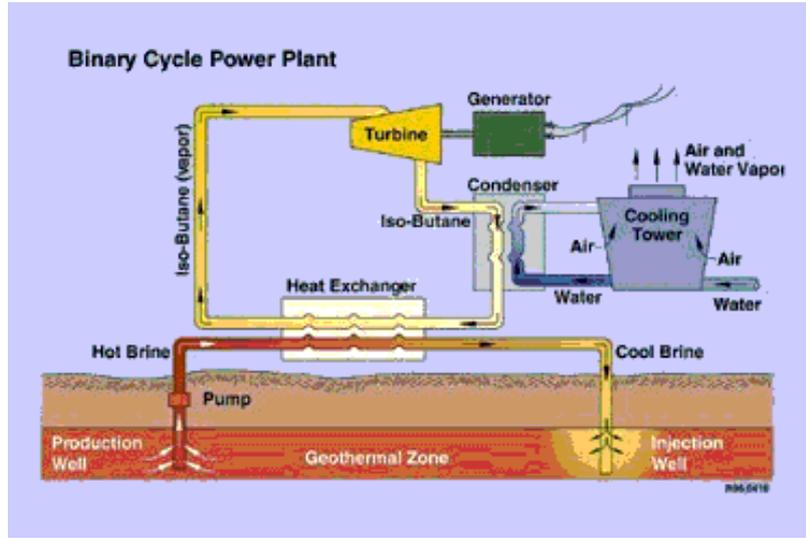


شكل 14-6 :

### 2-5-6 محطات الدائرة المزدوجة:

تستخدم هذه المحطات السوائل الموجودة تحت الأرض ذات درجة غليان مرتفعة (حوالي 200 مئوية) يتم ضخها إلى الأعلى حيث تقوم بتسخين الماء ذي درجة غليان عادية (100 مئوية) في أنبوب آخر يمر بمحاذاة الأنبوب الساخن (مبادل حراري). يتبخر الماء الذي تم تسخينه بسبب درجة الحرارة المرتفعة للسائل في الأنبوب الآخر . يحرك البخار توربين المولد الكهربائي ويتكثف فيعود مجدداً إلى محاذاة الأنبوب الساخن ، ويتحرك بهذه الطريقة في دوران مستمر. يُعاد ضخ الماء المستخرج مجدداً إلى الأرض عبر بئر الحقن (شكل 15-6)

لاحظ أن الأماكن المرشحة لعمل آبار مثل هذه هي في الغالب تقع في أماكن التثقيب عن البترول .



شكل 15-6

## محطات التوليد من المد والجزر

### Tidal Power Stations

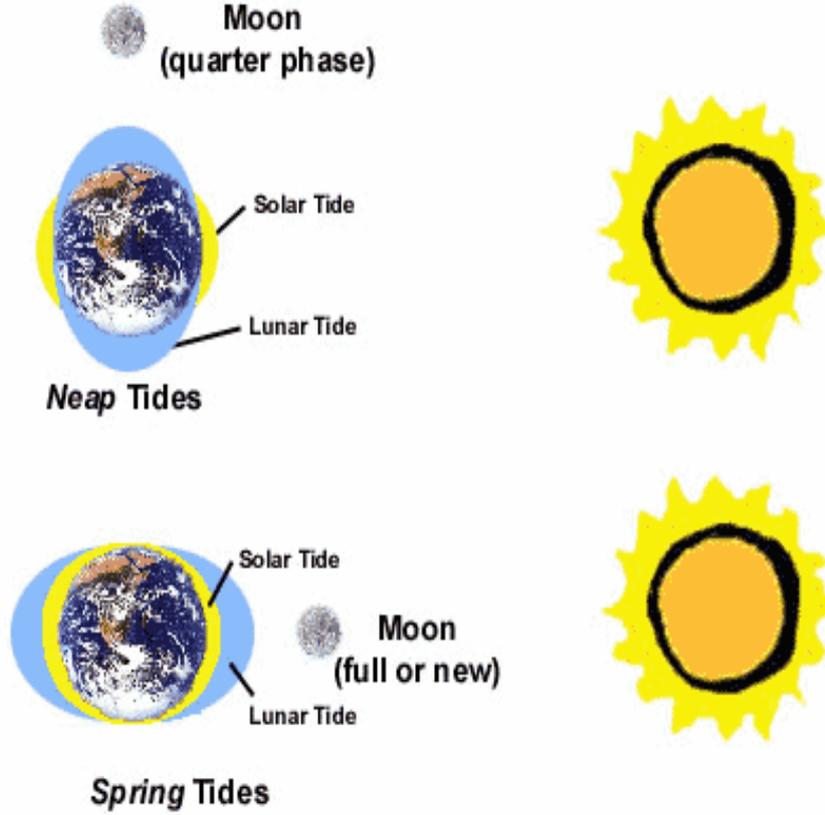
المد والجزر من الظواهر الطبيعية المعروفة عند سكان سواحل البحار . فهم يرون مياه البحر ترتفع في بعض ساعات اليوم وتتنخفض في الأخرى. وقد لا يعلمون أن هذا الارتفاع ناتج عن جاذبية القمر عندما يكون قريبا من هذه السواحل ، وأن ذلك الانخفاض يحدث عندما يكون القمر بعيدا عن هذه السواحل ، أي عندما يغيب القمر ، علما أن القمر يدور حول الأرض في مدار أهليجي elliptical أي بيضاوي الشكل دورة كل شهر هجري ، وأن الأرض تدور حول نفسها كل أربع وعشرين ساعة . فإذا ركزنا الانتباه على مكان معين ، وكان القمر ينيره في الليل ، فهذا معناه أن القمر قريب من ذلك المكان وأن جاذبيته قوية . لذا ترتفع مياه البحر . وبعد مضي اثني عشرة ساعة من ذلك الوقت ، يكون القمر بالجزء المقابل قطريا ، أي بعيدا عن المكان ذاته بعدا زائدا بطول قطر الكرة الأرضية فيصبح اتجاه جاذبية القمر معاكسة وبالتالي ينخفض مستوى مياه البحر .

وأكثر بلاد العالم شعورا بالمد والجزر هو الطرف الشمالي الغربي من فرنسا حيث يعمل مد وجزر المحيط الأطلسي على سواحل شبه جزيرة برنتانيا إلى ثلاثين مترا ، وقد أنشئت هناك محطة لتوليد الطاقة الكهربائية بقدرة 400 ميغاوات . حيث توضع توربينات خاصة في مجرى المد فتديرها المياه المتجهة للخزان في نصف الشهر الأول ثم تعود المياه الهابطة من الخزان وتديرها مرة أخرى. في نصف الشهر الثاني (انظر الصورة في نهاية هذا الجزء).

## 6-6 أساسيات عملية المد والجزر TIDAL POWER

ينجم المد والجزر عن الجاذبية التي يمارسها القمر على الأرض (شكل 6-16) ، و قوة الجاذبية هذه تؤدي إلى اندفاع مياه المحيطات نحو القمر وبالتالي ارتفاع المياه بدرجة أكبر على جهة الأرض المواجهة للقمر ، و يحدث أيضا على الجانب الآخر من الأرض بنفس الطريقة ، و بين منطقتي المد هاتين ، تجد منطقة من الجزر لأن ارتفاع الماء في منطقة يعنى بالضرورة انخفاضه في منطقة أخرى.

ونتيجة لدوران الأرض ، فإن مستوى البحر في أي بقعة من الكوكب يرتفع وينخفض بالتناوب مرتين في اليوم. وقوة المد والجزر هذه تقدر عالميا بثلاثة بلايين كيلو وات ، إلا أنه لا يمكن تسخير كل هذه القوة الهائلة.



شكل 6-16

وهناك ما يقارب الاثنتي عشرة محطة في العالم ، قابلة لإنتاج الطاقة في العالم إلا أن صناعة هذه المحطات يحتاج إلى وجود ظاهرة ضخمة للمد والجزر . فالمستوى بين المد والجزر يجب أن يتعدى العشرة أمتار على الأقل ، أضف إلى ذلك أن المحطة يجب أن تكون بجوار (خزان) هائل ، قدر الإمكان. لهذا يجب بناؤه في خليج ، أو عند مصب نهر. وفوق الحاجز أو السد الذي يفصل الخليج أو مصب النهر عن البحر تبني محطة الطاقة.

ومن الأماكن التي يكثر فيها المد والجزر السواحل الشمالية للخليج العربي في منطقة الكويت حيث يصل أعلى مد إلى ارتفاع 11 مترا .

## 6-6-1 فكرة التوليد

كما ذكرنا فإنه يمكن تنفيذ هذه المحطات في الأماكن التي يكون هناك فرق كبير بين المد والجزر خلال الشهر كشرط أول . أما الشرط الثاني فهو وجود مكان (مخرج) ضيق على خليج مثلا لبناء سد بين البحر والخليج الصغير الذي يمثل خزان للمياه أو ما يسمى مستوعب للمياه. والدورة تبدأ من أيام المد العالية حيث تفيض المياه إلى الخزان من خلال السد ويمكن توليد كهرباء في هذه الفترة. ثم عندما تبدأ أيام الجزر ، وفيها يكون الماء في الخزان أعلى منه في المحيط ، فترجع المياه بفضل فرق الارتفاع وتتولد الكهرباء مرة أخرى. والشكل 6-17 يبين هذه الفكرة بوضوح.



شكل 6-17 :

كمية الطاقة التي يتم توليدها تعتمد كما ذكرنا على فرق ارتفاع المد والجزر ، وعلى كمية المياه التي يتم تخزينها في المستوعبات. يمكن للمضخات أن تعمل في كلا الاتجاهين. حتى أنها يمكن أن تعمل أثناء حركة المد. يمكن استخدام المضخات أيضا لرفع مستوى المياه في المستوعبات إلى ما هو أعلى من مستوى البحر. حين يكون ذلك ممكنا ، وخصوصا عندما يقل الطلب على استهلاك الطاقة ، وتحديدًا في فترة الليل. يتم تفريغ المياه بعد ذلك إلى البحر ، حين يزداد الطلب على الكهرباء.

يلاحظ أيضا أن المراجع العلمية لا تسميه سدا ولكن تسميه حاجزا لكونه صغيرا مقارنة بالسدود المعروفة. ونشير هنا إلى أنه قد تم بناء أول محطة توليد تعتمد على المد والجزر في فرنسا حيث تم استقطاع المستوعب من البحر كما في الشكل 6-18. وبالطبع فأحدى فوائد محطات التوليد من المد والجزر أنها تنتج كميات هائلة من الطاقة دون أن تلوث البيئة.



شكل 6-18 :

## Wind Farms محطات الرياح

### 7-6 طاقة الرياح

استخدمت طاقة الرياح منذ آلاف السنين في دفع المراكب على سطح الماء وطحن الحبوب والري وفي ضخ المياه ، إلى جانب بعض التطبيقات الميكانيكية الأخرى . وتشير المراجع العلمية والمخطوطات التاريخية إلى أن الفرس هم أول من استخدم طاقة الرياح في طحن الحبوب وضخ المياه.

ونشير هنا إلى أن سيدنا عمر بن الخطاب رضى الله عنه قبل استشهاده بيومين على يد أبي لؤلؤة المجوسي دار بينهما حوار ، سأله عمر فيه عن طواحين الرياح فأجاب أبو لؤلؤة أنه يستطيع صنعها فطلب منه سيدنا عمر أن يصنع للمسلمين واحدة ، إلا أن أبا لؤلؤة غدر به وقتله.

أما في أوروبا فقد انتشرت طواحين الرياح "Wind Mills" منذ القرن الثاني عشر كما في الشكل 6-19 حتى وصل عددها في عام 1750 ميلادية إلى أكثر من 8000 طاحونة في هولندا وأكثر من 10000 طاحونة في إنجلترا ، كان الغرض الرئيسي لعملها هو ضخ المياه "Water Pumping" من المناطق المنخفضة إلى مناطق الزراعات المرتفعة ، أو إدارة أحجار "الرحى" لطحن حبوب القمح والذرة وغيرها.



شكل 6-19

### 6-7-1 الطاقة الشمسية هي مصدر الرياح

تتولد الرياح نتيجة لامتناس أسطح الأرض والبحار والمحيطات لأشعة الشمس "Solar Radiation" وبالتالي ترتفع درجة حرارة هذه الأسطح بدرجات مختلفة ، وعندما يسخن الهواء فإن ذلك يؤدي إلى انخفاض كثافته ، وتبعاً لذلك ينتقل الهواء من منطقة الضغط المرتفع (حيث يقل الإشعاع الشمسي) إلى منطقة الضغط المنخفض (حيث الإشعاع الشمسي الأعلى) مما يؤدي إلى نشوء الرياح.

### 6-7-2 كيف تعمل توربينات الرياح ؟

المكونات الرئيسية لتوربين الرياح هي ريش دؤارة تحمل على عمود ومولد يعمل على تحويل الطاقة الحركية للرياح إلى طاقة كهربية ، فعندما تمر الرياح على الريش تخلق دفعة هواء ديناميكية تتسبب في دوران الشفرات ، وهذا الدوران يشغل المولد فينتج طاقة كهربية ، كما جهزت تلك التوربينات بجهاز تحكم في دوران الريش لتنظيم معدلات دورانها ووقف حركتها إذا لزم الأمر .

تعتمد كمية الطاقة المنتجة من توربين الرياح على سرعة الرياح وقطر الشفرات ؛ لذلك توضع التوربينات التي تستخدم لتشغيل المصانع أو للإضاءة فوق أبراج ؛ لأن سرعة الرياح تزداد مع الارتفاع عن سطح الأرض ، ويتم وضع تلك التوربينات بأعداد كبيرة على مساحات واسعة من الأرض لإنتاج أكبر كمية من الكهرباء. ولأن هناك بعض الأوقات التي تقل فيها سرعة الرياح ، مما يصعب معه إنتاج الطاقة الكهربائية ، فإن مستخدمي طاقة الرياح يجب أن يكون لديهم مولدًا احتياطياً يعمل بالديزل أو بالطاقة الشمسية لاستخدامه في تلك الأوقات. والمكان الأفضل لوضع التوربينات (عمل حقل رياح) يجب ألا يقل متوسط سرعة الرياح فيه سنويًا عن 12 ميل في الساعة .

ومعظم مزارع الرياح تقام على اليابسة ، لكن ونظراً للتأثير المهم لسرعة الرياح على الطاقة المولدة فإن بعضاً من مزارع الرياح تقام داخل المياه ويطلق عليها المزارع البحرية "Off-Shore Wind Farms" حيث ترتفع سرعات الرياح عنها في اليابسة (شكل 6-28 لاحقاً).

### 6-7-3 مكونات محطة توليد الكهرباء من الرياح

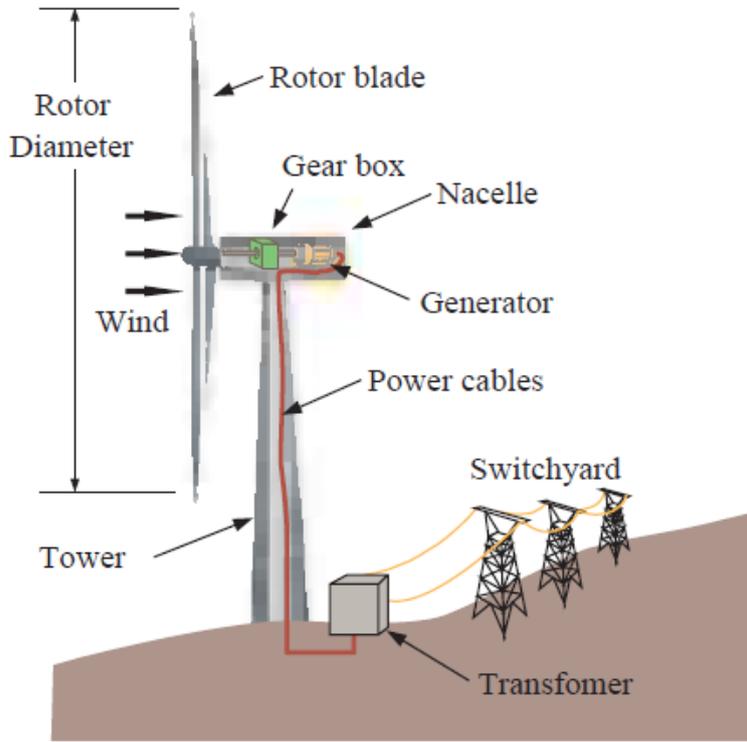
تتكون مروحة التوليد كما في الشكل 6-20 من:

- 1- عدد 2 إلى 3 ريشة Rotor Blades وتصل في الطول إلى 20 متر للريشة ، وفي الأنواع الجديدة مثل وحدة الـ 5 ميغا يتجاوز قطر الدوران 130 متر.
- 2- صندوق تروس Gear Box وترتبط بين :

a. محور السرعة البطيئة الذى تركيب عليه الريش وهو يدور بسرعة حوالي 30 لفة فى الدقيقة

b. محور السرعة العالية وهو الذى يصل مباشرة للمولد ويدور بسرعة 1500 لفة فى الدقيقة

3- غرفة القمرة التى تسمى Nacelle ، وتشتمل على المولد والتروس فهى بمثابة Housing لكل المعدات ، وتشتمل أيضا على المعدات التى تتحكم فى الريش ، حيث يمكنها تغيير زاوية ميل الريشة بالنسبة للرياح بواسطة موتور ، وبالتالي تتحكم فى سرعة الدوران التى تقاس بلفة /ثانية متأثرة بسرعة الرياح والتى يجب ألا تقل عن 5 متر فى الثانية. ويجب ألا تزيد عن 30 م/ث.



شكل 6-20 :

4- مولد كهربى وتتراوح قدرته من 500 إلى 1500 كيلووات وبعض المولدات وصلت الآن إلى 3 و 5 و 6 و 7 ميغا وات .

5- يقوم المحول الخاص بالوحدة بنقل القدرة بجهد توزيع (حوالى 24 kv) عبر كابلات و يتم تجميعه مع الوحدات الأخرى ثم الرفع إلى خطوط النقل ، و لا يتم اتصال كل وحدة مباشرة مع خطوط النقل.

6- والجميع (ماعد المحول) مثبتون في أعلى برج التوليد Tower والمصنوع من الاستيل ويبلغ ارتفاعه من 40 إلى 60 متر ، وحاليا يتجاوز الارتفاع 140 متر مع قدرات 5 ميغا. ويُصنع البرج من الحديد المعالج حراريا ليتحمل مكونات الحاوية الـ Nacelle والتي يصل وزنها إلى قرابة الثلاثين طن.

في بدء التشغيل يعتمد المولد الحثي Induction Generator على سحب تيار كهربى من الشبكة الكهربائية والذي يكون ذو تردد ثابت (50 هيرتز في مصر) مع نسبة تغير طفيفة ( $\pm 0.5\%$ ) ، وهو ما يعني أن التربيننة تعمل في البداية كموتور حتى تصل سرعة دوران الريش إلى قيمة تختلف بحسب تصميم التربيننة (مثلا 27 لفة/دقيقة) ، بعدها يترك الأمر لقوة الرياح لاستكمال تدوير التربيننة وإنتاج الكهرباء. ولضمان الاستعادة بأقصى قدر من طاقة الريح ، يستخدم نظام لتوجيه " التربيننة في اتجاه الرياح Yawing " ، فإذا ارتفعت سرعة الرياح عن 25 متر/ثانية فإن الفرامل "Brakes" تمنع الريش من الدوران مخافة أن تؤدي سرعة الرياح العالية إلى تحطمها وتكسير الأجزاء الدوّارة في الحاوية "Nacelle".

#### 4-7-6 كمية الطاقة المولدة من الرياح

تتوقف كمية الطاقة المولدة بالرياح بشكل كلى على الطاقة الحركية للهواء والتي تتناسب طرديا مع كتلة الهواء وسرعته. والمعادلة التالية تبين ذلك بدلالة مساحة المروحة وكثافة الهواء كما يلي:

$$P = 0.5 \times \rho \times A \times C_p V^3$$

where:

**P** = power in watts (746 watts = 1 hp)

**$\rho$**  = air density (about 1.225 kg/m<sup>3</sup> at sea level)

**A** (m<sup>2</sup>) = rotor area exposed to the wind

**V** = upstream wind speed in meters/sec

$$C_p = \frac{\left(1 + \frac{V_0}{V}\right) \left[1 - \left(\frac{V_0}{V}\right)^2\right]}{2}$$

**V<sub>0</sub>** (downstream wind velocity of the exit of the rotor blades)

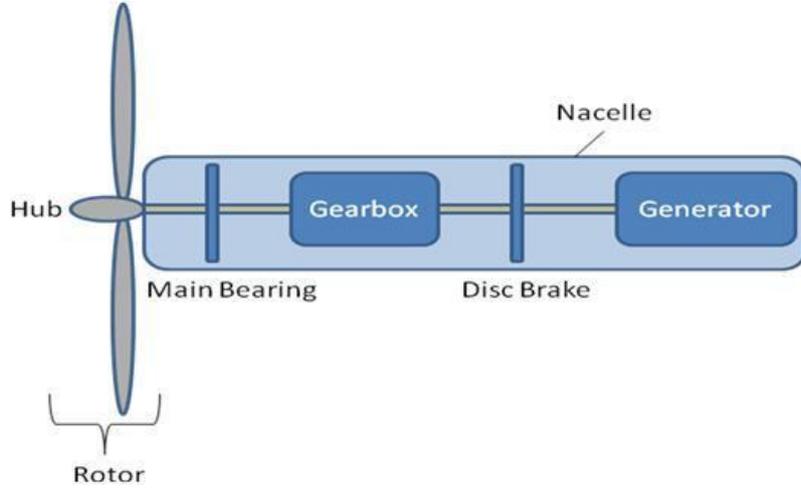
## 8-6 العوامل المؤثرة في إنتاج الطاقة

1- سرعة الرياح : يتأثر إنتاج توربينات الرياح تأثراً مباشراً بسرعة الرياح حيث تتناسب الطاقة المنتجة مع مكعب السرعة ، ولبيان هذه العلاقة نضرب المثال التالي ، إذا كانت سرعة الرياح 5 متر/ثانية فإن الطاقة الناتجة تعادل - تقريباً - 125 وحدة طاقة ، فإذا ارتفعت السرعة وأصبحت 6 متر/ثانية فإن الطاقة الناتجة تزيد إلى 216 وحدة طاقة. ويبين هذا المثال البسيط كيف أن ارتفاع سرعة الرياح بمقدار 1 متر/ثانية أدى إلى زيادة كبيرة في الطاقة المنتجة ، أيضاً تتأثر الطاقة المنتجة من التوربينات بعوامل أخرى منها كثافة الهواء وارتفاع البرج ومساحة سطح الدوران وتأثير التوربينات على بعضها البعض "Wake Effect" ، إلا أن التأثير المباشر يكون مع سرعة الرياح.

2- مساحة سطح الدوران "Swept Area": تعبر مساحة سطح الدوران عن المساحة الناشئة عن دوران الريش والتي تتحدد بطول الريشة وبالتالي حجم الهواء الذي يضرب مستوى الدوران ، ويطلق أيضاً على مساحة سطح الدوران قطر التربينه.

3- نسبة سرعة سن الريشة "Tip-Speed Ratio": هي النسبة بين السرعة عند نهاية الريشة "سن الريشة Tip Blade" وسرعة الرياح ، والتي تزيد كلما زاد طول الريشة ، وتتحدد حدودها المثلى بين 60 - 80.

وعندما تهب الرياح على التربينه يدور الـ Rotor تبعاً للقوى الايروديناميكية و يتم نقل هذه الحركة إلى المولد عن طريق محورين و صندوق تروس سرعة ( محور السرعة البطيئة ومحور السرعة العالية) ونسبة النقل لصندوق التروس تحدد السرعة التي سوف تصل للمولد. والشكل 6-21 يوضح معظم مكونات تربينة الرياح في القمرة وفيها أيضاً محركات السيرفو التي تقوم بتغيير جهة الريش تبعاً للرياح التي تهب على التربينه.

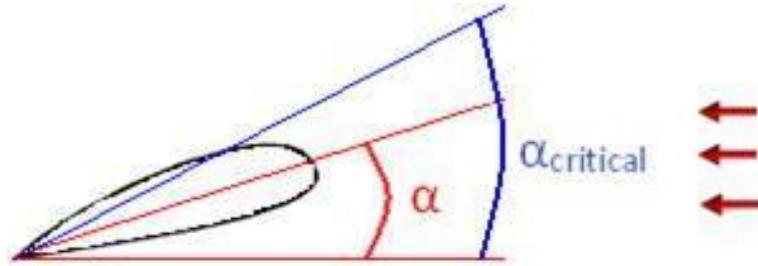


شكل 6-21 :

### 6-8-1 زاوية الهجوم:

مساحة السطح التي تهب عليها الرياح هي أحد المؤشرات الهامة لزيادة القوة الايروديناميكية على ريش التربينه . لذلك فإن الزاوية التي يتم تغيير الريش لمواجهة الرياح عليها هي زاوية مهمة جدا و تدعى زاوية الهجوم  $\alpha$  .

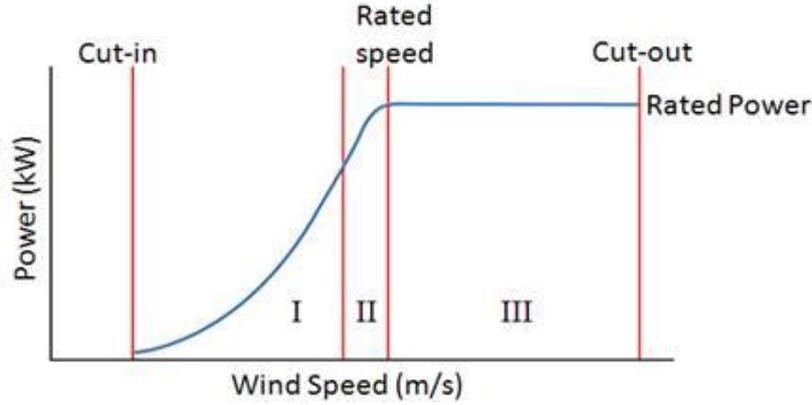
وزاوية الهجوم الحرجة تعرف بأنها الزاوية التي لا يمر عندها أي تيار هوائي على الشفرات ، ويوضح الشكل 6-22 زاوية الهجوم ، و زاوية الهجوم الحرجة.



شكل 6-22 :

### 6-8-2 منحنى القدرة :

يوضح هذا المنحنى (شكل 6-23) العلاقة بين القدرة المنتجة من التربينه وسرعة الرياح ، وهو محدد رئيسي لتحديد نوع التحكم المطلوب استخدامه في التربينه.



شكل 6-23 :

يوضح الشكل السابق منطقة تشغيل التربينه بين الـ Cut in Speed و الـ Cut out Speed و في هذه المنطقة يكون تشغيل التربينه ضمن الحدود التي تسمح بها قدرتها و تبقياها في حدود أمان التشغيل وتساعد في الحفاظ على بنيتها .

في المنطقة الأولى و الثانية و عندما تكون سرعات الرياح قليلة يتم تعديل الريش للحصول على أعظم قدرة ، أما في المنطقة الثالثة و عندما تكون السرعات عالية و فوق سرعة الرياح الاسمية المصممة عليها التربينه يتم تعديل الريش لتقليل تأثير سرعة الرياح و الحفاظ على التربينه من السرعات العالية.

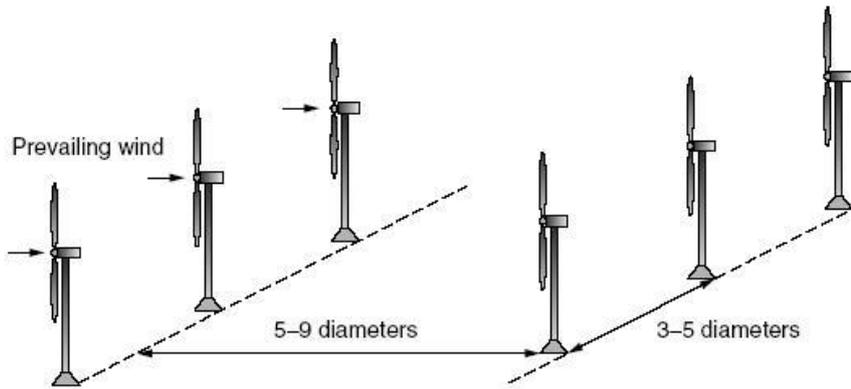
### 6-8-3 مميزات طاقة الرياح و عيوبها :

- طاقة الرياح طاقة محلية متجددة ولا ينتج عنها غازات أو ملوثات ، وبالتالي فإن تأثيرها الضار بالبيئة طفيف .
- 95% من الأراضي المستخدمة كحقول للرياح يمكن استخدامها في أغراض أخرى مثل الزراعة أو الرعي ، كما يمكن وضع التوربينات - الصغيرة بالطبع - فوق المباني .
- التأثير البصري لدوران التوربينات والضوضاء الصادرة عنها قد تزعج الأشخاص القاطنين بجوار حقول الرياح ، ولتقليل هذه التأثيرات يفضل إنشاء حقول الرياح في مناطق بعيدة عن المناطق السكنية .

- تتسبب التوربينات العملاقة أحيانا في قتل بعض الطيور خاصة أثناء فترات هجرتهم ، ويتم حاليا دراسة تأثيرها على انقراض بعض أنواع الطيور ، ولكن النتائج المبدئية تشير إلى أن التوربينات ليس لها هذا التأثير الشديد .
- ومن أبرز مشاكل محطات الرياح مشكلة الضوضاء وقد تم التغلب عليها بتحسين تصاميم الريش لتقليل الضوضاء .
- ومن المشاكل أيضا الصدا والتآكل ويعالج ذلك بطلاء الريش بمادة خاصة لمنع الصدا.
- وهناك مشكلة لا يشعر بها سوى المتخصصون في الوقاية ، وهي أن محطات الرياح (أيضا المحطات الشمسية) وكذلك كل محطة من محطات الطاقة الجديدة والتي تحتوى ضمن مكوناتها على Inverter سيكون تيار Short Circuit عند حدوث عطل على أحد الخطوط منخفض جدا وقد لا يتجاوز مرة ونصف من قيمة التيار الطبيعي ، والأخطر من ذلك أن مدة بقائه أيضا تكون قصيرة جدا ، ومن ثم فهناك صعوبة شديدة في اعتماد الطرق التقليدية للوقاية مع هذه الأنظمة. وبالطبع هناك أنواعا خاصة لأجهزة الوقاية المستخدمة لعلاج هذه المشكلة منها جهاز "الروكوف" ROCOF ويعنى Rate of Change of Frequency .

#### 6-8-4 ترتيب التربينات في مزارع الرياح

للحصول على هندسة معقولة للمزرعة يجب أن تكون الأبعاد بين صفوف التربينات (D 5-9) ، وذلك باتجاه الرياح السائدة و(3-5 D) بالاتجاه المتعامد لاتجاه الرياح ، حيث D ترمز للقطر Diameter الخاص بالشفرات كما يبين الشكل 6-24.

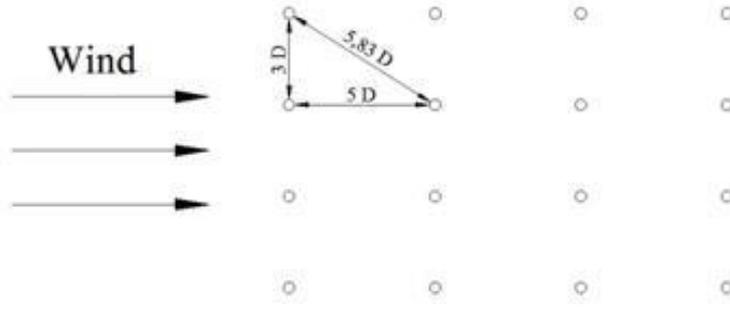


شكل 6-24 :

وغالبا ما توضع التريينات على مسافة  $5D$  في اتجاه الرياح السائدة (بين الصفوف) وعلى مسافة  $3D$  في الاتجاه العمودى على الرياح (بين التريينات). في هذه الحالة نميز نوعين من التوزيع:

### 1- التوزيع الطبيعي Natural distribution

وفيه يتم توزيع التريينات وراء بعضها بالترتيب كما في الشكل 6-25 :

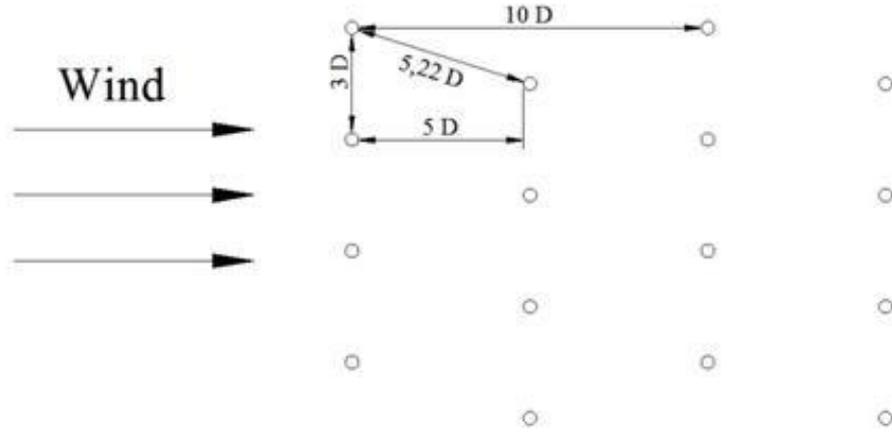


شكل 6-25

في هذا النوع تكون المسافة بين صفوف التريينات باتجاه الرياح  $5D$  ، والمسافة بين التريينات بالاتجاه المتعامد للرياح  $3D$  ، وتكون مساحة الأرض اللازمة للتريينة الواحدة  $5D*3D$ .

### 2- التوزيع الشطرنجي

وفيه يتم توزيع التريينات بالتناوب كرقعة الشطرنج فتكون مثلا الأبعاد بين الصفوف  $5D$  كما في الشكل 6-26:



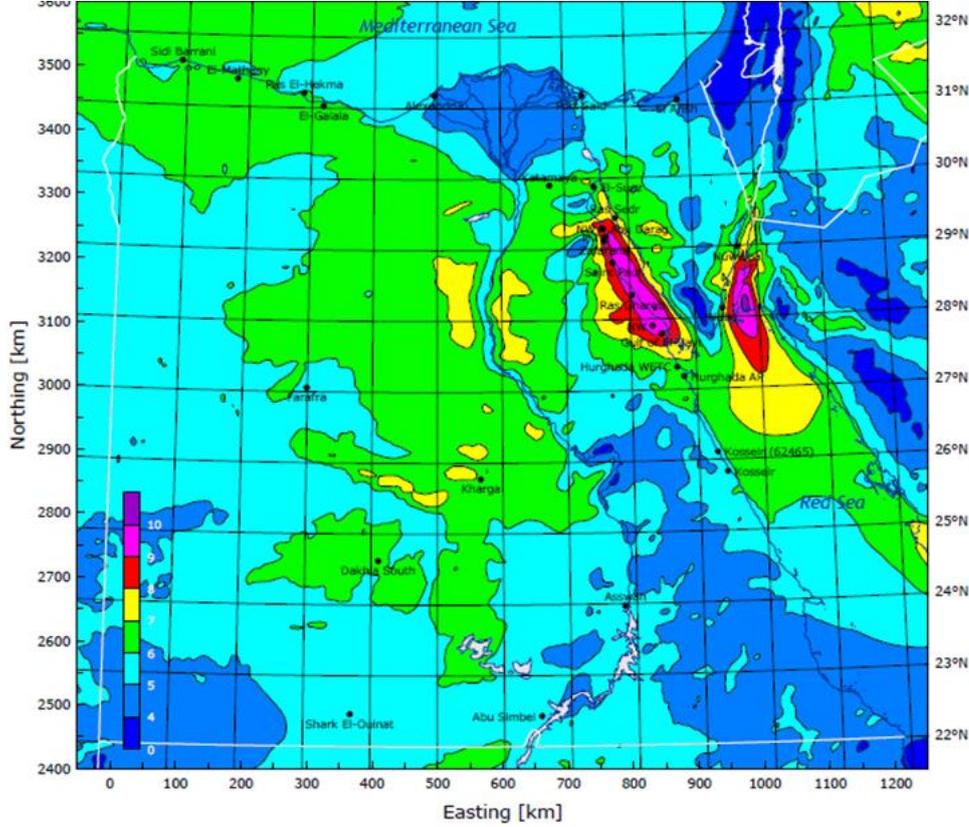
شكل 6-26

في هذا النوع تكون المسافة بين صفوف التربينات باتجاه الريح  $5D$  ، و تكون المسافة بين تربنتين متاليتين  $10D$  ، والمسافة بين التربينات بالاتجاه المتعامد للريح  $3D$ . في هذه الحالة تتضاعف المسافة بين التربينات باتجاه الريح بنفس مساحة الأرض اللازمة.

## 9-6 طاقة الرياح في مصر

- تتميز مصر بنشاط رياح ثابت نسبياً و معدل سرعة يصل إلى ( 10 أمتار في الثانية) و ذلك في منطقة خليج السويس و ساحل البحر الأحمر بين رأس غارب و سفاجا ، و في منطقة شرق العوينات.
- وبصفة عامة تكون سرعات الرياح في شهور الصيف أعلى منها في شهور الشتاء في تلك المناطق ، ويصل المتوسط السنوي لسرعة الرياح بالزعفرانة حوالي 9 متر/ثانية على ارتفاع 25 متر ، في حين أنها تصل إلى 10.5 متر/ثانية في منطقة جبل الزيت عند نفس الارتفاع.
- تم إنشاء محطات رياح لتوليد الكهرباء بالگردقة و الزعفرانة ، ، توفر استهلاكاً من الوقود البترولي يصل إلى حوالي 125 ألف طن بترول متكافئ سنوياً الأمر الذي ينعكس إيجابياً على اقتصاديات مشروعات الطاقة المتجددة.
- في 2014 تم تشغيل مشروع طاقة الرياح في منطقة جبل الزيت بقدرة 200 ميغا وات
- في مارس 2003 صدر أطلس رياح تفصيلي (جزء منه في الشكل 6-27) لخليج السويس بالتعاون مع معامل ريزو الدنماركية ، وفي فبراير 2006 صدر أطلس رياح جمهورية مصر

العربية. وقد بلغت القدرة المركبة الإجمالية في 2014 حوالي 500 ميجاوات ، ومن المتوقع الوصول بإجمالي طاقة الرياح إلى نحو 12% من الطاقة الكهربائية المولدة عام 2020.



شكل 6-27 :

## 10-6 محطات الرياح في البحار والمحيطات

الرياح البحرية تميل للتدفق بسرعة وقوة أكبر من الرياح على اليابسة ، ذلك لأن خشونة سطح البحر أقل منها عند اليابسة وعوائق هبوب الرياح أقل وبالتالي فإن ذلك يسمح للتربينات الرياح بتوليد طاقة كهربائية بشكل أكبر.

وبما أن الطاقة المستخرجة من الرياح تتناسب مع مكعب سرعة الرياح ، فإن أي زيادة بسيطة في سرعة الرياح يمكنها أن تحقق زيادة ملحوظة في الطاقة الكهربائية المتولدة ، على سبيل المثال تربينة الرياح المتواجدة في موقع سرعة الرياح فيه 16 ميل بالساعة (7 متر بالثانية) تنتج أكثر ب 50% من نفس تربينة المتواجدة في موقع سرعة الرياح فيه 14 ميل بالساعة (6 م بالثانية).

## 6-10-1 ميزات وضع تربينات الرياح في البحر :

1- انخفاض نسبة الضجيج الصوتي: أن تربينات الرياح خلال عملها تعمل على بعث صوت مزعج والذي أدى إلى التسبب بمشاكل للناس الذين يسكنون في المناطق المجاورة للمحطة الرياح ، حتى أن بعض المزارعين يشتكون بأن مواشيهم تتأثر بالضجيج الصادر عن شفرات تربينة الرياح ، لذلك توجد تربينات الرياح في البحر (شكل 6-28) يخفف من تأثير هذه المشكلة سواء على الإنسان أو الحيوانات التي تعيش في المناطق المجاورة.

2- لا تشكل تهديد على حياة الطيور المهاجرة: فتربينات الرياح المتواجدة على ارض اليابسة غالبا ما تسبب مقتل العديد من الطيور المصطدمة بشفراتها المتحركة ، على الرغم من أن هذه المشكلة تعمل بعض الدول التي تعتمد على طاقة الرياح على تفاديها بعدم إنشاء محطات ريح على طريق هجرة الطيور ، وتربينات الرياح في البحار تنهي هذه المشكلة حيث أن الطيور نادرا ما تطير فوق المحيطات.

3- لا يوجد لتربينات الرياح تأثير بصري كبير حيث أنها توضع بعيدة عن أماكن السكن ، فهي لا تؤثر على المنظر العام.

السلبية الوحيدة لتربينات الرياح في البحار بالنسبة للتربينات على اليابسة هو التكلفة ، حيث من الممكن أن تزيد كلفة الطاقة المولدة عن هذه تربينات بحوالي (2.5 إلى 3.5 مرة) عن تلك المتواجدة على اليابسة ولكن على أية حال مازالت تربينات الرياح في البحار صناعة قيد التطوير وهذه التكلفة العالية ستخف مع الزمن ، علما بأن التكلفة العالية بسبب ظروف العمل الصعبة لتكيب وصيانة تربينات في البحار والتي تتطلب الاستعانة بسفن خاصة لتكيبها في مياه البحر.



شكل 6-28 :

## 11-6 أسطورة المولدات من النوع FREE ENERGY

اختتم هذا الفصل بالتعليق على المولدات الموجودة على الإنترنت والتي تسمى Free energy generator وملخصها أنها تتكون من Rotor + Stator كما في المولدات العادية لكنها هنا لا تحتوي على ملفات بل تحتوي على أقطاب مغناطيسية من النوع Permanent magnet بحيث تتركب كمية ضخمة من الأقطاب على الـ Rotor وكمية أخرى ضخمة على الـ Stator ويكون دائما الأقطاب المتواجدة في الـ Rotor and stator داخل الـ Air gap متشابهة (شمالى يواجه شمالى أو جنوبى يواجه جنوبى) ، وتبدأ القصة فى مثل هذه الفيديوهات بأن يدار هذا المولد يدويا أولا ، ثم يترك بدون توصيله بأى مصدر خارجى للطاقة الحركية وتجده فعلا يستمر فى الدوران (بفعل التنافر بين الأقطاب). والحقيقة أن هذه الطاقة الحركية بغض النظر عن مدتها التى تطول أو تقصر حسب حجم الأقطاب فإن المشكلة الأساسية فيها هى أنها ضعيفة ولا يمكن من هذه الطاقة الحركية تغذية محرك 50 حصان مثلا ، ولكن لما كانت الأقطاب المستخدمة ضخمة فإنها يمكن أن تستمر بفعل القصور الذاتى لمدة طويلة نسبيا ، ويمكن خلال هذه المدة توليد طاقة كهربائية كافية لتضيء بعض اللمبات الموفرة كما فى الفيديوهات الموجودة على الإنترنت أو سخان صغير ، ولكن لا يمكن أن تغذى حملا كبيرا ولا يمكن أن تستمر لساعات فى تغذية الأحمال الصغيرة ، ولذا تجد هذه الفيديوهات لا تتعدى دقائق.

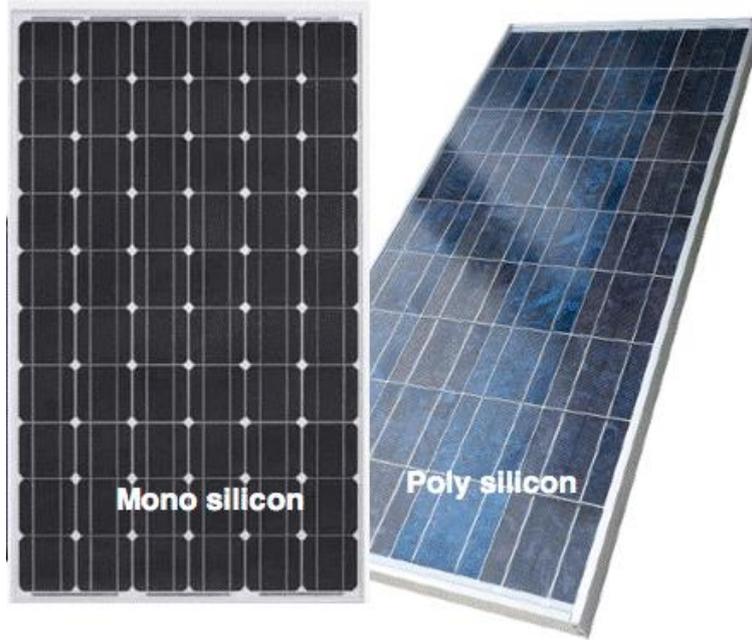
## منظومات الـ PV المربوطة بالشبكة العامة Large Scale PV System

### 12-6 أنواع الخلايا الشمسية

تصنع الخلايا الشمسية عموما من السيليكون.

#### 1-12-6 الخلايا وحيدة البلورة Monocrystalline Silicon

وتسمى أيضا بالألواح الأحادية ، مظهرها متناسق الذي يدل علي نقاء كريستالات السيليكون. الخلايا المكونة للألواح الأحادية عبارة عن سبائك سليكون تم تقطيعها إلي شرائح. وتستطيع أن تري أن الألواح الأحادية مظهرها مميز كما هو واضح بالصورة. و هذه الألواح هي أعلي الأنواع ، وتعطي كفاءة تصل إلي 22.5 % في المعمل، و لكن فعليا الخلايا المنتشرة تجاريا في 2017 كفاءتها لا تزيد عن 17.5% ، عمرها الافتراضي 25 سنة أو أكثر. ويكون لون الخلية مائل للأزرق الغامق الأقرب للأسود كما في الشكل 6-29.



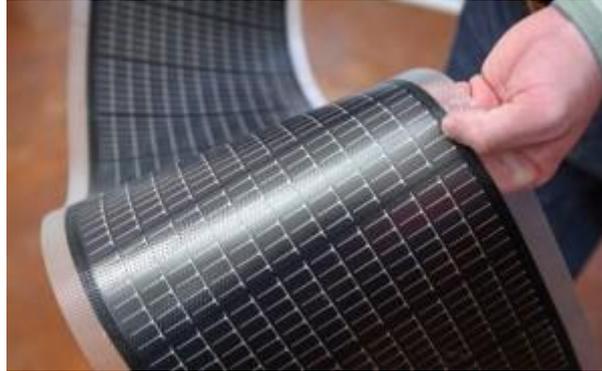
شكل 6-29

### 6-12-2 النوع الثاني هو الخلايا متعددة الكريستالات Polycrystalline Silicon

والفرق بينها وبين الأحادية واضح من حيث الشكل في الصورتين السابقتين فالنوع الأول يكون منتظم وصافى اللون والثاني غير منتظم في الشكل. وتتميز بانخفاض ثمنها مقارنة بالخلايا الأحادية وذلك لانخفاض كفاءتها إلى أقل من 16% ، وعمرها الافتراضي 25 سنة أو أكثر.

### 6-12-3 النوع الثالث هو Thin Film

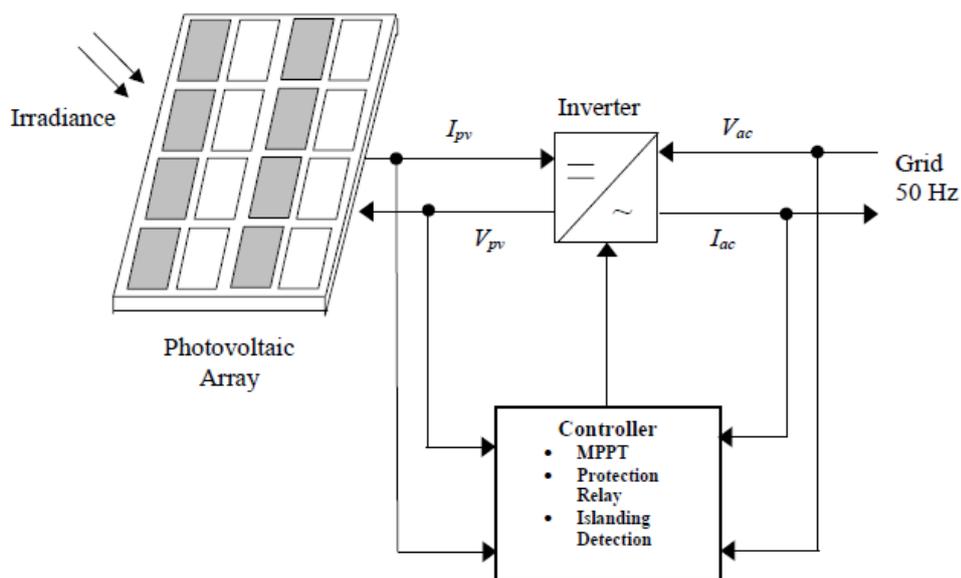
وهذا النوع من الألواح الشمسية رقيق وانسيابي كما هو واضح بالشكل 6-30 . ويأخذ شكل السطح الذي يتم تثبيته عليه ، معظم التطويرات والأبحاث التي تجري حاليا تقوم علي التطوير في هذه النوع بالتحديد نظرا لأن له انسيابية ووزنه وسمكه قليل وبالتالي فهي صالحة للعديد من التطبيقات مثل اسطح المركب و سيارات النقل ، لكن من عيوبها أنها أقل الأنواع كفاءة فكفاءتها لا تزيد عن 12% ، كما أن عمرها الافتراضي أقل من نظيرتها الأحادية والمتعددة و يصل إلى 15 عام فقط.



شكل 6-30

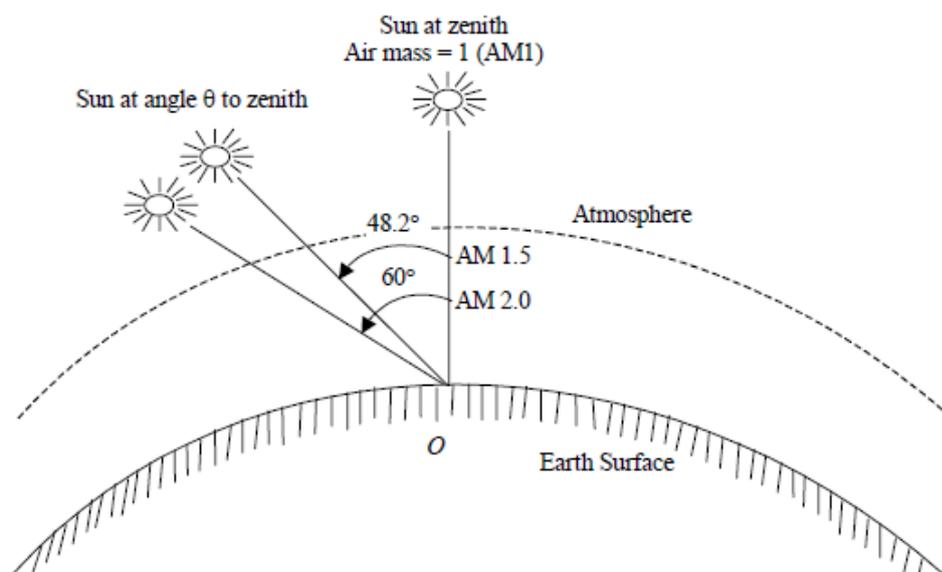
## 6-13 خصائص خلية الـ PV

التوليد الشمسي يعتمد على تحويل الطاقة الشمسية ( Sun light ) مباشرة لطاقة كهربائية بواسطة الـ Solar Cell والشكل 6-31 يوضح العناصر الأساسية في منظومة المحطات الشمسية المرتبطة بالشبكة.

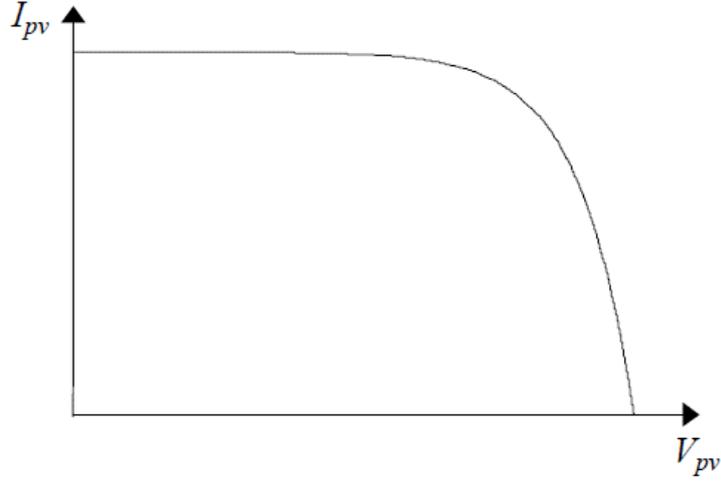


شكل 6-31

معلوم أن الـ Solar Power Density خارج الغلاف الجوي تصل إلى  $1370 \text{ W/m}^2$  ، لكن الـ Standard Test Conditions, STC على سطح الأرض تقول أن الـ Power Density تصل فقط إلى  $1000 \text{ W/m}^2$  عند 25 درجة مئوية و  $\text{Air Mass, AM} = 1.5$  ، وزاوية ميل تقريبا 50 درجة.

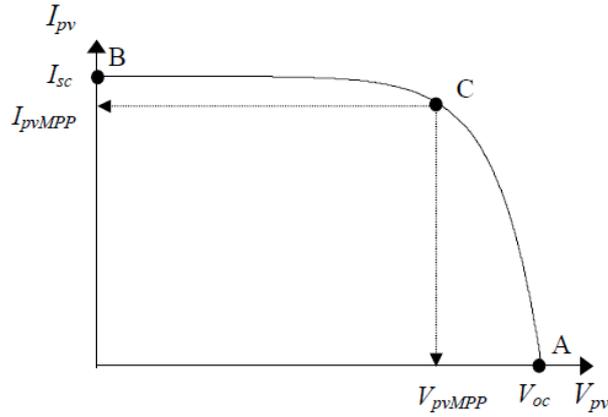


و فقط للتذكرة السريعة فإن الـ V-I Characteristic تظهر في الشكل 6-32.



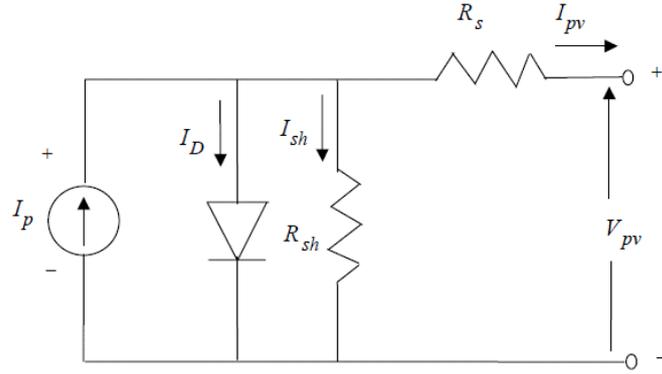
شكل 6-32

واضح من الشكل السابق أنه سيكون لدينا قيم مختلفة لحاصل ضرب الجهد في التيار ولذا يفضل دائما أن يتم تشغيل الخلية (طبعا باستخدام عند نقطة Max Peak Point, MPP التي تعطي أكبر قيمة لحاصل ضرب الجهد في التيار كما في الشكل 6-33



شكل 6-33

والدائرة التي يمكن أن تحقق هذه العلاقة تمثل في الشكل 6-34 وكأنها Current Source



شكل 6-34

ويلاحظ هنا وجود الـ Diode في اتجاه لأسفل والغرض من هذا الوضع تمثيل الوضع عند النقطة A حين تكون الدائرة Open circuit فيكون لدينا جهد عالي لكن تيار صفر في دائرة الخروج وهو ما يحققه التمثيل السابق للخلية.

وعندها يمكن تمثيل الدائرة كما في الشكل 6-35

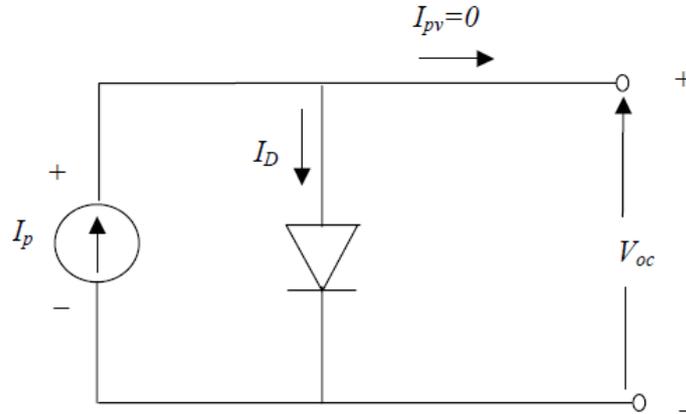


Figure 2.7: Open circuit condition

$$I_p - I_o \left[ e^{\frac{qV_{oc}}{nkT}} - 1 \right] = 0$$

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln \left[ \frac{I_p + I_o}{I_o} \right]$$

شكل 6-35

أما النقطة A فتتمثل حالة الـ Short Circuit وتمثل في الشكل 6-36

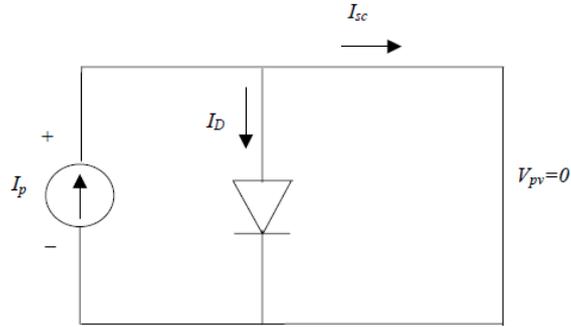


Figure 2.8: Short circuit condition

$$I_{sc} = I_p$$

شكل 6-36

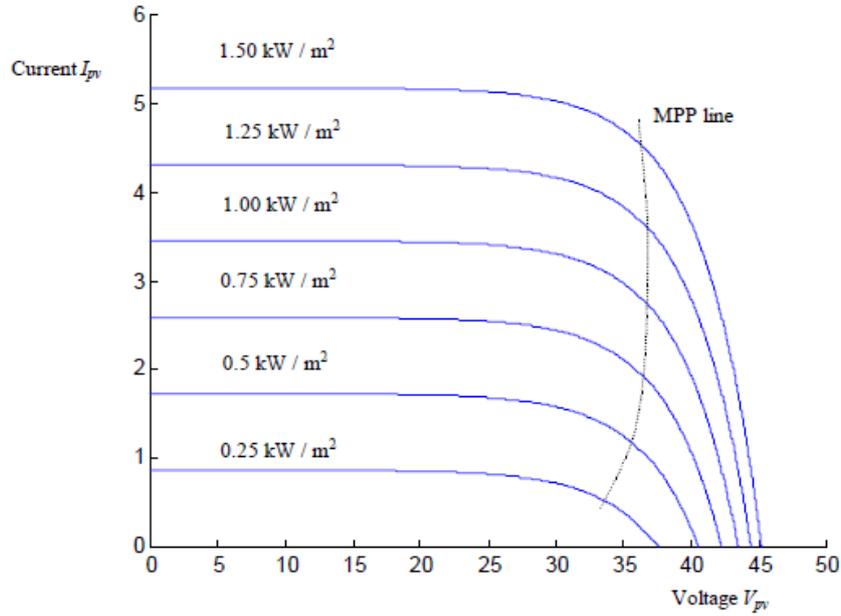
أما العلاقة الرياضية الممثلة لهذه الخلية في الوضع العادي فتظهر في التوصيف التالي:

$$I_{pv} = I_p - I_D - I_{sh}$$

$$= I_p - I_o \left[ e^{\frac{q(V_{pv} + R_s I_{pv})}{NkT}} - 1 \right] - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_{sh}}$$

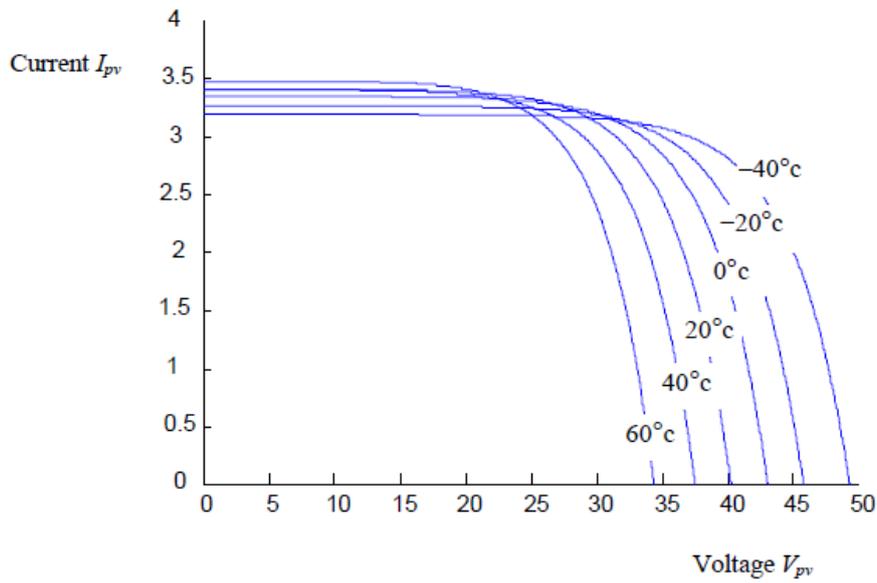
where	$I_p$	=	Photocurrent [A]
	$V_{pv}$	=	Terminal voltage of the cell [V]
	$I_D$	=	Diode current [A]
	$I_o$	=	Saturation current [A]
	$I_{sh}$	=	Shunt current [A]
	$N$	=	Ideality factor
	$q$	=	Electron charge [C]
	$k$	=	Boltzmann's constant
	$T$	=	Junction temperature [K]
	$R_s$	=	Series resistance [ $\Omega$ ]
	$R_{sh}$	=	Shunt resistance [ $\Omega$ ]

وتتأثر قيم الجهد والتيار المولدين من الخلية حسب الشكل 6-37



شكل 6-37

كما تتأثر القدرة المنتجة من الخلية بدرجة الحرارة كما في الشكل 6-38



شكل 6-38

والشكل 6-39 يمثل صورة لمواصفات ألواح شمسية

PERFORMANCE AT STANDARD TEST CONDITIONS*			
Nominal Power (+5W/-0W) Measurement accuracy P <sub>mpp</sub> *: ± 3 %	P <sub>MPP</sub>	[W]	305
Short circuit current	I <sub>SC</sub>	[A]	8.99
Open circuit voltage	V <sub>OC</sub>	[V]	45.14
Current at maximum power	I <sub>MPP</sub>	[A]	8.38
Voltage at maximum power	V <sub>MPP</sub>	[V]	36.39
Maximum system voltage	V <sub>SYS</sub>	[V]	1000 (IEC) 1000 (CSA/UL)
Weight	M	[kg/lb]	22.1/48.72

\*STC: 1000 W/m<sup>2</sup>, 25 °C, AM 1.5 Spectrum. Data given are rated (nominal) values.

CE  Made in Korea

شكل 6-39

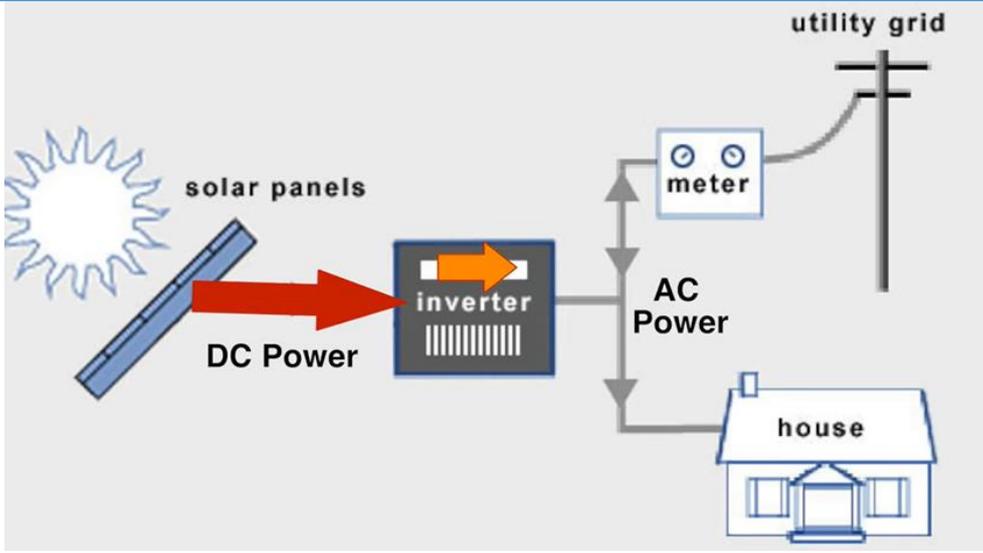
## 6-14 ارتباط منظومة التوليد الشمسية بالشبكة الموحدة

تطبيقات المحطات الشمسية المربوطة بالشبكة العامة تتضمن تصنيفات متنوعة ، وغالبا تصنف أولا حسب الحجم إلى ثلاث فئات:

- 1- Residential Scale (Micro Grid)
- 2- Industry Scale (Medium Scale)
- 3- Utility Scale. (Large Scale > 50 MW)

والنوع الأول يسمى أيضا Micro Scale ويمكن تقسيمه هو الآخر إلى ثلاثة أنواع:

- 1- النظام الأول Grid-tie system ، وفيه تتصل المنظومة بشبكة التوزيع وبالمزمل معا كما في الشكل 6-40.



شكل 40-6

وهو الأرخص ضمن المنظومات كلها ، لكن يعيبه أنه عند انقطاع التيار يتم فصل النظام بالكامل ولا يسمح للجزء الخاص بالطاقة الشمسية أن يعمل في حال فصل الشبكة العامة لتجنب حالة الـ Islanding التي سنتحدث عنها لاحقاً. وبالطبع يكون هناك عداد كما في الشكل 41-6 يقيس في الاتجاهين ويحسب كم أخذت من الشبكة وكم صدرت للشبكة.



شكل 41-6 :

2- النظام الثاني Grid-tie with battery Backup وذلك لعلاج المشكلة السابقة. وفيه يكون لدينا two inverters كما في الشكل 42-6. الـ Inverter الأول (يمين الصورة) هو المسئول عن تحويل الجهد الـ DC المتولد من الخلايا الشمسية إلى جهد متردد (من 300VDC إلى

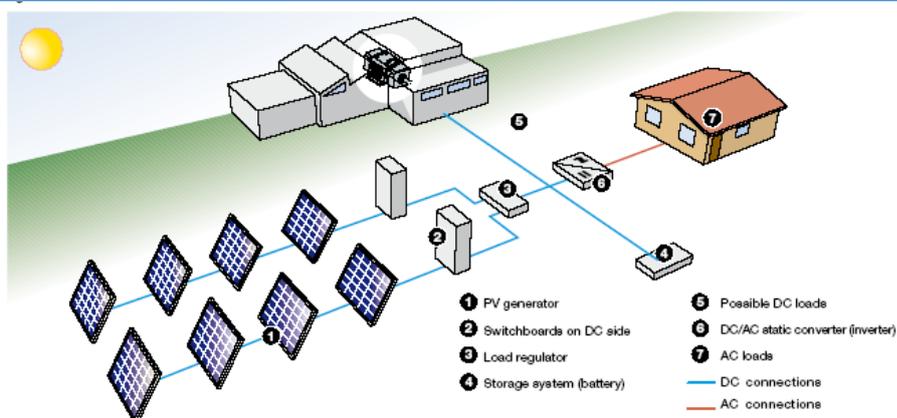
( 120VAC ) . علما بأن قيمة الـ DC voltage من الخلايا الشمسية يتوقف على طريقة توصيل الألواح الشمسية ويمكن أن يزيد أن يقل ، لكن زيادته تعني أن الـ Inverter سيكون أكبر حجما (وأعلى سعرا) لازدياد فرق الجهد بين جهد الدخول و جهد الخروج ، وعلى الجانب الآخر فإن خفضه سيقلل من مقاطع الأسلاك وبالتالي سعرها.

أما الـ Inverter الثانى (يسار الصورة) فمستول عن تحويل جهد الـ DC من البطارية (48VDC) إلى ( 120VAC مثلا) في حال فصل الشبكة العامة وفصل المنظومة الشمسية. لاحظ أن حجمه تقريبا ضعف الأول بسبب الملاحظة التي ذكرناها سابقا.



شكل 6-42

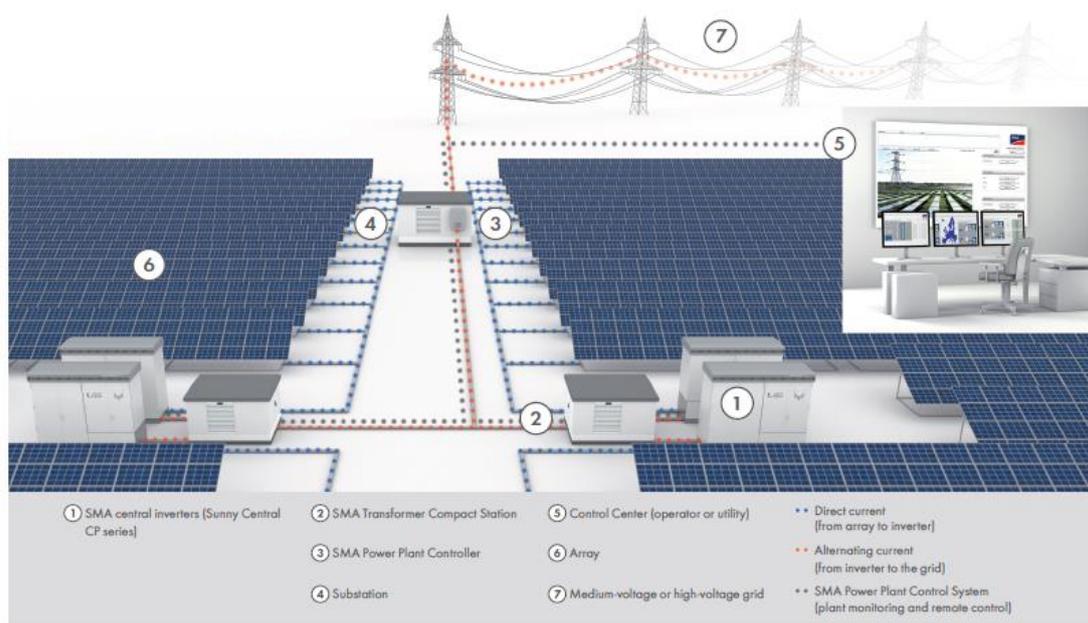
3- النظام الثالث Off-grid system ، وفي هذا النوع تكون الخلايا غير متصل بالشبكة شكل 6-43 ، وبالتالي لا نستفيد من الطاقة الزائدة التي كنا نبيعها في النوع الأول ، وهو يصلح للمناطق المنعزلة البعيدة عن الشبكة ، لكن بالطبع يعيبه أن البطاريات لها دورة يومية ولذا عمرها سينخفض مقارنة بالنوع الثانى ولذا فهو الأعلى سعرا.



شكل 6-43 :

## 15-6 ارتباط المحطات الشمسية الكبيرة بالشبكة العامة

للفهم الصحيح لهذا الموضوع ينبغي أن نجيب على عدد من الأسئلة .



بعض هذه الأسئلة تتعلق بموضوع استقرار الشبكة ( Stability ) من قبيل:

- 1- ما الفرق بين ربط Large scale PV system ، وبين ربط مولد Synchronous Generator تقليدي على الشبكة العامة ؟

- 2- المولدات البخارية تصنف على أنها High inertia والمحطات الغازية تصنف بأنها Low Inertia ، أما محطات الـ Solar PV فتصنف على أنها No Inertia . ما مدى تأثير وجود هذه النوعية من المحطات والتي تصنف على أنها no Inertia على استقرار الشبكة؟ ما هو تأثيرها على الـ Transient Stability ؟
- 3- ما مدى تأثير التغير السريع في المناخ على شبكة تحتوى هذه النوعية من التوليد ( في 16 مارس 2018 انخفضت مساهمة المحطات الشمسية في الشبكة الألمانية من 24GW إلى 9GW في ظرف ساعة واحدة فقط بسبب الغيوم!!!)؟
- 4- هل توجد حدود على نسبة دمج لهذه النوعية من المحطات في الشبكة حتى لا يؤثر النقص المفاجئ في توليدها على استقرار الشبكة؟
- 5- ماذا يعنى أن محطات التوليد الشمسية لا تزال تعتبر Negative Load؟ ولماذا لا يتم تصنيفها على أنها Generating Station ؟ وهل يمكن للمحطات الشمسية أن تشارك فيما يسمى بالـ Frequency Control ؟ وما المقصود بالـ Frequency response لهذه المحطات؟

وهناك أسئلة تتعلق بدور هذه المحطات في إنتاج الـ Reactive power من قبيل:

- 6- من أين تأتي الـ Reactive Power في محطات الـ PV ، والمعروف أنه ليس بها ملفات كمولدات العادية؟ وكيف سيتم توليد هذه النوعية من الطاقة من داخل هذه المحطات خاصة أنها لازمة لكافة الأحمال الديناميكية (المحركات)؟
- 7- هل هناك فرق بين الـ inverter العادى ، وبين الـ inverter المستخدم مع محطات التوليد الشمسية؟
- 8- هل لهذه المحطات أي دور أثناء الليل؟

وهناك أسئلة تتعلق بمنظومة الوقاية من قبيل:

- 9- هل يمكن استخدام أجهزة الوقاية التقليدية في حماية هذه النوعية من المحطات عند ربطها بالشبكة؟
- 10- ما مدى تأثير هذه المحطات على مستوى القصر Short circuit في الشبكة؟

11- كيف يتأثر شكل الجهد والتيار على أطراف الـ Inverter عند حدوث عطل خارجي بالشبكة العامة؟

وهناك أسئلة تتعلق بظروف التشغيل من قبيل:

12- ما معنى Islanding condition ؟ كيف يجب أن تتصرف محطات الـ Solar PV المربوطة بالشبكة إذا حدث عطل على خط الربط مع الشبكة العامة؟ إلى أي مدى يمكنها أن تتماسك وتظل موجودة في ظل وجود عطل على الشبكة؟ وما المقصود بالـ Fault ride through ؟

13- إذا كان لدينا منطقة بها أحمال تغذى من محطة الشمسية وفي نفس الوقت متصلة بالشبكة العامة ، ثم تم فصل الخط الرابط مع الشبكة العامة لكن ظل التوليد الشمسي متاح يساوى مجموع أحمال الجزء المفصول من الشبكة ، ولم يتغير لا الجهد ولا التردد . فهل يجب فصل المحطة الشمسية أيضا ؟ ولماذا؟.

## 6-16 مكونات المحطات الشمسية المربوطة على الشبكات

المنظومة الشمسية Large scale تتكون فقط من الخلايا والـ Inverter ثم الـ Transformers التي ترفع الجهد من الجهد المنخفض (حوالي 600 فولت) إلى الجهد المتوسط ( 22kV ) تمهيدا لربطها بالجهد العالى. وقد عرضنا لمات الخلايا الشمسية في الجزء الأول من هذا الفصل. ونعرض هنا العنصر الثانى وهو :

### الـ Inverter .

إذا كانت الخلايا الشمسية هي المنتجة للطاقة ، فإن الـ Inverter هو العقل المفكر في هذه المنظومة (تذكر أن المنظومة الشمسية المربوطة بالشبكة لا تحتوى على بطاريات تخزين إنما هي فقط خلايا + Inverter ). إن كل مسؤوليات الربط مع الشبكة تقع على عاتق هذا العقل المدبر كما سنرى. فماذا تغير في الـ Inverter المستخدم مع المنظومات الشمسية المربوطة بالشبكة (يسمى Grid Tie Inverter ) ، واختصارا سنسميه GTI ، وما الفرق بينه وبين الـ Inverter العادى الذى يحول الـ DC إلى AC ؟

الواقع أن هناك عدة اختلافات بينهما منها :

- 1- أن الـ GTI يحتاج إلى تتبع التغير في جهد الشبكة ، ويحتاج لضبط زاوية وقيمة الجهد المولد حتى تكون In-phase أو بمعنى آخر أن تكون synchronized مع جهد الشبكة دائما. والأمثلة الرقمية التالية مأخوذة من الكود المصرى الصادر في 2017.
- 2- يجب أن يكون الـ Inverter قادرا على التناغم مع التغيرات التي قد تحدث في الشبكة عند نقطة الـ PCC وأن يكون قادرا على ضبط هذا "التسنيك" مع الشبكة في الحدود التالية:

Voltage range	Time period for Operation
0.85 pu – 1.10 pu	Unlimited
1.10 pu – 1.15 pu	30 minutes

هذا يعنى أنه لو انخفض الجهد للشبكة حتى 0.85 pu مثلا فسيكون مطلوبا من الـ GTI أن يغير جهده ليتناسق مع جهد الشبكة لأى مدة بينما سيكون مطلوبا منه أن يستمر في العمل متناغما مع جهد الشبكة إذا ارتفع الجهد إلى 1.15 pu لمدة لا تتجاوز 30 دقيقة.

- 3- في حالة حدوث disturbance في الشبكة العامة وترتب عليها تغير في قيم الـ Frequency عند نقطة الـ PCC ، فعندها يجب أن يستمر الـ Inverter في الربط مع الشبكة طبقا للحدود التالية:

Frequency:	$48 \text{ Hz} \leq f \leq 51 \text{ Hz}$
Voltage:	$0.90 \text{ per unit} \leq U \leq 1.10 \text{ per unit}$

- 4- في حالة ارتفاع قيمة التردد 50.2-51.5 Hz فإن المحطة الشمسية يجب أن تخفض إنتاجها طبقا للمعادلة التالية:

$$\Delta P = 0.4 * PM * (\Delta f / \text{Hz}) \quad \text{Equation 1}$$

PM: actual output power before the grid frequency exceeds 50.2 Hz

$\Delta f$ : actual grid frequency minus 50.2 Hz

- 5- عند انقطاع التغذية من الشبكة فإن الـ GTI يجب أن يفصل التوليد القادم من الخلايا الشمسية لمنع حدوث حالة الـ Islanding التي سنتحدث عنها لاحقا.

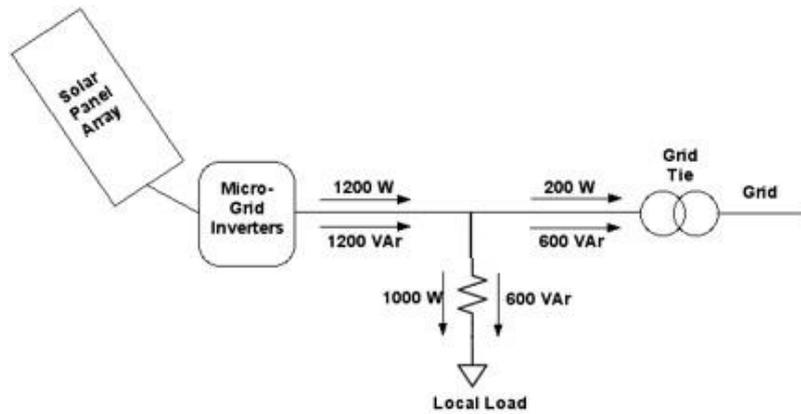
وبالإضافة للفروقات السابقة ، فإن هناك فروقات أخرى تتعلق بموضوع الـ Reactive power :

## 17-6 القدرة الغير فعالة في المنظومات الشمسية

بداية ، كان ربط المحطات الشمسية بالشبكة على مستوى منظومة التوزيع وبأحجام تصل إلى مئات الـ kWs ، وكان دورها يقتصر في مصنع مثلا على تقليل الاعتماد على الـ Power القادمة من الشبكة العامة لتقليل الاستهلاك وخفض فاتورة الكهرباء ، ولم يكن الأمر له علاقة بالجهد ولم يخطر على بال أحد أن يفكر في تأثير هذه الوحدات على الجهد اللهم إلا أن استخدام هذه المنظومة كان يقلل التيار المسحوب عبر خطوط التوزيع ومن ثم كان الجهد يتحسن نسبيا .

لكن خفض فاتورة الكهرباء في المصنع نتيجة تقليل سحب الـ P من الشبكة لم يكن خيرا مطلقا ، فالواقع أن الأحمال الديناميكية (المحركات) تحتاج لقدرة غير فعالة ، وهذه القدرة كانت أحمال المصنع تسحبها من الشبكة في الوقت الذي تسحب القدرة الفعالة من المنظومة الشمسية ، وهذا جعل معامل القدرة في المصنع يصبح سيئا جدا (  $Q \gg P$  ) ، والمشكلة تظل موجودة حتى عند التحميل الخفيف بسبب سحب Q الخاصة بالـ Filters التي تضاف دائما على خرج الـ Inverters ، وبالتالي كانت هناك غرامات على هذه المصانع مالم تسارع بتحسين معامل القدرة بتركيب مكثفات.

من جهة أخرى ، فإنه لما بدأ حجم الاعتماد على المنظومات الشمسية يرتفع أصبح لابد من دمج هذه القدرات الكبيرة ( أكبر من 20 MW ) داخل منظومة النقل وليس داخل منظومة التوزيع. وهنا لم يعد مقبولا ألا يكون لهذه المنظومة دور في تنظيم الجهد ، ولم يعد مقبولا منها أن تنتج قدرة فعالة فقط ، بل أصبح من الضروري أن تنتج أيضا قدرة غير فعالة سواء لتغذية الأحمال أو للمساعدة في تنظيم الجهد على الشبكة أو للالتئين معا كما في الشكل 6-43.



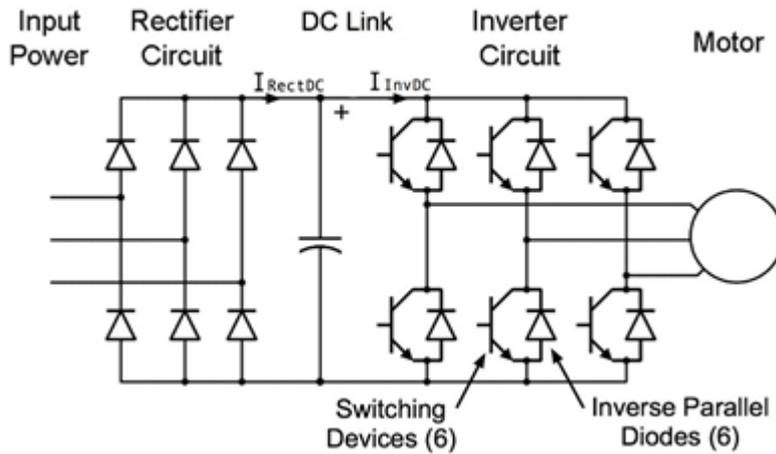
شكل 6-43

وقديما كان العائق أمام إنتاج قدرة غير فعالة من المنظومة الشمسية هو الحاجة لوجود مكثفات ضخمة لتبادل القدرة غير الفعالة بين الأحمال وبين هذه المكثفات. ثم بدأ التفكير في السؤال التالي : هل من الممكن أن نحصل على القدرة غير فعالة من الخلايا الشمسية بدون استخدام المكثفات الضخمة؟ والإجابة نعم بواسطة الـ Smart Inverters . فالـ GTI في الشبكات الكبيرة (أكبر من 20 MW ) أصبح مزودا بإمكانية إنتاج قدرة غير فعالة على عكس الـ GTI في شبكات التوزيع والذي كان الـ PF فيه يساوى واحد دائما ، وعلى عكس أيضا الـ Inverters العادية. فكيف يتم ذلك؟

معلوم أن القدرة غير الفعالة لا تستهلك وإنما تتحرك ذهابا وإيابا بين الحمل والمصدر ، وكان هذا مفهوما في المصادر التقليدية فهي تمر في ملفات الحمل في نصف الدورة وترجع إلى ملفات المولد في النصف الثاني ، أما في المحطات الشمسية فإلى أين ستذهب القدرة غير الفعالة حين ترجع للمصدر (الخلايا الشمسية) ومعلوم أنه ليس بها ملفات ولا مكثفات؟ والحقيقة أنها لن ترجع للخلايا بل سترجع فقط إلى الـ GTI .

ولفهم كيف تتعامل GTI مع القدرة غير الفعالة فيجب أن نعرف أن من ضمن ما تتميز به الـ GTI عن الـ Inverters التقليدية ما يلي:

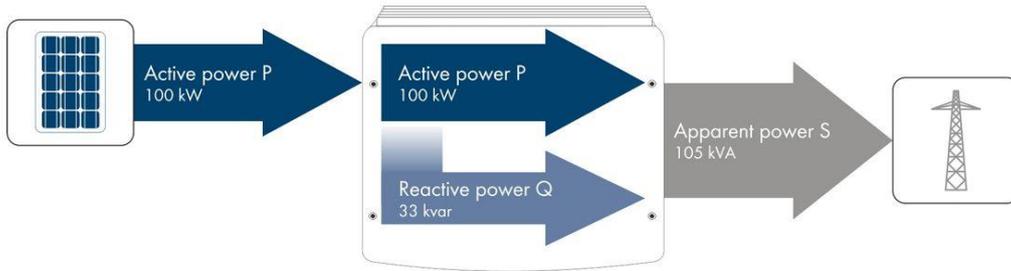
1. وجود الـ Fly Wheel Diode كما في الشكل 6-44 الذي يسمح بمرور تيار بعد فتح الـ Switch (معلوم أن الـ Inductive Current مثلا يستمر في المرور حتى بعد فتح الـ Switch). ملحوظة: التحكم في الـ Switches + diodes يسمى Four- Quadrant Operation ، وبالتالي تسمح للـ GTI بالتعامل أو لنقل تسمح لها بعمل handling للقدرة غير الفعالة.



شكل 6-44

2. في الـ GTI الكبيرة أيضا توجد Special Controllers ليتحكم في الزاوية بين الجهد والتيار المنتجين خلال الـ GTI ، وبالتالي يمكن للـ GTI أن يصبح مصدرا للقدرة غير الفعالة بأسلوب مبتكر وهو التحكم في الزاوية بين الجهد والتيار إلكترونيا وليس من خلال مكثفات وملفات كما في الطرق التقليدية (نفس فكرة أجهزة الـ Statcom). وتتحرك القدرة غير الفعالة ذهابا وإيابا عبر الـ الأحمال من جهة وعبر الـ Fly wheel diodes من الجهة الثانية.

من المهم أن نعلم أيضا أن إنتاج (handling) القدرة غير الفعالة لن يؤثر على القدرة الفعالة المنتجة من الخلايا ، أي أن الـ Inverter أصبح محطة لتداول وتحريك هذه القدرة عبر الـ Inverter وتظل القدرة الفعالة كما هي كما هو واضح في الشكل 6-45. فالجزء السفلي هو ممر للمرور القدرة غير الفعالة عبر الـ Diodes ، ومن خلال التحكم في الـ Inverter يمكن أن نجعل مرور التيار Lag or lead للجهد وكأن المسار السفلي يمكن أن يصبح وكأنه ملف أو مكثف حسب اختيارنا.



شكل 6-45

وهذه النقطة الأخيرة ضرورية لاسيما في حالة الـ GTI الكبيرة ، فهذه الـ Smart GTI تعتبر الأرخص في مصادر إنتاج القدرة غير الفعالة. والأهم من ذلك أنه لا حدود على الكمية المنتجة من الـ Q منها بخلاف المصادر التقليدية مثل الـ Synchronous Gen الذي توجد عليه حدود على الكمية المنتجة.

والميزة الأخرى في هذه الـ Smart GTI أنه عند انخفاض الإشعاع الشمسي إلى 10% مثلا ستكون الـ P المنتجة صغيرة جدا ، لكن في هذه الحالة يمكن استغلال الـ 90% الأخرى في إنتاج (أو تداول handling) قدرة غير فعالة بين الشبكة وبين الـ Inverter.

لكن بالطبع إذا استخدم الـ GTI في إنتاج Q فيجب أن يزيد الـ Rating قليلا ، فلو كان مثلا قادرا على إنتاج 2710A في حالة إنتاج pure active power فإنه سيحتاج أن يكون مقننا على 3000A كي ينتج نفس الـ P السابقة لكن بمعامل قدرة قدره 0.91 . بسبب مرور تيار الـ reactive power أيضا خلاله. ولذا ستلاحظ أن الـ GTI المزودة بهذه الخاصية تعرف بالـ KVA وليس بالـ kW .

لاحظ أنه لو مطلوباً من الـ GTI أن يجعل معامل القدرة لا يقل عن 0.9 عند نقطة الاتصال بشبكة النقل Point of Common Coupling, PCC فهذا يعني أن يحتاج لقدرة غير فعالة أكبر من المحسوبة لتعويض القدرة غير الفعالة في الكابلات ومحولات التوزيع قبل الوصول إلى PCC .

## 18-6 مقارنة بين المحطات الشمسية والبخارية

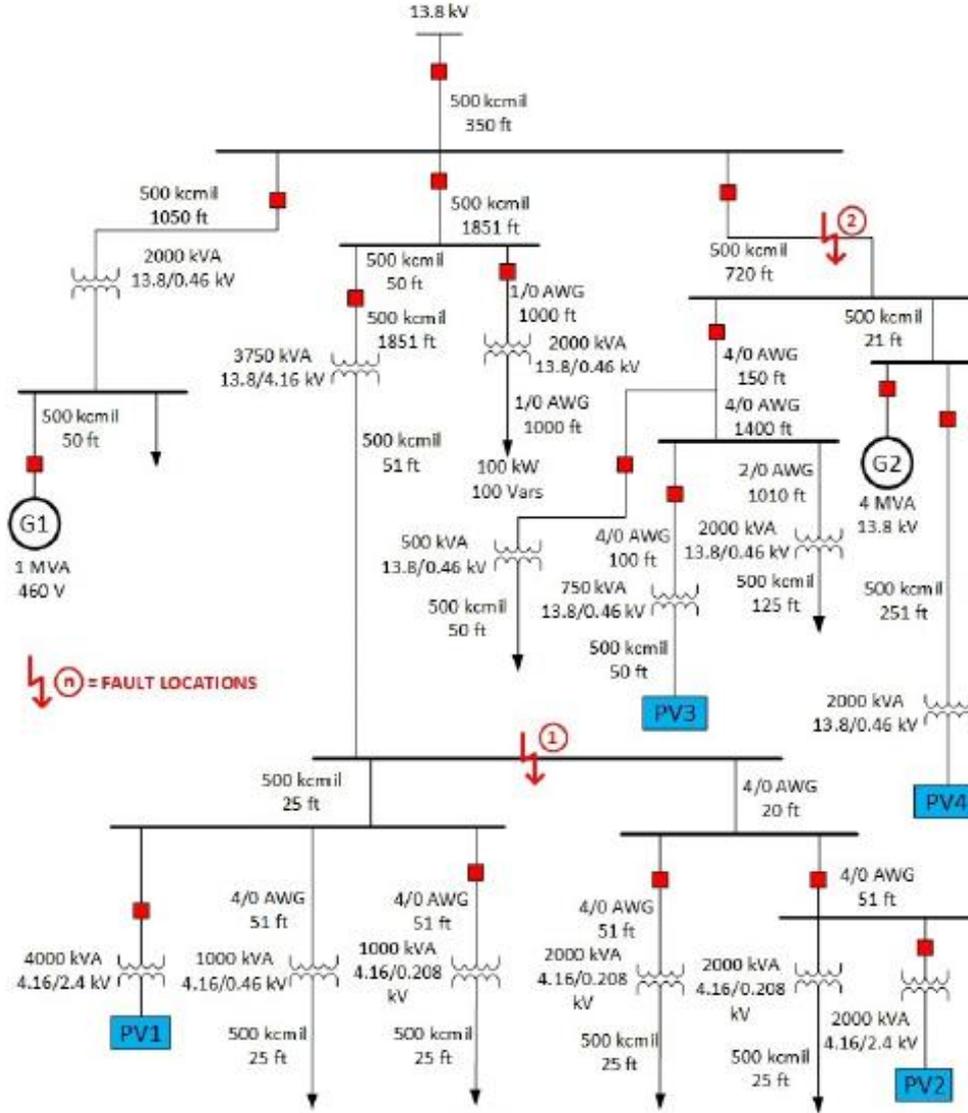
هناك عدة أوجه للمقارنة:

- 1- المحطة الشمسية لا تنتج سوى Active power, P وتحتاج لـ Smart GTI حتى يمكنها أن تنتج جزء من القدرة على صورة Q .
- 2- إذا زودت المحطة الشمسية بـ GTI سيمكنها ليس فقط توليد جزء من القدرة على صورة Q مثل المحطات البخارية بل يمكن أن تجعل كل الـ Output على شكل Q ، وهذا مستحيل في المحطات البخارية لوجود thermal and magnetic limitation .
- 3- لكن حتى مع وجود الـ Smart GTI سنحتاج لوجود مصادر أخرى لتنظيم الجهد لاسيما عند حدوث أعطال على الشبكة العامة وانخفاض الجهد. وبالتالي غالباً تزود هذه المحطات عند نقطة اتصالها بالشبكة العامة بوسيلة من وسائل dynamic voltage regulation مثل SVC أو Statcom . ولا يكفي وجود مكثفات أو ملفات ثابتة Static compensation بسبب بطء إدخالهم في الشبكة.
- 4- ما لم تزود المحطات الشمسية بإمكانيات كبيرة للمساهمة في تنظيم الجهد فإنها ستعامل على إنها negative Load بمعنى أن مركز التحكم لا يصنفها على أنها توليد متاح ، بل يصنفها على أنها مكافئة لتناقص أحمال.
- 5- وحتى إذا زودت هذه المحطات بهذه الإمكانيات فإنها ستعامل معاملة خاصة بسبب تأثيرها الشديد بالمناخ ، فلن يسمح أن تمثل أكثر من 10% (هذه النسبة قابلة للبحث والتغيير) من التوليد متاح في الشبكة في أي فترة ، لأنه يمكن أن يخرج جزء كبير من هذه النسبة ببعض الغيوم ومن ثم لا بد أن تكون هناك reserve في الشبكة جاهز لتعويض النقص المحتمل في التوليد في أي لحظة.
- 6- المحطة الشمسية يكون الـ Contribution منها خلال الـ SC ضئيلاً جداً لا يتجاوز 20% زيادة ولمدة وجيزة جداً لا تتجاوز نصف دورة وبعد ذلك سيتدخل الـ Inverter ويقطع الدائرة.

7- أجهزة الوقاية العادية ( Overcurrent, Distance, etc ) لا تصلح في اكتشاف الأعطال من جهة المحطة الشمسية بسبب النقطة السابقة وأشهر أنواع الـ Relays البديلة هو الروكوف ROCOF Relay الذي يعتمد على اكتشاف معدل التغير في التردد.

## 19-6 كيف يتأثر خرج المحطة الشمسية بسبب عطل ؟

بالنظر للشبكة في الشكل 6-46 ، سنفترض وقوع نوعين من الأعطال عند الموضع الأول : الأول عطل Unsymmetrical SLG والثاني عطل Symmetrical 3LG ، ثم سنتعرف على شكل الجهد والتيار عند أطراف الـ Inverter الخاص بـ PV1 و PV2 القريبين من العطل ، وكذلك الجهد والتيار عند أطراف الـ Inverter الخاص بـ PV3, PV4 وهما بعيدان عن العطل ، الهدف كما قلنا معرفة كيفية أداء الـ Inverter أثناء حدوث عطل خارجي على الشبكة.

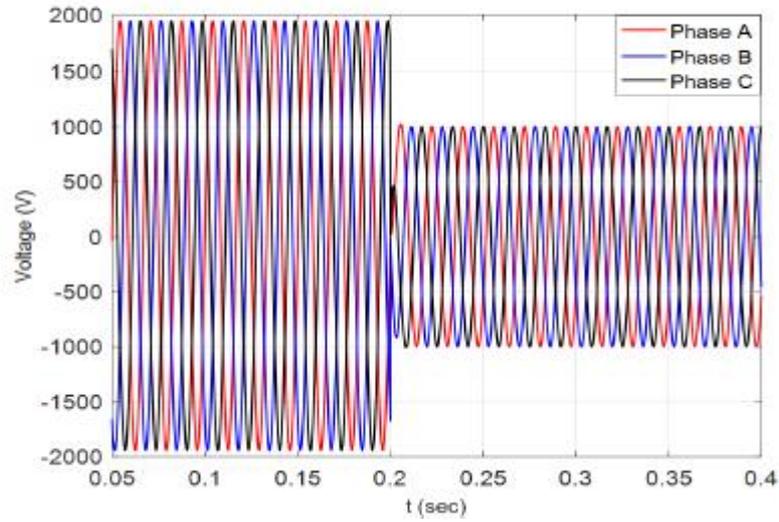


شكل 6-46

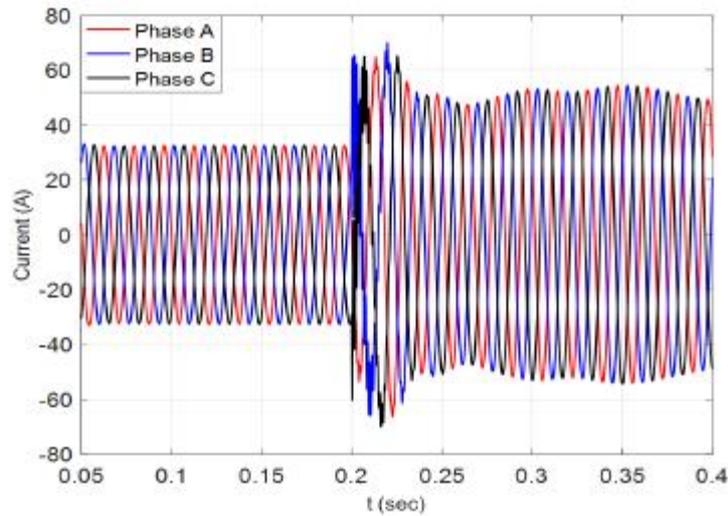
عند حدوث 3L fault عند الموضع الأول فإن المحطات الشمسية الأربعة في الشبكة تتأثر بدرجات متفاوتة. وأكثرهم تأثراً هو PV1 القريب جداً من العطل كما في الشكل 6-47 .

من الشكل يظهر حدوث انخفاض في الجهد على الفازات الثلاثة.

من الشكل 6-48 هناك ارتفاع طفيف في تيار الـ Inverter بمعنى أن مشاركة الـ Inverter contribution محدودة (وبالتالي لن يتأثر تيار العطل كثيراً بمشاركة الـ Inv .



شكل 6-47



شكل 6-48

يتأكد المعنى السابق بحساب الـ Sequence المختلفة للجهود والتيارات في حالة العطل المتماثل ، فهناك انخفاض ملحوظ في الـ Positive Sequence Voltage وتغير محدود و طفيف في الـ negative Sequence رغم أنه عطل متماثل وذلك بسبب الـ Disturbance فقط. والعكس في حالة التيارات.

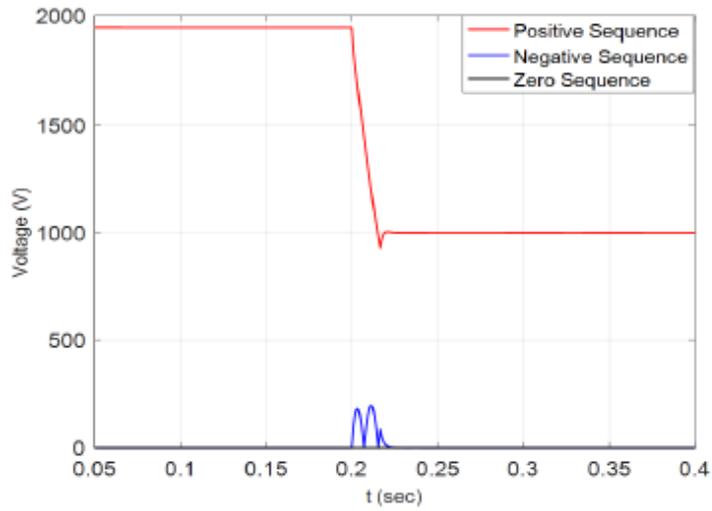


Figure 13: Sequence components of PV1 inverter terminal voltage under three phase fault

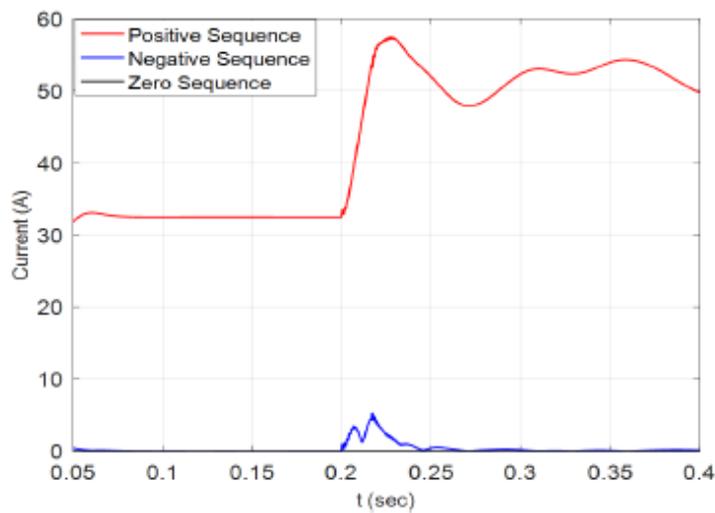


Figure 14: Sequence component of PV1 inverter terminal current under three phase fault

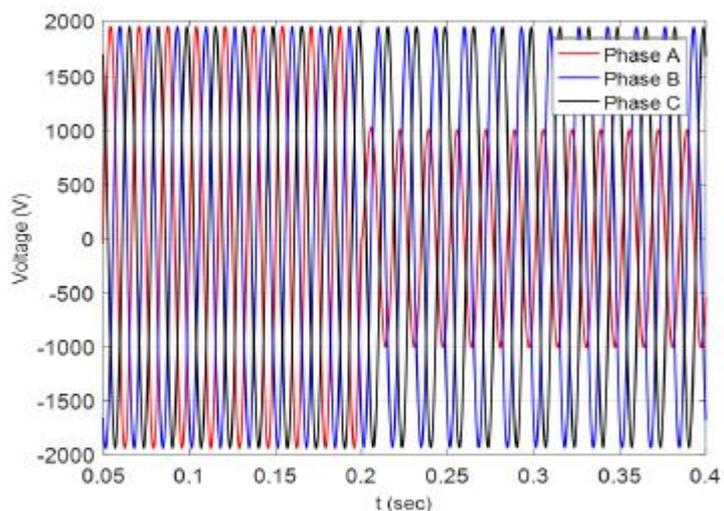


Figure 15: PV1 Inverter terminal voltage under single line to ground fault

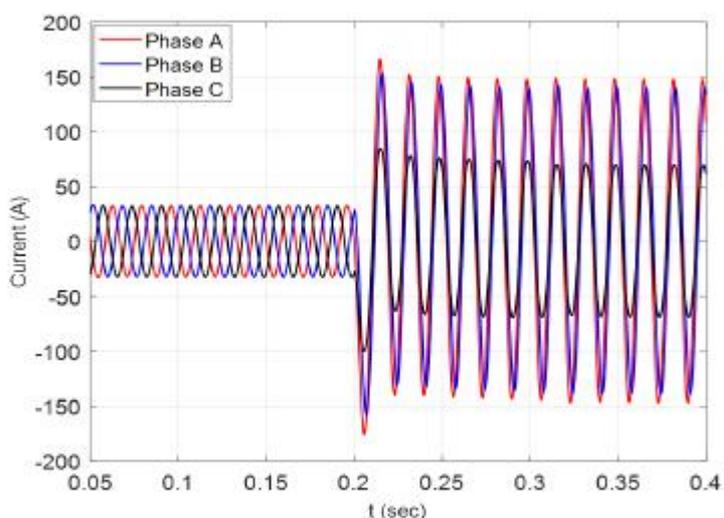


Figure 16: PV1 Inverter terminal current under single line to ground fault

أما في حالة العطل الغير متماثل SLG فهناك تغير ملحوظ في قيم الـ Sequence currents and voltages . وهذا يعنى أنه يمين الاعتماد عليها في اكتشاف هذه النوعية من الأعطال.

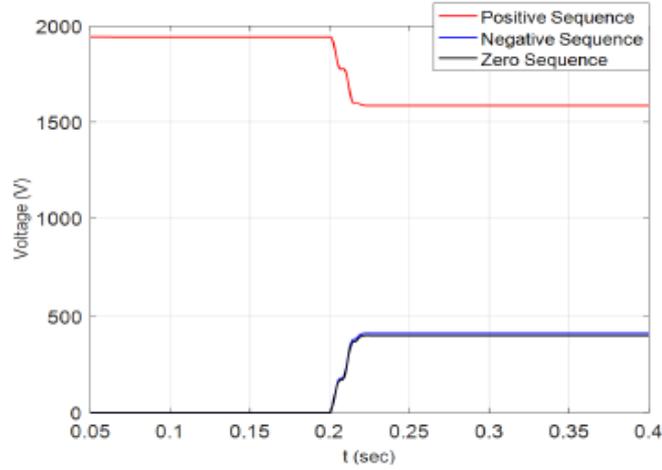


Figure 17: Sequence components of PV1 inverter terminal voltage under single line to ground fault

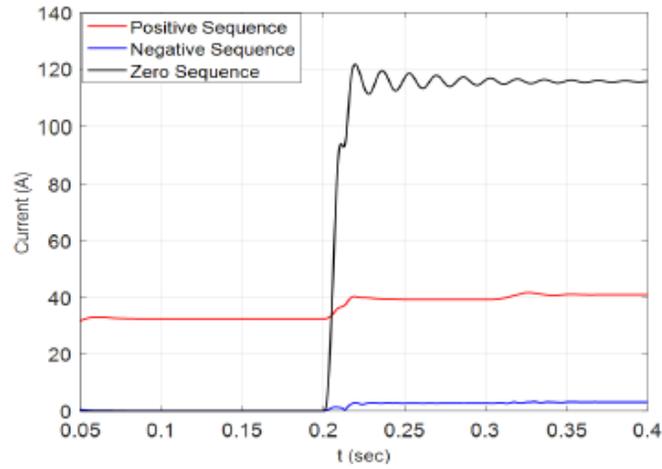
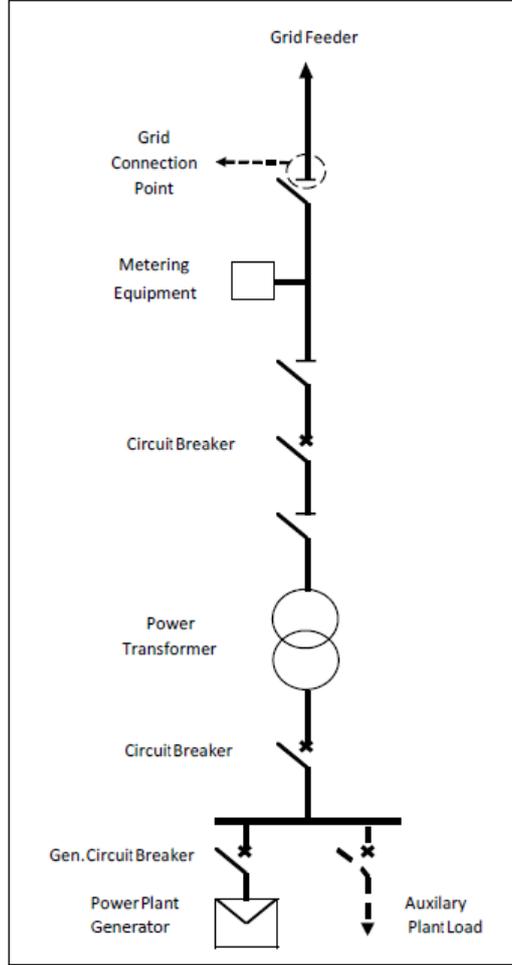


Figure 18: Sequence component of PV1 inverter terminal current under single line to ground fault

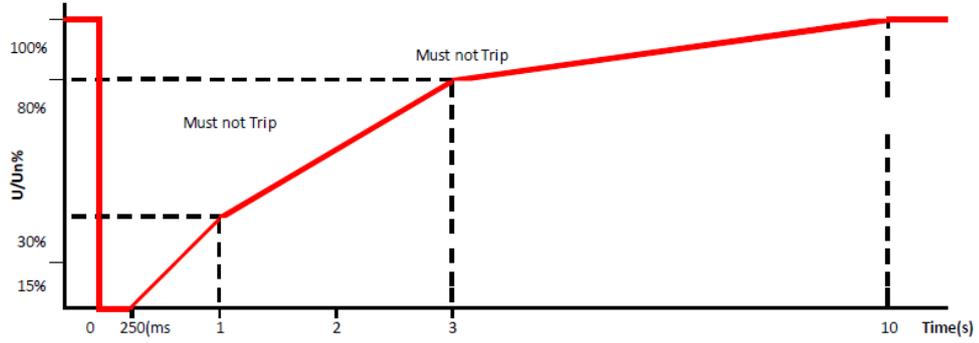
## 20-6 ما معنى الـ FAULT RIDE THROUGH

نتيجة عطل مثل الذي ظهر في الأشكال السابقة يمكن أن يحدث هبوط حاد في الجهد عند نقطة الـ PCC ، ولذا أصبح من الضروري توصيف المحطات الشمسية (وكذلك محطات الرياح) بمعامل مهم هو الـ Fault ride through ويقصد به قدرة المحطة على استمرارها متصلة بالشبكة مع تغير قيمة الجهد عند نقطة الـ PCC لمدة زمنية محددة . ونقطة الـ PCC تظهر في الشكل 6-55:



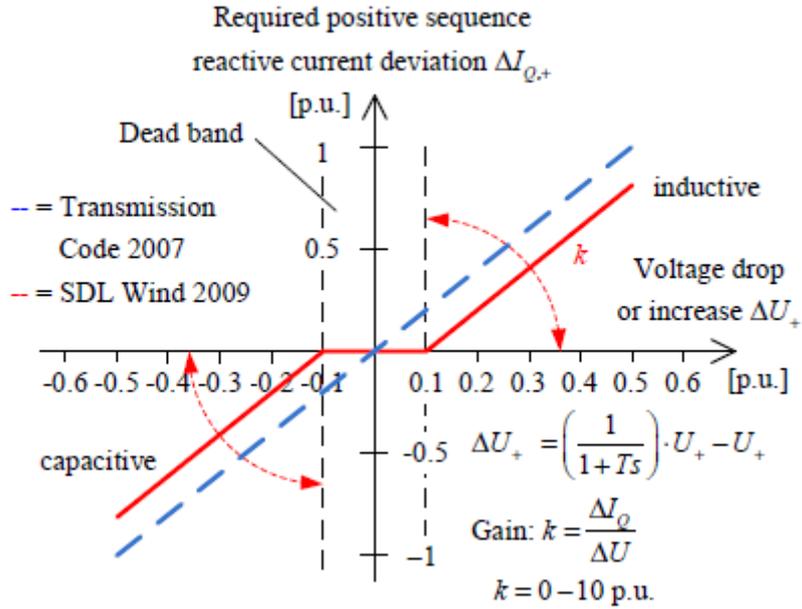
شكل 55-6

ويفهم من هذا الشكل 56-6 أن المحطة الشمسية مطلوب من منظومة التحكم فيها أن تحافظ على بقائها في الشبكة أي تظل Connected مع انخفاض جهد PCC إلى صفر لمدة 250 مللي ثانية من لحظة وقوع العطل ثم يجب أن يكون جهدها أعلى من الخط الأحمر بعد ذلك وتتحمل هذه الظروف لمدة 10 ثواني حتى يتم تماما إزالة أثر العطل الخارجي. فإذا ظل الجهد الخارج من المحطة أعلى من الخط الأحمر فهذا يعنى أن المحطة متوافقة من المواصفات وإلا فهي غير متوافقة للمواصفات.



شكل 6-56

بعض المواصفات القياسية مثل المواصفات الألمانية تشترط ليس فقط وجد FRT capability ولكن تشترط أن تشارك المحطة في دعم الجهد أثناء الأعطال . الشكل 6-57 يمثل أحد المتطلبات أيضا من المحطات الشمسية ، وهو أن تنتج Reactive Power كنسبة من الانخفاض في الجهد.



شكل 6-57

واضح أنه كلما زاد التغير في الجهد عند نقطة الـ PCC كلما كانت الـ Q المطلوبة أكبر (سواء +Q or -Q) حسب الارتفاع أو الانخفاض في الجهد. فإذا كان التغير في الجهد بالارتفاع (موجب) فسنتحتاج إلى أن تشارك المحطة بـ Inductive reactive Power والعكس بالعكس.

ويقصد بالـ Dead Band أي المنطقة التي لا يطلب من المحطة أي شيء نتيجة أن التغير بسيط.

لاحظ أن المواصفات حددت قيم الـ Q التي تشارك بها المحطة في مدى معين ، ولم تحدد مدى معين لقيم الـ P ، وهذا يعنى أن المحطة يمكن التحكم في قيم الـ P على المدى كله ، وهذا لا يمثل مشكلة للمحطة لأنها في الأصل لا تنتج إلا P.

وحسب الكود المصرى فإن إنتاج القدرة الغير فعالة أثناء الأعطال يحسب طبقا للمعادلة التالية:

$$\frac{\Delta I_B}{I_N} = k \times \frac{\Delta U_r}{U_N} \quad \text{Equation 2}$$

$$\Delta U = U - U_0 \quad \text{Equation 3}$$

Variables:

$U_N$ : rated voltage

$I_N$ : rated current

$U$ : voltage during fault

$\Delta I_B$ : required reactive current change during fault

$U_0$ : pre-fault voltage

$\Delta U_r$ : relevant voltage change during the fault

The factor k shall be adjustable in the range from 0 to 4.

## 21-6 تأثير وجود المحطات الشمسية على استقرار الشبكة

بداية يجب أن نجيب على السؤال التالى:

**ماهى الـ Inertia؟**

عموما يقصد بالـ Inertia القدرة على مقاومة التغير ، وكهربيا في الشبكة الموحدة يقصد بها كمية الـ Kinetic Energy المخزنة في الآلات الدوارة (Rotating machines (Gen + Motors) . فمجموع كتلة هذه الآلات تعطى للشبكة العامة الـ Inertia اللازمة لمقاومة أية هزات تحدث في الشبكة نتيجة تغير مفاجئ في توازن التوليد و الأحمال. هذا التغير في العلاقة بين التوليد والأحمال يظهر أثره على تغير قيمة الـ Frequency ، وحجم هذا التغير يتأثر بالـ Inertia الموجودة في الشبكة وكلما كبرت الـ Inertia كلما كان التغير بطيئا وهو بالطبع ما نريده حتى نعطي فترة زمنية أطول لأجهزة التحكم لاسترجاع التوازن بين التوليد والأحمال. علما بأن

التفسير الفيزيقي لذلك هو أن هذه الآلات الدوارة تمتص بعضا من الـ Kinetic Energy التي تظهر بعد العطل فتقلل من تأثيرها على التردد وهو ما يسمى بالـ Internal Response.

### لماذا تتناقص الـ Inertia في الشبكة العامة؟

السبب الأول هو التوسع في دمج المحطات الشمسية وكذلك محطات الرياح في الشبكة العامة وهي محطات ليس لها أية Inertia . ورغم أن محطات الرياح لها Rotor لكنه لا يدور متزامنا مع الشبكة العامة مثل المولدات التقليدية بل هو معزول عن الشبكة بواسطة الـ Inverter ، بمعنى آخر أن الـ Rotating mass لا تتصل مباشرة بالشبكة وإنما من خلال Inverters ، لذا تصنف أيضا هذه المحطات على أنها No inertia مثل المحطات الشمسية..

والسبب الثاني لنقص الـ Inertia في الشبكة هو التوسع في بعض الدول في نقل الطاقة بواسطة الـ HVDC فالطاقة القادمة ورغم ضخامتها لكنها أيضا جاءت من خلال أجهزة الـ Inverters وليس لها أيضا أية Inertia .

والتوابع الخطيرة لتناقص الـ Inertia هي أن أي تغير في توازن الأحمال والتوليد سينتج تغير أكبر وأطول من الشبكات التي لها Inertia عالية. ويمكن فهم ذلك رياضيا من خلال المعادلة التالية:

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} = T_m - T_e$$

where

$\theta$  : angle (rad) of the rotor with respect to a stationary reference.

$J$  : moment of inertia.

$T_m$  : mechanical torque from the turbine.

$T_e$  : electrical torque on the rotor.

واضح أنه كلما كانت  $J$  كبيرة كلما قل تأثير تغير  $\Delta T$  على تغير قيمة الـ Rotor angle .

في بعض البلاد الإسكندنافية حيث هذه المشكلة ظاهرة جدا بسبب النسبة العالية للـ Renewable Energy sources فإنهم أحيانا يضطرون لخفض الإنتاج من أكبر محطة حين تصبح الـ Inertia منخفضة تحسبا لوقوع أعطال ، وبالطبع هذا ليس الحل الأمثل لكنه الحل المتاح حتى الآن وبالطبع يحتاجون أيضا لـ Fast activated reserve Power ليكون الحل نموذجيا.

## 22-6 مفهوم الـ ISLANDING

أحد المتطلبات الهامة من المحطات الشمسية المتصلة بالشبكة أن تكون مزودة بـ Anti-Islanding بمعنى إمكانية اكتشاف أن الشبكة العامة قد فصلت وأن المحطة الشمسية أصبحت تغذى الحمل بمفردها وهو الوضع الذي نسميه Islanding وهو وضع غير مرغوب فيه خاصة أن عمال الصيانة على الشبكة (لاسيما في شبكات التوزيع) قد يظن أن الشبكة مفصولة لكن قد يفاجئوا بوصول الكهرباء إليهم من جهة الحمل فيصابوا بالصعقة الكهربائية.

وهناك أسلوبان لاكتشاف المحطة الشمسية لحالة الـ Islanding : الأول هو Passive methods ويقصد به اكتشاف الحالة بدون استخدام أجهزة إضافية وإنما فقط من تتبع التغير في قيم الجهد أو التيار أو التوافقيات إلخ

أما الأسلوب الثانى فيعتمد على حقن الشبكة بإشارات معينة وتتبع التغير فيها ولذا يسمى Active method.

## 23-6 تأثير الغيوم على الخلايا الشمسية؟

بالطبع سينخفض الناتج من المحطة بسبب الغيوم ، مع ملاحظة أن هناك جزء من الخلايا يوصل على التوالي والناتج من هذه التوصيلة يمثل الخرج لأضعف خلية من المجموعة المتصلة على التوالي ، ولذا بدأت بعض الشركات في تزويد كل مجموعة خلايا بما يسمى Optimizer (العنصر الأسود أسفل كل Panel في الشكل 6-59) ، وهو متصل بالـ Inverter وبالتالي يمكن للـ Inverter أن يتعامل مع كل Panel بصورة مستقلة ، وبالتالي ضمان أنه لو وجدت خلية بها مشكلة وتؤثر على الـ String فإنه يقوم باستبعادها للمحافظة على أقصى إنتاج ممكن من مجموعة الخلايا المتصلة على التوالي .



شكل 6-59

(ملحوظة : في الجهود العالية يفضل تنظيم الجهد باستخدام الملفات دخولا وخروجا ، أما في الجهود المتوسطة فيفضل استخدام المكثفات دخولا وخروجا).

## ملحق الباب الأول

## اقتصاديات محطات التوليد

هذا الملحق يمثل الختام الطبيعي لأي حديث عن محطات التوليد ، ففي الفصول السابقة تناولنا فنيات عديدة لمحطات التوليد بأنواعها المختلفة ، لكن الواقع العملي يحكم بأن الفنيات وحدها ليست الفيصل في اختيار نوع المحطة التي نود إنشاءها ، وربما كانت اقتصاديات محطات التوليد هي الفيصل في الاختيار بين أنواع عديدة من المحطات.

وفي هذا الملحق سنتناول بعض المصطلحات الاقتصادية التي تخدم الموضوع ، ثم نشرح العوامل المؤثرة على اقتصاديات محطات التوليد ، ونختم الفصل بمقارنة بين أسعار المحطات طبقا لما أعلنته وزارة الطاقة الأمريكية في إصدار سنة 2013.

ملحوظة:

سيلاحظ القارئ أني أرجع كثيرا لإحصائيات أمريكية في هذا الملحق وغيره من الفصول ، والسبب أن الوزارات هناك تطبق مبدأ الشفافية حرفيا ، فلا يوجد أسرار تخفي عن الناس بخصوص أسعار المحطات أو عن الشركات المنفذة ، ولا كم حصلت إلخ . ويمكن للقارئ الرجوع لهذه التقارير ليعرف حجم الشفافية الموجودة في هذه البلاد.!!!

## العوامل المؤثرة في اقتصاديات المحطات

عند بناء محطة توليد ، فإن هناك العديد من الاعتبارات الفنية والاقتصادية التي تؤثر في تصميم المحطة . وما يهمنا هنا هو الاعتبارات المؤثرة اقتصاديا ، ومنها:

- موقع المحطة (سعر الأرض يختلف من مكان لآخر)
- تواجد عمالة تسكن بالقرب من مكان المحطة ، وإلا ستأخذ في الاعتبار تكلفة إعاشة العمال ومواصلاتهم (في البلاد المتقدمة).
- تكلفة الإنشاء والتصميم
- مصاريف التشغيل والصيانة
- تكلفة إنتاج الـ kWh من المحطة
- تكلفة خدمة الدين (القرض) إذا كانت منشأة بقرض من البنوك

وعموما يمكن تقسيم المصروفات في المحطات إلى نوعين :

1- **مصروفات ثابتة** : تشمل تكلفة الإنشاء وفوائد قرض الإنشاء ، والتأمين والضرائب التي تفرضها الدولة على عائدات بيع إنتاج المحطة إذا كانت قطاعا خاصا ( إذا كانت المحطة ملكا للدولة فإن الضرائب يدفعها المستهلكون لهذه الكهرباء ، بمعنى أن يضاف إلى تعريف الاستهلاك نسبة أخرى للضرائب )  
 علما بأن تكلفة الإنشاء تشمل ثمن الأرض والمباني و ثمن المعدات ، ومصاريف تركيب المعدات ، ومصاريف التصميم والتخطيط إلخ .  
 ويضاف أيضا تكلفة المخازن ، والحراسة ، فالمحطة تحتاج لمخازن ضخمة لتخزين الوقود وزيوت التشحيم وقطع الغيار إلخ لأن هذه الأشياء يجب أن تكون حاضرة دائما تحسبا لأي صيانة علاجية محتملة.

2- **مصروفات جارية** ( وهي متغيرة حسب حجم الإنتاج ، وتشمل تكلفة الوقود والأجور وتكلفة الصيانة ومستلزمات الإنتاج).  
 وتعتبر تكلفة الوقود هي الأكثر تأثيرا في محطات الكهرباء (باستثناء المحطات المائية والتي هي الأقل في مصاريف التشغيل ، وحتى مصاريف العمالة تعتبر هي أيضا الأقل في المحطات المائية مقارنة بالمحطات البخارية مثلا التي تحتاج عمالة أكثر بكثير) . وتتوقف تكلفة الوقود على كمية الإنتاج وسعر الوقود وكفاءة المحطة. ودائما يجب البحث عن أفضل طرق تقليل استهلاك الوقود بالمحطة.

وفي المحطات البخارية مثلا يكون توزيع نسب التكلفة بين العناصر السابقة في حدود النسب التالية:

Fuel cost =	30 to 40%
Fixed charges for the plant =	50 to 60%
Operation and maintenance cost =	5 to 10%

### معدل الفائدة Rate of Interest

قد يكون بناء المحطة بواسطة قرض من بنك أو بواسطة استثمارات من شركات أو مجموعة أفراد ، في كل الأحوال فصاحب المال يريد استرجاع ماله ، مضافا إليه مكسب معتبر ، وهو ما نسميه الفائدة ، والتي تساوي الفرق بين المبلغ الأصلي والمبلغ المسترد ، وقد تكون هذه الفائدة محسوبة على أنها فائدة بسيطة ، بمعنى أنها نسبة ثابتة سنويا . وقد تكون فائدة مركبة تتغير قيمتها مع طول المدة.

على سبيل المثال فأنت إذا أودعت 1000 دولار بالبنك بفائدة بسيطة قدرها 3% لمدة 5 سنوات فهذا يعنى أنك ستحصل على 150 دولار كفائدة فى نهاية الخمس سنوات (مبلغ الفائدة يوضع سنويا فى حساب منفصل وتظل الوديعة قيمتها ثابتة عند 1000 دولار) . أما إذا كانت فائدة مركبة فإن العائد (الفائدة) تضاف إلى أصل المبلغ وبالتالي تكون الفائدة (العائد) فى نهاية السنة الثالثة مثلا أعلى من العائد فى نهاية السنة الثانية وهكذا.

### معدل الإهلاك Depreciation

إذا كنت تريد إنشاء مشروعا (محطة توليد مثلا) فإنك لا تتوقع فقط أن يحقق ربحا (ناتجا عن بيع الكهرباء المولدة) يغطى مصاريف التشغيل وقدر معين من الأرباح فقط ، لكنك يجب أن تأخذ فى الاعتبار أن معدات هذا المشروع تتآكل سنويا بفعل التشغيل أو العوامل الجوية أو حتى مجرد التقادم ، ومن ثم لا بد من تقدير نسبة معينة لمعدل الإهلاك تضاف إلى العائد المتوقع وتصرف فى تجديد معدات المشروع ، وإذا لم يحقق المشروع عائده المتوقع ومضافا إليه معدل الإهلاك فلن يستطيع أن يحقق نفس الأرباح سنويا بسبب تقادم معداته.

ومعدل الإهلاك غالبا لا يكون ثابتا بل متزايد مع تقادم العمر ، وقد يكون التزايد خطيا أو غير خطى ، وعموما هناك عدة طرق لحساب هذا المعامل يمكن الرجوع إليها فى مصادرها.

### تسعير الكهرباء المبيعة Tariff

بناء على دراسة جميع عناصر التكلفة السابقة يمكن الآن تحديد تعريفية سعر بيع الـ KWH ، فهذا السعر (مضروبا فى حجم الإنتاج) يعطى العائد المالى الذى يجب أن يحقق تغطية جميع المصاريف السابقة وتغطية خدمة الدين (إذا كان قرضا من البنك) وتغطية معدلات الإهلاك وتغطية الضرائب وخلافه ، بالإضافة إلى تحقيق مكسب معقول للمستثمرين.

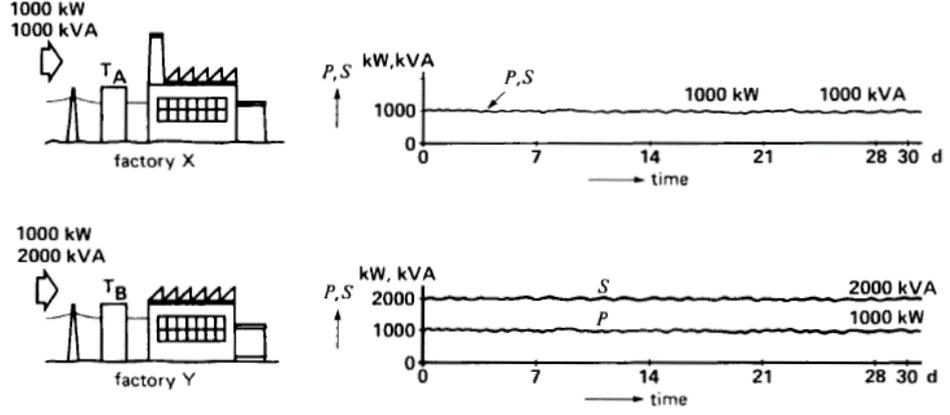
ولكن بالإضافة للعناصر السابقة ، هناك عناصر أخرى يجب أن تؤخذ فى الاعتبار عند تحديد تعريفية البيع للمستهلك منها:

#### كمية الاستهلاك

فليس مقبولا مثلا أن يكون سعر البيع موحدا مهما كان استهلاك العميل بل يجب تشجيع كبار العملاء المستهلكين بتقديم سعر أقل (وهذا لأنه يقدم فى المقابل خدمة أكبر للاقتصاد القومى بالإنتاج الكثيف وتشغيل العمالة). ولذا يجب أن تكون التسعيرة متدرجة ومراعية لحجم الاستهلاك الكثيف جدا.

## 1- معامل القدرة

كما يجب ألا يكون الحساب موحدًا مهما كان معامل القدرة الخاص بالمستهلك كما في الشكل 1.

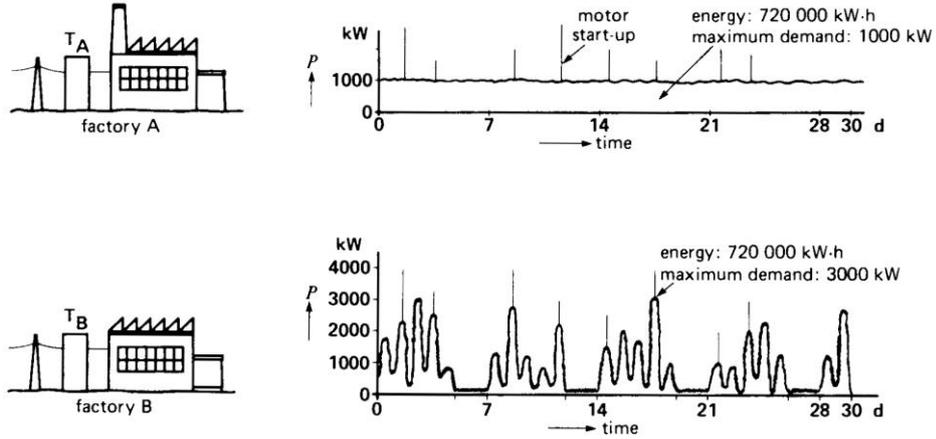


شكل 1-

فالمصنع الأول له معامل قدرة يساوي 1 والقدرة الفعالة المستهلكة 1 ميغا وات وبالتالي سيحتاج أن يسحب من الشبكة 1MVA ، بينما المصنع الثاني له معامل قدرة 0.5 ويسحب نفس القدرة الفعالة ، ولكنه سيسحب قدرة ظاهرة Apparent Power من الشبكة 2MVA . فلو تمت محاسبة المصنعين على استهلاك الـ KWH وبنفس التسعيرة سيكون هذا غير عادل للشركة المنتجة ، لأنها حجزت للثاني قدرة أكبر ومع ذلك استهلك مثل الأول ، ولذا يجب أن تضم التسعيرة بندا يتعلق بمعامل القدرة ليرغم أصحاب المصانع الذين لديهم معامل قدرة منخفض على تحسين معامل القدرة لديهم وإلا ستكون هناك غرامة تتناسب مع بعد معامل القدرة عن القيمة المطلوبة (غالبا 0.9) مما يجعل الفاتورة قاسية.

## 2- الحمل الأقصى

ومن المهم أيضا أن تأخذ التسعيرة في الاعتبار أقصى حمل Max Demand يصل إليه المستهلك ، وكذلك المدة التي يظل يعمل فيها على هذا الحمل الأقصى. فربما كان لدينا مصنعين كما في الشكل 2 ، كلاهما يستهلك 720MWH لكن كما هو واضح في الشكل فإن الأول له Max Demand يساوي 1000kW بينما الثاني يصل إلى ثلاثة أضعافه.



شكل-2 :

فهل يستويان؟

بمعنى آخر أن معامل الـ Load Factor للثاني سيء جدا مقارنة بالأول ، وبالطبع يجب التفرقة لاسيما أن الثاني سيتم حجز قدرة تعاقدية له أكبر من الأول حتى يمكن أن توفى الشركة بتعهداتها بتوفير الحمل الأقصى وقت حدوثه ، بغض النظر عن مدة الحدوث . ولذا يجب أن تتضمن الفاتورة بندا يحاسب بسعر خاص (أعلى طبعا ) على أقصى قيمة وصل إليها خلال الشهر ومدة حدوثها (توجد عدادات خاصة بالمصانع لقياس الـ Max Demand ) ، وهذا سيجعل أصحاب المصانع الذين يحتاجون إلى هذه القيمة العالية من الأحمال لمدة وجيزة أن يبحثوا عن أساليب أخرى لتجاوز هذه المدد الصغيرة ، عن طريق استخدام مولدات خاصة بهم مثلا ، أو عن طريق توزيع الأحمال على مدار اليوم بصورة أفضل ، وتجنب فترة الحمل الأقصى باستخدام أساليب المعروفة بالـ (Demand Management).

### 3- القدرة التعاقدية

كما يجب الأخذ في الاعتبار حجم التعاقد وحجم التشغيل ، فالبعض قد يتعاقد على قدرة عالية جدا (تحسبا لأي توسعات مستقبلية) ، ويتم توصيل الكابلات والمحولات التي تحقق له هذه القدرة ويتم حجز مغذيات خاصة به في محطة المحولات الرئيسية ، ثم لا يستغل منها إلا قدرا يسيرا في تشغيل مصانعه ، وربما تكون المصانع متوقفة . فلو تمت محاسبة صاحب المصنع فقط على مجرد استهلاكه للكهرباء سيكون هذا كارثيا لشركة الكهرباء التي حجزت له نسبة من قدرتها حسب العقد ثم هو لم يستهلك منها شيئا ، ولذا يجب أن تشمل تعريفه محاسبته نسبة على حجم القدرة المتعاقد عليها سواء استخدم هذه القدرة أم لم يستخدمها.

وكل هذه الاعتبارات أنتجت أساليب متنوعة للـ Tariff منها:

- (1) Flat demand rate
- (2) Straight line meter rate
- (3) Step meter rate
- (4) Block rate tariff
- (5) Two-part tariff
- (6) Three-part tariff.

وكل دولة قد تضيف عناصر أخرى فى الاعتبار بعد ذلك ، مثل البعد الاجتماعي الذى يقدم مثلاً أسعاراً أقل لمن يقل استهلاكهم عن نسبة معينة ، ثم تتزايد الشريحة ، وهكذا.

**والجدول 1 نموذج تسعيرة الكهرباء للاستهلاك المنزلى فى مصر (يونيه 2016):**

جدول-1: أسعار الكهرباء للاستهلاك المنزلى فى مصر (2018)

التعريف بعد الزيادة	الشريحة
سعر الكيلو 22 قرشاً	الشريحة الأولى تبدأ من صفر إلى 50 كيلو وات
30 قرش	الشريحة الثانية تبدأ من 51 إلى 100 كيلو وات
36 قرش	الشريحة الثالثة تبدأ من 101 إلى 200 كيلو وات
70 قرش	الشريحة الرابعة تبدأ من 201 إلى 350 كيلو وات
90 قرش	الشريحة الخامسة تبدأ من 351 إلى 650 كيلو وات
135 قرش	الشريحة السادسة تبدأ من 651 إلى 1000 كيلو وات
145 قرش	الشريحة السابعة من 0 إلى أكثر من 1000 كيلو وات

لاحظ أن الحساب يبدأ بملاً أعلى شريحة ممكنة ثم الأقل ، وليس العكس ، بمعنى لو كان الاستهلاك 450kWH مثلاً ، فهذا يعنى أن أعلى شريحة التى تبدأ من الاستهلاك الأعلى من 351 ، وعلى هذا يكون الحساب كالتالى:

100kWH فى الشريحة من 351-650 = 100x 0.9 = 90 جنيهه

150kWH فى الشريحة من 201-350 = 150x 0.7 = 105 جنيهه

100kWH فى الشريحة من 100-200 = 100 x 0.36 = 36 جنيهه

50kWH فى الشريحة من 50-100 = 50 x 0.3 = 15 جنيهه

50kWH فى الشريحة من 0-50 = 50 x 0.22 = 11 جنيهه

ويصبح الإجمالى 257 جنيه ، وهذا قبل إضافة الدمغات والضرائب ورسم التوريد ورسوم تحسين الخدمة ومصاريف النظافة!. لاحظ أنه من الخطأ أن تبدأ الحساب بملاً الشريحة الأولى ثم الثانية وهكذا. لاحظ لو أن الاستهلاك تجاوز الـ 1000 kWH فلن تكون هناك شرائح بل سيضرب الاستهلاك كله في 145 قرش.

لاحظ أن شركة كيما لصناعات الألومنيوم بنجع حمادى وأيضاً مترو الأنفاق هما فقط اللذين لهما وضع خاص فى التسعيرة ، كما أن المصانع الكبرى تعامل بسعر أقل من المنازل لأنها تخدم الاقتصاد وتوفر عمالة.

### تعظيم عائد الاستثمار فى محطات الكهرباء

إنشاء محطة للتوليد يعتبر مشروعاً ضخماً من كافة النواحي ، ولذا فعلى المستثمر فى هذا المجال أن يبحث عن طرق لتعظيم العائد من هذا المشروع ، وتشمل هذه الطرق :

1- تحسين اختياراته فى مرحلة التصميم ، فعليه أن يعرف أولاً ما هو أنسب نوع من محطات التوليد يمكن أن يبنيه فى هذه المنطقة (فى المقطع التالى سنورد مقارنة بين أسعار إنشاء الأنواع المختلفة من محطات التوليد). وبالطبع فليس بالضرورة كون تكلفة الإنشاء منخفضة أن تكون هى المحطة الأنسب ، فكما ذكرنا هناك نوع آخر من التكلفة وهى التكلفة الجارية ، كما أن التكلفة الثابتة العالية لا تعنى كذلك رفض هذا الاختيار فربما تكون مصاريف التشغيل شبه معدومة كما فى حالة الخلايا الشمسية.

2- اختيار أفضل المعدات وأطولها عمراً وأعلىها كفاءة.

3- كما تشمل هذه الطرق جعل المحطة تعمل أطول فترة ممكنة ، فلا يعقل أن تنفق هذه المليارات ثم لا تجد مشترياً لهذه البضاعة ، ويفضل دائماً أن تعمل المحطة على Load Curve شبه مسطح لأن هذا يعنى كفاءة مرتفعة . وارتفاع الكفاءة مع ارتفاع معدل التشغيل سببه أن التكلفة

الثابتة ستتوزع على إنتاج أكبر فتكون نسبة التكلفة الثابتة في سعر الـ kWh المنتج صغيرة ، وهذا يجعل الكفاءة Overall Efficiency أعلى.

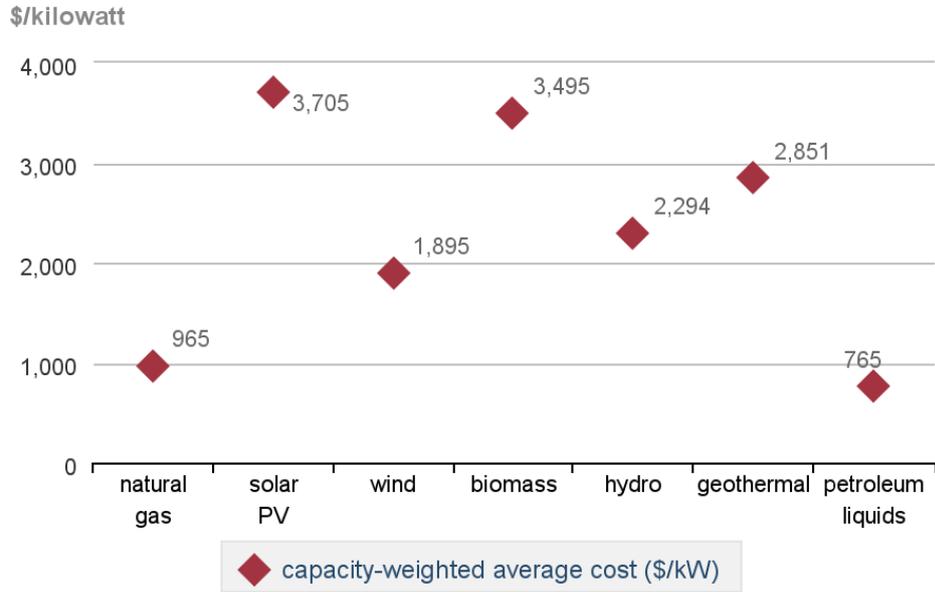
ويمكن الرجوع لبعض المراجع الواردة في الكتاب لتطبيق هذه المعلومات على مسائل حسابية لزيادة الفهم.

### مقارنة بين أسعار إنشاء محطات التوليد المختلفة في أمريكا

الأشكال التالية تعطى مؤشرا على أسعار إنشاء محطات التوليد الكهربائية المختلفة في الولايات المتحدة الأمريكية (أرقام رسمية). ويمكن الرجوع للمصدر المكتوب أسفل الصورة لمزيد من التفاصيل.

الشكل - 3 يعطى التكلفة (تكلفة الإنشاء فقط دون التشغيل) بالـ \$/kW حسب نوع محطة التوليد

#### Average construction cost



eia Source: U.S. Energy Information Administration

شكل-3:

والجدول 2 يعطى مؤشرا على تكلفة الـ kWh في المحطات النووية (شاملة الإنشاء والوقود والتشغيل):

جدول-2:

## 2015 Cost Summary (\$/MWh)

Category	Number of Plants / Sites	Fuel	Capital	Operating	Total Operating (Fuel + Operating)	Total Generating (Fuel + Capital + Operating)
All U.S.	58*	6.91	7.97	20.62	27.53	35.50
<b>Plant Size</b>						
Single-Unit	23	7.10	10.26	27.15	34.25	44.52
Multi-Unit	35	6.85	7.31	18.74	25.60	32.90
<b>Operator</b>						
Single	12	7.49	9.30	22.05	29.54	38.84
Fleet	46	6.74	7.58	20.21	26.95	34.53

\* Costs exclude shutdown plants. Also excludes Fort Calhoun, Fitzpatrick, and Pilgrim because no data was provided for 2015.

Source: Electric Utility Cost Group (EUCG)

والجدول 3- يعطى أسعار تفصيلية للمحطات النووية فى أمريكا حتى عام 2015 ، وستلاحظ تذبذب الأسعار عبر السنين ، وهذا بسبب عوامل عديدة منها أسعار الوقود وأسعار البترول. لاحظ أن أسعار إنشاء محطة نووية متذبذب بشكل كبير ، فهو يتراوح فى الخمس سنوات الأخيرة بين 5500 \$/kW إلى حوالى 8000\$/kW ، وبمعنى آخر أن سعر كل ميغاوات يتراوح بين 6-9 بليون دولار (شاملة أعباء الدين المقترض من المؤسسات المالية). لاحظ أن السعر من عشر سنوات كان يتراوح بين 1200-1500 \$/kW . والجدول 4 يعطى أسعار بعض المحطات النووية فى الولايات المتحدة حتى سنة 2008.

## جدول-3

## U.S. Nuclear Plant Costs (2015 \$):

Year	Fuel	Capital	Operating	Total
2002	5.73	3.92	18.61	28.27
2003	5.60	4.94	18.87	29.40
2004	5.29	5.66	18.56	29.50
2005	5.02	5.81	18.97	29.80
2006	5.05	5.56	19.23	29.85
2007	5.13	6.12	19.09	30.35
2008	5.36	6.77	19.53	31.66
2009	5.94	8.92	20.52	35.38
2010	6.77	9.17	20.66	36.59
2011	7.10	10.07	21.91	39.08
2012	7.47	10.77	21.50	39.75
2013	7.74	8.21	20.95	36.91
2014	7.22	8.19	20.95	36.35
2015	6.91	7.97	20.62	35.50
2002-2015 Increase	21%	103%	11%	26%
2010-2015 Increase	2%	-13%	0%	-3%

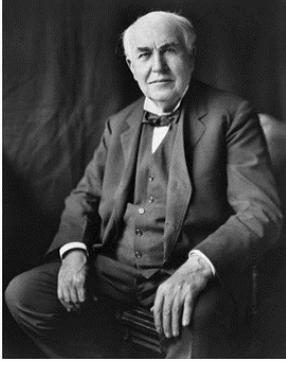
## جدول-4:

Forecast	Overnight Cost (\$/kW)	Total Plant Cost (\$/kW)	Total Plant Cost - 2 Units (billions\$)
DOE (2002)	\$1,200		
	\$1,500		
MIT (2003)	\$2,000		
Keystone Center (2007)	\$2,950	\$3,600	
	\$2,950	\$4,000	
Moody's Investor Services (2007)		\$4,000	
		\$6,000	
Florida Power & Light (2007)	\$3,108	\$5,492	\$12.1
	\$4,540	\$8,081	\$17.8
Progress Energy (2008)			\$14.0
			\$6.4 for 45% of 2 plants
Georgia Power (2008)			

# الباب الثاني

## نقل القوى الكهربائية

## مقدمة الباب



كانت عملية نقل الكهرباء تتم في بداية توليد الكهرباء عن طريق مد أسلاك توصيل مباشرة بين محطة التوليد ( DC Station ) ، وبين المشترك كما فعل توماس إديسون (February 11, 1847 – October 18, 1931) في أول محطة طاقة تجارية في التاريخ والتي أنشأتها شركته في نيويورك سنة 1882 (سميت فيما بعد بشركة جنرال إلكتريك) . لكن مع التوسع العمراني وزيادة الطلب وابتعاد المحطات عن المستهلكين بسبب بناءها خارج المدن وبسبب اتساع المدن فقد تعثرت طريقة نقل الطاقة بالطريقة العادية المباشرة من المحطة للمستهلك وأصبحت غير عملية لأن الهبوط في الجهد الكهربائي الحاصل بسبب طول المسافة أصبح كبيرا.



ابتكرت بعد ذلك طريقة جديدة بواسطة جورج وستجواوس (October 6, 1846 – March 12, 1914) ومعه المهندس الشاب العبقري نيقولا تسلا (10 July 1856 – 7 January 1943) الذى يعتبر بحق أبو الكهرباء وهى طريقة رفع الجهد الكهربائي فى المحطة الرئيسية ( AC Station ) بواسطة المحولات التى استخدمها تسلا لأول مرة ، ثم نقل الطاقة عبر خطوط الجهد العالي ، ثم فى النهاية خفض

الجهد مرة أخرى داخل محطات التحويل القريبة من المستهلكين. وهذه الطريقة حلت مشكلة الـ Losses فى الطاقة وانخفاض الجهد وذلك بسبب الانخفاض الكبير فى قيمة التيار المار بالخط (نتيجة رفع الجهد).

هذا الباب يشتمل على خمسة فصول بدءا من الفصل السابع وحتى الفصل الحادى عشر. وهذا عرض لأهم الموضوعات التى ستطرح فى هذا الباب ، وهى من وجهة نظرى تعتبر أهم الموضوعات التى يجب أن يلم بها مهندس القوى الكهربائية والمتعلقة بخطوط النقل:

1- أساليب نقل القدرة الكهربائية وهذه تدرس في الفصل السابع .

2- العناصر الرئيسية في تركيب الخطوط الهوائية وهذه تدرس في فصلين:

- (الفصل الثامن) ، وفيه ندرس تصاميم الأبراج والموصلات وملحقات الأبراج.
- (الفصل التاسع) ، وفيه ندرس العوازل Insulators .

3- حسابات الـ **TL Parameters** ، وهذه تدرس في الفصل الثالث بهذا الباب (الفصل العاشر بالكتاب) ، وأقصد بها حساب قيم ثلاثة عناصر:

- حساب قيمة مقاومة الموصل
- حساب قيمة الـ Inductance وتأثيرها على تحميل الخط
- حساب قيمة الـ Capacitance وتأثيرها على الجهد.

3-تقنيات معوضات القدرة غير الفعالة Reactive Power Compensators ، أو اختصارا الـ FACTs ، وهذه تدرس في الفصل الأخير من هذا الباب (الفصل الحادى عشر).

## 7

## أساليب نقل الطاقة الكهربائية

المقصود بنقل الكهرباء هي عملية نقل الطاقة الكهربائية التي ولدتها محطة التوليد إلى محطات التحويل الرئيسية التي ندرسها في الباب الثالث ، تمهيدا لنقلها بعد ذلك للمستهلكين عبر شبكة التوزيع التي ندرسها في الباب الرابع.

وفي هذا الفصل سنقدم مقارنة بين أشهر أساليب نقل هذه الطاقة ، وتحديدًا :

- مقارنة بين نظامي النقل باستخدام التيار المستمر DC ، والتيار المتردد AC
- مقارنة بين استخدام الخطوط الهوائية والأرضية

لكننا سنبدأ بمقدمة صغيرة عن الجهود المستخدمة في شبكات النقل وكيفية اختيارها.

## 1-7 الجهود المستخدمة في شبكات النقل

تتنوع قيم جهود المستخدمة في شبكات النقل ، لكن السمة العامة أن جهد خطوط النقل يكون عالياً ، ويبدأ من 66 kV وتصل في بعض البلاد إلى 400 kV كما في السعودية والأردن مثلاً ، وهذه تسمى شبكات الجهد العالي ، أما شبكات الجهد الفائق فتبدأ من 500 kV كما في مصر ، وتصل حتى 750 kV كما في أمريكا. والجدول 1-7 يعطى تصنيف الخطوط طبقاً لقيمة الجهد حسب الـ ANSI Code .

جدول 7-1 :

Name or Category	Nominal Voltage (kV)
Subtransmission	34.5
	46
	69
High voltage	115
	138
	161
	230
EHV	345
	400 (Europe)
	500
	765
Ultra-high voltage	1000 (China)

وجهود شبكات النقل في مصر تبدأ من جهد الـ 66 kV ، وأشهر مناطقها هي مناطق القاهرة الكبرى ، وهناك بعد ذلك شبكة جهد 132 ك ف وتغطي منطقة الصعيد كلها ، وهناك شبكة جهد الـ 220 ك ف وهذه تغطي شمال الجمهورية لاسيما الدلتا والإسكندرية ومدن القناة ، وترتبط بها أكثر من ثلثي محطات التوليد ، وهناك شبكة الـ 500 ك ف ، وهذه تبدأ من السد العالي بطول 950 كم حتى سيدي كرير بالإسكندرية ، وترتبط بها معظم محطات التوليد الموجودة بأطراف مدينة القاهرة. ويمكن الرجوع للشبكة العامة في بداية الباب الأول من هذا الكتاب للمزيد.

وبالطبع فإن الهدف من رفع جهد النقل إلى قيم عالية هو:

1- زيادة القدرة المنقولة بين المحطات والتي تتناسب طرديا مع قيمة الجهد في محطات الموجودة في بداية ونهاية الخط.

2- تقليل التيار المار في الخطوط ، حيث أنه من المعلوم أن القدرة المنقولة هي حاصل ضرب الجهد في التيار، فإذا ارتفعت قيمة الجهد فستتخفص قيمة التيار عند ثبات قيمة القدرة المنقولة ، وهو ما يترتب عليه الفوائد التالية:

3- خفض الـ Losses في القدرة المنقولة ( $P_{Loss} = 3 I^2 R$ ) ،

4- استخدام موصلات ذات مساحة مقطع أقل وهذا يعني سعر أقل ، ووزن أقل ، ويعني أيضا تكلفة أقل في بناء الأبراج بالنسبة للخطوط الهوائية.

## 7-1-1 اختيار جهد النقل

ويتوقف تحديد الجهد المناسب للخط على عاملين أساسيين :

- الأول هو طول الخط.
- والثاني هو القدرة المنقولة عبر الخط.

ويمكن استخدام المعادلة الرياضية Eq. 7-1 ، أو الجدول 2-7 الذي يليها لتحديد أفضل جهد لشبكة النقل.

جدول 2-7:

Eq. 7-1

$$E = 5.5 \sqrt{\frac{L}{1.6} + \frac{KVA}{150}}$$

القدرة المطلوبة (MW)	المسافة (km)	جهد المطلوب (KV)
3500	500	765
500	400	400
120	150	220
80	50	132

## 2-7 نقل القدرة في منظومة الـ AC (LOADABILITY)

سؤال يطرح دائما: ما هي أقصى قدرة يمكن نقلها عبر خط معين؟

هناك عوامل متعددة تحدد أقصى قدرة يمكن نقلها عبر خط معين ، منها:

- 1- جهد الخط
- 2- طول الخط
- 3- التحمل الحراري لموصلات الخط
- 4- الهبوط في الجهد المسموح به
- 5- حدود الـ Stability Margin
- 6- أقصى Sag مسموح بها في الخطوط الهوائية حسب الظروف المناخية

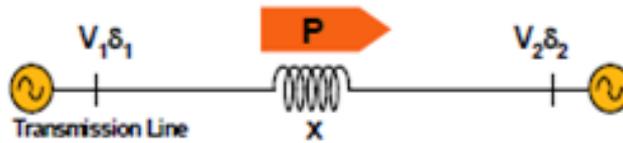
ويمكن أن نقول أن العامل المؤثر في الخطوط القصيرة هو التحمل الحرارى ، بينما تعتبر دراسات الـ ( Stability ( Transient stability, Steady state stability, Voltage collapse هي الأكثر تأثيرا في تحديد قيمة القدرة المنقولة على الخطوط الطويلة، بل إن التحميل يكون غالبا أقل من Thermal Limits في الخطوط الطويلة لتفادى مشاكل الـ Stability، ولذا فهناك طرق معروفة لزيادة القدرة المنقولة عبر الخطوط من أهمها استخدام معدات الـ FACTS حتى نصل بالتحميل إلى حدود التحمل الحرارى من أجل الاستفادة القصوى من الخطوط كما سنرى في الفصل الأخير من هذا الباب.

ويمكن حساب تقدير مبدئى للقدرة المنقولة عبر خط بعدة طرق منها:

- 1- المعادلة التقريبية Eq. 7-1 السابقة ، وتعطيك قيمة تقريبية بدلالة طول الخط وجهد التشغيل فقط.
- 2- المعادلة Eq- 7-2 الواردة في الجزء التالى وتعطيك قيمة أقصى قدرة بدلالة جهد الخط ومعاوقة الخط  $X$  وكذلك زاوية القدرة بين المحطتين على طرفى الخط ، وبالتالي تأخذ الجهد وطول الخط وكذلك موضوع الـ Stability في الاعتبار.
- 3- كما أن القدرة المنقولة عبر خط ما يمكن أن تحسب بدلالة الـ SIL كما في الجزء بعد التالى.

### 7-2-1 الحدود القصوى لنقل الطاقة

أحد أهم القيم المطلوب تحديدها لأي خط هي أقصى قدرة فعالة  $P$  يمكن أن تنتقل خلاله كما فى الشكل 7-1 .



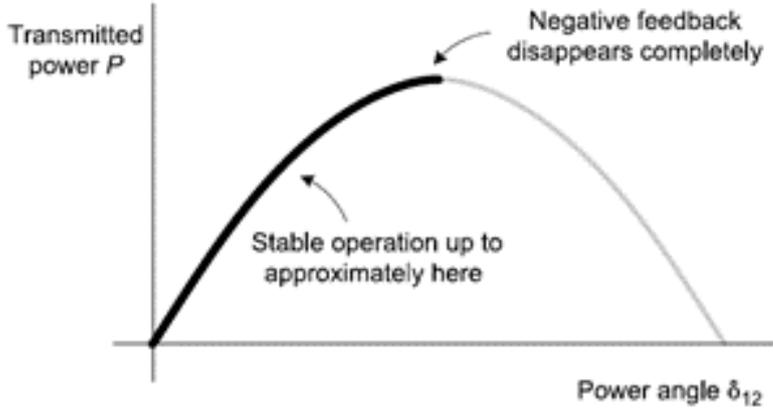
شكل 7-1:

فإذا أخذنا فى الاعتبار محطتين لهما جهد  $V_2$  and  $V_1$  مربوطتين بخط نقل القدرة له معاوقة Inductive Reactance قدرها  $X$  ، والزاوية بين جهدى المحطتين هي  $\delta_{12}$  التى تعرف بالـ Power Angle ، فإن القدرة المنقولة Transfer Power Capacity بين المحطتين تساوى:

Eq. 7-2:

$$P = \frac{V_1 V_2}{X} \sin \delta_{12}$$

ويمكن تمثيلها بالمنحنى الموجود بالشكل 7-2 والذي منه نستنتج أن القدرة المنقولة تزيد مع زيادة الزاوية بين المحطتين حتى تصل حداً الأقصى حين تكون الزاوية بين المحطتين تساوى 90 درجة لكن بالتأكيد لن نحاول الاقتراب من هذه القيمة لأن أى زيادة طفيفة فى الزاوية بعد 90 درجة ستقلنا إلى منطقة عدم الاتزان والتي فيها تتناقص القدرة المنقولة مع زيادة الزاوية.



شكل 7-2:

ومن المعادلة السابقة نستنتج أن القدرة المنقولة يمكن أن تزيد بعدة طرق منها:

- 1- زيادة جهد النقل وهذا يفسر استخدام الجهود العالية فى نقل القدرة الكهربائية بالإضافة لما نعلمه جميعاً من أن رفع الجهد سيخفض قيمة التيار فى الخطوط ومن ثم يخفض قيمة Power Losses مع ملاحظة أن رفع جهد خط بعد تركيبه يعتبر شبه مستحيل لأن ذلك يستلزم تغيير كافة العوازل على طول مسار الخط .
- 2- زيادة قيمة الزاوية  $\delta$  عن طريقة زيادة ضغط البخار الداخلى للتربين فى محطة التوليد لكن هناك حدود لهذه الزيادة Stability limit ويجب ألا تقترب من قيمة 90 درجة خوفاً من عدم الاتزان.
- 3- ويمكن زيادة القدرة المنقولة عن طريق إنقاص قيمة  $X$  وهذا ممكن إما بإنشاء مثلاً خط موازى فنقل قيمة  $X$  إلى النصف وبالتالي تزداد القدرة المنقولة إلى الضعف ، أو عمل Bundle

conductors وهو أيضا ليس أمرا هينا . ويتبقى الحل الآخر وهو استخدام التكنولوجيا الجديدة المعروفة باسم FACTS كما سندرسها في الفصل الأخير من هذا الباب للتحكم في قيم  $X$  .

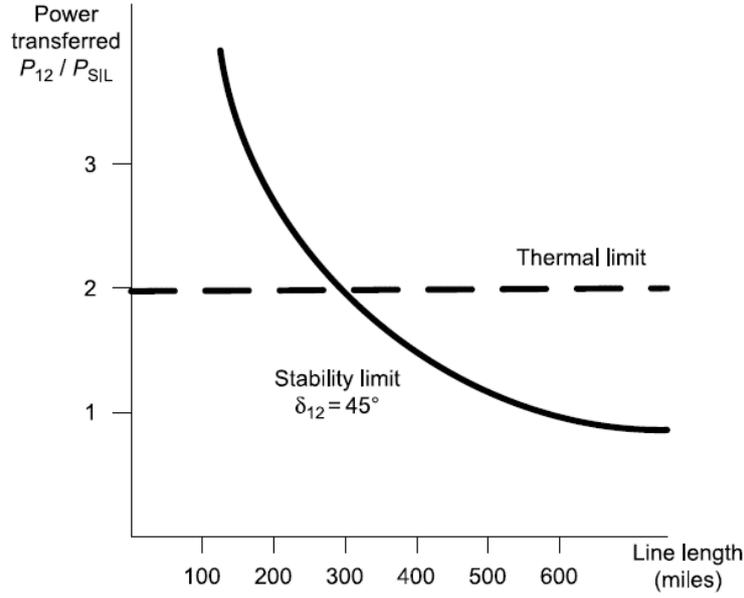
### 7-2-2 هل الخطوط القصيرة أفضل في نقل الطاقة؟

في الخطوط القصيرة ستكون قيمة  $X$  منخفضة وهذا يعنى أن القدرة المنقولة ستكون أكبر منها في حالة الخطوط الطويلة ، لكن هذا الكلام ليس على إطلاقه ، وذلك لسببين :

- الأول أن المعادلة السابقة هي معادلة تقريبية نفترض فيها فرضا غير واقعى وهو أن الخط Lossless أى ليس له مقاومة ومن ثم لم يظهر تأثير المقاومة في المعادلة.
- والسبب الثانى وهو مترتب على السبب الأول وهو أن هناك عنصر آخر يجب أن يؤخذ فى الاعتبار فى هذه الحسابات وهو ما نسميه الاتزان الحرارى أو Thermal Stability .

والاتزان الحرارى يقصد به أن تكون الحرارة المتولدة داخل أسلاك النقل نتيجة مرور التيار ( $I^2 R t$ ) تساوى أو أقل من الحرارة المتبددة من الأسلاك فى الهواء وهذا يتوقف على قيمة التيار المار بالسلك وعلى قيمة مقاومة السلك  $R$  ويتوقف كذلك على درجة حرارة الجو وأقصى درجة حرارة يتحملها الموصل ، وبالتالي فلا يمكن اعتبار أن القدرة المنقولة قد ارتفعت نتيجة أن قيمة  $X$  قد انخفضت فى الخطوط القصيرة ، مالم نأخذ فى الاعتبار أيضا قيمة الـ Thermal Limit كما هو واضح فى الشكل 7-3 .

**ملحوظة:** القدرة المنقولة  $P_{12}$  تظهر فى الشكل السابق كنسبة من الـ Surge Impedance Load . ويمكن مراجعة مفهوم الـ SIL فى الجزء التالى .



شكل 3-7:

## 3-7 ما هو مفهوم الـ SURGE IMPEDANCE LOADING ؟

وكثيرا ما تقاس القدرة المنقولة عبر خط ما كنسبة من Surge Impedance Loading, SIL ، فالخطوط القصيرة يمكن تحميلها حتى أكثر من ضعف الـ SIL ، بينما بالكاد تصل لنصف هذه القيمة في الخطوط الطويلة. فما هي الـ SIL ؟ وما أهمية حسابها؟ هل تمثل القدرة المنقولة؟

معلوم أن خط النقل يولد Reactive Power من خلال مكثفات الخط الطبيعية Self-Capacitance ، وتكون كمية الـ Q المنتجة بواسطة هذه المكثفات تساوى

$$MVAR (Produced) = \frac{V^2}{X_C}$$

أيضا هذه الخطوط تحتاج لسحب Reactive Power لتوليد المجال المغناطيسي المصاحب للخط من خلال الـ Self-Inductance الخاصة بالخط ، وهذه القدرة الغير فعالة المسحوبة تساوى

$$MVAR (Absorbed) = I^2 X_L$$

وعندما تكون  $Q (used\ by\ the\ line) = Q (Supplied\ to\ the\ line)$  فهذا يعنى أن

$$I^2 X_L = \frac{V^2}{X_C}$$

ومنها نجد أن

$$X_L X_C = \frac{V^2}{I^2}$$

ومنها نحصل على العلاقة المعروفة

$$\frac{V}{I} = \sqrt{\frac{L}{C}} = \text{Surge Impedance} = \text{Characteristic Impedance} = Z_c$$

و الـ characteristic Impedance السابقة تتراوح قيمتها بين 400 - 600 أوم في خطوط النقل الهوائي ، بينما تصل إلى 40-60 أوم في الكابلات.

والأهمية النظرية لهذا المصطلح أنه إذا تم توصيل حمل Pure resistance في نهاية الخط وكانت قيمته تساوى نفس قيمة الـ C/C Impedance للخط فعندها سيكون الجهد عند الحمل مساويا تماما للجهد عند المصدر دون أى هبوط في الجهد لأنه كما ذكرنا فإن Capacitance في الخط ألغت تأثير الـ Inductance كما أن الحمل مفترض أنه resistance بمعنى أنه لا يحتاج إلى Reactive Power ، ومن ثم لا يحدث هبوط في الجهد عبر الخط . و في هذه الحالة سيكون قيمة التيار المسحوب في الحمل تساوى

$$|I_L| = \frac{|V|}{\sqrt{3} * \sqrt{(L/C)}}$$

وإذا ضربنا طرفي المعادلة السابقة في  $\sqrt{3}V$  سنحصل على قيمة الـ SIL كما يلي

$$SIL = \sqrt{3} |V| \frac{|V|}{\sqrt{3} * \sqrt{(L/C)}}$$

|V| in kVs

$$SIL = \frac{|V|^2}{\sqrt{(L/C)}} \quad (MW) \quad (7 - 3)$$

وهذا يعنى أن هذا الخط عند هذه القيمة تحديدا من التحميل لن يحتاج من مصدر التغذية إلى أي دعم فيما يخص الـ Reactive Power. لكن ماذا لو زادت القدرة المنقولة أو نقصت عن هذه القيمة ؟ هذا ما نوضحه في الجزء التالي.

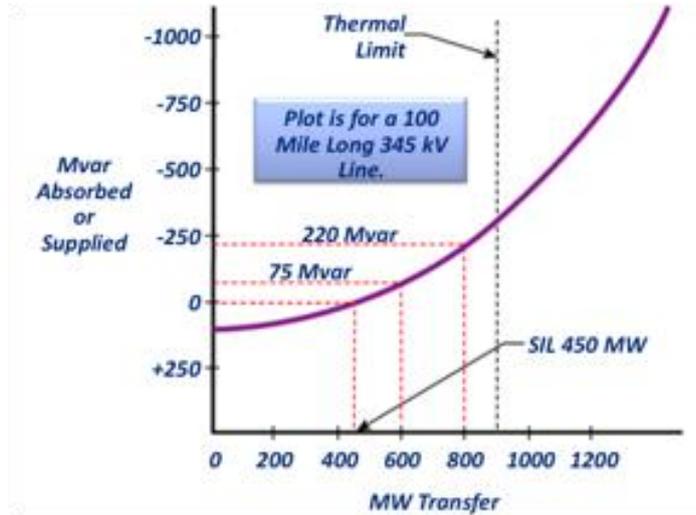
### 7-3-1 أهمية قيمة الـ SIL

الرقم الممثل للـ SIL له أهمية كبرى لمهندسي التشغيل ، فالرقم أولا نحصل عليه بسهولة ، فأنت لا تحتاج سوى معرفة جهد الخط وقيمتي الـ L and C حتى تحسب قيمة الـ SIL. فعلى سبيل المثال لو فرضنا أن الـ C/C Impedance لخط ما تساوى  $400\Omega$  وكان جهده يساوى 110 kV فهذا يعنى أن الـ

$$SIL = \frac{V^2}{Z_c} = \frac{110^2}{400} = 30MW$$

فما أهمية هذا الرقم؟

فى الشكل 4-7 يفترض أن لدينا خط له  $SIL = 450MW$ . فإذا تم تحميل الخط بحمل قدره 450 MW بالضبط ، فهذا يعنى أن القدرة غير الفعالة المولدة بواسطة مكثفات الخط تساوى تماما القدرة غير الفعالة التى يحتاجها الخط ، ولن نحتاج لأى قدرة غير فعالة من المصدر كما سبق أن ذكرنا. أما إذا زاد التحميل عن هذه القيمة فإن الخط سيحتاج لسحب Q من أى مصدر (سواء المولد نفسه أو من مكثفات مساعدة كما سنرى) ، وبالتالي يجب أن نتوقع حدوث انخفاض في الجهد.



شكل 4-7:

وإذا تم تحميل الخط بحمل أقل من SIL فهذا يعني أن الخط سينتج Q ، ومن ثم نتوقع ارتفاع جهد المنظومة.

ومن هنا تظهر أهمية هذا الرقم بالنسبة لمشغل الشبكة ، خاصة أن يستطيع بسرعة وبحسابات بسيطة كما ذكرنا معرفة قيمة الـ SIL ، وبناء على هذه القيمة يمكنه أن يتوقع هل سيحتاج إلى قدرة غير فعالة إضافية أم لا .

فعلى سبيل المثال لو فرضنا أن الـ C/C Impedance لخط ما تساوي  $400\Omega$  وكان جهده يساوي 110 kV فهذا يعني أن الـ SIL = 30MW ، وبالتالي فإن الـ Operator يكون عنده إمكانية تقدير طبيعة عمل الخط حسب نسبة تحميله ، وهل هي مثلاً أعلى أم أقل من الـ SIL المحسوبة ، وبالتالي هل الخط يسحب أم يعطي قدرة غير فعالة كما رأينا في المنحنى السابق.

### مثال 7-1

خط نقل كهرباء جهده 138 KV تم تحميله بحمل 450 KW و له:

$$L = 2.6 \text{ mH/km}$$

$$C = 0.012 \text{ }\mu\text{F/km}$$

فهل الخط يسحب أم يعطي قدرة غير فعالة ؟  
الحل

$$Z_o = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{2.6 \times 10^{-3}}{0.012 \times 10^{-6}}} = 465.5 \Omega$$

$$\text{Surge Impedance Loading} = SIL_{MW} = \frac{(KV)^2}{Z_o} = \frac{138^2}{465.5} = 40.9$$

$$40.9 \text{ MW} < 450 \text{ MW}$$

بما أن الخط محمل بحمل أكبر من SIL إذن سيعمل كأنه shunt reactor و يسحب قدرة غير فعالة.

### ملاحظات هامة جدا:

1- قيمة SIL لا تعبر عن القدرة التي يمكن أن ينقلها الخط Power Transfer Capability ، لكنها فقط مؤشر إلى حجم الـ Q التي سيحتاجها الخط انتاجا أو استهلاكاً.

2- لابد من معرفة الـ thermal rating للخط لتحديد أقصى قدرة منقولة كما في الجدول التالي.

System kV	XL (Ω/mi)	XC (MΩ-mi)	Surge Impedance (Ω)	SIL(MW)	Thermal Rating (MW)
Transmission Overhead Line Characteristics					
230	0.75	0.18	367	145	440
345	0.60	0.15	300	400	1500
500	0.58	0.14	285	880	3000
765	0.56	0.14	280	2090	8000
Transmission Cable Characteristics					
345	0.25	0.0060	39	3050	2100

## 4-7 مقارنة بين النقل باستخدام الـ HV-DC و HV-AC

### 1-4-7 مشاكل النقل بنظام الـ AC

لاحقا و مع التوسع في نقل الطاقة المنقولة بين محطتين ظهرت مشاكل جديدة للـ AC Transmission لم تكن بالحسبان منها :

- 1- أن عملية النقل إذا تمت بنظام الـ AC فسيترتب على ذلك ظهور معاوقات جديدة لمرور التيار (  $X_L$  and  $X_C$  ) تعرف بالـ Inductive and Capacitive Reactance ، وهذه تختلف عن المقاومة الأومية R المعروفة في نظام الـ DC ، ويترتب على وجود هذه المعاوقات عدة مشاكل منها زيادة انخفاض الجهد عبر الخط.
- 2- تبين أن هناك حدودا Limits لأقصى قدرة يمكن نقلها على الخط الواصل بين المحطتين ، وهذه الـ Max power transmitted تتوقف على عدة عوامل منها قيمة جهد الخط في بدايته ونهايته  $V_1$  ,  $V_2$  ، وتتوقف أيضا على قيمة معاوقة الخط Inductive Reactance  $X$  ، وتتوقف أيضا على قيمة الـ Power angle,  $\delta$  بين جهدي المحطتين ، كما في المعادلة :

$$P = \frac{V_1 V_2}{X} \sin \delta$$

وهذه المعوقات لم تكن موجودة في نظام الـ DC الذى كانت حدود النقل فيه تتوقف فقط على التحمل الحرارى للخط ، ومن ثم فالقدرة المنقولة قلت لاسيما مع زيادة طول خطوط النقل (زيادة قيمة X ) .

3- فى نظام الـ AC يمكن أن يؤثر حدوث أى تغيير فى الحمل أو حدوث عطل على استقرار الشبكة وربما يصل الأمر إلى أن يتسبب فى فصل محطة التوليد . (راجع فصل استقرار الشبكة الكهربائية بالباب السادس من هذا الكتاب) ، ومنه ستجد أن استقرار الشبكة فى نظام الـ AC أصعب بكثير منه فى حالة الـ DC بسبب الـ Reactive Power كما سيتم شرحه فى الباب السادس ونبذة عن ذلك فى نهاية هذا الباب .

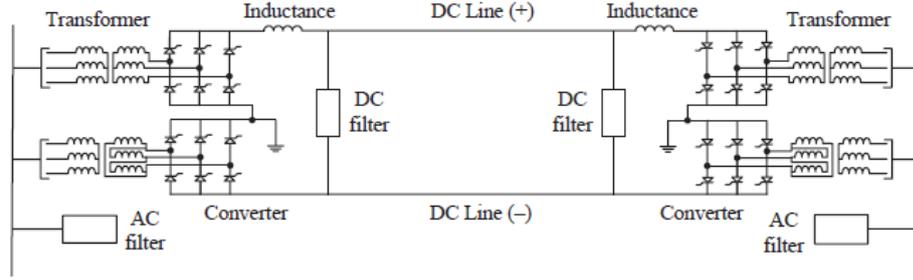
4- ظهور ظواهر مثل ظاهرة ارتفاع الجهد عند الأحمال Ferranti Effect ، وكذلك ظاهرة Arcing Ground فى نظم الـ AC المعزولة ، وأيضاً ظاهرة الكورونا وما ترتب على ذلك من كثرة عدد الموصلات بسبب استخدام Bundle conductors كما سنرى ، إلى غير ذلك من المشاكل المرتبطة بنظام الـ AC والتي لم تكن فى الحسبان ، وبالتالي أصبحت تكلفة الموصلات والأبراج متضاعفة مقارنة بنظام الـ DC .

وبعد ظهور هذه المشاكل عادت فكرة النقل باستخدام HVDC تعود مرة أخرى ولكن بعد تعديلها ، أو بمعنى آخر ، بعد دمج الطريقتين معا فى طريقة واحدة تستفيد من ميزاتهما وتتجنب عيوبهما .

بالإضافة للنقاط التى ذكرت فى المقطع السابق ، فهناك عناصر أخرى تمثل نقاطاً هامة فى المقارنة بين النظامين ، وسنبداً بعرض عيوب نظام الـ HVDC مقارنة بنظام الـ HV-AC ، ثم نعرض لميزاته:

#### 2-4-7 عيوب نظام الـ HV-DC

1- نقل القدرة بالتيار المستمر يتطلب محطة تحويل من التيار المتردد إلى المستمر فى بداية خط النقل (Rectifier) ، أخرى للتحويل من التيار المستمر إلى المتردد (Inverter) فى نهاية الخط كما فى الشكل 5-7 وهذه المحطات لها تكلفة عالية .



شكل 5-7

2- أجهزة الـ Inverters and Rectifiers المستخدمة في نظام الـ DC والتي تظهر صورتها في الشكل 6-7 تعتبر مصدرا للتوافقيات Harmonics غير المرغوب فيها مما يتطلب استخدام harmonic filter عند بداية ونهاية الخط كما في الشكل 5-7 مما يزيد من التكلفة.



شكل 6-7:

3- من عيوب هذه المحطات أنها تستهلك قدرة غير فعالة بقيمة عالية (لكن مع فارق مهم وهو أن هذه الـ Reactive Power تستهلك في بدايات الخط عند المصدر ولا تمر عبر الخط كما في حالة التيار المتردد).

القواطع في شبكات HV DC تعتبر أكثر تعقيدا بسبب صعوبة إطفاء القوس الكهربائية Arc ، فالتيار المستمر ثابت ولا يمر بالصففر ، لذلك يتم تصميمها بشكل خاص باستخدام ثايرتتورات SCRs معينة Gate Turn Off, GTO ، مع دوائر إطفاء Commutation circuits معقدة

نسبيا ، أما قواطع شبكات HV AC فإن الأمر سهل لأن التيار المتردد يمر بالصفر مرتين في كل cycle مما يجعل إطفاء القوس الكهربائية أكثر سهولة.

4- ومن عيوبها تعقد التصميم والتشغيل والتحكم مقارنة بنظام الـ AC .

### 3-4-7 مميزات نظام الـ HV-DC

وكل ما سبق يعتبر من عيوب النقل على الجهد العالي المستمر HVDC ، لكن لهذا النظام فوائد عديدة منها:

- 1- من أهم مميزات هذا النظام أننا لا نحتاج عند الربط بين شبكتين أن نتأكد من أنهما Synchronized كما في حالة الـ AC ، وهذه الميزة مهمة جدا لتحسين الـ Stability ، كما أن هذه الميزة واضحة في شبكتي الصين والهند - وهما أكبر دولتين حدث بهما نمو سريع جدا لشبكة الكهرباء - حيث توسعت الشبكة من خلال إنشاء شبكات موحدة متعددة ( Grids ) يتم الربط بينها بنظام الـ HVDC لسهولة تبادل الطاقة بين المنظومات المختلفة. راجع شكل 1-6 في الفصل الأول لتجد نموذجا آخر لربط شبكات الولايات المتحدة معا بخطوط HVDC .
- 2- في نظام الـ DC تكون عدد الأسلاك اثنان Bipolar system فقط كما في الجزء الأيمن من الشكل 7-7 الـ DC ، بينما تكون عدد الأسلاك بالدائرة الواحدة يساوي ثلاثة ( three phase ) في نظام الـ AC كما في الجزء الأيسر من الشكل 7-7 ، وهناك أيضا نظام في الـ DC يستخدم خط واحد فقط للنقل Monopolar على أن يعود التيار خلال الأرض. بالتالي في كل الأحوال فإن حجم البرج أيضا في نظام الـ DC أصغر ، وهذا يعني تكلفة أقل.



شكل 7-7:

- 3- في نظام الـ DC يكون التردد صفرا ، و بالتالي لا توجد مفاعلة حثية  $X_L$  ولا مفاعلة سعوية  $X_C$ . وهذا يعني عدم وجود الـ Reactive Power بمشاكلها ( التي تدرس تفصيلا في نهاية هذا الباب) والتي منها عدم اتزان الجهد ومنها التسبب في زيادة القدرة المفقودة بسبب مرور هذه

- الـ Reactive Power عبر الخطوط ، ولذلك فقد قلنا سابقا أن استقرار منظومة الـ DC أعلى من استقرار منظومة الـ AC.
- 4- ظاهرة الـ skin effect موجودة في حالة التيار المتردد فقط ، حيث يمر التيار المتردد حول السطح الخارجي للموصل أى تقل مساحة المقطع الفعلية التي يمر فيها التيار (مشروحة بالتفصيل في الفصل العاشر) ، بينما هذه الظاهرة غير موجودة في حالة التيار المستمر حيث يمر التيار في كامل مقطع الموصل وهذا يعنى أن مقاومة الموصل في حالة الـ AC أكبر من مقاومته في حالة الـ DC (المقاومة تتناسب عكسيا مع مساحة المقطع) وهذا يؤدي بالضرورة إلى أن تكون المفايد النحاسية ( $I^2 R$ ) في حالة الـ DC أقل.
- 5- مساحة مقطع الموصل في حالة الـ DC أقل من مساحة مقطعه في حالة الـ AC كنتيجة لظاهرة الـ skin effect ، وهذا يقلل من التكلفة الكلية.
- 6- في حالة النقل بالتيار المستمر يكون الهبوط في الجهد على طول الخط ( $I \cdot R$ ) أقل بكثير من الهبوط في الجهد في حالة النقل بالتيار المتردد ( $I \cdot (R + jX)$ ) مما يحسن تنظيم الجهد Voltage Regulation ويزيد من كفاءة نقل القدرة الكهربائية .
- 7- في حالة الـ DC يسمح باستخدام خط نقل DC بأى طول لنقل أى قدرة (بشرط عدم تجاوز حد التحميل الحرارى للموصلات فقط ) ، بينما في حالة الـ AC هناك حدود لطول خط النقل كما أشرنا في مقدمة الفصل.
- 8- في خط النقل الـ DC لا نستخدم معوضات Compensators على طول خط مثل Shunt or Series capacitors أو Shunt reactors المستخدمة في خطوط الـ AC .
- 9- مفايد الكورونا Corona Losses في خطوط النقل بالتيار المستمر أقل من نظيراتها في خطوط النقل بالتيار المتردد (راجع الفصل التاسع لشرح هذه الظاهرة).
- 10- في معظم الحالات تكون قيمة تيار الـ Short Circuit Current في نظام الـ DC أقل بكثير من قيمته في نظام الـ AC لاسيما في حالة الوصلات التي تمر خلال الموانع المائية حيث تكتمل دائرة التيار من خلال مقاومة عالية في حالة الـ Short فتقل القيمة.
- وبالإضافة للميزات السابقة ، هناك ميزات حصرية لنظام الـ HVDC بمعنى أنه لا وجه للمقارنة فيها مع نظام الـ HVAC ، وهى ما نعرضه في الجزء التالى.

### 7-4-4 متى لا يكون هناك بديل للنقل بنظام الـ HVDC ؟

يعتبر النقل بالتيار المستمر HVDC Transmission اختيارا وحيدا ليس له بديل عند الربط الكهربى بين شبكتين فى الحالات الثلاث الآتية :

- 1- عندما يكون تردد الشبكتين مختلفا ( 50 Hz و 60Hz مثلا )
  - 2- عند وجود مانع مائى (بحر مثلا) بين الشبكتين بحيث يمنع تركيب معوضات إستاتيكية (static var compensators) بينهما. ومن أشهر الأمثلة على ذلك الخط البحرى بين إنجلترا وفرنسا ، ويصل طوله إلى 45 كم ويحمل 2000 ميغا وات من خلال كابلات HVDC تحت الماء . لاحظ أن النقل هنا لو كان HV-AC لكان هناك مفايد فى التيار هائلة خلال الـ Capacitance الخاصة بالكابل.
  - 3- عندما تكون الشبكتين من الضخامة بحيث يصعب على نظم التحكم فيهما عمل synchronization بينهما فى حال الفصل والارتباط.
- ملحوظة: فى بقية هذا الباب سيكون الاهتمام منصبا فقط على نظام الـ AC بتعدياته.

### 7-4-5 مقارنة التكلفة فى النظامين

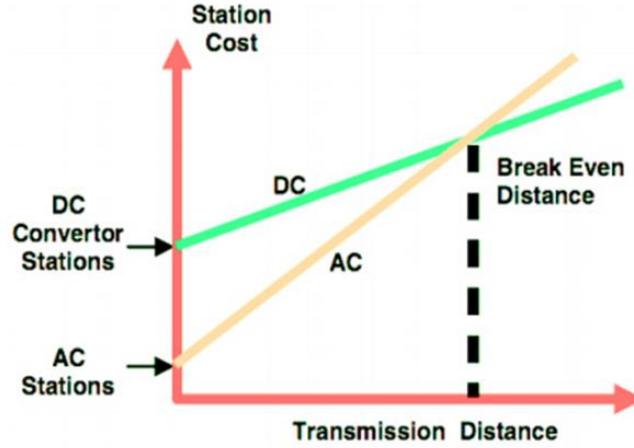
أما بالنسبة للتكلفة ، فتكلفة خط النقل فقط (بالنسبة للكيلو متر الواحد دون أخذ محطات الـ Inverters and Rectifiers فى الاعتبار ) للتيار المستمر أقل من مثيلتها بالنسبة للتيار المتردد ، لأن التيار المستمر يحتاج إلى موصلات وعوازل أقل وأبراج نقل ذات أبعاد أقل و بالتالى تكلفة أقل . (ملحوظة : تكلفة محولات رفع/ خفض الجهد لا تؤخذ فى الاعتبار لأنها موجودة فى النظامين).

لكن التكلفة الإجمالية ليست مجرد تكلفة خط النقل ، وإنما هناك معدات خاصة بنظام الـ DC. والمنحنى الموجود فى شكل 7-8 يوضح الفرق بين تكلفة النقل بالتيار المستمر والمتردد مقارنة مع طول خط النقل. لاحظ تغير التكلفة الإنشائية لخط النقل بالتيار المتردد و المستمر مع طول النقل على النحو التالى:

- 1- التكلفة الابتدائية لخط النقل بالتيار المستمر للمسافات الصغيرة أكبر من مثيلتها للتيار المتردد ، لأن تكلفة محطات Inverters/ Rectifications ستتوزع على طول صغير فترتفع القيمة.
- 2- لكن عند قيمة معينة لطول الخط تسمى Break even distance والتي عندها يتقاطع منحنى التكلفة للنظامين نجد أن تكلفة النقل بالتيار المستمر تصبح أقل. وهذه القيمة تكون لطول يساوى 800 كم تقريبا ، لذلك نجد أنه من الناحية الاقتصادية يستحسن النقل بالتيار المستمر فى

المسافات الطويلة (أكبر من 800 كم) بينما يفضل اقتصاديا النقل بالتيار المتردد فى المسافات الأقل من 800 كم.

3- لاحظ أن معدل تغير تكلفة الخط للكيلو متر الواحد بالنسبة لخط النقل بالتيار المتردد أكبر من مثيلتها بالنسبة للتيار المستمر وذلك بصفة عامة للأسباب التى ذكرناها سابقا .



شكل 7-8:

## 5-7 مقارنة بين خطوط النقل الهوائية والأرضية

يوجد ثلاثة أنواع لخطوط النقل والتوزيع ، هى :

1. خطوط هوائية Over Head Transmission Lines
2. كوابل أرضية Underground Cables.
3. وهناك نوع ثالث غير شائع ، وهو خطوط الـ Gas-Insulated Lines التى تستخدم غاز الـ SF6 كعازل ، وهذه الطريقة لاتزال محدودة الاستخدام وفى المسافات الصغيرة فقط ، وأطول خط نفذ من هذا النوع كان بطول 700 متر فى ألمانيا . ومعظم هذه الخطوط تكون غالبا داخل محطات التوليد أو محطات التحويل أو لنقل الطاقة بينهما لمسافة غير طويلة خلال أنفاق كما فى الشكل 7-9 التى تمثل نمودجا لإحدى محطات شركة سيمنس.



شكل 7-9:

وسيكون التركيز في هذا الجزء على المقارنة بين النوعين الأولين فقط.

في الخطوط الهوائية تستخدم الموصلات المكشوفة غير المعزولة ، ولذلك تستخدم الأبراج بأنواعها المختلفة لرفع الموصل عن الأرض بمسافة كافية لتوفير الأمان ، ويكون الهواء هو العازل بين الموصلات بعضها البعض على طول مسار الخط ولذلك سميت بالخطوط الهوائية.

ويعتبر استخدام الخطوط الهوائية عموماً أفضل اقتصادياً من الكابلات الأرضية ، حيث تبلغ تكلفة خطوط الكابلات من 5 إلى 10 مرات ضعف تكلفة الخطوط الهوائية ذات الإمكانيات المتساوية . ومن ثم فإن التكاليف الثابتة للخطوط الهوائية (تكاليف الإنشاء) أقل كثيراً من الكابلات الأرضية ، إلا أن التكاليف الجارية لها تكون أكثر قليلاً من التكاليف الجارية للكابلات، حيث تحتاج الخطوط الهوائية إلى صيانة دورية من نظافة أو تغيير العوازل وترميم القواعد وتغيير بعض أعضاء الهيكل المعدني في حالة تعرضها لعوامل التعرية وكذلك تغيير موصلات مقطوعة أو توصيلها ببعضها بالطرق الفنية السليمة. ورغم ذلك ، فإن مجموع التكاليف الثابتة والمتغيرة للخطوط الهوائية تظل أقل بكثير من مجموعها للكابلات الأرضية . لكن مما قد يساعد على تفضيل الكابلات أحياناً هو زيادة مساحة الأرض المطلوبة لإنشاء خطوط النقل الهوائية في حالة استخدام الجهود الزائدة والفائقة وارتفاع تكلفة هذه الأراضي ، فعلى سبيل المثال فإن

إنشاء خط هوائي للجهد العالي يتطلب 30000 متر مربع/ كيلو متر، ويزداد ثمن الأرض سوف تزداد تكلفة إنشاء مثل هذه الخطوط.

وأيضا مما يميز الكابلات المدفونة تحت الأرض عدم تأثرها بالتغيرات الجوية والعوامل الطبيعية كالرياح وتراكم الجليد والتلوث ، وبالتالي يزيد من عمرها الافتراضي عن الخطوط الهوائية . لكن يعيب الكابلات - بالإضافة إلى ارتفاع ثمنها - صعوبة تحديد مكان الخطأ إلا باستخدام السيارات الحديثة المجهزة لذلك.

وعموما ، فالواقع يقول أن نظم النقل تجدها مختلطة Composite Overhead-Underground Lines ، فحينما يكون من الصعب استخدام الخطوط الهوائية لوجود المناطق السكنية مثلا فإننا نستخدم الكابلات ، ومن ثم فيمكن أن تجد خطا مكونا من جزئين فقط : U/G Cable + OHTL ، وأحيانا نجده مكونا من ثلاثة أجزاء :

. U/G Cable + OHTL + U/G Cable

وتتابع هذا الأمر ستكون بالأساس زيادة في صعوبة تصميم منظومة الحماية ، فالخط الآن ليس له Characteristic Impedance واحدة ، وبالتالي هناك صعوبة في تحديد مسافة العطل سواء باستخدام Distance relay أو باستخدام Travelling Waves .

## 6-7 المواضيع الهامة في دراسة خطوط النقل

الخلاصة حتى الآن أن عملية نقل الكهرباء تعتبر علما قائما بذاته ، وليست كما تبدو للبعض أنها مجرد موصلات تحمل تيارا من مكان لآخر ، وسترى هنا في هذا الباب أننا نحتاج لدراسات تفصيلية لعلاج مشاكل الـ Losses ومشاكل الاستقرار ، وتحسين انتظام الجهد وغيرها من المشاكل.

ونستطيع في نهاية هذه المقدمة الطويلة أن نوجز هنا أهم المواضيع التي يجب أن يلم بها مهندس القوى الكهربائية والمتعلقة بخطوط النقل مباشرة:

1-العناصر الرئيسية في تركيب الخطوط الهوائية وهذه تدرس في فصلين:

(الفصل الثامن) ، وفيه ندرس:

- الأبراج Transmission towers وأنواعها
- الموصلات conductors وأنواعها والمواد التي تصنع منها

• الملحقات مثل الـ Damping devices وحلقات الكورونا والتأريض وكلامبات الشد ووصلات المنتصف وخلافه.

(الفصل التاسع) ، وفيه ندرس العوازل Insulators وطرق تعليقها وأنواعها وتحسين كفاءتها ، وظاهرة الكورونا إلخ.

2- حسابات الـ **TL Parameters** ، وهذه تدرس في الفصل الثالث بهذا الباب (الفصل العاشر بالكتاب) ، فكما ذكرنا في المقدمة فإننا نحتاج إلى دراسة حدود نقل القدرة على خط ما ، وحساب ثبات الجهد وغيره ، وكل هذا يحتاج إلى حساب قيمة معاوقة الخط Impedance أو بمعنى أوسع حساب الـ Parameters الخاصة بالخط وهي ثلاثة عناصر:

- حساب قيمة مقاومة الموصل
- حساب قيمة الـ Inductance وتأثيرها على تحميل الخط
- حساب قيمة الـ Capacitance وتأثيرها على الجهد.

وهناك ظواهر متعددة مرتبطة بهذه الـ Parameters مثل ظاهرة الكورونا والـ Arcing Ground وظاهرة Ferranti Effect وغيرها ، وكل هذه الظواهر تدرس أيضا في هذا الفصل.

3- تقنيات معوضات القدرة غير الفعالة Reactive Power Compensators وهي من الموضوعات الهامة لدراسة التحكم في القدرة المنقولة بالخط وكذلك المساعدة في تحسين جهد الشبكة ، وهو ما يطلق عليه خطوط النقل المرنة Flexible AC Transmission systems أو اختصارا كلمة FACTS ، وهذه تدرس في الفصل الأخير من هذا الباب (الفصل الحادي عشر).

## 8

## الأبراج الهوائية لنقل القوى

## 1-8 تصميم الأبراج

الوظيفة الرئيسية لخطوط النقل الكهربائية هي نقل القدرة الكهربائية من مكان إلى آخر. والمكون الرئيسي لخط النقل الهوائي هو الموصل أما باقي الأجزاء فهي أجزاء مساعدة لحمل الموصل وعزله عن الأرض. وفي الخطوط الهوائية يستفاد من الهواء كوسط عازل ، ولكن الهواء - شأن كل العوازل - ينكسر عزله إذا زاد الجهد عن قيمة معينة ، وهي في حالة الهواء تساوي  $30 \text{ kV/cm}$  ، بمعنى أنه إذا وصل الجهد بين نقطتين إلى أكثر من هذه القيمة فسيتحول الهواء إلى موصل. ولذا كان الغرض من استخدام الأبراج الكهربائية هو الحفاظ على الموصلات على ارتفاع آمن من الأرض وكذلك إيجاد مسافة آمنة بينها وبين بعضها البعض .

وتتعدد العوامل التي تؤثر في تصميم الأبراج الكهربائية ، فمن أهمها:

- 1- الجهد الكهربى المستخدم
- 2- عدد الدوائر التي يحملها البرج.
- 3- المسافة بين الأبراج.
- 4- العوامل المناخية التي يتعرض لها الخط (رياح - ثلوج.....).
- 5- أقطار الموصلات والمسافة بينها.
- 6- العوامل الجغرافية (طبيعة الأرض ، إلخ)

فى المراجع الأجنبية ستجد أن البرج إما أن يسمى Tower أو يسمى Pylons، وهذا الاسم الأخير مأخوذ من شكل وطريقة تصنيع البرج والذي يصنع غالبا من تشكيلات حديدية متداخلة (بعض الأبراج تصنع من الخرسانة أو حتى الخشب فى الجهود المنخفضة نسبيا) .

ورغم أن معظم ارتفاعات الأبراج تتراوح بين 15- 50 متر تقريبا ، إلا أن هناك حالات خاصة معدودة على مستوى العالم يصل فيها ارتفاع البرج إلى مئات الأمتار (أعلى برج وصل إلى 370 متر وموجود في الصين) .

وأعلى برجين في مصر ( 221 متر ) موجودان ضمن خط النقل الهوائي الذي يعبر قناة السويس ، وبالطبع فالهدف منهما تفادي السفن الضخمة التي تعبر القناة. وهذه إحصائية ببعض أشهر هذه الأبراج حول العالم.

Year	Country	Town	Pinnacle	Remarks
2009–2010	China	Damao Island	370 m	Tallest pylons in the world
1992	China	Nanjing	257 m	Tallest reinforced concrete pylons in the world
2003	China	Wuhu	229 m	Tallest electricity pylons used for HVDC
1998	Egypt		221 m	
1999	Turkey	Istanbul	160 m	
1984	Iran	Strait of Ghesm	130 m	One pylon standing on a caisson in the sea

### 8-1-1 عناصر مكونات الأبراج

يتكون أى خط هوائى (شكل 8-1) من ثلاثة عناصر أساسية هي:

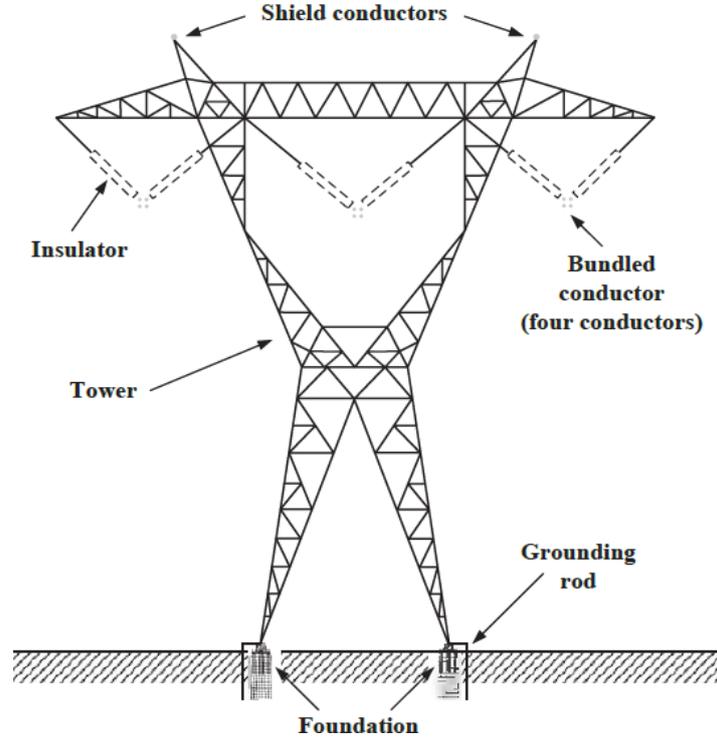
1- الأبراج Tower وما تشتمل عليه من قواعد ونظم تأريض.

2- العوازل insulators

3- الموصلات

بالإضافة إلى عدد من الملحقات مثل:

- خط الأرضى Earthing Line ويسمى أيضا Shield conductors للحماية من الصواعق البرقية
- خامدات الاهتزاز Dampers
- فواصل الأسلاك Spacer فى حالة استخدام نظام الـ Bundle Conductors
- الحلقات المعدنية Guarding Rings ، وغيرها.



شكل 1-8 :

علما بأن كل برج لابد له من لوحة تعريفية تحمل رقمه (كل برج له رقم خاص لتسهيل عمليات الصيانة أو البحث عن الأعطال).

والمكونات السابقة وغيرها ستشرح هنا في هذا الباب ضمن ثلاثة فصول :

- هنا في الفصل الثامن سنعرض شرحا تفصيليا للأبراج والموصلات وملحقاتها.
- أما الفصل التاسع سنخصصه للعوازل في الأبراج .
- في الفصل العاشر سندرس كيفية عمل تمثيل Simulation لهذه الخطوط الهوائية وكيفية حساب قيم عناصرها ( Resistance, Inductance and Capacitance ) ، وندرس أيضا تأثير هذه القيم على أداء خط نقل الطاقة عموما ، وندرس أيضا بعض الظواهر المرتبطة بهذه ال Parameters مثل ظاهرة ال Ferranti Effect ، ال Arcing Ground ، وظواهر الارتفاع في الجهد.

## 2-8 المسافات فى الأبراج الكهربائية

يمكن أن يحمل البرج الكهربى دائرة كهربية واحدة (الدائرة الواحدة تحمل موصلات لثلاثة أوجه three phases ) ، ويمكن أيضا أن يحمل دائرتين. ويجب أن يراعى عند تصميم الأبراج وجود مسافات آمنة بين الموصلات والأرض ، وكذلك بين الموصلات وبعضها البعض ، وهو الهدف الأساسى من استخدام البرج.

وهناك عدة مسافات تحتاج للتوصيف عند دراسة الأبراج منها:

- 1- ارتفاع البرج ، والمسافة بين الموصلات والأرض
  - 2- المسافة بين كل برج والبرج الذى يليه
  - 3- مسافة حق طريق المرور Right of Way
  - 4- تقدير المسافات الآمنة من تأثير المجالات الكهربائية والمغناطيسية
- وفيما يلى ندرس تفصيلا هذه الموضوعات.

### 1-2-8 ارتفاع البرج والمسافة بين الموصلات والأرض

ارتفاع الأبراج تتراوح غالبا بين 15 - 50 متر (باستثناء الأبراج الخاصة التى أشرنا إليها) ، وبالطبع فالعنصر الأساسى فى المقارنة هو قيمة الجهد. أما الحد الأدنى للمسافة بين الموصلات والأرض فهو يحسب كما يلى :

#### CLEARANCE ABOVE GROUNDS:

(Clause 77 of Indian Electricity Rules)-- m.

33 KV -----	5.100
66 KV -----	5.490
132 KV-----	6.100
220 KV -----	7.015
400 KV-----	8.840

ويمكن حسابها أيضا من بعض المعادلات ، وبالطبع ستتوقف المسافة على الجهد بالدرجة الأولى وأيضا على مقدار الـ Sag المسموح به حتى لا تتلامس الموصلات وقت هبوب الريح. وبعض المعادلات تأخذ

مقطع الموصل فى الحسابان . وجدول 1-8 يقدم بعض نماذج لهذه الـ Formulas التى تستخدم فى تحديد هذه المسافات:

## جدول 1-8

## 1) Mecomb's formula

$$Spacing(cm) = 0.3048 \cdot V + 4.010 \frac{D}{W} \sqrt{S}$$

V= Voltage of system in KV

D= Diameter of Conductor in cm

S= Sag in cm

W= weight of conductor in Kg/m

## 2) VDE formula

$$Spacing(cm) = 7.5\sqrt{S} + \frac{V^2}{2000}$$

Where-

V= Voltage of system in KV

S= Sag in cm

## □ Swedish formula

$$Spacing(cm) = 6.5\sqrt{S} + 0.7 \cdot E$$

Where-

E= Line Voltage in KV

S= Sag in cm

## □ French formula

$$Spacing(cm) = 8.0\sqrt{S+L} + \frac{E}{1.5}$$

Where-

E= Line Voltage in KV

S= Sag in cm

L= length of insulating string(cm)

## 8-2-2 المسافة بين البرج والذي يليه

المسافة المثلى (Span) بين أبراج الجهد العالي الهوائية هى المسافة التى تعطى أقل تكلفة للخط مع توفير حدود الأمان المطلوبة. وتجري هذه الحسابات لكل كيلومتر بعد تحديد هل الخط (مفرد أم مزدوج) وهل سيوضع فى أرض عادية ومنبسطة أم على أرض ذات تربة صخرية مثلاً ، ثم تحديد بعض المعطيات مثل قوة شد الموصلات فى أدنى درجة حرارة لها، و تدلي هذه الموصلات Sag فى أعلى درجة حرارة لها، ، ويؤخذ فى الاعتبار أيضاً ارتفاع الأبراج وطول سلاسل عوازل التعليق بالإضافة لحجم وتكاليف القواعد الخرسانية للأبراج والـ Earthing .

وعادة تجرى الحسابات باعتبار المسافة هى 100متر مثلاً بين كل برجين ، ثم تزيد تدريجياً حتى 500 متر ثم نختار المسافة التى تعطى أقل تكلفة . وبالطبع تجرى هذه الحسابات بواسطة برامج خاصة للحصول على النتائج بسرعة.

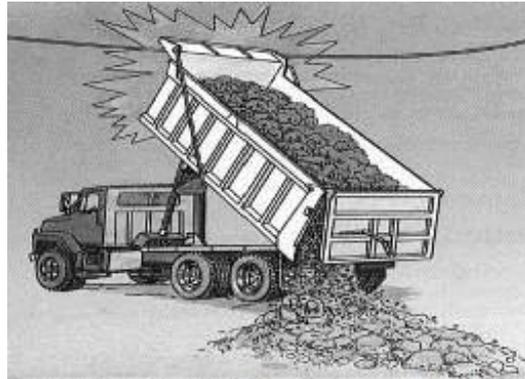
## 3-2-8 مسافة طريق مرور الأبراج Right of Way

يجب أن يراعى وجود مسافة مناسبة Right of Way لتباعد المباني والأشجار عن مسار الخطوط (شكل 2-8) . وتحسب هذه المسافة بحيث إذا سقطت إحدى الأشجار لأي سبب من الأسباب فإنها لا تسقط على الخطوط ، وهذا يستلزم تقدير الطول الأقصى الذى يصل إليه طول الشجرة.



شكل 2-8 :

كما أن الخطوط يجب أن تكون أعلى من مستوى السيارات المارة تحتها لاسيما سيارات النقل حتى لا يتسبب انخفاضها فى حوادث كما فى الشكل 3-8.



شكل 3-8 :

علما بأنه فى حالة حدوث حادثة كما فى الصورة السابقة فسيكون تواجدها أن تنفجر جميع إطارات السيارة كما فى الشكل 4-8 (بسبب ارتفاع فرق الجهد على الهواء الداخلى للإطار) ، والمفارقة الغريبة هنا أن الشخص الموجود بداخل السيارة لن يصاب بأذى حتى لو كان جهد الخط 500 ك ف ، والسبب هو عدم

وجود فرق جهد عليه وهو داخل السيارة ، وهو فى ذلك يشبه الطيور التى تقف على خطوط النقل ولا تتأثر بسبب عدم وجود فرق جهد على جسمها. (تذكر أن التيار لا يسير إلا بين نقطتين بينهما فرق للجهد. )



شكل 4-8 :

وإنما الخطر الداهم يحدث إذا غادر هذا الشخص السيارة ووقف على الأرض مثلا ثم أغلق باب السيارة ، عندها سيكون هناك فرق جهد على جسمه كاف لحرقه وليس فقط موته. وعلى أى إنسان فى المنطقة المحيطة بالسيارة أن يقف على بعد لا يقل عن 10 متر ، فإذا كان لابد أن يكون على مسافة أقل من ذلك فعليه أن تكون قدميه متجاورتين وملامستين حتى يتجنب ظهور Step Voltage على جسمه. فإذا أراد الشخص مغادرة السيارة فلا يلمس أى جزء منها بعد مغادرته للسيارة ، ويجب أن تكون قدميه متجاورتين كما فى الشكل 5-8.



شكل 5-8 :

## 4-2-8 الصيانة الحية Live maintenance للأبراج

بدأت بعض الشركات في تطبيق أسلوب الصيانة على الجهد أي الصيانة في وجود الجهد تجنباً لقطع الكهرباء ، وهو أسلوب موجود في منظومتي النقل و التوزيع ، وبالطبع هي في حالة أبراج الجهد العليا ستكون أخطر منها في شبكات التوزيع ذات الجهد المتوسط والمنخفض .

وتتعدد أساليب الصيانة على الجهد على النحو التالي:

1- استخدام Hot Stick أو العصا المعزولة. وهي عصا طويلة ومعزولة يمكن للمختص أن يستخدمها مع الخطوط الحية حيث تتركب معدات الصيانة في طرفها ، وتستخدم مع الجهود المتوسطة.



ولمزيد من الأمان يجب ان يرتدى الشخص الممسك بالعصا جوائتى عازل **Insulating Gloves** مناسب للجهد المتعامل معه وأن يقف داخل سلة معزولة إذا كان معلقا في الهواء .

### الطريقة الثانية : barehand method

في هذه الحالة سيتم وضع الشخص مباشرة فوق الخط المكهرب بحيث يصبح فرق الجهد على جسمه يساوى صفر فلا يمر به أي تيار ، تماما مثل الطيور التي تقف على الأسلاك .

بالطبع فإن هذا الشخص سيكون معزولا عن الأرض ، ويصل للخط إما بواسطة طائرة أو ونش معزول . وعليه فهو يشبه قطعة حديد طائرة في السماء تقترب من الخط وتلمسه .

### كيف يمكن حماية الشخص من المجال؟

السر يكمن في البدلة التي يرتديها من يتعاملون مع الخطوط الحية ، فهي بدلة موصلة للكهرباء على عكس ما يظن البعض (حتى الجوائتى والشراب في قدمه كلهم موصلين) ، وتسمى أحيانا Farady's suit ، لأنها تشبه Faraday's cage ، فالمجال الكهربى لا يخترق هذا الصندوق المعدنى بل تظل الشحنة على السطح فلا يتأثر الإنسان بداخلها .

ويتم وضع الإنسان تدريجيا على الخط إما بواسطة الصعود التدريجى على سلم معزول أو الاقتراب من الخط بواسطة ونش في نهايته سلة معزولة يقف بداخلها الشخص ويقرب من الخط ممسكا بعصا معدنية ينكسر بينها وبين الخط الهواء فتنتج شرارة ثم يصبح جهدها وجهد الشخص الممسك بها هو نفسه جهد الخط .

هذه الشرارة التي تظهر حين اقتراب الشخص من الخط ناتجة من انهيار عزل الهواء مع تقارب المسافة بين الموصلين: الخط والبدلة ، وعلى الشخص أن يسرع في لمس الخط حتى يصبح فرق الجهد بينهما صفرا. بالطبع فإن استخدام العصا الحديدية حتى تكون الشرارة بينها وبين الخط فلا تتأثر البدلة مع الوقت بكثرة تعرضها للشرارة .

### لماذا يزود الشخص ببدلة موصلة رغم ان الطيور لا تستخدم اى "بدل" عازلة؟

نظريا يمكن وضع الشخص مباشرة على الخط دون بدل خاصة مثل الطيور لكن الفرق هو في حجم الإنسان مقارنة بحجم الطائر ، فالحجم الصغير تكون سعته Capacitance صغيرة وتأثره بالجهد أقل ، وهذا يعنى أن الإنسان معرض بسبب حجم جسمه للتأثر بالمجال ويمكن أن تصل قيمة التيار الناتج بسبب المجال الكهربى إلى حوالى  $15 \mu A$  for each  $kV \cdot m^{-1}$  through a human body .

لاحظ أنه نظريا بدون هذه البدلة سيكون الجسم واقع في مجال مغناطيسي وكهربي عالى جدا لكن الجسم المعزول عن الأرض (كما هي الحالة هنا) يمثل كما قلنا low capacitance ، وبالتالي لن يمر بها تيار (تماما مثل الطائر الذى يحط على الخط بدون "بدلة" لكنه يمثل very small capacitance بالنظر إلى حجم الطائر) .



### 8-2-5 التعامل مع الخطوط المفصولة

عند التعامل مع الخطوط المفصولة يكون الشخص مرتديا عوازل أيضا في يديه تحسبا لوجود شحنات ساكنة لا تزال على الخط ويجب أن يتعامل مع الخط بعصا الأمان ومبين الجهد للتأكد التام من خلوه من الشحنات ويجب قبل تمام التأكد ألا يلمس الخط بيديه الاثنين في وقت واحد وإنما على الأقل تكون العطل المعزولة في إحدى يديه حتى لا تجد الشحنة مسارا موصلا سهلا (مقاومته صغيرة) خلال قلبه لاسيما إذا

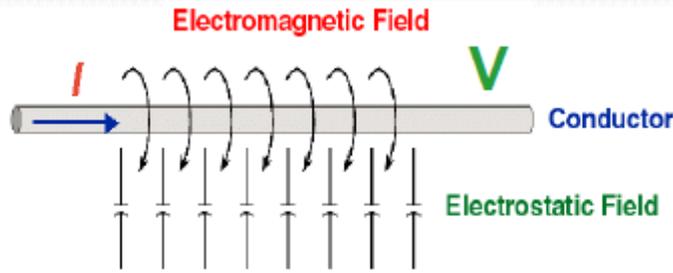
كان هناك خلل في الجوانتي العازل (ممكن يكون فيه قطع صغير أو يكون غير مناسب لجهد الخط بالخطأ) فعندها تحدث الكارثة.

### 8-2-6 تحديد مدى مسافات خطورة المجالات حول الأبراج

تتميز خطوط القوى الكهربائية بأن حولها مجالات كهربية ومغناطيسية (شكل 8-6 ، وشكل 8-7). وتتوقف شدة وخطورة المجال الكهربى على شدة الجهد ، بينما تتوقف شدة المجال المغناطيسى على شدة التيار .



شكل 8-6 :

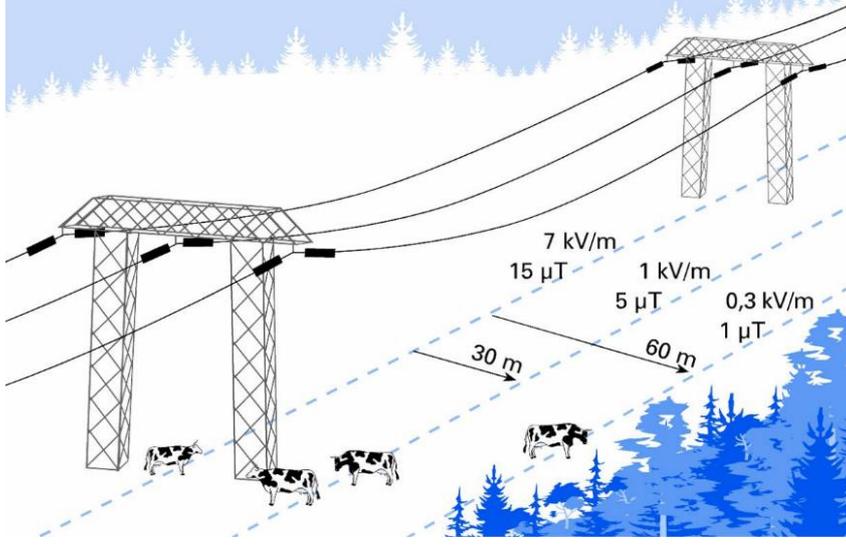


شكل 8-7 :

وتتوقف شدة المجال أيضا على مدى البعد عن الخط ، فعلى سبيل المثال فى خط 400 ك ف كما فى الشكل 8-8 حيث تكون شدة المجال المغناطيسى أسفل الخط مباشرة حوالى  $15 \mu\text{T}$  بينما تصل إلى  $1 \mu\text{T}$  على بعد 60 متر من الخط. أما المجال الكهربى فتتراوح قيمته فى المثال السابق بين  $7\text{kV/m}$  إلى  $0.3\text{kV/m}$ .

ورغم أن الأبحاث متضاربة نوعا ما فى تقدير المسافة التى خلالها يتسبب المجال الكهربى والمغناطيسى فى ظهور خطر على صحة الإنسان والحيوان ، إلا أن هناك بعض القيم لا خلاف عليها وهى:

- أقل من متر لكل 100 كيلو فولت يعتبر خطرا أكيدا
- أكثر من 10 متر لكل 100 كيلو فولت يعتبر أمانا أكيدا



شكل 8-8 :

وبين هاتين القيمتين توجد منطقة البعض يتشدد فيها والبعض يتساهل ، وفى أغلب الأحوال تعتبر مسافة متر لكل 10 كيلو فولت مسافة مناسبة. بالطبع المقصود هنا عند دراسة خطورة هذه المجالات على شخص دائم التواجد فى هذه المنطقة ( طبيعة عمله أو سكنه تقتضى أن يقضى وقتا طويلا بجوار هذه الخطوط )، ولا نقصد تأثيرها على شخص يمر مرورا عابرا .

وفيما يلى نموذج للمواصفات الهندية للمسافات المختلفة فى خطوط النقل الهوائية.

### LINE CLEARANCES

The minimum clearances shall be in accordance with Indian Electricity Rules, 1956 and are given in Table I.

Table - I, Minimum Clearance ( Values in Meters )

Voltage Category (IE Rules, 1956) Nominal System - Voltage Clearance	Low & Medium Voltage			High Voltage			Extra High Voltage		
	Low	Upto 11 KV	Upto 33 KV	66 KV	132 KV	220 KV	400 KV HVDC	±500 KV	800 KV
<b>1) Clearance to Ground</b>									
(a) Across Street	5.8	6.1	6.1	6.1	6.1	7.0	8.80	12.50	12.40
(b) Along Street	5.5	5.6	5.8	6.1	6.1	7.0	8.80	12.50	12.40
(c) Other areas Bore Cond.	4.6	4.6	5.2	5.5	6.1	7.0	8.80	12.50	12.40
(d) Other areas Insu. cond.	4.0	4.0	-	-	-	-	-	-	-
<b>2) Clearance to Buildings</b>									
(a) Vertical (*) - from higher object	2.5	3.7	3.7	4.0	4.6	5.5	7.30	11.59	10.50
(b) Horizontal (+) - from nearest point.	1.129	1.219	2.0	2.3	2.9	3.80	5.6	10.98	9.20

#### 3) Clearance Between Line crossing each other.

Voltage of 1 <sup>st</sup> Line	Voltage of 2 <sup>nd</sup> Line						
	250V to 66KV	100 KV	132 KV	220 KV	400 KV	± 500KV HVDC	800 KV
250 V to 66 KV	2.44	2.75	3.05	4.58	5.49	6.86	7.94
100 KV	2.75	2.75	3.05	4.58	5.49	6.86	7.94
132 KV	3.05	3.05	3.05	4.58	5.49	6.86	7.94
220 KV	4.58	4.58	4.58	4.58	5.49	6.86	7.94
400 KV	5.49	5.49	5.49	5.49	5.49	6.86	7.94
+ 500 KV HVDC	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	7.94
800 KV	7.94	7.94	7.94	7.94	7.94	7.94	7.94

#### 4) Clearance from Supporting structure of another line

- Low or Medium Voltage line 1.210 meters
- High Voltage 1.829 meters.
- Extra High Voltages lines 1.944 meters.

#### 5) The Transmission line corridor requirement for different voltage lines are as follows :

Voltage Level (KV)	Corridor Requirement (meters)	Voltage Level (KV)	Corridor Requirement (meters)
66	18	220	35
110/100	22	500 HVDC	52
132	27	800	85

#### 6) Tree Clearance :

- For E.H.VT Lines , all tall trees within 12.19 meters on either side.
- All bush growth within 6,095 meters on either side to be completed cleared, Grafted fruit trees which will not grow tall may be left out.
- All branches or leaves which are within 0.914 meters from the conductors, neutral and earth wires in case of L.T line should be cut.

## 3-8 أنواع الأبراج :

تصنع الأبراج الكهربائية في الجهود العالية عادة من الصلب المجلفن Galvanized Steel. ويتحدد نوع البرج من طريقة تركيب العازل المركب عليه أو الوظيفة التي يؤديها ، فإذا كان العازل معلقا يصبح نوع البرج برج تعليق و إذا كان العازل مشدودا يصبح نوع البرج برج شد ، كما أن البرج الذي يعبر مانع مائي مثلا يسمى برج عبور ، وهكذا.

### 1-3-8 أبراج تعليق Suspension Towers :

وتشكل هذه الأبراج حوالي 80 % من إجمالي عدد الأبراج في الخط وتستخدم في حمل الموصلات . وهى الأبراج التي يتم توظيفها لحمل الموصل فقط و لا يقع عليها أى قوى شد أفقية. فأبراج التعليق (شكل 8-9) تعتمد في ثباتها على وجود قوتين للشد متساويتين على جانبي البرج فلو حدث و سقط موصل من إحدى الجهتين فسيؤثر الموصل وكذلك الموصلات على كافة أبراج التعليق المجاورة.

ويمكن تمييز هذا النوع بوجود سلسلة عوازل واحدة لكل موصل عند كل نقطة تعليق كما في الصورة على عكس الأنواع التالية. و لتجنب امتداد هذه المشكلة فإننا نستخدم برج شد بعد كل عشرة أبراج تعليق تقريبا.



شكل 8-9 :

## 8-3-2 أبراج شد Tension Towers :

وظيفة أبراج الشد هي تحمل قوى الشد الميكانيكية بصورة مستقلة عن الأبراج السابقة أو اللاحقة. ويمكن تمييز هذا البرج (شكل 8-10) بوجود سلسلتين للعوازل عند كل نقطة تثبيت حيث يكون الموصل بينه وبين البرج الذي يسبقه مربوطاً بأحد العازلين والموصل بينه وبين البرج الذي يليه مربوطاً بالعازل الثاني .



شكل 8-10 :

ويوضع برج من هذا النوع بعد كل عدة أبراج تعليق - كل عشرة أبراج في المتوسط - وذلك لتفادي سقوط السلك من على كل الأبراج حالة حدوث قطع فيه ، لأنه إذا كانت جميع الأبراج على مسار الخط أبراج تعليق ، وحدث قطع في الموصل فإن الموصل سيسقط من على جميع الأبراج ، وبالتالي سنحتاج لوقت ومجهود كبير وتكلفة عالية للإصلاح.

وأبراج الشد متعددة الأنواع حسب نوع قوى الشد الواقعة عليها كأبراج الشد في بداية الخط و نهايته ، أو الأبراج المستخدمة عند تغيير الاتجاه ، أو أبراج عبور المسطحات المائية الصغيرة كالأنهار أو قناة السويس مثلاً .

**3-3-8 أبراج التبديل Transposition Towers :**

وهذه الأبراج (شكل 8-11) يتم من خلالها تبديل الفازات Phases على مسافات متساوية بطول الخط لكي تتساوى الـ Inductance في الـ Phases الثلاثة وكذلك تتساوى الـ Capacitance للفازات الثلاثة بطول الخط

فكما سنرى في الفصل العاشر فإن قيمة الـ Inductance and Capacitance تتوقف على أبعاد البرج وارتفاعات الموصلات عن الأرض ، وهذا يعني أن الـ Phase العلوى ستكون له Inductance مختلفة في القيمة عن الـ Phase السفلى ، ومن هنا ظهرت الحاجة لتبديل الـ Phases على طول الخط ، بحيث يكون Phase-A مثلا في الأعلى لثالث المسافة ، ثم يكون في الوسط في الثالث الثانى ، ثم في الأسفل في الثالث الأخير .

مع ملاحظة إنه يجب ألا يختلف ترتيب الـ Phases في بداية الخط عن نهايته بعد إجراء عملية التبادل ، على سبيل المثال لو كان الخط طوله 150 كم فيتم تقسيم هذا الخط إلى ثلاثة قطاعات أو مضاعفاتها بحيث يتم تركيب برج تبادل كل 50 كم من الخط. ويكون Phase-R هو الأعلى في البداية والأوسط في المنتصف والأسفل في النهاية ، ومن ثم يكون هو أيضا الأعلى بعد نهاية الـ 150 كم إذا زاد الطول عن ذلك. وبالطبع فإن برج التبادل هو بالضرورة برج شد .



شكل 8-11 :

## 4-8 الموصلات فى أبراج الجهد العالي :

الموصل هو الجزء الرئيسي في خط النقل حيث إنه هو الناقل الذي يقوم بنقل الطاقة الكهربائية من مكان لآخر. والموصلات المستخدمة في خطوط النقل تكون مكشوفة أي غير مغطاة بمادة عازلة ، وتكون معلقة بين أعمدة أو أبراج تبعد عن بعضها مسافات قد تصل في بعض الأحيان أكثر من 250 متراً ، وهذه المسافة تعرف بـ "بحر السلك" أو الـ "Span" .

وتصنع الموصلات من النحاس أو الألمونيوم النقي بدرجة نقاوة لا تقل عن 99.5 % . ويتم سحب الأسلاك النحاسية إما على الساخن أو على البارد ، أما أسلاك الألمونيوم فيتم سحبها على البارد فقط لأن السحب على البارد يعطى قوة شد أعلى.

وكون الموصل معلقاً يجعله دائماً واقعاً تحت تأثير وزنه الذي يؤثر رأسياً إلى أسفل مسبباً إجهاد شد في الموصل ، ولذلك فإنه يجب أن تكون المادة التي يصنع منها الموصل ذات متانة ميكانيكية عالية تجعلها تتحمل الإجهاد الواقع عليها ، ويجب أن تكون خفيفة الوزن حتي تكون قوة الشد المؤثرة على الموصل قليلة وحتى يمكن زيادة المسافة بين الأبراج لتقليل تكلفة إنشاء الخط .

وعموماً فإن اختيار مادة الموصل في خطوط النقل يخضع لعدة اعتبارات:

1. المسافة بين البرجين.
2. الشد في الموصلات.
3. هل يكون الخط معرض للاهتزازات نتيجة الرياح أم لا.
4. الـ Losses في القدرة على الخط.
5. الهبوط في الجهد على الخط.
6. الطقس والعوامل المناخية في موقع الخط.
7. مساحة مقطع الموصل أو حجم الموصل.

#### 8-4-1 خصائص المواد المستعملة في صناعة الموصلات

##### 1- التوصيلية: Conductivity

يجب أن تكون المادة التي تصنع منها موصلات خط النقل ذات موصلية عالية وذلك حتى يكون الـ Losses في القدرة على الخط أقل ما يمكن حتى تكون عملية النقل اقتصادية.

##### 2- المتانة الميكانيكية: Mechanical Strength

تقاس المتانة الميكانيكية بأقصى إجهاد تتحمله المادة ، وكلما كانت نسبة المتانة إلى الوزن أكبر كلما أمكن زيادة خطوة البرج وتقليل تكلفة إنشاء الخط.

##### 3- معامل المرونة: Modulus of Elasticity

استطالة الموصل تحت تأثير إجهاد الشد الواقع عليه تؤدي إلى نقص مساحة المقطع مما يؤدي إلى ضعف الموصل وانقطاعه ولذا نحتاج أن يكون معامل المرونة صغيراً.

## 4- معامل التمدد الحراري: Heat expansion coefficient

يفضل صناعة الموصل من مادة ذات معامل تمدد حراري صغير حيث أن خطوط النقل الهوائية تكون معرضة للتغيرات المناخية نظراً لوجودها بالعراء فهي عرضة للتغيرات في درجة الحرارة من درجات تقترب من درجة التجمد في الشتاء إلى درجات تروبو على 40 درجة مئوية وقد تصل إلى درجة 50 أو أكثر في بعض المناطق ، فإذا كان معامل التمدد الحراري للموصل كبيراً فإن أسلاك خط النقل ستمدد لدرجة تجعلها تقترب من الأرض في الصيف أو على الأقل تزداد احتمالية تلامسها ببعضها ، في حين أنها ستتكسب انكماشاً شديداً في الشتاء مما يزيد الشد في الموصل ويجعله ينقطع.

## 5- التكلفة: Cost

والتكلفة من أهم العوامل المؤثرة في اختيار مادة الموصل ، وبالطبع نهدف إلى جعل تكلفة نقل الطاقة الكهربائية أقل ما يمكن .

والمادة الأكثر استعمالاً في صناعة موصلات خطوط النقل الهوائي هي الألمونيوم حيث أن الألمونيوم يتمتع بخصائص تؤهله لأن يكون بديلاً جيداً للنحاس وهي أن له موصلية عالية تقارب 60% من موصلية النحاس إضافة إلى خفة الوزن ورخص الثمن . ورغم أن المتانة الميكانيكية للألمونيوم أقل من النحاس فإنه يتم التغلب عليها بطرق مختلفة كما سنرى في الجزء التالي.

## 5-8 أنواع الموصلات في خطوط النقل الهوائي

### 1-5-8 الموصلات المجدولة (Stranded Conductors) :

معظم الموصلات المستخدمة في خطوط النقل الهوائية تكون عبارة عن جديلة من أسلاك الألمونيوم ملفوفة فوق سلك صلب واحد أو أكثر في قلب الجديلة ، ويمكن أن تكون أسلاك الألمونيوم عبارة عن طبقة أو أكثر من الأسلاك المجدولة بطريقة حلزونية حول هذا القلب (شكل 8-12) ، ويكون اتجاه جدل الأسلاك في كل طبقة مخالفاً لاتجاه الجدل في الطبقة السابقة لزيادة متانة الشد.



شكل 8-12 :

والموصلات المجدولة تستخدم في الأحمال المرتفعة والجهود العالية لأنها تتحمل تيارات أعلى لنفس مساحة مقطع الموصل وذلك بسبب خاصية الـ skin effect حيث يمر التيار في الطبقات الخارجية للسلك بنسبة أكبر في الموصلات المجدولة ، بسبب تعدد الأسطح ، ومع زيادة عدد الأسطح تزداد فرصة مرور التيار بقيمة أكبر بينما في الموصل المصمت لدينا سطح واحد.

وبالتالي فإن الموصل المجدول يتحمل تيارا كهربيا أعلى من الموصل المصمت لنفس مساحة المقطع في حالة التيار المتردد ، بالإضافة إلى أنه يمتاز بالمرونة العالية .

ولكن هناك عيبين للموصلات المجدولة :

- الأول أن القطر الخارجي للموصلات المجدولة أكبر من القطر الخارجي للموصلات المصمتة والتي لها نفس المساحة.
- والثاني هو عدم انتظام توزيع الـ Electric Field على سطحه مما يؤدي لزيادة المجال في مواضع أكثر من الأخرى كما سيتم شرحه في باب الكابلات عند الحديث عن موصلات الكابلات حيث أن تأثير عدم انتظام المجال يكون واضحا جدا في الكابلات أكثر من الخطوط الهوائية.

وهناك أنواع متعددة من الموصلات المجدولة المستخدمة في الخطوط الهوائية منها:

- Aluminum Conductor Steel Reinforced (ACSR),
- All-Aluminum Conductor (AAC),
- All-Aluminum Alloy Conductor (AAAC),

- Aluminum Conductor Steel Supported (ACSS),
- Aluminum Conductor Composite Core (ACCC),
- Aluminum Conductor Composite Reinforced (ACCR), and

وفيما يلي شرح لبعض من هذه الأنواع.

#### موصلات الألمونيوم الخالص

يعتبر الـ All Aluminum Conductor, AAC أرخص أنواع الموصلات ، ولكن بسبب المتانة المنخفضة لهذا النوع من الموصلات تجعله مناسباً فقط عندما تكون المسافة بين كل برجين قصيرة.

#### الألمونيوم المقوي بالصلب

يتكون الـ Aluminum Conductor Steel Reinforced ACSR من قلب عبارة عن طبقة أو أكثر من أسلاك الصلب المجلفن المحاطة بطبقة أو أكثر من أسلاك الألمونيوم ، كما هو موضح بالشكل 8-13، ويتم تعريف هذه الموصلات بعدد أسلاك الألمونيوم وأسلاك الصلب . على سبيل المثال السلك مقطع 30 / 7 أي التي تتكون من 30 سلك ألمونيوم على طبقات (طبقتين في الرسم) ، و 7 أسلاك من الصلب إلا أنه توجد أنواع كثيرة بنسب مختلفة من أسلاك الصلب والألمونيوم . كما في الجدول التالي المأخوذ من شركة كابلات عمان.

وبالطبع هناك مقاييس أخرى يرجع إليها في الكatalogات.



## ALL-ALUMINIUM CONDUCTORS

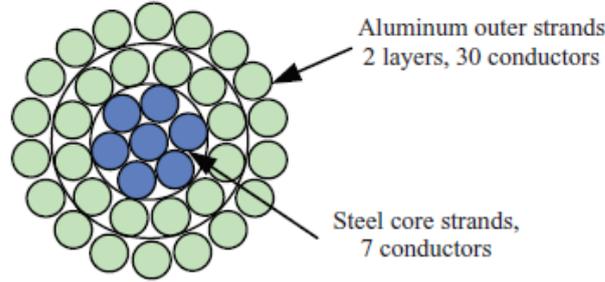
## AAC

BS 215 : Part 1

TABLE 1A

BRITISH SIZES

Code Name	Nominal Area	No. / Nominal diameter of wires	Approximate Overall Diameter	Total Area	Approximate Weight	Nominal Breaking Load	Nominal DC Resistance at 20°C	Current Rating (*)
	mm <sup>2</sup>	No./mm	mm	mm <sup>2</sup>	kg/km	KN	ohm/km	A
Midge	22	7/2.06	6.18	23.33	64	3.99	1.22700	106
Ant	50	7/3.10	9.30	52.83	145	8.28	0.54190	175
Fly	60	7/3.40	10.20	63.55	174	9.90	0.45050	196
Wasp	100	7/4.39	13.17	106.00	290	16.00	0.27020	268
Hornet	150	19/3.25	16.25	157.60	434	25.70	0.18250	342
Chafer	200	19/3.78	18.90	213.20	587	32.40	0.13490	412
Cockroach	250	19/4.22	21.10	265.70	731	40.40	0.10830	471
Butterfly	300	19/4.65	23.25	322.70	888	48.75	0.08916	530
Centipede	400	37/3.78	26.46	415.20	1145	63.10	0.06944	616



شكل 8-13 :

هذا النوع من الموصلات له متانة أعلى من موصلات الألمنيوم ولذلك يستخدم عندما تكون المسافة بين الأبراج كبيرة ويمكنه كذلك تحمل الظروف الجوية السيئة وله كذلك معامل مرونة أعلى ومعامل تمدد حراري أقل من الألمنيوم ولذلك فإن خصائصه الميكانيكية أعلى بكثير من الألمنيوم ويمكن التحكم في هذه الخصائص بتغيير نسبة الألمنيوم إلى الصلب في الموصل المجدول.

## موصلات سبائك الألمنيوم

وهذا النوع : AAAC , All Aluminum Alloy Conductor , عبارة عن سبيكة متجانسة معالجة حرارياً من الألمنيوم والمغنسيوم والسيليكون ، وهذا الموصل له خصائص تميزه عن ACSR ، AAC ،

حيث أن له متانة عالية جداً وذلك يتيح زيادة المسافة بين الأبراج وبالتالي تقليل تكلفة إنشاء الخط أو زيادة قدرة حمل التيار عند استخدامه على الأبراج الموجودة فعلاً وتحسين أداء الخط . وهذا الموصل له مقاومة كهربية أقل وبالتالي يسبب فقد أقل في القدرة على الخط ، ولذلك يكثر استخدام هذا النوع من الموصلات في الخطوط الحديثة .

### الألومنيوم المقوي بسبيكة الألومنيوم

يعتبر : Aluminum Conductor Alloy Reinforced ACAR مشابهاً تماماً لـ ACSR ولكن مع استبدال القلب المكون من أسلاك الصلب بأسلاك من سبيكة الألومنيوم وبذلك يعطي خصائص بين خصائص موصلات الألومنيوم وخصائص موصلات الألومنيوم المقوي بالصلب.

### سبيكة الألومنيوم المقوي بالصلب

يعتبر Aluminum Alloy Conductor Steel Reinforced AACSR مشابهاً لـ ACSR حيث يحتوي على قلب مكون من أسلاك الصلب ولكن تستبدل أسلاك الألومنيوم بأسلاك من سبيكة الألومنيوم ، وهذا النوع له متانة ميكانيكية عالية على حساب الموصلية ولذلك يستخدم هذا النوع من الموصلات عندما تكون مثل هذه الخصائص مرغوبة وخصوصاً في أسلاك الأرضي.

## 8-5-2 أطوال الموصلات

عادة يكون الموصل ملفوفاً على بكرة (درم) بطول يتراوح بين 1 كيلومتر (موصلات Moose or Zebra) وقد تصل إلى 2 كيلومتر كما في موصلات من النوع Panther أو موصلات الـ Earthing ، وبالطبع سنحتاج لعمل وصلات بين الموصلات كما في الشكل 8-14 ، وذلك للوصول للطول اللازم .ويمكن عمل الوصلات بصور أخرى مثل اللحام وغيره.



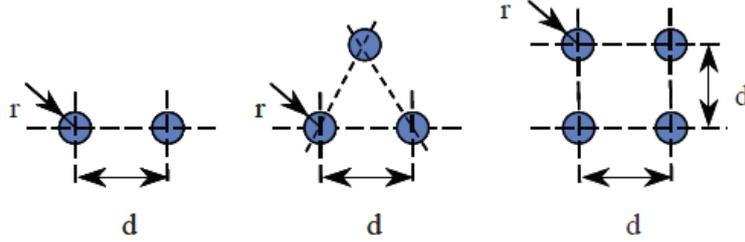
شكل 8-14 :

## 6-8 الاكسسوارات التي تستخدم في الخطوط

هناك أيضا بعض العناصر التي يمكن تصنيفها على أنها ملحقات Accessories تتعلق بالموصلات ، مثل كلابات التعليق والشد ، ومنها أيضا خامد الاهتزازات Dampers ، ومنها كذلك الـ (spacers) وهي الفواصل بين الموصلات عند عمل Bundles Conductors .  
وفيما يلي بعض التفاصيل عن هذه الملحقات.

### 1-6-8 فواصل الموصلات

عند عمل Bundle Conductors ، يمكن استخدام موصلين أو ثلاثة أو أربعة لكل فاز كما في الشكل 15-8 ، وبالطبع نحتاج لفواصل بين هذه الموصلات لضمان وجود مسافة ثابتة بين الموصلات .



شكل 15-8 :

ويستخدم الـ Spacer كما في الشكل 16-8. راجع الجزء الخاص بظاهرة الكورونا في الفصل التاسع للمزيد حول هذا الموضوع.



شكل 16-8 :

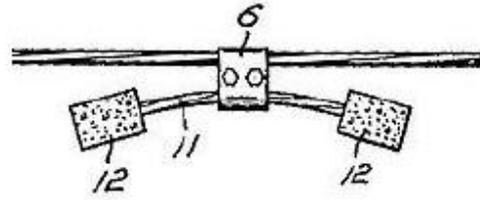
## 2-6-8 خامد الاهتزازات Dampers

نتيجة الرياح الشديدة سيكون هناك اهتزازات قد تتسبب مع الوقت في مشاكل للخط و للعوازل ، ولذا فمعظم الخطوط تكون مزودة ( لاسيما في الجهد العالي ) بما يسمى Stockbridge dampers كما في الشكل 17-8



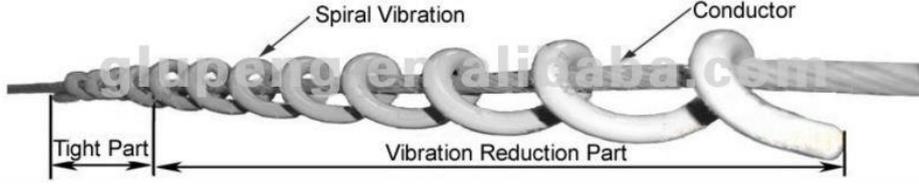
شكل 17-8 :

وفكرة العمل كما في الشكل 8-18 أن الاهتزازات تنتقل من نقطة الاتصال رقم 6 إلى كابل قصير رقم 11 مركب عليه أفعال (غالبا كتل خرسانية أو معدنية ) رقم 12 ، وطول الكابل مع الكتل المركبة مصممة بحيث تستنفذ طاقة الاهتزازات فيهم . ويتم تركيبه في بداية ونهاية كل موصل بين برجين .



شكل 18-8 :

وهناك نوع آخر يستخدم لإخماد الاهتزازات يسمى spiral vibration damper وهو سلك ثقيل يلف مثل السوستة حول الموصل في كل جهة من جهات التثبيت كما في الشكل 8-19. وقد يستعمل النوعان معا.



شكل 8-19 :

### 8-6-3 كرات تحذير الطائرات

لعلك تلاحظ في بعض خطوط نقل القوى وجود كرات تسمى warning lights كما في الشكل 8-20 ، وبعض هذه الكرات لا يصدر ضوءا وهي الكرات المناسبة للنهار فقط ، لكن بالليل نحتاج لكرات تصدر ضوءا تحذيرا للطائرات المارة بالمنطقة إذا كانت قريبة من المطارات لاسيما طائرات الهيلوكوبتر التي قد تطير على ارتفاعات منخفضة . ويبلغ قطر الكرة حوالي 60 سم.



شكل 8-20 :

كما يوجد نوع آخر من أجهزة الإنارة والتحذير يوضع على قمم أبراج الضغط العالي حسب تعليمات منظمة هيئة الطيران المدني وفيه إلزام بأن أى برج يزيد ارتفاعه أو يساوى 50 مترا لابد أن يوضع عليه جهاز ضوئى.

## 9

## عوازل خطوط النقل

## Insulators

معلوم أن جميع الموصلات المستخدمة في الشبكات الهوائية للجهد العالي والفائق هي موصلات غير معزولة ، و هذا هو السر في انخفاض التكلفة مقارنة بالكابلات ، لكن في المقابل يجب عزل هذه الموصلات عن الأرض وذلك بتعليقها و رفعها بعيدا عن مستوى الأرض ، و يجب عزلها عن الأبراج الحديدية من خلال سلاسل العوازل.

و تتكون العوازل المستخدمة في خطوط النقل من عدة أطباق Disc Insulators . وبالطبع يتغير عدد أطباق السلسلة حسب الجهد المستخدم. وعندما يكون الحمل الميكانيكي كبيرا يمكن استعمال سلسلتين على التوازي لحمل الموصل الواحد.

وكلما كان الجهد المستخدم عاليا كلما كان عدد الـ Discs أكثر ، وبالتالي طول مجموعة العوازل أكبر . والجدول 1-9 يعطى مثلا على ذلك (وبالطبع سيؤدى ذلك لزيادة تكاليف العازلية و حجم الأبراج) .

جدول 1-9

Line Voltage (kV)	Number of Insulators per String
69	4-6
115	7-9
138	8-10
230	12
345	18
500	24
765	30-35

و هذه العوازل تمثل نقطة الضعف الأساسية في الشبكات الهوائية لعدة أسباب من أهمها تراكم الأتربة عليها مما يجعل من سطحها مساراً سهلاً لتسرب التيار من الموصلات إلى الأرض خلال جسم البرج ، و لذا يجب عمل صيانة و نظافة دورية لهذه العوازل إضافة إلى مشكلة عدم انتظام توزيع الجهد على الأقرص المكونة لسلسلة العزل . وهذه المشكلة وغيرها ندرسها لاحقاً في هذا الفصل .

## 9-1 وظيفة العوازل:

للعوازل وظيفتان أساسيتان هما:

- 1- وظيفة كهربية: وهي تأمين العزل الكهربية الكامل بين الموصلات (الأسلاك) الكهربائية و بين الأبراج الحاملة لها. وهذا لن يتم إلا إذا توفرت في العازل عدة سمات أهمها الكفاءة العالية للعزل الكهربى تحت أسوأ الظروف الجوية كالمطر و الرطوبة و الأمطار و التلوث ، وأيضاً تحمل جهد تشغيل الخط بالإضافة إلى الجهود الناتجة من عمليات الفصل و التوصيل للمهمات.
  - 2- وظيفة ميكانيكية : وهي تثبيت الموصلات الكهربائية على الأعمدة أو الأبراج الكهربائية في جميع الظروف الجوية المتوقعة ، بحيث تتحمل مختلف القوى الميكانيكية المؤثرة عليها مثل وزن الموصل و قوة الشد.
- و يتوقف نوع العوازل و قوتها على نوع الخط المركبة عليه وجهده ، و كذلك على موضعها من البرج المستخدم ، ولها عدة تصنيفات :

## 9-2 تصنيف العوازل حسب الشكل التصميمى :

ويوجد منه عدة تصميمات :

### 9-2-1 تصميم عوازل الطاقة والمسامر

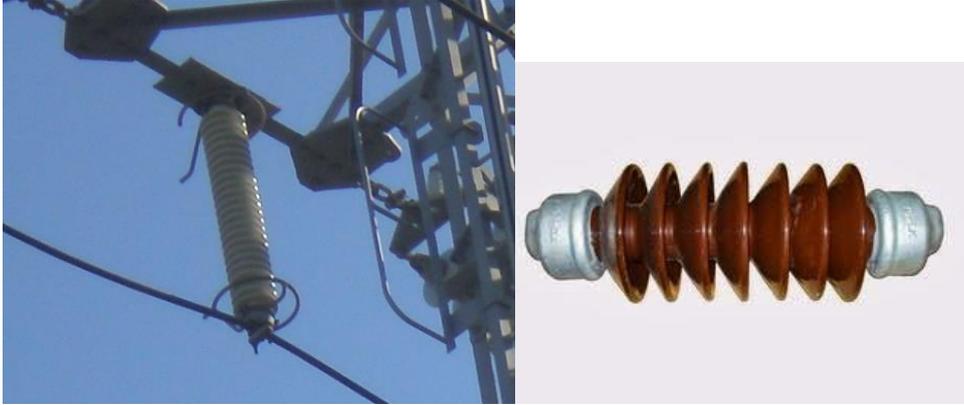
ويسمى Cap & Pin type insulator ، ويصنع هذا النوع من البورسلين أو الزجاج. و يتميز هذا النوع من العازلات بإمكانية استبدال أى طبق تالف من السلسلة ، كذلك فإنه يصلح لكافة الجهود بدءاً من المتوسطة و حتى فائقة الجهد 500 ك ف . ويتم تركيب الأطباق المختلفة معا بتوصيل مسمار الطبق الثانى بالشق أو الثقب الموجود بالأول كما في الشكل 9-1 ، وهكذا حتى تتكون السلسلة بالطول المطلوب.



شكل 9-1

### 9-2-2 تصميم عوازل الساق الطويلة

ويصنع Long rod type insulator من البورسلين أو المطاط السليكوني (شكل 9-2) ، وأكثر استعماله في الـ Bushings الخاصة بالكابلات أو المحولات وفي محطات التحويل.



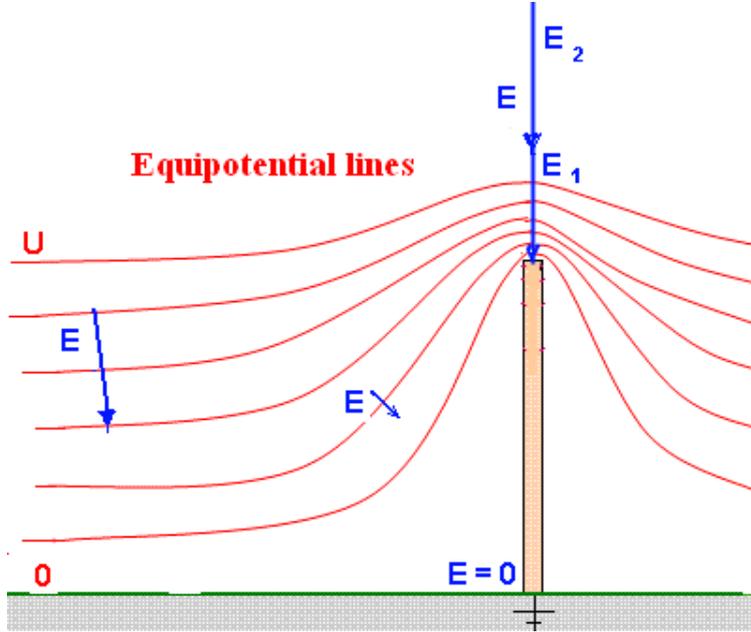
شكل 9-2 :

وفي الجهد المتوسط لدينا نوع ثالث وهو Pin type أى عازل المسمار فقط (شكل 9-3) ، ويستخدم حتى 33 كيلو فولت كما في الصورة . وهو مصنوع من قطعة واحدة من العزل مشكلة على شكل مظلة أو أكثر . والمظلة الواحدة تستعمل في جهد 11 ك ف وبعده يستعمل مظلتين أو ثلاثة في الجهود الأعلى كما في الصورة. وتكون المظلات متباعدة عن بعضها لتحسين العزل أثناء الأمطار. ويصبح استعمال هذا النوع من العوازل مرفوضا في الجهود العالية لصعوبة تغييره.



شكل 9-3 :

**ملحوظة هامة:** قد يتساءل البعض هل هو مقصود فعلاً أن يكون جسم العوازل بهذا الشكل وتلك المظلات؟ بالطبع نعم وهناك هدف هام من وراء هذا التصميم ، وهو جعل السطح الخارجي لمظلات العوازل يقع على الخطوط متساوية الجهد Equi-Potential lines للمجال الكهربائي للموصلات (شكل 9-4) ومن ثم يقل أو يمنع تسرب التيار بين هذه النقاط لأنها ستكون متساوية الجهد. لاحظ أن شكل العازل يشبه شكل خطوط توزيع المجال.



شكل 9-4 :

## 3-9 تصنيف العوازل حسب مادة الصنع :

### 1-3-9 عوازل بورسلين: Porcelain :

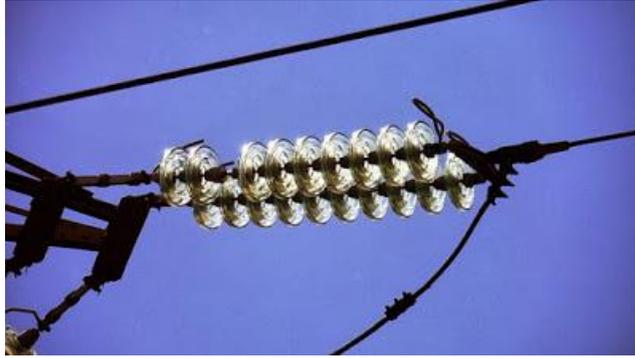
وهو نفسه الذى نسميه الخزف ويتمتع بعازلية كهربية مرتفعة إذا كان متجانسا و نقيا و معالجا بصورة جيدة و خاليا من أي مسامات أو شوائب أو فقاعات مهما صغرت.

وتصنع عوازل البورسلين من سيليكات الألومنيوم ويخطط مع مادة الكاولين البلاستيكية ومادة الكوارتز ، وتصل شدة المجال الكهربى دون الانهيار إلى  $60\text{kV/cm}$  بينما يصل تحمله لقوى الضغط Compressive Strength إلى  $5,000\text{ Kg / cm}^2$  ، ويصل تحمله لقوى الشد Tensile Strength إلى  $500\text{ Kg / cm}^2$ .

ويصنع من البورسلين نوعي العوازل Cap & Pin Type و Long rod Type على السواء.

### 2-3-9 العوازل الزجاجية: Glasses

يتم تصنيع الزجاج (شكل 9-5) من السليكون ويكون عزله عاليا يصل إلى  $140\text{ kV/cm}$ . ويتحمل قوة ضغط و قوة شد ميكانيكى بدرجة أكبر من أو على الأقل تساوى تلك التى يتحملها البورسلين (يصل تحمله لقوى الضغط Compressive Strength إلى  $10,000\text{ Kg / cm}^2$  ، بينما يصل تحمله لقوى الشد Tensile Strength إلى  $500\text{ Kg / cm}^2$ ) كما أنه أرخص وأطول عمرا من البورسلين.



شكل 9-5 :

ويمتاز بأنه شفاف مما يجعل رؤية أى شوائب أو فقاعات غازية أو شروخ ممكنة بالعين المجردة و يعد شفافا بالنسبة للإشعاعات الحرارية ، و لذلك لا يسخن كثيرا بتعرضه لأشعة الشمس ، بالإضافة إلى أن معامل تمدده أقل من الخزف وهذا يجعل الإجهاد الذى يتعرض له نتيجة تغير درجة الحرارة أقل.

و له ميزة عملية تكمن في أنه إذا تعرض لصدمات ميكانيكية كرمي الحجارة عليه فإنه يكسر بالكامل فيسهل اكتشاف موقع العطل في خط النقل (أصبحت نقطة ضعفه هي سر تميزه) . بينما يتشقق عازل البورسلين فقط في الحالات المشابهة و بالتالي يصعب اكتشافه بالنظر إليه من سطح الأرض. ويصنع من الزجاج عوازل Cap & pin فقط.

و يكمن العيب الرئيسي للزجاج في سهولة تكاثف الرطوبة على سطحه ، و هذا يقلل إمكانية استخدامه في المناطق الرطبة .

### 9-3-3 العوازل المطاطية: rubber

تصنع هذه العوازل من البلاستيك المقوى و المطاط و تتميز هذه العوازل بخفة وزنها مقارنة بالعوازل الأخرى. ويمتاز هذا النوع بعازلية فائقة لا تسمح للماء بالتواصل مع التلوث على العازل مما يحد من تأثر هذه العوازل بالتلوث (يحدث نوع من التكور (شكل 9-6) ومن ثم لا يكون هناك مسار متصل فيصعب على التيار أن يتسرب من خلال سطح العازل) .

كما يمتاز بخفة وزنه الكبيرة مقارنة بالعوازل الأخرى (نسبة واحد إلى 30) من وزن عازل البورسلين كما يمتاز بسهولة تركيبه على الأبراج . إلا أن أسعارها لا زالت أعلى من أسعار العوازل الزجاجية أو المصنوعة من البورسلين. ويصنع منه عوازل من نوع Long rod فقط.



شكل 9-6 :

وأختم هذا الجزء بمثال تفصيلي لأحد الخطوط الهوائية بالمنطقة الوسطى بالسعودية جهد 380 kV بين المحطتين رقم [9009 ، 9011] بمدينتي الرياض والمجمعة لإعطاء تخيل صحيح لأعداد الأبراج والعوازل على أحد الخطوط الهوائية :

1- عدد الأبراج للخط الهوائي بين المحطتين 457 برج

2- طول مسار الخط الهوائي بين المحطتين 193 كم

- 3- جميع سلاسل العوازل للدائرتين على طول الخط [ 9011-9009 ] مصنوعة من أقراص الزجاج Toughened Glass Discs صناعة شركة SEDIVER فرنسا.
- 4- أطباق العوازل من النوع منبسط السطح Aero-Dynamic Profile لأن هذا الشكل من العوازل هو الأكثر ملائمة للبيئة الصحراوية الجافة مثل بيئة المنطقة الوسطى.
- 5- جميع الأبعاد لأطباق العوازل الزجاجية صناعة شركة SEDIVER الفرنسية مماثلة للأبعاد الخاصة بأطباق العوازل من البورسلين صناعة شركة NGK اليابانية وكذلك جميع الخواص الميكانيكية والكهربائية متماثلة للنوعين.
- 6- تتكون سلسلة العازل الزجاجية من عدد 26 طبق لجميع الأبراج على طول الخط الهوائي الجديد جهد 380 kV الذي يربط بين المحطات [ الرياض 9009 - 9011 المجمع ].
- 7- بالمثل تتكون سلاسل العوازل على الجزء الثاني من الخط الهوائي جهد 380 kV والذي يربط بين المحطتين [ 9011 المجمع ، 9010 القصيم ] ولكنها من أطباق البورسلين صناعة شركة NGK اليابانية.

## 4-9 الأعطال التي تتعرض لها العوازل :

هناك العديد من هذه الأنواع منها:

1. كسر العوازل: وذلك نتيجة تعرضها للعوامل الجوية مثل (الصواعق) أو نتيجة تعرضها للعبث أو نتيجة صدأ و تشقق القطع المعدنية المكونة لسلسلة العوازل .
2. انهيار العازلية Breakdown: يكون ذلك كنتيجة للعوامل التالية:
  - نتيجة تلوث العوازل سواء من العوامل الجوية أو قربها من المصانع التي تخرج مخلفات تؤثر على سلاسل العوازل ( كالإسمنت ، البوتاس ، . . . الخ )
  - تعرضها للجهود العالية سواء بسبب العوامل الجوية كالصواعق المفاجئة ، أو بسبب Switching الخ.
  - وجود تيارات متسربة. Leakage Current .

### 9-4-1 تأثير التلوث على أداء العازل

يحتوي التلوث الطبيعي على نسبة عالية من الأملاح ، و نتيجة لوجود الشبورة المائية و حتى في وجود الأمطار يذوب الملح على سطح العازل منشأ مسارا موصلا وبالتالي مسببا هبوطاً في قيمة مستوى العزل

حيث ينتج مسار لمرور التيار خلال الأتربة ذو مقاومة أقل من مقاومة العازل ، ويكون هذا المسار بالتوازي مع العازل الأصلي مما يقلل القيمة الكلية للمقاومة الناتجة فتقل مقاومة العزل ، و نتيجة لذلك يحدث Flashover على سلسلة العازل وهذا الأخير قد يتسبب في حدوث شروخ على سطح العازل وخروج الدائرة من الخدمة بواسطة أجهزة الوقاية .

### 9-4-2 كيفية حدوث الومضة الكهربائية Flashover

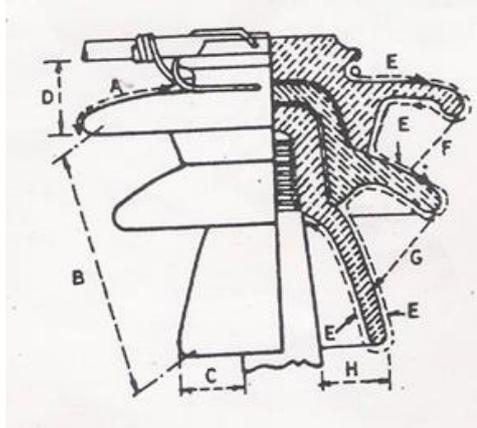
سلسلة العزل تمثل بمكثف ، القطب الموجب له هو الخط الهوائى أما القطب السالب فهو الأرض (يمثلها هنا مسمار العازل المتصل بجسم البرج المؤرض) و الوسط العازل بينهما هو سلسلة العازلات .

ففى الوضع الطبيعى بدون أى تلوث أو أطباق تالفة لن يكون هناك أى مجال لحدوث Flashover باستثناء حالة واحدة فقط و هى حدوث Over-voltages على الخط بأكثر من 150 % من جهد الخط.

أما فى وجود الملوثات على سطح السلسلة فسوف تقل قيمة العزل بين القطبين الموجب و السالب إلى أن يحدث انهيار لقيمة العزل منها يحدث الـ Flashover . وعند حدوث ذلك تصبح سلسلة العازل كما لو كانت مقاومة يسرى التيار من أحد طرفيها إلى الطرف الآخر وهذا بالطبع يعتبر Short circuit وسي تدخل جهاز الحماية لاكتشافه وعزله مما يسبب تعطل الخط.

وهذا الـ Flash over غالبا لا يسبب تلف العازل بل يعود العزل لأداء وظيفته العادية بعد حدوثه مالم تكن كمية الحرارة الناتجة عنه كبيرة جدا بحيث تسبب احتراق سلسلة العازل.

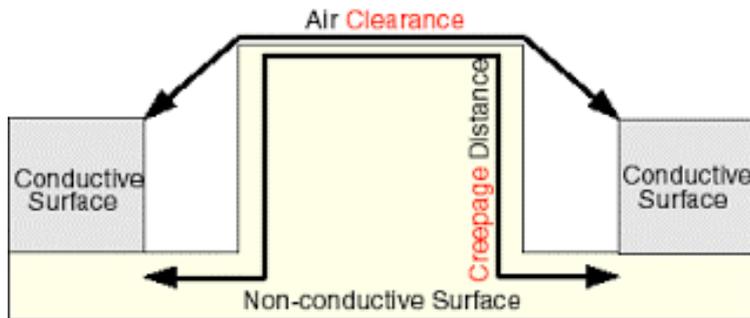
والشكل 7-9 يظهر المسافات التى يحدث عليها Flashover ، فهناك مسارات طويلة وهناك مسافات مختصرة وهى الأخطر مثل  $D+B+C$  أو  $A+B+C$  وهكذا. لاحظ أن لدينا فرق بين المسافة التى يزحف عليها التيار Creepage distance وبين المسافة المختصرة Clearance Distance كما هو واضح فى الجزء التالى.



شكل 9-7 :

### 3-4-9 ما هي الـ Creepage Distance ؟

هو مصطلح مهم في موضوع العزل والتلوث وتعني مسافة الزحف ، ويستخدم هذا المصطلح في تصميم العوازل بناء على نسبة التلوث في المنطقة ، ويمكن تعريفه على أنه أقصر مسار مقاس خلال سطح العازل يصل بين نقطتين موصلتين (المسار كله يجب أن يكون على سطح العازل) و يمكن للتيار أن يسلكه ويسبب انهيار كهربى ، وبالطبع هذه المسافة تختلف عما يعرف بالـ Clearance Distance ويقصد بها أقصر مسافة فعلية بين نقطتين موصلتين لتحقيق مسافة آمنة تمنع حدوث arc بينهما كما في الشكل 9-8 (ليس بالضرورة أن يكون المسار بالكامل على سطح العازل كما في المصطلح السابق) .



شكل 9-8 :

والجدول 9-2 من المواصفات الألمانية لتحديد مسافة الزحف حسب درجة التلوث.

جدول 9-2 :

**F.4**

DIN EN 60664-1 (VDE 0110-1), table F.4 (extract)  
Creepage distance for the avoidance of the failure by tracking

Voltage r.m.s. <sup>1)</sup>  V	Minimum creepage distances								
	Printed wiring material		Pollution degree						
	1  All material groups  mm	2  All material groups except IIIb  mm	1	2			3		
			All material groups  mm	Material group  I  mm	Material group  II  mm	Material group  III  mm	Material group  I  mm	Material group  II  mm	Material group  III <sup>2)</sup>  mm
25	0,025	0,040	0,125	0,500	0,500	0,500	1,250	1,250	1,250
32	0,025	0,040	0,14	0,53	0,53	0,53	1,30	1,30	1,30
40	0,025	0,040	0,16	0,56	0,80	1,10	1,40	1,60	1,80
50	0,025	0,040	0,18	0,60	0,85	1,20	1,50	1,70	1,90
63	0,040	0,063	0,20	0,63	0,90	1,25	1,60	1,80	2,00
80	0,063	0,100	0,22	0,67	0,95	1,30	1,70	1,90	2,10
100	0,100	0,160	0,25	0,71	1,00	1,40	1,80	2,00	2,20
125	0,160	0,250	0,28	0,75	1,05	1,50	1,90	2,10	2,40
160	0,250	0,400	0,32	0,80	1,10	1,60	2,00	2,20	2,50
200	0,400	0,630	0,42	1,00	1,40	2,00	2,50	2,80	3,20
250	0,560	1,000	0,56	1,25	1,80	2,50	3,20	3,60	4,00
320	0,75	1,60	0,75	1,60	2,20	3,20	4,00	4,50	5,00
400	1,0	2,0	1,0	2,0	2,8	4,0	5,0	5,6	6,3
500	1,3	2,5	1,3	2,5	3,6	5,0	6,3	7,1	8,0
630	1,8	3,2	1,8	3,2	4,5	6,3	8,0	9,0	10,0
800	2,4	4,0	2,4	4,0	5,6	8,0	10,0	11,0	12,5
1000	3,2	5,0	3,2	5,0	7,1	10,0	12,5	14,0	16,0

<sup>1)</sup> This voltage is  
- for functional insulation, the working voltage,  
- for basic and supplementary insulation of the circuit energized directly from the supply mains (see 4.3.2.2.1), the voltage rationalized through Table F.3a or Table F.3b, based on the rated voltage of the equipment, or the rated insulation voltage,  
- for basic and supplementary insulation of systems, equipment and internal circuits not energized directly from the mains (see 4.3.2.2.2), the highest r.m.s. voltage which can occur in the system, equipment or internal circuit when supplied at rated voltage and under the most onerous combination of conditions of operation within equipment rating.

<sup>2)</sup> Material group IIIb is no not recommended for application in pollution degree 3 above 630 V.

### 9-4-4 تنظيف العوازل

ويعتبر تراكم الأتربة والملوثات أحد أهم العوامل التي تؤدي إلى انهيار العازل وتسرب التيار من فوقه ، ولذلك فمن الضروري عمل نظافة دورية لهذه العوازل. وتختلف المدة حسب حجم التلوث الموجود في البيئة. ومن أشهر الطرق لتنظيف العوازل غسلها بالماء - بعد فصل الكهرباء عنها - ثم تطورت الطرق فصار يستخدم الطائرات في تنظيف العوازل دون فصل التيار باستخدام الماء المقطر (غير موصل للكهرباء) .

ومن الطرق الحديثة استخدام أنواع من العوازل لا يتراكم عليها التراب ، ففي جزيرة كريت باليونان كان ملح البحر المتبخر يتراكم على العوازل فاستخدموا مادة تشبه الشمع وتم دهن العوازل بها لتساعد على بلورة المياه التي تتكثف عليها و بهذا يصبح المسار للتيار المتسرب متقطعا ولا يسمح بمرور التيار. و يتم الدهان بهذه المادة كل ثلاث سنوات و قد وجد أن تكاليف استخدامها أقل بكثير من تكاليف الصيانة العادية والتي يتم فيها غسل العوازل سواء بالسيارات والرافع أو بالطائرات كما في الشكل 9-9.



شكل 9-9 :

## 9-5 أسباب ظهور الجهود الزائدة على شبكة النقل

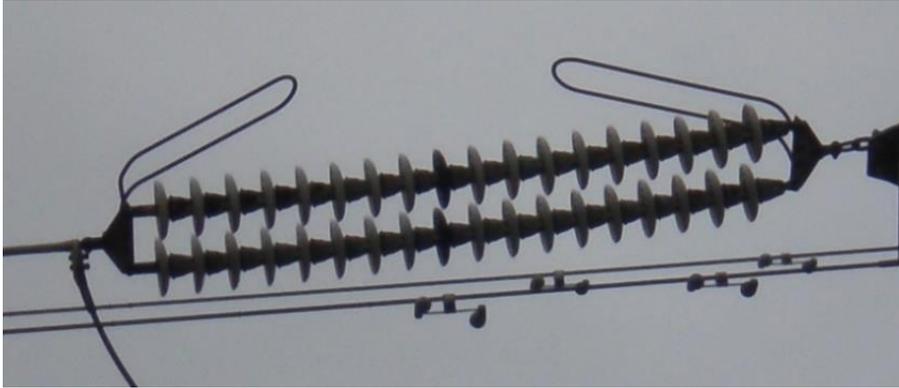
المشكلة الأساسية التي تدمر عوازل الخطوط الهوائية هي تعرضها لجهود عالية على سطحها Over Voltage ، وهذه الجهود العالية كافية لكسر العازل (ليس بالضرورة أن ينكسر طبق العزل حقيقيا ، بل يكفي أن ينهار العازل على سطحه حتى نقول أن طبق العزل قد انكسر) . وهناك أسباب عديدة لحدوث ارتفاع في جهد الخط أو ظاهرة الـ Over Voltage على الخطوط الهوائية . ومن هذه الأسباب:

- 1- اصطدام صاعقة برق بالخط
- 2- حدوث فصل وتوصيل للقواطع CB Switching
- 3- توصيل المكثفات
- 4- حدوث Open Circuit وبالتالي ظاهرة Ferro Resonance
- 5- حدوث ظاهرة Ferranti Effect
- 6- حدوث ظاهرة القوس الأرضى Arcing Ground
- 7- ظاهرة ارتفاع الجهد نتيجة حدوث قصر Short Circuit

والظواهر الأربعة الأولى ستجد شرحا تفصيليا لهم فى الباب السادس بالكتاب (الفصل التاسع والعشرون) ، أما الظواهر الثلاثة الأخيرة فهى مشروحة فى هذا الباب لكن فى الفصل العاشر ( TL Parameters ) وذلك لارتباطها كليا بمكثفات خطوط النقل .

### 9-5-1 تأثير الجهود الزائدة على سلسلة العوازل

قد يضرب البرق مثلا أحد موصلات الخطوط الهوائية ومن ثم تسير الـ Surge على الخط وتحاول الوصول للأرض من خلال سلسلة العزل ، ولذا تزود السلاسل بما يسمى Rod Gap كما فى الشكل 9-10 ، فإذا ارتفع الجهد فجأة بسبب صاعقة برقية أو غيره كان المرور خلال هذه الـ Gap أسهل من المرور خلال سلسلة العزل ومن ثم تكون الـ Gap قد حمت السلسلة. وبالطبع سيتوقف طول مسافة الـ Gap على طول السلسلة وجهد الخط.



شكل 9-10 :

## 6-9 ظاهرة الكورونا

تعتبر الكورونا من أبرز المشاكل التي تواجه العوازل عامة . وهذه الظاهرة عبارة عن حدوث تفريغ جزئي Partial Discharge لوسط عازل أو مرور تيار متسرب من الموصل الأصلي إلى الهواء الجوى المحيط به بصورة عشوائية نتيجة تأين الهواء المحيط ، وتعتبر هي الظاهرة مؤشرا لحدوث انهيار محتمل للعزل (كلمة العزل تتضمن أيضا الهواء كنوع من العوازل) .

وتحدث هذه الظاهرة عندما يتجاوز شدة المجال الكهربى electric field عند سطح الموصل الحد المعروف بـ disruptive potential gradient وهو الحد الذى يساوى فى حالة الهواء الجوى 30 kV/cm ( مع ملاحظة أن هذه القيمة تتغير مع الضغط الجوى ولذا فمشكلة الكورونا أكثر وضوحا فى الأماكن المرتفعة عن سطح الأرض) ويترتب على ذلك أن يصبح الهواء المحيط بالموصل ليس عازلا كاملا بل تصبح له درجة من درجات التوصيل a conductive plasma فقط فى منطقة محيطة بالموصل. لكن قد تزداد هذه الطبقة الموصلة مع الوقت حتى ينكسر العزل بين الموصلات ويحدث انهيار كامل من خلال شرارة كهربية.

والمجال الكهربى عموما يزداد عند الأسطح الحادة لأن التغير فى قيمة الجهد يكون كبيرا وليس تدريجيا كما فى الأسطح الملساء ومن ثم ترتفع قيمة kV/cm بقيم كبيرة تتسبب فى بروز هذه الظاهرة بوضوح أكبر .

ومن ثم فدائما هناك مسافة كافية بين موصلات خطوط النقل لتجنب الوصول لهذه القيمة. ولكن قد تجد ظروف معينة تجعل المجال الكهربى المسلط على الهواء يتزايد ، وعندها يبدأ الوسط العازل (هواء / زيت / أو غيره) فى التأين .

وتحدث ظاهرة (التفريغ الجزئى) Partial Discharge أو الكورونا فى أى وسط عازل يقع بالقرب من جهود كهربية موجودة فى الخدمة ، سواء كان ذلك خطوط النقل أو فى أى عازل آخر مثل الزيت مثلا داخل الـ CB ، ففى حالة خطوط النقل يتأين الهواء المحيط حول موصلات الجهد العالى وتزداد الظاهرة وضوحا كلما كان سطح الموصل غير منتظم وأيضا كلما زادت الرطوبة والتلوث فى الوسط العازل حيث تزداد نسبة ذرات الهواء المتأين حول الموصل .

ويمكن ملاحظة ذلك على خطوط النقل الكهربى كوميض لامع مائل للزرقة (شكل 9-11 ، وتكون هذه الظاهرة مصحوبة بصوت أزيز وإنتاج غاز الأوزون وهذه الظاهرة تسمى Partial Discharge أى يحدث تفريغ جزئى داخل العازل وهو يعتبر مقدمة للانهييار فى العزل Breakdown.



شكل 9-11 :

وبالتبع ينتج عن وجود هذه الظاهرة حدوث مفايد للقدرة الكهربائية تسمى Corona Losses. تتمثل فى هالة من الضوء يميل للون البنفسجى أو الأزرق ، والصوت المصاحب للظاهرة إضافة إلى حدوث تداخلات مع موجات الراديو. Radio Interference.

وهذه معادلة تقريبية للجهد الذى تبدأ عنده الكورونا بالظهور . وواضح أنها تعتمد على درجة خشونة السطح وعلى قطر الموصل وبعده عن بقية الموصلات الحاملة للجهد.

$$V_0 = 21.1 * m \frac{\delta * r(1 + 0.3)}{\sqrt{r}} \log_n \left( \frac{D}{r} \right)$$

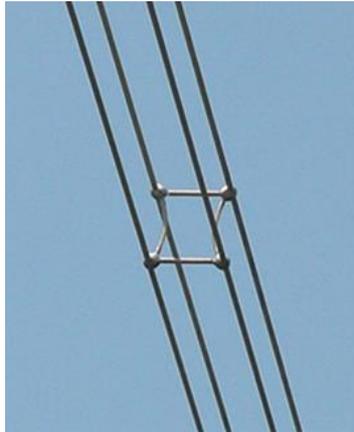
- $V_0$  = corona starting voltage, KV(rms)
- $r$  = radius of conductor in cm
- $D$  = GMD equivalent spacing b/n conductors in cm
- $m$  = roughness factor
  - = 1.0 for clean smooth conductor
  - = 0.85 for stranded conductor

9-6-1 أسباب ظاهرة الكورونا :

- ارتفاع الجهد الكهربى : فمن أهم أسبابها ارتفاع الجهد على الخطوط وبالتالي يزداد شدة المجال وتزداد احتمالية تأين الذرات حول الموصل.
- انخفاض شدة العزل : ومن أسبابها أيضا انخفاض شدة العزل نتيجة تلوث أو رطوبة مثلا . تذكر أن المجال الكهربى يتأثر بقيمة الجهد ولا علاقة له بقيمة التيار ومن ثم فالظاهرة لا تتأثر بقيمة التيار فى الخطوط.
- تقارب الموصلات : ومن أسبابها أيضا تقارب المسافات بين الأجزاء الحاملة للجهد.
- عدم انتظام المجال الكهربى : مع التأكيد على أن أكثر الأماكن تأثرا بهذه الظاهرة هي الأماكن غير المنتظمة السطح حيث يصبح توزيع المجال فيها غير منتظم فيزداد فى نقاط (يحدث فيها التأين) ويقل فى نقاط أخرى.

### 9-6-2 الحلول الممكنة لظاهرة الكورونا :

- 1- الحل الأمثل هو زيادة مساحة مقطع الموصل وبالتالي يقل قيمة المجال على سطح الموصل (راجع المعادلة السابقة لحساب الجهد الذى يبدأ عنده حدوث الكورونا ، و ستجد أن قيمة نصف القطر فى مقام المعادلة ، بمعنى كلما زاد نصف القطر كلما كبر الجهد الذى يحدث عنده بداية التفريغ) .
- وأحد طرق زيادة المقطع هو استخدام الـ **bundled conductors** وذلك بجعل موصل الـ Phase الواحدة عبارة عن موصلين أو أكثر ثم عمل short circuit على هذه الموصلات (شكل 9-12) ، وبالتالي يزيد المقطع المكافئ لكل موصل ومن ثم يقل المجال المحيط به فلا تتأين ذرات الهواء .



شكل 9-12 :

- 2- زيادة المسافة الفاصلة بين الفازات لتقليل شدة المجال أيضا ولكن ذلك سيؤدى إلى زيادة حجم البرج وارتفاع التكلفة.
- 3- ولأن هذه الظاهرة ليست فقط معتمدة على المجال الكهربى ولكنها تتأثر بشدة بشكل الأسطح الحاملة للتيار ، وبصفة عامة يجب تجنب الأسطح الحادة فى خطوط النقل وغيره لتجنب الارتفاع فى الـ Voltage Gradient ، ولذا يستعمل مثلا وسائل تعليق للموصل لها حواف مستديرة الشكل بدلا من الحواف الحادة rounded rather than sharp edges ، وكذلك الحال أيضا بالنسبة للـ Spacers وخامد الاهتزازات (لاحظ الصور السابقة لهذه العناصر).
- 4- وبالتأكيد يجب تجنب الارتفاع فى الجهد لأنه أحد أهم الأسباب الرئيسية.
- 5- استخدام ما يعرف بـ **Corona Rings** ، فمما سبق يتبين أن أحد أهم أسباب هذه الظاهرة هو عدم انتظام السطح وهذا ما يحدث عند تعليق الموصل بسلسلة العزل فتكون نقطة الاتصال معرضة أكثر من غيرها لحدوث الكورونا بسبب التغير الحاد فى السطح ، ولعلاج ذلك توضع الحلقات كما فى الصورة متصلة بالموصل المعدنى الحامل للجهد فإذا ظهرت الكورونا فإنها تظهر على الحلقات وليس على أطباق العازل ومن ثم فقد تم حماية العزل.

وتستخدم هذه الحلقات (شكل 9-13) أيضا مع مانعات الصواعق Lightning Arrestor وكذلك تستخدم فى أطراف الـ CB والمحولات لنفس الغرض وهو حماية أطراف العزل من التغير المفاجئ فى الجهد أو التغير المفاجئ فى الشكل والذى ينتج عنه قيمة مرتفعة للـ Voltage gradient , kV/cm والتي تتسبب فى ظاهرة الكورونا.



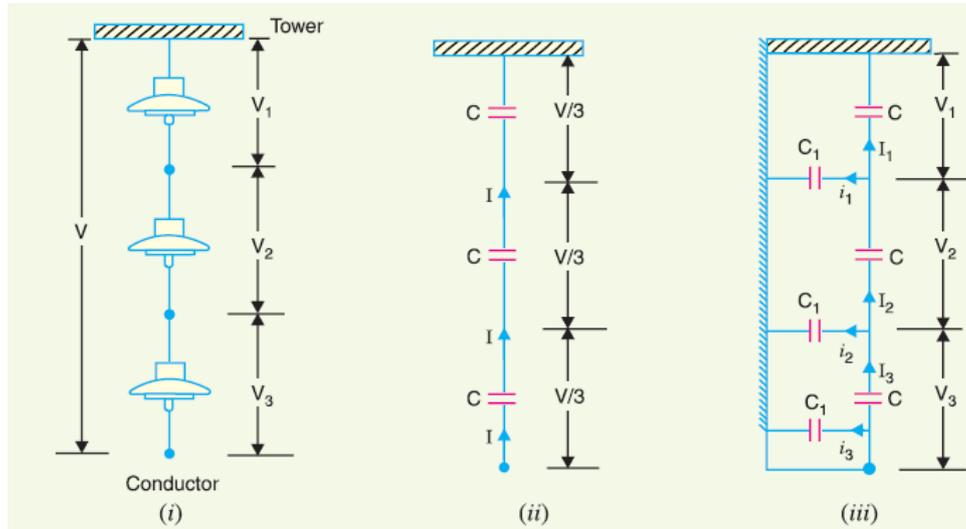
شكل 9-13 :

وهذه الحلقات تتصل مباشرة بالموصل كما ذكرنا عند نقطة اتصاله بسلسلة العزل لأنها أخطر منطقة معرضة للكورونا ، ويمكن القول أن هذه الحلقات تغير شكل المجال الكهربى عند نقاط الاتصال بحيث لا يصبح قادرا على تأيين ذرات الهواء المحيطة بالموصل أو العزل عند نقاط الربط. فالـ Gradient,  $kV/cm$  أصبح ضعيفا بسبب كبر القيمة الموجودة فى المقام لأن المجال الكهربى أصبح محيطا بحلقة قطرها واسع وليس بنقطة اتصال صغيرة ومن ثم صغرت قيمته.

## 7-9 توزيع جهد التشغيل على سلسلة العازل :

في حالة استخدام أكثر من قرص Disc في السلسلة String ، كما هو الحال فى شبكات الجهد المرتفع فعندها نظريا سيتم توزيع فرق الجهد على العوازل الموجودة بالسلسلة بالتساوي بمعنى لو كان جهد الشبكة يساوي 500 كيلو فولت فهذا يعني أن الجهد على سلسلة العزل المكونة من 20 قرص مثلا سوف يساوي  $25 kV/disc$  و هذا طبقا لقانون توزيع الجهد كما في الجزئين يسار الشكل 9-14. حيث يمثل كل قرص وكأنه مكثف وبالتالي يكون لدينا مجموعة من الـ Series Capacitors وهو تمثيل حقيقى فالمكثف ليس سوى لوحين معدنيين بينهما عازل وعليهما فرق للجهد ، وهو الحاصل هنا بين النقاط المعدنية .

لكن هذا غير متحقق في الواقع و السبب هو وجود تلك الوصلات الحديدية التي تربط كل قرص Disc بما قبله و بما بعده في السلسلة ، فهذه الوصلات الحديدية ينشأ بينها و بين حديد البرج مكثفات أخرى تسمى Shunt Capacitors,  $C_1$  كما فى الشكل الأيمن 9-15.



شكل 9-14 :

فبتغير توزيع التيار ليصبح كما في أقصى يمين الشكل السابق. و من ثم يصبح التيار المتسرب Leakage Currents خلال السلسلة في حالة افتراض وجود النوعية الثانية من المكثفات ليس متساويا على كل الأقراص كما في الحالة المثالية الأولى ، بل يصبح التيار الأكبر هو التيار المار في الـ Disc الأقرب إلى الموصل ثم يقل التيار بعد ذلك و من ثم فلم يعد التيار متساويا على كل مسافة و هذا يعني أن بعض أقراص السلسلة ستتعرض لإجهاد كهربى أكثر من غيرها و ربما يحدث لها انهيار أو على الأقل يحدث خلالها Flashover بسهولة .

### 9-7-1 رفع كفاءة توزيع الجهد

ونظرا لأن الجهود غير متساوية على عوازل السلسلة الواحدة فقد استخدم مصطلح كفاءة السلسلة أو ما يعرف بـ String Efficiency لتحديد حجم الفرق بين أعلى جهد يظهر على القرص الأول من أجزاء السلسلة من ناحية الموصل و هو القرص المعرض لأعلى جهد ، و بين الجهد الكلي الواقع على الـ String مع ملاحظة أن الجهد يتناقص على الأقراص التالية.

حيث أن: كفاءة السلسلة التى بها عدد n من الأطباق يساوى

$$\text{String efficiency} = \frac{\text{Voltage Across the string}}{n \times \text{Voltage across disk nearest to Conductor}}$$

واضح أن كفاءة السلسلة تقل بزيادة عدد الأطباق نتيجة للتوزيع غير المتماثل للجهد ، فعلى سبيل المثال لو كان الـ Flashover Voltage على عزل ما يساوى 78 ك ف وكان لدينا ثلاث سلاسل مختلفة بها 5 و 10 و 15 طبق بالسلسلة على التوالي ، فعندئذ سيكون جهد الـ Flashover Voltage على السلاسل الثلاثة يساوى 685 و 490 و 280 ك ف على الترتيب (واضح أنه كلما زاد الطول قلت الكفاءة) ، فلو كانت الجهود متساوية لأمكن فى هذه الحالة استخدام 4 و 7 و 9 عوازل .

وبالتالى إذا استطعنا أن نجعل الجهد متساويا على كل أطباق السلسلة فعندئذ يمكن استخدام سلسلة أقصر وأقل تكلفة.

والجدول التالى يعطى بعض النتائج العملية لاختبارات تمت على سلسلة عزل تتزايد عدد الأطباق فيها تدريجيا حتى تصل إلى عشرة أطباق وفى كل مرة نحسب الكفاءة فى حالتين : العازل جاف والعازل رطب والنتائج كما يلى:

[S.O.V. = Spark-over Voltage]

No. in series.	S.O.V., Dry (kV.).	String Effic., Dry. (Per cent.)	S.O.V., Wet (kV.).	String Effic., Wet. (Per cent.)
1	75	100	48	100
2	140	93.4	90	92
3	195	86.7	128	89
4	245	81.8	166	86.5
5	295	78.8	205	85.5
6	345	76.7	245	85.1
7	395	75.4	280	83.4
8	445	74.2	320	83.4
9	490	72.8	355	82.2
10	535	71.4	385	80.3

**Example 8.1.** In a 33 kV overhead line, there are three units in the string of insulators. If the capacitance between each insulator pin and earth is 11% of self-capacitance of each insulator, find (i) the distribution of voltage over 3 insulators and (ii) string efficiency.

**Solution.** Fig. 8.14. shows the equivalent circuit of string insulators. Let  $V_1$ ,  $V_2$  and  $V_3$  be the voltage across top, middle and bottom unit respectively. If  $C$  is the self-capacitance of each unit, then  $KC$  will be the shunt capacitance.

$$K = \frac{\text{Shunt Capacitance}}{\text{Self - capacitance}} = 0.11$$

$$\text{Voltage across string, } V = 33/\sqrt{3} = 19.05 \text{ kV}$$

**At Junction A**

$$I_2 = I_1 + i_1$$

$$\text{or } V_2 \omega C = V_1 \omega C + V_1 K \omega C$$

$$\text{or } V_2 = V_1 (1 + K) = V_1 (1 + 0.11)$$

$$\text{or } V_2 = 1.11 V_1 \quad \dots(i)$$

**At Junction B**

$$I_3 = I_2 + i_2$$

$$\text{or } V_3 \omega C = V_2 \omega C + (V_1 + V_2) K \omega C$$

$$\text{or } V_3 = V_2 + (V_1 + V_2) K$$

$$= 1.11 V_1 + (V_1 + 1.11 V_1) 0.11$$

$$\therefore V_3 = 1.342 V_1$$

(i) Voltage across the whole string is

$$V = V_1 + V_2 + V_3 = V_1 + 1.11 V_1 + 1.342 V_1 = 3.452 V_1$$

$$\text{or } 19.05 = 3.452 V_1$$

$$\therefore \text{Voltage across top unit, } V_1 = 19.05/3.452 = 5.52 \text{ kV}$$

$$\text{Voltage across middle unit, } V_2 = 1.11 V_1 = 1.11 \times 5.52 = 6.13 \text{ kV}$$

$$\text{Voltage across bottom unit, } V_3 = 1.342 V_1 = 1.342 \times 5.52 = 7.4 \text{ kV}$$

$$(ii) \text{ String efficiency} = \frac{\text{Voltage across string}}{\text{No. of insulators} \times V_3} \times 100 = \frac{19.05}{3 \times 7.4} \times 100 = 85.8\%$$

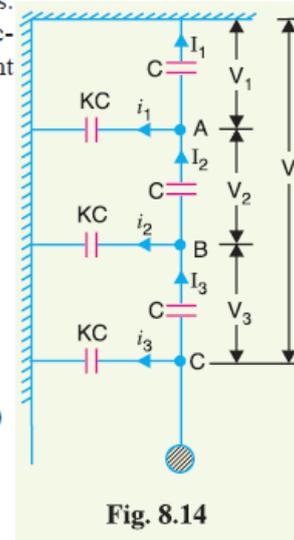


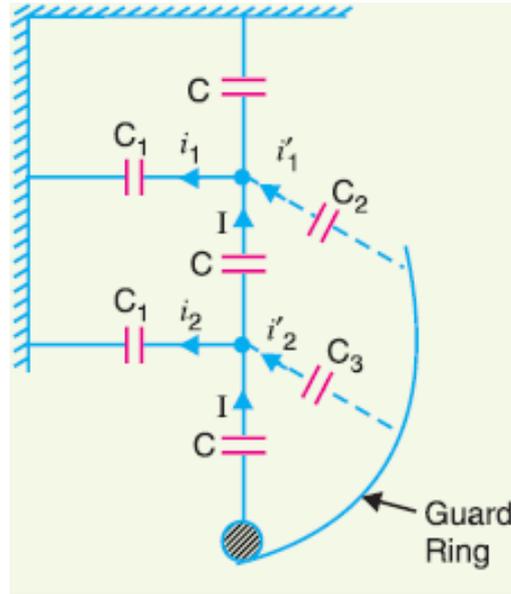
Fig. 8.14

## 9-7-2 علاج انخفاض كفاءة سلسلة العزل

و لعلاج مشكلة المكثفات الناشئة التي تسببت في عدم تساوى الجهد يمكن نظريا إلغاء هذه المكثفات بزيادة طول ذراع البرج ومن ثم تصبح قيمة هذه الـ Shunt Capacitors مهمة لكن بالطبع هذا حل مكلف بسبب ارتفاع تكلفة تصنيع البرج.

والحل الأمثل الواقعى المستخدم هو أن تضاف الحلقات المعدنية التي نراها في الشكل 9-15 والمعروفة باسم Guard Rings و هذه الحلقات تنشئ مكثفات معاكسة من الجهة الأخرى كما في الشكل 9-15 ،

و من ثم فإنها تلغي بدرجة كبيرة تأثير Shunt Capacitors السابقة و تقرب الصورة مرة أخرى إلى الحالة المثالية .



شكل 9-15 :

### 3-7-9 أسلوب الـ Insulation Coordination

وهناك حل ثالث لهذه المشكلة يجعل الـ Capacitance لأطباق العوازل غير متساوية بل متغيرة بنسب التيارات المارة بها وهذا يعنى أن الطبقة المجاور للموصل ستكون له Self-Capacitance أكبر من غيره فى السلسلة ومن ثم تتساوى الجهود على أطباق العوازل لأن الجهد سيتناسب عكسيا مع الـ Self-Capacitance للطبق ، وبالتالي يقل الجهد على الطبقة المجاور للخط ويزيد على الطبقة فى نهاية السلسلة من ناحية البرج ، وهذا يعنى أننا عالجتنا الخلل السابق فى توزيع الجهد . وتعرف هذه الطريقة بتنسيق العوازل Insulation Coordination .

## 10

## تمثيل خطوط النقل

## TL Parameters

البداية في هذا الموضوع تكون بحساب قيم العناصر الأساسية الثلاثة ( R , L and C ) الممثلة للخط ( TL Parameters ) . و أهمية ذلك تكمن في أن معرفة هذه القيم هي الأساس في تمثيل حقيقي للخطوط . وتمثيل الخطوط هو الأساس في جميع الحسابات والتحليلات في منظومة القوى مثل حسابات انتظام الجهد Voltage Regulation ، وحساب كفاءة النقل Transmission Efficiency ، وحسابات الـ Short circuit analysis ، وخلافه . ومن هنا كان لابد من حساب هذه الـ Parameters .

وقد يبدو لأول وهلة أن الخط الكهربى هو فقط عبارة عن موصل له مقاومة قيمتها R ، وهذا جزء من الحقيقة ، أما الحقيقة الكاملة فإن الخط يشتمل أيضا على قيمة حثية L Inductance ، تمثل مع قيمة المقاومة ما يعرف بالـ Impedance, Z ، ويشتمل الخط أيضا على قيمة سعوية C Capacitance ، تمثل مع الـ Conductance ما يسمى بالـ Admittance, Y . وفى الأجزاء التالية سندرس كيفية حساب قيمة كل عنصر من عناصر التمثيل الثلاثة : R, L and C ، وتأثير كل واحد منهم على أداء منظومة النقل .

## 1-10 مقاومة الخط

تمثل المقاومة عنصرا مهما فقط في الخطوط القصيرة حيث تكون غالبا مرتفعة القيمة ومن ثم تتسبب في هدر كبير للقدرة (I<sup>2</sup>R loss) على صورة حرارة ، ومع زيادة التحميل ترتفع قيمة التيار ومن ثم القدرة المفقودة على صورة حرارة .

وقد ترتفع درجة حرارة الموصل فيتمدد ويزداد طوله ويحدث Sag كبير ، فإذا انخفض التيار رجع الموصل لما كان عليه ، لكن إذا ارتفعت قيمة التيار بحيث تتسبب في حدوث تمدد كبير وفى نفس الوقت لا ينكمش

بعد انخفاض التيار فنقول أن هذا لتيار تجاوز ما يسمى بالـ thermal limit of conductor. وعموماً يجب أن يكون تحميل الخط دائماً أقل من هذه القيمة.

### 10-1-1 العوامل المؤثرة على قيمة مقاومة الموصل

معلوم أن مقاومة أى سلك تساوى

$$R = \frac{\rho \times L}{A}$$

$\rho$  is the resistivity of the conductor.

إلا أن مقاومة السلك تتأثر أيضاً بالعوامل التالية:

#### 1- الجدل Stranding

ومعظم الخطوط كما ذكرنا فى الفصل الخاص بتركيب الخطوط الهوائية تستخدم الموصلات من النوع المعروف بـ ACSR وفى هذا النوع يكون سلك الصلب فى الوسط ومحاط بشعيرات من الألومنيوم على صورة طبقات مجدولة ، وهذا الجدل يتسبب فى أن يكون الطول الفعلى للموصل أكبر بنسبة 2% تقريبا عن الطول الاسمى للخط وبالطبع ستزيد المقاومة.

#### 2- ظاهرة الـ Skin Effect

حيث يمر يميل التيار المتردد للمرور فى الحدود الخارجية لمقطع الموصل أكثر من مروره فى منتصف المقطع لاسيما مع ارتفاع التردد ، ولهذا تكون  $R_{AC}$  أكبر من  $R_{DC}$  وهذا سبب آخر لزيادة قيمة المقاومة عن القيمة النظرية من المعادلة السابقة

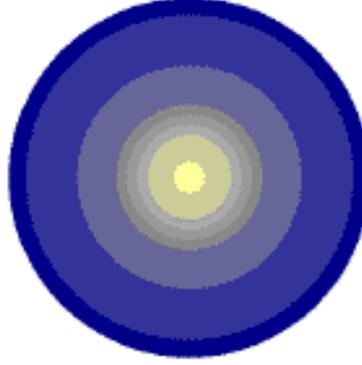
#### 3- درجة الحرارة

وأخيراً فإن المقاومة تتناسب طردياً وخطياً مع ارتفاع درجة الحرارة ولذا يجب مراجعة المصنع لمعرفة معاملات التمدد وتصحيح قيم المقاومة.

### 10-1-2 ظاهرة التأثير السطحى Skin Effect

لو نظرنا للموصل على أنه مكون من طبقات (شكل 10-1) وكل طبقة تحمل قدراً من التيار ، وكل تيار يرتبط بقدر معين من الفيض ، فهذا يعنى أن الطبقة الأولى الداخلية ترتبط بقدر من الفيض يبدأ من الداخل ويقطع كل الطبقات التالية ، ثم يأتى تيار الطبقة الثانية فيقطع كل الطبقات من الثانية حتى نهاية الموصل لكنه لا يقطع الطبقة الأولى ، وهذا يعنى أننا كلما اتجهنا لداخل الموصل زاد الفيض المرتبط

بالموصل أو ما يعرف بالـ Flux Linkage وكما هو موضح فى الجزء التالى مباشرة فإن قيمة الـ Inductance تتناسب طرديا مع قيمة الـ Flux Linkage وهذا يعنى أن المعاوقة الحثية Inductive Reactance بالطبقات الداخلية أكبر بكثير من المعاوقة الموجودة فى الطبقات الخارجية ، وهذا يعنى بالضرورة أن التيار فى الطبقات الداخلية سيكون أقل من التيار بالطبقات الخارجية.



شكل 1-10:

### 3-1-10 العوامل المؤثرة على الـ Skin Effect

- 1- قيمة التردد: معلوم أن الـ Inductive reactance تتأثر طرديا بقيمة التردد فهذا يعنى أنه كلما زاد التردد زادت  $X_L$  وبالتالي قل التيار وهذا يؤكد على تناقص قيمة التيار فى وسط الموصل مع تزايد قيمة التردد
- 2- قطر الموصل: مع تزايد قطر الموصل يزداد الفرق بين قيمة الفيض المرتبط بقلب الموصل (يزداد قوة) وبين الفيض المرتبط بأطراف الموصل الخارجية (يزداد ضعف) وهذا يعنى أن  $X_L$  تزداد قيمتها مع تزايد قيمة المقطع .

### 4-1-10 لماذا نلجأ لاستخدام الـ Bundle Conductors

المناقشة السابقة تفسر لماذا نلجأ إلى عملية الـ Bundle Conductors ، أى استخدام حزمة موصلات صغيرة (من هنا جاء مسمى الموصلات الحزمية) بدلا من موصل واحد كبير ، لأن الموصل الكبير فى مقطعه تظهر فيه ظاهرة الـ Skin Effect بدرجة أكبر ومن ثم يقل الاستفادة من المعدن الداخلى للموصل بل يعتبر وزنا إضافيا بلا داع ولا فائدة ، ومن هنا نلجأ للـ Bundle .

## 2-10 تأثير قيمة الـ Inductance للخط

قد يقول قائل من أين تأتي الـ Inductance ونحن لدينا فقط خط موصل وليس فيه ملفات؟ وهذا خطأ شائع وهو اعتبار أن الـ Inductance, L لا تظهر إلا في وجود ملفات Coils ، والسبب في هذا الخطأ الشائع هو عدم معرفة معنى الـ Inductance .

### 1-2-10 ما هي الـ Inductance , L ؟

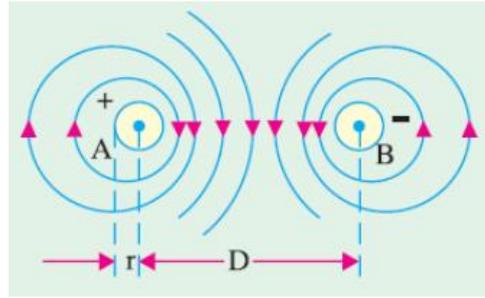
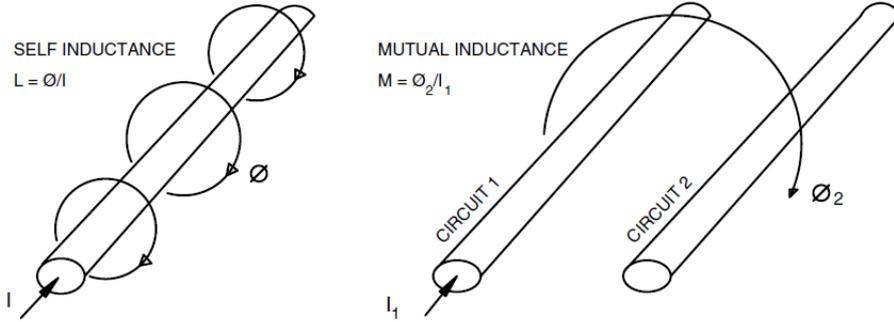
في الخطوط الهوائية الطويلة والمتوسطة سنكتشف أن قيمة الـ Inductance, L والقيمة الأومية لها وهي Inductive Reactance,  $X_L$  والتي تساوي  $X_L = \omega L$  ستكون هي المعاوقة الأساسية للخط وليس المقاومة الأومية R . فمرور التيار المتردد AC Current في أى خط يكون دائماً مصحوباً بظهور هذه المعاوقة  $X_L$  .

والسبب في ذلك أن التيار المتردد يكون مصحوباً بمجال مغناطيسي متردد أيضاً وهذا المجال يقطع الموصل نفسه وينشأ فيه emf معاكسة للجهد الأصلي الموجود على الخط فيتسبب ذلك في انخفاض قيمة التيار المار بالخط . إذن هناك مقاومة جديدة ظهرت نتيجة مرور التيار المتردد ، ونعبر عن هذه الظاهرة بتمثيل هذه المعاوقة الجديدة  $X_L$  ، التي لا تظهر إلا في وجود التيار المتردد (عكس المقاومة R والتي تظهر سواء كان التيار متردد أو ثابت) بل حتى بدون تيار فهي موجودة أما الـ  $X_L$  فهي فقط موجودة مادام التيار المتردد موجوداً. لاحظ أن هذه المعاوقة Inductive Reactance تظهر سواء كان لدينا خط مستقيم أو لدينا ملف ، لكن بالطبع إذا كان السلك على شكل ملف فإن الـ Inductance له ستزيد.

وتعرف الـ Self-Inductance بأنها نسبة الفيض المرتبط بالخط مقارنة بالتيار المار في نفس الخط. بمعنى أن  $L = \Phi/I_1$  . وهناك نوع آخر من الـ Inductance تتأثر بالتيار المار في سلك مجاور فيظهر في السلك  $M = \Phi/I_2$  Mutual Inductance ، كما في الشكل 2-10 .

ولذا تتوقف قيمة الـ Inductance, L على وضعية الخطوط (الموصلات) بالنسبة للمجال المغناطيسي وهل الخط منفرد أم بجوار خطوط أخرى وهل الخطوط الأخرى متوازية معه وفي نفس الـ Phase أم من Phases أخرى ولهذا ستتوقف قيمة الـ Inductance L على شكل البرج ونوعية الدوائر التي يحملها كما سنرى في الملحق الموجود بنهاية هذا الباب.

وهذه القيمة تمثل القيمة الكلية للـ  $L$  الناتجة من الفيض المرتبط بالموصل داخليا Self-Inductance وخارجيا Mutual Inductance ، وتقاس بوحدة الـ H ، وغالبا تكون لكل كم طولى من الخط.



شكل 10-2:

والمعادلة التالية تعطى علاقة الـ Inductance بأبعاد الموصلات

$$L = \frac{1}{l} \mu_0 K N^2 A$$

$$L = 2 \times 10^4 \left( \frac{\mu}{\pi} \log_e D/r + \frac{\mu_l}{4\pi} \right) \text{henry}$$

لاحظ أن المعادلة الأولى تعطى قيمة الـ Inductance بدلالة عدد اللغات بينما الثانية تعطيها بدلالة المسافات بين الخطوط الهوائية وأقطارها.

وقد يسأل سائل: هل يعنى ذلك أن خط النقل ليس له Inductance لأن عدد اللغات فيه = 1؟ والإجابة : رغم أن عدد اللغات بالفعل صغير ويساوى 1 ، لكن مساحة مقطع هذه اللفة الواحدة ضخم جدا ، ولذا قيمة الـ Inductance معتبرة. وبسبب هذه المساحة الضخمة تكون الـ Inductance فى الخطوط الهوائية

أكبر بست مرات منها فى الكابلات ، على عكس الـ Capacitance التى ستكون فى الكابلات أكبر بعشر مرات.

ملحوظة:

عند مرور التيار المتردد فى الملف فإن الملف يخزن طاقة بداخله فى نصف الدورة الموجب ، ويردها للمصدر مرة أخرى فى نصف الدورة السالب ، وتتوقف قيمة الطاقة المخزنة على شدة التيار المار وعلى قيمة الـ Inductance حسب المعادلة التالية :

$$W = \frac{1}{2} LI^2$$

حيث الطاقة المخزنة هى  $W$  وتقاس بالجول بينما الـ Inductance تقاس بالـ H ، Henery

### 10-2-2 سعة الخطوط Capacitance وتأثيراتها

مرور التيار يولد مجالاً مغناطيسياً يتسبب فى ظهور الـ Inductance كما سبق ، وعلى الجانب الآخر فوجود فرق جهد بين موصلين ينشأ بينهما مجالاً كهربياً ، أى أن الـ Inductance ترتبط بالمجال المغناطيسى (الذى أنشاه التيار) أما الـ Capacitance فترتبط بالمجال الكهربى (الذى أنشاه فرق الجهد) . كما أن فرق الجهد بين الموصلين يتسبب فى تخزين شحنات كهربية فى الوسط العازل بينهما (فكرة المكثف) ، وهذه الكمية من الشحنات تساوى  $Q$  حيث

$$Q = CV$$

بمعنى أن كمية الشحنات المخزنة  $Q$  تتناسب طردياً مع شدة الجهد  $V$  ، وهناك ثابت للتناسب هو ما اصطلح على تسميه بالـ Capacitance,  $C$  ، حيث تتوقف قيمتها على الأبعاد الهندسية بين الموصلات الحاملة للجهد وسماحية الوسط العازل لتخزين الشحنات ، وهذه السماحية Permeability يرمز لها بالرمز  $\epsilon_0$  فى حالة الهواء .

و الهواء هو أقل الأوساط العازلة سماحية للتخزين ، بينما المواد العازلة الأخرى لها سماحية تخزين تزيد عن سماحية الهواء بنسبة تساوى  $\epsilon_r$  قد تصل قيمتها إلى 7 أو 8 أمثال سماحية الهواء .

والجدول التالى يعرض نماذج لقيم سماحية عوازل مختلفة مع عرض قيم الجهود التى يتحملها.

<i>Insulating material</i>	<i>Dielectric constant or relative permittivity (<math>\epsilon_r</math>)</i>	<i>Dielectric Strength in kV/mm</i>
Air	1.0006	3.2
Asbestos*	2	2
Bakelite	5	15
Epoxy	3.3	20
Glass	5-12	12-100
Marble*	7	2
Mica	4-8	20-200
Micanite	4-5-6	25-35
Mineral Oil	2.2	10
Mylar	3	400
Nylon	4.1	16
Paper	1.8-2.6	18
Paraffin wax	1.7-2.3	30
Polyethylene	2.3	40
Polyurethane	3.6	35
Porcelain	5-6.7	15
PVC	3.7	50
Quartz	4.5-4.7	8
Rubber	2.5-4	12-20
Teflon	2	20
Vacuum	1	infinity
Wood	2.5-7	---

والمعادلة التالية تعطي علاقة الـ Capacitance بأبعاد الموصلات

$$C = \frac{0.0121\epsilon_r}{\log_{10} \frac{D}{r}} \mu F/km$$

وتسمى هذه السعات غير المرئية بالمكثفات الذاتية Self-Capacitance ، وتظهر هذه السعات طبقا للتعريف السابق بين كل Two Phases كما تظهر بين كل Phase والأرض ، وهذه الأخيرة تسمى بالمكثفات الشاردة Stay Capacitance وهي مكثفات غير مرئية وموزعة بانتظام على طول الخط ، وتتسبب في مرور تيار متسرب من الخط إلى الأرض يسمى بالـ Stray Current أو الـ Capacitive Currents .

ومن أساسيات النقل الاقتصادي للتيار المتردد أن تكون السعة الكهربائية Capacitance بين الخط الحامل للتيار وبين الأرضي صغيرة لتقليل الفقد في الكهرباء . ويمكن تنفيذ ذلك بزيادة ارتفاع الأبراج مثلا في الخطوط الهوائية ، أما بالنسبة للكابلات عموما لاسيما الكابلات البحرية التي تمتد عشرات الكيلومترات

فالمشكلة أصعب حيث تكون سعة الكابلات كبيرة ، وبالتالي تزداد تكلفة نقل التيار المتردد ، وفي هذه الحالة يكون النقل باستخدام التيار المستمر أوفر اقتصاديا ، حيث لا يحدث فقد كبير .  
وتتوقف قيمة الطاقة المخزنة بالمكثف  $W$  (Joule) على حسب سعة المكثف ، وفرق الجهد عليه حسب المعادلة التالية:

$$W = 0.5 CV^2$$

وبسبب وجود هذه المكثفات وهذه التيارات المتسرية ظهر مصطلح جديد هو الـ Admittance, Y .

### 5-2-10 مصطلح الـ Admittance, Y

هي مقياس لمدى سهولة مرور التيار بالدائرة وهي عكس المعاوقة  $Z$  وبالتالي يمكن أن تسميها المساهلة ، وحتى وحدات قياسها تكون عكس وحدات قياس المعاوقة  $Z$  والتي تقاس كما نعلم بالأوم ، ويرمز لها بالـ  $\Omega$  ، أما الـ Admittance فتقاس بالـ mho والرمز يكون  $\bar{Y}$  (لاحظ أن الاسم والرمز معكوسين) ، وأحيانا تقاس أيضا بالـ Siemens

$$Y = \frac{1}{Z} = \frac{1}{R + jX} = \left( \frac{R}{R^2 + X^2} \right) + j \left( \frac{-X}{R^2 + X^2} \right)$$

Or

$$Y = G + jB$$

Where

Y is the admittance, measured in Siemens (1/ohm).

G is the conductance, measured in Siemens. Real part of admittance Y.

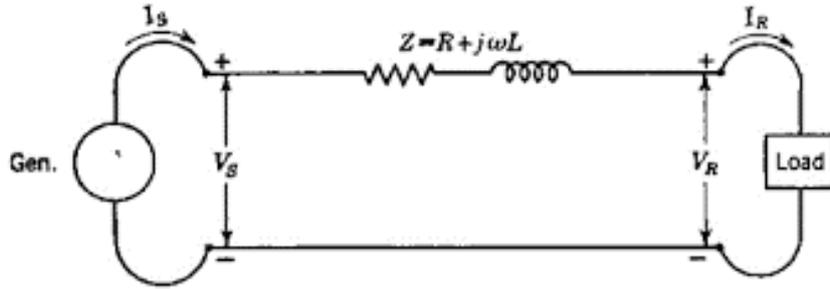
B is the saucepans, measured in Siemens, Imaginary part of admittance Y.

## 3-10 طرق تمثيل خطوط النقل رياضيا

جميع الحسابات المرتبطة بخطوط النقل تحتاج إلى تمثيل رياضى للخط ، وطريقة هذا التمثيل تتوقف على طول الخط ، حيث تقسم خطوط النقل إلى ثلاثة أنواع حسب الطول :

## 10-3-1 تمثيل الخطوط القصيرة :

الخطوط القصيرة Short TL ، والتي يكون طولها أقل من 80 كم ، يتم تمثيلها كـ Lumped Parameters ، أى بمعاوقة  $R + jX$  مجمعة كما فى الشكل 10-6 ، حيث تمثل المقاومة الكلية لموصلات الخط ، و  $X$  تمثل المعاوقة الحثية Inductive Reactance للخط كله ، وفى هذه الخطوط نهمل تأثير المكثفات الشاردة للخط.



شكل 10-6:

والمثال التالى يظهر كيفية تأثير قيم عناصر التمثيل (  $R$  and  $L$  ) على أداء الخط (الكفاءة وانتظام الجهد).

**Example 10.3.** An overhead 3-phase transmission line delivers 5000 kW at 22 kV at 0.8 p.f. lagging. The resistance and reactance of each conductor is 4 Ω and 6 Ω respectively. Determine : (i) sending end voltage (ii) percentage regulation (iii) transmission efficiency.

**Solution.**

Load power factor,  $\cos \phi_R = 0.8$  lagging

Receiving end voltage/phase,  $V_R = 22,000/\sqrt{3} = 12,700$  V

Impedance/phase,  $\vec{Z} = 4 + j6$

Line current,  $I = \frac{5000 \times 10^3}{3 \times 12700 \times 0.8} = 164$  A

As  $\cos \phi_R = 0.8 \therefore \sin \phi_R = 0.6$

Taking  $\vec{V}_R$  as the reference phasor (see Fig. 10.6),

$$\vec{V}_R = V_R + j0 = 12700 \text{ V}$$

$$\vec{I} = I(\cos \phi_R - j \sin \phi_R) = 164(0.8 - j0.6) = 131.2 - j98.4$$

(i) Sending end voltage per phase is

$$\begin{aligned} \vec{V}_S &= \vec{V}_R + \vec{I} \vec{Z} = 12700 + (131.2 - j98.4)(4 + j6) \\ &= 12700 + 524.8 + j787.2 - j393.6 + 590.4 \\ &= 13815.2 + j393.6 \end{aligned}$$

$$\text{Magnitude of } V_S = \sqrt{(13815.2)^2 + (393.6)^2} = 13820.8 \text{ V}$$

$$\text{Line value of } V_S = \sqrt{3} \times 13820.8 = 23938 \text{ V} = \mathbf{23.938 \text{ kV}}$$

$$(ii) \quad \% \text{ age Regulation} = \frac{V_S - V_R}{V_R} \times 100 = \frac{13820.8 - 12700}{12700} \times 100 = \mathbf{8.825\%}$$

$$(iii) \quad \text{Line losses} = 3I^2R = 3 \times (164)^2 \times 4 = 3,22,752 \text{ W} = 322.752 \text{ kW}$$

$$\therefore \text{Transmission efficiency} = \frac{5000}{5000 + 322.752} \times 100 = \mathbf{93.94\%}$$

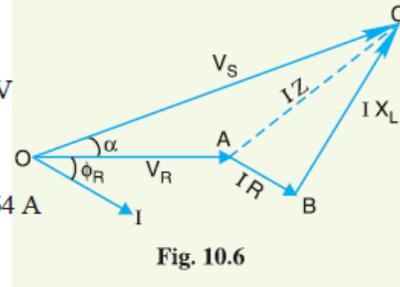


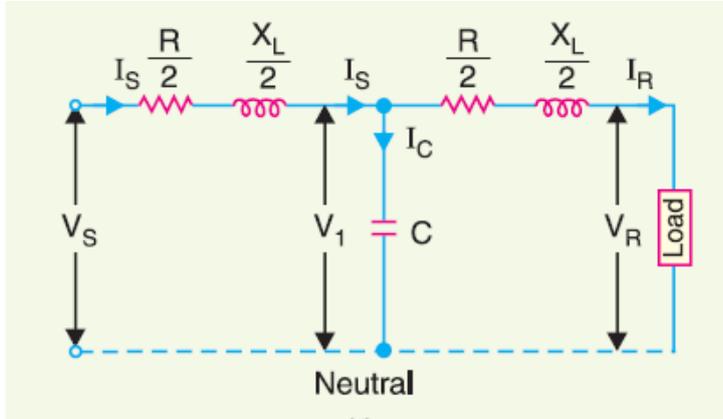
Fig. 10.6

### 10-3-2 تمثيل الخطوط متوسطة الطول

الخطوط متوسطة الطول Medium TL ، تكون بين 80 إلى 160 كم ، وتمثل :

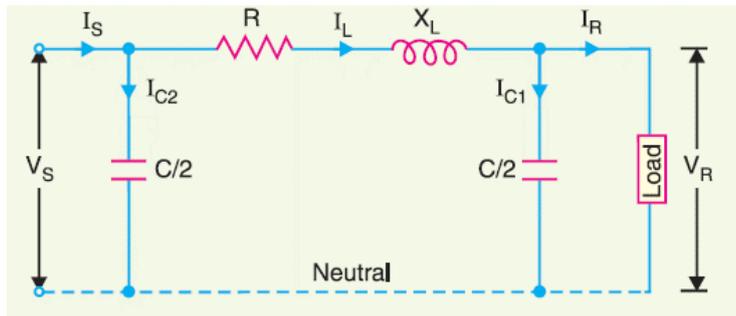
1- إما بطريقة الـ T-Section ، حيث يظهر تأثير الـ Capacitance لكن بصورة مجمعة سواء

في منتصف الخط كما في الـ T-model الذي يظهر في الشكل 10-7.



شكل 10-7:

2- أو بتقسيم المكثفات إلى نصفين (كل نصف يمثل بضعف قيمة الـ Admittance الكلية للخط) ، كما في الشكل 10-8 .



شكل 10-8:

وهذا مثال لحسابات أداء الخط وتأثره بقيم التمثيل (R and L and C)

**Example 10.11.** A 3-phase, 50-Hz overhead transmission line 100 km long has the following constants :

- Resistance/km/phase = 0.1 Ω
- Inductive reactance/km/phase = 0.2 Ω
- Capacitive susceptance/km/phase = 0.04 × 10<sup>-4</sup> siemen

Determine (i) the sending end current (ii) sending end voltage (iii) sending end power factor and (iv) transmission efficiency when supplying a balanced load of 10,000 kW at 66 kV, p.f. 0.8 lagging. Use nominal T method.

**Solution.** Figs. 10.13 (i) and 10.13 (ii) show the circuit diagram and phasor diagram of the line respectively.

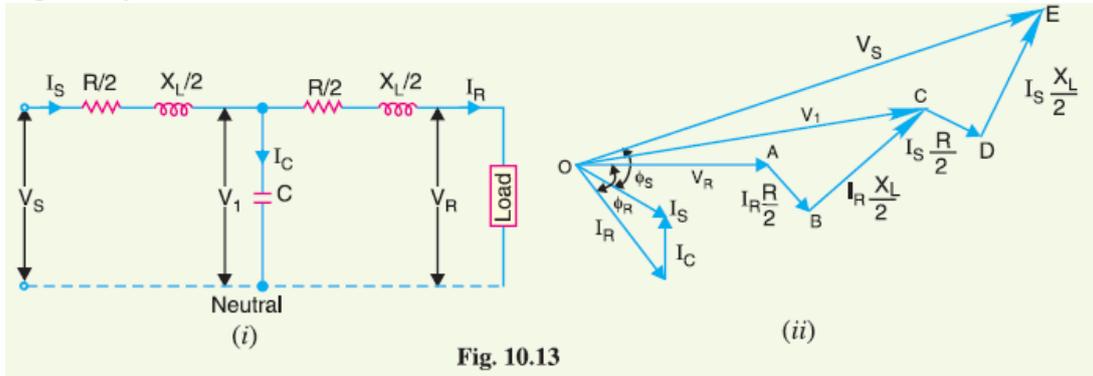


Fig. 10.13

- Total resistance/phase,  $R = 0.1 \times 100 = 10 \Omega$
- Total reactance/phase,  $X_L = 0.2 \times 100 = 20 \Omega$
- Capacitive susceptance,  $Y = 0.04 \times 10^{-4} \times 100 = 4 \times 10^{-4} S$
- Receiving end voltage/phase,  $V_R = 66,000/\sqrt{3} = 38105 V$

Load current, 
$$I_R = \frac{10,000 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 66 \times 10^3 \times 0.8} = 109 A$$

$\cos \phi_R = 0.8 ; \sin \phi_R = 0.6$

Impedance per phase,  $\vec{Z} = R + j X_L = 10 + j 20$

(i) Taking receiving end voltage as the reference phasor [see Fig. 10.13 (ii)], we have,

Receiving end voltage,  $\vec{V}_R = V_R + j 0 = 38,105 V$

Load current,  $\vec{I}_R = I_R (\cos \phi_R - j \sin \phi_R) = 109 (0.8 - j 0.6) = 87.2 - j 65.4$

Voltage across C, 
$$\vec{V}_1 = \vec{V}_R + \vec{I}_R \vec{Z}/2 = 38,105 + (87.2 - j 65.4) (5 + j 10)$$

$$= 38,105 + 436 + j 872 - j 327 + 654 = 39,195 + j 545$$

$$\text{Charging current, } \vec{I}_C = j Y \vec{V}_1 = j 4 \times 10^{-4} (39,195 + j 545) = -0.218 + j 15.6$$

$$\begin{aligned} \text{Sending end current, } \vec{I}_S &= \vec{I}_R + \vec{I}_C = (87.2 - j 65.4) + (-0.218 + j 15.6) \\ &= 87.0 - j 49.8 = 100 \angle -29^\circ 47' \text{ A} \end{aligned}$$

$$\therefore \text{ Sending end current} = \mathbf{100 \text{ A}}$$

$$\begin{aligned} \text{(ii) Sending end voltage, } \vec{V}_S &= \vec{V}_1 + \vec{I}_S \vec{Z}/2 = (39,195 + j 545) + (87.0 - j 49.8) (5 + j 10) \\ &= 39,195 + j 545 + 434.9 + j 870 - j 249 + 498 \\ &= 40128 + j 1170 = 40145 \angle 1^\circ 40' \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \therefore \text{ Line value of sending end voltage} \\ &= 40145 \times \sqrt{3} = 69\,533 \text{ V} = \mathbf{69.533 \text{ kV}} \end{aligned}$$

(iii) Referring to phasor diagram in Fig. 10.14,

$$\theta_1 = \text{angle between } \vec{V}_R \text{ and } \vec{V}_S = 1^\circ 40'$$

$$\theta_2 = \text{angle between } \vec{V}_R \text{ and } \vec{I}_S = 29^\circ 47'$$

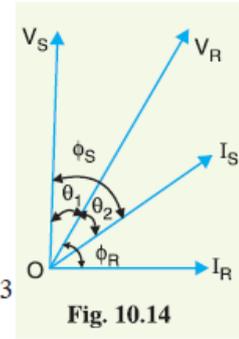
$$\begin{aligned} \therefore \phi_S &= \text{angle between } \vec{V}_S \text{ and } \vec{I}_S \\ &= \theta_1 + \theta_2 = 1^\circ 40' + 29^\circ 47' = 31^\circ 27' \end{aligned}$$

$$\therefore \text{ Sending end power factor, } \cos \phi_S = \cos 31^\circ 27' = \mathbf{0.853 \text{ lag}}$$

$$\begin{aligned} \text{(iv) Sending end power} &= 3 V_S I_S \cos \phi_S = 3 \times 40,145 \times 100 \times 0.853 \\ &= 10273105 \text{ W} = 10273.105 \text{ kW} \end{aligned}$$

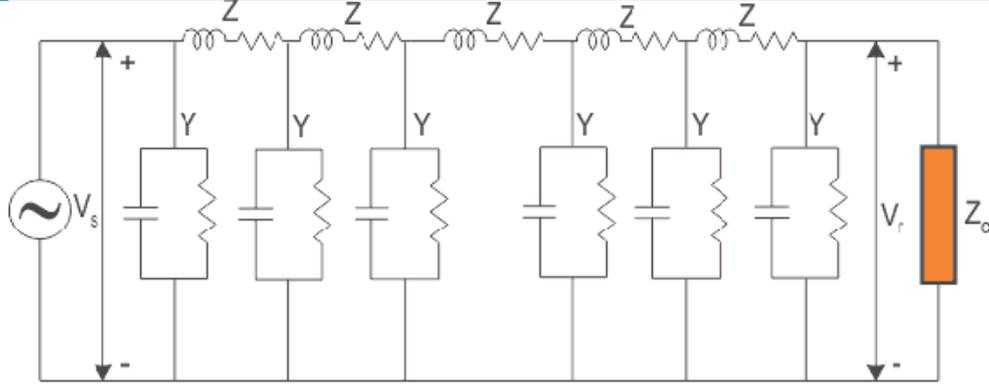
$$\text{Power delivered} = 10,000 \text{ kW}$$

$$\therefore \text{ Transmission efficiency} = \frac{10,000}{10273.105} \times 100 = \mathbf{97.34\%}$$



### 3-3-10 تمثيل الخطوط الطويلة :

الخطوط الطويلة Long TL تكون أطول من 160 كم وتمثل بطريقة الـ Distributed parameters كما في الشكل 9-10.



Long Transmission Line Model

شكل 10-9:

والمعادلات التي تصف أداء هذه الخطوط تتسم بالدقة والتعقيد الرياضى فى وقت واحد ، فالخط هنا يمثل وكأنه مجموعات لانهائية العدد من Series Impedance, Z and Shunt Admittance, Y ، كما فى الشكل 10-9 . ويتم حساب قيم الجهد الذى يظهر على وحدة من هذه المجموعات ، ثم عمل تكامل Integration على طول الخط للوصول للجهد فى نهاية الخط .

وحيث أن الوحدة الصغيرة من هذه المجموعات تمثل بمعادلة تفاضلية من الدرجة الثانية Second Order Differential Equation ، و عند عمل تكامل لهذا النوع من المعادلات تنتج القيم المعروفة بـ Sinh and Cosh - وهما بالطبع يختلفان عن الـ Sin and Cos المعروفتان ، ومن هنا نصل للمعادلات المشهورة الممثلة لهذه الخطوط ، وهذه المعادلات تعطى قيمة الجهد والتيار عند الـ ( Supply End ) كما (VS, IS) بدلالة Z, Y للخط ، وكذلك بدلالة التيار والجهد عند الـ ( Receiving End, (IR, VR) كما فى المعادلتين التاليتين :

$$V_S = V_R \cosh \sqrt{YZ} + I_R \sqrt{\frac{Z}{Y}} \sinh \sqrt{YZ}$$

$$I_S = V_R \sqrt{\frac{Y}{Z}} \sinh \sqrt{YZ} + I_R \cosh \sqrt{YZ}$$

**Example 10.15.** A 3- $\phi$  transmission line 200 km long has the following constants :

$$\text{Resistance/phase/km} = 0.16 \Omega$$

$$\text{Reactance/phase/km} = 0.25 \Omega$$

$$\text{Shunt admittance/phase/km} = 1.5 \times 10^{-6} \text{ S}$$

Calculate by rigorous method the sending end voltage and current when the line is delivering a load of 20 MW at 0.8 p.f. lagging. The receiving end voltage is kept constant at 110 kV.

**Solution :**

$$\text{Total resistance/phase, } R = 0.16 \times 200 = 32 \Omega$$

$$\text{Total reactance/phase, } X_L = 0.25 \times 200 = 50 \Omega$$

$$\text{Total shunt admittance/phase, } Y = j 1.5 \times 10^{-6} \times 200 = 0.0003 \angle 90^\circ$$

$$\text{Series Impedance/phase, } Z = R + jX_L = 32 + j50 = 59.4 \angle 58^\circ$$

The sending end voltage  $V_S$  per phase is given by :

$$V_S = V_R \cosh \sqrt{Y Z} + I_R \sqrt{\frac{Z}{Y}} \sinh \sqrt{Z Y} \quad \dots(i)$$

Now

$$\sqrt{Z Y} = \sqrt{59.4 \angle 58^\circ \times 0.0003 \angle 90^\circ} = 0.133 \angle 74^\circ$$

$$Z Y = 0.0178 \angle 148^\circ$$

$$Z^2 Y^2 = 0.00032 \angle 296^\circ$$

$$\sqrt{\frac{Z}{Y}} = \sqrt{\frac{59.4 \angle 58^\circ}{0.0003 \angle 90^\circ}} = 445 \angle -16^\circ$$

$$\sqrt{\frac{Y}{Z}} = \sqrt{\frac{0.0003 \angle 90^\circ}{59.4 \angle 58^\circ}} = 0.00224 \angle 16^\circ$$

$$\begin{aligned} \therefore \cosh \sqrt{Y Z} &= 1 + \frac{Z Y}{2} + \frac{Z^2 Y^2}{24} \text{ approximately} \\ &= 1 + \frac{0.0178}{2} \angle 148^\circ + \frac{0.00032}{24} \angle 296^\circ \\ &= 1 + 0.0089 \angle 148^\circ + 0.0000133 \angle 296^\circ \\ &= 1 + 0.0089 (-0.848 + j 0.529) + 0.0000133 (0.438 - j 0.9) \\ &= 0.992 + j 0.00469 = 0.992 \angle 0.26^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sinh \sqrt{Y Z} &= \sqrt{Y Z} + \frac{(Y Z)^{3/2}}{6} \text{ approximately} \\ &= 0.133 \angle 74^\circ + \frac{0.0024 \angle 222^\circ}{6} \\ &= 0.133 \angle 74^\circ + 0.0004 \angle 222^\circ \\ &= 0.133 (0.275 + j 0.961) + 0.0004 (-0.743 - j 0.67) \\ &= 0.0362 + j 0.1275 = 0.1325 \angle 74^\circ 6' \end{aligned}$$

Receiving end voltage per phase is

$$V_R = 110 \times 10^3 / \sqrt{3} = 63508 \text{ V}$$

$$\text{Receiving end current, } I_R = \frac{20 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 110 \times 10^3 \times 0.8} = 131 \text{ A}$$

Putting the various values in exp (i), we get,

$$\begin{aligned} V_S &= 63508 \times 0.992 \angle 0.26^\circ + 131 \times 445 \angle -16^\circ \times 0.1325 \angle 74^\circ 6' \\ &= 63000 \angle 0.26^\circ + 7724 \angle 58^\circ 6' \\ &= 63000 (0.999 + j 0.0045) + 7724 (0.5284 + j 0.8489) \\ &= 67018 + j 6840 = 67366 \angle 5^\circ 50' \text{ V} \end{aligned}$$

Sending end line-to-line voltage =  $67366 \times \sqrt{3} = 116.67 \times 10^3 \text{ V} = 116.67 \text{ kV}$

The sending end current  $I_S$  is given by :

$$I_S = V_R \sqrt{\frac{Y}{Z}} \sinh \sqrt{YZ} + I_R \cosh \sqrt{YZ}$$

Putting the various values, we get,

$$\begin{aligned} I_S &= 63508 \times 0.00224 \angle 16^\circ \times 0.1325 \angle 74^\circ 6' + 131 \times 0.992 \angle 0.26^\circ \\ &= 18.85 \angle 90^\circ 6' + 130 \angle 0.26^\circ \\ &= 18.85 (-0.0017 + j 0.999) + 130 (0.999 + j 0.0045) \\ &= 129.83 + j 19.42 = 131.1 \angle 8^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

∴ Sending end current = **131.1 A**

## 4-10 الظواهر التي تترتب على وجود الـ CAPACITANCE

هناك عدة ظواهر ترتبط جميعا بوجود المكثفات الشاردة منها :

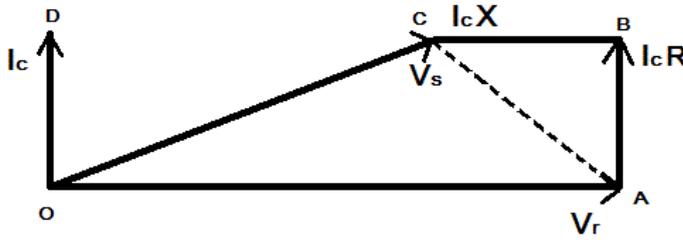
- ظاهرة Ferranti Effect
- ظاهرة ارتفاع الجهد نتيجة حدوث قصر
- ظاهرة الـ Arcing Ground
- ظاهرة التيارات الشاردة Stray Currents

وفيما يلي نقدم شرحا لهذه الظواهر.

### 1-4-10 ظاهرة Ferranti Effect

هذه هي أولى الظواهر التي تنشأ بسبب الـ Stray Capacitance . معلوم أن التيار يسير من الجهد الأعلى للأقل وهذا بالضرورة يعنى أن جهد المصدر لا بد أن يكون دائما أعلى من جهد الحمل حتى يسير التيار من المصدر للحمل ، ولكن أحد العلماء Sir S.Z. Ferranti, in the year 1890 اكتشف ظاهرة فريدة وهي ارتفاع الجهد عند الحمل أكثر من الجهد عند المصدر ، وذلك يحدث في الخطوط المتوسطة الطول والطويلة عند انخفاض الأحمال وسميت الظاهرة باسمه Ferranti Effect

تحدث هذه الظاهرة إذا زادت قيمة التيار المسحوب بواسطة المكثفات الشاردة لخط النقل عن قيمة التيار المسحوب بواسطة الحمل في نهاية الخط (هذا بالطبع لا يمكن أن يحدث إلا عند انخفاض الأحمال بشدة على سبيل المثال قبل صلاة الفجر مثلا ) بحيث أن التيار المار في الخط يكون معظمه Capacitive currents ، وبالتالي يكون لدينا Leading current أى سابق الجهد بزواوية 90 درجة تقريبا كما في الشكل 10-10.



شكل 10-10:

ومعلوم أن تيار المكثف يسبق الجهد ومن ثم يصبح الـ Voltage drops على مقاومة الخط وعلى الـ Inductance كما في الشكل 10-10. مما يجعل VS يصبح أقل من VR وتحدث ظاهرة الـ Ferranti Effect . بالطبع هذه الظاهرة غير موجودة في الخطوط القصيرة لصغر قيمة الـ Stray Capacitance بها.

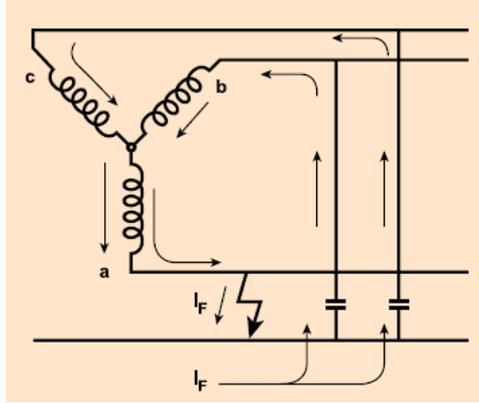
والمعادلة التالية تعطى قيمة الارتفاع في الجهد بدلالة طول الخط والـ Inductance (لاحظ أنه الارتفاع يتناسب مع مربع طول الخط أى أنه يتأثر بشدة بقيمة المكثفات الشاردة التى تتناسب هى الأخرى مع طول الخط).

$$\text{Voltage rise} = \left(\frac{1}{2}\right) V_r \omega^2 l^2 c_0 L_0$$

تجدر الإشارة إلى أن هذه الظاهرة تكون أشد وضوحا إذا كان خط النقل عبارة عن كابلات أرضية حيث تأثير الـ Capacitance تكون أكبر بكثير من الخطوط الهوائية .

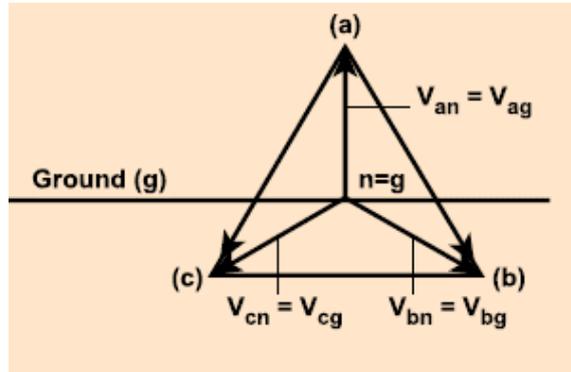
## 2-4-10 ظاهرة ارتفاع الجهد عند حدوث قصر Short Circuit

معلوم أن حدوث قصر يتسبب في ارتفاع التيار وانخفاض الجهد ، لكن هناك بعض الحالات التي يتسبب فيها الـ Short Circuit في ارتفاع الجهد على الـ Healthy Phases نتيجة عطل على Faulty Phase بسبب مكثفات الخط كما هو واضح في الشكل 10-11 .



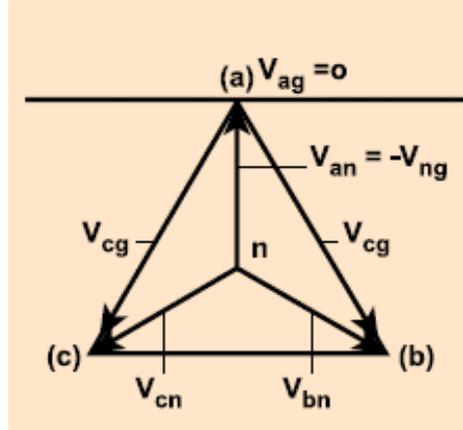
شكل 10-11:

فقبل حدوث العطل كان الجهد على كل وجه يساوى Phase Voltage كما في الـ Phasor Diagram المرسوم بالشكل 10-12 ، وبالتالي كان جهد نقطة التعادل يساوى صفرا.



شكل 10-12:

ثم عند حدوث الـ Short Circuit يعود تيار العطل في طريق رجوعه من خلال مكثفات الـ Healthy Phases كما في الشكل 10-11 ويرتفع جهد نقطة التعادل المعزولة إلى ما يساوى Phase Voltage ( بقيمة سالبة كما في الشكل 10-13 ) لأن جهد Phase-a هو الذى يساوى صفرا بعد العطل .



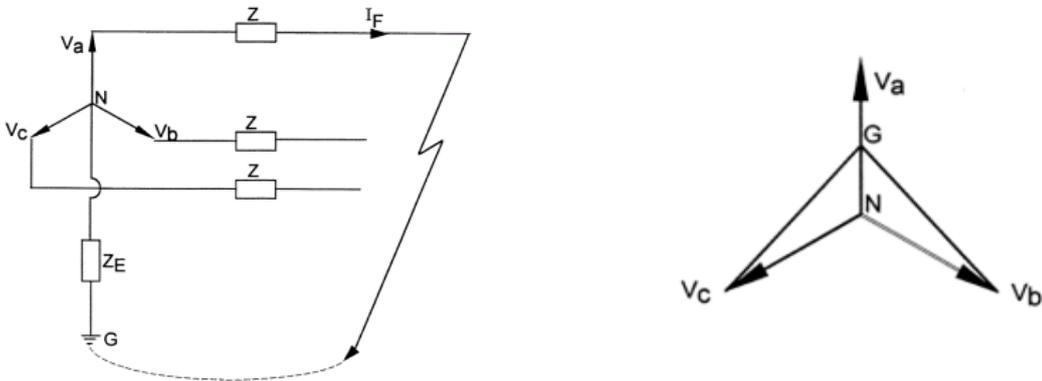
شكل 10-13:

وبناء عليه يصبح الجهد على الـ Other two phases يساوى الـ Line voltage

$$V_{bn} = V_b - V_n = V_b - (-V_a) = B_{ba} = V_{line}$$

أى أن عوازل الخط لهذه الـ Phases يجب أن تتحمل جهد يساوى هذا الجهد الجديد.

أما الخطوط المؤرضة فتعاني من نفس الظاهرة لكن فقط عندما تكون نقطة التعادل مؤرضة خلال مقاومة كما فى الشكل 10-14 حيث تزحزحت نقطة التعادل من النقطة N إلى النقطة G وبالتالي انخفض الجهد على الـ Phase-A ليصبح VA- VG بينما ارتفع على الفازتين الأخرين كما فى الجزء الأيمن من الشكل.



$$V_{GN} = I_F Z_E = V_{aN} \cdot \frac{Z_E}{Z_E + Z}$$

شكل 10-14:

ويترتب على ظهور هذا الجهد ليس فقط تأثر العوازل بل هناك ما هو أسوأ وهو ظاهرة الـ Arcing Ground.

### 10-4-3 ظاهرة القوس الأرضي Arcing Ground

تحدث هذه الظاهرة عند سقوط خط يحمل جهدا على الأرض في نظام معزول (نقطة التعادل غير مؤرضة Isolated Neutral) ، فعند حدوث عطل أرضي على أحد الـ phase فإن المسار الوحيد لمرور تيار العطل ليكمل closed circuit هو الـ capacitance الخاصة بالخطوط كما في الشكل 10-11 السابق .

ولعل بعضنا قد رأى يوما خطا كهربيا يقفز في الهواء وكان شخصا يمسك بطرفه ويحركه لأعلى وأسفل ، وبالطبع لا أحد يمسك به وإنما كل ما حدث أن الخط بمجرد أن يقترب من الأرض تنكسر عازلية الهواء بينه وبين الأرض بسبب قرب المسافة فيحدث تفريغ لشحنات المكثفات الشاردة على الـ Healthy Phases وترى بعينك شررا بين السلك والأرض ، ثم يسقط السلك على الأرض فيمر تيار الـ Short Circuit Current المرتفع الخاص بالوجه المعطل إلى الأرض فيتناثر مع الأرض حسب شدة التيار ثم يتكرر الوضع .

وقد لا يكون تيار العطل عاليا بسبب مقاومة الأرض - بل غالبا سيكون تيار العطل صغيرا جداً لارتفاع معاوقة هذه المكثفات Capacitive Reactance، ومن ثم يمكن للنظام أن يستمر في العمل في وجود هذا العطل لفترة ، ونقول أننا في حالة system floating ، لكن تيار العطل الصغير هذا يكون كافيا كي تعود المكثفات إلى الشحن مرة أخرى بعد تناثر السلك مع الأرض وارتفاعه لأعلى ، ويتكرر الوضع بين شحن وتفريغ للمكثفات ولا يستقر السلك على الأرض بل يقفز عشوائيا في كل الاتجاهات طالما أن السلك لا يزال متصلا بمصدر الطاقة وطالما أن الـ CB لم يفتح الدائرة.

وأخطر ما في هذه الظاهرة - بالإضافة للخطر على البشر - هو أن ينتج عنها ارتفاع في الجهد على الخط يصل إلى 5 أمثال جهد الخط مما قد يتسبب في انهيار العوازل.

وبسبب وجود احتمال لحدوث ارتفاع كبير في الجهد over voltage ، فإن هذه الجهود العالية يمكن أن تؤدي لحدوث عطل أرضي آخر على عوازل برج آخر ، ومن ثم ينشأ مسار جديد يسمح بمرور تيار العطل الأول خلاله لكنه يتميز بمقاومة منخفضة هذه المرة مقارنة بمقاومة المكثفات الشاردة التي كان يمر خلالها قبل حدوث العطل الثاني ، ومن ثم ترتفع قيمة تيار العطل الأول بشدة ، ويتسبب في مخاطر كبرى ، ولذلك تكون تكلفة الصيانة أحيانا في هذا النوع من الأعطال مرتفعة جدا .

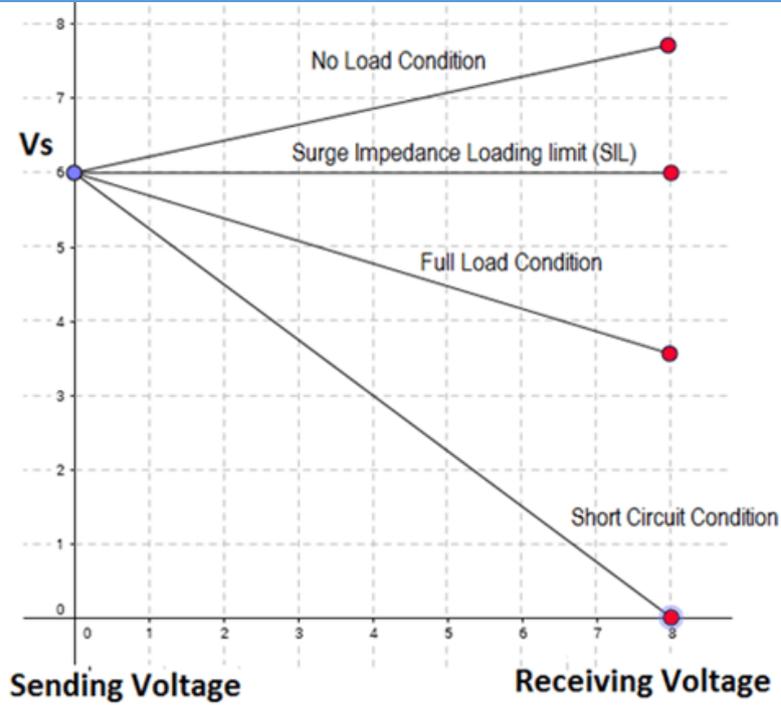
والحل الوحيد لهذه الظاهرة هو إيجاد مسار لمرور تيار العطل بدلا من المرور على المكثفات كما في النظم المؤرضة عند نقطة التعادل حيث أن الدائرة للعطل ستكتمل بعيدا عن مكثفات الـ Phases السليمة.

# 11

## تقنيات معوضات القدرة غير الفعالة

### Reactive Power Compensators

في بدايات شبكات الكهرباء لم يكن هناك حاجة لاستخدام ما يعرف الآن باسم الـ Static VAR Compensators بأنواعها المتعددة ، إذ كانت الأحمال مجاورة للتوليد ولا يوجد أحمال حثية كثيرة ، بل كانت معظم الأحمال إما إنارة أو تسخين ، وكانت الأحمال تتصل بخطوط قصيرة بالمصدر ، ومن ثم فلم يشعر أحد بمشاكل الـ Reactive Power والتي ظهرت مع تغير هذه الظروف فصارت لدينا أحمال حثية ضخمة تحتاج لسحب كميات هائلة من الـ Q قد لا تستطيع المولدات الموجودة في الخدمة إمداد الأحمال بها ، لأن زيادة القدرة الغير فعالة المسحوبة بواسطة الأحمال تعنى شيئين: الأول هو حدوث هبوط في الجهد عند الـ Receiving end مع زيادة التحميل كما هو واضح في الشكل 1-11 ، والذي يظهر أيضا ارتفاع الجهد عند انخفاض التحميل نتيجة ارتفاع قيمة الـ Reactive Power كما سيتبين لاحقا:



شكل 1-11

والأمر الثاني المترتب على ارتفاع قيمة القدرة غير الفعالة المسحوبة بواسطة الأحمال هو انخفاض في قيمة الـ Power factor كما هو واضح من العلاقة المشهورة بين P-Q curve والتي تظهر في الشكل 1-11 ، ومن ثم نلجأ إلى مصادر أخرى لتعويض للقدرة غير الفعالة وهو إما باستخدام المكثفات ، أو باستخدام أجهزة الـ STATCOM .

## 1-11 مفاهيم أساسية

وقبل الحديث عن هذه الأجهزة نراجع باختصار بعض المعلومات الأساسية المتعلقة بالـ Reactive Power في الخطوط (يمكن تجاوز هذا الجزء لبعض المهندسين حيث المحتوى يمثل بالنسبة لهم معلومات أولية).

## 1-1-11 تمثيل الأنواع المختلفة للقدرة الكهربائية

معظم الأجهزة الكهربائية التي تعمل على التيار المتردد (مثل المحركات والمحولات و..) تستهلك نوعين من الطاقة الكهربائية :

1- الأولى قدرة فعالة (Active Power) وتقدر بالـ (kW) وهذه يستهلك جزء صغير منها عبر المقاومة الأومية (R) للملفات ، والجزء الأكبر يتحول فعليا إلى طاقة أخرى مفيدة (حركية مثلا خلال المحركات أو ضوء كما في اللمبات وهكذا ) ، ولذا تسمى بالقدرة الفعالة أو الحقيقية.

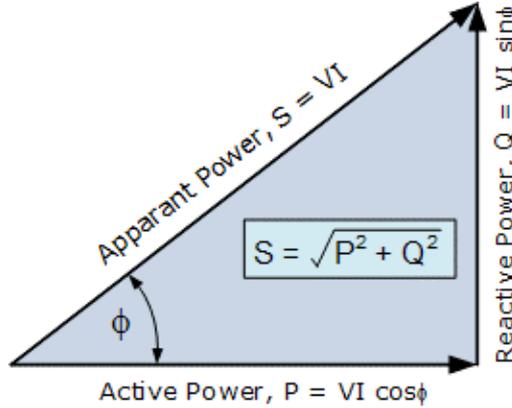
$$P = VI \cos \phi \quad (11-1)$$

2- والثانية قدرة غير فعالة (Reactive Power) وتقدر بالـ (KVAR) وهذه لا تستهلك ولا تتحول لصورة أخرى بل تتردد ذهابا وإيابا بين المصدر وبين الحمل من خلال خطوط التوصيل بينهما وتقوم داخل الحمل بمهمة إنشاء المجال المغناطيسي المطلوب لعمل هذه الأجهزة.

$$Q = VI \sin \phi \quad (11-2)$$

3- وعند جمع هاتين القدرتين اتجاهاً ينتج لدينا القدرة الظاهرية (S) Apparent Power وتقدر بالـ (KVA) كما في المثلث المعروف بمثلث القدرة شكل 2-11.

$$S = VI = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (11-3)$$



شكل 2-11:

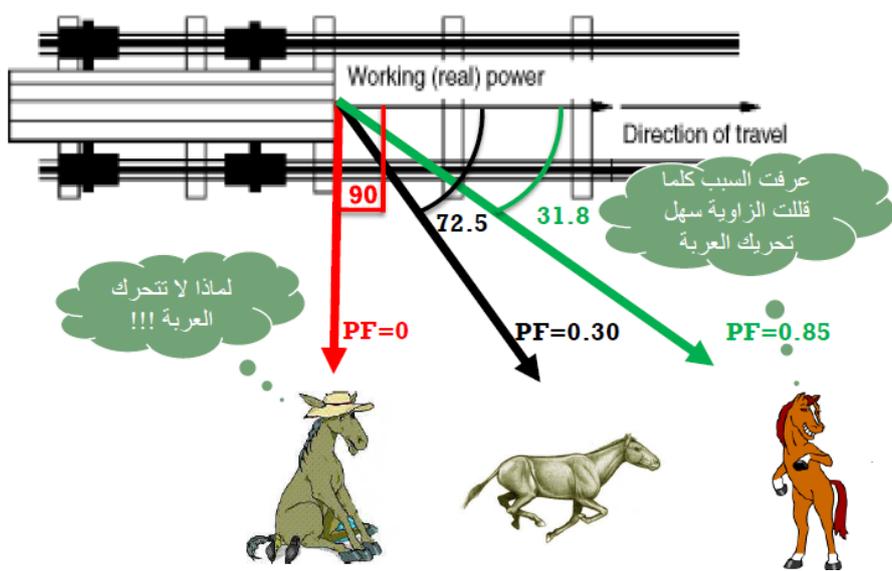
ويمكن تقريب الأمر بصورة توضيحية ، فلو تخيلنا أن لدينا صندوقاً مغلقاً به حمل كهربى Electric load ومتصل به سلكان يمر خلالهما التيار الكهربى ، فلو أنك باستخدام Multi-meter قمت بقياس الجهد والتيار الداخلين للجهاز ثم حسبت حاصل ضربهما فستحصل على ما نسميه القدرة الظاهرة

Apparent Power ، وتعنى كما نقول باللغة الدارجة أن الظاهر أن القدرة الداخلة لهذا الجهاز المغلق تساوى كذا VA ، وهذا مصطلح دقيق لأنها فعلا قدرة ظاهرية أما الواقع فإنها داخل هذا الصندوق ستتنقسم إلى جزئين ليس بالضرورة أن يكونا متساويين أحدهما يمثل القدرة الفعالة P والآخر يمثل القدرة غير فعالة Q ، والنسبة بينهما تحدد ما يعرف بالـ Power Factor .

### 2-1-11 مفهوم معامل القدرة Power Factor

فى مثلث القدرة تسمى الزاوية  $\phi$  بين الـ P وبين الـ Q بزاوية القدرة Power Angle ويكون  $\cos$  هذه الزاوية مساويا لنسبة القدرة الحقيقية أو الفعالة (P) إلى القدرة الظاهرية (S) ، وهو ما يسمى بمعامل القدرة Power Factor .

وكلما كانت Q أقل كلما كانت زاوية القدرة صغيرة وهذا يعنى أن معامل القدرة سيكون كبيرا ويقترّب من الواحد وبالتالي تكون القدرة الفعالة المفيدة المستهلكة أكبر وهذا ما نسعى إليه. وكلما كانت Q كبيرة كلما كان معامل القدرة صغيرا وهذا يعنى أننا لن نحصل سوى على قدرة حقيقية فعالة إلا بقدر صغير من إجمالي القدرة الظاهرة S التى تغذى الحمل. ومن هنا كان معامل القدرة PF مؤشرا على ارتفاع كفاءة الاستفادة من القدرة المتاحة على الشبكة تماما كما لو تخيلنا زاوية الحبل الذى يشده الحصان فى الشكل 3-11 ، فكلما اقتربت الزاوية من الصفر كلما استفدت من قوة الحصان بأقصى صورة بينما لو جعلت الزاوية 90 درجة فلن تتحرك العربة ولن تحصل على أى قوة من الحصان.



شكل 3-11:

وعند إعداد دراسة لإنشاء محطة توليد أو محطة توزيع بقدرة مثلاً (  $1000 \text{ kVA}$  ) لتأمين التغذية الكهربائية لمنطقة عامل القدرة لها بحدود (  $P.F=0.8$  ) فإن المولد أو المحول سيكون قادراً على تأمين قدرة فعالة قدرها فقط

$$(P = 0.8 \times 1000 = 800 \text{ KW})$$

لأنه سيحتاج لتأمين النوع الثاني من القدرة وهو القدرة غير فعالة.

أما عندما يكون معامل القدرة بحدود (  $P.F = 0.5$  ) فإن هذه المولد أو المحول لن يكون قادراً إلا على تأمين قدرة فعالة فقط بحدود (  $P = 500 \text{ KW}$  ).

### مثال 1-11

حمل قدرته الظاهرية Apparent Power تساوي 250 VA ومعامل القدرة PF له يساوي 0.5 lagging . إحصب القدرة الفعالة والقدرة غير الفعالة له.

الحل

$$P = S \times PF = 250 \times 0.5 = 125 \text{ watt}$$

$$PF = \cos \varphi = 0.5$$

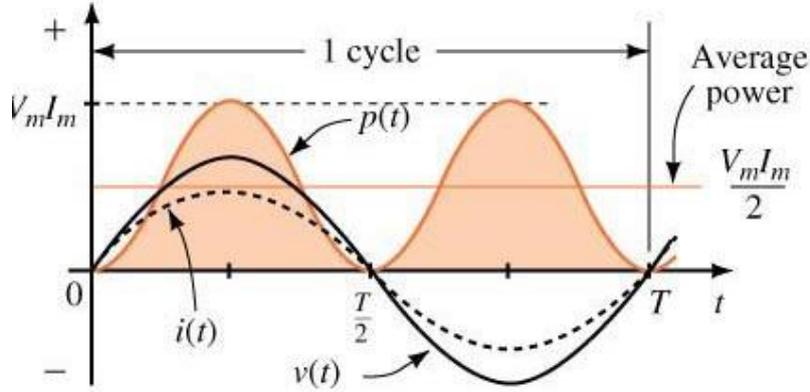
$$\varphi = \cos^{-1} 0.5 = 60^\circ$$

$$Q = S \times \sin \varphi = 225 \times \sin 60^\circ = 216 \text{ VAR}$$

## 2-11 القدرة غير الفعالة REACTIVE POWER

هذا المصطلح يظهر دائماً إذا كانت الأحمال التي لديك تشتمل على مكثفات أو ملفات ، أما إذا كانت الأحمال عبارة عن مقاومات فقط فعندها لن يكون لدينا سوى نوع واحد من القدرة وهو القدرة الفعالة Active Power أو أحيانا تسمى القدرة الحقيقية Real Power .

ففي حالة ال Resistive Loads يكون الجهد والتيار In-phase كما في الشكل 11-4، ومن ثم يكون حاصل ضربهما وهو القدرة (  $P = V.I$  ) موجبا دائماً كما في الشكل .



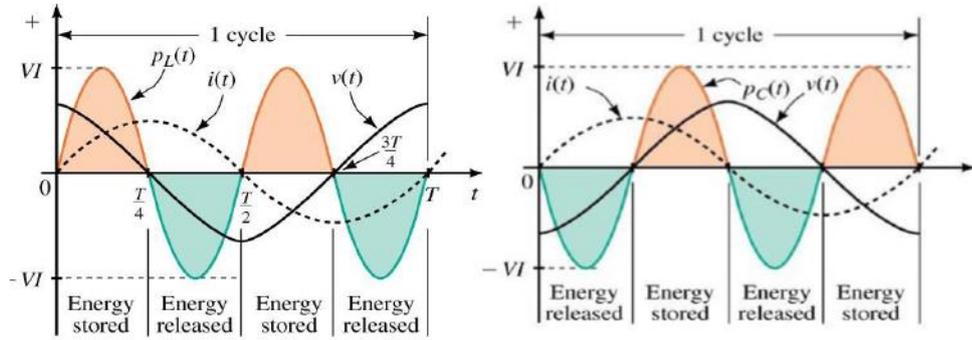
شكل 4-11:

ويمكن القول أن كل القدرة الكهربائية القادمة من المصدر قد تحولت إلى قدرة فعالة Active داخل الحمل ، فقد تكون تحولت مثلا إلى حرارة أو إلى ضوء أو أى صورة من صور تحويل الطاقة.

أما فى حالة وجود ملفات فقط أو مكثفات فقط فى الدائرة الكهربائية الموصلة على مصدر للتيار المتردد فإن هناك Phase Shift بين الجهد والتيار قدرة 90 درجة (التيار يسبق الجهد فى حالة المكثفات ، ويكون متأخرا عنه Lag فى حالة الملفات).

ونتيجة هذا الـ Phase Shift فإن حاصل ضرب الجهد فى التيار تصبح موجبة فى أول ربع دورة فى حالة الملفات ثم سالبة ثم موجبة ثم سالبة فى الربع الأخير كما فى الجزء الأيسر من الشكل 4-11. والعكس صحيح فى حالة المكثفات كما فى الجزء الأيمن من الشكل.

وهذا يعنى أن المكثف / الملف يخترن الطاقة المسحوبة من المصدر خلال ربع الدورة ثم يردها ثانية للمصدر خلال ربع الدورة التالى ، ويتكرر ذلك خلال ربعى الدورة الثالث والرابع . وتصبح متوسط القدرة P المسحوبة خلال دورة كاملة يساوى صفرا.

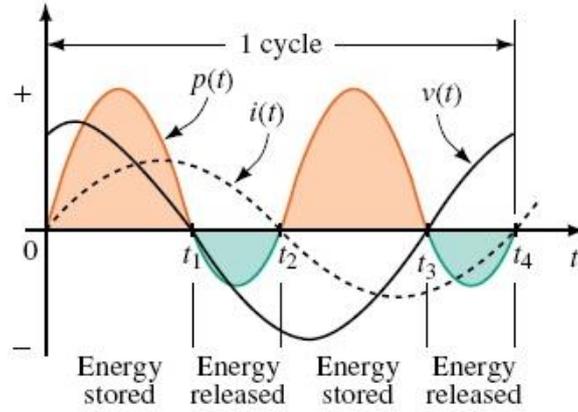


شكل 11-5:

و كما هو واضح من الشكلين فإن متوسط القدرة P المسحوبة من المصدر خلال دورة كاملة يساوى صفرا في حالتى المكثف والملف ، ومن هنا أطلق على هذا النوع من القدرة التى تسحب بواسطة ملفات أو مكثفات اسم القدرة غير فعالة Q, Reactive Power لأنها فى الإجمال لم تؤد أى شغل ولم تتحول إلى أى صورة أخرى مفيدة بل كل ما فعلته (فى الظاهر حتى الآن) أنها تمر خلال الأسلاك بين المصدر والحمل ذهابا وإيابا متسببة فى مرور تيار إضافى فى الأسلاك وهذا التيار الإضافى سيتسبب فى حدوث Voltage drop على الخط ومن ثم ينخفض الجهد عند الأحمال ، بالإضافة إلى تسببها فى حدوث فقد فى الطاقة خلال مقاومة الأسلاك الواصلة للحمل (لاحظ أن القدرة الفعالة الوحيدة التى ظهرت هى القدرة المفقودة فى الأسلاك ولا علاقة لها بالملفات أو المكثفات).

وأحيانا يطلق على الـ Q القدرة السالبة أو التخيلية والسبب واضح من الأشكال السابقة ، ففي حالة القدرة الفعالة P, Active Power فإن القدرة متغيرة القيمة لكنها دائما موجبة بينما فى حالة القدرة غير فعالة Q فإن جزء منها موجب والجزء الآخر سالب كما فى الشكل 11-4 و 11-5، وبالطبع ليس معنى القدرة السالبة أو التخيلية أنها غير موجودة بالواقع ، بل يعنى أن اتجاهها قد تغير ليصبح من الحمل إلى المصدر .

بالطبع لا يوجد فى الواقع العملى أحمال عبارة عن ملفات فقط أو مكثفات فقط وإنما يكون مع كل منهم مقاومة ما ، ومن ثم فالقدرة المسحوبة بواسطة الملف أو المكثف لن تكون كلها Q كما فى الشكل السابق بل سيكون جزء منها يعتبر P وجزء آخر يعتبر Q وتختلف نسبة كل جزء منهما حسب نوع الحمل. والشكل 11-6 يمثل الصورة الواقعية للقدرة الفعالة وغير الفعالة المسحوبة بواسطة حمل مكون من ملف ومقاومة.

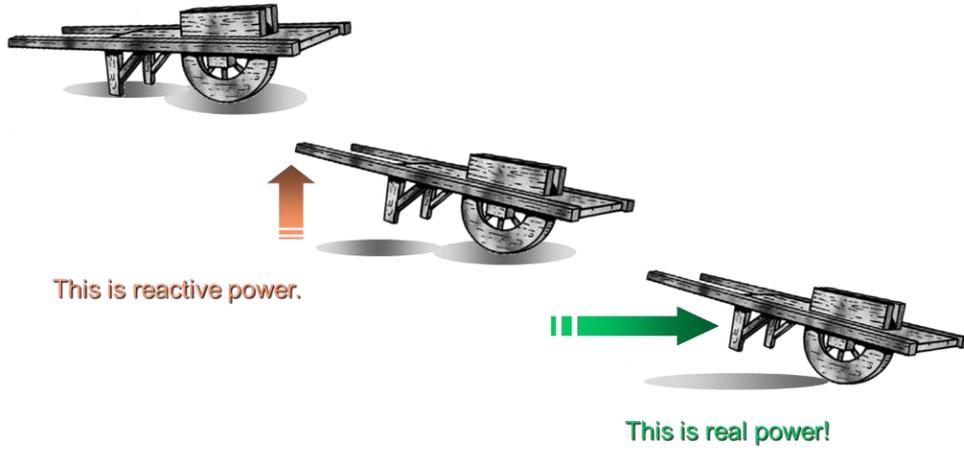


شكل 11-6:

### 11-2-1 هل القدرة غير الفعالة لا فائدة لها؟

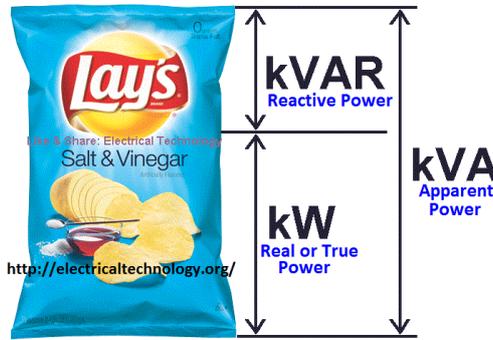
كما ذكرنا فإن الـ Reactive Power ليس لها فائدة مباشرة كما يبدو في الظاهر، فهي تتردد ذهابا وإيابا بين المصدر والحمل ومن ثم تتسبب في حدوث هبوط في الجهد بسبب تيار القدرة غير فعالة المار بالخط ذهابا وإيابا، ولكن القدرة غير الفعالة أساسية لعمل الكثير من الأجهزة، فهي المسؤولة عن توليد المجال المغناطيسي الضروري واللازم لعمل المحركات أو المحولات والمولدات. ويمكن فهم إشكالية أنها مفيدة ولكن بصورة غير مباشرة من الأمثلة التالية.

فالعربة تحتاج لقوة دفع أمامية (وهو ما يكافئ  $P$ ) لكن لو صرفنا جزءا من قوتنا لرفع العربة لأعلى قليلا (وهو ما يكافئ  $Q$ ) فسيكون دفع العربة أسهل كثيرا (شكل 11-7). وهذا بالفعل دور الـ  $Q$  فهي في هذا المثال لا تدفع العربة ولكن تساعد في دفعها، وهي كهربيا لا تتحول إلى قدرة ملموسة (حركة مثلا في المحركات) ولكنها تساهم في إنتاج هذه الحركة من خلال إنتاجها للمجال المغناطيسي والذي بدوره لن يتحرك الموتور.



شكل 11-7:

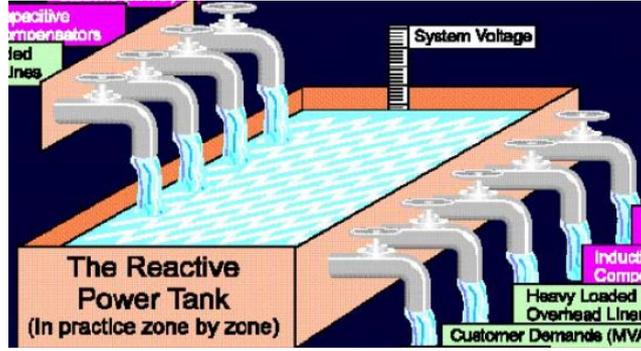
وهناك مثال طريف آخر لشرح مفهوم القدرة غير فعالة من خلال كيس الشيبسي في الشكل 11-8 . فالجزء الفعال أو المفيد هو الجزء السفلي المحتوي على رقائق البطاطس ، لكن الشركة مضطرة أن تضيف جزءا فارغا مملوء بالهواء (فعليا يملأ بالنيتروجين حتى لا تصبح القطع لينة) ، فهذا تماما هو دور القدرة غير فعالة لا تفيد مباشرة لكنها ضرورية بصورة غير مباشرة.



شكل 11-8:

والبعض قد يظن أننا نحتاج فقط إلى القدرة الفعالة لأنها بالفعل هي الـ Useful power التي تتحول إلى أي نوع آخر من صور الطاقة ، وهذا جزئياً صحيح ، لكن في الواقع فإننا نحتاج أيضاً إلى الـ Reactive power ، لأنها هي المسؤولة عن تثبيت الجهد ، ومعلوم أن ثبات الجهد هو المسئول عن دفع القدرة الفعالة ونقلها من مكان لمكان ، وبالتالي يمكن القول أن القدرة غير الفعالة هي المسؤولة عن نقل القدرة الفعالة من مكان لآخر. والشكل 11-9 يوضح بصورة رمزية معنى أن الـ Q (الماء المخزن) هي المسؤولة

عن تثبيت الـ  $V$  (ارتفاع الماء في الخزان) ، ومعنى أن الـ  $V$  هو المسئول عن تحريك القدرة الفعالة (قوة الاندفاع للماء الخارج).



شكل 11-9 :

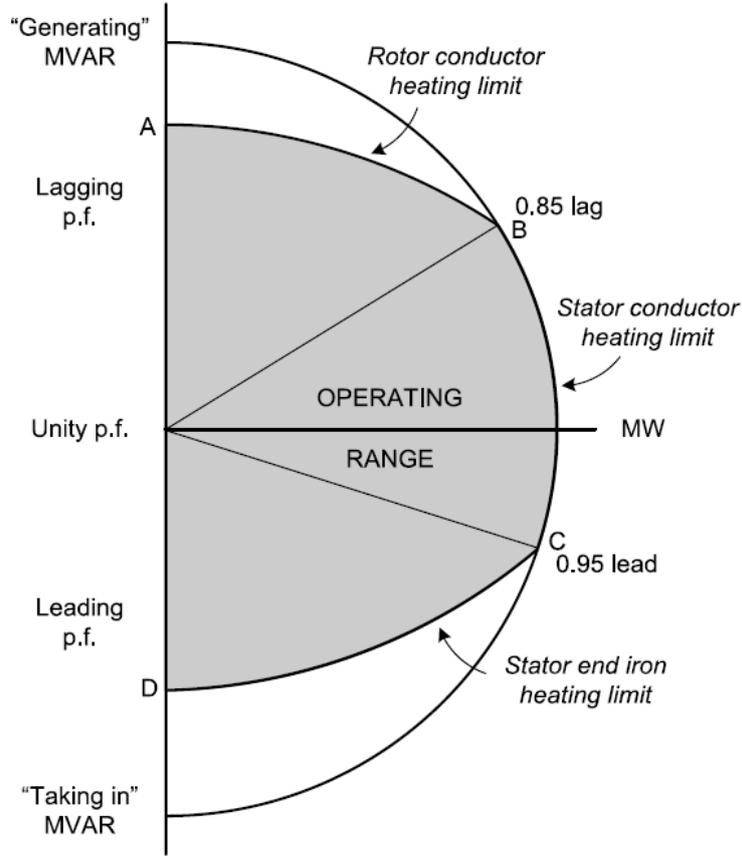
### 2-2-11 إنتاج واستهلاك الـ Reactive Power

جميع المعدات الكهربائية التي تحتوي على ملفات تعتبر مستهلكة للـ  $Q$  مثل المحركات والمحولات . أما المعدات التي تنتج الـ  $Q$  فهما نوعان : الأول هو المولدات Synchronous Generators والثاني هو المكثفات.

علما بأن المولدات يمكن أن تكون منتجة للـ  $Q$  إذا كان في حالة Over Excited ، كما يمكن أن تكون مستهلكة للـ  $Q$  في حال كونها Under excited . (شكل 11-10)

أما خطوط النقل / كابلات فهي تعتبر مستهلكة للـ  $Q$  في حال كونها محملة Loaded بأعلى من Surge Impedance Load, SIL وتعتبر منتجة للـ  $Q$  إذا كان تحميلها خفيف وأقل من SIL كما سنشرح لاحقاً. ونعرض ملخصها هنا.

واضح من الشكل 11-10 أنه كلما انخفض معامل القدرة كلما كانت لدينا مشكلة أكبر في التحمل الحراري للـ rotor بسبب ارتفاع قيمة الـ Reactive power التي تتولد فيه ، وهذه صورة أخرى من صور مساوئ معاملات القدرة المنخفضة.



شكل 10-11:

### 11-2-3 دور القدرة غير الفعالة في خطوط النقل

المعادلة التالية تمثل قيمة الـ Reactive Power الواصلة عند طرف Receiving end

$$Q_r = \frac{V_s V_r}{X_1} \cos \theta - \frac{V_r^2}{X_1} \quad (11-4)$$

حيث

$\theta$  هي نفسها  $\delta$  في المعادلة المشهورة وتمثل الزاوية بين الجهود في طرفي خط النقل.

$X_1$  هي reactance of the transmission line

ومن المعادلة السابقة يمكن أن نصل إلى علاقة الـ Reactive Power بالجهود كما يلي:

$$V_r^2 - V_s V_r + X_1 Q_r = 0$$

وهي معادلة من الدرجة الثانية تعطى حلين أحدهما مرفوض ، والثاني يظهر في المعادلة التالية:

$$V_r = \frac{V_s - \sqrt{V_s^2 - 4X_1 Q_r}}{2}$$

فإذا اعتبرنا أن

$$Q_r = Q_1 (\text{Demand}) - Q_2 (\text{supplied}).$$

فسيكون لدينا 3 احتمالات:

- الأول: أن تكون  $Q_2 (\text{supplied}) = Q_1 (\text{Demand})$  ، في هذه الحالة سيكون  $V_s = V_r$  وهو المطلوب.
- الثاني: أن تكون  $Q_1 (\text{Demand}) > Q_2 (\text{supplied})$  ، في هذه الحالة سيكون  $V_s > V_r$  وهو الأكثر شيوعاً ، وسنحتاج لطرق معينة لرفع هذا الجهد عند الأحمال.
- الثالث : أن تكون  $Q_1 (\text{Demand}) < Q_2 (\text{supplied})$  ، في هذه الحالة سيكون  $V_s < V_r$  وهذا يحدث عند التحميل الخفيف وهي غير مرغوب فيه لخطورته ، وسيعالج باستخدام الـ Shunt Reactors كما سنرى لاحقاً.

معلومة :

من أجل تحسين معامل القدرة والتحكم في قيمة الـ Reactive Power بلغ إجمالي السعات المركبة حتى صيف 2014 على الجهود المتوسطة والمنخفضة في مصر حوالي 9635 MVAR ، بالإضافة إلى 800 MVAR على شبكة الجهد الفائق 220 KV ، ونتيجة لذلك فقد بلغ معامل القدرة بالشبكة الموحدة حوالي 92% ومن المستهدف الوصول إلى 94% .

### مثال 11-2

- إحسب القدرة الفعالة الكلية و القدرة الظاهرية الكلية و الـ PF لمجموعة الأحمال التالية :
- 1 : حمل إضاءة 50 KW و PF= 1 .
  - 2: محرك حثي 125 KW عند PF = 0.707 lagging .
  - 3: محرك متزامن 75 KW عند PF = 0.9 leading .

الحل

$$P_{tot} = 50 + 125 + 75 = 250 \text{ KW}$$

$$Q_1 = P_1 \times \tan \varphi_1 = 50 \times \tan 0^\circ = 0$$

$$Q_2 = -P_2 \times \tan \varphi_2 = -125 \times \tan(\cos^{-1} 0.707) = -125 \text{ KVAR}$$

$$Q_3 = P_3 \times \tan \varphi_3 = 75 \times \tan(\cos^{-1} 0.9) = 36.3 \text{ KVAR}$$

$$Q_{tot} = 0 - 125 + 36.3 = -88.7 \text{ KVAR}$$

$$S_{tot} = \sqrt{P_{tot}^2 + Q_{tot}^2} = \sqrt{250^2 + 88.7^2} = 265.3 \text{ KVA}$$

$$PF = \frac{P_{tot}}{S_{tot}} = \frac{250}{265.3} = 0.94 \text{ lagging}$$

لاحظ أن المحرك الحثي يسحب قدرة غير فعالة ( إشارة  $Q_2$  سالبة ) بينما المحرك المتزامن يعطي قدرة غير فعالة ( إشارة  $Q_3$  موجبة )

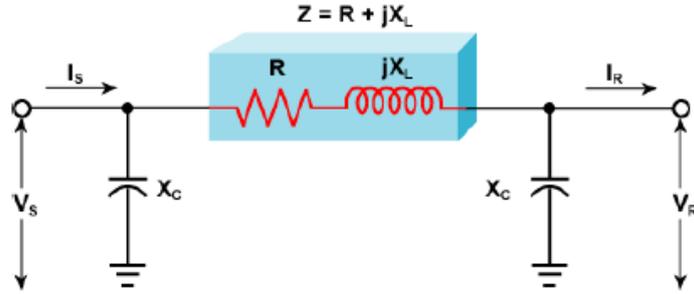
## 3-11 معوضات القدرة غير الفعالة

بدلاً من جعل الـ Q تسير على الخط الناقل بين المصدر والحمل فإننا نركب أجهزة بتقنيات متنوعة لنحصل منها على الـ Q المطلوبة عند الحمل مباشرة بدلاً من الحصول عليها من مصدر القدرة ، وهذا يعنى أن الخط الواصل بين المصدر والحمل سيصبح مخصصاً للقدرة الفعالة فقط وبالتالي تتحسن مشكلة الهبوط في الجهد . إضافة إلى أن المصدر لم يعد مطالباً بإمداد الحمل بالـ Q وهذا سيجعل  $S = P$  ومن ثم يمكن تغذية أحمال أخرى.

وقد ظهرت هذه التقنيات مع ظهور مايسمى بـ Flexible AC Transmission System, FACTS ، أو منظومة نقل التيار المتردد المرنة ، وهي ببساطة مجموعة تقنيات (أجهزة) متنوعة تعتمد على استخدام معدات إلكترونية عالية القدرة high Power مثل الـ SCR وذلك مع أساليب التحكم المتطورة من أجل التحكم أساساً في الـ Reactive Power بالإضافة للتحكم أيضاً في القدرة الفعالة وقيمة الـ X وقيمة الـ Phase Angle بين المحطات .

## 11-3-11 الفرق بين مرور الـ P ومرور الـ Q في الخطوط

في الشكل 11-11 نموذج مبسط لخط نقل



شكل 11-11:

فإذا فرضنا أن مقاومة الخط مهملة ، فإن القدرة الفعالة وغير الفعالة المولدة من المصدر ، والمستقبلية بواسطة الأحمال تمثل بالمعادلات التالية:

$$P_S = \frac{V_S V_R}{X_L} \sin \delta \quad (11 - 10)$$

$$Q_S = \frac{V_S^2 - V_S V_R \cos \delta}{X_L} - \frac{V_S^2}{X_C} \quad (11 - 11)$$

$$P_R = \frac{V_S V_R}{X_L} \sin \delta \quad (11 - 12)$$

$$Q_R = \frac{-V_R^2 - V_S V_R \cos \delta}{X_L} - \frac{V_R^2}{X_C} \quad (11 - 13)$$

ومن هذه المعادلات يتبين:

1- أن القدرة الفعالة الصادرة من المصدر والقدرة الواصلة للحمل متساويتان (بإهمال مقاومة الخط)

2- أن هناك فرق بين القدرة غير الفعالة الصادرة والواصلة حيث  $Q_R \ll Q_S$

- 3- لا يمكن نقل الـ Q لمسافات طويلة على الخطوط حيث تتميز هذه الخطوط بارتفاع نسبة  $X/R$  وهذا يعنى أن الخطوط نفسها صارت " Big Sink " أى تبتلع كمية كبيرة من الـ Q حيث  $I^2 X$  المستهلكة فى الخط كبيرة جدا وبالتالي صارت كفاءة النقل ضعيفة جدا.
- 4- يترتب على الملاحظة السابقة أن الحل الوحيد لتعويض الـ Reactive Power هو استخدام تقنيات لمعوضات محلية عند نقاط الأحمال.

### 11-3-2 الهدف من استخدام هذه التقنيات :

- 1- زيادة القدرة المنقولة من القدرة الكهربائية لتصل إلى الحدود القصوى للتحمل الحرارى لتلك الخطوط وذلك بجعلها مخصصة فقط لنقل القدرة الفعالة ، وبدون أن تحملها بالقدرة غير الفعالة . وهذا يعنى عدم الحاجة لإضافة خطوط جديدة قد تحتاج لأراضى وأبراج وموصلات وخلافه.
- 2- تحسين الجهود عند نقاط الشبكة المختلفة .
- 3- التحكم فى مسارات القدرة دون الاضطرار لإنشاء محولات Phase Shifting مثلا.
- هذه الأجهزة تتركب على خطوط نقل القدرة ذات التيار المتردد فتساهم بمرونة وسلاسة فى التحكم فى القدرة المنقولة عبر خطوط التيار المتردد ، على سبيل المثال يمكنها أن تتحكم فى الـ Reactive Power المنقولة عبر هذه الخطوط ومن ثم تزيد من استقرار جهد المنظومة الكهربائية.
- و حيث أن المنظومة الكهربائية التقليدية من مولدات ومحولات وخطوط وغيره لا يمكن تغيير الـ Parameters الرئيسية بها مثل الجهد والمعاوقة Impedance والـ Phase Angle إلا من خلال فتح قواطع أو غلقها أو تركيب خطوط/مولدات/محولات جديدة وكل هذه أمور مكلفة جدا وتحتاج لوقت وأراضى واستثمارات ، أما مع استخدام هذه الأجهزة الحديثة فيمكن تحقيق نفس الأهداف ولكن إلكترونيا باستخدام تقنيات ومعدات الـ Facts ومن هنا سميت بهذا الاسم ويعنى Flexible Ac Transmission Systems أو الخطوط المرنة لنقل التيار المتردد.

### 11-3-3 التحكم فى عناصر الشبكة

ولتنفيذ الأهداف السابقة على أرض الواقع ، هناك العديد من الأجهزة التى يمكن استخدامها. منها على سبيل المثال:

#### 1- أجهزة تقليدية مثل :

1. Synchronous Generator
2. Synchronous Motors

3. Shunt Reactors

4. Series Capacitors

5. Shunt Capacitors

2- - أجهزة حديثة تندرج ضمن مجموعة الـ FACTS مثل:

6. Static VAR Compensator, SVC

7. Static Synchronous Compensator, STATCOM

8. Static Synchronous Series Compensator, SSSC

9. Unified Power Flow Controller, UPFC

وهذه الأجهزة - سواء القديمة أو الحديثة - تساعد في التحكم في قيم ثلاثة عناصر رئيسية هي:

1- الجهد

2- الـ Phase angle

3- المعاوقة X

وسنرى في هذا الفصل أن الأجهزة التسعة السابقة يمكنها التغيير والتحكم في القيم الثلاثة السابقة كما أنها تتشابه جميعاً في امتلاك القدرة على التحكم في قيم الـ Reactive Power ، ولذلك يطلق عليها مصطلح عام هو : "معوضات القدرة غير الفعالة" أو Reactive Power Compensators .

والفرق بين الأجهزة التقليدية ( من 1 إلى 5 ) والأجهزة الحديثة ( من 6 إلى 9 ) هو أن التقنية الحديثة تحقق كل الأهداف بتكلفة ومفايد أقل كثيراً من الأساليب التقليدية.

فكيف يتم التحكم في الـ Reactive Power ؟ هذا ما سنعرضه بأسلوب مبسط للأدوات التسعة السابقة.

## 4-11 الأجهزة التقليدية للتحكم في تدفق Q

تشمل هذه الأجهزة ما يلي:

### 1-4-11 المولدات الكهربائية Electric Generators:

وقد يكون تيار الـ Field في المولد أقل من الطبيعي ومن ثم تسحب المولدات قدرة غير فعالة من الشبكة الكهربائية وقد تكون إثارة المولدات أى تيار الـ Field أعلى من الطبيعي ومن ثم تدفع المولدات قدرة غير فعالة تغذى بها الشبكة ، ولكن القدرة غير الفعالة Reactive Power التي يعطيها المولد أو يمتصها

محدودة دائما بقدرة المولد وفقا لرسم الدائرة circle diagram الخاص بالمولد (شكل 11-9 السابق) ، إضافة إلى أن إنتاج أكبر لقدرة غير فعالة يعنى إنتاج أقل للقدرة الفعالة من نفس المولد ، ولهذا فاستخدام هذا الأسلوب يعتبر محدود الاستخدام.

### 11-4-2 المعوضات المتزامنة Synchronous Compensators:

وهى فى الحقيقة عبارة عن محركات متزامنة Synchronous Motors ولكن غير محملة Unloaded . ولهذا النوع ميزات عديدة منها أن القدرة غير الفعالة Reactive Power التى تولدها لا تتأثر بجهد المنظومة لأن لها مصدر جهد خاص بها ، كما يمكنها توليد من 10 إلى 20 % أكبر من قدرتها الاسمية لمدة نصف ساعة ، ولكن يعيبها التكلفة العالية وكثرة أعطالها وبطء استجابتها للتغيرات مقارنة بالأنواع الحديثة.

لاحظ أنه محرك من النوع الـ Synchronous يشبه فى تركيبه المولدات المتزامنة تماما لكن يختلف فى شئئين :

- الأول : أنه غير محمل بأى أحمال ومن ثم لا يستهلك أى P مطلقا
- الثانى هو طريقة التحكم فى المجال المغنطيسي له الذى يمكن عن طريق التحكم فيه أن نتحكم فى كمية الـ VAR التى ينتجها ومن ثم فهو لا ينتج سوى قدرة غير فعالة وبقيمة متغيرة وأسلوب التغيير سلس وناغم على عكس الـ Shunt Cap/Ind الذى يحتاج إلى CBs أو Contactors للتحكم فى عدد المكثفات/الملفات التى تدخل أو تخرج من الخدمة.

لاحظ أن عدم إنتاجها لأى P يعنى أنها تنتج Q بمدى أو كميات أكبر بكثير من المولد التقليدى ، علاوة على أنها تصنع بتصميم خاص فتصبح أقل تكلفة من المولدات الكهربائية التقليدية التى تنتج P and Q

### 11-4-3 استخدام Shunt Reactors :

تستخدم هذه الـ Reactors مع شبكات الجهد العالي ويمكنها امتصاص الـ Reactive Power الزائدة والتى غالبا تكون من النوع الـ Capacitive وناتجة عن وجود أطوال كبيرة من الكابلات أو خطوط طويلة مع انخفاض فى الأحمال ومن ثم تتسبب فى ارتفاع الجهد مالم يكن هناك وسيلة مثل الـ Shunt Reactors وتوصيلها على الشبكة فى هذه الأوقات لامتناس هذه الـ Reactive Power لكن يعيب هذه الطريقة الحاجة لتركيب CBS مكلفة ، خاصة فى الجهود العالية ، كما أن هناك مشكلة أنه قد يحدث ارتفاع مفاجئ فى الـ Reactive Power نتيجة فصل مفاجئ لأحد الأحمال قبل توصيل الـ

Shunt Reactors (شكل 11-12) فى الخدمة. والبديل ليس مقبولا وهو توصيلها بشكل دائم حيث سنحتاج لعمليات فصل وتوصيل متعددة حسب تغير الأحمال.

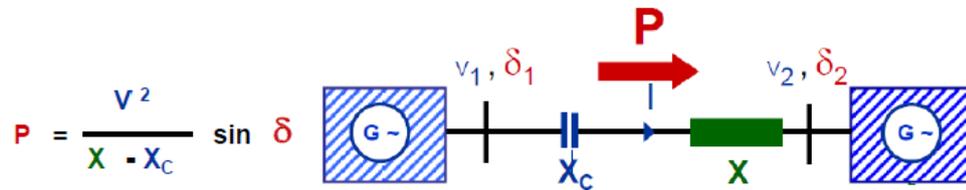


شكل 11-12:

#### 11-4-4 : استخدام الـ Series Capacitors

تركب هذه المكثفات على التوالي مع الشبكة (شكل 11-13) ومن ثم تودى إلى تناقص الـ  $X$  المكافئة ومن ثم تزايد القدرة المنقولة عبر نفس الخط أو تزايد إمكانية النقل لمسافة أطول لنفس القدرة. وكون أن هذه المكثفات موصلة على التوالي يعنى أن الـ Reactive Power المولدة ستتناسب طرديا وأتوماتيكيا مع زيادة التحميل وهذا يعنى تنظيم أفضل للجهد.

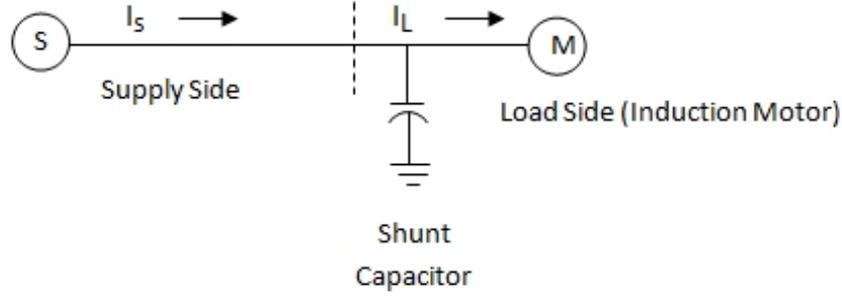
لكن يعيب هذه الطريقة حدوث ارتفاع فى الجهد مع التحميل الخفيف مما يتطلب تركيب Shunt Reactors بصفة مستمرة وهذا بالطبع سيقبل من القدرة المنقولة وبالتالي يقلل من أهمية هذا الأسلوب . كما أن هناك احتمالات كبيرة لحدوث Resonance ومرور تيارات عالية مدمرة.



شكل 11-13:

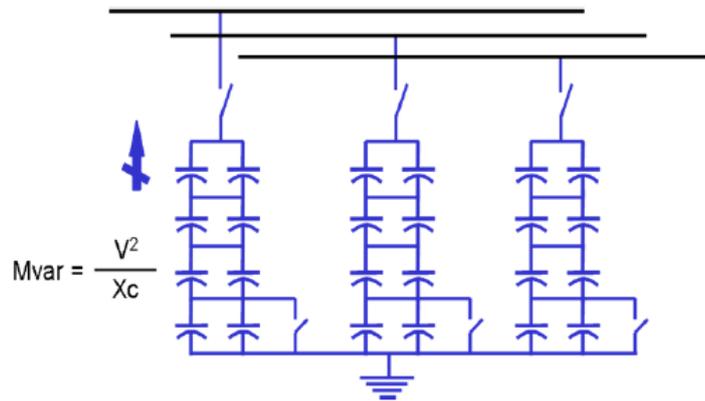
## 5-4-11 استخدام الـ Shunt Capacitors :

في هذا الأسلوب تستخدم المكثفات على التوازي ، وتكون عادة موصلة بصورة دائمة ومركبة بالقرب من الأحمال الكبيرة التي لها معامل قدرة منخفض كما في الشكل 11-14 .



شكل 11-14:

وهنا تكون الـ Reactive Power حساسة جدا للتغير في الجهد (تتناسب مع مربع الجهد) كما في المعادلة التي تظهر مع الشكل 11-15 ، فعند انخفاض الجهد سيحدث انخفاض في الـ Reactive Power المولدة من هذه المكثفات وهذا عكس ما نريد ، فنحن نريد Q عالية عند انخفاض الجهد لتحسينه ، ومن ثم فهذا عيب خطير في هذا الأسلوب كما أن مشكلة الخوف من حدوث الرنين مازالت قائمة كما في الأسلوب السابق.



شكل 11-15

والمشكلة الأخرى هذا الأسلوب هي الحاجة لقواطع تتحمل الارتفاع في الجهد نتيجة عملية الـ Switching كما في الشكل 11-15.

## مثال 11-3

حمل متصل بخط 220 V ، 50 HZ قدرته 4 KW و معامل القدرة PF يساوي 0.8 lagging . نريد رفع معامل القدرة إلي 0.95 عن طريق توصيل مكثف علي التوازي معه. إحسب سعة المكثف.

الحل

$$PF_1 = \cos \varphi_1 = 0.8 \quad \therefore \varphi_1 = 36.87$$

$$S_1 = \frac{P}{\cos \varphi_1} = \frac{4000}{0.8} = 5000 \text{ VA}$$

$$Q_1 = S_1 \times \sin \varphi_1 = 5000 \times \sin 36.87 = 3000 \text{ VAR}$$

$$PF_2 = \cos \varphi_2 = 0.95 \quad \therefore \varphi_2 = 18.19^\circ$$

$$S_2 = \frac{P}{\cos \varphi_2}$$

$$S_2 = \frac{P}{\cos \varphi_2} = \frac{4000}{0.95} = 4210.5 \text{ VA}$$

$$Q_2 = S_2 \times \sin \varphi_2 = 4210.5 \times \sin 18.19^\circ = 1314.4 \text{ VAR}$$

الفرق بين  $Q_1$  القديمة و  $Q_2$  الجديدة هو قيمة  $Q_c$  التي يخرجها المكثف.

$$Q_1 - Q_2 = 3000 - 1314.4 = 1685.6 \text{ VAR}$$

$$Q_c = \frac{V^2}{X_c} = V^2 \times \omega \times C$$

$$\therefore C = \frac{Q_c}{\omega \times V^2} = \frac{1685.6}{2\pi \times 50 \times 220^2} = 110.86 \mu F$$

## مثال 4-11

مولد يغذي حمل 300 KW عند معامل قدرة  $PF = 0.6$  lagging . إذا تم رفع معامل القدرة إلى 1 ، ما مقدار الزيادة في P التي يستطيع المولد إعطاؤها لنفس ال KVA نتيجة لتصحيح معامل القدرة ؟

الحل

$$S_{gen} = \frac{P}{PF} = \frac{300}{0.6} = 500 \text{ KVA}$$

$$P_{gen1} \text{ at } 0.6 \text{ PF} = 300$$

$$P_{gen2} \text{ at } 1 \text{ PF} = 500 \times 1 = 500 \text{ KW}$$

القدرة الفعالة المضافة نتيجة تصحيح معامل القدرة هي :

$$P = P_{gen2} - P_{gen1} = 500 - 300 = 200 \text{ KW}$$

يمكن استخدام هذه القدرة الفعالة المضافة للمولد لتغذية حمل آخر .

## 5-11 ثانياً : أجهزة الـ FACTS

هذه المنظومة تستخدم مع شبكات النقل وتتميز عن الأساليب السابقة في أنها تشتمل على مكثفات و ملفات في وقت واحد ومن ثم فهي قادرة على إنتاج Capacitive/ Inductive Reactive Power ، وتتميز أيضاً بسرعة رد الفعل والاستجابة السريعة لأي تغير في الجهد سواء بالزيادة أو النقصان لأن التحكم في كمية الـ Q يتم عن طريق SCR – Control Circuits وهي أسرع من الـ Switched Capacitors المستخدمة في الأنواع التقليدية.

والأجهزة التالية هي عناصر تستخدم ضمن منظومة الـ FACTS أي المنظومة المرنة لنقل التيار المتردد. و هذه الأجهزة هي:

## 11-5-1 أجهزة المعوضات الثابتة SVC

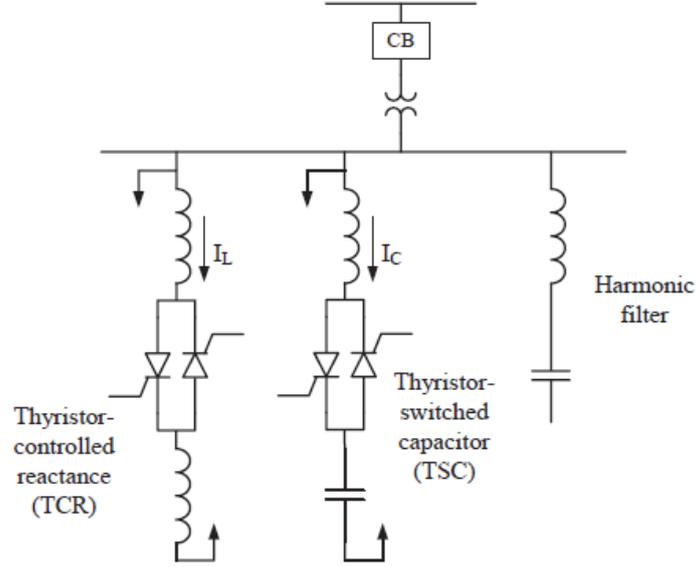
وهو أبسط أنواع الـ Facts هي الـ Static VAR Compensators ، حيث يتكون من مكثفات/ملفات مركبة على التوازي Shunt Capacitors/Inductors ، والفرق هنا عن الحالات التقليدية أنهما يركبان معا في نفس الوقت و يمكن إجراء عمليات فصل وتوصيل لأي منهما وبأى نسبة بواسطة ثايرستورات محكومة بدوائر تحكم.

ويتم تركيب الـ SVC عندما يكون هناك تغييرات كبيرة في الجهد في أزمنة قصيرة ، وغالبا ما تكون مثل هذه المشكلة في الأحمال الصناعية .. أما بالنسبة لشبكات النقل فإنه قيم الجهود لا يحدث بها تغيرات كبيرة وسريعة إلا في وجود الأحمال الصناعية كثيفة الاستهلاك للقدرة الكهربائية وذات طبيعة ترددية عالية ، فعندها إذا لم تتمكن الشبكة (وحدات التوليد المحيطة) بالمحافظة على قيم الجهود في الحدود المسموح بها أثناء حدوث هذه التغييرات في الحمل فإنه يتم اللجوء إلى الـ SVC لمواكبة التغيرات السريعة في الجهود والمحافظة عليها في الحدود الآمنة .. أما إذا كانت هذه التغيرات بطيئة (أحمال منزلية أو تجارية أو منشآت خدمية ...) ولم تسطع الشبكة أيضا المحافظة على قيم الجهود في هذه المنطقة نظرا لبعدها عن أماكن الإنتاج أو لأي سبب آخر فإنه يتم الاكتفاء فقط بتركيب Inductors أو مكثف متغير القيمة ذو (Steps) ، ويتم الدخول بها تدريجيا عند الحاجة فقط وذلك لأن التغييرات هنا لا تحتاج إلى السرعات العالية كما في .. SVC .

ومصطلح الـ SVC يتضمن تحته ثلاثة أنواع:

- 1- Thyristor-Controlled Reactors (TCR).
- 2- Thyristor-Switched Capacitors (TSC).
- 3- Thyristor-Switched Reactors (TSR).

يظهر النوعان الأول والثاني منهم في الشكل 11-16 .



شكل 11-16:

ويتم التحكم في قيمة الـ Reactance عن طريق التحكم في درجة توصيل الـ SCR . لاحظ ضرورة وجود محول بين SVC وبين الشبكة لأننا لا نستطيع تركيبه مباشرة على الجهد العالي بسبب محدودية الجهود التي تعمل بها أجهزة الـ SCR حتى الآن. والشكل 11-17 هي لمجموعة مكثفات في إحدى محطات الجهد العالي في السعودية.



شكل 11-17:

ويمكن أن نرى أننا حققنا عدة مكاسب من استخدام الـ SVC:

- 1- القيمة متغيرة أتوماتيكيا وبسهولة حسب تغير وضع الأحمال
- 2- لا حاجة لوجود CB مكلفة
- 3- يمكن توليد قدرة غير فعالة من خلال Thyristor Switched Capacitor, TSC ويمكن أيضا من نفس الجهاز امتصاص الـ Reactive Power بواسطة Thyristor Controlled Reactor, TCR
- 4- بمعنى أنها أصبحت كما لو كانت X متغيرة (لاحظ الاسم Flexible)

لكن يعيب هذا النوع :

- التكلفة العالية
- محدودية القدرة حسب أحجام المكثفات والـ Inductors المتاحة بالموقع
- تأثر القدرة غير فعالة الـ Capacitive بانخفاض الجهد وبالتالي يقل المنتج منها.

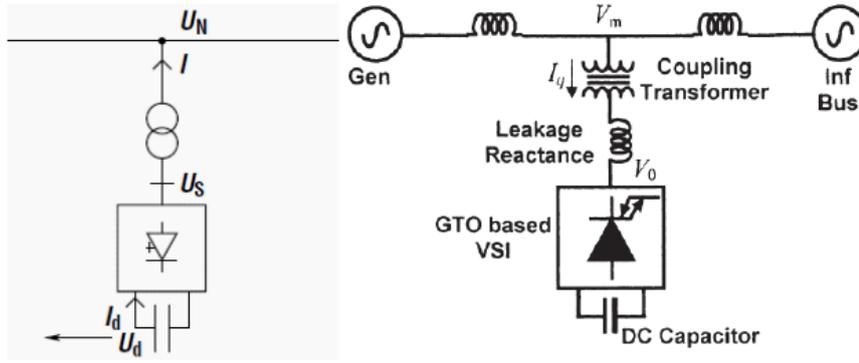


شكل 11-18 : SVC ±250 MVAR in Brazil

### 11-5-2 أجهزة الـ STATCOM :

وتعنى Static Synchronous Compensator وهي تطوير للـ SVC السابق شرحه ، وهو عبارة عن Inverters لكنها لا تستخدم الثايرستور العادى بل تستخدم نوعا أحدث وهو Gate Turn Off , GTO ، حيث التحكم فى هذا النوع أسرع وأسهل من النوع التقليدى ، لكن الأهم من ذلك هو أننا هنا لا نستخدم مكثفات ولا Reactors وفى نفس الوقت ننتج ونستهلك قدرات غير فعالة. فكيف يتم ذلك؟

الفكرة هنا هو استخدام دوائر تحكم فى الـ Inverter بحيث ينتج جهدا وتيار (من بطاريات ومجموعة صغيرة من المكثفات) بحيث تكون الـ Phase angle بين الجهد والتيار الناتجين إما 90 درجة Lead أو 90 درجة Lag ، شكل 11-19 ، وهذا يعنى أننا أنتجنا قدرة غير فعالة Capacitive or Inductive بدون أن نستخدم مكثفات ولا ملفات. وهذه هى الميزة الأهم لأجهزة الـ STATCOM حيث يترتب على هذه الميزة ميزات أخرى منها صغر الحجم والحاجة لمساحة أقل حيث لا نحتاج لملفات ولا لمكثفات (سوى ما لا يزيد عن 12% من المكثفات التى كانت تستخدم فى الـ SVC وهى هنا ليست بغرض توليد قدرة غير فعالة ولكن بغرض إكمال دائرة الـ Inverter )

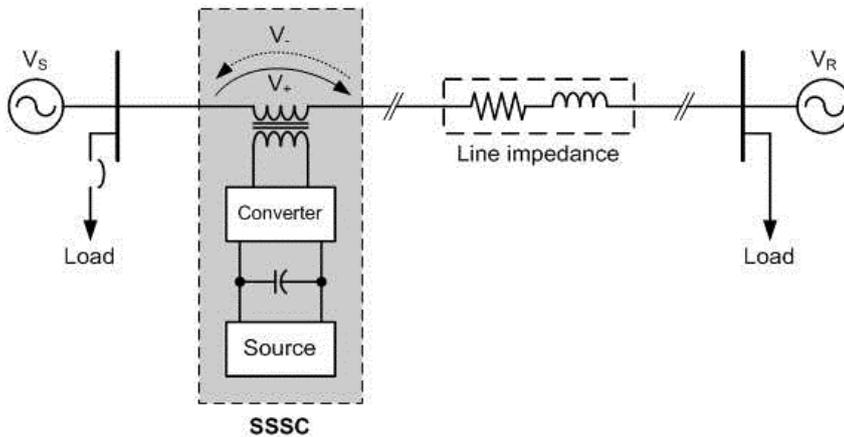


شكل 11-19:

ويتميز أيضا بأنه لا يتأثر بجهد الشبكة عند توليد Capacitive Reactive Power ، وهذه الأجهزة موجودة بالخدمة منذ الثمانينيات.

### 11-5-3 أجهزة الـ Static Synchronous Series Compensators

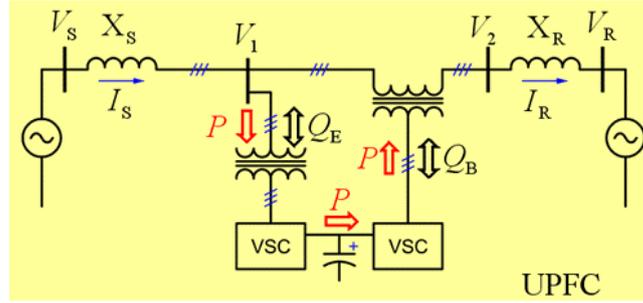
وتسمى المعوضات الثابتة الموصلة على التوالي SSSC ، وهو يشبه تماما الـ STATCOM ولكنه يركب على التوالي مع الشبكة وليس على التوازي (شكل 11-20) ومن ثم يعمل على تغيير الـ X المكافئة ومن ثم يمكننا زيادة/أو تقليل القدرة المنقولة عبر الخط دون الحاجة إلى إجراء تغيير في الخطوط. ويتميز عن الـ Series Capacitors أنه لا يتأثر بقيمة التيار المار في الدائرة ومن ثم فمجالات استخدامه أوسع.



شكل 11-20:

### 4-5-11 منظم سريان القدرة الموحد Unified Power Flow Controllers

هذا الجهاز هو عبارة عن الجهازين السابقين معا أى يركب على التوالي والتوازي ( شكل 11-21) ، ومن ثم يجمع ميزات كلا النوعين ومن هنا جاءت تسميته بمنظم سريان القدرة الموحد.



شكل 11-21:

# الباب الثالث

## محطات التحويل الكهربائية

## 12

## مقدمة عامة عن محطات التحويل

معلوم أن الطاقة المولدة في محطات التوليد يتم نقلها إلى مراكز التوزيع من خلال منظومة لنقل وتوزيع الطاقة . وأحد أهم مكونات هذه المنظومة هي محطات التحويل الكهربائية أو الـ Substations .

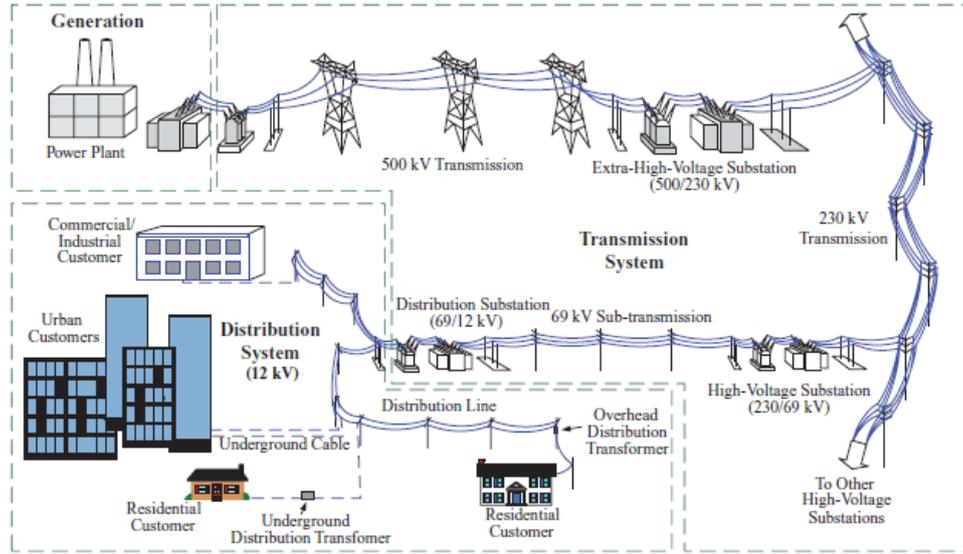
ويمكن أن تعتبر محطات تحويل الطاقة الكهربائية في شبكتي النقل والتوزيع الكهربائي بمثابة المفاصل في جسم الإنسان ، فرغم وجود الأيدي والأرجل والأصابع وغيرها إلا أن كافة هذه الأعضاء تعتمد في عملها على وجود المفاصل ، فهكذا محطات التحويل تربط بين محطات توليد الطاقة الكهربائية المختلفة بعضها البعض ، كما تربط مراكز توزيع الأحمال بمحطات التوليد .

ونظرا لبعدها محطات التوليد عن الأحمال فكان لابد من إنشاء محطات تحويل لرفع الجهد Step Up S/S من أجل تقليل الـ Losses في الطاقة كما هو معلوم ، وهذه النوعية من المحطات ( Step Up S/S ) تقع داخل محطات التوليد . ثم تخرج خطوط الجهد العالي إلى عدد من محطات الجهد العالي أيضا في أماكن أخرى بالدولة بغرض ربط محطات التوليد معا بواسطة شبكات الجهد العالي . ثم هناك ربط بين المحطات ذات الجهود العالية المختلفة لتكوين الشبكة الموحدة .

فعلى سبيل المثال فإن محطات التحويل جهد 500/220 kV ، تربط بين شبكتين مختلفتين في الجهد (شبكة الـ 500 ك ف ، وشبكة الـ 220 ك ف ) ، وهذا النوع من محطات التحويل تسمى Transmission Substations ، حيث تتصل هذه المحطات ببعضها البعض عن طريق خطوط نقل - أرضية أو هوائية - لنقل الطاقة سواء في الدخول عليها أو الخروج منها ، ودورها الأساسي هو ربط محطات التوليد معا لتكوين الشبكة الموحدة التي تحدثنا عنها في الفصل الأول من الكتاب.

ولتوزيع الطاقة المولدة في المناطق القريبة من الأحمال فهذا يتطلب إنشاء نوع آخر من محطات التحويل هو الـ Distribution Substations ، والهدف من هذا النوع من محطات التحويل القريبة من الأحمال هو إعادة توزيع الطاقة الداخلة عليها من عدد محدود من المغذيات عالية الجهد والقدرة ، إلى عدد كبير من المغذيات متوسطة الجهد والقدرة ، لتغذي مساحة جغرافية أكبر .

ثم يكون النوع الأصغر من محطات التحويل والتي تصنف أيضا على أنها Distribution Substations وهي المحطات الموجودة في وسط مناطق الأحمال والتي تحول الجهد المتوسط إلى جهد منخفض ، ويتم التوزيع منها على المستهلكين كما في الشكل 1-12.



شكل 1-12:

## 1-12 أهمية محطات الـ TRANSMISSION S/S

نحن نحتاج إلى ربط شبكات النقل ذات الجهود المختلفة ببعضها البعض من أجل نقل وتبادل الطاقة بين هذه الشبكات حسب الحاجة ، فعلى سبيل المثال هناك في مصر محطات توليد تتصل مباشرة بشبكة الـ 500 kV ، وهناك محطات توليد أخرى ترتبط مباشرة بشبكة الـ 220 kV ، وهذا يعني أن لدينا في كل شبكة منهما مخزون من الطاقة المولدة ليس بالضرورة أن يكون متساويا. ولذا فهذه الشبكات ترتبط ببعضها البعض وتتبادل الطاقة فيما بينها ، وتسمى المحطات حينئذ بمحطات النقل ( Transmission substations ) حيث ترتبط المحطات من هذا النوع بعدد من خطوط النقل.

وبعض محطات النقل يمكن أن يوجد بها Phase Shifting Transformers للتحكم فى الـ Power Flow ما بين الشبكتين. فكما هو معلوم فإن الطاقة المنقولة من محطة لأخرى تحسب من المعادلة :

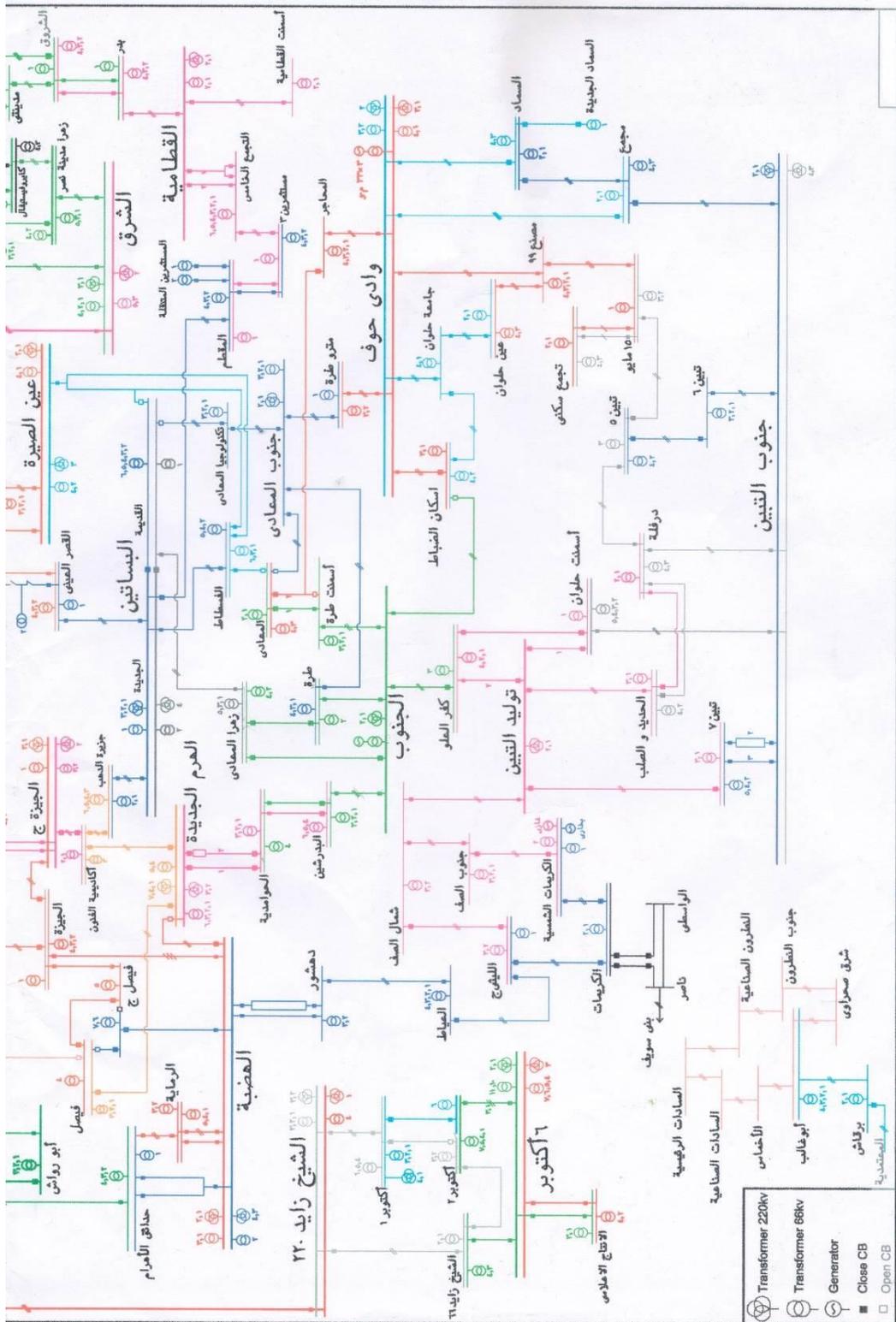
$$P = \frac{V_1 V_2}{X} \sin \delta_{12}$$

وكما هو واضح من المعادلة فإن أحد طرق التحكم فى القدرة المنقولة هو التحكم فى الزاوية بين جهدى المحطتين هى  $\delta_{12}$  التى تعرف بالـ Power Angle ، وهذا يمكن أن يتم من خلال Phase Shifting Transformers . وبالتالي فهذا دور آخر من أدوار محطات التحويل.

### 1-1-12 أمثلة عملية

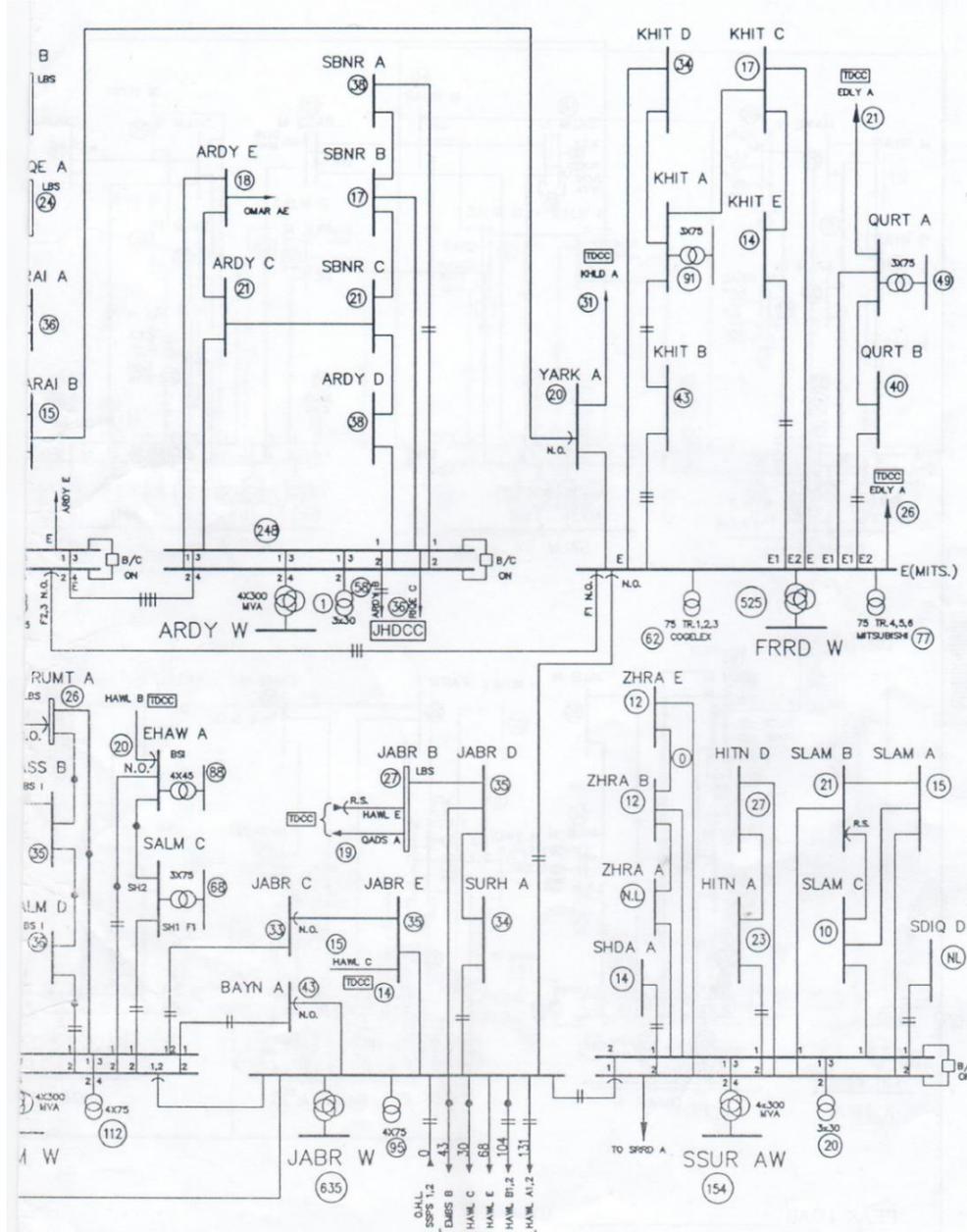
وكمثال لمحطات الربط بين الشبكات ذات الجهد المختلف انظر مثلا إلى محطة محولات "القاهرة 500" فى الشبكة الموحدة التى عرضت فى بداية الباب الأول (شكل 1-7) ، ففى هذه المحطة يوجد محولات بجهد 500/220 kV ، حيث تستقبل هذه المحطة خطوط نقل جهد 500 ك ف من أربع محطات توليد هى : الكريمتات وشمال الجيزة والنوبارية وغرب القاهرة ، وترتبط بخطوط نقل جهد 500 ك ف مع محطات تحويل ليس بها توليد لكن لمجرد الربط مع الشبكات الأخرى مثل محطات باسوس وسمالوط ، كما ترتبط بخطوط أخرى تقع ضمن شبكة الـ 220 ك ف مثل محطات الهرم والمعتمدية و6-أكتوبر (محطة توليد) ، وبالتالي تعتبر محطة للربط بين شبكتى الـ 500 kV والـ 220 kV ، وبالتالي فهى محطة محورية بين شبكتين لهما جهد مختلف وفى كل منهما محطات توليد مختلفة.

وقد يكون من أدوار محطات التحويل مجرد الربط بين محطات من نفس الجهد بغرض تحسين القدرة على عمل مناورات للتغذية أثناء فترات الأعطال أو الصيانة ، كما فى كثير من محطات شبكة الـ 66 ك ف بمصر التى يظهر جزء صغير منها فى (شكل 12-2) حيث تجد كثير من المحطات ترتبط بعدد آخر من المحطات المجاورة وليس بالضرورة أن ترتبط بمحطة توليد مباشرة.



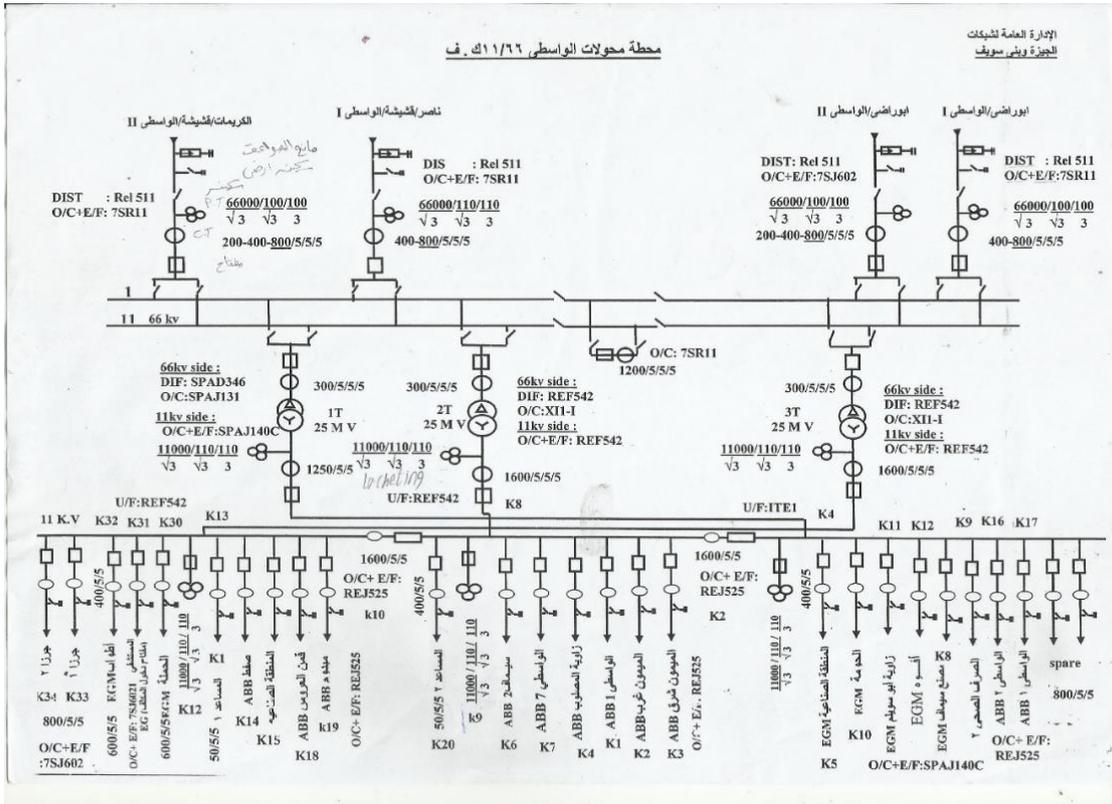
شكل 12-2:

أو كما في الشكل 12-3 ، الذي يمثل جزءا من شبكة الـ 132 ك ف في الكويت ، فمحطة الـ ARDY C مثلا تربط بين محطات الـ ARDY E ومحطة الـ ARDY AW ومحطة الـ SBNR C ، وجميعهم لهم نفس الجهد 132 kV ، وليس فيهم أى محطة توليد ، ولكن الفائدة هنا أننا يمكن تغذية المحطة من عدة جهات حسب ظروف التشغيل.



شكل 12-3:

وقد يكون دور محطة التحويل هو الربط مع محطات من نفس الجهد كما في الأمثلة السابقة لكن في نفس الوقت ترتبط مع شبكة التوزيع على سبيل المثال محطة محولات الوسطى بصعيد مصر (شكل 12-4) ، فهي ترتبط مع محطات الواسطى ومحطة مركز ناصر والكريمات وكلهم على شبكة الـ 66kV من خلال خطوط ربط ، بالإضافة إلى ارتباطها بشبكة الـ 11kV من خلال ثلاثة محولات جهد 66/11kV ، وهذه المحولات الأخيرة يخرج منها ما يقرب من 30 كابل ( من K1 إلى K31 ) إلى الموزعات Distributors المنتشرة بالمدينة كما يظهر في المخطط العام للمحطة.



شكل 12-4:

## 12-1-2 وظائف أخرى لمحطات التحويل

من المقدمة السابقة يمكن أن نصل إلى تحديد أهداف ووظائف محطات التحويل في الشبكة الكهربائية ، ونلخصها هنا فيما يلي :

- 1- ربط وحدات التوليد معا ضمن الشبكة الموحدة .

2- رفع مستوى جهد التوليد إلى مستوى جهد النقل (بهدف تقليل المفقودات Losses بشبكة النقل ) وبالتالي ربط شبكات النقل ببعضها.

3- ربط شبكة النقل بشبكة التوزيع ، حيث يتم خفض مستوى الجهد من مستوى جهد النقل إلى مستوى جهد التوزيع الذى يناسب خدمة المستهلكين الكبار (المصانع مثلا) ، وكذلك خفض مستوى الجهد ضمن الحدود والمتطلبات المناسبة للمستهلك العادى . وهناك كثير من محطات التحويل تحقق الوظيفتين الثانية والثالثة معا.

4- التحكم فى فصل وتشغيل دوائر الخطوط ودوائر المحولات عند الحاجة لإجراء الصيانة والفحوصات المبرمجة أو عند الحاجة للتوسعة والتركيبات الإضافية عن طريق المفاتيح الكهربائية المتواجدة في محطات التحويل والتي يمكن التحكم فيها من داخل المحطات أو من مراكز التحكم المركزية .

وكل هذه الأهداف أو الوظائف يمكن استنتاجها من المقدمة السابقة ، لكن هناك هدفين آخرين سنذكرهما لاحقا حين نتحدث بالتفصيل عن مكونات محطات التحويل . فمن خلال دراسة هذه المكونات سيتبين أنه يوجد داخل محطات التحويل المعدات الخاصة بمهمتين كبيرتين إضافيتين ، هما تنظيم الجهد ، ووقاية المعدات الكهربائية .

5- فأما تنظيم الجهد فيتم عن طريق استخدام Transformer Tap Changer ، أو أجهزة الـ Voltage Regulators ، أو عن طريق توصيل Capacitors or Inductors ، أو باستخدام أجهزة الـ FACTs للتحكم فى قيم الـ Reactive Power من أجل رفع أو خفض قيمة الجهد بالشبكة ، ومعظم هذه المعدات موجودة داخل محطات التحويل . وهناك المزيد من التفاصيل حول هذا الموضوع فى الباب الثانى ، الفصل الحادى عشر : Facts ، وأيضا فى الباب السادس الفصل التاسع والعشرون : استقرار الجهد ، من هذا الكتاب.

6- وأما أنظمة الوقاية الموجودة بداخل هذه المحطات فيمكن من خلالها اكتشاف الأعطال سواء كانت هذه الأعطال بالمعدات الموجودة داخل المحطة أو على الخطوط الخارجة منها أو الداخلة إليها ، وبالتالي فمهمة فصل أى جزء من شبكة النقل أو شبكة التوزيع نتيجة الأعطال أو نتيجة إجراءات الصيانة تقع على عاتق مهمات الوقاية الموجودة داخل محطات التحويل. وسنشير باختصار لأسماء منظومات الوقاية المركبة على العناصر المختلفة بالمحطة دون تفاصيل فى نهاية هذا الباب .

ويمكن الرجوع لكتابي : نظم الحماية الكهربائية في شرح التفاصيل الخاصة بمنظومة الوقاية.

## 2-12 تصنيف محطات التحويل

محطات التحويل يمكن تصنيفها طبقا لعدة معايير . وأهم هذه المعايير هي :

التصنيف حسب العازل المحيط بالأجزاء المكهربة ( هواء ، أو غاز SF6):

1- محطات هوائية أى معزولة بالهواء الجوى Air Insulated Substation, AIS كما

فى الصورة التالية:



2- محطات غازية أى معزولة بالغاز Gas Insulated Substation, GIS كما فى الصورة

التالية:



و تتشابه محطات التحويل الهوائية والغازية في مكوناتهما إلى حد كبير ، والخلاف بينهما يكمن أساسا في نوع العازل (هواء/ SF6 ) المستخدم في عزل مهمات (معدات) منطقة الجهد العالي ، أما باقى مناطق المحطة فمتشابهة تماما في النوعين. مع ملاحظة أن هناك تطابق في أسماء المكونات الموجودة في منطقة الجهد العالي في كلا النوعين من المحطات إلا أن شكل هذه المكونات ومواصفاتها يختلف تماما.

#### التصنيف حسب الجهد:

- محطات تحويل رئيسية 66/220/500 kV ، والمتواجدة ضمن منظومة النقل.
- محطات تحويل فرعية 0.4/22 kV ، أو 0.4/11 kV التابعة لمنظومة التوزيع.

#### التصنيف حسب مكان وجود المعدات :

- خارجية (outdoor type)
- داخلية (indoor type)

في النوع الأول تكون جميع المعدات المحطة في الساحة الخارجية للمحطة ما عدا معدات التحكم والحماية (control & protection Equipment) فإنها تتركب في مبنى التحكم للمحطة (Control Building).

#### التصنيف حسب طريقة تركيب القضبان العمومية:

يتوفر عالميا أنواع كثيرة من محطات التحويل حسب تركيب القضبان العمومية (Bus bar) منها:

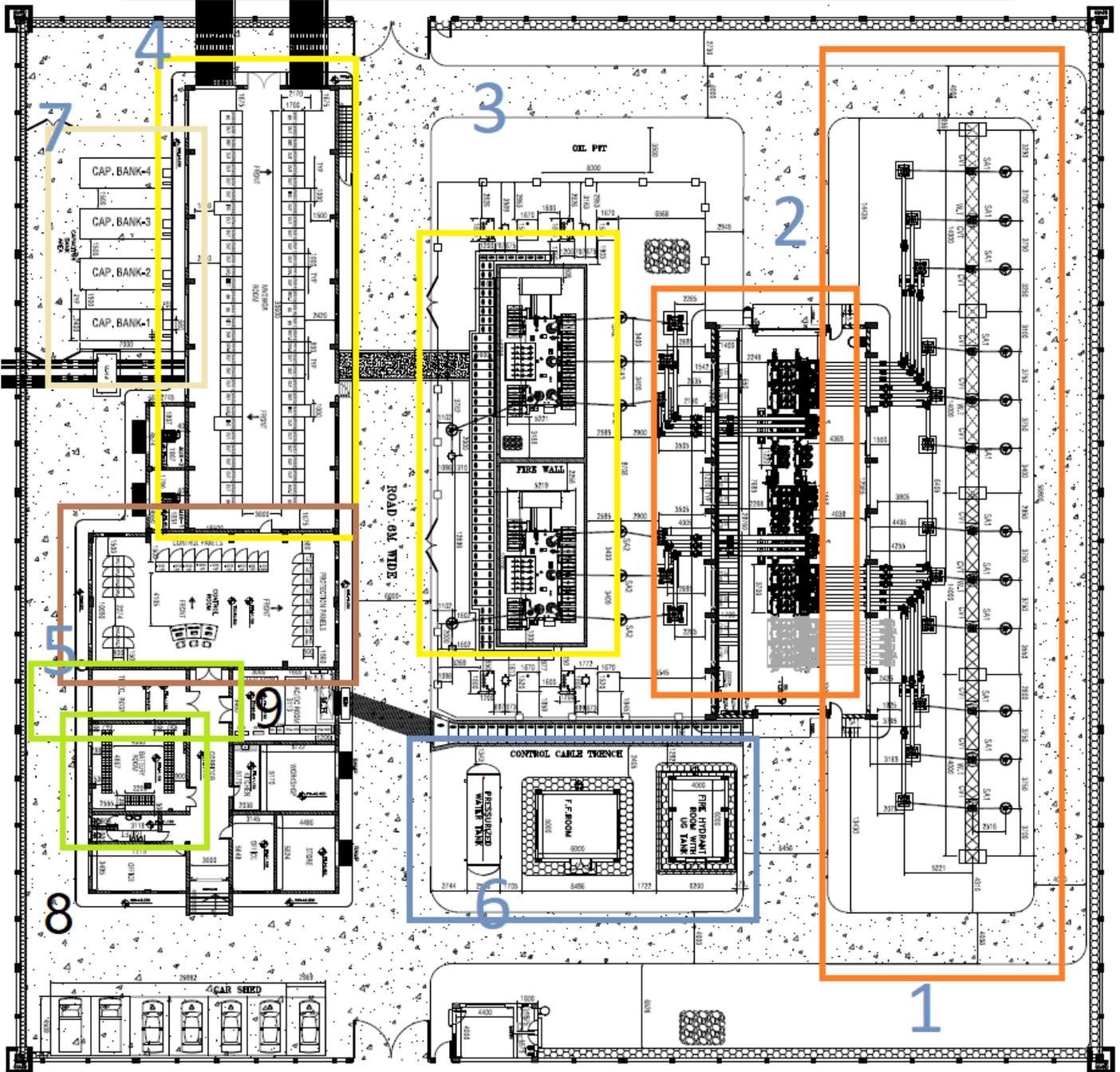
1. (Single Bus-Bar)
2. (Single Bus-Bar with Sectionalizer)
3. (Double Bus-Bar with Single Circuit Breaker)
4. (Double Bus-Bar with Double Circuit Breaker)
5. (Breaker and half with Two Main Buses)
6. (Main and Transfer Bus-Bar)
7. (Mesh or Ring Scheme)

وسيدرس هذا الموضوع تفصيلا في الفصل الرابع عشر من هذا الباب.

## 3-12 الهيكل العام لمحطة التحويل

تتكون محطة التحويل المرتبطة بشبكة النقل (سواء هوائية أو غازية) من مناطق ومنظومات رئيسية (راجع الشكل 12-5) هي :

- 1- منطقة معدات الجهد العالي H. V. Switchgear (مربع رقم 1)
- 2- منطقة GIS Switchgear للتحكم في دوائر الدخول
- 3- منطقة المحولات Power Transformer (مربع رقم 3)
- 4- منطقة معدات الجهد المتوسط M. V. Switchgear (مربع رقم 4)
- 5- منظومة التحكم Control system (مربع رقم 5)
- 6- منظومة إطفاء الحريق. (مربع رقم 6)
- 7- منظومة تنظيم الجهد بواسطة الـ Capacitor Banks
- 8- منظومة الـ DC (غرف البطاريات و الشواحن و لوحات توزيع التيار المستمر DC) (مربع رقم 8)
- 9- منظومة الاتصالات. (مربع رقم 9)
- 10- منظومة الـ Earthing



شكل 5-12

وفيما يلي عرض مختصر وسريع لهذه المناطق و المنظومات قبل التوسع في الشرح فيما بعد.

### 12-3-1 المنطقة الأولى : منطقة معدات الجهد العالي

إذا كانت المحطة من النوع AIS (الهوائية) فإن المنطقة الأولى يطلق عليها منطقة التفريعات ، وهي المنطقة الأكبر مساحة ، وتشتمل أساسا على قضبان توزيع الجهد العالي الـ HV-BB الذى تدخل عليها خطوط الجهد العالي القادمة إلى المحطة ، و خطوط الجهد العالي الخارجة منها ، وبالطبع تتضمن هذه المنطقة العديد من المهمات ( Elements ) المرتبطة بهذه الخطوط والتي تسمى إجمالا معدات HV Switchgear وتشمل العناصر مثل:

Lightning Arrestor, HVCB, VT, CT, Isolators, Earthing Switches, etc.

كما تتضمن هذه المنطقة أيضا الموصلات الخارجة من الـ HV-BB متجهة إلى منطقة المحولات.

أما إذا كانت المحطة من النوع الـ GIS فإن المنطقة الأولى يطلق عليها منطقة الـ High Voltage Switchgear وهي المنطقة الأكبر مساحة فى هذا النوع من المحطات ، وتشتمل على نفس العناصر الموجودة فى محطات الـ AIS ، والفرق فقط أن هذه العناصر تكون مدمجة معا فى وحدة واحدة تسمى الـ Bay كما سنرى. (مصطلح Bay يطلق عموما على مجموعة المعدات التى تتشارك معا لتوصيل خط أو محول على نظام الـ BB بالمحطة).

وتفاصيل هذه المنطقة تدرس فى ( الفصل الثالث عشر ).

### 12-3-2 المنطقة الثانية: منطقة HV Switchgear

فى معظم المحطات ، تكون المنطقة الأولى تشتمل فقط على دوائر الدخول مسندة على Gantry حديد تمهيدا لنزولها لمستوى GIS Switchgear الذى يقع فى المنطقة الثانية من الشكل 12-5 ويشتمل أساسا على القواطع الخاصة بكل دائرة إضافة إلى سكاكين الفصل والتأريض ومحولات التيار والجهد.

### 12-3-2 المنطقة الثالثة: منطقة المحولات

وتشتمل أساسا على محولات القوى الرئيسية فيدخل عليها كابلات الجهد العالي القادمة من منطقة التفريعات ، ويخرج منها كابلات الجهد المتوسط إلى منطقة خلايا الجهد المتوسط . ورغم أن المحولات عنصر أساسي فى محطات التحويل إلا أننا لن نتعرض لها فى هذا الكتاب ، ويمكن الرجوع لكتابتى : المرجع فى محولات القوى الكهربائية لدراستها بالتفصيل.

**12-3-3 المنطقة الرابعة: منطقة خلايا الجهد المتوسط**

تستقبل خلايا دخول الجهد المتوسط Incoming Cells كابلات الجهد المتوسط القادمة من منطقة المحولات ، فيتم توصيلها على الـ MV-BB الذى يربط بين جميع خلايا الدخول والخروج الموجودة بالعنبر .

وهذا الـ MV-BB قد يكون من النوع Single/Double BB ، وبالتالي فإن مهمة هذه المنطقة هي توزيع الطاقة على خلايا الخروج Outgoing cells المتصلة بالـ MV- BB والتي تخرج من المحطة إلى كبار المستهلكين (مصانع / موزعات).

وتفاصيل المنطقة الثالثة تدرس تفصيلا فى الباب الرابع (الفصل التاسع عشر) من هذا الكتاب.

**12-3-5 القسم الخامس: غرفة التحكم**

غرفة التحكم الرئيسية هي التي من خلالها يمكن فصل وتشغيل ومتابعة ومراقبة أى دائرة من دوائر الجهد العالي أو دوائر الجهد المتوسط كما سنرى لاحقا فى هذا الباب (فصل 16) . ويمكن أيضا أن تقرأ المزيد فى الفصل الأخير من الباب الرابع (الفصل 22 ) عند الحديث عن التحكم فى منظومة التوزيع.

**12-3-7 القسم السادس : القسم الخاص بمنظومة إطفاء الحريق .**

و هي تحتوى على جميع المهمات الخاصة بإطفاء الحرائق Fire Fighting, FF مثل تنكات المياه و الضواغط Compressor اللازمة لضخ الماء و ضواغط الهواء الخ.

والأنظمة (الأقسام) الأربعة الأخيرة ستدرس معا فى الفصل الرابع من هذا الباب (الفصل السادس عشر) تحت عنوان الأنظمة المساعدة بالمحطة.

**12-3-4 القسم السابع: منطقة الـ Capacitor Banks وهي المكثفات الخاصة**

بضبط وتنظيم الجهد.

**12-3-4 القسم الثامن: منظومة الـ DC**

ويضم غرفة البطاريات و الشواحن. والمعدات الأساسية التي تحتاج إلى جهد مستمر DC Voltage بالمحطات هي :

1. منظومة الحماية (القواطع والريلهات CB & Relays )

## 2. منظومة الاتصالات

وتحتوى غرفة البطاريات على أكثر من مجموعة من البطاريات. على سبيل المثال:

- a. مجموعة بطاريات دوائر التشغيل و التحكم Control circuits ، و هى التى تمدها أجهزة القطع و التوصيل بالتيار المستمر جهد 220 أو 110 فولت اللازم لتشغيل القواطع ، كذلك تمدها أجهزة الوقاية بالجهد اللازم.
- b. مجموعة بطاريات أجهزة الاتصالات ذات الجهد 110 أو 48 فولت.

## 12-3-6 القسم التاسع : منظومة الاتصالات

و يحتوى هذا القسم على جميع أجهزة الاتصالات التى تربط المحطة بمراكز المراقبة و التحكم Load Dispatch Center ، بالإضافة إلى أجهزة الفصل المعروفة بـ Inter Trip ، حيث تربط أجهزة الحماية فى المحطة بأجهزة الحماية فى المحطات المقابلة لها على نفس الخط والذي يطلق عليها أيضا Tele Protection.

## 12-3-8 القسم العاشر : منظومة الـ Earthing

وهذه المنظومة تدرس تفصيلا فى فصل خاص من هذا الباب وهو الفصل الخامس عشر.

## 12-4 الأعمال الكهربائية لإنشاء محطة تحويل

فى نهاية هذه المقدمة أود أن أذكر بشيء من التفصيل عناوين الدراسات و الأعمال الكهربائية اللازمة لإنشاء محطة تحويل. حيث تتضمن عملية تصميم محطة تحويل الأعمال / الحسابات / الدراسات الكهربائية التالية:

- ❖ اختيار محولات القدرة لرفع أو خفض الجهد (step up or step down transformers)
- ❖ اختيار ترتيب قضبان التوزيع Bus Bar arrangement
- ❖ اختيار أجهزة الفصل وسكاكين الأرضي (Isolators and grounding switch)
- ❖ اختيار محولات القياس (CT & VT) Instrument transformers
- ❖ اختيار محولات الحماية (CT & VT) Protection transformers

- ❖ اختيار أجهزة القطع Circuit Breaker
- ❖ اختيار كابح الصواعق Lightning arrestors
- ❖ اختيار نظم الحماية Protective relaying schemes
- ❖ اختيار أجهزة تعديل الجهد Voltage regulating equipment
- ❖ اختيار منظومة الكابلات
- ❖ اختيار منظومة التحكم Control System
- ❖ اختيار نظم التأريض Earthing System
- ❖ اختيار نظم الإضاءة Illumination System
- ❖ اختيار نظم الحماية من الحريق ونظم الإنذار Fire Fighting and Fire Alarm systems
- ❖ اختيار وسائل الاتصالات Communication Systems
- ❖ اختيار وسائل التغذية الإضافية Auxiliary supply
- ❖ اختيار ( الغلق التبادلي ) Interlocks
- ❖ اختيار منظومة الـ DC Supply ( البطاريات والشواحن )

ولكى يقوم المصمم بتحديد هذه الاختيارات ، فإن عليه أن يأخذ فى الاعتبار مجموعة من الاعتبارات.

منها اعتبارات تخص المنظومة الكهربائية التى ستدخل عليها هذه المحطة ، مثل تحديد:

#### 1- Primary System Characteristics

- ◦ Local Utility
- ◦ Nominal Voltage
- ◦ Maximum Operating Voltage
- ◦ System Frequency
- ◦ System Grounding
- ◦ System Impedance Data

وهناك اعتبارات تخص توصيف عزل المعدات منها :

## 2- Insulation Requirements

- ◦ (Basic Insulation Level), BIL
- ◦ Insulator and Bushing Creep
- ◦ Minimum Clearances
- ◦ Phase Spacing

علما بأن اختيار مستوى العزل سيحدد كثيرا مساحة المحطة ، وبناء عليه سيتم تحديد الخلوصات Spaces بين الأوجه المختلفة وبين كل وجه والأرض.

وعادة يتم اختيار قيم العزل لمهمات المحطة طبقا للمواصفات القياسية والتي تأخذ في الاعتبار الجهود العالية الخاطفة Impulse voltage التي ستعرض لها المعدات ، والتي عادة تكون إما بسبب فصل وتشغيل الأحمال/المكثفات/المحركات /القواطع ، أو بسبب عطل على أحد الأوجه في الشبكات المعزولة ، أو عند توصيل خط من جهة واحدة (جهة المصدر) بينما جهة الحمل مفتوحة ، ففي كل الحالات السابقة سيحدث نوع من الارتفاع في الجهد على المعدات ، وقد يحدث الارتفاع أيضا بسبب الصواعق الرعدية. (راجع تفاصيل هذه الجزئية في الفصل الأول من الباب السادس (فصل 28) عند الحديث عن الهزات العابرة والـ Surge Voltages في منظومة القوى.

وهناك دراسات هامة مطلوبة للتصميم مثل :

- Short-Circuit Studies
- Protective Device Coordination
- Arc-Flash Risk Assessment
- Motor Starting
- Transient Stability
- Insulation Coordination
- Harmonic Analysis

وهناك اعتبارات تخص التحكم والمراقبة

- Manned or Unmanned
- Fault Recording
- Local & Remote Control
- Automation
- Communication Protocol

## 5-12 خريطة الباب

فى الفصول التالية ، نبدأ فى عرض تفاصيل المحطات :

- فى الفصل التالى (فصل 13) نقدم شرحا لأهم العناصر (الاسم الشائع فى المحطات هو كلمة : المهمات) الموجودة فى القسم الأول من محطات التحويل (الهوائية والغازية) ، ويختم الفصل بمقارنة بين المحطات الهوائية والمحطات الغازية . كما يعرض بسرعة للقسم الثانى (المحولات بدون تفاصيل) ، والقسم الثالث (عنبر الجهد المتوسط والذى يدرس تفصيلا فى الباب الرابع).
- فى الفصل الرابع عشر نقدم شرحا لأنظمة قضبان التوزيع المختلفة بالمحطات ، وميزات وعيوب كل نوع.
- فى الفصل الخامس عشر نقدم شرحا تفصيليا لتصميم منظومة الأرضى .
- فى الفصل السادس عشر نقدم شرحا لبقية أقسام المحطة بدءا من القسم الرابع ( منظومة الـ DC ) ، والقسم الخامس (التحكم والمراقبة) ، و القسم السادس (الاتصالات) ، والقسم السابع (إطفاء الحريق).

## 13

## المعدات الرئيسية في محطات التحويل

## Substation' High Voltage Equipment

في هذا الفصل سنتتبع جميع المهمات Elements/Equipment الموجودة بالمنطقة الجهد العالي (سواء كانت هوائية أم غازية) ، وذلك من خلال تتبع ظهورها في الـ Single Line Diagram, SLD الخاص بالمحطة .

وبالطبع قد تختلف أشكال الـ SLD قليلا من محطة لأخرى كما سنرى لاحقا ، بمعنى أنه ليس بالضرورة أن الشكل 1-13 سيتكرر في جميع المحطات ، بل ستكون هناك بعض الإضافات والحذف ، لكن تظل الخطوط العامة مشتركة في جميع أشكال الـ SLDS . وسنبداً بشرح المخطط أولاً قبل شرح المهمات.

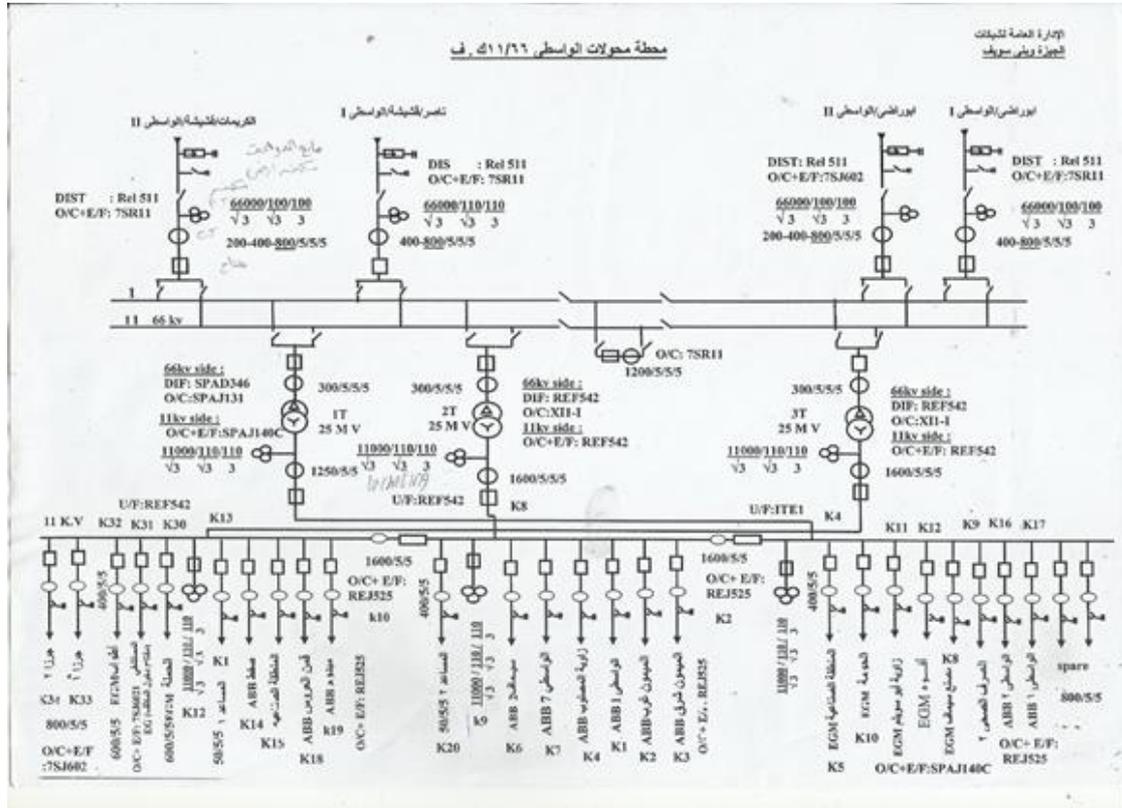
## 1-13 قراءة مخطط المحطة

في الشكل 1-13 نموذج لمحطة تحويل جهد 11/66 تشتمل على أربع دوائر دخول/خروج في منطقة الـ 66 ك ف ثم ثلاثة محولات جهد 11 /66 تغذي منطقة الجهد المتوسط التي تخرج منها أكثر من 30 كابل جهد متوسط إلى الموزعات والمحولات الموجودة في المنطقة الجغرافية المحيطة بالمحطة.

ونشير هنا إلى أنك لا تستطيع من الـ SLD أن تحدد هل هذه المحطة هوائية أم غازية ، لأنه كما ذكرنا سابقا جميع المكونات متشابهة في الاسم والوظيفة والدور المنوط بها في كلا النوعين من المحطات ، وإنما يكون الاختلاف الوحيد في الشكل وأسلوب العزل ، وهل هو هواء أم غاز ، وهذا لا يظهر من الـ SLD.

ويتم ربط المحطة بالشبكة الموحدة من خلال Incoming/Outgoing Feeders ، علما بأن الخطوط إذا كانت قادمة من محطة توليد فإنها تعتبر خطوط دخول فقط ، أما الخطوط القادمة من محطة محولات فهي قد تكون في فترة ما تنقل قدرة إلى المحطة فتعتبر خطوط دخول Incoming ، و قد تكون في فترة

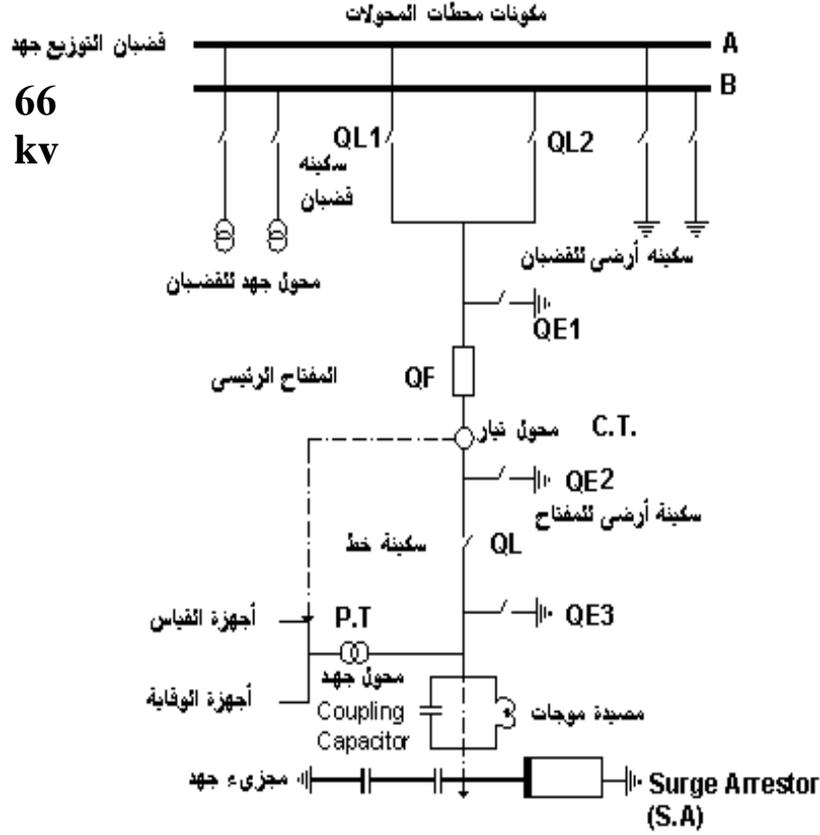
أخرى تنقل قدرة إلى خارج المحطة فتعتبر حينئذ خطوط خروج Outgoing ، و بالطبع لا يمكن أن تكون دخول و خروج في نفس اللحظة .



شكل 1-13

على سبيل المثال في الشكل السابق الذي يمثل محطة محولات الواسطى ببنى سويف لدينا أربع دوائر جهد 66kV، الأولى قادمة من محطة الكريماط وهي محطة توليد ، وبالتالي فهذه الدائرة تعتبر التغذية الرئيسية لهذه المحطة وهي دائما دائرة دخول ، بينما الدائرة الثانية متصلة بمحطة مركز ناصر (وهي محطة محولات) ، والدائرة الثالثة والرابعة متصلين أيضا بمحطة محولات أبو راضى بمدينة الواسطى (وهي محطة محولات) ، وبالتالي فلدينا فقط دائرة وحيدة تعتبر دائرة دخول دائما ، أما الثلاث دوائر الآخر فقد تكون دخول أو خروج حسب ظروف تشغيل الشبكة.

والشكل 13-2 نموذج آخر وضوحا وتفصيلا لـ SLD.



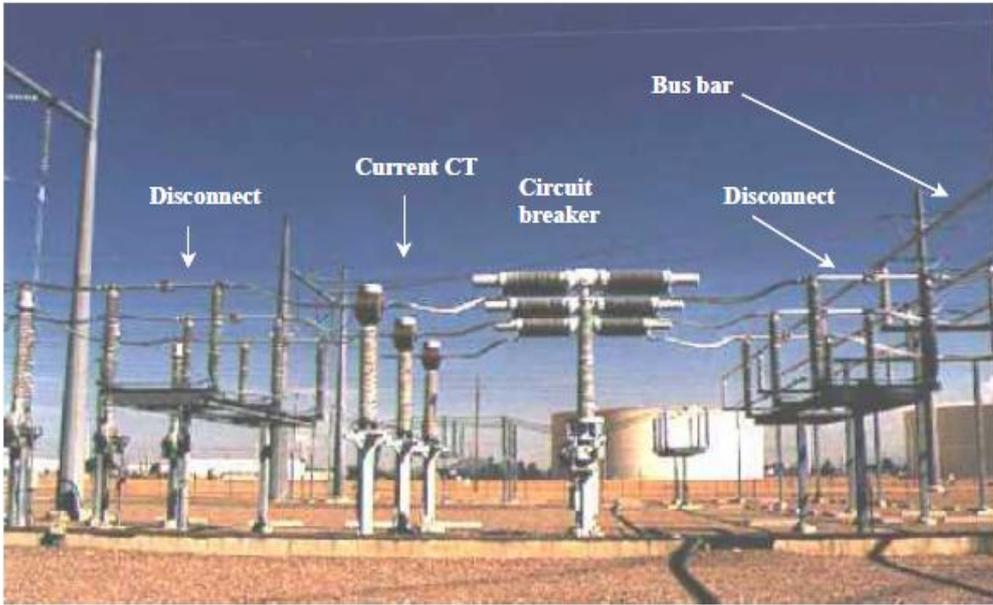
شكل 13-2 :

وترتيب هذه المهمات على الـ SLD من أعلى لأسفل كالتالي:

- |                               |                                       |
|-------------------------------|---------------------------------------|
| Bus bar, A and B              | 1- قضبان التوزيع جهد 66 kv            |
| Potential Transformers        | 2. محول جهد لكل واحد من قضبان توزيع   |
| Earth Switches                | 3. سكينة أرضي لكل واحد من قضبان توزيع |
| Bus bar Isolators QL1 and QL2 | 4- سكينة فصل لكل واحد من القضبان      |
| Earth Switches QE1            | 5- سكينة الأرضي رقم واحد للقاطع       |
| Circuit Breaker (QF)          | 6- القاطع                             |
| Current Transformer (C.T)     | 7- محول التيار                        |

Earth Switches QE2	8- سكينه الأرضي رقم اثنين للقاطع
Potential Transformer (P.T)	9- محول الجهد
Earth Switches QE3	10- سكينه الأرضي للخط
Wave Trap	11- مصيدة الموجات
Surge Arrestor	12- مانعة الصواعق

والشكل 3-13 يظهر الشكل الحقيقي لهذه المهمات Equipment الموجودة داخل محطة هوائية على دوائر الدخول /الخروج في منطقة الجهد العالي.



شكل 3-13 :

وفي الجزء الأول من هذا الفصل نعرض التفاصيل الفنية لكل عنصر من عناصر منطقة الجهد العالي في المحطات الهوائية. ثم في الجزء الثاني سنعرض نفس المكونات لكن في محطات الـ GIS .

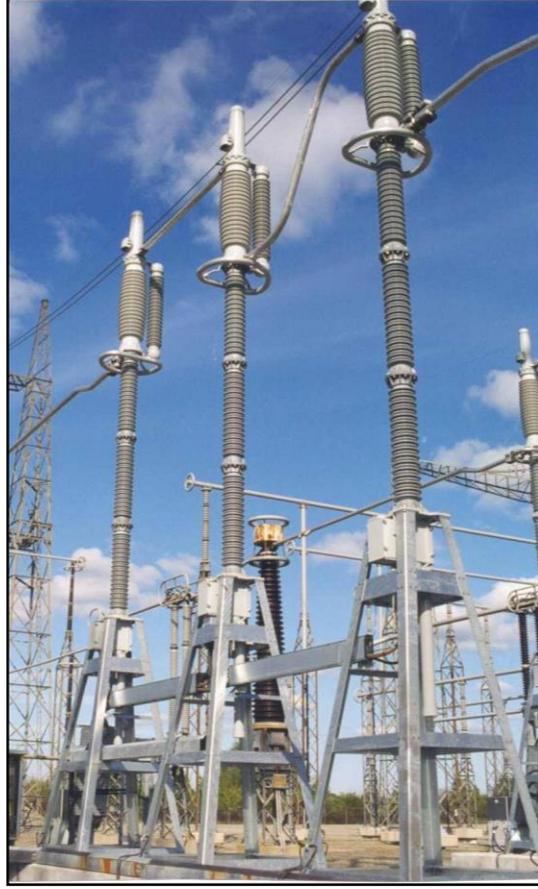
## مهمات منطقة الجهد العالي في محطات الـ AIS

فيما يلي سنعرض أهم المهمات (المعدات) الموجودة في هذه المنطقة:

### 2-13 مانعة الصواعق SURGE ARRESTOR

هي أول عنصر يركب على خط الدخول الهوائي Overhead Transmission line بعد عبوره سور المحطة . والشكل 13-4 تظهر شكلها في الواقع العملي.

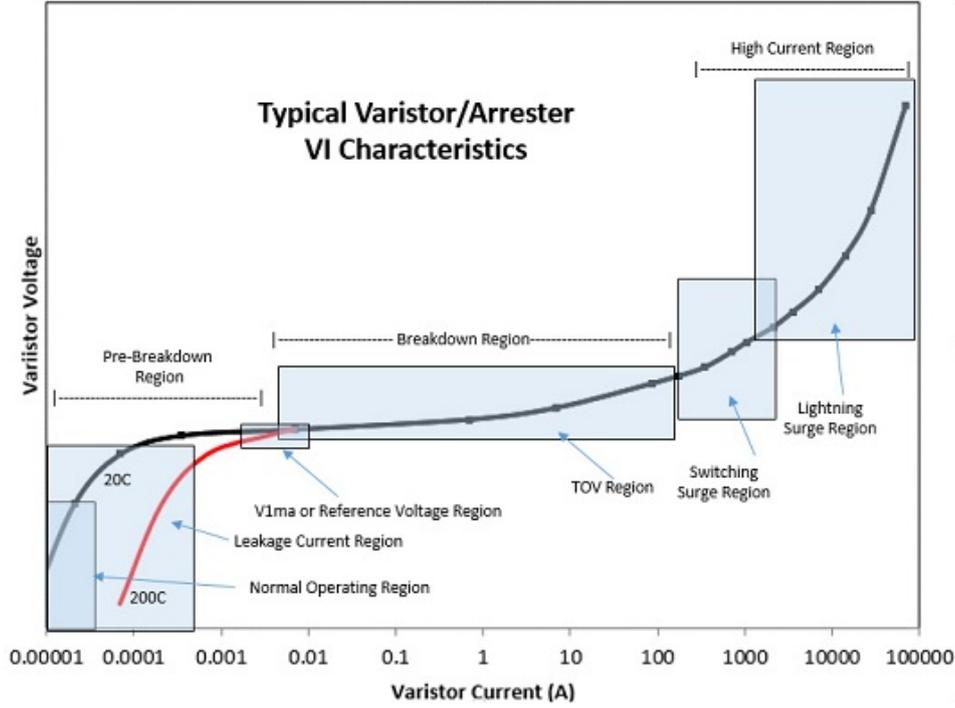
وبالتالي يظهر كأول عنصر على مخطط الـ SLD . أما إذا كان الدخول للمحطة بكابلات أرضية بدلا من الخطوط الهوائية فلن تكون هناك حاجة له ، إذ هو يستخدم لحماية المحطة من الصواعق البرقية التي يمكن أن تدخل إليها بعد اصطدامها بالخط الهوائي مسببة زيادة هائلة في الجهد وقد تدمر هذه الصاعقة المحطة إذا لم يتم منع دخولها بواسطة هذا الـ Surge Arrestor (Lightning Arrestor, LA) وتتميز مانعة الصواعق بارتفاع مقاومتها جدا في الظروف الطبيعية والجهود العادية ، وبالتالي يكون التيار خلالها تقريبا يساوي صفرا ، أما في حالة الجهود العالية الخاطفة Impulse Voltages (مثل لحظات الصاعقة) فتصبح مقاومتها صغيرة جدا ومن ثم تسمح بمرور تيار عالي فتتسرب الصاعقة خلالها قبل الدخول للمحطة.



شكل 13-4 :

والشكل 13-5 يظهر علاقة الجهد والتيار خلالها. لاحظ أن التيار يساوى صفرا مع القيم المنخفضة للجهد (normal operating region) ثم فجأة يرتفع لقيمة عالية مع ارتفاع الجهد عن حد معين ، (lightning surge region)

النقطة الهامة التي يجب أن تذكر هنا أن التيار يعود مرة أخرى للصفر بمجرد انخفاض الجهد ، أي أن المنحنى في الشكل 13-5 يمكن أن تبدأه من أي جهة شئت.



شكل 5-13 :

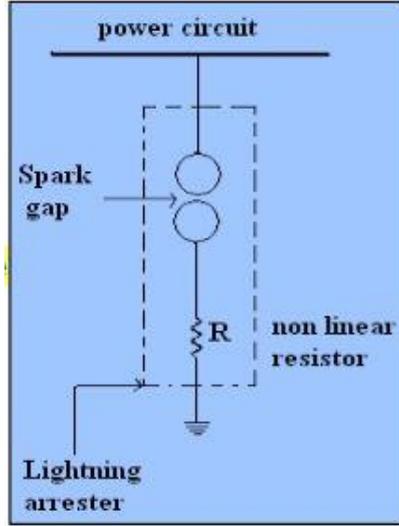
وهناك نوعان من مانعة الصواعق:

- 1 Conventional Gapped Arrester (Valve Type Arrester)
- 2 Metal-Oxide (ZnO) Arrester

### 1-2-13 النوع الأول : (Valve Type Arrester)

هو مانع من النوع الصمامي ، ويتكون هذا النوع من Non Linear Resistor Element مركب على التوالي مع Spark Gap كما في الشكل 6-13.

فأما الـ Non-linear Resistance فتكون قيمتها كبيرة جداً في الحالة العادية أى عند جهد الشبكة الطبيعي . وأما الـ Gap Unit فيكون لديه فراغ Gap بمسافة معينة ، بحيث يكون الـ Arrester غير قادر على توصيل التيار في الحالة العادية. وعند حدوث الصاعقة يزداد الجهد بصورة كبيرة و ينكسر عزل الهواء في الـ Gap و تصبح قيمة المقاومة صغيرة جداً و يتم تفريغ التيار للأرض. وقد تم استخدام هذا النوع لعدة عقود من الزمن حتى ظهر النوع الثاني وهو الـ Metal-Oxide Arrestors في منتصف سبعينات القرن الماضي.



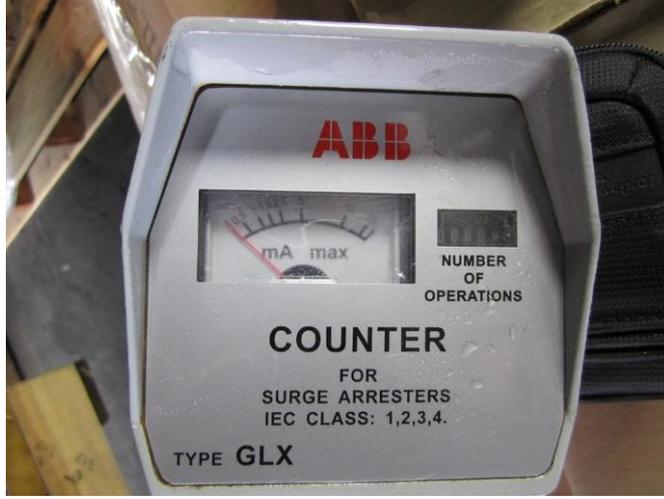
شكل 13-6 :

### 2-2-13 النوع الثاني : Metal-Oxide ( $Z_nO$ ) Arrestor

هو مانع يستخدم أكسيد الزنك ، ففي هذا النوع تم استبدال الـ Non-linear Resistance المصنعة من كربونات السيليكون Silicon-Carbide بأخرى من Metal-Oxide التي تتمتع بـ Non-linear characteristics أعلى من نظيرتها. وتم أيضا الاستغناء عن Series Gap في هذا النوع و بذلك يكون قد قضى على مشكلة الحرارة المرتفعة التي كانت تنتج من حدوث breakdown للـ spark gaps ، كما يقلل من احتمالات الفشل التي كانت تحدث نتيجة لتغير الـ breakdown voltage الخاص بالـ spark gaps بسبب تغير أحد الظروف مثل الضغط أو درجة الحرارة أو التلوث.

و يصنع هذا النوع عادة من أكسيد الخارصين (Zinc Oxide) الذي يمتاز بانخفاض مقاومته عند قيمة محددة للجهد ثم استردادها مرة أخرى عند انخفاض هذه القيمة ، مما يوفر حماية و أداء أفضل للـ arrestor.

وتزود هذه الأجهزة بعدادات كما في الشكل 13-7 لقياس تيار الصاعقة و لحصر عدد المرات التي مرت فيها الصواعق خلاله وهذه المعلومات هامة في تقييم صلاحية الـ LA.



شكل 13-7 :

و يجب تغيير مجموعة الأقراس (التي تتكون منها المقاومة الغير خطية) الموجودة داخل مانعة الصواعق بعد عدد معين من مرات التفريغ و هذا العدد يتم تحديده بواسطة الشركة المصنعة. وإذا لم يتم استبدال و فحص الأقراس فقد نتقاجاً بحدوث صاعقة وتنتهار مانعة الصواعق و المعدات معها.

كذلك يوجد عداد آخر لقياس تيار الـ SS معاير بالملي امبير ، وفي حالة زيادة هذا التيار بمرور الوقت فإن هذا قد يكون مؤشرا للانهييار الحرارى لمانعة الصواعق وعوازل الخط الكهربى أيضا.

علما بأن الـ LA قد يوضع أيضا ليس فقط عند نقطة دخول الخطوط الهوائية للمحطة بل أيضا يوضع مباشرة قبل المحول وذلك لوجود احتمال أن الصاعقة ضربت أى عنصر من عناصر المحطة الموجودة فى منطقة التفريعات (بالهواء الطلق) وبالتالي فهناك احتمال أن تصل للمحول (وهو العنصر الأهم والأعلى بمحطة المحولات) ولذا وجبت حمايته بـ LA إضافى كما فى الشكل 13-8.

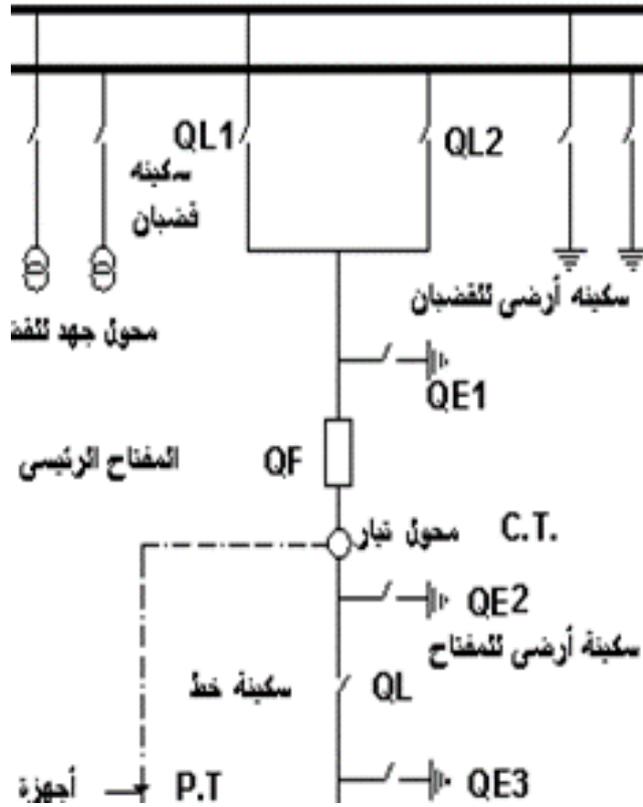


شكل 13-8 :

### 3-13 سكاكين الفصل ISOLATORS

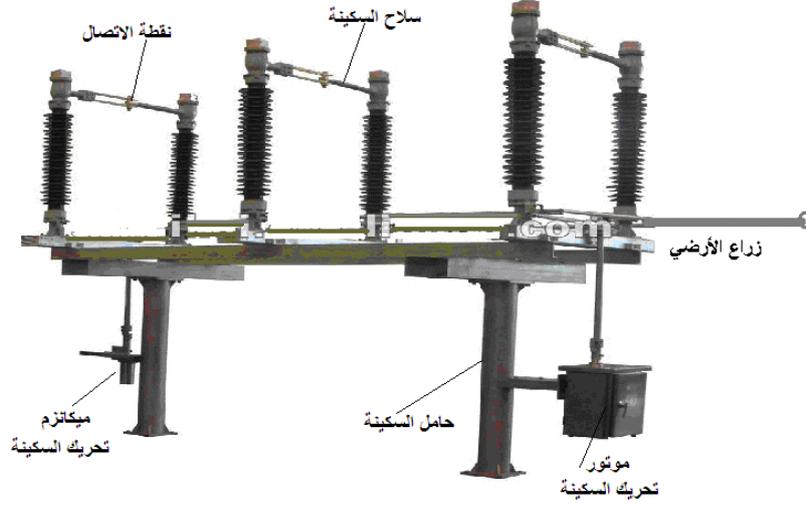
سكاكين الفصل وتسمى أيضا بالمستعزلات Isolators ، وتسمى أيضا Disconnecting Switches ، وهي جهاز ميكانيكي يستخدم أساسا لإتمام عملية العزل التام لعناصر الدائرة عن مصدر الطاقة بغرض القيام بأعمال الصيانة أو بغرض عزل الخط .

وبالمحطة عدة أنواع من السكاكين كما في الشكل 13-9 . فهناك سكينة الخط أو سكينة رأس الخط ، ورمزها في الشكل السابق هو QL . وهناك سكينة أخرى تشبهها تماما ولكن تركيب جهة الـ BB ولذا تسمى سكينة الـ BB ، ورمزها على الشكل 13-9 هو ( QL1 and QL2 ) . والهدف من هذه السكاكين هو إتمام عزل الخط بعد فتح القاطع . ففتح الـ CB مثلا لا يكفي لبدء أعمال الصيانة فيه ، فرغم أن الـ Contacts داخل القاطع نفسه قد أصبحت مفتوحة ، إلا أن الجزء الأول من هذه الـ Contacts لاتزال تتصل بالشبكة جهة الـ BB ، وهنا يأتي دور ( QL1 and QL2 ) لإتمام عملية العزل من هذه الجهة ، كما أن الجزء الثاني من أطرافه لاتزال متصلة بالأحمال ، وهنا يأتي دور سكينة الخط QL التي تفتح لإتمام عزل الـ CB عن الأحمال .



شكل 9-13 :

والفرق بين سكينه رأس الخط وسكينه الـ BB هو أن سكينه الخط تكون مزودة بمفتاح أرضى Earthing Switch من جهة الخط الهوائى ورمزها QE3 ، وتظهر فى الشكل 10-13 ، فبمجرد أن تفتح سكينه الخط يتم أوتوماتيكيا توصيل هذه السكينه بالأرض. علما بأن تأريض الخط بهذه الطريقة يحقق فاعلية فى حدود 2 كم من المحطة ، أما إذا امتدت منطقة الصيانة لأطول من ذلك فيجب عمل أرضى مؤقت فى المنطقة البعيدة خارج المحطة .



شكل 10-13 :

ويستطيع كلا النوعين من هذه السكاكين ( Isolators ) تحمل مرور تيار ال short circuit current خلالها وهي مغلقة لمدة قصيرة ، ولكن لا يمكن فتحها إلا عندما يتم قطع التيار عن الدائرة بواسطة القاطع الأساسي ، أو أن تكون قيمة التيار قبل القطع صغيرة جداً حيث أن هذه السكاكين غير مزودة بأى وسيلة لإطفاء الشرارة الناتجة عن قطع تيار مرتفع كما هو الحال في ال CB ، وهو غير مهياً لذلك فلا يوجد به زيت مثلاً لإطفاء الشرارة كما في ال CB ، وبالتالي لا يمكن فتحه إلا بعد فتح ال CB أولاً.

وهناك نوع ثالث من المفاتيح (السكاكين) وهو مفتاح التأريض ال Earthing Switch الخاصة بالقواطع ، ويظهر في الشكل 9-13 بالرمز QE1 and QE2 و يركب قبل وبعد القاطع لتفريغ أى شحنات. مع ملاحظة ضرورة وجود نظام قفل كهربى (Interlock) بين ال CB وبين سكينتى التأريض ( QE1 and QE2 ) ، بحيث يضمن عدم فتحهما إلا بعد فصل ال CB أولاً لأنهما مثل كافة السكاكين غير مزودة بأى آلية لإطفاء الشرارة التى تنشأ عند الفتح . أما فى حالة غلق ال CB فيجب أن تفتح أولاً سكاكين القاطع (QE1 and QE2) ثم يغلق القاطع بعد ذلك ، حتى لا يحدث Short circuit بالدائرة .

ولهذه السكاكين ميزة إضافية فى المحطات الهوائية حيث تمكنك من التأكد من تحقق العزل بالعين المجردة ، وذلك بعد إجراء فصل الدائرة بالقاطع ال CB .

يلاحظ أن سرعة الفتح والغلق لل Isolators تكون دائماً أبطأ بكثير مقارنة بالقواطع حيث أنها أيضاً غير مزودة بآليات تسريع الفتح (سوسته مثلاً ) كما هو الحال فى القواطع الرئيسية.

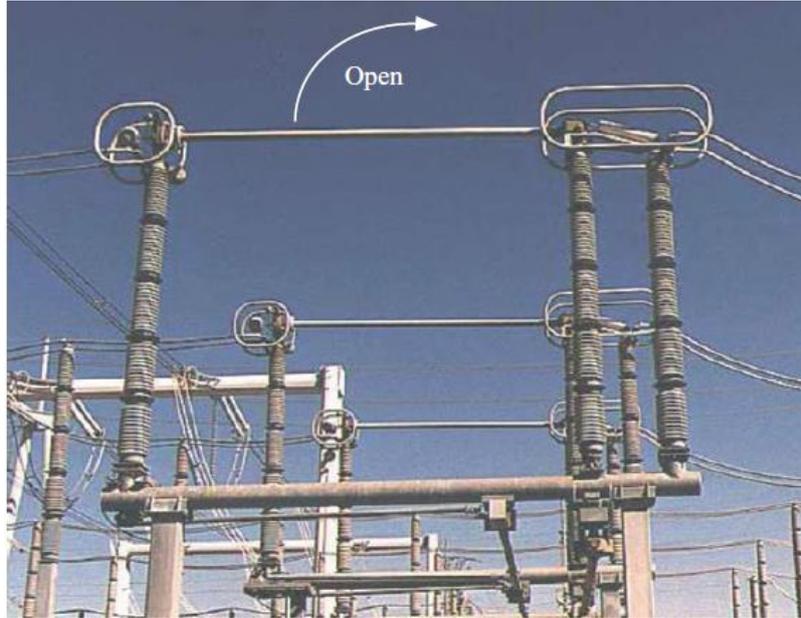
## 13-3-1 أساليب فتح سكاكين الفصل

تنقسم هذه السكاكين من حيث أسلوب الفتح إلى عدة أنواع (يتم الاختيار بينهم حسب المساحة المتاحة للفتح وطريقة التثبيت) منها:

- Vertical Break
- Double End Break
- Center Break
- Double End Break Vee Type

**Vertical Break**

تتكون السكينة في هذا النوع من ذراع واحد يتحرك عمودياً ، و طرفا السكينة يكون كل منهما مثبت على عازل كما في الشكل 13-11. و يتم فتح الدائرة عن طريق رفع الذراع لأعلى كما في الصورة التي تبين شكل سكينة جهد 500 ك ف.



شكل 13-11 :

**Double End Break**

تتكون السكينة من ذراع واحد يتم تحريكه من خلال العزل المثبت في المنتصف (شكل 12-13) ، و يتم توصيل الدائرة عن طريق توصيل الذراع بالطرفين الثابتين (المثبتان أيضا بعوازل). ويمتاز هذا النوع على الـ vertical switch بأنه يمكن استخدامه في المواقع التي ليس بها مساحات فارغة في الاتجاه الرأسى حيث يتم فصل الدائرة عن طريق تدوير الذراع أفقياً و ليس رأسياً.



شكل 12-13 :

**Center Break**

في هذا النوع تتكون السكينة من ذراعين متقابلين يتحركان في اتجاهين مضادين و يتم توصيل الدائرة عن طريق تلامس الطرفين في نقطة تكون تقريباً في المنتصف (شكل 13-13).

وميزة هذا النوع عن النوعين السابقين (vertical break & double end break) هو أنه يتكون من عدد أقل من العوازل "two insulator/phase" بينما النوعان السابقان بهما three insulator/phase (في هذا النوع يحمل كل عازل نصف الذراع المتحرك وليس كامل الذراع كما في النوعين السابقين). و لكن من عيوبها أنها تتطلب مسافة أكبر بين كل phase و الآخر مقارنة بالنوعين السابقين.



شكل 13-13 :

و هناك أشكال أخرى من السكاكين مثل Double End Break Vee Type هو يشبه في تصميمه الـ Double End Break ولكن العازلان المثبتان على طرفي السكينة مائلان كما توجد أشكال أخرى مثل Pantograph Type و Knee Type.

## 4-13 تسلسل عمليات الفصل و التشغيل في المحطة

1- خطوات فصل خط هوائي ( المغذى Feeder ) يتبع الآتى:

1. فصل القاطع CB الرئيسي والتأكد من فصل الـ 3-Phases.
2. تفصل سكينة الخط الهوائية.
3. فصل سكينة القضبان .

ملحوظة هامة:

يراعى عند فصل أي كابل أن يتم الفصل من ناحية الحمل أولاً ، ثم من ناحية المغذي (المصدر) بعد ذلك ، منعا لمرور تيار خلال سعات capacitance الكابل مما قد يؤدي لرفع الجهد كما ذكرنا سابقا في الباب الثاني.

2- خطوات توصيل خط هوائي يتبع الآتى:

1. تفصل سكينة الأرضي للخط الهوائي مع التحقق من ذلك.

2. توصيل سكينه القضبان.
3. توصيل سكينه الخط الهوائية.
4. توصيل المفتاح الرئيسي والتأكد من توصيل الثلاث أوجه.

#### 5. تشغيل مجموعتان من القضبان الرئيسية

وفى حال وجود موصل قضبان وعند الرغبة في نقل جميع التوصيلات من القضبان الموجودة بالخدمة إلى الاحتياطية دون انقطاع التغذية يتبع الآتى:

1. توصيل سكينتي رابط القضبان.
2. توصيل موصل القضبان.
3. تقرأ الفولتمترات المركبة على مجموعة القضبان الاحتياطية للتأكد من وجود فولت عليها.
4. يتم التحقيق من توصيل موصل القضبان.
5. توصيل سكاكين القضبان الاحتياطية لجميع الدوائر الموصلة إلى مجموعة القضبان الشغالة.
6. تفصل سكاكين القضبان الشغالة لجميع الدوائر الموصلة.
7. يقرأ الأمبير والميترات المركبة على موصل القضبان للتحقق من عدم مرور بين مجموعتي القضبان.
8. يفصل مفتاح رابط القضبان.
9. تفصل سكينتي رابط القضبان.

#### 13-4-1 ما الفرق بين فصل الخط ، وعزل الخط ، وانسحاب الجهد؟

نقصد بكلمة خط أى المغذى أو Feeder ، ويوجد فرق بين مصطلح "فصل الخط" ، ومصطلح "عزل الخط" على النحو التالى:

- أ. فصل الخط يعنى فتح القاطع CB ، و لكن تظل سكاكين العزل مغلقة ( سكينه الخط و سكينه القضبان العمومية ) وتظل سكاكين الـ Earthing مفتوحة. وهذا السيناريو يحدث إذا جاءت إشارة الفتح من الـ Relay ، لأنه من الممكن أن يلى ذلك إشارة غلق من الـ Auto-recloser ، فلو تخيلنا أن فصل الخط كان مصاحباً مثلاً فغلق سكاكين الـ Earthing فهذا يعنى كارثة.

ب. عزل الخط ( المغذى Feeder ) يعنى فتح القاطع CB ، و فتح سكاكين العزل ( سكينه الخط و سكينه القضبان العمومية ) ، و غلق سكاكين الـ Earthing فى أول الخط و نهايته. وهذا يحدث عن عمل صيانة للخط.

ت. أما انسحاب الجهد فنقصد به حدوث انقطاع للتيار تلقائيا دون سابق تعليمات ، لا من الـ Relay ، ولا من مسئولى الصيانة على عكس ما حدث فى الحالتين السابقتين ، بل هو انقطاع للتغذية عن قضبان التوزيع و الخطوط الهوائية و الكابلات الأرضية و سائر المعدات الكهربائية دون سابق تعليمات وبدون حدوث عطل داخل المحطة .

وتعتبر هذه المعدات فى هذه الحالة فى حكم المغذاه ، ولا يجوز بأي حال من الأحوال الاقتراب منها أو العمل فيها أو إعادة تعشيقيها - إلا بعد الحصول على التصريح اللازم من الجهة المشرفة على تشغيل هذه المعدات (مركز التحكم المختص أو وردية المحطة).

## 5-14 محولات التيار CURRENT TRANSFORMER

وهو من المعدات الأساسية بالمحطة ، حيث يقوم هذا النوع من المحولات بتحويل التيارات العالية إلى تيارات منخفضة عادة 1 أمبير أو 5 أمبير لنتمكن من التعامل مع هذا التيار بشكل آمن سواء فى أجهزة القياس أو أجهزة الوقاية. ويتم تصنيف محولات التيار إلى (Classes) و ذلك حسب الاستخدام (للحماية أو للقياس). و يركب الـ CT بشكل منفصل لاسيما مع الجهود العالية كما فى الشكل 13-14.



شكل 13-14 :

لكن هناك شكل آخر من أشكال محول التيار وهو (BCT) Bushing Current Transformer، وفيه يتم تركيب الـ CT ضمن العوازل الخارجية للـ Bushing للمحول أو القاطع.

ويتميز هذا النوع بميزة أساسية و هي أنه يمكن تركيبه على الخط أو محول القدرة أو القاطع الموجود بالفعل دون الحاجة لتركيبه منفصلاً . وذلك لأن الـ CB يركب على التوالي في الدائرة وكذلك الـ CT ولذا يركبها معا فيدخل الكابل على الـ CT ومنه (داخليا) إلى الـ CB ثم يخرج من الـ CB إلى سكين الـ BB كما سنرى.

وتتقسم محولات التيار لعدة أنواع طبقاً للمادة المستخدمة للعزل داخل المحول . وأهم تلك الأنواع:

Oil Insulated Type –1

SF6 Insulated Type –2

Dry Insulated Type –3

وللمزيد عن محولات التيار وأيضا عن محولات الجهد يمكن الرجوع لكتاب نظم الحماية الكهربائية.

## 6-13 محولات الجهد

ويقوم هذا النوع من المحولات بتحويل الجهود العالية إلى جهود منخفضة (عادة 110 فولت) لنتمكن من التعامل مع هذه الجهود بشكل آمن مع أجهزة القياس أو أجهزة الوقاية . ومكوناته الأساسية تظهر في الشكل المجاور .

و يستخدم محول الجهد فيما يلي :

- تغذية أجهزة القياس مثل (VAR meter Wattmeter، Voltmeter)
- تغذية أجهزة الحماية (Protection Equipment)
- تغذية مسجل الأخطاء (Fault Recorder) ، ووظيفة هذا الجهاز داخل محطة التحويل أنه يسجل التيارات والجهود قبل وخلال وبعد حدوث العطل ، وكذلك لحظة فصل القاطع ، كما يسجل اللحظة التي تعطلت فيها الأجهزة.
- تغذية أجهزة التوافق (Synchronizers) حيث يشترط في عمليات التوافق : تساوي الجهد ، تساوي التردد ، توافق الـ Phases and Sequences ، و تستخدم في محطات التحويل لإغلاق الدائرة عن بعد من غرفة التحكم فقط

والفرق بين نوعي محولات القياس (محول التيار ومحول الجهد) هو أن محول الجهد لا يحتاج معه لقطع الكابل كما في حالة محول التيار الذي يدخل التيار إليه من نقطة ويخرج من نقطة أخرى. أما في محولات الجهد فيتم التوصيل من نقطة واحدة (توصيل على التوازي) كما في الشكل 13-15 بينما الطرف الثاني لمحول الجهد يكون عبارة عن سلك توصيل صغير المقطع (يحمل جهد لا يتجاوز 120 فولت و تيار ضعيف) وهذا السلك يتصل مباشرة بأجهزة الحماية والقياس داخل مبنى المحطة.

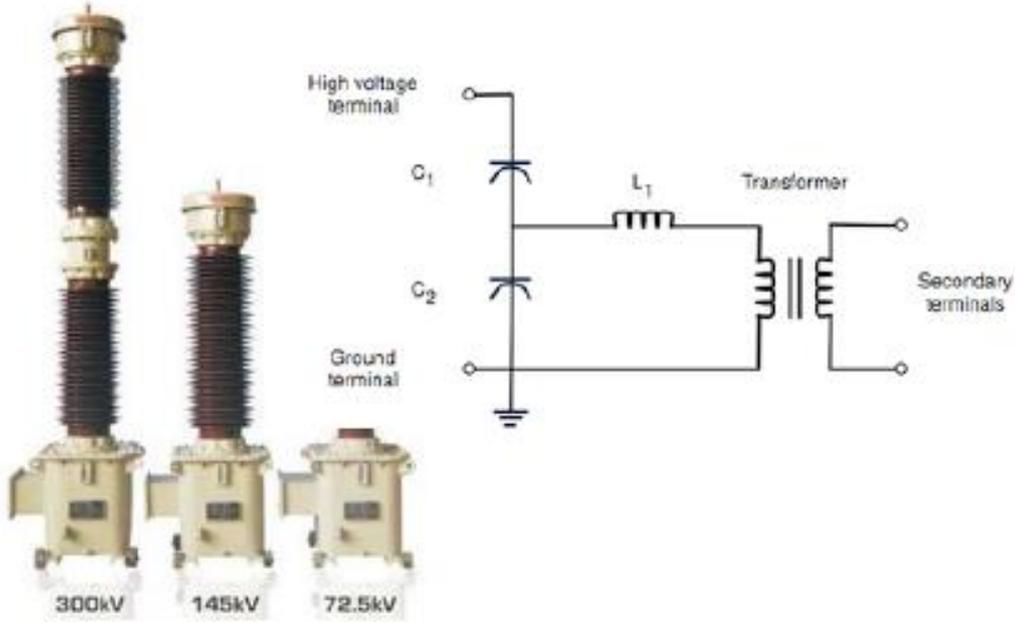
ومن أشهر أنواع هذه المحولات:

1. محولات الجهد الحثية (I.V.T). Inductive VT كما في الشكل 13-15.
2. محولات الجهد السعوية (C.V.T). Capacitive VT كما في الشكل 13-16.

يستخدم الـ CVT لخفض جهد الشبكة الفائتة EHV إلى مستوى جهد معدات القياس و الحماية. وتقوم فكرة الـ CVT على توصيل الجهد المراد خفضه على مكثفين على التوالي two capacitors in series (شكل 13-16) فيكون بذلك الجهد على أحد المكثفين أقل من الجهد الكلي ثم نقوم بتوصيل ذلك الجهد على الملف الابتدائي للمحول و الذي بدوره يقوم بتخفيضه إلى القيمة المطلوبة. وهذا النوع أفضل اقتصادياً من محول الجهد العادي عند استخدامه على خطوط EHV & UHV.



شكل 13-15 :



شكل 13-16 :

وقد أصبح شائعاً استخدام محولات الجهد السعوية CVT لسببين:

- الأول: أنها أقل تكلفة عن محولات الجهد المغناطيسية .
- الثاني: أن المكثف Capacitor الموجود بها يؤدي وظيفة أخرى حيث يعمل في نفس الوقت كمكثف ربط Coupling Capacitor لنظام الاتصال بالموجات المحملة على خطوط نقل الطاقة Power Line Carrier PLC والذي أصبح استخدامه ضرورياً لأغراض الاتصالات وربط أجهزة الحماية في المحطات بأجهزة الحماية في المحطات المقابلة والذي يطلق عليه Tele Protection. راجع تفاصيل ذلك في القسم الخاص بالاتصالات في الفصل الأخير من هذا الباب.

وتتعدد أشكال محولات الجهد حسب مكان استخدامه. فالصور السابقة تمثل محولات الجهد في المحطات الهوائية وفي الشكل 13-17 صور لمحولات الجهد في المحطات الغازية ولوحات الجهد المتوسط.

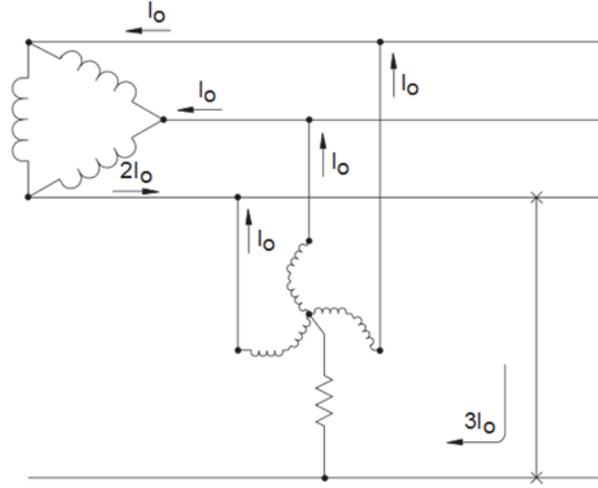


شكل 13-17

## 7-13 محولات التأريض (EARTHING TRANSFORMER)

معظم محولات التوزيع تكون مؤرضة تأريضا مباشرا (Solid Earthing) أي بتوصيل نقطة التعادل مباشرة بالأرض مما يجعل تيارات الأعطال مرتفعة القيمة ، وذلك من أجل أن تميزها أجهزة الحماية بسهولة ولتقليل الإجهاد الكهربى على العوازل والمعدات .

فإذا كان احد جانبي المحول موصلا على شكل دلتا فيمكن تأريضه ولكن من خلال محولات الـ Earthing التى تكون على شكل زجراج Zig-Zag كما فى الشكل 13-18 الذى يمثل مرور التيار خلال عطل أرضى من النوع الـ SLD والذى كان من المستحيل رجوعه للمحول سوى من خلال المكثفات الشاردة ، أما عند استخدام محول الزجراج فقد أمكن تمريره كما فى الشكل. ويمكن الرجوع لكتابى المرجع فى محولات القوى لمزيد من التفصيل حول هذه النقطة.



شكل 13-18 :

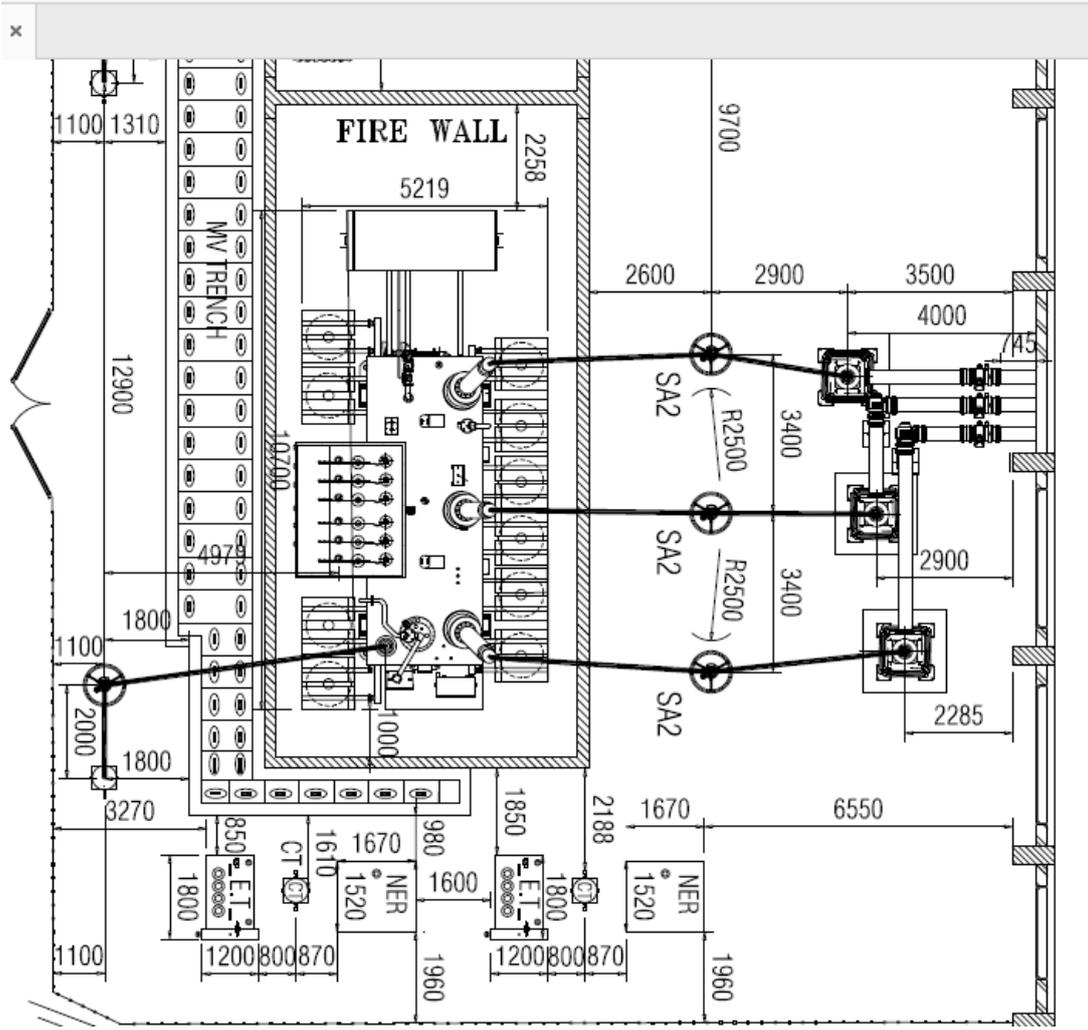
و محولات الـ Earthing تستخدم عادة في محطات النقل الفرعية لأن المحولات فيها عادة تكون متصلة دلتا / ستار ، وبالتالي فنحن نحتاج في جهة الدلتا لإيجاد مسار لمرور تيارات الأعطال الأرضية كما في الشكل السابق، ومن خلال هذا المسار يمكن رفع قيمة الـ Zero Sequence Impedance لخفض قيمة التيار في حالة حدوث أعطال أرضية ، و لذا تستخدم محولات الـ Zig-Zag في هذه الحالة للحد من قيمة تيارات الـ Short Circuit Current الأرضية إلى قيمة التيار المقنن وتستخدم للتأريض فقط وليس للتحميل عليها.

ويمكن تمييز محولات التأريض بأن لها أربعة نقاط دخول فقط وليس لها خروج كما في الشكل 13-19. (المحولات العادية يكون لها نقاط دخول للجهد الابتدائي ونقاط خروج للجهد الثانوي).



شكل 13-19 :

لاحظ أن هذا المحول يكون منفصل تماما عن المحول الأصلي ويوضع بالقرب منه كما في الشكل 13-20 الذي يظهر الدخول على المحول الأصلي من جهة الـ GIS ويظهر أيضا الـ Earthing Transformer, ET وكذلك مقاومة تأريض نقطة التعادل NER ، كما تظهر على الشكل جميع الأبعاد وجميع مسافات الخلوصات Spacing بين المعدات المختلفة في هذه المنطقة من المحطة.



شكل 13-20

ويتم تحديد الـ Ratings لهذه المحولات بحيث تتحمل مرور التيارات الأرضية لمدة يتم توصيفها بمعرفة المصمم للمحطة ، ويتم توصيل هذه المحولات بأرضي المحطة. والجدول التالي مأخوذ من الـ IEEE 32-1972 ومنه يتم تحديد نسبة التيار الذي يتحمله هذا المحول بصورة متصلة كنسبة مئوية من تيار Thermal current وهذا التيار (Thermal) يساوى تقريبا ثلث تيار العطل الأرضي المتوقع في المحول الأصلي.

Continuous Duty Current in Percent of Thermal Current Rating		
Rated Time of Device	Reactors, Ground-Fault Neutralizers, and Transformers Used For Grounding	
		Resistors
10 s	3	0
1 min	7	0
10 min	30	0
Extended Time	30	0

## مثال 1-13 :

احسب قدرة محول زجاج متصل بمحول 220/22/22 kV قدرته 175MVA ، علما بأن تيار العطل الأرضي المتوقع في المحول الاصلى يساوى 600 أمبير لمدة لا تتجاوز 30 ثانية. احسب أيضا قيمة المقاومة التي توصل بنقطة التعادل NER .

## الحل:

من الجدول السابق نجد أن نسبة تيار محول الزجاج لمدة 30 ثانية غير مذكورة بالجدول لكنها تقع بين القيمتين الأولين وتقريبا يمكن أن تساوى 5% من قيمة thermal current rating . ومن معطيات المثال نجد أن

$$I_{thermal} = \frac{1}{3} \times I_{fault} = \frac{1}{3} \times 600 = 200A$$

ومن ثم يصبح التيار المقنن لمحول الزجاج يساوى 5% من القيمة السابقة = 10 أمبير. وهذا يعنى أن قدرة المحول تساوى

$$P(kVA) = \sqrt{3} \times 10A \times 22kV = 381kVA$$

وأقرب قيمة قياسية هي 500 kVA .

أما مقاومة NER فتحسب بقانون أوم مباشرة وهي ناتج قيمة الجهد على تيار العطل ، وبما أن تيار العطل قيمته 600 أمبير فتكون قيمة المقاومة

$$R = \frac{\text{phase voltage}}{\text{fault current}} = \frac{22000}{\frac{\sqrt{3}}{600}} = 20 \Omega$$

## 8-13 القواطع CIRCUIT BREAKERS

قاطع الدائرة هو المسئول عن فصل وتشغيل الدائرة أوتوماتيكيا بناء على إشارة من جهاز الحماية Protective Relay وذلك في حالة الأعطال الطارئة ، كما يستخدم لفصل وتوصيل التيار الكهربائي للمعدات الكهربائية في الظروف الطبيعية أيضا عند الحاجة للصيانة أو التركيبات الإضافية ، ولكن الإشارة في هذه الحالة لا تأتي من الـ Relay ، بل تأتي يدويا للقاطع.

وأحد أهم ميزات القواطع هي القدرة على إطفاء الشرارة التي تحدث عند انفصال الجزء المتحرك (Moving Contact) عن الجزء الثابت (Fixed Contact) الموجودين داخل القاطع أثناء فصل الدائرة في الحالات العادية أو في حالة حدوث عطل. وتتميز الـ CB بهذه الميزة عن السكاكين التي ذكرناها سابقا. و الشرارة التي تنشأ داخل القاطع تمثل أكبر عقبة تواجه تشغيل هذه القواطع ، وهي ليست مشكلة سهلة ، فعند انفصال الـ Contacts داخل القاطع يحدث فرق جهد بينهما (حسب جهد تشغيل القاطع) لكنه غالبا يكون كافيا لكسر العزل بين طرفي القاطع لاسيما أن المسافة بينهما صغيرة ، ومن ثم يمر تيار هائل بين طرفي القاطع على شكل قوس كهربائي أو Arc ، وهذا التيار يتسبب في سخونة شديدة للمنطقة الواقعة بين الـ Contacts ، ومن ثم يتبخر الزيت مثلا (كما في القواطع الزيتية) ، أو يتأين الهواء بينهما (كما في القواطع الهوائية) ويكون الجهد كافيا لبقاء هذا القوس وبالتالي استمرار توصيل الدائرة ما لم نستخدم طرقا أخرى لتساعد القاطع على قطع الشرارة.

والعلاقة التالية تعطي فكرة عن حجم الطاقة الهائلة التي تتولد داخل القاطع لحظة تباعد الـ Contacts الخاصة به:

القدرة الكهربائية بالشرارة (مقاسة بالكيلوجول) =

قدرة القاطع ( MVA ) × زمن الشرارة (بالثانية) × 0.1 =

على سبيل المثال لو كانت قدرة القاطع ( Short circuit capacity ) تساوى 500 MVA ، وزمن فصل الشرارة هو 0.04 sec ، فإن القدرة الكهربائية المستنفذة بالشرارة تساوى

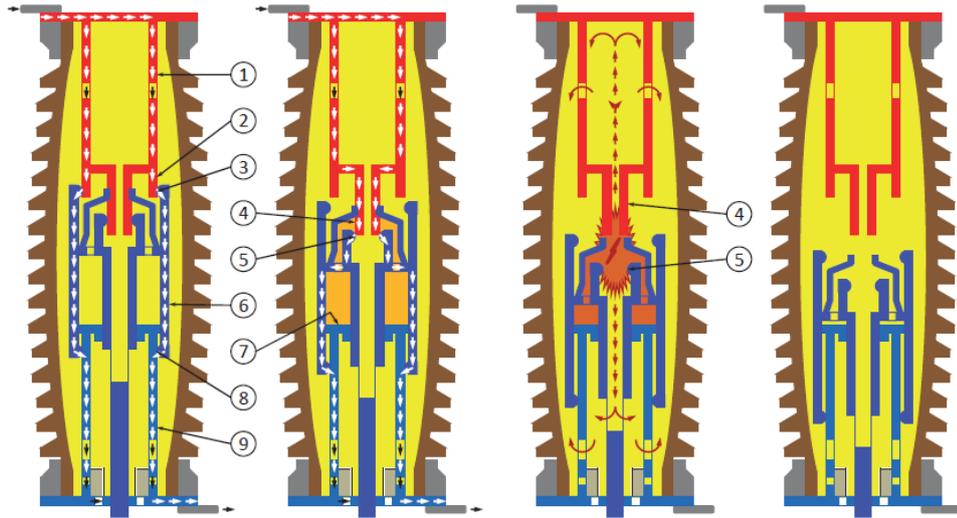
$$500 \times 0.04 \times 0.1 = 2000 \text{ k Joule}$$

وهي قيمة هائلة تستلزم أخذها في اعتبارات كثيرة منها المادة التي يصنع منها جسم القاطع. تذكر أن كيلو جول واحد يكفي لرفع درجة حرارة كيلوجرام من الماء درجة مئوية واحدة ونحن لدينا هنا 2000 كيلو جول.

### 13-8-1 أسلوب الفصل داخل القواطع الكهربائية:

القاطع عموماً يحتوي في داخله على نقاط تلامس ثابتة ، ونقاط متحركة كما ذكرنا.

وإذا أردت تفصيلاً أكثر نقول : أن النقاط المتحركة مكونة هي الأخرى من جزئين : الجزء الأول يمثل نقاط تلامس رئيسية Main Contacts يمر خلالها التيار في الوضع العادى ، والجزء الثاني يمثل نقاط تلامس المساعدة Auxiliary Contacts يمر خلالها التيار في اللحظة التي تسبق مباشرة عملية انفصال نقاط التلامس. ويمكن من الشكل 13-20 فهم هذه العملية :



شكل 13-20 :

ففي وضع التوصيل الطبيعي (الرسم أقصى اليسار) ، تجد نقاط التلامس الثابتة (رقم 2) تلامس الجزء الأول من نقاط التلامس المتحركة الرئيسية (رقم 3). وعندما يأتي أمر بالفصل ، تجد أن النقاط 2 و 3 السابقتين قد انفصلا لكن بدون حدوث أى شرارة بينهما وذلك لأن التيار لا يزال يجد مسارا بديلا من خلال نقاط التلامس الثابتة (رقم 4) والجزء الثاني من نقاط التلامس المتحركة (رقم 5) ، كما في الشكل الثاني من اليسار ويسميان بالأطراف المساعدة Auxiliary Contacts.

وهذه النقطة هامة جدا لأن عملية فصل الـ Main Contacts (2 و 3) بدأت فعليا وانتهت ولكن بدون حدوث شرارة فيهما ، مما يوفر حماية لهما من التآكل ومن ثم لا تتكون مقاومة عالية على سطحهما.

وتستمر عملية الفصل في الشكل الثالث لكن هنا تظهر الشرارة بين الأطراف المساعدة Auxiliary Contacts ، ويتدخل نظام إطفاء الشرارة (حسب نوع القاطع ) ليتم بأسرع ما يمكن إنهاء هذه الشرارة حتى نصل للوضع المرسوم في الجزء الأخير من الشكل 13-20.

### 13-8-2 الأجزاء الرئيسية بالقاطع

يمكن النظر للأجزاء الرئيسية بالقاطع من زاوية أخرى ، حيث يمكن القول أنها ثلاثة أقسام:

1. حجرة الإطفاء (Extinguishing Chamber): حيث يتم إطفاء الشرارة.

2. الوسط العازل: وهناك عدة أنواع من العزل:

- غاز الـ (SF6)
- الزيت
- الوسط المفرغ من الهواء

3. قوة محرقة (Mechanism): تعمل هذه القوة على تحريك الجزء المتحرك في القاطع لينفصل

عن الجزء الثابت بسرعة ، حيث نحتاج في القواطع أن يكون زمن الفصل في حدود 50 ms

وزمن التوصيل في حدود 100 ms.

### 13-8-3 آليات الحصول على القوة المحركة:

هناك ثلاث آليات للحصول على الحركة القوية اللازمة لفتح القاطع:

- آلية تحريك زنبركية Spring Operated C.B (سوستة فقط تشحن يدويا أو بمحرك كهربى):

ويستخدم في هذا النوع محرك تيار مستمر أو متردد بحيث يقوم بشحن سوستة الزنبرك المستخدمة في عمليات الفصل والتشغيل . ومن الممكن تشغيل المفتاح يدويا في حالة وجود عطل بمحرك D.C مع ملاحظة وجوب فصل الجهد في هذه الحالة عن طرفي المفتاح وكذلك فصل تغذية الموتور .

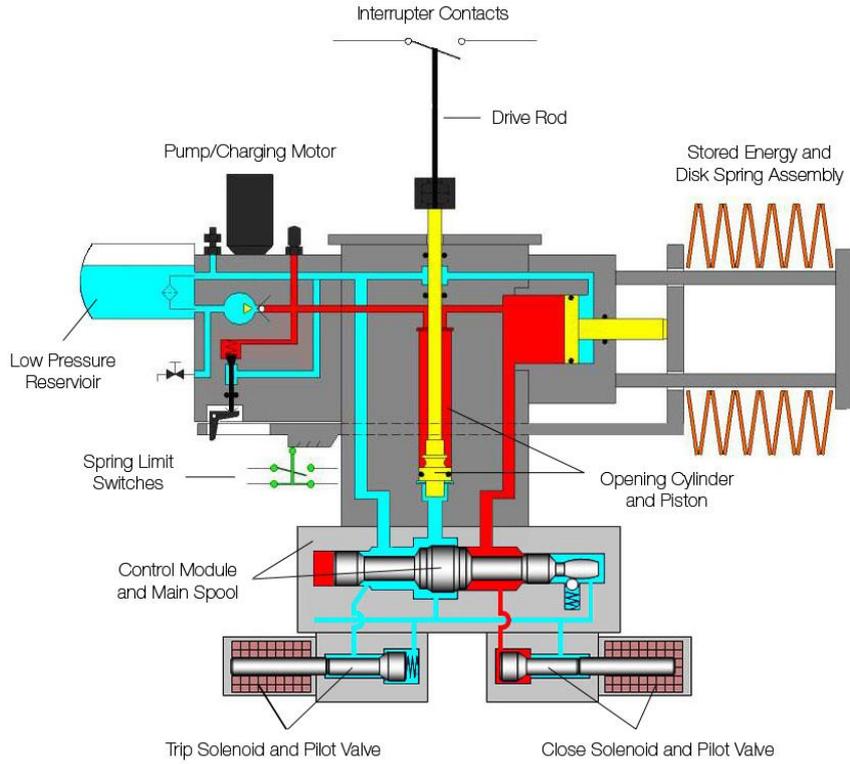
#### • آلية تحريك هوائية Pneumatic C.B

وهو يستخدم في المفاتيح الهوائية ذات الضغوط العالية (66/220 kV) ويعتمد على الهواء المضغوط في الفصل والتوصيل حيث يصل هذا الضغط إلى 17 بار عن طريق الـ (Compressor) و عند الفصل أو التوصيل يتم تحرير هذا الضغط و توجيهه إلى المكبس (Piston) ويقوم هذا المكبس بدوره بتحريك الجزء المتحرك إما وصلا أو فصلا حسب الأمر المعطى.

#### • آلية تحريك هيدروليكية Hydraulic C.B

ويستخدم في المفاتيح التي يستعمل فيها غاز SF6 (الغازية) لإطفاء الشرارة ويعتمد على الزيت الهيدروليكي ذو المواصفات الخاصة . والصورة التالية تظهر السوستة spring وموتور الشحن وخزان الزيت.

وعموما ، فمعظم القواطع تكون عادة مزودة بآلية التحريك الزنبركي حيث تتميز بدرجة عالية من الأمان عند التشغيل وعمر افتراضى أطول وصيانة قليلة.



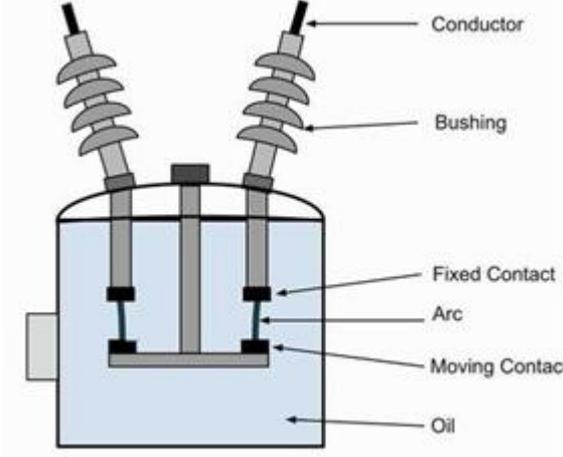
## 9-13 أنواع القواطع بالمحطات

هناك عدة أنواع من الـ CBS المستخدمة في محطات التحويل حسب قدراتها والجهود التي تعمل عليها ،  
منها:

- Oil C.B . ويستخدم مع الجهود (3.6 - 12) kV .
- Air blast C.B . ويستخدم مع الجهود (245-1000) kV .
- Vacuum C.B . ويستخدم مع الجهود حتى 36 kV .
- SF6 C.B . ويستخدم مع الجهود (36-420) kV .
- وهناك نوع آخر يسمى Air break C.B ، ويستخدم مع الجهود المنخفضة والمتوسطة حتى 12 .kV

## Oil CB : النوع الأول : 1-9-13

وفكرة عمله أنه عندما يتولد القوس الكهربى داخل القاطع بين الأقطاب كما فى الشكل المجاور فإنه تنتج طاقة حرارية تتسبب فى تحلل للزيت وبالتالي تتولد فقاعات غازية داخل الزيت . و بزيادة الضغط داخل القاطع تندفع هذه الغازات المحبوسة وتسبب اضطراب فى الزيت مما يؤدي إلى إطفاء القوس الكهربى .

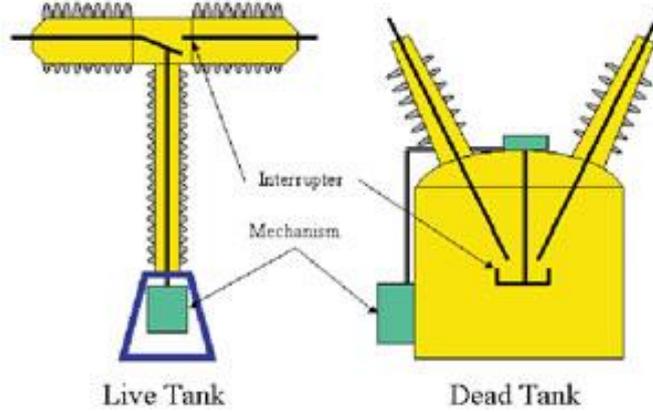


والغازات الناتجة تتصاعد إلى أعلى الخزان وتخرج من فتحات التهوية أعلى الخزان ، ولذلك فإنه إذا كانت هذه الفتحات مسدودة فقد يحدث انفجار للخزان . علما بأن هذه الفقاعات تكون ذات ضغط عالى وهذا يولد ضغطا على جسم الخزان لذا يجب أن يكون جسم الخزان قويا

ليتحمل هذا الضغط ، كما يجب ألا يُمأ الخزان بالكامل بالزيت ، بل يجب ترك مساحة لهذه الفقاعات داخل الخزان .

ويعييب هذا النوع أن الزيت يكون قابلا للاشتعال عند درجة الحرارة العالية ، ويعيبه أيضا تكون الكربون بعد كل عملية إطفاء ، و بالتالى تزيد الحاجة إلى تبديل الزيت أو تنظيفه (بناء على نتائج اختبار الزيت الذى يجرى كل فترة) . ولكن الزيت بصفة عامة عازل جيد ولا يحتاج لضغط ، كما يتميز بأنه عندما يسخن نتيجة مرور تيار عالى فيه - وهو ما قد يسبب تأين لبعض الذرات - تقل كثافته فيرتفع لأعلى ويحل محله زيت بارد غير متأين (تدوير طبيعى) ، وأحيانا يستخدم معه مضخة (Pump) حتى تبعد الزيت المتأين ليحل محله زيت جديد بارد . ويوجد نوعان من هذه القواطع (شكل 13-21) هما :

- Bulk Oil C.B (Dead Tank)
- Minimum Oil C.B (Live Tank)



شكل 13-21 :

ففي القواطع الزيتية الأولى Bulk Oil تكون نقاط الفصل مغمورة بالزيت داخل خزان معدني كبير ، وتسمى القواطع ذات الخزان الكبير وتسمى أيضا (dead tank breakers) . وسبب التسمية أننا نحتاج لعزل الأجزاء الكهربائية داخله عن هذا جسمه المعدني ، ولذا يستخدم فيه كمية ضخمة من الزيت للعزل وليس فقط لإطفاء الشرارة. ولا يزال البعض منها في الخدمة كما في الشكل 13-22. لاحظ وجود الـ Bushings الضخمة حتى تبعد جهد الخط عن جسم القاطع المتصل بالأرض.

أما النوع الثاني فهو الأكثر انتشارا الآن ، حيث يستخدم الزيت في إخماد القوس الكهربائي فقط ، و ليس كعازل كما في الـ Bulk Oil ، وفي المقابل يتم عزله برفعه عن الأرض من خلال Bushing كما في الشكل التالي ، و يكون جسم الخزان في هذا النوع مكهربا ولا يمكن لمسه ولذا يكون مرتفعا عن الأرض ويسمى Live Tank ، و لكن يتميز بقلّة كمية الزيت المستخدمة داخل الخزان فهي لإطفاء الشرارة فقط . ونظرا لقلّة كمية الزيت المستخدم فإنه أيضا يسهم في الحد من خطورة وقوع الحرائق التي عرفت مع القواطع ذات الخزانات الكبيرة للزيت . وهو بالطبع أرخص من النوع الأول حيث لا نحتاج لـ Bushings ضخمة .



لاحظ أن وجود الـ Bushing يسمح بتركيب CTs على أطراف الـ CB بسهولة بينما لا يمكن تركيب الـ CTs على الـ Live tank وتركب منفصلة عنه.

لكن القواطع الزيتية عموماً تعاني من مشاكل كثيرة منها تسرب الزيت، وضعف مستوى العزل نتيجة تعدد مرات الـ Short Circuit، وارتفاع الضغط بداخله مع الفصل المتكرر نتيجة لتراكم أبخرة الزيت ويحتاج لصيانة دورية بمعدل مرتفع.



**ملحوظة:** يجب عدم إعادة تشغيل قاطع التيار الزيتي إلا بعد مرور عشر دقائق على الأقل بعد فصل العطل ليسمح بتشتت الغازات المتولدة داخله وحتى يبرد الزيت. كذلك يجب فحص الزيت بعد عدد معين من مرات التشغيل في حالة الأعطال.

شكل 13-22 :

### 2-9-13 النوع الثاني Air Blast CB :-

يستخدم مع هذا النوع من القواطع ضاغط هواء Air Compressor لدفع الهواء عند حدوث شرارة لإطفائها (شكل 13-23). ففي الظروف العادية يكون الهواء داخل القاطع الكهربائي مضغوطاً ، وهذا يعنى ارتفاع قيمة عزل الهواء (العازلية تتناسب طردياً مع الضغط) وبالتالي يمكنه تحمل جهد الشبكة على أطرافه ، ولكن عندما تنفصل نقاط التلامس داخل القاطع تتعرض الفجوة بينهما لمجال كهربائي عالي وترتفع درجة الوسط لتصل إلى آلاف الدرجات المئوية مما يتسبب في تأين الهواء العازل وحدوث القوس الكهربائي. عند ذلك يندفع الهواء المضغوط أصلاً داخله ليقطع الشرارة وتنخفض درجة القوس الكهربائي وتخفني ظاهرة التأين ويتم قطع التيار.

ولهذا النوع عدة مميزات عن القاطع الزيتي منها:

- لا وجود لأخطار الحريق التي يتسبب فيها الزيت.
- سرعة فصل فائقة.
- يحتاج إلى صيانة أقل من القاطع الزيتي.

لكن له عدة عيوب منها:

- عند الحاجة لعمليات الفصل المتعددة يجب تواجد Air Compressor ذو سعة كبيرة لإعادة الضغط داخله لقيمته العالية بعد كل عملية تشغيل.

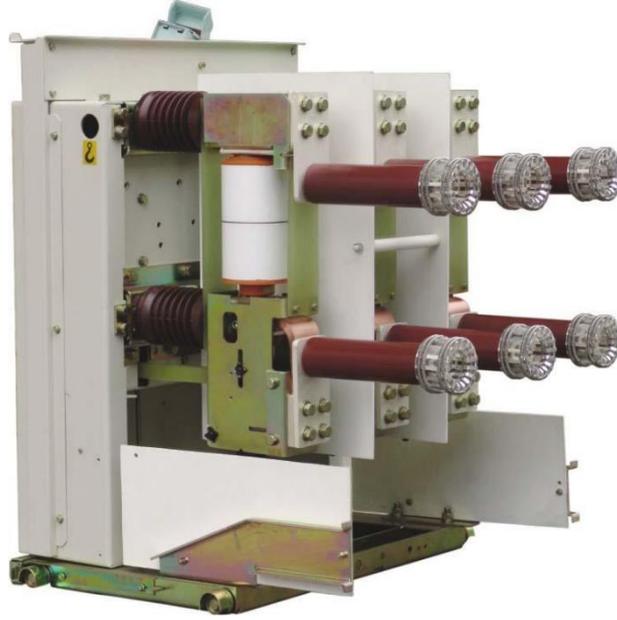
- هناك احتمالية لتسرب الهواء من مواسير التغذية.



شكل 13-23 :

### 13-9-3 النوع الثالث : القاطع المفرغ الهواء (Vacuum CB) :

في هذا النوع (شكل 13-24) لا يوجد هواء مطلقاً في المنطقة المحيطة بأطراف القاطع الداخلية وبالتالي فلن تحدث شرارة بداخله. فهذا القاطع يتكون من اسطوانة مغلقة تحتوى على أطراف الوصل المتحركة داخل فراغ كامل ، فإذا تكون القوس الكهربائي نتيجة الفصل والاحتكاك فإنه سرعان ما يخمد لانعدام الوسط الداعم له كالزيت أو الغاز.



شكل 13-24 :

والقاطع يتكون من Arc chamber بداخلها نقط التلامس الثابتة والمتحركة ، ولكن يعيب هذا النوع من القواطع أنه إذا حدث أدنى تسرب للهواء داخل القاطع فإنه يؤدي إلى حدوث شرارة كبيرة وانفجار لأقطاب القاطع. ويكثر استخدام هذا القاطع في محطات الجهد المتوسط حتى جهد 33 ك ف وليس أكثر من ذلك في الوقت الحالي.

يتميز هذا النوع بارتفاع عدد مرات الفصل المسموح بها خلال عمر القاطع عند التشغيل العادي ، وأيضا يتميز بارتفاع عدد المرات الفصل على الـ Short Circuit ، وغالبا يكون العمر الافتراضي لنقاط التلامس فيه من 50 إلى 180 مرة عند الفصل على Short Circuit وحوالي " 10000 " مرة عند الفصل بالتيار المقنن العادي. علما بأن زمن التوصيل يكون تقريبا 75 مللي ثانية ، أما زمن الفصل فيتراوح بين 40 إلى 60 مللي ثانية.

#### مميزات أخرى للقواطع المفرغ من الهواء

- صغر حجم الغرفة المفرغة التي يتم إطفاء الشرارة بها.
- زمن الفصل في حدود نصف دورة لتيار الـ Short Circuit Current .
- شدة العزل لمقاومة انهيار الثغرة الهوائية الصغيرة كبيرة حيث تم استخدام الهواء المفرغ كوسط عازل.

- تتميز المفاتيح المفرغة بأنها الأقرب إلى المثالية.
- عدم احتوائها على سوائل قابلة للاشتعال أو غازات قد تتسرب.
- خفة الوزن و هدوء التشغيل.
- لا تحتاج الي صيانة.

## عيوب هذه القواطع:

- تتصاعد كمية من الغازات من القطبين الثابت و المتحرك عند درجات الحرارة العالية.
- قد يتعرض القطبين الثابت و المتحرك للانهييار او التآكل مما يعني استبدال الغرفة الزجاجية بالكامل.

## 13-9-4 النوع الرابع : قاطع دائرة باستخدام غاز الـ SF6

يتميز غاز الـ (SF6) (سادس فلوريد الكبريت) بعدة ميزات منها أنه:

- غاز خامل وغير قابل للاشتعال ، وغير سام ، ولا لون له ولا رائحة
- عازل جيد جدا للكهرباء حيث تصل كفاءة عزل الغاز المضغوط إلى عشرة أمثال عزل الهواء للكهرباء
- مستقر كيميائيا ، ولا يتحد مع أي مادة أخرى عند درجة حرارة الغرفة ، وبالتالي فإنه يحافظ و يحمي الموصلات من مشاكل الصدأ وغيره التي تحدث أثناء التشغيل كما أنه يحافظ على عمر الموصلات و الماكينات الكهربائية .
- هذا الغاز في الضغط الجوي الطبيعي تكون شدة عزله تساوى 2.5 مرة أفضل من الهواء، وعادة يكون ضغط الغاز المستعمل 3-5 مرة ضغطا جويا وبذلك تكون خواص العازل أفضل عشرة مرات من الهواء.
- عمر هذا الغاز الافتراضي طويل
- وأهم خاصية لهذا الغاز أن الشرارة فيه تؤدي إلى تأين ذرات الـ (SF6) وهذه الأيونات الناتجة تتحد مع ذرات الـ (SF6) الأصلية وينتج عنها (SF6) جديد وبالتالي فالغاز لن يفقد عازليته. وبأسلوب آخر ، نقول أن غاز الـ SF6 يتحلل عند درجات الحرارة العالية الناتجة عن شرارة أو قوس كهربى ، و لكن ذرات الكبريت و الفلوريد تتحد مجددا و تلقائيا مكونة مركبات سادس فلوريد الكبريت من جديد ، وهذا يعنى أن هذا الغاز لا يحتاج إلى إعادة ملاء أو استبدال بشكل دورى على فترات قريبة مثل ما يحدث مع الزيت.

بعض العيوب

- غاز الـ SF6 هو أثقل من الهواء بحوالي 6 مرات ، ذلك يعني أنه قد يتجمع في قنوات الكابلات Cable Ducts أو في أسفل الخزانات . ومع أن الغاز ليس خطر عند استنشاقه لكنه إذا تجمع بكثرة فهناك خطر من الاحتراق بسبب قلة الأكسجين.
  - وعلى الرغم من الفوائد الجمة لغاز سادس فلوريد الكبريت في المحطات الكهربائية إلا أنه يعتبر أحد أهم الغازات المسببة للاحتباس الحراري و أكثرها ضررا بالبيئة. ففي اتفاقية حماية البيئة بكيوتو، تم إدراج غاز الـ SF6 كواحد من ستة غازات ينبغي تقليل استخدامها. و رغم أن انبعاث هذا الغاز قليل نسبيا إذا قورن بباقي الغازات ، إلا أن عمره الطويل في الغلاف الجوي الذي يتجاوز 3200 سنة يجعله على رأسها من حيث الخطورة لأنه أكثرهم استدامة في الغلاف الجوي للأرض.
  - وهناك بعض الاحتياطات التي لا بد من مراعاتها عند استخدام الغاز SF6 في CB's وهي أن غاز الـ SF6 لا يكون فعالا إلا عند وقوعه تحت ضغط عال ، لذلك يتم وضع جهاز لقياس الضغط على كل Circuit Breaker للتأكد من أن الضغط عند المدى الملائم.
- وعموما فإن المعدات الكهربائية المملوءة بغاز الـ SF6 موجودة بالخدمة منذ أكثر من 40 سنة وتجربتها في الخدمة الفعلية جيدة جداً.

**13-9-5 ضغوط تشغيل قواطع الـ SF6:**

1. التشغيل الطبيعي : ضغط الغاز بالمفتاح 7 بار
  2. ضغط الإنذار : 6.2 بار
  3. ضغط Blocking : 5 بار
- عندما يقل الضغط عن (5) بار فإن الغاز لا يستطيع إخماد الشرارة داخل قاطع الدائرة Circuit Breaker لذلك يصبح قاطع الدائرة مغلقا Blocked أوتوماتيكيا (أي أنه لا يمكن فتحه وذلك لمنع حدوث الشرارة) ويظل هكذا حتى يصل الضغط إلى المدى الآمن مرة أخرى. وغالبا يكون انخفاض الضغط مصاحبا بإعطاء إنذار صوتي.
  - عند انخفاض الضغط يتم نقل أنابيب الشحن المملوءة بغاز الـ SF6 ، والمتاحة في الـ Switch yard ، والتي تحمل غالبا على عربة إلى مكان العطل أو التسرب لتعبئة القاطع بالـ SF6 حتى مستوى الضغط المطلوب للتشغيل الآمن .

- هذا النوع من القواطع (مثله مثل أى قاطع آخر) يحتوى على لوحة توضع فى أسفله تبيين وضع المفتاح "متصل أو مفصول" ، وكذلك تبيين وضع السوسته هل هى مشحونة أم لا
- وهو أيضا مثل كافة القواطع يكون منه نوعين Dead Tank كما فى الصورة شكل 13-25 ، التى تظهر قاطع SF6 – 500 kV ، ومنه أيضا الـ Live Tank الذى ظهر فى أول صورة لمحطة هوائية فى هذا الفصل.



شكل 13-25 :

- ويوجد منه أيضا نوعان : خارجى وداخلى . وتركب القواطع الغازية فى الخارج فى محطات AIS (كما فى الصورة السابقة) ، كما يوجد منه القاطع الداخلى الذى يكون جزءا من الـ Bay فى محطات الـ GIS الداخلية.

#### ومن المميزات الأخرى للقواطع الغازية (SF6) التى تفسر تفوقها على بقية الأنواع :

- عدم الحاجة إلى ضاغط compressor والاعتماد على تقنية الدفع الذاتى للغازات .
- بساطة غرف الفصل التى لا تحتاج إلى غرفة إضافية على عكس القواطع القديمة التى تعمل بالهواء المضغوط.
- وقت قصير لفصل العطل من 2 إلى 2.5 دورة (cycles) تحت جهد فائق (EHV).
- يسيطر الـ SF6 على الـ Arc بسهولة لأن له خواص تبريد ممتازة فى درجات الحرارة (1500 – 5000 كلفن) التى فيها تطفى الـ Arc .

- قدرة تحمل كهربية تسمح بضمان عمر افتراضي لا يقل عن 25 سنة .
- الأمان عند التشغيل
- أصوات منخفضة عند التشغيل .

و أكثر أنواع الـ CBs استخداما في الوقت الحاضر هما الـ SF6 CBs ، و الـ Vacuum CBs ولذلك لطول أعمار الـ Contacts الخاصة بهم بالنسبة لعدد مرات الفصل في ظروف التشغيل الطبيعية أو الـ faults مما يجعلها لا تحتاج إلى الصيانة بشكل مستمر مثل الأنواع الأخرى ولذلك توصف هذه الأنواع بأنها " Maintenance free CBs " .

### 13-9-6 ما هو دور جهاز الـ anti-pumping relay ؟

في حالة الضغط على زر غلق القاطع يقوم القاطع بتنفيذ الغلق ، لكن ماذا لو كان هناك أمام القاطع short circuit؟ في هذه الحالة يقوم القاطع بالفصل فورا. لكن ماذا لو كان هذا الشخص حركة أصابعه بطيئة ، ولا يزال ضاغطا على زر التوصيل ؟ عندئذ ستكون هناك فرصة لتكرار التوصيل والفصل.

ولتفادي هذه المشكلة ولضمان عملية التوصيل لمرة واحدة في كل عملية ضغط ، فإن القواطع تزود بجهاز وقاية يسمى anti-pumping relay يقوم بقطع التغذية السالبة عن ملف التوصيل بعد التوصيل مباشرة وذلك نضمن ألا يحدث تلف لموتور الشحن أو سوستة الفصل والتوصيل.

### 13-9-7 ملحوظات من الواقع:

1- في محولات 220/66 kV يكون قاطع المحول من النوع SF6 من جهة الـ 66 kV أصغر في الحجم من القاطع الموجود في جهة الـ 220 kV ، وذلك لأن الثلاث فازات تكون موجودة داخل ماسورة واحدة (تسمى في مصر بولة واحدة) وهو تعريب مصرى لكلمة Pole أو Pool ، ولكن ضغط غاز الـ SF6 يكون أعلى في قواطع الـ 66 kV بسبب وجود الـ 3-Phases داخل البولة الواحدة .

2- قيمة الـ Short circuit capacity للمفاتيح المستخدمة في مصر حسب الجهد هي:-

- 40 KA في مفتاح الـ 220 kV
- 31.5 KA في مفتاح الـ 66 kV
- 26.3 KA في مفتاح الـ 11 kV

واعتقد أنه يجب إعادة النظر في هذه القيم على ضوء تزايد قدرات التوليد التي دخلت مؤخرا في الشبكة.

3- معظم قواطع الجهد المتوسط تتركب داخل خلايا لوحات التوزيع و تتميز بأنها حرة الحركة حيث يمكن إدخالها وإخراجها عن طريق وسائل عدة مثل عربة التحميل . ويوجد أنواع أخرى نجد فيها القاطع مجهزا بعجل Rolling يساعد في عملية سحبه وتحريكه بسهولة كما في الصور شكل 13-26.



قاطع تيار محمول على عربة

قاطع تيار على عجل قابل للسحب

شكل 13-26 :

وهذه قيم لأهم الضغوط بالمحطات سواء للغاز أو للزيت وذلك للقواطع والسكاكين أيضا:

SF6 rated pressure	7 bar
Sf6 pressure first alarm	6.2 bar
Sf6 pressure second alarm (Blocking)	5 bar
Oil rate pressure	336 bar
Oil low pressure	316 bar
Oil locking pressure	264 bar
Oil locking trip	250 bar
Disconnectors & Earth switches	
SF6 rate pressure	4 bar
Sf6 low pressure first alarm	3.2bar
SF6 locking pressure second alarm	3 bar

### 13-9-8 توصيف الـ Circuit Breakers :

يتم توصيف الـ CB طبقا للعناصر التالية:

**Rated Voltage – 1**

و هى تساوى أكبر قيمة لجهد المنظومة System Voltage فى الظروف الطبيعية . والقيم القياسية هى (مقاسة بالـ kV ) :

3.6 – 7.2 – 12 – 17.5 – 24 – 36 – 52 – 72.5 – 100 – 123 – 145 –  
170 – 245 – 300 – 362 – 420 – 550 – 800

**Rated Normal Current, In – 2**

و هى قيمة الـ R.M.S Current التى يمكن أن يتحملها القاطع باستمرار فى الحالات العادية.

According to IEC60059 the standard values of rated normal currents are:

630 – 800 – 1000 – 1250 – 1600 – 2000 – 2500 – 3150 – 4000 A

**Rated Short Circuit Breaking Current (Sic) – 3**

و هى أعلى قيمة لتيار short circuit يمكن أن يمر بالقاطع لحظة فصله دون حدوث تلف للقاطع وغالبا يكون فى حدود عشرة أمثال التيار المقنن للقاطع. (يسمى أيضا  $I_{Breaking}$  ).

**Rated Short Circuit Making Current (Im) – 4**

ويسمى ( $I_{making}$ ) ، و هى أعلى قيمة لتيار short circuit يمكن أن للقاطع أن يغلق عليه فى وجود Short Circuit بدون أن يحدث له ضرر. عادة تكون قيمته مقارنة بالقيمة فى البند السابق كما يلى:  $I_{making} = 2.55 I_{Breaking}$

**Rated short circuit current, ICU – 5**

هو أقصى قيمة لتيار Short Circuit يمكن أن تمر فى أجهزة القطع وهى مغلقة لمدة ثانية واحدة أو 3 ثوانى بدون حدوث أى تلفيات فى القطع.

**6 – Ics, التيار التشغيلي للقاطع**

وهو التيار الذى يتحمله القاطع ثلاث مرات متتالية يفصل بينهما ثلاث دقائق ويجب اختبار القاطع بعدها .

وهناك مصطلحات هامة أخرى يجب توصيفها مثل Re-striking Voltage وتجد تفاصيلها فى الباب السادس (الفصل 28) عند الحديث عن الجهود العابرة بالشبكات ، فيحسن الآن الذهاب إليها.

MEGAWIN	
Sl.No. / ID No.	: 20091631
TYPE	: MSP 36
MANUFACTURER'S REF. STD	: IEC 62271-100/S13118
RATED VOLTAGE	: 36 KV
RATED NORMAL CURRENT	: 1250 Amps
RATED FREQUENCY	: 50Hz
RATED BREAKING CAPACITY (Symmetrical)	: 25 KA
RATED MAKING CAPACITY	: 62.5 KA
RATED SHORT TIME CURRENT / DURATION	: 25 KA / 3 Sec.
TRIP COIL RATED OPERATING VOLTAGE	: 110 Volts DC
MOTOR VOLTAGE	: 240V AC
RATED OPERATING DUTY	: 0-0.3Sec-CO-3min-CO
WEIGHT OF COMPLETE BREAKER	: 675 Kgs. (APPROX.)
YEAR OF MANUFACTURE	: 2009
PURCHASE ORDER NUMBER AND DATE	: TCM/56/2009 -10/1835 07-07-2009

شكل 13-27 :

### 13-9-9 كيف يتم اختيار قيم الـ rated وقيم الـ SC للقواطع؟

أما قيمة الـ Rated Current للقواطع فيتم اختيار بناء على أقصى قيمة تيار طبيعي تمر خلاله وهذه يمكن معرفتها من دراسات الـ Load Flow .

أما قيمة الـ SCC فتحسب بناء على أعلى قيمة SC Current تمر خلاله وذلك بعد عمل SC Study وغالبا تكون هناك قيم للـ MVA SC Capacity حسب كل منطقة وحسب كل جهد ، فالـ MVA SC .

**Example 19.1.** A circuit breaker is rated as 1500 A, 1000 MVA, 33 kV, 3-second, 3-phase oil circuit breaker. Find (i) rated normal current (ii) breaking capacity (iii) rated symmetrical breaking current (iv) rated making current (v) short-time rating (vi) rated service voltage.

**Solution.**

- (i) Rated normal current = 1500 A
- (ii) Breaking capacity = 1000 MVA

$$(iii) \text{ Rated symmetrical breaking current} = \frac{1000 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 33 \times 10^3} = 17496 \text{ A (r.m.s.)}$$

$$(iv) \text{ Rated making current} = 2.55 \times 17496 = 44614 \text{ A (peak)}$$

$$(v) \text{ Short-time rating} = 17496 \text{ A for 3 seconds}$$

$$(vi) \text{ Rated service voltage} = 33 \text{ kV (r.m.s.)}$$

## 10-13 الفحوصات العامة واختبارات القواطع

الغرض من هذه الاختبارات هو التأكد من مدى تطابق مواصفات القاطع مع أدائه ، والتأكد من مدى صلاحية القاطع لإدخاله إلى الخدمة. و توجد أنواع مختلفة من الفحوصات منها:

- 1- اختبار سلامة الملامسات **Contacts** العلوية والسفلية للقاطع من أجل التوصيل الجيد داخل غرفة إطفاء الشرارة.
- 2- التأكد من سرعة الفتح والغلق الميكانيكي للقاطع.
- 3- سلامة مفتاح حدود الشحن **Charging Limit Switch** .
- 4- سهولة إدخال وإخراج القاطع .
- 5- عمل سخان الموجود داخل حجرة القاطع بصورة صحيحة (يستخدم مع القواطع الزيتية حتى لا ترتفع لزوجة الزيت في الأيام الباردة).
- 6- التأكد من الـ **Earthing** .

### 1-10-13 الاختبارات التشغيلية Operation Tests

في هذا الفحص يتم التأكد من سلامة مفاتيح التشغيل للقاطع ، حيث يتم التأكد من عمل القاطع بالضغط على مفتاح التشغيل ثم يتم الضغط على مفتاح الفصل ثم يتم التأكد يدويا من عمل سوستة الشحن حيث يتم شحن القاطع يدويا من خلال يد مخصصة لذلك.

#### فحص الأقفال الميكانيكية Mechanical Interlock

يتم التأكد من عدم إمكانية إدخال وإخراج القاطع وهو في حالة الغلق ، وعدم إمكانية تأريض المغذي والقاطع في موضع الخدمة ، إلى آخره من الأقفال **Interlock** المتداخلة الميكانيكية الموجودة بالقاطع لتجنب الوقوع في الخطأ و حدوث الكوارث.

**فحص الأقفال الكهربائية Electrical Interlock**

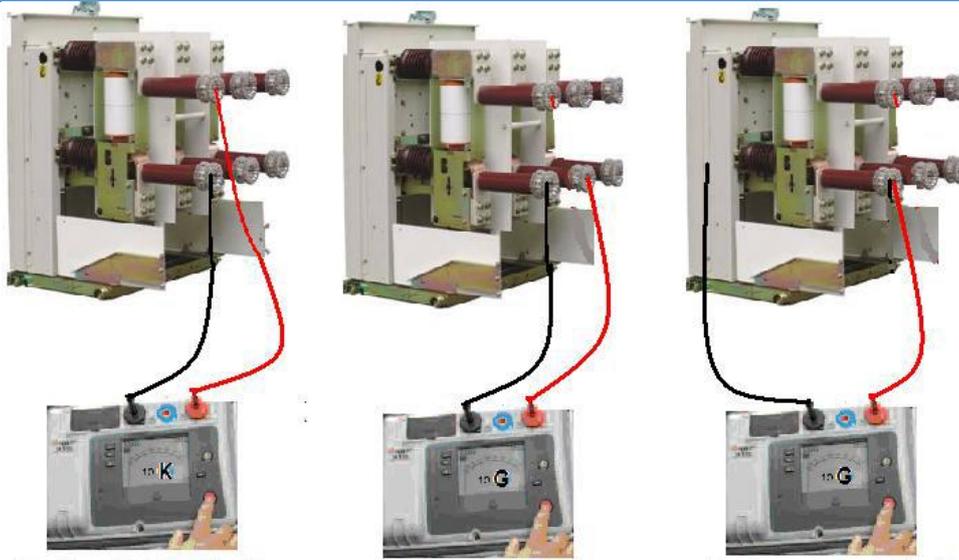
يجرى التأكد من عدم إمكانية غلق القاطع جهة الجهد العالي للمحول عندما يكون القاطع فى جهة الجهد المنخفض مؤرضاً. أيضاً يتم اختبار التشغيل اليدوي OFF/ON والتشغيل الكهربائي للقاطع Local and Remote. ، واختبار شحن القاطع يدوياً وكهربائياً.

**2-10-13 اختبارات قوة العزل بالقاطع**

يجب إجراء فحص قوة العزل على القواطع الكهربائية لمعرفة شدة مقاومة العزل الموجودة بين أقطاب القاطع بعضها البعض ، وبينها وبين الأرضي ، وكلما زادت مقاومة العزل بين الأجزاء الحاملة للفولتية وبين الأجزاء الميتة أى الأجزاء الغير حاملة للفولتية يكون القاطع جيد جداً. وقوة العزل تقاس فى حال كون القاطع فى الوضع ON أو فى الوضع OFF .

يتم تشغيل القاطع فيحدث تلامس بين الـ Moving and fixed parts داخل القاطع ، وباستخدام الميكر يتم قياس قوة العزل بين الأقطاب وبعضها ، وكذلك قوة العزل بين الأقطاب وجسم القاطع.

- قوة العزل بين أقطاب القاطع وجسم القاطع يجب أن تكون أكبر من 500 ميغا أوم ( أو القيمة المحددة فى الكتلوج )
  - قوة العزل بين أقطاب الـ Phase الواحد R-R مثلاً فى حدود 10 كيلو أوم أو أقل أثناء الغلق (الأصل أن تساوى صفر لكن بسبب استخدام جهاز الميكر وهو غير مؤهل لقياس المقاومات الصغيرة جداً فقد حصلنا على هذه القيمة لكن القيمة الصحيحة تقاس فى الجزء التالى مباشرة باستخدام الميكروميتر).
  - قوة العزل بين أقطاب القاطع المختلفة يجب أن تكون أكبر من 500 ميغا أوم
- تعاد نفس الاختبارات السابقة ولكن مع وضع القاطع فى الوضع OFF-position وهنا يجب أن تعطى كل الاختبارات السابقة قيماً أكبر من 500 ميغا أوم.
- والشكل 13-28 يظهر شكل توصيلات الاختبارات.



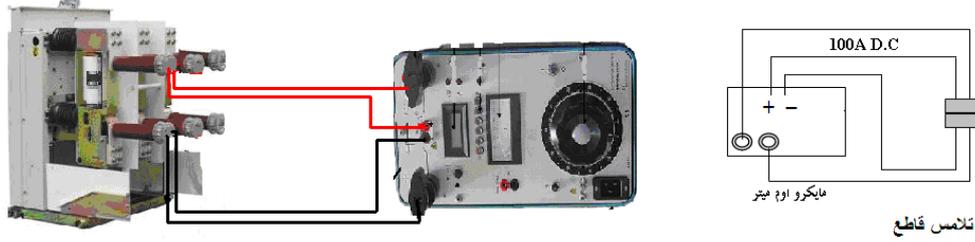
شكل 13-28 :

### 3-10-13 فحص مقاومة التلامس بين أقطاب القاطع المغلقة

يستخدم جهاز ما يـكرو-أوم ميتر لقياس مقاومة الـ Contacts الخاصة بالقاطع ويتم قياس مقاومة كل phase على حدة ، و تتراوح قيمة مقاومة نقاط التلامس للقاطع عند جهد 11 ك ف حول  $12 \mu\Omega$  - 60 أما قواطع الـ 33kV فتتراوح حول  $(25-100) \mu\Omega$  .

وكلما كانت قيمة مقاومة الأقطاب المغلقة قليلة كلما قل قيمة هبوط الجهد وتحسنت مواصفات القاطع ، أما إذا كانت مقاومة تلامس الأقطاب عالية ( أي فيها رخاوة ) فإنها تؤدي إلى ارتفاع درجة حرارة الأقطاب أثناء مرور التيار الكهربائي فيها ويؤدي إلى تآكل الأقطاب وربما يؤدي في النهاية إلى انفجار الأقطاب .

الشكل 13-29 يمثل جهاز المايكرو-أوميتر، وتقاس المقاومة عن طريق إمرار تيار مستمر في أقطاب القاطع مقداره 100 أمبير وقياس مقدار الجهد على الأقطاب بواسطة فولتميتر موجود أيضا داخل الجهاز ثم بتقسيم الجهد على التيار يتم حساب المقاومة ويظهر قيمة مقاومة تماسك الأقطاب على شاشة الجهاز.



شكل 13-29 :

### 13-10-4 اختبار زمن الفصل والتوصيل وجهد التشغيل:

يتم هذا الاختبار على ملف الفصل وملف التوصيل . والهدف من هذا الاختبار هو معرفة زمن الفصل ، وأيضا معرفة أقل جهد يمكن أن يعمل عنده ملف الفصل وملف التوصيل بحيث لو حدث وانخفض جهد البطاريات عن جهد التشغيل العادي بنسبة معينة نكون قد ضمنا عمل ملف الفصل لفصل القاطع عند حدوث أي عطل . ويهدف هذا الاختبار أيضا للتأكد من أن المفاتيح تعمل ميكانيكيا بطريقة صحيحة وأن الفازات الثلاثة تعمل معا في نفس اللحظة .

ويتم هذا الاختبار كالتالي:

- بالنسبة للمفاتيح الجديدة: يتم اختبار زمن الفصل والتوصيل للمفاتيح عندما يكون الجهد على أطرافه مساويا لـ 80% من من جهد الـ D.C المقنن ، ويقاس زمن الفصل أيضا عند 60% من جهد الـ D.C
- بالنسبة للمفاتيح القديمة: يتم اختبار زمن الفصل والتوصيل للمفاتيح فقط عند 100 % من جهد الـ D.C و يلزم تساوي الزمن للأوجه الثلاثة.

### اختبار الفصل الحراري :

- حيث يتم توصل أطراف القاطع على التوالي ثم يتم توصيل القاطع بجهاز الفحص ليتم حقن تيار ( ضعف التيار المضبوط عليه القاطع ) ويحسب الوقت الذي يتم عنده حدوث الفصل **The Trip** ، وبعد ذلك يضرب الناتج في معامل درجة الحرارة **Temperature Factor** لدرجة الحرارة التي تم عندها الاختبار، ودرجة الحرارة المسجلة على منحنى خواص القاطع، ويتم عمل المقارنة.

## اختبار الـ Short Circuit:

- يتم عمل Short Circuit على 2 Poles من القاطع وبعد ذلك يتم حقن تيار بالقاطع حسب تيار القصر للقاطع  $5I_n$  على سبيل المثال، ويتم اختبار سرعة الفصل عند حدوث Short Circuit والتي تقدر 0.01 ثانيه تقريباً.

## 5-10-13 اختبارات تسلسل التشغيل

كما نعلم فإن القاطع معرض للفصل والتوصيل تحت الحمل وأثناء العطل بصورة متتابعة وأحياناً في زمن قصير للغاية ، وبالتالي فنقاط التماس معرضة للسخونة والتلف في حالة التشغيل المتتابع السريع ، ولذلك يتم اختبار تحمل القواطع وفقاً لتسلسل معين . وفيما يلي واحد من أنظمة الاختبارات هذه :

O – 0.3s – CO – 3min – CO

حيث

- حرف الـ O تعني فتح القاطع Open
  - حرف الـ C تعني إغلاق القاطع Close
  - أما وجود الرمز CO مع بعض فتعني عملية غلق ثم فتح مباشرة
  - زمن الثلاث دقائق تعني زمن إعادة شحن سوسته القاطع
  - أما الـ 0.3 sec فتعني زمن إعادة التشغيل
- وبالتالي يمكن أن نقرأ التسلسل السابق كما يلي: فتح القاطع ثم بعد زمن تأخير قدره 0.3 sec يتم عمل غلق وفتح متتابعة ثم يترك 3 دقائق ثم عملية غلق وفتح متتابعة أخرى.

## منطقة الجهد العالي في محطات الـ GIS

يحتوي هذا النوع من المحطات على كافة المعدات الموجودة في المحطات الهوائية السابق ذكرها مثل القواطع (Circuit Breakers) والقضبان (Bus-Bars) والعوازل (Isolators) ومحول التيار (CT) ومحول الجهد (VT) ، والفرق أن هذه العناصر تكون في محطات الـ GIS مغمورة بمادة الـ (SF6) داخل أوعية معدنية (Metal Housing) . مع ملاحظة أن المعدات الداخلية لا تتلامس مع هذه الأنابيب فهي معزولة تماما عنها.

والشكل 13-30 يمثل صورة لمنطقة الجهد العالي في محطات الـ GIS . لاحظ في الصورة ظهور نفس الرموز التي استخدمت في شرح الـ SLD للمحطات الهوائية. وقد سبق الإشارة لبعض من سمات غاز الـ SF6 عند الحديث عن SF6- CB ويفضل مراجعتها الآن.



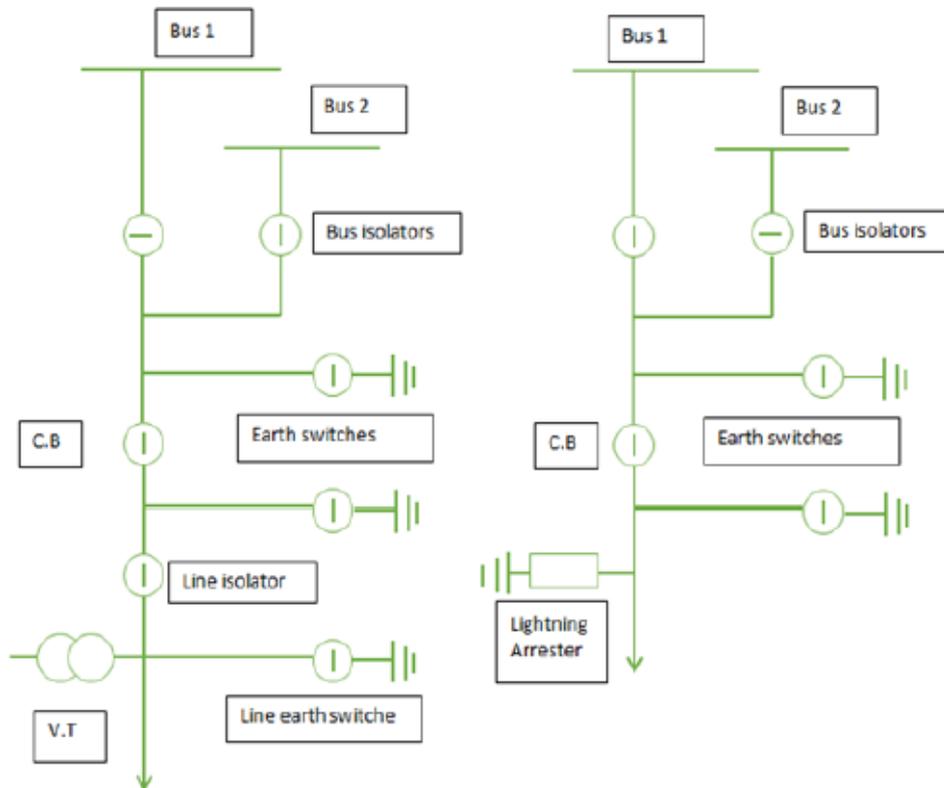
شكل 13-30 :

## 11-13 المهمات في محطات GIS

تتكون منطقة الجهد العالي ( الشكل 13-31) في هذه المحطات (H.V switch gear) من: High Voltage Bus Bar، تتصل عليه مجموعات من الـ Bays وهي :

1- Incoming Bays وتشتمل على الـ Switchgear الخاص بمغذيات الدخول للمحطة من الشبكة العامة.

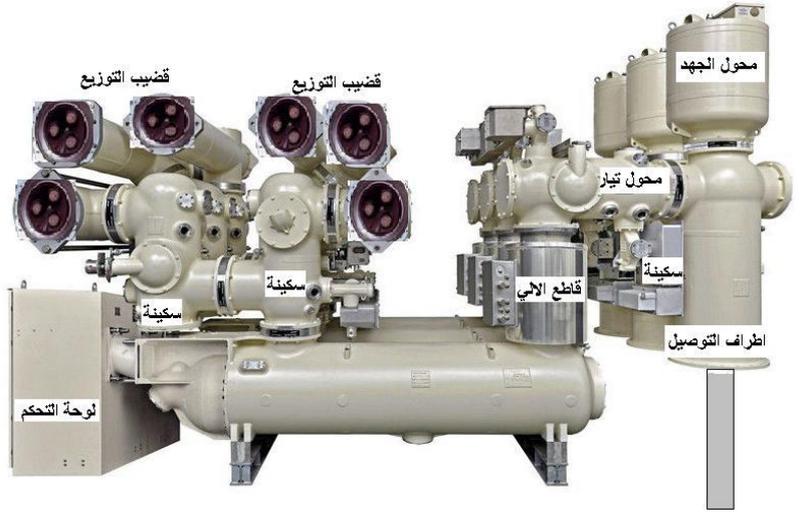
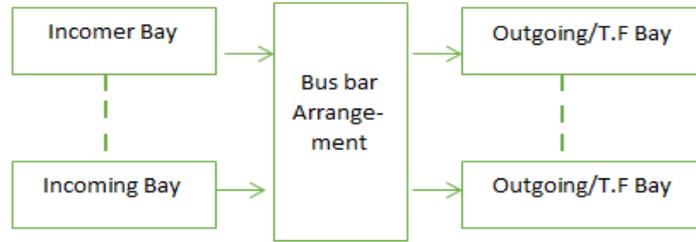
2- Outgoing Bays وتشتمل على الـ Switchgear الخاص بمغذيات الخروج إلى محولات المحطة أو إلى الشبكة العامة.



شكل 13-31 :

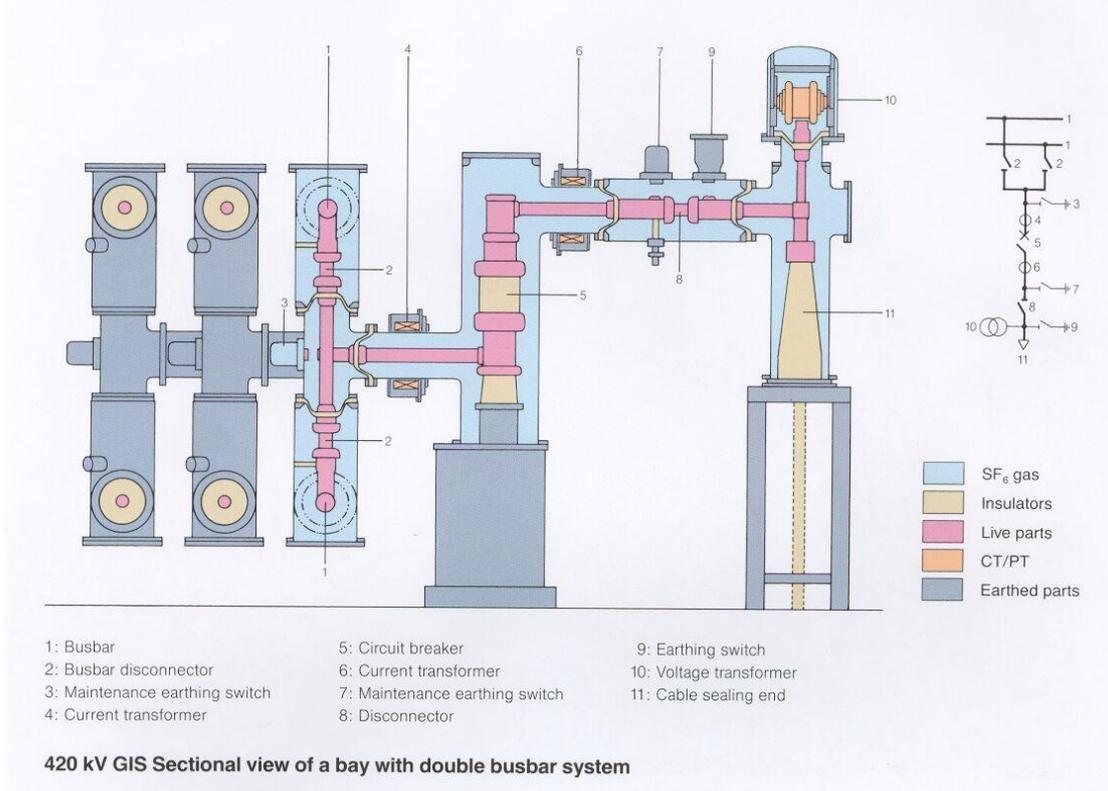
## 11-13 مكونات ال Bay

داخل ال Bay توجد مجموعة معدات ال Switchgear التي يدخل عليها Incoming /outgoing feeders قبل أن تتصل بال BB ، وتشتمل على قاطع CB ، و محول تيار CT ، ومحول جهد VT ومفتاح تأريض ES وسكينة DS تماما كما في دوائر المحطات الهوائية ، لكن مع فرق في الحجم والشكل والذي يبدو في شكل 13-32 التي تمثل Bay واحد . حيث تدخل عليه كابلات الدخول من أقصى يمين الصورة (يمكن أن تدخل أيضا الخطوط الهوائية كما في الشكل 13-35 الذي سيأتي لاحقا) ويمر على المعدات التي ذكرناها وتنتهي على قضبان التوزيع.



شكل 13-32 :

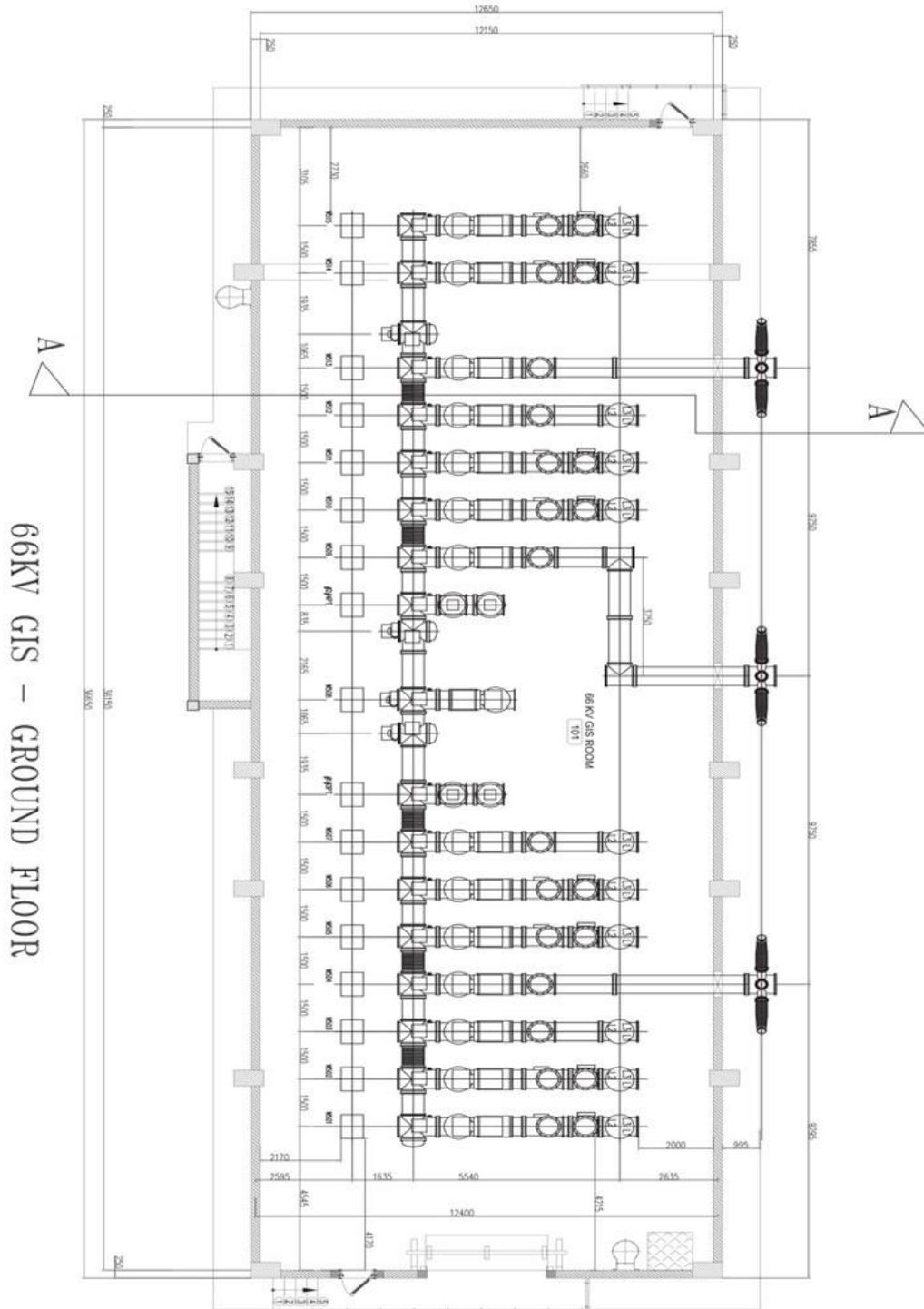
والشكل 13-33 يمثل تفصيل ما بداخل هذه المواسير .



شكل 13-33 :

ويراعى في تصنيع وحدات الـ CT and VT داخل هذه المواسير أن يتم عمل نوع من التحجيب shielding لهذه العناصر منعا لظهور تيارات حثية Induced currents تؤثر في دقة قراءاتها. والشكل 13-34 يبين مخطط Plan لعنبر الـ HV Switchgear في المحطات الغازية جهد 66 kV .

وواضح من المخطط أن لدينا 3 خطوط دخول/ خروج وهي التي تخترق جدار المحطة ثم لدينا عدد 12 Bays وهذه قد تكون متصلة بمحولات المحطة من خلال كابلات أرضية وغالبا سيكون منها واحدة أو اثنتين احتياطى.

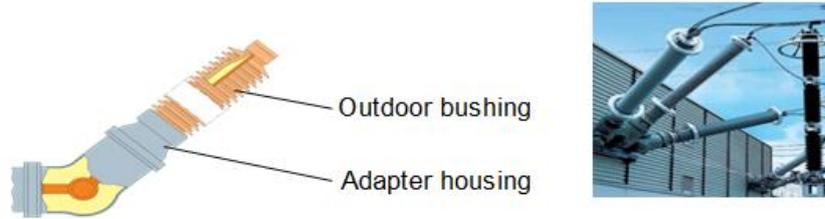


شكل 13-34 :

## 2-11-13 الدخول إلى محطة GIS

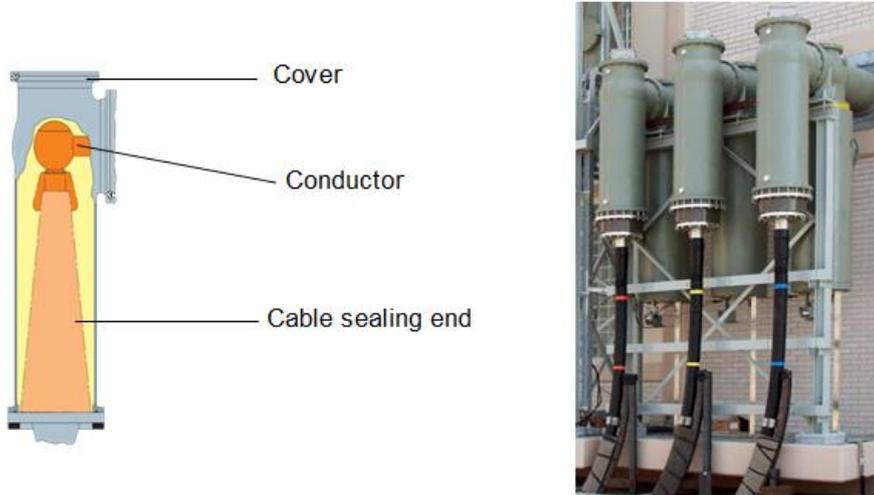
يكون دخول وخروج المغذيات إلى المحطة

- إما من خلال خطوط هوائية (شكل 13-35) من خلال وحدة تسمى Outdoor Termination Module



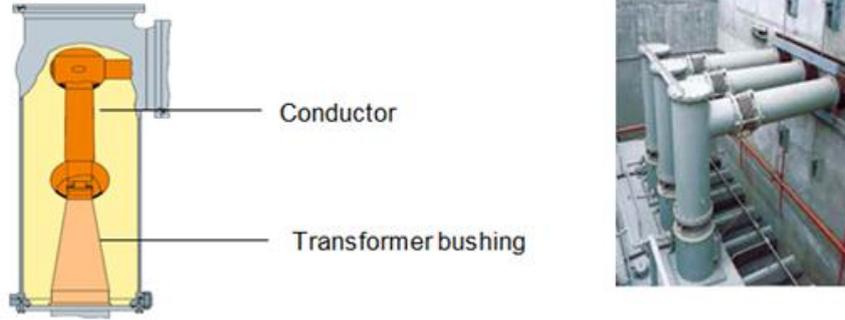
شكل 13-35 :

- أو من خلال كابلات أرضية (شكل 13-36) من خلال وحدة تسمى Cable Termination Module



شكل 13-36 :

- أما المحولات فتتصل بالنظام من خلال Transformer Termination Module كما في شكل 37-13



شكل 13-37 :

### 3-11-13 الحماية من الصواعق في محطات الـ GIS

يتم تثبيت عناصر أكسيد الزنك في مانعات الصواعق و التي تغمر في غاز الـ SF6 بواسطة اسطوانات عازلة بداخل مواسير الـ GIS. و لأن موصلات الـ GIS تتواجد بداخل وعاء معدني مؤرّض فإن المدخل الوحيد لنبضات الصواعق يكون من خلال اتصال الـ GIS بباقي النظام الكهربى. فإذا كان التوصيل عن طريق الكابلات فلا مجال أن تتعرض المعدات للصواعق البرقية ، ولذا فإننا نهتم بأمر الصواعق فقط في حالة الـ SF6-to-Air Bushing. علما بأن مانعات الصواعق المعزولة بالهواء والتي تتركب بالتوازي مع الـ SF6-to-Air Bushing توفر حماية كافية للـ GIS من الصواعق ويسعر أقل من مانعات الصواعق المعزولة بالـ SF6.

## المحولات

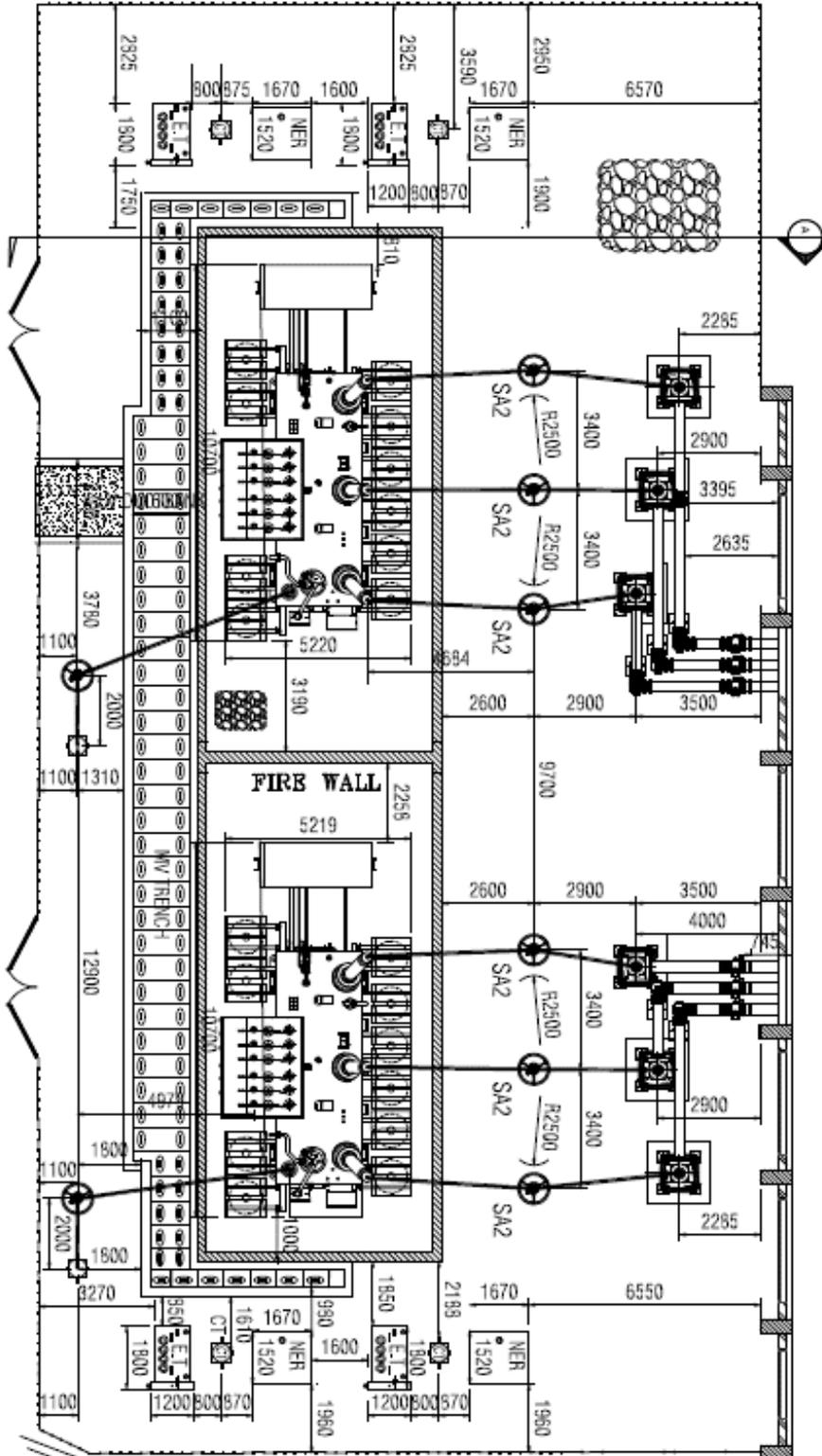
تعتبر المحولات هي العنصر الأساسي في المحطة فالغرض الأساسي من محطة التحويل هو رفع أو خفض الجهد بواسطة هذه المحولات . و تقع المحولات غالبا في فناء منفصل عن فناء منطقة الجهد العالي كما في الشكل 13-38 و ليس هناك مهمات كثيرة في هذا الفناء لأن معظم المهمات الخاصة بالمحول تقع في منطقة الجهد العالي السابقة .



شكل 13-38 : Transformers

(يفضل الرجوع لكتابي المرجع في محولات القوى الكهربائية) لمزيد من التفصيل في هذا العنصر الذي يمثل عصب المحطة .)

والشكل التالي يمثل منطقة المحولات في إحدى المحطات وتظهر اتصالها بمنطقة GIS كما يظهر SA Surge arrestors, الخاصة بكل phase ، ويظهر أيضا بجوار منطقة المحولات two Earthing Transformer, ET ، وكذلك two Neutral earthing Resistance, NER . ويظهر كذلك مسارات الكابلات حول منطقة المحولات والكابلات المتجهة إلى منطقة لوحات الجهد المتوسط.



## القسم الثالث بالمحطة :

## عنبر الجهد المتوسط MV Switchgear

بعد خروج كابلات الجهد المتوسط من المحولات فإنها تتجه إلى منطقة خلايا الجهد المتوسط حيث يتم ربطها على BB الجهد المتوسط من خلال قواطع CBS داخل خلايا كما في الشكل 13-39 . و تشمل كل خلية من هذه الخلايا بالإضافة إلى القاطع ومنطقة دخول الكابل على محول تيار/ جهد و سكينه عزل و أجهزة الحماية و القياس.

وهذا العنبر مكون من مجموعة من خلايا الجهد المتوسط (شكل 13-39) ، و عدد هذه الخلايا يساوى عدد كابلات الجهد المتوسط الخارجة من المحطة (خلايا الخروج) بالإضافة إلى عدد المحولات و التي تتصل بخلايا الدخول لهذا العنبر. ويضاف إلى ما سبق عدد آخر من الخلايا ، وهى خلايا القياس التي تحتوى على معدات قياس الجهد والتيار والقدرة بأنواعها ، وهناك خلايا لتوصيل مكثفات تحسين معامل القدرة ، وهذا كله بالإضافة بالطبع إلى خلايا الربط بين أجزاء اللوحة والخلايا الاحتياطية.

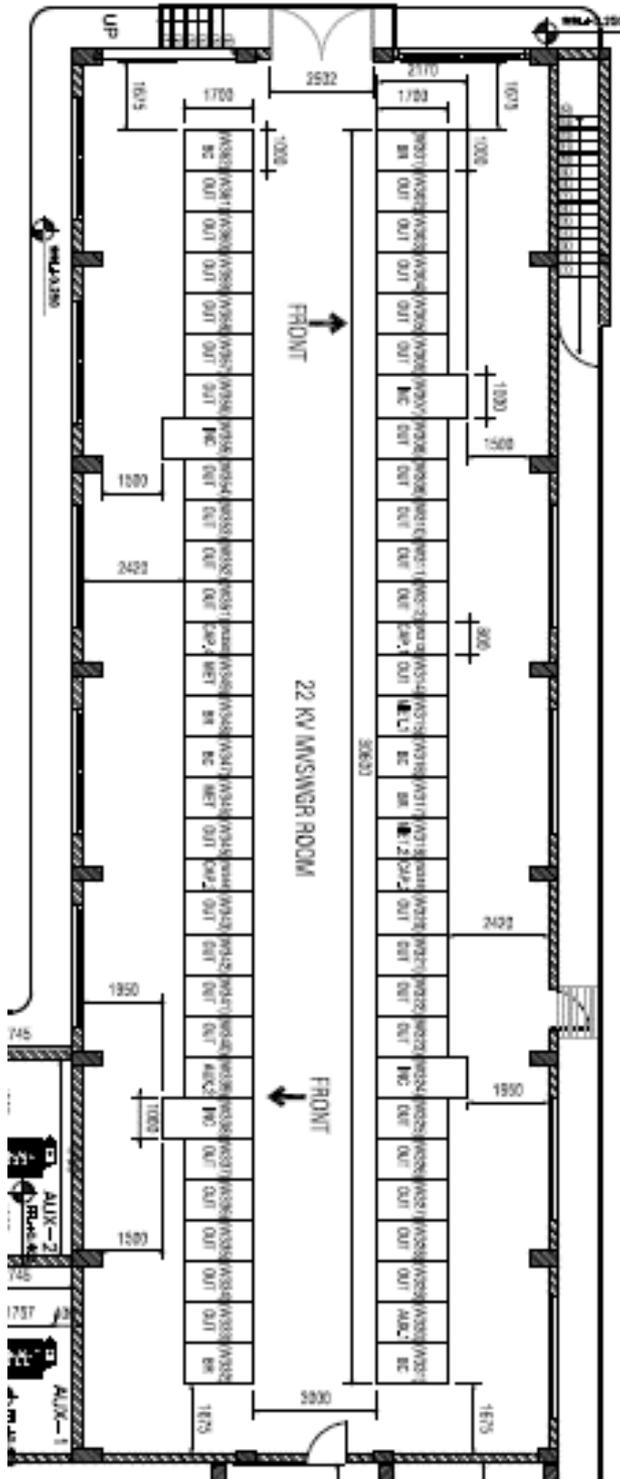
و كما ذكرنا فإن أحد أهداف محطات التحويل هو إعادة توزيع الطاقة الداخلة عليها من عدد محدود من المغذيات عالية الجهد والقدرة إلى عدد كبير من المغذيات منخفضة الجهد والقدرة ، لتعطي تغذية مساحة جغرافية أكبر وهذ الخلايا كلها متجمعة على الـ LV BB الخاص بالمحطة.



شكل 13-39 :

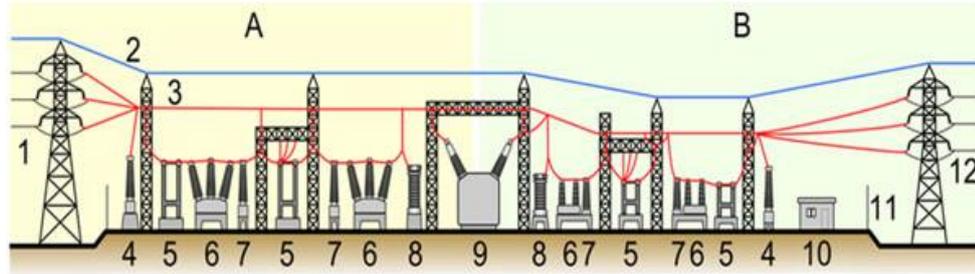
تفاصيل أكثر عن هذه الخلايا تجدها في الباب الرابع (الفصل 19) في الجزء الخاص بموزعات الجهد المتوسط.

والشكل التالي يمثل مخطط هذا القسم في أحد المحطات بمصر.



## 4-11-13 مقارنة المحطات الهوائية والغازية

المحطات الهوائية كما ذكرنا سابقا هي المحطات التي تستخدم الهواء كعازل بين الـ Phases المختلفة وكذلك أيضا بين الـ Phase و الأرضي ، ويستخدم الحديد المجلفن في الإنشاءات لدعم المعدات والعوازل والخطوط الداخلة والخارجة للمحطة. والشكل 13-40 يجمع عناصر المحطة الهوائية في رسم توضيحي.



A: Primary power lines' side B: Secondary power lines' side  
1. Primary power lines 2. Ground wire 3. Overhead lines 4. Transformer for measurement of electric voltage 5. Disconnect switch 6. Circuit breaker 7. Current transformer 8. Lightning arrester 9. Main transformer 10. Control building 11. Security fence 12. Secondary power lines

شكل 13-40 :

يوجد نوعان من المحطات الهوائية:

- 1- محطات خارجية **Outdoor**: وهي المحطات التي تكون مكشوفة في الهواء غير مغطاة.
  - 2- محطات داخلية **Indoor**: تكون داخل مبنى مغطى و يستخدم هذا النوع من المحطات الهوائية في الأماكن شديدة التلوث و الأماكن الغير مستقرة مناخيا.
- وبالتالي فليس معنى أنها هوائية أنها مبنية في الهواء الطلق بل يمكن أن تبني داخل مبنى وتظل تسمى هوائية طالما أن العزل بين أجزاءها هو الهواء كما في الصورة شكل 13-41.



شكل 13-41 :

كما أن المحطة قد تكون غازية لكنها في الهواء الطلق بدون مبنى كما في الصورة شكل 13-42

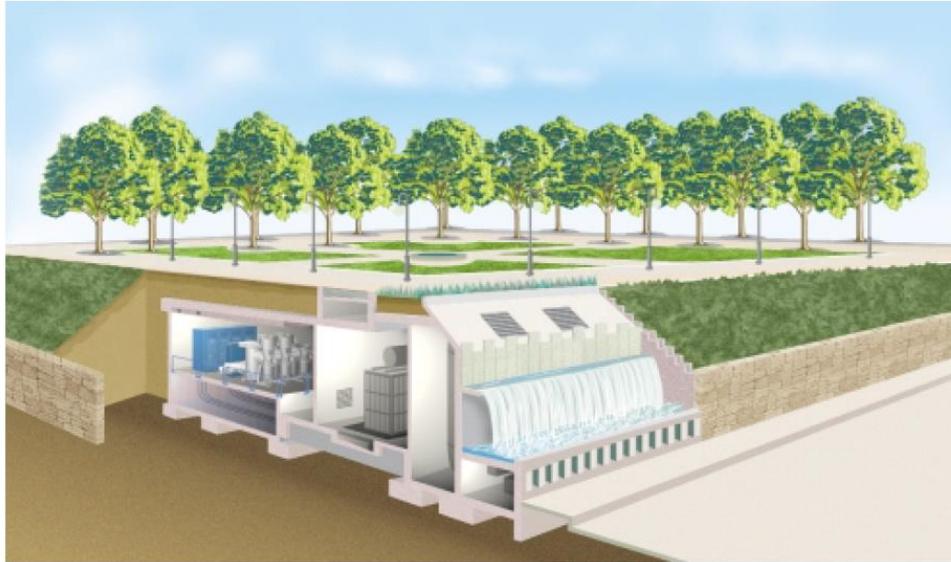


شكل 13-42 :

أما محطات الـ GIS ، فمعلوم أن من أكبر التحديات الرئيسية اليوم في عالم نقل الطاقة الكهربائية هو تحقيق مستويات عالية من الجهد في شبكات النقل حتى لو كانت داخل المناطق الحضرية. وهذا يتطلب أن تشغل المعدات مساحات صغيرة ، ويتطلب ذلك أيضا انخفاض مستوى الضجيج والانبعاثات الكهرومغناطيسية.

والمحطات المعزولة بالغاز (GIS) لا مثيل لها عندما يتعلق الأمر بمساحة الإشغال والاعتمادية والكفاءة والسلامة. فتصميم محطة الـ GIS يكون أصغر بنسبة تصل إلى أكثر من 80% من إجمالي مساحة المحطات التقليدية كما أنها تكون أقل حاجة للصيانة . يعتبر هذا النظام من أفضل الأنظمة في الشبكة من حيث التشغيل والصيانة وهو موجود بالمحطات ذات السعات العالية وكذلك أكثر محطات التوليد.

بل إن محطات الـ GIS يمكن إنشاؤها تحت الأرض كما في المحطة التي أنشأتها ABB في أسبانيا وتظهر في الشكل التالي . والجميل أنه تم إنشاء حديقة عامة فوق المحطة ، والأجمل من ذلك تلك الفكرة العبقرية بأن أضافوا شلالات مائية في المحطة والتي يبدو أنها لتجميل الحديقة والصحيح أن الغرض من هذه الشلالات الصناعية هو المساهمة في عمليات التبريد بالمحطة ، كما أن صوت الماء في هذه الشلالات يغطي على صوت المراوح الموجودة أسفل الحديقة!!.



Use of ABB gas-insulated switchgear allowed the 132-kV transformer substation Barbaña in the center of Orense, Spain, to be constructed underground and a park built over it which harmonizes with the surroundings. The sound of the waterfall, which acts as a heat-exchanger, hides the noise made by the fans.

1

### 13-11-5 ميزات المحطات الهوائية:

- أعمال البناء المطلوبة لهذا النوع أقل نسبياً من محطات GIS وتكلفة تركيب الـ switchgear أقل.
- عمل توسعات في هذا النوع من المحطات أسهل.
- الوقت اللازم لبناء المحطة أقل.

- جميع المعدات يمكن رؤيتها وبالتالي فإكتشاف الأعطال يكون أسهل.

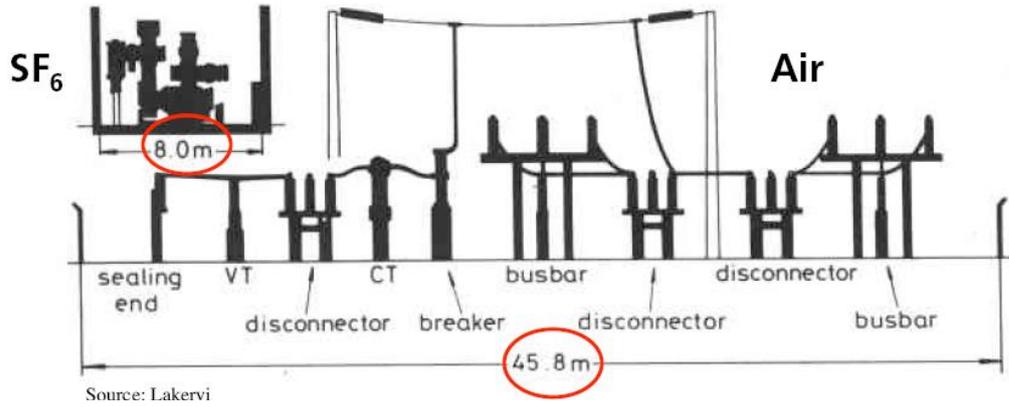
### 6-11-13 عيوب المحطة الهوائية :

- تبنى على مساحات واسعة مقارنة بمحطات الـ (GIS). فمن المعروف أن أقصى جهد يتحمله الهواء هو 30 kV/cm فى الضغط الجوى العادى ، وإذا زاد الجهد عن هذه القيمة فإن عزل الهواء ينهار و يصبح موصلا. وبالتالي فإن المحطات الهوائية تحتاج إلى مساحات كبيرة حتى يمكن توفير قيمة العزل المطلوبة.
- ونتيجة للنقطة السابقة فإن بناء محطة هوائية أصبح معقدا في التخطيط و يتطلب الكثير من الوقت في التنفيذ مما يزيد من التكلفة الثابتة ، كما أن احتياجها للصيانة الدورية يجعل تكلفة التشغيل أيضا مرتفعة.
- محطات الـ AIS تعتبر أقل فى الاعتمادية من محطات GIS بسبب أنها معرضة أكثر للصواعق ، وبسبب أن الهواء ردى كعازل ، فتغير درجة حرارة الهواء و مستوى الرطوبة و المطر وملوثات الهواء عوامل رئيسية تتسبب في انهيار العزل عند جهد أقل من الجهد الذى تمت عليه الحسابات .

### 7-11-13 ميزات محطات الـ GIS :

- هذه المحطات آمنة وتتم عزل الأجزاء الكهربائية باستخدام أغلفة معدنية مؤرسة ومن ثم فهناك ثقة فى عزل كل الأجزاء التى يمر بها تيار كهربى .
- والمحطات المعزولة بهذا الغاز تزيل المجال الكهربى بالكامل لأن الأغلفة المعدنية بهذه المحطات تمنع ظهور المجال الكهربى خارجها ، وهذه فائدة حقيقية للقائمين بأعمال التركيبات Installers وموظفي التشغيل و الصيانة ، ومن يعيشون على مقربة من تلك المحطات.
- تكلفة التشغيل قليلة.
- معدلات ووقت الصيانة أقل ، فهى تتطلب صيانة كل أربع سنوات بينما AIS تتطلب صيانة كل سنة أو سنتين ، كما أن مدة الصيانة نفسها فى محطات الـ AIS تكون أكبر ، فصيانتها الـ AIS breaker وحده تأخذ حوالي 4-8 ساعات فى كل مرة (للقاطع فقط).
- المحطة غير مقيدة بالموقع فمن الممكن أن تبنى المحطات فى الأماكن المفتوحة أو المغلقة فوق أو تحت الأرض بجانب البحار و المحيطات أو فوق المرتفعات أو فى مناطق الجليد أو الممطرة. أى أن استخدام هذا النوع من المحطات لا يتأثر بالظروف المناخية أو الموقع نظرا لأنها محكمة الغلق ولا يتأثر العزل بمثل هذه الظروف.

- سهولة التركيب (تستغرق وقتا أقل بنسبة 30 % من المحطات الهوائية).
  - التوفير في مساحة المحطة ، فمثلا عند جهد 400 كيلو فولت تكون مساحة محطة الـ AIS تقريبا تساوى  $199 * 236 = 46765$  م<sup>2</sup> ، أما في محطات الـ (GIS) فتكون المساحة تقريبا تساوى  $12 * 43 = 522$  م<sup>2</sup> فقط.
- والفرق بين النوعين من حيث المساحة المطلوبة للمحطة واضح من خلال الشكل 13-43:



شكل 13-43 :

### 13-11-8 عيوب محطات الـ (GIS) :

- التكلفة العالية مقارنة بالمحطات التقليدية
- في حالات حدوث الخلل تكون الأضرار على نطاق واسع
- تحديد الخلل و اكتشافه و تصليحه يستغرق وقتا كبيرا .
- ضغط الغاز يجب أن يكون مراقبا في جميع مكونات المحطة فأى انخفاض في ضغط الغاز قد يؤدي إلى حدوث خلل قد يكون مدمرا
- غاز SF6 يسبب تآكل الأوزون و يساهم في ظاهرة الاحتباس الحراري

### 13-11-9 مقارنة بين اقتصاديات المحطات

تكلفة المعدات في محطات الـ GIS أعلى من نظيراتها في المحطات التقليدية التي تستخدم عزل الهواء كما ذكرنا. و ترجع هذه الزيادة في التكاليف إلى عدة عوامل لعل أبرزها وجود إطار معدني. و مع ذلك فإن محطات العزل بالغاز هي أقل في التكلفة من حيث التركيب. كما تمتلك محطات الغاز ميزة هامة تتمثل في انخفاض تكلفة تنمية أو تأهيل الموقع. و هذه الميزة تزداد أهميتها كلما ازداد جهد المحطة لأنه

في المحطات التقليدية يكون كلمة "جهد أعلى" تعنى "مساحة أكبر" و بالتالى تكاليف أكثر لتأهيل هذه المساحة.

عند الجهود العالية كان متوقعا من محطات الـ GIS أن تكون أقل كلفة من التقليدية ، ولكن ما حدث أنه قد تم خفض تكلفة محطات الهواء بصورة كبيرة عن طريق التقدم التقنى و الصناعى (و خصوصا فى القواطع) و ذلك خلال الثلاثين سنة الماضية ، بينما لم تظهر أسعار مكونات الـ GIS أى انخفاض كبير خلال هذه الفترة ، وكانت تكلفة محطات الـ GIS أعلى من تكلفة الـ AIS بحوالي 10 % إلى 40% .

غير أن الوضع قد بدأ بالتغير نسبيا فى وقتنا الحالى ، فإننا نشهد تناقصا فى كلفة الـ GIS نتيجة للتكامل بين أجزاء المحطات. كما أن ظهور نظم التحكم الرقمية و تزايد استخدامها فى محطات النقل أدى إلى طفرة ملحوظة فى محولات الجهد والتيار خفضت كثيرا من كلفتها. علاوة على أن تكلفة التركيب و تأهيل الموقع تنخفض تدريجيا فى محطات الـ GIS.

و حاليا هناك توجه جديد يسمى "تقنيات السويتش المختلطة" أو "محطات عزل الغاز الهجينة" و التى تستخدم قواطع و مفاتيح و محولات تيار و جهد معزولة بغاز الـ SF6 موصولة بباقي المعدات فى المحطة عن طريق موصلات معزولة بالهواء. هذا التطور الحديث ينبىء بحدوث طفرة فى أسعار الـ GIS مع التضحية باستخدام مساحات أكبر للمحطة.

## 14

## ترتيبات قضبان التوزيع

## Bus Bars Arrangements

دور الـ BB فى المحطات أنه يسهل عملية توزيع الطاقة بين دوائر الدخول والخروج ، وهو عنصر هام وخطير بالمحطة لأن أى عطل عليه قد يتسبب فى خروج المحطة بالكامل. فوظيفة الـ BB هى تجميع الطاقة الكهربائية القادمة من دوائر الدخول (المصدر) ثم توزيعها على دوائر الخروج (الأحمال والمحولات والخطوط الخارجة من المحطة) .

## 1-14 تصنيع القضبان العمومية

يوجد أسلوبان أساسيان مستخدمان فى تصنيع القضبان هما:

- 1- القضبان الصلبة Rigid bus .
- 2- القضبان المرنة Strain bus .

وفى الغالب تستخدم القضبان الصلبة rigid فى حالة الجهد الكهربى المتوسط والمنخفض ، وتكون مصنوعة من الألومنيوم أو النحاس على هيئة قضبان أو أنابيب تربط بين أجزاء المحطة المختلفة كما فى الشكل 1-14.



شكل 1-14:

أما في حالة الجهد العالي فتستخدم القضبان المرنة strain المصنوعة من أسلاك الألومنيوم المجذولة والمدعمة ACSR ، أو من النحاس ويتم تثبيتها على عوازل Strain type insulators وذلك للربط بين مكونات المحطة كما في الصورة شكل 2-14.



شكل 2-14:

وأحيانا تكون الـ BB معزولة بغاز الـ SF6 داخل مواسير كما في الشكل 3-14.



شكل 14-3:

وبوجه عام يستخدم الألومنيوم والنحاس وسبائك الألومنيوم المعالجة حرارياً وخاصة في حالة الأنابيب hollow tube bus bars التي تستخدم في الجهد العالي أو الفائق . ويتميز الألومنيوم عن النحاس بأنه أقل في الوزن كذلك يحتاج لصيانة أقل ، وإن كان النحاس أعلى فإنه يتميز أيضا بأن مقطع موصل الألومنيوم يكون أكبر بحوالي 33% من مقطع موصل النحاس لنفس قيمة التيار .

#### 1-1-14 مميزات وعيوب البـ (Rigid Bus) :

أهم المميزات:

- أقل استخداما للحديد وأسهل في التصميم المدني.
- أسهل في تنظيف العوازل .
- أقل ارتفاعا ويمكن فصله للصيانة.
- أفضل من حيث رؤية الأجهزة و المعدات.

أما أهم العيوب فهي:

- استخدام العديد من العوازل والدعامات وبالتالي الحاجة إلى صيانة هذه العوازل وتنظيفها .
- يتطلب مساحة أكبر مقارنة بالـ Strain bus

• أعلى تكلفة مقارنة بـ (strain bus).

وتتوقف قيمة المسافات بين القضبان حسب جهد التشغيل كما في الجدول 1-14

جدول 14 - 1:

الجهد	مسافة بين الفاز وارضى بملى ميتر	مسافة بين الفاز والفاز بملى ميتر
6.6	139.7	177.8
11	177.8	228.6
22	279.4	330.2
33	381	431.8
66	685.8	787.4
110	863.6	990.6
132	1066.8	1219.2
220	1778	2057.4

#### 2-1-14 التصنيف حسب شكل الموصل

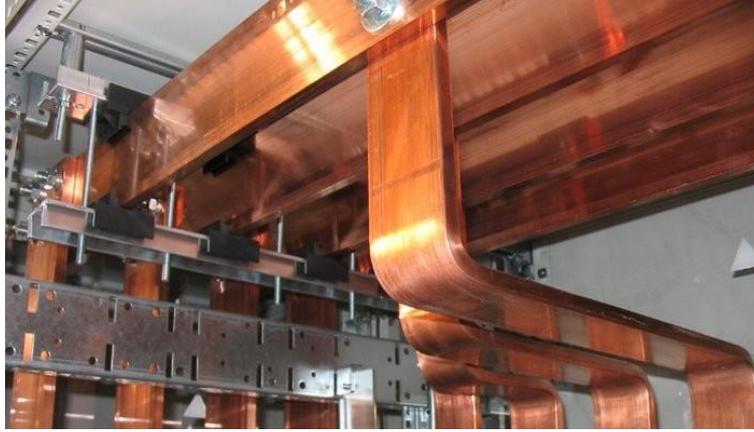
ويمكن تصنيف الـ BB طبقاً لشكل الموصل إلى عدة أنواع:

1- النوع المسطح Flat BB كما في الصورة التالية وفي هذا النوع يمكننا حساب قيمة التيار الذي يتحملة الـ BB من المعادلة التالية:

$$I = 7.73A^{0.5} p^{0.39}$$

حيث

- A مساحة المقطع  
P السمك في حالة المسطح والمفرغ



2- النوع المفرغ كما في الصورة التالية ، وله سمك ( P ) ، وفي هذا النوع يمكننا حساب قيمة التيار الذي يتحمله الـ BB من المعادلة التالية:

$$I = 8.63A^{0.5} p^{0.36}$$



3- النوع المصمت ، وفي هذا النوع يمكننا حساب قيمة التيار الذي يتحمله الـ BB من المعادلة التالية:

$$I = 13.6A^{0.68}$$

وفي كل الحالات السابقة فقد افترضنا أن الارتفاع في درجة الحرارة يمكن أن يصل إلى 50 درجة مئوية فوق درجة حرارة الجو التي يفترض أنها 40 درجة. ويفترض أيضا أن المعدن المستخدم هو النحاس الذي له resistivity تساوى  $1.724 \mu\Omega \cdot \text{cm}$  عند 20 درجة مئوية. و يمكن الرجوع لتفصيلات ذلك في كتب نظم القوى الكهربائية.

## 2-14 ترتيبات الـ BB ARRANGEMENTS

يمكن تقسيم الـ BBS من حيث التركيب إلى عدة أنظمة ( وكل نظام منهم يندرج تحته عدة أنظمة فرعية):

1-Single BB

2-Double BB

3-Ring System

ويوجد داخل كل Substation نوعان من الـ BBs : أحدهما جهة الجهد العالي ، والآخر جهة الجهد المتوسط. والهدف من الـ BB الخاص بالجهد العالي كما ذكرنا هو ربط دوائر الدخول/ الخروج من/إلى الشبكة العامة من جهة ، وربطها مع محولات القدرة من جهة أخرى ، بحيث يمكن للمحطة أن تستقبل قدرة أو تنقل قدرة من / إلى الشبكة.

أما الـ BB الخاص بالجهد المتوسط فوظيفته ربط الكابلات الخارجة من محولات القدرة الرئيسية بالمحطة بمجموعة كابلات الجهد المتوسط المتجهة خارج المحطة لتغذية أحمال المستهلكين.

والسبب في تنوع أشكال الـ BB هو المزيد من تسهيل عملية اختيار النوع المناسب للمحطة من حيث التشغيل والتكلفة.

**ويتم التمييز بين الأنواع المختلفة حسب حجم توافر الميزات التالية في نظام الـ BB :**

- بساطة النظام.
- سهولة الصيانة للمعدات المختلفة.
- التقليل من مدد انقطاع الخدمة.
- توفر إمكانية التوسع مع نمو الطلب.
- توفر إمكانية إضافة دوائر جديدة للمحطة دون الحاجة لفصل الدوائر الموجودة بالخدمة أثناء عملية التركيب.

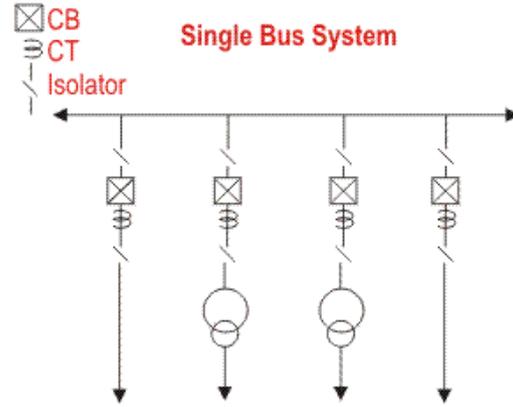
وبالتبع هذه الميزات جميعا قد يتوافر بعضها أو كلها في نظام ولا يتوافر في الآخر ، وطبيعى أيضا أن التكلفة تزيد بزيادة الميزات ، ومن هنا ستكون هناك موازنة ما ، عند تصميم أى محطة للوصول لأفضل الاختيارات .

## 3-14 النظام الأول : SINGLE BUS BAR :

يستخدم في المحطات ذات القدرات المنخفضة والجهود المتوسطة ويوجد منه نوعان :

### 1-3-14 محطات تحويل أحادية القضبان

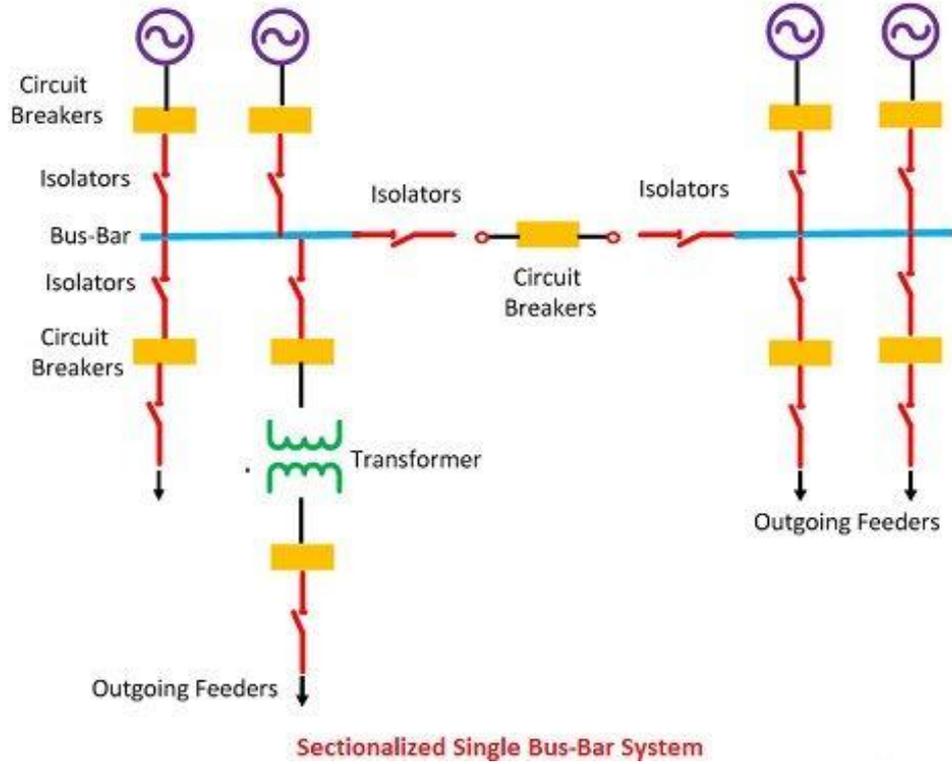
وهذا النوع هو أبسط أنواع الـ BB وأرخصها ، ويندر أن تجده في محطة تحويل مهمة ، ولكن قد تجده في محطات التحويل الصغيرة داخل شبكات التوزيع كما في الشكل 4-14. وبالطبع يعيبه أنه في حالة حدوث عطل بدائرة الدخول أو على أى جزء بين الـ BB فستخرج كل الدوائر المتصلة على هذا الـ BB. وأيضا إذا أردت أن تضيف دائرة خروج جديدة على هذا الـ BB أو حتى عمل صيانة في خلية قديمة موجودة فيلزم أولا أن تفصل وتعزل الـ BB كله حتى تنتهى من عمل التركيبات الجديدة.



شكل 4-14:

### 2-3-14 محطات تحويل أحادية القضبان مع فاصل القضبان

لتقليل المشاكل السابقة يمكن استخدام sectionalized Single BB كما في الشكل 5-14 ، وهذا النوع له اعتمادية أعلى حيث أن كل جزء يتصل بمغذى مستقل ، فعند حدوث عطل على جزء ما فإننا نفقد فقط نصف أو ثلث الأحمال (حسب عدد الـ Sections ) وليس كل الأحمال كما في النوع الأول . والصورة التالية شكل 6-14 تمثل نموذجا لـ Single BB with 3-Sections في محطة جهد 132 ك ف.



شكل 5-14:

كما يمكن تغذية الجزئيين من مغذى واحد فى حالة حدوث عطل فى أحد المغذيين بشرط أن يتحمل المغذى الرئيسى لهذا الجزء الحمل بالكامل ، فإذا كان لا يمكنه أن يتحمل كل الحمل فيمكن أيضا توصيل الجزئيين ولكن مع فصل بعض الأحمال غير المهمة حتى يصبح المغذى قادرا على تحمل بقية الأحمال. وبالطبع فهذا النوع والنوع الذى سبقه أيضا لا تجدهما فى حالة المحطات المهمة.

ويعيب هذا النظام كما هو الحال بالنسبة لنظام single bus system ، أن صيانة المعدات ( الـ CB مثلا ) فى أي Bay لا يمكن أن تتم من دون انقطاع التغذية أو المحولات المتصلة بهذا الـ Bay.



شكل 14-6:

## 4-14 النظام الثاني: القضبان المزدوجة DOUBLE BB.

يستخدم هذا النظام في المحطات ذات القدرات العالية وأنظمة الجهد العالي ، وذلك من أجل الاستفادة من توزيع ونقل الأحمال الكهربائية بطريقة تضمن استمرارية أفضل للتغذية . ويوجد منه عدة أنواع :

- Double BB with Single CB
- Double BB with Double CB
- Double BB with One and Half CB
- Double BB (Main and Transfer)

ولكل شكل منهم مميزات وعيوبه ، لكن الميزة المشتركة فيهم جميعا هي أنه إذا حدث عطل على أي من الـ Two-BBs أو إذا تم فصل أحدهما لإضافة أو عزل دائرة جديدة فلن يتسبب ذلك في أى مشكلة بسبب وجود الـ BB الثاني الذى يمكن نقل جميع الدوائر إليه باستخدام رابط القضبان Bus Coupler،

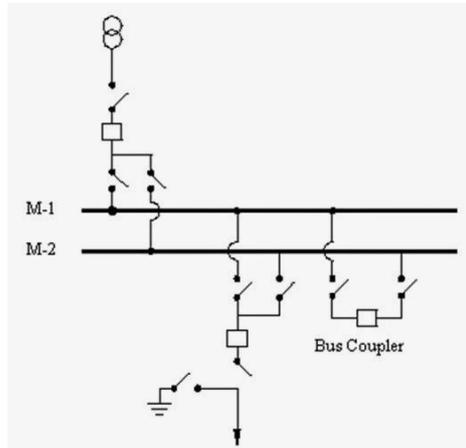
BC كما سنرى. لكن عند حدوث مشكلة على دوائر الدخول أو دوائر الخروج سيكون هناك فرق بين الأنواع الأربعة في درجة الاعتمادية كما سنرى.

#### 14-4-1 النوع الأول: Double BB with Single CB

في هذا النوع (شكل 14-7) وعند الحاجة مثلا لإضافة دائرة جديدة على M-1 يمكن نقل كافة دوائر الدخول والخروج إلى M-2 بالخطوات التالية :

- غلق سكاكين الـ Bus Coupler, BC
- غلق الـ CB الخاص بالـ BC (الآن أصبح الـ 2-BBs لهما نفس الجهد)
- غلق سكاكين الدوائر الموصلة على M-2 (لاحظ أن فرق الجهد على هذه السكاكين يساوى صفرا ومن ثم يمكن فتحها وغلقها بأمان )
- فتح سكاكين الدوائر على M-1
- فتح الـ CB الخاص بالـ BC
- فتح سكاكين الـ BC

الآن أصبحت جميع دوائر الدخول والخروج موصلة على الـ BB الثانى ويصبح الأول جاهزا لأي صيانة أو إضافة تركيبات دون التأثير على الخدمة.



شكل 14-7:

ويعيب هذا النوع عدم إمكانية عمل صيانة على الـ CB الخاص بدائرة خروج دون فصل الأحمال على هذه الدائرة وتأثرها ، والوضع سيكون أسوأ إذا كانت الصيانة على الـ CB الخاص بدائرة الدخول إذا كانت

هناك دائرة واحدة أو كانت الدائرة الأخرى لا تتحمل كافة الأحمال ، بمعنى أنه مفيد فقط في صيانة الـ BB أو عند إضافة أحمال .

ويعيبه أيضا استخدام ثلاث سكاكين فصل (Isolators) لكل دائرة فضلا عن استخدام قاطع إضافي وهو الخاص بالـ Bus Coupler.

لاحظ الفرق بين الـ Bus Section في النظام الأول والـ Bus Coupler في النظام الثاني:

✚ فالأول يسمى مجزئ القضبان Bus Section ، وهو عبارة عن قاطع يقوم بتجزئة الـ BB إلى جزأين مما يعطي مرونة في استمرارية التغذية للأحمال أثناء حدوث الأعطال أو إجراء أعمال الصيانة على أحد الأجزاء كما رأينا .

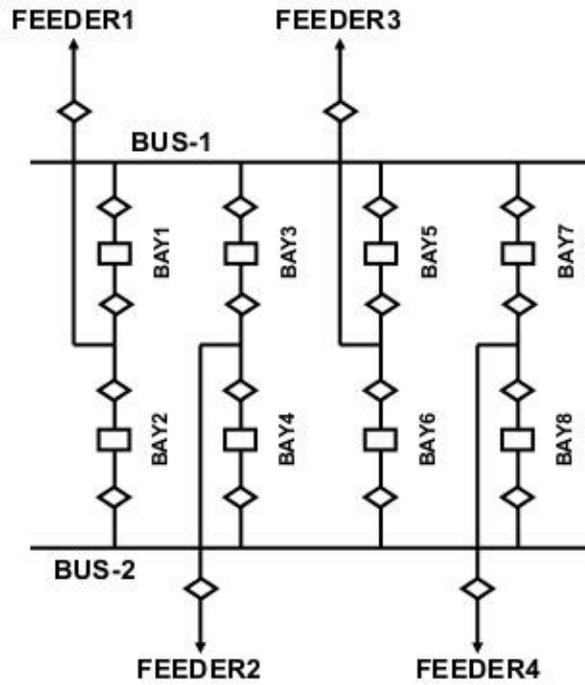
✚ أما الثاني فيسمى دامج القضبان Bus Coupler هو أيضا قاطع لكنه يقوم بعملية ربط أكثر من BB مع بعض لكي يضمن استمرارية التغذية للأحمال أثناء حدوث الأعطال أو إجراء الصيانة على أحد القضبان أو لسهولة التوزيع الأحمال.

#### 14-4-2 النوع الثاني Double BB with Double CB

في هذه التوصيلة (شكل 14-8) تكون دائما جميع الـ CBs مغلقة في الظروف الطبيعية.

وبالإضافة للميزات التي ذكرت في النوع السابق فلدينا هنا ميزة إضافية وهي أنه في حالة حدوث مشكلة في الـ CB المتصل بالـ BB الأول الخاص بالدائرة سواء (الدخول أو الخروج) فيمكن هنا مباشرة استخدام الـ CB الثاني ، وهذه ميزة هامة على اعتبار أن مشاكل الـ CB متكررة.

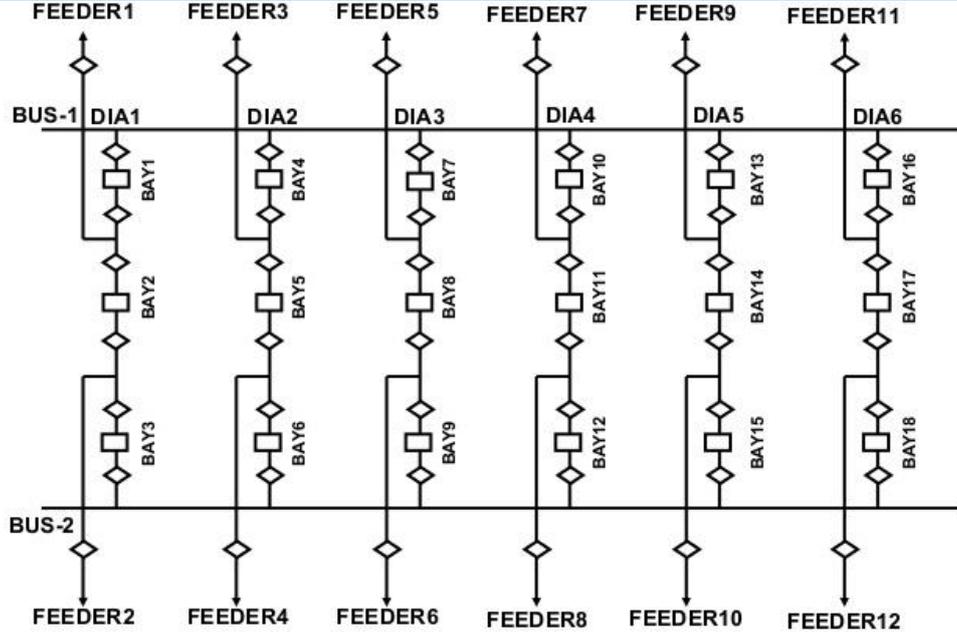
وهذا بالطبع مكلف جدا ويندر أن تجده في محطات التحويل العادية (ولكنه يستخدم في محطات التوليد ومحطات التحويل ذات الجهد العالي والفائق نظرا لأهمية هذه المحطات ) ويعيب هذا النوع بالإضافة إلى التكلفة والمساحة الكبيرتين أنه يحتاج لفصل الـ 2-CBs لكل عطل وهذا يضاعف احتمالية حدوث Breaker Failure .



شكل 8-14:

### 3-4-14 النوع الثالث: Double BB with One and Half CB

هو حل وسط بين النظامين السابقين (شكل 9-14) فلدينا هنا في الشكل BB-2 وبينهما تركيب ثلاثة قواطع لكل دائرتين أي لدينا قاطع و نصف لكل دائرة و هذا يعني نوعا من التوفير في عدد القواطع. لكن نظام الوقاية سيكون نسبيا أكثر تعقيدا من الأنظمة السابقة . ولأهمية هذا النظام وكثرة وجوده بالمحطات سيتم شرحه هنا بصورة مفصلة.



شكل 9-14:

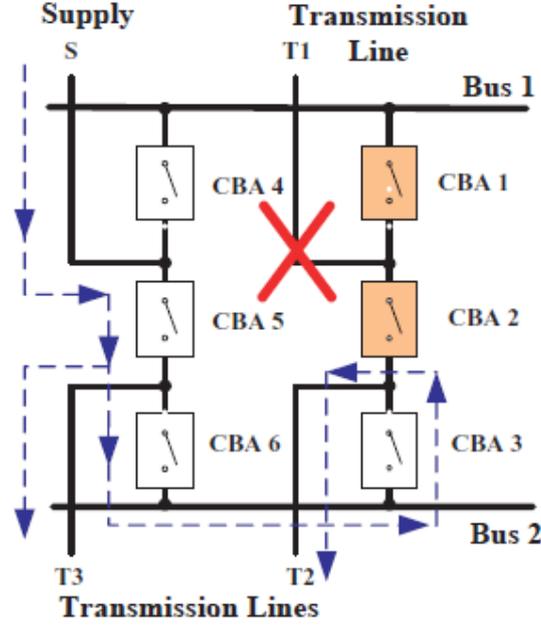
الأصل أن الـ 3-CBs الموجودة على كل دائرتين كلهم مغلقين في الظروف الطبيعية (تسمى المجموعة الواحدة Bay كما في الشكل 9-14) ، وبالتالي فالـ BBs الاثنان يعملان أيضا في الظروف الطبيعية ، ولذا يعتبر كل واحد منهما Main-BB ، ولا فرق بينهما ويسمى الـ CB الموجود في الوسط بالـ Tie-Breaker .

وعند حدوث عطل على BUS-2 مثلا سيتم فصل كل الـ CBs المتصلة بهذا الـ BB مع ملاحظة أن جميع الدوائر لم تتأثر لأنها ستتغذى من BUS-1 (الـ CB في المنتصف يكون مغلقا) .

وعند حدوث عطل على أي خط فإن كلا الـ CBs المتصلان بالخط المعطل يفصلان (يمين و شمال الدائرة) و بالتالي تعزل الدائرة المعطلة تماما دون تأثير على أي دائرة من الدوائر الأخرى بالمحطة ، فمثلا لو كان هناك عطل على Feeder-8 في الشكل السابق فسيتم عزله بفتح الـ CBs الموجودة في Bay11 and Bay12 .

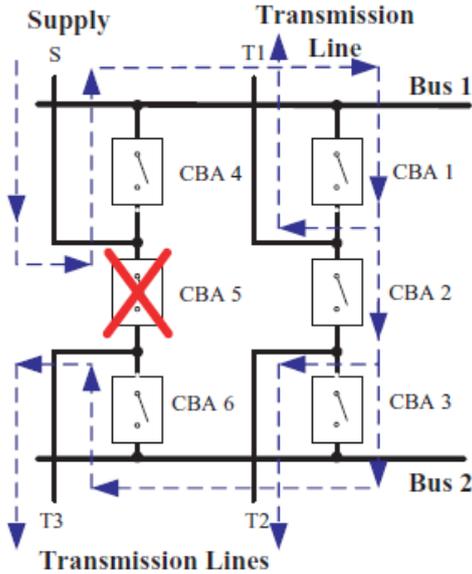
ولو كان هناك عطل على الخط T1 في الشكل 10-14 فسيتم عزله بفتح CBA 1 and CBA 2 ، مع ملاحظة أن بقية الخطوط لا تتأثر بفتح هذين القاطعين ، فالخط T3 سيتم تغذية من المصدر S من

خلال CBA 5 بينما الخط T2 سيتم تغذيته من المصدر S عبر القواطع 5 ثم 6 ثم 3 كما فى الشكل 10-14.



شكل 10-14:

لاحظ أيضا أنه يمكن صيانة أى واحد من الـ CBS الثلاثة الموجودة فى أى Bay بالمحطة بدون فصل أى من الأحمال ، كما فى المثال الموضح بالشكل المجاور حيث افترضنا خروج CBA 5 ، ومع ذلك فمزال المصدر S قادرا على تغذية الخطوط الثلاثة .

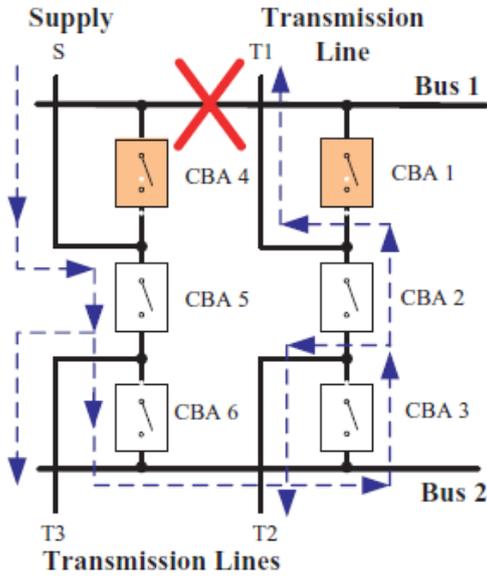


فالخط رقم T1 يمكن تغذيته من خلال القاطع 4 ثم القاطع 1 .

بينما الخط T2 يمكن تغذيته من خلال القاطع رقم 4 ثم 1 ثم 2 .

وأخيرا فالخط رقم T3 يمكن تغذيته من خلال رقم 4 ثم 1 ثم 2 ثم 3 ثم 6 ومنه للخط. وهذا يعنى أن النظام لم يتأثر بخروج القاطع CBA 5.

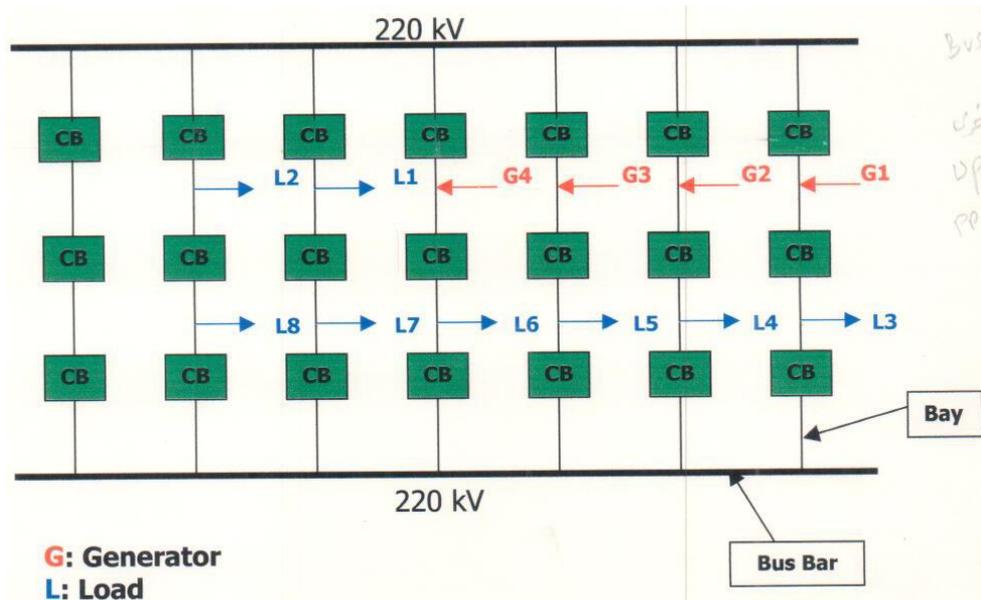
لكن هذا يستلزم أن تكون مواصفات القاطع رقم 4 مثلا ملائمة لكي يتحمل تيار كل المغذيات.



يمكن أيضا في هذا النظام فصل أي من الـ Two-BBs دون فصل أي دائرة ، كما في المثال الموضح بالشكل المجاور فرغم فتح الـ Bus 1 إلا أن الخطوط الثلاثة لاتزال مغذاة بالمسارات الموضحة بالشكل. وبالطبع يمكن بعد عزل الـ BB أن نضيف عليه أي دوائر جديدة ، وهذا يعني أن النظام يتميز بالقدرة على إضافة أي دوائر جديدة (سواء كانت دوائر خروج أو دخول ) دون تأثير على بقية الدوائر الموجودة بالخدمة وهذا يساعد على استقرار الشبكة وتحقيق استمرارية التشغيل .

والشكل 11-14 يمثل نموذجا لنظام الـ BB في

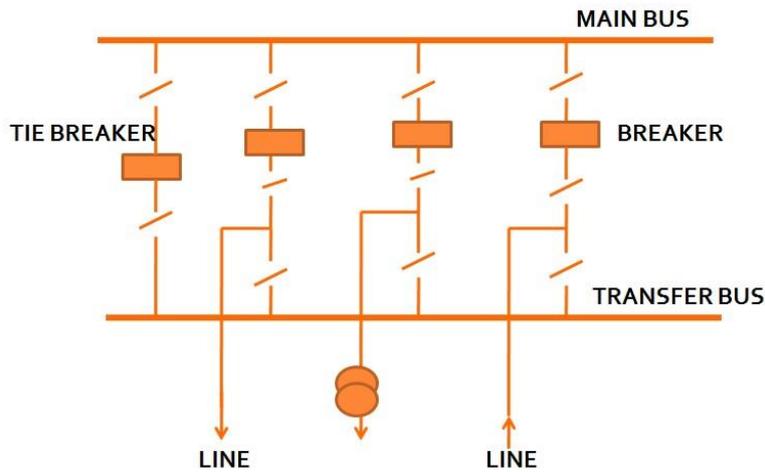
محطة شبرا الخيمة حيث أربع دوائر دخول وثمانية دوائر خروج.



شكل 11-14:

## 4-4-14 النوع الرابع Main and Transfer

هذا نوع آخر من التركيبات التي بها 2-BBs ، والأصل هنا (شكل 14-12) أن تدخل جميع الدوائر الدخول و الخروج على الـ BB ( Main ) ، فإذا أردنا عمل صيانة لـ CB الخاص بأى دائرة فى الشكل فإننا نقوم بغلق دائرة الـ Bus Coupler ، وذلك بإغلاق السكاكين على كلا جانبي قاطع bus coupler (Bus Tie) أولاً ، ثم إغلاق القاطع نفسه وذلك من أجل أن يصبح الجهد على كلا الـ BBs متساويا ، ثم نقوم بغلق السكينة الدائرة المراد صيانتها ثم نقوم بعزل الـ CB الخاص بتلك الدائرة ومن ثم فتح السكاكين الخاصة به.



شكل 14-12:

و يصبح الآن الخط المراد صيانتته متصلا بالـ Transfer Bus من خلال السكينة السفلية و في هذه الحالة يكون الـ CB الخاص بالـ BC هو نفسه المختص بحمايته تلك الدائرة أثناء عملية الصيانة وفي هذه الحالة يصبح النظام مشابها تماما لنظام Double BB with Single CB الذى ذكر فى النوع الأول. (لاحظ أن الـ Transfer Bus لا يستخدم إلا لدائرة واحدة في وقت واحد ولاحظ أيضا أن الـ BC Breaker يمكنه أن يكون بديلا لأى قاطع one at a time).

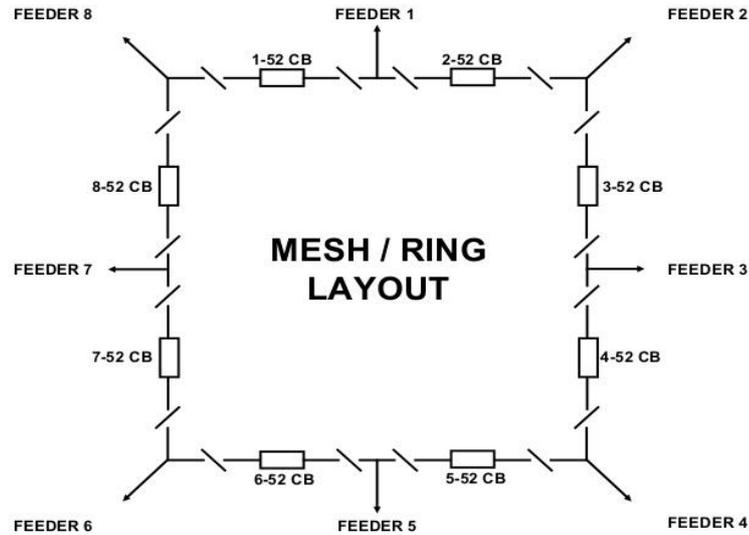
في هذا النوع أيضا يمكن إجراء صيانة الـ (Line Circuit Breaker) دون حدوث تأثير على الـ (Supply) وبهذا يتميز عن (Double Bus-Bar with Single Breaker).

كما يتميز بإمكانية نقل الأحمال من الـ (Main Bus) إلى الـ (Transfer Bus) في حالة حدوث عطل أو إجراء صيانة للـ (Main Bus) ، ولكن يعيب هذه التوصيلة أنه في حالة خروج Main BB نفسه للصيانة فإن بقية الدوائر يمكن نقلها إلى الـ BB الأخرى لكن بدون وقاية بمعنى أنه لا يوجد CB على

الدائرة و إنما فقط Disconnecting Switch ، كما يعييه تعقد نظام الوقاية له. لاحظ أن كلا النظامين (Main and Transfer & Double BB with Single CB ) كلاهما يصنف في الظروف الطبيعية على أنه single BB لأن الـ Bus Coupler, BC يكون دائما مفتوحا و هذا يجعل الاعتمادية في كلا النظامين تشبه الاعتمادية في نظام الـ Single-BB .

## 5-14 النظام الثالث : الـ RING SYSTEM

هذه التوصيلة تتميز باعتمادية عالية كما في الشكل 13-14 ( تسمى أيضا Mesh System ) ، ويتكون من عدة مفاتيح كهربية مربوطة مع بعضها البعض على التوالي ، و تربط عدة دوائر كهربية وذلك من أجل الاستفادة من توزيع ونقل الأحمال الكهربائية في حالات الصيانة على الدوائر الكهربائية في المحطة وبالتالي استمرارية التغذية للأحمال الكهربائية. وفي هذا النظام يكون عدد الـ (Circuits) مساويا لعدد القواطع (Circuit Breakers) الموجودة في الشبكة. ولا يعتمد على وجود (Main Bus-Bar).



شكل 13-14:

ويمكن هنا عمل صيانة لأي CB بتحويل اتجاه Power flow إلى الجهة الأخرى دون الحاجة لفصل الدائرة ، و تكلفته تقترب من تكلفة نظام الـ One and Half ، لكن الفرق أن الأخير يفضل استخدامه إذا كان عدد الدوائر كبيرا ، لأن وضعها عندئذ في Mesh System سيكون معقدا من عدة نواحي منها تنسيق الوقاية مثلا بينما في حالة One and Half ستكون لكل دائرة عدد 1.5 من الـ CBs لكنها منفصلة عن بقية الدوائر في الشبكة.

لاحظ في Ring System أن أي عطل على دائرة سيتسبب في فصل 2-CBs و فصل الدائرة دون تأثير على بقية الدوائر .

ويجيبه أن نظام الحماية معقد لأنه يحتاج لفصل اثنين من القواطع (Circuit Breakers) لعزل الخط الذي حدث له عطل (Fault).

كما أنه يحتاج إلى محول جهد (Voltage Transformer) لكل دائرة لأنه يعتمد على الوقاية الاتجاهية Directional OC Protection ، وذلك بسبب احتمالية تغير اتجاه التيار من وقت لآخر .

يعيب هذا النظام أيضا أن مرونته للتوسع مستقبلا ضعيفة جدا ، كما أنه عند الصيانة أو لأي سبب آخر لفتح الدائرة يصبح النظام مقسوما لجزئيين مفتوحين وأي عطل جديد على أي جزء منهما سيتسبب في خروج كافة محولات هذا الجزء . بمعنى آخر أن اعتمادية النظام أثناء الصيانة ضعيفة على عكس منظومة One and Half والتي تظل كل Bay فيها مستقلة بذاتها سواء في التشغيل العادي أو أثناء الصيانة.

## 6-14 مقارنات بين الأنواع المختلفة

اختيار نوع القضبان لأي محطة تحويل يعتمد على أهمية المحطة وموقعها وكيفية التوسع في المستقبل . وهناك عناصر أخرى للمقارنة منها:

1- الأسعار :

جدول 2-14:

Configuration	Relative Cost Comparison
Single Breaker-Single Bus	100%
Main-Transfer Bus	140%
Ring Bus	125%
Breaker and Half	145%
Double Breaker-Double Bus	190%

Reference: IEEE 605-2008

2- الاعتمادية

جدول 3-14

 $\lambda$  = Annual Fail Rate $r$  = Annual Outage Time $U$  = Average Outage Time

Configuration	$\lambda$ (/yr)	$r$ (min)	$U$ (min/yr)
a	0.0489	72.15	3.53
b	0.0453	71.95	3.26
c	0.00301	184.56	0.56
d	0.00567	124.216	0.70
e	0.0174	81.88	1.42

- Single bus
- Sectionalized single bus
- Breaker-and-a-half
- Double breaker-double bus
- Ring bus

## 15

## تأريض محطات التحويل

## Earthing Systems

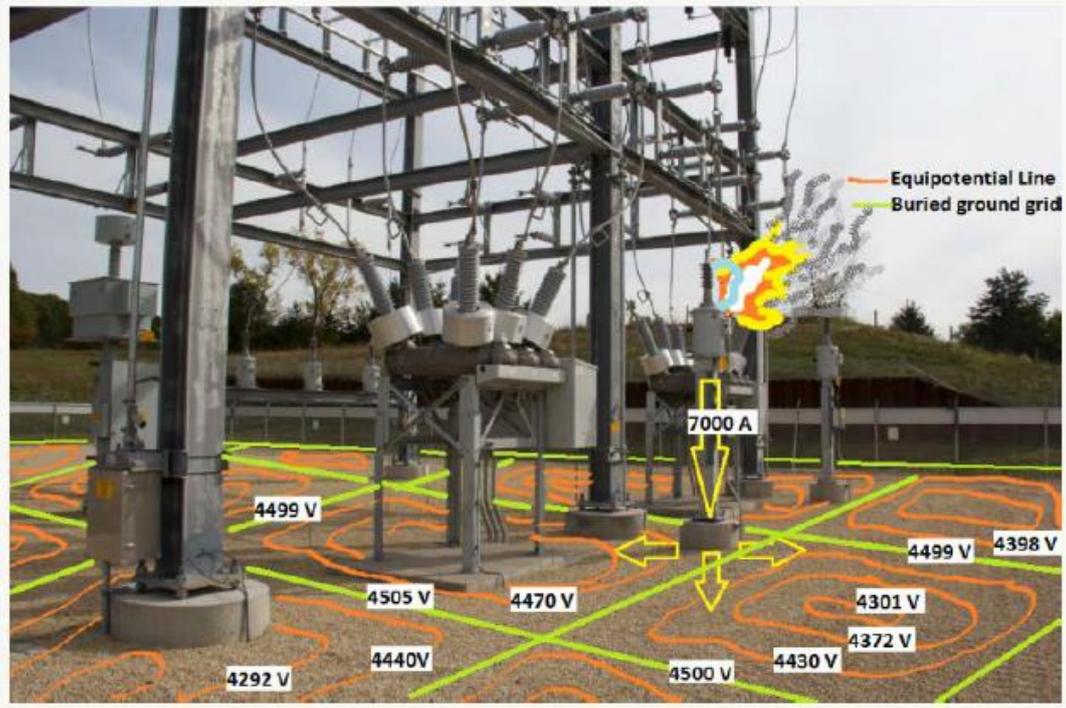
يهدف تأريض المعدات الكهربائية إلى وقاية العاملين من الصدمات الكهربائية الناتجة من ارتفاع الجهد على جسم المعدات المعدنية المكشوف والمعرض للمس (جهد اللمس). وكذلك يهدف إلى الوقاية من الصدمات التي تنشأ من الجهد الذي يظهر على سطح الأرض بين قدمي شخص بالمحطة (جهد الخطوة) ، كما يعمل على زيادة فعالية أداء أجهزة القطع والحماية في حالة وجود تيار عطل أرضي في هذه المعدات ، فتشعر بالعطل وتفصله بصورة أسرع .

بصفة عامة ، عند حدوث عطل فإن أقصى ارتفاع للجهد مقارنة بجهد باطن الأرض يسمى Ground Potential Rise, GPR ، ويساوي حاصل ضرب تيار العطل المتسرب مضروباً في مقاومة الأرضي. وهذا ليس الجهد الذي يظهر على جسم الإنسان ، إنما هو فقط الأكبر على الإطلاق لذا ستلاحظ حتى في التصميمات الصحيحة أن هذا الجهد يصل إلى kVs دون أن يتسبب ذلك في مشاكل.

فتيار العطل في الشكل 1-15 هو 7000A سيتسرب الجزء الأكبر منه للأرض (وجزء منه يعود للمصدر من خلال أسلاك التأريض مثلا ولا يعود من خلال مقاومة الأرض) ، ويتسبب الجزء المتسرب في ارتفاع جهد المناطق القريبة من نقطة العطل ، على سبيل المثال فإن أقرب منطقة للتسريب في الشكل 1-15 ارتفع جهدها إلى حوالي 4500 فولت وهو الذي يسمى GPR ، لكن يحدث تناقص في جهد الدوائر كلما ابتعدت عن نقطة العطل كما هو واضح في الشكل ، ويسمى هذا التناقص بال Potential Gradient ، ومن المهم أن يكون هذا الـ Gradient صغيراً (بمعنى ان النقص يكون تدريجياً بدرجة بسيطة) حتى يكون الفرق في الجهد بين قدمي أي شخص صغيراً (أقصى فرق جهد بين قدمي أي شخص في الشكل السابق سيكون في حدود 200 فولت) ويسمى هذا الجهد بالـ (Step volt)

أما جهد اللمس Touch voltage فهو يساوى فرق الجهد بين الـ GPR ، وبين جهد المنطقة التي يقف عليها الشخص بقدمه. والمشكلة الكبرى في حالة الـ Touch Voltage تحدث إذا كانت نقطة التأريض بعيدة عن الجهاز الذى به عطل والذى يلمسه شخص ما ، فعندها سيكون جهد اللمس يساوى GPR نفسه ، لأن جهد القدم تقريبا في هذه الحالة تساوى صفر فولت. وهذا يبين أهمية ألا تكون نقطة التأريض بعيدة. وهذا أيضا يبرر لماذا يكون التأريض في محطات الكهرباء عبارة عن شبكة مدفونة تغطى تقريبا كل مساحة المحطة.

المشكلة أيضا أن أي جسم معدنى متصل بالأرض (ماسورة ، خط تلفون ، إلخ) حتى لو كان خارج المحطة وبعيد عن منطقة العطل فإنه سيرتفع جهده بقدر معين ، وبالطبع يجب أن يكون هذا الجهد الذى يسمى Transfer Red Voltage صغيرا . والهدف في هذا الفصل التأكد من أن كل هذه الجهود في الحدود الآمنة التي لا تسبب صدمات للبشر الموجدين بالمحطة.



شكل 1-15

## 1-15 فكرة الأرضى

والفكرة الأساسية أن تيار العطل إن لم يجد مسار معدنيا لكي يعود من خلاله إلى مصدره (على سبيل المثال الـ Metallic sheath في الكابلات مثلا) فإنه يعود من خلال كتلة الأرض نفسها كـ Return Path ، وبالتالي يكمل دائرته بالوصول لنقطة تعادل المصدر المنشأ له.

و القيمة المسموح بها لأرضى المحطات الفرعية (الجهد العالى) تتراوح بين 0.5 إلى 1 أوم. بينما تصل القيمة إلى 5 أوم فى محطات التوزيع (الجهد المتوسط). والجدول 1-15 يعطى قيما لمقاومة الـ Earthing فى الأماكن المختلفة.

جدول 0 - 1 :

Particulars	Permissible values
Power Stations	0.5 Ohms
EHT Substations	1.0 Ohms
33KV Stations	2.0 Ohms
D/T centers	5.0 Ohms
Tower foot resistance	10.0 Ohms

لاحظ أنه لو كانت مقاومة الأرضى مرتفعة لظهر جهد على سطح الأرض مرتفع جدا Ground Potential Rise ، ولذا نحتاج لتقليل هذا الجهد من خلال شبكة الأرضى ذات المقاومة المنخفضة جدا كما سنرى.

### 1-1-15 أنواع منظومات التأريض

تتقسم نظم الـ Earthing إلى :

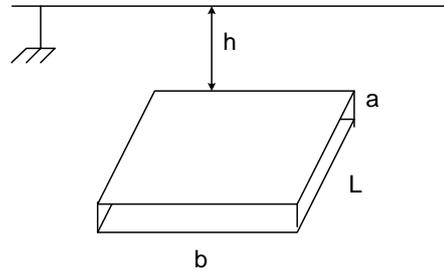
- تأريض نقطة التعادل Neutral earthed
- تأريض وقائى للجهد المنخفض (راجع كتاب المرجع فى التركيبات والتصميمات الكهربائية للمؤلف)
- تأريض وقائى للجهد العالى حيث يتم تأريض جميع الأجزاء المعدنية Frames الخاصة بالـ switchgear والمحولات وحتى أغلفة الكابلات Cable sheath كما يظهر ذلك فى الشكل 1-15 ، وأيضا مواسير الكابلات الموجودة بالمحطة. حيث يوجد دائما أرضى عام تتصل به جميع معدات المحطة. وهو موضوع هذا الفصل.

هناك طرق متعددة لعمل نظام الـ Earthing حسب مستوى الجهد وخطورة تيار الـ Short Circuit Current كما ذكرنا. ففي الجهد المنخفض قد يكون كافيا استخدام إلكترود تأريض واحد في حديقة المبنى مثلا لتحقيق مستوى الأمان وذلك بتوصيله للوحة العمومية ومنها إلى بارات الـ Earthing باللوحات الفرعية ومنها إلى النقاط المراد تأريضها. وهذا يعتبر كافيا في الجهد المنخفض بسبب أن تيار العطل ليس كبيرا كما في الجهود العالية .

وفي حالة الجهود المنخفضة ، فإنه إذا كان إلكترود الـ Earthing على شكل ماسورة أسطوانية مثلا قطرها d وطولها L فإن مقاومة الأرضي حينئذ تحسب من المعادلة التالية:

$$R = \frac{\rho}{2 \pi L} \ln \frac{8L}{d}$$

وفي الجهود المتوسطة تستخدم أحيانا شريحة أفقية لها سمك a وطولها L وعرضها b ، ومدفونة أفقيا على عمق h كما في الشكل ، وفي هذه الحالة تكون مقاومة الأرضي تساوى:



$$R = \frac{\rho}{4 \pi L} \left[ \ln \frac{8L^2}{ah} + \frac{a^2 - \pi a b}{2(a+b)^2} - 1 + \frac{h}{L} + \frac{h^2}{4L^2} \right]$$

ويمكن إهمال سمك الشريحة وحساب مقاومة الأرضي R لقطب عبارة عن لوح معدني مساحته A من العلاقة التقريبية التالية ( المواصفات القياسية IEEE-80-1986 )

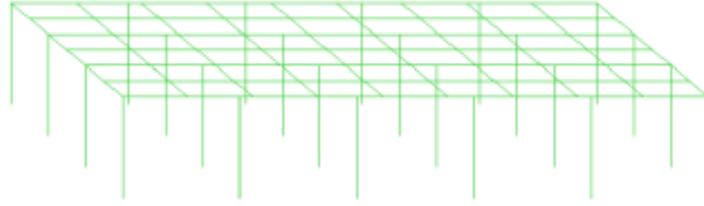
$$R = \frac{\rho}{2A} \sqrt{\left( \frac{\pi}{2A} \right)}$$

## 2-15 EARTHING في محطات الجهد العالي

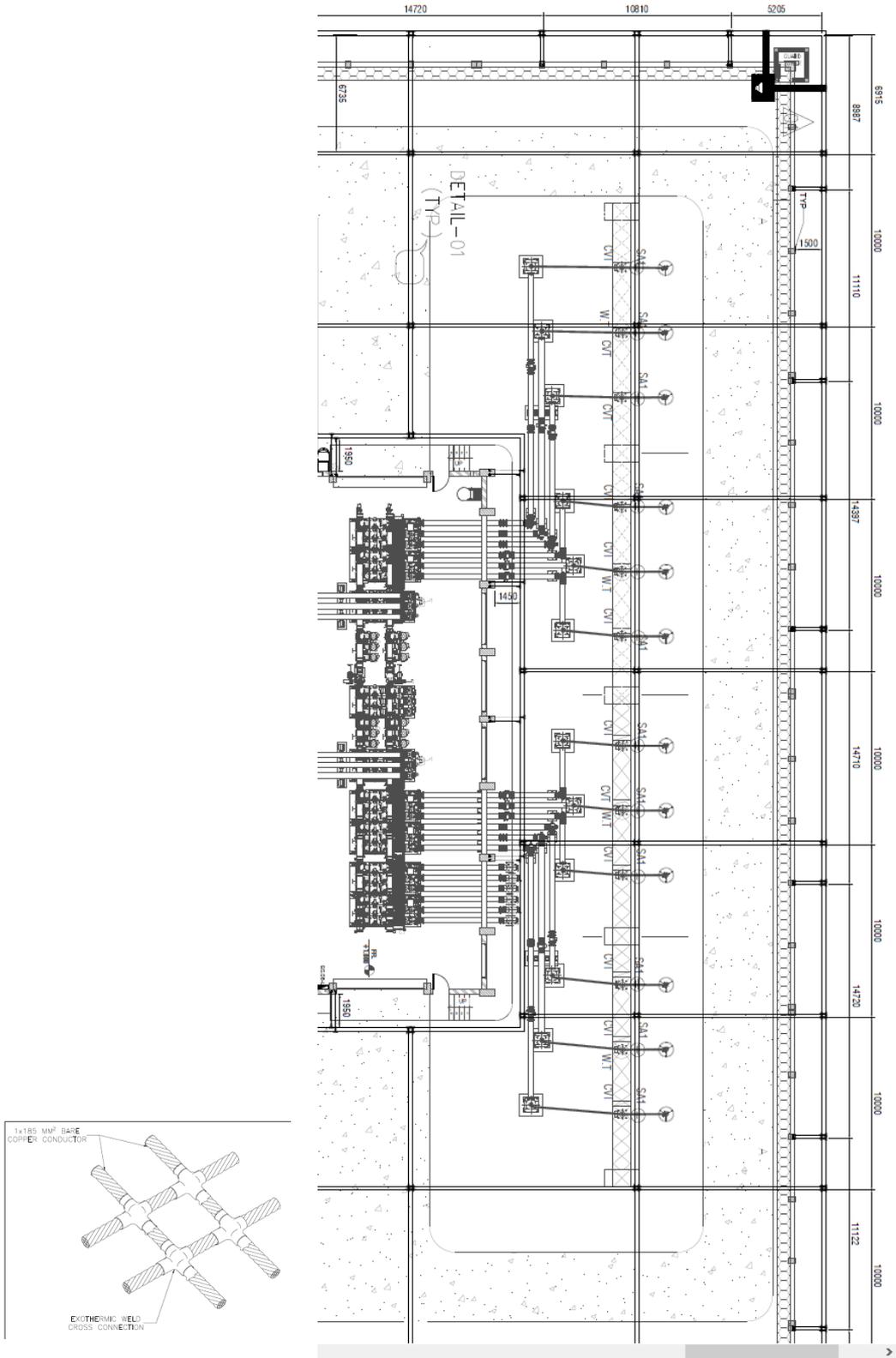
أما في محطات الجهد العالي فالأمر أعقد وأصعب من ذلك ، والسبب الرئيسي في ذلك له علاقة بمسار تيار العطل ، فإذا كان مسار رجوع تيار العطل يمر من خلال الأرض وليس من خلال Cable sheath مثلا فستكون لدينا مشكلة تتعلق بتوزيع الجهد على سطح الأرض الناتج من هذا عطل والذي يسمى Ground Potential Gradient.

ففي محطات التوليد أو محطات المحولات ، يمكن أن تتسبب تيارات الأعطال في ارتفاع قيمة الجهد على موصلات الـ Earthing لقيم خطيرة على العاملين في هذه المحطات ما لم تكون مقاومة الأرضي فيها شديدة الانخفاض ، ولذا تخضع هذه الأماكن لنظام تأريض مختلف وهو المعروف باسم شبكة التأريض Grid مكونة من مجموعة من الـ Meshed Electrodes (موصلات أفقية متقاطعة بالإضافة إلى إلكترودات رأسية تكون غالبا عند الأركان بالإضافة إلى إلكترودات خاصة بالـ LA ) . و تكون المقاومة المحصلة لهم جميعا صغيرة جدا (أقل من نصف أوم) كما في الشكل التالي.

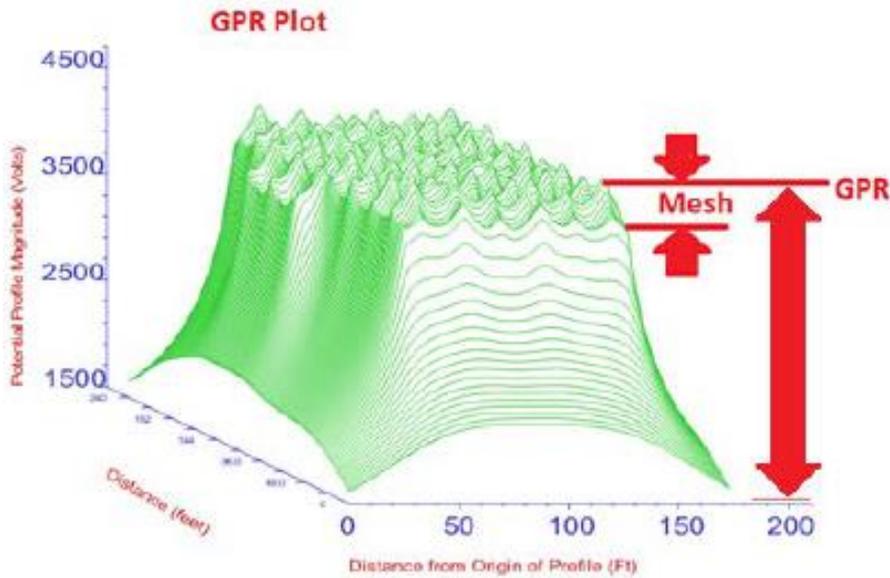
Ground Grid Layout



كما يظهر الشكل التالي جزءا من التصميم التفصيلي لمحطة حقيقية حيث تظهر الموصلات الأفقية ( 2 x 185 mm ) وهي تغطي مساحة المبنى وتحيط كذلك بمبنى الـ GIS كما تظهر نقاط قضبان التأريض الرأسية عند أركان المبنى وكذلك بجوار كل SA Surge arrester . وتظهر بجوارها تفاصيل لحام الموصلات الأفقية ببعضها البعض.



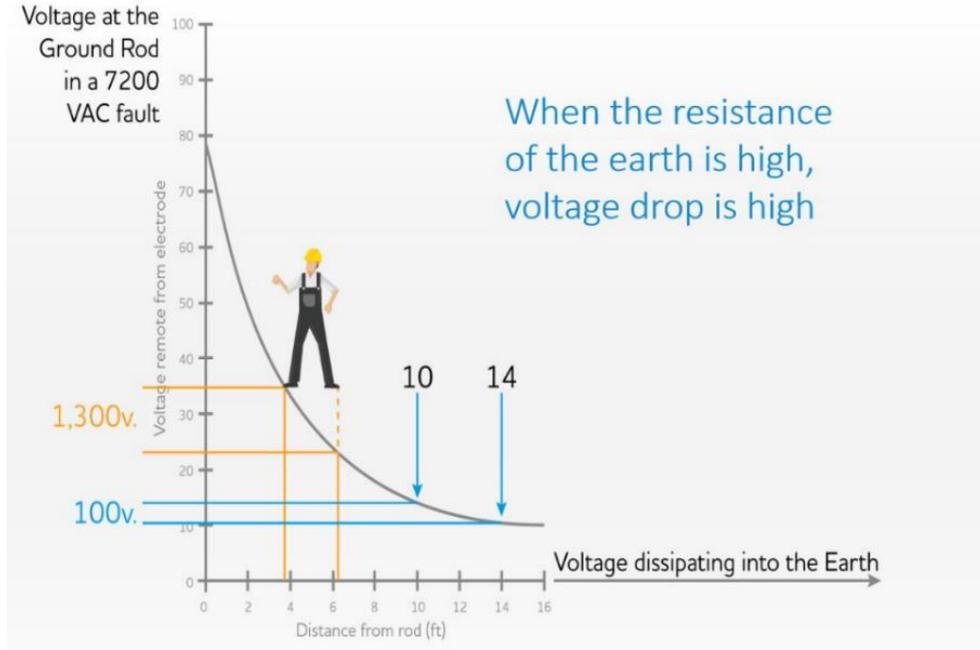
فعندما نقول أن مقاومة نظام الأرضى فى محطة ما تساوى  $0.5 \Omega$  مثلا فهذا يعنى أن المقاومة الكهربائية من نقطة تلامس أى سطح معدنى بالمحطة وحتى نصل إلى نقطة الـ Remote earth - والتي تمثلها الكتلة المنصهرة بمركز الأرض - تساوى نصف أوم. هذه المقاومة الكلية تحسب من المعادلات كما فى الجزء السابق ، وبالتالى فعند مرور تيار العطل  $I_F$  يساوى مثلا  $10 \text{ kA}$  خلال إلكترود مقاومته  $8 \text{ أوم}$  فإنه سيتسبب فى ظهور جهد تراكمى متزايد على سطح الأرض Ground Potential Rise, GPR ، يبدأ بقيمة مطلقة تساوى  $80 \text{ kV}$  عند الجسم المؤرض ويساوى  $(I_F \times R_E)$  كما فى الشكل 15-2 ، ثم يبدأ فى التناقص كلما ابتعدت عن نقطة العطل كما سبق توضيحه فى الشكل 15-1. والشكل التالى يبين توزيع الجهود على الـ Grid ، ، علما بأن فرق جهد بين مربعات شبكة التأريض يسمى بالـ Mesh Voltage.



ومن هذه المقدمة يمكن الإجابة على السؤال التالى:

### لماذا تكون الأعطال فى محطات النقل أخطر من الأعطال فى محطات التوليد؟

فى محطات التوليد يعود تيار العطل من خلال شبكة الأرضى فى المحطة وهى قيمة منخفضة فلا يحدث ارتفاع فى الجهد ، بينما فى محطات النقل يعود تيار العطل الذى يقع على مسافة بعيدة عن المحطة من خلال مقاومة الأرض الممتدة من نقطة العطل خارج المحطة وحتى المحطة نفسها فيرتفع الجهد بقدر ارتفاع قيمة مقاومة مسار الرجوع.



شكل 15-2:

### 15-2-2 لماذا نحتاج أن تكون مقاومة الأرضي منخفضة جداً؟

لاحظ في الشكل السابق أن قيمة تيار العطل سيمر خلال مسارين :

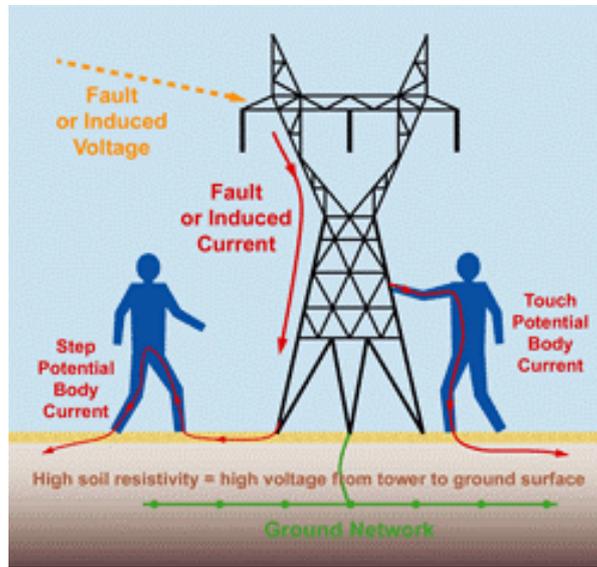
- المسار الأول هو المار في الشخص  $I_B$  ، وهذا سيتوقف على عدة عوامل منها قيمة مقاومة جسم هذا الإنسان  $R_B$  ، وعلى قيمة المقاومة بين قدمه والأرض  $R_F$  (Foot Resistance) ،
- والمسار الثاني سيوقف على مقاومة الأرضي  $R_E$  ، ومن ثم كلما كبرت مقاومات المسار الأول كلما كان الشخص في أمان.

فأما مقاومة الجسم فهي في أقصى قيمة لها ستساوي 10 ك أوم إذا كان الجسم جافاً ، ولا توجد جروح في الجلد . وأما المقاومة بين القدم والأرض فتزيد بالطبع إذا كان الشخص مرتدياً حذاء أمان Safety Shoes ، وهذا هو السبب في إلزام العاملين بالمحطات ارتداء هذه الأحذية .

على الجانب الآخر ستظهر أهمية أن تكون مقاومة إلكترود الـ Earthing أقل ما يمكن حتى يمر معظم تيار العطل في المسار ذي المقاومة المنخفضة وبالتالي يكون حاصل ضرب التيار في المقاومة الأرضية أصغر ما يمكن ، ومن ثم يكون هذا الشخص في أمان من جهد اللمس.

## 15-2-1 جهد اللمس

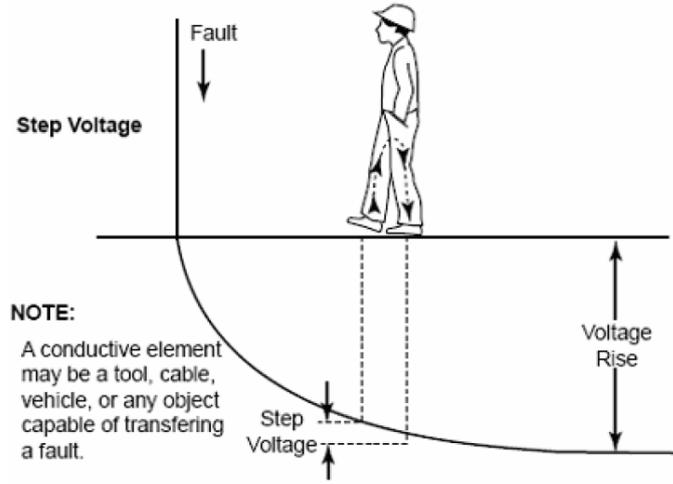
تعريف جهد اللمس: هو فرق الجهد بين جهد النقطة المعدنية التي يلمسها الإنسان ، وبين جهد شبكة الأرضى التي يقف عليها كما فى الشكل 15-3. فرق الجهد الذى سيظهر على هذا الشخص سوف يساوى جهد نقطة اللمس مطروحا منه جهد النقطة التي يقف عليها بقدمه كما فى الشكل (وليس كما يفهم البعض أنه يساوى جهد النقطة التي يلمسها الشخص فقط) ، ويسمى هذا الفرق بجهد اللمس Touch Voltage، مع ملاحظة أن قيمة الجهد عند قدم هذا الشخص سيتوقف على منحنى توزيع الجهد Potential Distribution الذى ظهر فى الشكل 15-2 .



شكل 15-3:

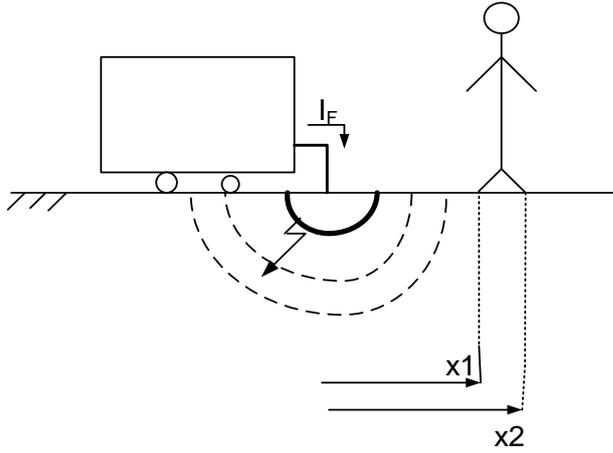
## 15-2-3 جهد الخطوة

أما إذا كان الشخص واقفا بجوار هذا المحول - ودون أن يلمسه - فهناك احتمال كبير لظهور فرق جهد بين قدميه لاسيما كلما اقترب العامل من نقطة العطل كما فى الشكل 15-4 حيث يكون معدل ميل منحنى توزيع الجهد كبيرا كلما اقترب من نقطة العطل.



شكل 4-15:

فإذا كانت المسافة بين قدميه قدرها  $(x_1 - x_2)$  كما في الشكل فإنه سيكون أيضا معرضا في حالة تسرب تيار قدره  $I_F$  من المحول إلى الأرض لنوع آخر من الجهود يسمى جهد الخطوة Step Voltage ويحسب من المعادلة التالية (يفرض أن إلكترود الـ Earthing من النوع النصف كروي ) :



$$V_{step} = \frac{\rho I_f}{2\pi} \left( \frac{1}{x_1} - \frac{1}{x_2} \right)$$

ومن واضح أنه كلما زادت المسافة بين قدميه  $(X_2 \gg X_1)$  ، كلما صار جهد الخطوة أخطر.

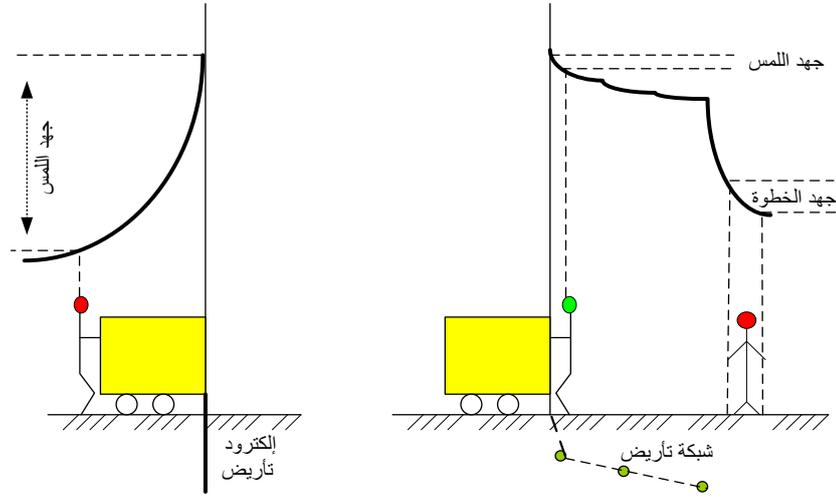
ملحوظة هامة:

هناك فرق بين جهد شبكة الأرضي والذي يسمى ground Potential Rise, GPR ، وبين جهد سطح الأرض ، فجهد سطح الأرض يتغير حسب نوع وسمك طبقة الحصى التي توضع على سطح الأرض ، ويختلف بالطبع حسب وجود شبكة أرضي تحت الأرض من عدمه ، وجهد سطح الأرض دائما يكون أقل من الـ GPR.

## 15-2-4 كيف تحل مشكلة جهد اللمس وجهد الخطوة؟

من المقدمة السابقة يمكن أن نصل إلى أن هذه المشكلة سببها الرئيسي هو الميل الكبير في منحنى توزيع الجهد ، فلو استطعنا أن نجعل منحنى توزيع الجهد شبه أفقى فهذا يعنى أن الفرق بين أى نقطتين عليه لن يكون كبيرا وبالتالي لن تظهر مشكلة جهد اللمس وجهد الخطوة. والشكل 15-5 يمثل مقارنة بين الجهد الذى يظهر على جسم شخص واقف على الأرض نتيجة لمس له لمحول مؤرض فى حالتين :

- بواسطة إلكترود مدفون رأسيا فى الجزء الأيسر من الشكل.
- شبكة تأريض Grid فى الجزء الأيمن من الشكل.



شكل 15-5:

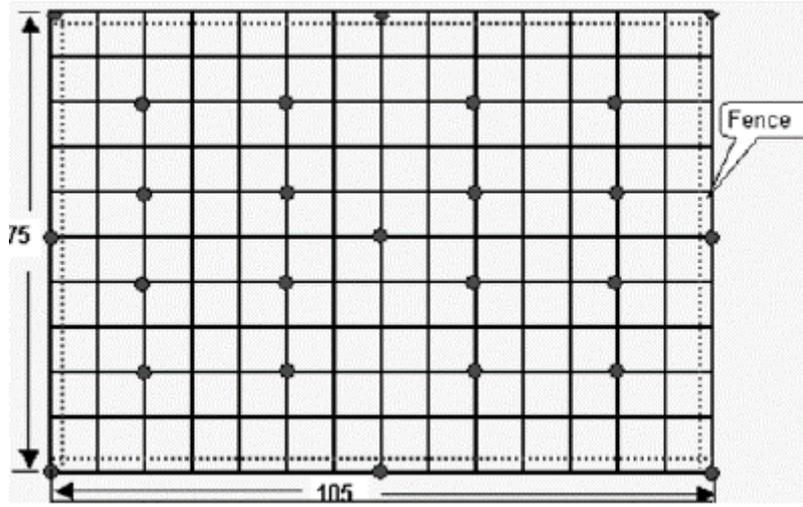
إذن فمن مميزات شبكة الـ Earthing أن توزيع الجهد على سطح الأرض Surface Potential Distribution الناشئ نتيجة مرور تيار العطل يكون أفضل من توزيعه فى حالة الإلكترود الواحد المدفون رأسيا .

## 15-3 شبكات الـ EARTHING فى المحطات الكهربائية

فى الأماكن مثل محطات التوليد أو محطات المحولات ، يمكن أن تتسبب تيارات الأعطال فى ارتفاع قيمة الجهد على موصلات الـ Earthing لقيم خطيرة على العاملين فى هذه المحطات ما لم تكون مقاومة الأرضى فيها شديدة الانخفاض ، ولذا تخضع هذه الأماكن لنظام تأريض مختلف وهو المعروف باسم

شبكة التأريض Grid مكونة من مجموعة من الـ Meshed Electrodes تكون المقاومة المحصلة لهم صغيرة جدا .

وغالبا تكون الشبكة من مربعات بأبعاد من 3-20 متر (تتغير حسب التصميم) وتغطي كافة مساحة المحطة ، كما فى الشكل 6-15 (أيضا 11-15 لاحقا). كما أن شبكة الـ Earthing يجب تخرج أبعد من سور المحطة Fence بحوالي متر ونصف.



شكل 6-15:

### 1-3-15 ما هي الـ Ground mat ؟

فى بعض الأحيان قد نستخدم ما يسمى حصيرة أرضية إضافية Ground mat وهذه لا تستخدم منفردة بل بالإضافة إلى شبكة الأرضى Ground Grid الأصلية ، وذلك فى الأماكن التى يكثر وجود البشر بها داخل المحطة مثل منطقة وقوف العمال أمام عدادات القياس مثلا ، وهى عبارة عن موصلات متقاطعة مع بعضها لتكوين شبكة تدفن فوق الشبكة الأصلية (شكل 9-15) ، وأحيانا توضع فوق سطح الأرض مباشرة (شكل 10-15) ، لأن مجرد الوقوف على سطح معدنى يعنى أن جميع أجزائه متساوية الجهد فلا يحدث فرق جهد بين قدمى من يقف عليه .



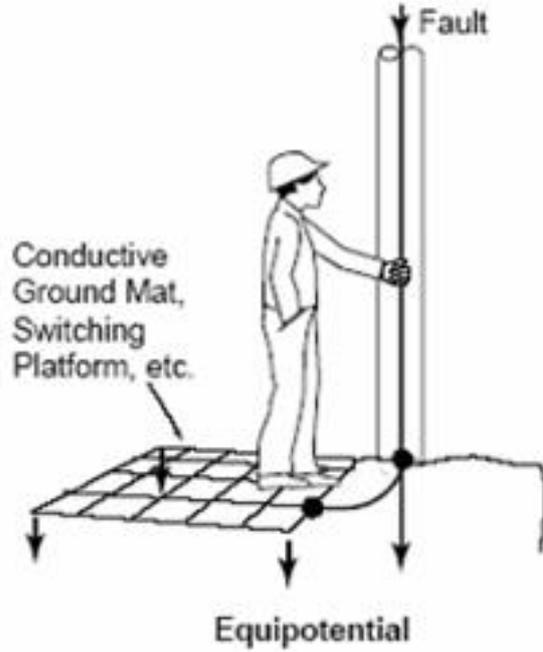
شكل 15-9:

ويستخدم هذا الأسلوب في المناطق التي يكون جهد الخطوة واللمس بها مرتفع نسبيا. وهذه الشبكة قد يتصل وقد لا يتصل بها Earthing Rods عند أركانها.



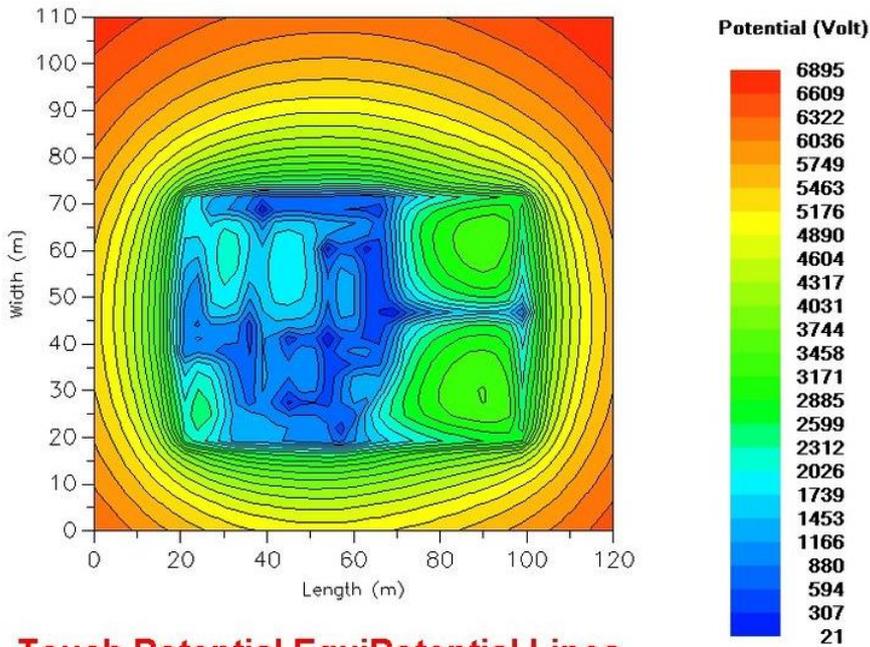
شكل 15-10:

والأهم كما قلنا أن توزيع الجهد في المساحة المغطاة بالـ Meshed Electrodes يكون شبه متساوى Equi-potential ، وبالتالي ففرق الجهد بين نقطتين متقاربتين يكون صغيرا (يمكن أن يحدث تزايد تدريجي بدءا من نهاية حدود شبكة الـ Earthing).



شكل 15-7:

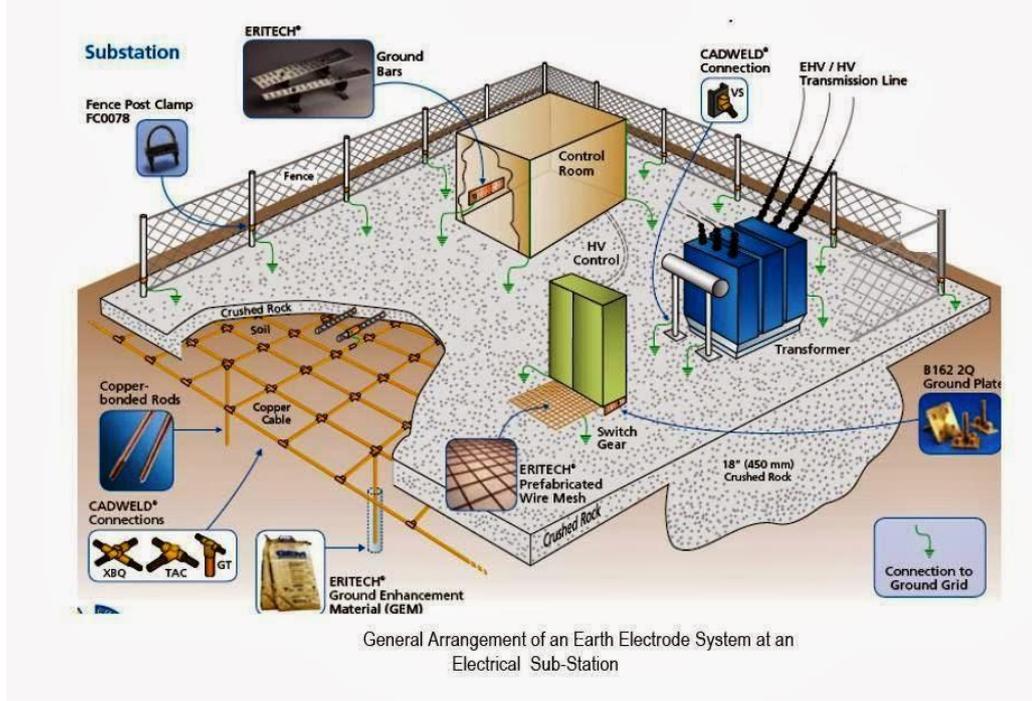
والشكل 15-8 يبين مستوى الارتفاع في الجهد في المناطق المختلفة من مساحة المحطة ، كما يظهر من خلال برامج التمثيل مثل الـ ETAP.



شكل 15-8:

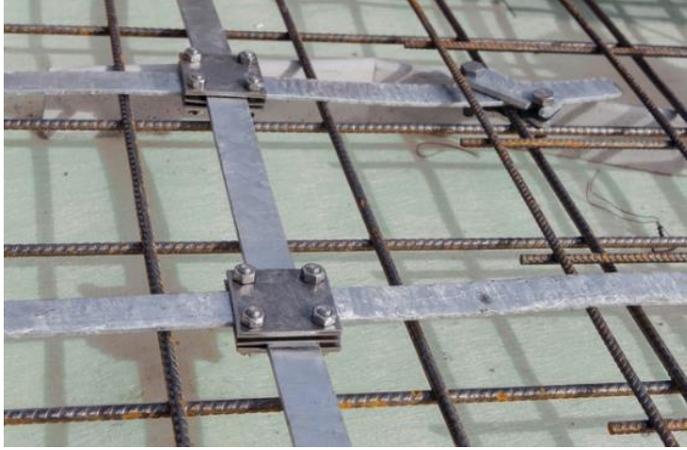
## Earthing Grid أشكال الـ 2-3-15

قد تكون شبكة الـ Earthing في المحطات عبارة عن شبكة تغطي مساحة كافة العنبر (شكل 15-11) ، باستثناء المساحة تحت المعدات مباشرة فلا يوضع فيها موصلات للأرضى .



شكل 15-11:

وقد تكون هذه الشبكة أيضا متصلة بأساسات المبنى كما في الصورة شكل 15-12 ثم يصب عليهم الخرسانة جميعا (بالطبع بعد توصيل طرف الشبكة خارج سطح الأرض). وهذا الأسلوب مفيد جدا في تخفيض جهد الخطوة واللمس لأن شبكة حديد التسليح تعمل كـ Ground mat.

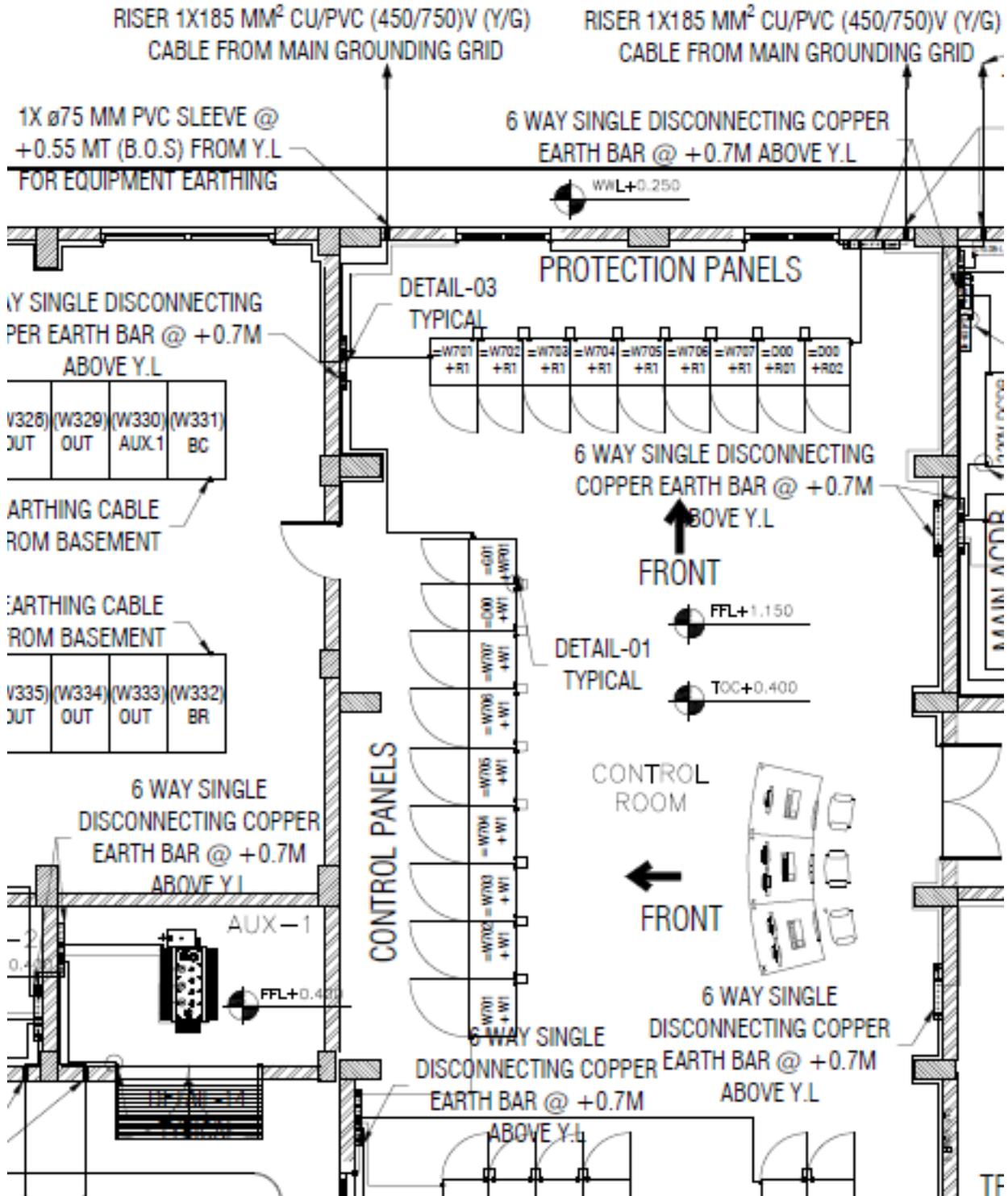


شكل 15-12:

وحسابات الـ Ground Grid يدخل فيها عدد كبير من المتغيرات وهذا هو ما نناقشه تفصيلا في الجزء التالي.

### مصطلح الـ Secondary Earthing

هذا المصطلح يقصد به طريقة توصيل كافة المعدات بشبكة الأرضى الرئيسية بالمحطة ، على سبيل المثال فالشكل التالي يمثل جزءا من تأريض الأجزاء المعدنية بغرفة التحكم بالمحطة.



## 4-15 خطوات التصميم

الهدف الرئيسي من عملية تصميم شبكة الأرضى فى المحطات الكهربائية ذات الجهد العالى وهو : **التأكد من أن Step Voltage and Touch Voltage ضمن الحدود الآمنة.**

وتحقيق ذلك يتم من خلال حساب العدد المناسب لإلكترودات الـ Earthing والعدد المناسب للموصلات الأفقية ، وكيفية توزيعها داخل المحطة . ويعتبر البحث المرجعى رقم (2000) IEEE STD 80 وعنوانه "Guide for safety in AC substation grounding" مرجعا أساسيا فى عملية تصميم نظام التأريض فى محطات التحويل.

وفى هذا الفصل سيتم شرح وتلخيص الخطوات القياسية المذكورة فى هذا المرجع على النحو التالى:

1. Measurements of Soil Resistivity
2. Determine Surface Layer Derating Factor
3. Determine Minimum Earthing Conductor Size
4. Calculate Tolerable Step and Touch Potential
5. Layout Preliminary Substation Grid,
6. Determine Preliminary Resistance of Grounding System
7. Determine Grid Current
8. Determine GPR. If Less than Tolerable Touch Voltage, Done.
9. Otherwise: Calculate Actual Mesh and Step Voltages.
- 10.If Mesh and Step Voltage Are Below Tolerable values, Done.
- 11.Otherwise: Revise Grid.

### 1-4-15 خطوات ما قبل التصميم

قبل الخوض فى تفاصيل التصميم نذكر أن هناك معلومات يجب توافرها قبل البدء فى التصميم ، وهذه المعلومات المطلوب توافرها هى :

- مخطط عام الموقع وتحديد مساحة المحطة
- أقصى تيار عطل متوقع مروره خلال شبكة الـ Earthing وهذا يحسب من خلال Short circuit Study
- أقصى زمن يستغرقه جهاز الحماية لفصل العطل وهذا يمكن معرفته بعد الانتهاء من الـ Coordination Study Protective ، وسنستفيد منه في معرفة قيمة الجهد الذي يظهر على جسم إنسان تعرض للصعق بالمحطة حيث أن هذه القيمة تعتمد على زمن بقاء العطل كما سنرى.
- درجة حرارة التربة
- معرفة قيمة المقاومة النوعية للتربة Soil Resistivity بالقياس .
- معرفة قيمة Resistivity لأي طبقة سطحية مضافة على التربة (مثل الزلط مثلا) كل المعلومات السابقة يفترض أنها معلومة قبل البدء في خطوات التصميم التالية.

#### الخطوة الأولى: قياسات المقاومة النوعية للتربة

ربما يكون كافيا في مشروعات التخرج أن يفترض الطالب قيمة مناسبة لـ Soil Resistivity ( المقاومة النوعية للتربة) ، أما حين تنشأ محطة حقيقية فلا بد من عمل قياسات عملية للوصول للقيم الحقيقية للمقاومة النوعية للتربة. ومن أشهر هذه الطرق طريقة Wenner four-pin method وسبق شرحها في كتاب المرجع في التركيبات الكهربائية للمؤلف. والجدول 2-15 يعطى قيم تقريبية للمقاومة النوعية حسب نوع التربة (لا تستخدم هذه القيم في تصميم حقيقي بل يجب عمل قياسات).

#### جدول 2-0

Table 1: Basic Range of Soil Resistivity  
Ref. IEEE Std, 80, Table 8. Copyright ©2000. IEEE. All rights Reserved

Type of Earth	Average Resistivity ( $\Omega \cdot m$ )
Wet Organic Soil	10
Moist Soil	$10^2$
Dry Soil	$10^3$
Bedrock	$10^4$

ويفضل أخذ القياسات عند أكثر من نقطة في المساحة المقترحة لبناء المحطة ، كما يفضل جعل المسافات بين الإلكترودات الأربعة المستخدمين في القياس Four Electrode method كبيرة نسبيا وفي حدود

50-100 متر وكلما زادت هذه المسافة كلما كانت القراءة معبرة عن قيمة المقاومة على أعماق كبيرة (تقريباً يمكن اعتبار المقاومة مقاسة على عمق يساوي المسافة بين كل اثنين من الإلكترودات الأربعة).  
 وقيمة المقاومة الكهربائية للتربة تتوقف على كمية الأملاح بالتربة (تزيد بزيادتها) وتتوقف أيضاً على حجم حبيبات التربة (أيضاً تزيد بزيادتها) فالرمل الخشن مقاومته أعلى من الرمل الناعم ، والزلط مقاومته أعلى من الرمل ، والرمل أعلى من الطين.

### الخطوة الثانية : حساب Surface Layer Derating Factor

دائماً تضاف طبقة من الحصى أو الزلط بسمك من 5 إلى 20 سم لزيادة المقاومة النوعية لسطح التربة من أجل أن يقل خطر الـ Touch and Step Voltage . وبالطبع ستتأثر المقاومة النوعية لهذه الطبقة بحالة التربة وهل هي رطبة أم جافة ولذلك ستجد الجدول 3-15 يعطى قيماً تقديرية للمقاومة النوعية لهذه الطبقة حسب نوع المادة المستخدمة وحالتها وسمكها.

### جدول 3-15

Table 2: Typical Surface Material Resistivities.  
 Ref. IEEE Std, 80, Table 7. Copyright ©2000. IEEE. All rights Reserved

Number	Description of surface material (U.S. State where found)	Resistivity of sample $\Omega \cdot m$	
		Dry	Wet
1	Crusher run granite with fines (N.C.)	$140 \times 10^6$	1300(ground water, 45 $\Omega \cdot m$ )
2	1.5 in(0.04m) crusher run granite (Ga.) with fines	4000	1200(rain water, 100W)
3	0.75-1 in(0.02-0.025 m) granite (Calif.) with fines	-	6513(10 min after 45 $\Omega \cdot m$ water drained)
4	#4 (1-2in) (0.025-0.05 m) washed granite (Ga.)	$1.5 \times 10^6$ to $4.5 \times 10^6$	5000 (rain water, 100 $\Omega \cdot m$ )
5	#3 (2-4 in) (0.05-0.1 m) washed granite (Ga.)	$2.6 \times 10^6$ to $3 \times 10^6$	10 000 (rain water, 100 $\Omega \cdot m$ )
6	Size unknown, washed limestone (Mich.)	$7 \times 10^6$	2000-3000 (ground water, 45 $\Omega \cdot m$ )
7	Washed granite, similar to 0.75 in (0.02m) gravel	$2 \times 10^6$	10 000
8	Washed granite, similar to pea gravel	$40 \times 10^6$	5000
9	#57 (0.75 om) (0.02 m) washed granite (N.C.)	$190 \times 10^6$	8000 (ground water, 45 $\Omega \cdot m$ )
10	Asphalt	$2 \times 10^6$ to $30 \times 10^6$	10 000 to $6 \times 10^6$
11	Concrete	$1 \times 10^6$ to $1 \times 10^9$ <sup>a</sup>	21 to 100

وأهمية هذه الطبقة تأتي من أنها تلمس مباشرة قدمي الشخص ولذا سنتسهم في تحديد قيمة  $R_f$ , R-foot ، وهي الطبقة غير سميكة وسطحها غير منتظم ، ومن ثم سنحتاج لحساب معامل تصحيح  $C_s$  لتصحيح قيمة مقاومة سطح التربة ، و سنتسهم هذه الطبقة في تقليل مقاومة الأرضي إن وجدت وذلك بنسبة تساوي هذا المعامل  $C_s$  الذي تتوقف قيمته على المقاومة النوعية للتربة الأصلية وسمك الطبقة السطحية المضافة كما في المعادلة التالية:

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2h_s + 0.09}$$

Where  $C_s$  is the surface layer derating factor

$\rho$  is the soil resistivity ( $\Omega.m$ )

$\rho_s$  is the resistivity of the surface layer material ( $\Omega.m$ )

$h_s$  is the thickness of the surface layer (m)

وسنستفيد من هذا المعامل لاحقا عند حساب الـ Touch and Step Voltage

ومعامل التصحيح  $C_s$  يساوي واحد إذا لم تكن هناك طبقة على السطح ، ويصبح أقل من الواحد في وجود هذه الطبقة الرقيقة .

وهذه الطبقة لها ميزات عديدة ، فهي بالإضافة إلى كونها تعتبر مقاومة موصلة على التوالي مع جسم الإنسان مما يعني أن التيار خلال الجسم سينخفض وقد يصل إلى عشر قيمته ، وهذه هي الميزة الأساسية لها ، فهي أيضا تعيق تبخر الماء من التربة الأصلية فتحافظ على انخفاض قيمة مقاومة التربة.

### الخطوة الثالثة : حساب مساحة مقطع الموصلات الأفقية لشبكة التأريض

أحد أهداف عملية التصميم هو حساب مساحة المقطع المناسب لكل إلكترود من إلكترودات الـ Earthing وعددهم . وفي هذه الخطوة سنحسب مساحة المقطع المناسبة.

وكما هو معلوم فإن مساحة مقطع الموصل تتوقف أساسا على قيمة تيار الـ Short Circuit Current والتيار الطبيعي ، ولكن على عكس الكابلات العادية والتي تكون حدود تحملها لتيار القصر متوقفا على تحمل العازل لدرجة الحرارة العالية الناشئة من القصر قبل أن يحدث له melting ، فإن كابلات الـ

Earthing لا يوجد عازل عليها ، ومن ثم فالحد الأقصى هو تحمل الموصل نفسه للحرارة لمدة معينة قبل أن يحدث له melting (وهذا يفسر لك أحد أسباب عدم وجود عازل على موصلات الـ Earthing ، كما سيقبل ذلك كثيرا من التكلفة الإجمالية للنظام الأرضي ) ، وهذه الدرجة يمكن الحصول عليها من الجدول 3-15 ، وقد تصل في بعض المواد إلى فوق الـ 1000 درجة مئوية ، لكن للأمان فإن معظم التصميمات تكفي بحساب حرارة الموصل عند 500 أو 800 درجة فقط.

لاحظ أن أقصى تيار قصر Short Circuit Current يتحمله الموصل يتوقف أساسا على المدة الزمنية التي يستغرقها مرور هذا التيار قبل فصله بأجهزة الحماية ، ولذا فمن المعلومات الأساسية المطلوب للتصميم : زمن تشغيل أجهزة الوقاية . ويمكن الرجوع في هذه النقطة لكتاب المرجع في التركيبات الكهربائية. والـ IEEE-80 تعتبر زمن الفصل يمكن أن يتأخر حتى يصل إلى 3 ثواني في المحطات الصغيرة عند تصميم منظومة الأرضي . وعموما فحساب مقطع موصل الأرضي يعتبر خطوة عامة في تصميمات الأرضي ، ولا علاقة لها بالـ GPR أو جهد الخطوة ، وجهد اللمس.

#### طرق حساب هذا المقطع:

توجد طريقتان لحساب هذا المقطع :

الطريقة الأولى : باستخدام المعادلة التقريبية الواردة في مواصفات الـ IEEE وهي:

$$A_{\min} = I_{fs} \cdot \sqrt{\frac{t_c \cdot \alpha_r \cdot \rho_r \cdot 10^4}{TCAP \cdot \ln \left( 1 + \frac{T_m - T_a}{K_0 + T_a} \right)}}$$

Where

- $I$  : rms current (kA)
- $A_{mm^2}$  : conductor cross section (mm<sup>2</sup>)
- $A_{kcmil}$  : conductor cross section (kcmil)
- $T_m$  : maximum allowable temperature (°C)
- $T_a$  : ambient temperature (°C)
- $\alpha_r$  : thermal coefficient of resistivity at reference temperature  $T_r$  (1/°C)
- $\rho_r$  : resistivity of the ground conductor at reference temperature  $T_r$  ( $\mu\Omega$ -cm)
- $t_c$  : duration of current (s)
- $K_0$  : equals  $1/\alpha_0$  or  $(1/\alpha_r) - T_r$  (°C)
- $TCAP$  : thermal capacity per unit volume ( $J/cm^2 \cdot °C$ )

والثوابت السابقة تجد قيمتها في الجدول رقم 15-4

For example, commercial hard-drawn copper has material constants:

- $T_m = 1084 \text{ }^\circ\text{C}$  درجة انصهار الموصل
- $\alpha_r = 0.00381 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
- $\rho_r = 1.78 \text{ } \mu\Omega.\text{cm}$
- $TCAP = 3.42 \text{ Jcm}^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ .
- $T_c = \text{duration} = 0.5 \text{ sec}$
- $K_0 = 234$

والطريقة الثانية هي معادلة تقريبية أيضا ولكن أكثر تبسيطا وهي:

$$A (\text{mm}^2) = \frac{I_d}{1973} \times \sqrt{\frac{76 t}{\ln \frac{234 + T_{cm}}{234 + T_{sm}}}}$$

ومنها يمكن حساب مساحة المقطع ، ومنه نحسب قطر الموصل d ، وهذا سيستخدم في الخطوة التاسعة من خطوات التصميم.

وهناك معادلة أخرى تقريبية

$$A (\text{mm}^2) = 8.832 \times I_{GF} \times \sqrt{T_C}$$

ويمكن فرض مقطع الموصل مباشرة حسب الـ IEEE-665-1995 بحيث يتم اختيار مقطع يتحمل نصف قيمة تيار العطل (أو 60% إذا أردت مزيدا من الأمان) ، وذلك على اعتبار أن تيار العطل يتسرب من جهتين خلال شبكة الأرضى.

#### اختبارات عملية:

1. زمن الفصل لا يقل عن نصف ثانية للأمان.
2. فى بعض التصميمات يؤخذ حرارة انصهار العزل فى الاعتبار حيث تكون هناك بعض الأجزاء معزولة (لون عزل أسلاك الأرضى هو الأخضر فى أصفر) ففى هذه الحالة نعتبر درجة الحرارة ليست حرارة انصهار موصل الأرضى والتي قد تصل لـ 1000 درجة كما رأينا بل قد تحسب على أنها 200 درجة فقط. ولذا يجب التأكد أولا من وجود أو عدم وجود موصلات معزولة فى منظومة الـ Earthing لأن هذا سيغير من مساحة مقطع الموصل.

3. مقطع الموصل غالبا لا يقل عن 120 مم<sup>2</sup>
4. القيمة الكلية لتيار القصر  $I_{GF}$  لا بد أن تأخذ في الاعتبار قيمة مجموع تيارات الأعطال من داخل المحطة ومن خارجها. وتضاف نسبة أمان للتوسعات المستقبلية التي قد ترفع من قيمة تيار العطل.

## جدول 0 - 4 :

Table 3-Material Constants  
Ref. IEEE Std 80-2000 Table 1. Copyright © 2000. IEEE. All rights reserved

Description	Material Conductivity (%)	$\alpha_r$ factor at 20°C (1/°C)	$K_0$ at 0°C (0°C)	Fusing <sup>a</sup> temperature $T_m$ (°C)	$\rho_r$ 20°C ( $\mu\Omega\text{-cm}$ )	TCAP thermal capacity [J/(cm <sup>3</sup> ·°C)]
Copper, annealed soft-drawn	100.0	0.00393	234	1083	1.72	3.42
Copper, commercial hard-drawn	97.0	0.00381	242	1084	1.78	3.42
Copper-clad steel wire	40.0	0.00378	245	1084	4.40	3.85
Copper-clad steel wire	30.0	0.00378	245	1084	5.86	3.85
Copper-clad steel rod <sup>b</sup>	20.0	0.00378	245	1084	8.62	3.85
Aluminum, EC grade	64.0	0.00403	228	657	2.86	2.56
Aluminum, 5005 alloy	53.5	0.00353	263	652	3.22	2.60
Aluminum, 6201 alloy	52.5	0.00347	2268	654	3.28	2.60
Aluminum-clad steel wire	20.3	0.00360	258	657	8.48	3.58
Steel-1020	10.8	0.00160	605	1510	15.90	3.28
Stainless-clad steel rod <sup>c</sup>	9.8	0.00160	605	1400	17.50	4.44
Zinc-coated steel rod	8.6	0.00320	293	419	20.10	3.93
Stainless steel, 304	2.4	0.00130	749	1400	72.00	4.03

<sup>a</sup>From ASTM standards.

<sup>b</sup>Copper-clad steel rods based on 0.254 mm (0.010 in) copper thickness.

<sup>c</sup>Stainless-clad steel rod based on 0.508 mm (0.020 in) No. 304 stainless steel thickness over No. 1020 steel core.

## الخطوة الرابعة: حساب الحدود الآمنة لقيم جهد الخطوة وجهد اللمس

عندما لا يجد تيار العطل مسارا ليكمل الدائرة سوى بالرجوع خلال الأرض تكون هناك خطورة من ارتفاع جهد الأرض حول منطقة العطل ويسمى Ground Potential Rises GPR وهذا يعني أن أى شخص يقف على هذه الأرض يكون معرضا لصدمة كهربية إما نتيجة فرق الجهد بين قدميه Step Voltage أو نتيجة فرق الجهد بين الجسم المعدنى الذى لمسه وبين الأرض التي يقف عليها Touch Volt.

فإذا كان لدينا شبكة تأريض مناسبة فستقوم بتبديد تيار العطل بعيدا فى عمق الأرض ، وبالتالي لا يظهر GPR على سطحها وهذا كما ذكرنا فى المقدمة هو الهدف الأساسى من التصميم وهو أن نحصل على شبكة قادرة على جعل جهد الخطوة وجهد اللمس ضمن الحدود الآمنة بالمحطة.

والمعادلات التالية تعطى قيم تقريبية لجهد الخطوة وجهد اللمس (لاحظ أن تتوقف على وزن الشخص وتتوقف على نوع التربة والطبقة السطحية ومدة بقاء تيار العطل قبل فصله بأجهزة الوقاية). لاحظ أيضا أهمية أن تكون منظومة الوقاية سريعة بالدرجة الكافية لتقليل هذه الجهود.

القيم الناتجة من المعادلات التالية هي التي تجعل التيار المار فعليا في جسم الإنسان في الحدود الآمنة.

50kg person,  $E_t$

$$E_{touch,50} = (1000 + 1.5C_s\rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}}$$

70kg person,  $E_t$ :

$$E_{touch,70} = (1000 + 1.5C_s\rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}}$$

أما المعادلات الخاصة بالجهود الآمنة لجهد الخطوة فهي كما يلي:

50kg person:

$$E_{step,50} = (1000 + 6C_s\rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}}$$

70kg person:

$$E_{step,70} = (1000 + 6C_s\rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}}$$

Where  $E_{touch}$  is the touch voltage limit (V)

$E_{step}$  is the step voltage limit (V)

$C_s$  is the surface layer derating factor (as calculated in Step 2)

$\rho_s$  is the soil resistivity ( $\Omega.m$ )

$t_s$  is the maximum fault clearing time (s)

ملحوظة:

أصل المعادلات السابقة يمكن كتابتها على النحو التالي:

$$E_{Step} = (R_B + 2 \times R_F) \times I_B$$

$$E_{Touch} = (R_B + R_F \div 2) \times I_B$$

والرقم 1000 في المعادلات السابقة يمثل قيمة مفترضة لمقاومة جسم الإنسان.

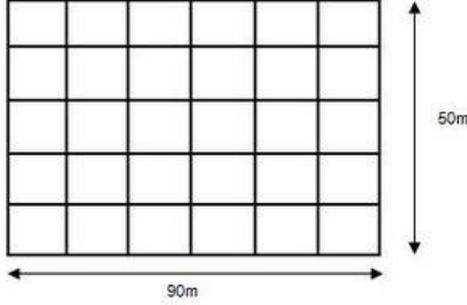
لاحظ في حالة الـ Touch volt تكون المقاومتان أسفل القدمين  $R_{Foot}$  موصلتان على التوازي ولذا تقسم  $R_F$  على 2 ، بينما في حالة الـ Step Volt تكونان على التوالي ولذا تضرب في 2 كما في المعادلتين الأخيرتين.

لاحظ أن القيم الناتجة من الحسابات السابقة ستكون مرتفعة لأنها تمثل جهد نقاط وليس فرق الجهد الذي سيظهر على جسم الشخص ، لذا لا تستغرب إذا وجدت ان القيم السابقة تتعدى الألف فولت.

**الخطوة الخامسة : حساب عدد الموصلات الأفقية واختيار طريقة وضعها**

يختلف توزيع الجهد على سطح الأرض الناشئ نتيجة مرور تيار العطل خلال هذه الإلكتروودات ، Surface Potential Distribution فيكون أفضل في حالة الشبكة المكونة من عدة موصلات أفقية منه في الإلكتروودات المدفونة رأسياً. ففي حالة الموصلات الأفقية (أو الشبكة) يكون قيمة الجهد الذي ينشأ على سطح الأرض بين نقطتين في المنطقة القريبة من الجسم المؤرض نتيجة مرور تيار العطل صغيراً جداً .

ولذا ستجد دائما في محطات التحويل أننا نستخدم شبكة تأريض عبارة عن موصلات أفقية على شكل مربعات بطول ضلع يتراوح بين 3-6 متر ، بينما يصل طول الضلع في تأريض محطات النقل والتوليد



من 10 إلى 20 متر. وتوضع هذه الشبكة أسفل أرضية المحطة لضمان انخفاض قيمة جهد الخطوة وجهد للمس كما في الشكل. لاحظ أن كل هذه الموصلات مدفونة أفقية تحت سطح الأرضية بـ متر أو نصف متر تقريبا ثم سنضيف لها إلكتروادات رأسية إما عند نقاط التقاطع على محيط الشكل أو عند كافة نقاط التقاطع كما سنرى.

#### الخطوة السادسة : حساب مقاومة شبكة الأرضي

مقاومة شبكة الأرضي التي تم رسمها في الخطوة السابقة تحسب من المعادلة التالية

$$R_g = \rho \left[ \frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left( 1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20/A}} \right) \right]$$

Where  $R_g$  is the earthing grid resistance with respect to remote earth ( $\Omega$ )

$\rho$  is the soil resistivity ( $\Omega.m$ )

$L_T$  is the total length of buried conductors (m)

$A$  is the total area occupied by the earthing grid ( $m^2$ ) مساحة المحطة وليست مساحة الموصلات

$h$  is the depth of the earthing grid (m)

ويتضح منها أن قيمة المقاومة تتوقف على :

- 1- إجمالي أطوال الموصلات الأفقية المستخدمة في شبكة المربعات (الخطوة السابقة)
- 2- إجمالي عمق الإلكترونيادات الرأسية (الخطوة السابقة)
- 3- عمق الدفن
- 4- المساحة المغطاة بشبكة ال Earthing (معلومة)
- 5- المقاومة النوعية للتربة (خطوة -1)

وكما ذكرنا فهذه المقاومة ليست مقاومة كمية النحاس المدفون بل هي المقاومة المكافئة من نقطة التلامس حتى مركز الأرض.

### الخطوة السابعة : حساب قيمة أقصى تيار يمر بشبكة الـ Earthing

وهو أقصى تيار عطل يمكن أن نحصل عليه من حسابات الـ Short Circuit . والأصل أن أقصى تيار هو الـ 3-phase short circuit current ويحسب من المعادلة التالية

$$I_{k3} = \frac{1.1 \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_1|}$$

أما عطل الـ Single phase فيساوي

$$I_{k1} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1.1 \cdot U_n}{|Z_1 + Z_2 + Z_0|} = \frac{3 \cdot I_{k3}}{2 + |Z_0/Z_1|}$$

علما بأن تيار العطل يمكن أن يحدث له نقصان بنسبة Sf ، أو زيادة بنسبة Df:

فيمكن أن ينقص نتيجة ما يسمى Surface factor, Sf (قيمه بالطبع ستكون أقل من واحد لكن لزيادة الأمان يمكن اعتباره يساوي واحد) ، ونقصد بذلك أن التيار يمكن ألا يرجع من خلال شبكة الأرضي فقط بل يمكن أن يعود جزء منه خلال أغلفة الكابلات مثلا والباقي خلال شبكة الأرضي. لاحظ أن فرض قيمة Sf =1 يعتبر نوعا من الأمان لكن على حساب التكلفة حيث ستزيد عدد الإلكتروادات.

والشكل 13-15 يبين فكرة توزيع تيار العطل وطريقة رجوعه لمصدره. فتيار العطل الأصلي قيمته عند نقطة العطل كانت 2720 أمبير ، لكن هذا التيار رجع لنقطة التعادل في المحول المغذى لهذا العطل من طريقين:

- الطريق الأول خلال تأريض كل برج حيث تسرب جزء من التيار ويتجمع ويعود عن طريق خط الأرضي الممتد فوق هذه الأبراج وهذا التيار مجموعه 875 أمبير (أو قد يعود خلال الـ Cable Sheath إذا كان النقل عبر كابلات أرضية). وهذا التيار لا يتسبب في GPR ، ولذا لا يدخل في حسابات جهد اللمس وجهد الخطوة.
- والطريق الثاني لرجوع تيار العطل كان من خلال الأرض مباشرة ومن ثم إلى إلكتروادات شبكة الـ Earthing بالمحطة ومنها لنقطة التعادل وهذا الجزء يساوي 1121 أمبير كما في الشكل

13-15. وهذا هو الجزء الذي يهمنا لأنه المتسبب في رفع قيمة جهد الأرض. ولذا يحسب

GPR كالتالى:

$$GPR = I_G R_G$$

حيث  $I_G$  يمثل الجزء الثانى فقط من تيار العطل.

على الجانب الآخر ، هناك جزء إضافى يمكن أن يزيد من قيمة التيار نتيجة الـ magnetic coupling وأيضاً نتيجة احتمال وجود DC component فى العطل والتي تتوقف قيمتها على Time Constant الخاص بالشبكة ومكان العطل و هذا يحتاج إلى تقريب فى حسابه. وعموما نسبة الإضافة تسمى Decrement factor وهي  $D_f$  تحسب من المعادلات التالية

$$I_G = I_g D_f$$

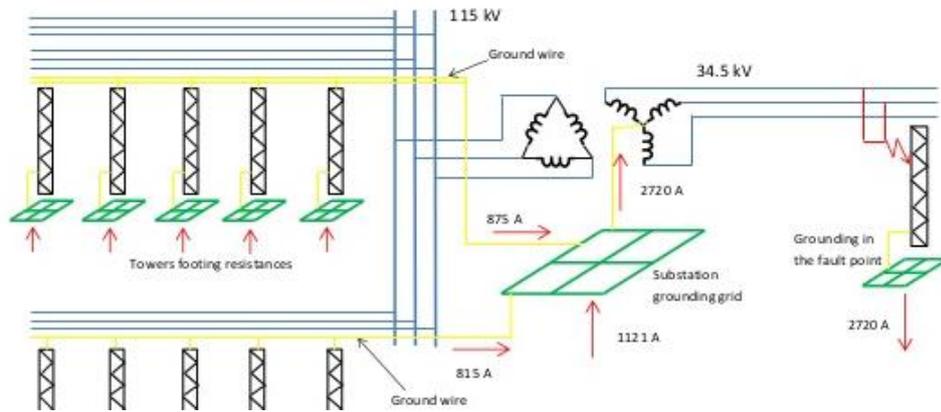
$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T_a}{t_f} \left(1 - e^{-\frac{2t_f}{T_a}}\right)}$$

$$T_A = \frac{X}{R} \cdot \frac{1}{2\pi f}$$

$t_f$  is the duration of the fault (s)

$T_A$  is the dc time offset constant

يمكن اعتبار  $D_f = 1.25$  للتبسيط



شكل 13-15:

## الخطوة الثامنة : حساب الارتفاع في جهد شبكة الأرضي GPR

في هذه الخطوة نحسب قيمة الارتفاع في الجهد على شبكة الأرضي نتيجة حدوث عطل

$$GPR = I_G R_g$$

Where  $GPR$  is the maximum ground potential rise (V)

$I_G$  is the maximum grid current found earlier in Step 7 (A)

$R_g$  is the earthing grid resistance found earlier in Step 6 ( $\Omega$ )

ملحوظة :

- إذا كانت  $GPR < V_{step-4}$  فهذا يعني بالتأكيد أن التصميم صحيح ونكون قد نصل لنهاية خطوات التصميم
- لكن إذا كانت  $GPR > V_{step-4}$  فقد يكون التصميم سليماً وقد يكون خاطئاً ويصبح الفيصل في الحكم هو القيم التفصيلية لجهدى الخطوة واللمس التي سنحسبها في الخطوة التالية. ولذا قد نحسب في بعض الحالات القيم التفصيلية ونكتشف أنها أقل من المسموح رغم أننا لم نغير شيئاً في التصميم وهذا يؤكد على ما قلناه أن كون الـ  $GPR$  كبيراً لا يعنى بالضرورة خطأ التصميم.

## الخطوة التاسعة : الحساب الدقيق لجهد الخطوة وجهد اللمس الحقيقيين

القيم المحسوبة في الخطوة الرابعة السابقة كانت تمثل القيم الآمنة ، أما القيم المحسوبة هنا فتمثل القيم التي سنتشأ نتيجة الشبكة التي تم تصميمها بالفعل في الخطوات السابقة وبالطبع يجب أن تكون قيم الخطوة التاسعة أقل من قيم الخطوة الرابعة حتى نقرر أن التصميم آمن ، فتحقيق القيم الآمنة لقيم هذه الجهود هو الهدف الأسمى لتصميم شبكة الأرضي كما ذكرنا في المقدمة .

## أولاً حساب جهد اللمس الفعلي

فأما قيمة جهد اللمس ( ويسمى Mesh Voltage ) فتحسب من المعادلة

$$E_m = \frac{\rho_s K_m K_i I_G}{L_M}$$

Where

the surface soil resistivity ( $\Omega.m$ )  $\rho_s$

the maximum grid current (A)  $I_G$

the geometric spacing factor  $K_m$

the irregularity factor  $K_i$

the effective buried length of the grid  $L_M$

ثانياً حساب جهد الخطوة الفعلى:

المعادلة التالية تعطى قيمة جهد الخطوة:

$$E_s = \frac{\rho_s K_s K_i I_G}{L_s}$$

Where  $\rho_s$  is the soil resistivity ( $\Omega.m$ )

$I_G$  is the maximum grid current (A)

$K_s$  is the geometric spacing factor

$K_i$  is the irregularity factor (as derived above in the mesh voltage calculation)

$L_s$  is the effective buried length of the grid

والحسابات هنا تأخذ في اعتبارها بالإضافة إلى قيمة تيار العطل قيمة التباعد بين الموصلات الأفقية وعمق دفن الإلكتروودات الرأسية ومجموع أطوال الموصلات المدفونة تحت الأرض أفقياً ، وأيضا مجموع أطوال الإلكتروودات الرأسية. ويمكن الرجوع للمرجع الأصلي للمزيد من تفاصيل هذه الثوابت.

مع ملاحظة أن البرامج الجاهزة مثل الـ ETAP تعتبر مثالية لتنفيذ هذه الحسابات ، وما عليك سوى فهم معاني المفردات المستخدمة في هذه البرامج ، وإدخال البيانات المناسبة لشبكتك.

#### الخطوة العاشرة : المقارنات

وصلنا لنهاية الرحلة وبقي فقط أن نتأكد هل هذا التصميم يحقق الحدود الآمنة لجهد الخطوة وجهد اللمس (وهو الهدف الأسمى للتصميم) أم لا. وكما ذكرنا سابقا فإنه يجب أن تكون القيم المحسوبة في الخطوة التاسعة أقل من قيم الخطوة الرابعة حتى نقرر أن التصميم آمن وبالتالي يجب تحقق الشرطين التاليين حتى يكون التصميم صحيحا :

$$\begin{aligned} E_m &< E_{touch} \quad \bullet \\ E_s &< E_{step} \quad \bullet \end{aligned}$$

وإلا نعيد التصميم مع عمل بعض التعديلات منها مثلا:

- 1- تقليل مقاومة الأرض بزيادة عدد الإلكتروودات أو زيادة مساحة المقطع.
- 2- تقليل تيار العطل باستخدام ال Current Limiter مثلا
- 3- تحسين المقاومة التربة
- 4- تحسين المقاومة النوعية لسطح التربة.

## 5-15 مثال تفصيلي

المعطيات:

- 1- المساحة 50 متر عرض و90 متر طول
- 2- تيار Short Circuit Current = 3.15 kA أمبير
- 3- زمن فصل العطل 0.5 sec
- 4- زمن الإحساس بالصدمة 0.15 sec
- 5- درجة الحرارة 40 درجة مئوية
- 6- المقاومة النوعية للتربة  $300 \Omega.m$
- 7- المقاومة النوعية للطبقة السطحية  $3000 \Omega.m$  بسمك 10 سم

الحل

الخطوة الأولى: قياسات المقاومة النوعية للتربة

طبقا للمعطيات فإن المقاومة النوعية للتربة تساوى  $300 \Omega.m$ .

الخطوة الثانية : حساب Surface Layer Derating Factor

طبقا للمعطيات نجد أن المقاومة النوعية للطبقة السطحية  $3000 \Omega.m$  بسمك 10 سم وبالتعويض بهذه القيم (المقاومة النوعية للتربة وسطح التربة وسمك طبقة سطح التربة في معادلة حساب  $C_s$  نحصل على الاتي:

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2h_s + 0.09}$$

$$\begin{aligned}
C_s &= 1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2h_s + 0.09} \\
&= 1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{300}{3,000}\right)}{2 \times 0.1 + 0.09} \\
&= 0.7207
\end{aligned}$$

الخطوة الثالثة : حساب مساحة مقطع الموصلات الأفقية

بالتعويض في المعادلة

$$A_{\min} = I_{fs} \cdot \sqrt{\frac{\frac{t_c \cdot \alpha_r \cdot \rho_r \cdot 10^4}{TCAP}}{\ln \left(1 + \frac{T_m - T_a}{K_0 + T_a}\right)}}$$

الطريقة الأولى : بالتعويض في المعادلة السابقة:

$$A = 31,5 \cdot \sqrt{\frac{\frac{0,5 \cdot 0,00381 \cdot 1,78 \cdot 10^4}{3,42}}{\ln \left(1 + \frac{1084 - 40}{242 + 40}\right)}} = 80,4 \text{ mm}^2$$

- $T_m = 1084 \text{ }^\circ\text{C}$  درجة انصهار الموصل
- $\alpha_r = 0.00381 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
- $\rho_r = 1.78 \text{ } \mu\Omega \cdot \text{cm}$
- $TCAP = 3.42 \text{ Jcm}^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ .
- $Tc = \text{duration} = 0.5 \text{ sec}$
- $K_0 = 242$
- $Ta = 40 \text{ }^\circ\text{C}$

والطريقة الثانية هي معادلة تقريبية أيضا ولكن أكثر تبسيطا وهي:

$$A \text{ (mm}^2\text{)} = \frac{I_d}{1973} \times \sqrt{\frac{76 t}{\ln \frac{234 + T_{cm}}{234 + T_{sm}}}}$$

ومنها أن الموصل المناسب هو 100 ملم<sup>2</sup> واحتياطا سنأخذه 120 ملم<sup>2</sup>.

الخطوة الرابعة: حساب الحدود الآمنة لقيم جهد الخطوة وجهد اللمس

- 70kg person:

$$E_{touch,70} = (1000 + 1.5C_s\rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}}$$

- 70kg person:

$$E_{step,70} = (1000 + 6C_s\rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}}$$

$C_s$  is the surface layer derating factor (as calculated in Step 2) = 0.7207

$\rho_s$  is the surface soil resistivity ( $\Omega.m$ ) 3000 معطى

$t_s$  is the maximum shock time (s) = 0.150 s زمن الإحساس بالصدمة معطى

$$\begin{aligned} E_{touch,70} &= (1000 + 1.5C_s\rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \\ &= (1000 + 1.5 \times 0.7207 \times 3,000) \frac{0.157}{\sqrt{0.15}} \end{aligned}$$

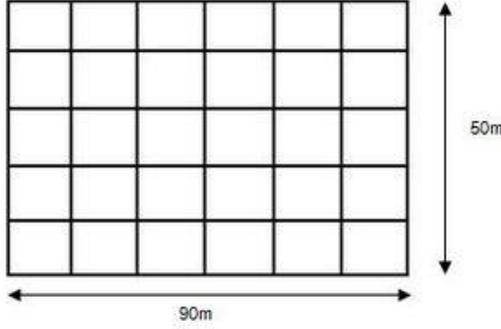
$$V = 1720 \text{ V}$$

$$\begin{aligned} E_{step,70} &= (1000 + 6C_s\rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \\ &= (1000 + 6 \times 0.7207 \times 3,000) \frac{0.157}{\sqrt{0.15}} \end{aligned}$$

$$V = 5664.3 \text{ V}$$

الخطوة الخامسة : حساب عدد الإلكتروودات واختيار طريقة وضعها

لدينا مساحة 90x50 فسيكون لدينا شبكة مبدئية كما فى الشكل (6 صفوف و 7 أعمدة) ويمكن بالطبع تعديل أعدادهم بالزيادة والنقصان حسب النتائج لاحقاً.



- الموصلات مدفونة أفقية تحت سطح الأرضية نفترض أنها على عمق 60 سم فى هذا المثال
- ثم سنضيف لها إلكترودات رأسية (بطول 3 متر) عند نقاط التقاطع الواقعة على محيط الشكل الخارجى وعددها هنا يساوى 22 نقطة (يمكن بالطبع زيادة أو تقليل عددهم حسب النتائج الأولية لاحقاً).
- مقطع الموصل سنفترضه مبدئياً 120 ملم من الخطوة الثالثة

الخطوة السادسة : حساب مقاومة شبكة الأرضى

$$R_g = \rho \left[ \frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left( 1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20/A}} \right) \right]$$

$$\rho = 300 (\Omega.m) \text{ معطى}$$

$$L_T = 90 \times 6 + 50 \times 7 + 22 \times 3 = 956 \text{ (m)}$$

$$h = 0.6 \text{ (m)}$$

$$A = 50 \times 90 = 4500 \text{ m}^2$$

$$= 300 \left[ \frac{1}{956} + \frac{1}{\sqrt{20 \times 4,500}} \left( 1 + \frac{1}{1 + 0.6\sqrt{20/4,500}} \right) \right]$$

$$= 2.2753 \Omega$$

**الخطوة السابعة : حساب قيمة أقصى تيار يمر بشبكة الـ Earthing**

سنفترض هنا للتسهيل أن تيار العطل بكامله يرجع من خلال شبكة الأرضى ولا يتفرع منه شئ ( division factor is 1 ) وفرضا X/R تساوى 15 عند حدوث العطل وزمن العطل كما ذكرنا سابقا 150 مللى ثانية وسنحاول حساب الـ Decrement Factor, Df

$$\begin{aligned} T_A &= \frac{X}{R} \cdot \frac{1}{2\pi f} \\ &= 15 \times \frac{1}{2\pi 50} \\ &= 0.04774 \end{aligned}$$

The decrement factor is then:

$$\begin{aligned} D_f &= \sqrt{1 + \frac{T_a}{t_f} \left(1 - e^{-\frac{2t_f}{T_a}}\right)} \\ &= \sqrt{1 + \frac{0.04774}{0.15} \left(1 - e^{-\frac{2 \times 0.15}{0.04774}}\right)} \\ &= 1.1479 \end{aligned}$$

ومنه نحسب قيمة  $I_G$

$$I_G = I_g D_f = 3.15 \times 1.14 = 3.559 \text{ kA}$$

أحيانا يؤخذ  $D_f = 1.25$  للتسهيل

**الخطوة الثامنة : حساب الارتفاع فى جهد شبكة الأرضى GPR**

$$GPR = I_G R_g$$

$$= 3559 \times 2.2753 =$$

$$V = 8097 \text{ V}$$

بما أن هذه القيمة تجاوزت القيم الآمنة لجهد الخطوة وجهد اللمس فى الخطوة الرابعة فهذا يعنى أننا بحاجة لحساب القيم التفصيلية لجهد اللمس وجهد الخطوة مع إعادة التصميم.

## الخطوة التاسعة : الحساب الدقيق لجهد الخطوة وجهد اللمس الحقيقيين

## أولا حساب جهد اللمس

باستخدام برنامج الـ ETAP وبإدخال نفس الأرقام فى هذا المثال سنجد أن جهد اللمس المحسوب يساوى 1217 فولت فى حين أن القيمة المسموح بها هى 1720 فولت وهذا يعنى أن التصميم قد تجاوز هذه الخطوة بنجاح.

## ثانيا حساب جهد الخطوة

باستخدام برنامج الـ ETAP وبإدخال نفس الأرقام فى هذا المثال سنجد أن جهد الخطوة المحسوب يساوى 583 بينما الجهد المسموح به هو 5664 وهذا يعنى أنه تجاوز هذه الخطوة أيضا بنجاح.

## الخطوة العاشرة المقارنات

الآن وضح من الحسابات التفصيلية أن التصميم باستخدام هذه الأعداد من الموصلات الأفقية والرأسية يعتبر الآن كافيا وآمنا.

## ملحوظة هامة:

فى الساحات التى ليس بها هياكل معدنية فليس هناك احتمال أن يصاب أحد بصدمة كهربية نتيجة لمس شيء ، لكن المشكلة ستكون فقط فى جهد الخطوة ، ومن ثم يكون الاهتمام به فقط وهذا يمكن أن يؤدي إلى تقليل شبكة النحاس المستخدمة فى الـ Earthing إذا أخذت هذه النقطة فى الاعتبار.

## 6-15 حل المثال السابق باستخدام الـ ETAP

## المعطيات:

- المساحة 50 متر عرض و 90 متر طول
- تيار  $3.15 \text{ kA} = \text{Short Circuit Current}$  أمبير
- زمن فصل العطل  $0.5 \text{ sec}$ , Tc
- زمن الإحساس بالصدمة  $0.15 \text{ sec}$ , Ts
- درجة الحرارة 40 درجة مئوية
- المقاومة النوعية للتربة  $300 \Omega.m$

- المقاومة النوعية للطبقة السطحية  $3000 \Omega.m$  بسمك 10 سم

الخطوة الأولى : حساب مساحة مقطع الموصلات الأفقية

يحتاج البرنامج أن تدخل له مساحة الموصلات الأفقية المستخدمة ، ويمكن للتبسيط استخدام المعادلة التالية:

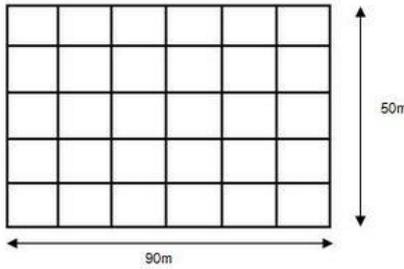
$$A (mm^2) = 8.832 \times I_{GF} \times \sqrt{T_C}$$

ويمكن أيضا فرض مقطع الموصل مباشرة حسب الـ IEEE-665-1995 بحيث يتم اختيار مقطع يتحمل نصف قيمة تيار العطل (أو 60% إذا أردت مزيدا من الأمان) ، وذلك على اعتبار أن تيار العطل يتسرب من جهتين خلال شبكة الأرضى.

ومنها أن الموصل المناسب هو 100 ملم<sup>2</sup> واحتياطا سنأخذ 120 ملم<sup>2</sup>.

الخطوة الثانية : حساب عدد الموصلات الأفقية واختيار طريقة وضعها

لدينا مساحة 90x50 فسيكون لدينا شبكة كما فى الشكل (6 صفوف و 7 أعمدة).



- الموصلات مدفونة أفقية تحت سطح الأرضية
- نفترض أنها على عمق 60 سم فى هذا المثال
- ثم سنضيف لها إلكتروادات رأسية (بطول 3 متر) عند نقاط التقاطع الواقعة على محيط الشكل الخارجى وعددها هنا يساوى 22 نقطة .
- مقطع الموصل 120 ملم من الخطوة السابقة.

الخطوة الثالثة : إدخال بيانات الـ Case Study

سنفترض هنا للتسهيل أن تيار العطل بكامله يرجع من خلال شبكة الأرضى ولا يتفرع منه شئ ( division factor is 1 ) وفرضا X/R تساوى 15 عند حدوث العطل وزمن العطل كما ذكرنا سابقا 150 مللى ثانية

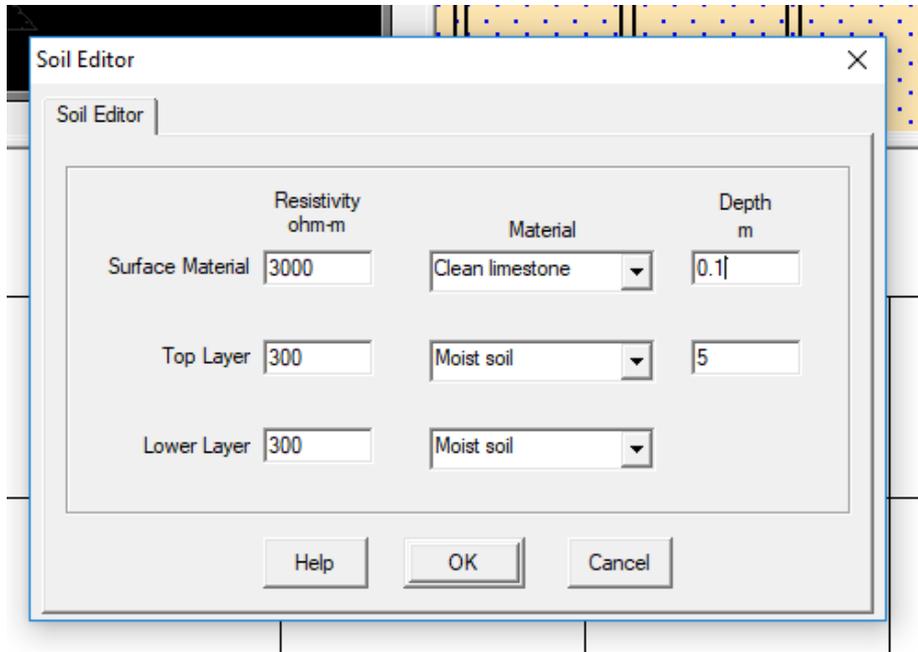
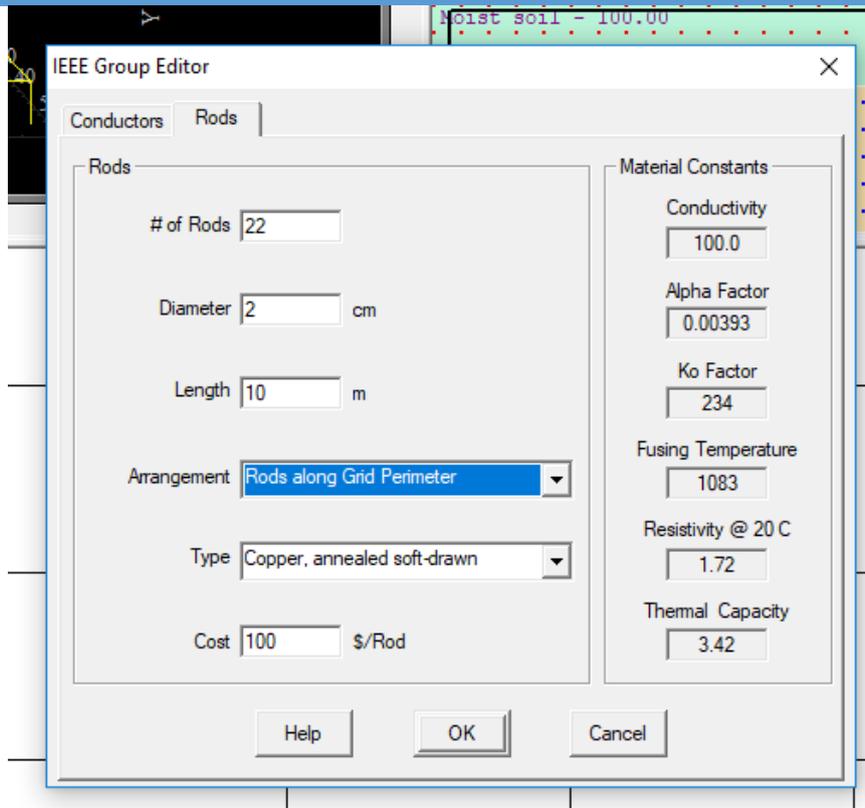
الخطوة الرابعة : عمل RUN من أجل حساب الـ GPR وجهدى اللمس والخطوة

والشاشات التالية مأخوذة مباشرة من البرنامج بعد إدخال البيانات السابقة.

The screenshot shows the IEEE Group Editor dialog box with the following settings:

- Grid Size:** Lx = 90 m, Ly = 50 m
- # of Conductors:** X Direction = 6, Y Direction = 7
- Material Constants:** Conductivity = 100.0, Alpha Factor = 0.00393, Ko Factor = 234, Fusing Temperature = 1083, Resistivity @ 20 C = 1.72, Thermal Capacity = 3.42
- Conductors:** Depth = 0.6 m, Size = 120 sq.mm, Type = Copper, annealed soft-drawn, Cost = 10 \$/m

Buttons: Help, OK, Cancel



GRD Study Case Editor

Study Case

Study Case ID: GRD1

Options

Weight:  50 kg  70 kg

Ambient Temperature: 40 °C

Method

Finite Element  IEEE 80 - 2000  IEEE 80 - 1986  IEEE 665 - 1995

Update

# of Conductors and Rods (Optimization)

Reports & Plots

Auto Display Summary & Alert  Report Details

Fault Durations

tf: 0.5 Sec tc: 0.5 Sec ts: 0.15 Sec

Ground Short-Circuit Current

User Specified Ifg: 3.15 kA X/R: 15  Short-Circuit Study

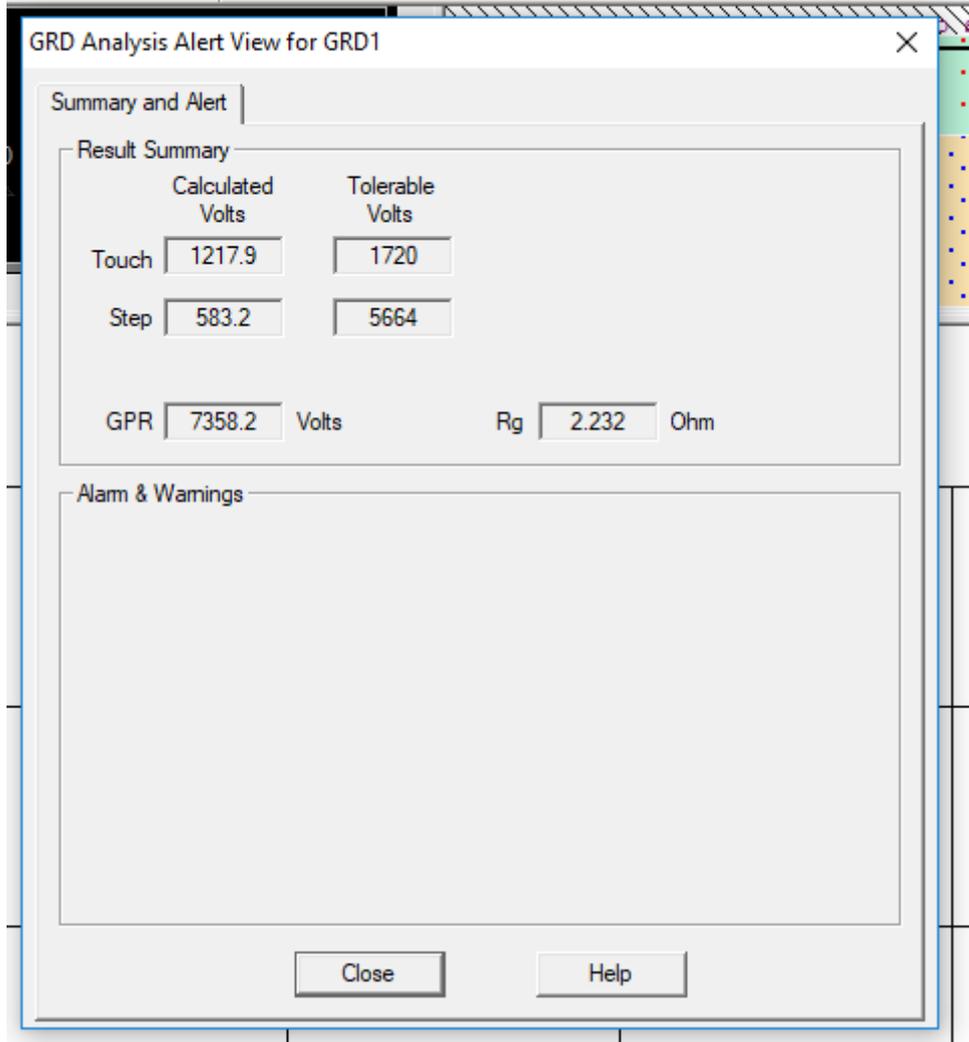
Grid Current Factors

Sf: 100 % Cp: 100 %

Remarks 2nd line

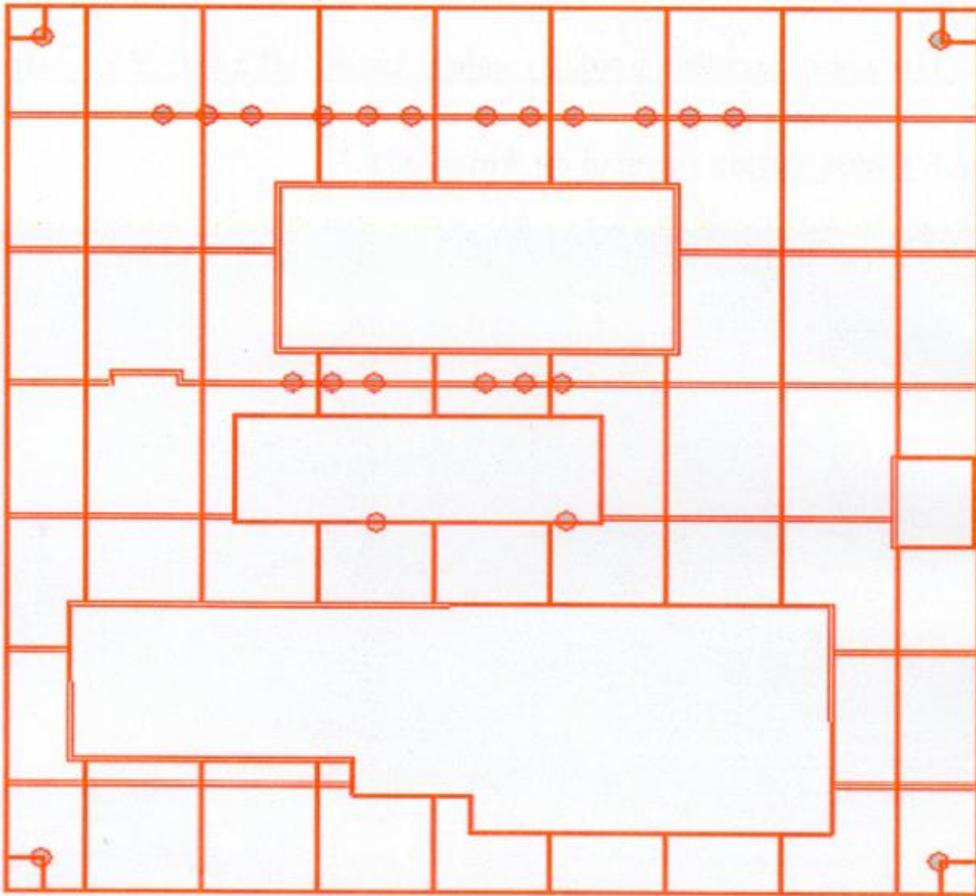
< GRD1 >

Help OK Cancel



## ملحوظة:

عمليا لن يكون التوزيع منتظما كما في المثال السابق بل سيكون كما في الشكل التالي حيث لا توضع موصلات أفقية أسفل المباني. والرسم التالية نحصل عليها بعد رسم المحطة بواسطة الـ Autocad مثلا ثم يتم عمل import للملف من داخل برنامج الـ ETAP فيظهر كما في الشكل التالي.



## 16

## الأنظمة المساعدة في محطات التحويل

## Auxiliary Systems

هناك العديد من الأنظمة التي تصنف بـ Auxiliary Systems ، وترتبط ارتباطا وثيقا بالمعدات الأساسية بالمحطة مثل :

- منظومة تغذية مساعدات المحطة سواء بالـ AC Supply أو من خلال منظومة الـ DC Supply.
- منظومات الحماية والقياس : التي تقوم بحماية الدوائر الكهربائية وقياس القيم الكهربائية.
- منظومة التحكم والمراقبة والاتصالات : التي تقوم بالتحكم بتشغيل الأجهزة والمعدات الكهربائية إما عن طريق مركز المراقبة والتحكم باستخدام معدات الاتصالات المتوفرة في المحطة أو مباشرة من داخلها عن طريق شخص يكون مكلفا بذلك .
- منظومات السلامة والإطفاء .

وغيرها الكثير . وفيما يلي تفاصيل لبعض هذه المنظومات والأقسام الموجودة بمحطات التحويل.

## 1-16 منظومة تغذية مساعدات المحطة

يوجد بالمحطة نظامين لتغذية المساعدات **Auxiliaries** : أحدهما **AC** والآخر **DC** .

## 1-1-16 النظام التغذية بنظام الـ AC System :

وهو عبارة عن (Auxiliary Transformer + Distribution Board) وذلك لتغذية الأحمال الداخلية في المحطة مثل إضاءة المحطة و التكييف والمضخات وكباسات الهواء compressors إلخ. حيث يوجد بالمحطة محول مساعد أو أكثر يقوم بخفض الجهد من 11kV إلى 380 volt ليغذى الـ Main

Distribution Board التي تقوم بدورها بتغذية أحمال المحطة.

والأحمال التي تتم تغذيتها بنظام الـ AC Auxiliary System تكون عادة:

- لوحات الحماية Protection Panels
- لوحات التحكم GIS Control Panels
- لوحات توزيع المباني Buildings Power Distribution Boards
- لوحات توزيع نظام التكييف Building HVAC Distribution Board
- لوحات توزيع الإضاءة Building HVAC Lighting Board
- نظام إطفاء الحريق و المضخات.

## 2-16 منظومة التغذية بنظام الـ DC SYSTEM :

وهو عبارة عن (Chargers + Batteries) .

ويوجد داخل كل محطة تحويل غرفة للبطاريات ، ويوجد بها مجموعات البطاريات الحمضية (قلوية في بعض المحطات) المستخدمة في تغذية دوائر الوقاية والطوارئ (220 / 110 فولت) وكذلك دوائر الاتصالات (48 فولت).

وتوجد البطاريات في غرفة خاصة حيث تنظم في صفوف كما في الشكل 1-16 . وتجري على البطاريات اختبارات دورية منها قياس المقاومة الداخلية و قياس جهد العمود وتركيز سائل البطارية.



شكل 1-16:

وفي بعض المحطات توجد جميع البطاريات في غرفة واحدة ، و في بعض المحطات توجد كل مجموعة بطاريات في غرفة منفصلة ، كما تخصص غرفة منفصلة للشواحن Battery Charger ، و لا يتم وضعها مع غرفة البطاريات حتى لا تتأثر بالغازات الخارجة من البطاريات. والأحمال التي يتم تغذيتها بجهد 220V DC هي :

- إنارة الطوارئ Emergency Lighting
- لوحات حماية الكابلات Cables Protection Panels
- لوحات حماية المحول Transformer Protection Panels
- لوحات حماية رابط قضبان التوزيع Bus Coupler Protection Panels
- لوحات حماية قضبان التوزيع Bus bar Protection Panels
- لوحات التحكم عن بعد Remote Control Panels
- لوحات حماية الدخل Incoming Protection Panels
- لوحات حماية الخرج Outgoing Protection Panels
- 11 KV Switchgear

#### ملحوظة هامة:

العديد من الأجهزة الموجودة داخل المحطات من أجهزة تحكم أو أجهزة وقاية تعمل بالتيار المستمر و ليس التيار المتردد ، وعند عزل المحطة عن الشبكة الكهربائية تكون البطاريات هي مصدر التيار الوحيد المتاح و لذلك يجب الاهتمام بصيانة البطاريات و التأكد من صلاحيتها. ولأهمية هذه الأنظمة ، فدائماً يؤخذ

في الاعتبار أن تكون سعة البطاريات كافية لتشغيل المحطة لمدة لا تقل عن 8 ساعات متصلة.

### حساب حجم بطاريات المحطة:

قبل البدء في عمل هذه الحسابات يجب معرفة أنواع الأحمال التي تتغذى بالبطاريات والمدة الزمنية لكل حمل. وعموما يوجد بالمحطة ثلاثة أنواع من الأحمال من وجهة نظر البطاريات:

- 1- أحمال تعمل بصورة متصلة مثل أحمال الإنارة وأجهزة الاتصالات والإذاعة الداخلية annunciators loads ، وكذلك الـ Continuous charged coils وهي أحمال تتصل بالبطارية بصورة متصلة مع اتصال البطارية بالشاحن أيضا بصورة متصلة.
- 2- أحمال تعمل في فترات متقطعة non continuous loads وفي أوقات غير محددة ، وبعضها يفصل اتوماتيكيا والبعض قد يستمر بعد تشغيله لمدد طويلة مثل أحمال التهوية وظلمبات الطوارئ ونظم الإطفاء إلخ.
- 3- أحمال تعمل بصورة خاطفة momentary Loads (لمدة وجيزة) لكنها أحمال عالية مثل تيار بدء المحركات.

وسنعرض هنا صورة مبسطة لحسابات حجم البطارية ، علما بأن المواصفات القياسية IEEE-1115-2000 تعطي طريقة مفصلة وتأخذ عوامل كثيرة في الاعتبار مثل تقادم عمر البطارية ودرجات الحرارة وغيرها.

نشير أيضا في البداية إلى أن سعة البطارية تتغير حسب قيمة التيار المسحوب بالبطارية التي سعتها 100AH لا تعطي كما يتصور البعض 20 أمبير لمدة 5 ساعات ، أو 10 أمبير لمدة 10 ساعات ، فهذا خطأ شائع لكن السعة المتاحة من البطارية تتغير حسب قيمة التيار مسحوب منها ولذا يكثر استخدام المعامل التالي:

$$\text{Capacity rating factor, } K_t = \frac{\text{Nominal Capacity (AH)}}{\text{Performance (Amp)}}$$

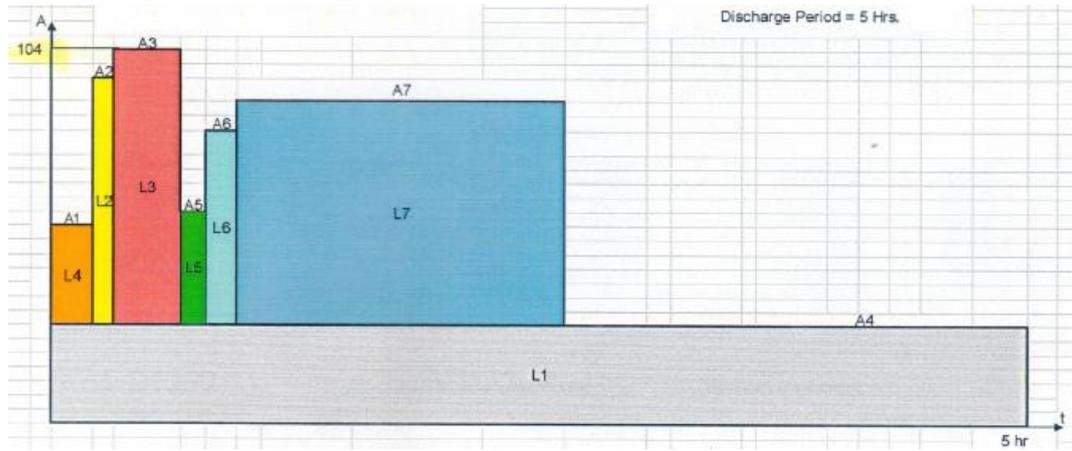
نشير كذلك إلى أن عدد الخلايا يحسب من معرفة أقل جهد يسمح بالنزول إليه مقسوما على أقل جهد تصل إليه الخلية ، فعلى سبيل المثال لو كان الجهد الاسمي للمحطة 220 فولت ( DC ) لكن يسمح بالنزول حتى 198 فولت ، فإذا كان H أقل جهد للخلية الواحدة يصل إلى 1.076V فإن عدد الخلايا يحسب من المعادلة التالية:

$$\text{No. of cells} = \frac{\text{min allowable system voltage}}{\text{end cell voltage}} = \frac{198}{1.076} = 184 \text{ cell}$$

مثال : في الجدول التالي حصر لأنواع الأحمال بإحدى المحطات ومدة تشغيل كل منها وكذلك التيار المسحوب خلال كل مدة:

DC Emergency Lighting Load =	13000	W
Σ Continuous Loads =	5938	W : L1 = 26.989 A
Σ Closing Coils Loads For 1 Sec =	13072	W : L2 = 59.418 A
Σ Spring Charging Motor For 15 Sec =	16940	W : L3 = 77 A
Σ Non-Continuous Loads For 4 Sec =	1200	W : L4 = 5.4545 A
Σ Non-Continuous Loads For 1 Sec =	2708	W : L5 = 12.309 A
Σ Tripping Coil 1.2 Loads For 1 Sec. =	5548	W : L6 = 25.218 A
Σ Emergency lighting For 1800 Sec. =	13000	W : L7 = 59.091 A

والشكل التالي يمثل توزيع هذه الأحمال خلال فترة Duty cycle والمقدرة هنا بخمس ساعات:



والجدول التالي نحسب منه بناء على الشكل الذى سبقه قيمة السعة المطلوبة خلال كل فترة من الفترات التي ظهرت في الشكل السابق ، ومنه نحصل على تقدير مبدئى لسعة البطاريات المطلوبة (أقول مبدئى لانه هناك خطوات أخرى في التصميم بعدها قد تصل السعة المطلوب إلى حوالى 3 أمثال هذه السعة المبدئية).

Period	Loads	Total Amperes		Duration (Sec)	Capacity Removed (AH)
1	L1+L4	32	A1	4	0.04
2	L1+L2	86	A2	1	0.02
3	L1+L3	104	A3	15	0.43
4	L1	27	A4	18178	121.3
5	L1+L5	39	A5	1	0.01
6	L1+L6	52	A6	1	0.01
7	L1+L7	86	A7	1800	43.0
				TOTAL	165 AH

### 1-2-16 الشواحن : (Battery Chargers)

وظيفة شاحن البطاريات battery charger في المحطات (شكل 2-16) هي:

1. إمداد جميع المعدات و أجهزة الوقاية بالتيار المستمر اللازم لتشغيلها.
2. شحن البطاريات.

وتغذي الشواحن لوحات توزيع (DC Panel) ، وكل لوحة تغذى مجموعة من الأحمال ، بالإضافة إلى تغذية واحدة من مجموعات البطاريات . كما توجد بغرفة الشواحن على الـ (DC Panel) عدادات لمتابعة حمل كل شاحن وقراءة جهد الخرج منه.



شكل 16-2 :

### 16-2-2 طرق شحن البطاريات :

**الشحن الطبيعي أثناء التشغيل :** (Floating) ويكون تيار الشحن ضعيفا (حيث توصل البطارية طوال الوقت بالشاحن لكي يقوم بتعويض عملية التفريغ الداخلي التي تحدث داخل البطارية).

**الشحن السريع (Equalizing)** يكون جهد الشحن أعلى من جهد البطارية وأعلى من جهد الشحن العادي لتنشيط البطارية أول مرة ، كما توضع عليه البطارية بعد كل عملية صيانة لمدة لا تقل عن ثمان ساعات فأكثر . وعموما لا يفضل الشحن السريع (high rate) لها إلا في الاحتياج الشديد.

### 16-2-3 هل يؤثر سرعة الشحن على عمر البطارية؟

بعض الناس يظنون أن البطارية عبارة عن وعاء فارغ تصب فيه الإلكترونات كصب الماء ، ومن وجهة نظره أن الوعاء إذا سكب الماء فيه بسرعة يملأ بسرعة وإذا سكب فيه الماء ببطء يملأ ببطء، وهذا غير صحيح في حالة البطارية ، فالبطارية القابلة للشحن تحتوي على مركب كيميائي يحتاج للوقت ليتكون بصورة صحيحة ، ومن ثم فالسرعة والبطء كلاهما مرفوض ولذا فشركات البطاريات تحدد أنسب تيار للشحن حتى لا تفسد البطارية. (يرجع في ذلك للكتالوج).

### 16-2-4 عيوب وميزات البطارية الحامضية

أهم عيوب هذه البطاريات أنها:

- تحتاج لصيانة أكثر من البطاريات القلوية
- عمرها الافتراضي أقل

- حجمها كبير نسبياً وأثقل وزناً
- تتعرض لعملية الكبريتة (sulphation) (تكون أملاح الكبريتات عليها ويمكنها أن تسبب تلف البطارية)
- تصاعد الهيدروجين قد يؤدي إلى انفجار نتيجة اختلاطه بالأكسجين ولا يحدث ذلك إلا إذا زادت نسبة الهيدروجين عن 14% في الغرفة.

لكن لها ميزات عديدة أهمها:

- جهد العمود أو الـ cell فيها عالى نسبياً (2 - 2.2 - 2.4) فولت وهذا يعتبر أعلى جهد يمكن أن نأخذه من البطاريات السائلة وبالتالي فإننا نحتاج إلى عدد قليل من الخلايا بالبطارية الواحدة.
- المقاومة الداخلية لها أقل
- يوجد بها ثبات للجهد أثناء التفريغ
- كفاءتها أعلى 60 في المئة
- أرخص في الثمن ويوجد تنوع كبير في السعات الخاصة بها من 1AH إلى أعلى من 1000AH
- لها أداء ممتاز في درجات الحرارة المرتفعة
- يمكن بسهولة معرفة حالة الشحن سواء مشحونة أو مفرغة من خلال قياس كثافة المحلول.

## 16-2-5 عيوب وميزات البطارية القلوية

يعيب هذه البطاريات:

- الجهد للعمود أو الـ cell قليل لا يتعدى 1.2 فولت
- المقاومة الداخلية للعمود أعلى من الحامضية
- أعلى في الثمن
- كثافة المحلول لا تعطى مؤشراً لحالة الشحن.

لكن أهم ميزاتها:

- الصيانة أقل
- عمرها الافتراضى أعلى
- حجمها أقل
- أكثر أماناً.

## 16-2-6 الشروط الواجب توافرها في غرفة البطاريات:

ينتج من عملية شحن البطاريات غازات متصاعدة بالغرفة أهمها وأخطرها الهيدروجين القابل للانفجار إذا زادت نسبته في الغرفة عن 14% ، لذلك يجب أن تتوفر في الغرفة ما يلي:

- التهوية الجيدة بتركيب شفاط أو أكثر يطرد الهواء من داخل الغرفة للخارج
- توضع مفاتيح الإنارة خارج الغرفة ، وإن وضعت بالداخل يجب أن تكون من النوع ضد الانفجار ( أي أنها معزولة تماما لعزل الشرارة الحادثة من التوصيل بملامسات المفتاح عند إنارة المصابيح بالغرفة لأنه من الطبيعي أنك ستضيء المصابيح بالغرفة قبل الدخول وربما ما يزال بالداخل غازات).
- الأرضية تكون من السيراميك الحراري و المقاوم للأحماض
- يجب أن يتوفر بالحجرة حوض مياه و حنفية تعمل بالضغط سواء باليد أو بالقدم و يفضل أن تعمل بالقدم و ذلك في حالة الإصابة للوجه أو اليدين بالحمض أو القلوي تذهب إلى الحوض فوراً و تضغط بالقدم على الدواسة لتخرج المياه من الحنفية (غالبا تكون حنفيتين موجهتين لأعلى و بزواية بحيث تغطي المياه الخارجة جانبي الوجه).
- الباب لا يكون خشبيا بل معدنيا و يجب أن يفتح للخارج و ذلك لسهولة الخروج بسرعة في حالة حدوث خطر .

## 16-2-7 صيانة البطاريات :

يتم فحص البطاريات بشكل دوري كل ستة أشهر للتأكد من تمام عملها وعمل الدوائر المصاحبة لها وتتم عملية الصيانة بالخطوات التالية :

- فحص واختبار السائل الإلكتروليتي للبطاريات شهريا وزيادة منسوب السائل عند انخفاضه بإضافة ماء مقطر ويتم اختبار درجة الحمضية عن طريق ميزان الكثافة ( الهيدروميتر) الذي يظهر في الصورة المجاورة
- فحص ألواح البطاريات نصف سنويا لتجنب تراكم أملاح كبريتات الرصاص التي يصعب تحليلها ونزعها من الألواح
- اختبار سعة وجهد البطاريات عن طريق قياس معدل التفريغ لها ومقارنته بسعة البطارية
- شحن البطاريات بواسطة جهاز الشحن واستبدال



البطاريات في حالة حدوث التملح الشديد

### 8-2-16 أعطال البطارية وكيفية إصلاحها :

هناك العديد من الأعطال لكن أبرز هذه الأعطال :

- تملح الألواح ، والسبب في ذلك هو التفريغ السريع أو تركها غير مشحونة بدون استخدام فترة طويلة. وتملح الألواح يعنى تكون طبقة صلبة من الكبريتات تمنع إتمام التفاعل الكيماوى .وإذا كان التملح بسيطاً فمن الممكن علاجه بشحن البطارية بتيار ضعيف يصل إلى عشر تيار الشحن العادى ثم تفريغها أيضاً بنفس المعدل أما حالات التملح الشديد فلا علاج لها.
- حدوث دوائر قصر بين الألواح ، ويحدث ذلك نتيجة للاتصال الداخلى بين الألواح الموجبة والسالبة، وعلاج ذلك يكون بغسل البطارية ثم شحنها، فإذا بقى الـ Short Circuit كما هو فعندها يجب تغييرها.
- تلف البطارية نتيجة الشحن الزائد للبطارية والذي يؤدي إلى:
  1. زيادة كبيرة في كمية الماء المستهلكة في البطارية لأن الشحن الزائد يؤدي إلى زيادة درجة حرارة السائل وبالتالي إلى سرعة تبخره.
  2. زيادة التآكسد في الألواح الموجبة مما يؤدي إلى تمدد هذه الألواح.
  3. تملح الأطراف العلوية لألواح البطارية.

## 3-16 قسم الرقابة والتحكم

قسم الرقابة و التحكم Monitoring and Control فى أى محطة يمثل العقل المدبر للمحطة ، فتستطيع من خلاله فصل وتشغيل أى عنصر من عناصر المحطة ومعرفة حالته التشغيلية. ويوجد نوعان من أنظمة التحكم فى المحطات :

- نوع فى المحطات القديمة نستعرضه سريعاً.
- ونوع ثان فى المحطات الحديثة يعرف بالـ Distribution Control Center, DCC أو Substation Automation System, SAS . وهذا ندرسه بالتفصيل.

فنظام التحكم فى المحطات القديمة والتقليدية يتمثل فى مجموعات من الخلايا تتواجد فى غرفة التحكم الرئيسية بالمحطة كما فى الشكل 3-16 :

1. المجموعة الأولى من هذه الخلايا يظهر عليها مخطط SLD لمهمات الجهد المرتفع (دوائر الدخول

على المحطة والدوائر المتجه إلى جهة الجهد العالي في المحول) وتظهر باللون الأزرق (جهد 132 ك) في الصورة والتي يتضح منها أيضا أن نظام الـ BB الخاص بهذه المحطة من النوع Double . BB



شكل 16-3 : غرفة التحكم في المحطات التقليدية

2. المجموعة الثانية من الخلايا (شكل 16-4) يظهر عليها مخطط مهمات الجهد المتوسط ، وتظهر باللون الأسود في جهد الـ 11kV . (هذه صورة للمؤلف في سنة 2005 أثناء تدريب ميداني لطلبته بالكويت)



شكل 4-16

وفي كلا الحالتين نجد داخل هذه الخلايا مجموعات من الـ Contactors والـ Bush Button متصلة بالعناصر المختلفة بالمحطة عن طريق كابلات من أجل التحكم في فصلها وتشغيلها. والدائرة الخاصة بكل Feeder في الصور السابقة مزودة بأجهزة قياس وأجهزة تحكم وأجهزة وقاية ومبينات أعطال ( فإذا حدث عطل في عنصر ما فإن مبین العطل الخاص بهذا العنصر يظهر ذلك من خلال إضاءة لمبة أو تغيير لونه) ومن هنا سميت هذه الغرفة بغرفة التحكم لأنك تستطيع أن تعرف وأنت بها حالة كل كابل دخول/خروج وهل هو موصل أم مفصول وما هو الحمل عليه ، الخ. وإمكانيات هذا النظام القديم محدودة ولا تتعدى ما ذكرناه. أما الأنظمة الحديثة في التحكم فنستعرضها في جزء لاحق.

3. المجموعة الثالثة من الخلايا الموجودة في غرفة التحكم التقليدية تضم أجهزة الوقاية الخاصة بحماية مغذيات الجهد العالي دخول / خروج بالإضافة إلى أجهزة الوقاية الخاصة بالمحول. وبعض تفاصيلها في جزء تالي بعد عرض منظومة التحكم الحديثة.

### 1-3-16 نظام الإنذار في المحطات التقليدية

وهو يتكون من خلية محلية للإنذار Local Alarm Panel تتصل بنظام الوقاية وباقي عناصر المحطة عن طريق دوائر الإنذار وهي مزودة بإشارات بيان ضوئية وبإنذار صوتي وعندما تحدث أي ظاهرة غير عادية يعمل الجهاز.

ومن الإشارات الخاصة بنظام الوقاية ما يلي:

Protection Trip	اشتغال أحد أجهزة الوقاية
Protection Fault	تعطل أحد أجهزة الوقاية
D.C Failure	انقطاع التغذية بالتيار المستمر عن أي جهاز وقاية
Protection Under Test	وضع أي جهاز وقاية على وضع اختبار
Trip Circuit Faulty	وجود خلل بدائرة القطع بأحد القواطع

وذلك إضافة إلى الكثير من إشارات الإنذار الخاصة بالمحولات والخلايا الكهربائية وكل جزء في المحطة . وعند صدور أي من هذه الإشارات فإن نظام الإنذار يعمل وتضاء الإشارة الضوئية على خلية الإنذار بالمحطة مبينة نوع الخلل والعنصر الذي به الخلل وفي نفس الوقت ترسل نفس الإشارة إلى مركز التحكم المختص عن طريق نظام الاتصالات .

#### 4-16 نظم التحكم الحديثة SAS

نظم التحكم والوقاية في محطات التحويل تطورت ومازالت تتطور بشكل مطرد خلال السنوات الأخيرة ، فقد تحولت نظم التحكم في جميع المحطات الحديثة من نظم التحكم التقليدية ( التي تعتمد على استخدام لوحات التحكم المزودة بمفاتيح يدوية Pushbuttons و Contactors متصلة بمهمات المحطة عن طريق كابلات ) إلى نظم تحكم تعتمد على نظم الاتصالات الرقمية الحديثة. وتسمى هذه النظم بالـ Substation Automation Systems (SAS).

تمثل الـ SAS عصب التحكم والوقاية لجميع مهمات المحطة ، بل ويربط المحطة بنظام التحكم الإشرافي Supervisory Control and Data Acquisition System (SCADA).

ولا يقتصر دور الـ SAS على التحكم فقط ، بل يتم ربط جميع أجهزة الوقاية الرقمية والإنذارات والإشارات والبيانات الخاصة بكل مهمة في المحطة ليتم عرضها والتحكم فيها من خلال أجهزة الحواسيب المخصصة داخل غرفة التحكم. والشكل 5-16 يبين صورة من غرفة التحكم بإحدى محطات التحويل (قارن هذه الصورة وإمكاناتها بالصورة الواردة في الجزء السابق)

وفيما يلي نعرض بشئ من التفصيل للمصطلحات ووظائف الهيكل العام لنظام الـ SAS.

### 1-4-16 وظائف نظام الـ SAS

يشتمل نظام الـ SAS (شكل 16-6) على العناصر التالية:

- جهاز التحكم والمراقبة الخاص بكل عنبر المسمى بـ Bay Control Intelligent Electronic Device (IED).
- جهاز الوقاية الخاص بكل عنبر المسمى بـ Bay Protection Intelligent Electronic Device
- نظام Software Electrical Interlocking لكل المهمات الكهربائية بداخل وحدة التحكم للعنبر.

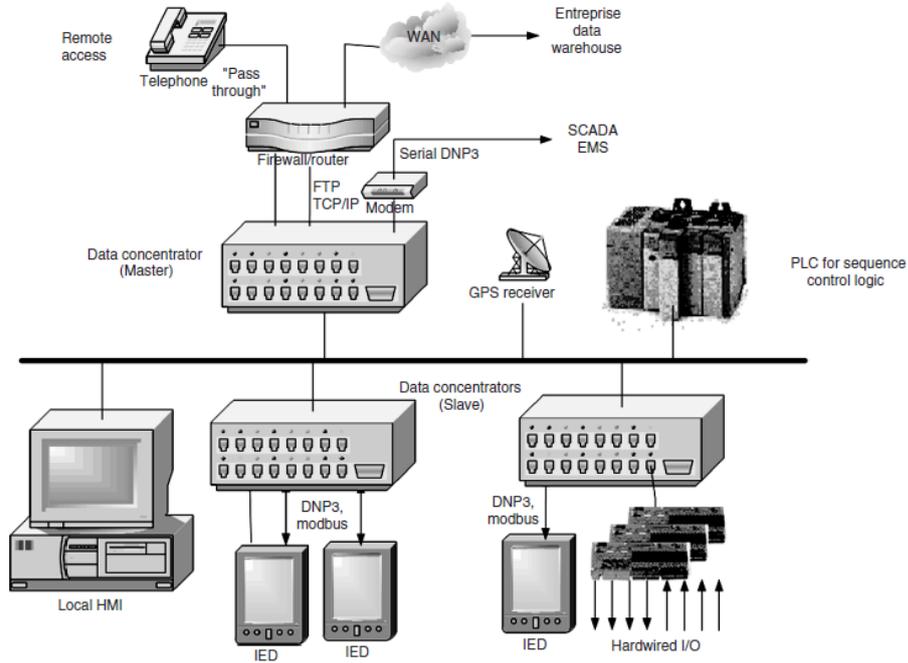


شكل 16-5 :

- أجهزة الحواسيب المخصصة للتحكم والمراقبة لجميع المهمات الكهربائية ، وهي معروفة باسم بـ Human Machine Interface (HMI). وتنقسم أجهزة الـ HMI إلى Operator's Workstation (OWS) و Engineering Workstation (EWS).
- شبكتي اتصالات (Ethernet) منفصلتين تماما تشكلا Redundant Local Area

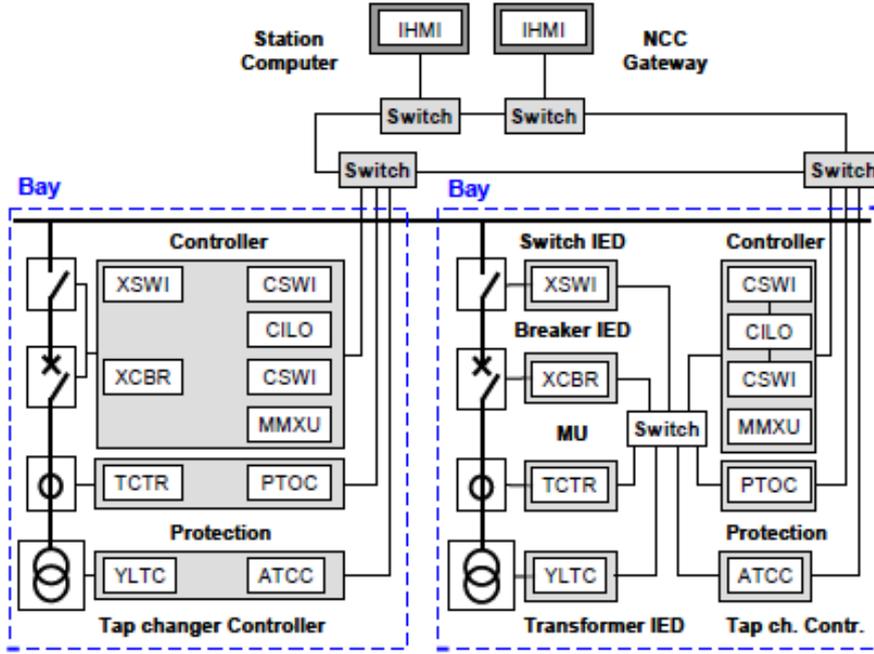
Ethernet Switches, Routers, Gateways, Network (LAN) تتكون الـ LAN من Ethernet Switches, Routers, Gateways, Optical-Fiber Cables, and Modems.

- أجهزة طرفية Terminal devices مثل الطابعات و شاشات العرض و لوحات المفاتيح وغيرها.
- نظام تزامن Global Positioning System (GPS) لربط جميع أجهزة الوقاية والتحكم بزمن موحد على مستوى الشبكة ككل.
- نظام تسجيل الأحداث التتابعي (SER) Sequential Event Recorder لتسجيل كل الأحداث والإشارات مثل فتح أو غلق أى دائرة و عمل أى جهاز من أجهزة الوقاية. ويتم طباعة هذه التقارير بشكل مستمر على طابعات مخصصة.
- نظام تسجيل الإنذارات Annunciation لتسجيل كل الإنذارات الحادثة مثل حدوث عطل فى أجهزة الوقاية أو انقطاع التغذية عنها أو حدوث أعطال وغيرها.
- أجهزة تسجيل الأعطال (TFR) Transient Fault Recorder والتي تقوم بتسجيل قيم الجهد والتيار بالإضافة إلى بعض الإشارات الرقمية الصادرة من أجهزة الوقاية بعد حدوث العطل. يتم الاحتفاظ بهذه البيانات لتحليلها بعد ذلك لمعرفة أسباب وملاسات العطل.
- تشمل أيضا نظم الـ SAS على الوسائل اللازمة لربط المحطة بالـ SCADA.



شكل 6-16 : SAS

والشكل 7-16 يمثل الشكل العام لنظام الـ SAS.



شكل 7-16 :

## 16-4-2 مقارنة بين التحكم في المحطات التقليدية والمحطات الحديثة

لنأخذ مثالا بسيطا لنبين به مدى التوفير ومقدار رفع الكفاءة وقدرة التقليل في تكاليف التشغيل والصيانة في المحطات الحديثة مقارنة بالمحطات التقليدية.

في المحطة التقليدية يكون لكل معدة كهربية سواء كانت (مغذى - محول - رابط القضبان) عدد ثلاث خلايا في مبنى التحكم للمحطة:

1- خلية وقاية

2- خلية تشغيل ومراقبة

3- خلية قياس ومراقبة

كذلك تركيب أجهزة وحدات طرفية Remote Terminal Unit RTU لتجميع المعلومات من معدات المحطة وتبادل تلك المعلومات مع مراكز التحكم، والـ RTU عبارة عن جهاز إلكتروني ذكي يمكن تركيبه في مكان بعيد لكي يعمل كنقطة نهاية للـ field contact ويستخدم زوج من الوصلات النحاسية لكي يشعر ويراقب كل contact & transducer ومنها أنواع توضع في مراكز التحكم كأجهزة إرسال واستقبال للإشارات ، و منها ما يوضع في المحطات.

أما في المحطات الحديثة فقد تجمعت كل تلك الوظائف في جهاز الوقاية الرقمي IED ، إذ أنه يؤدي مهمة الوقاية وكذلك يؤدي مهمة القياس للفولت والتيار وحسب القدرة الفعالة والقدرة غير الفعالة ويمكنه حساب أى معلومة أخرى بدلالة الجهد والتيار وزاوية الطور بينهما والزمن مثل احتساب استهلاك الطاقة. كذلك يؤدي مهام التشغيل للمعدات من فصل وتوصيل القاطع الكهربى وسكاكين التوصيل وسكاكين الأرضى.

وفى المحطات التقليدية سواء كانت AIS أو GIS فإنه يلزم كمية كبيرة من الكابلات للربط بينها وبين غرفة التحكم للمحطة ، وهذه الكابلات تستخدم لتوصيل خلايا التشغيل وخلايا المراقبة وخلايا الوقاية لكل معدة كهربية بمعدات الفصل والتوصيل ومعدات استشعار الجهد (محول الجهد) ، ومعدات استشعار التيار (محول التيار).

أما فى المحطات الذكية فالوضع يختلف تماما لسببين:

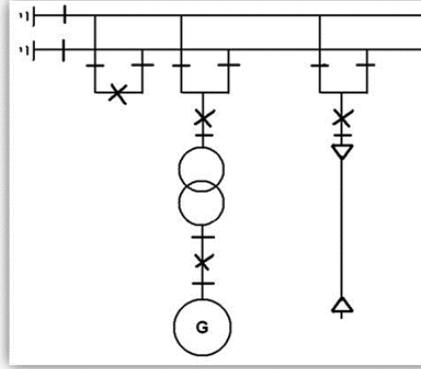
- أولاً : تركيب أجهزة الوقاية الرقمية إما فى السويتشجبر مباشرة أو فى غرفة أقرب ما تكون إليها وفى هذه الحالة فإن طول الكابلات سوف يكون قليلا جدا بالمقارنة بتوصيلها إلى غرفة التحكم.
- ثانيا : يتم توصيل ملابس مساعد auxiliary contact واحد أو اثنين على الأكثر من كل من القاطع الكهربائي وسكاكين التوصيل وسكاكين الأرضى وكذلك ثلاثة أو أربعة أسلاك توصل من الملفات الثانوية من محولات الجهد وأخرى من محولات والتيار إلى أجهزة الوقاية الرقمية مرة واحدة وفى هذه الحالة فإن كمية الكابلات سوف تكون قليلة جدا بالمقارنة بالنظام التقليدي .

وبالتالى فقد أدت نظم الـSAS إلى كثير من المميزات مقارنة بنظم التحكم التقليدية أهمها كما ذكرنا توفير عدد كبير من كابلات التحكم حيث تم استبدالها ببرامج وخوارزمات تكتب داخل أجهزة الـ IEDs. وهذا بدوره يؤدي إلى قلة احتمالية حدوث أعطال أو قطع فى شبكات كابلات التحكم داخل المحطة وبالتالي زيادة نسبة الاعتمادية لنظم التحكم والوقاية.

## 5-16 ما هي IEC 61850؟

تخيل نفسك في substation ولديك مئات القراءات التي تحتاج لمتابعة وعشرات العمليات تحتاج لترتيب خاص واحتياطات معينة قبل التنفيذ. وهذا ما نقصده بمصطلح التحكم في المحطة . وفيما يلي بعض الأمثلة للتحكم في المحطات :

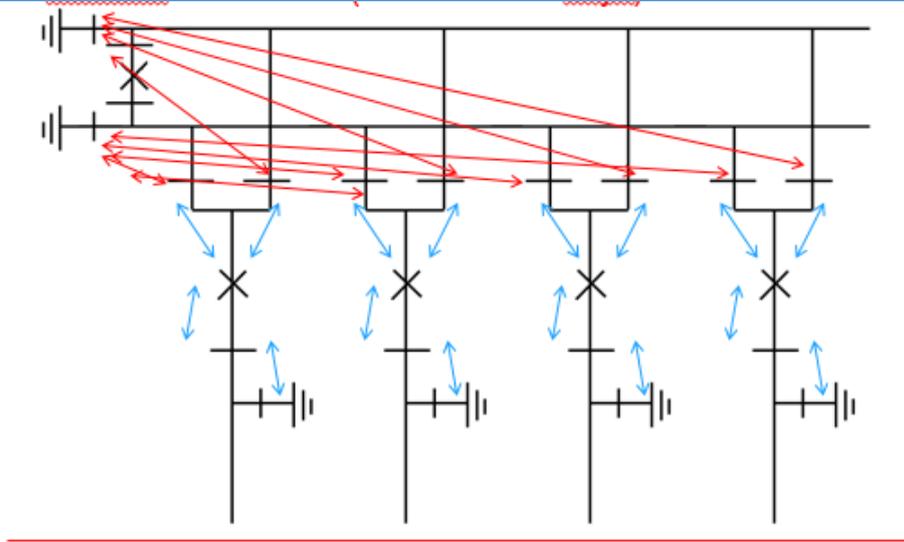
1- قبل نقل التغذية لدائرة الخروج في الشكل التالي من الـ BB العلوى إلى الـ BB السفلى هناك إجراءات مرتبة تحدثنا هنا في الجزء رقم ؟؟؟؟ من هذا الفصل.



2- هناك بالمحطة العديد من الـ Inter-Locks التي تمنع على سبيل المثال فتح السكاكين قبل فتح القواطع تجنباً لحدوث شرارة لا يمكن قطعها بين أطراف السكينة كما في الشكل.

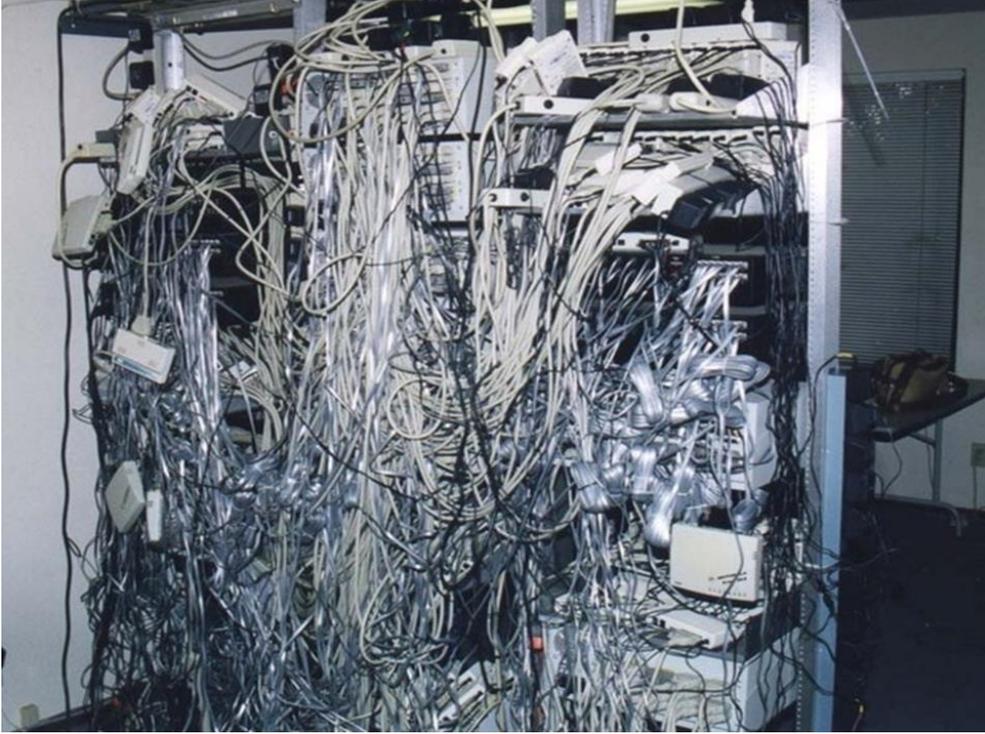


3- كما يوجد Inter-Locks تمنع توصيل مفتاح الأرضى إذا كان القاطع متصلاً وتمنع توصيل القاطع إذا كانت سكينة الأرضى موصلة. وبالطبع هذه مهمة بسيطة إذا كان الأمر متعلق بعدد محدود من المهمات لكن في الواقع يمكن أن تجد هذا الأمر شديد التعقيد بسبب كثرة المهمات كما في الشكل التالي.



في الشكل السابق - على سبيل المثال لا الحصر - يوصل من القاطع الكهربى عددا من الملامسات المساعدة (Auxiliary contacts) لخلايا التشغيل منها Contact لبيان حالة القاطع (موصل أو مفصول) ، وعدد آخر من الـ Contacts تستخدم كشرط لإمكانية توصيل أو منع التوصيل (Interlock) للقاطع الكهربى والسكاكين التي لها علاقة به ، وعدد آخر من الـ Contacts لخلايا أجهزة الوقاية اللازمة للقيام بمهمة الوقاية. ونفس العدد من الـ Contacts أو أكثر لكل سكينه توصيل وكل سكينه أرضي لنفس الوظائف ، كذلك يوصل من محولات التيار كابلات لتوصيل الملفات الثانوية إلى خلايا أجهزة الوقاية وخلايا القياس والمراقبة وأيضا كابلات لتوصيل الملفات الثانوية لمحولات الجهد إلى نفس الخلايا. كذلك يتم توصيل كابلات تخص التشغيل من غرفة التحكم لإتمام عملية التوصيل والفصل سواء العادي أو نتيجة لحدوث خطأ.

و يلاحظ أن كمية الكابلات المطلوبة هائلة حتى يمكن التشغيل والتحكم من غرفة تحكم المحطة. فهل يمكن أن يتم من خلال الـ Control room التي ستصل إليها مثل هذه الغابة من الأسلاك التحكم في المعدات من خلال أجهزة تقليدية؟



وحتى لو انتقلنا إلى جيل الإشارات الرقمية الـ Digital ، ومع استخدام أجهزة الـ Intelligent Electronic Devices, IED هل يمكن التحكم في المئات من هذه الأجهزة المصنعة من شركات مختلفة والـ Brands مختلفة؟

هل يمكن وسط هذه الغابة من الأجهزة والأسلاك والإشارات أن نتحدث عن Smart Grid وعن تواصل بين المحطات وبعضها ، خاصة وأن كل جهاز له أسلوبه في قراءة البيانات وأسلوبه في نقل المعلومات حسب الشركة المصنعة ؟

هل يمكن أن نتحدث عن Power Quality, وعن اعتمادية عالية ؟  
الطريق الوحيد لذلك حسب تقرير EPRI الذي يقول : إن الـ Reliability في الشبكة يمكن أن تتحسن بنسبة 40 % لو تحولت المحطات لتصبح Fully Automated .

لكن كيف يمكن أن يحدث ذلك في ظل وجود صعوبات أساسية في الـ Infrastructure للمحطات تصعب الوصول لهذا الحلم ، أهمها عدم وجود Standard Communication Protocols بين أجهزة المحطة الواحدة

من هنا كان الحل السحري الذي قدمته IEC . هذا الحل يضمن حدوث التواصل السليم بين أجهزة التحكم وأجهزة المراقبة وأجهزة القياس وأجهزة الوقاية وغيرها داخل المحطة الواحدة ، وبينها وبين غيرها من

المحطات تمهيدا للوصول للهدف الأسمى وهو الـ Smart Grid ، والتي يفترض فيها أن يتواصل مركز التحكم مع كافة المعدات والمفاتيح والمولدات والمحولات المصنوعة من multi-venders بلغة واحدة يفهمها الجميع من أجل الوصول لتحسين القدرة ورفع معدلات الاعتمادية.

وكلمة السر في سبيل تحقيق ذلك هي 61850!!! هذا المنتج الرائع الذي كتبه 60 عالم من عدة دول اجتمعوا ضمن اللجنة رقم 57 في منظمة الـ IEC منذ سنة 1995 ولعدة سنوات وانتجوا لنا 1200 صفحة تمثل الـ IEC 61850 .

إن IEC 61850 هو عبارة عن standard تم توصيفه خصيصا من أجل الاتصالات التي تحدث في الشبكة الكهربائية بهدف تسهيل عملية التحكم ونقل البيانات بين الأجهزة المختلفة في الشبكة الكهربائية. وفي بداية الأمر كان هذا الـ standard للاتصالات بين الأجهزة داخل نفس المحطة ، ولكنه بعد ذلك امتد للربط بين الأجهزة في محطات مختلفة ، وكذلك لربط المحطات بمركز التحكم.

والبعض قد يبسط الأمر ويعرف الـ IEC 61850 على أنها بروتوكول موحد لتنسيق عمليات التخاطب ( Digital communication بين أجهزة الـ Intelligent Electronic Devices IED المختلفة داخل محطات التحويل ، والحق أنها أكبر من ذلك. فهي مثلا ليست بروتوكول واحد بل عدة بروتوكولات ( MMS, GOOSE, SDV ) كل واحد منها يستخدم في مستوى معين من مستويات المحطة لأداء مهمة معينة كما سنرى .

وفي الواقع يمكن أن نقول أن IEC61850 عملت في ثلاث مجالات Domains عبقرية لحل مشاكل المحطات من أجل الوصول إلى Fully Automated Substations . وهذه المجالات الثلاثة هي:

- 1- تطوير ثلاث طرق للـ Communication ، وهي : MMS, GOOSE, SMV
- 2- اعتماد Object Oriented Programming بدلا من الـ Signal Oriented
- 3- تطوير أساليب Engineering and Testing

وقبل عرض المزيد من التفاصيل عن هذه المجالات الثلاثة السابقة نؤكد على معنى هام وهو أنك باستخدام الـ IEC61850 فإنه يمكنك فقط أن "تعرف معلومة" ، أي You can know a piece of Information ، ويمكن أن تعرف من أين جاءت المعلومة وماذا تحتوى وتكون واثقا Fully Trust من وصولها من المكان المطلوب للمكان السليم ، كما يمكن أن تشارك هذه المعلومة مع غيرك من الأجهزة . بمعنى أن الـ IEC 61850 مختصة بشيئين: . How to Know and How to share info. ،

ولكنها لا علاقة لها بالتنفيذ. وبالطبع يعتمد تطبيق الـ IEC 61850 على وجود Ethernet Communication قوية لأن كم هائل من المعلومات سيتم نقله عبر كابلات الفايبر بدلا من الكابلات النحاسية القديمة.

أيضا نشير إلى أن 61850 تقسم المحطة إلى ثلاثة مستويات :

1- المستوى الأول Process Level وفيه يتواجد كل المعدات , ETC, , CT, VT, CB وجميعها

من النوع الـ Intelligent التي يمكن التواصل معها من خلال كابلات الـ Ethernet وفي هذا

المستوى تنتقل الإشارات من الـ CTs and VTs إلى المستوى الثاني.

2- المستوى الثاني يسمى بالـ Bay Level ويشتمل على أجهزة الـ IEDs الخاصة بالمعدات الموجودة

في المستوى الأول (أجهزة الـ IEDs هي أجهزة رقمية تقوم بمهام الوقاية والمراقبة والتحكم بناء

على الإشارات التي أتت إليها من المستوى الأول ، والـ IEDs هي الجيل الأحدث في منظومة

الوقاية لأنها تعتمد ليس فقط على إشارات الجهد والتيار الخاصة بالمعدة المراد حمايتها ولكنها

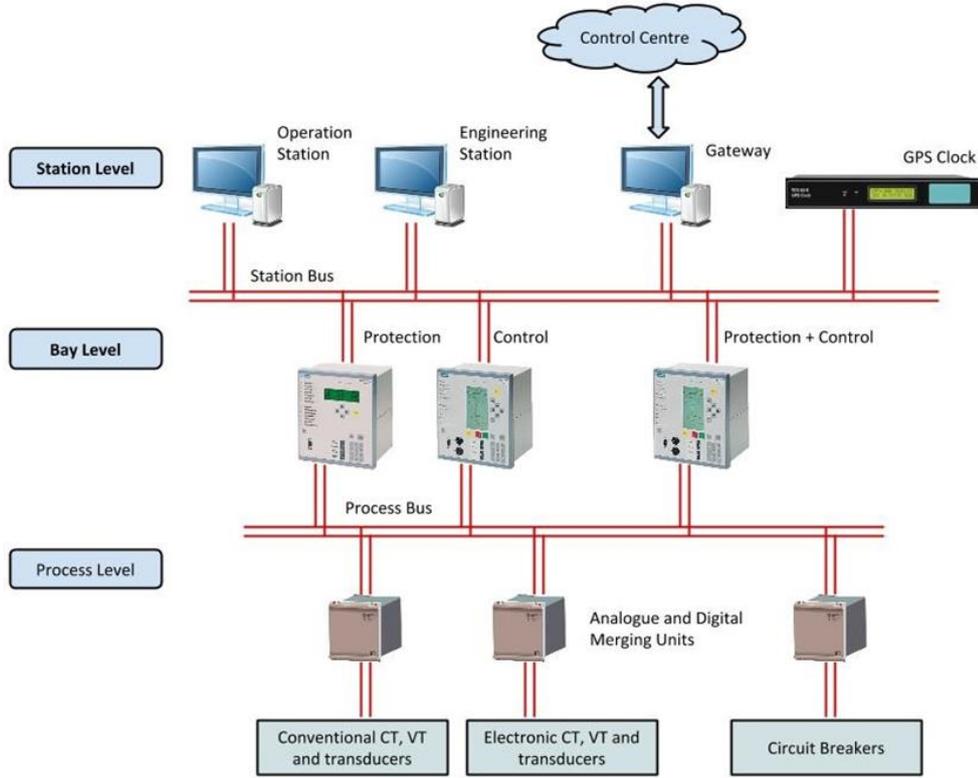
تتفاعل مع Logic and info مأخوذة من الـ Process نفسها فهي ليست مجرد جهاز وقاية

وحسب).

3- المستوى الثالث يسمى بالـ Station Level وفيه تتواجد الـ SCADA, Data acquisition,

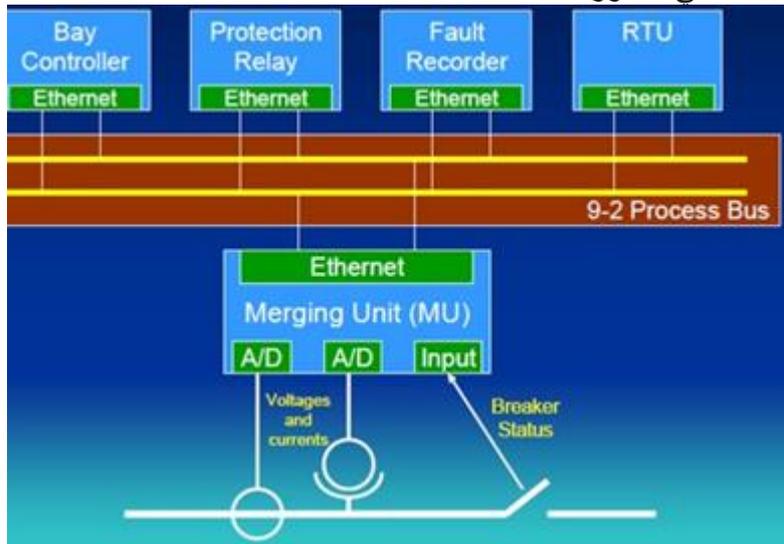
Human Machine interface, HMI وهي الأجهزة التي تستخدم في مراقبة والتحكم في

المحطة كلها.



The merging unit is the interface between the traditional analogue signals and the bay controllers and protection relays.

لاحظ أن المعدات الموجودة في المستوى الأخير قد لا تكون كلها Digital ولذا تزود بما يسمى Merging Unit كما في الصورة



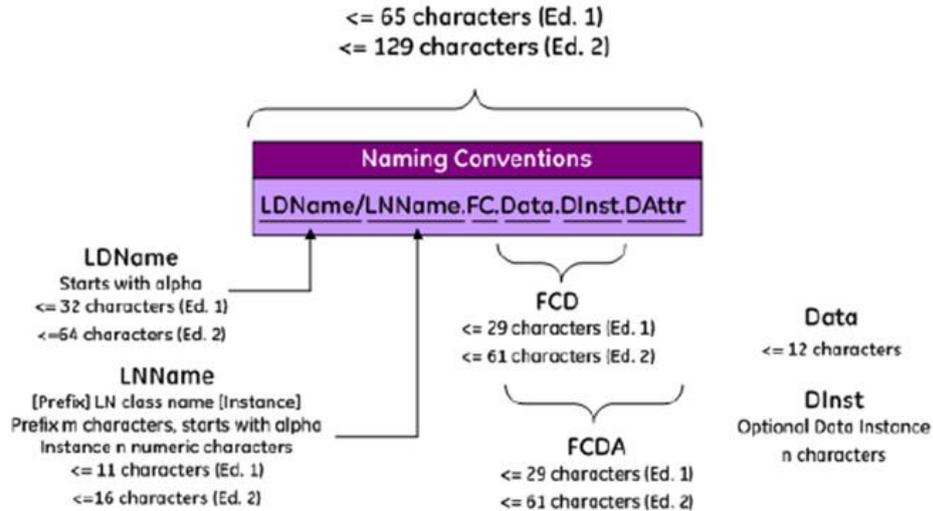
## المجال المميز الأول لـ IEC 61850

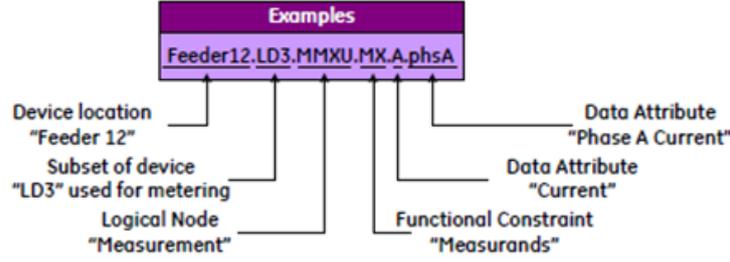
هو طريقة الـ Structure of Information ، أو

Substation Configuration Language and naming conversion ، فقديمًا كان مبدأ Signal Oriented هو المعتمد وفيه كان سلك الإشارة يأتي للتحكم وعليه Tag يقول أن هذه الإشارة من الجهاز الفلاني ، وكان هذا مقبولًا في الأنظمة الصغيرة لكن مع التوسع الكبير في عدد الإشارات (يمكن أن تصل إلى الآلاف) يصبح هذا الأسلوب مستحيلًا ، ومن هنا كان الابتكار باستخدام Object Oriented Programming ، كطريقة رائعة لتنظيم المعلومات .

وهي لغة تواصل رقمية ، لا ننقل فيها فقط المعلومة المطلوبة (قيمة التيار مثلا أو حالة المفتاح) بل يكتب ضمن بيانات الـ Data اسم الجهاز المرسل منه المعلومة ومن أي جزء فيه ووحدة القياس وقيمة القياس إلخ ، وهذه الـ Format لها أيضا Keys للتأكد من صحة وصول المعلومة ، بمعنى آخر أن المعلومة تصل رقميا ويمكن من مجرد النظر أن تعرف كافة التفاصيل المتعلقة بها طالما كنت تعرف أساسيات هذه اللغة الجديدة وهي بسيطة وغير معقدة ، علما بأن الخطوة الأولى فيها هي تحديد أسماء قياسية معتمدة لكل عنصر (مثلا المفتاح اسمه XCCB وجهاز الحماية ضد ارتفاع التيار اسمه PIOC إلخ)

والخطوة الثانية لتطبيق هذه اللغة هو تحديد الـ Nodes المختلفة بالجهاز وكل Node سيكون لها اسم (أسماء قياسية وليست عشوائية) ومن هنا أصبح من الممكن عمل برامج لقراءة آلاف المعلومات بسهولة وتنفيذ الأوامر فيها دون تدخل بشري Fully Automated بسبب هذا الأسلوب المبتكر في تسمية ونقل المعلومات . (الجهاز يقسم إلى وظائف ثم الوظائف تقسم إلى nodes ) ويقوم بهذه المهمة مهندس الـ Control Software Engineer .



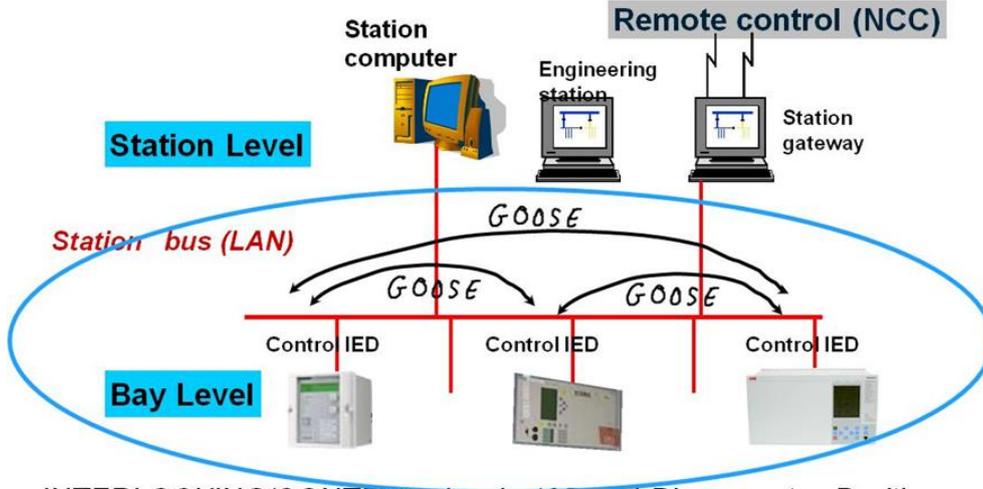


### المجال الثاني لـ IEC 61850 :

والبعض يظن أن الـ IEC 61850 مجرد communication بروتوكول وهذا خطأ رغم أن من المجال الأول من مجالاتها الثلاث التي ذكرناهم سابقا هو تقديم three communication mechanisms للتواصل بين الأجهزة بسرعة أقل من 4 مللي ثانية وبدون الحاجة لأسلاك . والواقع أن الـ IEC 61850 تقدم ثلاث وسائل للتواصل مختلفة حسب المستويات السابقة:

1- الأول يسمى الـ Manufacturing Message Specification MMS وهي تمثل mechanism التواصل بين المستويين الأول والثاني ( Station Level and Bay Level ) وبمعنى آخر التواصل بين الـ SCADA وبين الـ IEDs ، ومن خلاله تخرج التقارير وتعليمات التحكم. ويمكن من خلال هذا البروتوكول التواصل مع معدات خارج المحطة عن طريق الانترنت ولذا فكل جهاز سيكون له IP-Address خاص بهذه الشبكة.

2- الثاني يسمى Generic Object Oriented Substation Event, GOOSE ، و هو خاص بالتواصل بين ( IEDs ) في المستوى الثاني ، ومن خلاله يتم نقل إشارات GOOSE Message مثل Trip/Block/Interlock بدون الـ Hardware القديم. وهذا الـ Protocol خاص بتواصل الـ IEDs داخل المحطة فقط أي داخل الـ LAN ، ولذا يتعامل معها بواسطة MAC-Address لكل جهاز ولا يتعدى الـ Router لأنه لا يتواصل مع خارج المحطة. مع العلم بأن الـ GOOSE الواحدة يمكن أن تحمل أكثر من معلومة. وهي تنشر بطريقة Publisher/Subscribers بمعنى الجهاز الذي يصدرها ينقلها إلى كل المشتركين في نفس المستوى ثم يقوم كل واحد منهم بتنفيذ ما يخصه في هذه المعلومة (أو يهملها إذا كانت لا تخصه). وهي من النوع الـ Real time protocol فهي سريعة جدا لتناسب أجهزة الوقاية. ومن استخداماتها:



INTERLOCKING/CONTROL signals (CB and Disconnecter Positions, reservation, etc.) are sent through the station bus.

#### Horizontal communication

3- الثالث يسمى SMV (Sampled Measured Values) وهو حلقة الوصل بين الأجهزة في المستوى الثالث وبين أجهزة الـ IEDs في المستوى الثاني ومن خلال هذا الـ Mechanism و بعد أن تتحول الإشارات من Analog to Digital يتم تداول ومشاركة كافة القراءات للجهد والتيار مع بقية أجهزة الـ IEDs

وبواسطة هذه الـ Mechanisms أو البروتوكولات تصبح عمليات الـ Engineering داخل المحطة كلها Software بما في ذلك عمليات الـ Testing وهناك مجال واسع جدا للمهندسين في البحث عن أساليب متنوعة للاستفادة من هذه المعلومات.

## 6-16 منظومات الوقاية الكهربائية في المحطات

توجد داخل محطات التحويل جميع أجهزة الوقاية Protective Schemes الخاصة بحماية عناصر الشبكة الكهربائية مثل خطوط النقل والمحولات وقضبان التوزيع والـ Reactors وخلافه.

وكل عنصر من هذه العناصر له منظومة حماية تتكون من عدة أجهزة وقاية بالإضافة إلى القواطع وأجهزة الـ CT and VT الخاصة بهذا العنصر. وكل هذه المنظومة توضع داخل محطات التحويل في غرفة التحكم كما في الصورة شكل 9-16.

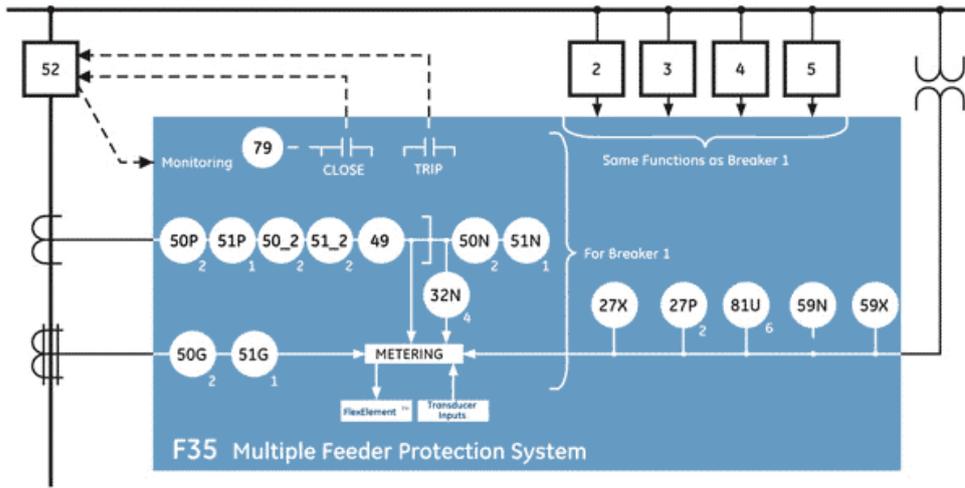


شكل 9-16 :

وفي هذا الجزء لن نشرح أداء هذه المنظومة ولن نشرح مكوناتها فهذا يمكن الرجوع إليه في كتاب نظم الحماية الكهربائية ، وسنكتفى فقط بوضع نموذجين لمخططات منظومة الوقاية لأحد المغذيات (شكل 16-10) ، ومنظومة الوقاية للمحول (شكل 16-11) ، حيث يظهر على المخطط فقط أرقام أجهزة الوقاية المستخدمة في حماية هذا العنصر . والأمثلة مأخوذة من كتالوج إحدى الشركات المصنعة لأجهزة الوقاية الرقمية.

### 16-5-1 نموذج لمنظومة حماية أحد المغذيات

The F35 feeder protection system provides feeder protection, control, monitoring and metering in an integrated, economical, and compact package.



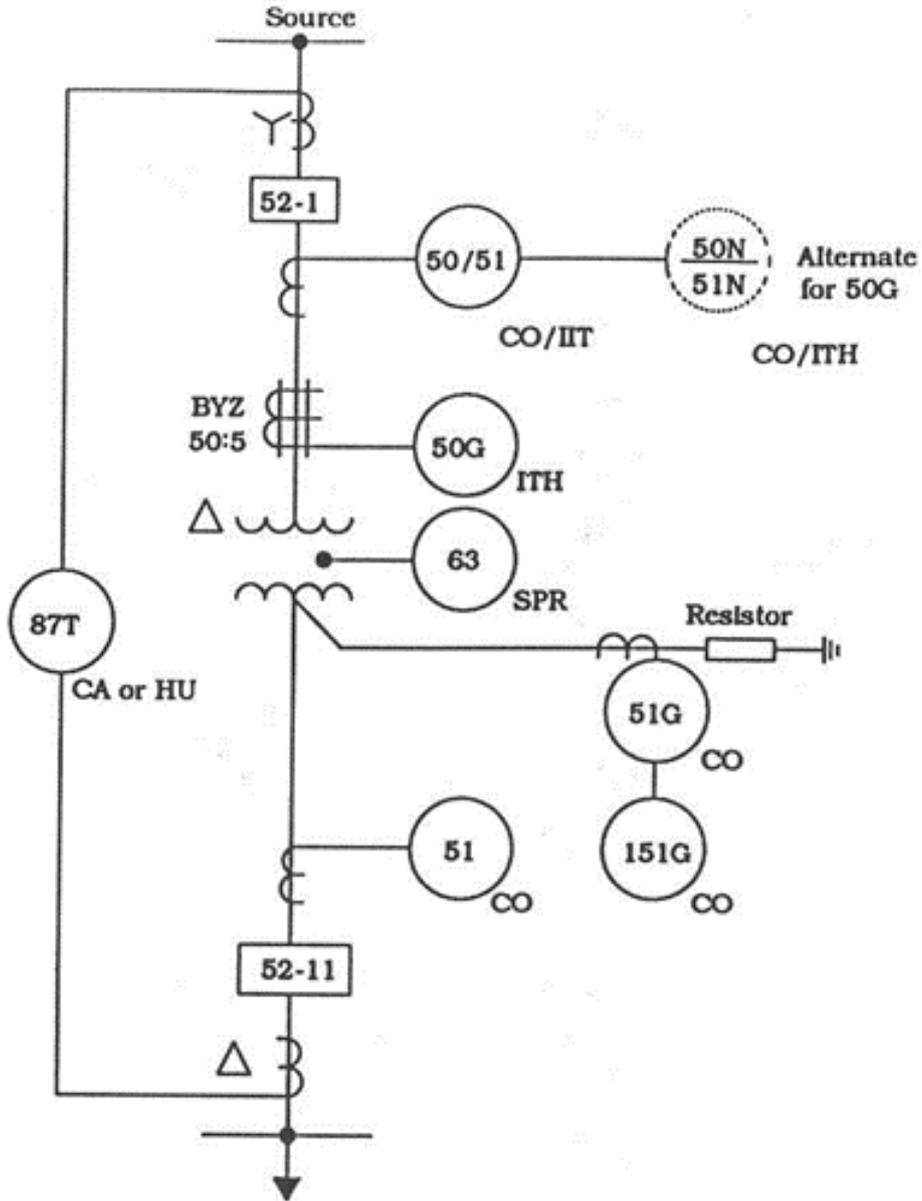
ANSI Device Numbers & Functions

Device Number	Function	Device Number	Function
27P	Phase Undervoltage	51N	Neutral Time Overcurrent
27X	Auxiliary Undervoltage	51P	Phase Time Overcurrent
32N	Wattmetric Zero Sequence Directional	51_2	Negative Sequence Time Overcurrent
49	Thermal Overload	52	AC Circuit Breaker
50G	Ground Instantaneous Overcurrent	59N	Neutral Overvoltage
50N	Neutral Instantaneous Overcurrent	59X	Auxiliary Overvoltage
50P	Phase Instantaneous Overcurrent	79	Automatic Recloser
50_2	Negative Sequence Instantaneous Overcurrent	81	Underfrequency
51G	Ground Time Overcurrent		

شكل 16-10

### 2-5-16 نموذج لمنظومة حماية المحول

The T60 transformer protection system is a comprehensive three-phase transformer relay designed to protect medium and large power transformers.



شكل 11-16:

## 6-16 قسم نظم الاتصالات بالمحطات

تعتبر الاتصالات وسيطا لنقل المعلومات والبيانات بين المحطات المختلفة وبين الـ Load Dispatch Center, LDC ، و نلاحظ أن أجهزة الاتصال جزء منها في المحطات والجزء الآخر في مركز توزيع الأحمال.

وتتقسم وسائط الاتصال المختلفة المستخدمة للربط بين المحطات إلى عدة وسائط أهمها:

### 1-6-16 الاتصال عن طريق خطوط الضغط العالي : PLC

ولكى يمكن استخدام هذه الطريقة وتسمى Power Line Carrier, PLC في نقل المعلومات لابد من توفر جهاز PLC في المحطة وآخر في المركز ، حيث يتم استقبال المعلومات المختلفة القادمة من وحدة RTU على شكل إشارات رقمية (Digital) بواسطة جهاز Modem ، وهذا الجهاز يقوم بتحويلها إلى إشارات (Analog) ذات تردد منخفض يعرف بالتردد الصوتي (Voice Frequency, VF) كمرحلة أولى ، ثم يقوم بعد ذلك بتمريرها إلى الـ PLC من خلال كارت داخل هذا الجهاز يُعدّل تردد الموجة إلى تردد متوسط (Intermediate Frequency, IF) ، ثم في المرحلة النهائية يتم تعديل تردد الموجة إلى التردد العالي (HF) المراد إرسالها عليه.

وفي الجزء الأخير من هذه العملية يتم تكبير الإشارة وإعطائها كمية من الطاقة بواسطة Power Amplifier، حتى يمكن إرسالها على خطوط الجهد العالي (500 kV أو 220 kV) الموجودة على البرج ، مع ملاحظة أنه لن يحصل تداخل بين المعلومات المتعلقة بالاتصالات وبين الطاقة المنقولة على نفس الخط وذلك لأن تردد الشبكة هو (50 هيرتز) بينما تردد الاتصالات يكون ما بين (20 إلى 500 كيلوهيرتز) .

ونلاحظ أن تعديل الموجة تم على مراحل ، وذلك لكي لا يحصل تشوه كبير في الموجة أثناء التعديل من خلال مرحلة واحدة وبالتالي لا نفقد أية معلومات.

ما أن تصل الموجات المرسله على خطوط الجهد العالي إلى محطة أخرى أو إلى مركز تحكم LDC حتى يستقبلها صائد الموجات Wave Trap حيث يعمل صائد الموجات على التقاط موجات الاتصالات من خط القوى و تمريرها إلى داخل المركز حيث يكون في استقبالها جهاز PLC الثانى الذى يعمل على تعديل تردد الموجة من التردد العالي (HF) إلى التردد المتوسط (IF) ، ثم تعديل التردد المتوسط إلى الصوتي (VF) ، ثم يقوم بتمريرها إلى جهاز Modem يقوم بإزالة تضمين الموجة وتحويلها من Analog

إلى Digital ، ومن ثم تحويلها إلى جهاز Tag Control Information, TCI الذي يقوم بمعالجتها وإرسالها إلى أجهزة الحاسب الآلي

وتتميز هذه الطريقة في نقل المعلومات بعدم وجود تمديدات وأسلاك خاصة بالاتصالات لأن النقل يتم من خلال خطوط الضغط العالي الممددة أصلاً لنقل الطاقة.

نلاحظ أن البيانات و المعلومات سواء كانت مُرسلة أو مُستقبلة يتم نقلها على نفس الخط ولكن بتردد مختلف لكي لا يحصل بينها تداخل. كما يقوم الجهاز بتشغيل قناة واحدة إذا كانت المعلومات التي يتعامل معها قليلة أو قناتين عند كثرة المعلومات.



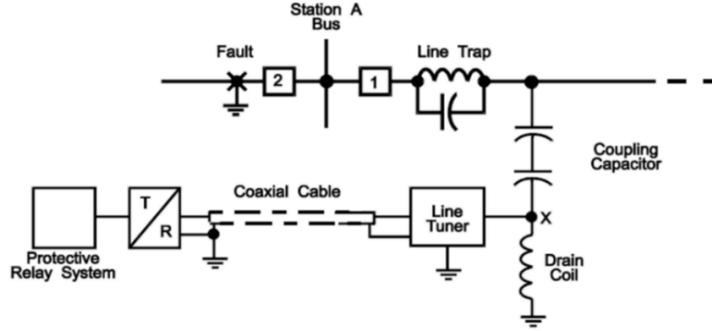
### 16-6-2 دوائر مصيدة الترددات على الخطوط Line Trap

وهذه تكون في مدخل المحطة ومن أوائل المكونات فيها ، وتكون موصلة على التوالي مع موصلات خط الدخول وهي عبارة عن Inductor بقيم تيار مقننة عالية تصل إلى 2000 أمبير وتكون ال Inductance ما بين 0.1-2 mH ، والغرض منها استقبال الإشارات القادمة من المحطات الأخرى الخارجية ، وهي عادة إشارات خاصة بأجهزة الوقاية غالباً أو إشارات من مركز التحكم بغرض فصل وتوصيل خطوط أو محولات بالمحطة فتسمح هذه الدوائر بمرور التيارات ذات التردد 50 هيرتز وتحجز الترددات العالية في دائرة أخرى متصلة بجهاز الاستقبال Receiver. وتظهر دائماً كاسطوانات معلقة كما في الشكل 16-12.

شكل 16-12:

وتوصل مصيدة الذبذبات على التوالي مع خط الضغط العالي وتوصل في الغالب على فارة واحدة فقط . ملحوظة: هذه الترددات العالية تكون بالطبع أعلى من الترددات (العالية) التي يمكن أن تتواجد في الإشارة أثناء العطل وتكون غالباً في مدى 4 إلى 11 ميغا هيرتز وهذا المدى لا يظهر في إشارات الأعطال.

وتعتمد فكرة عمل هذه المعدات على كونها (RLC circuits) و يتم ضبط Resonance Frequency للـ Line Trap بحيث تصبح معاوقتها عند الـ 50 Hz تساوى صفراً وبالتالي تقوم بإمرار تردد الشبكة - 50 Hz مع تحقيقها لمعاوقة كبيرة لمرور الترددات المرتفعة والتي تجد الـ Coupling Capacitor معاوقته صغيرة جداً فتدخل من خلاله إلى جهاز الاستقبال عبر الـ Line Tuner كما في الشكل 16-13.



شكل 16-13:

### 3-6-16 الاتصالات عن طريق Pilot Cable :

وتعرف أيضاً بالكابلات الأرضية ، وذلك لأنها عبارة عن كابلات خاصة بالاتصالات يتم تمديدها تحت الأرض بين المحطات و بين الـ LDC.

و يتم تركيب جهاز Modem في المحطات بحيث يستقبل الإشارات الرقمية القادمة من RTU ثم يقوم بتحويلها إلى Analog ، ثم منه إلى Pilot Cable الذي ينقلها بدوره إلى المركز ، حيث يستقبلها جهاز Modem آخر يقوم بتحويلها من Analog إلى Digital ومنه إلى Tag Control Information, TCI

### 4-6-16 الاتصال عبر الألياف البصرية: Fiber Optic , FO

يتم تمديد الألياف البصرية بين المحطات المختلفة و مركز توزيع الأحمال وذلك بحيث تحتوي المحطات على أجهزة خاصة بالاتصال عن طريق الألياف البصرية وتتميز هذه الطريقة في نقل المعلومات بكونها سريعة جداً وتنقل كمية كبيرة من البيانات وقليلة الأعطال نوعاً ما

و يستقبل جهاز (FO) الإشارات الرقمية من الـ RTU و من أجهزة أخرى حتى وإن كانت Analog ، ثم يقوم بتحويلها إلى إشارات ضوئية وإرسالها من خلال الألياف البصرية إلى المركز حيث يكون في استقبالها جهاز آخر يقوم بتحويل الإشارات الضوئية إلى Digital أو Analog ومن ثم نقلها إلى TCI .

**Wireless : 5-6-16 الاتصالات اللاسلكية :**

وتتكون شبكة الاتصالات اللاسلكية من عدة أجهزة أهمها:

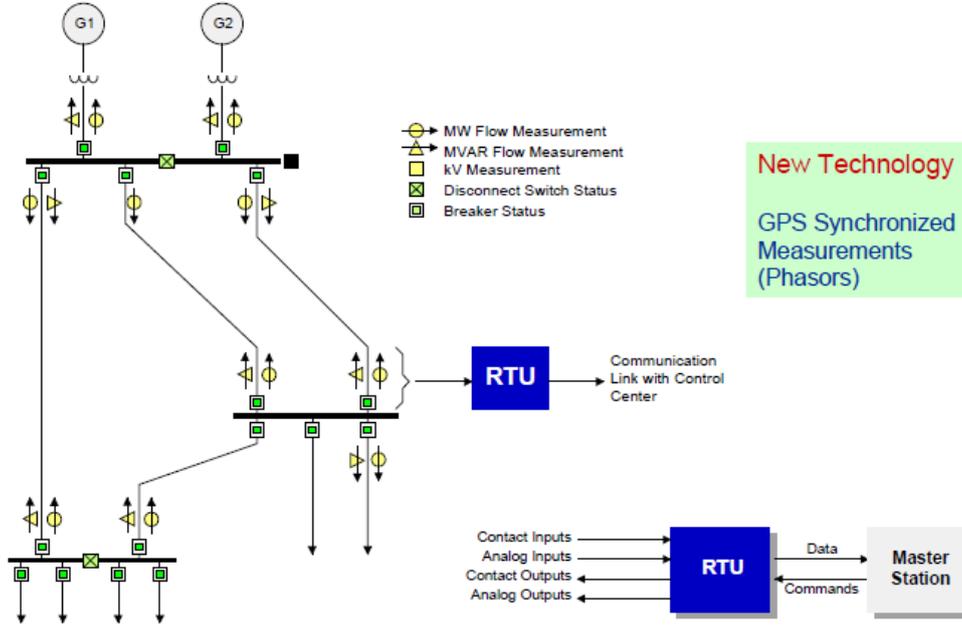
**1- الأبراج Towers**

تعتبر الأبراج ذات أهمية قصوى في أي شبكة لاسلكية فهي تحمل هوائيات الاتصال ، ويتم توزيع الأبراج بشكل مدروس لكي تشمل جميع المناطق المراد تغطيتها بالشبكة. وأهم عيوب هذه الوسيلة أن هوائيات الأبراج لا بد أن تكون في مدى الـ Line of Sight بمعنى أن ترى بعضها بعضا ، وهذا هو السبب في أن أبراج الاتصالات دائما تكون مرتفعة أو فوق مباني مرتفعة. وإلا ستضعف الإشارة ونحتاج إلى المكبرات أو الـ Repeaters .

**2- جهاز Repeater**

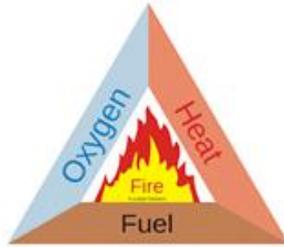
يقوم هذا الجهاز باستقبال الإشارات من الأجهزة اللاسلكية المختلفة ثم يقوم بتكبيرها ( أي تكبير ترددها ) وإعادة إرسالها مرة أخرى ، وذلك لكي تنتقل الإشارات إلى مسافات بعيدة وبالتالي يكون نطاق عمل اللاسلكي أكبر . ويتحكم الجهاز في (6) قنوات كحد أقصى ويقوم بتشغيلها وتكون هذه القنوات على ترددات مختلفة لكي لا يحصل بينها تداخل. ويتم تغذيته بتيار متردد AC ، وفي حالة انقطاع هذا المصدر توجد بطاريات DC تعمل فور انقطاع المصدر الأصلي وذلك لضمان استمرار خدمة اللاسلكي على الدوام.

نشير هنا إلى أنه عند توصيل وتمديد أحد الطرق السابقة لا يتم ذلك مباشرة من كل محطة إلى المركز بالضرورة ، بل قد يمر الخط بعدة محطات في طريقه قبل أن يصل إلى المركز حاملاً معه بيانات كل محطة على حدة لإيصالها إلى المركز أو العكس.



## 7-16 نظم الوقاية من الحريق بالمحطات

الغرض من نظام الإطفاء هو حماية العاملين والمعدات والأجهزة من الحريق . وكما نعلم فإنه لكي يحدث الاشتعال فلا بد من توافر المادة القابلة للاشتعال والحرارة والأكسجين (مثلث الحريق شكل 14-16) ، وذلك في مكان واحد وزمان واحد . ولإطفاء الحريق نحتاج لكسر ضلع واحد على الأقل من أضلاع هذا المثلث. و نظام الوقاية من الحريق الذي نحن بصدده يتضمن النظام الثابت ولا نقصد أنظمة الوقاية المحمولة (الطفايات) .



شكل 14-16

### 1-7-16 مصادر التطورة في المحطات

حدوث حريق بالمحطة غالبا يكون بسبب من الأسباب التالية:

- الكابلات هي مصدر الخطورة الأساسي في المحطات الكهربائية حيث يمثل مزيج من المواد القابلة للاشتعال ومصدر للشرارة ، حدوث خطأ في أحد الكابلات يمكن أن يسبب درجة كافية لإشعال العازل وإحداث حريق.
- ومن مصادر الخطورة أيضا الأجهزة المعزولة بالزيت كالمحول أو قاطع الدائرة في قابلية الزيت للاشتعال عند حدوث خطأ كهربائي داخل الجهاز ، كما يعتبر تسرب الماء داخل الأجهزة أو حدوث خطأ في الجسم العازل من أسباب حدوث الشرارة وحدث الحريق.
- ومن مصادر الخطورة في بعض المحطات الكهربائية مولدات الديزل وضغط الهواء لما تحتويه من مواد قابلة للاشتعال مع الشرارة.

### 16-7-2 نظرية الإطفاء

تعتمد فكرة نظرية إطفاء الحريق بمحطات المحولات على إفساد نسبة الأكسجين عند بدء الاشتعال وذلك :

- باستخدام مادة مخمدة ، مثل غاز ثاني أكسيد الكربون ، أو بخار الماء ( أو رذاذ المياه ) ، مما يقلل نسبة الأكسجين عن الحد اللازم لاستمرار الاشتعال ( حوالي 10 % ) وكذلك يسبب إزاحة الأكسجين عن الجسم المحترق . بسبب اختلاف كثافة المادة المخمدة والهواء مما يؤدي إلى توقف الاشتعال.
- أحكام إغلاق جميع الفتحات والأبواب في الغرفة التي بها الحريق ، بحيث لا يسمح بدخول الهواء إليها ، وغالبا تترك فتحات صغيرة علوية لخروج الهواء .

### 16-7-3 مكونات نظام الإطفاء الثابت:

نظام الإطفاء عبارة عن نظام يركب في المواقع المراد حمايتها ويعمل تلقائيا. ويتكون من واحد أو أكثر من الأنظمة التالية:

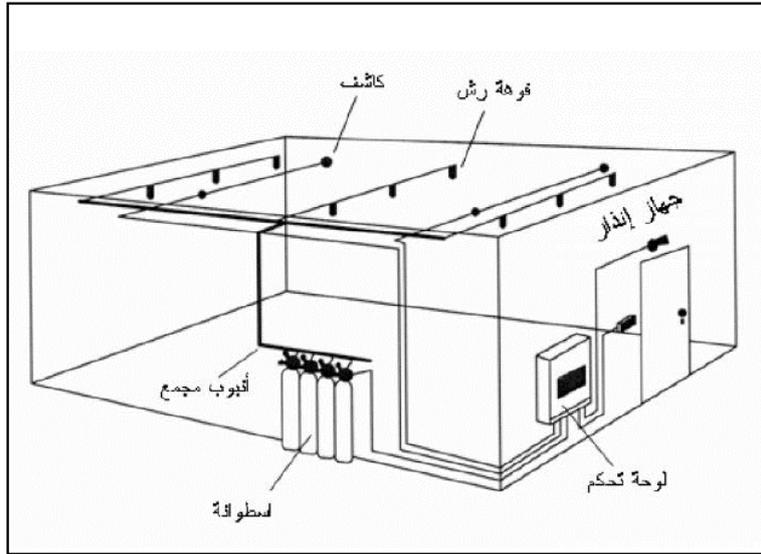
- أنظمة المرشات المائية
- أنظمة ثاني أكسيد الكربون
- أنظمة الهالون وبدائله.
- ولكل واحد منها مميزات وعيوبه.

ويتكون كل نظام إطفاء من:

- عنصر الإطفاء
- صمام التحكم
- نظام التوزيع
- أجهزة الكشف والتحكم
- صمامات الرش (sprinklers valves) أو صمامات الغمر (deluge valves) ،
- بالإضافة إلى مواسير قادرة على إيصال عنصر الإطفاء (ماء/CO2) بالشكل المطلوب والكمية المطلوبة إلى مكان الحريق كما في الشكل 15-16.

### عنصر الإطفاء :

يمكن أن يكون هذا العنصر ماء مخزن في خزان للمياه أو من أي مصدر طبيعي للماء . ويستخدم في بعض المحطات نظام ثاني أكسيد الكربون.



شكل 15-16:

### صمام التحكم :

صمامات التحكم النموذجية هي صمامات الرش (sprinklers valves) أو صمامات الغمر (Deluge valves) .

### نظام التوزيع :

يتكون من مواسير ومنافذ قادرة على إيصال عنصر الإطفاء بالشكل المطلوب والكمية المطلوبة إلى مكان

الحريق .

### أجهزة التحكم و الكشف عن الحريق :

هي عبارة عن أجهزة كهروميكانيكية مجهزة بحساسات (sensors) قادرة على اكتشاف الحريق في مراحل مبكرة جداً ، أى فى بداياته وإرسال إشارات إلى أجهزة الإنذار والتحكم تشغيل في نظام الإطفاء .

### 16-7-4 آلية الإطفاء

يتم إطفاء الحريق أما يدويا ( طفايات) أو آليا ، وسوف نتحدث في هذا الجزء عن إطفاء الحريق آليا ، حيث تعتمد الفكرة الأساسية على تركيب رؤوس مكتشفة للارتفاع في درجة الحرارة المحيطة بالمحول ، وعند وصولها إلى الحد الخطر تبدأ في إعطاء إشارة بوجود حريق ، كما تعمل في نفس الوقت على إطلاق الوسط الذي سيتم إطفاء الحريق به ، ويختلف هذا الوسط على حسب نوع تركيب المحول ، هل هو داخل المبنى أو خارجه .

فإذا كان المحول مركبا داخل المبنى يتم استخدام غاز ثاني أكسيد الكربون وهو يمتاز بأنه غاز خامل لا يساعد على الاشتعال ، ولا يشتعل وأثقل من الهواء ، كما يمكن استخدام الهالون ، وهو غاز لا يساعد على التآكل وغير موصل ، يقوم إذا ما تواجد بتركيز يبلغ حجمه 5% بإطفاء الحريق بواسطة تفاعل كيميائي ، حيث يتفاعل مع ناتج الاحتراق المسئول من انتشار اللهب بسرعة ، كما ينهي التفاعل المتسلسل للاحتراق ، ويتميز غاز الهالون بأنه أسرع فى إطفاء الحريق من غاز ثاني أكسيد الكربون .

أما إذا كان المحول مركبا خارج المبنى أو في حجرات غير مغلقة من جميع الجوانب ، فإنه يتم استخدام مياه مدفوعة تحت ضغط ، وغالبا تكون مثل الرذاذ ، فيؤدي استخدامها إلى خفض درجة حرارة المحول المشتعل عن درجة حرارة اشتعاله ، نتيجة مشاركة واقتسام المياه للحرارة المتولدة عن الحريق .

## 16-8 الأنظمة المختلفة لإطفاء الحريق

### 16-8-1 الماء تحت ضغط الهواء

في محطات المحولات نستخدم هذا النظام الشائع لحماية المواقع التي بها محولات مملوءة بالزيت ، في هذا النظام يستخدم كمية كبيرة من الماء المخزن في خزانات خاصة تحت ضغط لإطفاء الحريق وهذا الماء يدفع إلى الـ Sprinklers بمساعدة الهواء المضغوط . أيضا يستخدم الهواء المضغوط للكشف عن الحرائق وللتحكم في خروج الماء إلى المكان الذي به الحريق .

من مميزات هذا النظام أنه من السهل إعادته إلى الخدمة بسرعة بعد إطفاء الحريق وأيضا رخص ثمن المادة المستخدمة في الإطفاء وهي (الماء) .

ومن عيوب هذا النظام تعرض الخزان للصدأ . وفي حالة عدم إخماد الحريق واستنفاد كمية الماء الموجودة في الخزان فإن الهواء المندفع من النظام يساعد على زيادة الحريق .

### 16-8-2 نظام ثاني أكسيد الكربون

نظام مكافحة الحريق باستخدام غاز ثاني أكسيد الكربون ذو تأثير فعال في إطفاء الحرائق دون ترك آثار ضارة بالمعدات الموجودة. يتميز غاز ثاني أكسيد الكربون أنه لا يشتعل ولا يساعد على الاشتعال ، وأنه أثقل من الهواء بحوالي مرة ونصف ، فيتراكم على سطح المواد المشتعلة مانعا وصول أكسجين الهواء لمصدر النار. وحيث أن درجة حرارة غاز CO2 منخفضة جدا ، وبالتالي فإنه يعمل على تبريد المادة المشتعلة

كمية الغاز المستخدمة لإطفاء الحريق تعتمد على حجم المكان أو الحجرة الموجود بها المحول ، فيحتاج كل متر مكعب إلى 2كجم من غاز ثاني أكسيد الكربون.

ويخزن ثاني أكسيد الكربون في أسطوانات مضغوطة كما في الشكل ، وتستخدم اسطوانة صغيرة من ثاني أكسيد الكربون لنتحكم في تمرير ثاني أكسيد الكربون من الاسطوانات الكبيرة.

من عيوب هذا النظام في حالة حدوث تسريب للغاز داخل الحجرة فيمكن أن يؤدي ذلك إلى حدوث اختناق للأفراد .



**ملحوظة:**

عند تفرغ غاز  $CO_2$  يجب أن تغلق جميع الأبواب و الشبابيك ولكن تترك فتحات في أعلى الحجرة لخروج الهواء كما يجب تشغيل إنذار صوتي (يعمل أوتوماتيكيا عند حدوث الحريق) لتنبيه العاملين بحدوث حريق .

يلاحظ أنه يوجد تأخير زمني ( من 1-24 ثانية) من لحظة تشغيل الإنذار ، وحتى انطلاق الغاز لكي يمكن إخلاء المكان من الأشخاص وغلق الأبواب . وبعد انتهاء إطفاء الحريق يجب مراعاة عدم دخول غرفة المحول قبل عمل التهوية الكافية .

**16-8-3 نظام الماء تحت ضغط ثاني أكسيد الكربون**

هذا النظام يشبه نظام الماء تحت ضغط الهواء ولكن تم استبدال الهواء المضغوط بثاني أكسيد الكربون لدفع الماء من الخزان خلال المواسير إلى الرشاشات الرزازيه . وغاز ثاني أكسيد الكربون المستخدم يخزن في أسطوانتين أو أكثر ، ويستخدم نظامان للكشف عن الحريق ، ولكي يمر الغاز من الاسطوانة الكبيرة ويخرج الماء لابد من أن يعمل كلا من نظامي الكشف معا وفي حالة عدم شعور أحدهما بالحريق فلن يعمل النظام.

من مميزات هذا النظام عدم صدأ الخزان ، وإذا لم تتم عملية الإطفاء بعد انتهاء كمية الماء فإن الغاز الذي يخرج بعد الماء لا يزيد من الاشتعال كما في حالة الهواء .

لكن من عيوب هذا النظام أنه في حالة عدم وجود أسطوانات احتياطية أو استبدال الأسطوانات الفارغة بسرعة بعد عملية التشغيل سوف يكون المكان المراد حمايته بدون حماية بالإضافة إلى أن غاز ثاني أكسيد الكربون غالي الثمن.

**16-8-4 نظام الإطفاء برشاشات الماء لحماية المحول:**

توضع الرشاشات حول المحول (شكل 16-16) وهذه الرشاشات مثبتة على مجموعة من المواسير تحيط بالمحول الأمر الذي يجعل الماء الخارج منها يغمر المحول من جميع الجوانب وعندما يشعر الحساس بحرارة الحريق فإن مفتاح الضغط يرسل إشارة ليعمل جهاز الإنذار بغرفة التحكم . وفي نفس الوقت يتم فتح صمام التحكم عن بعد آليا خلال ثواني ويبدأ في إطفاء الحريق .



شكل 16-16

وبما أن الماء أهم عامل مؤثر في عملية الحريق لذلك فإن الماء لا بد أن يكون مجهزا طوال الوقت بالكمية المناسبة وبالضغط المناسب . لذلك لا نستطيع أن نضع نظام وقاية الحريق على مصدر المياه التابع لمرفق مياه المدينة ، ولكن يجب وجود خزان مياه كبير مملوء بالماء ومزود بضغوط هواء (يصل ضغط الهواء من 10-15 بار داخل خزان المياه ) وذلك من أجل أن يخرج الماء على شكل غمامة فيساهم أيضا في خنق الحريق).

## 9-16 ملحق تعليمات التشغيل محطات المحولات

فيما يلي نموذج من إحدى محطات التحويل 11/66 ك ف بمصر تشتمل على التعليمات الموجهة للسادة رؤساء محطات المحولات والسادة فنيي المحطات للتشغيل

( النموذج المقدم لتنسيق العمل بين تحكم طلخا (تحكم إقليمي رئيسي) وتحكم شركة التوزيع):

- اتباع تعليمات الأمن الصناعي أثناء فصل المحطة بالكامل وأثناء ظروف التشغيل العادية وكذلك فصل أي مهمة من مهمات المحطة جهد 220 kV - جهد 66 kV - جهد 11 kV وأثناء ظروف التشغيل العادية
- أثناء تنفيذ المناورة وعند حدوث أي عطل يجب الرجوع للتحكم والإبلاغ عن ذلك مع إخطاره بالخطوة التي حدث بها العطل سواء كان أثناء التنفيذ بخاصية الريموت أو خاصية المحلي أو خاصية اليدوي.

- ضرورة اتباع تعليمات التشغيل الخاصة بمناورات الفصل والتوصيل للدوائر جهد -220 kV
  - 66 kV على أن تراعى النقاط التالية وإدراجها بالخطوات التنفيذية لاستمارة المناورة:
    - يتم فصل القواطع من الجهتين والتحقق من تمام الفصل بالطرق الآتية:
    - إشارات أوضاع الاشتغال بالقواطع.
    - اختفاء التيارات على الثلاثة أوجه.
    - اختفاء الجهود على الثلاثة أوجه للقراءات الوجهي والأرضي.
    - يتم استكمال فصل السكاكين من الجهتين للخطوط والقضبان.
    - الـ Earthing للدائرة في حالات أعمال الصيانة عليها.
    - التأكيد على استقلالية خطوة الأرضي عند عمل مناورات.
- عند انسحاب الجهد من المحطة تلقائياً يتم عمل الآتي مباشرة :**

1. فصل المغذيات جهد 11 kV
2. فصل المفتاح الرئيسي للمحولات الرئيسية جهد 66/11 kV من جهة 11 kV.
3. فصل المفتاح الرئيسي للمحولات الرئيسية جهد 66/11 kV من جهة 66 kV.
4. خفض مغير الجهد كتعليمات مهندس وريدي التحكم
5. إبلاغ مهندس وريدي التحكم بذلك وانتظار التعليمات.

**عند عودة الجهد يتم الآتي:**

1. توصيل المفتاح الرئيسي للمحولات من جهة 66 kV
2. توصيل المفتاح الرئيسي للمحولات من جهة 11 kV .
3. توصيل المغذيات من جهة 11 kV بالتنسيق مع مهندس تحكم طلخا و تحكم التوزيع.
4. تعديل نقطة مغير الجهد حسب النقطة المتفق عليها سابقاً
5. الاهتمام بتسجيل العلامات بدقة عند خروج أي مهمة ( خط - محول - مغذي ) وإبلاغها مباشرة.
6. الإبلاغ بالقراءات الصحيحة لأي من مهمات المحطة.
7. الاهتمام بوسائل الاتصال ( اللاسلكي أو التليفون ) والتأكد من أنهم في حالة جيدة.
8. الاهتمام بالتيار المستمر من ناحية البطاريات أو الشواحن.
9. الاهتمام بكيفية قراءة الأجهزة وخاصة جهاز معامل القدرة سواء مباشر أو غير مباشر.
10. مراقبة درجة حرارة الملفات والزيت للمحولات جهد 66/11 kV والتأكد من سلامة تشغيل المراوح.
11. عند اشتغال الجهاز التسرب الأرضي المقيد Restricted earth fault تكون منطقة العطل

## على المحول من جهة 11 kV

نموذج للعلاقة بين مركز تحكم رئيسي وبين تحكم شركة توزيع :

وسنعرض هنا نموذج لتنسيق العمل بين تحكم طلخا (تحكم إقليمي رئيسي) وتحكم شركة التوزيع :

- في حالة حدوث أعطال على المغذيات جهد 11 kV والخارجة من محطات المحولات وحدوث فصل تلقائي للمغذي بأي جهاز وقاية يتم التعامل بين مراقب الوردية بمحطات المحولات ومهندس الوردية بتحكم التوزيع مباشرة، وفي فترة الذروة المسائية عند حدوث أي طوارئ يتم الرجوع إلى تحكم طلخا.
- مناورات الفصل - التوصيل الخاصة ببرنامج الصيانة - الاختبارات الدورية - والطوارئ للمغذيات الخارجة من محطات المحولات مناورة الفصل والتوصيل تتم بين مراقب الوردية بمحطة المحولات ومهندس الوردية بتحكم شركة التوزيع والمسئول عن طلب الفصل والتوصيل هو مهندس الوردية بتحكم التوزيع فقط.
- انسحاب التيار عن لوحات التوزيع والمغذيات الهوائية جهد 11 kV التعامل بين مهندس وردية تحكم وسط الدلتا بطلخا مع مراقب الوردية وأخطار تحكم التوزيع بالوضع والاتفاق معاً على كيفية إرجاع الوضع العادي.
- عند طلب تخفيف أحمال لظروف طارئة بالشبكة التعامل بين تحكم وسط الدلتا بطلخا ومراقب الوردية في المحطات مباشرة ويخطر مهندس وردية تحكم طلخا بالوضع مهندس تحكم شركة التوزيع .
- عند طلب رفع الجهد في منطقة معينة بشبكة جهد 11 kV التعامل بين مهندس شركة التوزيع وتحكم وسط الدلتا بطلخا على أن تكون التعليمات الصادرة لمراقب وردية المحطة من مهندس تحكم طلخا فقط.
- دراسة الأحمال على المغذيات واللوحات وتبادل الطاقة في الشبكة يتم التعامل بين مهندس الوردية في كلا من تحكم التوزيع والتحكم الإقليمي.

□

□

□

# الباب الرابع

## توزيع القوى الكهربائية

## 17

## ملامح تخطيط شبكات التوزيع

يُطلق مصطلح "منظومة التوزيع الكهربائية" على كلاً من شبكتي الجهد المتوسط والجهد المنخفض . فأما قيم الجهد المتوسط فهي : 33 kV - 22 kV - 11 kV - 6.6 kV - 3.3 kV ، وأما قيمة الجهد المنخفض فهو 400 V في معظم الدول ، و في أمريكا فهي 220 V ( Line Voltage ) .

و منظومة التوزيع للجهد المتوسط يقصد بها شبكة المغذيات الأولية

"PRIMARY DISTRIBUTION" ، و هي التي تنقل القدرة من المحطات الرئيسية جهد 66 kV/11 kV مثلاً إلى ( الموزعات ) ، ثم من الموزعات إلى محولات التوزيع المنتشرة داخل الأماكن السكنية. وتتضمن منظومة التوزيع العناصر التالية:

- لوحات توزيع الجهد المتوسط (الموزع) وهي أول نقطة في شبكة توزيع الجهد المتوسط وتستقبل كابلات المغذيات من محطات التحويل الرئيسية.
- خطوط الجهد المتوسط التي تخرج من الموزعات إلى المحولات وتشمل خطوط هوائية أو كابلات أرضية أو الإثنيين معاً.
- أكشاك سكاكين شبكة الجهد المتوسط للمساهمة في عمل مناورات تغيير الخطوط.
- لوحات الـ RMU وهي وحدة الربط بين المحول وبين بقية المحولات في الشبكة من جهة الجهد المتوسط .
- محولات التوزيع وهي آخر عناصر شبكة الجهد المتوسط ، وبعدها تبدأ شبكة الجهد المنخفض.

وأما الجزء الثاني من منظومة التوزيع فيشمل اللوحات والكابلات الموجودة في جهة الجهد المنخفض من محول التوزيع. وهذا الجزء تم تغطيته في كتابي المرجع في التركيبات الكهربائية لذا فلن نتعرض له هنا.

## 1-17 متطلبات مهندس تخطيط الأحمال

و كل من يتعامل مع تخطيط شبكات التوزيع لابد له أن يكون قادراً على رؤية الصورة الكاملة لمنظومة التوزيع ، كما يجب أن يتعرف على ملامح تخطيط هذه المنظومة ، وخطوات إنشائها ، وأدوات تنفيذ ذلك ، ومعرفة عناصرها ، وأن يكون متمكناً كذلك من بعض الأدوات والبرامج التي تساعده في عملية التخطيط. ويمكن أن نوجز أهم هذه المفاهيم والأدوات الأساسية التي يجب أن يلم بها أى دارس لشبكات التوزيع فى الخمس نقاط التالية:

### 1-1-17 معرفة وتحقيق الأهداف الأساسية لعملية تخطيط الشبكات:

كل مصمم أو مخطط لمنظومة التوزيع يجب عليه تحقيق الأهداف التالية فى تصميمه :

تحديد مواقع وأحجام المحولات "TRANSFORMER" ، و الـ C.B ، و الـ Switches ، و الـ Feeders .

- تحقيق الأمان "Electric Safety" خاصة أن هذه الشبكة هى الأقرب للمستهلكين.
- تحقيق البساطة فى التصميم لاسيما فى الدول النامية التى لا تتوفر فيها مستوى عالٍ من التعليم .
- تقليل القدرة المفقودة "Power Losses" فى الشبكات .
- تحسين قيم الجهود "Voltage Profile" عند الأماكن المختلفة بتقليل الـ Voltage Drop .
- دراسة لخطه وضع (المكثفات و منظمات الجهد) كمحسنات للجهد و وسائل لتقليل الـ Losses ومن ثم إضافتهم لخطه التوزيع للشبكة ، وعمل دراسة عن أفضل الأماكن لهم وكيفية تقليل عددهم .
- استخدام "DGs" Distributed Generators و استخدام الـ Cross Connection "CCs" كمحسنات للاعتمادية ( "CCs" هى أجهزة تقوم بتوصيل الـ Feeders ببعضها حيث يمكن تغذية الحمل من Feeder آخر إذا حدث Fault بالـ Feeder الأساسى) . ثم أخذهم فى الاعتبار عند التخطيط لشبكة التوزيع . وعمل دراسة عن أفضل الأماكن لهم وكيفية تقليل عددهم .

- رفع قيمة معاملات الاعتمادية "Reliability Index" ، ( و خاصة فى الأحمال الإستراتيجية والأكثر أهمية مثل أحمال المستشفيات ) مع العلم أن رفع مستوى اعتمادية مصدر التغذية بدرجة كبيرة يعنى تكلفة ضخمة ، ولذا يكون غالباً هناك نوع من الموازنة بين ضمان استمرارية التغذية وبين التكلفة .
- تحقيق المواصفات القياسية الوطنية المتعلقة بتصميم الشبكات لضمان تماثل أجزاء الشبكة وتسهيل عمليات الصيانة وتوفير قطع الغيار ، فالاستعانة بشركات أجنبية متعددة فى مشروعات مختلفة يمكن أن يترتب عليه شبكات توزيع غير متناسقة فى البلد الواحد بسبب اختلاف المواصفات التى تتبعها كل شركة مع الأخذ فى الاعتبار أن تحقيق هذه الأهداف ليس بالأمر الهين ، فبعض هذه الأهداف متعارض .

وهناك أيضاً بعض المحددات التى يجب أن تؤخذ فى الاعتبار لضمان تحقيق الأهداف ومنها:

- الميزانية المتاحة للتكلفة .
- الموقع الجغرافى للحمل : وهذا يؤثر على موقع المحطة بعدها أو قربها من الحمل كما يؤثر على قيمة المفاقد "losses" .
- أحجام المحولات والمساحة المتاحة للمعدات .
- التوسعات المستقبلية .

### 17-1-2 القدرة على عمل الدراسات الخاصة بالأحمال Load Studies:

أى دارس لمنظومة التوزيع يجب عليه أن يكون مجيداً لمجموعة دراسات تتعلق بالأحمال، وتعتبر أدوات هامة فى التصميم وهى :

1. حسابات تقدير الأحمال "Load Estimation" .
2. تقدير الأحمال المستقبلية "Load Forecasting" .
3. دراسة خصائص الأحمال "Load Characteristics" .

وتحت هذا البند يجب أن يلم الدارس أيضاً بطبيعة الأحمال التى تغذيها شبكة التوزيع ، وهى ثلاثة أنواع:

1. أحمال سكنية سواء فى المدن أو القرى .
2. أحمال خدمات (شوارع - مطارات مبانى حكومية - مولات تجارية) .
3. أحمال صناعية (الورش والمصانع الصغيرة والكبيرة) .

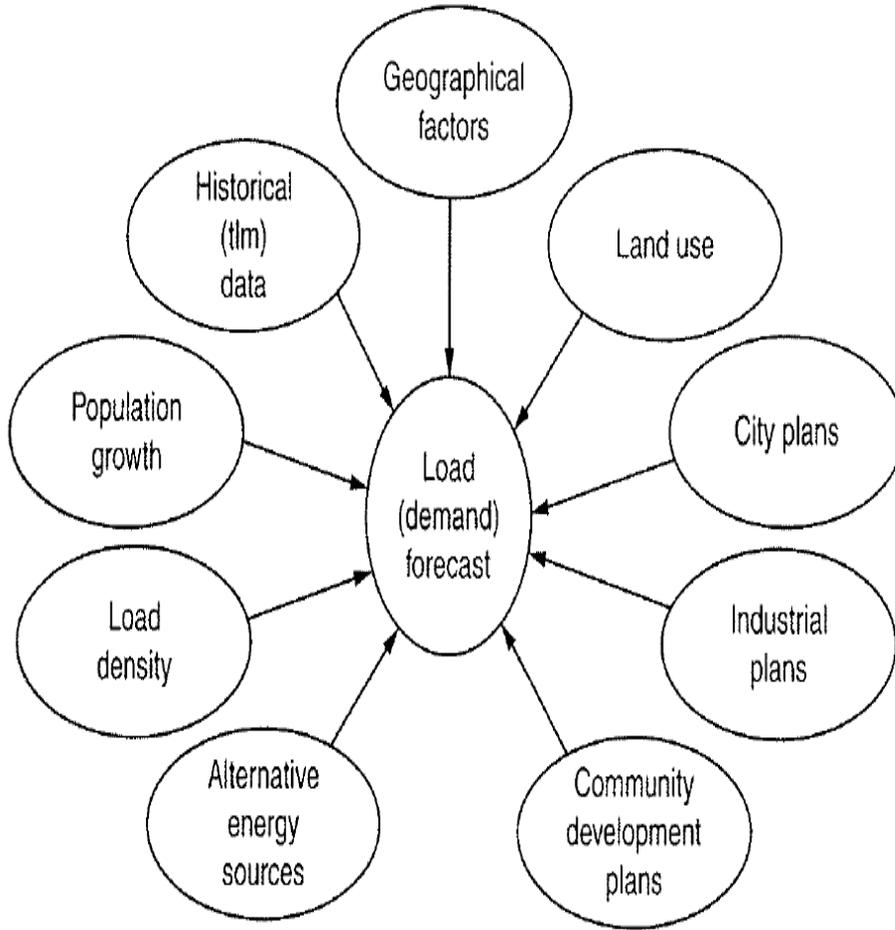
و الاختلاف الأساسي بين هذه الأحمال يكمن في طريقة حساب معاملات تقدير الأحمال مثل معامل الطلب "Demand Factor" الذي يستخدم لتحديد نسبة تزامن تشغيل أحمال من نفس النوع ( دائماً أقل من الواحد الصحيح ) ، و معامل تباين الأحمال "Diversity Factor" الذي يستخدم لتحديد نسبة تباعد تشغيل الأحمال ذات النواعيات المختلفة ( دائماً أكبر من الواحد الصحيح ) ، كما أن هناك أموراً أخرى تؤخذ في الاعتبار مثل تيار البدء للمحركات الكبيرة في الورش أو المصانع .

و أحياناً تغذى شبكة التوزيع الواحدة مزيجاً من الأحمال الثلاثة ، ماعدا المصانع الكبيرة فدائماً يكون لها شبكة توزيع مستقلة .

أما حسابات الحمل المتوقع "Load Forecasting" فهي تعتمد على عوامل كثيرة ملخصها في الشكل 1-17 ويعد توقع الحمل "Load Forecasting" من الخطوات المهمة في تحديد عملية التشغيل والتخطيط للشبكة ، حيث أنه يكون من أوائل الخطوات بالإضافة لكونه العامل الرئيسي في تحديد حجم المحول .

وينقسم الـ Load Forecasting تبعاً للمدة إلى ثلاثة أقسام :

1. Short term load forecasting: up to 1 day.
2. Medium term load forecasting: from 1 day to 1 year.
3. Long term load forecasting: from 1 year to 10 years.



شكل 1-17

### 3-1-17 القدرة على توصيف عناصر شبكات التوزيع :

من الأمور الهامة لأي دارس لمنظومات التوزيع أن يكون ملماً بطبيعة ومواصفات المعدات الأساسية التي سيستخدمها لتنفيذ شبكة التوزيع وأهم المعدات في شبكة الجهد المتوسط التي يجب أن يعرف مواصفاتها هي :

- الموزعات "Distributors" .
- المحولات بأنواعها .
- لوحات الربط الحلقى Ring Main Unit .

- كابلات الجهد المتوسط : توصيفها وتفصيل طبقاتها .
  - عناصر شبكات الجهد المتوسط الهوائية (العوازل — السكاكين — ... إلخ) .
  - عناصر شبكة الجهد المنخفض (كابلات ، قواطع ، لوحات توزيع ، ATS ، UPS ، مولدات الديزل ، ... إلخ) .
  - عناصر منظومة التحكم والمراقبة في الشبكة (RTU ، SCADA ، ... إلخ) .
- ويجب على مهندس التوزيع أن يكون خبيراً بأنواع ومواصفات كل عنصر من العناصر السابقة.

#### 4-1-17 : معرفة البدائل المتاحة في عملية تصميم الشبكات

تخطيط شبكات التوزيع يتضمن بدائل متعددة و اختبارات كثيرة للبند الواحد ، وسيكون على المهندس أن يتخذ قرارات باختبارات معينة من ضمن هذه البدائل المتاحة ولذلك يجب أولاً أن يكون ملماً بهذه البدائل وميزات وعيوب كل بديل. ومن أمثلة البدائل المتعددة التي سيواجهها المهندس مايلي:

- نوع أسلوب التوزيع Radial / Ring .
- نوع الشبكة Over Head / Cables .
- نوع المحولات جافة / زيتية "Oil/Dry" .
- مستوى جهد التغذية 11kV / 22 kV .
- نوع المحطة AIS / GIS .
- نوع أجهزة الوقاية CB / Fuse .
- كابلات أم Bus Duct .
- نظام الـ BB وهل هو Single / Double / ...etc .
- طرق تحسين الجهد Voltage regulators / Capacitors / Tap changer .
- هل نستخدم الـ Distributed Generation أم لا ، وما أنسب مكان / حجم / نوع.

#### 5-1-17 القدرة على عمل الدراسات المطلوبة لعملية التخطيط

والغرض من هذه الدراسات والحسابات التي يحتاجها مهندس التوزيع هو التأكد من صحة التصميم ومنها:

- حسابات الـ Short Circuit Studies .
- حسابات الهبوط في الجهد Voltage Drop .
- حسابات التحمل الحرارى للكابلات Thermal capacity .
- تنسيق أجهزة الوقاية Relay Coordination .

- حسابات سريان القدرة Load flow Study .
- حسابات وقياسات التوافقيات Harmonics Studies .

وكل هذه الدراسات يمكن أن تتم باستخدام برامج جاهزة مثل برنامج ETAP أو برنامج EasyPower وغيرهما (توجد نبذة عن هذه البرامج والفروق بينها في نهاية الباب) وبعض هذه البرامج متاح مجاناً على الإنترنت ، وعلى كل دارس لشبكات التوزيع أن يكون محترفاً على الأقل في واحد من هذه البرامج .

## 2-17 استخدام الـ OPTIMIZATION TECHNIQUES

تبدأ عملية التخطيط الفعلي لشبكات التوزيع بعد إنتهاء الدراسات الأولية بتحديد أماكن المحولات وقدراتها. وبناء على أماكن المحولات فإننا نحدد طريق الـ Feeders الخاصة بالجهد المتوسط و الجهد المنخفض . وبالطبع فنحن نحتاج إلى طريقة سريعة للوصول لأفضل الأماكن التي تؤدي إلى تقليص التكاليف الخاصة بالمحولات والـ Feeders وأيضاً تقليل المفاقد "Losses" ، كما نحتاج للوصول إلى أعلى قيمة من الإعتدالية "Reliability" للشبكة ، مع الأخذ في الإعتبار تخفيض قيمة الـ voltage drop لتكون في المدى المسموح به وفقاً للمواصفات.

ومعظم هذه المتطلبات متعارض مع بعضها البعض ، فتقليل الـ LOSS قد يكون بزيادة مقطع الكابلات وهذا يزيد التكلفة وهكذا ، وهذا هو المدخل الذي دعانا لاستخدام مبادئ

الـ Optimization في تخطيط شبكات التوزيع وتعنى الوصول لأفضل الحلول ، فالحل اليدوى سيظل قاصراً أمام الكم الكبير من الأهداف المتعارضة ، والبديل هو استخدام الـ Optimization.

### 1-2-17 كيفية الوصول للحل الأمثل

دائماً يكون الفيصل في اختبار حل ما هو ما ستجنيه من مكاسب ، وهذه المكاسب هي ما يعبر عنه رياضياً بالـ Objective Functions أى المكاسب المرجوة ، فقد تكون الـ Objective Function لنظام ما هو زيادة الـ Stability Margin مثلاً ، وقد تكون تقليل الـ Losses فى الطاقة ، وقد تكون التكلفة الأقل إلى غير ذلك من المكاسب المرجوة . وفى مثل هذه الحالات نكون أمام ما يسمى بـ Single Objective Function .

وفى المقابل قد يكون هدفك تحقيق عدة مكاسب وهو ما يسمى بالـ Multi-Objective Functions .

وسواء كان هدفك هو مكسب واحد أو مكاسب متعددة فسيكون أمامك اختبارات متعددة ، فمثلاً إذا كان الهدف هو زيادة الـ Stability Limit عن طريق وضع مكثفات ثابتة في الشبكة فسيكون لديك مشكلة جديدة وهي : في أى محطة نضع هذه المكثفات وهل نضعها في محطة واحدة أم نوزعها على أكثر من محطة ؟

وهذا هو المدخل لما يسمى بالـ Optimization Techniques كما ذكرنا. وهي أساليب رياضية متعددة الأشكال لكن خلاصتها أنك تكتب Objective Function معينة تهدف للوصول إليها ، و هذه الـ Function مكتوبة بدلالة عناصر متغيرة (وحيدة أو متعددة) ، وبالطبع أيضاً سيكون هناك عدد من الـ Constrains أى شروط ومحددات للحل بمعنى أن الحل الأمثل هو مثلاً من يعطيني تغيراً في الجهد لا يتجاوز 3% بالزيادة أو النقصان وبشرط ألا يتجاوز حجم المكثفات المستخدمة مثلاً قيمة الحمل المركب إلى غير ذلك من الشروط التي تضعها لتضمن أن يكون الحل الذي تبحث عنه بواسطة الـ Optimization Technique عملياً ومقبولاً .

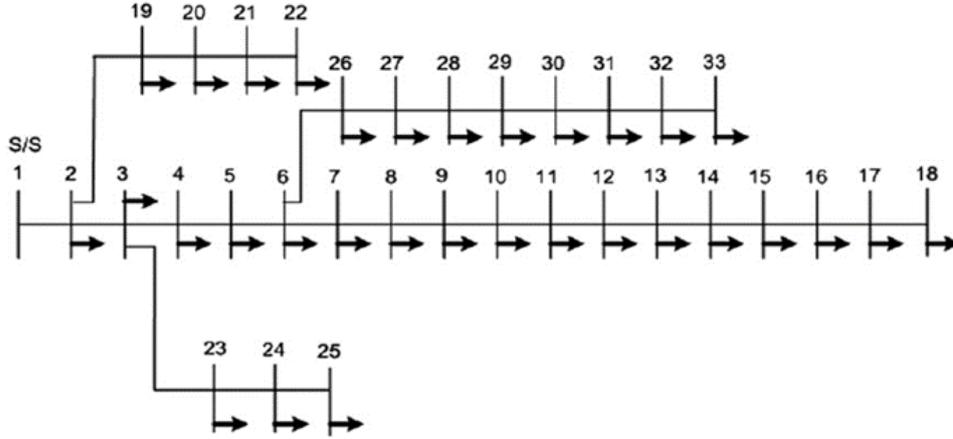
ويكون دور الـ Optimization Technique المستخدم هو سرعة الوصول للحل الأمثل وتحديد القيمة المثلى للمتغيرات مع تحقيق الشروط الموضوعية حيث أن العملية تحتاج لتجربة قيم مختلفة ومتعددة ولا يصلح معها بالطبع الحل اليدوي .

ومن هذه الطرق:

1. Particle Swarm Optimization, PSO.
2. Genetic Algorithms.
3. Cuckoo Search.

وبالطبع لكل واحدة منها مميزاتا وعيوبها من حيث سرعة الوصول للهدف والدقة في تحقيق الهدف .

وحتى يمكن المقارنة الصادقة بين الحلول المقترحة من الباحثين فقد قامت الـ IEEE بوضع عدة نماذج لشبكات التوزيع تختلف في عدد الـ BBS وقدرات الأحمال . والشكل 17-2 هو واحد من هذه الأشكال ويعرف بشبكة الـ BBS-33 .



شكل 2-17

وهذه الشبكات متاحة للجميع بحيث تتم تجربة أى أسلوب مقترح على نفس الشبكة وبالتالي تكون المقارنة صادقة بين الأساليب المختلفة .

## 3-17 خريطة هذا الباب

الفصل الأول من هذا الباب بعد هذه المقدمة يدرس أمثلة تطبيقية لخطوات تصميم شبكة توزيع ، و سيجد القارئ أن معظم الخطوط العريضة التي عرضت هنا فى هذه المقدمة قد مررنا بها خلال هذه الأمثلة التطبيقية ولكن بعضاً من هذه الخطوط ستحتاج لمزيد من التفاصيل ، وهو ما سنقدمه فى الفصول من الثاني إلى الخامس فى هذا الباب.

ففى الفصل الثاني من هذا الباب (الفصل 18) نتعرض لدراسة أهم عناصر شبكة التوزيع وتشمل:

- 1- الموزعات Distributors .
- 2- محولات التوزيع .
- 3- لوحات الربط الحلقى الـ RMU ، والربط مع شبكة الجهد المنخفض .

بينما يخصص الفصل الثالث من هذا الباب (الفصل 19) لدراسة منظومات التغذية المختلفة فى شبكات الجهد المتوسط ، وكذلك دراسة تأثير دخول التوليد الموزع Distributed Generation على شبكات التوزيع .

ويخصص الفصل الرابع من هذا الباب (الفصل 20) لدراسة الشبكات الهوائية ، بينما يخصص الفصل الأخير (الفصل 21) لدراسة الإعتماضية وتنظيم الجهد ، و أيضاً دراسة منظومة التحكم والمراقبة فى شبكة الجهد المتوسط.

## 18

## أمثلة تطبيقية لتخطيط شبكات الجهد المتوسط

في هذا الفصل سيتم تحديد مراحل عامة في تخطيط وتصميم شبكات التوزيع من خلال مثال تطبيقي .  
ملحوظة:(بعض الأمثلة في هذا الفصل مأخوذة بتصريف من مقال للمهندس يسرى عبد السلام).

## 1-18 مراحل تصميم شبكة توزيع

## 1-1-18 المرحلة الأولى: تقدير الأحمال

سنتخيل بناء مدينة جديدة أو توسعات ملحقة بمدينة ما، فالمرحلة الأولى دائماً هي مرحلة حسابات تقدير الأحمال . وبالطبع هذا سيتوقف على طبيعة الأحمال في هذه المنطقة ، فتقدير الأحمال السكنية يختلف عن تقدير الأحمال الصناعية مثلاً ، بل أن الأحمال السكنية نفسها تختلف حسب مستوى المعيشة ، وهل هو إسكان فاخر أم إسكان شعبي إلخ .

وكذلك الأحمال الصناعية تتغير تقدير الأحمال فيها حسب كثافة استهلاك الطاقة لإنتاج المنتج المطلوب . والجدول 1-18 يعطى نموذجاً لكثافة استهلاك الطاقة في بعض الأنشطة الصناعية .

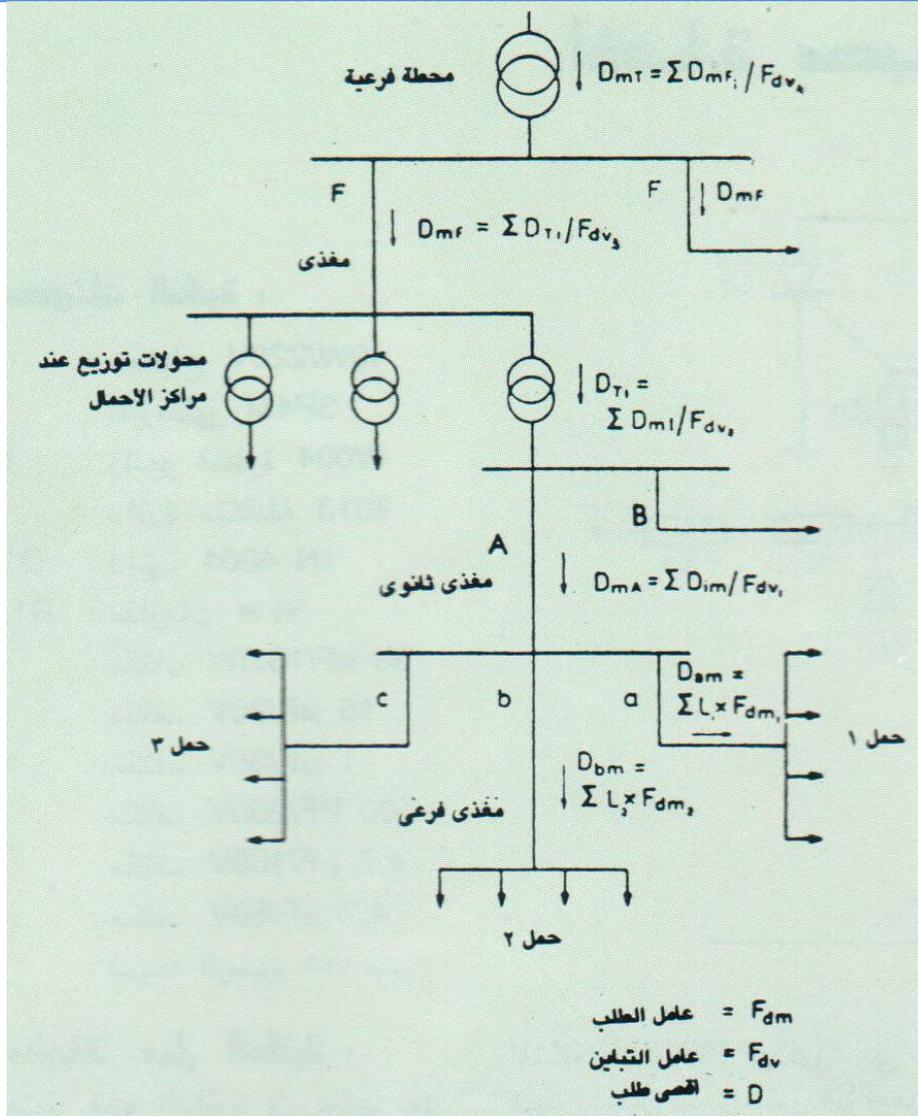
المنتج	الطاقة الكهربائية لكل وحدة منتجة (KWh)	المنتج	الطاقة الكهربائية لكل وحدة منتجة (KWh)
أسمنت (طن)	١١٢	سكر خام (طن)	٢٢٠
البنزين (طن)	٣.٥	الصوديوم (كيلوجرام)	١١
ورق (طن)	٥٠٠	الألمنيوم (كيلوجرام)	٢٠
فوسفات الأمونيوم (طن)	١٦	حامض الكبريت (طن)	٣٦
صلب (طن)	٢٣٠	الأمونيا والكلور (طن)	١٦٨٠
حديد خام (طن)	٢٥	سجاد (١٠٠٠ متر مربع)	١٧٧٠

جدول 1-18

ومن ثم فيمكن بمعلومية المساحة ونوعية الأحمال والخطط المستقبلية للتوسعات الوصول إلى تقدير لأحمال هذه المدينة.

وبالطبع سنحتاج في هذه المرحلة لدراسة معاملات مهمة مثل معامل الطلب Demand Factor ، ومعامل التشتت أو التباعد "Diversity Factor" وغيرهما . وصعوبة هذه المعاملات أنها تقديرية وليست ثابتة وتحتاج لمناقشات مع الخبراء في هذا النشاط . كما سنحتاج في هذه المرحلة لتحديد الأحمال غير العادية مثل المحركات الكبيرة ذات تيار البدء المرتفع والأحمال الصناعية الخاصة إن وجدت وخاصة الأفران وماكينات اللحام الكبيرة ، والأحمال ذات دورات التشغيل الخاصة .

و عادةً فإن التصميم يبدأ من أسفل لأعلى أى من الأحمال إلى محطات التغذية كما في الشكل 18-2 ، فعند تصميم شبكة يجب معرفة عامل الطلب "D.F" Demand Factor للأحمال المتشابهة ، وعامل التباين "Div. F" Diversity Factor للأحمال المختلفة على الموزعات الفرعية بالشبكة لتحديد الحمل الأقصى "D" Max Demand لكل موزع فرعى ، ثم نجمع هذه الأحمال القصوى لكافة الموزعات الفرعية ونقسمها على معامل التباين ( دائماً أكبر من الواحد الصحيح ) لهذه الموزعات وبالتالي نحصل على الحمل الأقصى للموزع الرئيسي ، ومجموع الأحمال القصوى للموزعات الرئيسية مقسومة على معامل تباينها يعطى الحمل الأقصى لمحول التوزيع الموجود في مراكز الأحمال ، وتتكرر العملية حتى نصل لمحطة التحويل .



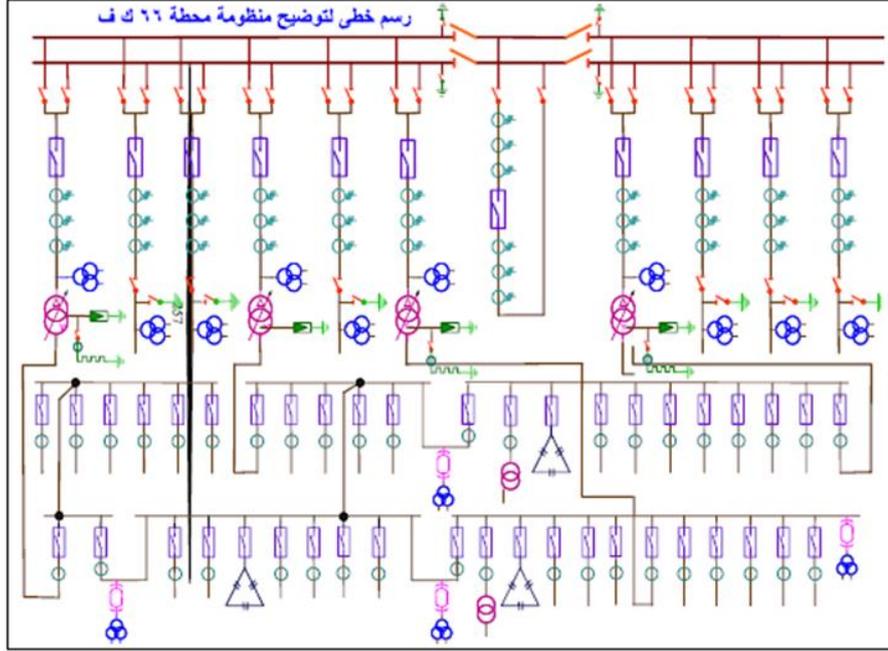
شكل 2-18

### 2-1-18 المرحلة الثانية : اختبار جهد محطة التوزيع

يمكن تقسيم محطات التوزيع Distribution Substations إلى نوعين :

1. محطات توزيع ابتدائية جهد 11kV / 132kV أو 11kV / 66kV ، أو 33kV / 11kV ، وهذه المحطات هي حلقة الربط مع شبكة الجهد العالي وتمثل بداية شبكة الجهد المتوسط .

ويشتمل هذا النوع من المحطات على عدد من العناصر مثل المحولات والقواطع وقضبان التوزيع وسكاكين العزل وأجهزة التحكم والوقاية والقياس والاتصالات... إلخ ، وهى بذلك تشبه تماماً محطات التحويل التى دُرست فى الباب الثالث ، لذا لن نعيد الكلام عنها هنا. ونكتفى فقط بهذا ال SLD لمحطة جهد 11kV / 66kV شكل 3-18 ، كنوع من اختبارات التذكر ، ويفترض الآن أن تقرأه بسهولة حتى لو لم نكتب اسم العنصر على الرمز المستخدم .



شكل 3-18

2. محطات توزيع ثانوية ( محطة الخدمات أو أكشاك المحولات) وتعمل على جهد 11kV / 0.4kV (المدن القديمة فى مصر مثل حلوان أو المعادى) أو 22kV / 0.4kV (المدن الجديدة مثل التجمع الخامس أو 6 أكتوبر ، والمناطق السياحية ) ، وهذه المحطات تمثل قلب شبكة الجهد المتوسط. وهى أقل حجماً وأبسط فى التركيب من المحطات الابتدائية ، فغالباً تضم فقط محول أو أكثر متصلين على Sectionalized Single BB أو Single BB ، وتتصل من ناحية بال RMU ومن ناحية أخرى بكشك أو أكشاك توزيع الجهد المنخفض . و غالباً تكون منظومة الوقاية فيها مبسطة ، وقد لا تتجاوز فى بعض الأحيان استخدام فيوزات للحماية كما هو الحال مع المحولات ذات القدرة الأقل من 1MVA ، إضافة إلى بعض المعدات الأخرى البسيطة كما سنرى .

وبين هذين النوعين من المحطات توجد الموزعات Distributors التي تستقبل المغذيات الخاصة بها Incoming Feeders من المحطات الابتدائية ثم تخرج منها كابلات الـ Outgoing Feeders إلى المحطات الثانوية ( لا يوجد بالموزعات أى محولات ، سوى محول صغير فقط لخدمة مهمات الموزع نفسه كما سندرس ذلك تفصيلاً ) .

وعليك فى هذه المرحلة من التخطيط أن تحدد :

- هل سنحتاج مثلاً إلى محطة محولات جهد ( 66kV / 11kV or 66kV / 22kV or 33kV/11kV ) كمرحلة أولى ، ثم بعد ذلك هل ستستخدم محولات توزيع جهد 11kV / 0.4 kV أو جهد 22kV / 0.4 kV كمرحلة ثانية للوصول للمستهلكين؟
- أم ستختار محطة جهد 11kV / 0.4 kV مباشرة كمرحلة واحدة .

وهذا بالطبع سيتوقف على القدرة الإجمالية ( KW ) للحمل المحسوب فى المرحلة السابقة.

لاحظ أنه فى المدن الجديدة والمناطق الصحراوية يكون جهد دوائر الدخول و الخروج فى الموزعات هو 22 kV وذلك ليتحمل الأحمال الجديدة حيث يتم رفع الجهد لينخفض التيار فى الكابلات ( أو الخطوط الهوائية ) و يؤدي ذلك إلى زيادة قدرة الكابل ( أو الخط ) فيتحمل ضعف الأحمال تقريباً ( لنفس مساحة المقطع ) مقارنة بجهد 11kV ، لكن بالطبع على حساب زيادة عزل الكابل.

و يمكن الاسترشاد بالقيم التالية عند اختبار الجهد المناسب للمحطة الرئيسية:

#### عندما تكون القدرة

- بين 100 kW إلى 5MW يتم التغذية بجهد 11 kV
- ما بين 5MVA إلى 15MVA يتم التغذية بجهد 22 kV
- ما بين 15MVA إلى 30MVA يتم التغذية بجهد 33 kV

والقدرات الأكبر من ذلك تنقل عبر شبكات النقل حسب الجهود التالية:

- ما بين 30MVA إلى 75MVA تنقل عبر خط بجهد 66 kV
- ما بين 75MVA إلى 200MVA تنقل عبر خط بجهد 132 kV
- وعندما تزيد القدرة عن 200MVA تنقل عبر خط بجهد 500 kV أو 220 kV

وبالطبع قد تختلف هذه الحدود من دولة لأخرى. مع ملاحظة أن اختبار جهد الدخول سيؤثر على اختبارات أخرى كثيرة بعد ذلك، منها اختبار حجم الموصل الذي يكون دائماً متناسباً مع التيار المار به ، و يتأثر هذا الاختبار بالقدرة المنقولة والمسافة التي سيقطعها الكابل الرئيسي للوصول للمحطة حيث يجب أن نأخذ بعين الاعتبار سعة تحمل الأسلاك للتيار .

فمثلاً في حالة نقل قدرة 22 MVA إلى منطقة بعيدة تصل إلى 25 km مثلاً ، فإذا نقلنا القدرة بشبكة جهد 11 kV سيكون التيار المنقول يساوى 1157 A ، وبالتالي يجب اختبار كابل له مساحة مقطع كبيرة نسبياً لتحمل هذا التيار العالي ، ولكن إذا رفعنا جهد خط النقل إلى 33 kV فسيقل التيار وتقل مساحة المقطع للكابل .

وتوجد علاقة رياضية تساعد في حساب الجهد المناسب لخط معين حسب القدرة المنقولة P وحسب طول الخط الناقل L بالكيلومتر كما في المعادلة التالية:

$$V = 5.5 \sqrt{L + \frac{P}{100}}$$

وفي هذه المرحلة سيكون علينا حسم قيمة نسبة تحويل المحولات :

بالطبع سنحتاج لتركيب محول ليخفض الجهد العالي من 66 kV أو 33kV إلى جهد 400 V فولت ولكن هذا غير مفضل لأن تصنيع هذه المحولات يحتاج إلى درجة عزل عالية ، وبالتالي زيادة التكلفة و لذلك يتم التخفيض على مرحلتين :

- في المرحلة الأولى من 33 kV إلى 11 kV أو من 66 kV إلى 11 kV
- ثم في المرحلة الثانية يتم التخفيض مرة أخرى من 11kV إلى جهد التوزيع المنخفض (400 V) و الذى يسمى بجهد التوزيع الثانوى .

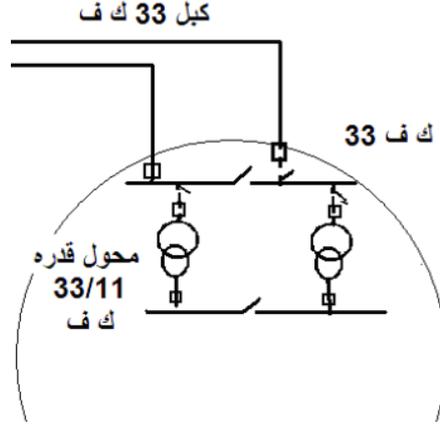
### 3-1-18 المرحلة الثالثة : اختبارات المحطة / المحطات الرئيسية

بعد معرفة قيمة الحمل ، وتحديد مستوى الجهد تكون الخطوة التالية هي المفاضلة بين عدة خيارات خاصة بمحطة التحويل التي ستغذى المدينة . ولتحديد هذه الخيارات يجب الإجابة على الأسئلة التالية :

هل نستخدم محول واحد كبير داخل المحطة أم مجموعة محولات أصغر حجماً ؟

فإذا تم تركيب محول واحد لتحويل جهد 33 kV إلى جهد 11 kV ثم حدث عطل بالمحول فستصبح المنطقة بكاملها غير مغذاة بالكهرباء ، ولذا يفضل استخدام محولين يوصلان معاً على التوازي أو

يكون أحدهما منفصل لكنه احتياطي للأخر عند حدوث أى مشاكل أثناء التشغيل كما فى الشكل 4-18



شكل 4-18

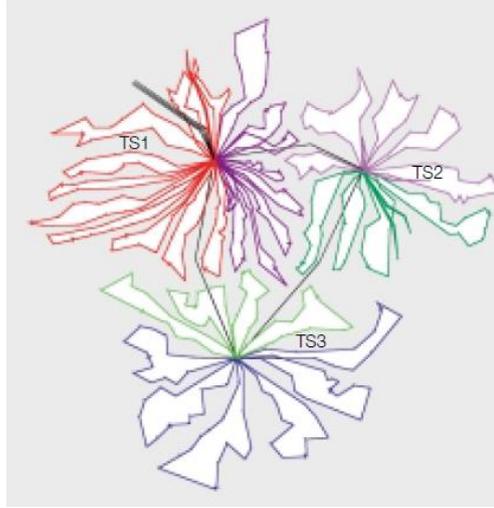
أين نضع محطة التوزيع الرئيسية وأين نضع المحطات الفرعية؟

ويراعى عند تصميم محطات التوزيع الابتدائية 11kV / 33kV أو 11kV / 66kV مايلى:

- أن يكون موقع المحطة قدر الإمكان في مركز الأحمال لتقليل أطوال الكابلات وبالتالي يقل الـ Losses فى القدرة و الهبوط فى الجهد كما هو معلوم. لاحظ فى الصورة التالية شكل 5-18 كيف وضعت المحطات الفرعية "Transformer Substations"

TS1, TS2 and TS3

فى مراكز الأحمال.



شكل 5-18

- أن تكون مساحة المحطة كافية لاستيعاب المحتويات من محولات ومفاتيح والملحقات الأخرى .
- أن يكون تصميمها مناسباً لدخول مغذيات الدخول ، وخروج كابلات الخروج بسهولة وبدون أي عوائق . وهذا يستدعى دائماً أن يكون موقع المحطة على شارع رئيسي لسهولة دخول المعدات .
- أن تكون قابلة للتوسع مستقبلاً عند زيادة الأحمال .

#### 4-1-18 المرحلة الرابعة : حسم أسلوب التغذية لشبكة التوزيع

نحتاج أن نقرر بعد ذلك هل الأنسب اختبار شبكة نقل هوائية أو يتم النقل بالكابلات لتغذية شبكة التوزيع الابتدائية؟ وما هو أنسب مسار لشبكة النقل؟

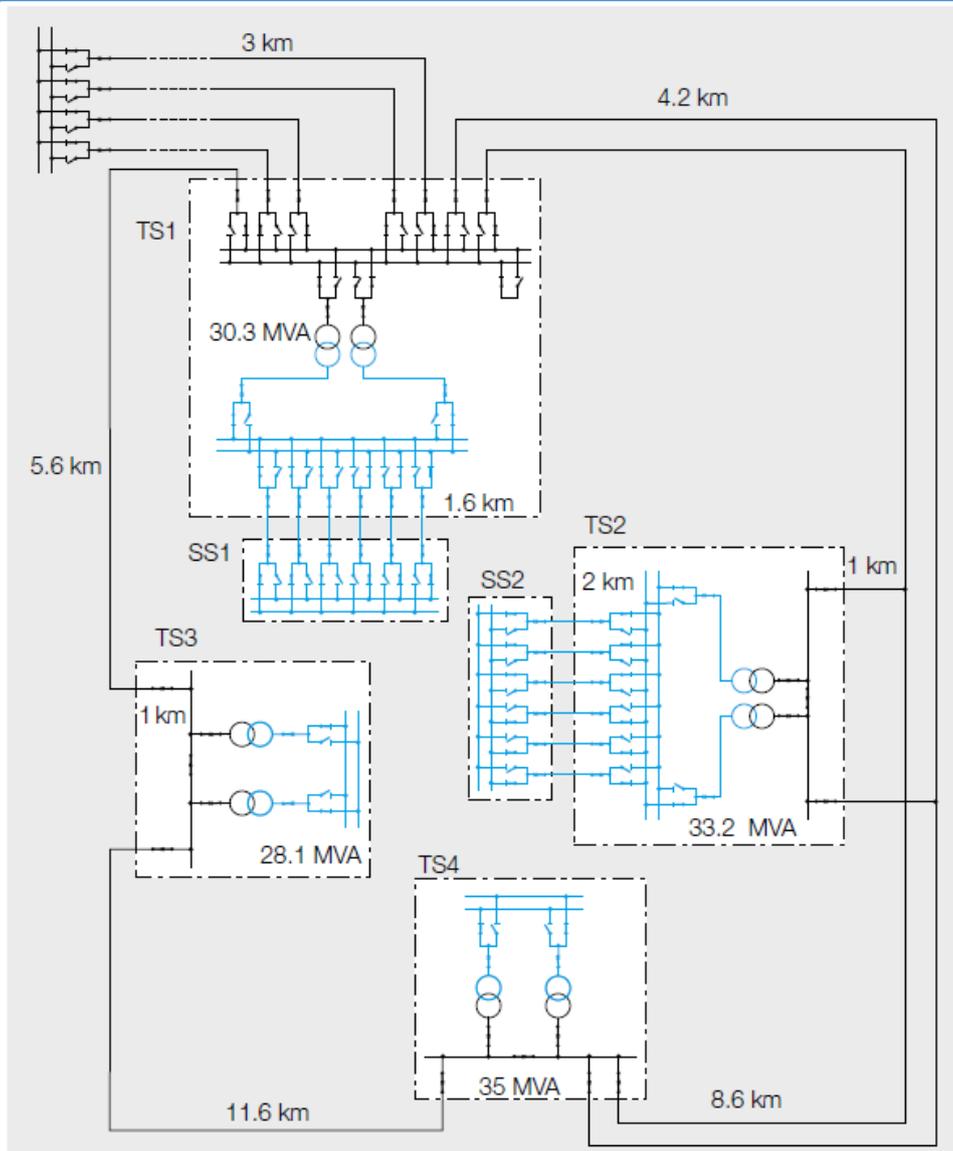
يراعى دائماً اختيار أقصر الطرق. و يفضل دائماً أن يكون المسار موازياً للطرق الرئيسية كلما أمكن ذلك ، وأن يبعد بمسافة تقريباً 30 m عن الطريق بحيث يمكن الوصول إلى الخط من أجل الصيانة بسهولة . وفي حالة المرور بأراضي زراعية يجب أن يكون الخط في مسار يسبب أقل خسائر ممكنة في موضوع نزع الملكية ، حتى يتم تقديم أقل تعويضات ممكنة وذلك لخفض التكاليف ، ويجب تفادي الكباري ومناطق المستنقعات وتفادي التوازي مع خطوط التليفونات حتى لا يحدث تداخل كهرومغناطيسي معها .

لكي يتم تصميم محطة توزيع ابتدائية يجب تحديد كلاً من قدرة محولات القوى حسب حجم الأحمال ، ونوعية القضبان في لوحات توزيع الجهد العالي ، وعدد اللوحات وكذلك لوحات الجهد المتوسط وعددها وكذلك تحديد مقاطع الكابلات المستخدمة في الربط بين المكونات .  
وفي هذه المرحلة يمكن تحديد عدد المغذيات للمحطة ، وهل يمكن مثلاً تغذية المحطة بكابل واحد من المحطة الرئيسية ؟

فلو فرضنا أن المدينة مقسمة إلى ثلاثة أجزاء وأن أحمال كل جزء تصل إلى 15 MVA وأن الجهد المتوسط المستخدم في شبكة التوزيع هو 33 kV فهذا يعني أن التيار المار في كابل التغذية يساوي

$$I = \frac{15000}{\sqrt{3} \times 33} = 262A$$

وبعد أخذ معاملات الأمان في الاعتبار وكذلك معاملات الـ De-ratings من عمق الدفن والكابلات المتجاورة ودرجة الحرارة... إلخ نجد أن أنسب كابل يصل مقطعه إلى 400 mm<sup>2</sup> بعازل XLPE .  
لكن استخدام كابل واحد سيتسبب في خروج الأحمال كلها مع حدوث أى عطل على هذا الكابل. ولذا يفضل تغذية المحطة بكابليين. و بالطبع سيتوقف اختبار مقطع الكابلات وكفاءة معدات الشبكة على دراسة مستوى الـ Short Circuit Capacity ونوع الـ Earthing والهبوط في الجهد المسموح به.  
وهناك أسلوب آخر يمكن استخدامه وهو أن يتم توصيل ربط المحطة الرئيسية ببقية المحطات الفرعية TS1, TS2, TS3 على شكل حلقة Ring كما في الشكل 6-18 .



شكل 6-18

### 5-1-18 المرحلة الخامسة : حسم أسلوب التغذية الفرعية ؟

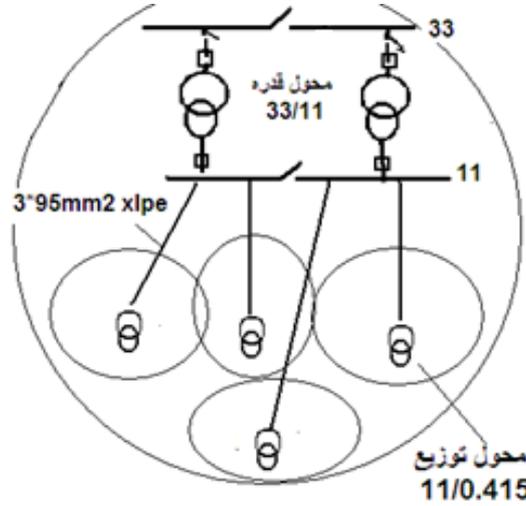
في هذه المرحلة نجيب على السؤال التالي: هل نستخدم الـ Radial or Ring System ؟ أو خليط منهما؟

فقد أصبح الآن في كل منطقة بمخطط المدينة محطة محولات رئيسية جهد  $11\text{ kV} / 33\text{ kV}$  ، ومطلوب من هذه المحطة أن تغطي الأماكن المختلفة في كل منطقة بمحولات جهد  $11\text{ kV} / 0.4\text{ kV}$  لتغذية

أحمال المستهلكين ، فلو فرضنا أن لدينا في كل منطقة من المناطق الثلاثة السابقة بها عدة تجمعات وكل تجمع يحتاج إلى محول منفصل قدرة 1.5 MVA ، فكل محول منهم سيحتاج لكابل تغذية مقطعه يتحمل تيار قدره

$$I = \frac{1500}{\sqrt{3} \times 11} = 78A$$

وبأخذ معامل أمان ومعاملات الـ De-rating في الاعتبار وكذلك بعد أخذ احتمالات الهبوط في الجهد في الاعتبار سنجد أن أنسب كابل قد يصل إلى 95 mm<sup>2</sup> نحاس . في هذه الحالة يمكن أن يكون أحد طرق التغذية هي الطريقة Radial Feeding كما في الشكل 7-18 حيث تتميز هذه الطريقة بالبساطة وقلّة التكلفة ، لكن هذه الطريقة لها مع ذلك عدة عيوب منها:



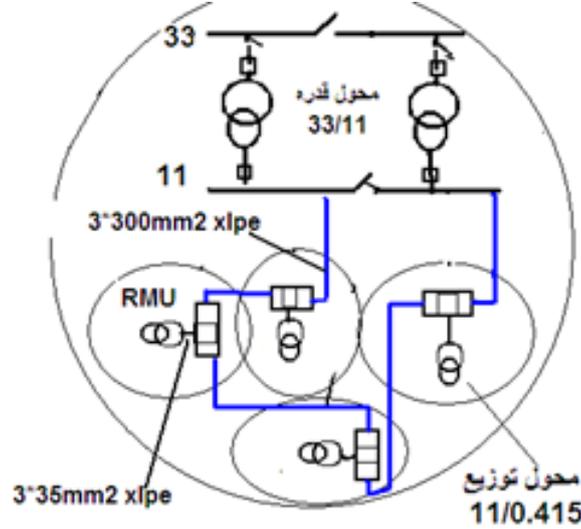
شكل 7-18

إمكانية فصل وتشغيل المحول الفرعي موجودة فقط في لوحات التوزيع الـ 11 kV أي تبعد عن المحول بمسافات كبيرة قد تتعدى الكيلو متر وهذا يصعب عمليات إصلاح الكابل مثلاً .

فلو فرضنا أن المنطقة تحتوى على 50 محول توزيع فرعي وليس أربعة كما في الرسم فهذا يعنى أننا نحتاج إلى 50 خلية منفصلة في الموزع و أيضاً سنحتاج لكابلات بأطوال كبيرة وهذا طبعاً غير منطقي . فحدوث عطل في كابل تغذية المحول يؤدي لخروج أحمال هذا المحول من الخدمة .

وللتغلب على المشاكل السابقة يمكن استخدام طريقة التغذية الحلقية Ring System حيث يتم تغذية مجموعة محولات من كل خلية في الموزع وليس محول واحد ، وكل محول من مجموعة المحولات سيتم تغذيته من خلال وحدة الـ "RMU" Ring Main Unit التي تربط المحولات جميعاً معاً . وزيادة في

تأمين الأحمال فإنه يتم ربط كل مجموعة محولات في حلقة تغذية من خليتين منفصلتين في الموزع كما في الشكل 8-18. تفاصيل أكثر عن هذه الطرق تجدها في الفصل التالي من هذا الباب .



شكل 8-18

### 6-1-18 كيف يتم حساب مقطع الكابل في التغذية الحلقية؟

كان تحديد مقطع الكابل في طريقة الـ Radial System مبسطاً ومباشراً ، أما هنا فنحتاج لتوضيح كيف سيتم حساب مقطع الكابل. بداية يجب تحديد ما هو أكبر عدد من المحولات التي يتم تغذيتها عبر الكابل ، فعلى سبيل المثال في الشكل السابق يكون الجزء الأول في الكابل معرضاً لتحمل تيار أربعة محولات في حالة فصل التغذية من الجهة الأخرى ومن ثم يجب تصميم هذا الكابل على تحمل ذلك العدد .

لكن عملياً ، يتم التصميم بالعكس ، بمعنى أن الكابلات غالباً تستخدم بمقاطع موحدة في الشبكة ، و يعرف الكابل بقدرته على تغذية عدد معين من المحولات ، فمثلاً كابل  $300 \text{ mm}^2$  يستطيع تحمل تيار قدره  $400 \text{ A}$  ، إذن قدرة هذا المغذى تساوى  $7 \text{ MVA} = \sqrt{3} \times 11000 \times 400$  ، ولو فرضنا أن المحولات الموجودة قدرة  $1 \text{ MVA}$  وأنها لا تحمل بأكثر من  $70\%$  من قدرتها فهذا يعنى نظرياً أن هذا الكابل يمكن أن يغذى عدد من المحولات يساوى عشرة محولات  $10 = 7 \div 0.7$  وإن كان هذا الرقم عملياً سيتم تخفيضه لظروف الحرارة وبقيّة معاملات الـ De-rating ، فربما لا يتجاوز 7 محولات بدلاً من عشرة .

## 18-1-7 المرحلة السادسة : محطة التحويل الابتدائية هوائية/غازية؟

كما هو معلوم ، يوجد نوعان من المحطات :

النوع الأول هي محطات توزيع ابتدائية معزولة بالغاز "GIS" Gas Insulated Substations ، ويتواجد هذا النوع من المحطات بداخل المدينة حيث يتم وضع جميع مكونات هذا النوع من المحطات بداخل مبنى كما بالشكل 18-9 ( محطة بالسعودية ) ، و يحتوى بداخله على كل مكونات المحطة ، و تكون مكونات المحطة المعزولة بالغاز داخل خلايا Bays (راجع فصل المحطات المعزولة بالغاز بالباب الثالث) .



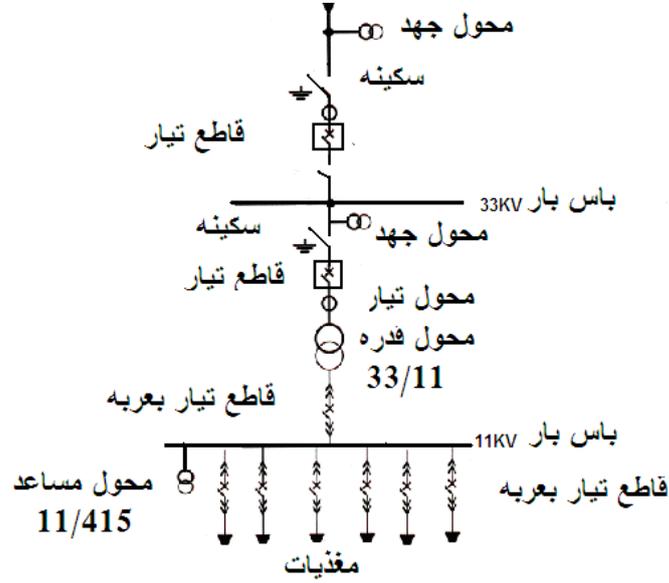
شكل 18-9

النوع الثاني من محطات التوزيع الابتدائية هي المحطات المعزولة بالهواء Air Insulated Substations "AIS". وفي هذا النوع من المحطات يكون الهواء هو الوسط العازل بين قضبان التوزيع ، وتكون مكونات تلك المحطة بعيدة عن بعضها البعض بمسافات كبيرة نسبياً. وقد سبق دراسة ميزات وعيوب كل نوع من أنواع المحطات (غازية أو هوائية) في الباب الخاص بمحطات التحويل .

## 18-1-8 المرحلة السابعة : اختبار نوعية قضبان التوزيع

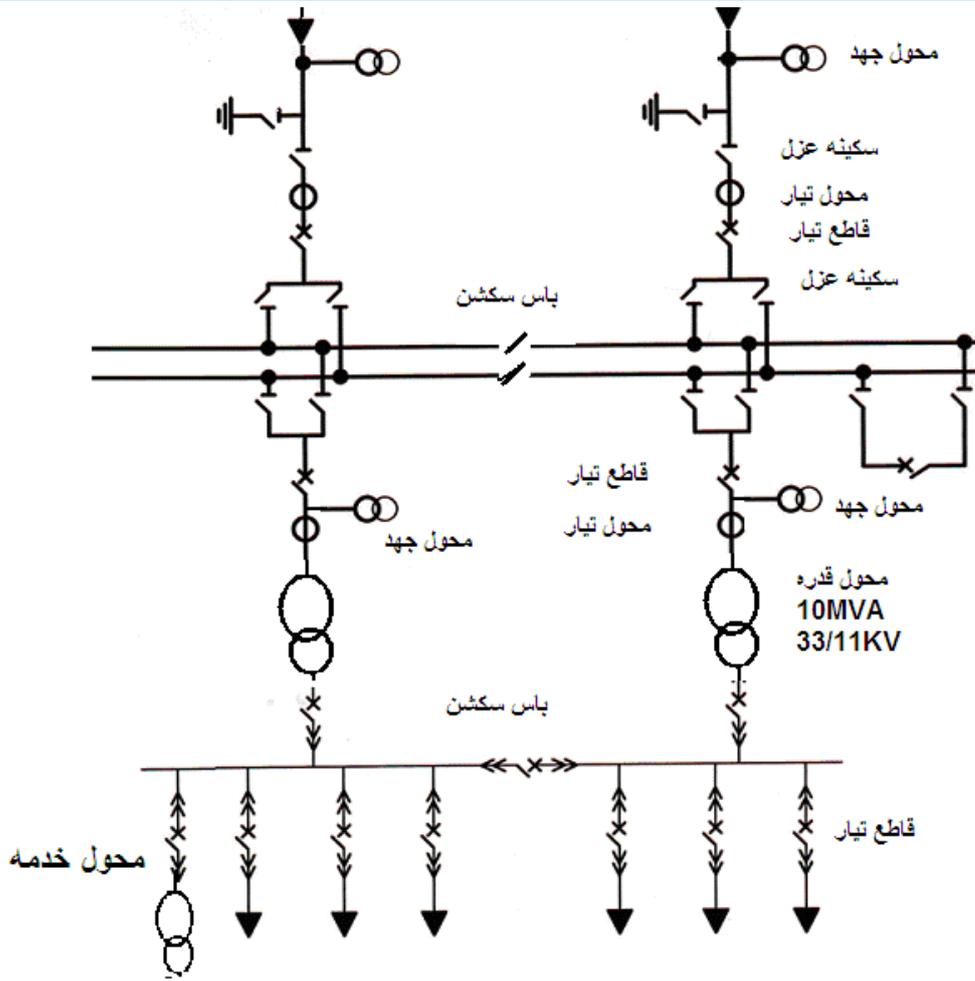
في الباب الثالث درسنا أنواعاً متعددة من قضبان التوزيع. لكن في محطات التحويل الصغيرة يكثر استعمال نوعين فقط هما :

- الـ Single BB ، وهو أبسط نظام مستخدم كما في مخطط الـ SLD (شكل 10-18) الذى يمثل محطة توزيع فرعية ، حيث يغذي المحطة موزع رئيسي واحد. ويعيب تلك الأنواع من التوصيلات أنه في حالة عطل المحول أو قضبان التوزيع تنقطع التغذية عن جميع الأحمال .



شكل 10-18

- لتفادى حدوث الفصل التام للأحمال في الشكل السابق يتم استخدام محولين سعة كل محول منهما تبلغ % 70 من سعة المحطة ، وأيضاً يمكن استخدام Double BB حيث أنه مقسم إلى جزئين لكي يعطى مرونة في التشغيل (شكل 11-18). و يتميز هذا النظام بقلة قيمة تيار الـ Short Circuit Current نسبياً. ويتميز أيضاً بأنه عند وجود عطل بمحول يتم نقل الأحمال إلى المحول الأخر. وهذا يعنى اعتمادية عالية. و أيضاً في حالة وجود عطل أحد الـ BBS يتم نقل الأحمال إلى الأخر، وبذلك نكون ضمناً سهولة في التشغيل وتقليل قدر المستطاع فى فترة انقطاع التغذية.



شكل 11-18

## 19

## العناصر الأساسية بشبكة التوزيع

عناصر منظومة التوزيع تتضمن ما يلي :

- الموزعات Distributors .
- محولات التوزيع.
- الفيوزات
- لوحات الربط الحلقى الـ RMU
- أكشاك التوزيع في الجهد المنخفض

وفيما يلي تعريف مختصر ومعلومات عامة عن العناصر السابقة قبل البدء في دراستها بصورة تفصيلية.

1. **العنصر الأول** في هذه المنظومة هو الموزعات Distributors . وهي عبارة عن لوحات توزيع للجهد المتوسط ، وهي أول نقطة في شبكة توزيع الجهد المتوسط ، حيث تستقبل كابلات المغذيات (جهد متوسط) من محطات التحويل الرئيسية ، ثم تخرج منها كابلات تغذية لمحولات التوزيع المنتشرة في المدينة (جهد متوسط أيضا).
2. **العنصر الثاني** هو محولات التوزيع ، وهي محولات قوى تتراوح قدرتها بين عدة عشرات من الـ kVA وتصل حتى 10MVA ، ويكون جهدها في ناحية الابتدائي إحدى قيم الجهد المتوسط السابقة (3.3 kV - 6.6 kV - 11 kV - 22 kV - 33 kV) ويكون جهدها في ناحية الثانوي 400 فولت. وبالتالي فهي تختلف عن محولات القوى الموجودة في منظومة النقل في قيمة القدرة (قدرة المحولات في شبكة النقل تبدأ من 10 MVA وتصل إلى مئات الـ MVA) وتختلف أيضا في الجهود. وسيكون الحديث عن محولات التوزيع هنا مقتضبا ، حيث يمكن الرجوع لكتابي المرجع في محولات القوى الكهربائية لمن يريد التفاصيل.
3. **العنصر الثالث** : الفيوزات حيث يكثر استخدامها في شبكات التوزيع لذا يجب أن تدرس بعناية هنا.

4. **العنصر الرابع** فى المنظومة هو لوحات الـ RMU وهى وحدة الربط بين المحول وبين بقية المحولات فى الشبكة من جهة الجهد المتوسط .
5. **العنصر الخامس** هو صناديق التوزيع فى شبكة الجهد المنخفض وكيفية عمل مناورات تغيير الخطوط.

## 1-19 ضخامة منظومة التوزيع

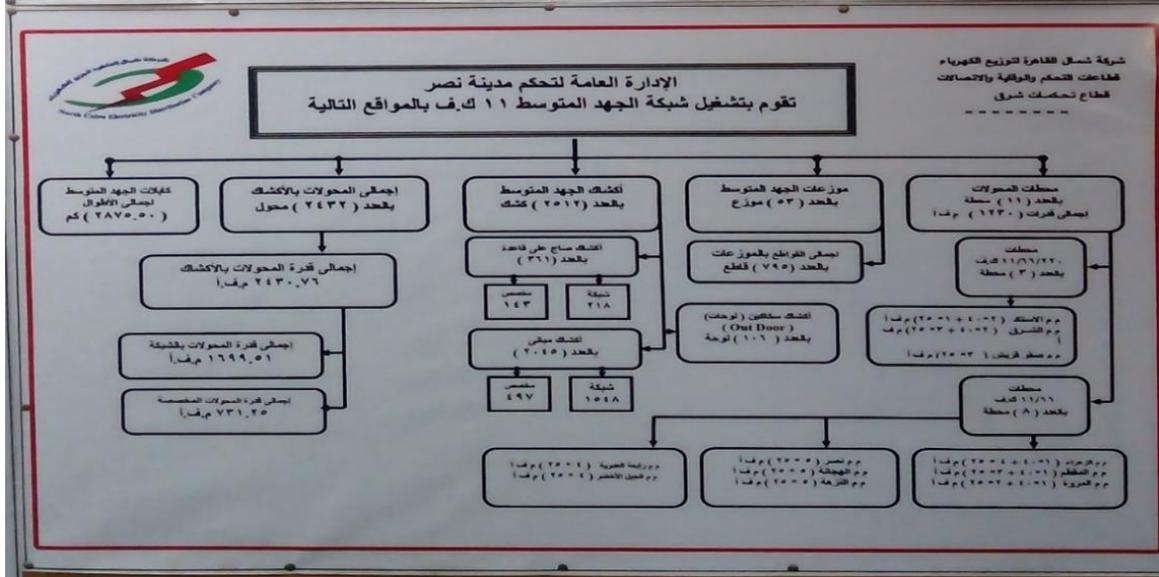
تمثل منظومة التوزيع أكثر من 50% من إجمالي رأس المال لمنظومة القوى الكهربائية ككل ، ويرجع هذا إلى انخفاض الجهود فى شبكات التوزيع وارتفاع التيارات وبالتالي استخدام عدد كبير من الكابلات والمحولات والأكشاك والمهمات المختلفة بالإضافة إلى ضرورة استخدام أطوال كبيرة من الكابلات للوصول للمستهلكين ، وهذا يفسر أهمية العناية بمنظومة التوزيع من حيث التصميم والتركييب والتشغيل والصيانة. وأحد أهم الاختلافات بين شبكتى النقل والتوزيع هو الاختلاف فى أعداد المهمات (المعدات) فى نفس المساحة الجغرافية. ففي شبكة النقل ربما لا تجد فى مساحة جغرافية طولها مثلا 20 كم أكثر من بضعة مئات من أبراج النقل وربما محطة محولات واحدة ، وقد لا تجد. بينما فى نفس هذه المساحة داخل مدينة سكنية ستجد شبكة التوزيع تحتوى على عشرات الموزعات ومئات المحولات و الآلاف من أكشاك الجهد المنخفض ، إلخ).

واللوحة التالية شكل 1-19 تبين الحجم الضخم لمهمات هذه الشبكة فى مركز تحكم واحد فقط (تحكم مدينة نصر) بمدينة القاهرة ، فهذا المركز مسئول عن 53 موزع تغذى حوالى 2500 محول من خلال شبكة كابلات يصل إجمالى طولها إلى حوالى 2800 كم . وهذا كله فى حى واحد فقط ضمن أحياء مدينة القاهرة.

هذه الموزعات (الـ 53 ، والتي تغذى 2500 محول ) تأخذ تغذيتها من:

- عدد 3 محطات تحويل (محطات نقل) جهد 11/66/220 ك ف ، وهى : محطة محولات الإستاد ، ومحطة محولات الشرق ، ومحطة محولات صقر قریش.
- ثم عدد 8 محطات تحويل جهد 11/66 ك ف ، (محطات توزيع ابتدائية) وهى محطات محولات : الزهراء ، والمقطم ، والمرورة ، ومدينة نصر ، والهجانة ، والنزهة ، والجبل الأخضر، ورابعة العدوية.

والمحولات (الـ 2500) الموجودة بهذه الشبكة معظمها داخل مباني (سواء حكومية أو خاصة) ، كما يوجد عدد 361 محول داخل أكشاك محولات فى الشارع مباشرة.



شكل 1-19 :

وفيما يلى سندرس بالتفصيل أهم خصائص عناصر شبكة التوزيع التى ذكرناها إجمالاً فى هذه المقدمة.

## العنصر الأول في منظومة الجهد المتوسط:

## 2-19 : موزعات الجهد المتوسط DISTRIBUTORS

## 2-19-1 المهام داخل مبنى الموزع Distributor' Equipment

كما ذكرنا ، فالموزع هو نقطة البدء في شبكة الجهد المتوسط ، وكل موزع مسئول عن تغذية مجموعة من المحولات في المنطقة المحيطة به ، وفي الغالب لا يوجد محولات داخل مبنى الموزع نفسه ، وإنما فقط كابلات جهد متوسط دخول وخروج ، وإن كان هناك بعض الموزعات التي يوجد بها محول خدمة بقدرة 25 kVA .

والموزع ليس إلا مجموعة من خلايا توزيع جهد متوسط متصلة ببعضها البعض عن طريق قضبان نحاسية كما في الشكل 2-19 الذي يظهر في جزئه العلوي مخطط مبسط للموزع ثم في الجزء السفلي الصورة الحقيقية لخلايا الموزع. والموزع يستخدم لاستقبال القدرة الكهربائية من محطات المحولات الرئيسية عبر كابلات جهد متوسط بقدرات وجهود مختلفة وتوزيعها على محولات التوزيع الثانوية بقدرات وجهود مختلفة.

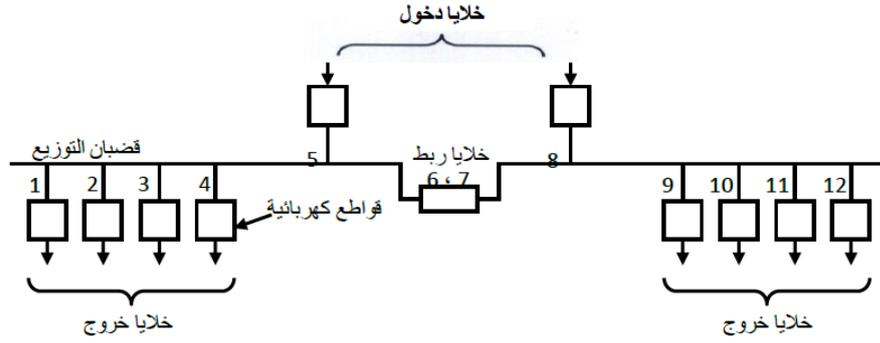
وبداخل مبنى الموزع هناك عدة مهام (معدات) :

- لوحة التوزيع (الموزع).
- مهام جهد منخفض ، وتشمل البطاريات وشواحن البطاريات
- منظومة الاتصالات والتحكم (غالبا لاسلكي)
- مهام الأمن الصناعي للوقاية من الحرائق

وفي الجزء التالي سنشرح بالتفصيل الأجزاء الخاصة بلوحة الموزع وهي كما ذكرنا تمثل العنصر الرئيسي بالمبنى.

## 2-2-19 لوحة التوزيع (الموزع)

تتكون لوحة الموزع من خلايا متجاورة كما في الصورة شكل 2-19 ، وتكون الخلايا مثبتة على باررات حديدية على ارتفاع كاف من سطح الأرض من أسفل لسهولة ربط الكابلات بها . ويتم تجهيز وضع لوحة الموزع بالشكل المناسب بحيث لا يتعارض مع حرية الحركة والدخول للمعدات داخل المبنى، لذلك يراعى وضع اللوحات بجوار الجدران دون ملاصقة لها حتى يمكن لفرق الصيانة فتحها من الخلف أثناء عمليات الإصلاح والصيانة بسهولة وإدخال معدات الصيانة كما في الصورة.



شكل 19-2 :

ويراعى أيضا وضعها بعيدًا عن الأبواب الرئيسية والفرعية ومنافذ الهروب وبعيدًا عن أماكن المعدات التي تحدث اهتزازات وكذلك إبعادها عن خطوط أنابيب المياه بأنواعها وأنابيب الغازات. وتركب اللوحة على قاعدة أسمنتية مرتفعة عن مستوى أرضية المبنى حماية لها من المياه أثناء عمليات التنظيف ويتم أيضا تجهيز مجارى للكابلات أسفل اللوحات لسهولة توصيل الكابلات الكهربائية بها حيث يوجد بدروم أسفل الخلايا لتمديد الكابلات.

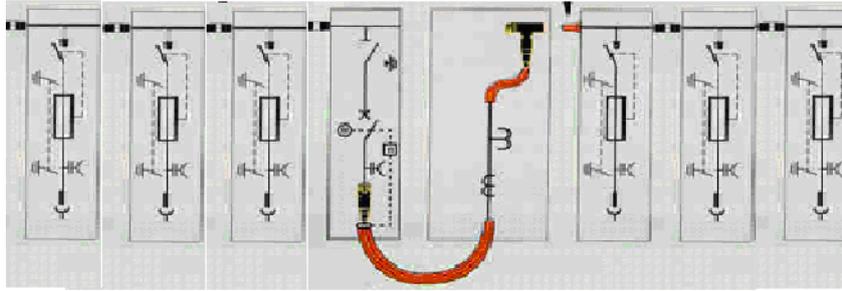
وبصفة عامة تحتوي لوحة الموزع على عدة أنواع من الخلايا:

- خلايا الدخول (الشائع في مصر استخدام ٤ خلايا دخول)
- خلايا الخروج (الشائع ٨ خلايا خروج)

- خليتين لربط القضبان ، أحدهما للـ Bus Riser والأخرى خاصة بالـ Bus section, BS
- خلية القياسات وتأريض البارة (Bus Metering and Bus Earthing): ويوجد بها محول جهد VT للبارة يغذى جميع أغراض خلايا الخروج على نفس هذه البارة لأنه غالبا لا يوجد VT مستقل لكل Outgoing لتقليل التكلفة. كذلك يوجد بها أجهزة Voltmeter للبارة ويوجد بها كذلك سكينه الـ Earthing للبارة.
- خلية تغذية المحول المساعد لمحطة التوزيع (Auxiliary Transformer Cubical): وهى خلية لتغذية المحول المساعد وتشبه تماما خلية الخروج العادية لكن يزيد عليها فقط وجود بعض الـ auxiliary/lockout relays الخاصة بالوقاية الميكانيكية للمحول.
- توجد أيضا خلية تغذية مكثفات تحسين معامل القدرة التى تكون مركبة على قضبان الـ kV11 ، وتسمى Capacitor Bank Cubical ، وتشبه خلايا الخروج تقريبا.

## ملاحظات:

1. عادة تكون هناك دائرتى تغذية فقط (كل دائرة تغذى نصف الـ BB ) إذا كانت كل دائرة منهما قادرة على تغذية كامل الأحمال المغذاه من الموزع. أما إذا كانت الأحمال الكلية للموزع أكبر من قدرة دائرة تغذية واحدة فإن الأمر يقتضى استخدام أربع دوائر تغذية وبالتالي يكون عدد خلايا الدخول للموزع أربعة.
2. يفضل وجود أربعة مغذيات كل اثنان منهما يغذيان نصف الموزع لضمان استمرارية الكهرباء عند حدوث عطل فى أى من مغذيات الدخول فى أى نصف ، ويفضل أن تكون تغذية نصف الموزع مختلفة عن النصف الآخر بحيث يكونا من محطات محولات ابتدائية مختلفة ، أو من محولات مختلفة داخل نفس المحطة.
3. خلايا الخروج يكون عددها مساو لعدد دوائر الخروج مضافاً إليها الخلايا الاحتياطية.
4. ولأن الموزع مكون من قسمين فنحن نحتاج إلى ربط القسمين معا بواسطة خلايا الربط Bus Coupler التى تتكون من خليتين إحداهما خاصة بقاطع الربط CB Coupling لربط جزئى قضبان التوزيع والأخرى تسمى بالـ Bus Riser ، وهذه ليس بها CB ، وإنما يتم فيها فقط استبدال الباربات برفع قضبان التوزيع من مستوى أطراف الخروج الخاصة بقاطع الربط إلى مستوى القضبان فى الموزع كما فى الشكل 19-3
5. ويجب مراعاة وجود Interlock (ميكانيكى/ كهربى) - (يدوى/ تلقائى) ، بين خلايا الدخول من خلال خلية الـ Bus Section.

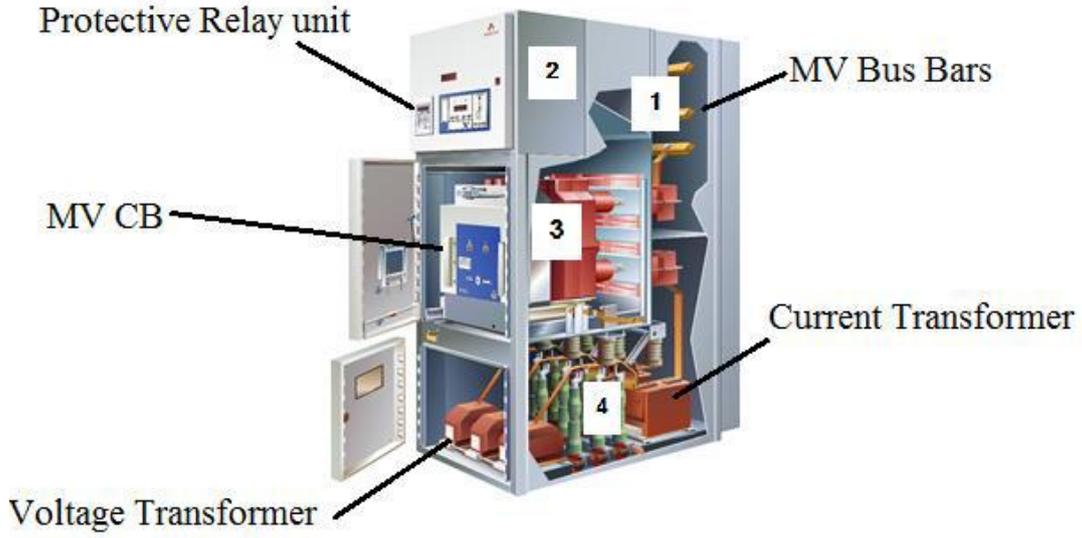


شكل 19-3 :

### 3-2-19 مكونات الخلية

كل خلية من خلايا الموزع سواء كانت خلية دخول أو خلية خروج تتكون - من حيث الشكل الخارجى - من ثلاث أقسام كما فى الشكل 19-4:

- القسم العلوي : وهو خاص بأجهزة الجهد المنخفض ( 110 فولت) وتضم أجهزة القياس والحماية
- القسم الأوسط : وهو و خاص بوسائل الفصل والتوصيل أي مكان تركيب القاطع وفقا لنوعه وكذلك يمر من خلاله قضبان التوزيع التي هي عبارة عن قضبان نحاسية تأخذ أشكالاً مختلفة وذات مساحة مقطع مختلفة حسب الحمل التصميمي و تكون موزعة بطريقة يسهل ربطها مع القاطع .
- القسم السفلى : وهو مكان خاص بدخول وتركيب الكابلات كما يحتوى أيضا على محول جهد ومحول تيار .



شكل 19-4 :

#### 19-2-4 المهام الموجودة داخل خلية الدخول Incoming Cubicle

تحتوى خلية الدخول على العناصر التالية: (الأرقام الواردة تمثل نموذجاً فقط وليست موحدة ولكن شائعة)

- قاطع تيار جهد متوسط MV-CB ثلاثى الأوجه سعة 1250A .
- سكينه أرضى موصلة بشبكة الـ Earthing .
- دوائر الكنترول التى تعمل بالتيار المستمر لتشغيل دوائر الفصل والتشغيل للقاطع.
- كابلات الدخول بمساحة مقطع  $3 \times (1 \times 400)$  أو  $3 \times 300$
- عدد "3" محولات تيار ( 5/5/400 ) يستخدم كل واحد منهم مع Phase من الـ 3-phases ، لتغذية أجهزة الوقاية والقياس .
- عدد "3" أميتر لقياس التيار بالأميير
- عدد "3" محول جهد  $\frac{11000}{\sqrt{3}} / \frac{110}{\sqrt{3}} / \frac{110}{\sqrt{3}}$
- عداد طاقة فعالة وغير فعالة
- مبيّن وضع القاطع ومبيّن وضع لسكينه الأرضى.
- لمبات بيان حالة فصل وتوصيل القاطع

أما أجهزة الحماية فتشمل:

Over current Relay	حماية ضد زيادة التيار
Earth Fault Relay	حماية ضد تسرب الأرضي
Directional Over Current Relay	حماية ضد زيادة التيار الاتجاهي
Directional Earth Fault Relay	حماية ضد التسرب الأرضي الاتجاهي

كما يوجد إنترلوك ميكانيكى بين سكينه الأرضى وبين القاطع يمنع توصيلهما معا.

### 5-2-19 المهامات الموجودة بخلية الخروج: Cubicle Outgoing

تحتوى خلية الخروج على العناصر التالية:

- قاطع تيار جهد متوسط ثلاثى الأوجه سعه 630 أمبير أو 1250 أمبير
- سكينه أرضى موصلة ببار الأرضي
- دوائر الكنترول التى تعمل بالتيار المستمر الخاص بتشغيل دوائر الفصل للقاطع
- كابلات الخروج ومقطعها 3\*150 أو 3\*240 ملم
- عدد 3 " 3 " أميتر لقياس التيار بالأمبير
- عدد 3 محول تيار وفى الغالب تكون 5/5/200
- مبيّن وضع القاطع ومبيّن وضع لسكينه الأرضي.
- لمبات بيان حالة فصل وتوصيل القاطع

أجهزة الحماية بها تشمل :

Over current Relay حماية ضد زيادة التيار

Earth Fault Relay حماية ضد تسرب الأرضي

لاحظ أن خلية الخروج تحتوى على CT فقط ولا تحتاج إلى VT بسبب عدم وجود Directional relay فى دوائر الخروج (هناك حالات خاصة يوجد بها VT إذا احتوت الخلية على عداد قياس الطاقة لمشارك معين ) .

### 6-2-19 المهامات الموجودة بخلية الربط :

يوجد خليتين للربط تحتوى الأولى على المهامات التالية:

- القاطع سعة 1250A

- جهاز وقاية ضد زيادة التيار والتسرب الأرضي

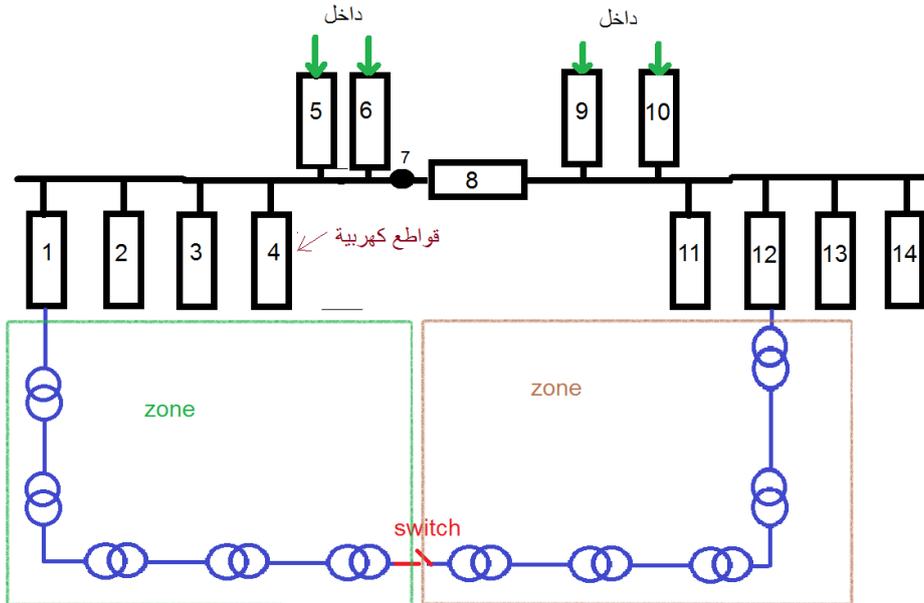
أما الخلية الثانية فهي خلية استبدال بارات فقط كما ذكرنا.

### 7-2-19 مخطط لوحة الموزع

دائما تظهر التفاصيل الفنية الداخلية الخاصة بلوحات الموزعات على SLD كما الشكل 5-19 الذي يظهر لوحة تتكون من 14 خلية ( K1-K14 ) ، بعض هذه الخلايا تكون خلايا دخول للكابلات المغذية للوحة ( K5,K6,K9,K10 ) ، والباقي خلايا خروج لتغذية المحولات المنتشرة بالمنطقة ، ماعدا الخليتان رقم K7, K8 فيمثلان رابط القضبان . وجميع الخلايا لها نفس الجهد.

ويمكن أن ترى أن خلايا الدخول مقسمة إلى مجموعتين ، فهناك الخليتان 5 و 6 موصلتان على نصف الموزع وقادمتان من مصدر مختلف عن الخليتين 9 و 10 اللتان تغذيان النصف الثاني من الموزع . ولا يتم الربط بينهم أبدا إلا في حالة خروج أو توقف إحدى الجهتين عن الخدمة. لاحظ أيضا أن خلايا الخروج تربط بين الموزع وبين المحولات الموجودة بالمنطقة ( 11KV / 400V ) .

و يتم توصيل المحولات على شكل Ring فيتم توصيل كل مجموعة محولات مغذاة من إحدى خلايا القسم الأيمن بمجموعة محولات مغذاة من خلية أخرى في القسم الأيسر ويتم التوصيل بينهم بـ Switch يكون مفتوحا دائما (ويسمى بسكينة فتح المنتصف ) و لا يغلق إلا في حالة حدوث عطل في إحدى الخليتين أو عطل في الكابلات بين المحولات و ذلك من أجل استمرار التيار حتى يتم إصلاح العطل.



شكل 5-19 :

## 3-19 المهام الأخرى الموجودة بمبنى الموزع:

### 1-3-19 البطاريات:

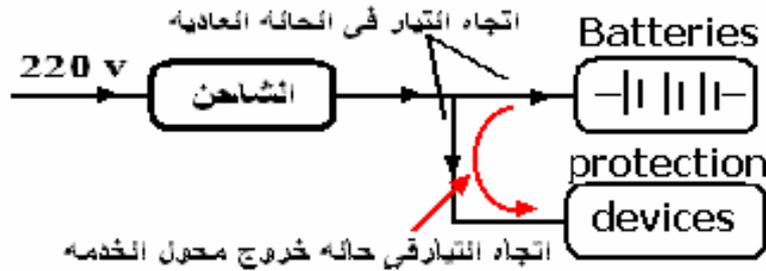
وهي تقوم بإمداد أجهزة الحماية بالفولت المناسب وكذلك تغذية ملفات الفصل والتوصيل بالقواطع ، وتغذية لمبات البيان و إضاءة لمبات الطوارئ من خلال ريلاي مساعد في حالة انسحاب الجهد عن الموزع. علما بأن هناك نوعين للبطاريات:

- حمضية : وعمرها الافتراضى صغير ويتراوح بين سنة واحدة و5 سنوات حسب عدد مرات الفصل والتشغيل ، وجهد البطارية الواحدة 12 فولت ، وغالبا لا تستعمل مع الموزعات.
- قلوية : وعمرها الافتراضى يصل إلى ٢٠ سنة وهى الأكثر استعمالا ولاسيما النوع الليثيوم وجهد العمود 1.2 V .

ملحوظة: راجع الجزء الخاص بالبطاريات فى الباب الثالث (محطات التحويل ) لمزيد من المعلومات.

### 2-3-19 الشاحن (التونجر )

ودوره هو شحن البطاريات وتغذية أجهزة الوقاية طالما كان يتغذى من خلال محول الخدمة الموجود بمبنى الموزع. فإذا خرج محول الخدمة تصبح التغذية من البطاريات كما فى الشكل 6-19.



شكل 6-19 :

(هناك أكثر من خطأ فى الصورة شكل 7-19 الخاصة بغرفة البطاريات. هل يمكنك تحديدهم؟)



شكل 19-7 :

### 19-3-3 ما معنى انسحاب الجهد على الموزع؟

إذا حدث فصل كامل لمحطة التوزيع فعلى مهندس التشغيل التأكد من سبب الفصل على النحو التالي :

- مراجعة الريلاي الخاص بمغذيات الدخول للمحطة ، فإذا لم يجد أي خطأ فهذا يعني أنه لا توجد مشكلة في مغذيات الدخول للمحطة.
- فحص قراءة عدادات مغذيات الدخول للمحطة فإذا وجد أنها أصفار و القاطع في وضع تشغيل فهذا يدل ذلك على أن السبب في فصل المحطة هو سبب خارجي (تسمى بحالة انسحاب الجهد).

في هذه الحالة على مهندس التشغيل فصل كل مغذيات الخروج دون انتظار لأمر من التحكم. ماعدا محول الخدمات فيبقى في وضع تشغيل ثم عليه بالاتصال بمهندس التحكم لإخباره بما حدث ، وعلى مهندس التشغيل بالموزع مراقبة عدادات الجهد لمغذيات الدخول حتى يكون على استعداد لإرجاع الأحمال مرة أخرى.

بعد التأكد من رجوع الجهد على مغذيات الدخول و في نفس الوقت بعد أخذ التصريح من مهندس التحكم عليه أن يقوم بإرجاع الأحمال بتوصيل قواطع مغذيات الخروج الـ 11 kV واحد تلو الآخر حتى يتم التشغيل بأمان.

### 19-3-4 التحكم في لوحات الجهد المتوسط

ما تم شرحه حتى الآن هو لوحات موزعات الجهد المتوسط العامة التابعة للدولة ، لكن في المشروعات الكبرى يكون لدى كل مشروع لوحة موزع خاصة به ، وهي تشبه من حيث الوظيفة والتركيب اللوحات التي تحدثنا عنها لكن أحيانا تكون أقل في عدد الخلايا ، فالمشروع قد يكون مغذى مثلا من 4 أو 5 محولات فقط . ويكثر في لوحات الجهد المتوسط الخاصة وجود لوحتي تحكم هما:

- لوحة تحكم خاصة بالمكثفات وهي Automatic Capacitor Control System, ACCS ويتم عن طريقها التحكم في دخول وخروج المكثفات تلقائيا بناءا على قيمة الـ Reactive Power ، وحسب قيمة الجهد الذي ضبط عليه الـ Setting .
- لوحة تحكم خاصة بالجهد المتوسط تسمى Automatic Bus Transfer Scheme, ABTS وهي تشبه لوحة الـ Automatic Transfer Switch, ATS الموجودة في لوحة الجهد المنخفض . ووظيفة الـ ABTS هي فتح أو غلق رابط القضبان (Bus-Couplers) أوتوماتيكيا.

ولشرح هذه الوظيفة نفترض أن لدينا مثلا 3 محولات جهد 33/11kV متصلين بحيث أن جهد الثانوى لهم يكون موصلا على ثلاث Sections منفصلة في بارة الـ 11kV ، وعندها سيكون لدينا عدد ( 2 ) من الـ Bus-Sections بين الـ Sections الثلاثة ، وفي الغالب يكون اثنان من المحولات الثلاثة متصلين على التوازي (BS بينهما مغلق) ، والمحول الثالث يكون مغذي للـ Section الثالث منفردا ، وذلك للحد من الـ Short-circuit Level على الـ 11kV.

لو حدث عطل على أى محول من الاثنين الموصولين على التوازي وتم فصله ، فستقوم الـ ABTS بالغلاق الأوتوماتيكى للـ Bus-Section الثانى لكى يدخل المحول الذى كان منفردا مع المحول المتبقى ليغذيا معا الـ 3 Sections لعدم فقد الأحمال.

لو رجع المحول المفصول وصارت المحولات الثلاثة على التوازي ، فستقوم الـ ABTS بفصل الـ Bus-Section الثانى لفصل محول لتقليل الـ Short-circuit Level على الـ 11kV.

## العنصر الثاني في منظومة الجهد المتوسط:

## 4-19 محولات التوزيع

تعرف أكشاك المحولات باسم Kiosk (شكل 19-8) . والكلمة تعنى كشك.



شكل 19-8

و الكشك يتكون من 3 غرف :

- غرفة Ring main unit
- غرفة المحول
- غرفة لوحة التوزيع الرئيسية للجهد المنخفض MLVS

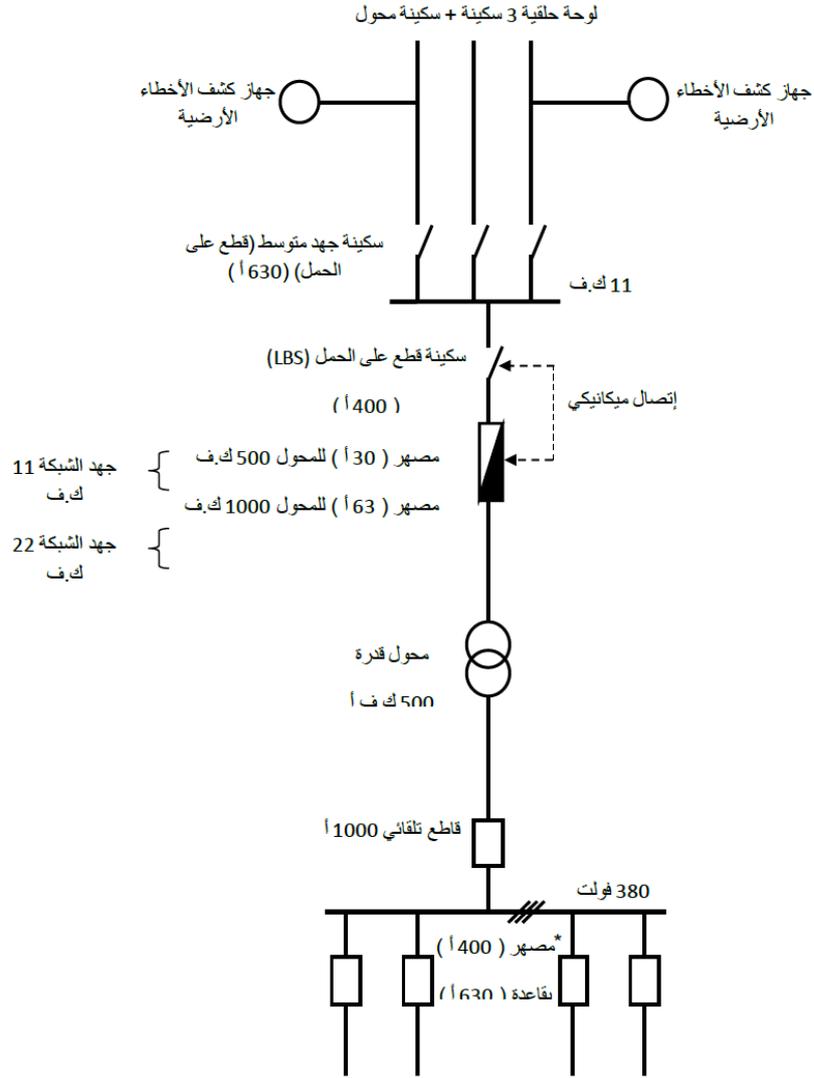
و يستخدم الكشك لتغذية مجمع سكنى أو غيره حيث تتصل الـ RMU من جهة بالموزع ، ومن الجهة الأخرى بوحدة RMU أخرى أو تتصل بخلية أخرى من خلايا الموزع ، ويتصل المفتاح الأوسط من الـ RMU بالمحول الذى يقوم بتحويل الجهد المتوسط 11kV إلى الجهد المنخفض 400 volt فى لوحة توزيع الجهد المنخفض MLVS ، و منها إلى الأحمال المراد تغذيتها .

وقدرات المحولات المستخدمة فى شبكة التوزيع هى :

25 kVA, 50 kVA, 100 kVA, 250 kVA, 400 kVA, 500 kVA,

630 kVA, 800 kVA, 1000 kVA, 1250 kVA, 1600 kVA, 2000 kVA

والشكل 10-19 يظهر SLD للمجموعة كلها ، وفى الجزء العلوى منه تظهر الـ RMU وعليها منظومة الحماية الخاصة بها ثم المحول ثم دوائر الخروج إلى أحمال الجهد المنخفض .



شكل 10-19 :

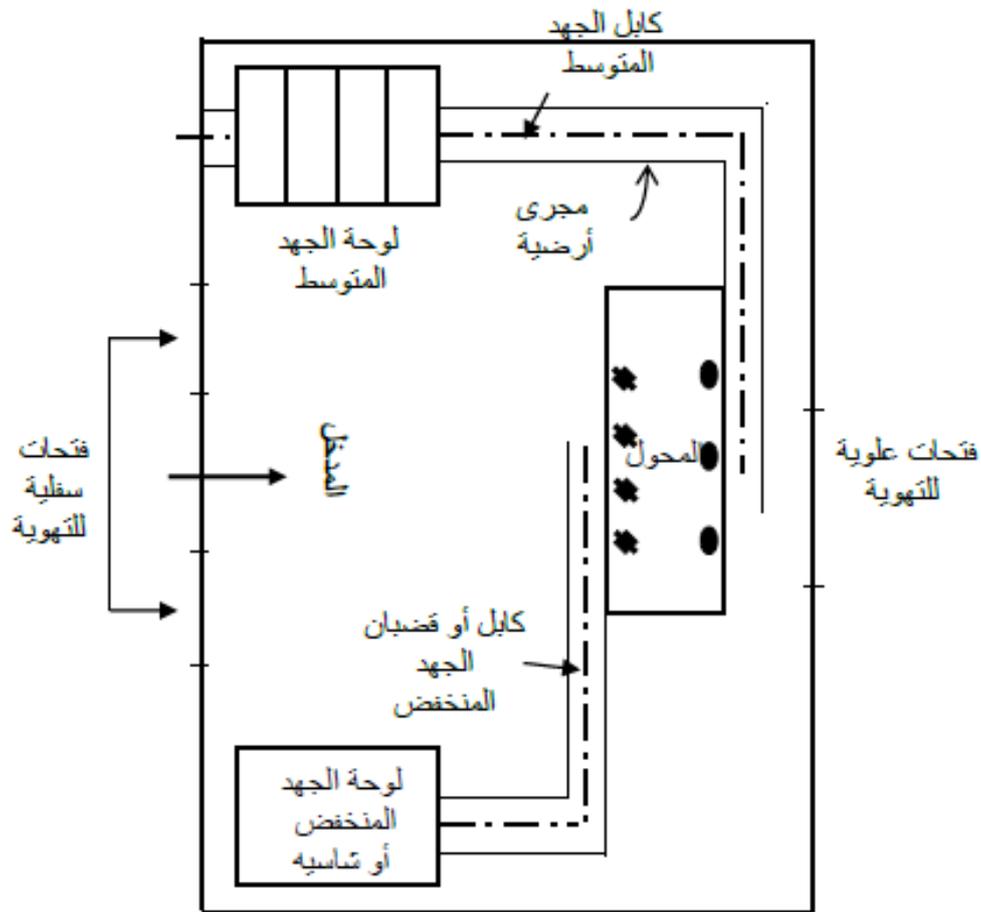
ويضاف إلى أحمال الجهد المنخفض بعض الدوائر الخاصة بالكشك نفسه وتسمى أحمال الـ single phase وهي :

- اللمبة للمساعدة في إنارة اللوحة في حالة حدوث عطل أو إجراء معاينة من قبل العامل في الموقع
- فيشه socket كمصدر كهربى في حالة الحاجة إلى استخدام جهاز قياس في الموقع أو غيره.
- شفاط مروحة (fan & hood) للتهوية

ومن ضمن دوائر الخروج توجد غالباً دائرة خاصة بتحسين معامل القدرة Power Factor حيث تتصل بمكثف يركب داخل لوحة الجهد المنخفض. وتختلف ساعات المكثفات على حسب قدرات المحول وكمثال على ذلك:

محول ١٠٠٠ ك ف أ	75 kVAR
محول ٥٠٠ ك ف أ	45 kVAR
محول ٣٠٠ ك ف أ	25 kVAR

والشكل 11-19 يظهر طريقة توزيع العناصر الثلاثة داخل كشك المحول



شكل 11-19 :

## العنصر الثالث في منظومة الجهد المتوسط:

## 5-19 الفيوزات في شبكات التوزيع

يمكن حماية العناصر الكهربائية بالكشك (المحول والمغذيات) إما باستخدام فيوزات أو باستخدام قواطع CB . وفى الغالب يكون المستخدم جهة الجهد المتوسط هو الفيوزات . وفيما يلي نبذة عن هذا العنصر لأهميته.

هو جهاز حماية يعمل كقاطع عندما يتجاوز التيار المار القيمة المسموح بها ، فيؤدى ارتفاع درجة حرارة المصهر إلى انصهاره بعد زمن محدد على حسب قيمة التيار المار . وهو يعتبر منظومة حماية متكاملة ، فهو يمكنه الإحساس بالتيارات العالية وبالتالي فهو يقوم مقام محول التيار ، وبعد ذلك يتخذ قرار بالفصل من تلقاء نفسه فيقوم بذلك مقام الريلاى الذى يتخذ قرار الفصل ، ويقوم فى نفس الوقت مقام القاطع الذى يقوم بعملية الفصل ذاتها .

والمصهرات أنواع : منها مصهرات الجهد المنخفض وتركب مع المغذيات الخارجة من المحول ، ومنها أيضا مصهرات الجهد المتوسط التى تركيب قبل محولات التوزيع وتسمى High Rupturing Capacity, HRC .

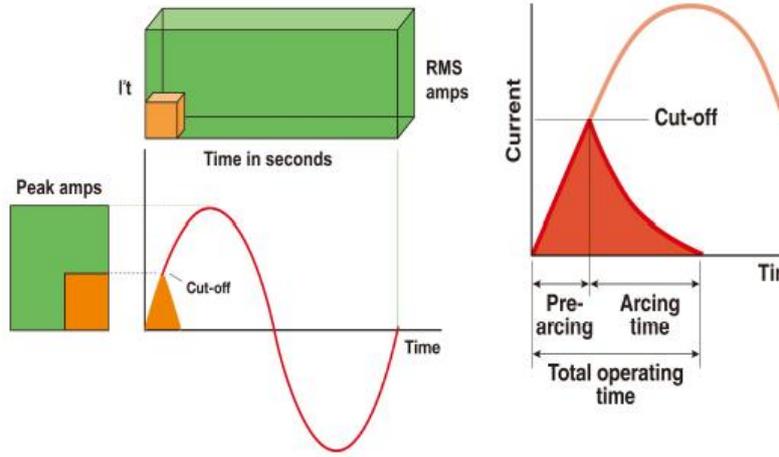
والفيوز فى الغالب يكون عبارة عن جسم من البلاستيك أو الخزف يحتوى على عنصر قابل للمصهر موصل بطرفى المصهر ويملىء المصهر بمسحوق الكوارتز لاستيعاب درجة الحرارة المتولدة أثناء الـ Short Current فلا يحدث له انفجار بسببها .

## 1-5-19 مميزات وعيوب الفيوز Fuse

يتميز الفيوز بسرعة القطع مقارنة بالـ CB حيث يفصل ربما فى ربع دورة (شكل 19-12) بينما يحتاج القاطع إلى دورة كاملة على الأقل ، وهذا يعنى أن الطاقة التى تمر (I<sup>2</sup>t) Energy let through خلال الدائرة ضئيلة جدا ولا تسبب مشاكل للعناصر المحمية خلافا للقاطع الذى ربما ينجح فى قطع التيار لكن بعد مرور وقت أطول تكون خلاله كل عناصر الدائرة قد تأثرت بدرجة ما .

لكن أهم عيوب الفيوزات أنه لا يوجد منها 3-phase وأنها تعمل فقط على 1-phase ، فإذا ركبت على الفازات الثلاثة وحدث عطل فإنها تفصل لكن ليس فى وقت واحد وقد تفصل فازه واحدة وتترك الاثنى الأخرين وهذا قد يسبب بعض المشاكل .

ونذكر هنا أن الفيوز يعمل فقط على مبدأ Overcurrent Protection ومن ثم لا يصلح إلا لهذه التطبيقات المحددة.



شكل 12-19 :

و من عيوب استخدام الفيوز عموماً لغرض الحماية أنه لا يتعامل بسرعة مع الخطأ الأرضي وكذلك لا يفرق بين الأعطال العابرة والأعطال المستمرة. ولذلك لا يفضل استخدام الفيوز لحماية الخطوط الهوائية خاصة أن زمن إعادة التيار مرتفع ، لذلك فإن هذه الفيوزات تستخدم فقط لحماية محولات التوزيع سواء المعلقة على الأعمدة أو الموجودة على الأرض.

### 2-5-19 أرقام هامة لتوصيف الفيوز

القيمة المكتوبة على الفيوز هي Rated value وتمثل قيمة التيار الذي يستطيع تحمله ولا ينصهر عنده أبداً. و يبدأ الفيوز في الانصهار إذا تجاوز التيار المار خلاله قيمة ما يسمى تيار الصهر Fusing current ، والذي غالباً تكون نسبته إلى التيار المقنن تتراوح بين 1.5-4 (تسمى بالـ Fusing Factor). بمعنى أن الفيوز 10A لن يبدأ في الانصهار قبل مرور تيار قدره من 15A-40A تقريباً خلاله. ويمكن للسهولة استخدام الجدول 1-19 ، حيث تجد هذه النقطة واضحة تماماً ، فأمام كل Rated current ستجد قيمة اسمها min breaking Current ، فالفيوز 63 أمبير مثلاً لن ينصهر إلا إذا مر خلاله 200 أمبير على الأقل طبقاً لما هو مكتوب بالجدول.

وهناك رقم هام أيضا هو الـ Rated breaking current وهي الخاصة بتحمل أقصى تيار قصر قبل أن ينفجر الفيوز. وهو يساوي 40kA للفيوز السابق.

جدول 1-19

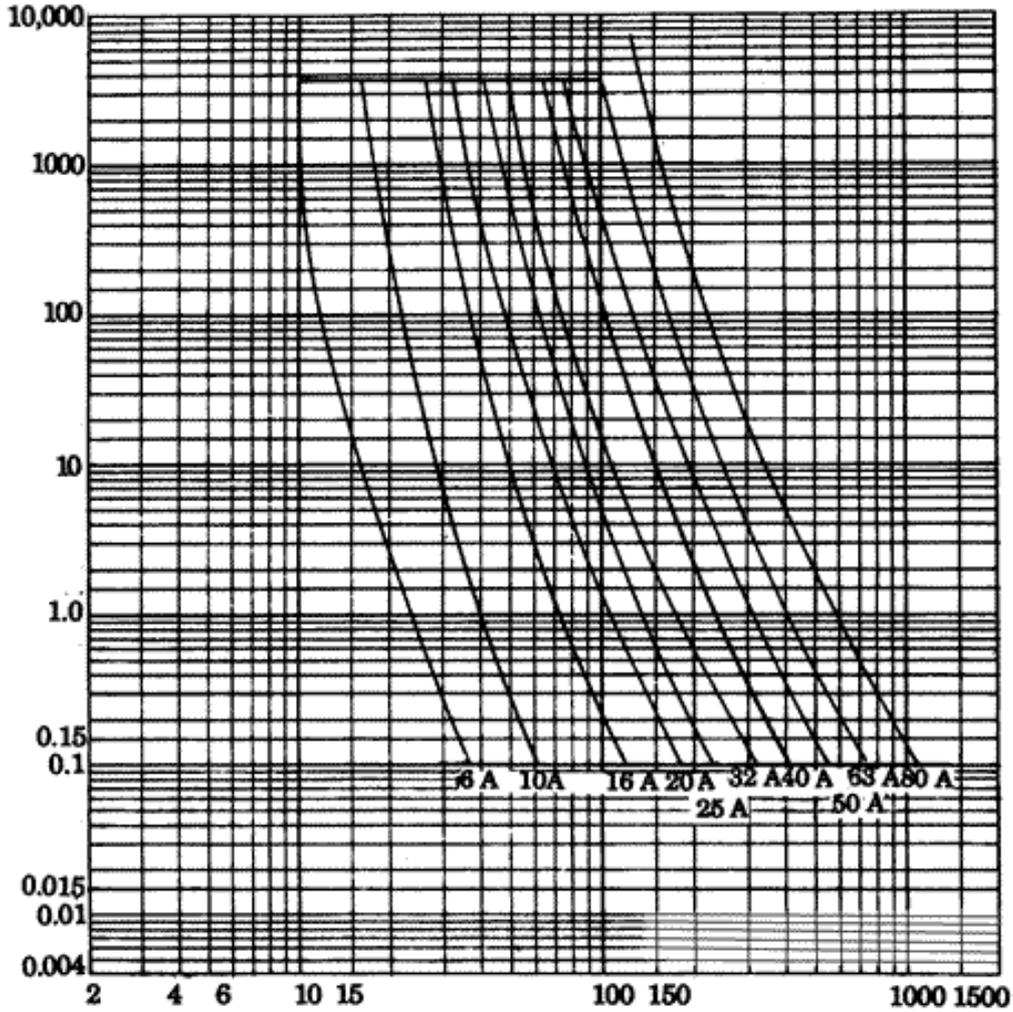
Fuse-link Type	Rated Voltage	Rated current	Rated Breaking Current	Min Breaking Current	Switching voltage	Resis-tance	Weight	Length
	$U_n$	$I_n$	$I_{ws}$	$I_{min}$	$U_m$	$R \pm 10\%$		L
	kV	A	kA	A	kV	m $\Omega$	kg	mm
BWMW-7.2/3.15	7.2	3.15	40	6	<20	650	1.3	192-1
BWMW-7.2/6.3		6.3		19.5		195		
BWMW-7.2/10		10		30		130		
BWMW-7.2/16		16		48		64		
BWMW-7.2/20		20		54		52		
BWMW-7.2/25		25		67		39		
BWMW-7.2/31.5		31.5		80		31	2.6	
BWMW-7.2/40		40		94		25		
BWMW-7.2/56		56		117		16	3.6	
BWMW-7.2/63 -1		63		200		15.5		
BWMW-7.2/80 -1		80		280		11		
BWMW-7.2/100 -1		100		400		8.2		
BWMW-7.2/63		63		150		13.4	5.2	
BWMW-7.2/80		80		200		12.5		
BWMW-7.2/100		100		330		9		
BWMW-12/3.15		12		3.15		46	7.4	<30
BWMW-12/6.3	63		17.8	300				
BWMW-12/10	10		30	200				
BWMW-12/16	16		50	100				
BWMW-12/20	20		64	76				
BWMW-12/25	25		70.6	51				
BWMW-12/31.5	31.5		78	45.5	3.6			
BWMW-12/40	40		88	37.2				
BWMW-12/56	56		172	22.5	6.1			
BWMW-12/63	63		188	21.6				
BWMW-12/80	80		355	16.7				
BWMW-12/100	100		444	12				

أما زمن فصل الفيوز فيتوقف على مدى الارتفاع في شدة تيار العطل وكلما زاد تيار العطل قل زمن الفصل ، ويمكن معرفته من منحنيات "الزمن- التيار" الموجودة بالشكل 13-19 ، فزمن الانصهار لفيوز 16 أمبير مثلا إذا مر خلاله تيار قدره 100 أمبير يساوي 0.2 sec طبقا لهذه المنحنيات . مع ملاحظة أن هناك دائما قيمتين هامتين ترتبطان بزمن الفصل ويظهران في الشكل السابق:

- الزمن الأول هو pre-arcing time ، ويسمى أيضا بزمن الانصهار Melting time ، وهو الزمن من بداية ارتفاع التيار وحتى حدوث الشرارة .

- أما الزمن الثانى فهو زمن استمرار الشرارة arcing time .

وأهمية تعريف هذين الزمنين يكمن فى أن اختيار مادة المنصهر تتوقف على مجال استخدامه و على الزمن المسموح به لفصل الدائرة بالفيزوز ، فكل مادة لها زمن فصل مختلف وبالتالي لها تطبيقات مختلفة.



شكل 19- 13 :

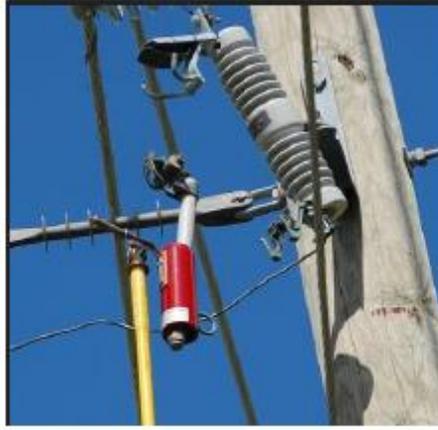
### 19-5-3 أنواع الفيوزات

#### 1- مصهرات الطرد

ويستخدم هذا النوع من الفيوزات في الأماكن الخارجية وخاصة لحماية الخطوط الهوائية والمحولات المركبة على الأعمدة (الشبكات الهوائية هي الأكثر انتشاراً في أمريكا وكندا من الكابلات) . وتتكون من عنصر صهر داخل أنبوبة لها نهاية مفتوحة ، وعند انصهار عنصر المنصهر يمتد القوس الكهربائي بين طرفي المنصهر ، ونتيجة لدرجة الحرارة العالية لهذا القوس تتبخر مادة الأنبوبة ، مما يؤدي إلى انبعاث كمية هائلة من الغازات التي ترفع الضغط داخلها مما يعمل على إطفاء القوس الكهربائي ومنع إعادة اشتعاله .

ويتم طرد الغازات بشدة إلى الجو من الطرف الأعلى للأنبوبة حيث تستغل شدة اندفاع الغازات في إسقاط الفيوز بأكمله إلى أسفل بحيث يعطي دليلاً مرئياً على انصهاره . ولا يمكن بطبيعة الحال استخدام هذا النوع داخل المباني بسبب الإزعاج وكمية الغازات الهائلة المنبعثة عند الانصهار .

و الشكل 14-19 يوضح هذا النوع من المصهرات.



شكل 14-19 :

## 2- فيوزات الجهد العالي "الخرطوشة"

وأشهر استخداماتها أنها تتركب بداخل الوحدة الحلقية RMU لحماية المحول وتكون بسعة قطع مختلفة وفقاً لقدرة المحول. وهذا النوع من الفيوز يوضع بداخل الزيت ويكون الفيوز في وضع سليم ما لم يخرج أي مسمار من إحدى الجوانب أما لو خرج مسمار فيدل على أن الفيوز قد احترق كما الشكل 15-19 ، ويجب أن يتركب الفيوز في الاتجاه الصحيح حتى يضمن عند حدوث العطل أن يخرج المسمار من الفيوز ويصدم بميكانيزم داخلي يعمل على فصل المحول.



شكل 15-19

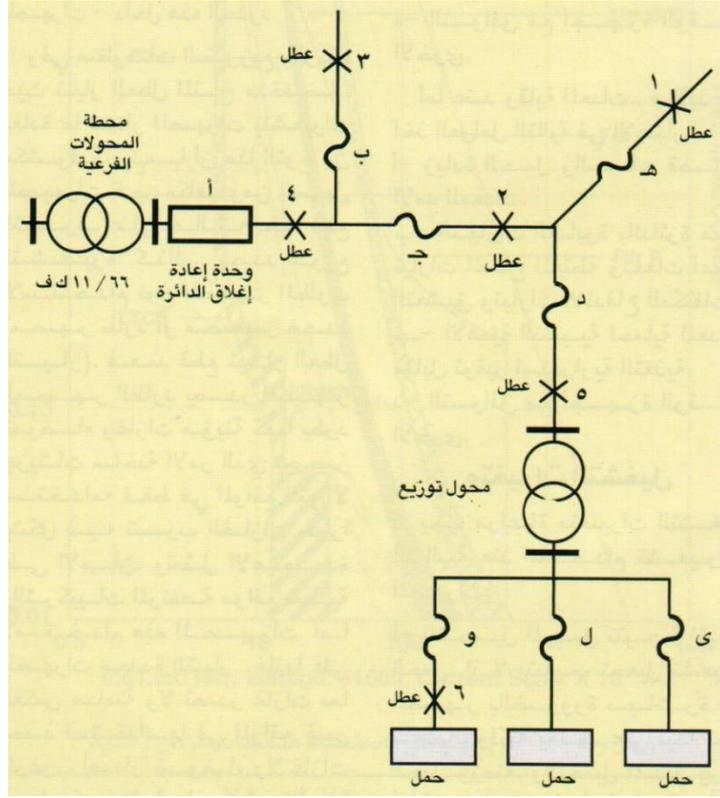
### 19-5-4 قواعد عامة لاختيار الفيوز المناسب

1. يجب أن يكون التيار المقنن للفيوز أكبر من تيار الحمل الأقصى الذي سيمر خلاله. وإلا فإن الفيوز يمكن أن يسخن تحت الظروف الطبيعية وينصهر دون وجود عطل. (معظم أنواع شعيرات الفيوزات المصنوعة من القصدير Type K and T يكون تيار الصهر فيها يساوي تقريبا لـ 150% من تيار الفيوز المقنن).
2. يجب أن يكون الجهد مناسباً للشبكة التي سيركب فيها.
3. يجب أن تكون سعة القطع Short circuit capacity أكبر من أعلى تيار عطل متوقع مروره (طبقاً لحسابات الـ Short Circuit) وإلا سينفجر الفيوز مع الأعطال العالية.
4. يجب التأكد من أن الفيوز المختار لن يتأثر بقيم التيارات العالية الطبيعية مثل تيار بدء المحركات أو تيار الاندفاع الـ Inrush في المحولات.
5. يجب أن تكون القيمة المختارة لتيار الفيوز متناسقة Coordinated مع الفيوزات التي تليها والتي تسبقها على التوالي.

### 19-5-5 تنسيق الفيوزات في شبكات التوزيع

عند عمل التنسيق Coordination بين الفيوزات المركبة على التوالي فإننا نستخدم مصطلح فيوز الواقي Protective Fuse للفيوز الأقرب إلى العطل ، بينما نستخدم مصطلح الفيوز المساند Backup Fuse لذلك الفيوز الذي يليه في اتجاه مصدر التغذية. وبالطبع يجب أن يكون زمن إزالة العطل في الفيوز الواقي أصغر من الزمن الذي يستغرقه الفيوز المساند (غالباً لا يزيد عن 75% من زمن الفيوز المساند).

والهدف الأساسي من عملية التنسيق هو ضمان فصل أصغر قدر ممكن من الشبكة بما يحقق فصل العطل مع استمرارية الخدمة لأكبر عدد ممكن من المستخدمين. ومن خلال دراسة الشكل 19-16 سنقدم نموذجاً لعملية تنسيق الفيوزات واختيار قيمها.



شكل 16-19 :

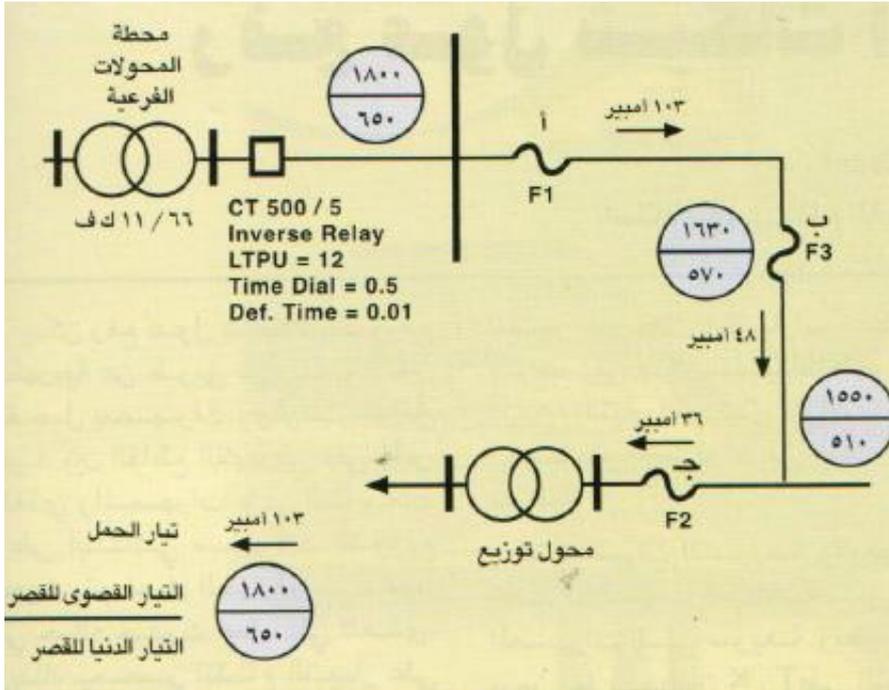
فالشبكة في هذا الشكل تبدأ بمحطة فرعية والحماية الرئيسية أمامها تشتمل على Recloser وهذا معتاد في هذه الشبكات بسبب كثرة الأعطال التي تصنف على أنها transient faults ، ثم تبدأ الشبكة في الامتداد والتفرع كما في الشكل وفي بداية كل تفرعة يوجد فيوز حماية ( ب ، ج ، ه ، د ) ثم هناك فيوزات على الأحمال نفسها ( ي ، ل ، و ) .

لاحظ أن الجهاز أ يجب أن يتوافق مع الفيوز ب ويتوافق مع ج ، وأن الفيوز ج يجب أن يتوافق مع ( ه ، د ) ، والفيوز د يجب أن يتوافق مع الفيوزات ( ي ، ل ، و ) الموجودة عند الأحمال. فماذا يعني ذلك؟ هذا يعني أنه في حالة حدوث عطل عند النقطة 1 ، فإن الفيوز ه (الفيوز الواقى) يجب أن يفصل قبل الفيوز ج (الذى يعتبر فيوزا مساندا في هذه الحالة) . أما في حالة العطل عند النقطة 2 ، فإن الفيوز ج (الفيوز الواقى في هذه الحالة) يجب أن يفصل قبل الجهاز أ . وهكذا في حالة العطل 3 يفصل الفيوز ب قبل أ ، وفي حالة العطل 6 يفصل الفيوز و قبل الفيوز د . إلخ.

وحتى يتم تحقيق هذه المتطلبات فإننا نحتاج إلى عمل خمس خطوات:

- **الخطوة الأولى:** إجراء دراسة مفصلة عن حسابات الـ Short Circuit بالشبكة ، ويمكن أن يتم ذلك يدويا فى الشبكات الصغيرة ، أو باستخدام البرامج الجاهزة مثل الـ ETAP مثلا.
- **الخطوة الثانية:** إجراء دراسة عن الـ Load Flow أيضا باستخدام الـ ETAP لتحديد قيم التيارات المارة فى كل تفرعة.

وبناء على القيم التى سنحصل عليها من الدراستين السابقتين يمكن اختيار قيم الفيوزات التى تحقق القواعد العامة لاختيار الفيوزات التى ذكرناها فى البند السابق ، والتى تحقق أيضا التوافق بين الفيوزات المتواليه. وحيث أن هذه الحسابات على الـ ETAP تقع خارج نطاق الكتاب ، فسأكتفى بعرض نتائج شبكة صغيرة كما فى الشكل 17-19 ، حيث يظهر عند كل فيوز قيمة أكبر وأقل تيار متوقع عند حدوث الـ Short Circuit (داخل دائرة) ، كما يظهر على الفروع قيمة التيار المقنن الذى يمر فى الظروف الطبيعية (فوق سهم).



شكل 17-19 :

ومن خلال هاتين القيمتين اللتين ظهرتا فى الشكل 17-19 سيتم اختيار وتنسيق قيم الفيوزات بإحدى طريقتين:

- إما باستخدام جداول التوافق للفيوزات التى تنتجها كل شركة ،

- أو باستخدام المنحنيات الخاصة بهذه الفيوزات كما سيتم شرحه تفصيلا فيما يلي.

### الطريقة الأولى : باستخدام جداول التوافق

هذه الجداول يتم استنباطها من منحنيات الزمن/التيار التي أشرنا إليها سابقا في الشكل 19-13. وكل جدول من جداول التوافق التالية يعطى الحدود التي يمكن أن يتوافق فيها كل فيوز واطى مع الفيوز المساند (الذى يليه). على سبيل المثال فى الجدول 19-2 نجد أن الفيوز الواقى من النوع K له قيم تبدأ من 6A وحتى 140A ، بينما الفيوز المساند له من نفس النوع K له قيم تبدأ من 8A وحتى 200A . فكيف نضمن التوافق بينهما طبقا لهذا الجدول؟

### جدول 19-2 :

تشعيرة المصهر المساند														تشعيرة المصهر الواقى
200 K	140 K	100 K	80 K	65 K	50 K	40 K	30 K	25 K	20 K	15 K	12 K	10 K	8 K	
أقصى تيار عطل يحمي عنده المصهر A المصهر B (أمبير)														
9200	5800	3900	2800	2200	1700	1340	1060	840	650	510	350	190		6 K
9200	5800	3900	2800	2200	1700	1340	1060	840	650	440	210			8 K
9200	5800	3900	2800	2200	1700	1340	1060	840	540	300				10 K
9200	5800	3900	2800	2200	1700	1340	1050	710	540	300				12 K
9200	5800	3900	2800	2200	1700	1340	870	430						15 K
9200	5800	3900	2800	2200	1700	1100	500							20 K
9200	5800	3900	2800	2200	1350	660								25 K
9200	5800	3900	2800	1700	850									30 K
9200	5800	3900	2200	1100										40 K
9200	5800	3500	1450											50 K
9200	5800	2400												65 K
9200	4500													80 K
9100	2000													100 K
4000														140 K

خذ على سبيل المثال الفيوز 20K (الرمز K هنا لا يعنى كيلو وإنما يعنى نوع Type من أنواع الفيوزات) إذا استخدم كفيوز واطى ، فإن الفيوز المساند له يبدأ من 30K ويمكن أن يستمر التوافق بينهما طالما أن تيار العطل أقل من 500 أمبير (نقصد بالتوافق هنا أن الفيوز الواقى يفصل قبل الفيوز المساند) ، بينما يمكن أن نستخدم الفيوز 40K ويستمر التوافق طالما تيار العطل أقل من 1100 أمبير وهكذا.

لاحظ أن هناك أنواعا مختلفة من الفيوزات حسب المادة المستخدمة فى التشعيرة ، فهناك الفيوزات من النوع K الواردة فى الجدول السابق ، وهى فيوزات سريعة الفصل وهناك فيوزات من النوع T وهى فيوزات بطيئة الفصل كما فى الجدول 19-3 ، حيث يمكن أن ترى أن الفيوز 20T (أى 20 أمبير من النوع T ) يتوافق مع الفيوز 30T فى مدى يصل إلى 990 أمبير. لاحظ هنا أنه أبطأ بكثير من الفيوز 20K الذى يتوافق مع 30K حتى 500 أمبير فقط.

## جدول 19-3 :

تشعيرة المصهر المساند													تشعيرة المصهر الواقى	
200 T	140 T	100 T	80 T	65 T	50 T	40 T	30 T	25 T	20 T	15 T	12 T	10 T		8 T
أقصى تيار عطل يحمي عنده المصهر A المصهر B (أمبير)														
15200	9700	6100	5000	4100	3200	2540	2000	1500	1200	920	680	350		6 T
15200	9700	6100	5000	4100	3200	2540	2000	1500	1200	800	375			8 T
15200	9700	6100	5000	4100	3200	2540	2000	1500	1100	530				10 T
15200	9700	6100	5000	4100	3200	2540	2000	1280	680					12 T
15200	9700	6100	5000	4100	3200	2500	1700	730						15 T
15200	9700	6100	5000	4100	3200	2100	990							20 T
15200	9700	6100	5000	4100	2600	1400								25 T
15200	9700	6100	5000	3100	1500									30 T
15200	9700	6100	3800	1700										40 T
15200	9700	4400	1750											50 T
15200	9700	2200												65 T
15200	7200													80 T
13800	4000													100 T
7500														140 T

فإذا طبقنا هذا الكلام على الشبكة التي ظهرت في الشكل 19-17 ، نجد أن الفيوز ج مثلا يمكن أن نختار له قيمة تساوى 40T ، وهي قيمة أعلى من التيار الطبيعي خلاله ( 36 أمبير ) وفي هذه الحالة فإن الفيوز ب لكى يتوافق معه يجب أن يكون مساويا 80T وهنا سيكون التوافق مضمونا فى مدى يصل إلى 3800 أمبير ، وحيث أن أقصى قصر يمر بالفيوز ب هو 1630 أمبير فيكون الاختيار مناسباً .

لاحظ أننا لو اخترنا الفيوز 65T فإنه سيكون أيضا متوافقا من الفيوز 40T ولكن المدى يصل إلى 1700 أمبير فقط وهو قريب جدا من قيمة الـ Short Circuit ( 1630 أمبير ) لذا يفضل اختيار القيمة الأعلى .

**الطريقة الثانية : باستخدام منحنيات الزمن/التيار**

نفس النتائج السابقة يمكن الوصول إليها باستخدام منحنى الزمن/التيار لكل فيوز كما فى الشكل 19-18 .

وهذه الطريقة تحتاج أيضا إلى الخطوتين السابقتين (حسابات الـ SC وحسابات Load Flow ) فى البداية كما سبق . ثم نستكمل الخطوات كما يلي :

**الخطوة الثالثة : تحديد نقط الحماية الخاصة بالمحول ، وتشمل نقطتين :**

نقطة الـ ANSI التي تمثل أقصى تيار قصر يمكن أن يمر بالمحول ، وهو بالطبع التيار الناشئ عن عطل على أطراف المحول مباشرة ، ويمكن حسابه طبقا للمواصفات من المعادلة التالية:

$$I_{ANSI} = \frac{I_{FL}}{X_{PU}} \times 0.58$$

وتتص المواصفات على أن المحول يجب أن يتحمل هذا التيار لمدة 3.75 sec ، أما المحولات الأكبر فإن الفترة الزمنية تصل إلى 4 ثانية . والهدف من تحديد هذه النقطة هو التأكد من أن جميع منحنيات أجهزة الحماية ستكون جميعا أسفل هذه النقطة (بمعنى أن تفصل أجهزة الحماية قبل أن يصل تيار العطل إلى هذه القيمة وهذه المدة والتي لا يمكن للمحول أن يتحمل أكثر منهما).

مع ملاحظة أن بعض الشركات تعطي منحنى خاص لكل معدة يسمى منحنى الـ Damage Curve بدلا من حساب هذه النقطة ، فإذا تم استخدام هذا المنحنى فعندئذ يجب أن تكون كافة منحنيات أجهزة الوقاية تقع أسفله لنفس السبب السابق.

نقطة تيار الـ Inrush current وهو التيار المرتفع الذى يمر بالجانب الابتدائى من المحول عند بداية إدخال المحول إلى الخدمة ، وقد تصل قيمته إلى 10 أمثال التيار الطبيعى ، وحيث أنه مرتفع إلى هذه الدرجة فيجب أن نضمن أن جهاز الوقاية المختص بالجانب الابتدائى من المحول لن يتأثر بهذا التيار ، بمعنى أن المنحنى الخاص به سيكون أعلى هذه النقطة .

وبعد تحديد القيم الهامة السابقة يتم عمل التنسيق بين منحنيات أجهزة الوقاية المختلفة برسمها على ورق Log-Log ، واختيار مقياس رسم مناسب .

والنقطة الهامة التى يجب أن نشير لها هنا أن لدينا أجزاء من الشبكة تقع فى نطاق الجهد المنخفض للمحول وأجزاء أخرى تقع فى نطاق الجهد المرتفع ، وقد يكون لدينا أكثر من محول متتالى فيكون لدينا ثلاثة مستويات للجهد ، وفى كل الأحوال يجب أن يتم توقيع جميع القيم فى ورقة الرسم منسوبة إلى جهد مرجعى واحد Reference Voltage (وليكن الجهد المنخفض مثلا) ، وتستخدم الـ Turns Ratio للمحول لتحويل قيمة أى تيار إلى ما يكافئها فى ناحية الجهد المرجعى الذى تم اختياره.

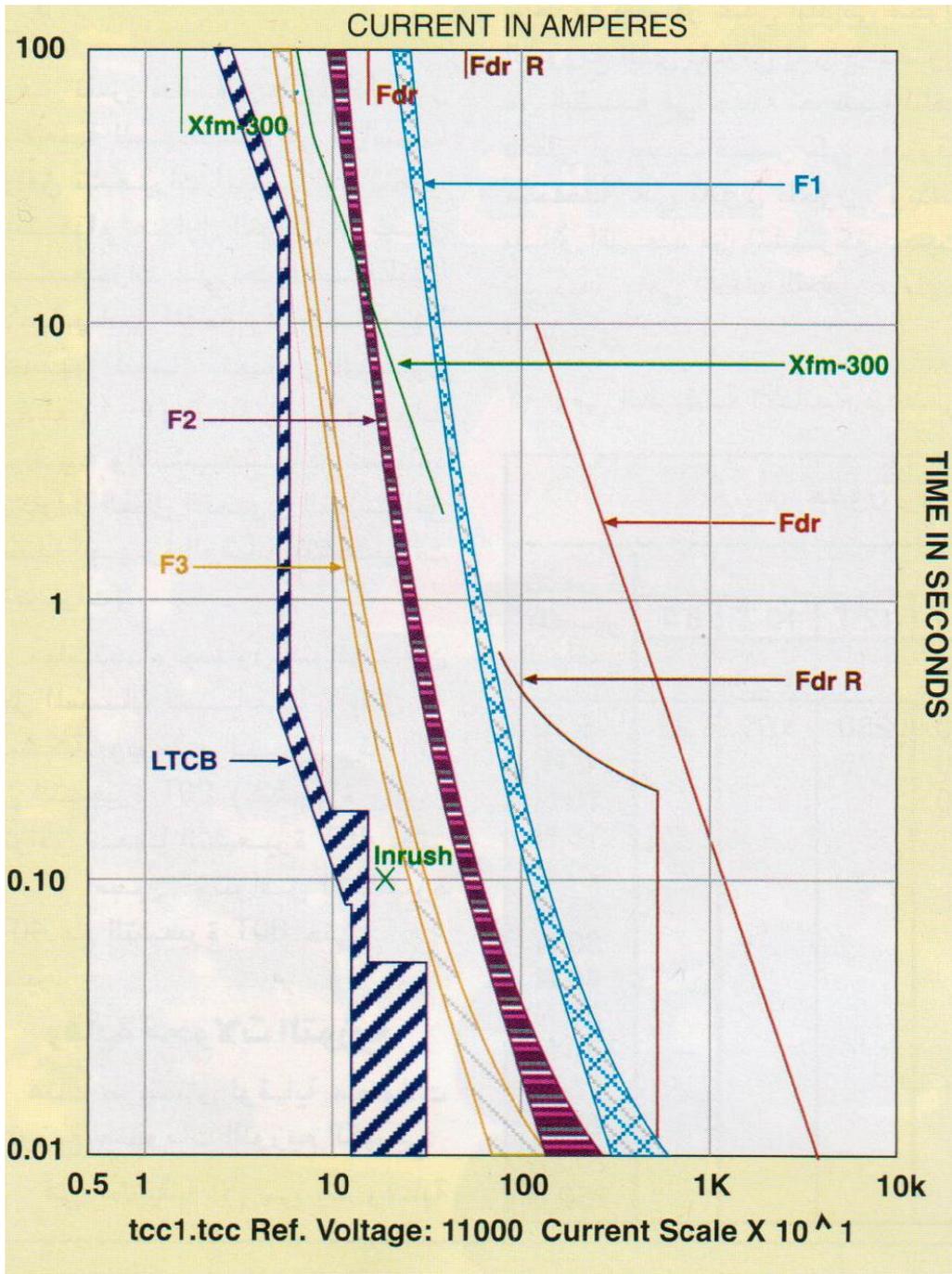
**الخطوة الرابعة :** توقيع النقط الثابتة التى أشرنا إليها فى الخطوة الثالثة على الخريطة منسوبة لجهد الخريطة المرجعى.

**الخطوة الخامسة :** رسم المنحنيات الخاصة بأجهزة الوقاية على الخريطة والتأكد من وجود التوافق بينها. وعند رسم هذه المنحنيات يفضل الآتى:

- يفضل دائما أن تبدأ باختيار المنحنى الخاص بجهاز الحماية الأخير ( الأقرب للحمل) وأن يكون هذا المنحنى جهة اليسار قدر المستطاع على الخريطة ليفسح المجال لرسم بقية المنحنيات التى تليه.

- ثم بعده مباشرة يفضل أن تختار المنحنى لأبعد جهاز حماية ( الأقرب للمصدر ) ، ويجب التأكد أنه يقع أسفل منحنى الـ Damage curve للمحول عند المصدر ، لضمان حماية المحول تحت كل ظروف الأعطال .
- ثم بعد ذلك سيتم رسم بقية المنحنيات بينهما .

والشكل 18-19 يعطى نموذجا لنفس الشبكة التي درسناها فى الطريقة الأولى (باستخدام الجداول).



شكل 18-19 :

## العنصر الرابع في منظومة الجهد المتوسط:

## 6-19 عناصر منظومة الجهد المتوسط : RMU

وتسمى Ring Main Unit, RMU ، وهي مكونة من ثلاثة أقسام ، يقوم القسم الأول منها باستلام الجهد 11 kV القادم من لوحات التوزيع (الموزعات) ، والقسم الثاني يقوم بتغذية المحول ، أما القسم الثالث فيتصل بوحدة حلقيّة أخرى لتغذية محول آخر كما في الشكل 19-22. ومن هنا أصبحت وسيلة التحكم في المحول من فصل وتشغيل بجوار المحول مباشرة كما تم تقليل أطوال الكابلات لكن لا تنس أن مقاطع الكابلات قد تغيرت أيضا وذلك لأن الكابل الواحد صار مسئولاً عن تغذية عدد من محولات التوزيع مربوطة مع بعض من خلال الوحدات الحلقيّة الأخرى.

شكل 19-22 :



## العنصر الخامس في منظومة الجهد المتوسط:

## 7-19 صناديق التوزيع في شبكة الجهد المنخفض :

ويطلق عليها المغذيات الثانوية Secondary هي التي تنقل القدرة من محولات التوزيع إلى نقاط الاستهلاك. وشبكة توزيع الجهد المنخفض تتضمن:

- خطوط هوائية (كما في الريف) أو كابلات أرضية (في المدن) .
- أكشاك توزيع
- لوحات توزيع عمومية وفرعية داخل المباني وخارجها.

وهذه اللوحات (شكل 19-23) تفرض ظروف العمل وضعها في العراء في الأجواء المفتوحة لذا فإن هذا النوع من اللوحات يراعى فيه حماية اللوحة ومعدات الداخلية من العوامل البيئية فيتم تصنيع هذه اللوحات بإحكام وتكون مدهونة بدهانات خاصة تقاوم العوامل الجوية بجميع ظروفها وتكون مقاومة لتسرب الأتربة ومقاومة لتسرب المياه. ويتم تركيب تلك اللوحات على قواعد لا تقل عن 0.4 متر حتى يسهل تركيب الكابلات من أسفل حتى يسهل التعامل مع أجهزة الفصل بها ويتم إدخال الكابلات إلى تلك اللوحات من خلال جالاند وذلك لمنع تسرب الحشرات إلى داخل اللوحات.



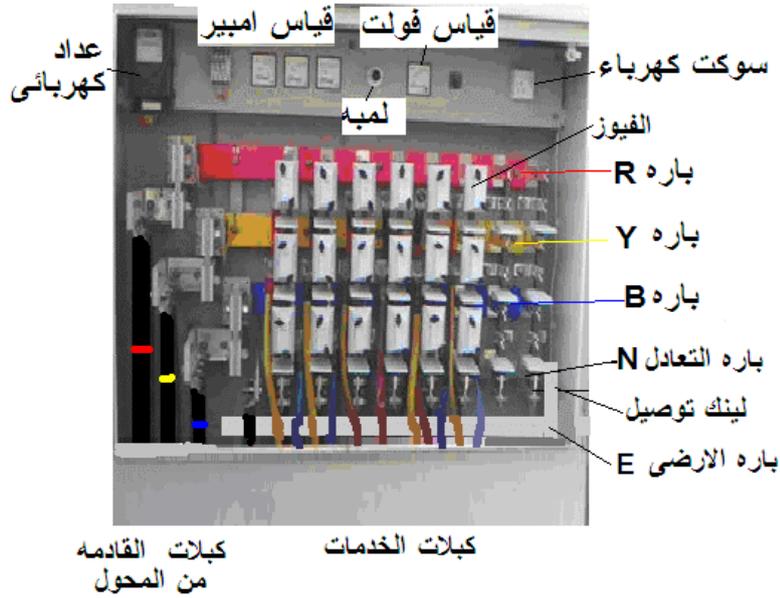
شكل 19-23 :

وفي معظم دول الخليج يكون لكل محول صندوق توزيع واحد يسمى Feeder Pillar بعدد مخارج يتناسب مع قدرة المحول كما في الشكل 19-24 بسبب ارتفاع أحمال الفيالات والسكن عموماً هناك .



شكل 19-24 :

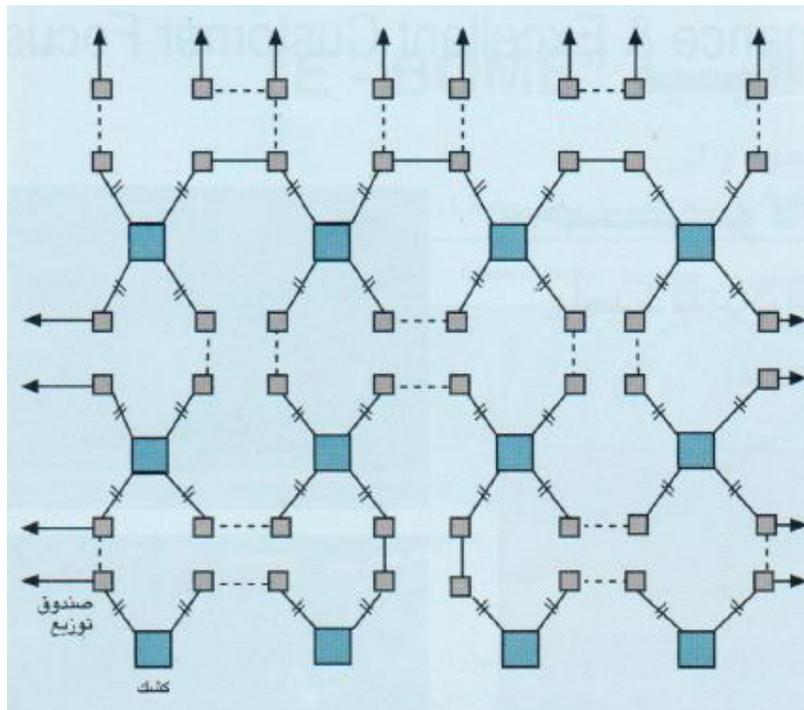
أما في مصر فيمكن أن يتصل بالمحول من 4-6 أكشاك توزيع (معروفة بكشك سيمنس). والشكل 19-25 يظهر نموذج لأحد أكشاك التوزيع الخاصة بالجهد المنخفض وكل صف رأسي تظهر فيه الثلاثة فيوزات المخصصة لحماية ال 3-Phase الخاصة بأحد كابلات الخروج أما كابل التغذية فموجود يسار الصورة.



شكل 19-25 :

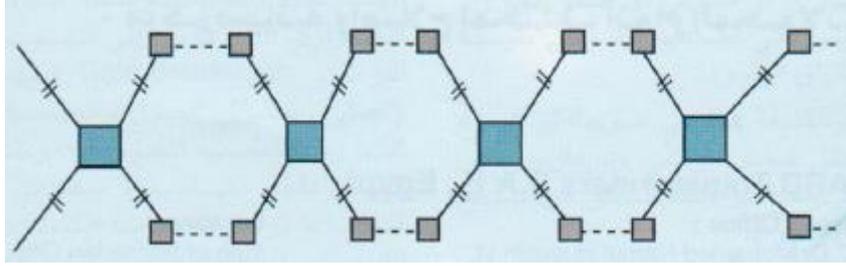
## 1-7-19 تنسيق صناديق التوزيع

في الشكل 19-26 يمثل المحول بمربع أزرق في المنتصف ، يتصل به أربعة أكشاك توزيع جهد منخفض (مربعات صغيرة) ، لاحظ أن كل صندوق من صناديق المحول الأربعة يتصل بصندوق تابع لمحول آخر من خلال خط منقط (وهذا يعني أن هذا الكابل الإضافي يكون مفتوحا في الظروف الطبيعية Normally Open). ويمكن من الشكل أن تكتشف أن بهذه الطريقة يتم تأمين خروج أى محول بنسبة مئة في المئة ، بمعنى لو خرج أى محول بسبب عطل مثلا فإن صناديقه الأربعة ستوزع على أربعة محولات مختلفة ، ويصبح كل محول محملا بصندوق واحد إضافي فقط.



شكل 19-26 :

أما في الشكل 19-27 فالأحمال يتم تأمينها بنسبة 50% فقط.



شكل 19-27

وبالتبع فالفيصل فى الاختيار سيكون لأهمية الأحمال والميزانية المتاحة.

# 20

## أنظمة التغذية في الجهد المتوسط

### MV Feeding Systems

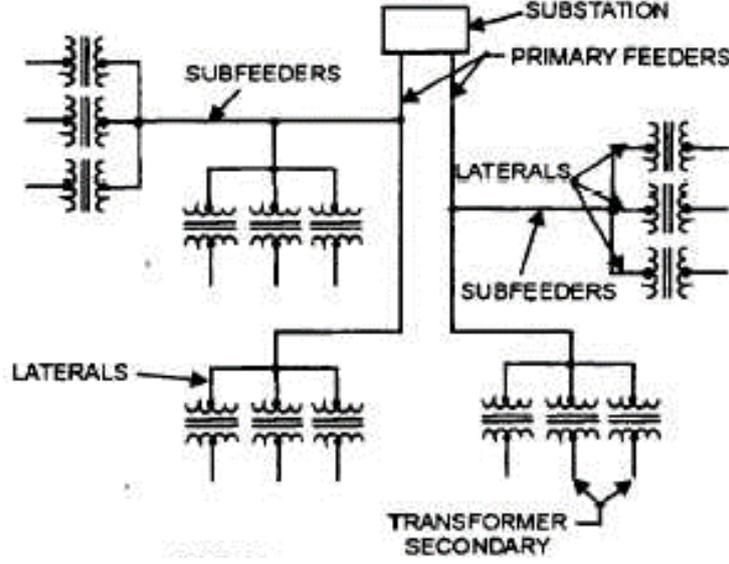
وظيفة المغذيات أن تصل بين محطة التوزيع الفرعية (الموزع) وبين محولات التوزيع المنتشرة في أجزاء المدينة المختلفة ، بمعنى آخر أنها تمثل شبكة التوزيع داخل مدينة أو قرية أو مجموعة قرى. و منظومة التوزيع هذه تقع بالكامل في منطقة الجهد المتوسط .

## 1-20 أشكال منظومة التغذية

أشكال التغذية في شبكات الجهد المتوسط والمنخفض تتنوع على النحو التالي:

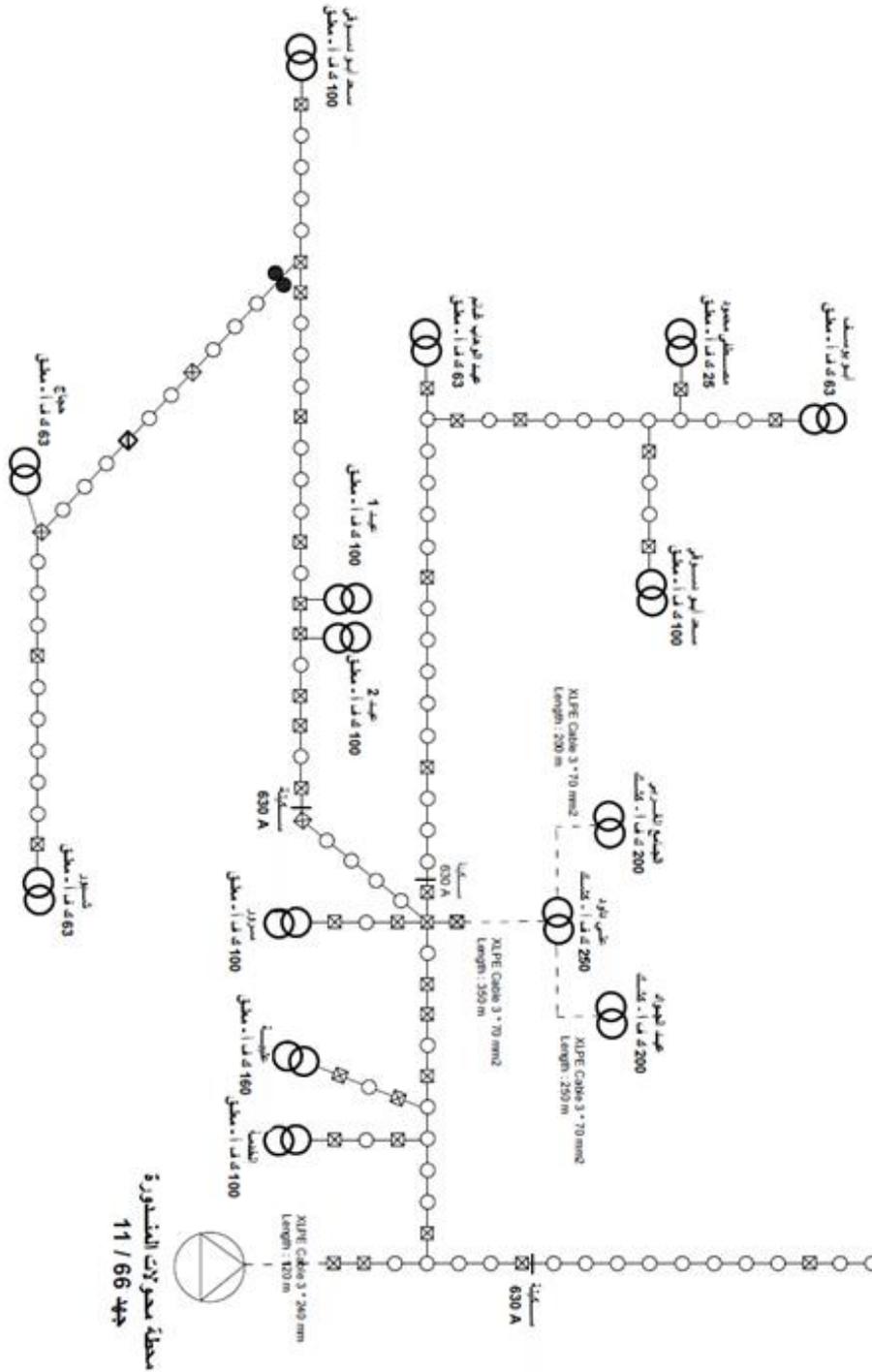
### 1-1-20 التغذية الشعاعية Radial System

يعتبر (Radial Distribution System) أبسط نظام توزيع وأوسع الأنظمة انتشارا في منظومات التوزيع بالقرى والأرياف ، وفيه تكون التغذية دائما من جهة واحدة فقط كما في الشكل 1-20 بينما الأحمال في الجهة الأخرى. ويبدأ هذا النظام من محطة محولات رئيسية Substation (محطة المندورة مثلا في الشبكة المفصلة ) ، تخرج منها مجموعة من المغذيات الرئيسية Primary Feeders ، ثم تتفرع منه فرعيات أخرى sub-feeders وهي التي تتصل بمحولات التوزيع الفرعية Secondary transformer ، من خلال laterals خاصة بكل محول توزيع فرعية. وغالبا في شبكات الأرياف في مصر تكون هذه المحولات ذات قدرات صغيرة في حدود عدة مئات من الـ KVA.



شكل 1-20

وتتصل هذه الفرعيات بالمغذي الرئيسي عن طريق مصهرات (Fuses) حتى لا يتسبب حدوث أي خطأ في الفرعيات إلى فصل المغذي الرئيسي بالكامل كما في الشكل 2-20 ، وإن كان الواقع يقول أن هذا الاحتمال وارد جدا ، فقد لا يشعر الفيوز بالعطل ومن ثم تقع مسئولية فصل هذا العطل على القاطع الرئيسي في المحطة ومن ثم تخرج جميع المحولات الفرعية المركبة على هذا المغذي.

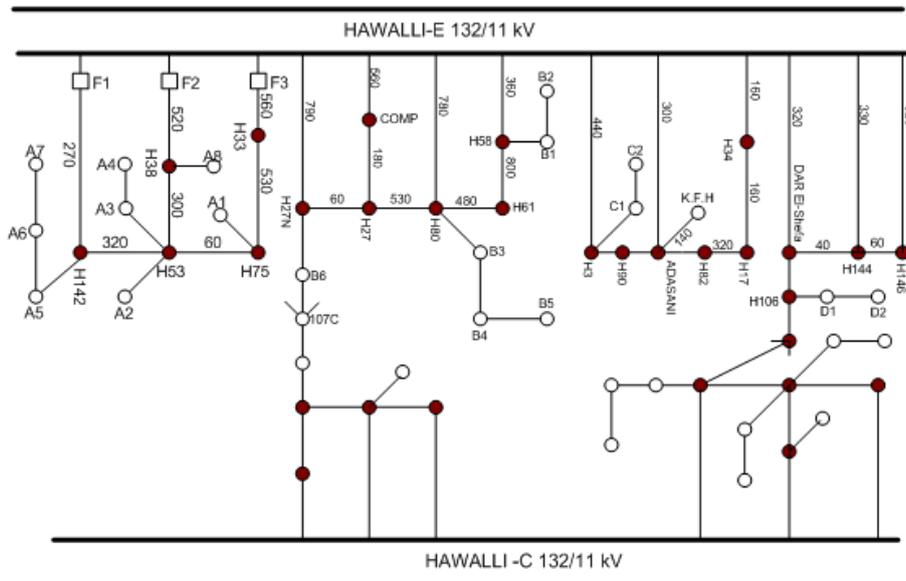


شكل 2-20

## 2-1-20 Ring System المغلقة

أما شبكات التوزيع في المدن فتتكون في الغالب من مجموعة حلقات أو دوائر Rings تكون مفتوحة أو مغلقة. والنوع المغلق يظهر في الشكل 1-20 الذي يمثل نموذجاً متبعاً في الكويت على سبيل المثال. وتتكون كل Ring منها من ثلاثة أو أربعة فروع ، فعلى سبيل المثال فالـ Ring اليسرى في الشكل 2-1 مكونة من ثلاثة فروع هي F1 , F2, F3 ، و تبدأ الفروع جميعاً من داخل محطة توزيع رئيسية ( Primary Substation ) - وهي هنا على سبيل المثال محطة تسمى Hawalli-E وهي المحطة التي تضم بداخلها 3 محولات لخفض الجهد من 220 kV إلى 11kV ، أي أنها تمثل حلقة الربط الأساسية بشبكة الجهد الأعلى المستخدمة بالدولة .

و تمثل النقاط المصمتة في الشكل 1-20 محطات التوزيع الفرعية Secondary Substations مثل H42, H38, H53, H75 وغيرها ، وداخل كل واحدة منها يوجد ما بين محول واحد إلى 3 محولات على التوازي جهد 0.4 / 11 kV ، ثم تخرج من هذه المحطات (الممثلة بدوائر مصمتة ) كابلات الجهد المنخفض إلى المنازل . أما الدوائر البيضاء بنفس الشكل فتتمثل امتدادات أو تفرعات تؤخذ من الشبكة الأصلية لتغذي محول واحد فقط 0.4 / 11 kV يعرف بـ Unit Distribution System أو اختصاراً UDS ، وهو محول مزود بلوحة الـ LT التي يخرج منها 3 كابلات أو أكثر لتغذية مبنى معين ذي حمل مرتفع أو حقلين متجاورين .

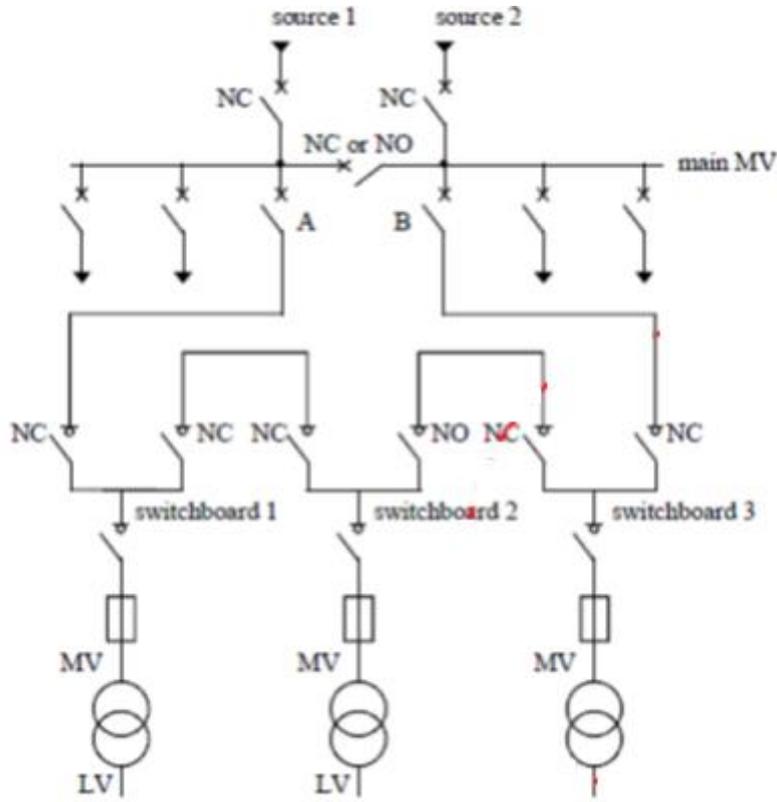


شكل 1-20 شبكات التوزيع بالمدن

وتمثل الأرقام المكتوبة على الخطوط في الشكل أطوال كابلات الجهد المتوسط مقاسة بالمتري ، وهي الكابلات التي تربط جميع أجزاء الـ Ring الواحدة. لاحظ في الشكل السابق أن كل محطة فرعية يبدأ اسمها بحرف الـ H وهو الحرف الأول في اسم المحطة الرئيسية التي تغذي جميع المحطات الفرعية.

### 3-1-20 نظام الـ Loop المفتوحة

وفي أغلب الأحيان تترك الـ Ring مفتوحة في موضع ما باستخدام Normally Open Switch, NO Switch كما في الشكل التالي وذلك لتقليل الـ Short circuit current ، على أن يتم غلقه يدويا أو أوتوماتيكيا عند الحاجة للتغذية من الجهة الأخرى.

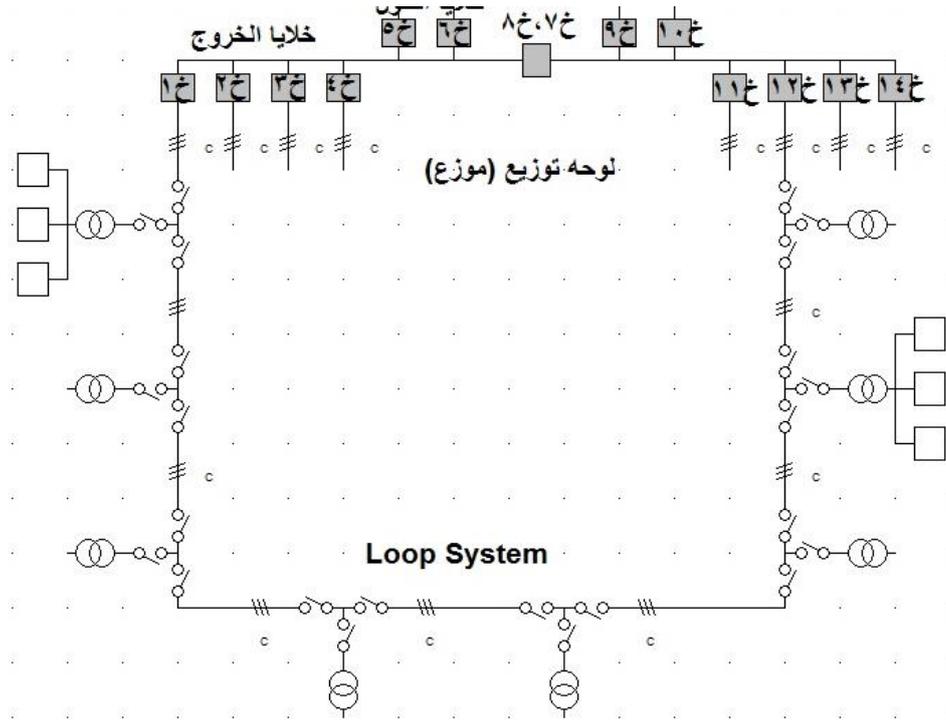


وفي كلا الحالتين (سواء كانت الـ Loop مفتوحة أو مغلقة) فإن المغذي الرئيسي للـ Loop يبدأ من محطة التوزيع (الموزع) وينتهي فيها أيضا ، أي أن نهايتي الموزع تكونان داخل المحطة (شكل 2-20) ، ومن ثم فالمغذيات تتمتع بميزة التغذية من جهتين على عكس نظام الـ Radial الذي يتمتع بتغذية من جهة واحدة فقط.

لاحظ أن الموزع نفسه يتم تغذيته من جهتين (خلايا رقم 9 و10 و5 و6) كما في الشكل ، وهذا أيضا لزيادة الاعتمادية. كما أن الـ BB المستخدم في الشكل من النوع Sectionalized Single BB وهو الأكثر انتشارا (الخلتين 7 و8 تعتبران خلايا ربط).

لاحظ هنا أن الـ Loop مفتوحة وذلك في الظروف العادية للتشغيل من أجل تقليل قيمة تيار الـ Short Circuit ، لأنه إذا كان الحلقة مغلقة وحدث عطل فإن تيار الـ Short Circuit سيغذى من جهتين (ومن مصدرين) وهذا يعنى أن قيمة تيار الـ Short Circuit سيكون مرتفعا ، أما إذا كانت الـ Loop مفتوحة فقد جمعنا بين الحسنيين : أن تيار الـ Short Circuit منخفض وفي نفس الوقت هناك مصدر تغذية احتياطي يمكن استخدامه وقت اللزوم فقط وذلك بغلق مفتاح الفصل الموجود في الحلقة.

ويتكون هذا النظام من فيوزات أيضا على المحولات المتفرعة من الـ Loop (وقد يستخدم CB أيضا ) بالإضافة إلى القاطع الرئيسي الموجود في بداية الحلقة داخل محطة التوزيع (الموزع) والذي يفتح آليا في حالة فشل الفيوزات في فصل العطل على الفرع . ويتم تغذية الأحمال بعد ذلك بواسطة الجزء الآخر من المغذي ، لذلك تصميم هذا المغذي يجب أن يتحمل أحمال الجزئين معا.



شكل 20-2 :

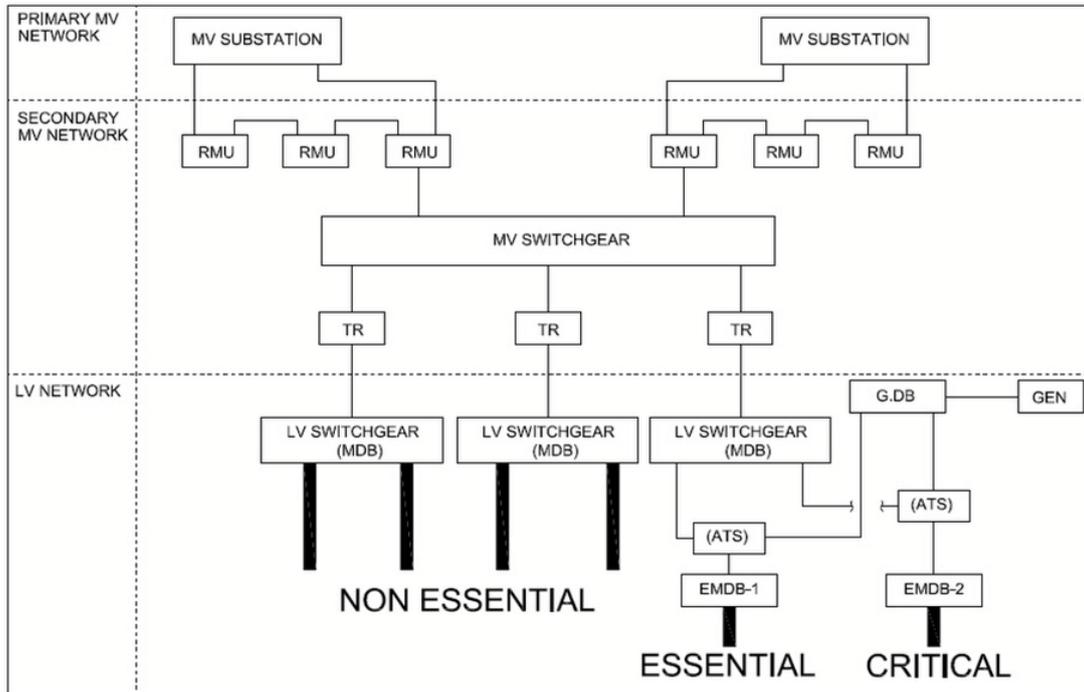
واضح أن العيب الأساسي لنظام Radial السابق قد تلاشي هنا في نظام الحلقات ، وذلك بضمان استمرارية الخدمة للمستهلكين ولكن على حساب التكلفة العالية . وهذا النظام شائع الاستخدام في المدن الرئيسية فقط. في الشكل 2-20 السابق لاحظ أن الخليتين خ1 ، خ12 تقومان بتغذية الـ Open Loop مع وجود سكينه مفتوحة في أحد الأكوثاك وذلك لزيادة الاعتمادية في الشبكة ، فعند حدوث خلل في أحد الكابلات يتم التغذية من المصدر الآخر.

والمحولات الفرعية في هذا النظام تكون أكبر حجما من المنظومة السابقة ( Radial ) فلن تجد في هذا النظام محولات بقدرة عشرات الـ kVA كما في السابق .ويرتبط كل محول بالـ Loop من خلال ما يعرف بـ RMU.

وقد تأتي تغذية الموزع جهة اليمين (خ9 و خ10) من محطة توزيع بينما تأتي التغذية جهة اليسار (خ5 ، خ6 ) من محطة واحدة ، وقد تكونان من مغذيات من نفس المحطة.

#### 4-1-20 لوحات R.M.U

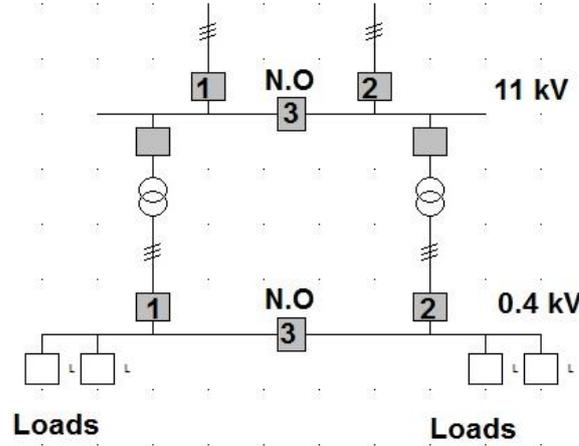
في كلا الحالتين ( Radial or Ring ) فإن المحولات ترتبط بشبكة الجهد المتوسط الرئيسية من خلال لوحات تعرف بالـ Ring Main Unit . التي تظهر في الشكل التالي الذي يظهر أيضا علاقة الـ MV بشبكة الـ LV بصورة مبسطة.



## 5-1-20 تغذية كبار المشتركين

يوجد عند كبار المشتركين لوحة توزيع أتوماتيكية على الجهد المتوسط أو الجهد المنخفض أو الاثنين معا والتي تعمل بنظام (2 out of 3) كما في الشكل 3-20 :

ففي الوضع الطبيعي يكون مفتاحين فقط في وضع توصيل والمفتاح الثالث في وضع فصل (غالبا المفتاح 3) حتى لا يتم تداخل المصادر مع بعضها . فإذا خرج المغذى رقم 2 مثلا فيغلق المفتاح رقم 3 أتوماتيكيا . و تحتوى هذه اللوحات على دوائر انترلوك كهربى وميكانيكى لمنع تداخل المصادر .



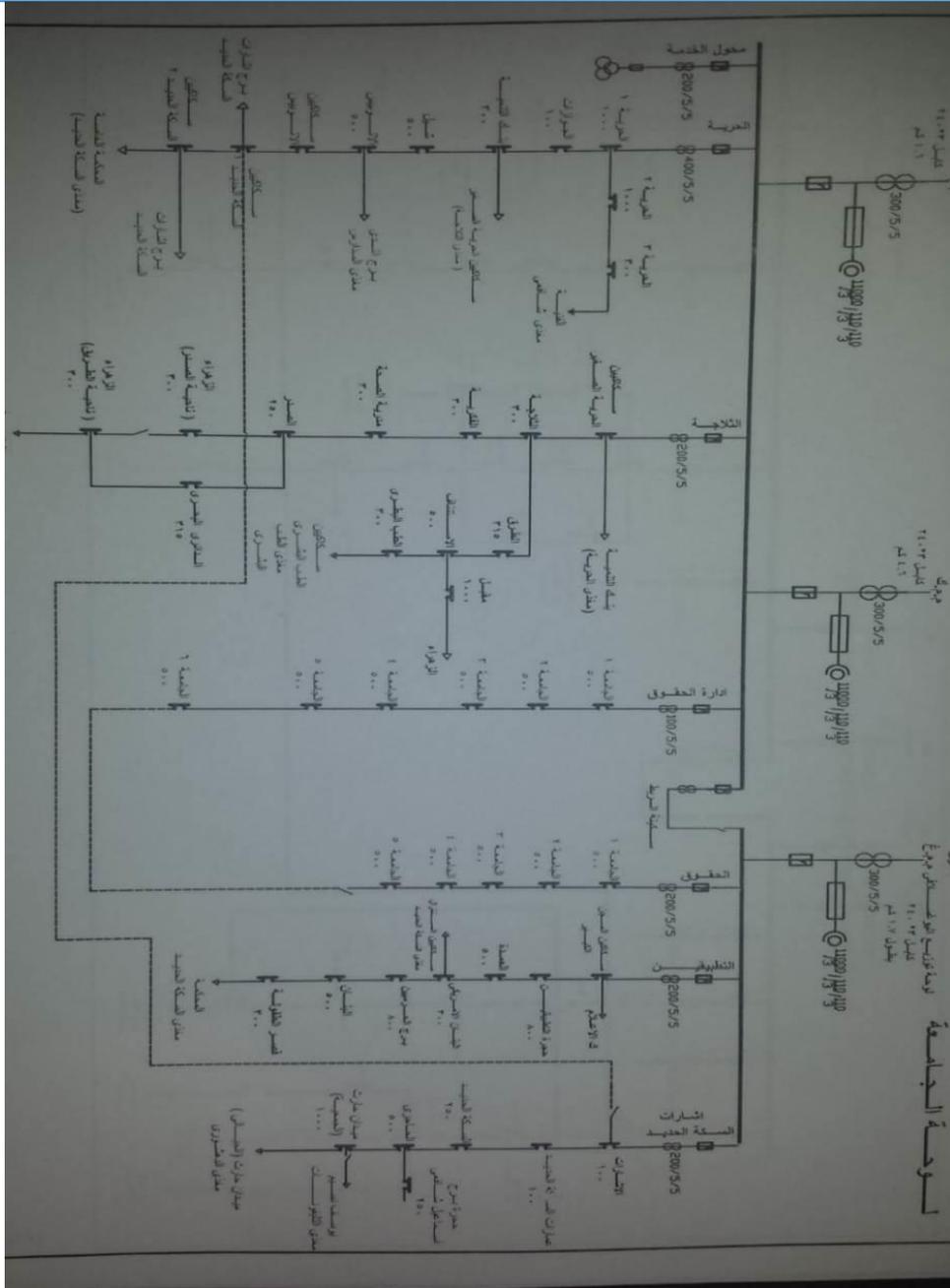
شكل 3-20 :

## 6-1-20 أنظمة من الواقع

عمليا ستجد أنظمة مختلطة بين كل ما سبق فيمكن أن تجد في دوائر الموزع الواحد دائرة Radial وأخرى Open Loop ، وربما خليط من أكثر من ذلك. والشكل 4-20 يمثل SLD للوحة موزع منطقة الجامعة في بنى سويف حيث يستخدم أكثر من نظام كما هو واضح في الشكل.

لاحظ وجود السكاكين المفتوحة التي تصل بين المغذيات الرئيسية والتي تكون كما ذكرنا في الوضع المفتوح ولا تغلق إلا عند الحاجة للتغذية من الجهة الأخرى نتيجة فصل المغذى الرئيسي.

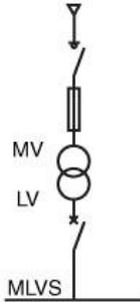
لاحظ في الشكل السابق أن المحطة تستقبل مغذيان جهد 11 كيلو وموزعين على two Sections وهناك ارتباط (سكاكين مفتوحة) بين المغذيات الفرعية التي تخرج من هذين الجزئين بحيث يمكن تحويل التغذية من قسم لآخر حسب ظروف التحميل والصيانة والأعطال وخلافه.



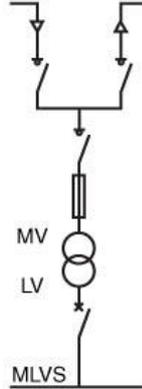
شكل 4-20

وفيما يلي نماذج لأشكال أخرى لطريقة ربط محولات التوزيع الموجودة عند المستهلك بشبكات التوزيع - غير التي سبق عرضها - وكل واحد منها يمكن استنباط ميزاتهِ وعيوبهِ من جهة الاعتمادية والتكلفة (الأشكال منقولة من كتاب IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution ( Distribution

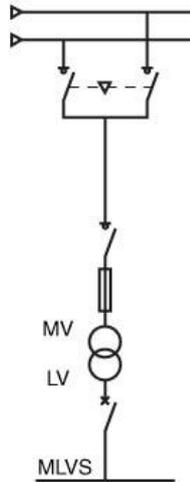
a) Single-line:



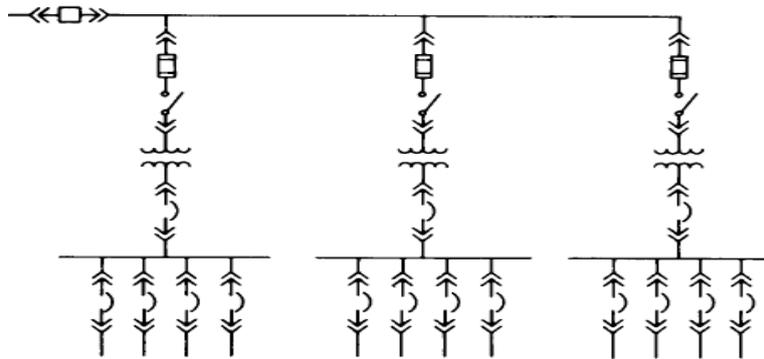
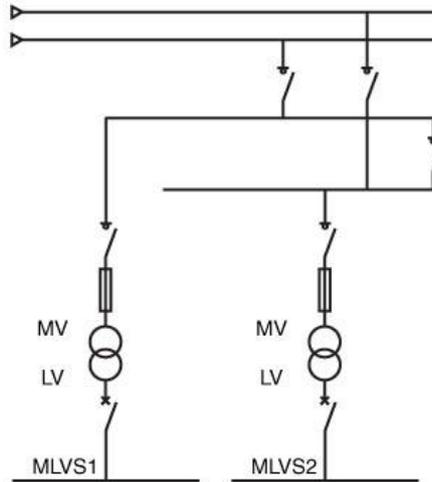
b) Ring-main:



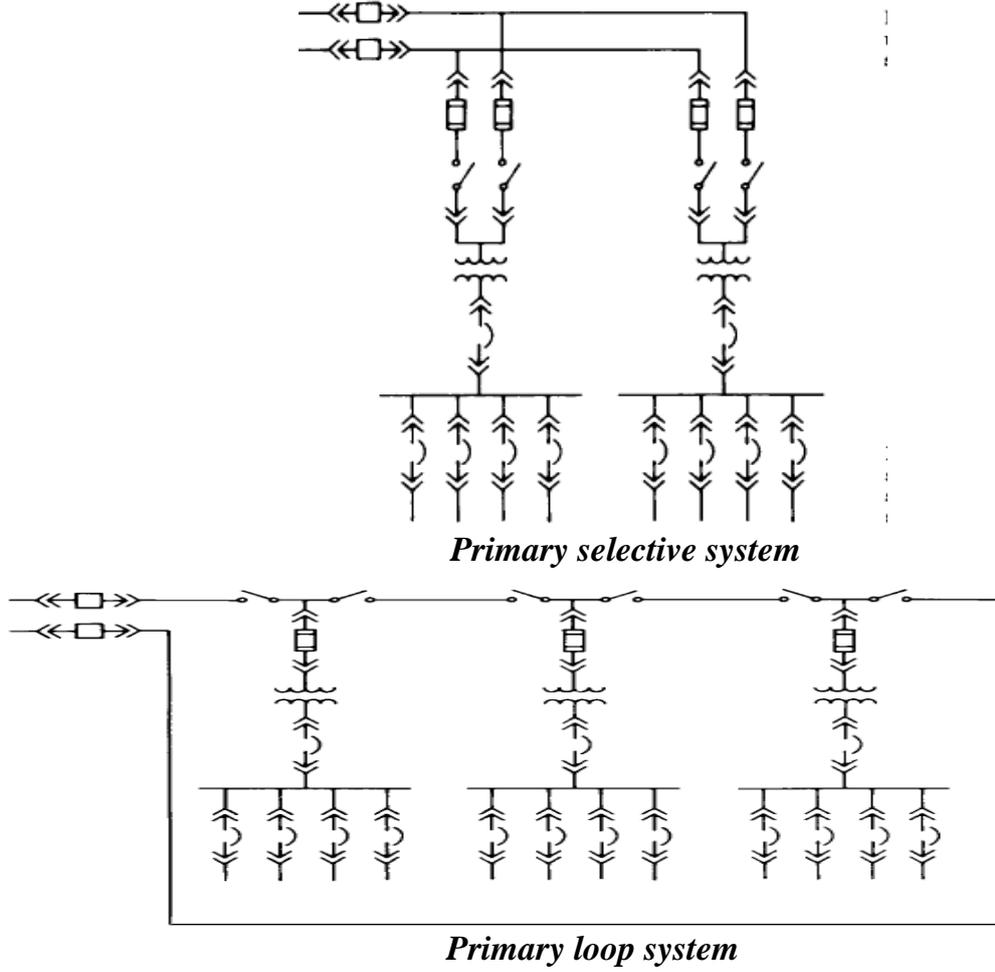
c) Duplicate supply:



d) Double busbar with duplicate supply:

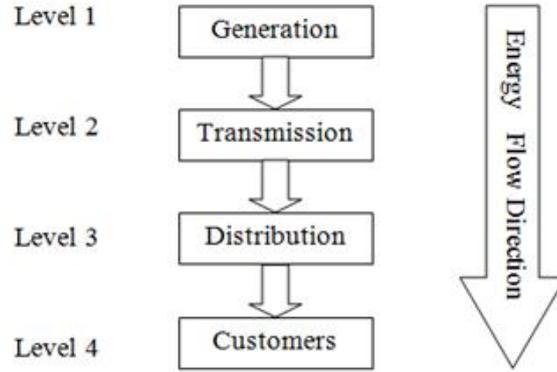


*Expanded radial system*



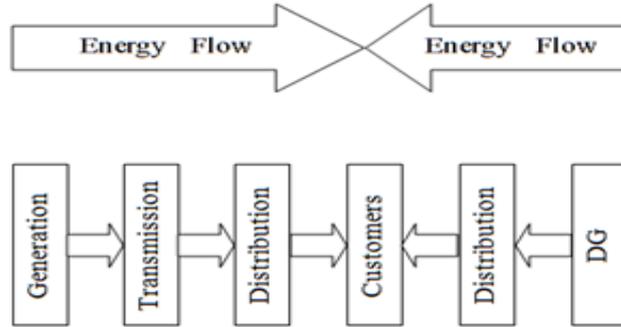
## 2-20 تأثير دخول التوليد الموزع DG

منظومة القوى الكهربائية التقليدية كانت دائما تمثل بمرحلة توليد يتبعها مرحلة نقل الطاقة ثم التوزيع وانتهاء بالأحمال كما في الشكل 20-5. لكن مع ظهور نظم توليد الطاقة من مصادر الطاقة الجديدة والمتجددة مثل الخلايا الشمسية أو الرياح تغير شكل المنظومة ، فأصبحت المنظومة الجديدة مختلفة في اتجاه مرور القدرة عن نظم التوزيع التقليدية كما في الشكل 20-6 حيث نلاحظ أن التوليد صار موجودا في بداية المنظومة (المحطات التقليدية الضخمة) ، وموجودا في نهاية المنظومة أيضا بجوار الأحمال (محطات الطاقة الجديدة) .



شكل 20-5 :

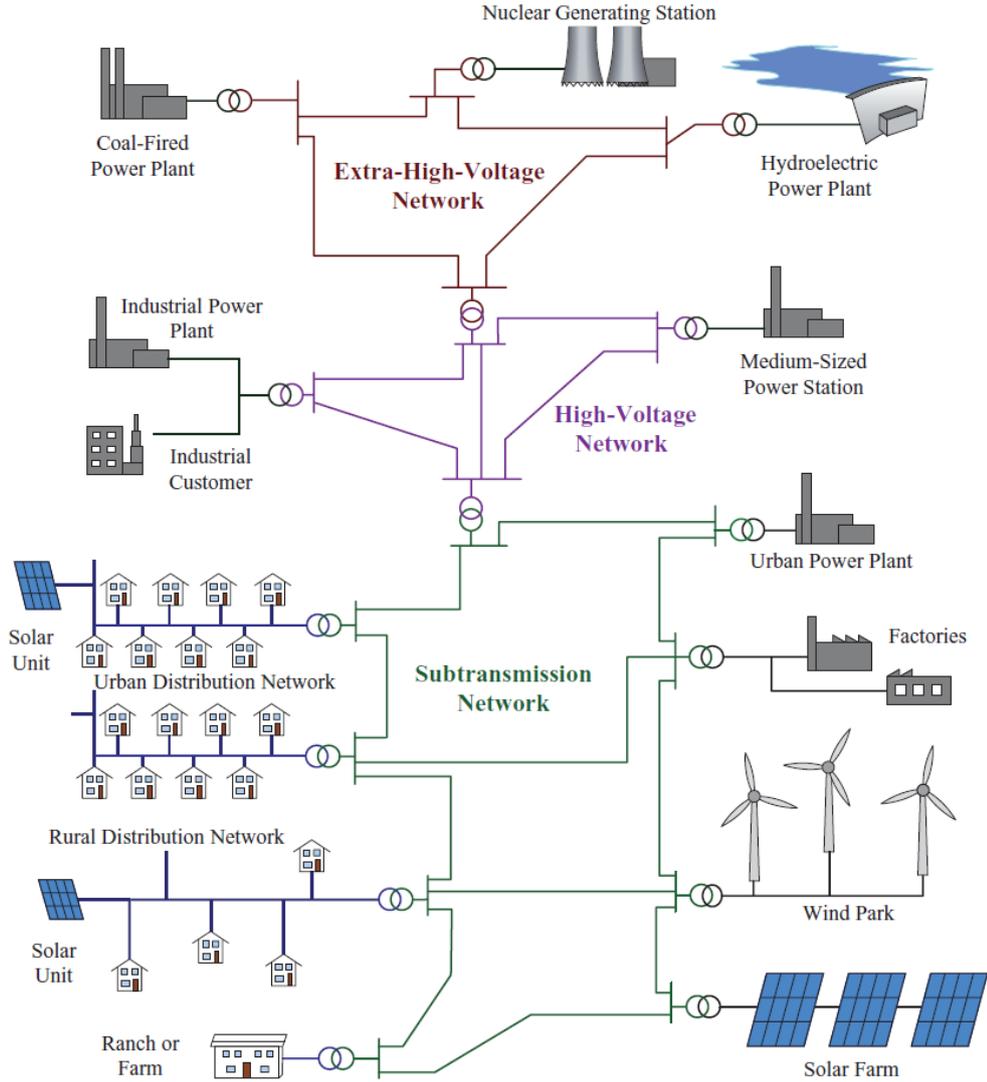
وساعد على ذلك أن محطات الطاقة الجديدة (ذات القدرات المحدودة غالباً) يمكن تنفيذها بجوار الأحمال مباشرة بل إن بعض هذه المحطات يمكن إنشاؤها فوق أسطح بعض المباني ، على عكس المحطات التقليدية (ذات القدرات الضخمة) والتي كان من المستحيل أن تنشأ بجوار الحمل.



شكل 20-6 :

### 1-2-20 ميزات وعيوب التوليد الموزع

هذه الصورة الجديدة لمنظومة القوى جعلت التوليد ليس فقط في بداية المنظومة بل أصبح التوليد موزعاً في أكثر من مكان بالشبكة كما في الشكل 20-7 ، ومن هنا ظهر مصطلح التوليد الموزع Distributed Generation, DG. كما ظهرت نوعية مختلفة من المشاكل التي تواجهها منظومة القوى لم تكن موجودة بالسابق. وأصبحت هذه المشاكل تمثل مساحة كبيرة من الأبحاث الجديدة في مجال نظم التوزيع.

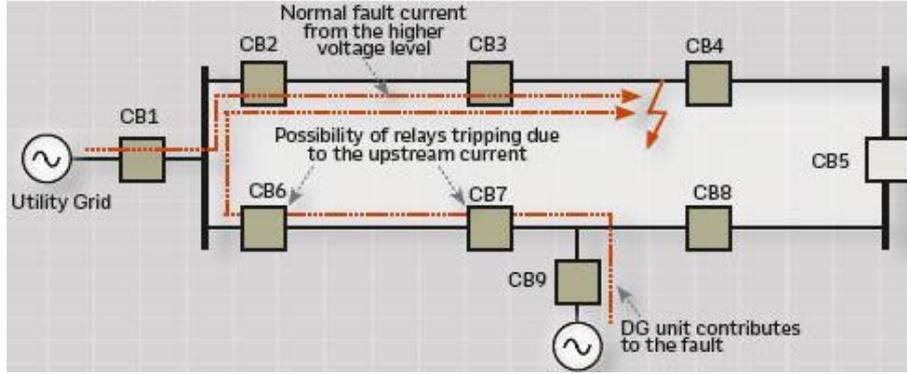


شكل 7-20 :

وفيما يلي نعرض عددا من المشاكل المرتبطة بنظم التوليد الموزع:

## 2-2-20 مشكلة التنسيق - Coordination

على سبيل المثال فقد ظهر مع التوليد الموزع DG مشكلة تعقد تنسيق أجهزة الوقاية ، ففي نظم التوزيع التقليدية كان من الممكن ضبط تنسيق أجهزة الوقاية طبقا لترتيب محدد وثابت ، أما في وجود الـ DG فلم يعد هناك شيء ثابت ، فلا مكان للتوليد ولا حتى قيمة التوليد يمكن أن يكون ثابتا ، ومن ثم ظهرت مشكلة تغير قيمة تيار العطل حتى لو كان العطل في نفس المكان بسبب التغذية الإضافية القادمة من مصادر التوليد الموزع المتغيرة القيمة كما في الشكل 9-20.

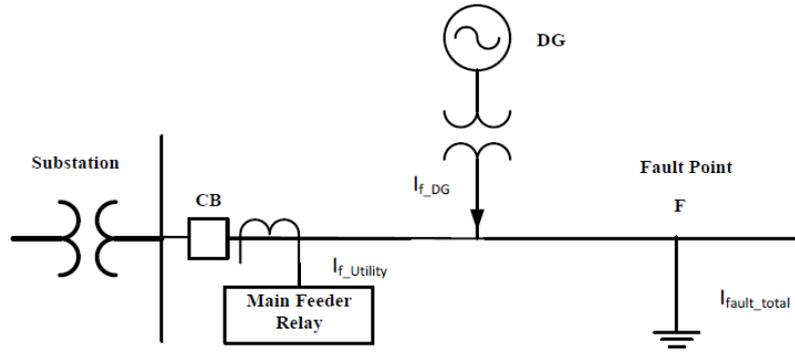


شكل 9-20 :

في النظم التقليدية يمكنك تقدير حجم التنسيق بين أجهزة الوقاية بناء على قيم تيار العطل كما سبق شرحه في الفصل السابق ، لكن المشكلة الآن أن تيار العطل صار متغيرا بسبب الـ DG. ومن أشهر طرق علاج هذه المشكلة استخدام ما يسمى بالـ Adaptive Settings أو استخدام ما يسمى بالـ Multi-settings Groups .

### 3-2-20 مشكلة الخطأ في تقدير مسافة العطل

كما قد تتغير قيمة المسافة المحسوبة بواسطة جهاز الوقاية المسافية حسب وجود أو عدم وجود الـ DG بل حسب نسبة مشاركة هذا الـ DG بسبب تغير قيمة التيار المار بجزء من الخط (ما بين الـ DG وبين العطل في الشكل 10-20) أثناء العطل عن قيمة التيار المار بجهاز الوقاية ، ومن ثم فستتغير مسافة العطل المحسوبة رغم أن العطل قد يكون في نفس المكان .



شكل 10-20 :

### 4-2-20

### مشكلة ارتفاع مستوى الـ Short Circuit

لاحظ من الشكل السابق أن قيمة تيار في بعض أجزاء الشبكة سترتفع على حسب قوة الـ DG المضافة ، فقبل إضافته كان تيار العطل يغذى من مصدر معين ، لكننا بعد إضافة الـ DG صار لدينا مصدر

جديد مما رفع من قيمة تيار العطل ، وهذا قد يتسبب في تجاوز قيمة الـ Short circuit Capacity لبعض المعدات ، مما يعنى أنها يمكن أن تحترق نتيجة تيار العطل الجديد.

#### ملحوظة هامة:

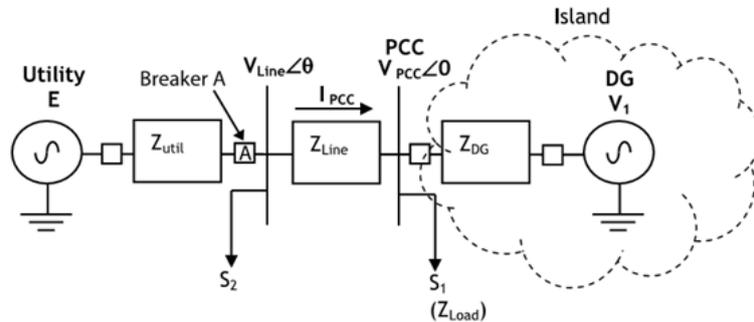
ارتفاع مستوى الـ Short Circuit Current لا يحدث إلا إذا كان المولد المستخدم فى الـ DG من النوع Synchronous أما محطات الرياح ومحطات الطاقة الشمسية فالمشكلة فى وجودهم معكوسة ، بمعنى أن مستوى الـ Short Circuit Current ينخفض عن المستويات المعروفة للأعطال (لا يتجاوز مرة ونصف من قيمة التيار المقنن).

وهناك أيضا مشكلة أخرى وهى أن منظومات الـ DG والتي تحتوى على Inverters يتم فيها معالجة العطل من خلال التحكم فى الـ Inverters فى خلال ربع دورة زمنيا تقريبا ، وهذا يعنى أن أجهزة الوقاية يجب أن تبحث عن طريقة أخرى لاكتشاف حدوث العطل مختلفة عن مجد متابعة الزيادة فى قيمة التيار لأنه فى الواقع تقريبا لن تحدث زيادة فى التيار مع ما يسمى Inverter-Based Systems .

ومن أشهر طرق معالجة هذه المشكلة استخدام الـ ROCOF Relay وتتطق : روكوف وتعنى: Rate of Change Of Frequency وهو جهاز وقاية مناسب لهذه الحالات.

### 5-2-20 مشكلة الانعزال Islanding

ومن المشاكل الأخرى التى جدت على السطح ولم تكن من قبل مؤثرة مشكلة الـ Islanding ويقصد بها حدوث خروج لمنظومة التغذية الأساسية (شبكة الدولة بعد فتح الـ Breaker A فى الشكل 11-20) بينما تبقى أجهزة التوليد المتوزع DG وكأنها جزيرة معزولة ومسئولة بمفردها عن تغذية الأحمال كما فى الشكل.



شكل 11-20 :

وهذا الطرف يجب سرعة اكتشافه وفصل أجهزة الـ DG لعدة أسباب منها:

1- قدرة الـ DG أقل من أن تغذى الحمل بعد فصل الشبكة الرئيسية وبالتالي فهناك مشكلة تتعلق بها على أساس أنها Weak Source ، وإذا بقيت بمفردها فستكون هناك بالتأكيد مشاكل تتعلق بالجهد والتردد وثباتهما في الجزيرة المنعزلة. ومن ثم فالأفضل تجنباً لهذه المشاكل المتوقعة هو فصل الـ DGs كلها.

2- بعد فتح الـ Breaker A سيظن فريق الصيانة على الخط أن الخط في أمان طالما أنه لا يوجد تغذية من المصدر ، وقد يغيب عنه أن هناك مصدر آخر وهو الـ DG في الجهة الأخرى. لاحظ أن هذه المصادر قد تكون موجودة في ملكيات خاصة وقد يكون مجرد مصدر كبير داخل أحد المصانع ولديه فائض فهو يبيعه للشبكة.

والمشكلة أن هذا المصدر الثانى غير محدد القيمة ولا المكان ، وقد يجده مفتوحاً ثم فجأة يدخل للخدمة وبالتالي لا علم لهم بها ولا يوجد إمكانية لفصل الخط من الجهتين كما فى الأنظمة التقليدية. ولذا كان لابد من اكتشاف حالة الـ Islanding وسرعة فصل الـ DG .

3- فى حالة عدم فصل الـ DG وعدم اكتشاف الـ Islanding ، فإنه عند رجوع الخدمة من الشبكة العامة ستحدث مشكلة كبيرة وهى عدم التزامن بينهما Synchronization. بالطبع مالم يكن لدينا أجهزة تزامن فى شبكة التوزيع وهذا غير معتاد.

وهناك مشاكل أخرى عديدة ناتجة عن إضافة الـ DG لشبكة التوزيع . و يمكن الرجوع للأبحاث المنشورة فى هذا المجال. وأغلب هذه الأبحاث تدرس نقطة بحثية هامة وهى : كيف يمكن اكتشاف ظاهرة الجزيرة الكهربائية و تمييزها وفصل المولدات ذات التوزيع المنتظم من الشبكة الكهربائية فى غضون 2 ثانية وفقاً لـ IEEE1574 لسنة 2003. وأغلب الطرق تستخدم إشارة الجهد الموجود عند هذه المولدات والبحث عن تغييرات فى إشارة الجهد لا تحدث إلا فى حالة الـ Islanding مثل تغيير نسبة التوافقية الثانية أو غيرها أو تغيير نسب الـ positive and negative sequence components إلخ.

## 21

## شبكات الجهد املتوسط الهوائية

هي إحدى أنواع شبكات التوزيع الثانوية ، وهي آخر مرحلة في الجهد المتوسط حيث تنتهي هذه الشبكة بمحولات التوزيع ، وبعدها تبدأ شبكة الجهد المنخفض. تنتشر الشبكات الهوائية في مناطق الأرياف بمصر والمناطق الصحراوية ، حيث تتميز بالبساطة وقلة التكاليف ، وسهولة اكتشاف الأعطال وسهولة إصلاحها. والمشكلة الأساسية لها أنها تشبه المنظر ، كما أن نسبة أعطالها أكثر من الشبكات الأرضية .

والغريب أنها الأكثر انتشارا في الولايات المتحدة الأمريكية وكندا ، والسبب في ذلك أنهم يعتمدون مبدأ هاما وهو أنه طالما أن الشبكة الهوائية لا تسبب مشاكل وأعطالها في الحجم الطبيعي فلماذا نستبدلها بشبكة أرضية أكثر تكلفة؟.

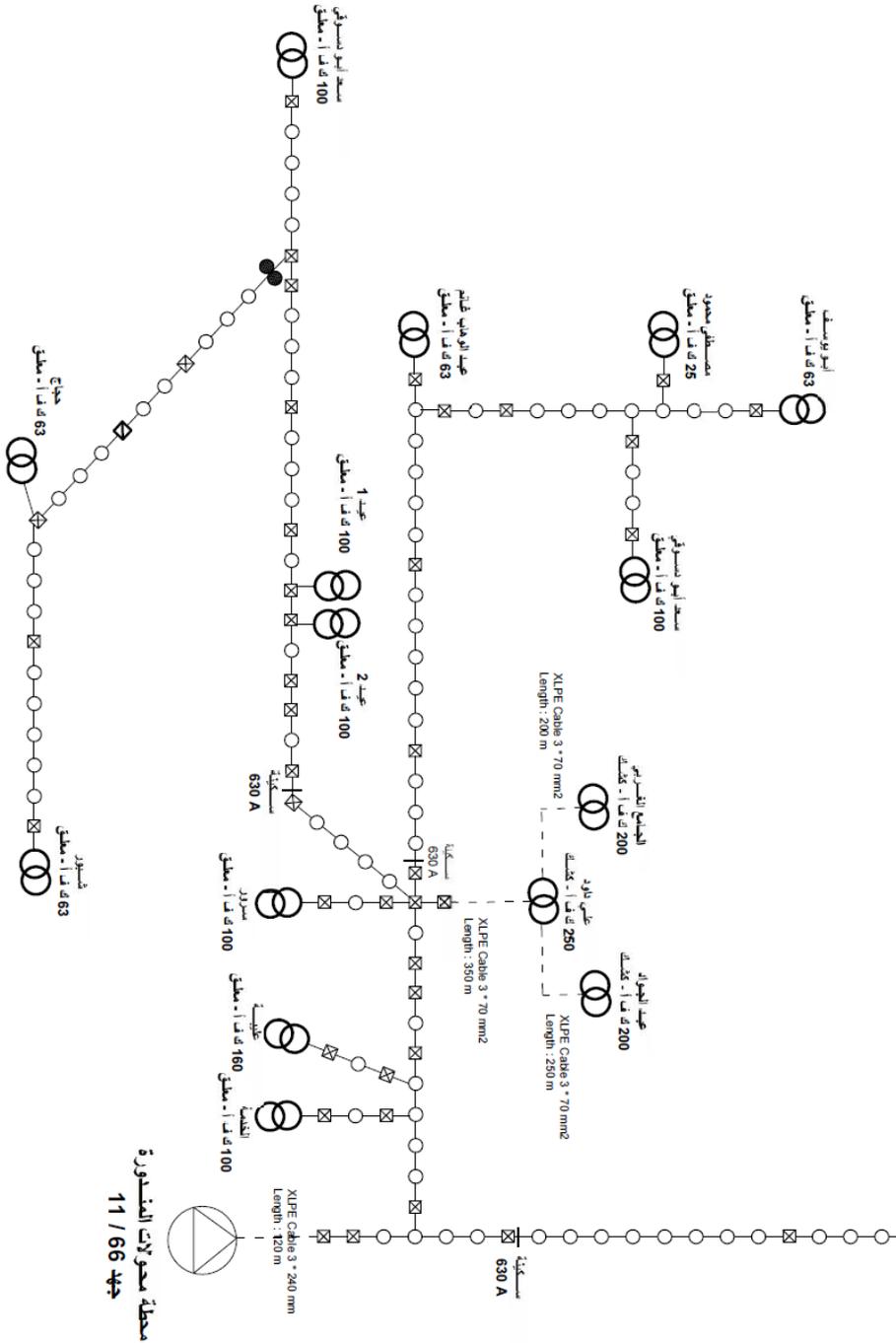
ويلاحظ أن المدن في هذه الدول تتميز بجو مطير وأشجار كثيرة ، ولذا فإن الشبكات الهوائية تكون أيضا من كابلات معزولة ، وكونها هوائية يسهل من عمليات الصيانة والتعديلات ، وكونها معزولة حتى لا تتأثر بكثافة الأشجار التي قد تتلامس معها.

## 1-21 أشكال التغذية في شبكات التوزيع الهوائية

يوجد من الشبكات الهوائية نفس النوعين السابقين : Radial and Ring (Loop) .

## 1-1-21 أولا الشبكات الشعاعية Radial

في الشكل 1-21 نموذج لشبكة توزيع من النوع الـ Radial في إحدى قرى ريف مصر ، حيث تبدأ الشبكة من محطة محولات 66/11 ك ف (أقصى جنوب غرب الشكل) ويخرج منها مغذى رئيسي



شكل 21-1 :

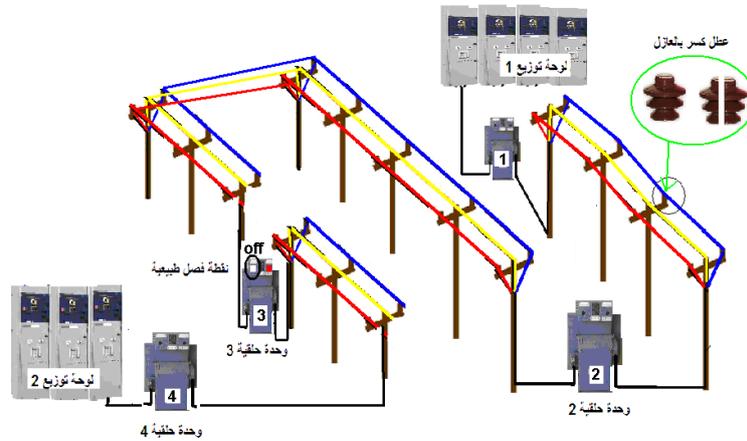
يبدأ بكابل أرضي طوله 120 متر (مرسوم بخط متقطع) لزوم الخروج من المحطة الرئيسية فقط ) ثم يتصل هذا الكابل مباشرة بالمغذى الرئيسي الهوائي Main Feeder الذي تتفرع منه بعد ذلك مغذيات

فرعية كثيرة من نقاط مستقلة تسمى Tap-off لتغذى فى نهاية كل تفرعة أحد المحولات التى تعلق على الأبراج الهوائية ، والتي تتراوح قدرتها ما بين 50 إلى 250 kVA كما هو واضح من الشكل .  
وغالبا تكون الشبكة خليطا من أجزاء هوائية وكابلات أرضية ومحولات معلقة على أعمدة وأخرى مثبتة على الأرض ومتصلة بوحدات الـ RMU.

### 2-1-21 ثانيا التوصيل الحلقى Ring

نتيجة بعض المشاكل التي تنشأ مع التوصيل الـ Radial مثل انقطاع التغذية عند حدوث عطل في المغذى الرئيسى، ولحل تلك المشاكل وتقليل فترة انقطاع التغذية الكهربائية يتم استخدام نظام التوصيل الحلقى Ring حيث تتم التغذية من الطرفين ويكون بينهما نقطة مفتوحة كما سبق أن بينا فى الفصل السابق حيث يعمل هذا النظام على إعادة الكهرباء للمستهلك بعد اكتشاف مكان العطل وعزله.

الشكل 2-21 يوضح شبكة هوائية يتم الربط فيها من خلال وحدة حلقة RMU ، فعند حدوث عطل ما سيتم فصل ذلك المغذى بالكامل عند لوحة التوزيع رقم 1 ، ثم من خلال قسم التشغيل يتم عمل مسح للخط الهوائي بالعين المجردة ، فإذا تم اكتشاف أن أحد العوازل مكسور مثلا فعندئذ يقوم قسم التشغيل بإعادة التغذية إلى الأجزاء الأخرى بعد فصل المنطقة التي بها عطل حسب الخطوات الآتية:



شكل 2-21 :

1. يتم فصل جانب الخروج للوحدة الحلقية رقم 1 ثم عمل تأريض
2. يتم فصل جانب الخروج للوحدة الحلقية رقم 2 ثم عمل تأريض ، وبذلك يكون قد تم عزل المنطقة التي بها عطل.
3. يتم إعادة التغذية من خلال النقطة المفتوحة الطبيعية الموجودة في الوحدة الحلقية رقم 3 .

## 2-21 العناصر الأساسية فى الشبكات الهوائية

تتكون الشبكة الهوائية عموماً من عناصر أساسية هى :

- الأبراج
- الموصلات (الأسلاك الهوائية)
- العوازل
- مانعات الصواعق
- سكاكين الفصل والفيوزات
- المحولات
- مبيبات الأعطال

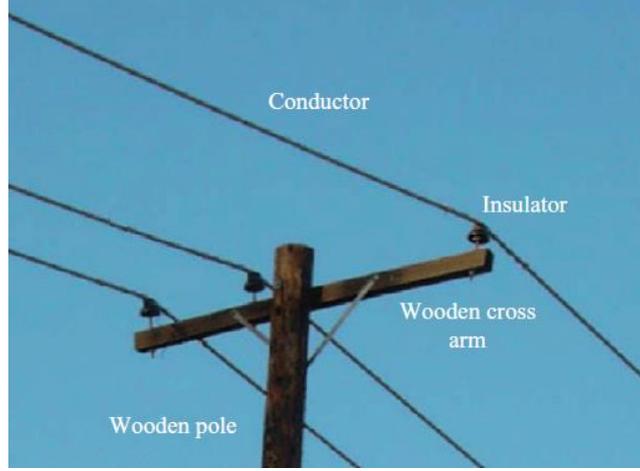
وفىما يلى بعض تفاصيل هذه المهمات:

## 3-21 أبراج شبكة الجهد المتوسط

توجد أنواع متعددة من الأعمدة تستخدم فى شبكات التوزيع منها :

- الأعمدة الخشبية
- الأعمدة الخرسانية
- الأعمدة المعدنية
- الأعمدة الهيكلية

1. الأعمدة الخشبية (شكل 3-21) كانت شائعة قديماً ولا زالت منتشرة فى البلاد التى تتوفر فيها الأخشاب لاسيما أن هذا النوع من الأعمدة يتميز بالمرونة فى وقت الرياح ، وهى الأكثر انتشاراً فى كندا وأمريكا ، ويتم معالجتها بمواد كيميائية للتغلب على مشكلة العفونة والتأثر بالرطوبة.



شكل 21-3 :

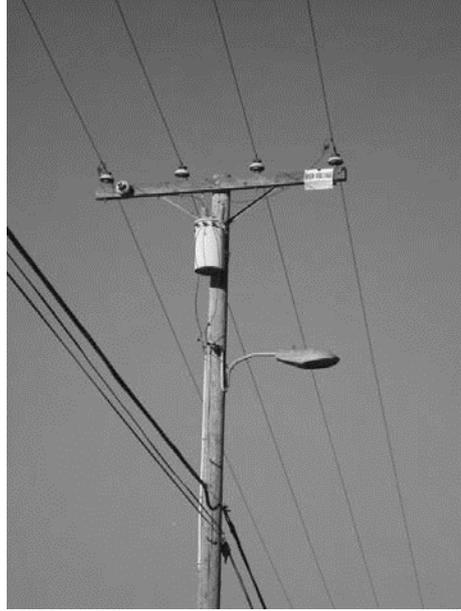
2. الأعمدة الخرسانية : هي أعمدة قطرها السفلي أكبر من قطرها العلوي بتدرج انسيابي وتحمل قوة شد 1000/750/500/350 كجم طبقا للطراز وتستخدم للجهود حتى 11kV ومستخدمة في مصر بشكل محدود وإن كانت شائعة في دول الخليج لكون مقاومتها الكهربائية أعلى من أعمدة الصلب ومن ثم فهي أكثر أمانا. ورغم أنها مكلفة لكنها لا تحتاج لصيانة تقريبا وعمرها طويل مقارنة بغيرها
3. أعمدة مواسير الصلب : تستخدم أعمدة المواسير الصلب في شبكات الجهد المتوسط وهي عبارة عن مواسير من الصلب يتم تشكيلها (طلاء بالنيكل) لزيادة عمرها الافتراضي ، ويقسم طولها إلى ثلاث مواسير متداخلة في بعضها بحوالي 0.25 متر ويستخدم هذا النوع في الجهود حتى 11kV
4. الأعمدة الهيكلية Steel Structure Tower : تتكون هيكلها من زوايا من الحديد المجلفن وتعتبر أفضل من الأنواع السابقة وتتميز بسهولة أعمال الصيانة وتحملها لقوة شد كما أنها تتسم بالثبات بفضل قاعدتها المربعة ، أما الأعمدة الأسطوانية فإنها إذا تعرضت لقوة شد قبل أن تمر فترة كافية على زراعتها وتركيبها فقد تدور حول مركز تثبيتها.

ويمكن تصنيف الأعمدة من حيث مكان العمود في الشبكة ، كالتالي :

#### 1- أعمدة الوسط (عمود التعليق)

يستخدم حيث تكون قوة شد الموصلات متساوية على جانبي العمود أو حيثما لا يكون هناك تغير في اتجاه الخط فيتم تركيبها في المسارات المستقيمة من الخط (شكل 21-4) وتمثل 80% من إجمالي أعمدة

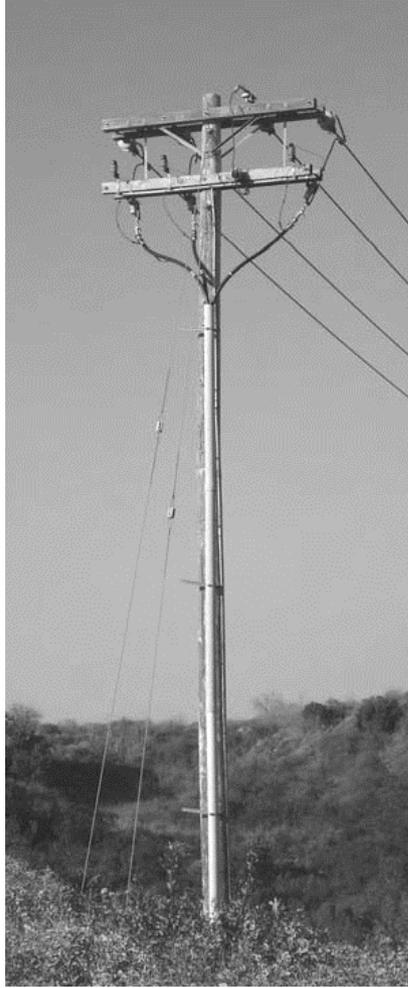
الخط. وفي الغالب تترك مسافة 80 متر بين كل عمودين. وبعض هذه الأعمدة تحمل أيضا محولات التوزيع ولمبات الإنارة أيضا.



شكل 21-4 :

## 2- أعمدة الشد

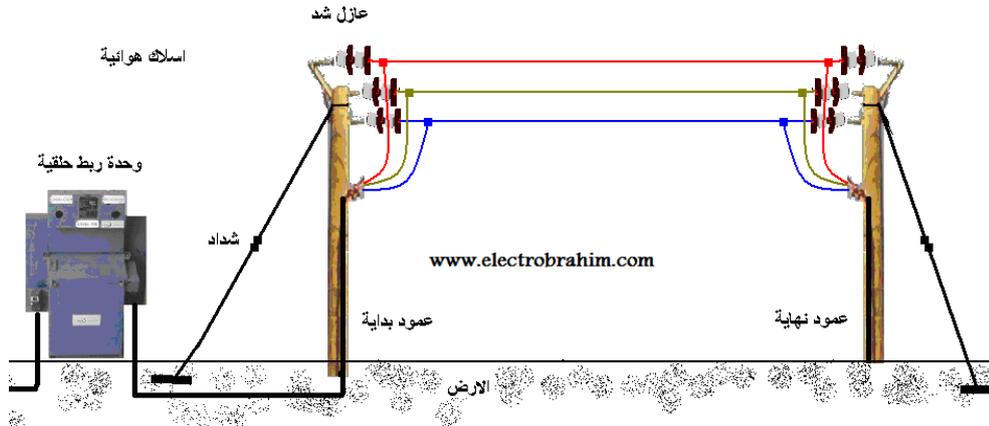
وهذه تصمم لتتحمل الشد من الجهتين بالإضافة إلى تحمل أوزان الموصلات ، وغالبا يستخدم عمود شد بعد كل خمسة أعمدة تعليق ، وكذلك عند تغيير مسار الخط كما في الشكل 21-5 . لاحظ الأسلاك الصلب التي يشد بها العمود إلى الأرض . ويسببها سمي بهذا الاسم.



شكل 21-5

### عمود بداية أو نهاية الخط الهوائي

تصمم تلك الأعمدة على أنها أعمدة شد من جانب واحد ، وتكون مزودة بعوازل تتحمل قوة شد كما في الشكل 21-6.



شكل 21-6

## 4-21 العوازل المستخدمة في الجهد المتوسط

وظيفة هذه العوازل هي حمل الموصلات الكهربائية ، وعزل الموصلات عن جسم البرج ، وذلك لمنع حدوث قصر بين الموصلات وبعضها ، أو بين الموصلات والأرض . ويوجد منها عدة أنواع حسب نوع مادة العزل ، فمنها العازل الزجاجي والعازل الخزفي (البورسلين) . وهناك تصنيف آخر طبقاً لشكل العازل وتركيبه وهو الأشهر في تصنيف العوازل ، وتصنف فيه العوازل إلى عدة أنواع منها عازل مسمار ، وعازل القرص ، وعازل السلك الشداد.

### عازل المسمار :

يستخدم ذلك النوع (شكل 21-7) من عوازل الجهد المتوسط لحمل الموصلات فقط دون تحمل أي قوة شد فيستخدم مع أعمدة التعليق فقط.



شكل 21-7 :

**عازل قرص Suspension Insulators**

وتسمى أيضا عوازل الطاقة والمسمار والسبب واضح من الشكل 21-8. ويستخدم هذا النوع من العازلات مع أبرج الشد وأبراج الزاوية ، وأعمدة البداية والنهاية ، حيث يركب قرصين في حالة جهد 11kv أو ثلاثة في حالة جهد 22kv وتكون مصممة لتحمل شد الموصلات .



شكل 21-8

**عوازل الـ Strain Type:**

في نهاية الخط ، أو عند وجود زاوية في المسار ، فسيكون الخط معرضا لقوى شد كبيرة ، فيتم استخدام هذا النوع للتخلص من الشد في الخط . وهو يستخدم في الجهود الأقل من 11 كيلو فولت.

**STRAIN TYPE****عوازل الـ Shackle Type**

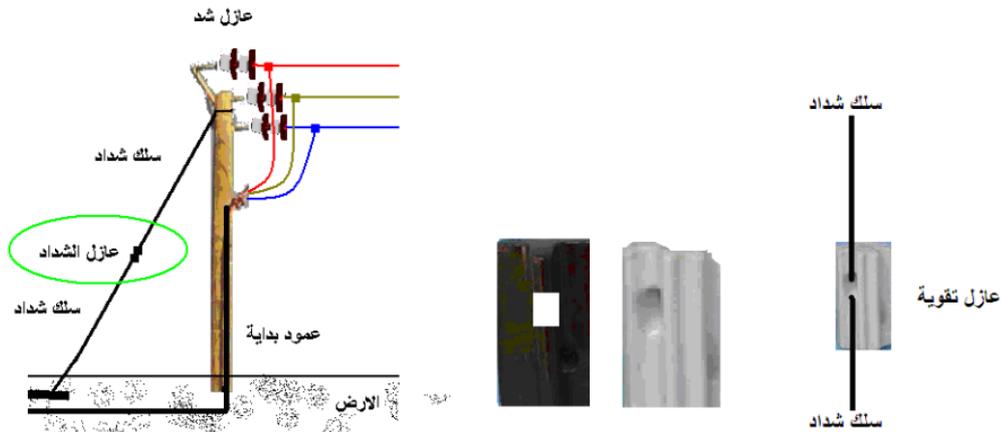
هذا النوع كان يستخدم قديما بدلا من Strain Insulators ، وهو يستخدم حاليا فقط في خطوط نقل الجهد المنخفض . وهذا النوع يمكن أن يستخدم أفقيا أو رأسيا ويمكن أن يثبت مباشرة علي الخط او باستخدام ذراع .



SHACKLE TYPE

عازل السلك الشداد

تستخدم أسلاك صلب لتثبيت الأعمدة كما في الشكل 21-9. وبما أنها صلب فيمكن أن يتسرب تيار خلالها لذا لاحظ وجود عزل في وسط السلك الشداد كما في الصورة لمنع تسرب التيار. وصورته التفصيلية على يمين الصورة.



شكل 21-9 :

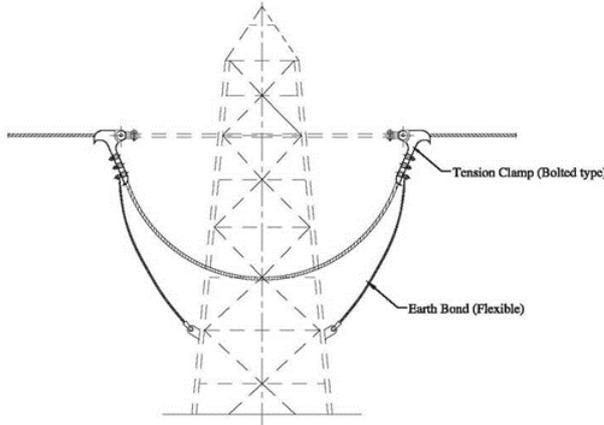
## 5-21 الإكسسوارات في الشبكات الهوائية

### 1-5-21 كلابات الشد Tension clamp

ويتكون من ذراعين ، الذراع الأصغر لا يوجد به مسامير ويكون في اتجاه الخط الهوائي والذراع الأكبر يوجد به عدد 3 إلى 4 مسامير ، ولذلك يسمى شداد 3 مسمار أو 4 مسمار ويكون في اتجاه البرج كما

في الصورة. ويجب أن يكون السطح الداخلي للشداد أملس تماما لعدم تجريح السلك أثناء الشد على هذا السطح ، ويفضل تبطين هذا السطح بشريط من الألومنيوم.

الصورة التالية في الشكل 10-21 تمثل أحد الكلامات.



شكل 10-21 :

### 2-5-21 السكاكين

أولا هناك فرق شاسع بين السكينة Disconnecting Switch وقاطع الدائرة Circuit Breaker كما هو معروف ، وهو أن القاطع يفصل على حمل أو على عطل ، وذلك يدويا في الأحوال العادية ، أو عن طريق أجهزة الوقاية المركبة على الخلية حيث يفصل تيارات الأعطال تلقائيا.

أما السكينة فإنها نوعان :

### 3-5-21 النوع الأول : السكاكين الهوائية

هذا النوع يفصل في حالة اللا حمل فقط ، و يستخدم في المناورات التي تتم على الخطوط الهوائية سواء للصيانة أو لإصلاح الأعطال أو لتجزئة الخط الرئيسي لتسهيل تحديد مكان العطل حيث يتم تركيب سكينة لكل 3 كم بالخطوط الرئيسية وعند الخطوط الفرعية .

ويتم تركيب السكاكين الهوائية عند بداية الخط الرئيسي وعند بداية التفريعات.

وتتكون من ثلاثة أجزاء (شكل 11-21) :

- الجزء الثابت وتسمى الأسلحة الثابتة
- الجزء المتحرك وتسمى الأسلحة المتحركة

- يد السكينة ومتصلة بماسورة حديد بطول 6 متر لتسهيل عملية الفصل والتوصيل من الأسفل إذا كانت معلقة على عمود.



شكل 21-11 :

سعة السكاكين المستخدمة

بالمصهرات عند التفريعات والمحولات المعلقة	200 أمبير
لتجزئة الخط الرئيسي	400 أمبير
عند بداية الخط الرئيسي	630 أمبير

**4-5-21 النوع الثاني : Load Break Switch**

وهناك نوع آخر من السكاكين يمكنه الفصل على الحمل لكنه لا يمكنه الفصل على العطل ، وهو ما يسمى Load Break Switch . والنوع الظاهر في الصورة شكل 21-12 معزول بغاز الـ SF6 (هناك أشكال أخرى عديدة).



شكل 21-12 :

## 6-21 الموصلات المستخدمة بشبكة الجهد المتوسط

معظم الموصلات المستخدمة في الخطوط الهوائية تكون عبارة عن أسلاك مجدولة بطريقة حلزونية ويكون اتجاه جدل الأسلاك في كل طبقة مخالفا لاتجاه الجدل في الطبقة السابقة .

وبالإضافة إلى الموصلات المجدولة المصنوعة من النحاس أو من سبيكة النحاس ويوجد عدد أنواع من الموصلات الألومنيوم والتي تعطى أفضل الحلول لمتطلبات خطوط النقل الهوائية في الظروف المختلفة ولكن من عيوب الألومنيوم أن نقطة انصهاره منخفضة فيتأثر بدرجة أسرع بتيارات الـ Short Circuit Current ، ولذا يجب إضافة النحاس أو الصلب للألومنيوم لتحسين بعض خواصه.

وهذه بعض الأنواع المستخدمة من الموصلات:

- موصلات الألومنيوم فقط ( ALL Aluminum Conductor )
- الألومنيوم المقوى بالصلب (ACSR) Aluminum Conductor Steel Reinforced
- موصلات سبائك الألومنيوم (AAAC) All-Aluminum Alloy Conductor
- الألومنيوم المقوى بسبيكة الألومنيوم Aluminum Conductor Aluminum Reinforced (ACAR)
- سبيكة الألومنيوم المقوى بالصلب Aluminum Conductor Steel Supported (ACSS)

ويتم اختيار مساحة مقطع الموصل طبقا للأحمال المطلوب توصيل التيار الكهربائي لها ، وكذلك نوع الحمل حتى لا يؤثر على قيمة الهبوط في الجهد .

وأشهر الأنواع المستخدمة هي الألومنيوم المدعوم بالصلب كما ذكرنا في شبكات النقل .

وأشهر المقاسات المستخدمة في شبكات التوزيع هي :

6/35 مم<sup>2</sup> ، 8/50 مم<sup>2</sup> ، 12/70 مم<sup>2</sup> ، 15/95 مم<sup>2</sup> ، 21/120 مم<sup>2</sup> ، 25/150 مم<sup>2</sup>.

ومعنى 6/35 حسب مواصفات الـ DIN أن الموصل يتكون من جزئين:

- ألومنيوم بمساحة مقطع 35مم<sup>2</sup>
- الصلب بمساحة مقطع 6 مم<sup>2</sup>

والجدول 1-21 يظهر بعض خصائص هذه الكابلات وعدد الأسلاك (المقطع الواحد مكون من عدد من الشعرات) المستخدمة من كل مادة داخل المقطع الواحد ومساحة مقطع كل سلكة من هذه الأسلاك.

## جدول 1-21

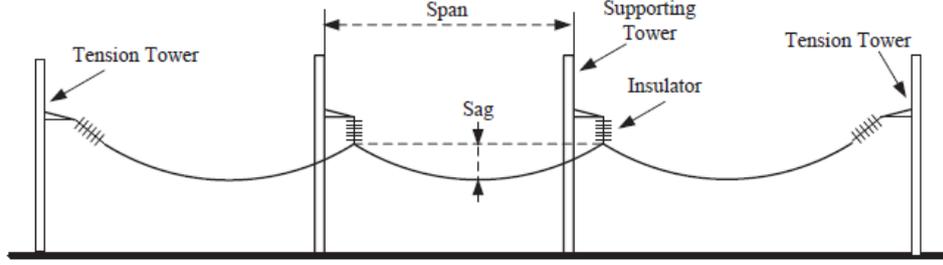
Egytech - code	Nominal cross sectional area	Number and nominal diameters of wires		Max. DC. resistance at 20 °C	Calculated breaking load	Approx. overall diameter	Approx. weight
		Aluminium	Steel				
	mm <sup>2</sup>	nr x Ø (mm)	nr x Ø (mm)	Ω/km	kn	mm	kg/km
a - According to DIN 48204							
AC0-T001-U11	16 / 2.5	6 x 1.80	1 x 1.80	1.8750	5.62	5.4	62
AC0-T001-U12	25 / 4	6 x 2.25	1 x 2.25	1.2060	8.39	6.8	97
AC0-T001-U13	35 / 6	6 x 2.70	1 x 2.70	0.8365	11.92	8.1	139
AC0-T001-U14	50 / 8	6 x 3.20	1 x 3.20	0.5941	16.72	9.6	196
AC0-T001-U15	70 / 12	26 x 1.80	7 x 1.45	0.4130	24.97	11.6	276
AC0-T001-U16	95 / 15	26 x 2.10	7 x 1.65	0.3058	32.19	13.4	369
AC0-T001-U17	120 / 21	26 x 2.45	7 x 1.95	0.2530	41.43	15.7	507
AC0-T001-U18	150 / 25	26 x 2.70	7 x 2.15	0.1939	52.34	17.3	630
AC0-T001-U19	185 / 32	26 x 3.00	7 x 2.40	0.1640	64.78	19.2	762
AC0-T001-U21	210 / 36	26 x 3.20	7 x 2.55	0.1410	73.44	20.5	865
AC0-T001-U20	240 / 40	26 x 3.40	7 x 2.70	0.1188	82.58	21.7	974
AC0-T001-U31	380 / 50	54 x 3.00	7 x 3.00	0.0757	120.90	27.0	1448

Cables - code name	Nominal cross sectional area	Number and nominal diameters of wires		Total cross-sectional area	Max. DC. resistance at 20 °C	Calculated breaking load	Approx. overall diameter	Approx. weight
		Aluminium	Steel					
	mm <sup>2</sup>	nr x Ø (mm)	nr x Ø (mm)	mm <sup>2</sup>	Ω/km	kn	mm	kg/km
b - According to BS 215								
Gopher	25	6 / 2.36	1 / 2.36	30.62	1.0930	9.61	7.08	106
Weasel	30	6 / 2.59	1 / 2.59	36.88	0.9077	11.45	7.77	128
Ferret	40	6 / 3.00	1 / 3.00	49.48	0.6766	15.20	9.00	172
Rabbit	50	6 / 3.35	1 / 3.35	61.70	0.5426	18.40	10.05	214
Horse	70	12 / 2.79	7 / 2.79	116.20	0.3936	61.20	13.95	538
Dog	100	6 / 4.72	7 / 1.57	118.50	0.2733	32.70	14.15	394
Wolf	150	30 / 2.59	7 / 2.59	194.90	0.1828	69.20	18.13	726
Dingo	150	18 / 3.35	1 / 3.35	167.50	0.1815	35.70	16.75	506
Lynx	175	30 / 2.79	7 / 2.79	226.20	0.1576	79.80	19.53	842
Caracal	175	18 / 3.61	1 / 3.61	194.50	0.1563	41.10	18.05	587
Panther	200	30 / 3.00	7 / 3.00	261.50	0.1363	92.25	21.00	974
Jaguar	200	18 / 3.86	1 / 3.86	222.30	0.1367	46.60	19.30	671
Zebra	400	54 / 3.18	7 / 3.18	484.50	0.0674	131.90	28.62	1621

وعند إنشاء الخطوط يراعى الآتى :-

1. استخدام الموصلات 6/35 مم<sup>2</sup> ، 12/70 مم<sup>2</sup> للخطوط الفرعية بأطوال 5 كم ، 15 كم على الترتيب.
2. استخدام الموصلات 25/150 مم<sup>2</sup> للخطوط الرئيسية لمسافة 20 كم كحد أقصى.

3. ويجب أن نلاحظ أن الأسلاك تتمدد في فصل الصيف وتتكمش في فصل الشتاء ولذلك عند حساب الطول الكلي اللازم للخط نضيف مترا لكل 100 متر طولى لدواعى الـ Sag الذى يظهر فى الصورة التوضيحية شكل 21-13.



شكل 21-13 :

وعموما فإن أقل مسافة وهى الموجودة عند أكثر نقطة انخفاضاً بين الموصل والأرض فى الشبكات جهد 11 kV يجب ألا تقل عن 6 متر ، وإذا تقاطع مع طريق فلا بد أن تكون المسافة 8 متر أو أكثر.

## 7-21 أجهزة الفصل وإعادة التوصيل التلقائى

فى التجمعات الصغيرة مثل القرى والمزارع والصحارى وما يشابهها تكون التغذية دائماً عبارة عن خط هوائى لأنه يصعب تمديد الكابلات بالأرض حيث الفلاحين يقومون بعزق الأرض بالفؤوس ، ومن ثم فهناك خطورة من تواجد الكابلات بالأرض ، ولذا يتم نقل الجهد عن طريق الخطوط الهوائية .ونتيجة لأن الأحمال صغيرة فيتم تغذية الأحمال بواسطة محولات تركيب على الأعمدة.

والمشكلة فى مثل هذه الأنظمة هو تعرض الخطوط لأعطال عابرة مثل حدوث تلامس عابر بسبب الأمطار أو الطيور أو أغصان الأشجار ، وقد تكون أعطال دائمة نتيجة سقوط أحد الأسلاك أو قطع أو انهيار عزل أحد المحولات الكثيرة المتصلة على الخط .

وحيث أن هذا الخط يكون محمياً فى أوله فقط من ناحية محطة التحويل الرئيسية بقاطع و أجهزة الوقاية فإن كل عطل من الأعطال السابق ذكرها يؤدى إلى فصل القاطع الرئيسى وهذا يؤدى إلى انقطاع التغذية عن عدد كبير من المشتركين رغم أن العطل قد يكون فى واحدة فقط من عشرات التفريعات على الخط وقد يكون كما ذكرنا عطلاً مؤقتاً.

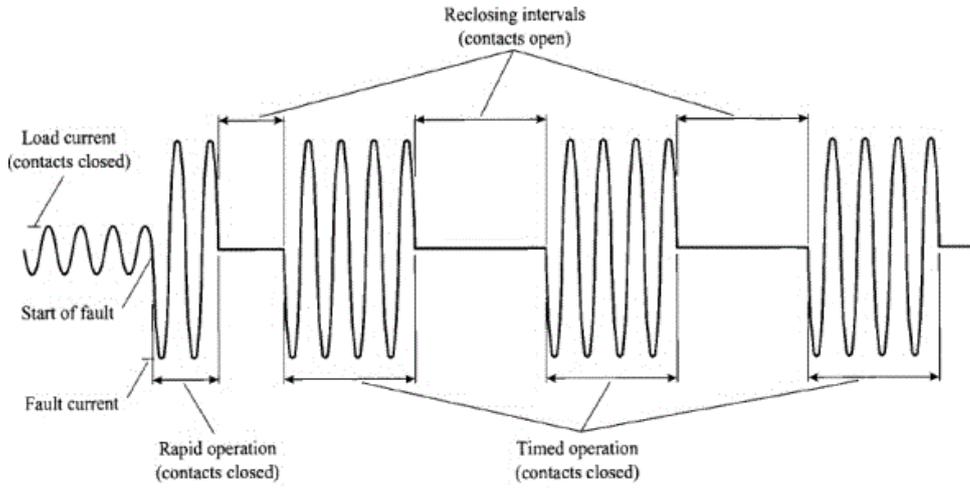
ولتفادي حدوث ذلك فإننا نستخدم جهاز فصل وإعادة توصيل أوتوماتيكي Recloser شكل 21-14، وهو مشابه للقاطع في عمله، بل هو فعلا قاطع ولكنه يتميز بأنه يمكنه أن يعيد توصيل نفسه (من مرة إلى ثلاث مرات بعد زمن معين) وفي المرة الأخيرة لا يعيد توصيل نفسه .

ملحوظة : الصندوق الصغير يمين العمود يوضع به دائرة التحكم في الـ Recloser .



شكل 21-14 :

والشكل 21-15 يمثل أداء هذا الجهاز عندما يضبط على فصل وإعادة توصيل لثلاث مرات ، فعند حدوث عطل بالخط الهوائي يتم الفصل بعد زمن الفصل المحدد (0.3 ثانية لجهاز التفريغ ، 0.5 ثانية لجهاز بداية الخط ) ثم يقوم الجهاز بإعادة التوصيل للخط بعد زمن معين (زمن يتم تحديده في كل مرة توصيل من المرات الثلاث وعلى سبيل المثال 1 ثانية ، 3 ثانية ، 10 ثانية) فإذا تكرر الفصل مرة رابعة فإن الجهاز يقوم بفصل كامل للخط ولا يتم الإعادة إلا بعد عمل Reset للجهاز يدويا . والصورة التالية في الشكل 21-16 تمثل محول ومعه Recloser على عمود توزيع واحد.



شكل 21-15 :



شكل 21-16 :

## 8-21 مانعة الصواعق

توضع مجموعة مانعة الصواعق فى بداية ونهاية الخط الهوائى للجهد المتوسط وكذلك عند كل محول. وتوضع أيضا على كل جهاز فصل وإعادة التوصيل الأتوماتيكي Recloser ، وعلى منظمات الجهد الأتوماتيكية AVR ، ومكثفات الجهد المتوسط وذلك لتفريغ الشحنة الكهربائية للصواعق التى قد تضرب الشبكة الهوائية.

وهى عبارة عن مقاومة غير خطية ذات مقاومة عالية فى الأحوال العادية بينما تقل قيمتها عند زيادة الجهد (راجع تفاصيل أكثر عنها فى الباب الثالث الخاص بمحطات التحويل). وتثبت مانعة الصواعق (شكل 17-21) على قمة برجى البداية والنهاية مع توصيل قواعد المجموعة بأرضى جيد.



شكل 17-21 :

## 9-21 أجهزة مبيات الأعطال

نظرا لطول الخط الهوائى الذى يصل أحيانا إلى أكثر من 50 كيلو متر فإنه يتم تركيب بعض الأجهزة على الأسلاك الهوائية لتعطى علامة بيان على هيئة ضوء أو فلاش عند حدوث عطل بالخط الهوائى ، وذلك لسرعة تحديد الاتجاه الذى تم حدوث العطل به، فالشبكة الهوائية يمكن أن يكون بها تفريعات فى اتجاهات متعددة كما رأينا فى الشكل 1-21 فى بداية هذا الفصل .

ويتم رؤية الضوء الصادر من هذا الفلاش على بعد يتراوح بين 300 إلى 400 متر بالنهار أما في الليل يتم رؤيتها على بعد كيلو متر . ويفضل أن يركب ذلك الجهاز (شكل 21-18) بعد التفريضة أو نقطة التقسيم.

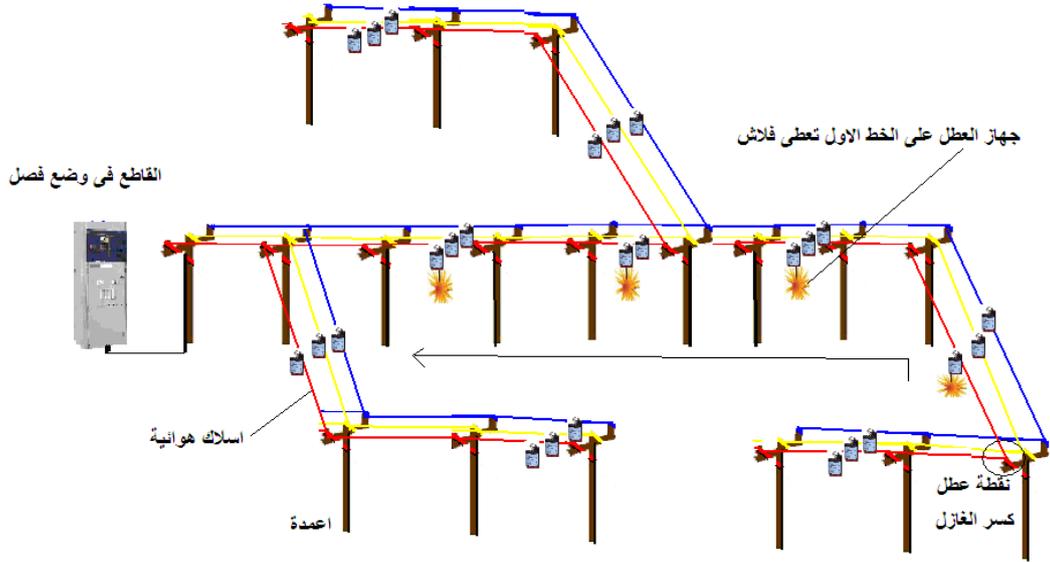


شكل 21-18 :

ويوجد نوعان من هذه الأجهزة : نوع يركب على الأسلاك الهوائية مباشرة ، ونوع آخر يركب على الأعمدة. وفكرة عمله أنه عند وجود تلامس ثلاث خطوط مع بعض يتم تشغيل كل أجهزة البيان من نقطة العطل إلى المصدر لتبين مكان واتجاه العطل أما إذا حدث التلامس بين خطين فإن مبيبات الأعطال الخاصة بهذين الـ Two Phases فقط يضيئوا مثل السابق من المصدر وحتى العطل ، ومن ثم يسهل تحديد اتجاه العطل لاسيما إذا كان لدينا شبكات بها تفريعات عديدة. وبالطبع ففي الوضع الطبيعي تكون كافة المبيبات مطفأة.

مع ملاحظة أن فكرة هذه المبيبات مبنية على مبدأ زيادة التيار ، بمعنى أنه كلما زاد تيار العطل كلما كان الضوء أكثر وضوحا ، فإذا كان تيار العطل منخفضا تصبح هذه المبيبات عديمة الفائدة كما في حالة High-Impedance faults .

والشكل 21-19 يظهر عطلا من النوع الـ SLG ، وهذا واضح بدليل وجود لمبات فازة واحدة فقط مضيئة من المصدر للعطل. ويتم فصل القاطع لفصل الخط بالكامل مع استمرار إشارة الفلاش على طول الخط من نقطة العطل حتى بداية الخط.



شكل 19-21 :

ويوجد أنواع أخرى من مبيانات الأعطال تعمل من خلال إرسال إشارات لاسلكية (شكل 20-21) لتسهيل الوصول إلى أماكن الـ Short Circuit ، وكل ذلك لتقليل فترات إصلاح الأعطال وتحسين جودة التغذية الكهربائية.



شكل 20-21 :

## 10-21 الأرضى فى شبكات التوزيع

يتم توصيل خط أرضى أعلى الأبراج و تأريضه فى بدايات الخط و ذلك للحماية من البرق و لتفريغ أي شحنات متجمعة بعيدا عن الشبكة.

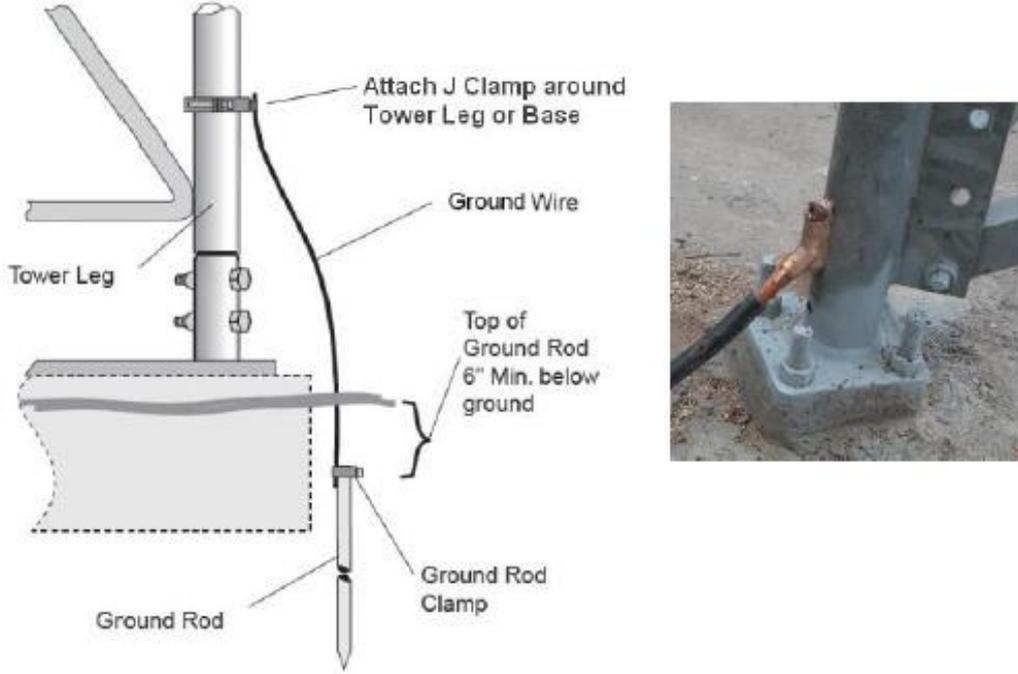
وهذا النوع من الأرضي يسمى أرضي هوائي ، ويستخدم عندما تكون التربة صخرية أو رملية ، وهو عبارة عن موصل رابع بمساحة مقطع 70 مم<sup>2</sup> نقوم بتركيبه على الأبراج مباشرة بدون عوازل ، ثم يتم عمل آبار الأرضي عند أبراج البداية والنهاية للخط الهوائي لتوصيل الأرضي بها ، وكذلك كل 1 كم طوال مسار الخط.

وفى هذه الآبار يتم تركيب إلكترود نحاس داخل البئر ويربط عند سطح الأرض بسلك نحاس مساحة مقطعة 70 مم<sup>2</sup> عن طريق كلمبات و الطرف الآخر للسلك يتم توصيله بالأرضي الهوائي ، ويمكن زيادة عدد الإلكترودات للوصول إلى أقل مقاومة للتربة لتكون فى حدود 5 أوم كحد أقصى.

وهناك أرضى خاص بالأبراج نفسها وهو عبارة عن ماسورة من الحديد الصلب المجلفنة يتم تثبيتها فى الأرض ثم توصيل الطرف العلوي للماسورة بسلك نحاس مساحة مقطعه 50 مم<sup>2</sup> والطرف الآخر للسلك يتم تثبيته بالبرج كما فى الصورة شكل 21-21.

ملحوظة:

يستخدم الأرضي المؤقت Temporary Earthing أثناء عمليات الصيانة وإصلاح الأعطال ، وذلك لتأمين القائمين على العمل ، فعند القيام بعمل صيانة أو إصلاح عطل بجزء من الخط الهوائي يتم تركيب أرضى مؤقت فى بداية الخط (بداية تغذية الخط ) ويتم كذلك تركيب أرضى مؤقت قبل منطقة العمل وتركيب أرضى مؤقت بعد منطقة العمل .



شكل 21-21 :

## 11-21 مشاكل خطوط التوزيع الهوائية

1. انقطاع الكبارى "Jumpers" بالخط واحتراقها أحيانا بسبب الرخاوة في الربط حيث تزداد درجة حرارتها بزيادة التيار المار فيها خصوصا إذا كانت هذه الزيادة نتيجة لأعطال متكررة بالخط.
2. وجود أشجار في مسارات الخطوط تتسبب حركة فروع الشجر في عمل قصر بالدائرة الكهربائية.
3. نقص العازلية نتيجة لتراكم الغبار على العوازل مما يؤدي إلى انقطاع التغذية.
4. سقوط أعمدة الخطوط نتيجة لهطول الأمطار والرياح أو بواسطة حركة المرور.
5. انقطاع أحد الموصلات وتلامسه بالأرض من ناحية الأحمال (أعطال عالية المقاومة) مما يتسبب صعوبة فصل المغذى بجهاز الوقاية ويتسبب في حدوث وفيات نتيجة الصعق بالكهرباء.
6. مرور الخطوط الهوائية داخل المناطق المأهولة بالسكان .
7. سوء توزيع الأحمال وانخفاض الجهد (لاسيما في القرى) .
8. نتيجة زيادة الأحمال عند المشتركين خصوصا في وقت الذروة وارتفاع التيار المسحوب وينتج عنها زيادة قيمة voltage drop ويؤدي لانخفاض الجهد عند المستهلك
9. عدم اختيار مقطع مناسب للكابلات مما يؤدي أيضا إلى زيادة voltage drop

10. وجود الوصلات بين الكابلات وبعضها أو بين الكابلات والبارات حيث أنه ينتج عنها contact resistance وتزيد قيمة المقاومة في هذه المناطق مما يؤدي إلى زيادة voltage drop .

## 22

## دراسات هامة فى شبكات التوزيع

هذا الفصل يشتمل على أربعة مواضيع:

- 1- الاعتمادية وطرق حسابها
- 2- تنظيم الجهد فى شبكات التوزيع
- 3- التحكم فى شبكات التوزيع
- 4- نظم الاتصالات فى شبكات التوزيع

## 1-22 الاعتمادية فى الشبكات

فى الأجزاء السابقة تعرضنا لطرق تخطيط شبكات توزيع الجهد المتوسط وكذلك تخطيط الشبكات الثانوية بما تشتمل عليه من محولات وخلافه. والحقيقة أن النماذج التى عرضت تمثل فقط أشهر الطرق للتوصيلات لكن يمكن عمل أشكال أخرى عديدة لربط عناصر شبكة التوزيع سواء فى منطقة الجهد المتوسط أو فى منطقة الجهد المنخفض أو فيهما معا .

والفرق بين هذه الشبكات هو فى نسبة الاعتمادية Reliability المطلوبة وما يترتب على ذلك من تكلفة التصميم فكلما زادت الاعتمادية زادت التكلفة وزاد تعقيد التصميم ، ومن هنا كانت النقطة الأولى التى يجب على المصمم أن يحسمها هى : ماهو شكل الشبكة التى تحقق درجة الاعتمادية المطلوبة ؟

## 1-1-22 الفرق بين الـ Reliability &amp; Power Quality

يجب فى البداية توضيح الفرق بين الاعتمادية Reliability ، و بين الـ Power Quality وذلك لتقارب المفهومين :

- **فأما الـ Power Quality** "جودة الطاقة الكهربائية" فتعنى مدى مطابقة موجة الجهد التي تظهر للعميل للـ ideal sinewave المتعاقد عليها مع الشركة من حيث عدم وجود voltage fluctuations أو تشوه في شكل الموجة نفسها بسبب وجود بعض الـ harmonics مثلا .
- **أما الاعتمادية reliability** فيقصد بها مدى حدوث انقطاع في الخدمة لمدد تتجاوز الخمس دقائق وذلك طبقا لمقاييس معينة سنتعرض لها في الأجزاء التالية.

ملحوظة: إذا كانت مدة انقطاع الخدمة تقل عن خمس دقائق فإنها تعتبر من مشاكل الـ Power Quality وليست من مشاكل الاعتمادية.

## 2-1-22 مؤشرات الاعتمادية في الشبكات :

توجد عدة مؤشرات لقياس الاعتمادية منها:

### System Average Interruption Duration Index (SAIDI)

هذا المؤشر يشير إلى متوسط مدة انقطاع الخدمة عن العملاء لفترة محددة قد تكون شهرا أو سنة أو حتى يوم واحد و هو الأكثر استخداما لتحديد الـ sustained interruption. ولحساب هذا المؤشر فإننا نقسم إجمالي عدد ساعات الانقطاع على عدد العملاء الكلى . ويقاس SAIDI بالدقائق أو الساعات وغالبا ما يتم قياسها خلال العام.

مثال توضيحي : حدث ثلاثة انقطاعات للخدمة في يوم 1 يناير وهذه الانقطاعات كالتالي:

1. عدد 10 عملاء تم قطع الخدمة عنهم لمدة 90 دقيقة
2. عدد 1000 عميل تم قطع الخدمة عنهم لمدة 20 دقيقة
3. عدد 3 عملاء تم قطع الخدمة عنهم لمدة 175 دقيقة

وبفرض أن عدد العملاء الكلى 30000 ، إذن تكون قيمة الـ SAIDI كالتالي:

$$0.714 = 30000 \div (175 * 3 + 20 * 1000 + 90 * 10)$$

وبالتبع كلما صغرت هذه القيمة كلما دل ذلك على ارتفاع الاعتمادية في الشبكة.

**System Average Interruption Frequency Index (SAIFI)**

و هذا المؤشر يحسب نسبة احتمالية قطع الخدمة عن أى عميل فى مدة معينة ، ويساوى عدد العملاء الذين تم قطع الخدمة عنهم مقسوما على عدد العملاء الكلى . و من المثال السابق فإنه يساوى  $1013 \div 30000 = 0.0337$  فى يوم 1 يناير .

**Customer Average Interruption Duration Index (CAIDI)**

و هذا المؤشر يشير إلى متوسط مدة انقطاع الخدمة عن العملاء الذين تم قطع الخدمة عنهم ولحسابه من المثال السابق فبدلا من أن يكون المقام 30000 فإنه يصبح 1013 ، حيث يمثل هذا الرقم إجمالى العملاء الذين تأثروا فعلا بالانقطاعات و بالتالى يصبح الـ CAIDI يساوى 21.15 دقيقة. لاحظ أن

$$CAIDI = SAIDI / SAIFI$$

**Customer Average Interruption Frequency Index (CAIFI) –**

و هذا المؤشر يشير إلى متوسط عدد مرات فصل الخدمة عند العملاء الذين تم فصل الخدمة عنهم فى مدة محددة ويساوى (عدد مرات فصل الخدمة ÷ عدد العملاء الذين تم فصل الخدمة عنهم )

$$0.00296 = 1013 \div 3$$
 ومن المثال السابق فإنه يساوى

**Customer Interrupted per Interruption Index (CIII) –**

هذا المؤشر يعطى متوسط عدد العملاء الذين تم فصل الخدمة عنهم عند انقطاع التيار الكهربى . ولحساب هذا المؤشر نستخدم القانون التالى:

عدد الأفراد الذين تم فصل الخدمة عنهم مقسوما على عدد مرات انقطاع التيار الكهربى . ومن المثال السابق فإنه يساوى  $1013 \div 3 = 337.66$

وهذه المؤشرات التى ذكرناها أنفا هى المقياس الحقيقى للاعتمادية فى أى شبكة والتى ينبغى معرفة قيمتها جيدا حتى يمكننا مقارنة أداء الشبكة فى الوقت الحاضر مقارنة مع أدائها فى وقت سابق لمعرفة ما إذا كان هناك تحسن أم لا . كذلك تساعد هذه المؤشرات فى تحديد أماكن الضعف فى الشبكة والتى ينبغى تحسينها حتى نصل بالأداء إلى أفضل مستوى ممكن.

ولكى تعبر هذه المؤشرات عن أداء الشبكة الحقيقى ينبغى قبل حسابها أن نحذف الأحداث الكبرى major events من بيانات الشبكة التى تستخدم فى استنتاج هذه المؤشرات. وهذه الـ major events لها تعريفات كثيرة و لكن باختصار هى الأيام التى تحدث فيها أعطال كثيرة تزيد عن حد معين يتم تحديده

حسب التعريف والتي تكون بسبب مؤثر خارجى عن الشبكة كالزوايح والأعاصير والفيضانات . فالأعطال التي تحدث بسبب من هذه الأسباب لا يمكن أخذها فى الاعتبار فهي لا تعبر بحال من الأحوال عن أداء الشبكة و بالتالي لا يمكن الاستفادة منها .

ومن العوامل الأخرى التى تؤثر فى الاعتمادية فى الشبكات :-

- **circuit length** فكلما زاد طول الشبكة زادت احتمالية تعرض الخدمة للانقطاع وبالتالي قلت الاعتمادية لهذه الشبكة .
- **Circuit configuration** فشكل الشبكة من الداخل يؤثر بشكل كبير على الاعتمادية لهذه الشبكة ، فالشبكة الـ Ring مثلا تكون مدد الأعطال فيها أقل بكثير من الشبكات الـ Radial.

## 2-22 تنظيم الجهد فى شبكات التوزيع

تعتبر منظمات الجهد الأتوماتيكية أو الـ Automatic Voltage Regulator (AVR) من أهم وسائل المحافظة على قيمة الجهد ثابتة ، ويتم تركيبها فى المناطق التى ينخفض بها الجهد نتيجة المسافات الطويلة للخطوط الهوائية وخصوصا فى أوقات نزوة الأحمال . وهو يشبه المحول العادى من حيث الشكل الخارجى ، أما تركيبه الداخلى فهو محول من النوع الـ auto Transformer ونستعرضه فى الجزء التالى.

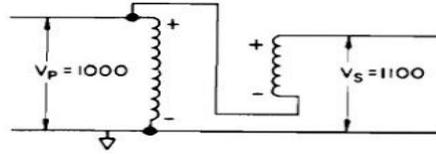
### 1-2-22 فكرة عمل منظم الجهد

تبنى فكرة عمل منظم الجهد الأتوماتيكي على استخدام محول ذاتى Auto Transformer مكون من ملف واحد مقسم إلى جزئين من الملفات على قلب حديدى واحد .

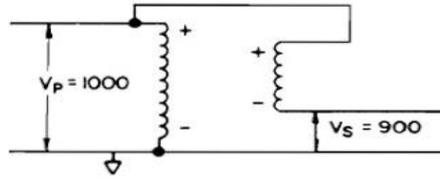
وهناك نوعين من منظم الجهد الأتوماتيكي AVR الأول يستخدم فى شبكة الجهد المتوسط وهو من النوع الميكانيكى فى جزء التحكم كما سنرى ، والثانى يستخدم فى الجهد المنخفض وغالبا يكون التحكم فيه كهربيا وليس ميكانيكيا. وهناك أيضا فروق فى التركيب فضلا عن الفروق فى الاستخدام. فالـ AVR المستخدم فى الجهد المنخفض يكون الهدف منه حماية المستهلكين من الارتفاع أو الانخفاض المفاجئ فى الجهد. أما حديثنا فى هذا الجزء فسيتركز فقط على الـ AVR المستخدم فى شبكات الجهد المتوسط بغرض علاج مشكلة الهبوط فى الجهد .

وفكرة الـ AVR أنه محول مكون كما ذكرنا من ملفين ابتدائي وثانوي مثل أى محول لكن الجديد هنا أن الملفين متصلين ببعض على التوالي بطريقة يمكن أن تؤدي إما إلى جمع جهدي الملفين معا Boost ، أو طرحهما Buck ، على سبيل المثال لو لدينا محول 1000/100 فإن الجهد الناشئ من توصيل الملفين معا بطريقة جمعية يساوى 1100 فولت بينما ستكون القيمة إذا وصلا معا بطريقة الطرح تساوى 900 فولت ، وهذا يعنى أن هذا المحول يمكنه تغيير الجهد الخارج منه بنسبة 10% زيادة أو نقصان كما فى الشكل 1-22 .

ويمكن إضافة Taps على ملفات الجهد الأعلى ليتم الفصل والتوصيل على درجات وليس فقط بين الأطراف النهائية كما فى الشكل ، مما يعطى مجالا أوسع لتغيير قيمة الجهد فى الجهة الأخرى.



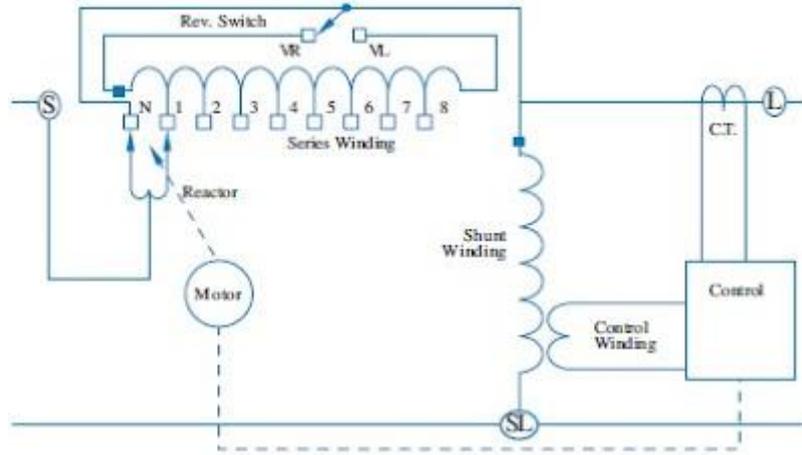
Step-up Autotransformer (Boost)



Step-down Autotransformer (Buck)

شكل 1-22 :

وتتم عملية التحكم فى الفصل والتوصيل لهذه الملفات بطريقة كهربية/ميكانيكية ، فهذه الأجهزة تكون مزودة بمعالج دقيق Microprocessor لتقدير حجم الهبوط فى الجهد ومن ثم تقدير المقدار المطلوب رفعه بواسطة الـ AVR . وبناء على الحسابات السابقة ترسل إشارة إلى محرك كهربى Motor كما فى الشكل 2-22 ليقوم بنقل نقاط التوصيل ميكانيكيا حسب المطلوب سواء بالدوران يمينا أو يسارا وبالتالي يزيد الجهد أو ينخفض.



شكل 2-22 : Step Voltage Regulator Schematic Diagram

والأنواع الحديثة تكون أيضا مزودة بنظم اتصالات لتتم عملية التغيير عن بعد وبالتالي التحكم فى الجهد وضبط قيمه أوماتيكيا. وغالبا لا تزيد نسبة التغيير المسموح بها فى شركات التوزيع عن  $\pm 10\%$  من قيمة جهد الدخول ، ويتم التقسيم على 32 خطوة (16 خطوة منهم بالزيادة و16 خطوة بالنقصان) فإذا قسمت  $10\%$  على 16 خطوة ستجد أن نصيب الخطوة الواحدة يساوى  $5/8\%$  من قيمة الجهد. ويوجد من هذه الأجهزة نوعان : Single and Three phase Voltage regulators .

والعيب الأساسى لهذه الأجهزة هو البطء فهى تحتاج على الأقل إلى 15 ثانية لتنتقل من توصيلة لأخرى وهذا زمن طويل فى حالة حدوث عارض مفاجئ لكنه مقبول فى الظروف الطبيعية. (ملحوظة : هناك أنواع حديثة يصل سرعة التغيير إلى حوالى ربع ثانية ، لكنها حتى الآن غير موجودة بالشبكة فى مصر).

### 2-2-22 مثال تطبيقى لتقدير حجم الـ AVR

يقدر حجم الـ AVR بوحدات الـ KVA فكيف يتم حساب ذلك؟

يحتاج الأمر إلى معرفة نسبة التغيير فى الجهد المطلوبة ولتكن مثلا  $\pm 10\%$  ، ثم نحتاج أيضا لمعرفة الجهد المقتن System phase voltage ، ومعرفة قيمة أقصى تيار حمل Max Load current . ثم بضرب الثلاث قيم السابقة معا نحصل على القدرة المقننة للـ AVR per Phase .

**Example:**

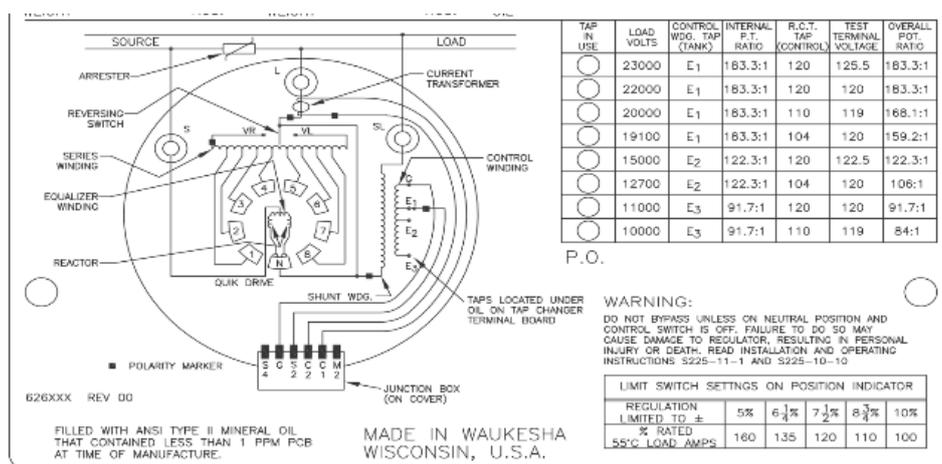
Compute for the step-voltage regulator size needed by a 3-phase, 4-wire multi-grounded feeder with a system voltage of 13800Y/7970 V. The required voltage regulation is 10% and the peak connected load is 6.0 MVA.

**Solution:**

- Voltage regulation = 10%
- Phase voltage is the line-to-neutral voltage = 7.97 kV (since it is a 4-wire multi-grounded wye feeder)
- Load current =  $6.0 \text{ MVA} / (1.732 \times 13.8 \text{ kV}) = 251 \text{ A}$
- Voltage Regulator kVA Size =  $10\% \times 7.97 \text{ kV} \times 251 \text{ A} = 200 \text{ kVA}$

Use three 32-step voltage regulators, each with a standard rating of 250 kVA, 7970 V,  $\pm 10\%$  regulation

والشكل 22-3 يمثل مخطط حقيقي لأحد أنواع AVR ويمكن رؤية قيم نسبة التغير المتاحة حسب نقطة التوصيل في الجدول الظاهر بنفس الشكل.



شكل 22-3 :

وتثبت أجهزة الـ AVR في الشبكات الهوائية على أعمدة خشبية أو معدنية كما في الشكل 4-22 وهي تشبه في الشكل الخارجي المحولات العادية.



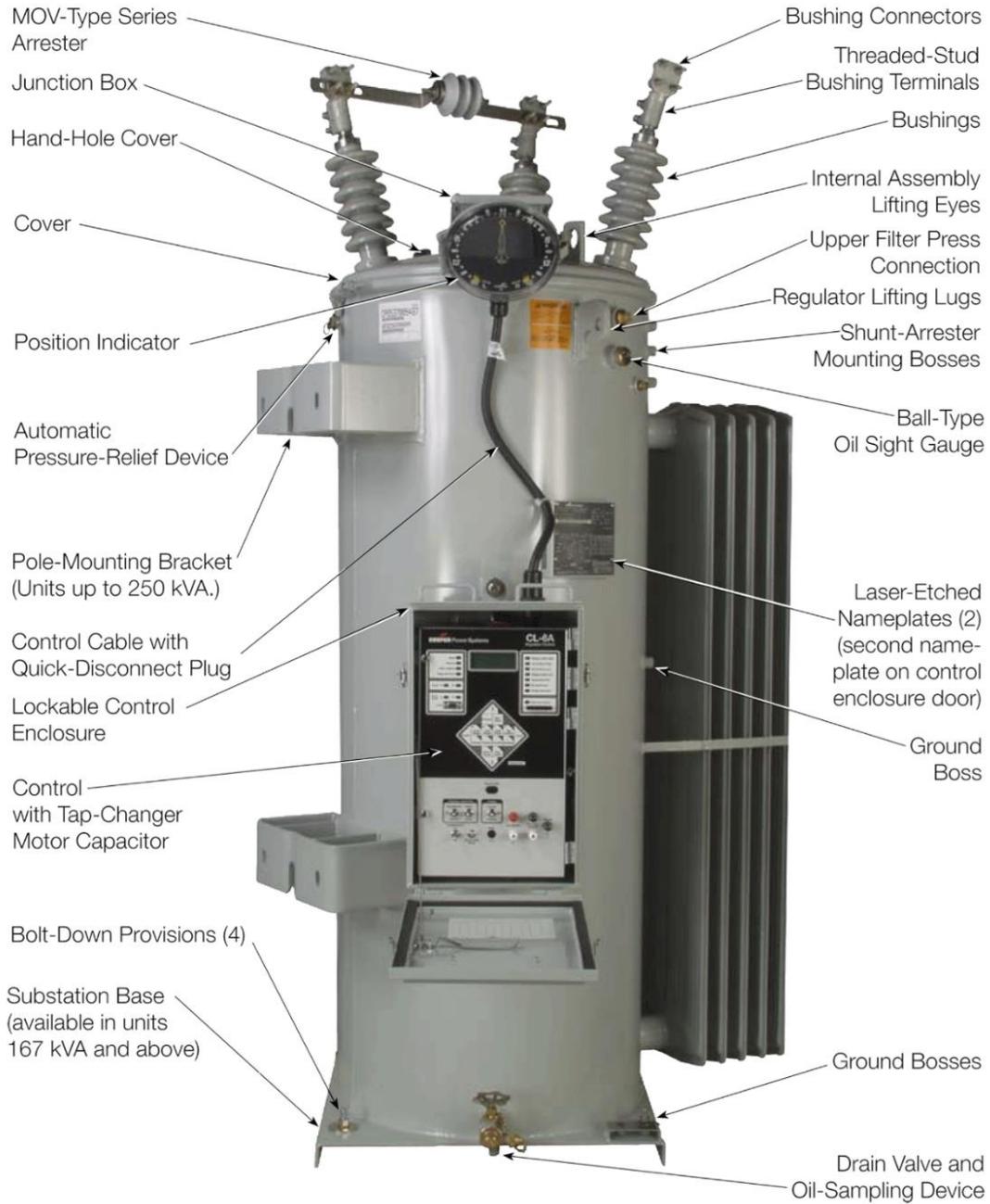
شكل 4-22 :

أما في الشبكات الأرضية فيوضع في صناديق تشبه صناديق التوزيع كما في الشكل 5-22.



شكل 5-22 :

ويمكن مراجعة المزيد عن محولات الـ Auto Transformer في كتابي "المرجع في محولات القوى". وهذه صورة في الشكل 6-22 مفصلة للـ AVR .



شكل 22-6 :

## 3-22 التحكم في شبكات التوزيع

### 1-3-22 تعريف الـ Distribution Automation :

الـ Distribution Automation له عدة مفاهيم ومعاني مختلفة كما أن له العديد من التطبيقات المتنوعة ، فقد نقصد به نظام اتصال على مستوى التوزيع يمكننا من التحكم فى الأحمال وتقليل قيمة peak مثلا ، أو قد يمثل محطة تحكم عن بعد فى محطة التوزيع ذات قدرة على اتخاذ القرارات مثل فتح أو غلق بعض الدوائر .

يوجد نوعان من التحكم فى شبكات التوزيع:

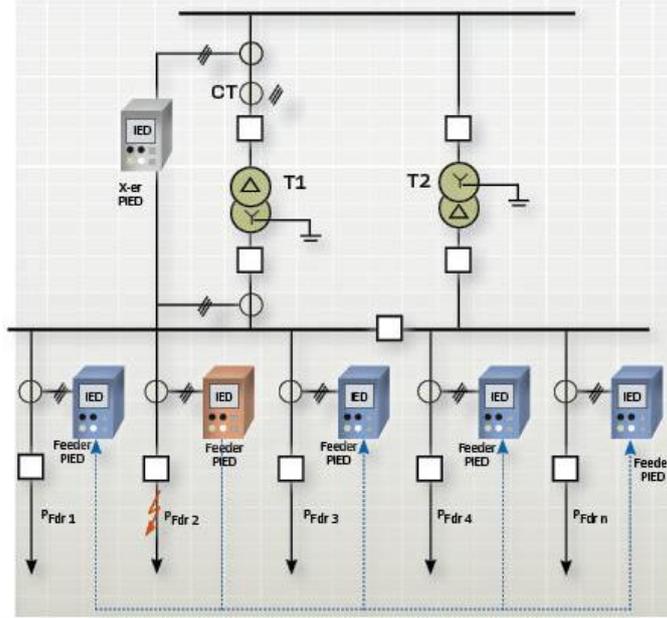
- التحكم فى شبكة الجهد المتوسط وذلك عن طريق الموزعات. وتتم عملية التحكم من داخل مراكز للتحكم فى شركات التوزيع المختلفة.
- التحكم فى شبكات الجهد المنخفض وذلك عن طريق العداد الذكى المركب عند العميل.

يستخدم نظام التحكم سواء فى محطات التحويل الكهربى أو فى شبكات التوزيع مجموعة من الأجهزة المختلفة تعمل معا كمنظومة متكاملة. من أهمها :

### 2-3-22 أجهزة الـ IED

أدى التطور الهائل فى أنظمة المعالجات الدقيقة (Microprocessors) إلى انتشار الأجهزة الذكية المعروفة بـ Intelligent Electronic Devices IEDs ، واستخدامها فى وقاية مختلف عناصر منظومة التوزيع كما فى الشكل 7-22.

وإلى عهد قريب كانت الشركات تنتج هذه الأجهزة بروتوكولات للتخاطب والاتصال مختلفة ، مما أدى إلى الاعتماد الكلى على الشركة المنتجة فقط فى التطور أو التوسع أو الصيانة. ولذا قامت الجمعية الدولية الكهروتقنية IEC المجموعة رقم 57 بإعداد بروتوكول قياسي IEC 61850 لتنظيم إنتاج المعدات الكهربائية الذكية وتوحيد لغة التخاطب بينها بحيث يمكن تشغيل معدات مختلفة من شركات مختلفة لتعمل مع بعضها فى منظومة واحدة بتوافق تام دون الحاجة إلى أجهزة أو برامج لتقوم بمهمة التوافق بينهما كما كان الحال عند ظهور هذه الأجهزة الذكية.

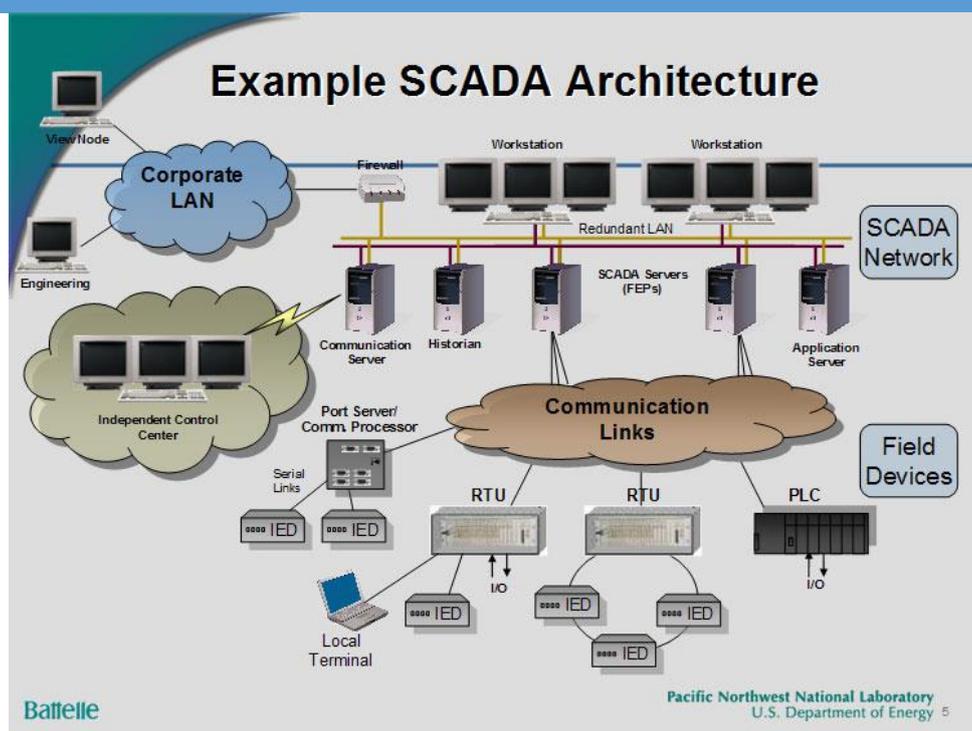


شكل 22-7 :

### 3-3-22 نظام الـ SCADA

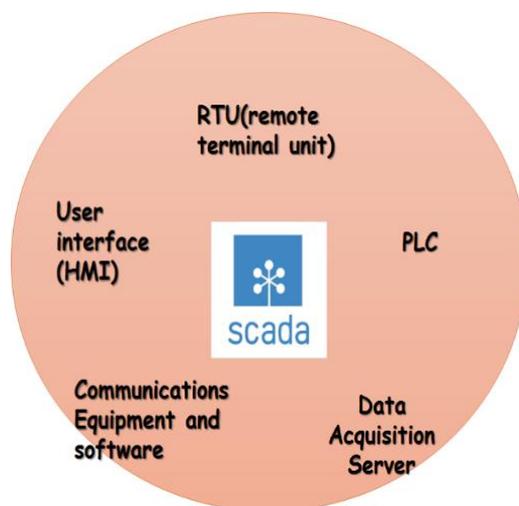
كلمة SCADA ، وهي اختصار لـ Supervisory Control and Data Acquisition ، أي نظام للمراقبة والتحكم وجمع البيانات. ويقوم مبدأ العمل في شبكات التوزيع من خلال مراقبة الخطوط والمحولات عن طريق وجود حساسات Sensors وأنظمة تحكم طرفية RTU , Remote Terminal Unit موجودة في لوحات التوزيع أو لوحات المحولات التي يُراد مراقبتها والتحكم بها، وتكون هذه الحساسات مُتصلة بجهاز الحاسوب المركزي، وعن طريق قنوات اتصال لنقل البيانات إلى وحدة المراقبة المركزية التي تستطيع من خلال هذه البيانات معرفة حالة الجهاز الطرفي أو الوحدة الطرفية عن بُعد دون الحاجة للمراقبة البشرية التي بدأت جميع الأنظمة في التخلي عنها واستبدالها بالأنظمة التكنولوجية كنظام SCADA لتوفير الجهد والوقت.

ومن خلال الحساسات والأجهزة الطرفية تستطيع أيضا بالإضافة للمراقبة أن تتحكم بالوحدات التابعة للنظام؛ كإغلاق خط أو فتحه ، أو أية عمليات تحكم عن بُعد، فمثلاً يقوم الحساس بتوجيه بيانات رقمية عبر شبكة SCADA ، وتصل إلى الجهاز المركزي بأن هناك ارتفاع في درجات الحرارة لمحول معين ، فيقوم عندها العامل المناوب في الخدمة بالتدخل إما بتخفيف الحمل أو بإرسال فرق الصيانة. والشكل 22-8 يمثل نموذجا لمنظومة الـ SCADA.



شكل 22-8 :

وغالبا ما تتكون أنظمة الـ SCADA من الأنظمة الفرعية التالية:



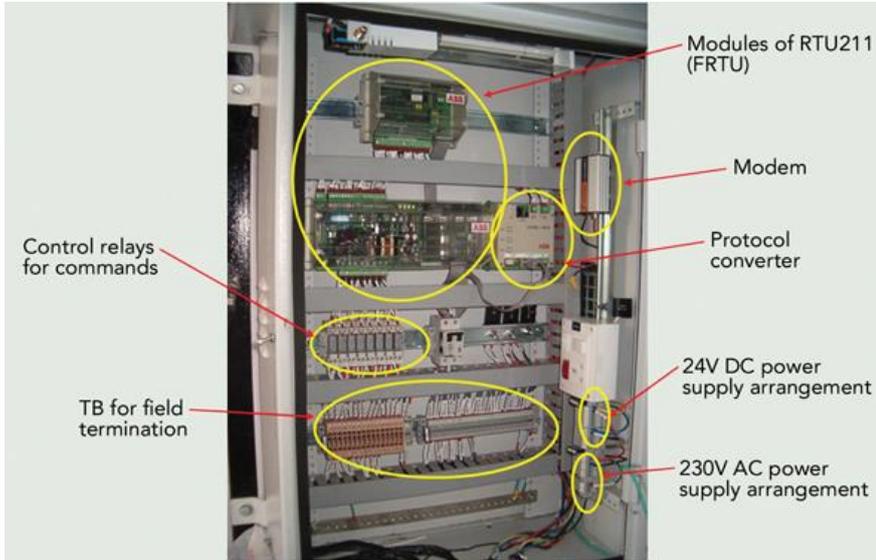
1. واجهة استخدام للمستخدم (Human-machine interface or HMI) وهي الشاشة النهائية التي تظهر عليها بيانات معالجة لمدير العمليات ، ومن خلال هذه البيانات المعالجة يقوم مدير العمليات بالمراقبة والتحكم في العمليات.

2. نظام المراقبة العمومي: عن طريق الحاسوب، الذي يقوم بتجميع البيانات عن الشبكة ويقوم بإرسال أوامر للتحكم فيها أيضا.
3. قناة الاتصال communication وهو يربط وحدات التحكم الطرفية بنظام المراقبة العمومي.
4. والعنصر الفعال الأساسي هو الـ RTU .

### وحدات التحكم الطرفية (Remote terminal Unit RTU) .

وهي أداة تحكم ومراقبة عن بعد تقوم بجمع المعلومات من جميع الوحدات في المناطق الخارجية من إنذارات وقياسات والتي تكون مربوطة بالحساسات المستخدمة مثلا لقياس درجة الحرارة، أو مستوى سائل، أو ضغط مثلا. وتقوم وحدات التحكم الطرفية بتحويل البيانات الخارجة من الحساسات إلى بيانات رقمية، وإرسالها إلى نظام المراقبة العمومي ، بمعنى أنها تقوم بتحويل الإشارات المتبادلة مع مركز توزيع الأحمال Load Dispatch Center, LDC إلى لغة تفهمها مكونات الشبكة الكهربائية ، كذلك تقوم هذه الوحدة بجمع المعلومات من ( إنذارات وأوضاع وقياسات وغيرها ) من المحطات ونقلها إلى الـ Load Dispatch Center على شكل رقمي ، ثم في المركز يتم استقبالها وتحليلها واتخاذ الإجراء المناسب لكل على حدة .

ووحدة التحكم عند بعد (RTU) كجهاز تتكون من: Electronics Unit ، ومصدر للطاقة Power Supply ، ووحدة I/O Peripherals . والشكل 22-9 يظهر صورة الـ RTU الموجودة بلوحة أحد محولات التوزيع.



شكل 22-9 :

و تحتوي الـ (RTU) على جهاز GPS وذلك لتحديث الوقت والتاريخ في الجهاز بصورة مستمرة ، لأن الوقت والتاريخ أساسيين في عمل وحدة التحكم عن بعد ، فإرسال أي معلومة من قبل الوحدة لابد وأن تكون مرفقة بالوقت والتاريخ ومكان حدوثها وذلك لعمل التحليل المناسب لها في المركز بالسرعة والدقة المطلوبة واتخاذ الإجراء الصحيح حيالها.

وتنقسم البيانات و المعلومات التي يتعامل معها (RTU) إلى :

- الإنذارات (Alarms)
- الأوضاع (Status)
- القراءات و القياسات (Measurements):
- الأوامر (Commands) :

وهي الأوامر التي تصدر من مركز توزيع الأحمال إلى المحطات من فتح و قفل وغيرها ، والتي يتم من خلالها التحكم عن بعد في المهمات فيمكن للمهندس في مركز التحكم فصل وتوصيل المهمات .

وفيما يلي تفاصيل أكثر عن الإشارات التي يتم تجميعها بواسطة الـ RTU والتي يتم نقلها بواسطة منظومة الاتصالات المناسبة إلى مركز التحكم .

#### ملحوظة:

من هذه المقدمة يمكن التفرقة بين Distribution Control System, DCS وبين الـ SCADA ، فالـ SCADA تعتبر أحد مكونات نظام الـ DCS الذى يمكنه التحكم فى شبكة مدينة كاملة ، بينما الـ SCADA تظهر عليها البيانات الخاصة بهذه الشبكة أو جزء منها لتساعد فى التحكم.

### 22-3-4 الإشارات المنقولة إلى مركز التحكم من لوحات التوزيع

- بيان Indication عن فصل و توصيل حالة القاطع لجميع المغذيات الدخول و الخروج و الربط.
- بيان فصل و توصيل حالة سكينة الأرضى لمغذيات الدخول و الخروج
- بيان حالة وضع المفتاح ( داخل أو خارج الخلية ) لجميع المغذيات
- بيان بإشارة فصل جهاز الوقاية ضد زيادة التيار لجميع المغذيات
- بيان بإشارة فصل جهاز الوقاية ضد التسرب الأرضى لمغذيات الدخول و الخروج
- بيان بإشارة فصل جهاز الوقاية الاتجاهى لمغذيات الدخول
- بيان بإشارة فقد الجهد المستمر ( D.C ) لجميع المغذيات
- بيان بقيمة تيار الحمل لجميع المغذيات

- بيان بقيمة جهد ( 11 kV ) على الـ BB

بيان بالإنذارات الآتية :-

- عطل بشاحن الـ RTU - عطل بانخفاض جهد بطارية الـ RTU
- عطل بشاحن اللوحة الرئيسية - عطل بانخفاض جهد بطارية اللوحة
- بيان بفقد جهد الـ 220 فولت - بيان بفقد الاتصال من الـ RTU
- بيان بحالة فتح و غلق باب الـ RTU - بيان بحدوث حريق باللوحة
- بيان بحالة مفتاح الـ RTU ( Local / Remote )
- بيان بحالة فتح و غلق باب اللوحة الرئيسى

### 22-3-5 إشارات منقولة من محطات المحولات

- بيان فصل و توصيل حالة القاطع لجميع المغذيات الدخول و الخروج و الربط
- بيان فصل و توصيل حالة سكينة الأرضى لمغذيات الدخول و الخروج
- بيان حالة وضع المفتاح ( داخل أو خارج الخلية ) لجميع المغذيات
- بيان بإشارة فصل جهاز زيادة التيار لجميع المغذيات
- بيان بإشارة فصل جهاز ضد التسرب الأرضى لمغذيات الدخول و الخروج .
- بيان بإشارة فصل جهاز طرح الحمل لمغذيات الخروج
- بيان بإشارة فصل غياب الجهد المستمر ( D.C ) لجميع المغذيات
- بيان قيمة تيار الحمل لجميع المغذيات
- بيان بقيمة جهد ( 11 kV ) على الـ BB

بيان بالإنذارات الآتية:-

- عطل بشاحن الـ RTU - عطل بانخفاض جهد بطارية الـ RTU
- عطل بشاحن اللوحة الرئيسية - عطل بانخفاض جهد بطارية اللوحة
- فقد جهد الـ 220 فولت - بيان بفقد الاتصال من الـ RTU
- بيان بحالة فتح و غلق باب الـ RTU
- بيان بحالة مفتاح الـ RTU ( Local / Remote ) .

### 22-3-6 إشارات منقولة من محولات التوزيع

- بيان فصل و توصيل سكاكين الجهد المتوسط لمغذيات الدخول و الخروج و المحول.

- بيان حالة جهاز مبین الأعطال .
- بيان بفقد جهد الـ 220 للـ RTU.
- بيان بفقد جهد التيار المستمر .
- بيان بفقد الاتصال من الكشك إلى اللوحة .
- بيان بقيم تيارات الحمل على الجهد المنخفض .
- بيان بقيمة جهد اللوحة على الجهد المنخفض .

### 22-3-7 أدوار التحكم في شبكات الجهد المتوسط:

يمكن الاستفاد من الإشارات المنقولة من محطات المحولات والموزعات ولوحات التوزيع والتي ذكرناها في الجزء السابق في عمل مهام رائعة في التحكم في شبكات التوزيع. وفيما يلي بعضا من المهام (المكاسب) الرئيسية بعد إنشاء مراكز التحكم في شبكات الجهد المتوسط.

1. مراقبة الجهد لحظة بلحظة وتحديد أى تغيير في حالة الشبكة فور حدوثه وهذا سوف يؤدي إلى سرعة التدخل لإصلاح الوضع وإعادته إلى الوضع الطبيعي وتقليل فترات الفصل
2. المراقبة المستمرة لأحمال المغذيات والتأكد دائما أنها لم تتعدى الحدود المقننة لها وهذا سوف يؤدي إلى عدم تحميل مكونات الشبكة بأكثر من قدرتها مما يؤدي إلى الحفاظ على سلامتها وزيادة عمرها التشغيلي
3. نقل إشارات الأعطال وتحديد مكان العطل وذلك سيؤدي إلى تقليل زمن الفصل وعزل العطل
4. التحكم في فصل وتوصيل المغذيات بالموزعات وعمل المناورات
5. تقدير فصل الحمل : وهي تسمى أيضا بإدارة أحمال العميل وتشمل التحكم المباشر في مناطق أحمال العميل الفردية بواسطة موقع مركزي عن بعد (Remote Central Location)
6. التحكم في تخفيض الحمل Load Shedding : تسمح بالإسقاط السريع للأحمال الكبيرة تحت ظروف معينة وفقا لأساس الأولوية.
7. تنظيم الجهد Voltage Regulation : تسمح بالتحكم عن بعد في منظمات الجهد المحددة ضمن شبكة التوزيع . مع ملحوظة أن محولات التوزيع التي تحتوى على off load tap changer لا يمكن التحكم في جهدها عن بعد.
8. Capacitor control ، تسمح بالتحكم عن بعد بفصل مكثفات التوزيع .

9. عمل دراسات الأحمال وتشمل جمع وتسجيل بيانات الأحمال ، وهذه البيانات تخزن في نقطة تجميع بمحطة فرعية أو ترسل إلى مركز الإرسال وبذلك تقدم معلومات دقيقة و وقتية للتخطيط و الهندسة في نظم القوى الكهربائية
10. اكتشاف العطل والموقع والعزل : أجهزة الاستشعار الموجودة في شبكات التوزيع يمكن استخدامها في الكشف والإبلاغ عن أى ظروف غير طبيعية وهذه المعلومات يمكن استخدامها في تحديد أماكن الأعطال تلقائيا وعزل مكان العطل وإعادة تشكيل الدائرة الكهربائية وبذلك تساعد فريق إصلاح الأعطال في الوصول إلى مكان العطل سريعا وكذلك تقصير مده فصل التيار عن العميل
11. متابعة دوائر التيار المستمر المسؤولة عن تغذية دوائر الكنترول وأجهزة الوقاية واكتشاف العطل بها بسرعة.
12. عند تزويد الأكوثاك الكهربائية بمفاتيح مميكنة يتم اكتشاف مكان العطل وعزله أوتوماتيكيا وإعادة التغذية من الجهة الأخرى .
13. سهولة عمل دراسات للوقوف على حالة الشبكة في الأوضاع العادية والغير عادية والأوضاع الحرجة لمعاونة مهندسي التشغيل على اتخاذ القرارات السليمة لتحسين ورفع أداء الشبكة واستقرارها مثل:

- تحديد المكان الأمثل لفتح حلقات التغذية بهدف تحسين الجهد وتقليل الـ Losses
- التكامل مع العديد من برامج الحاسبات الآلية مثل نظام المعلومات الجغرافي الذي يتيح الحصول على صورة فورية لحالة أي مغذي، وبيان حالة الأجزاء المفصولة، والأجزاء التي تحت الجهد، موقعة على خريطة جغرافية حتى يمكن توجيه فرق إصلاح الأعطال لموقع العطل مباشرة.

ويراعى عند تصميم النظام تبني نظام الازدواجية Redundant System بحيث يكون لكل جهاز رئيسي بالمركز جهاز آخر احتياطي يقوم بالعمل أليا وبنفس الكفاءة في حالة حدوث أي خلل بالجهاز الرئيسي ، كما أن جميع أجهزة الحاسبات والطابعات متصلة ببعضها البعض عن طريق شبكة حاسبات مزدوجة LAN مما يوفر أعلى مستوى من الاعتمادية Reliability.

### 22-3-8 ثانيا التحكم في شبكة الجهد المنخفض:

وتتم هذه العملية عن طريق العداد الذكي Smart Meter المركب عند المشترك سواء كان سكنى أو صناعى : وهو عداد مزود بمجموعة من الريليات Relays الموزعة على الأحمال المختلفة في المنزل

مثلا ويتم التحكم فى كل ريلالى على حدة لتقليل الحمل عند المشترك فى حالة وجود عجز فى التوليد وتستخدم فى :

- التوصيل والفصل : تسمح بالتحكم عن بعد فى توصيل أو فصل الخدمة الكهربائية عن العميل من موقع التحكم المركزى.
- تسعير أحمال الذروة : فهى تسمح بتنفيذ برامج تسعير أحمال الذروة باستخدام التحول عن بعد فى عداد السجلات Remote switching of meter register automatically
- قراءة سجلات عداد العميل تلقائيا : تسمح بالتحكم عن بعد فى قراءة عدادات العملاء من حيث الاستهلاك الكلى و ذروة الطلب و وقتها فى اليوم و تحفظ القراءات الضرورية فى العدادات ، ومن ثم يتم مقارنة القياسات المقاسة من الموزعات والقياسات المقاسة من عدادات المشتركين ومقارنتهم ببعض لمعرفة وجود أو عدم وجود سرقات كهربية.

### 9-3-22 الـ SCADA فى شبكات التوزيع بمصر

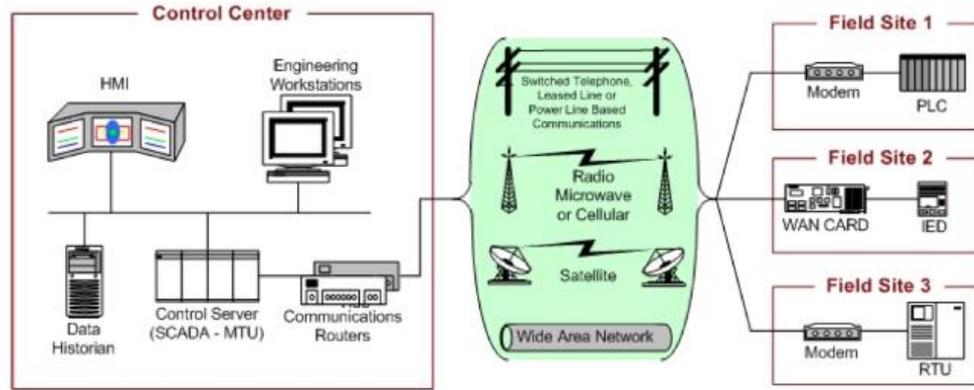
فى كثير من شركات التوزيع بمصر تم إدخال نظام Scada وإدخال جميع البيانات الخاصة بشبكات الجهد المتوسط والمنخفض. على سبيل المثال تم تجميع البيانات الخاصة بكل كشك من أكشاك محولات الجهد المنخفض ، وهى:

- قدرة المحول المركب داخل الكشك.
- عدد الخطوط الخارجة ( السورتيهات ) وأسمائها
- اسم الموزع الذى يتغذى منه الكشك.
- اسم المنطقة المتواجد بها.
- عدد الأعمدة المركبة على كل سورتيه
- رقم كل عمود من بداية السورتيه . (السورتيه هو الخط الخارج من اللوحة)
- اسم الشارع المتواجد به كل عمود من الأعمدة
- أسماء المشتركين على كل كشك ، وأسماء وعناوين المشتركين على كل سورتيه.

ومن خلال تجميع البيانات الجغرافية السابقة تم عمل قاعدة بيانات كاملة .

## 4-22 منظومة الاتصالات في شبكات التوزيع

تعتبر الاتصالات Communication وسيط لنقل المعلومات والبيانات بين المحطات المختلفة وبين الـ Load Dispatch Center, LDC ، لذلك نلاحظ أن أجهزة الاتصالات جزء منها يوضع في المحطات والجزء الآخر يوضع في مركز توزيع الأحمال . والشكل 10-22 يلخص هذه المنظومة.



شكل 10-22 :

وقد سبق الحديث في الفصل الأخير من الباب الثالث عن وسائط نقل المعلومات فيمكن الرجوع إليها.

### 1-4-22 شبكة الاتصالات في الجهد المتوسط

ويتم عبر هذه الشبكة نقل البيانات من المواقع المختلفة إلى مركز التحكم وفي العادة يفضل أن تكون هذه الوسائل خاصة بشركات الكهرباء و عدم الاعتماد على شبكات أخرى ملك الغير ما أمكن. والوسائل المستخدمة هي:

أولاً: بين الأكشاك و لوحات التوزيع:

يتم نقل البيانات والإشارات عن طريق الـ DLC (Distribution Line Carrier) من خلال كابلات الجهد المتوسط وذلك إما باستخدام أرضى الكابلات (Shield) أو باستخدام احد أوجه الكابلات (Phase).

ثانياً: بين محطات المحولات و لوحات التوزيع ومركز التحكم:

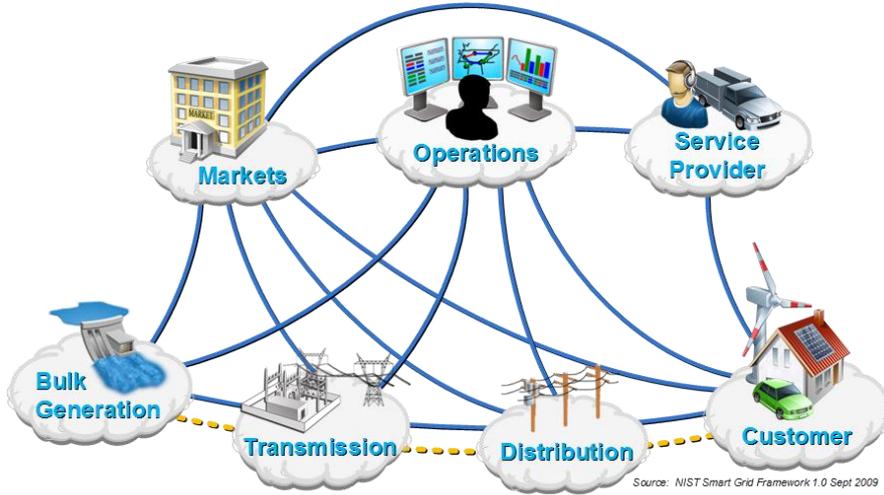
يتم نقل البيانات والإشارات من محطات المحولات و لوحات التوزيع إلى مركز التحكم عن طريق شبكة اللاسلكي (Radio Frequency) على الحيز الترددي العالي VHF .

## 5-22 شبكات التوزيع الذكية

الشبكات الذكية لنقل وتوزيع واستهلاك الطاقة الكهربائية تعتمد بشكل كبير على تحقيق الاستغلال الأمثل للكهرباء نقلاً وتوزيعاً واستهلاكاً .

والشبكة الذكية Smart grid هي الشبكة الكهربائية التي تُستخدم فيها تقنيات الاتصالات كالعدادات الذكية Smart Meters أو أنظمة المراقبة (SCADA) وغيرها. وذلك لجمع معلومات من نقاط استهلاك و توليد و نقل الكهرباء ومن ثم تعديل عمل الشبكة بناء على هذه المعلومات.

وكمثال لتميز الشبكات الذكية ، فقد كانت مثلاً الطريقة التقليدية للاستجابة لذروة الطلب هي في زيادة الإنتاج. أما الآن، فعن طريق الشبكة الكهربائية الذكية، تستطيع البرمجيات التنبؤ والتحكم بالطلب وقت الذروة عن طريق تفاعل المستهلك مع السعر وكذلك فهم سلوكياته. لذلك يعتقد بأن الطريقة الأكثر فاعلية في المستقبل لتقليل الأحمال سوف تكون عن طريق تغيير سلوك الفرد بالتواصل الفعال معهم من خلال الشبكات الذكية.



### 1-5-22 مكونات الشبكة الذكية

يمكن تقسيم عناصر الشبكة الكهربائية الذكية إلى ثلاثة أقسام:

1. الأول : يضم أجهزة القياس وأنظمة إدارة المعلومات
2. الثاني : يشمل البرمجيات الذكية.
3. الثالث : ويشمل شبكة الاتصالات وأنظمة التخزين

**أولاً : أجهزة القياس وأنظمة إدارة المعلومات**

تنقسم أجهزة القياس وأنظمة إدارة المعلومات عموماً إلى قسمين:

**القسم الأول يعنى بخطوط الضغط العالي** ويشتمل مثلاً على وحدات قياس الطور PMU ، ونظام الرصد لشبكة الاتصال الممتدة WAM.

1- وحدات قياس الطور Phase Measuring Unit, PMU ، ويعد جهاز الـ PMU من أهم الأجهزة المتطورة في منظومة شبكة النقل الكهربائية. وهو نظام مطور لجهاز قياس فرق الجهد في الشبكة التقليدية مع بعض الفروقات الجوهرية. فبينما كان يقاس فقط فرق الجهد في الشبكة التقليدية ، فإن الجهاز المطور يمكنه أيضاً قياس الـ phase shift . هذا التطور الملاحظ جاء نتيجة لسببين : الأول قدرة الجهاز المطور على إجراء قياسات بنسبة تصل إلى 60 قراءة في الثانية ، بينما الجهاز التقليدي لا تتعدى قدرته 4 قراءات بالثانية. والثاني ارتباط هذا الجهاز بالأقمار الصناعية لتحقيق القياس المتزامن بين مجموعة من أجهزة قياس الطور المتصلة تحت بنية نظام الرصد لشبكة الاتصال الممتدة.

2- نظام الرصد لشبكة الاتصال الممتدة Wide Area Monitoring, WAM يُعرف نظام الرصد لشبكة الاتصال الممتدة WAM بأنه بنية إدارة وتحليل المعلومات المتزامنة القادمة من أجهزة قياس الطور الموجودة في أماكن مختلفة من الشبكة والمتصلة عبر الأقمار الصناعية. ويعمل كنظام إنذار مبكر عند وجود اضطراب في الشبكة قد يؤدي إلى القفل التام لها Blackout.

**والقسم الثاني من أقسام أجهزة القياس يعنى بالمستهلك والتوزيع** كالحساسات الذكية Sensors ، والعدادات الذكية Smart Meters والأجهزة المنزلية الذكية وغير ذلك.

**i. الحساسات الذكية Sensors**

وهي أجهزة لقياس كمية الكهرباء المستهلكة، وأرسالها إلى منظومة القياس المتقدمة بغرض تحليل المعلومات وعمل الفواتير وبعثها إلى المستهلك بغرض الإحاطة وإمكانية تعديل السلوك الاستهلاكي.

كذلك من وظائفها إخطار المستهلك بالسعر الديناميكي وإيصال معلومات إلى الأجهزة المنزلية الذكية لغرض تعظيم فائدة المستهلك الاقتصادية. فهي أجهزة ثنائية الاتصال، حيث يتم الاتصال عن طريقها

بالمستهلك بواسطة شبكة الإنترنت المنزلية وتصل المعلومات للمستهلك في جهاز الحاسب أو الهاتف الذكية التي يستطيع من خلالها التحكم في نمط عمل هذه الأجهزة المنزلية.

و يعول عليها أيضا في استشعار المشكلات الخطيرة التي قد تطرأ في مكونات الشبكة حيث تقوم بتحديد أماكنها بدقة ليتم علاجها وتلافيها في الوقت المناسب قبل أن تؤثر على أداء الشبكة برمتها.

## ii. العدادات الذكية للتحكم في الاستهلاك smart meters :

وهي العدادات التي يمكن التحكم من خلالها عن بعد من فتح وغلق الأجهزة المنزلية على نحو من شأنه المساهمة في تخفيض الأحمال وارتفاع الطلب خلال فترة الصيف، كما من شأنه أيضا أن يساعد المستهلكين على ترشيد الاستهلاك والاقتصاد في تشغيل أجهزة التكييف والثلاجات والمصابيح وأجهزة منزلية أخرى وتمكنهم من التحكم والسيطرة على تلك الأجهزة عن بعد بواسطة الهاتف الخليوية أو الحواسيب المحمولة أو المتحكمات اللوحية.



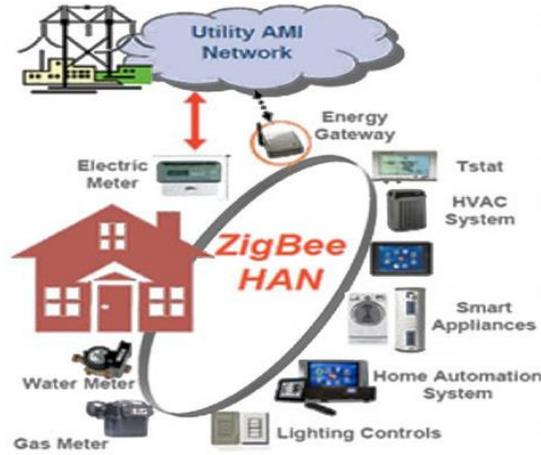
العدادات الذكية تشتمل على ميزات متقدمة مثل الدقة في القياس ، والمعايرة الرقمية السريعة، والحماية ضد العبث أو السرقة للطاقة (الاستهلاك الغير قانوني) واكتشافها إضافة إلى توفير مستلزمات التحكم بالتيار والاستهلاك والتحكم بقطع ووصل التيار سواء عن فاز واحد أو أكثر أو جميع الفازات معا .

ويجب أن تتكامل وتتوافق بروتوكولات ومكونات وحدات الاتصالات للعدادات الذكية مع باقي مكونات وبروتوكولات الشبكة الذكية مثل مجمعات البيانات "الكونسنتريترز" وبرمجيات التشغيل والتحكم أي أن يتكلم الجميع معا بلغة واحدة.

## الأجهزة المنزلية الذكية

في منظومة الشبكات الذكية سوف يكون للمستهلك الخيار لانتقاء نمط عمل الأجهزة المنزلية الذكية المرتبطة مع الشبكة الكهربائية الذكية. فلو فرضنا أن المستهلك يملك جهاز تكييف، وجهاز تسخين، وثلاجة، وغسالة ملابس، ونشافة ، فإن الشبكة تستطيع بواسطة الحساس الذكي التحكم في أوقات عملها والتحكم في جهاز منظم الحرارة المبرمج وذلك لتحقيق الموازنة بين نمط حياة المستهلك والتشغيل الاقتصادي، وفي نفس الوقت تجنب التشغيل المكلف في وقت الذروة.

وبالتبع هذا يستلزم أن تتصل هذه الأجهزة بمنظم الطاقة من خلال شبكة WiFi ومن خلال بروتوكولات معينة تفهمها هذه الأجهزة مثل استخدام منظومة الـ ZigBee لتواصل الأجهزة معا مع جهاز الموبيل مثلا.



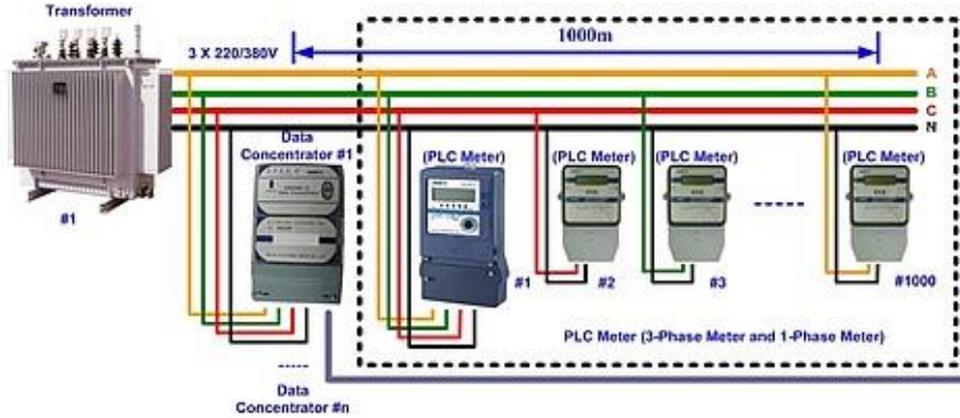
### ثانيا : البرمجيات الذكية

يمكن تعريف البرمجة الذكية على أنها الأنظمة البرمجية القادرة على التعامل مع مسائل معقدة، وعشوائية، ومتغيرة البيئة. ومن المسائل المعقدة التي يجب أن تتعامل معها البرمجيات: المعالجة الذاتية Self-Healing، والطلب المتفاعل Demand Response والسعر الديناميكي Dynamic Price، والتنبؤ بقدرة مصادر الطاقة الشمسية وطاقة الرياح على التوليد، والتعامل مع منظومة شحن السيارة الكهربائية.

### ثالثا شبكة الاتصالات:

تعتبر شبكة الاتصالات من أهم مكونات الشبكة الذكية من أجل قراءة البيانات عن بعد وكذلك نقل أوامر الفصل والتوصيل، ويمكن أن يتم ذلك باستخدام خطوط الكهرباء للجهد المنخفض لدى شركات توزيع الطاقة، وباستخدام شبكة خطوط الكهرباء ذات الجهد المتوسط عند شركات نقل الطاقة والتي يجب أن تتوفر فيها الشروط والمواصفات اللازمة لنجاح نقل البيانات بكفاءة من العدادات الذكية والأجهزة الأخرى إلى مركز السيطرة والتحكم. ولتحقيق هذا الهدف فلقد اقترحت نظم اتصالات مختلفة مثل استخدام ترددات الراديو (RF)، أو الاتصال عبر خط الطاقة (PLC or BPL)، أو المنصات الهاتفية (سلكي أو لاسلكي).

وكان اقتراح استخدام البنية التحتية لشبكة الجهد المنخفض في شبكة الاتصالات أكثر الحلول قبولاً لكونه الأقل تكلفة والأكثر أماناً ولعدم قدرة الحلول الأخرى على بناء شبكة اتصالات مستقرة و اقتصادية مما حدا بالاتحاد الأوروبي سنة 2010 لتبني تكنولوجيا نقل البيانات عبر خطوط الكهرباء ذات الجهد المنخفض أو ذات الجهد المتوسط دون غيره من التقنيات الأخرى لتمييزه عن غيره ولكونه جزء من البنية التحتية المملوكة لشركات الكهرباء.



وبالإضافة للمكونات الثلاثة الأساسية السابقة فإن الشبكات الذكية تحتاج إلى:

- تخزين الطاقة من المصادر المتجددة: فلا بد من وجود أنظمة تخزين ذات كفاءة عالية يمكن الركون إليها والاعتماد عليها في خفض مستويات الأحمال القصوى وتمكين المستهلك من تجنب الانقطاعات المفاجئة وخفض تكلفة إنتاج الطاقة الكهربائية.
- التنبؤات الدقيقة لأحوال الطقس: وذلك بهدف الاستفادة القصوى من الطاقة المتجددة وزيادة موثوقية الشبكة للحيلولة دون وقوع عجز في القدرات المتاحة في محطات التوليد وعبر شبكات النقل والتوزيع.

## 2-5-22 وظائف الشبكة الذكية :

1. إدارة الطاقة المستهلكة ، وتوعية أصحاب المنازل والشركات بأن إنتاج الطاقة قد يكون مكلفاً مادياً وبيئياً في بعض الأوقات من يتطلب منهم خفض الأحمال أو تشغيلها في وقت آخر ، ويمكن القيام بذلك عن طريق مؤشرات خاصة أو من خلال متصفحات الويب أو تطبيقات الحاسب الشخصية. وذلك بتفعيل خاصية الطلب المتفاعل Demand Response الذي يُعد

- من أهم خصائص الشبكة الكهربائية الذكية. إذ من خلالها، يستطيع المستهلك أن يضبط استهلاكه تفاعلياً مع السعر الديناميكي، الذي يتغير كل ساعة، عن طريقين:
- إما أن يكبح استهلاكه طوعاً عن طريق آلية محددة سلفاً،
  - أو عن طريق منح الشبكة الكهربائية الإجازة على التحكم في هامش محدد من الاستهلاك، كما في الأجهزة المنزلية الذكية.
2. العمل على تمكين خاصية "التوصيل والتشغيل" وهي القدرة على إضافة مصادر توليد جديدة للطاقة إلى الشبكة.
3. السماح لشركات التوليد الموزع Distributed Generation ببيع فائض الطاقة إلى المرافق العامة (تغذية الشبكة بدلاً من سحب القدرة منها).
4. تحسين التشخيص الآلي لاضطرابات الشبكة، وتقديم أفضل المساعدات للمشغلين والذين من المفترض أن يستجيبوا لمشاكل الشبكة بشكل سريع آلياً عند حدوث أخطاء في الشبكة والتي من شأنها العمل على عزل مناطق الاضطراب والمنع أو التقليل من الانقطاعات المتتالية للتيار الكهربائي نتيجة زيادة الأحمال على الشبكة والتي يمكن أن تنتشر على نطاق واسع.

## 6-22 ملحق أشهر برامج تمثيل ودراسة أداء الشبكات

### ETAP

ETAP is a company specializing in electrical power system modeling, design, analysis, optimization, and predictive real-time solutions.

Functions include arc flash analysis, load flow analysis, short circuit analysis, motor starting, OPF, transient stability analysis, generator start-up, parameter estimation, cable sizing, transformer tap optimization, reliability assessment, transmission line constant calculations, harmonic analysis, protection coordination, dc load flow, battery discharge and sizing, earth grid design, cable pulling, and GIS map integration.

### **PowerWorld**

PowerWorld Corporation are a Champaign, Illinois based firm that develop the PowerWorld Simulator suite of power systems analysis tools for Windows. The software focuses on a visual approach to power system simulation.

Functions include load flow, short circuit, contingency analysis, sensitivity calculations, security constrained OPF, transient stability, transmission line parameter calculations. Includes scripting support.

### **MathWorks (SimPowerSystems)**

Mathworks, the makers of general purpose mathematical software MATLAB, also develop an power systems simulation program. SimPowerSystems is a tool that extends MATLAB's Simulink and provides models of many components used in power systems, including three-phase machines, electric drives, and libraries of application-specific models such as Flexible AC Transmission Systems (FACTS) and wind-power generation. Harmonic analysis, calculation of Total Harmonic Distortion (THD), load flow, and other key power system analyses are automated.

### **EasyPower**

The flagship product, EasyPower, includes the following modules: arc flash analysis, power flow, short circuit, OPF, protective device coordination, dynamic stability, transient motor starting, and harmonic analysis.

Additional workflow enhancing modules include SmartPDC™, which automates protective device coordination, and SmartDesign™ which automatically sizes feeders, breakers, switchgear, fuses, busway, MCCs, panels, etc to NEC requirements. The Scenario Manager feature allows the study of multiple system scenarios on the fly.

One line Designer is a cost effective solution for people who are dedicated to creating onelines, as well as system data collection and entry.

### **EMTP-RV**

The ElectroMagnetic Transients Program (EMTP) was first developed by Prof. Hermann Dommel in the 60s/70s for the analysis of electromagnetic transients. It was commercialized in 1987 and released as DCG EMTP and later EMTP96. EMTP-RV is the latest commercial released of the program, created by Jean Mahseredjian and currently being developed by POWERSYS.

### **ATP-EMTP**

The Alternative Transients Program (ATP) is a free (closed source) program for the digital simulation of electromagnetic (and electromechanical) transient phenomena. ATP-EMTP was first developed in 1984.

### **ASPEN**

ASPEN (Advanced Systems for Power Engineering) are a California based company that develops the following separate Windows platform products:

- OneLiner - short circuit and relay coordination program (and the Breaker Rating Module add-on checks the rating of circuit breakers against the short circuit currents they need to interrupt)
- DistriView - integrated suite of voltage drop, short circuit, relay coordination, and harmonics and reliability calculation software for utility distribution systems
- Power Flow Program - power flow program designed for the planning, design and operating studies of

---

transmission, sub-transmission and distribution networks (includes a BASIC-style scripting language)

- Line Constants Program - calculates electrical parameters of overhead transmission lines and underground cables
- Relay Database - a repository of relay information for electric utilities and industrial facilities
- Line Database - an electronic depository of data related to power lines and cables

# الباب الخامس

## كابلات القوى الكهربائية

## مقدمة عامة للباب الخامس

الكابلات الكهربائية هي إحدى الوسائل التي تستخدم لنقل الطاقة الكهربائية وتوزيعها في المدن والمناطق المزدحمة بالسكان ، حيث يصعب مد الخطوط الهوائية. وتتميز الكابلات بسهولة و سرعة إنشاء خطوطها مقارنة بالخطوط الهوائية. كما أنها تشغل حيز أقل من الأرض ولها عمر افتراضي أطول ، بالإضافة إلى سهولة تغيير مسار الكابل عند الدفن إلى زاوية معينة حسب سمك الكابل.

لكن من عيوب الكابلات صعوبة تحديد العطل مباشرة و صعوبة الوصول إليها في حالة الصيانة ، كما أنها تحتاج لشدة عزل عالية ، وبالتالي فهي أعلى في التكلفة من الخطوط الهوائية. كما أن استخدام الخطوط الهوائية أكثر اقتصادية من الكابلات ، حيث تصل تكلفة خطوط الكابلات من 10 إلى 20 مرة تكلفة الخطوط الهوائية ، والسبب في ذلك أن موصلات الخطوط الهوائية مكشوفة بدون عازل ، أما الكابلات فهي مغطاة بأكملها بمادة عازلة . إلا أن هذا الرقم قد انخفض كثيرا بعد الكثير من البحوث والتطوير. وهناك مقارنة تفصيلية أكبر بين النظامين في مقدمة الباب الثاني من هذا الكتاب.

الكابل عموما يتكون من جزئيين : الموصل و العازل ، ولا تختلف مساحة الموصل الحاملة لنفس التيار سواء كانت الكابلات جهد منخفض أو متوسط أو عالي حيث أن مساحة الموصل تعتمد فقط على مقدار التيار الكهربائي الذي يتم نقله أما سمك العازل فيعتمد على فرق الجهد الكهربائي على الكابل و هنا يظهر الفرق في أحجام الكابلات حيث كلما زاد الجهد زادت مساحة العزل ، فإن زاد الجهد على الكابل فإن العزل ينكسر بمعنى أنه يفقد قدرته على عزل الكهرباء و بالتالي يكون هناك خطر على جميع الأجهزة و على البشر قبل كل شيء .

### تصنيف الكابلات

تصنف الكابلات تبعاً للجهد : جهد منخفض (حتى 1 ك ف ) وجهد متوسط ( من 1 حتى 33 ك ف) وجهد عالي (بدءاً من 66 ك ف) . وهناك فرق كبير بين كابلات الجهد المنخفض والكابلات الأخرى في عدد الطبقات بالكابل ونوعية العزل ، لكن ليس هناك فرق كبير بين كابلات الجهد المتوسط والعالي ، والفرق بينهما ليس في عدد الطبقات وإنما في خواص المواد المستخدمة في كل جهد منهما (المتوسط والعالي).

وتصنف الكابلات أيضا تبعا لنوع العزل فهي إما PVC أو XLPE أو هما معاً ، وقد يستخدم ورق مشبع بالزيت . علما بأن الورق المشبع بالزيت أعلى شدة في العزل الكهربى و أطول فى عمره الافتراضى بالمقارنة بجميع العوازل الأخرى المستعملة ، لكن يعيبه أن ليس له مقاومة للرطوبة وأنه غير مرن .



وتصنف الكابلات أيضا حسب عدد القلوب ، فالكابلات إما أن تكون مفردة القلب Single Core أو متعددة القلب Multi-Core لأربعة قلوب مثلا كما فى الصورة ، وقلب الكابل عبارة عن موصل يحيط به مادة عازلة تعزله عن باقى القلوب وكذلك مكونات الكابل .



وفى حالة الكابل Multicore يكون قطره الخارجى كبير جداً فى المقاطع الكبيرة وبالتالي يصعب نقله والتعامل معه ، لذلك يتم فى هذه الحالة استخدام كابلات Single Core. وأهم عيوب هذا النوع (أحادي القلب) تتمثل فى أن التسليح بالصلب يتسبب فى حدوث فقد فى الطاقة Loss فى طبقة التغليف بسبب الـ Induced currents بما يساوي أو يزيد عن الـ Losses فى موصل الكابل نفسه Cupper Losses لذلك يتم تسليحه بمادة غير موصلة.

ويمكن القول بصفة عامة أن استخدام الكابلات Multicore يؤدي إلى خفض التكاليف ، أما الكابلات الـ Single Core فهي أكثر مرونة وأسهل فى التركيب والتوصيل.

### موضوعات الباب

مهندس القوى الكهربائية لابد يوماً من أن يتعامل مع الكابلات ، سواء كابلات الجهد المنخفض (راجع كتابى المرجع فى التركيبات الكهربائية ) أو كابلات الجهد المتوسط والعالي التى تدرس فى هذا الكتاب. وأهم المواضيع التى سنتعرض لها هنا فى هذا الكتاب حسب فصول الباب هى :

- الفصل الأول من الباب (الفصل 23) : المواد المستخدمة فى صناعة الكابلات
- الفصل الثانى (الفصل 24) : تركيب كابلات الجهد العالى
- الفصل الثالث (الفصل 25) : الخواص الكهربائية للكابلات
- الفصل الرابع (الفصل 26) : اختبارات الكابلات
- الفصل الخامس (الفصل 27) : اكتشاف أعطال الكابلات

# 23

## المواد المستخدمة في صناعة الكابلات

### 1-23 المواد المعدنية المستخدمة في صناعة الموصلات

أشهر الموصلات المستخدمة في الكابلات هي النحاس والألومنيوم. ويعتبر النحاس أكثر الأنواع شهرة في الاستخدام كموصل كهربائي لعدة أسباب منها: أنه الأفضل توصيلاً للكهرباء (مقاومة أقل) . وهو معدن له قوة احتمال كبيرة للإجهادات الميكانيكية و يمكن تشكيله. لكن عيب النحاس الرئيسي هو ارتفاع ثمنه. أما الألومنيوم فيتميز برخص ثمنه وخفة وزنه وسهولة السحب والتشكيل على الحار والبارد. ويمكن اعتبار أن تحمل كابل ذي موصل ألمونيوم لشدة التيار يساوي 70% إلى 80% من مثيله النحاسي ، مع ملاحظة أن الانخفاض في السعر أكبر من هذه النسبة ، وهذا ما يجعل الألومنيوم أكثر إغراء في الاستخدام. ويشترط تبعاً لمعظم المواصفات ألا تقل نسبة نقاوة الألومنيوم المستخدم عن 99% . والجدول 1-23 يعطى بعض أوجه المقارنات بين الاثنين.

جدول 1-23 :

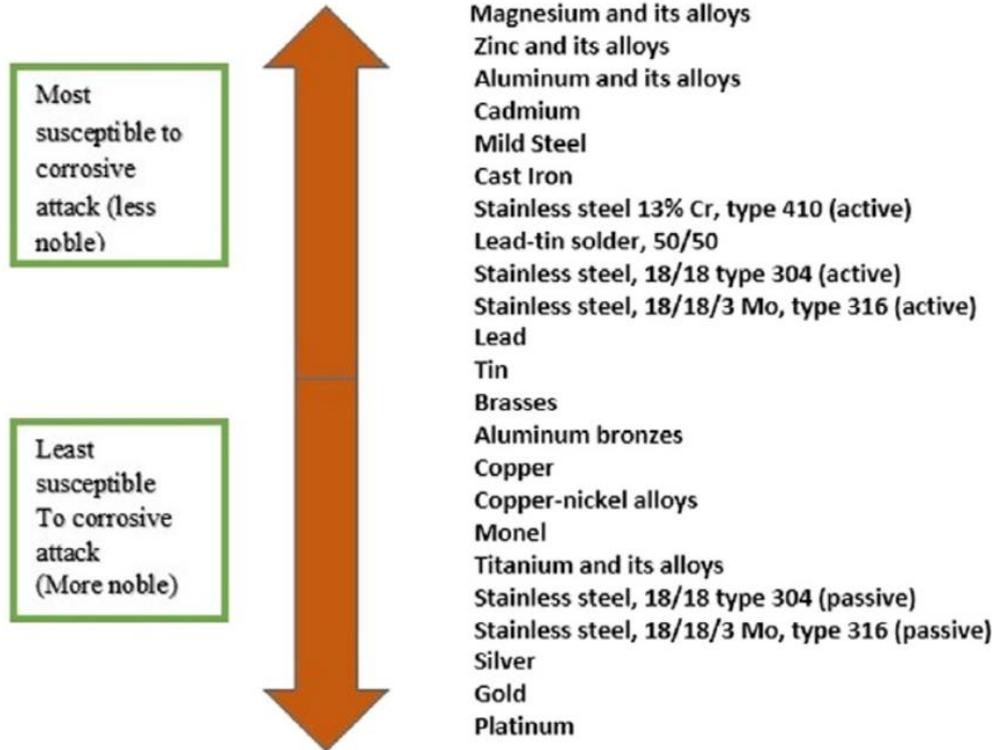
CHARACTERISTICS	COPPER	ALUMINUM
Tensile strength for same conductivity	55000	40000
Weight for same conductivity (lb).	100	48
Cross section for same conductivity	100	160
Specific resistance	10	17
Cost	Relatively high	Relatively low

وأهم العيوب الأساسية في موصلات الألمنيوم هو تكون طبقة رقيقة وصلبة من أكسيد الألمنيوم الرديء التوصيل للكهرباء على سطح الموصل ، وهذا يسبب مشكلة في نقاط التوصيل لذا يلزم التأكد عند عمل توصيلات مع كابلات الألمنيوم أن يكون مكان التوصيل لامعا وغير مؤكسد ، ويفضل وضع مانع التأكسد على الموصل .

وحاولت بعض الشركات الجمع بين ميزات الاثنتين فأنتجت موصلات عبارة عن قلب من الألمنيوم محاط بطبقة سميكة من النحاس الملتصق بالألمنيوم وسمكها من 10 % إلى 27 % من الوزن الكلي للكابل . وتسمى موصلات الألمنيوم الملبسة بالنحاس Copper-Clad-Aluminum Conductors, CCAC .

وأحد أهداف التلبس النحاسي Copper Clad هو التغلب على المشاكل الناجمة عند توصيل الألمنيوم على بارات النحاس ، فمعلوم أنه لا يصح ربط موصل ألومنيوم مباشرة على BB نحاس بسبب اختلاف الجهد الجلفاني بينهما ، ومن ثم يحدث تآكل للموصل الأسبق في الترتيب خلال الزمن وهو في هذه الحالة الألمنيوم ولذا لا يصلح استخدام الألمنيوم ك BB داخل اللوحة لأنه هو الأسبق في التآكل .

## Corrosion Susceptibility of metals



وهناك حل آخر لهذه المشكلة وهو استخدام Pi-metal glands وهي تستخدم فقط عند ربط كابلات الألومنيوم مع قضبان النحاس كما في الشكل 23-1.



شكل 23-1 :

**23-1-1 ثانياً المواد المعدنية المستخدمة للحماية**

وهناك عنصر معدني آخر مرتبط بالكابلات وهو المعدن المحيط خارجياً بالكابل من أجل توفير حماية ميكانيكية له مثل الحديد المجلفن ، لأن عملية الجلفنة تعطي الكابل قدرة عالية ضد التآكل ، ولذلك أصبح الحارس الخارجي الأول للكابل إما أسرطة الحديد المجلفن أو أسلاك الحديد المجلفن كما سيأتي بالتفصيل في الجزء الخاص بتركيب الكابل.

وهناك مواد معدنية أخرى مستخدمة في الـ Metallic sheath مثل الألومنيوم أو الرصاص كما سيأتي تفصيلاً.

**23-2 المواد العازلة المستخدمة في صناعة الكابلات**

المواد العازلة أنواع : فمنها ما هو عنصر مثل الغازات الخاملة ، ومنها ما هو مركبات سواء كانت مركبات عضوية أو غير عضوية. و أغلب المواد المستخدمة في الواقع وهي مركبات ، لاسيما المركبات العضوية مثل الـ PVC .

**23-2-1 ما معنى عازل كهربائي؟**

كلمة "عازل كهربائي" تترجم إما إلى : dielectric ، وفي هذه الحالة نقصد به المادة التي يمر فيها المجال الكهربائي. مثل المادة العازلة بين الأقطاب المعدنية في المكثف مثلاً. وقد تترجم إلى "insulator" ، وفي هذه الحالة نقصد به المادة التي تستخدم لمنع مرور التيار الكهربائي عبره.

وبسبب المسافات الكبيرة بين الذرات وبعضها في المادة العازلة والارتباط الشديد بين الإلكترونات والنواة فإنه يصعب انتقال الإلكترونات من ذرة إلى أخرى عند وجود تأثير مجال كهربائي خارجي عليها. وهذا هو العازل الكهربائي.

وبسبب المجال يمكن تمثيل الذرة بقطبين كهربائيين أحدهما سالب والآخر موجب الشحنة. وتتصف المواد العازلة بأن كل ذرة فيه تتخذ شكل القطبين تحت تأثير مجال كهربائي خارجي ، ولا تنتقل الإلكترونات بين الذرات، أي لا تسمح بمرور تيار كهربائي.

وأهم ما يميز هذه المواد كونها غير موصلة ، فالإلكترونات فيها غير حرة الحركة كما هي في المعادن الموصلة ، وإنما تميل إلى وضع الاستقطاب Polarization في حال توجيه مجال كهربائي عليها ،

بمعنى أن تتجه الإلكترونات إلى طرف من العازل (لتنشأ قطبا سالبا) بينما تزيد الشحنة الكهربائية الموجبة في الطرف العكسي (فتنشأ قطبا موجبا) - وهذا هو معنى استقطاب المادة Polarization .

### 2-2-23 أهم خصائص المادة العازلة كهربيا

أهم الخصائص التي يجب أن تتميز بها المادة لتوصف بأنها عازلة كهربيا هي:

- أن تكون لها مقاومة نوعية عالية .
- أن يكون لها جهد انكسار عالي .
- ألا تقبل امتصاص الرطوبة من الوسط المحيط بها .
- لا تتفاعل مع الأحماض والقلويات الموجودة بالتربة .
- أن تكون لها خاصية الصلابة و المرونة معاً .
- لا تتأثر أو تتغير مكوناتها بارتفاع درجة الحرارة الناتجة عن تيار الحمل العادي أو أقصى حمل أو الحرارة الناتجة عن تيار الـ Short Circuit Current .
- لا تقبل سريان الحريق .
- أقل فقد كهربائي ممكن أثناء التشغيل .

## 3-23 مقدمة عن البوليمرات

معظم العوازل الكهربائية الآن مصنوعة من البوليمرات ، فما هي البوليمرات؟

أن كلمة ( بوليمر ) لاتينية الأصل ، وهي مركبة من مقطعين هما : بولي poly وتعني متعدد ، و مرmer وتعني جزء أو وحدة ، لذلك polymer تعني متعدد الأجزاء أو متعدد الوحدات . ويسمى في بعض الأحيان الجزيء العملاق (macromolecule) وهو جزيء لمركب كيميائي ويتمثل بوزن جزيئي عالي ( 10000 إلى 10 مليون) . والجزيء على شكل سلسلة حلقاتها عبارة عن جزيئات لمركب بسيط ، ترتبط مع بعضها البعض بروابط تساهمية ( covalent bond ) .

و البوليمر هو مركب ذو وزن جزيئي مرتفع مكون من وحدات جزئية مكررة. قد تكون هذه المواد عضوية أو غير عضوية أو عضوية معدنية، وقد تكون طبيعية أو صناعية في أصلها . وقد عرف الإنسان البوليمرات منذ القدم واستخدم المنتجات النباتية و الحيوانية البوليمرية الطبيعية لأغراض مختلفة في حياته

اليومية ، فقد استخدم الإنسان القار "pitch" و الراتنجات "resin" النباتية كما عرف الصمغ "gum" و المطاط "rubber" قبل آلاف السنين.

وتضم البوليمرات الطبيعية أيضا العضوية النشا، والسيليلوز، والأحماض الأمينية، والبروتينات. والآن تعد البوليمرات العضوية ذات أهمية بالغة في حياة الإنسان إذ تدخل في الوقت الحاضر في مكونات غذائه وكسائه ومسكنه ، فهو ينتفع من النشويات والسكريات والبروتينات في الغذاء ، ويستخدم القطن والصوف والحريز وجلود الحيوانات في صنع الملابس كما يستفيد من الخشب في تشييد المسكن والأثاث ويستخدم المطاط والصمغ وغيرها من المواد البوليمرية الطبيعية التي لا تحصى في أغراض شتى.

وبالرغم من أن معظم البوليمرات الطبيعية تعتبر عضوية (أي أنها مبنية على سلسلة كربونية) ، فإنه يوجد أيضا بوليمرات غير عضوية ، وغالبا تكون سلاسلها مبنية على أصل من السيليكون. وتشمل البوليمرات الطبيعية غير العضوية الألماس، والجرافيت، والرمل، والاسبستوس، والعقيق، والميكا.

### 1-3-23 تطبيقات البوليمرات الصناعية Synthetic Polymer

في القرن العشرين عندما زادت الحاجة للمطاط في الحرب العالمية الثانية استطاع العلماء الألمان إنتاج المطاط الصناعي وهو يعطى نفس مواصفات المطاط الطبيعي وتقريبا نفس التركيب الكيميائي . وتعتبر البوليمرات الصناعية بوليمرات بسيطة نسبيا بالمقارنة مع البوليمرات الطبيعية وأقل في التكلفة.

البوليمرات الصناعية مثل المواد التي غزت الأسواق العالمية حديثا ، ومنها المواد البلاستيكية Plastics ، والمطاط Rubber ، والجلود الصناعية Leather Synthetic ، وأقمشة النايلون Nylons ، والبوليستر Polyesters. ومنها الترمو بلاستيكات وهي البوليمرات الصناعية الصلبة التي تلين بارتفاع الحرارة ثم تعود لصلابتها بالتبريد دون تغير في تركيبها الكيميائي ، وغيرها . ومنها أيضا الألياف الصناعية : Fibers وهي من أهم البوليمرات المستخدمة في الصناعة وتمتاز بمقاومة شديدة للتشوه وتحمل إطالة صغيرة حوالى (10-50%) ولها قوة شد عالية و تمتاز بضعف امتصاصها للرطوبة .

وفي الآونة الأخيرة أخذت صناعة البوليمرات تدخل حتى في عالم الإلكترونيات و بشكل كبير حتى دخلت في تصنيع مصادر الطاقة للأجهزة الإلكترونية المحمولة نظرا لخفة وزنها ولمواصفاتها الأخرى الحسنة . وقد حلت بعض البوليمرات المحضرة صناعيا في الآونة الأخيرة مكان المواد الطبيعية فأصبحتنا نستخدم مواسير الـ PVC بدلا من مواسير الحديد مثلا وهذا ناتج عن التطور الهائل الذي حصل في الصناعات الكيماوية والقائمة على النفط ومشتقاته . وهذه تتميز بصفات ميكانيكية جيدة كما تتميز برخص الثمن

وتوفرها بشكل كبير وقد تم استخدامها في صناعة الأدوات المنزلية والصناعات الحربية و المدنية كالسيارات والطائرات والغواصات والأجهزة الكهربائية.

وبالإضافة إلى المجالات السابقة تمكن العلماء من وضع آلية تمكن من الاستفادة من البوليمرات في مجال التوصيل الكهربائي وعلى وجه الخصوص في مجال تصنيع البطاريات الكهربائية والعوازل الكهربائية ، وهو ما يهمننا هنا. و تنقسم لدائن البوليمر البلاستيكية إلى نوعين أساسيين هما:

- اللدائن الحرارية: thermo-plastics-
- الجوامد الحرارية : thermo-sets-

### 2-3-23 اللدائن الحرارية : البولي فينيل كلورايد PVC

اللدائن الحرارية هي أنواع من اللدائن تلين بالحرارة وتتصلد بالبرودة . ويعتبر الـ PVC من أشهر اللدائن الحرارية المستخدمة في صناعة الكابلات .

ويتميز الـ PVC بخواص كهربية ممتازة عند الجهود المنخفضة (لا يستخدم في غيرها) وعند درجات الحرارة المنخفضة ، إلى جانب رخص ثمنه. ومن ثم فهو دائماً الاختيار الأول في جميع أنحاء العالم في الجهود المنخفضة. لكن عازليته تتأثر بدرجة الحرارة ومن ثم لا يصلح في التطبيقات ذات الحرارة العالية ، فعند ارتفاع درجات الحرارة تكون مادة (PVC) أكثر ليونة وهذا بالطبع غير مرغوب فيه . كما أن مقاومته تكون ضعيفة في درجات الحرارة المنخفضة جدا حيث يمكن أن يحدث به تشققات .

و يتميز الـ PVC بخاصية الإطفاء الذاتي للهب فهو يشتعل عند تقريب لهب إليه لكنه ينطفئ بمجرد إبعاد اللهب ، إلا أنه ينتج غازات سامة عند اشتعاله. وأخيراً يجب أن يراعى ألا يتعرض الـ PVC إلى الانحناءات الحادة فهو ليس مثل المطاط في هذه الخاصية. ويمكن إجمال سمات الـ PVC فيما يلي:

- لها مقاومة نوعية عالية .
- لها جهد انكسار منخفض فلا يستخدم إلا في تطبيقات تصل حتى 1000 فولت فقط.
- لها خاصية عدم امتصاص الرطوبة من الوسط المحيط .
- غير نشطة كيميائياً أى خاملة " لا تتفاعل مع الأحماض أو القلويات " .
- تتأثر مكوناتها بارتفاع درجة الحرارة .
- لها خاصية الصلابة والمرونة .
- لا تتأثر بالمذيبات أو الشحوم .
- لا تتأثر بالمياه .

**3-3-23 الجوامد الحرارية :-Thermo-sets**

وهي اللدائن التي لا تلين بالحرارة حتى درجة تحللها ، ويمكن صناعيا " تحويل " العديد من اللدائن الحرارية إلى جوامد حرارية وذلك بإجراء معالجة خاصة عليها تسمى التشابكية cross-linking. ويوجد نوعان من الجوامد الحرارية يستخدمان في صناعة الكابلات:

**4-3-23 المطاط:-RUBBER**

يعتبر مطاط البنييل bntyl rubber من أشهر أنواع المطاط الصناعي ، وقد تم استخدامه على نطاق واسع في صناعة كابلات السفن نظرا لمقاومته للزيوت والشحوم التي تكون موجودة عادة داخل السفن كما استخدم أيضا في كابلات الجهد العالي بسبب مقاومته لغاز الأوزون الذي يتساعد نتيجة لظاهرة الكرونا corona الناشئة من زيادة شدة المجال الكهربائي.

**5-3-23 عوازل البولي إيثيلين PE ، والبولي بروبيلين PP**

يوجد منها نوعان : بولي إيثيلين مرتفع الكثافة HDPE والآخر منخفض الكثافة LDPE ، وخواصهما أقل من الـ PVC ولذا لا يستعملان كعوازل وإنما يستعملان كحماية خارجية للكابل. أما البولي بروبيلين فهو مادة عازلة وتصنع منه الخيوط المستخدمة في ربط قلوب الكابلات.

**6-3-23 البولي إيثيلين التشابكي XLPE :-**

مادة XLPE هي أشهر الجوامد الحرارية على الإطلاق المستعملة الآن في صناعة الكابلات ، كما أن مادة PVC هي أشهر اللدائن الحرارية . يتم تركيب المادة على موصل للكابل عن طريق البثق EXTRUSION عندما يكون في الحالة اللدنة عند درجة حرارة مرتفعة ثم تتعرض المادة لعدة عمليات كيميائية ينتج عنها تغيير في التركيب الجزيئي لها مما ينتج عنه مادة مرنة قاسية لا تلين بعد ذلك بارتفاع درجة الحرارة. ويستعمل XLPE كعازل في الكابلات حتى حرارة مستمرة تصل إلى 90 درجة مئوية. وهو أكثر المواد استخداما الآن في كابلات الجهد العالي والمتوسط ، حيث أنه مادة لا تلين بالحرارة حتى درجة حرارة احتراقها أو تحللها ويتميز بخواص كهربية وفيزيائية وكيميائية ممتازة ، ويمكن استخدامها في درجة حرارة مستمرة للموصل حتى 90 درجة مئوية وبدرجة حرارة 250 درجة مئوية في فترات قصر الدائرة وتعتبر مقاومته ممتازة للرطوبة وغاز الأوزون الذي يتساعد نتيجة لظاهرة الكورونا Corona الناشئة من زيادة شدة المجال الكهربائي للعازل ، وهو مادة صلبة جداً غير قابلة للاشتعال.

## 4-23 أبرز مشاكل العوازل

تعانى العوازل المستخدمة فى الكابلات الكهربائية من عدة مشاكل . منها:

### 1-4-23 المفقودات Losses

الـ LOSS عموماً تسبب ارتفاع فى درجة حرارة الكابل ، ومن ثم يجب التأكد دائماً من وجود اتزان حراري للكابل ، بمعنى أن الحرارة المتولدة تساوى (أو أقل من) الحرارة المتسربة من الكابل . لاحظ أن الحرارة المتسربة من الكابل تتوقف فى حالة دفن الكابل تحت الأرض على المقاومة الحرارية لنوعية التربة ومسامية حبيباتها.

ومفقودات القدرة خلال العازل المحيط بالموصل Insulation Loss تحسب من المعادلة التالية:

$$P_{ins} = V^2 \omega C \tan \delta$$

حيث (  $\delta$  ) هى زاوية الفقد Loss angle لمادة العازل المحيط بالكابل ، وهى الزاوية بين الجهد والتيار المتسرب Leakage Currents ، وبالتالي تختلف عن زاوية الـ Power Factor التى تكون بين الجهد وتيار الـ Load . والزاوية (  $\delta$  ) إحدى الثوابت التى تميز مادة عازلة من أخرى ، ومن الواضح أنها كلما زادت قيمتها كلما زادت الـ Power loss خلال العازل.

### 2-4-23 التيارات المتسربة خلال العوازل

تعتبر ظاهرة تسرب التيار على مدى طول الكابل خلال طبقات العازل التى تحيط بموصل الكابل من المشاكل السلبية التى تظهر بوضوح فى الكابلات ، ويسمى هذا التيار بتيار الشحن Charging Current أو التيار المتسرب Leakage Current . وتحسب قيمة هذا التيار من المعادلة:

$$I_C = V \omega C$$

حيث

V هو جهد التشغيل مقاساً بالـ Volt .

$\omega$  ترتبط بتردد التيار ( f ) المار بالكابل من خلال العلاقة (  $\omega = 2\pi f$  ) .

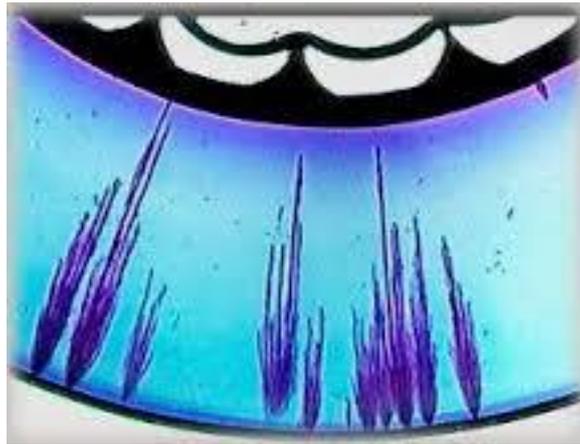
C هى السعة ( Capacitance ) مقاسة بالـ Farad .

ومن هنا ، فكلما زاد جهد التشغيل ، أو زادت الـ Capacitance الخاصة بالكابل كلما ارتفعت قيمة التيار المتسرب Leakage Currents على طول الكابل ، حتى أنه يصل إلى 13A لكل كيلومتر طولى فى الكابلات جهد 220 kV.

و عندما يصل طول الكابل إلى قيمة معينة (تسمى **الطول الحرج Critical Length** ) فإن قيمة تيار الشحن المتسرب Leakage Currents من الكابل تصبح مساوية لقيمة التيار المقنن للكابل  $I_R$  . و هذا يعني أن كل الـ Power المنقولة خلال الكابل قد تسربت ، و لم يصل للحمل منها شيء . و الطول الحرج فى منظومة الـ 132 kV هو 64 Km ، بينما يصل هذا الطول الحرج فى منظومة الـ 400 KV إلى 24 Km فقط . ومن الواضح أنه كلما زاد الجهد زاد التيار المتسرب Leakage Currents وبالتالي يقل الطول الحرج وهذا من عيوب الكابلات التى لا حل لها.

### 3-4-23 ظاهرة WATER TREE :

تسرب الرطوبة لداخل العازل يمكن أن يؤدي إلى نشوء ظاهرة التشجير المائى ( Water Treeing ) - لاسيما إذا كان سطح الموصل غير أملس والمجال غير منتظم - فعندما تتسرب الرطوبة إلى داخل المادة العازلة بسبب عدم انتظام المجال الكهربى بين الموصل والمادة العازلة على طول الكابل بسبب وجود نتوءات كأحد صور عيوب التصنيع ، ينتج عن ذلك زيادة المجال الكهربى عند نقط النتوءات وقلته عند الجزء الأملس من الكابل. و هذا الاختلاف يتسبب فى وجود شقوق فى العزل تتفرع فى جميع الاتجاهات مثل الشجر (شكل 2-23) . ويعتبر تسرب الرطوبة إلى داخل الكابلات أحد أهم أسباب انهيار العزل.



شكل 2-23 :

# 24

## تركيب الكابل

تتشابه كل الكابلات في أنها تحتوي على موصلات لحمل التيار ، وعازل محيط بالموصلات ، ونوع من الغطاء الخارجي لتقديم الحماية الميكانيكية وكذلك الحماية من التآكل وذلك لضمان عمل العازل بطريقة جيدة خلال فترة العمر الافتراضي لعمل الكابل. وهذا هو المشترك بين كابلات الجهد المنخفض وكابلات الجهد المتوسط وكابلات العالي ، لكن كابلات الجهد المتوسط و العالي تزيد عن هذا التركيب البسيط بعدة طبقات أخرى لعلاج مشاكل الجهود العالية وعدم تماثل توزيع الجهد كما سنرى.

وسنركز هنا على تركيب كابلات الجهد العالي High Voltage Cables (سنستخدم هذا المصطلح للتعبير عن كابلات الجهد المتوسط والعالي لأن الفرق بينهما ليس في عدد الطبقات وإنما في خواص المواد المستخدمة في كل طبقة ) وخاصة كابلات XLPE وهي الأكثر انتشارا في الشبكات الآن بعد ضآلة فرص استخدام الورق المشبع بالزيت والذي كان قديما هو الأكثر انتشارا.

### 1-24 تركيب كابلات الجهد العالي :

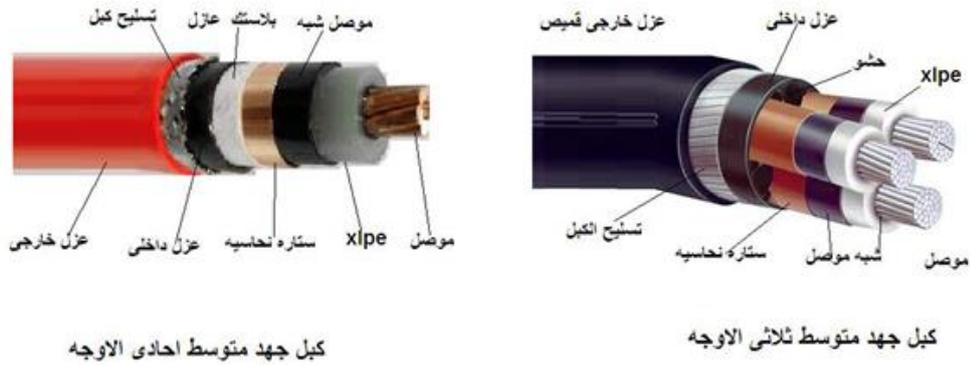
داخل كابلات الجهد العالي والمتوسط توجد عدة طبقات (شكل 1-24) ، كما يلي:

1. الموصل .
2. حجاب الموصل الأول (شبه الموصل) Semiconductor Layer.
3. العزل Insulation
4. حجاب العزل (شبه الموصل الثاني) Semiconductor Layer .
5. حجاب العزل الثاني (الشبكة النحاسية) أو Metallic Sheath
6. الحشو ( أو الفرشة) Filling
7. شنبر التسليح إن وجد Armoring.

8. عزل داخلي (بلاستيك)

9. الغلاف الخارجي . Outer Sheath .

وسنعرض بالتفصيل لمواصفات كل طبقة واستخداماتها.



كبل جهد متوسط احادي الوجة

كبل جهد متوسط ثلاثي الوجة

شكل 1-24

### 1-1-24 الموصل Conductor

يعتمد اختيار السلك الموصل على عدة سمات منها مقدار التيار الذي يمر فيه Ampacity ، والجهد والخواص الفيزيائية والمرونة Flexibility ، وبالطبع الناحية الاقتصادية.

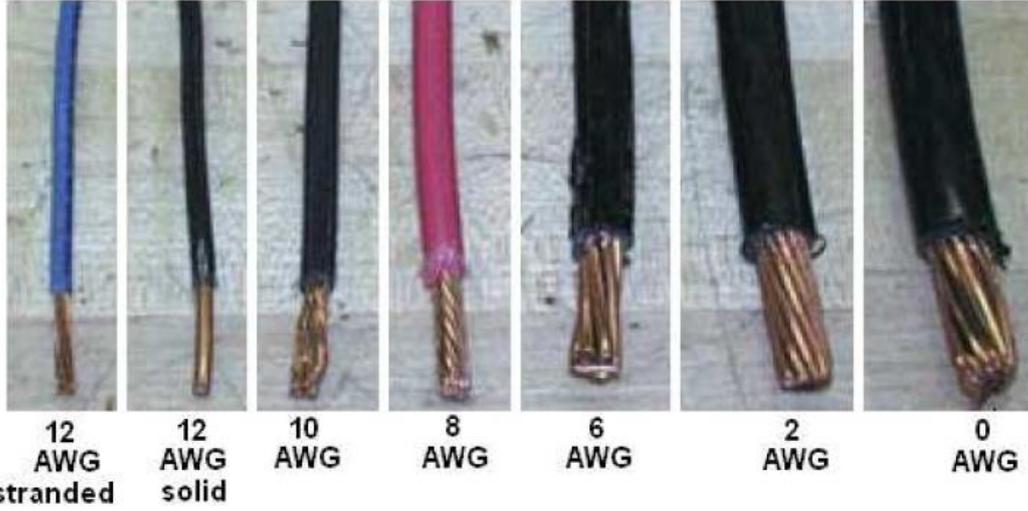
والموصلات عادة تصنع من أسلاك مجدولة stranded كما سبق أن ذكرنا عند الحديث عن موصلات الخطوط الهوائية في الباب الثاني (يفضل الرجوع إليها الآن لمراجعة سمات الأسلاك المجدولة وسمات المواد المستخدمة في صناعة الموصلات عموماً سواء النحاس أو الألومنيوم بأنواعه).

وأحيانا تضاف طبقة من القصدير على الموصل فتسمى أسلاك مقصدرة Tinned wires وأهمية هذه الطبقة هي منع تفاعل النحاس مع بعض مكونات العوازل المطاطية.

ومقاس الموصل Size يقدر بمساحة مقطعه ، والذي يقدر عادة بالملم المربع بالمعايير الدولية أو يقاس بوحدة American Wire Gauge, AWG حسب المقاييس الأمريكية . والمساحة هي مجموع مساحة الشعيرات المستخدمة. والجدول التالي يعطى معلومات عن العلاقة بين نظامي القياس والذين يجب أن يحيط بهما أي مهندس .

AWG	Diameter [inches]	Diameter [mm]	Area [mm <sup>2</sup> ]	Resistance [Ohms / 1000 ft]	Resistance [Ohms / km]	Max Current [Amperes]	Max Frequency for 100% skin depth
0000 (4/0)	0.46	11.684	107	0.049	0.16072	302	125 Hz
000 (3/0)	0.4096	10.40384	85	0.0618	0.202704	239	160 Hz
00 (2/0)	0.3648	9.26592	67.4	0.0779	0.255512	190	200 Hz
0 (1/0)	0.3249	8.25246	53.5	0.0983	0.322424	150	250 Hz
1	0.2893	7.34822	42.4	0.1239	0.406392	119	325 Hz
2	0.2576	6.54304	33.6	0.1563	0.512664	94	410 Hz
3	0.2294	5.82676	26.7	0.197	0.64616	75	500 Hz
4	0.2043	5.18922	21.2	0.2485	0.81508	60	650 Hz
5	0.1819	4.62026	16.8	0.3133	1.027624	47	810 Hz
6	0.162	4.1148	13.3	0.3951	1.295928	37	1100 Hz
7	0.1443	3.66522	10.5	0.4982	1.634096	30	1300 Hz
8	0.1285	3.2639	8.37	0.6282	2.060496	24	1650 Hz
9	0.1144	2.90576	6.63	0.7921	2.598088	19	2050 Hz
10	0.1019	2.58826	5.26	0.9989	3.276392	15	2600 Hz
11	0.0907	2.30378	4.17	1.26	4.1328	12	3200 Hz
12	0.0808	2.05232	3.31	1.588	5.20864	9.3	4150 Hz
13	0.072	1.8288	2.62	2.003	6.56984	7.4	5300 Hz
14	0.0641	1.62814	2.08	2.525	8.282	5.9	6700 Hz
15	0.0571	1.45034	1.65	3.184	10.44352	4.7	8250 Hz
16	0.0508	1.29032	1.31	4.016	13.17248	3.7	11 k Hz
17	0.0453	1.15062	1.04	5.064	16.60992	2.9	13 k Hz
18	0.0403	1.02362	0.823	6.385	20.9428	2.3	17 kHz
19	0.0359	0.91186	0.653	8.051	26.40728	1.8	21 kHz
20	0.032	0.8128	0.518	10.15	33.292	1.5	27 kHz
21	0.0285	0.7239	0.41	12.8	41.984	1.2	33 kHz
22	0.0254	0.64516	0.326	16.14	52.9392	0.92	42 kHz
23	0.0226	0.57404	0.258	20.36	66.7808	0.729	53 kHz
24	0.0201	0.51054	0.205	25.67	84.1976	0.577	68 kHz
25	0.0179	0.45466	0.162	32.37	106.1736	0.457	85 kHz
26	0.0159	0.40386	0.129	40.81	133.8568	0.361	107 kHz
27	0.0142	0.36068	0.102	51.47	168.8216	0.288	130 kHz

لاحظ في النظام الأمريكي أنه كلما كبر الرقم كلما صغرت مساحة المقطع كما في الشكل التالي.

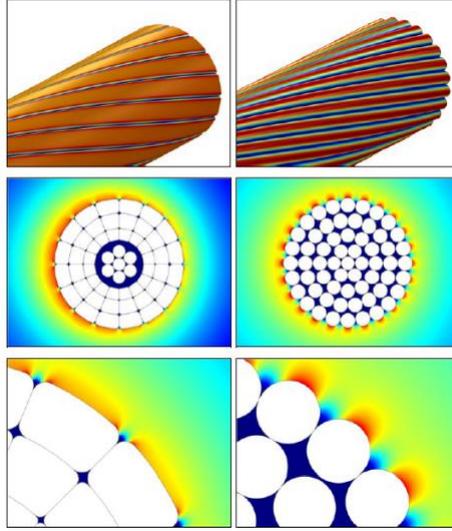


وقد سبق الحديث عن المواد المستخدمة في صناعة الموصلات. ويتبقى فقط الحديث عن مقاومة الموصل وهي موجودة في الفصل التالي عند الحديث عن المواصفات الكهربائية للكابلات.

### 2-1-24 حجاب الموصل Semiconductor Layer

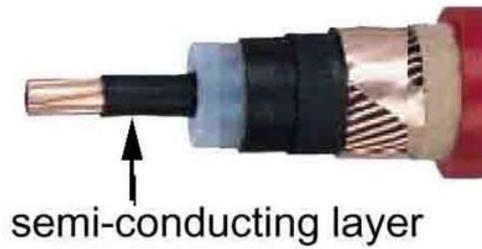
تتسبب عملية جدل الأسلاك Stranding للحصول على موصل الكابل في زيادة شدة المجال الكهربائي على سطح الموصل بنسبة تصل إلى 20% ، فالجدل غير مستقيم يؤدي إلى عدم انتظام المجال الكهربائي في السطح الداخلي بين العازل و الموصل و الذي ينتج عنه ارتفاع / انخفاض قيم المجال في بعض النقاط كما في الشكل 2-24. و هذا الاختلاف قد يؤدي إلى انهيار العزل.

وهذه المشكلة قد تؤدي أيضا إلى حدوث ظاهرة الـ water tree وتسرب الرطوبة إلى داخل المادة العازلة لوجود هذه النتوءات التي تؤدي لوجود شقوق في الكابل تتفرع في جميع الاتجاهات مثل الشجر كما سبق الحديث عنه في نهاية الفصل السابق.



شكل 2-24 :

ولعلاج هذه المشكلة فإننا نأخذ في الاعتبار في تصنيع الكابل تركيب مادة شبه موصلة (شكل 2-24-3) وتسمى ستارة الموصل (Conductor Shield) وهي تستخدم لتقليل ظاهرة الـ stranded effect و من أجل الحصول على أفضل توزيع للمجال الكهربائي حيث أن هذه الطبقة تعمل على تنعيم سطح الموصل و جعله أملس. كما تعمل على تنظيم خطوط المجال الكهربائي لتصبح غير عمودية على سطح الموصل.



شكل 3-24 :

وتصنع هذه المادة من مادة البلاستيك مع إضافة كربون أسود لإعطاء الحجاب خاصية شبه التوصيل ( بحيث تكون مقاومة شبه الموصل أعلى من مقاومة الموصل نفسه ) ويساعد شبه الموصل هذا على انتظام المجال الكهربائي داخل العازل كما ذكرنا.

كما أن الخاصية البلاستيكية للمادة شبه الموصلة تجعلها ملائمة للتمدد والانكماش مع العازل في فترات زيادة أو قلة الأحمال على الكابل (زيادة الحمل تزيد حرارة الكابل) مما يؤدي إلى منع تكون أي فقاعات داخل الكابل بين الموصل والعازل . علما بأن وجود تلك الفقاعات مع الإجهادات الكهربائية Electrical Stress يؤدي إلى تأين الهواء بالفقاعة وبالتالي انهيار العازل واحترق الكابل .

### 3-1-24 العزل INSULATION

ويعتبر العزل أهم مكونات الكابل فإذا ضعف العزل أو انهار أصبح الكابل بلا فائدة ولا قيمة له ومن أجل ذلك فإن أهم اختبار يجري في المصنع بعد التصنيع هو اختبار العزل وكذلك أثناء فحص واستلام التركيبات وكذلك قبل إطلاق التيار في المشروعات. والعزل يقوم بعزل الفازات بعضها عن بعض ، وكذلك عزل وحماية البشر المتعاملين مع الكابل. وفي حالة كابلات الجهد العالي والمتوسط فإن العزل يكون من مادة XLPE " البولي إيثيلين المتشابك وقد سبق الحديث عن سماته في الفصل السابق .

#### ملحوظة:

أسماء أنواع العوازل السابقة هي الشائعة في أوروبا والشرق الأوسط ، أما في أمريكا فالعوازل مختلفة تماما في أسمائها ، فرغم أنها أيضا مواد بوليمرية إلا أن هيئة الاختبارات الأمريكية اختارت أسماء مختلفة لأنواع العوازل ، من أهمها:

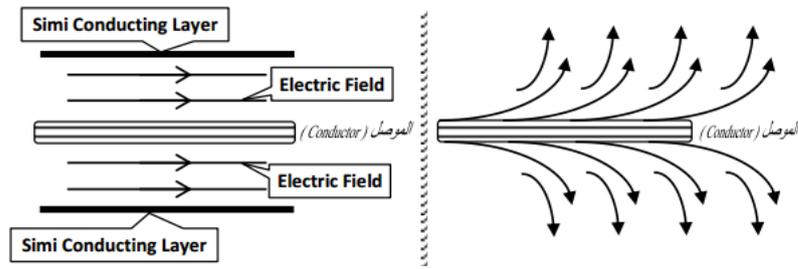
- عوازل Type T : وتستخدم في الأماكن الجافة فقط
- عوازل Type TW, THW, THWN : للعوازل المستخدمة في الأماكن المعرضة للمياه
- عوازل Type TBS : وهو من اللدائن الحرارية وبه ألياف خارجية مبطنة للهب ويستخدم في لوحات التوزيع.
- عوازل Type MTW : وهو مقاوم للرطوبة والحرارة والزيوت
- عوازل Type THHW : وهو نفسه الـ XLPE ويستعمل حتى 75 درجة في الأماكن الجافة وحتى 90 درجة في الأماكن الرطبة.

وأهمية هذه الملحوظة أن بعض الشركات الأمريكية العاملة في بلادنا تستخدم منتجات بلادها برموزها ، وبالتالي فالمهندسين العاملين بهذه الشركات عليهم أن يتعاملوا بأسماء هذه المنتجات.

## 4-1-24 حجاب العازل (شبه الموصل الثاني)

توضع مادة شبه الموصل semi - conductor في كابلات الجهد العالي والمتوسط بعد الموصل ، وتوضع أيضا بعد العزل مباشرة . ووظيفة هذه المادة هي جعل خطوط المجال الكهربائي تسير بشكل موازي للموصل (شكل 4-24) وليس في اتجاه عمودي على اتجاه الموصل وبالتالي لا يحدث إجهاد على العزل .

وتصنع مادة شبه الموصل ( الثاني ) غالبا من مادة مطبوخة على الـ Phase أى مبطوقة وتكون صعبة النزع حتى أننا نحتاج إلى زجاجة مسطحة لنزاعها عند عمل الوصلات.

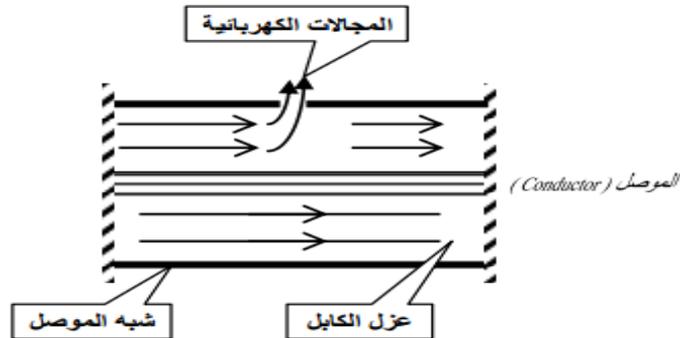


شكل 4-24 :

يتكون حجاب العازل من جزئيين هما:

- الحجاب العازل المساعد Auxiliary Shield وهي شبه الموصل الذي تحدثنا عنه آنفا
- الحجاب الأساسي Primary Shield ( وهي نفسها طبقة الـ Metallic sheath التالية)

لاحظ أنه إذا حدث ثقب في هذه الطبقة semi - conductor فإن ذلك يؤدي إلى تجمع خطوط المجال الكهربائي بالثقب وتكون خطوط المجال عموديا على العزل وبالتالي انهيار العزل كما في الشكل 5-24.



شكل 5-24 : تأثير عدم اتصال شبه الموصل

## 5-1-24 الغلاف المعدني Metallic sheath

يوجد غلافان معدنيان يسميان تسليح (شكل 24-6) بكابلات الجهد المتوسط والعالي:  
**الغلاف الأول داخلي:** (وهي الطبقة التي نتحدث عنها الآن) ويوضع هذا الغلاف المعدني على كل فارة Phase من الفارات الثلاثة حتى يمكنها من تسريب تيار الـ Short Circuit Current - إن وجد - كما أنها تحمي الفارة من الرطوبة وتسرب المياه . وقد يصنع من الرصاص أو الألومنيوم أو النحاس.



شكل 24-6 :

ويصنع الغلاف المعدني Metallic Sheath الأول بأشكال مختلفة ، منها:

- شريط/ أسلاك من النحاس يلف على العازل بطريقة لولبية .
- أو شريط معرج من النحاس يوضع على العازل بطريقة طولية.
- وقد يكون غلافا مصمما من الرصاص يتم لصقه بالطول عن طريق البثق Extruded-lead sheath حيث يتميز الرصاص بسهولة الصنع ومقاومته للتآكل إلا أن خواصه الميكانيكية ضعيفة وغير مشع حراريا وهذا يعني حسب الحرارة داخل الكابل لذلك يستعمل بعض سبائك الرصاص لتحسين تلك الخواص.

كما يمكن استخدام الألومنيوم في صناعة الغلاف المعدني للكابلات نظرا لأنه أقوى من الرصاص . ولكن نظرا لارتفاع شدة معدن الألومنيوم الميكانيكية فإنه يكون من الصعب التعامل معه خصوصا عند عمليات ثني الكابل. إضافة إلى ذلك فإن الإجهادات الميكانيكية الشديدة الناتجة عن التمدد الحراري في

الكابل تؤثر تأثيراً سيئاً على وصلات الكابل في حالة استخدام غلاف أملس من الألومنيوم . وقد تم التغلب على هذه المشكلة باستخدام غلاف ألمونيوم معرج corrugated يمكنه امتصاص وتحمل تلك الإجهادات بطريقة أفضل من الغلاف الأملس.

**والغلاف المعدني الثاني (خارجي) :** وهو نفسه طبقة التسليح قبل الأخيرة التي سنتحدث عنها لاحقاً.

### 24-1-6 مزايا الأغلفة المعدنية عامة

- حصر المجال الكهربائي داخل الكابل. ويعبر عن ذلك بمصطلح "تحجيب الكابل" أي عمل حجاب للكابل لمنع خروج المجالات الكهربائية والمغناطيسية خارجه.
- توفير مسار لتيار الـ Short Circuit Current الأرضي.
- خفض الإجهادات الكهربائية على العازل وخاصة المجالات العمودية على سطح العازل التي تتسبب في تلفه.
- الحد من التشويش على أجهزة الاتصالات بسبب تحجيب المجالات.
- خفض مخاطر الصدمات الكهربائية في حالة الـ Earthing الجيد للكابل.
- يوفر حماية ميكانيكية وكيميائية وطبيعية لمادة العازل .

### 24-1-7 الحشو أو ( الفرشة ) FILLING - BEDDING :

يوضع حشو بين الفازات وهي عبارة عن فرشاة أو مخدة لكل فارة . وعادة ما يتم تصنيع هذا الجزء من مادة PVC لما لها من مميزات ذكرناها من قبل . و فائدة طبقة الحشو مايلي :

- العمل على استدارة الكابل وبالتالي يسهل سحبه وتمديده.
- حماية الفازات من شنبر التسليح الذي سيوضع لاحقاً أن وجد .
- تساعد على عدم تسريب الماء والرطوبة إلى داخل الكابل
- تعمل كغطاء واقى من الصدمات الميكانيكية الخارجية
- حماية القلوب في حالة وجود طبقات من شرائح الصلب

### 24-1-8 التسليح ( التدرج ) ARMOUR :

الكابلات قد تكون مسلحة وقد تكون بدون تسليح ، ولكل منهما مجالات للاستخدام ، فالكابل المسلح يستخدم فى الحالات التالية:

1. الأرض الهشة ذات التراب أو الرمل الناعم .
2. الأرض المعرضة باستمرار لمرور السيارات والمشاة والمركبات ( ضغوط ميكانيكية )

والكابلات المسلحة تتمتع بحماية ميكانيكية ضد الإجهادات التي يتعرض لها أثناء عمليات النقل والتركيب أو إذا كانت عرضة للوقوع تحت أحمال كبيرة كمرور السيارات وخلافه. ومن فوائد هذه الطبقة أيضا المساهمة فى إيجاد مسار لمرور تيار العطل Earth Faults وتوفير مسار رجوع له إلى مصدره بدلا من الرجوع فى الأرض.

والغلاف المعدنى الخارجى يصنع من الصلب حتى لا يصدأ ويأخذ أشكالا مختلفة:

- فقد يستعمل طبقتان من شرائط الصلب بسمك يتراوح من 0.5 – 0.8 mm حسب قطر الكابل وتدهن هذه الشرائط بالبيتومين.
- كما توجد طريقة أخرى لعملية التسليح الكابل ، وهي استخدام أسلاك من الصلب المجلفن كما فى الشكل 7-24 . ويمكن القول أن عملية تسليح الكابل هي خبرة فنية خاصة بكل دولة أو شركة تقوم بتصنيع الكابلات .



شكل 7-24

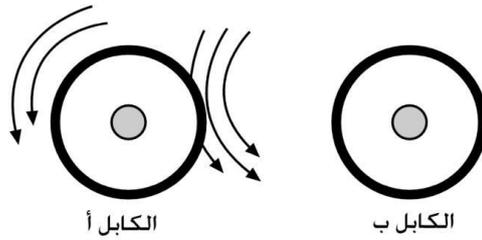
## 9-1-24 المشاكل المرتبطة بالغلاف Sheath Effect

عند مرور تيار في موصل الكابل ذي القلب الواحد فإن هذا التيار يولد حوله مجالاً مغناطيسياً عبارة عن مسارات مغلقة من الفيض المغناطيسي تولد Induced EMF في غلاف الكابل نفسه وكذلك في أغلفة الكابلات المجاورة له ، هذه القوة الدافعة الكهربائية تسبب تيارات تأثيرية ينتج عنها مفقودات الغلاف التي منها :

## 1- مفقودات بسبب التيارات الدوامية في الغلاف

تتولد في الغلاف المعدني للكابل تيارات حثية (Inducted Currents) والتيارات دوامية (Eddy Currents) نتيجة للفيض المغناطيسي المتغير الناتج عن مرور التيار المتردد في موصل أو موصلات الكابل نفسه أو في موصلات الكابلات المجاورة له. وتسبب هذه التيارات في ظهور فقد Loss في الغلاف مما يقلل من قدرة الكابل على حمل التيار.

في الشكل 8-24 عند مرور تيار في موصل الكابل (ب) يتولد مجال مغناطيسي يقطع غلاف الكابل ( أ ) المجاور له بحيث تكون شدة هذا المجال في الجهة القريبة من الكابل ( ب ) أكبر من شدته في الجهة البعيدة عنه. ويتولد عن ذلك فرق في الجهد بين مقطعي غلاف الكابل (أ) وينشأ عنه تيارات دوامية (لاحظ أن التيارات الدوامية تسير عرضياً في الكابل وليس طولياً كما يظن البعض ومن هنا سميت دوامية لأنها تشبه الموجات الصغيرة في النهر التي تتحرك عمودية على اتجاه النهر).



شكل 8-24 :

وينشأ عن هذه التيارات مفقودات في الغلاف تمثل حوالي 2% بالنسبة لمفقودات الموصل ويظهر تأثيرها في الكابلات ذات الأغلفة المعدنية.

## 2- تقليل المفقودات في الغلاف عن طريق عمل Cross Bonding

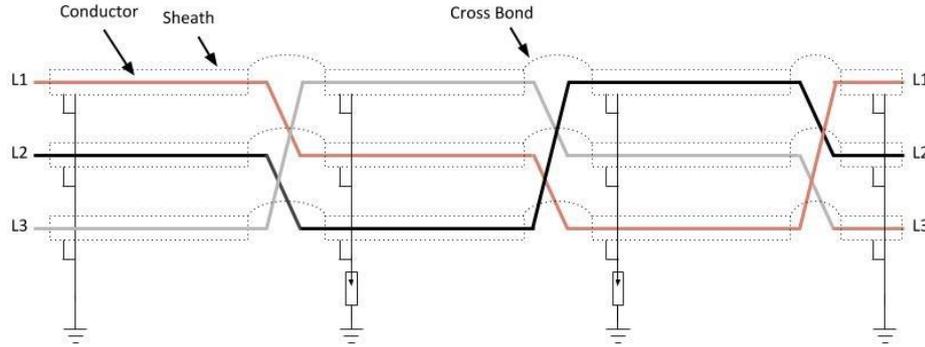
تستخدم طريقة الترابط المتقاطع للأغلفة Cross Bonding في الأنظمة ثلاثية الطور المكونة من ثلاثة كابلات أحادية الطور لمنع مرور التيارات المستحثة Induced currents في أغلفة الكابلات ، فغالبا تربط أغلفة الفازات الثلاثة ذات القلب الواحد ربطا متقاطعا Cross Bonded بمعنى أن يوصل غلاف الفاز الأول بغلاف الفاز الثاني والثالث كما يربط غلاف الفاز الثاني بغلاف الفاز الثالث كما في الشكل 9-24 ، فهذا يمنع تيارات الغلاف نظرا لأن جهود الأغلفة الثلاثة مزاحة عن بعضها بزاوية 120 درجة وبالتالي يصبح مجموع الجهد على الغلاف يساوي صفرا . ويتم عمل الـ Cross Bonding عند صناديق التوصيل (Link Boxes).



شكل 9-24 :

وعمليا يتم التأكد من تنفيذ هذا التصميم على الوجه المطلوب أثناء اختبارات الاستلام وذلك بحقن تيار على الموصل في حدود 100 أمبير ومن ثم قياس التيار المار بكل غلاف فلا بد ألا يزيد عن 3 أمبير أي 3% من تيار الموصل (التفاصيل لاحقا).

هذا التوضيح مبني على فرض أن الكابلات الثلاثة موضوعة في شكل مثلث متساوي الأضلاع Trefoil أما إذا وضعت الكابلات على مستوى أفقي في خط مستقيم Flat فإن مفقودات الكابل لن تكون متساوية في الكابلات الثلاثة وستنشأ كمية من الـ Losses ولذلك نقوم بعملية التبديل لمواضع الكابلات (Transposition) للعمل على تقليل الـ Induced voltage في الكابلات وبالتالي تقلل الـ Losses (لاحظ ترتيب الكابلات الثلاثة المفردة وكيف تم عكس هذا الترتيب مرتين في شكل 10-24 على طول الكابل).



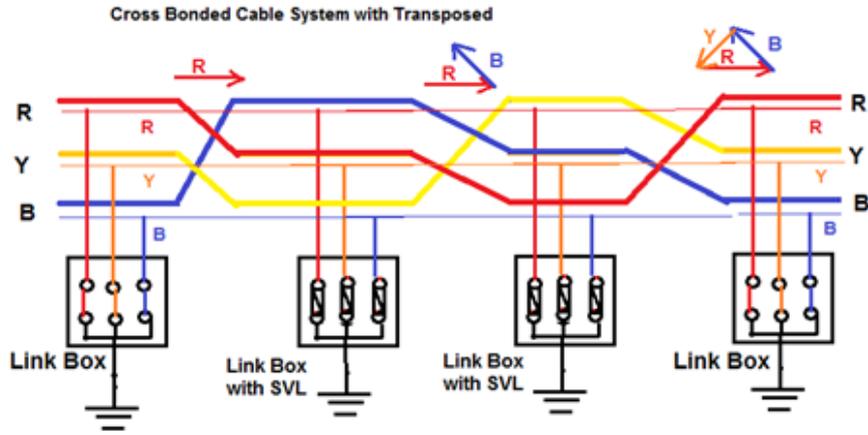
شكل 24-10 :

### 3- تأريض الغلاف المعدني للكابلات

يجب عمل تأريض Earthing للكابل المسلح في الكابلات الـ Single phase وذلك للتخلص من الجهد الناشئ على هذا الغلاف بسبب المجال المغناطيسي الناتج عن مرور التيار في الموصل كما ذكرنا. ويكون الـ Earthing بإحدى طريقتين : إما تأريض الغلاف من جهة واحدة أو من جهتين.

1. فأما الـ Earthing من جهتين فهو الأفضل للكابل من حيث قيم الجهود و لا يوجد خطر على العازل أو الأشخاص العاملين في صيانة تلك الكابلات ، فالجهد يكاد يكون صفرا على الغلاف. ولكن المشكلة في هذه الطريقة هي مرور تيارات بطول الكابل - عكس الدوامية - في الغلاف بسبب أن الدائرة مغلقة ومن ثم يكون لدينا Losses تتناسب مع مربع التيار المار في الغلاف.

2. أما الطريقة الثانية فهي تأريض الغلاف من جهة واحدة ، وفي هذه الحالة تكون الدائرة مفتوحة وبالتالي لا يوجد Losses ، ولكن المشكلة هنا هي ارتفاع الجهد على الطرف الآخر من الكابل إلى قيمة قد تتسبب في حرق عازل الكابل ولذلك يوضع Sheath Voltage Limiter كما في الشكل 24-11 عند الطرف الآخر من الكابل وتعمل عند قيم معينة تضبط عندها لتفريغ هذا الجهد. والشكل 24-11 يظهر عملية الـ Earthing مع عملية الـ Transposition .



شكل 11-24 :

ملحوظة هامة :

يجب عدم استخدام أى مواد مغناطيسية (حديد مثلاً) فى تغليف الكابلات الـ Single Core لأن المواد المغناطيسية يمر فيها تيارات حثية ناتجة عن قطع المجال للغلاف وبذلك ترتفع درجة حرارة الكابل . ومن هنا نلاحظ أن كابلات الجهد المتوسط من النوع الـ Single Phase تكون ذات تسليح المونيوم أو بدون تسليح .

### 10-1-24 الغلاف الخارجى Outer Sheath :

الحماية الخارجية للكابل عبارة عن طبقة من مادة لها خواص معينة . توضع فوق الغلاف أو فوق طبقة تسليح الكابل بحيث تكون طبقة الحماية الخارجية هي آخر طبقة خارجية للكابل لحمايته من البيئة الخارجية والمواد الأخرى المحيطة به. والغلاف الخارجى للكابل يكون عادة من مادة خاملة كيميائياً أى لا تتفاعل مع الأحماض أو القلويات أو المواد العضوية ولذلك كانت مادة PVC (تستعمل فى هذه الطبقة مهما كان جهد التشغيل لأن دوره هنا ليس العزل الكهربى وإنما الحماية الكيميائية ) هى الأكثر استخداماً فى الكابلات كغلاف خارجى حماية للكابلات من التآكل فى التربة .

ويجب أن يكون غلاف الكابل مانع للهواء والماء ويغطيه بكامل طوله ، ويسمى هذا الغلاف (الجاكت) أو الغلاف الواقي. وقد يكون الغلاف الخارجى لونه أحمر أو أسود وليس للألوان دخل فى تحديد وتفضيل أى كابل عن الآخر .

والجدير بالذكر أنه عادة يكتب على الغلاف الخارجي للكابل بعض المعلومات الهامة من قبيل اسم الشركة ومقاس الكابل وجهد التشغيل وتاريخ التصنيع كما في الشكل 12-24.



شكل 12-24 :

#### 11-1-24 أطراف التوصيل الخارجية

أطراف التوصيل الخارجية هي تلك التوصيلات التي تستخدم عند ربط كابل مع الخط الهوائي وبالتالي يكون معرضاً للظروف الجوية . ففي هذه الحالة يكون العزل مدرجاً بدوائر مثل الشمسية تسمى Rain Shed لحماية العازل من الأمطار والأتربة ، كما في الشكل 13-24.



ويتوقف عدد الشمسيات على قيمة الجهد ، فجهد 11 ك ف يستخدم معه عدد 2 شمسية ، بينما جهد 22 ك ف يستخدم معه 3 شمسيات ، و جهد 33 ك ف يستخدم معه 4 شمسيات.

شكل 13-24 :

## 25

## الخواص الكهربائية للكابلات

يقصد بالخواص الكهربائية للكابلات دراسة العناصر التالية:

- 1- مقاومة الموصل و مقاومة العازل
  - 2- محاثة الكابل (Inductance)
  - 3- سعة الكابل (Capacitance)
  - 4- بالإضافة إلى دراسة المجال الكهربائي والمغناطيسي للكابل.
- وفيما يلي سنتعرض بالشرح التفصيلي للعناصر السابقة.

## 1-25 مقاومة الموصل CONDUCTOR RESISTANCE

ويرمز لها بالرمز  $R$  ، وتختلف المقاومة من مادة إلى أخرى ، وتتوقف قيمتها على مساحة مقطع السلك وطوله ومقاومته النوعية ، ووحدة قياس المقاومة هي الأوم. ومقاومة الموصل للتيار المتردد تختلف عن مقاومته للتيار الثابت لنفس المادة . ويرجع ذلك إلى سببين أساسيين هما:

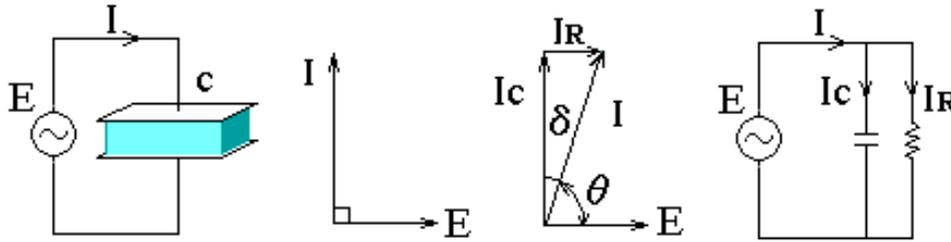
- الظاهرة القشرية Skin effect حيث يميل التيار إلى المرور داخل الموصل في الطبقة الخارجية منه تاركاً وسط الموصل ، وذلك بسبب توزيع الفيض المغناطيسي للتيار داخل الموصل نفسه كما سبق شرحه في الباب الثاني عند الحديث عن الموصلات في الخطوط الهوائية .
- الظاهرة التجاورية Proximity effect وتتسبب هذه الظاهرة عند وجود كابلين متجاورين يقع كل منهما في المجال المغناطيسي للآخر .

وتسبب الظاهرتان السابقتان زيادة في مقاومة الموصل للتيار المتردد عن مقاومته للتيار المستمر .

## 2-1-25 مقاومة العزل Insulation resistance

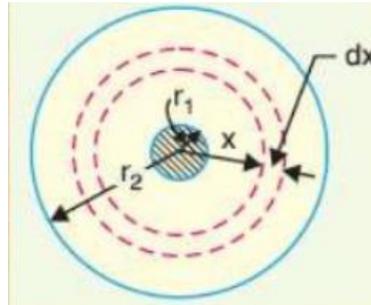
نظرا لعدم وجود مادة عازل كاملة ( $R = \infty$ ) فإنه بمجرد تعرض الكابل للجهد يتولد فرق جهد بين الكابل وغلافه (حتى وإن كان الكابل غير محمل أي بدون مرور تيار في موصل الكابل) وبسبب هذا الفرق في الجهد يمر تيار متسرب في عزل الكابل الذي يمكن اعتباره مكثفا غير نموذجي أي أنه مكثف بالتوازي مع مقاومة، ولذا سيتسرب تيار  $I_c$  إلى الغلاف كما هو موضح بالشكل 1-25 نتيجة سعة الكابل ويتسرب تيار آخر  $I_R$  نتيجة لمقاومة العزل.

وتعرف الزاوية  $\delta$  بين التيار المحصل  $I$  وبين التيار  $I_c$  بزاوية فقد العازل Insulation Loss Angle، ويجب أن تكون أصغر ما يمكن (تكون صفرا إذا كان العزل نموذجيا أي ليس لديه تيار متسرب في المقاومة الأومية  $R$  (المقاومة الأومية تعتبر مالا نهائية في العزل النموذجي) حتى يمكن تقليل الـ Losses في العازل لذا يتم اختيار العازل بحيث تكون مقاومته كبيرة جدا.



شكل 1-25 :

و مقاومة عزل الكابل هي المقاومة لمرور التيار في الاتجاه القطري بين الموصل والغلاف كما في الشكل.



ويمكن الحصول على قيمة مقاومة العزل للكابلات من المعادلة الآتية:

$$R_{ms} = \frac{\rho}{2l\pi} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad \text{ohm}$$

حيث

$$\begin{aligned} \rho &= \text{مقاومية مادة العزل (ohm.m).} \\ l &= \text{طول الكابل (m).} \\ r_2 &= \text{نصف القطر الخارجي للكابل.} \\ r_1 &= \text{نصف قطر الموصل.} \end{aligned}$$

ويوجد مزيد من التفاصيل حول مقاومة العزل في الفصل الرابع من هذا الباب والخاص بالاختبارات حيث يمكن مراجعة المجموعة الخاصة باختبارات العزل.

## 2-25 INDUCTANCE الكابلات

يمكن استخدام نفس طرق حساب الـ Inductance للخطوط الهوائية في الكابلات الأرضية ، ولكن سيكون هناك أخطاء في النتائج وذلك بسبب تأثير الظاهرة السطحية والتقارب Skin and Proximity Effects وتأثير وجود الغلاف . ففي الكابلات منخفضة الجهد تكون المسافة بين الموصلات صغيرة بالمقارنة بأقطار الموصلات وعلى ذلك لا يمكن إهمال التأثيرات السابقة . وعلى ذلك فمن الأفضل قياس الـ Inductance عند الاحتياج إليها لأن الحسابات تكون صعبة وغير دقيقة.

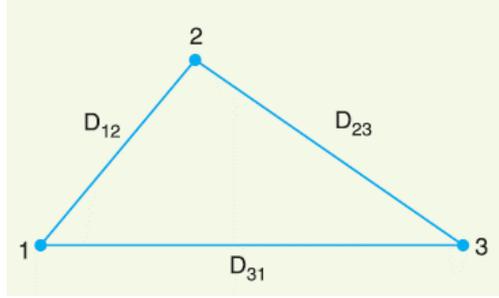
أما في كابلات الجهد العالي فيتم إهمال تأثير الظاهرة السطحية والتقارب بسبب ازدياد سمك العازل وفي مثل هذه الكابلات يتم تغليف القلوب المنفصلة أو إحاطتها بورق معدني يتم توصيله بالغلاف والأغلفة المعدنية تتشأ Mutual Inductance بين الموصلات وتؤثر بطريقة ملحوظة على المعاوقة الكلية ، وفي هذه الحالة يتم الأخذ في الاعتبار التأثيرات الناتجة عن الغلاف المعدني. تعتمد الـ Inductance لموصلات الكابلات في النظم ثلاثية الطور على الشكل الهندسي لهذه للموصلات (شكل 2-25).

$$L = 0.2 \left( \frac{1}{4} + \ln \frac{D}{r} \right) \text{ mH/km}$$

$$L1 = 0.2 \left( \frac{1}{4} + \ln \frac{D_{12} D_{31}}{r D_{23}} \right)$$

$$L2 = 0.2 \left( \frac{1}{4} + \ln \frac{D_{23} D_{12}}{r D_{31}} \right)$$

$$L_3 = 0.2 \left( \frac{1}{4} + \ln \frac{D_{31} D_{23}}{r D_{12}} \right)$$



شكل 2-25 :

والقيمة المتوسطة لل Inductance هي :

$$L_m = 0.2 \left( \frac{1}{4} + \ln \frac{D_m}{r} \right) \quad \text{mH/km}$$

حيث  $D_m$  = متوسط البعد الهندسي المتبادل للبعد بين مركز الموصلات.

$$D_m = \sqrt[3]{D_{12} D_{23} D_{31}}$$

$$L_1 = L_2 = L_3 = 0.2 \left( \frac{1}{4} + \ln \frac{D}{r} \right) \quad \text{mH/km}$$

وبرغم أنه يمكن حساب الـ Reactance ( $\omega L$ ) باستخدام المعادلات المبينة أعلاه إلا أن قيم هذه الـ Inductance المدرجة في جداول خصائص الكابلات التي يصدرها مصنعي الكابلات هي القيم التي يتم الحصول عليها بالقياس وذلك لأن مقطع الموصلات في كثير من الكابلات ليس دائريا وأيضا لأن القيمة الفعلية للـ Inductance تعتمد على النظام المستخدم في تأريض الغلاف ونظام الترابط بين الأغلفة وبعضها وعلي ما إذا الكابل له درع أم لا. وبصفة عامة فإن قيمة الـ Inductance الحثية للكابلات تقع في حدود 0.08-0.24 أوم/كم.

## 3-25 سعة الكابل CABLE CAPACITANCE

السعة الكهربائية Capacitance هي مقدار الشحنة التي يحملها المكثف مقسوما على جهده ( $C=q/v$ )، والمكثف نظريا هو لوحين موصلين بينهما عازل، ومن ثم يمكن اعتبار أن هناك مكثف تخيلي موجود بين موصل الكابل (القلب) والغلاف المعدني (sheath)، وتتشتأ أيضا مكثفات بين قلوب الكابلات بعضها البعض وبينها وبين الأرض.

في حالة الكابل ذي القلب المنفرد أو الموصل الواحد فإن الـ Capacitance, C بين الموصل والغلاف الخارجي أو الحجاب الخارجي هي:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln(R/r_0)} \text{ F/m}$$

حيث

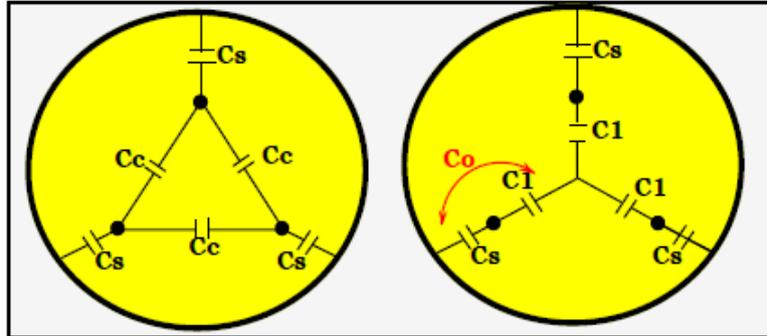
$$\epsilon_0 = \text{سماحية الفراغ} = 8.83 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

$$\epsilon_r = \text{السماحية النسبية} \text{ Relative Permeability} \text{ لمادة العزل.}$$

$$r_0 = \text{نصف قطر الموصل.}$$

$$R = \text{نصف القطر الداخلي للغلاف.}$$

أما في حالة الكابلات ثلاثية القلوب فإن الـ Capacitance بين قلب وآخر ( $C_c$ )، والـ Capacitance بين القلب والأرض ( $C_s$ )، أو بين قلوب الكابلات بعضها البعض وبينها وبين الأرض تكون كما في الشكل 3-25.



شكل 3-25 :

من الصعب حساب الـ Capacitance لهذه الكابلات ، حيث أن اتجاه المجال الكهربائي في هذه الكابلات ليس نصف قطري، ويتم تعيين سعة الكابلات في هذه الحالة عن طريق القياس. وجدير بالذكر أنه يمكن إيجاد قيمة تقريبية لسعة هذه الكابلات من المعادلة الآتية:

$$C = \frac{0.111\epsilon_r}{\ln \frac{a^2(3R^2 - a^2)^3}{r_0^2(27R^6 - a^6)}} \mu F/m$$

حيث

$r_0$  = نصف قطر الموصل (mm).

$R$  = نصف القطر الداخلي للغلاف أو الحجاب (mm).

$a$  = المسافة بين الموصلات (mm).

## 4-25 المجال المغناطيسي للكابلات :

عند مرور التيار الكهربائي في أي موصل ينتج عنه مجال مغناطيسي واتجاه هذا المجال يتحدد حسب " قاعدة فلمنج لليد اليمنى " .

ويجب الحرص على أن تكون أطوال الكابلات في المباني قصيرة قدر الإمكان لأن التقاط المجال الكهرومغناطيسي يتناسب مع طول الكابل. وبما أن أي موصل يحمل تياراً يشع حوله مجالاً مغناطيسياً فإن المجال المغناطيسي الموجود حوله يؤثر سلباً على المعدات المجاورة ويمكن تعطيلها ويؤثر أيضاً على توصيل الطاقة المطلوبة.

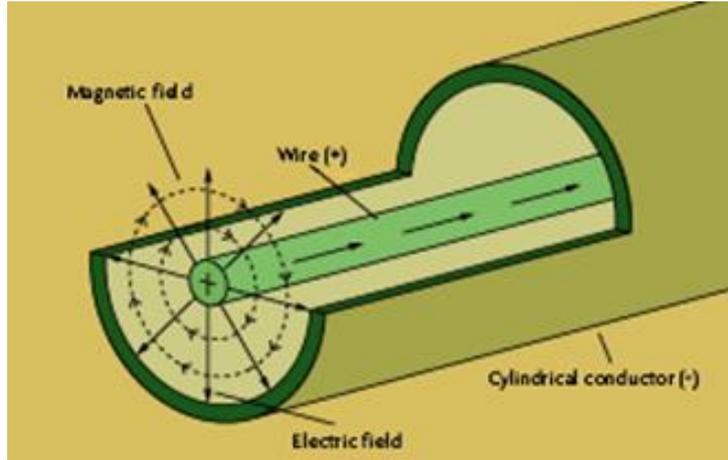
وكما ذكرنا سابقاً يجب عدم استخدام أي مواد مغناطيسية في تغليف الكابلات لأن المواد المغناطيسية يمر فيها تيارات حثية ناتجة عن قطع المجال للغلاف وبذلك ترتفع درجة حرارة الكابل . ومن هنا نلاحظ أن كابلات الجهد المتوسط من النوع الـ Single Phase تكون ذات تسليح ألومونيوم أو بدون.

## 5-25 المجال الكهربى للكابلات

يتشابه الكابل مع المكثف فى عدة نواحى ، فالمكثف عبارة عن لوحين معدنيين بينهما عازل. كذلك الكابل فهو يحتوى على موصلات معدنية بينها عازل. وعند تغذية المكثف بتيار مستمر نجد الآتى:

- اللوح الموصل بالطرف السالب : يحمل شحنة سالبة .
- اللوح الموصل بالطرف الموجب: يحمل شحنة موجبة (الإلكترونات مسحوبة منه).

وتتحرك الإلكترونات بواسطة قوة لها اتجاه تمثل بخطوط تسمى بخطوط " المجال الكهربى" ونفس الشيء فى الكابلات أى يحدث داخله مجال كهربى إذا وصل بتيار مستمر فلدينا بالكابل موصلين (داخلى وخارجى وبينهما عازل سيظهر عليه فرق جهد وتتراكم شحنة على الكابل وكأنه مكثف مشحون.

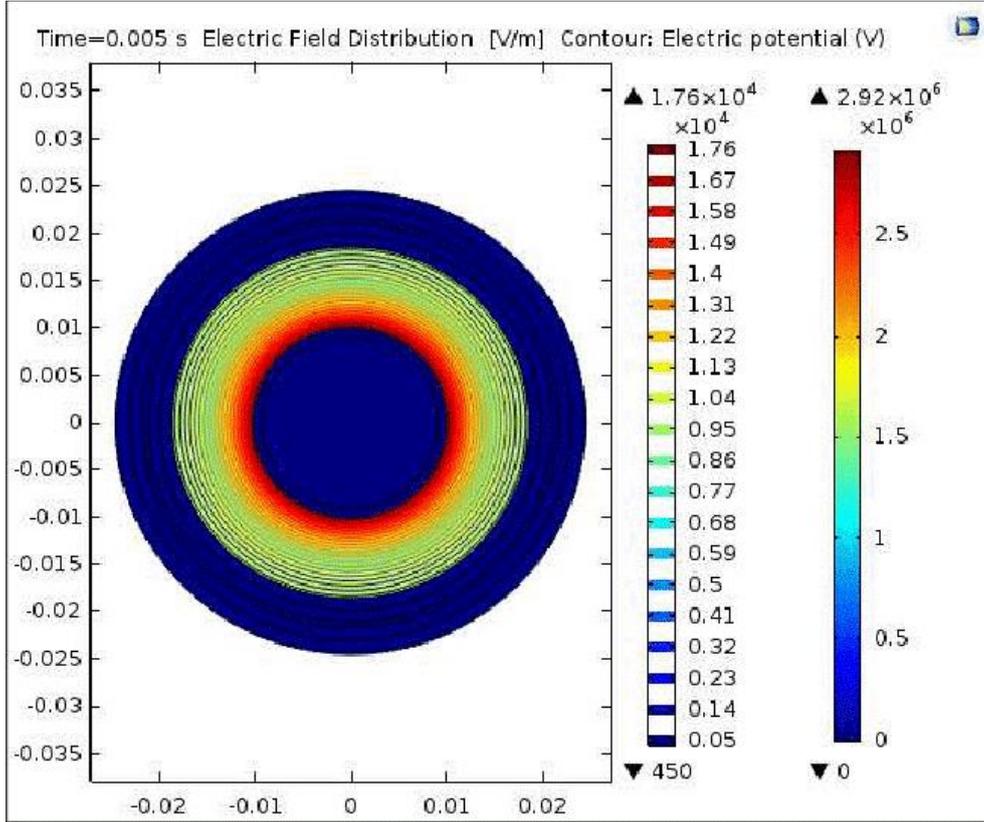


وحتى مع التيار المتردد فإن الكابل يكون غير قادر على تفريغ هذه الشحنة بسبب سرعة التردد العالية فيكون الكابل عند تغذيته بتيار متردد كأنه مكثف.

### 1-5-25 قياس شدة المجال الكهربى Electrical field

شدة المجال عند نقطة = الجهد مقسوما على بعد تلك النقطة ، و شدة المجال تقاس بوحدة  $v/m$  ، ويعزى الاهتمام بقياس شدة المجال إلى أنه العنصر المؤثر على جودة العزل ، فيهما أن نعرف ما هو أقل وأقصى شدة للمجال داخل الكابل.

وكما هو واضح من الشكل 7-25 فإن أقصى شدة مجال داخل لكابل يكون عند سطح الموصل و لذا تستخدم طبقة شبه موصلة حول القلب لتنظيم المجال.



شكل 7-25

وتحسب شدة المجال عند سطح الموصل من العلاقة:

$$E = \frac{V}{X \ln \frac{R}{r}}$$

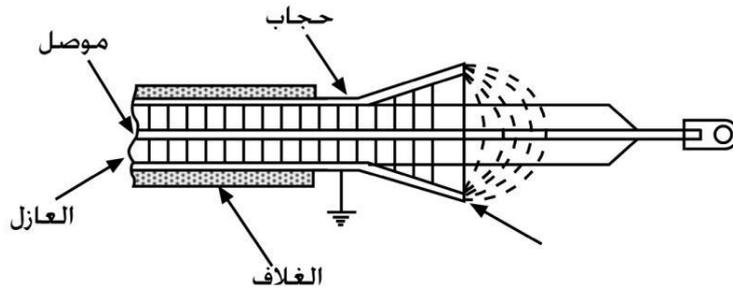
واضح من المعادلة السابقة خطورة معدل تغير الجهد بصورة مفاجئة كما هو الحال عند الحواف المدببة أو الأطراف لأنه طبقاً للمعادلة السابقة ستكون هذه الأماكن هي الأعلى في شدة المجال ، ومن ثم تكون الأخطر على حالة العزل في هذه الأماكن .

## 25-5-2 تأثير المجال الكهربى على الأطراف :

المجال الكهربى للكابل دائما موجود حتى فى حالة عدم تحميل الكابل طالما الكابل متصلا بالمصدر ، لأنه لا يعتمد على التيار بل ينشأ نتيجة وجود فرق جهد بين الموصل الحامل للتيار والغلاف المؤرض ، وفى حالة زيادة الجهد عن الحد الطبيعى فإن تأثير المجال الكهربى سوف يظهر وتحدث فرقة أو شرارة أو تفرغ . وتركيز خطوط المجال فى نقطة يؤدى إلى ارتفاع درجة الحرارة فى هذه النقطة وبالتالي يؤدى إلى انهيار العزل عندها.

وعند الحاجة لعمل Gland فى نهاية الكابل يلزم قص جزء من حجاب العازل وحجاب الموصل ابتداء من نهاية الكابل وذلك لجعل التوصيل سليم كهربيا ولكن قص الحجاب يؤدى إلى عدم استمرارية انتظام المجال الكهربى، ويصبح المجال مركزا على حافة الموصل مما قد يؤدى إلى انهيار عازل الكابل .

ويلزم عند عمل أطراف نهاية الكابل أخذ تلك القوى فى الاعتبار حتى لا يحدث انهيار للكابل عند الأطراف ويتم إضافة أنبوب Stress Control Tube لتقليل تلك الإجهادات بقدر الامكان وتقليل تركيزها بجعلها موزعة على مساحة أكبر كما فى الشكل 25-8 الذى يبين كيف نستخدم أنبوبة تخفيف الضغط Stress Control Tube حيث يلاحظ انتظام وتخفيف تركيز المجال الكهربى بعد استعمال الأنبوبة. وهناك صورة أخرى فى نهاية الفصل السابق لل Stress Control Tube .



شكل 25-8 :

ولحماية المواد العازلة عند الأطراف يجب تركيب أشرطة أو حوارف تركيب على العزل لتزيد من سمكه (شكل 25-9).



شكل 25-9 :

### 3-5-25 تأثير المجال الكهربائي على ظاهرة WATER TREE :

تسرب الرطوبة لداخل العازل يمكن أن يؤدي إلى نشوء ظاهرة التشجير المائي ( Water Treeing ) - لاسيما إذا كان سطح الموصل غير أملس والمجال غير منتظم - وينتج عن ذلك زيادة المجال الكهربائي عند نقط النتوءات وقلته عند الجزء الأملس من الكابل. و هذا الاختلاف يتسبب في وجود شقوق في الكابل تتفرع في جميع الاتجاهات مثل الشجر و تسرب الرطوبة إلى داخل الكابلات وهي إحدى أسباب انهيار العزل. راجع الصورة الموجودة في الفصل الثالث من هذا الباب الخاص بالخصائص الكهربائية للكابل.

## 26

## اختبارات الكابلات

تخضع الكابلات للعديد من الاختبارات بعد إنتاجها و كذلك بعد تمديدتها.

## 1-26 الفئات المختلفة للاختبارات

يمكن تقسيم هذه الاختبارات عموماً إلى أربع فئات:

- اختبارات روتينية. Routine Tests.
- اختبارات خاصة. Special Tests.
- اختبارات نوعية. Type Tests.
- اختبارات ما بعد التركيب. Electrical Tests after Installation.

وقد قامت اللجنة الكهربائية الدولية (IEC) International Electro-technical Commission بوضع تفاصيل هذه الاختبارات لكل نوع من أنواع الكابلات وذلك طبقاً لنوع العزل المستخدم و نطاق الجهود التي تستخدم فيها هذه الكابلات. وتعطي هذه المواصفات بالتفصيل قيم جهود الاختبار والشروط اللازمة لها مثل درجة الحرارة وأنواع الجهود المستخدمة وطول ونوع العينة التي تستخدم لكل اختبار.

ويمكن الرجوع إلى تفاصيل الاختبارات لمختلف أنواع الكابلات في المواصفات التي أصدرتها IEC والتي نوردتها هنا وهي: 60228 و 885، 840، 502، 230، 229، 141، 1-55: IEC. وسنشير هنا سريعاً للمجموعات الثلاثة الأولى من هذه الاختبارات، ثم يتم التركيز فقط على النوع الأخير لارتباطه الوثيق بعمل معظم المهندسين.

**26-1-1 الاختبارات الروتينية:**

يتم إجراء هذه الاختبارات على جميع أطوال الكابلات المصنعة وذلك للتأكد من أن هذه الكابلات تحقق المعايير المطلوبة. فعلي سبيل المثال تعتبر الاختبارات الآتية اختبارات روتينية للكابلات البوليمرية للجهود المقننة من 30 ك ف حتى 150 ك ف وذلك طبقاً للمواصفة IEC-840:

- اختبار التفريغ الجزئي (Partial Discharge).
- اختبار تحمل الجهد.
- الاختبار الكهربائي على الغلاف اللامعدني.

أما الاختبارات الروتينية بالنسبة للكابلات المعزولة بالورق المشرب والمملوءة بالزيت فهي في مدي جهد حتى 275 ك ف طبقاً للمواصفة IEC-141:

- اختبار مقاومة الموصل.
- اختبار الـ Capacitance .
- اختبار معامل الفقد  $\tan \delta$  .
- اختبار الجهد العالي.

**26-1-2 الاختبارات الخاصة (اختبارات العينة):**

تُجري هذه الاختبارات على عينات من الكابلات ، وقد تكون هذه العينات بكرة كاملة من الكابل المنتج في بعض الأحيان ، أو أطوال محددة من الكابل حسب الشروط التي تحددها مواصفات الـ IEC لكل اختبار .

ومن أمثلة الاختبارات الخاصة الواجب إجراؤها على الكابلات ذات العوازل البوليمرية للجهود المقننة من 30kV حتى 150kV طبقاً للـ IEC 840 ما يلي:

- فحص الموصل (Conductor Examination).
- قياس مقاومة الموصل.
- قياس سمك العزل والأغلفة اللامعدنية.
- قياس سمك الغلاف المعدني.
- قياس الأقطار.

- اختبار التصلد الساخن Hot St Test لكل من البولي إيثيلين المشبك XLPE ومطاط الإيثيلين بروبيلين EPR.
  - قياس الـ Capacitance .
  - قياس الكثافة للبولي إيثيلين عالي الكثافة HDPE.
- أما الاختبارات الخاصة المطلوب إجراؤها على الكابلات المعزولة بالورق المشرب والمملوءة بالزيت في مدي جهد حتى 275kV وطبقا لـ IEC-141 فهي:
- تغير عامل الفقد ( $\tan \delta$ ) مع درجة الحرارة.
  - اختبار أمان العزل.
  - اختبار الجهد الدفعي الساخن Hot Impulse Voltage Test.

### 26-1-3 الاختبارات النوعية:

يتم إجراء الاختبارات النوعية قبل أن يقوم المصنع بإنتاج نوع معين من الكابلات على المستوى التجاري وذلك لبيان أن هذا المنتج يفي على نحو مرض بمتطلبات الأداء. ولا توجد ضرورة لتكرار القيام بهذه الاختبارات ما دام الكابل قد اجتازها بنجاح إلا إذا قام المنتج بعمل تغييرات في التصميم أو المواد المستخدمة في صناعة الكابل مما قد يؤثر على أدائه.

ومن أمثلة هذه الاختبارات النوعية التي يجب إجراؤها على الكابلات البلمرية للجهود المقننة من 30kV حتى 150kV (IEC 840):

- اختبار ثني يتبعه اختبار للتفريغ الجزئي.
  - اختبار قياس عامل الفقد ( $\tan \delta$ ).
  - اختبار جهد مع دورة تسخين يتبعه اختبار قياس للتفريغ الجزئي.
- ويتم القيام بهذه الاختبارات على عينات من كابلات لا يقل طولها عن 10 متر. وجدير بالذكر أن هذه الاختبارات النوعية يجب أن تتم بالترتيب التعاقبي المدرج أعلاه.

## 2-26 اختبارات الموقع للكابلات أثناء الخدمة

هذه الاختبارات يتم إجراؤها عقب تركيب الكابل مباشرة للتأكد من سلامة الكابل قبل تحميله بالتيار. وكذلك تجرى هذه الاختبارات أثناء وجود الكابل بالخدمة ، فقد تحدث له أعطال أو تحدث تركيبات متصلة به أو وصلات إلخ ، ويترتب على ذلك احتياجنا إلى عمل اختبارات تساعد في التأكد من سلامة التركيبات الجديدة أو سلامة الوصلات أو تساعد في تحديد ماهية العطل ومكانه.

وأهم هذه الاختبارات هي (عدد الاختبارات ونوعها يتوقف على المواصفات المتبعة) :

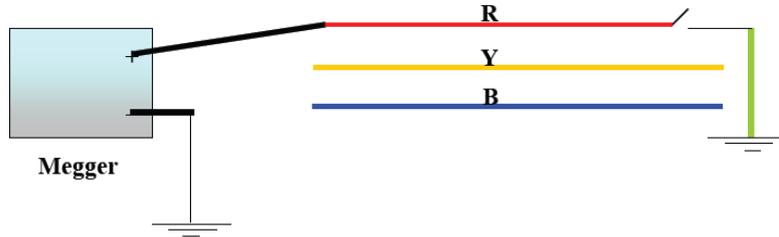
- اختبار تحديد الأوجه
- اختبار استمرارية التوصيل
- اختبار مقاومة الموصل
- اختبار قياس سعة الكابل Cable Capacitance
- اختبارات سلامة غلاف الكابل Sheath Test
- اختبارات صناديق الـ Cross Bonding
- اختبار قياس مقاومة الأرضي عند كل صندوق Earth resistance measurement of link boxes
- اختبار قياس الممانعة الصفرية والممانعة الموجبة zero & positive impedance
- اختبارات جودة العزل (اختبار قيمة مقاومة العزل - اختبار مدة التحمل - اختبار جهد انكسار العزل - اختبار جودة العزل  $\delta$  Tan )
- اختبار الجهد العالي (باستخدام الـ DC, AC, or Very low frequency, VLF)

والنوعان الأخيران يندرج تحتها عدد من الاختبارات كما سنرى. وفيما يلي تفصيل لهذه الاختبارات.

### 1-2-26 اختبار تحديد الأوجه Phase Checking

ليس بالضرورة أن تكون الفازات في الكابلات مميزة بألوان مختلفة بل قد تكون جميعها سوداء أو حمراء ، ومن هنا تظهر أهمية هذا الاختبار للتأكد من أن ما نسميه phase-R في الناحيتين هو بالفعل الـ Phase -R . ويعتبر هذا الاختبار ضرورياً للتأكد من صحة الأوجه قبل بداية جميع الاختبارات حيث يترتب على تشغيل الدائرة في وجود خطأ في الأوجه مرور تيار قصر عالي.

ويتم تحديد الوجه بواسطة تأريضه من الجهة البعيدة وترك باقي الأوجه غير مؤرضة كما في شكل 1-26 ، فإذا كان الـ phase صحيحا فإن جهاز الـ (Megger) يعطى قراءة مقاومة تساوى صفرا للوجه المؤرض ثم يعطى قيمة عالية إذا رفع الأرضي عن نفس الوجه بينما تعطي بقية الـ Phases دائما قيمة مقاومة عالية سواء كان الأرضى موصلا بالوجه الذى نختبره أم لا ، فهذا يدل على صحة الوجه من الجهتين. وينفذ هذا الاختبار على بقية الأوجه، ويكتفي بأقل جهد اختبار لتحديد الأوجه حيث أننا هنا لا نقيس شدة عزل.

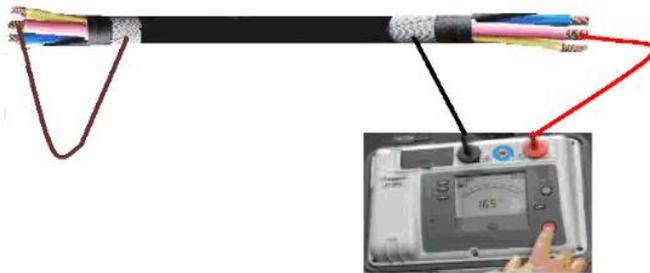


شكل 1-26 :

### 2-2-26 اختبار الاستمرارية Continuity test

يتم إجراء ذلك الاختبار للتأكد من عدم وجود أى قطع فى الكابل ويستخدم أيضا فى حالة تحديد صحة توصيل الأوجه مع بعضها قبل التركيبات وذلك عندما يتم توصيل أطراف كابلين لاسيما فى حالة وجود عدد من الـ Joints قبل عمل أطراف التوصيل النهائية لتجنب الخطأ فى الترتيب .

فمثلا لتحديد فازة R يتم توصيل الفازة R بسلك الـ Shield من جهة وقراءة قيمة المقاومة بواسطة جهاز الميجر بين الـ R والـ Shield من الجهة الأخرى كما فى شكل 2-26 ، فإذا كانت قراءة المقاومة تتراوح من 0 إلى 20 ك أوم فتدل على الاستمرارية ، أما إذا كانت قراءة قيمة عالية مثلا 10 ميغا أوم فيدل ذلك على حدوث تبديل للفازات أو وجود قطع فى الموصل وهكذا فى باقى الفازات.



شكل 2-26 :

## 26-2-3 اختبار قياس مقاومة الموصل للتيار المستمر

## DC Conductor Resistance

يصنع الموصل عادة من معدن ذي مقاومة كهربية منخفضة ويقوم هذا الموصل بدور توصيل التيار الكهربائي والطاقة الكهربائية ولذلك لا بد من اختبار مقاومة الموصل للتأكد من عدم زيادتها عن القيمة المسموح بها حسب مواصفات IEC (الجمعية الدولية الكهروتقنية) حيث ينتج عن ذلك مجموعة من المفقودات Losses تعمل على رفع درجة حرارة الموصل وتحد من قدرة حمل الكابل للتيار (Current Carrying Capacity) المعتمدة على أقصى درجة حرارة يمكن أن يتحملها الموصل بصفة مستمرة.

ويمكن إيجاد مقاومة أي موصل طوله  $L$  ومساحة مقطعه  $A$  من المعادلة التالية:

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

حيث  $\rho$  هي المقاومة النوعية للموصل (Resistivity) وتقاس بالـ  $m\Omega$

ويتم قياس مقاومة كل موصل لعينة من الكابل بطول لا يقل عن متر، وباستخدام التيار المستمر فقط من خلال استخدام جهاز Micro ohmmeter ، الذي يقوم بحقن DC Current وقياس فرق الجهد على الطرفين المراد قياس المقاومة بينهما وتحسب المقاومة من العلاقة التالية :

$$R = \frac{V}{I} \quad (\Omega)$$

يتم قياس درجة الحرارة أثناء الاختبار ويحسب منها مقاومة الموصل لكل Km عند درجة حرارة  $20^\circ C$  حسب العلاقة التالية :

$$R_{20} = \frac{R(\text{measured})}{L(1 + \alpha_{20}(T - 20))}$$

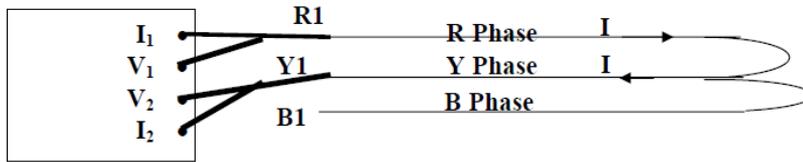
حيث :

L	الطول الفعلي للكابل (Km)
$R_{20}$	مقاومة الموصل عند $20^\circ C$ ( $\Omega/Km$ )
R	القيمة المقاسة لمقاومة الموصل لوجه واحد ( $\Omega$ )
$\alpha_{20}$	المعامل الحراري لمقاومة المعدن عند درجة حرارة $20^\circ C$ وتساوي بالنسبة للنحاس مثلاً = 0.00393

T درجة حرارة الموصل عند الاختبار

ويتم مقارنة  $R_{20}$  المقاسة بقيمته المسموح بها حسب المواصفة IEC -60228 . لاحظ أن استخدام التيار المستمر ضروري لأنه في حالة استخدام AC Supply فإننا نقيس المعاوقة Z التي تشمل المقاومة بالإضافة إلى الـ Reactance .

ولإجراء الاختبار نقوم بعمل قصر (Short) على جميع الموصلات في النهاية البعيدة وتوصيل طرف جهد و تيار على الوجهين كما في الشكل 3-26:



شكل 3-26

وفي هذه الحالة فإن الجهاز يقيس مجموع مقاومتي الوجهين R & Y وتعاد القياسات بنفس الطريقة لباقي الأوجه (R&B - Y&B) ثم يتم حساب مقاومة كل وجه من العلاقات التالية :

$$R = \frac{(R + Y) - (Y + B) + (R + B)}{2}$$

$$Y = (R + Y) - R$$

$$B = (R + B) - R$$

في حالة استخدام أسلاك لعمل قصر في النهاية البعيدة فإنه يجب أن تكون ذات مقاومة منخفضة (مساحة مقطع كبيرة) ويجب طرح مقاومة الـ Short Circuit وكذلك أسلاك الجهاز من القيمة المقاسة.

### 4-3-26 اختبار قياس سعة الكابل (Cable Capacitance)

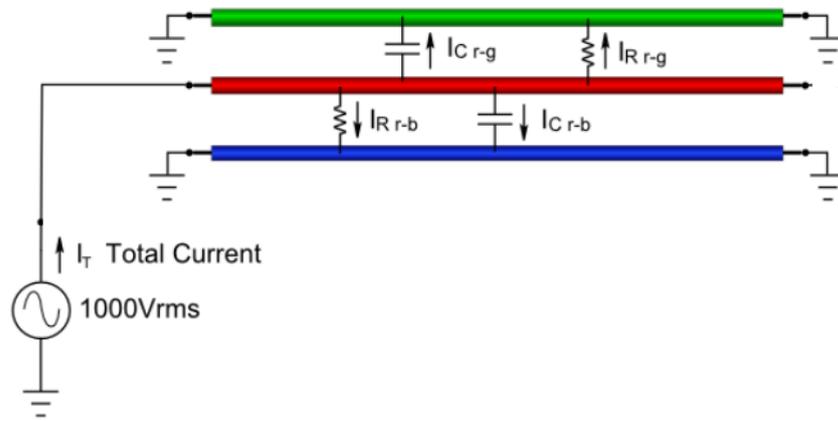
تحسب سعة الكابل لكل كيلومتر  $C'$  من العلاقة :

$$C' = \frac{C_{measured}}{L}$$

حيث :

 $C_{measured}$ : القيمة المقاسة للسعة الكلية للكابل وتقاس بالـ  $\eta F$ 

ويتم إجراء هذا الاختبار بواسطة جهاز (capacitance meter). حيث يتم توصيل طرف الموصل بالجهاز والطرف الآخر مؤرض كما في الشكل 26-4. وتقاس الـ Capacitance بوحدة الميكرو فاراد ( $\mu F$ )



شكل 26-4 :

وقد اكتسبت سعة كابلات الجهد العالي والفائق أهمية اقتصادية كبيرة نظرا لاعتماد كل من تيار الشحن (Charging Current) والقدرة الغير فعالة (VAR) والـ Losses في العزل عليها اعتمادا مباشرا كما تلعب هذه الـ Capacitance دورا هاما في تحديد مسافة نقل الطاقة باستخدام الكابلات (الطول الحرج للكابل Critical Length of Cable)، وكلما قلت قيمة الـ Capacitance كلما كان ذلك أفضل من وجهة نظر العوامل السابق ذكرها.

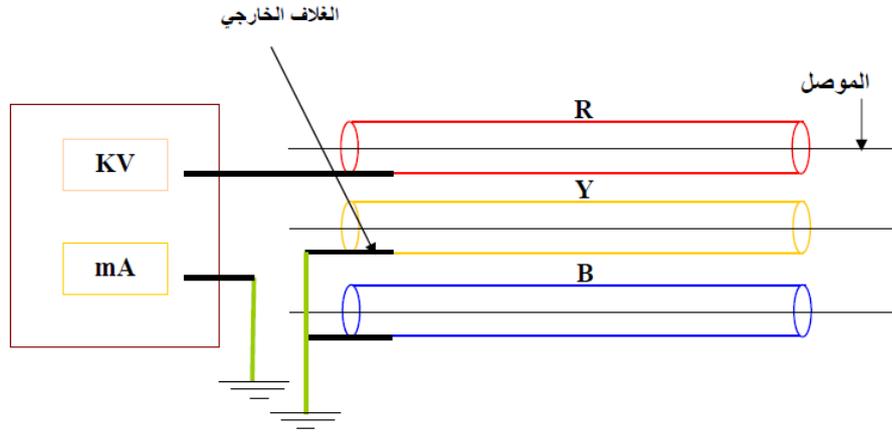
### 5-2-26 اختبار الغلاف الخارجي DC Sheath Test

يستخدم الغلاف الخارجي فوق الغلاف المعدني أو فوق طبقة تسليح الكابل (Armor) بحيث تكون آخر طبقة خارجية للكابل لحمايته من البيئة والمواد المحيطة به وعادة يستخدم في صناعته البولي فينيل كلورايد (PVC) أو مادة البولي ايثيلين عالي الكثافة (HDPF)

ويجب إجراء الاختبار على الغلاف الخارجي بغرض التأكد من أنه لم يحدث أي شروخ أو تلف فيه أثناء عملية التركيب ويتم هذا الاختبار بتسليط جهد مستمر 10 kV لمدة دقيقة واحدة بين الطبقة

المعدنية (metallic Sheath) وبين الغلاف الخارجي المصنوع من الـ PVC ، و نقوم في هذا الاختبار بتأريض مادة الـ PVC بطاؤها بمادة Semi-Conductor Material وبالتالي تكتمل الدائرة الكهربائية و نستطيع أن نحكم على مدى تحمل الـ sheath للجهد .

ونسجل قراءة تيار التسريب (Leakage Current) ويعتبر الاختبار ناجحاً في حالة عدم حدوث انهيار للغلاف (No Breakdown) ، ويوضح الشكل 26-5 طريقة الاختبار .



شكل 26-5 :

### 6-2-26 اختبار مقاومة التماس في صناديق التوصيل

ويسمى Contact Resistance Test of Link Boxes ويعمل في نهاية الاختبارات للتأكد من جودة الربط وذلك بقياس المقاومة باستخدام Micro-ohmmeter وهذا يؤثر في نظام الـ Cross Bonding) المستخدم لمنع مرور التيار في الغلاف المعدني ويعمل الاختبار بين جميع نقاط الربط بين وصلات Links وبين وصلات Sheath Voltage Limiter, SLV. ويجب أن لا تزيد المقاومة عن  $20 \eta\Omega$ .

### 7-2-26 اختبار صحة الترابط العرضي للغلاف المعدني

#### Cross Bonding Verification Test of Metallic Sheath

تتولد في الغلاف المعدني للكابل تيارات حثية (Inducted Currents) والتيارات دوامية (Eddy Currents) نتيجة للفيض المغناطيسي المتغير الناتج عن مرور التيار المتردد في موصل أو

موصلات الكابل نفسه أو في موصلات الكابلات المجاورة له. وتسبب هذه التيارات في ظهور فقد Loss في الغلاف مما يقلل من قدرة الكابل على حمل التيار.

ويتم إجراء هذا الاختبار بواسطة حقن تيار متردد (AC Current) للثلاثة أوجه (على الموصلات) مع عمل قصر من الجهة الأخرى وقياس التيار في الغلاف المعدني ويجب أن لا يزيد التيار في الغلاف عن 3% من التيار المحقون وتوضح القيمة صحة الترابط.

وسبب وجود التيار العالي (الذى يزيد عن 3%) يرجع لعدة عوامل منها أن تكون هناك أطوال غير متساوية أو قد تكون هناك دوائر Live بجوار الكابل مع رطوبة التربة أو خطأ في التصميم.

بما أنه لا يفترض توصيل الأغلفة بالأرضي إلا عند بعض صناديق التوصيل فإنه يتم عزلها عن الأرض بواسطة مقاومة غير خطية (Non Linear Resistance) تعمل على الحد من الجهد المستحث للغلاف في حالة حدوث الأعطال ولذا تعرف بأنها Sheath Voltage Limiter, SVL حيث تنخفض قيمة مقاومة العزل فتصبح مسارا لتيارات الغلاف إلى الأرض، أما في الوضع الطبيعي فتبقى مقاومتها عالية ولذا تختبر للتأكد من عازليتها ويجب أن لا تقل قيمة العازلية عن  $1G\Omega$  عندما تختبر بجهد 1000V.

## 3-26 مجموعة اختبارات العازل

نظرا لعدم وجود مادة ذات عزل كامل ( $R = \infty$ ) فإنه بمجرد توصيل الكابل عند طرف الإرسال بمصدر جهد فإنه سيتولد فرق جهد بين الموصل والغلاف المعدني (Metallic Sheath) فيمر تيار متسرب (Leakage) خلال العزل في اتجاه شعاعي (Radial) من الموصل إلى الغلاف وتعرف مقاومة العازلية بأنها المقاومة لمرور هذا التيار.

### ملحوظات هامة:

- يتم قياس جودة العزل بين الموصلات وبعضها وبين الموصلات والأرض حيث تكون القيمة المقبولة للعزل وفقا للقاعدة التي تقول أن كل واحد كيلوفولت من الكابل يقابله واحد ميغا أوم. فمثلا لو كان كابل بجهد تشغيل 11kV فتكون أقل قيمة مقاومة مسموح بها هي 11 ميغا أوم .
- يتم عمل الاختبار قبل وبعد اختبار الجهد العالي المشروح تفصيلا في نهاية الاختبارات

- يتم إجراء هذا الاختبار بواسطة الميجر (5000 فولت) حيث يتم قياس العازلية ما بين الفازات الثلاثة وبعضها وبين الفازات الثلاثة والأرضي وقد تصل قيمة العازلية إلى (100ميغا أوم فأكثر ) فى حالة لو كان الكابل جديدا .أما لو كان الكابل قديما فقد تصل إلى (1ميغا أوم).
- مدة هذا الاختبار دقيقة واحدة. والسبب فى ذلك أن الكابل يسحب فى البداية تيار شحن لمكثفاته Charging Capacitive Current بالإضافة إلى تيار التسرب إن وجد ، وعند التشغيل لمدة 60 ثانية ينخفض الـ Capacitive Current بالتدريج ويستمر فقط تيار التسرب إن وجد وهو الذى يحدد جودة العزل.
- لا تؤخذ مقاومة العازل كمعيار يقاس به سلامة العازل إلا فى حالة وجود تسرب مياه أو رطوبة إلى العازل حيث تؤدي إلى انخفاض كبير فى مقاومة العازل مما يشير إلى سوء حالته فى هذه الظروف (وعمليا نقارن بين قيم الفازات الثلاثة أو قيم دائرة مع دائرة أخرى مماثلة).

تعتمد مقاومة العزل على نوعية العزل ودرجة الحرارة. وعلى عكس مقاومة الموصل فإن مقاومة العازل تتناسب عكسيا مع طول الكابل ودرجة الحرارة. ولذا فهذا الاختبار يتم أولا بعد غمر العينة فى ماء درجة حرارته 20 درجة مئوية لمدة ساعة على الأقل ، والنتائج هنا تمثل مقاومة العزل عند درجة الحرارة القياسية . ويعاد الاختبار بعد غمر العينة فى درجات حرارة أعلى (تحددها المواصفات ) والنتائج هنا تمثل مقاومة العزل عند درجات الحرارة أثناء التحميل.

وتعتمد مقاومة العازل على عدة عوامل هي :

- الأبعاد الهندسية للكابل وهي مساحة مقطع الموصل وسمك العازل وطول الكابل ولذا كان لابد من الرجوع لمواصفات الاختبار التى تعطى طول العينة التى ستوضع تحت الاختبار ، فتغيير الأبعاد يعنى تغيير النتائج.
- مدى احتواء العازل على أي رطوبة أو بخار ماء
- نوع وتكوين العازل
- درجة الحرارة
- عمر الكابل

ويتم مقارنة القيمة المقاسة بالمواصفة IEC 60840.

ومن أهم الأجهزة المستخدمة في هذه الاختبارات جهاز الميجر (شكل 26-7) ، الذي يستخدم لقياس عازلية الكابل و قياس مقاومة العطل باستخدام جهد يولد داخليا حتى 5000 فولت.



شكل 26-7 :

ويتم ضبط الميجر وفقا لنوع للجدول 1-26.

جدول 1-26

تحديد جهد الاختبار بالميجر

جهد التشغيل	كابل جديد	كابل قديم	قيمة مقاومة
upto1.1KV	500 V dc for 1 min.	1.0KV dc for 1 min.	50MΩ
11KV	1.0KV dc for 1 min.	2.5KV dc for 1 min	200MΩ
33KV	2.5KV dc for 1 min.	5.0 KV dc for 1 min.	500MΩ
66KV	5.0 KV dc for 1 min.	5.0 KV dc for 1 min.	500MΩ

### 26-3-1 اختبار العازل باستخدام الـ Hipot

هناك أربعة اختبارات أساسية ضمن مجموعة اختبارات عزل الكابل ، الأول منها فقط يكون باستخدام الميجر وهو اختبار قياس مقاومة العزل ، بينما لا يصلح استخدام الميجر فى الباقي ، بل يجب استخدام جهاز الـ HiPot لأن طبيعة الاختبار تحتاج إلى جهد أعلى من المتاح فى الميجر كما سنرى. وكلمة “Hipot” تعني جهد عالي وهي اختصار (High Potential) ، وفيما يلي تفاصيل الاختبارات الأربعة.

### 26-3-2 اختبار تحديد قيمة مقاومة العزل Insulation Resistance

يجيب هذا الاختبار على السؤال التالي: هل مقاومة العزل عالية بدرجة كافية؟

فى هذا الاختبار تقاس قيمة مقاومة العزل بين كل Phase على حدة وبين الغلاف المعدنى للكابل كما فى الشكل 26-8 التى تعرض طريقة قياس عزل الفازة الحمراء. وتقاس أيضا مقاومة العزل بين كل two phases .

ويستخدم هذا الاختبار لتحديد مقاومة العطل وبالتالي تحديد الجهاز المناسب استخدامه لقياس مسافة العطل كما سنرى فى الفصل التالى.

ويجب تفريغ الشحنة على الكابلات بعد إجراء الاختبار لأن مكثفات الكابل تظل مشحونة بجهد الاختبار (تذكر أن الميجر له جهد DC ) ومن ثم هناك خطر على العاملين أن لمس أحدهم الكابل وهو مشحون ، ولذا نقوم بتفريغ هذه الشحنات بتوصيل الكابل بالأرض.



شكل 26-8 :

## 3-3-26 اختبار تحديد جهد انكسار العازل Dielectric Breakdown

يجيب هذا الاختبار على السؤال : عند أي جهد ينكسر العزل بين موصلين ؟

ونستخدم في هذا الاختبار جهاز الـ Hipot ، حيث يأخذ موصلين معزولين وغير متصلين ببعضهما Open Circuit ويطبق عليهما فولتية عالية جدا (تحدد طبقا لجهد العزل من المواصفات ) ، ويراقب سريان التيار بينهما بعناية . و في الحالة المثالية لن يسري تيار مطلقا ، فإذا مر تيار أكثر من اللازم فهذا يعني أن النقطتين أو الموصلين لم يتم عزلهما بصورة حسنة وهناك تسريب في نقطة ما ، و بذلك يفشلا في الاختبار .

ويتم هذا الاختبار باستخدام جهاز يسمى (Hipot tester) (شكل 26-9) حيث يطبق على الكابل الجهد اللازم لعمل الاختبار ويعرض من خلال الشاشة الموجودة به قيمة التيار المتسرب Leakage Currents الذى يفترض أن يكون صغيرا جدا. ويحتوي الجهاز أيضا على ( overload protection) حتى إذا زادت قيمة التيار عن حد معين يقوم بعملية الفصل . مدة الاختبار تصل إلى 60 ثانية أو أكثر .



شكل 26-9 :

لاحظ أنه قد يكون هناك فجوة بالعزل في أحدهما ، وهذه يصعب اكتشافها بجهد الميكر العادى ، ولذا يجب استخدام الجهد العالي لكشف هذه النوعية من الأعطال.

## 26-3-4 اختبار مدة تحمل مقاومة العازل

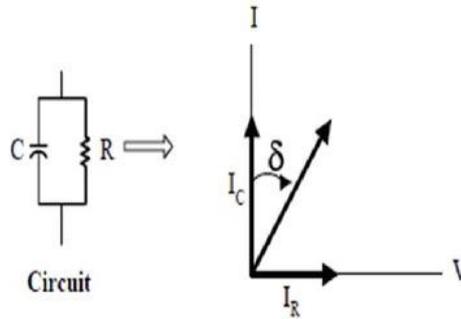
يجيب هذا الاختبار على السؤال : هل سيتحمل الكابل الجهد المتوقع للمدة الزمنية المطلوبة؟ وهو ما يعرف بـ Dielectric Withstanding Test .

حيث نقوم بوضع الجهد المطلوب (طبقاً للمواصفات ) لفترة الزمنية المحددة ونراقب سريان التيار .  
ففي الحالة المثالية يجب أن لا يسير أى تيار خارج الموصل طوال مدة الاختبار .

26-3-5 اختبار كفاءة العزل ( الـ  $\delta$  Tan delta )

يسمي هذا الاختبار أيضا (loss angle) و (Dissipation factor) ويستخدم هذا الاختبار لقياس مدي جودة عازل الكابل حيث يستخدم للتنبؤ بالعمر الافتراضي للعازل.

في الحالة الطبيعية يكون في حالة المكثف التيار يسبق الفولت ب 90 درجة وفي حالة الكابل يمكن تمثيل الموصل والعازل كمكثف ولكن نتيجة الإضافات التي تضاف لمادة العازل لا تكون الزاوية مساوية ل 90 درجة في هذه الحالة الزاوية بينهم تسمى  $\delta$  loss angle كما هو موضح في الشكل 10-26 .



شكل 10-26

حيث بزيادة تلك الإضافات في مادة العازل يزداد (resistive current) بزيادة الزاوية يعني زيادة IR ولكن الكابل المثالي الذي تكون فيه الزاوية مساوية للصفر وكلما اقتربت للصفر أصبح العازل أفضل .

والكابل في هذا الاختبار لابد أن يكون (energized) ، ثم يقوم (tan delta controller) بأخذ القياسات حيث يتم أخذ القياسات على خطوات متتالية .

في البداية يكون جهد الاختبار مساويا لـ  $V_0$  (normal line to ground voltage) ، فإذا كانت قراءات  $\tan \delta$  جيدة أي أن الزاوية تقترب من الصفر يكون الكابل جيد مبدئيا ، وفي هذه الحالة نغير جهد الاختبار لتصل قيمته من 1.5 ثم إلى ضعف قيمة  $V_0$  .

يتم إجراء الاختبار على الكابل باستخدام VLF AC HIPOT وتعنى Very Low Frequency أى عند تردد منخفض جدا يصل إلى 0.1Hz وليس 50 Hz وذلك لسببين:

1. الأول أنه إذا تم الاختبار عند 50 Hz سنحتاج إلى مصدر طاقة عالي جدا ( very high power supply ) ولكن عند استخدام تردد 0.1Hz نحتاج مصدر طاقة أقل 500 مرة من المصدر الذي نحتاجه في حالة 50 Hz .
2. السبب الثاني أن قيمة  $\tan \delta$  تزداد بنقصان قيمة التردد مما يجعل عملية القياس أسهل وفقا للعلاقة التالية

$$\tan \delta = IR / IC = 1 / (2\pi fCR)$$

و الاختبارات الأربعة السابقة هي أدوات تستعمل لفهم بشكل أفضل كيف سيؤدي الكابل عمله و كذلك لمراقبة أي تغييرات في أداءه مستقبلا. وبالطبع يجب أن يكون جهد الاختبار عاليا لأننا نتعامل مع مقاومات عالية جدا والجهد الصغير لا يكشف عيوب هذه المقاومات حتى لو كان العزل مخدوشا بالعين المجردة ، ومن هنا لزم استخدام الجهد العالي.

علما بأن اختبار انهيار و انكسار العازل Dielectric breakdown testing يستعمل في مراحل تصميم و تأهيل المنتجات حيث يساعد في توصيف أقصى جهد للكابل. كما أنه في الكثير من المواصفات يتطلب إجراء اختبار تحمل مقاومة العازل Dielectric Withstanding Test على كل كابل منتج.

### 6-3-26 مقارنة قيم الاختبارات:

قيم مقاومة العازل يجب أن تكون وفقا للبيانات المرفقة من المصنع وأن لم تتوفر يجب أن تكون متطابقة مع قيم الجدول 2-26 وأن لم تتوافق مع هذه القيم يجب أن يتم التحقيق في ذلك والتدقيق أكثر في العينة المختبرة.

## جدول 2-26

## Insulation Resistance Test Values Electrical Apparatus and Systems

Nominal Rating of Equipment in Volts	Minimum Test Voltage, DC	Recommended Minimum Insulation Resistance in Megohms
250	500	25
600	1,000	100
1,000	1,000	100
2,500	1,000	500
5,000	2,500	1,000
8,000	2,500	2,000
15,000	2,500	5,000
25,000	5,000	20,000
34,500 and above	15,000	100,000

## 26-3-7 اختبار (PD) Partial Discharge Testing:

التفريغ الجزئي (partial discharge) يعني حدوث شرارات كهربية صغيرة خلال العزل في كابلات الجهد العالي والمتوسط. وكل شحنة تفريغية هي نتيجة انكسار عزل فراغ هوائي أو بسبب وجود شروخ في العزل أو تلف طبقة شبه الموصل الخارجية أو تلف الوصلات في الكابل وعدم كفاءة النهايات (splices and termination). ويؤدي PD إلى تآكل العزل مع الوقت وفي النهاية إلى انهياره بالكامل.

ينص الكود الكهربى IEC على أن هذه التفريغات الكهربائية هي أول إشارة إلى تدهور حالة العزل ، فمنذ أكثر من 50 عام والشركات تقوم بعمل اختبارات (PD) على كافة المعدات الكهربائية المعزولة فالمعلومات الناتجة من هذا الاختبار توضح كفاءة العزل وتأثيره على سلامة المعدات ككل. ولأنه دائماً ما يحدث PD عندما يكون العزل في طريقه للانهيار فيمكننا التنبؤ بمستقبل الوصلات في الكابل وجودة النهايات أثناء التركيب. وهناك أنواع من PD tests منها:

**Online PD test**

يتم إجراء الاختبار أثناء عملية التشغيل الطبيعية للكابل فهو أقل تكلفة من offline test ولا يحتاج إلى فصل الكابل وخروجه من الخدمة تحت ظروف قياسية من الجهد ودرجة الحرارة وهذا الاختبار غير مدمر ولا يسبب أى ارتفاع فى درجة حرارة الكابل .

**:Offline PD test**

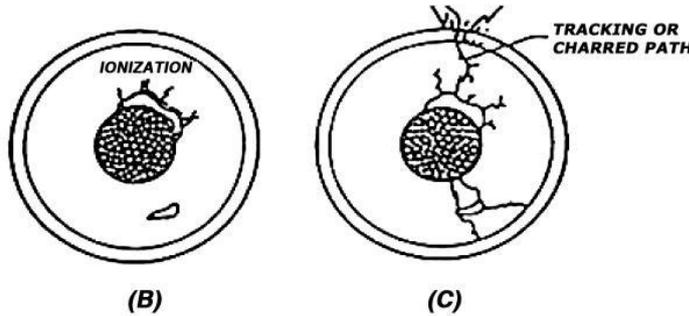
يتميز هذا النوع من الاختبار بأنه يوفر الفرصة لقياس استجابة الكابل لمستوى جهد معين والتنبؤ بأداء الكابل بالمستقبل بدون إحداث fault كما أنها تتميز بقدرته على تحديد مكان الخطأ بالتحديد مما يمكن العامل من التخطيط لصيانة الكابل.

## 4-26 اختبارات تحمل العزل للجهد العالي

انهيار أي كابل تحت تأثير الجهد يتوقف على العوامل التالية:

- زمن تأثير الجهد
- شكل الموصل
- درجة الحرارة
- كمية الفراغات الموجودة بالكابل

وتنشأ هذه الفراغات بالكابل (شكل 11-26) نتيجة دورة تحميل الكابل وازدياد الحرارة ما بين أقصى حمل وأدنى حمل مما يؤدي إلى تمدد وانكماش الكابل والذي يؤدي بدوره إلى تكون الفراغات والتي يتأين الغاز بداخلها نتيجة الجهد العالي للكابل مما يؤدي إلى انهياره في النهاية.



شكل 11-26

والجدير بالملاحظة هنا أن الجهد المستخدم عند اختبار الكابل القديم أقل من الجهد المستخدم عند اختبار الكابل الجديد ، والغرض من هذه الاختبارات كشف هذه العيوب.

## 26-4-1 اختبار الجهد العالي لدوائر 132kV ، أو أعلى

يتم إجراء الاختبار للتأكد من سلامة الكابل وقدرته على تحمل جهد وتيار التشغيل لفترة طويلة وللتأكد من عدم وجود عيوب داخلية بالكابل (مثل الوصلات الداخلية التي تربط الكابلات ببعضها) حيث يتم اختيار قيمة جهد الاختبار وفقاً للقاعدة التي تقول أن قيمة جهد الاختبار تساوي أربعة أمثال جهد العزل المقنن لفترة 15 دقيقة على مرحلة واحدة أو عدة مراحل. ويمكن إجراء هذا الاختبار باستخدام جهد ثابت أو جهد متردد وستتم المقارنة بين ميزات وعيوب كل نظام لاحقاً.

يعتمد هذا الاختبار على الجهد الكهربائي العالي المتصل بالكابل لإظهار أى عيوب صناعية مثلاً مثل فراغات هوائية أو ضعف وصلات أو شرخ بالعزل حيث أنه بتطبيق جهد عالي ومرور تيار عالي يؤدي ذلك إلى زيادة حرارة الكابل وبالتالي يؤدي إلى زيادة عمق الفجوة وبالتالي زيادة ضعف العزل - إن كان فعلاً ضعيفاً - مما يسبب انهياره أثناء الاختبار.

ويعتبر اختبار الرنين ذو التردد المتغير (Variable Frequency) أحد الطرق المستخدمة في اختبارات الجهد العالي كما في الشكل وفكرته أن حدوث الرنين سيتسبب في مرور تيار عالي يمكن أن نجعله يساوي تيار التشغيل بالتحكم في L الموجودة بالدائرة ، حيث يعتبر الكابل عند الاختبار كالمكثف الكهربائي وعند ربطه على التوالي مع الـ (Reactor) فإن الدائرة الناتجة هي دائرة رنين (Resonance) ، وبحسب ترددها من المعادلة :

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

حيث :

C : Capacitance الكهربائية للكابل بالـ F.

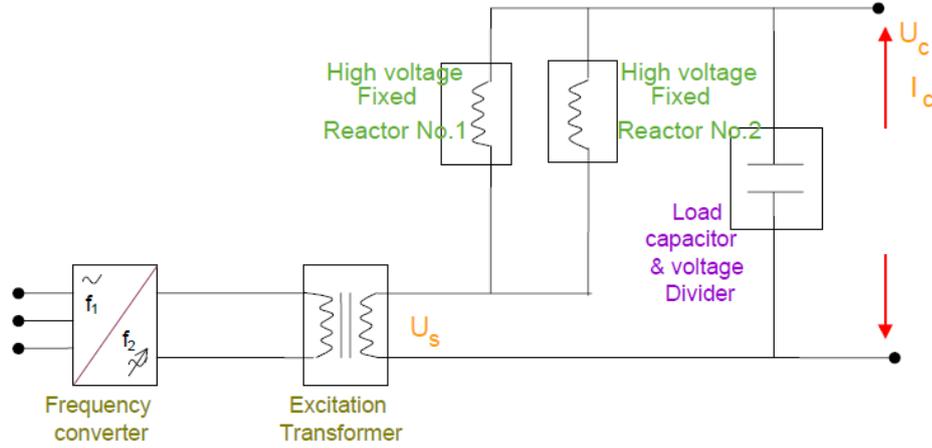
L : (Inductance) (H).

وتكون قيمة تيار الاختبار تساوي

$$I_{test} = \omega CV$$

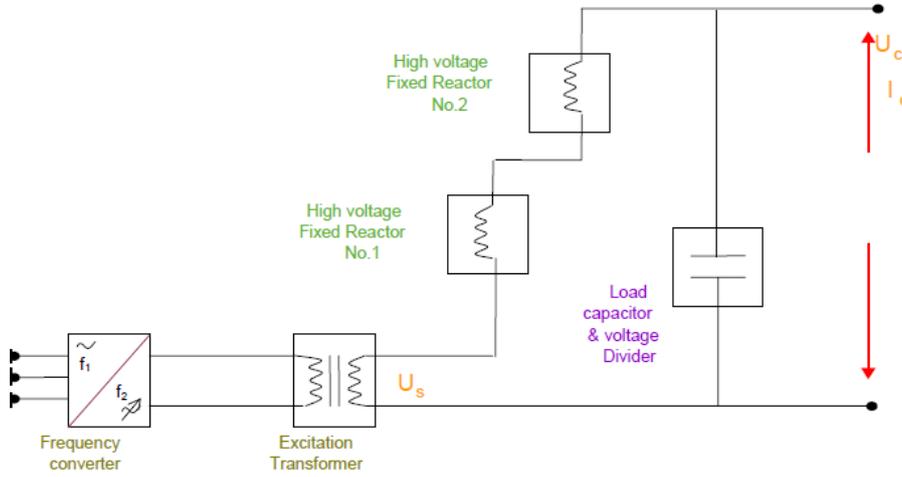
وقد نحتاج إلى استخدام two reactors على التوازي كما في الشكل 26-12 نظراً لزيادة سعة الكابل بزيادة طوله مما يؤدي إلى زيادة تيار الاختبار حسب المعادلة السابقة والحل يكون باستخدام

two Reactors و يتم توصيلهم على التوازي ، وبالتالي نحصل على تيار كبير مع ثبوت في قيمه الجهد كما هو موضح بالشكل .



شكل 12-26 :

وفي حالة كون جهد الاختبار أعلى من جهد الـ Reactor فإننا نقوم باستخدام two reactors على التوالي كما هو في الشكل 13-26 حيث يتضاعف الجهد ولا تتغير قيمة التيار .



شكل 13-26 :

ملحوظة: اختبارات جميع أنواع كابلات الضغط العالي يتم إجراؤها في مصر من خلال مركز أبحاث الجهد الفائت الموجود بطريق مصر إسكندرية الصحراوى .

## 26-4-2 تأثير استخدام الجهد العالي المستمر DC على كابلات القدرة

عند إجراء اختبار على كابلات الضغط العالي لا ينصح باستخدام DC Supply لاختبار العازل و ذلك لأنه بمجرد استخدام الـ DC سينشأ مجالاً مغناطيسياً ثابتاً و بمجرد ثبات المجال المغناطيسي فإنه من الممكن أن يتسبب فيما يسمى بـ Water Tree مما قد ينشأ عنه حدوث Break Down في العازل .

وهناك مشاكل أخرى منها:

- بعض الأعطال مثل الفراغات داخل الوسط العازل ( Bubbles ) أو القطع والخدش (Scratching) بعمق محدد داخل الوسط العازل لا يظهر أثرها مع استخدام الـ HVDC ، وهذه المشاكل تؤدي إلى حدوث تفرغ جزئي (Partial Discharge) عند تطبيق الجهد المتردد بعد إدخال الكابل للخدمة مما يؤدي إلى انهيار الوسط العازل مع مرور الزمن رغم تجاوزه الاختبار ومن ثم تضيع قيمة هذا الاختبار .
- توزيع الحمل الكهربائي على جسم الكابل والوصلات والنهيات يكون حسب المقاومة النوعية (ρ) وليس حسب الـ Permeability (ε) كما في حالة (AC) مما ينتج عنه توزيع غير متساوي للإجهاد الكهربائي إضافة إلى أن توزيع المجال الكهربائي عند الوصلات والنهيات سيكون مختلف تماماً عن التوزيع الفعلي عند التشغيل .

الجهد المستمر DC يتناسب طردياً مع المقاومة  $E1 / E2 = \rho1 / \rho2$  أما المتردد AC فيتناسب عكسياً مع الـ Permeability  $E1 / E2 = \epsilon2 / \epsilon1$

ينشأ بسبب هذا الجهد تراكم بعض الشحنات ( Space Charge ) خصوصاً في الفراغات بين الكابل والملحقات ( Accessories ) وأيضاً قريباً من الحدود الداخلية والخارجية للمادة العازلة ، وعند تشغيل الكابل بجهد الشبكة المتردد (AC) تتضاعف هذه الشحنات وتشكل (Stress) على الكابل مما يؤثر سلباً على عمر الكابل وملحقاته ويجعله عرضة للانهايار بشكل سريع .

يؤدي إلى تدهور حالة الكابل نتيجة تزايد التشجير المائي والكهربي ( Water & Electrical Treeing ) وتضاعفها بعد دخوله الخدمة .

تبين أن هناك بعض العيوب لا يمكن كشفها بالجهد المستمر (DC) إلا إذا وصل جهد الاختبار إلى 8 أضعاف الجهد المقنن للكابل (U0) ، وهذا يبين عدم قدرة الجهود المعطاة في المواصفات والتي تصل إلى ثلاثة أمثال (U0) فقط من التأكد من سلامة الكابل . لذا كان لابد من البحث عن البديل.

### 26-4-3 تأثير استخدام الـ HVAC

عند إجراء الاختبار على كابلات الضغط العالي باستخدام AC Supply ستظهر مشكلة أخرى مختلفة عن المشاكل الخاصة بالـ HVDC وهي أن الكابلات الطويلة تحتاج إلى تيار شحن كبير وبالتالي سنحتاج إلى جهاز كبير و ملفات كبيرة وهذا كله مكلف ، لذلك لا يستخدم الـ AC Supply . والجدول التالي يقارن بين الأسلوبين السابقين .

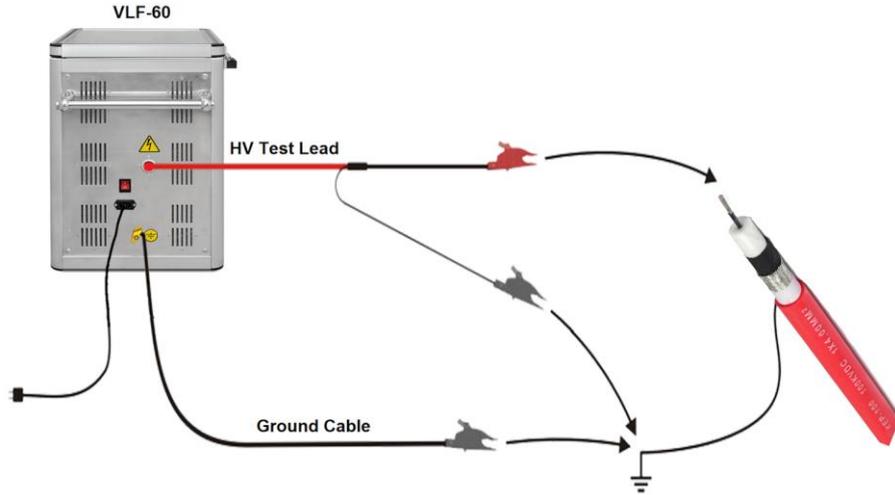
DC	AC	
صغيرة	كبيرة	حجم معدات الاختبار
منخفضة	عالية	طاقة الاختبار
مؤثر بشكل كبير	غير مؤثر	التأثير على عمر الكابل
يسبب شحن فراغية	لا يسبب شحن فراغية	الشحن الفراغية
فعال للكابلات الزيتية	فعال لجميع الكابلات	الفعالية
يكشف عيوب التأثير الحراري	يكشف جميع العيوب	الكشف عن العيوب
يكون تشجير	لا يكون تشجير	التشجير
لا يشابه جهد الشبكة	مقارب لجهد الشبكة	تقارب القيمة مع الجهد الشبكة

### 26-4-4 استخدام تردد منخفض VLF (Very Low Frequency)

تبين حتى الآن عدم ملائمة استخدام DC supply و أيضا AC supply للأسباب السابقة التي تم شرحها ، والحل الأمثل هو شيء وسطي بينهما أو ما يسمى ( Very Low Frequency ) (VLF)

( . وبما أنه AC فلن تظهر مشاكل الـ DC السابقة ، وبما أنه منخفض التردد جدا فسيسحب تيار منخفض لانخفاض التردد حسب المعادلة  $I = \omega C V$

ويتم إجراء الاختبار بطريقة بسيطة عن طريق توصيل مخرج الجهد العالي المعزول لجهاز VLF بموصل الكابل (conductor) الجاري إجراء الاختبار عليه وتوصيل طرف الأرضي مع طرف الجهد الثاني للجهاز بالـ (grounding shield) كما هو واضح في الشكل 14-26.



شكل 14-26 :

ثم يتم وضع الكابل على جهد الاختبار لمدة معينة وفقا للمواصفة IEEE 400.2 (المواصفة تنصح بأن يكون جهد الاختبار ثلاث أضعاف الجهد العادي (Normal line to ground voltage) (3Vo) لمدة من 30 إلى 60 دقيقة. و الجدول 3-26 يبين قيم أقصى جهد يتم وضع الكابل عليه وفقا للـ IEEE 400.2

إذا اجتاز الكابل هذا الاختبار فسيكون نسبة فرصة الكابل على تجنب أي انهيار في العازل أثناء تشغيله تصل إلى 95%. ويتم إجراء هذا الاختبار عند تردد منخفض 0.1 HZ كما يوجد أيضا ترددات 0.05 & 0.02 هرتز.

## جدول 3-26

Cable Rating phase to phase (RMS)	Installation Test phase to ground	Acceptance Test phase to ground	Maintenance Test phase to ground
kV RMS	kV RMS (or peak)	kV RMS (or peak)	kV RMS (or peak)
5	9 (13)	10 (14)	7 (10)
8	11 (16)	13 (18)	10 (14)
15	18 (25)	20 (28)	16 (22)
25	27 (38)	31 (44)	23 (33)
35	39 (55)	44 (62)	33 (47)

**Table 1:** IEEE 400.2 VLF Test Voltage Levels for Sinusoidal, Cosine-Rectangular. Voltage Pe values are shown in brackets for Cosine-Rectangular and Squarewave.

## جدول 4-26

## قيمة اختبار الجهد العالي للكابلات

جهد التشغيل	جهد الاختبار		تيار التسرب	
	كابل جديد	كابل قديم	كابل جديد	كابل قديم
upto1.1KV	3KV	660V	0.5mA	2mA
11KV	18KV	6.5KV	0.5mA	2mA
33KV	60KV	19.5KV	0.5mA	2mA
66KV	115KV	38KV	0.5mA	2mA

في الكابلات القديمة يتراوح جهد الاختبار ما بين  $2U_0 - 2.5U_0$  حسب عمر الكابل . وهذا الاختبار (VLF) تختبر به كابلات الجهد المتوسط لتحديد ما إذا كان هناك عطل فيها أم لا كما سيتم شرحه بالتفصيل في الفصل التالي

## 27

## اكتشاف أعطال الكابلات

الكابلات الكهربائية هي أقل عناصر الشبكة الكهربائية تعرضاً للأعطال و ذلك نتيجة تعرض الكابلات لاختبارات عديدة - كما شرحنا سابقاً - حيث يتم اختبار الكابلات في المصانع فور تصنيعها لضمان جودتها و كذلك اختبارات بعد التركيب و أيضاً قبل التشغيل مما يقلل فرص حدوث أعطال في الكابلات، و لكن هذا لا يمنع حدوث بعض الأخطاء والأعطال نتيجة لعدة أسباب نذكرها في الجزء التالي.

ومن الضروري معرفة نوع العطل في الكابل قبل إجراء الاختبارات اللازمة عليه، علماً بأن أعطال الكابلات لا تعتمد على جهد التشغيل فهي نفسها متكررة في كابلات الجهد المتوسط والجهد المنخفض على السواء كما أن الأجهزة التي تقوم باكتشاف وتحديد مكان الأعطال لا تعتمد على جهد التشغيل، حيث يتم تشغيلها والبحث عن العطل أثناء فصل الكابل من الخدمة أى بدون جهد. مع الأخذ في الاعتبار ألا تزيد الجهود المستخدمة لتحديد العطل عن جهد التشغيل.

وسيتيم في هذا الفصل التعرض لأنواع المختلفة للأعطال وأسباب حدوثها وكيفية علاجها وطرق اكتشافها.

## 1-27 الأسباب الأساسية لانهايار الكابلات:

وفيما يلي بعض أسباب الأعطال التي تتعرض لها الكابلات (نقلاً بتصريف عن تقرير لشركة توزيع مصر الوسطى).

## 1-1-27 أسباب تتعلق بالكابل نفسه

- تركيب كابل بمساحة مقطع لا تتناسب مع الحمل الواقع عليه.
- عدم ربط نهايات الكابلات جيداً.

- انقطاع موصل الكابل و هذا يحدث نتيجة لأعمال الحفر التي تتم في مسار الكابلات المدفونة تحت الأرض لذلك يجب وضع شريط تحذيري فوق هذا المسار لينبه القائمين بأعمال الحفر لتلافى حدوث أى أضرار فى الكابل.

### 2-1-27 أسباب تتعلق بالعزل خصوصا

- تنجم معظم أعطال الكابلات الكهربائية عند تلف العازل أو انهياره بعد فقدانه لخواص العزل بسبب ارتفاع درجة الحرارة عن الحد المقرر ولمدة طويلة أو حدوث الصدمات الميكانيكية. ومن الجدير بالذكر أن درجة حرارة التشغيل في معظم أنواع الكابلات يجب ألا تتجاوز 58 متر. ومن هذه الأسباب:
- يحدث عطل فى الكابل إذا تعرض العازل إلى جهد أكبر من الذى يمكن أن يتحملة ، و يمكن حدوث ذلك نتيجة Lightning and Switching .
- انهيار عازل الكابل نتيجة وجود شوائب بداخله أو فقاعات و التي تسبب تفريغ جزئى Partial Discharge مما يؤدي إلى تدهور تدريجى فى خواص العازل و انهياره .
- ارتفاع درجة حرارة العازل عن درجته الطبيعية مما يؤدي إلى تدهور فى خواص العازل و انهياره ، و يحدث هذا نتيجة تعرض الكابل لأحمال زائدة لفترات طويلة .
- تدهور العازل نتيجة زيادة فترة الاستخدام أو نتيجة عوامل خارجية مثل الرطوبة .

### 3-1-27 أسباب ميكانيكية

- يحدث هذا النوع من الأعطال عادة أثناء نقل بكر الكابلات وتحميلها من مكان إلى مكان فمثلا لو حدث تحطيم لبكرة وعليها الكابل ووضعت على جانبها فهذا الوضع يؤدي إلى إتلاف عزل الكابل . ويحدث أيضًا عندما يتم تشوين بكر الكابلات لفترة طويلة فى مكان ما دون رقابة وتعرضه للعبث ، وإتلافه بآلات حادة .

### 4-1-27 أسباب كيميائية

- تتعرض الكابلات أثناء تخزينها واستعمالها إلى عوامل كيميائية مختلفة وخاصة في الظروف الجوية كارتفاع نسبة الأملاح وغيرها ، وتتعرض أسلاك وشرائط الصلب المستخدمة كوقاية ميكانيكية للتآكسد والتآكل.

يحدث التآكل أو الصدأ فى الغلاف المعدنى للكابل وقد يكون سببه كهربائياً أو كيميائياً أو بسبب الإثنتين معاً .

والتآكل أو الصدأ ( corrosion ) نتيجة تأثيرات كيميائية يتوقف على نوع الأرض الممتد فى داخلها الكابل ، فالترية إما تكون حمضية أو تكون قلوية وقد تحتوى على مواد عضوية يكون لها تأثير على المدى البعيد على تآكل غلاف الكابل الخارجى وكذلك التسليح و عزل الكابل مما يؤدي إلى انهياره.

أما عن التآكل أو الصدأ نتيجة عوامل كهربية فهو يتوقف على مكان الكابل بالنسبة لحركة النقل والمواصلات الكهربائية مثل الترام والمترو حيث أن تيار التشغيل يعود إلى مصدره عن طريق القضبان الحديدية الممتدة فى الأرض وفى هذه الحالات تتولد تيارات شاردة تأخذ طريقها إلى الغلاف المعدنى للكابلات أو المواسير للحامية للكابل لأنها تجد مساراً سهلاً للمرور فيها بدلاً من طريق باطن الأرض فى طريق عودتها للمصدر الأسمى للتيار .

وتسير هذه التيارات فى الموصلات وتخرج منها نحو مصدر التيار ونتيجة لمرور التيار فى الكابل وخروجه منه مع مرور الوقت يؤدي ذلك إلى عملية الاستقطاب التى تسبب تآكل الغلاف المعدنى و انهياره ولعلاج ذلك فإنه يلزم توصيل الغلاف المعدنى للكابل بأرضى محطة الترام أو المترو لتجنب هذه التيارات الشاردة وتأثيراتها .

### 27-1-5 أسباب تتعلق بسوء طريقة المد

هذا العيب يكون سببه المباشر عدم وجود خبره كافية لدى القائم بالتنفيذ فى فرد ومد الكابلات فيجب اختبار المسار السليم للمد والفرد وأن يكون المسار بقدر المستطاع بعيداً عن كل أسباب تعرضه للتلف بعد فرده ومده مثلاً أن يكون بعيداً عن شبكة المياه والصرف الصحى والتليفونات ومواسير البخار والغلايات كما فى بعض المصانع وكما أنه من الواجب أن يكون عمق الحفر لرمي الكابل كافي وألا يكون قريباً من سطح الأرض مع وجود مسافة بين الكابلات التى توجد متوازية و ممتدة فى مسار واحد وكذلك من الواجب أن يتم تحديد الوسط المحيط للكابل سواء رمل أو بوتامين مع الأخذ فى الاعتبار نوع التربة ومكان المد بالنسبة للضغوط الميكانيكية للمشاة والمركبات وعلى أساس ذلك يتم اختبار نوع الكابل مسلح أو بدون تسليح .

كما أنه من الواجب أيضاً فى حالة وجود إنحناء للكابلات أثناء الفرد يراعى أصغر قطر للانحناء وهو يتوقف على قطر الكابل .

## 27-1-6 أسباب تتعلق بسوء اللحام

ويحدث هذا عادة في الوصلات وعلب النهاية ولذلك يجب أن يكون القائم بعمل العلب ذو خبرة ومهارة ودقة في اللحامات وإلا أصبحت نقاط اللحام ضعيفة في الكابل ولذا يجب أن يكون اللحام جيد مع عدم ترك زوايا حادة في اللحامات لمنع حدوث تجمع عالي للمجال المغناطيسي عندها وكما أنه يكون هناك تركيزا عاليا للضغط على درجة العزل وفي حالة إزالتها يجعلها متساوية على جميع مناطق العزل .

## 27-2 مراحل اكتشاف الأعطال

هناك خمس مراحل لاكتشاف مكان العطل بدقة في الكابل:

المرحلة الأولى:

في حالة الشك في وجود عطل على الكابل من عدمه هي إجراء اختبار الجهد العالي VLF الذي سبق الإشارة إليه في نهاية الفصل السابق . وفي هذا الاختبار يُحقن كل فاز phase بجهد يساوي تقريبا ثلاثة أمثال الجهد المقنن وذلك للكابلات الجديدة ، فمثلا الكابل جهد 11kV يكون الـ Phase voltage له يساوي تقريبا 6.6kV وبالتالي فتلاثة أمثال الجهد تقريبا تساوي 19kV ، أما الكابل القديم فيكتفى بضعف الجهد فقط.

ويُوضع الكابل (بالطبع بعد فصله من أي دائرة) تحت هذا الجهد لمدة 15 دقيقة ، فإذا كان الكابل سليماً ، فسيكون التيار المتسرب Leakage Current في حدود 150 ميكرو أمبير لكل كيلومتر ( $\mu A/km$ ) من طول الكابل ، ويجب أن تتساوى قيمة التيار المتسرب في الفازات الثلاثة. أما إذا زاد التيار المتسرب عن هذه القيمة فهذا يعني وجود عطل ما ، وبالتالي ننتقل للمرحلة الثانية من اكتشاف العطل.

المرحلة الثانية:

وهذه مرحلة هامة جداً قبل البدء في تحديد مكان العطل ، وهي معرفة قيمة مقاومة العطل بواسطة جهاز الميجر (Megger) سواء 5000 فولت أو 1000 فولت ، وبناء على قيمة مقاومة العطل يتم تحديد الجهاز المناسب للاستخدام من أجل قياس مسافة هذا العطل (قياس مبدئي تمهيدا للتحديد الدقيق في مرحلة لاحقة) كما هو موضح بالجدول أدناه:

مقاومة العطل	الجهاز المستخدم
المقاومة $> 200 \Omega$	Pulse Echo صدى النبضة
$> 1000 \Omega$ المقاومة $> 2$ ميغا $\Omega$	القنطرة
$2$ ميغا $\Omega$ > المقاومة $> 50$ ميغا $\Omega$	جهاز الحرق
المقاومة $< 1000$ ميغا $\Omega$	التيار النبضي (عطل وميضي)

ويستخدم جهاز الميجر لقياس قياس مقاومة العطل حيث يولد جهدا داخليا من 500 فولت ويصل حتى 10000 فولت كما في الشكل 1-27.



شكل 1-27 :

وسيتم شرح الأجهزة الواردة في الجدول السابق لاحقا.

### المرحلة الثالثة :

بناءً على قيمة مقاومة العطل المُقاسة في المرحلة السابقة قد نحتاج إلى عملية تفحيم (يصبح كالفحم) مكان العطل ، بمعنى أن نحرق مكان العطل بتيار عالي وجهد منخفض حتى ينهار ، وبالتالي يسهل اكتشافه ، لأن الأعطال العالية جدا في مقاومتها لا يمكن اكتشافها إلا بتخفيض قيمة هذه المقاومة من خلال عملية التفحيم.

**المرحلة الرابعة :**

استخدام الجهاز المناسب لتحديد مسافة مبدئية لمكان العطل مثل الـ Pulse Echo أو Bridge إلخ بناء على النتائج السابقة. (التفاصيل فى الجزء التالى مباشرة).

**المرحلة الخامسة:**

تحديد المكان الدقيق للعطل عن طريق تفريغ شحنات من الجهد العالى بالكابل من جهاز يسمى بالشاكوش ، وهذه الشحنات تحدث أصواتاً فى مكان العطل يمكن اكتشافها بواسطة سماعات خاصة. (التفاصيل فى الجزء بعد التالى).

**3-27 القياس المبدئى لمسافة العطل**

توجد عدة أجهزة تستخدم لقياس مسافة العطل بنسبة خطأ معقولة لكنها لا تعطى مكان العطل بدقة متناهية وإنما فقط تقربك من مكان العطل تمهيداً لاستخدام نوع آخر من الأجهزة للتحديد الدقيق لمكان العطل. ومن الأجهزة التى تعطى فقط مسافة العطل:

**1-3-27 جهاز صدى النبضة (الرادار) (Pulse Echo)**

تقوم فكرة هذه الأجهزة (شكل 2-27) على أنها ترسل الطاقة الكهربائية على هيئة نبضات ثم تنعكس الطاقة عند نقط عدم الاتصال Discontinuity ومنها نقطة العطل بالطبع، وكمية الانعكاس تعتمد على قوة الضرر كما سنرى تفصيلاً من خلال الرسومات فى الجزء التالى .

وعند دفع نبضات كهربية فى بداية الكابل فإن الطاقة الكهربائية لهذه النبضة تنتقل داخل الكابل بسرعة تقل قليلاً عن سرعة الضوء الذى تسير به لو مرت فى وسط ليس به عزل، والسبب فى ذلك أن التيارات خلال سيرها فى الموصل تقوم بشحن مكثفات العزل، وبالتالي تتأثر بوجود العزل من عدمه، كما تتأثر بالطبع بقيمة المسافة بين النقطتين.



شكل 27-2 :

**ملحوظة :**

قد يصاحب حركة النبضات حدوث شرارة كهربية مع صوت فرقة، وهذا الصوت يتم سماعه من خلال جهاز الاستقبال الذي يتمثل في السماعة التي تستخدم مع أجهزة التحديد الدقيق لمكان العطل كما سنرى لاحقاً.

**2-3-27 كيفية تحديد مسافة العطل باستخدام Pulse Echo**

تعتمد هذه الطريقة على مبدأ انعكاس النبضات الكهربائية (Time Domain Reflectometry) وهو نفس المبدأ الذي يعمل عليه الرادار .

فمن المعروف أن الموجات الكهربائية هي (Traveling Waves) مثل الموجات أو النبضات الكهربائية تنتقل على الموصلات الهوائية بسرعة الضوء بينما تنتقل على الموصلات التي بداخل الكابلات بسرعة قدرها

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

حيث  $c$  هي سرعة الضوء في الفضاء .

حيث  $\epsilon_r$  معامل السماحية النسبية (Relative permittivity) لمادة العزل.

وينعكس جزء من الموجة المتقلة عند نقط التحول transition point ، وهي النقط التي تتغير عندها المعاوقة المميزة للكابل. وتسمى النقطة التي يقع عندها الخطأ أو العطل بنقطة تحول.

ومعامل الانكسار عند هذه النقطة بصفة عامة هو :

$$\rho_{refraction} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

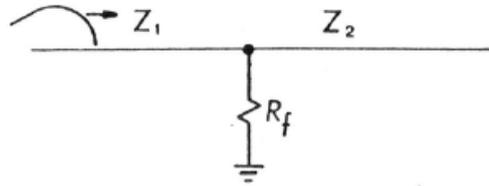
حيث

$Z_1$ : المعاوقة قبل نقطة التحول

$Z_2$ : معاوقة الخرج عند نقطة التحول

وإذا اعتبرنا أن العطل في الكابل له مقاومة  $R_f$  كما هو مبين في الشكل 3-27 فإن المعاوقة عند نقطة التحول هي

$$Z_2 = R_f * \frac{Z_1}{R_f + Z_1}$$



شكل 3-27 :

ويصبح معامل الانعكاس

$$\rho_{reflction} = -\frac{Z_1}{2 + Z_1}$$

فعند حدوث short على الموصل فإن  $Z_2 = R_f = 0$  ومن ثم تكون قيمة معامل الإنكسار :

$$\rho_{refraction} = -1$$

وعند حدوث Open Circuit في الموصل تكون  $Z_2 = \infty$  ومن ثم تكون:

$$\rho_{refraction} = +1$$

وبناء على ذلك يمكن فهم الأشكال الموجودة في الجزء التالي.

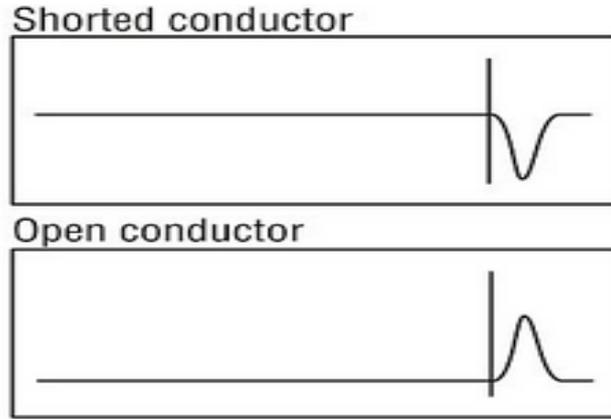
### 3-3-27 تصنيف الأعطال بالنسبة لجهاز الـ Pulse Echo

من الواضح مما سبق أنه إذا كانت مقاومة العطل صغيرة تكون الموجة المنعكسة سالبة وقوية ، وإذا كانت المقاومة كبيرة فالموجة المنعكسة تكون موجبة وقوية .

- في حالة الـ (short circuit) تنعكس الموجة بأكملها بالسالب
- في حالة القطع (open circuit) تنعكس الموجة بأكملها بالموجب

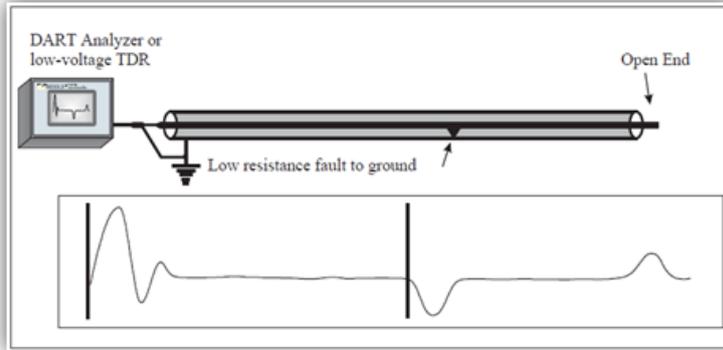
وبالتالي يمكن أن نفهم أشكال الموجات التي تخرج من الجهاز في الحالات التالية :

حالات الـ Short Circuit الصريح - بدون مقاومة - وحالات القطع Open circuit الصريح (شكل 4-27) :



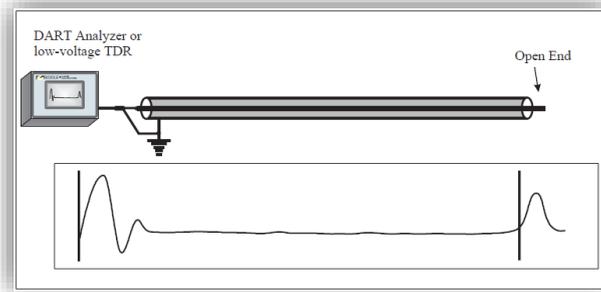
شكل 4-27 :

في حالة وجود عطل قصر خلال مقاومة صغيرة يكون الشكل الناتج كما في (شكل 5-27):



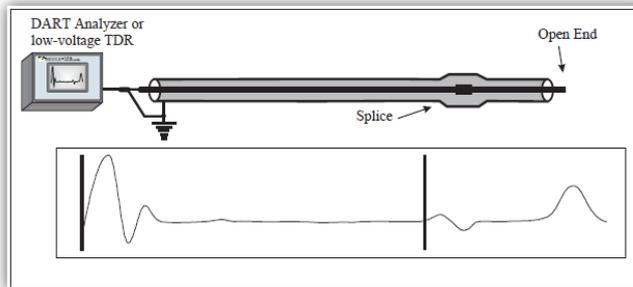
شكل 5-27 :

وفى حالة عدم وجود عطل يكون الشكل كما فى (شكل 6-27) ، والانعكاس هنا بسبب نهاية الكابل وليس بسبب قطع فيه.



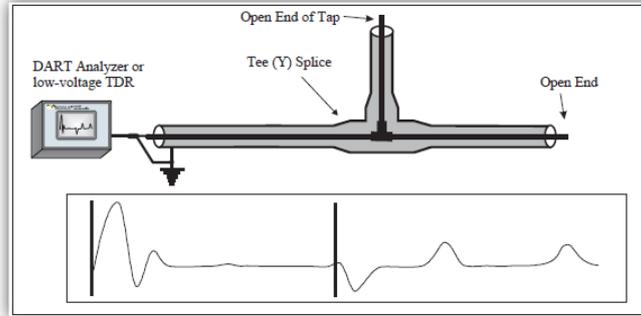
شكل 6-27 :

أما فى حالة وجود وصلات فيكون كما فى شكل 7-27



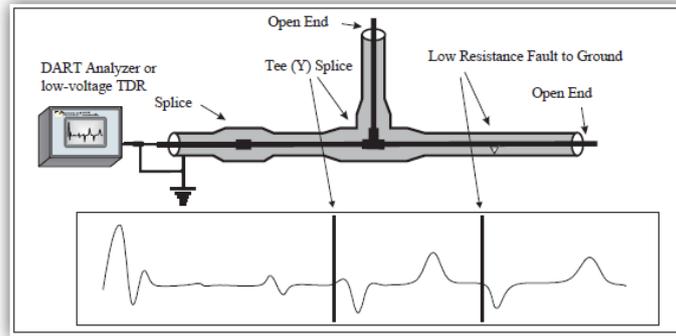
شكل 7-27 :

وفي حالة وجود T section يكون كما فى الشكل 8-27.



شكل 8-27 :

وأخيرا ، فى حالة وجود عطل مع وصلة مع T section يكون الشكل كما فى 9-27.

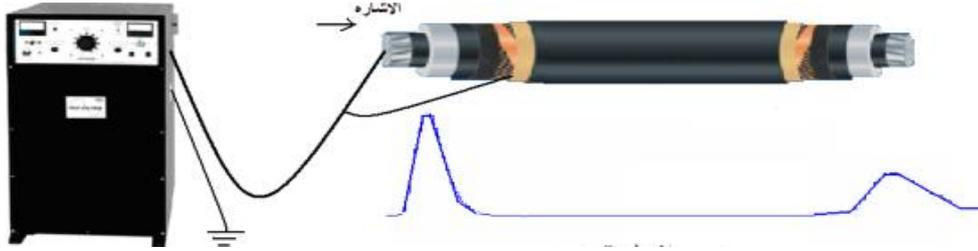


شكل 9-27 :

ملحوظات :

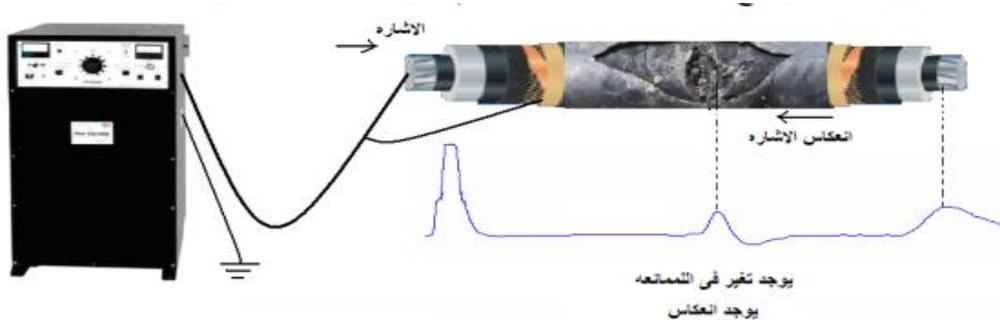
يكون استخدام TDR - فى حالة كون مقاومة العطل تساوى صفرا أى وجود Short بالكابل أدى إلى عمل لحام - هو الحل الوحيد ، حيث فى تلك الحالة لا يوجد Flash أو شرارة ولا يستطيع جهاز السماع سماع صوت الموجة المرتدة ، وبالمثل فى حالة وجود فتح بالكابل حيث أيضا لا يوجد انعكاس ولا نستطيع سماع صوت الموجة ، ولذلك يكون استخدام جهاز الرادار فى تلك الحالتين حلا وحيدا ، مع ملاحظة أن التحديد الدقيق هنا يكون مستحيلا وسيعتمد على التقريب.

إذا لم يكن هناك عطل فسيكون على الأقل لدينا انعكاس واحد من نهاية الكابل كما في الشكل 10-27 ، وهذا يعني أن الجهاز يمكن استخدامه أيضا في قياس أطوال الكابلات.



شكل 10-27 :

أما إذا وجد قطع فسيحدث انعكاس عند العطل وعند نهاية الكابل أيضا ولكننا بالطبع سنأخذ الأول كما في الشكل 11-27. (ولو القطع بشكل مكتمل فلن يحدث انعكاس عند نهاية الكابل).



شكل 11-27

### 4-3-27 كيفية حساب المسافة

يقوم جهاز TDR بإرسال نبضة كهربية في الموصل الذي به عطل وقياس الزمن المنصرم من لحظة إرسال النبضة حتى وصول النبضة المعكوسة ، ويتم تحديد مكان العطل من معادلة بسيطة

$$x = \frac{1}{2} v * t$$

$x$ : مسافة بعد نقطة العطل عند نهاية الكابل

$v$ : سرعة انتشار النبضة على الموصل

$t$ : الزمن المقاس

لاحظ أننا قسمنا على 2 لأن الموجة تذهب وتعود أى تقطع فعلياً ضعف مسافة العطل.

علماً بأن السرعة يمكن قياسها أولاً بمعلومية كابل سليم ومعروف طوله.

### 27-3-5 مشاكل استخدام الـ TDR:

من أبرز هذه المشاكل:

- أن الطول الفعلي في مسار الكابل لا يساوى المقاس على الأرض وذلك بسبب وجود انحناءات في مسار الكابل .
- عدم تحديد سرعة انتشار الموجة بدقة و ذلك نتيجة اختلاف مادة العزل في أكثر من جزء في الكابل.
- تستطيع أجهزة الـ TDR الحديثة أن تحدد موقع العطل بدقة فائقة وذلك بغض النظر عن قيمة مقاومة العطل بعد الربط مع مولد النبضات ، أما الأجهزة القديمة الصنع المنفردة فهي لا تعطي قياسات دقيقة إذا زادت قيمة مقاومة العطل عن 200 أوم . وفي هذه الحالة يجب قياس القيمة التقريبية لمقاومة العطل بواسطة جهاز أوميتر يعمل بالبطاريات وخاص باختبار الكابلات ولا يجوز في هذه الحالة استخدام جهاز الميجر (megger) حيث أن الجهد العالي الذي يولده هذا الجهاز قد يتسبب في حدوث تفريغ بالشرر (spark-over) مما يعطى قراءة خاطئة لمقاومة العطل.

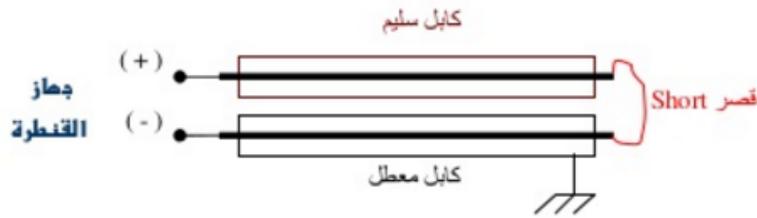
### 27-3-6 استخدام جهاز القنطرة (Bridge) لقياس مسافة العطل

تستخدم طريقة القنطرة في تحديد نسبة مسافة العطل.

والصورة توضح شكل جهاز القنطرة شكل 27-12 . فى البداية نقوم بعمل التوصيلات اللازمة كما هو موضح بالشكل 27-13 :



شكل 27-12:



شكل 27-13 :

حيث يتم أخذ قراءة جهاز القنطرة ثم نقوم بحساب مسافة العطل حسب العلاقة التالية :

$$L_f = \frac{2 \times L \times \text{Reading}}{100}$$

حيث :

L = طول الكابل

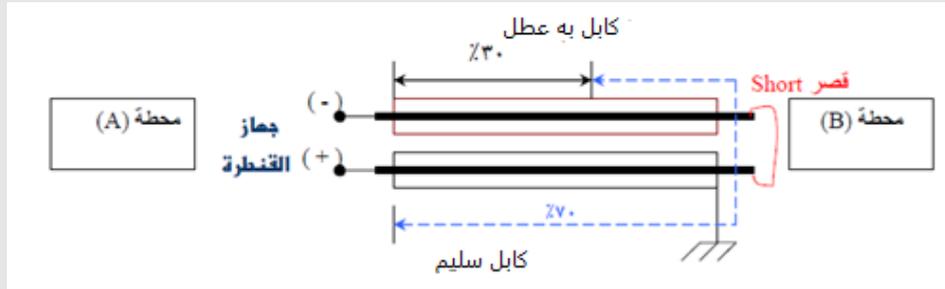
L<sub>f</sub> = مسافة العطل

أما الـ Reading فهي نسبة مئوية من طول الكابل .

## مثال 1-27

قراءة القنطرة من المحطة (A) هي ٣٠٪ وطول الدائرة ٣٠٠٠ متر ماهي مسافة العطل؟

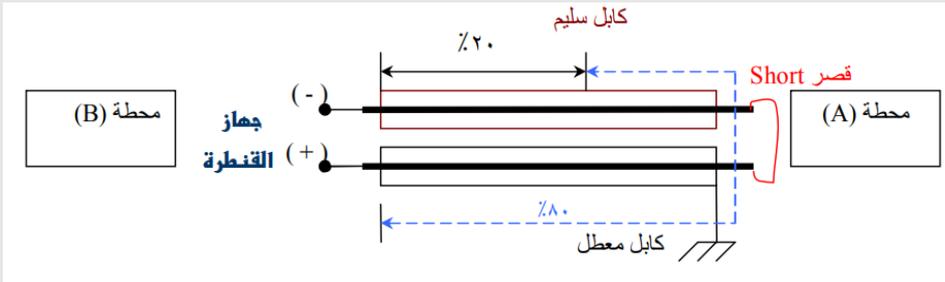
الحل



$$\text{Fault distance from A} = \frac{2 \times 3000 \times 30}{100} = 1800m$$

وعند عكس الأطراف من نفس المحطة (A) لا بد أن تكون قراءة القنطرة هي 70% أي المكتملة للـ 100%.

ووبعد ذلك يتم التأكد من مكان العطل بذهاب إلى المحطة الأخرى المحطة (B) كالآتي:



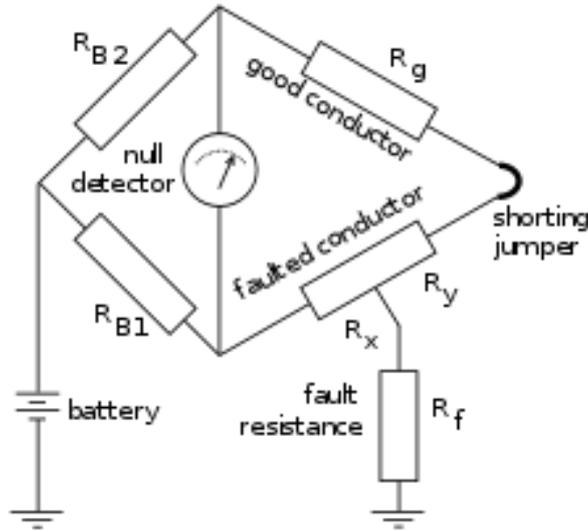
$$\text{Fault distance from B} = \frac{2 \times 3000 \times 20}{100} = 1200m$$

## 7-3-27 طريقة قنطرة موري Murray Bridge لقياس مسافة العطل

طريقة قنطرة موري تعتبر أقدم طريقة لتحديد مكان عطل الكابل ، وهي صورة معدلة من قنطرة هويتستون Wheatstone bridge ويجب أن تكون مقاومة العطل صغيرة لكي يسمح بمرور تيار كاف ليمر في القنطرة وتعطى الاتزان المطلوب .

وتعطى تلك الطريقة نتائج جيدة بنسبة خطأ ( $\pm 1\%$ ) مع سهولة في التشغيل إلا أنه من عيوبها وعيوب أي قنطرة أنها تحتاج لموصل سليم بجوار الموصل المعطل.

و في هذه الطريقة يتم توصيل نهاية من الكابل المعطوب بمصدر للجهد عن طريق مقاومتين و الطرف الآخر توصيله بالكابل السليم عن طريق دائرة قصر و يتم توصيل جلفانومتر galvanometer بين الكابلات كما هو موضح بالرسم شكل 14-27 ، و تصل هذه القنطرة إلى الإتزان عن طريق تغيير قيم المقاومتين  $R_{B1}$  ،  $R_{B2}$  حتى تكون قيمة الجلفانومتر تساوي صفر و بهذا تكون القنطرة متزنة.



شكل 14-27

و يتحقق الاتزان عندما تتحقق هذه العلاقة

$$\frac{R_x}{R_g + R_y} = \frac{R_{B1}}{R_{B2}}$$

و التي تكافئ العلاقة

$$R_x = (R_g + R_y) \cdot \frac{R_{B1}}{R_{B2}}$$

قيمة المقاومة  $R_x$  تتناسب مع الطول  $L_x$  و لذلك يمكن حساب مسافة العطل عن طريق العلاقة

$$L_x = 2 \cdot L \cdot \frac{R_{B1}}{R_{B1} + R_{B2}}$$

و الـ  $L$  هو الطول الكلي للكابل الخاضع للإختبار و قيمته تتناسب مع المقاومة  $R_g$

و بذلك نستطيع قياس مسافة العطل في حالة ائزان القنطرة .

يفترض هذا الأسلوب وجود خطأ واحد مقاومته صغيرة إذا تمت مقارنتها بمقاومة العزل للكابل السليم و أن الموصلات داخل الكابل لها مقاومة منتظمة لكل وحدة طول .

## 4-27 التحديد الدقيق لمكان العطل

الطرق السابقة تعطي تقديراً لمسافة العطل لكن لا تحدد بدقة مكانه . وهناك عدة طرق لهذا التحديد الدقيق منها:

### 1-4-27 استخدام جهاز مولد النبضات : Surge Generator

طريقة استخدام جهاز مولد النبضات (شكل 27-15) لتحديد أعطال الكابلات معروفة منذ عام 1940 وشهدت تطوراً كبيراً مع زيادة الاعتماد على الكابلات الأرضية. ويسمى أيضاً بالشاكوش كما سنرى.



شكل 15-27

والجهاز المستخدم يعرف بالمولد ذي الجهد العالي ويتكون من مصدر جهد ثابت يقوم بشحن مكثف بجهد عالٍ ثم بعد ذلك يتم التفريغ في الكابل عن طريق مفتاح يدوي أو أوتوماتيكي مع ضرورة تفريغ الشحنة من على الكابل بعد انتهاء الاختبار من خلال المقاومة الموجودة في الجهاز. وتستخدم هذه الطريقة بالضرورة في حالة كون المقاومة بين العطل والأرض كبيرة.

وإذا كانت الطاقة في المكثف التي تم تفريغها في الكابل كافية لإحداث Partial discharge مع الأرض فإن مكان العطل سيتم تحديده بدقة حيث سيصدر عند العطل صوت يمكن رصده عن طريق سماعات خاصة بالمرور على مسار الكابل ويمكن أن تظهر اهتزازات في التربة تلاحظ بسهولة ولذا يسمى هذا الجهاز كما ذكرنا بالشاكوش.

وقد تكون كمية الطاقة المرسله إلى مكان العطل ضعيفة نتيجة لانخفاض جهد المولد أو لكون سعة الكابل تحت الاختبار عالية وفي هذه الحالة نحتاج إلى عدة موجات دفعية لشحن الكابل أولاً ثم بعد ذلك يبدأ ظهور صوت تفريغ العطل مع الأرض ويمكن حساب الطاقة المخزنة في مكثف الجهاز عن طريق المعادلة:

$$E = \frac{1}{2} C V^2$$

حيث E هي الطاقة المخزنة في مكثف الجهاز و V يساوي جهد الشحن للجهاز و C هي قيمة مكثف الجهاز.

ويمكن التحكم في هذه الطاقة أما بتغيير جهد المولد المستخدم أو بتغيير سعة مكثف الجهاز.

ويعمل الجهاز على توليد جهد على شكل Pulses ذات طاقة عالية بجهد خرج يتراوح من 15 إلى 25 كيلو فولت مما يجعل هذا النظام مناسب بدرجة كبيرة لتحديد مكان العطل في كابلات الجهد المتوسط والمنخفض علما بأن جهد الخرج فيه يصل إلى 80 كيلو فولت للجهود العالية والفائقة .

ويحظر استخدام هذه الطريقة في حالة وجود مياه سواء من مطر أو غيره في محيط مسار الكابل وذلك للأسباب الآتية:

- أولاً : احتمالية تعرض العاملين لجهد الخطوة أو جهد اللمس نظرا لانخفاض المقاومة النوعية للتربة في هذه الحالة مع ضرورة مراعاة احتياطات الأمان اللازمة للتعامل مع الجهود العالية.
  - ثانياً: أنه في حالة اختلاط التربة بالماء يزداد تماسكها وبالتالي فإن صوت التفريغ الكهربائي لا يُسمع جيداً ويكون الصوت مكتوماً.
- وبالرغم من دقة هذه الطريقة في تحديد الأعطال إلا أن لها بعض العيوب أهمها:

- استخدام الجهد العالي في تحديد مكان العطل في الكابل يتسبب في حرق جزء كبير حول مكان العطل مما يتسبب في تغيير جزء من الكابل وعمل وصلتين إن لم يكن الكابل به كورية تسمح بعمل وصلة واحدة.
- تعرض الكابل للجهود العالية يقلل من العمر الافتراضي للكابل وبالتالي يتعرض للتلف والحاجة للتغيير في زمن قصير.
- الجهد المستخدم قد يقوم بشحن الفجوات الهوائية داخل الكابل والتي لا يتم تفريغها بعد الانتهاء من تحديد العطل مما قد يتسبب في انهيار الكابل بعد تحميله بجهد التشغيل.

و قد تكون كمية الطاقة المستهلكة إلى مكان العطل ضعيفة نتيجة لانخفاض جهد المولد أو لكون سعة الكابل عالية جدا و في هذه الحالة نحتاج إلى إرسال عدة موجات لشحن الكابل أولاً ، ثم بعدها يبدأ ظهور صوت تفريغ العطل مع الأرض ، وهذه الموجات المتتابعة قد تسبب انهيار العزل في أماكن كان العزل فيها لا يزال بحالة جيدة لكنه انهار بسبب تتابع الـ Pulses. وعمليا نقن عملية استخدام مثل هذه الجهود فنستخدمها بأقل قيم وأقل زمن (يعني لا نقوم بإطلاقها على الكابل إلا بعد الذهاب للمكان المحدد بأجهزة المسافات ، وعند سماع العطل لا نطيل فترة السماع).

## مثال 2-27

عند توصيل كابل به عطل على جهاز Surge Generator ، إ حسب القدرة المستهلكة في الشرارة نتيجة العطل علما بأن سعة المكثف بالجهاز تساوي 750 ميكرو فاراد و كان جهد الاختبار يساوي 2 كيلو فولت والفترة بين كل موجة وأخرى هي 5 ثواني.

الحل

$$E = (1/2) CV^2$$

$$E = (1/2) (750 \times 10^{-6}) (2000)^2 = 1500 \text{ Joules}$$

$$P = E/t = (1500) / (5) = 300 \text{ watts}$$

## 2-4-27 سماعات الاستشعار

يتم تحديد مكان العطل فعليا على الطبيعة بواسطة المخططات الصحيحة للموقع حيث يتم التحديد على المخطط و معرفة المكان تقريبا على الطبيعة ثم نستخدم جهاز Surge Generator بحيث ترسل نبضات في مسار الكابل الموضحة في المخطط و عند المكان المحدد يتم سماع العطل بواسطة السماعة (شكل 16-27).



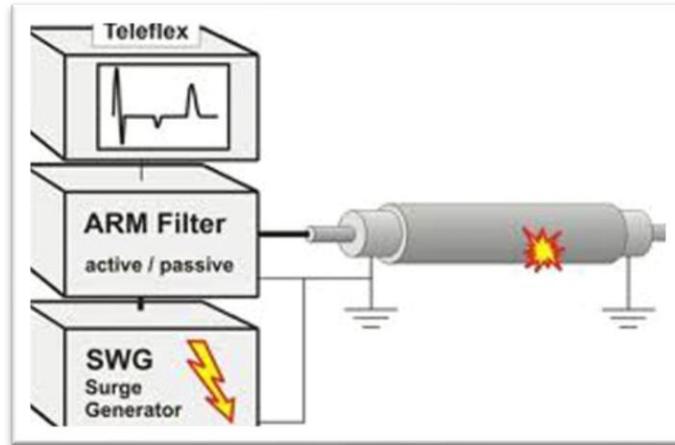
شكل 16-27 : استخدام السماعات

ويتكون جهاز الاستقبال من قلب مغناطيسي وعليه ملف من السلك يتكون من 200 لفة من سلك النحاس المعزول ويتصل طرفا الجهاز بسماعة أذن بحيث يمكن سماع التيارات المستحثة داخل الملف بالأذن. والفكرة هنا أنه عند مرور تيار متقطع داخل الكابل سيؤدي ذلك إلى توليد مجال مغناطيسي متغير حول الكابل وعندما يمر ملف الحث المغناطيسي في جهاز الاستقبال على مسار اتجاه طول الكابلات يتولد في ملفه تيار كهربي نتيجة لقطع خطوط المجال المغناطيسي له ، ويمكن سماع هذه التيارات داخل الملف بسماعات الأذن ومنها تحديد مكان الكابل.

وأحيانا يكون الموضع في أماكن غير ممهدة وتحتاج لمجهود للوصول إليها كما في الصورة التالية.

### 3-4-27 استخدام طريقة الـ Arc reflector في تحديد مكان العطل

هذه الطريقة (شكل 17-27) هي مزيج يجمع بين استخدام TDR والـ (surge generator) مع استخدام فلتر (arc reflection filter) بغرض حماية جهاز الـ TDR من الجهد العالي الذي سيولده الـ (surge generator).



شكل 17-27 :

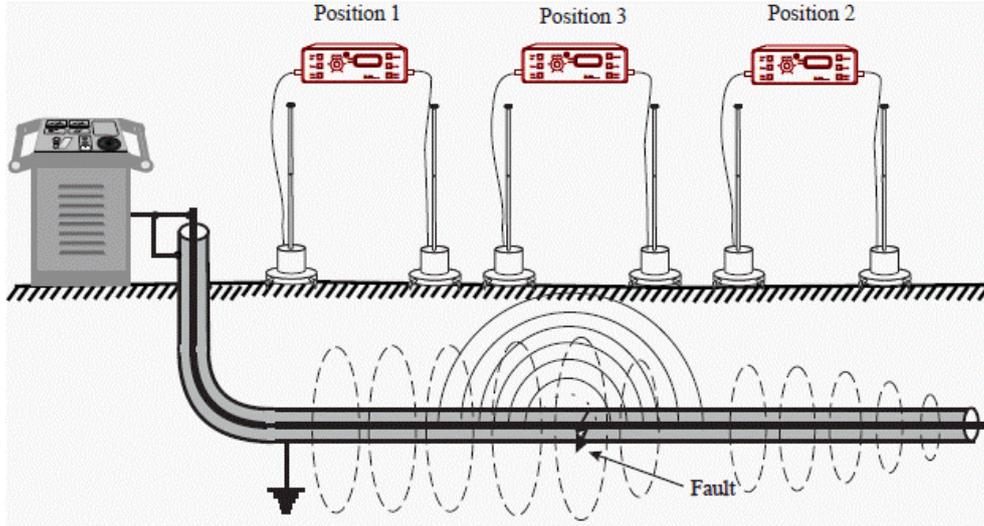
هذه الطريقة تستخدم حين تكون مقاومة العطل عالية جدا لدرجة أن الـ TDR لا يكتشفه ، وفي نفس الوقت سنحتاج لجهد عالي جدا إذا استخدمنا الـ Surge Gen بمفرده ، فيكون الحل هو توليد قوس كهربي بواسطة الـ Surge Gen عند نقطة الـ fault بحيث تقل مقاومة العطل إلى قيمة أصغر من

200 أوم ، وفي نفس الوقت يكون جهاز الـ TDR متصلا ، مما يمكننا من قياس انعكاس الموجات على شاشة الـ TDR ، كما سيصدر صوتا ناتجا عن القوس وهذا أيضا يمكننا من تحديد موقع العطل صوتيا. وهذه الطريقة تقلل كمية الجهد العالي الذي يتعرض له الكابل وتجنب ظهور faults بعد إعادة تشغيل الكابل .

#### 4-4-27 تحديد مكان العطل باستخدام المجال المغناطيسي

يجب قبل أي تجربة للكشف على كابل به عطل معرفة مسار الكابل من الرسومات الخاصة بالمشروع وإذا لم يتيسر ذلك فلا بد من استخدام جهاز تتبع مسار الكابل .

تستخدم هذه التقنية في تحديد مكان العطل المتصل بالأرض وتعتمد على حقن تيار مستمر في الكابل هذا التيار سيجد له مسارا إلى الأرض من خلال نقطة العطل ويكون توزيع المجال الكهرومغناطيسي الناتج عن هذا التيار كما هو موضح بالشكل 18-27 ومن شدة المجال الكهرومغناطيسي يمكننا ملاحظة أن شدة المجال أعلى ما يمكن عند نقطة الخطأ.



شكل 18-27 :

وبالتالي ، فباستخدام أى جهاز كاشف للمجال الكهرومغناطيسي وتتبع المجال حول الكابل نجد أن المجال يزداد كلما اتجهنا نحو نقطة الخطأ إلى أن يصل إلى أقصى قيمة له ثم ينعكس اتجاهه وبالتالي نكون قد وصلنا إلى نقطة الخطأ.

علما بأن سريان التيار فى الكابل يسبب مجال مغناطيسي فى الهواء والأرض ويمكن قياسه باستخدام



simple magnetic loop (antenna) حيث يمكن تحليل المجال المغناطيسى إلى مكون أفقي ومكون رأسى وتستجيب دائرة الاستشعار loop antenna للمكون الأفقى من المجال المغناطيسي الذى يكون بأقصى إثارة فوق الكابل مباشرة يختلف شكل المجال المغناطيسى بجوار الـ fault لعدم مرور تيار ولذلك تقل قيمة المكون الافقى للمجال المقاس بـ Loop antenna بسرعة.

## 5-27 سيارات فحص الكابلات

وظيفة هذه السيارات اكتشاف الأعطال فى الكابلات بدقة متناهية وسرعة كبيرة لسهولة حركتها من مكان إلى آخر . وهى تشتمل على نفس الأجهزة السابقة لكن فى مكان واحد. و سنعرض بعض الصور للأجزاء الداخلية داخل سيارة الفحص.

تحتوي السيارة (توجد لها مجموعة صور فى الأشكال التالية ) على حوالى عدة أجهزة من خلالها يمكن كشف العطل وتحديد مكانه بالضبط ومن ثم التعامل معه .

**جهد الاختبار :**

هو نفس فكرة عمل جهاز الميجر ولكن يختلف عنه أنه يستطيع أن يتعامل مع جهود أكبر .

## جهاز مولد نبضات + التفلكس:

يقوم جهاز مولد النبضات بإرسال إشارة جهد على الفازة الـ Phase المعطلة ، ويقوم جهاز التفلكس برسم منحنى يعبر عن الوسائط المختلفة داخل الفازة وتظهر مكان العطل على المنحنى كما يتم حساب المسافة من خلال مقياس رسم ومعايرة لحساب سرعة الإشارة ، ومن هنا فإن جهاز مولد النبضات والتفلكس يقومان بمعرفة بعد مسافة العطل من مكان صدور الإشارة.

## جهاز الشاكوش:

بعد استخدام جهاز (مولد النبضات + التفلكس) نذهب إلى مكان العطل يقوم جهاز الحرق بإرسال إشارة جهد عالي جدا على الفازة المعطلة وعند مكان العطل يحدث شرارة أو خبطة نتيجة أن نقطة العطل يحدث فيها أكبر انهيار ، ومن خلال جهاز الشاكوش - شكل 19-27 - يتم سماع الخبطة (حيث هذا الجهاز يعتبر مكبرا لصوت تلك الخبطة حيث الكابل موجود على عمق متر أو أكثر ) ثم يتم الحفر في هذا المكان حتى نصل إلى الكابل ثم يتم التعامل معه



شكل 19-27:

## مبين الجهد :

للأمان هناك جهاز آخر اسمه (مبين الجهد) وهو عمود طويل في نهايته جهاز (مثل مفك التست) إذا لمس أي موصل فيه تيار وليس عليه عازل يصدر الجهاز صفاة إنذار وبذلك نتأكد من أن الكابل قد تم فصله من المصدر قبل إصلاحه



شكل 20-27:



شكل 21-27 : الأجهزة المتنوعة داخل السيارة  
جهاز VLF / وجهاز المسار (Burn unit 15 KV)  
ومولد النبضات ( Surge 3/6/12 KV ) داخل السيارة



شكل 27-22 :

شكل 27-22 صورة لتوصيل كابل التوصيل من العربية إلى لوحة الـ RMU التي يتصل بها الكابل المعطل (الصورة منذ عدة سنوات ويظهر المؤلف إلى اليسار )

## 6-27 خلاصة بعض الخبرات الفنية

- يلزم وجود أوجه phases عاطلة وأخرى سليمة لاستخدام القنطرة .
- مقارنة صور الأوجه العاطلة بالأخرى السليمة ليسهل الوصول لمسافة العطل .
- عند وجود عطل على الموصل conductor فهذا يعنى وجود عطل على الغلاف وعندئذ لدينا طريقتان لتحديد العطل إما باستخدام الموصل أو باستخدام الغلاف ، والعكس غير صحيح ، أي عند وجود عطل على الغلاف فليس بالضرورة أن يكون هناك عطل على الموصل ، ولذا يكون تحديد العطل عن طريق الغلاف فقط .
- لتحديد العطل لا بد من معرفة المسافة وسماع الصوت عند العطل .

- الأعطال منخفضة المقاومة (أقل من 100 أوم) لا يتم سماعها فيتم التحديد بطريقة المحاولة والخطأ trial and error
- الأعطال عالية المقاومة (أكبر من 3 ميغا أوم) لا تشعر بها الأجهزة TDR ولا تعطى صورة أى انعكاس ، لذا يلزم حرق المقاومة (حرق مقنن للحفاظ على عمر الكابل وعلى قيمة مقاومة للعطل نستطيع بها سماع مكان العطل) لنقل قيمتها ونتمكن من الحصول على صورة واضحة.
- فى أعطال الغلاف الـ Sheath لو كان العطل بين صندوقين نستخدم القنطرة لمعرفة أيهم عنده العطل ولو العطل بين ثلاثة صناديق فإن ذلك يدل على أن العطل فى الصندوق الأوسط ويلزم أيضا التأكد من ذلك بالقنطرة للاطمئنان فقط قبل الحفر .
- أعطال كابلات القدرة يتم تحديدها فى فترة زمنية أقل من أعطال الـ Sheath أو أعطال الـ Pilot Cable وذلك لأن كابلات القدرة تتحمل الجهود العالية كما أن فرصة سماع مكان العطل فى كابلات القدرة تكون كبيرة .

# الباب الثاني والثلاثون

## تحليل نظم القوى الكهربائية

## الباب السادس

## دراسات هامة في نظم القوى الكهربائية

هذا الباب يعتبر نسبيا من أصعب أبواب الكتاب ، وفي نفس الوقت - في رأيي الشخصي - من أهم أبواب الكتاب ، فكثير من الظواهر التي تحدث في منظومة القوى نتعامل معها بالحسابات دون أن ندرك أحيانا أسباب نشوئها . على سبيل المثال نعلم جميعا أن هناك ارتفاع في الجهد سيحدث بالشبكة نتيجة دخول المكثفات مثلا ، ونعلم أيضا أن الهبوط في الجهد يمكن أن يؤدي لفصل الشبكة ، لكن السؤال هنا : كيف ولماذا؟

هذا الباب يتعرض لكثير من هذه الظواهر ولاسيما ما نسميه الهزات العابرة ( Transients ) التي تحدث في منظومة القوى الكهربائية بالشرح والتحليل بكثير من المنطق وقليل من المعادلات قدر الإمكان. وسيالاحظ القارئ لهذا الكتاب أن هذا هو الباب الوحيد الذي تزيد فيه جرعة الحسابات الرياضية عن الأبواب السابقة ، وهذا هو المسلك الأشهر لفهم هذه الظواهر في معظم المراجع ، لكننا نزيد على ذلك هنا في هذا الكتاب استخدام المنطق العقلي والفيزيائي لفهم هذه الظواهر.

والباب مكون من ثلاثة فصول :

- في الفصل الأول من هذا الباب (فصل 28) نتعرض لتفسير العديد من الظواهر العابرة Transients بالمنظومة.
- في الفصل الثاني (فصل 29) ندرس العوامل المؤثرة على استقرار الشبكة الكهربائية Power System Stability نتيجة تعرضها لهذه الهزات وغيرها ، والجزء الأكبر في هذا الفصل سيخصص للحديث عن استقرار الجهد ، حيث هو المشكلة الأبرز في أغلب الدول حاليا.
- في الفصل الثالث (فصل 30) ندرس ظاهرة هامة مؤثرة على أداء المنظومة وهي ظاهرة التوافقيات ( Harmonics ) .

## 28

## الهزات العابرة في نظم القوى الكهربائية

## TRANSIENTS IN POWER SYSTEMS

## 1-28 مقدمة الفصل:

كلنا يستطيع تحليل ودراسة أداء أى دائرة كهربية مغذاة من DC or AC Supply طالما تحقق فى الدائرة شروطان :

1. أن تكون قيم عناصر الدائرة R,L, and C ثابتة ولا تتغير.
2. أن يكون الجهد المطبق Applied Voltage ثابتا سواء كان DC or AC خلال فترة الدراسة بعيدا عن لحظات إغلاق مفتاح الدائرة . أى أن تكون الدائرة فى حالة Steady State, SS ، حيث يمكن تطبيق قانون أوم وقوانين كيرشوف ونظريات تحليل الدوائر الكهربائية Superposition, Norton, Thevenin, etc بسهولة لحساب قيم الجهد والتيار فى أى جزء من أجزاء الدائرة.

أما فى حالة كون الدائرة تمر بوضع Transient فالأمر مختلف تماما للأسباب التالية:

- بداية فإن كلمة Transient أو بالعربى سنترجمها بالهزة العابرة ، يقابلها كلمة Steady State, SS أو حالة الثبات ، ورغم أنه فى كلا الحالتين فإن الدائرة الكهربائية سيتحكم فى أدائها عناصر الشبكة الثلاثة الرئيسية وهم Resistance, Inductance and Capacitance ، إلا أن القوانين المطبقة فى حالة الـ SS لا يصلح تطبيقها فى حالة الـ Transient لأن استجابة هذه

العناصر الثلاثة لل Transients مختلفة تماما عن استجابتها في حالة الـ SS ، بل تختلف هذه الاستجابة حسب مدة بقاء الهزات العابرة وشكلها كذلك أثناء فترة الـ Transients .

- تعرف معظم الـ Transients بأنها Disturbance تحدث أثناء الانتقال من حالة استقرار إلى حالة استقرار مختلفة وذلك في مدة - غالبا تكون - أقل من دورة Sub cycle و تؤثر على شكل موجات الجهد والتيار. وإن كان هناك بعض الـ Transients التي قد تدوم دورات كاملة.
- معظم الهزات العابرة لا تستطيع أجهزة القياس العادية أن تلاحظها أو تسجلها وذلك لأن الـ Transient قد تكون لمدة 2ms مثلا وبترددات تبدأ من 0.1 Hz وتصل إلى 20kHz ، ومنها ما قد يصل إلى 50MHz في حالة الـ GIS substations ، وهذا يعني أن جهاز القياس يجب أن يكون له Frequency response سريع جدا حتى يمكنه رصد وتسجيل هذه الهزات بدقة وبالطبع سنحتاج إلى أجهزة خاصة جدا ومكلفة.

ونشير هنا إلى أنه أحيانا يطلق على هذه الـ Transients مصطلحات عامة من قبيل Impulse, Spike, surge, pulse وغيرها و لا بد من تحديد واضح لمعنى كل لفظ من هذه الألفاظ والتي عموما يمكن أن نسميها Transients.

## 1-1-28 الفرق بين الـ Transient Analysis والـ SS- Analysis

ونقصد بها تحليل الظواهر العابرة والظواهر المستقرة ، فالمقصود بالـ Transient Analysis هو دراسة تصرف الدائرة مع الزمن خلال فترة الـ Transients ، حيث تظهر معادلات الجهد والتيار كدالة في الزمن ، فعندها نقول أن هذه المعادلات هي نتاج الـ Transient Analysis .

أما إذا كانت المعادلات خالية من عنصر الزمن فهذا يعني أن الدائرة وصلت إلى حالة الثبات ولم يعد تغير الزمن يؤثر في قيم الجهد ولا التيار (المقصود أن قيم الـ RMS لهما ثابتة) ، وبالتالي تكون المعادلات وقتها نتاج حالة الـ Steady State Analysis .

وعموما عند دراسة أداء أى دائرة كهربائية رياضيا فإنه يتم دراستها من خلال معادلات تفاضلية، ويكون الحل دائما مكون من جزئين : جزء متعلق بحالة الـ transient ، بالإضافة إلى جزء خاص متعلق بحالة الـ SS.

## 2-1-28 مدى الهزات العابرة

في دراسة مقدمة من ( International Council on High Voltage Electrical Systems )  
 CIGRE وكذلك الـ International Electro Technical Commission ( IEC ) تم فيها تصنيف  
 مدى الترددات في الهزات العابرة إلى أربع مجموعات :

1. Low-frequency oscillations, from 0.1 Hz to 3 kHz;
2. Slow-front surges, from 50/60 Hz to 20 kHz;
3. Fast-front surges, from 10 kHz to 3 MHz;
4. Very fast-front surges, from 100 kHz to 50 MHz

كما تم تصنيف الترددات حسب سبب حدوثها على النحو التالي :

Origin	Frequency Range
Ferro resonance	0.1 Hz to 1 kHz
Load rejection	0.1 Hz to 3 kHz
Fault clearing	50 Hz to 3 kHz
Line switching	50 Hz to 20 kHz
Transient recovery voltage	50 Hz to 100 kHz
Lightning overvoltage	10 kHz to 3 MHz
Disconnecter switching in	100 kHz to 50 MHz

## 3-1-28 لماذا ندرس أداء الشبكات أثناء الـ Transient ؟

حالة الـ Transient ليست كما قد يفهمها البعض على أنها حالات نادرة ، فالحقيقة أن هذه الهزات متكررة  
 طوال اليوم ، فعلى سبيل المثال فإن الـ Transients تنتج في الأوقات التالية:

- عند فصل وتشغيل أى حمل
- عند حدوث عطل
- عند حدوث تغيير مفاجئ في جهد الدائرة

- عند فصل وتشغيل المكثفات والمحولات والكابلات وكذلك الـ reactors
- حالات الرنين وحالات الـ Ferro resonance
- عند الإصابة بالصواعق .

وقد يقول قائل : هذه الحالات متكررة لكنها طبقا للتعريف تعتبر حالات لا تبقى زمنيا إلا لأجزاء من الثانية . فلماذا الاهتمام بظاهرة ستختفى خلال جزء من الثانية؟

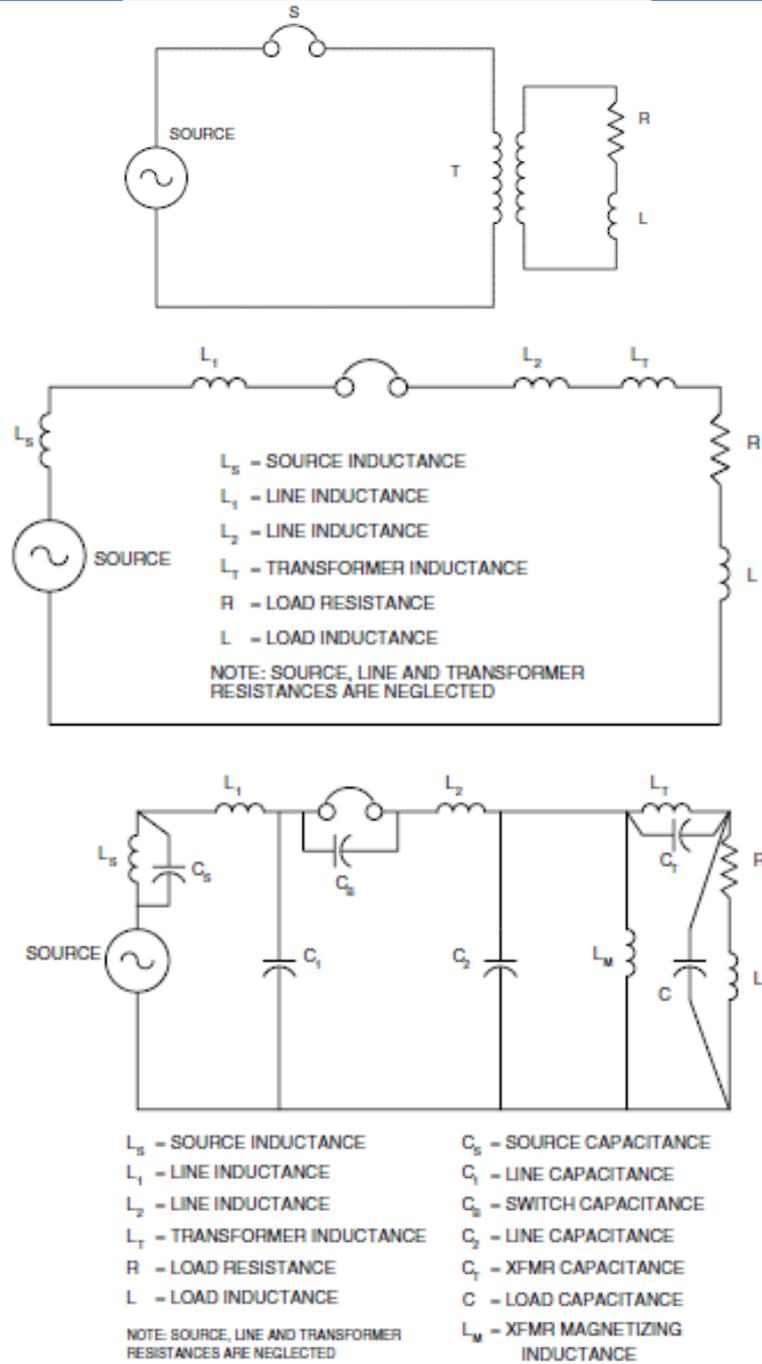
والإجابة أنه رغم صغر الفترة التي تحدث فيها الـ Transients إلا أنه قد يترتب على حدوثها انهيار في الشبكة نتيجة حدوث ارتفاعات في الجهد أو التيار خلال هذه المدة الوجيزة لا تتحملها الأجهزة . ومن هنا فكل جهاز أو معدات كهربية معرضة لحدوث أى شكل من أشكال الـ Transient فإنه يلزم قبل توصيفها دراسة نتائج حدوث هذه الظواهر وتأثيرها عليها ، وبالتالي تكتب المواصفات وقد أخذنا فى الاعتبار أقصى ارتفاع فى الجهد ومدة بقاءه وأقصى تيار وأقصى مدة له وهكذا . ومن هنا مثلا تفهم لماذا توصف وتختبر أجهزة ومعدات مثل القواطع CB والكابلات ليس فقط حسب جهد التشغيل بل أيضا حسب الجهد الدفعى max. Impulse voltage التى تتحملها .

وحتى الهزات التى لا تسبب ارتفاعات كبيرة فى الجهد فإنها تؤثر على أجهزة الوقاية مما يؤدي إلى خروج أحمال هامة بسبب هذه الهزات وبالتالي نتكبد خسائر ضخمة ، ففى مصانع الأسمنت مثلا عند حدوث هزات كهربية فإن الأحمال التى تعتمد على التردد مثل الـ (Drives) تخرج من الخدمة وتكلف المصنع خسائر كبيرة نتيجة تعطل المادة الخام وتلفها .

كما أن تأثير الـ Transient يمكن أن يسبب مشاكل لكل معدات الـ Power system بما فيها المعدات الأساسية مثل المحولات والمحركات ، وذلك رغم كونها تحتوى على Inductance عالية تستطيع أن تنشأ Damping للترددات العالية بسهولة لكنها قد تتأثر بالجهود العالية ، لكن المشكلة ستكون أكثر تعقيدا مع المعدات الإلكترونية الحساسة أو معدات التحكم عموما فى منظومة الـ Power System .

#### 4-1-28 كيف يتم تمثيل المعدات أثناء الـ Transients؟

والشكل I-28 يعطى نموذج شكلى لتوضيح ما سبق حيث يظهر جزءا من منظومة الـ power system فى الجزء الأول من الرسم ثم يظهر فى الجزء الثانى كيف يتم تمثيلها فى حالة الـ SS ، وأخيرا كيف يتم تمثيلها فى حالة الـ Transient .



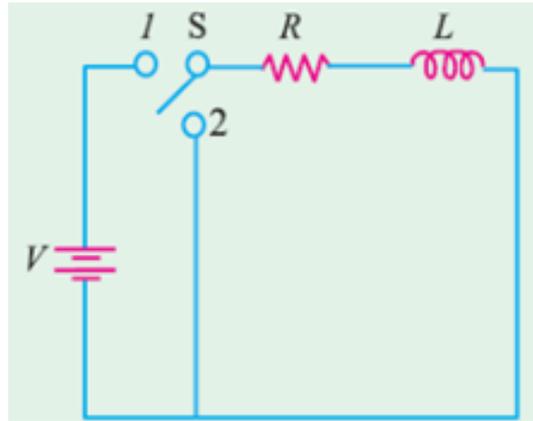
شكل 28 - 1 :

لاحظ كيف أن حالة الـ transient تأخذ في الاعتبار كل المركبات مهما صغرت قيمتها بسبب ارتفاع قيمة التردد عند حالات الـ Transient بينما يتم إهمال قيم مكثفات كثيرة في حالة الـ SS .

### 28-1-5 تحرير المصطلحات

الهزات العابرة تحدث سواء كانت الدائرة الكهربائية مغذاة من DC Supply أو كانت مغذاة من AC Supply ، وبعض المراجع تستخدم مصطلحات أخرى من قبيل مصطلح AC analysis and DC analysis .

عموماً ، يقصد بالـ DC analysis أن ندرس تصرف الدائرة إذا تم غلقها بدون وجود أى voltage source كأن تضع الـ Switch في الوضع 2 في الشكل 2-28 ، أو ندرس تصرفها في بداية وضع مصدر ثابت للجهد مثل البطارية.



شكل 2-28 :

أما مصطلح الـ AC analysis فغالباً يقصد به دراسة Frequency response للدائرة ، بمعنى آخر ما هو تصرف الدائرة إذا مر بها تيارات ذات ترددات مختلفة ، ولذا توضع النتائج بين محورين : الأفقى هو التردد والرأسى هو الـ Magnitude سواء كان جهداً أو تياراً ومنه تعرف هل هذه الدائرة مثلاً حساسة للترددات العالية أم المنخفضة أم لا تتأثر وهكذا.

ملحوظة:

قد يسأل سائل : ولماذا الاهتمام بموضوع الـ DC ونحن كافة تعاملتنا تكون بالـ AC ؟

والإجابة أن هناك أهمية قصوى لدراسة تأثير النظام بجهد DC لأنه ورغم أن المصدر الرئيسي للتغذية هو AC Supply إلا أن الـ DC Signals موجودة بكثرة ، على سبيل المثال :

- جميع الدوائر التي تحتوي على Capacitance and Inductance يمر بها عند بدء التشغيل تيار مكون من جزئين : الأول يسمى DC Component والثاني يسمى SS Current ، وبالتالي فوجود الـ DC لا يقتصر فقط على الدوائر التي تتغذى من DC Source .
- عند بدء تشغيل المحولات فإنها تسحب تيار الاندفاع Inrush current ، وهذا التيار مكون من جزئين DC and AC ، وبالتالي فعند دراسة تصرف أى دائرة circuit response أثناء مرور هذا التيار سنحتاج أن ندرسها بطريقة الـ Super Position حيث ندرس تأثير الدائرة بالجزء الـ DC فقط كما لو كان موجودا منفردا ، ثم ندرس تأثيرها ( circuit response ) بالجزء الـ AC كما لو كان منفردا . ويكون الـ circuit response تجاه الـ Inrush current هم مجموع الاثنين . ما يهمنا فى هذا المثال هو التأكيد على أننا نحتاج إلى دراسة أداء الدائرة فى وجود DC source .
- مثال آخر عند اصطدام صاعقة برقية بالمنظومة فكأننا وضعنا DC Supply على الدائرة ولا تنس أننا ندرس تأثير الـ Transient .

### 6-1-28 مصدر تغذية الهزات العابرة

من المهم جدا أن نعرف أن التيارات خلال فترة الـ Transient لا يكون مصدرها هو مصدر الطاقة الأساسى الذى يغذى الدائرة (بطارية مثلا أو مولد فهذه المصادر مسؤولة فقط عن مرور التيار فى حالة الـ SS ) ، أما مصدر تغذية تيارات الـ Transient فهى عملية تبادل الطاقة المختزنة فى الملفات والمكثفات ، بمعنى آخر لو وجدت دائرة ليس بها أى مكثفات أو ملفات فهذا يعنى بالضرورة أن الدائرة لن تتعرض لأي Transient Condition . وذلك لأن الـ L and C يمثلان العناصر القادرة على تخزين الطاقة وبالتالي يعزى إليهما المسؤولية عن نشوء حالة الـ Transient ، أما المقاومة فهى العنصر المسئول عن تبديد الطاقة وليس تخزينها ولذا يعزى إليها المسؤولية عن إخماد الـ Transient .

كما أن طول و قصر مدة الـ Transient ستوقف أساسا على قيم الـ L, R and C حسب ما يسمى بالـ Time Constant كما سنرى .

## 7-1-28 الأنواع المختلفة من الهزات العابرة

هذا الفصل مقسم إلى ثلاثة أقسام:

فى القسم الأول : سنرى أن مجرد توصيل المصدر أيا كان نوعه AC or DC على دائرة بها ملفات أو مكثفات يعنى أن لدينا حالة من الهزات العابرة ، ليس بالضرورة أن تكون مصحوبة بارتفاع كبير فى الجهد أو التيار ، وإنما يمكن أن تتسبب فقط فى تغير فى شكل موجة الجهد والتيار فى اللحظات الأولى من توصيل المصدر وبعدها تصل الدائرة إلى حالة الثبات أو ما نسميها بالـ SS. وسندرس فى هذا القسم نوعين من هذه الهزات:

- الهزات العابرة نتيجة توصيل DC Supply على الدائرة
- الهزات العابرة نتيجة توصيل AC Supply على الدائرة

وفى القسم الثانى من هذا الفصل : ندرس حالات من الهزات العابرة ينشأ عنها ليس مجرد تغير فى شكل الموجة وإنما تغير كبير أيضا فى قيمتها ، وتحديدًا سندرس الحالات المسببة لارتفاع فى الجهد ، وغالبا تدرس فى المراجع تحت عنوان الـ Voltage surges ، أو تمورات (مشتقة من الفعل تمور) الجهد وتشمل ارتفاع الجهد فى الحالات التالية:

- عند الإصابة بالصواعق البرقية
- عند لحظات حدوث / فصل الأعطال
- عند فصل وتشغيل المكثفات
- عند فصل وتشغيل أحمال لاسيما المحركات الكبيرة
- عند فصل وتوصيل المحولات

ويمكن تصنيف الحالات السابقة بطريقة أخرى حسب المدة الزمنية لبقائها ، حيث يمكن القول بأن الارتفاعات التى تحدث فى قيمة الجهد يمكن تقسيمها إلى ثلاث مجموعات هى : الارتفاع الدائم Over Voltages ، والارتفاع العارض Voltage Swell ، و الارتفاع الخاطف Impulse surges .

وفى القسم الثالث من هذا الفصل : ندرس حالات من الهزات العابرة ينشأ عنها انخفاض فى الجهد Voltage drop (عكس القسم الثانى) . وهذا الهبوط فى الجهد قد يكون دائما ومستمرًا مثل حالات:

- تيار البدء المرتفع فى المحركات
- الهبوط فى جهد على الكابلات نتيجة التحميل الزائد

- الهبوط فى الجهد بسبب المحولات
- وقد يكون مؤقتا وخاطفا مثل :
- الهبوط فى الجهد نتيجة تيار ال Short Circuit Current
- الهبوط الخاطف المسبب لحدوث Voltage Sags

علما بأنه قد تحدث للجهد أيضا حالة من عدم الاستقرار Voltage Instability وهذه تدرس فى الفصل التاسع والعشرون ، حيث أنه الفصل المعنى بدراسة موضوع ال Stability عموما.

## 2-28 مصطلح جودة القدرة

كفاءة الشبكة الكهربائية أو النظام الكهربى للدولة لم تعد تعتمد فقط على استمرارية التغذية الكهربائية و عدم انقطاعها لفترات كثيرة أو طويلة بل ظهرت عوامل أخرى تؤثر على القدرة الكهربائية نتيجة للتوسع فى استخدام الآلات الكهربائية و إلكترونيات القوى power electronics و electric drives وحتى ظواهر طبيعية ، و من هنا ظهر مصطلح جودة القدرة .

و الشبكة الكهربائية هى شبكة موحدة وكل معدة مرتبطة بالأخرى لذلك عند انهيار أو تغير أداء أى جزء منها يودى ذلك إلى التأثير على المكونات الأخرى للشبكة بدرجة تتوقف على أهمية هذا الجزء . و كذلك إذا تسبب حمل ما فى وجود ظاهرة ما غير مرغوب فيها فى الشبكة كالتوافقيات مثلا فإنه يؤثر فيما حوله من معدات و مصانع. و لذلك أصبح معتادا أن تحدث مشكلة ما لدى مستخدم و لا يكون هو السبب فيها .

كل هذا يؤثر على جودة الشبكة الكهربائية و القدرة التى تعتبر المنتج الذى يصل إلى المستهلك و لذلك كأن لابد من دراسة شاملة أولا للوقوف على هذه الظواهر و معرفة أسبابها ثم الوصول لطرق علاج و تحسين جودة القدرة الكهربائية.

### 1-2-28 تعريف جودة القدرة الكهربائية Power Quality :

توجد الكثير من التعريفات المختلفة لجودة القدرة الكهربائية اعتمادا على خلفية المستخدم.

- فشركات الكهرباء تعرف جودة القدرة الكهربائية باعتبارها موثوقية النظام الكهربى (Reliability) وتصدر احصائيات تفيد بموثوقية النظام الكهربى بنسبة 99.98 %.

- لكن مصنعو الأحمال يعرفون جودة القدرة الكهربائية باعتبارها خصائص المصدر الكهربائي التي تتيح للأحمال العمل بشكل جيد .

ونحن نعرف مشاكل جودة القدرة الكهربائية على أنها أي مشكلة تظهر في الجهد الكهربائي أو أي تغير في التردد يمكن أن تؤدي إلى تلف معدات المستهلكين . أو بصيغة أخرى ، هي الحدود أو الشروط الكهربائية التي تجعل الأجهزة تؤدي وظيفتها من غير التأثير على أدائها أو العمر الافتراضي للماكينة.

وعموماً تعتبر القدرة الكهربائية نموذجية عندما تكون موجات الجهد للـ 3-phases جيبية ونقية ، عند التردد الأساسي 50 Hz ، ولها نفس القيمة التي تسمى بالجهد الاسمي أو المقنن ، وبين كل منها زاوية 180 درجة بين كل وجهين (180 بين أعلى قمتين) . وعند حدوث أي ابتعاد عن هذا الوصف ينتج تشوه في الجهد وبالتالي في القدرة.

## 2-2-28 جودة القدرة أم جودة الجهد؟

من الملاحظ أننا نستخدم مصطلح جودة القدرة Power Quality في حين أن أغلب المعاملات التي سنراقبها تتعلق بالجهد ، فلماذا سميت جودة القدرة ولم تسم جودة الجهد؟

من الناحية الفنية ، ومن حيث المصطلحات الهندسية فإن القدرة تتناسب مع حاصل ضرب الجهد والتيار ، وحيث أن أي مؤسسة منتجة للطاقة الكهربائية يمكنها فقط السيطرة على جودة الجهد و لكن ليس لها أن تسيطر على التيارات التي تسحبها الأحمال ، ومن هنا كان الاهتمام منصبا على جودة الجهد (حيث نملك قدرة على تغييره وتحسينه) ، ويبقى سؤال : فلماذا لا تسمى جودة الجهد إذن؟

نعلم أن هناك دائما علاقة وثيقة بين الجهد والتيار في أي نظام كهربائي ، وعلى الرغم من أن المولدات قد توفر موجة جهد جيبية شبه مثالية إلا أن التيار المار يمكن أن يسبب مجموعة متنوعة من الاضطرابات في الجهد الكهربائي ، على سبيل المثال:

- التيار الناتج عن حدوث ماس كهربائي يتسبب في حدوث هبوط في الجهد (sag) أو ربما يصل لمرحلة انهيار لقيمة الجهد .
- التيارات الناتجة من البرق الذي يمر عبر خطوط الكهرباء والتي تؤدي الي نبضات جهد عالية قد تدمر في كثير من الأحيان العزل .
- التيارات تنتشوه من الأحمال المنتجة للتوافقيات وبالتالي تشوه الجهد لأنها تمر من خلال مقاومة النظام وهكذا يصل الجهد مشوها للمستخدمين حتى الذين لا يوجد لديهم أحمال مشوهة للتيار .

لذلك نجد أن الجهد هو الذي يقلقنا في نهاية المطاف لكنه يؤثر ويتأثر بقيمة التيار ومن ثم فالحل أن نجعلهما معا في مصطلح واحد هو جودة القدرة.

### 3-2-28 أسباب الاهتمام بجودة الطاقة الكهربائية

الكثير من العمليات أصبحت متكاملة في الشبكة الكهربائية ، (integrated processes) وبالتالي فإن فشل أي مكون سيترتب عليه توابع هامة .

ظهور جيل جديد من الأحمال الكهربائية ذو طبيعة مختلفة منها الأحمال التي تعتمد على المعالجات الدقيقة والأجهزة الإلكترونية (microprocessor-based controls and power electronic devices) وهذه الأحمال أكثر تأثرا من غيرها من الأحمال القديمة بالتغيرات في جودة القدرة الكهربائية . وهذه إحصائيات بنسب تأثر بعض من هذه الأجهزة بمشاكل جودة القدرة:

- Computer lockouts (20%)
- Light flickering (22%)
- Electronic card failures (18%)
- Power Factor correction system failures (17%)
- Failures in high load switching (16%)
- Neutral conductor overheating (12%)
- Unexpected breaker operation (11%)
- Power meters inaccurate readings (6%)

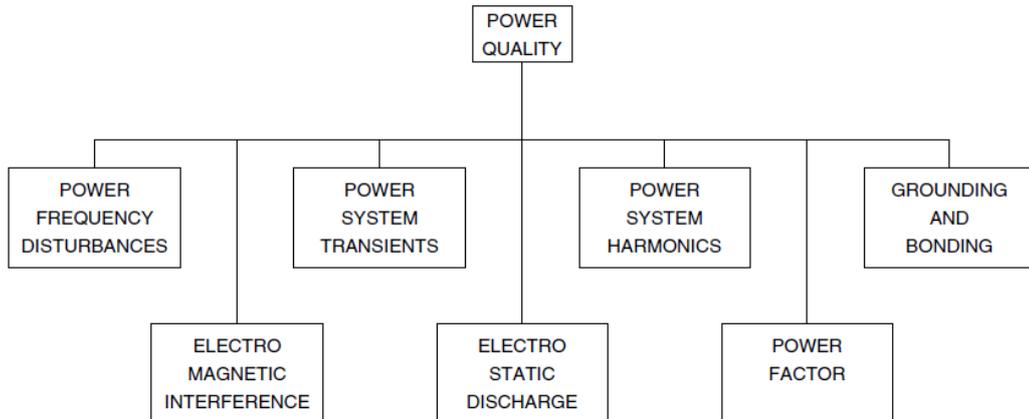
### 4-2-28 مظاهر عدم جودة القدرة:

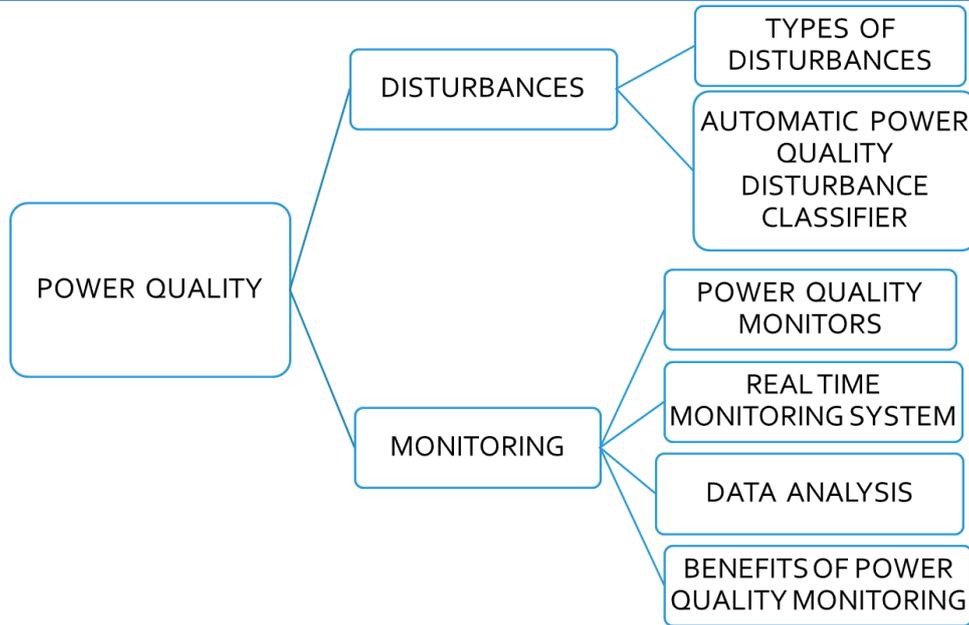
يمكن تصنيف مظاهر عدم جودة القدرة بعدة أساليب ، منها:

1. Long-Duration Voltage Variations
  - over voltage
  - under voltage
2. Short-Duration Voltage Variations
  - Sag
  - Swell
3. Interruption
  - Long interruption (Black out)

- Short Interruption
- 4. Transients
  - a. Impulse Transient Voltage
    - Spikes
    - Notches
  - b. Oscillator Transient Voltage (Noise)
    - Voltage unbalance
    - Voltage Fluctuation
- 5. Distortions
  - DC offset
  - Harmonics
- 6. Frequency variations
  - flickers

وهذه قائمة بأهم العناوين العامة في موضوع جودة القدرة:





### 28-2-5 أهم المواصفات التي تعنى بمشاكل جودة القدرة

IEEE 519	Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems
IEEE 1100	Recommended Practice for Powering and Grounding Sensitive Electronic Equipment
IEEE 1159	Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality
IEEE P1433	Power Quality Definitions
IEEE P1453	Voltage Flicker
IEEE P1564	Voltage Sag Indices

والجدول التالي يلخص القيم القياسية لكل ظاهرة من الظواهر السابقة طبقاً للمواصفة العالمية IEEE :1159

## جدول 1-28

IEEE1159-EN50160 Levels				
IEEE 1159				EN50160
No.	Categories	Typical Spectral Content	Typical Duration	Typical Voltage Magnitude
	Short Duration Variations			
	Instantaneous			
7	Sag		0.5-30 Cycles	0.1-0.9 pu
8	Swell		0.5-30 Cycles	1.1-1.8 pu
	Momentary			
9	Interruption		0.5 Cycles-3s	<0.1 pu
10	Sag		30 Cycles-3s	0.1-0.9 pu
11	Swell		30 Cycles-3s	1.1-1.4 pu
	Temporary			
12	Interruption		3 s-1 min	<0.1 pu
13	Sag		3 s-1 min	0.1-0.9 pu
14	Swell		3 s-1 min	1.1-1.2 pu
	Long Duration Variations			
15	Interruption, Sustained		>1 min	0.0 pu
16	Undervoltages		>1 min	0.8-0.9 pu
17	Overvoltages		>1 min	1.1-1.2 pu

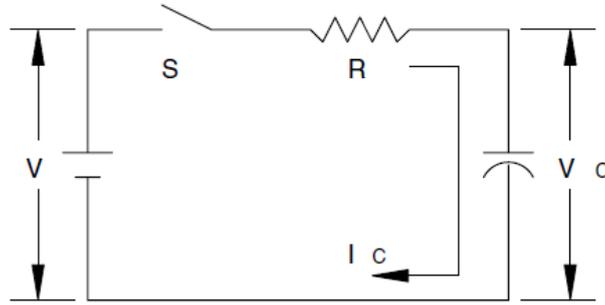
## القسم الأول من أنواع الهزات العابرة:

## الهزات العابرة المسببة لتغير في شكل الموجة

سنلاحظ في هذا القسم أن الهزات العابرة فيه تسبب تغيير طفيفا في شكل وقيمة الموجة ، على عكس الهزات التي ستدرس في القسم الثاني والثالث والتي تحدث تغيير كبيرا في قيمة الموجة سواء بالارتفاع كما في القسم الثاني أو بالانخفاض كما في القسم الثالث.

## 3-28 الهزات عند تطبيق DC على مكثف ومقاومة

في هذه الحالة (شكل 3-28) ستزيد قيمة الجهد على المكثف من صفر حتى تصل إلى  $V$  ، بينما ستتناقص قيمة تيار شحن المكثف من قيمة عظمى هي  $V/R$  وذلك عند لحظة البدء ثم يتناقص Exponentially حتى يصل إلى الصفر حين يتم شحن المكثف تماما.



شكل 3-28

وستكون قيمة الجهد على المكثف وكذلك التيار المار خلال المكثف تحكمه المعادلات التالية (بفرض أن المكثف كان غير مشحون عند البدء)

$$V_C = V(1 - e^{-t/RC})$$

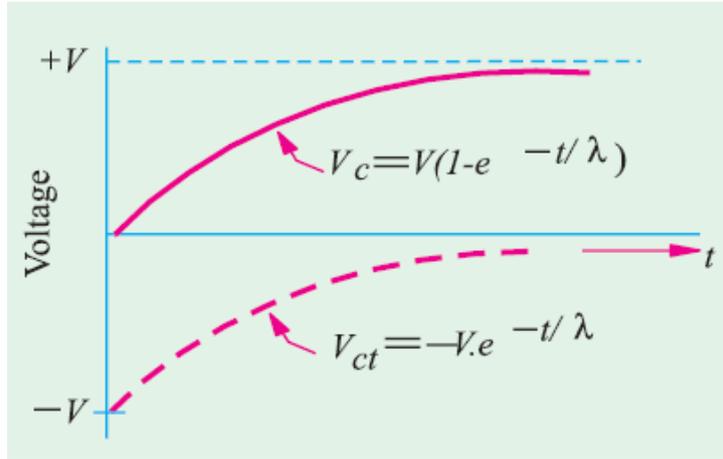
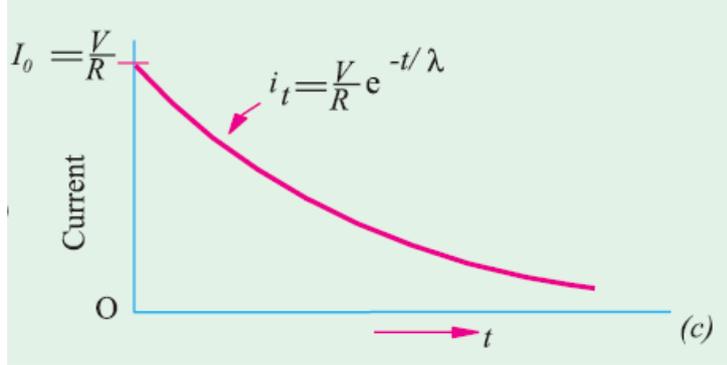
$$I_C = (V/R)e^{-t/RC}$$

$$RC = \lambda$$

وكما تلاحظ من الشكل 4-28 ، فإن الجهد مكون من جزئين :

- الجزء الأول هو الخاص بال-SS

- والجزء الثانى وهو الجزء الـ Exponentially ، وهو ما يمثل جزء الـ Transient .

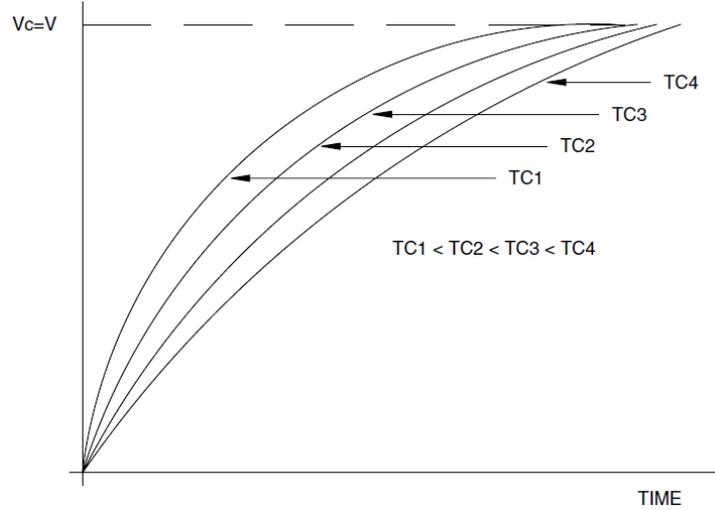


شكل 4-28

والـ Time Constant يقاس بالثانية هو الثابت الذى يساوى RC فى معادلة الجزء الخاص بالـ Transient ، ويرمز له بالرمز  $\lambda$  ، ويمثل الزمن الذى تستغرقه Exponential curve ليصل إلى 36% من قيمته الأصلية (تساوى بالضبط  $e-1$ ). فإذا وصلت قيمة الزمن  $(t)$  إلى ضعف الـ Time Constant فستصل قيمة التيار إلى 13% ( $e-2$ ) بينما ستكون القيمة بعد مرور خمسة أمثال الـ TC مثلا قد تلاشت تقريبا كما فى حالة تيار شحن المكثف المرسوم هنا. وهو ما حدث أيضا مع الجزء الخاص بالـ Transient فى إشارة الجهد حيث تلاشت مع الوقت ولم يتبق سوى الجزء الخاص بالـ SS ويساوى .V

## 1-3-28 مفهوم الـ Time Constant, TC

يعتبر الـ TC مقياساً لمدى سرعة استرجاع النظام لعافيته بعد تأثره بهزة معينة . فكلما زادت قيمة المكثف أو المقاومة كلما كانت النظام بطيئاً في استجابته كما في الشكل 5-28.



شكل 5-28 :

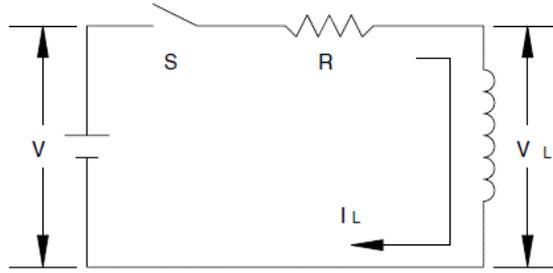
## 4-28 الهزات عند تطبيق DC على ملف ومقاومة

في هذه الحالة (شكل 6-28) ستكون قيمة تيار الملف والجهد تحكمه المعادلات التالية (بفرض أن التيار بالملف كان صفراً عند البدء) :

$$V_L = Ve^{-tR/L}$$

$$I_L = (V/R)(1 - e^{-tR/L})$$

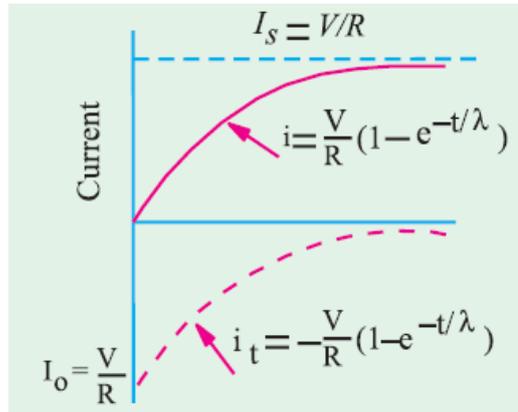
$$L/R = \lambda$$



شكل 6-28

لاحظ هنا أن قيمة الـ Time Constant في حالة الـ R-L Circuit يساوي  $L/R$  ويرمز له بالرمز  $\lambda$  (تذكر أنه في حالة R-C Circuit كان يساوي RC ) ، وبالتالي فكلما زادت قيمة الملف أو قلت قيمة المقاومة كلما كانت النظام بطيئاً في استجابته.

تذكر هنا لماذا نهتم بمعرفة قيمة الـ X/R ratio الخاصة بأى شبكة ، فالآن نفهم أن هذه النسبة تمثل الـ Time Constant الخاص بالدائرة والذي يعبر عن مدى سرعة وصول الشبكة لحالة الـ SS (شكل 28-7).

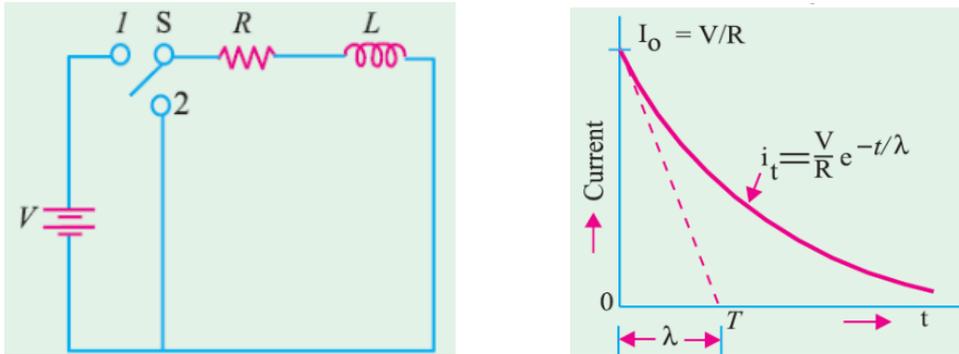


شكل 7-28

لاحظ أن التيار كما ذكرنا سابقاً مكون من جزئين أحدهما وهو الخاص بالـ Transient سيختفي بعد مرور فترة زمنية تعادل عدد معين من مضاعفات الـ Time Constant ولذا قد تطول أو تقصر حسب قيمة الـ TC والذي تتحكم الـ R and L في قيمته .

لاحظ أنه لو أغلقت الدائرة على الوضع رقم 2 في الشكل 8-28 فإن التيار لن يكون هناك له source ليستمر خلال الـ SS ، ومن ثم لن يكون لدينا سوى تيار واحد فقط هو تيار الـ Transient الذي يبدأ من قيمة عظمى وينتهي للصفر.

تذكر الملحوظة الهامة أن تيار الـ Transient ليس له Source سوى الطاقة المخزنة في الملف أو المكثف والتي سرعان ما تنتهي وينتهي معها حالة الـ Transient كما في الشكل.



شكل 8-28

**Example 22.2.** A circuit of resistance  $10 \Omega$  and inductance  $0.1 H$  in series has a direct voltage of  $200 V$  suddenly applied to it. Find the voltage drop across the inductance at the instant of switching on and at  $0.01$  second. Find also the flux-linkages at these instants.

(Basic Electricity, Bombay Univ.)

**Solution. (i) Switching instant**

At the instant of switching on,  $i = 0$ , so that  $iR = 0$  hence all applied voltage must drop across the inductance only. Therefore, voltage drop across inductance = **200 V**.

Since at this instant  $i = 0$ , there are no flux-linkages of the coil.

**(ii) When  $t = 0.01$  second**

As time passes, current grows so that the applied voltage is partly dropped across the resistance and partly across the coil. Let us first find  $iR$  drop for which purpose, we need the value of  $i$  at  $t = 0.01$  second.

Now, time period of the circuit is  $\lambda = L/R = 0.1/10 = 0.01$  second. Since the given time happens to be equal to time constant,

$$\therefore i = (200/10) \times 0.632 = 12.64 \text{ A}; iR = 12.64 \times 10 = \mathbf{126.4 \text{ V}}$$

$$\text{Drop across inductance} = \sqrt{200^2 - 126.4^2} = \mathbf{155 \text{ V}}$$

$$\text{Now, } L = N \Phi / i \quad \text{or} \quad N\Phi = Li$$

$$\therefore \text{Flux-linkages } Li = 0.1 \times 12.64 = \mathbf{1.264 \text{ Wb-turns.}}$$

## 5-28 الهزات عند تطبيق AC على ملف ومقاومة

لو فرضنا أن لدينا AC Source له جهد قيمته تساوى  $v = V_m \sin(\omega t + \Phi)$  وتم وضعه فجأة على دائرة بها  $R+L$  ، ففي هذه الحالة سيمر كما اتفقنا تيار مكون من جزئين : SS + Transient أو

$$I = I_s + I_t$$

فأما الجزء الخاص بال-SS فيحسب طبقا لقواعد ال- Circuits العادية ويساوى

$$I_m = \frac{V_m}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} = \frac{V_m}{Z}$$

وتكون صورته النهائية هي

$$i_s = I_m \sin(\omega t + \Psi - \phi)$$

طبقا لقواعد ال- Circuits العادية حيث  $\Phi$  هي الزاوية التي يتأخر بها التيار عن الجهد وتساوى  $\tan^{-1} X_L/R$

أما الزاوية  $\Psi$  فتمثل الزاوية التي تصادف أن تم غلق الدائرة عندها وقد تكون أى قيمة عشوائية لأنك لا تتحكم فى لحظة غلق الدائرة بدقة .

أما جزء ال- Transient فكما اتفقنا سابقا يكون فى حالة دوائر ال- R-L مكونا من جزء متناقص Exponentially بقيمة عظمى هي  $I_0$  . و يكون التيار الكلى هو مجموع الجزئين الثابت والمؤقت

$$i_t = I_0 e^{-t/\lambda} \quad \therefore i = I_m \sin(\omega t + \Psi - \phi) + I_0 e^{-t/\lambda}$$

وللحصول على قيمة  $I_0$  فى دوائر ال- AC نستخدم الشروط التي تصف حالة بدء الدائرة عند  $t=0$  فلو فرضنا أنه عند  $t=0$  كانت  $i=0$  سنحصل على قيمة  $I_0$  كما فى المعادلات التالية:

$$0 = I_m \sin(\Psi - \phi) + I_0 \quad \therefore I_0 = -I_m \sin(\Psi - \phi)$$

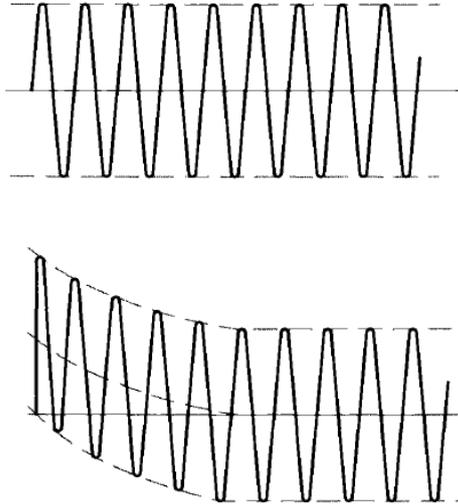
من الواضح أن قيمة  $I_0$  تتوقف على قيمة الزاوية  $\Psi$  وهذا يعنى أن القيمة العظمى لجزء ال- Transient تتوقف على توقيت لحظة غلق الدائرة وهل كانت مثلا عند زاوية تساوى صفرا أم تساوى 90 أو قيمة

بينهما. وهذا هو السبب الذى يجعل من يدرس قيمة تيار العطل عند الحالات المختلفة يقوم بدراسة الأعطال عند لحظات مختلفة من الـ sin wave ، والسبب كما ذكرنا أن قيمة تيار الـ Transient يتأثر بشدة بلحظة حدوث العطل.

وعموما فإن المعادلة العامة للتيار فى النهاية ستساوى

$$i = I_m \sin(\omega t + \Psi - \phi) - I_m \sin(\Psi - \phi) e^{-t/\lambda}$$

لاحظ أنه عند  $t=0$  لو كانت  $\Phi = \Psi$  فعندئذ ستكون  $I_0 = 0$  = صفر بمعنى أننا لن يكون لدينا جزء Transient كما فى الجزء الأول من الشكل 9-28 ، بينما يكون الجزء الخاص بالـ Transient فى أقصاه عندما تكون  $\Phi - \pi = \Psi/2$ .



شكل 9-28 :

## القسم الثاني من أنواع الهزات العابرة

## الهزات العابرة المسببة لارتفاع في الجهد

الهزات العابرة ، أو الـ Transients ، المسببة لارتفاع في الجهد تتشابه جميعها في أنها تحدث لمدة وجيزة جدا .

ورغم أن تأثيرها يظهر في إشارتي الجهد والتيار إلا أنه قد تم التعارف على تسميتها بالـ ( Voltage Surges ) ، أو الارتفاعات الحادة في الجهد لأنها تكون غالبا أكثر وضوحا في إشارة الجهد . وبعض المراجع العربية تستخدم مصطلح "تمورات الجهد" للتعبير عن هذه الظواهر .

## 6-28 ظاهرة ارتفاع الجهد

وهناك أسباب متعددة لحدوث هذه الهزات في منظومة القوى منها :

- ما ينشأ بسبب ظروف جوية طارئة ، والحالة الأشهر هنا هي حالة الإصابة بالصواعق البرقية .
- وقد تحدث هذه الـ Surges نتيجة لظروف التشغيل ، حيث تتولد نبضات جهد عالي بتردد يصل إلى عدة مئات من KHz ، كما في الحالات التالية :
- عند لحظات حدوث / فصل الأعطال (فصل وتشغيل قواطع الدائرة)
- عند فصل وتشغيل المكثفات
- عند فصل وتشغيل بعض الأحمال لاسيما المحركات الكبيرة
- عند فصل وتوصيل المحولات

ويمكن بصورة عامة أن نقول أن فصل وتشغيل أى معدات تحتوى على ملفات أو مكثفات ستسبب في حدوث Voltage Surges ، كما ذكرنا في المقدمة لهذا الفصل .

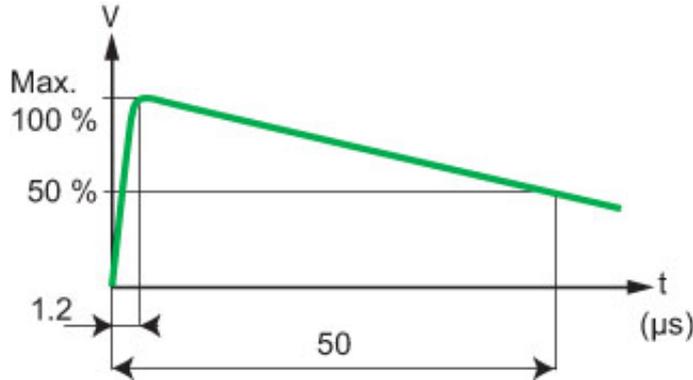
- وهناك سبب ثالث لحدوث هذه الـ Surges وهو تفريغ الشحنات الاستاتيكية ، فكما نعلم جميعا فمجرد أن يمشى إنسان على موكيت أو سجادة مثلا فسيتراكم على جسمه كمية الشحنات ترفع قيمة جهد الجسم إلى قيم قد تصل إلى 15 kV (ويصبح الجسم كأنه مكثف مشحون) فإذا تلامس مع جسم له جهد أقل فسيحدث تفريغ Discharge للشحنة وتمر طاقة كهربائية قد تكون كافية لتدمير على الأقل بعض المعدات الإلكترونية التي قد يلمسها ، ولذا تتخذ إجراءات صارمة

- بالنسبة للأشخاص الذين يتناولون هذه المعدات من ضمنها ضرورة أن يلبس سوار مؤرض في معصمه أو تكون الأرضية من مادة Anti-static إلخ.
- ومن الأسباب الأخرى حدوث قطع في الموصلات أو انهيار في العازل مما يتسبب في حدوث ظاهرة الـ Ferro resonance مع ملاحظة أن التردد في هذه الحالة الأخيرة لا يكون مرتفعا بل نفس تردد الشبكة.

### 1-6-28 طبيعة الـ Voltage surges

هي نبضات أو ارتفاعات حادة في الجهد تحدث بمعدل سريع جدا ، وبالتبعية ستتسبب في ارتفاعات حادة في التيار أيضا . و هذه الـ Surge عبارة عن طاقة كهربائية هائلة ذات جهد يصل في حالة الصواعق البرقية مثلا إلى عدة ملايين من الـ V ، والتيار الذي يمر خلال البرق قد يصل إلى 200 kA بمتوسط قدره 40 kA ، كما يصل في الحالات الأخرى إلى عدة آلاف من الفولت . ويتوقف مدى تأثير هذه الـ Surges على عدة عوامل منها:

- زمن الارتفاع Rise Time ، وهو الزمن الذي تستغرقه موجة الجهد للوصول للقيمة العظمى ، وغالبا لا يتجاوز  $1-2\mu s$  (1.2 في الشكل 10-28).
- زمن دوام الموجة ، وغالبا لا يتجاوز  $50-100\ \mu s$  ، وبعده يكون الجهد قد فقد 50% من قيمته كما في الشكل 10-28 الذي يظهر الشكل التقليدي للـ Voltage surge/ Impulse Wave (ومن ثم يمكن أن نفهم معنى هذا التعبير  $1.2 \times 50\ \mu s$  ) . وتسمى هذه الموجة بالموجة الكاملة كما ستظهر في جداول اختيار الجهود الدفعية Impulse voltage للمعدات لاحقا.
- معدل الارتفاع Gradient ويقاس بالـ kV لكل ميكرو ثانية.



شكل 10-28 :

وهذه القيم الثلاثة تحدد مدى تأثير ال Surge على المعدات ، وبالتالي فعوازل المعدات لابد أن تتحمل هذه الجهود المتوقعة. ومن هنا ظهرت أهمية تحديد مصطلح ال Basic Insulation Level, BIL في المقطع التالي.

### 2-6-28 ماذا نقصد بـ (BIL) Basic Impulse level

يجب دائما توصيف الأجهزة المعرضة لمثل هذه الارتفاعات الهائلة بالجهد بحيث تكون قادرة على تحملها ، ولذا نحتاج إلى عمل اختبارات لقياس ما يعرف بال BIL ، وهي تمثل القيمة القصوى لل Surge التي تتحملها المعدات الكهربائية ، فالمحولات الكهربائية على سبيل المثال يجب أن تتحمل عوازلها مثل هذا الارتفاع المفاجئ في الجهد نتيجة للصواعق أو أي مصدر داخلي من مصادر ارتفاع الجهد المفاجئ كعمليات الفصل والتوصيل على المحول أو المكثفات بالشبكة.

فإذا كان المحول موصلاً بكابلات في ناحيتي الجهد العالي والجهد المنخفض فإن احتمال تعرضه لموجة Surge Voltage ناتجة عن صاعقة أو عوامل خارجية يكون ضئيلاً جداً نظراً لأن الكابلات لها قدرة أكبر من الخطوط الهوائية على تقليل شدة موجة الجهد الدفعية. أما إذا كان المحول موصلاً بخط هوائي فيجب استخدام مانعة صواعق لحماية المحول ، وفي هذه الحالة يسمح بخفض قدرة عزل المحول المطلوبة. ويجب أن توضع مانعة الصواعق بحيث تكون أقرب ما يمكن من المحول.

جدول 2-28

### BASIC INSULATION LEVEL AS PER IS (2165 – 1962)

Nominal system volt kV (rms)	Highest system volt kV (rms)	Impulse withstand volt kVp for test		One minute power frequent volt kV (rms)	
		Full insulation	Reduced insulation	Full insulation	Reduced insulation
132 kV	145	650	550	275	230
220 kV	245	1050	900	460	395
400 kV	420		1550		680
			1425		630

Reduced insulation is used where system is effectively earthed.

ورغم أن احتمال تعرض المحول المتصل بكابلات للـ Surge العالية نتيجة البرق ضئيلاً إلا أن المواصفات على سبيل المثال (NEC article 280) تلزم بوضع Surge arrester ، لكن ليس لمنع تأثير البرق بل لمواجهة تأثير الجهود الخاطفة التي يمكن أن تصل للمحول نتيجة الـ Switching مثلاً. والجدول 3-28 يعطى القيم المستخدمة فى الشبكة المصرية لتوصيف تحمل المعدات للجهود العالية فى شبكات الجهود المختلفة (راجع مصطلح الموجة الكاملة فى المقطع السابق):

جدول 3-28 : توصيف المعدات حسب تحملها للجهود الدفعية

الجهود المقنن KVn rms	الجهود الأقصى KVm rms	جهود التحمل الدفعية بموجة كاملة KV peak	جهود التحمل يتردد المنظومة لرقبة واحدة KV rms
11	12	75	38
22	24	125	50
33	36	170	75
66	72,5	325	140
110	123	550	230
132	145	650	275
220	245	1050	460
395	460	1425	630

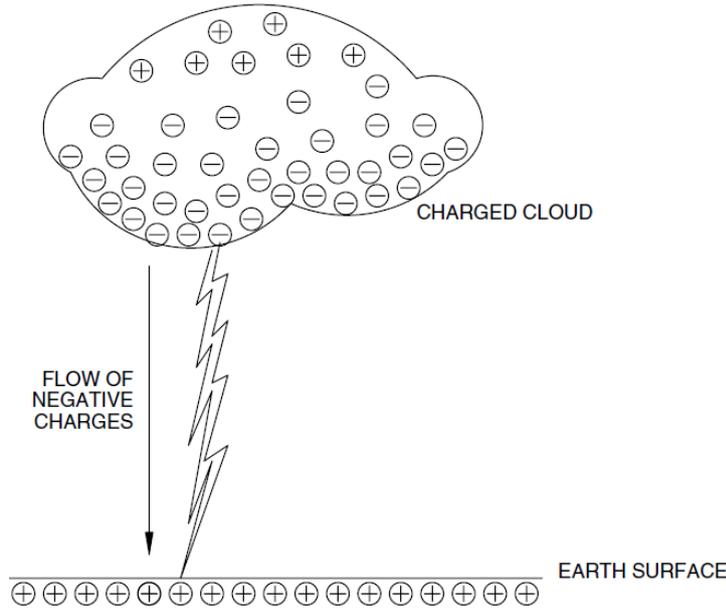
وفيما يلى سندرس بالتفصيل الحالات المختلفة للهزات العابرة المسببة للارتفاع فى الجهود وتحديدًا :

- حالة الإصابة بالصواعق البرقية.
- عند لحظات حدوث / فصل الأعطال (فصل وتشغيل القواطع)
- عند فصل وتشغيل المكثفات
- عند فصل وتشغيل بعض الأحمال لاسيما المحركات الكبيرة
- حالات الـ Ferro resonance

## 7-28 الهزات العابرة الناتجة عن الصواعق البرقية

### 1-7-28 ما هو البرق؟

البرق يمثل تعبيراً مرئياً عن كمية هائلة من الطاقة الكهربائية المحمولة على السحب. وأغلب النظريات تفسر تراكم هذه الشحنات ونشوؤها بحدوث احتكاك بين تيارات الهواء وبين الرطوبة وذرات الغبار الموجودة في السحابة ، مما يترتب عليه ظهور كميات هائلة من الشحنات الاستاتيكية السالبة على الجزء السفلي من السحابة ، بينما تتراكم شحنات موجبة في أعلى السحابة ، ويجذب المجال الكهربى السالب فى أسفل السحابة الشحنات الموجبة فى الأرض فتظهر شحنات موجبة على الأسطح (شكل 11-28) لاسيما على المباني العالية المقابلة للسحابة ، وهذا يعنى أن الهواء بين السحابة والمبنى قد أصبح يمثل مكثف هوائى مشحون ، فإذا زاد فرق الجهد بين طرفى هذا "المكثف" الافتراضى عن جهد الانهيار للهواء (30 kV/cm =  $3 \times 10^6$  V/m) فسيحدث تفريغ للشحنة على صورة شرارة بين السحابة والمبنى .

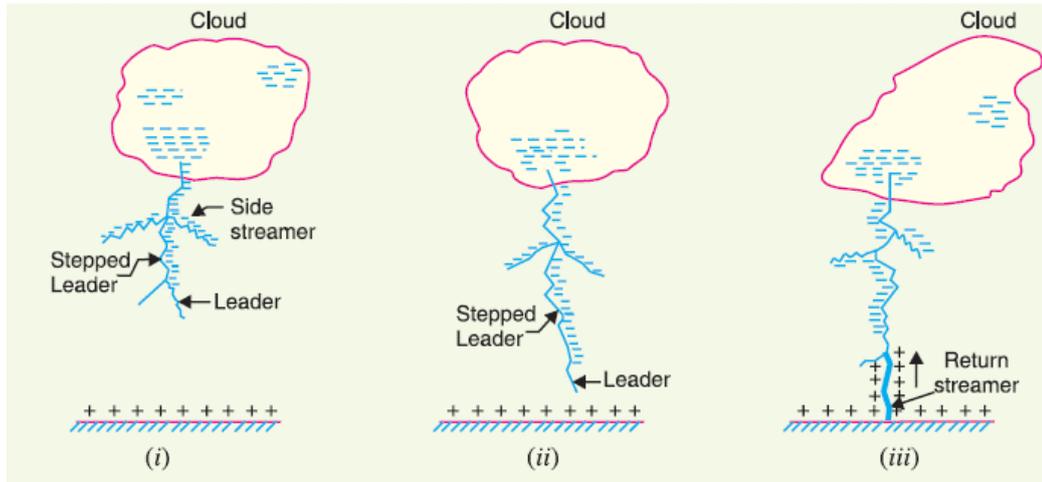


شكل 11-28 :

فعليا يبدأ الهواء المجاور للسحابة فى التأين بتأثير الشحنة الهائلة بالسحابة ويتكون ما يعرف بالـ Leader Streamer كما فى الشكل 12-28 ويبدأ هذا الخيط الرفيع المتأين من الهواء فى التمدد طالما السحابة

لاتزال قادرة على أن تمده بالشحنات مكونا مسار موصلا للتيار حتى يقترب من الأرض وعندما يلامس الأرض أو أى جسم فيها تنتقل الشحنات الموجبة التي كانت مقيدة على الأرض لتسلك نفس الطريق الذى صنعه الـ Leader Streamer مرتفعة للأعلى ويحدث تفريغ هائل نتيجة اتصال الشحنات الموجبة من الأرض بالسالبة فى السحابة ويحدث الشرارة العظيمة التى نسميها بالبرق.

و هذه الشرارة عبارة عن طاقة كهربية هائلة ذات جهد يصل إلى عدة ملايين من الـ V ، والتيار الذى يمر خلال البرق قد يصل إلى 200 kA بمتوسط قدره 40 kA ، وأهم ما يميزها هو سرعة بناء شكل موجة الجهد ، ففى فترة لا تتجاوز 1-2µs يكون الجهد قد وصل إلى قيمته القصوى ، ثم فيما لا يتجاوز 50-100 µs يكون الجهد قد فقد 50% من قيمته كما فى الشكل الموجود فى مقدمة الفصل الذى يظهر الشكل 10-28 للـ Voltage surge/ Impulse Wave التى تتولد نتيجة الصاعقة.(ومن ثم يمكن أن نفهم معنى هذا التعبير 1.2x50 µs).

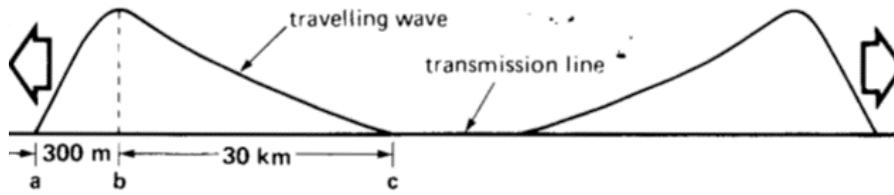


شكل 12-28 :

## 2-7-28 تأثير جهود الأجسام بالبرق

رغم قصر مدة التفريغ إلا أنها تكون كافية لانهاية العزل لأي من الموصلات على الأرض إذا وصلت الصاعقة إليه. الصواعق هي مصدر قوي للتغير المتسارع في الجهد الكهربى "impulse transient" و ينتج عن ذلك مرور تيار هذه الصواعق إلى الأحمال الكهربائية و يؤدي إلى حدوث زيادة في الجهد كبيرة.

بصفة عامة ينشأ عن اصطدام صاعقة البرق بالخط ارتفاع لحظى حاد في جهد نقطة الاصطدام مما ينشأ عنه تولد Travelling Wave ترحل يمينا ويسارا على الخط (شكل 28-13) حتى تصل إلى نهاية الخط من الجهتين حاملة معها شحنة طاقة هائلة ثم تنعكس هذه الموجات عند محطات نهاية الخط ، وتكرر العملية حتى تفقد الموجة قوتها نتيجة استنفاد طاقتها في مقاومة الخط الأومية.



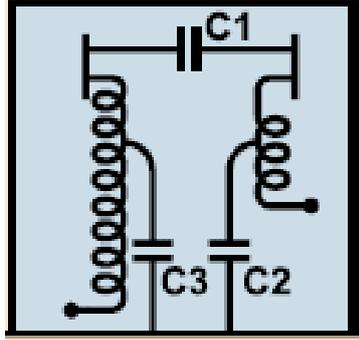
شكل 28-13 :

ويتميز هذا النوع من الصواعق المباشرة Direct Strokes بارتفاع حاد في الجهد يصل إلى مليون فولت/ميكروثانية بالإضافة إلى قيمة تيار عالية تصل إلى 200 ك امبير ، فإذا لم يتم تفريغ هذه الشحنات قبل وصولها لمفاتيح المحولات والأحمال فإنها يمكن أن تدمر كل شيء.

كما أن هذه الطاقة الهائلة الزاحفة على الخط تتسبب في عمل قوس كهربى Electric Arc على عوازل الأبراج أثناء زحفها على الخط لاسيما على سلاسل العوازل القريبة من نقطة الاصطدام ، لكن لحسن الحظ فإن طاقة الصاعقة تضعف كلما تحركت لمسافة أطول بسبب استهلاك الطاقة خلال مقاومة الخط وبسبب حدوث تفريغات خلال ال Arc Gaps المركبة على سلاسل العوازل (راجع الباب الثانى من هذا الكتاب).

وعندما تصل الصاعقة إلى المحول فإن المحول يقوم بدور فعال جدا في مواجهتها ، فرغم أننا نعلم أن المحول ينقل الجهد من الجانب الابتدائى للثانوى حسب ال Turns Ratio إلا أن هذا الكلام صحيح فقط فى مدى الترددات المنخفضة ، أما فى حالة وجود ترددات عالية فإن المحول سيمثل معاوقة عالية جدا  $X_L = 2 \pi f L$  بسبب التردد العالى. ومن ثم فلن تستطيع الصاعقة الانتقال للجانب الثانوى من خلال الحث المغناطيسى مثلما يحدث فى المحول مع الجهد العادى .

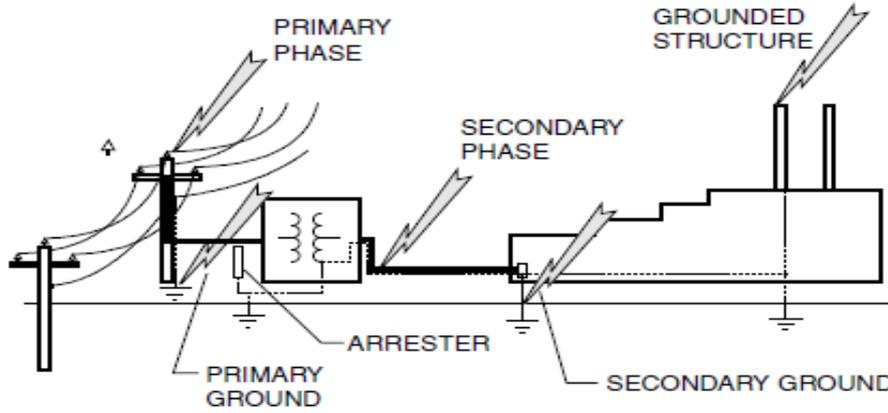
لكنها للأسف قد تستطيع الوصول للجانب الثانوي من خلال الـ C1 coupling capacitor بين الملفات شكل 14-28 ، والتي تقدم مساراً بديلاً للموجات ذات التردد العالي و هذا يؤدي إلى زيادة الجهد الكهربائي في الجانب الثانوي من المحول بقيمة أكبر حتى من التي كانت المتوقعة من نسبة عدد اللفات "turns ratio" ما لم تحل هذه المشكلة بطريقة ما .



شكل 14-28

كما يوجد طرق أخرى لعبور تيار الصواعق إلى الجهة الأخرى عبر موصل الأرضي " ground conductor path" فهناك عدد من الممرات التي من الممكن أن يدخل عن طريقها تيار الصواعق إلى نظام الـ Earthing و هو موضح في الشكل 15-28 عن طريق عدد من الخطوط المنقطعة " dotted lines" .

وبالطبع فمن أهم مشاكل الصواعق أنها ترفع الجهد إلى قيم مدمرة على كافة الأجهزة التي تقع في طريقها حتى مكان تفريق الشحنات . كما قد يرتفع الجهد على موصلات منظومة الـ Earthing إلى عدة آلاف من الفولت ، الأمر الذي يؤدي لتلف الأجهزة الإلكترونية المؤرضة بتلك المنظومة.



شكل 15-28 : تسرب تيار الصاعقة عبر الارضي

### 3-7-28 طرق الحد من تأثير الصواعق في شبكات الجهد العالي:

يتم حماية المعدات الكهربائية من زيادة الجهد الناتج من الصواعق بتركيب مانعة صواعق Lightning arrester ويتم حماية خطوط النقل بواسطة سلك الأرضي المركب في أعلى أبراج خط النقل .

و بالنسبة لمانع الصواعق فهي ببساطة عبارة عن مقاومة غير خطية تتغير قيمتها بتغير الجهد الواقع عليها فتكون قيمتها كبيرة جدا عند الجهود العادية المسموح بها و عند حدوث ارتفاع مفاجئ في الجهد تقل قيمتها وتعمل Short مما يؤدي إلى تسريب الشحنة الكهربائية إلى الأرض و بذلك يتم حماية المعدات من الجهد المفاجئ (راجع تفاصيلها في باب محطات التحويل).

ولكل مستوى جهد في الشبكة الكهربائية توجد له قيمة معينة لا Over voltage لا يتعداها فمثلا خط نقل جهد 66 كيلو فولت تكون أقصى قيمة لزيادة الجهد هي 325 كيلو فولت طبقا للمواصفات القياسية IEC .

والجدول 1-28 يحتوى على البيانات الفنية لـ surge Arrester مركب على خط 220kV . ويمكن ملاحظة أهم بنود التوصيف في مثل هذه الحالات من هذا الجدول.

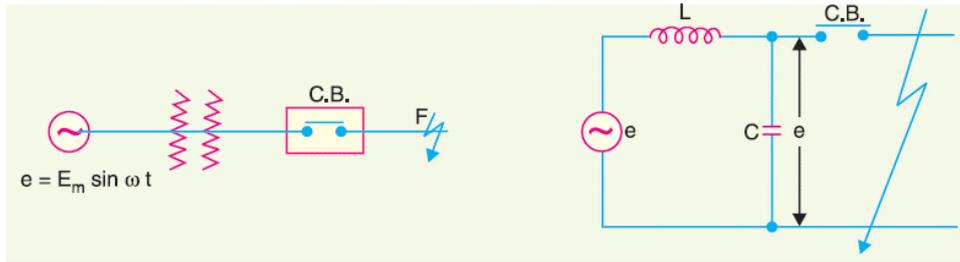
جدول 1-28 :

Technical Datasheet	Offer number: 27051032	Attachment
<b>Siemens H-Pos: 100; 3EP2 214-3PG43-1CZ1</b>		
<b>System Information</b>		
Nominal System Voltage (Un)	220	kV
Highest Voltage of Equipment (Um)	245	kV
Basic Insulation Level (BIL)	1 050	kV
Maximum altitude of installation (a.s.l.)	1000	m
Neutral system earthing	solid	
Power Frequency	50	Hz
<b>Electrical data</b>		
Applied Standard	IEC 60099-4	
Rated voltage (Ur)	214	kV
Maximum continuous operating voltage (Uc / MCOV)	171	kV
Nominal discharge current (In, 8/20 µs)	20	kA
Line discharge class	4	
Long duration impulse current withstand (2 ms)	1 600	A
High current impulse withstand (4/10 µs)	100	kA
Rated short circuit current (0,2 s)	65,0	kA
Maximum residual voltage at :		
20 kA 1/2 µs	574	kV
5 kA 8/20 µs	463	kV
10 kA 8/20 µs	492	kV
20 kA 8/20 µs	541	kV
40 kA 8/20 µs	591	kV
500 A 30/60 µs	399	kV
1 kA 30/60 µs	409	kV
2 kA 30/60 µs	428	kV
Temporary overvoltage for 1 s	246	kV
Temporary overvoltage for 10 s	230	kV
Energy discharge capability - thermal	10,0	kJ/kV <sub>r</sub>
Energy discharge capability - impulse	6,50	kJ/kV <sub>r</sub>
Switching Impulse withstand voltage (250/2500 µs, wet) <sup>1</sup>	1 650	kV
Switching Impulse withstand voltage (250/2500 µs, wet) <sup>2</sup>	1 175	kV
Lightning Impulse withstand voltage (1,2/50 µs) <sup>1</sup>	2 394	kV
Lightning Impulse withstand voltage (1,2/50 µs) <sup>2</sup>	1 800	kV
<b>Mechanical data</b>		
Height (H)	4 860	mm
Minimum creepage distance	10 815	mm
Number of units	3	
Weight (G)	294	kg
Color of housing	brown	
Specified long-term load SLL (F <sub>stat</sub> )	1020	N
Specified short-term load SSL (F <sub>dyn</sub> )	2570	N
Grading ring diameter (d)	1 800	mm
Distance from grading ring to top (l)	1 400	mm
Drawing number	E T HP AR 27051032.0100	

## 8-28 الهزات الناتجة عن فصل الأعطال

عند حدوث عطل فإن الطاقة المخزنة في الـ Power System سواء المخزنة في الملفات أو المكثفات الخاصة بمعدات المنظومة ، هذه الطاقة تعتبر كمية هائلة ومن ثم فإن عملية قطع الدائرة تتمثل بالصعوبة الأساسية فيها في كيفية التخلص من هذه الطاقة الهائلة وكيفية تفريغها من المنظومة. ويقع العبء الأكبر في أداء هذه المهمة على قاطع الدائرة CB حيث يتم داخله استهلاك معظم هذه الطاقة في صورة شرارة بين أقطابه ، لكن هناك جزء آخر من هذه الطاقة يستهلك في عملية Oscillatory Surges على خطوط النقل أو ما تسمى بالـ Travelling Waves وهي بالطبع عملية غير مرغوب فيها لأنه ينتج عنها ارتفاع مؤقت في جهد المنظومة ( TOV Temporary Overvoltage ).

والشكل 16-28 يبين نمودجا لجزء من شبكة يحدث عليها عطل وكيفية عمل دائرة مكافئة لهذه الشبكة.

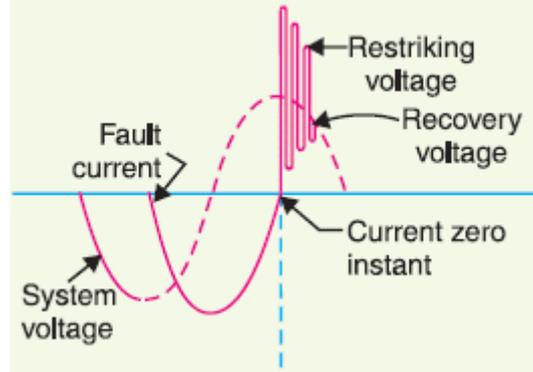


شكل 16 - 28

والدارس للقواطع الكهربائية يجب أن يكون ملما ببعض المصطلحات مثل :

جهد الـ Arcing Voltage وهو الجهد الذى يظهر بين طرفى القاطع أثناء عملية القطع. ثم عندما يصل التيار لقيمة تساوى صفرا أثناء القطع يظهر جهد جديد اسمه Restrike Voltage كما فى الشكل 28-17 وهو يمثل الـ Transient Voltage الذى يظهر بين طرفى القاطع عندما يمر التيار بنقطة الصفر .

وهذه الهزة العابرة ناتجة عن إعادة توزيع وتبديل الطاقة الكهربائية المخزنة فى كلا من المجال الكهربى والمغناطيسى للمصدر الكهربى والخط المتصلين كلاهما بالقاطع .



شكل 17-28

هذا الـ Oscillation يستمر لفترة وجيزة جدا كما في الشكل لكن قيمته قد تصل إلى ضعف قيمة الجهد الأقصى للمنظومة ويجب أن يكون القاطع قادرا على تحمل هذا الجهد.

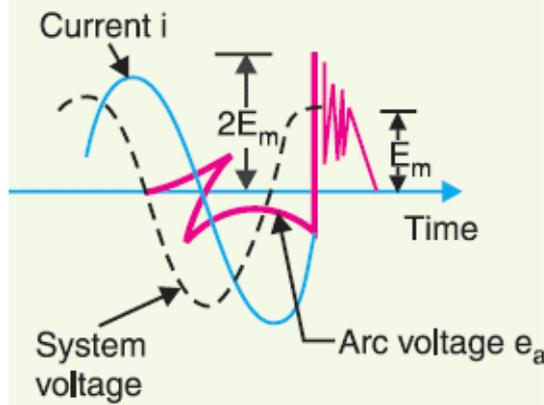
وسيحاول هذا الـ Oscillation أن يستمر أطول ما يمكن محاولا عمل انهيار للقاطع وإعادة عملية التوصيل لكن الـ Losses الموجودة بالقاطع ستضعفه حتى ينتهي ، ونظرا للمشكلة الوحيدة هي هذا الـ Overshoot الذي حدث في البداية والذي قد يتسبب في كسر العزل بين أطراف الـ CB وبالتالي تبقى احتمالية أن تفشل عملية قطع التيار.

وعلى حسب قيمة الـ Rate of Rise لهذا الـ Restrike Voltage ( تسمى RRRV ) ستحدد ما إذا كانت الشرارة ستعكس العزل مرة أخرى أم لا.

فلو كان الـ Rate of Rise of Restrike Voltage, RRRV أعلى من Dielectric strength الخاص بالمادة العازلة المستخدمة بالقاطع فسينكسر العزل ويفشل القاطع في قطع التيار.

وتتوقف قيمة الـ RRRV على عدة عوامل منها قيمة Recovery Voltage وكذلك قيمة تردد الـ Oscillation .

لاحظ أنه بعد حدوث العطل وقبل فتح الـ CB تكون الـ Capacitance غير مؤثرة لأن تيار العطل سيمر خلال الخط (الممثل بـ Inductance) ويرجع خلال الأرض في دائرة مغلقة ولا يحتاج لأي مسار بديل. وعلى هذا فجهود المولد مطبق كله على معاوقة حثية ، ولذا فالتيار تقريبا Pure Inductive حيث أهملنا مقاومة الدائرة ، وبالتالي يتأخر التيار عن الجهد بـ 90 درجة كما في الشكل 18-27



شكل 18-28

أما بعد فتح الـ CB فسيمر التيار خلال الـ Arc الداخلية فيظهر جهد بين طرفي القاطع يسمى Arc Voltage كما في الشكل السابق ويستمر التيار المتردد في المرور حتى ينجح الـ CB في قطعه نهائيا . عند هذه اللحظة (بعد فتح القاطع) يكون جهد المولد ليس أمامه سوى الـ Ind والـ Cap الخاصين بالمنظومة وبالتالي يكونا معا دائرة رنين لها تردد يساوى

$$f_n = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

وبالتالي يظهر فجأة Restrike Voltage بالتردد السابق بين أطراف الـ CB المفتوح محدثا نوعا من الـ Oscillation في الدائرة كما ذكرنا.

أما قيمة الـ  $v$  , Prestriking Voltage فتحسب من المعادلة :

$$v = V \left[ 1 - \cos \left( \frac{t}{\sqrt{LC}} \right) \right]$$

حيث  $V$  تمثل قيمة الجهد لحظة القطع ، وقيمة  $C$  (shunt Capacitance) تحسب من مكان القاطع حتى نقطة العطل وبالتالي كلما صغرنا (بمعنى أن العطل قريب من القاطع) كلما كان الـ Restrike Voltage أعلى وأخطر ، وبالتالي تزيد فرص حدوث الـ Restrike. والعكس صحيح.

**Example 19.3.** In a short circuit test on a circuit breaker, the following readings were obtained on single frequency transient :

- (i) time to reach the peak re-striking voltage, 50  $\mu$  sec  
(ii) the peak re-striking voltage, 100 kV

Determine the average RRRV and frequency of oscillations

**Solution.**

$$\begin{aligned}\text{Average RRRV} &= \frac{\text{Peak re - striking voltage}}{\text{Time to reach peak value}} \\ &= \frac{100 \text{ kV}}{50 \mu \text{ sec}} = 2 \text{ kV}/\mu \text{ Sec} = \mathbf{2 \times 10^6 \text{ kV/sec}}\end{aligned}$$

Natural frequency of oscillations,

$$\begin{aligned}f_n &= \frac{1}{2 \times \text{Time to reach peak value}} \\ &= \frac{1}{2 \times 50 \mu \text{ sec}} \\ &= \frac{1}{2 \times 50 \times 10^{-6}} = \mathbf{10,000 \text{ Hz}}\end{aligned}$$

**Example 19.2.** A 50 Hz, 11 kV, 3-phase alternator with earthed neutral has a reactance of 5 ohms per phase and is connected to a bus-bar through a circuit breaker. The distributed capacitance upto circuit breaker between phase and neutral is 0.01  $\mu$ F. Determine

- (i) peak re-striking voltage across the contacts of the breaker  
(ii) frequency of oscillations  
(iii) the average rate of rise of re-striking voltage upto the first peak

**Solution.**

Inductance per phase,  $L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{5}{2\pi \times 50} = 0.0159 \text{ H}$

Capacitance per phase,  $C = 0.01 \mu\text{F} = 10^{-8} \text{ F}$

- (i) Maximum value of recovery voltage (phase to neutral)

$$E_{max} = \sqrt{2} \times \frac{11}{\sqrt{3}} = 8.98 \text{ kV}$$

$\therefore$  Peak re-striking voltage =  $2 E_{max} = 2 \times 8.98 = \mathbf{17.96 \text{ kV}}$

- (ii) Frequency of oscillations is

$$f_n = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{0.0159 \times 10^{-8}}} = \mathbf{12,628 \text{ Hz}}$$

- (iii) Peak re-striking voltage occurs at a time  $t$  given by ;

$$t = \frac{1}{2f_n} = \pi\sqrt{LC} = \pi\sqrt{0.0159 \times 10^{-8}} = 39.6 \times 10^{-6} \text{ sec} = 39.6 \mu \text{ sec}$$

- $\therefore$  Average rate of rise of re-striking voltage

$$\begin{aligned}&= \frac{\text{Peak re - striking voltage}}{\text{Time upto first peak}} = \frac{17.96 \text{ kV}}{39.6 \mu \text{ sec}} \\ &= 0.453 \text{ kV}/\mu \text{ sec} = \mathbf{453 \times 10^3 \text{ kV/sec}}\end{aligned}$$

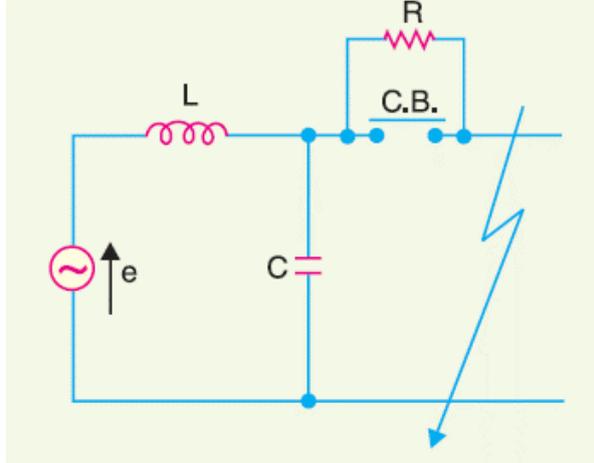
## 28-8-1 طرق الحد من ارتفاع الجهد على أطراف الـ CB

فى الجزء السابق تبين حدوث جهود عالية لاسيما فى حالات الـ Capacitive switching وهنا نعرض لواحدة من الطرق المعروفة للحد من هذا الارتفاع وذلك بإضافة مقاومة على التوازي مع القاطع كما فى الشكل 19-28.

الآن ، عند فصل القاطع وحدث شرارة كما سبق فالجديد هنا أن جزءا من تيار الـ Arc سيمر خلال مقاومة وبالتالي يقل التيار الأسمى الذى كان السبب فى تأين مسار الشرارة. وكلما زادت مقاومة مسار الـ arc كلما زادت نسبة التيار المار خلال المقاومة الخارجية حتى ينقطع تماما تيار الشرارة وتتطفئ بسرعة أكبر مما سبق.

أىضا هذه المقاومة تعمل على الحد من نمو اهتزازات Restrike Voltage ويمكن أن تثبت رياضيا أن تردد هذه الهزات العابرة قد أصبح يساوى

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{1}{4R^2C^2}}$$

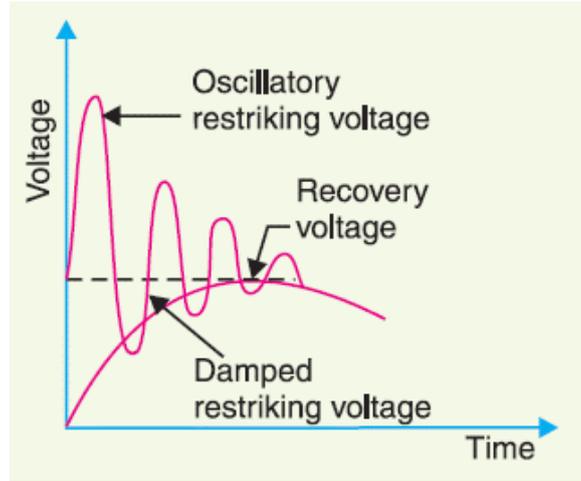


شكل 19-28

فإذا كانت قيمة المقاومة تساوى

$$0.5\sqrt{L/C}$$

فهذا يعنى أن التردد أصبح مساويا صفر وأن الاهتزازات لن تتجاوز قيمة الـ Recover Voltage كما فى الشكل 20-28 ويقال أن الدائرة فى وضع Critically Damped أى على حافة الوصول للقيمة التى لا يحدث معها اهتزازات.



شكل 20-28

## 9-28 الهزات الناتجة عن فصل/توصيل المكثفات

تعتبر المكثفات عنصرا أساسيا فى منظومة القوى الكهربائية ، ولها استخدامات عديدة فى مجالات التحكم ومجالات جودة القدرة Power Quality ضمن أجهزة الـ Power Conditioning . كما تستخدم المكثفات لتزويد أو مد النظام الكهربى بالقدرة التفاعلية " Reactive Power " والتي تستخدم فى تصحيح معامل القدرة الكهربائية " Power Factor Correction " .

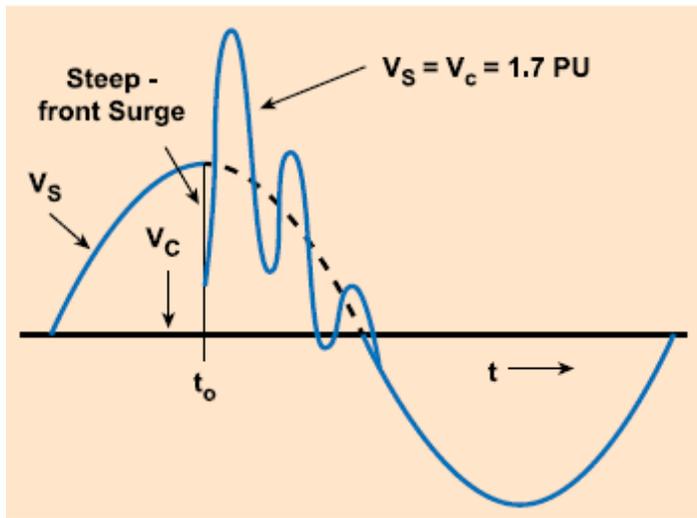
وتستخدم كذلك ضمن الـ Filters المستخدمة لمنع التوافقيات مثلا (راجع فصل التوافقيات التالى) كما تستخدم ضمن منظومة الـ FACTS بأنواعها (راجع الفصل الأخير فى باب نقل القوى الكهربائية) وضمن أجهزة إلكترونيات القوى ولاسيما مع الـ Converters بأنواعها.

وبعض المكثفات يتم توصيلها بالشبكة و شحنها بصورة دائمة Fixed Bank وهذا النوع يمكن أن يغير الـ Time Constant للشبكة أو لجزء منها. (راجع مفهوم الـ TC فى بداية هذا الفصل).

و البعض الآخر يتم توصيلهم أو فصلهم طبقا لمستوى التحميل على الشبكة ، أو طبقا لكمية الـ Reactive Power المراد إمداد الشبكة بها ، و هذا النوع هو المنسوب إليه ظاهرة زيادة الجهد Overvoltage لأن النوع الأول لا يحدث فيه Switching وبالتالي لا يسبب مشاكل مثل النوع الثانى.

### 28-9-1 ماذا يحدث عند توصيل المكثفات؟

ويترتب على عمليات تشغيل المكثفات Capacitor Switching عدة ظواهر تتعلق كلها بالارتفاع فى الجهد أو تتسبب فى حدوث Oscillatory Transient، منها على سبيل المثال: ظهور Steep Front Surge (انخفاض شديد فى لحظة توصيل المكثف). والسبب فى ذلك أن المكثف يبدو للمصدر كما لو كان Short Circuit فى لحظة التوصيل بسبب التردد العالى لحظة البدء ، ثم تبدأ تظهر له إخماد Damping لكن بعد أن تكون هناك موجة جهد عالية تتردد ذهابا وإيابا (فتكون إشارتها موجبة مرة وسالبة مرة أخرى) بين المصدر والحمل محدثة ترددات عالية بعد عملية التوصيل كما أن هذه الـ Travelling Wave تجمع على الجهد الأسمى مرة وتطرح مرة حسب الإشارة كما أسلفنا فتحدث ارتفاعات وانخفاضات فى قيمة الجهد وهذا هو السبب فى تجاوز الجهد للقيم المقننة حتى يصل إلى 170% كما فى الشكل 21-28.



شكل 21-28

أيضا يترتب على عملية توصيل المكثف اهتزازات عابرة نتيجة لتبادل الطاقة بين ملفات الشبكة ومكثفاتها ، فنتج هذه العملية مدى واسعا من الترددات وهذه الترددات يمكن أن تتسبب فى حدوث ظاهرة الرنين.

ومن توابع عملية توصيل المكثفات أن ينتقل الجهد العالي من الجانب الابتدائي للثانوى فى المحولات وبذلك يحدث للجهد نوع من التكبير لأن هذه الموجات سيتم جمعها على الجهد الطبيعى الموجود فى الجانب الثانوى ومن ثم يرتفع الجهد عند المستهلكين ربما إلى ثلاثة أمثال القيمة الطبيعية.

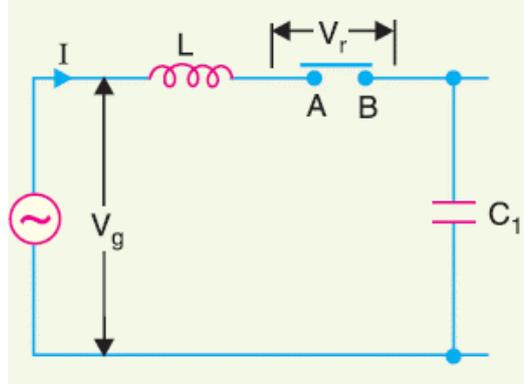
ويلاحظ أن نسبة تكرار حدوث الـ overvoltage الناتج عن عملية الـ switching أكبر من نسبة تكرار حدوثه نتيجة للـ lightning ، حيث أن ظاهرة الـ lightning ظاهرة موسمية قد تحدث و قد لا تحدث ، أما الـ switching فهي ظاهرة أو عملية دائمة الحدوث لاسيما بسبب المكثفات المستخدمة فى تحسين معامل القدرة ، نظرا لتغير قيمة الـ power factor من وقت إلى آخر ، مما يترتب عليه فصل وتوصيل المكثفات على الشبكة.

#### ملحوظة :

حدوث الزيادة فى الجهد Overvoltage بسبب عمليات الـ Switching قد يكون أكبر من الـ Overvoltage نتيجة الصواعق فى EHV & UHV System Voltages ، وقد كانت المراجع فى السابق لا تهتم سوى بالزيادة الناتجة من الصواعق ولكن مع الارتفاع فى جهد خطوط النقل وأيضا مع الأطوال الكبيرة لهذه الخطوط لاسيما الأكثر من 300 كيلو فولت حيث تصبح قيمة المكثفات بين الخطوط والأرض عالية جدا وتتسبب فى حصول هذه الزيادة فى الجهد عند تشغيل هذه الخطوط. ولتقليل هذا الأثر أو تخفيف قيمة الزيادة يتم تركيب Shunt Reactors على نهاية الخطوط.

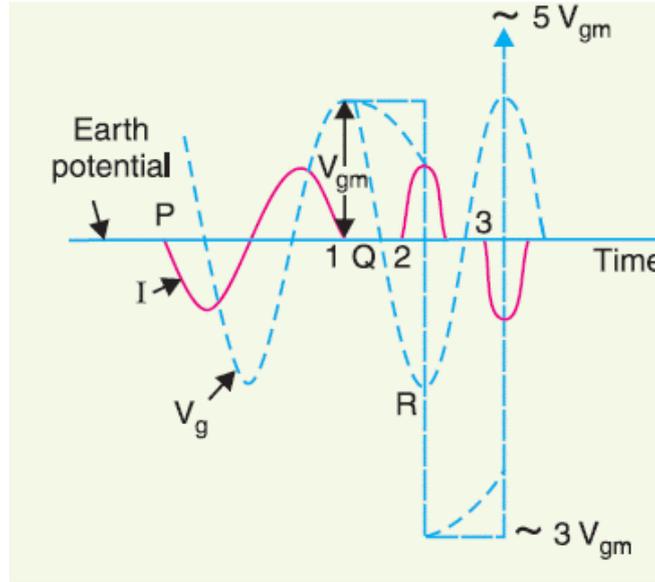
#### 28-9-2 ماذا يحدث عند فصل المكثفات؟

بالنظر إلى الحالة المرسومة فى الشكل 28-22 والتي قد تمثل عملية فتح الـ CB فى وجود مكثفات تحسين معامل القدرة أو تمثل فتح خط نقل طويل له Stray Capacitance بقيمة معتبرة والخط غير محمل Unloaded . وسندرس ماذا يحدث فى أسوأ الحالات . وذلك عند فتح الـ CB بينما قيمة تيار المكثف صفر وبالتالي فالجهد يكون قيمة عظمى (الجهد متأخر عن التيار بـ 90 درجة فى دوائر المكثفات كما هو معلوم)



شكل 28-22

الآن ، لو فرضنا أن لحظة فتح الـ CB كانت عند نقطة 1 هذا يعني أن جهد نقطة B (الطرف الآخر للـ CB) سيكون مساويا لـ  $V_{gm}$  (max of  $V_g$ ) ويظل ثابتا على ذلك طالما أن المكثف لم يفرغ شحنته. بينما يكون جهد نقطة A وهي الطرف الأول للـ CB مساوية لجهد المولد أو بمعنى آخر متغيرة القيمة حسب المنحنى الأزرق المنقط في الشكل 23-28.



شكل 28-23

وعندما نصل إلى نقطة R على الرسم يكون فرق الجهد بين طرفي الـ CB قد وصل إلى  $2V_{gm}$  وذلك كما في المعادلة

$$(V_{gm} - (-V_{gm}))$$

وهذا الجهد قد يكون كافيا لكسر العزل بين طرفى الـ CB ويحدث له Re-Strike وتتسأ شرارة بين قطبيه ، وعندها يقوم المكثف بتفريغ شحنته خلال هذه المقاومة الصغيرة وينشأ High Frequency Transient بتردد يتوقف على قيمة L and C الموجودين بالنظام.

وكما سبق أن درسنا فإن القيمة العظمى لجهد الـ Re-strike Voltage تكون مساوية لضعف قيمة الجهد على أطراف القاطع ، وحيث أن الجهد على أطراف القاطع قد وصل إلى  $2V_{gm}$  ومن ثم ستصل قيمة الـ Re-Strike Voltage إلى  $4V_{gm}$  عند نقطة R وقد يصل إلى  $5V_{gm}$  عند الوصول إلى أول Positive Peak لجهد المصدر كما فى الشكل ، لكن وبسبب الكورونا وبسبب الـ Losses فى الطاقة فإنه لا يصل غالبا لهذه القيمة العالية بل يحدث نوع من الـ Decaying Oscillatory .

وما يهمنا هنا هو اللحظات الأولى التى تحدثنا عنها والتى يتولد فيها Surge Oscillatory Voltage نتيجة فصل خط طويل غير محمل أو نتيجة فصل دائرة تحتوى على مكثفات لتحسين معامل القدرة ، وهذه الموجة العالية ترحل ذهابا وإيابا على طول الخط مسببة ارتفاع الجهد على عوازل الخط والمعدات الأخرى ، حيث يتم تبادل الطاقة المخزنة فى المكثفات  $0.5 CV^2$  مع الطاقة فى الملفات  $0.5 LI^2$  ، ويتم هذا التبادل بتردد يساوى التردد الرنينى Resonance Frequency ، وهذا قد يؤدي كما ذكرنا لمشاكل فى عوازل المعدات وحتى مشاكل للـ Surge arrestors المركبة إن لم تكن مصممة بصورة صحيحة لاستيعاب وتبديد هذه الطاقة .

#### طرق الحد من مشكلة الـ Capacitor switching:

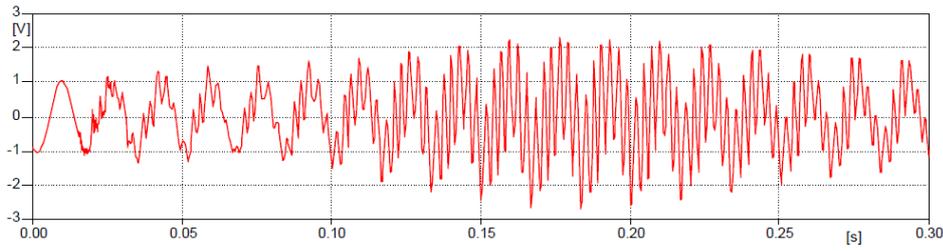
- فصل أغلب المكثفات فى حالات التحميل الضعيف لمنع ظاهرة الـ over-compensation .
- تحجيم مشكلة شحن المكثفات باستخدام fixed reactor و pre-insertion resistor .
- إضافة Surge arrestors .

## 10-28 الاهتزاز الناتج عن فصل وتشغيل الأحمال

هناك أحمال تتسبب فى حدوث Transient بالشبكة مثل بدء تشغيل المحركات الذى يسحب تيار بدء قد يصل لستة أمثال التيار الطبيعى وكذلك بدء تشغيل المحولات الذى يسحب Inrush currents أيضا مرتفعة جدا . وتيارات الاندفاع لا تمثل فقط مشكلة بسبب التيار المرتفع ولكنها تمثل مشكلة بسبب التوافقيات

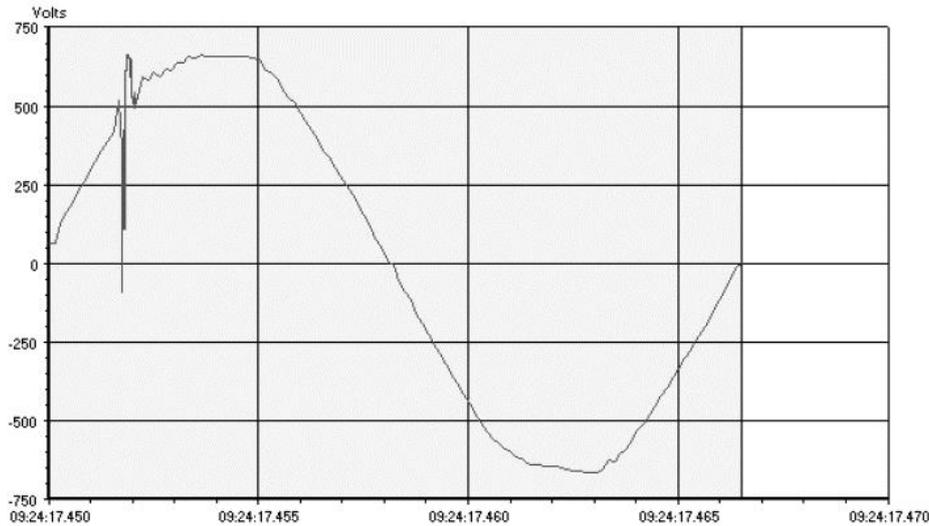
التي تظهر على تيار بدء المحولات والتي قد تتسبب في إيجاد تردد رنيني يسبب حالة من الـ Resonance وما يترتب عليه من ارتفاع في الجهد والتيار. وهذه التيارات قد تستمر من 10-15 cycle .

الشكل 24-28 يمثل الجهد الناتج عن حالة بدء تشغيل محول حيث يتضح أن الجهد يأخذ في الارتفاع بعد عدة دورات cycles من التشغيل ومن الملاحظ أن هذا الجهد قد يزداد ليتعدى الـ 2pu وهذا الارتفاع في الجهد يستمر لعدة دورات .



شكل 24-28 : الجهد بعد تشغيل أحد المحولات

والشكل 25-28 يمثل حالة بدء تشغيل محرك قدرة 50 حصان ، ورغم أن الفترة الزمنية التي استغرقها النظام ليتعافى من هذه الهزة لم تتجاوز نصف دورة إلا أن التغيرات في الجهد يمكن أن تكون كافية لفصل بعض الأجهزة الحساسة التي تتغذى من نفس الـ BB .



شكل 25-28 : تأثير تشغيل محرك 50 حصان

وحتى الأحمال الصغيرة مثل لمبات الفلورسنت تسحب أيضا عند البدء تيارات عالية تسبب نوعا من الـ Transients بشبكة الجهد المنخفض وبالطبع فهذه التيارات سترتب عليها حدوث Transient Voltages وهذه الأخيرة قد تؤثر على الأحمال الحساسة لتغير الجهد.

## 11-28 الهزات العابرة بسبب FERRO RESONANCE

هو نوع من الرنين ولكنه لا ينتج بسبب التوافقيات مثل الرنين العادي لكنه نوع خاص من الرنين يمكن أن يقال أنه Nonlinear Resonance لأنه يحدث بين Non Linear Inductance (Iron core inductor) مع مكثف المصدر المتصل به على التوالي لحظة حدوث Disturbance في الشبكة (غالبا في حالات حدوث Open circuit condition ) وبالتالي يختلف عن الرنين العادي الذي يحدث عند تساوى معاوقة ملف خطى ومكثف عند تردد محدد وفيه يتغير الجهد والتيار خطيا ، بينما يتميز الـ Ferro resonance بوجود ارتفاع في الجهد (يمكن أن يصل إلى 12 ضعف الجهد المقنن ، مع تشوهات كبيرة غير خطية في موجاتها ويمكن أن تسبب تدمير كارثي للمعدات .

وفي حالة الـ Ferro resonance أيضا تكون التغيرات معتمدة ليس فقط على التردد بل على قيمة التغير الحاد الذي يحدث للجهد وقيمة الفيض المغناطيسي في قلب المحولات.

أحد أشهر أمثلة هذا الرنين هو حدوث Open circuit على أحد فازات كابلات متصلة بمحول توزيع مثلا، فالآن توافرت كافة الشروط السابقة وأصبح المصدر متصلا فقط بمكثفات الكابل على التوالي مع Inductance المحول ، وقتها يصبح لدينا ارتفاع كبير في الجهد يمكن أن يدمر العزل.

ويمكن تفسير الظاهرة على النحو التالي: باعتبار دائرة RLC موصلة على التوالي كما بالشكل 28-26 و بإهمال قيمة المقاومة للحظة يمكن أن يمثل التيار بالتعبير التالي :

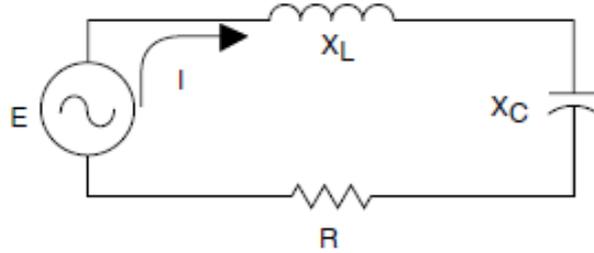
$$I = \frac{E}{j(X_L - |X_C|)}$$

where  $E$  = driving voltage

$X_L$  = reactance of  $L$

$X_C$  = reactance of  $C$

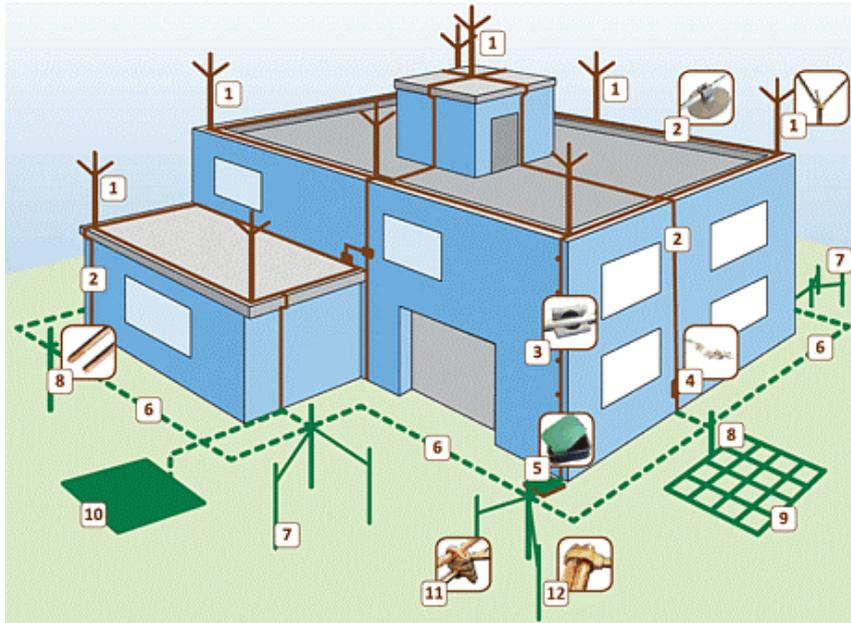
عندما  $X_L = X_C$  سوف ينتج تيار كهربى بمقدار كبير



شكل 26-28

## 12-28 وسائل الحماية من الـ VOLTAGE SURGES

توجد وسائل متعددة للحماية من ارتفاعات الجهد في شبكة الجهد المنخفض ، فمنها ما يعتبر حماية أولية مثل استخدام عصا مانعات الصواعق التي تتركب في المباني المرتفعة ، أو استخدام فكرة Faraday cage بتحزيم المبنى بموصلات نحاسية ثم توصيلها بشبكة الأرضى كما في الشكل من أجل منع اصابته بالصواعق .



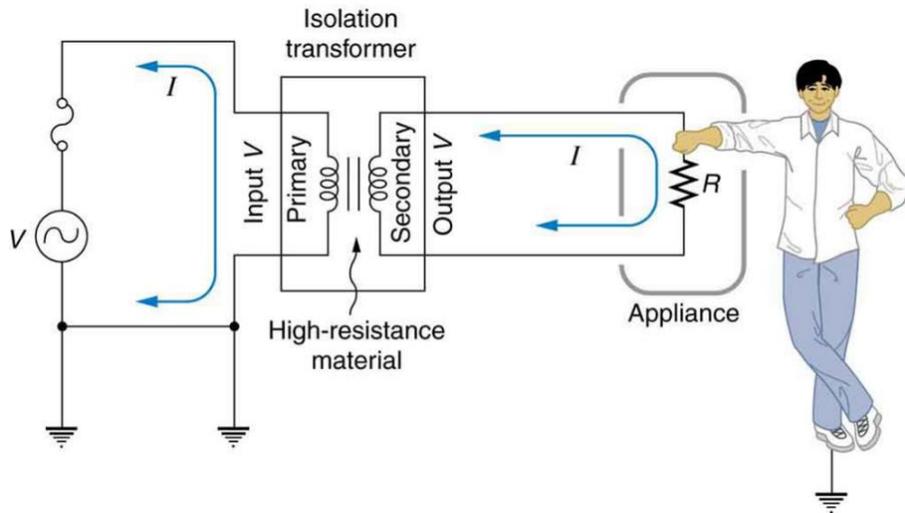
ومنها أيضا حمايات توضع في الشبكة الكهربائية نفسها (مع الأجهزة أو داخل لوحات التوزيع) ، وهذه تصنف على أنها حماية ثانوية ، وهذه قد يتم توصيلها على التوالي مع الجهاز كما في حالة الـ Filters

، وقد يتم توصيلها على التوازي كما في حالة استخدام الـ Voltage limiters ، أو عند استخدام الـ Low Voltage Surge Arrestors .

وهناك تقنيات متعددة لتصنيع وتنفيذ هذه الحماية ، فأشهر طرق الحماية من الـ Voltage Surges التي تنتقل وتظهر في شبكة الجهد المنخفض هو استخدام أحد الطرق التالية:

- تركيب Zener diode على التوازي مع المعدات المراد حمايتها حيث يتميز بسرعة استجابته للتغير في الجهد ، ولا يسمح بتسرب تيار أثناء التشغيل الطبيعي خلاله ، لكن يعيبه أن لا يتحمل قدرة كبيرة خلاله ، لذا يستخدم فقط كأداة مساعدة.
- استخدام محولات العزل Isolation transformers ، وهذه المحولات لها Inductance عالية ، وبالتالي فالـ inductive reactance لها تزيد مع زيادة التردد ومن ثم تستخدم في إضعاف موجة الجهد العالي وتمنع انتقالها إلى الجانب الآخر من المحول. وهذه المحولات لها Turns ratio = 1 .

لاحظ وجود ميزة أخرى لمحولات العزل وهي أنه لا يوجد مسار لرجوع التيار المار خلال هذا الشخص (شكل 27-28) سوى خلال المعاوقة الكبيرة لمحول العزل ومقاومة الأرض ، ومن ثم فالتيار خلال هذا الشخص يعتبر مهملاً.



شكل 27-28 :

- استخدام الفاريستور Varistor ، وهو يزيد عن ميزات Zener أنه يتحمل قدرة كهربية عالية خلاله. وهو الأكثر استخداما في كافة مستويات الجهود بالشبكة (العالية والمتوسطة والمنخفضة).
- وأخيرا استخدام ما يعرف بالـ Power Conditioners

## القسم الثالث من أنواع الهزات العابرة

## الهزات العابرة المسببة لانخفاض في الجهد

## 13-28 ظاهرة هبوط الجهد

انخفاض الجهد تعتبر الظاهرة الأكثر حدوثاً في الشبكات الكهربائية ، كما هي الأكثر تنوعاً في مظاهرها ، فتحت هذا العنوان يندرج العديد من مظاهر هبوط الجهد منها:

- الانخفاض المستمر للجهد: Sustained Voltage Drop/ Under Voltage
- الانخفاض القصير (المؤقت) : Voltage Sag/Dip
- انخفاض يصل إلى حد الانقطاع Voltage Interruption ، وهذا الانقطاع قد يكون طويلاً أو قصيراً ، ويعرف بأنه حدوث تلاشي للجهد بنسبة 100% من جهد التغذية لفترة زمنية تزيد عن الثانية الواحدة ، وقد يكون هذا الانقطاع مخططاً planned outage ، أو إجبارياً forced outage وهو الانقطاع الذي يحدث فجأة دون معرفة وقت حدوثه.
- ويمكن أن نضيف إليهم أيضاً ظاهرة ارتعاش الجهد Voltage Flicker

## 1-13-28 الانخفاض المستمر للجهد Under Voltage

هو انخفاض للجهد تتراوح قيمته بين 10% إلى 90% من القيمة المقننة للجهد الأصلي ، ويستمر لفترة طويلة تزيد عن دقيقة وقد تصل إلى ساعات متصلة (إذا قلت المدة عن دقيقة يعتبر Sag) . مع ملاحظة أنه لو وصلت قيمة الانخفاض إلى أقل من 10% من القيمة الأصلية فيسمى انقطاع Interruption وليس انخفاض.

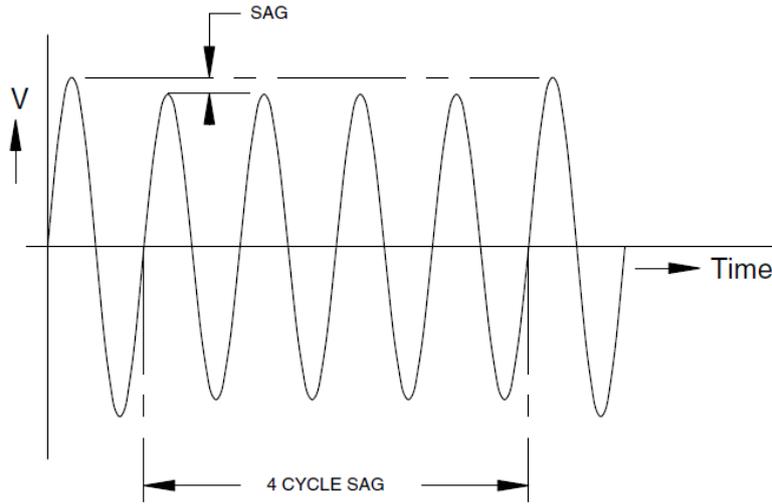
ودائماً يجب التأكد من أن الهبوط في الجهد Voltage Drop عند نهاية الكابل نتيجة مرور التيار لن يتعدى القيم القياسية المسموح بها هو 4% في الظروف الطبيعية ، أو 8% في ظروف الطوارئ ( في بعض المواصفات تتراوح 3-6%). وهذا النوع لا يصنف ضمن الهزات العابرة.

أبسط أسباب انخفاض الجهد هو الانخفاض الناتج عن الـ Voltage drop ، والذي ينشأ بسبب مرور التيار خلال أسلاك التوصيل  $VD = I.R$  . ومن أسبابه :

- زيادة الأحمال عند المشتركين خصوصا في وقت الذروة والذي يؤدي إلى زيادة التيار المسحوب وينتج عنها زيادة قيمة voltage drop ويؤدي لانخفاض الجهد عند المستهلك .
- عدم اختيار مقطع مناسب للكابلات مما يؤدي أيضا إلى زيادة voltage drop .
- وجود الوصلات بين الكابلات وبعضها أو بين الكابلات والبارات حيث أنه ينتج عنها contact resistance وتزيد قيمة المقاومة العامة للكابل مما يؤدي إلى زيادة الـ voltage drop

### 2-13-28 الانخفاض (العابر) للجهد Voltage Sag

هو انخفاض في الجهد تتراوح قيمته ما بين 10% إلى 90% من قيمة الجهد أو التيار الأصلي ، لكن يختلف عن المصطلح السابق في استمراره لفترة زمنية قصيرة ، تتراوح ما بين أقل من نصف دورة إلى دقيقة . ولذا يصنف ضمن الهزات العابرة.



وأهم أسباب الانخفاض العابر للجهد هي:

- ارتفاع قيمة الـ Voltage Drop
- حالات الـ Short Circuit
- بدء تشغيل المحركات الكبيرة

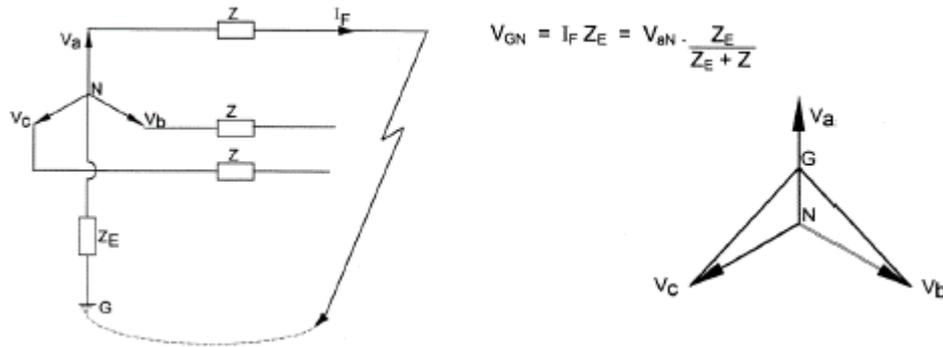
وفيما يلي نشرح تفاصيل هذه الأسباب:

## 3-13-28 انخفاض الجهد الموقت بسبب حالات الـ Short Circuit

وتتوقف قيمة الانخفاض في الجهد في هذه الحالة على طريقة توصيل الحمل ، و هل هو موصل على شكل دلتا أو موصل على شكل ستار ، كما يتوقف على نوع العطل وهل هو SLG or 2LG, Phase to phase و كذلك يتوقف على قيمة مقاومة الـ Earthing في نقطة التعادل وهكذا.

ففي حالة التوصيل على شكل ستار وحدث عطل من النوع SLG فإنه يحدث هبوط لجهد الـ Phase المعطل بينما لا تتأثر الـ two phases الأخرى تقريبا إذا كانت نقطة التعادل مؤرضة بطريقة مباشرة . Directly Earthed,  $Z_E = 0$

أما إذا كنت نقطة التعادل مؤرضة خلال مقاومة فسينخفض جهد الـ Phase المعطل كما سبق لكن سيرتفع جهد الـ Phases الأخرى. ويمكن فهم هذه الظاهرة من الشكل 28-28:



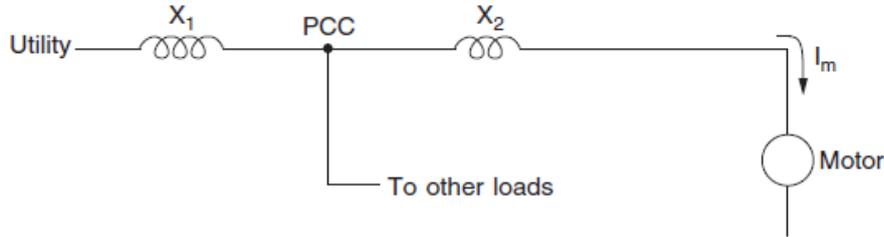
شكل 28-28 :

واضح أن جهد الـ N ارتفع ليصبح بقيمة تساوى VG بدلا VN الذى كان يساوى صفرا قبل العطل ، وهذا تسبب في انخفاض جهد الـ Va لأنه أصبح يساوى Va - VG والطرح هنا جبرى لأنهما من نفس الـ Phase ، بينما ارتفع الجهد على الـ Two phases الأخرين لأن Phase-B مثلا أصبح يساوى من الرسم VG - Vb والطرح هنا اتجاهاى لأنهما من Two Different Phases .

## 4-13-28 انخفاض الجهد الموقت بسبب بدء تشغيل المحركات الكبيرة

عند تشغيل المحرك فإنه يسحب تيارا كبيرا يكون أكبر من التيار الطبيعي بحوالي 5-6 مرات فيتسبب في حدوث voltage drop نتيجة معاوقة الخط  $(R + jX)$  ، بحيث يحدث انخفاض في الجهد عند Point of Common Coupling, PCC (شكل 28-29) ، وبالتالي يؤثر على باقي الأحمال المشتركة في هذه النقطة. هذا الانخفاض في الجهد قد يؤدي لإطفاء مصابيح التفريغ الغازي وقد يؤدي لعدم قدرة بقية المحركات على القيام بعملية البدء أثناء فترة انخفاض الجهد .

المشكلة أيضا أن هذا التيار هو تيار حتى بمعنى أن له معامل قدرة Power Factor منخفض جدا يصل إلى 0,3 ومن ثم تتسبب الزيادة الفجائية في التيار المسحوب في سحب قدرة غير فعالة عالية جدا مما يجعل الهبوط في الجهد مضاعف. وهذا ما جعل المصممون يفضلون بدء المحرك عن طريق توصيله بإحدى وسائل البدء ( Soft Starting or Delta/Star switch ) التي تحد من قيمة التيار المرتفع ولا تؤثر على عزم البدء المطلوب.



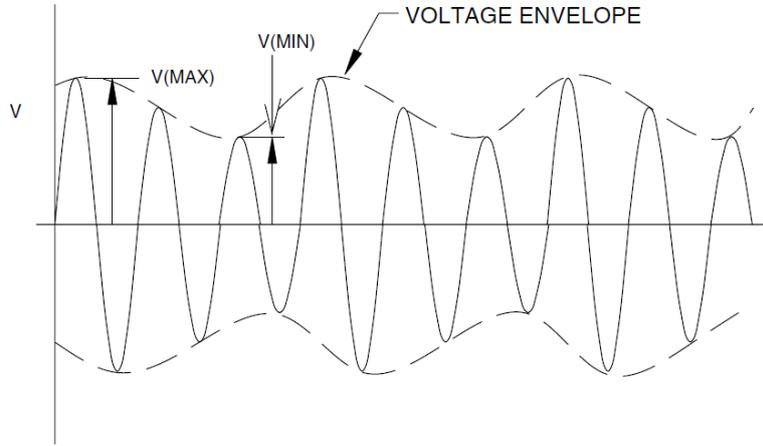
شكل 28-29

ومن الأسباب الأخرى لانخفاض الجهد:

- الزيادة المفاجئة للأحمال أو دخول عدد من الأحمال الكبيرة في وقت قصير
- تشغيل ماكينات اللحام بالقوس الكهربى حيث أنها تسحب تيارا كهربيا عاليا أثناء عملية اللحام.

## 5-13-28 ظاهرة ارتعاش الجهد ( Voltage Fluctuation (flicker)

هي عبارة عن تغيرات متتالية في الجهد (شكل 28-30) تحدث بشكل عشوائي و تكون قيمة هذا التغير بنسبة 10 % من قيمة الجهد الأصلية فتسبب ارتعاشات في الإنارة والشاشات .



شكل 28-30 :

أسباب حدوث ارتعاش الجهد:

- نوعية الأحمال في المكان. التشغيل و الإيقاف المستمر للمكينات مثل الاسانسير
- الأفران الكهربائية (أفران صهر المعادن). تعطى أفران القوس الكهربى فكرة واضحة لمعنى ارتعاش الجهد ، حيث أنه لحدوث القوس الكهربى فإننا نحتاج تيار عالى مما يسبب انخفاض فى الجهد ، وعندما ينطفئ القوس الكهربى لا يمر تيار فيرجع الجهد لقيمته الأصلية وهكذا. وعلى ذلك فإن التيار يتغير عشوائيا خلال دوره الانصهار مما يسبب تغير (ارتعاش) فى الجهد . يمكن ملاحظة ذلك بشدة من خلال الرعشة التى تحدث للمصابيح المتوهجة المغذاة من نفس مصدر تغذية الأفران .
- التوصيلات السيئة.
- ماكينات اللحام بالمقاومة resistance welding بمصانع الحديد والصلب تسبب أيضا voltage fluctuation عند تغذية عدة ماكينات لحام من نفس محول التوزيع حيث يكون تشغيلها عشوائيا أحيانا ويمكن أن تجد كثيرا من ماكينات اللحام تعمل فى نفس الوقت.

### 28-13-6 تأثير هبوط الجهد على الأحمال المختلفة

#### التأثير على الأجهزة الإلكترونية

رغم أن هذه الأجهزة هى أحد أهم المصادر التى تسبب عدم جودة القدرة ، فإنها أيضا أكثر الأجهزة التى تعاني من عدم جودة المصدر ، فتنحتاج الأجهزة الإلكترونية إلى بيئة كهربية متحكم فيها أكثر من احتياج

أغلب الأحمال الأخرى ، فعند حدوث انخفاض فى الجهد فعندئذ يتوقف الجهاز عن العمل أو تتشوه البيانات .

### التأثير على المحركات

يؤدى الانخفاض فى الجهد على المحرك الحثى Induction Motors إلى :

- انخفاض عزم البدء للمحرك مما قد يؤدى إلى تلف المحركات التى تدير أحمالا ميكانيكية ذات قصور ذاتى مرتفع لأن المحرك سيضطر لسحب تيار أعلى بكثير من المقنن ومن ثم تحرق ملفاته.
- زيادة تيار البدء سيؤدى بالضرورة إلى حدوث Voltage Sag
- إذا نجح المحرك فى البدء فستظل لديه مشكلة أثناء التشغيل لأن حرارة الملفات سترتفع بسبب ارتفاع قيمة التيار (تذكر أن هذه المحركات تعتبر Constant Power بمعنى أن انخفاض الجهد حتما سيؤدى لارتفاع التيار)

### التأثير على لمبات الإضاءة

أغلب نظم الإضاءة تكون قادرة على احتمال حدوث الانحدارات فى الجهد مثل:

#### المبات المتوهجة incandescent lamp

فالانخفاض فى الجهد سيؤدى إلى انخفاض الإضاءة لامحالة (انخفاض فى الجهد إلى 90% يؤدى إلى انخفاض الإضاءة إلى 70% من مقننها فى بعض اللمبات وانخفاض الكفاءة الضوئية إلى 80%) . لكن فى هذه النوعية من اللمبات يؤدى الانخفاض فى الجهد إلى زيادة العمر الافتراضى لأن تيار المصباح أيضا ينخفض (لا يعتبر من أجهزة الـ Constant Power ) .

#### مصابيح الفلورسنت fluorescent lamp

تتأثر هذه اللمبات بدرجة أكبر من اللمبات السابقة بسبب وجود Chock Coil ، وفى هذا النوع أيضا يتسبب الارتفاع أو الانخفاض فى تقصير العمر الافتراضى. وإذا انخفض الجهد بدرجة كبيرة (70%) مثلا فإنه يؤثر على الـ Electronic Ballast ويصبح غير قادر على تجهيز الطاقة لحدوث القوس داخل الأنبوبة و هذا يعنى ظلام اللمبة ولكنها تعود للعمل مباشرة بعد رجوع الجهد لحالته الطبيعية.

#### مصابيح التفريغ شديدة الكثافة high intensity discharge – metal halide

مثل مصابيح الصوديوم والزئبق وهذه المصابيح تتأثر بشدة بتغير الجهد فينطفئ المصباح إذا انخفض الجهد عن 80% ، والمشكلة الأكبر أنه إذا تكرر الانقطاع والتوصيل فهذا يؤثر بشدة على العمر الافتراضى للمصباح إضافة إلى أنه يحتاج إلى وقت كى يبرد بعد كل إطفاءة قد تصل فى بعض المصابيح إلى 10 دقائق وهذا كله يعنى أن هذه المصابيح لا تصلح فى الأماكن التى تعانى من اهتزاز الجهد.

#### التأثير على المكثفات

معلوم أن هناك عدة أهداف من وضع المكثفات بالدائرة منها تحسين معامل القدرة عن طريق تغذية الحمل بجزء كبير من الـ Reactive Power التى يحتاجها. لكن المشكلة عند انخفاض الجهد إلى 90% من قيمته فإن الـ Q المولدة من المكثف تنخفض إلى 81% (تناسب مع مربع الجهد) ، وهذه مشكلة كبيرة إذ أننا وضعنا المكثف لیساعدنا فى رفع قيمة الجهد فإذا به يتأثر هو نفسه سلبيا بانخفاض الجهد.

#### التأثير على الأجهزة المنزلية

بعض الأجهزة المنزلية التى لها محركات ثابتة القدرة تتأثر بشدة بانخفاض الجهد ، فمن المعلوم من أساسيات القوى أن  $(P = V \times I \cos \varphi)$  ، ومن ثم فأى انخفاض بأى نسبة فى الجهد سيؤدى بالضرورة إلى ارتفاع فى التيار بنفس النسبة. والمشكلة أن هذا الارتفاع غالبا لا يكون كبيرا ، فلو فرضنا أن هذا الارتفاع فى التيار كان بنسبة 10% فقط ، فهذا يعنى أن الـ CB لن يشعر بهذه الزيادة فى التيار وبالتالي لن يفصل الدائرة ، فى حين سيظل الجهاز يعانى من هذه الزيادة و من ثم ترتفع درجة حرارته تدريجيا مع الزمن حتى يصل لمرحلة الاحتراق. ومن هنا جاءت أهمية التأكد من عدم هبوط الجهد عن القيم القياسية المسموح بها.

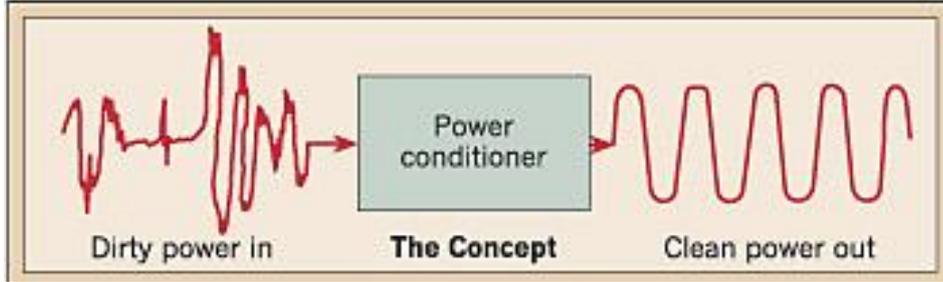
### 28-13-7 وسائل الحماية من انخفاض وتغير الجهد (شبكة الجهد المنخفض)

قد يكون التغير فى الجهد صغيرا بحيث لا تسبب أى مشاكل للمعدات ولكن فى بعض الأجهزة الإلكترونية الحساسة فإن أى تغير فى الجهد يؤدى إلى انهيارات وتشغيل خاطئ. ولذلك اهتمت الصناعة بتصميم وتصنيع أجهزة الحماية لعلاج هذه المشاكل مثل:

- مكيفات القدرة (Power Conditioners)
- منظمات الجهد (voltage regulator)
- مولدات الطوارئ (emergency power generators)
- نظم البطاريات الاحتياطية (battery backup) أو UPS.

## 8-13-28 استخدام أجهزة الـ Power Conditioners

تقوم الـ Power Conditioners بعمل عزل كهربى وتخفيض التشويش (electric noise) وفى بعض الوقت تعمل على تنظيم الجهد (voltage regulation). والمبدأ العام يتضح من الشكل 28-31 .



شكل 28-31

ومن أمثلة أجهزة الـ Power Conditioners ما يلى:

## 1- محولات العزل ( Isolation Transformer ):

تعتبر المكون الرئيسى لـ Power Conditioners ويحتوي على مجموعتين من الملفات مرتبطين بقلب مغناطيسي مشترك. وهذه الملفات مفصولة عن بعضها بواسطة تحجيب مغناطيسي ( magnetic shielding). هذا التحجيب يخفض أو يمنع التشويش الكهربى للحالة العادية وذلك بتحويله إلى نظام الـ Earthing .

## 2- منظمات الجهد ( voltage regulator )

فكرة عمله أنه يقوم بمراقبة مستوى الجهد المغذى لحمل معين ، ويعزز جهد الدخول بغرض تصحيحه إلى حدود محددة مسبقا. ويمكن أن يكون أحد مكونات الـ Power Conditioners أو منفصلا عنه.

وسائل تنظيم الجهد:

- نقط تقسيم الجهد يدويا/أوماتيكيًا Manual/Auto Tap switches regulator
- منظم جهد رنين حديدي Ferro resonance Regulator
- منتج شكل موجه إلكتروني أو مغناطيسي Magnetic synthesizers

فالنوع الأول يعرف بمفاتيح التقسيم (tap- switchers) و التي تعالج التغير الكبير في جهد المدخل مثلا من 80 إلى 145 فولت ، بينما تحافظ على جهد المخرج بين 110 و 125 فولت (الأرقام حسب النظام الأمريكي). وتكون الاستجابة الزمنية حوالى دورة واحدة ، وهذه فترة طويلة نسبيا و يمكن أن تسبب مشاكل لبعض الأجهزة .

والنوع الثانى هو منظم الرنين الحديدي ، وهو أفضل منظم جهد للمدخل (Ferro resonant regulators) فهذا النوع يحافظ على استقرار المخرج بدرجة أفضل ، وله استجابة زمنية أسرع.

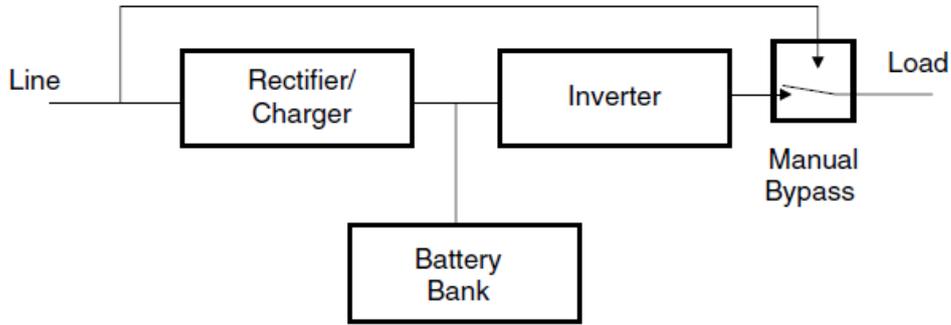
وفكرة عمل محول الرنين الحديدي Ferro resonant/Constant voltage transformer هي استخدام محول صغير فى حدود 500VA ذو نسبة تحويل 1:1 ، بحيث يحدث له Excitation بدرجة عالية حتي يصل إلى درجة التشبع (saturation curve) ، فيعطي (output voltage) لا يتأثر بشكل ملحوظ بالجهد الداخلى إليه ولذا يسمى أيضا بالمحول ثابت الجهد Constant-Voltage Transformers(CVTs))

### 3- نظم البطاريات الاحتياطية

وتستخدم نظم البطاريات الاحتياطية لتغذية الأحمال الحرجة عن طريق مصدر طاقة كهربية مستمر (UPS) Uninterruptible power supply ، وعند تقلب مصدر التغذية الأساسي أو عند فصله فإن الـ UPS يغذي هذا الحمل من نظام البطاريات حتي يظل نظام الحمل مستمرا و لمدة تعتمد على خصائص البطارية الداخلية. والـ UPS نوعان :

#### On-line UPS

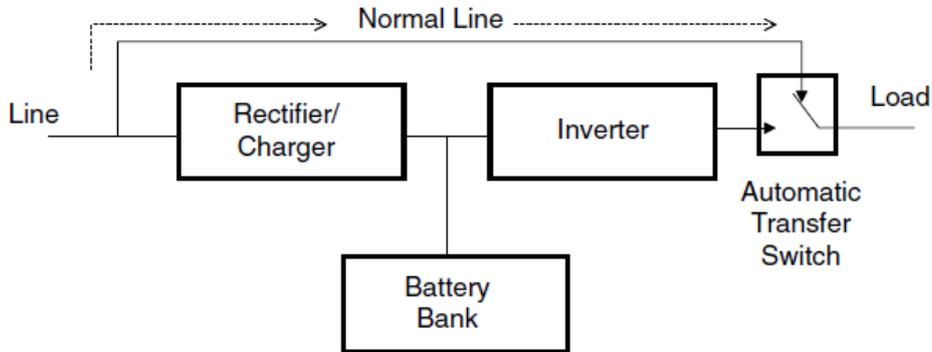
في هذا التصميم (شكل 28-32) تتم تغذية الحمل طوال الوقت من خلال الـ UPS ، وعند انقطاع الطاقة تتم تغذية الـ inverter من خلال البطاريات ويواصل تغذية الحمل .



شكل 28-32 :

**Standby UPS (Off-line UPS)**

في هذه الحالة (شكل 28-33) تتم تغذية الحمل عن طريق مصدر التغذية الرئيسي ، فإذا حدث انقطاع في هذا المصدر تتحول التغذية لتتم عن طريق الـ UPS ، وتتم هذه العملية عن طريق ATS (Automatic Transfer Switch) . ويجب أن يعمل الـ ATS بسرعة كبيرة تصل إلى 4 ms حتى لا تتأثر الأحمال.



شكل 28-33 :

## 29

## استقرار منظومة القوى الكهربائية

## POWER SYSTEM STABILITY

تعد دراسات الاستقرار Stability جزءاً أساسياً من دراسات التخطيط طويلة الأمد لنظم القدرة الكهربائية ، خاصة أنه مع توسع الشبكة الكهربائية وامتدادها على مناطق جغرافية واسعة أصبح من الصعب المحافظة على التزامن Synchronization بين مختلف الأجزاء للمنظومة الكهربائية ، ومعلوم أن فقدان هذا التزامن بين أجزاء الشبكة هو السبب الرئيسي لحدوث الـ Blackout الذي يمكن أن يضرب الشبكة.

## 1-29 ماذا نقصد بالاستقرار STABILITY

ووفقاً لتعريف IEEE – CIGRE فإن الاستقرار Stability هو قدرة النظام على العودة إلى شروط التشغيل الطبيعية بعد تعرضه لاضطراب Disturbance معين كما في الشكل 1-29 .  
فكما هو واضح من الشكل فقد حدث اضطراب ما في المنظومة وتغيرت قيمة الـ P and Q وكذلك السرعة لكن المنظومة في خلال ثواني رجعت مرة أخرى إلى القيم الطبيعية ، فهنا نقول أن هذا النظام . Stable



شكل 1-29

### ماذا نقصد بالاضطراب؟ وما هي توابعه؟

نقصد بحدوث اضطراب disturbance أنه قد حدث أمر من الأمور التالية: حدوث short circuit أو حدوث فقد في جزء من التوليد ، حدوث عملية switching سواء لمكثفات أو لقواطع حتى لو بصورة طبيعية ، حدوث بدأ لمحركات كبيرة إلخ.

يمكن نتيجة هذا الاضطراب حدوث ظاهرة الـ Power Swing (شرحت سابقا في كتابي نظم الحماية الكهربائية - طبعة 2019) ، أو حدوث تشغيل خاطئ في أجهزة الوقاية ، فصل أحمال هامة ، خروج بعض وحدات التوليد المتزامنة slip Pole tripping .

## 2-29 دلالات استقرار الشبكة

يعتبر استقرار منظومة القوى واحدا من أكبر التحديات التي تواجه الشبكات الكبيرة Interconnected Networks وتزداد المشكلة تعقيدا كلما زادت محطات توليد وزادت الخطوط والأحمال ، لأن هذه الشبكة معرضة للكثير من الأعطال ومعرضة أيضا لتغيرات في ظروف التشغيل ، وهنا يظهر السؤال الرئيسي :

هل الشبكة سيمكثها تجاوز تأثير هذه الاضطرابات وتعود سريعا إلى حالة التوازن والاستقرار؟

ولإجابة على هذا السؤال نحتاج أولا لتحديد بدقة أهم الدلائل على استقرار الشبكة وهي :

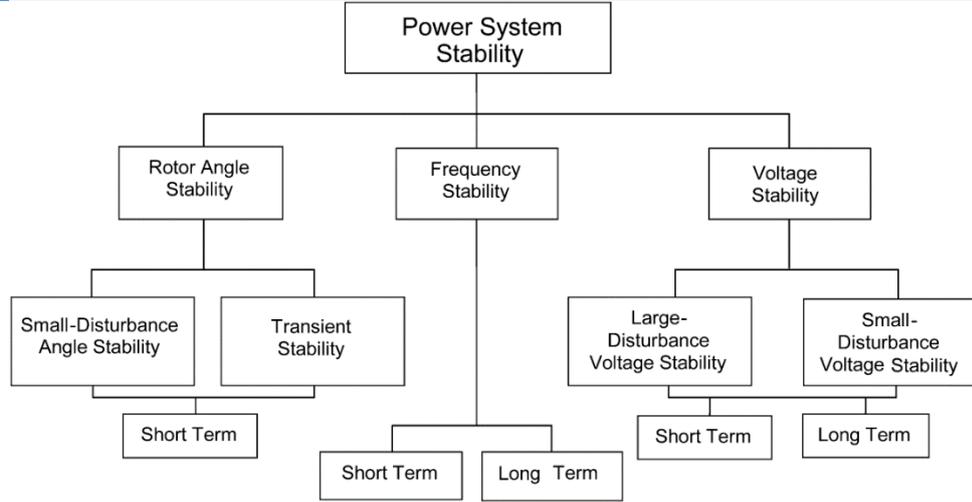
- أن يكون حجم الأحمال المركبة على الشبكة + Loss = حجم التوليد المتاح
- أن تكون جميع المولدات المركبة على الشبكة في حالة عمل متزامن Synchronized مع بعضها البعض
- أن يكون التردد Frequency مستقرا حول قيمته الإسمية (50/60 Hz) في أي نقطة بالشبكة
- أن يكون الجهد عند كافة الـ BBS في الشبكة قريب من قيمته الطبيعية
- أن تكون قيمة Rotor angle والتي يمكن أن تتغير على مدى من صفر إلى 90 درجة بعيدة عن 90 درجة ليصبح الـ Stability margin واسعا ، وهذا يعنى أن المنظومة قادرة على استيعاب الهزات.
- أن تكون جميع الخطوط والكابلات والمحولات والمولدات وغيرها تعمل جميعا وهي محملة بقيمة أقل من أو قريبة من القيمة المقننة لها بحيث يمكن أن تسمح بالزيادة ولكن لمدة وجيزة. وبالطبع فالاستقرار بالشروط السابقة قد لا يتحقق في الشبكة لأكثر من عدة دقائق ، فالشرط الأول على الأقل قد يتغير تقريبا كل عدة ثوانى نتيجة تغير الأحمال ، وبقيّة الشروط كذلك قد تتغير تغيرا بسيطا مع تغير الأحمال أو في بعض الظروف قد تتغير تغيرا دراماتيكيا نتيجة حدوث عطل مثلا بالشبكة. والاضطراب Disturbance الذى يحدث في الشبكة قد يستمر لمدة وجيزة أو لمدة طويلة Short and long term disturbance .

## 3-29 أهم المصطلحات والتعريفات

طبقا لتصنيف الـ IEEE ، فإن الدارس لموضوع الـ Stability عليه أن يوجه نظره إلى ثلاثة أنواع من الدراسات الخاصة بموضوع الاستقرار وهي :

1. استقرار التردد
2. استقرار الجهد
3. استقرار Rotor angle

وكل نوع من الأنواع السابقة له تصنيفات فرعية كما هو واضح في الشكل 2-29 الذى يظهر تصنيف عناصر استقرار نظم القدرة الكهربائية أخذا في الاعتبار أنواع الاضطرابات المختلفة حجما وزمنا. وفيما يلي شرح سريع لمعنى كل نوع من أنواع الـ Stability السابقة.



شكل 2-29 :

### 1-3-29 مفهوم الـ Rotor Angle Stability

والمقصود بالـ Rotor Angle Stability هو قدرة Synchronous Machines الموجودة بالنظام على البقاء في حالة التزامن Synchronism بعد حدوث اضطرابات ، مع القدرة على الحفاظ أو استعادة التوازن بين العزم الكهرومغناطيسي و العزم الميكانيكي عند كل Synchronous Generator موجود في النظام عند حدوث اضطراب في المنظومة. وبناء على قيمة هذا الاضطراب في العلاقة بين العزم الكهربى والميكانيكى المؤثران على دوران المولد سيكون لدينا ثلاثة أنواع من الدراسات :

- فالاضطراب البسيط المتدرج small disturbance يدرس تحت عنوان **Steady State Stability**
- أما الاضطراب البسيط الغير متدرج فيسمى **Dynamic Stability** ، هو نوعان : إما اضطراب بسيط مفاجئ سينتهى باستقرار المنظومة فيسمى النظام وقتها Dynamically stable ، والعكس إذا حدث اضطراب بسيط مفاجئ لكنه أدى إلى عدم استقرار المنظومة فيسمى Dynamically instable .
- أما الاضطراب المفاجئ والشديد large disturbance فيدرس تحت باب **Transient Stability** ، ويشمل حالات أن تخرج الشبكة Out Of Step أو يحدث فقدان للترزامن والمعروف بـ out of synchronism .

### 2-3-29 مفهوم الـ Frequency Stability

التردد هو ترمومتر العلاقة بين التوليد المتاح بالشبكة ، والأحمال المتصلة بالشبكة. والمقصود هنا هو قدرة النظام على معالجة النقص في القدرة المتاحة Power Deficit أو بمعنى آخر علاج الاختلاف بين قيم التوليد المتاحة وقيم الأحمال المركبة ، والذي بناء على حجمه سيكون لدينا درجة ما من درجات عدم استقرار في التردد .

### 3-3-29 مفهوم الـ Voltage Stability

ويقصد بها قدرة النظام على المحافظة على قيم الجهد ثابتة قدر المستطاع قريبا من القيم الاسمية بعد حدوث Disturbance بالشبكة . و غالبا تكون الدراسة في هذا الموضوع تتعلق بالأحمال ، وتدور أغلب الحلول حول سبل تعويض النقص في الـ Reactive Power Q لأن التغير فيها سيترتب عليه تغير في قيمة الجهد (تذكر أن جهد المولد نتحكم فيه من خلال التحكم في الـ Field من خلال زيادة أو نقص الـ Q).

وهذا الاضطراب في الجهد :

- قد يكون صغيرا فيدرس تحت عنوان : Steady-state voltage stability
- وقد يكون اضطرابا كبيرا فيدرس تحت عنوان : Dynamic Voltage Stability

### 4-3-29 صعوبة دراسة موضوع الـ Stability

منظومة الـ Power System عموما مصممة على أن تكون Stable خلال الاضطرابات التي تحدث كثيرا ، لكن بالطبع لا يمكن أن تصمم منظومة وتكون Stable تحت كافة ظروف التشغيل. وصعوبة دراسة هذا الموضوع تكمن في سببين :

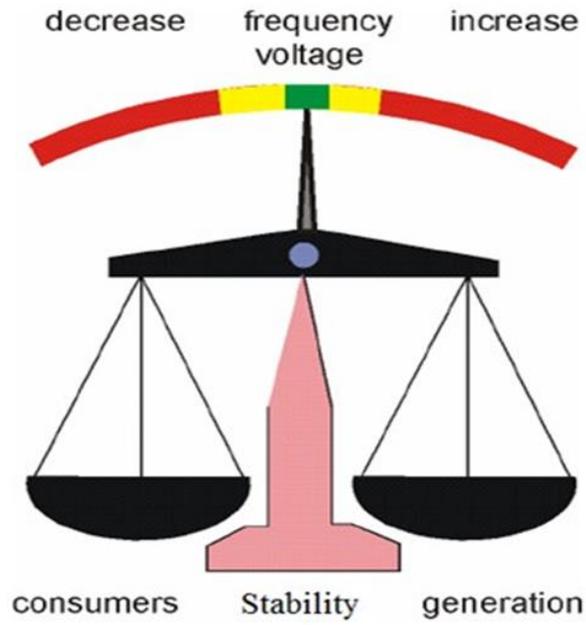
- 1- السبب الأول هو أن منظومة الـ Power system يمكن وصفها بأنها Non-Linear System وهذا يعنى أنه إذا تعرض النظام لعدة متغيرات فإن استجابته System Response لهذه المتغيرات ليست بالضرورة أن تكون مماثلة لمجموع استجاباته لكل متغير على حدة ، كما هو الحال في الـ Linear System وهذا ما يعقد الموضوع أكثر ، لأن توقع أداء الـ Non-Linear System ليست بالسهولة كما في حالة الـ Linear System.

2- السبب الثانى أن استجابة الـ Power System لأي Disturbance ليس فقط معقدة رياضيا كما فى السبب الأول ولكن أيضا معقدة من حيث سعة انتشار ، فتأثير أى عطل يطال العديد من عناصر منظومة القوى ، فحدوث عطل Short circuit مثلا على خط ثم فصل هذا الخط بواسطة أجهزة الوقاية وعزله بفتح الـ Circuit Breakers الخاصة به سيترتب عليه تغير فى الـ Power flow فى العديد خطوط الشبكة ، وهذا قد يؤدي إلى حدوث تغييرات فى قيم الجهد عند بعض الـ BBs وقد يؤدي ذلك إلى تشغيل بعض الـ Voltage Regulators ومن ثم قد تتغير أيضا سرعة بعض المولدات فينشأ عن ذلك تغييرات فى Frequency وتدخل من الـ Governors . ومن ثم فعمل واحد دفعنا إلى دراسة الأنواع الثلاثة من أنواع الـ Stability .

### الخلاصة حتى الآن :

ويمكن فى تلخيص سريع لما سبق أن نقول أن دراسات الـ Stability تشمل ثلاثة أنواع:

- 1- دراسة الـ Rotor Angle Stability ، وتهتم بوضع المولدات المتزامنة بالنظام والتوازن الـ Electric-torque ، وبين الـ Mechanical Torque فى هذه المولدات
  - 2- دراسة الـ Frequency Stability ، وتهتم بدراسة سداد العجز فى القدرة الفعالة Active Power بالنظام مع تحقيق أقل فصل ممكن فى الأحمال.
  - 3- دراسة الـ Voltage Stability ، وتهتم بدراسة سداد العجز فى القدرة غير الفعالة بالنظام.
- وواضح أن النوعين الثانى والثالث لهما علاقة مباشرة بتوازن الأحمال والتوليد فى الشبكة ولذا يعبر عنهما أحيانا بالشكل التالى:



فعند زيادة التوليد عن الأحمال سيحدث تسارع في التردد وارتفاع في الجهد وكلاهما مؤشر على حدوث عدم اتزان ، أما عند زيادة الأحمال عن التوليد فيحدث العكس (تناقص التردد وانخفاض الجهد) وهما أيضا مؤشران على حدوث عدم اتزان.

وفيما يلي ندرس تفصيلا الأنواع الثلاثة لدراسات الاستقرار.

## 4-29 دراسة الاستقرار ROTOR ANGLE STABILITY

معلوم أن المولد الكهربى يوجد داخله مجالان مغناطيسيان :

1- الأول ويسمى Rotor Magnetic Field ، وينشأ هذا المجال من دوران الـ Rotor - الذى يحمل أقطابا مغناطيسية - بواسطة القوة الميكانيكية الخارجية ( البخار مثلا أو المياه المندفعة من السدود ).

2- الثانى يسمى Stator Magnetic Field ، وهذا نشأ من ظهور الـ Three phase voltages والذى نشأت حسب قوانين فراداي داخل الـ three phase windings وما يترتب على ذلك من مرور التيار ، ومعلوم أن مرور three phase currents داخل three phase windings سوف يولد Rotating field .

و قوة المجال الثانى تتوقف على شدة التيار المسحوب من المولد وهذا بالطبع يتوقف على قيمة الحمل الموصل عليه ، كما أن سرعة دوران المجال الثانى - و تسمى Synchronous speed, N - تتوقف قيمتها على عدد الأقطاب P. Poles. فى الماكينة والتردد F الخاص بالمصدر حسب العلاقة

$$N = 120 F/P$$

بمعنى آخر ، فإنه عند دوران الـ Rotor بعزم ميكانيكى (Mechanical) T ، فإنه ينشأ مجالا مغناطيسيا يسمى بالـ Rotor magnetic field ، وهذا المجال سيقطع الملفات الموجودة فى الـ Stator فينشأ فيها جهدا حسب قوانين فراداي ، وهذا الجهد سينتج عنه مرور تيارات فى الحمل الكهربى الموصل على المولد ، وهذه التيارات تنشأ مجالا مغناطيسيا جديدا معاكسا للمجال الأول هو الذى نسميه بالـ Stator magnetic Field ، وتتوقف قوتها على قيمة الحمل الكهربى الموصل على المولد وتتوقف سرعة دورانه على تردد الشبكة وعدد الأقطاب .

### 29-4-1 تعريف زاوية الـ Rotor Angle

وفى الظروف الطبيعية يكون الـ  $T(\text{Electric}) = T(\text{Mechanical})$  ، ويكون كلا المجالين المغناطيسيين : الـ Rotor magnetic field ، والـ Stator magnetic Field يدوران بنفس سرعة الـ Synchronous speed, N ، ولكن توجد بين الـ Rotor field وبين الـ Stator field زاوية هي التي نسميها **Rotor angle** مع التأكيد مرة أخرى على أنهما يدوران بنفس السرعة وهناك فقط Phase shift بينهما.

### 29-4-2 التحكم فى الـ Rotor Angle

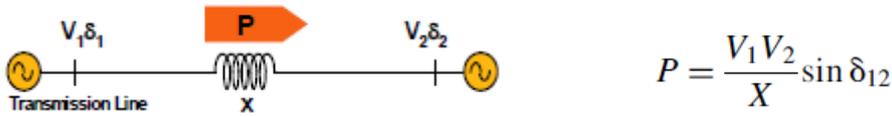
يمكن التحكم فى الـ Rotor Angle, عن طريق التحكم فى القدرة الميكانيكية الداخلة إلى الـ Rotor من التربينات البخارية مثلا ، ، فإذا زادت هذه القدرة الميكانيكية الداخلة فإن الـ Rotor تزداد سرعته ومن ثم تتغير الزاوية الموجودة بين الـ Rotor and Stator Fields ثم تعود السرعة للقيمة الطبيعية ولكن بعد حدوث التغير المطلوب فى الزاوية.

لاحظ أنه عند زيادة حمل كهربى سيزداد التيار وهذا سيؤدى إلى كون  $T(\text{Electric}) > T(\text{Mechanical})$  فنقل سرعة الـ Rotor وهنا يتدخل الـ Governor ليضخ بخارا أكثر ، أى قدرة ميكانيكية أكبر فتزداد سرعة دوران الـ Rotor ويعود مرة أخرى لتتساوى سرعته مع سرعة دوران الـ Stator Field لكن بفرق زاوية بينهما أكبر من المرة السابقة ، ومن ثم يجب أن يكون واضحا أننا حين نقول "زيادة سرعة الـ Rotor" فهذا لا يعنى أبدا أنه سيدور بسرعة مختلفة عن سرعة الـ Stator Field لكن المقصود أنها زيادة مؤقتة أو هى زيادة السرعة التى انخفضت أصلا بسبب زيادة الأحمال حتى تتغير قيمة Power angle ومن ثم يمكن نقل قدرة أكبر .

### 29-4-3 تأثيرات ناتجة عن تغير الـ Rotor Angle

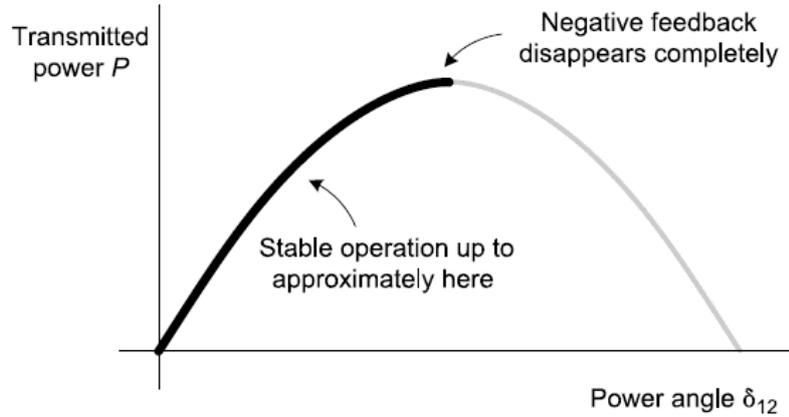
ويترتب على تغير قيمة الـ Rotor Angle لمولدات موجودة فى جهة ما من خط النقل حدوث تغير أيضا فى قيمة ما نسميه بالـ **Power Angle** ، والتي تساوى الفرق بين rotor angle الخاصة بالمولد فى الجهة الأولى وتلك الخاصة بالمولد فى الجهة الأخرى ، وهى أيضا الزاوية التى تظهر فى المعادلة المشهورة التى تحدد قيمة القدرة المنقولة Transfer Power Capacity بين محطتين لهما جهد  $V_1$  and  $V_2$  ويربط بينهما Transmission Line له معاوقة قدرها  $X$ . علما بأنه فى حالى توصيل المولد

على Infinite bus في الجهة الأخرى زاويته تساوى صفر ستصبح الـ rotor angle هي نفسها الـ Power Angle .



فالزاوية  $\delta_{12}$  هي التي تعرف بالـ Power Angle وكلما زادت هذه الزاوية كلما زادت القدرة المنقولة بين المحطتين ، وتغيير هذه الزاوية يحتاج لتغيير الـ Rotor angle في مولدات إحدى المحطتين عن طريق تغيير القدرة الميكانيكية الداخلة لهذا المولد.

مع ملاحظة أننا يجب ألا نسمح بزيادة هذه الزاوية أكثر من 90 درجة (الزاوية الحرجة) لأنه بعدها تتسبب زيادة الزاوية في انخفاض القدرة المولدة كما هو واضح من الشكل 3-29.



شكل 29 - 3

#### 4-4-29 صعوبة الدراسات المرتبطة بتغير الـ Rotor Angle

عند حدوث تغير كبير نتيجة خروج محطة توليد مثلا أو حدوث أى عطل مؤثر ، ففي هذه الحالة يكون العلاج صعبا بسبب حدوث اضطرابات كبيرة فإن فروق الزوايا Rotor angles للمولدات قد تكون كبيرة لدرجة تؤدي إلى خروج المولدات عن التزامن ، وقد نحتاج إلى Load shedding لإعادة التزامن بين وحدات التوليد المركبة على الشبكة وهذه الظاهرة أو هذا النوع من الدراسات يسمى بالـ Transient

Stability .وبالطبع فالـ Transient Stability هو الأخطر والأهم لأنه قد يترتب عليه حدوث عدم تزامن بين وحدات التوليد .

ومشاكل الـ Transient stability معقدة لأنها تحدث خلال أقل من ثانية واحدة وتؤثر بشدة على المولد القريب من مكان الاضطراب. وهي أصعب أنواع الدراسات من وجهة النظر الرياضية لأننا نحتاج لتمثيل النظام بواسطة مجموعة من المعادلات التفاضلية الغير خطية (لأن التغير يحدث في زمن ضئيل جدا) على عكس النوع الأول من الدراسات ( Steady State Stability ) التي نستخدم في تمثيل النظام مجموعة من Linear Equations .

وعموما ، فالـ Rotor angle Stability هو الأقدم من حيث الاهتمام به ومن حيث الدراسات التفصيلية الخاصة به ، فالنوعين الآخرين ( استقرار التردد ، واستقرار الجهد ) لم يظهر الاهتمام بهما إلا بعد ظهور مشاكل Power Quality ، ومع ازدياد تعقد الشبكات .

والجزء التالي يشرح بمزيد من التفصيل موضوع Transient Stability من خلال ما يعرف بالـ Equal Area Criteria والتي تمثل طريقة لفهم وتوقع تصرف النظام عند حدوث Transient Stability .

### 29-4-5 تأثير الـ Inertia على استقرار دوران المولد

عند حدوث زيادة/نقص مفاجئ في تحميل المولد فإن سرعة دوران الـ rotor حتما ستتغير ، وبالطبع فإن الوقت الذي سيستغرقه المولد ليصل إلى حالة الاستقرار سيتوقف على وزن الـ rotor أو لنقل بدقة أكثر سيتوقف على الـ Inertia الخاصة به ، ومن هنا يجب تعريف هذه المفردات التي ستأخذنا قليلا جهة قسم ميكانيكا ، فهذا الموضوع تحديدا يحتاج إلى خلفية رياضية ميكانيكية لفهمه.

الطاقة الحركية =

$$KE = \frac{1}{2} I\omega^2$$

القوة الدافعة الزاوية M، Angular Momentum

$$M = I\omega$$

$$KE = \frac{1}{2} M\omega$$

وحسب التعريف فإن الـ Inertia Constant, H تساوى

$$H = \frac{\text{stored energy}}{\text{machine rating (G)}}$$

ومن ثم تصبح الطاقة المخزنة تساوى  $G H =$

ومنها

$$M = \frac{GH}{180 f}$$

## 5-29 استخدام المعيار EQUAL AREA CRITERIA

### 1-5-29 مقدمة عن هذا المبدأ

لنفترض أن لدينا مولد كبير (الشبكة) يغذى موتورا ضخما يتصل بأحمال ميكانيكية. ونريد أن ندرس هنا استقرار حالة المولد (تحديدا Rotor angle stability) عند حدوث تغير في الأحمال الميكانيكية المتصلة على الموتور. والشكل 4-29 يمثل علاقة القدرة الكهربائية من المولد وعلاقتها بالـ Rotor angle,  $\delta$ .

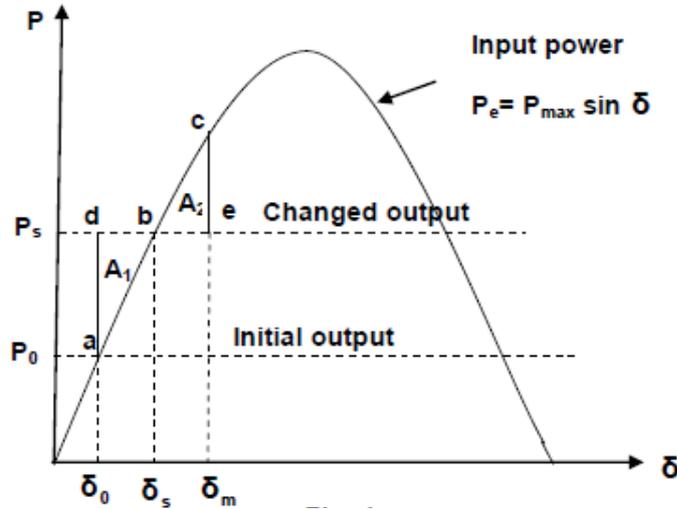
في الشكل السابق نجد الحمل المبدئي الميكانيكي المتصل على الموتور هو Initial Output,  $P_0$  مرسوما عند نقطة a في الشكل، و زاوية القدرة تساوى  $\delta_0$ ، والنظام حتى الآن يعتبر مستقرا، فالقدرة الكهربائية الداخلة على الموتور تتساوى مع الحمل الميكانيكي المتصل به، وأيضا الوضع مستقر لأن الزاوية  $\delta$  لم تتجاوز 90 درجة وبالتالي فالمولد في وضع مستقر.

الآن نفترض حدوث زيادة مفاجئة في قيمة الحمل على الموتور ليصبح عند قيمة Changed Output,  $P_s$  كما في الشكل.

الآن، لكي يظل الوضع مستقرا فلا بد من أن تزيد قيمة القدرة الكهربائية الداخلة على الموتور، بمعنى يجب أن تنتقل نقطة التشغيل إلى النقطة b، فكيف سيحدث ذلك؟.

في الفترة الزمنية من نقطة a إلى نقطة b ونتيجة زيادة الحمل الميكانيكي فجأة بدرجة أكبر من القدرة الكهربائية الداخلة فسيحدث انخفاض في سرعة دوران المولد (de-acceleration) وهذا يعنى انخفاضا في الجهد E (جهد التوليد يتناسب طرديا مع سرعة دوران المولد)، وبالتالي يزيد التيار الداخل للموتور

$(I = V - E/X)$  وهذا يترتب عليه أن تزيد القدرة الكهربائية  $P_e$  ، وهذا يعنى من الرسم أن زاوية القدرة  $\delta_0$  ستزيد لتصبح  $\delta_s$  وتصبح نقطة التشغيل الجديدة هي  $b$  والتي عندها أصبحت  $P_e = P_m$ .



شكل 4-29 :

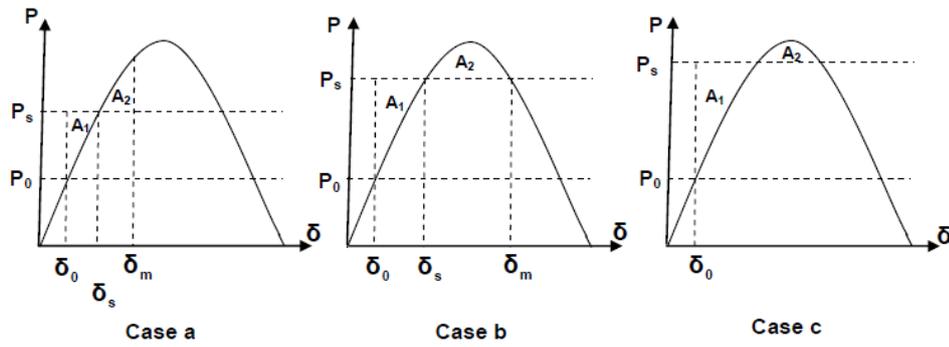
بالطبع كنا سنكون سعداء لو انتهى الأمر عند هذا الحد ، لكن هذا الانتقال لن يكون سلسا ، بل سيحدث نوع من الـ Oscillation حول نقطة  $b$  التي كان يفترض أن يستقر عندها النظام حسب الحمل الجديد ، فالمشكلة أن تزايد السرعة لن يتوقف فجأة حين يصل إلى نقطة  $b$  بل سيستمر تزايد السرعة نتيجة Spinning Energy of heavy Rotor ومن ثم تزايد الزاوية حتى تصل إلى قيمة  $\delta_m$  ، وتصبح نقطة التشغيل الجديدة هي النقطة  $c$ .

وكما هو واضح فقد نتج عن هذا التذبذب ظهور مساحتين  $A_1$  and  $A_2$  ، تقعان فوق وتحت القيمة الجديدة للحمل ، كما في الشكل. ويمكن أن نقول أن المساحة الأولى  $A_1$  تتناسب مع قدرة النظام على تسريع الاهتزاز ، بينما المساحة الثانية  $A_2$  تتناسب مع قدرة النظام على تباطؤ الاهتزاز.

ومبدأ المساحات المتساوية Equal Area Criteria ينص على أنه إذا تساوت المساحتان فإن النظام حتما سيأخذ وقتا ثم يستقر ، أما إذا زادت مساحة  $A_1$  عن مساحة  $A_2$  فسيزداد التسارع ويتسع الـ Oscillations حتى تتجاوز الزاوية  $\delta_m$  قيمة 90 درجة ويخرج النظام Out of Step .

وطبقا لمبدأ المساحات المتساوية فإنه إذا كانت هاتان المساحتان متساويتان في الشكل 29-4 فسيحدث نوع من التذبذب حول نقطة  $b$  لكن سيستقر النظام في النهاية . وتفسير ذلك أنه خلال الفترة من  $b$  إلى  $c$  تكون  $P_e$  أكبر من  $P_m$  فتتزايد سرعة الموتور ، وبالتالي يزيد الجهد  $E$  ، وبالتالي يقل التيار ( تذكر أن  $(I = \frac{V-E}{X})$  ، ومن ثم تقل القدرة الكهربائية الداخلة ، فتقل الزاوية  $\delta$  وتتراجع في اتجاه النقطة  $b$  ويظل التذبذب حول النقطة  $b$  بالزيادة والنقصان حتى تستقر في النهاية نتيجة وجود Damping في المنظومة.

والشكل 29-5 يظهر ثلاث حالات مختلفة لهذه المساحات فالحالة الأولى Case-a وفيها  $A_2=A_1$  نجد النظام مستقرا كما سبق شرحه ، وأيضا في الحالة الثانية التي يكون فيها الاستقرار حرجا لأن  $A_1=A_2$  لكن عند حافة منطقة الاستقرار ، بينما في الحالة الأخيرة Case-c نجده غير مستقر لأن  $A_1 > A_2$  .



شكل 29-5 :

**Example 1**

A synchronous motor having a steady state stability limit of 200 MW is receiving 50 MW from the infinite bus bars. Find the maximum additional load that can be applied without causing instability.

**Solution**

Refereeing to Fig. 6,  
for critical stability  
 $A_2 = A_1$

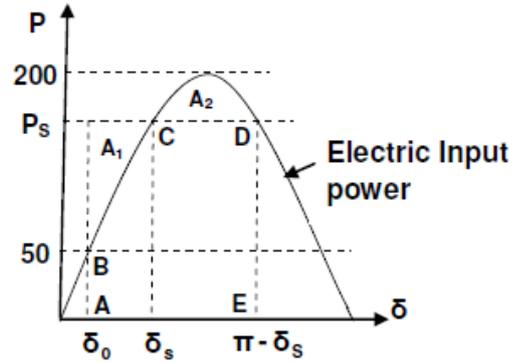
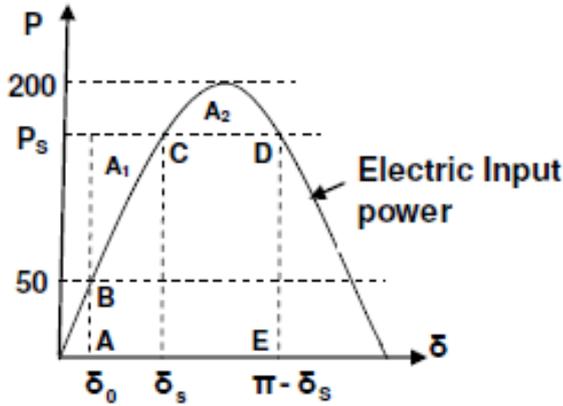


Fig. 6

$$\delta_0 = \sin^{-1} \frac{50}{200} = 0.25268 \text{ rad.}$$

$$\text{Further } 200 \sin \delta_s = P_s$$



Adding area ABCDE to both  $A_1$  and  $A_2$  and equating the resulting areas

$$200 \sin \delta_s (\pi - \delta_s - \delta_0) = \int_{\delta_0}^{\pi - \delta_s} 200 \sin \delta \, d\delta \quad \text{i.e.}$$

$$(\pi - \delta_s - \delta_0) \sin \delta_s = \cos \delta_0 - \cos (\pi - \delta_s) = \cos \delta_0 + \cos \delta_s \quad \text{i.e.}$$

$$(\pi - \delta_s - 0.25268) \sin \delta_s - \cos \delta_s = 0.9682458$$

The above equation can be solved by trial and error method.

$\delta_s$	0.85	0.9	0.95
RHS	0.8718	0.9363	0.9954

Using linear interpolation between second and third points we get

$$\delta_s = 0.927 \text{ rad.} \quad 0.927 \text{ rad.} = 53.11 \text{ deg.}$$

$$\text{Thus } P_s = 200 \sin 53.11^\circ = 159.96 \text{ MW}$$

$$\text{Maximum additional load possible} = 159.96 - 50 = 109.96 \text{ MW}$$

شرح المثال السابق:

في هذا المثال كان المحرك يسحب 50 ميغا وات من الشبكة ، وكان معلوما أن حدود استقرار هذا المحرك هي 200 ميغا وات فإذا سحب أكثر من ذلك سيفقد الاتزان ، وهذا الرقم ( 200 ميغا وات ) يعني أقصى قيمة يصل لها ولو لمدة جزء من الثانية ، ولا يعنى القيمة التي سيستقر عليها ، وبالتالي فكان

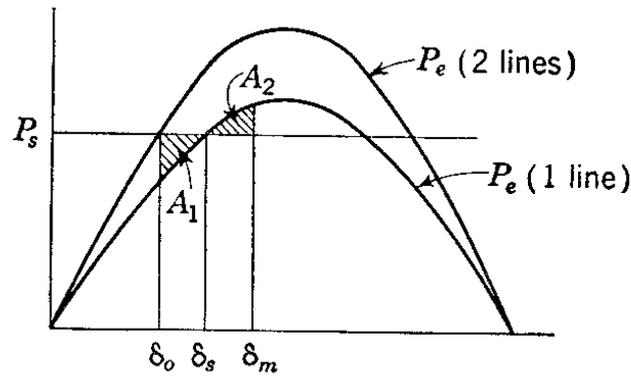
مطلوباً في هذا المثال معرفة ما هي أقصى زيادة مفاجئة في التحميل على هذا المحرك بحيث أن الـ oscillation الناتج لا يتجاوز 200 ميغا وات على الرسم.

ومن خلال هذا المبدأ يمكن فهم وتفسير بعض الظواهر المؤثرة على استقرار الشبكة بصورة بعيدة عن المعادلات الرياضية كما في الأمثلة التالية.

### 2-5-29 تأثير وجود خطين متوازيين على الـ Stability

في هذه الحالة سيكون لدينا منحنيان للقدرة المنقولة كما في الشكل 6-29:

- الأول وهو الأكبر يمثل القدرة المنقولة في وجود خطين
- والثاني وهو الأصغر يمثل القدرة المنقولة لو خرج أحد هذين الخطين



شكل 6-29 :

لاحظ أن الـ Power angle المطلوبة  $\delta_0$  لتشغيل الحمل في حالة وجود خطين أصغر بكثير من الزاوية في حالة وجود خط واحد  $\delta_s$  ، وهذا يعني أن النظام في وجود خطين أكثر استقراراً لأنه أبعد عن قيمة الـ 90 درجة التي تمثل stability margin .

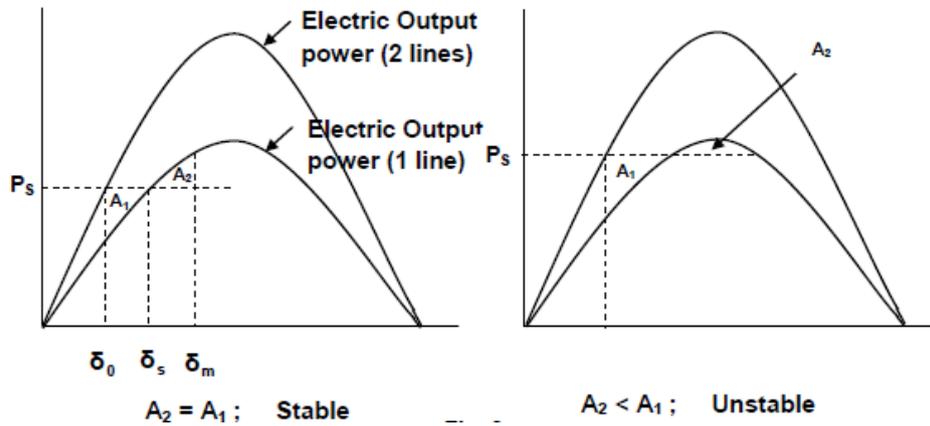
كما أن التغيير في الحمل في وجود خطين يؤدي إلى حدوث تغيرات بالزيادة والنقصان حول قيمة زاوية القدرة ، هذه التغيرات تكون أصغر بكثير منه لو كان المستخدم هو خط واحد ، وهذا يعني أن النظام قادر على استيعاب الهزات في الحمل بدرجة أكبر لو كان هناك خطين.

ماذا يمكن أن نفعل لتجنب عدم الاستقرار عند خروج أحد الخطين؟

بالنظر للمثال المرسوم في الشكل 6-29 سنجد أنه في وجود خطين كان زاوية القدرة  $\delta_0$  تساوى حوالى 25 درجة ، فلما خرج أحد الخطين أصبحت تقريبا 60 درجة ، أى اقتربت من الحد الأقصى للاستقرار ، وهذا يعنى أن لدينا احتمالا ليس بالقليل أن الـ Oscillations المتوقع حدوثه لحظة خروج أحد الخطين يمكن أن يأخذ النظام إلى منطقة عدم الاتزان .

فعقب خروج أحد الخطين (وهذا يمثل نوع من أنواع الـ Disturbance التي يمكن أن تحدث) فيفترض أن يعمل النظام بزاوية جديدة هي  $\delta_s$  ولكن لأننا نتعامل مع نظام ميكانيكى يحتاج إلى وقت للاستقرار بسبب الـ Inertia الموجودة فيه وبالتالي فإن هناك Oscillations سيحدث حول القيمة الجديدة للزاوية بحيث يمكن أن تصل زاوية القدرة لقيمة  $\delta_m$  بالزيادة ، كما يمكن أن تصل إلى قيمة  $\delta_0$  بالنقصان ، ومن ثم تظهر كما في الشكل 7-29 مساحتين هما  $A_1$  and  $A_2$  قيمة كل منهما تتوقف على قيمة الزاوية التي يصل إليها الـ Oscillations.

فلو كان الحمل الموجود قبل فصل أحد الخطين عاليا (أو كانت قدرة نقل الخط المتبقى منخفضة) فعندها ستصبح  $A_1 > A_2$  كما في الجزء الأيمن من الشكل 7-29 ، بينما لو كان الحمل أقل من قدرة الخط المنفرد فسنصل لحالة الاستقرار كما في الجزء الأيسر من الشكل.



شكل 7-29 :

ولتجنب ذلك يمكن مثلا أن نفصل بعض الأحمال قبل فصل أحد الخطين (هذا إذا كان الخروج مبرمجا وليس بسبب عطل مفاجئ).

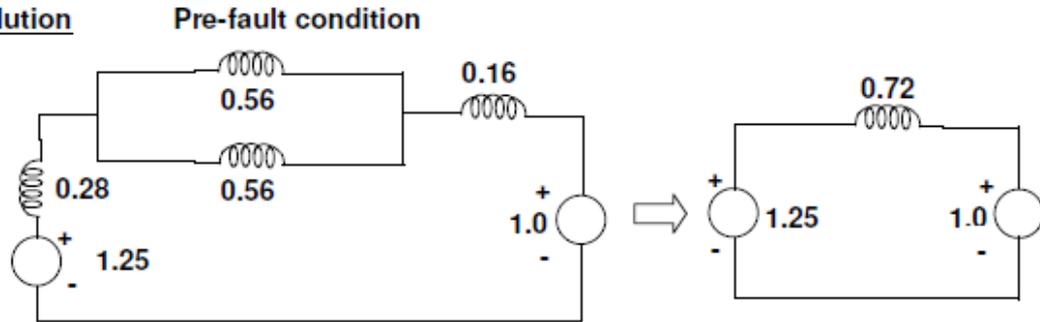
**Example 2**

In the power system shown in Fig. 13, three phase fault occurs at P and the faulty line was opened a little later. Find the power output equations for the pre-fault, during fault and post-fault conditions.



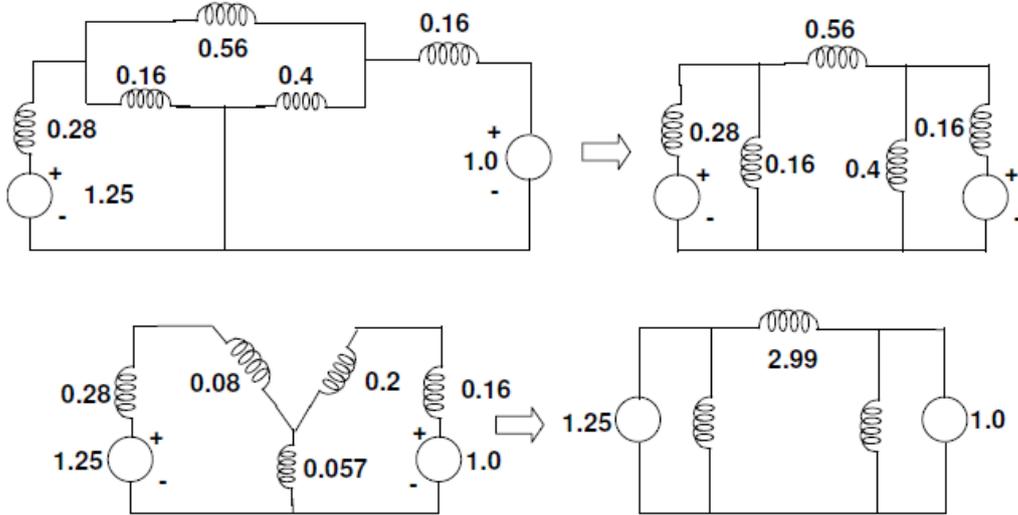
Fig. 13  
Values marked are p.u. reactances

**Solution**



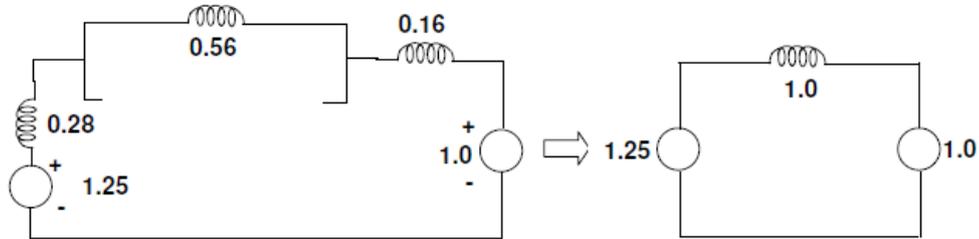
$$\text{Power output } P_e = \frac{1.25 \times 1.0}{0.72} \sin \delta = 1.736 \sin \delta$$

During fault condition:



$$\text{Power output } P_e = \frac{1.25 \times 1.0}{2.99} \sin \delta = 0.418 \sin \delta$$

Post-fault condition:



$$\text{Power output } P_e = \frac{1.25 \times 1.0}{1.0} \sin \delta = 1.25 \sin \delta$$

Thus power output equations are:

Pre-fault  $P_e = P_{m1} \sin \delta = 1.736 \sin \delta$

During fault  $P_e = P_{m2} \sin \delta = 0.418 \sin \delta$

Post fault  $P_e = P_{m3} \sin \delta = 1.25 \sin \delta$

Here

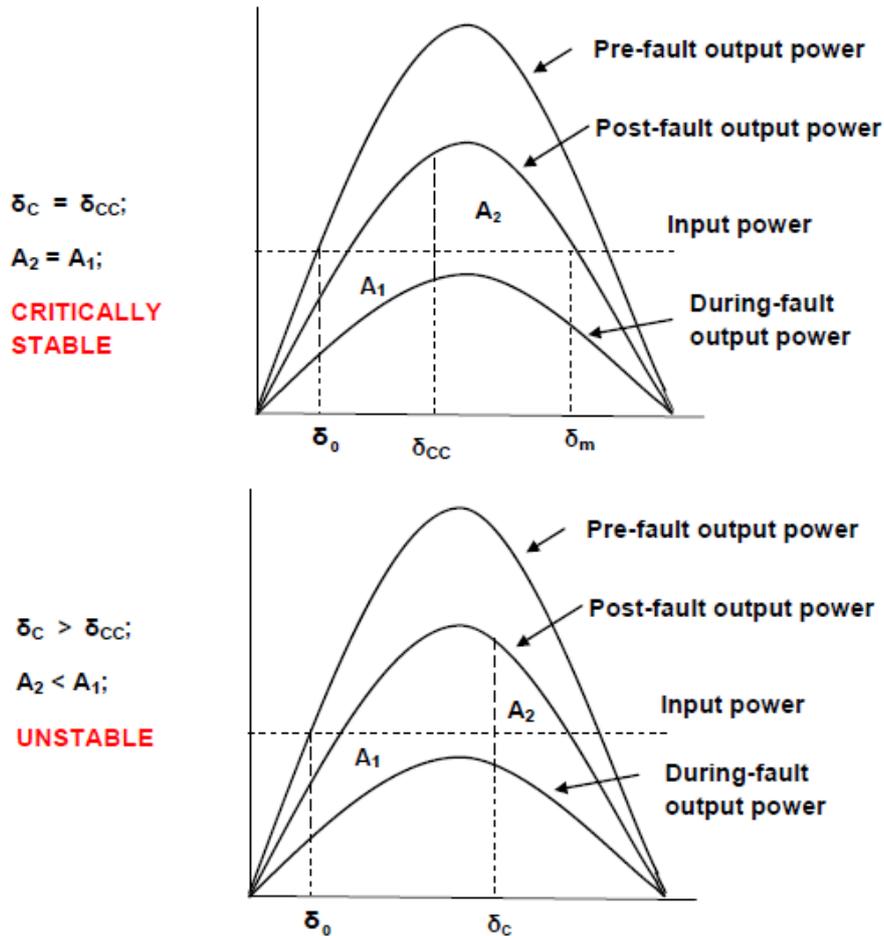
$P_{m1} = 1.736;$

$P_{m2} = 0.418;$

$P_{m3} = 1.25;$

## 29-5-3 تأثير سرعة فصل الأعطال على استقرار الشبكة

يمكن فهم هذه النقطة بعيدا عن الرياضيات المعقدة باستخدام مبدأ المساحتين المتساويتين كما في الشكل 29-8 . و الجزء العلوي منه يمثل نظاما كان يعمل عند زاوية  $\delta_0$  على المنحى الأول Pre-fault عندما كان لدينا خطين في الخدمة ، ثم انتقلت نقطة التشغيل بعد حدوث عطل إلى المنحى الأصغر During Fault حيث القدرة المنقولة محدودة جدا بسبب انخفاض الجهد أثناء العطل ، ثم بعد فصل الخط المعطل وبقاء خط واحد فسيحدث الاهتزاز حول النقطة  $\delta_{cc}$  التي حدث عندها إزالة Clearing للعطل. وحيث أن  $A_1=A_2$  كما في الشكل فإن النظام في النهاية سيحدث له استقرار .

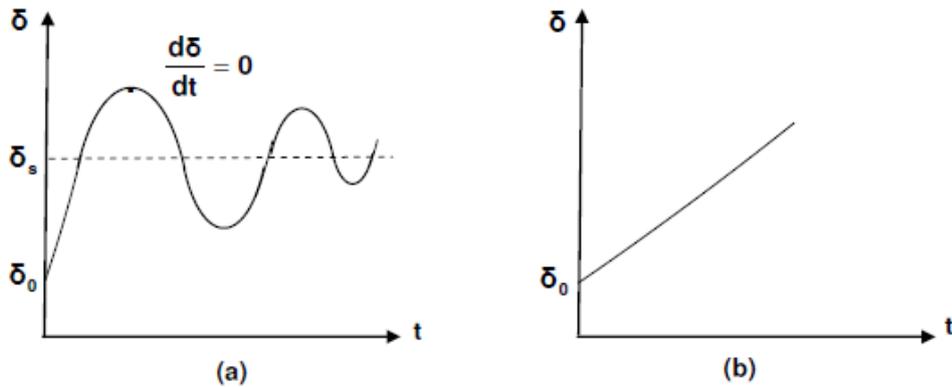


شكل 29-8 :

بينما فى الجزء السفلى من الشكل ، حدثت إزالة متأخرة للعطل (لاحظ كيف أن  $\delta_c$  بعيدة جدا  $\delta_o$ ) ومن ثم أصبحت  $A_1 > A_2$  ، فقطعا سينتهى الأمر بخروج النظام Out of step.

## معادلة الـ Swing

لاحظنا في الأجزاء السابقة أن الـ Rotor angle ، أو الـ Power angle تتأرجح حول نقطة الاستقرار النهائية بمعدل تناقصي في حالة dynamic stability وبشكل تزايدى في حالة dynamic instability ، والشكل التالى يوضح شكل هذا التأرجح في قيمة الـ rotor angle ، ويسمى بالـ Swing Curve . والمعادلة المعبرة رياضيا عن هذا التأرجح تسمى بالـ Swing Equation .



واضح من المنحنى السابق أن الزاوية وصلت لأقصى قيمة ثم بدأت في التناقص وهذا يدل على أن النظام Stable .

ومعادلة الـ Swing Equation المعبرة عن هذا التأرجح - بدون تفاصيل الإثبات الرياضى - صيغتها كالتالى:

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\omega_s}{2H} (P_m - P_e)$$

حيث  $\frac{d^2\delta}{dt^2}$  تعبر عن معدل تسارع سرعة المولد بعد حدوث الاضطراب ، وهذا المعدل هو ما نبحث عنه لنعرف ما هي أقصى سرعة سيصل إليها المولد في نهاية زمن الاضطراب كما في المثال التالى .

واضح من المعادلة السابقة انه كلما كانت الآلة لها Inertia, H عالية كلما كان معدل التسارع بطيئاً وبالتالي لا تتأثر بالاهتزازات ومن هنا نفسر لماذا تكون المولدات في المحطات البخارية الضخمة أكثر استقراراً من المولدات الغازية مثلاً .

**Example 3**

A 50 Hz, 4-pole turbo-generator is rated 500 MVA, 22 kV and has an inertia constant ( $H$ ) of 7.5. Assume that the generator is synchronized with a large power system and has a zero accelerating power while delivering a power of 450 MW. Suddenly its input power is changed to 475 MW. We have to find the speed of the generator in rpm at the end of a period of 10 cycles. The rotational losses are assumed to be zero.

We then have

$$\begin{aligned}\frac{d^2\delta}{dt^2} &= \frac{\omega_s}{2H} (P_m - P_e) = \frac{100\pi}{15} \times 25 = 523.6 \text{ electrical deg/s}^2 \\ &= \frac{523.6\pi}{180} = 9.1385 \text{ electrical rad/s}^2\end{aligned}$$

Noting that the generator has four poles, we can rewrite the above equation as

$$\begin{aligned}\frac{d^2\delta}{dt^2} &= \frac{9.1385}{2} = 4.5693 \text{ mechanical rad/s}^2 \\ &= 60 \times \frac{4.5693}{2\pi} = 43.6332 \text{ rpm/s}\end{aligned}$$

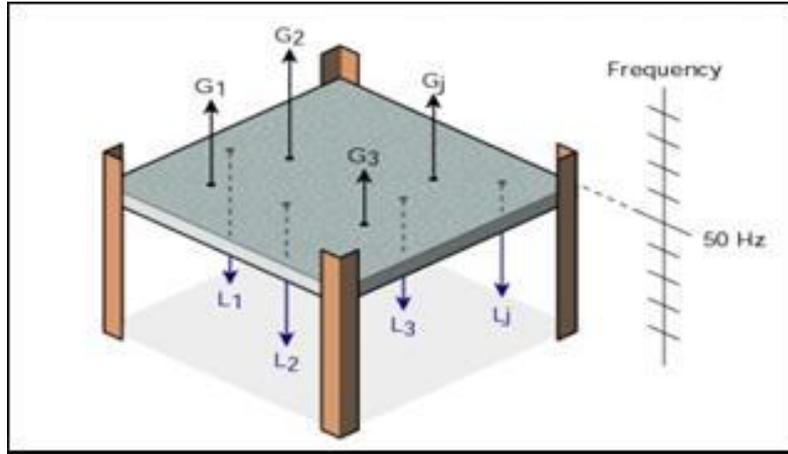
The machine accelerates for 10 cycles, i.e.,  $20 \times 10 = 200 \text{ ms} = 0.2 \text{ s}$ , starting with a synchronous speed of 1500 rpm. Therefore at the end of 10 cycles

$$\text{Speed} = 1500 + 43.6332 \times 0.2 = 1508.7266 \text{ rpm.}$$

النوع الثاني من دراسات الاستقرار:

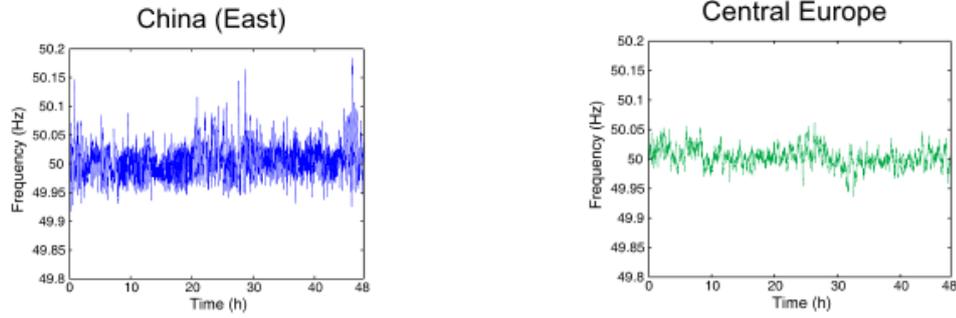
## 6-29 دراسة الاستقرار FREQUENCY STABILITY

يعتبر التردد هو العامل الذي يوازن بين الـ Load output Power و الـ Generated input power ، والشكل 9-29 يشرح العلاقة بين القدرة المتولدة والأحمال المتصلة بالشبكة من جهة ، وبين التردد من جهة أخرى ، فكما هو موضح فإن حدوث فصل لأحمال كبيرة بصورة مفاجئة (وهذا يكافئ ازدياد التوليد عن الحمل) فهذا يؤدي إلى حدوث زيادة في التردد . أما دخول أحمال زائدة على الشبكة بصورة مفاجئة أو لخروج بعض محطات التوليد فيؤدي إلى انخفاض التردد.



شكل 9-29 :

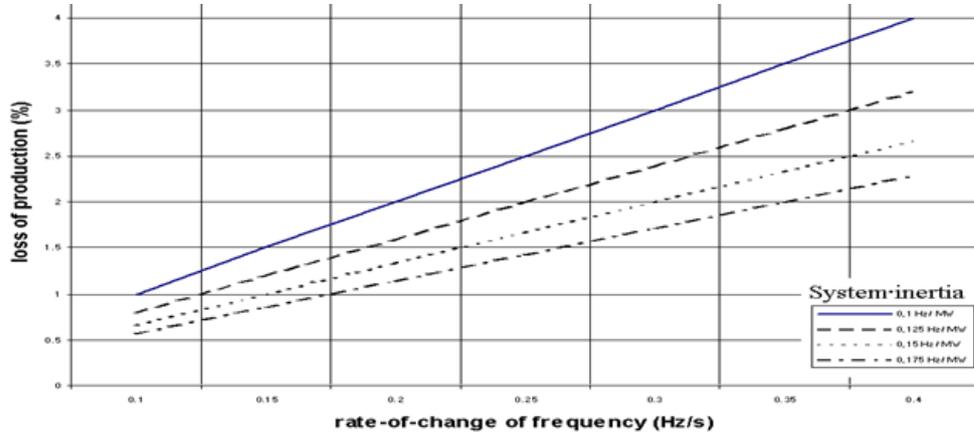
ومن ثم فالتردد هو ترمومتر الاتزان في الشبكة ، وعادة لا يسمح للتردد أن يقل عن 49.2 HZ أو يزيد عن 50.3 HZ. لاحظ المدى في شبكتي شرق الصين ووسط أوروبا في الشكل 10-29.



شكل 29-10.

## 7-29 تأثير الـ INERTIA على التغير في التردد

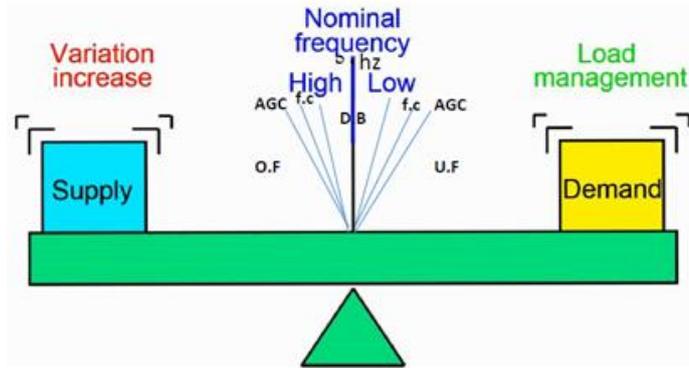
تقاس الـ Inertia بمقياس Hz/MW وكلما صغر ذلك المؤشر كان ذلك يعني أن الـ Inertia كبيرة وأن المولد ضخم ، و كلما كان المولد كبيرا في الحجم كلما كان اتزانته أسهل كما هو واضح من الشكل 29-11 ، فإن فقد نسبة من التوليد تؤدي إلى نسبة تغير في التردد أصغر كثيرا في المولدات التي لها Inertia كبيرة. ومن ثم كان هذا العامل هاما جدا في توصيف المولدات.



شكل 29-11 :

### 29-7-1 المجالات التي يتغير فيه التردد

يتغير التردد في Bands مختلفة على النحو الذي يظهر في الشكل 29-12 وتعريفها كالتالي:



شكل 12-29

**DB: Dead Band - 1**

هو مجال يسمح فيه بتغير التردد دون رد فعل من الشبكة أو الوحدة

**F.C: Frequency Correction - 2**

هو مجال يحدث فيه تغير في التردد و لكن هناك رد فعل تلقائي من خلال الـ Governor

**AGC: Automatic Generation Control - 3**

هو مجال يحدث فيه تغير التردد و لكن يكون رد الفعل عن طريق مركز التحكم القومى وأحيانا يكون من خلال المحطة نفسها.

**UF: Under Frequency - 4**

هو مجال يحدث فيه انخفاض شديد فى التردد مما يؤدي إلى فصل الأحمال Load shedding عن طريق مراكز التحكم بنسب معينة.

**OF: Over Frequency - 5**

هو مجال يحدث فيه ارتفاع شديد فى التردد مما يؤدي إلى فصل التوليد Blackout عن طريق منظومات الوقاية بالوحدة.

مع ملاحظة أن الحد المسموح به لتغير التردد وكذلك جدول فصل الأحمال يختلف من بلد لآخر. والجدول التالي يمثل حدود ونسب الفصل فى مصر.

نسبة فصل الحمل	التردد Hz
%2	49.2
%3	49.1
%4	49
%7	48.9
%20	48.8
%20	48.7
%22	48.6

وتنشأ اضطرابات التردد دائما بعد حدوث اضطراب في تغذية القدرة الفعالة كخروج محطة توليد كبيرة مثلا أو انقطاع خطوط الربط معها.

## 8-29 كيف يمكن علاج مشاكل الـ POWER DEFICIT

وكما ذكرنا ، فإن ثبات التردد شيء ضروري في الشبكة لاستقرارها غير أن التغير في التردد شيء طبيعي ومقبول إذا كان في مدى صغير فإذا زاد عن ذلك فيمكن التحكم فيه بواسطة الـ Governor ، فإذا زاد مدى التغير فربما نصل إلى مرحلة فصل بعض الأحمال أو ما يعرف بـ Load Shedding ، فإذا زاد التغير جدا فسنصل إلى الفصل التام للأحمال Blackout.

### 1-8-29 مراحل التحكم في التردد:

توجد عدة وسائل للتحكم في تغيرات التردد ، بعضها سريع جدا والآخر يستغرق وقتا كما يلي:

#### : (1s to 15s) Primary control

عندما يحدث تغير كبير في استهلاك الطاقة يقوم الـ primary control بتنظيم التردد بواسطة الـ governor. عند حد معين وليس بالضرورة إلى قيمته الثابتة .

**:Secondary control (15s to 3min)**

يستغرق وقت أكثر من الـ primary control ولكنه يقوم بإعادة التردد إلى قيمته الثابتة وهذا يحدث تلقائياً ولكنه متركز بمعنى أن نطاقه محدود من حيث المساحة ، ولذلك فكل مولد يحتوى على primary control ولكن ليس كل مولد يحتوى على secondary control

**: Tertiary control**

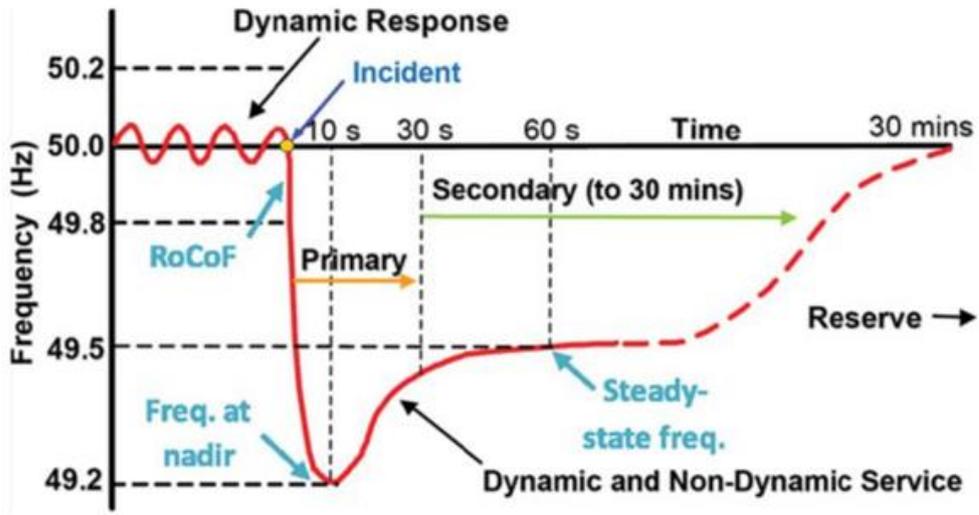
يستغرق وقت أكثر من الـ secondary control ووظيفته استعادة التردد الأصلي للمولدات المتشاركة فى الـ secondary control عن طريق توزيع الأحمال بينهم أو عن طريق تشغيل مولد إضافي وهذا ممكن أن يحدث أوتوماتيكيا أو يدويا.

**:Time control**

هو آخر مستوى فى التحكم والذى يستغرق وقت أكثر من كل الأنواع السابقة وهو يقوم بقياس التردد كل يوم للتأكد أنه فى نطاق التغيير المسموح به.

والجدول التالى يوضح المدى المؤثر فى كل نوع من أنواع أعطال الشبكات العامة والزمن المسموح به فى كل حالة .

Stage	Cause	Settings		
		for $f_N = 50$ Hz	for $f_N = 60$ Hz	Delay
f1	Disconnection from the network	48.00 Hz	58.00 Hz	1.00 sec
f2	Shutdown	47.00 Hz	57.00 Hz	6.00 sec
f3	Warning	49.50 Hz	59.50 Hz	20.00 sec
f4	Alarm or tripping	52.00 Hz	62.00 Hz	10.00 sec



والجدول التالي يبين المدى الزمني الذي تستغرقه عمليا التحكم المختلفة في الشبكة

Generator Primary Control and AGC	Economic Dispatch	Unit Commitment	Mid-Term Planning	Expansion Planning
Seconds	Minutes	Hours	Days	Weeks
				Years

## 9-29 دراسة الـ VOLTAGE STABILITY

حتى نهايات السبعينات كانت كل الكتب التي تدرس موضوع الـ Stability تدرسها من وجهة نظر استقرار عمل المولدات فقط ، من خلال دراسة التوازن بين العزم الكهربى والميكانيكى فى داخل المولد وهو النوع الأول من دراسات الاستقرار الذى سميناه بالـ Rotor angle stability. ثم بدأ الاهتمام بزيادة بنوع آخر من أنواع الـ Stability ، وهو الـ Voltage Stability ، وذلك مع تكرار حدوث عدة ظواهر جديدة على الشبكة آنذاك ، منها:

- Voltage Fluctuations
- Voltage Collapse

وبعد تحليل أسباب هذه الظواهر تبين أن دراسة الـ Voltage Stability لا تقل بل تزيد فى الأهمية عن دراسة النوع الأول من أنواع الـ Stability وأنه فى الغالب قد يكون سببا لمعظم حوادث انهيار النظام.

وسندرس هنا هذا النوع من الدراسات بشئ من التفصيل لشدة خطورته . وهذا النوع من الدراسة يهتم بدراسة العلاقة بين Demand and Load Supply . وعلى عكس الـ Rotor Angle Stability التى تهتم بوضع المولدات المتزامنة فى النظام فإن الـ Voltage Stability يهتم بوضع الأحمال Loads فى النظام ، وأكثر التركيز يكون على دراسة سد العجز فى قيم الـ Reactive Power التى تحتاجها الأحمال المركبة فى المنظومة .

وأهمية هذه الدراسات تكمن فى أن الارتفاع أو الانخفاض فى الجهد قد يؤدي إلى فصل بعض أنواع من الأحمال أو بعض الخطوط بواسطة أجهزة الحماية وهذا بالتبعية قد يؤدي إلى هزات فى النظام منها ، كما يمكن أن تتأثر المضخات والمحركات ومساعدات محطة التوليد الأمر الذى قد يؤدي لخروج المولد نفسه من الخدمة ، وقد يترتب عليه حدوث الخروج المتتابع cascaded outage والذى يمكن أن يؤدي إلى حدوث Blackout .

وكما ذكرنا سابقا فجميع أنواع الـ Stability قد تحدث متتابعة فخرج مولد نتيجة Rotor angle instability يمكن أن يؤدي إلى حدوث انخفاض فى الجهد عند العديد من الـ BBS وهكذا.

## 10-29 أنواع الـ VOLTAGE STABILITY

يوجد نوعان من الدراسات المتعلقة باستقرار الجهد:

1. Dynamic Voltage Stability
2. Static Voltage Stability

النوع الأول عبارة عن اهتزاز Fluctuation في الجهد نتيجة دخول أجهزة من النوع Fast acting devices مثل المحركات الحثية Induction Motors أو أجهزة HVDC والوقت المتاح لاستيعاب هذه الهزات في حدود 10-20 ثانية ، وهذا يصنف short term phenomenon .

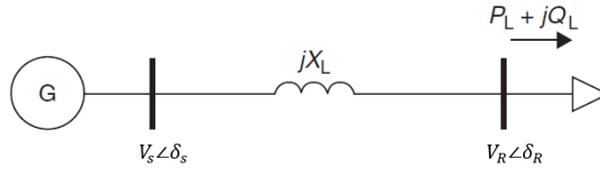
أما النوع الثاني فيحدث لو كانت التغيير الحادث في الجهد ناتج عن تغيير بطيء في الحمل أو نتيجة تحميل زائد مثلا أو تغيير في Tap Changing Transformers ففي هذه الحالات سيكون لدينا وقت في حدود عدة دقائق للتعامل مع الظاهرة وتصنف Long term phenomenon

### 1-10-29 ظاهرة انهيار الجهد الـ Voltage Collapse

وتعني أن جهد BB معين يصل للصفر فجأة بدون حدوث أى عطل مرئى أو مادي. فالمراقب العادى في هذه الحالة حين يرى أن الجهد وصل إلى الصفر فسيحكم لا محالة بأن هناك Short Circuit قد حدث بل وأن هذا القصر قريب جدا من الـ BB بحيث تسبب في هذا الانهيار السريع والكبير للجهد ، لكنه سيكتشف عدم وجود أى قصر ، والواقع أن السبب هو حدوث Voltage Instability أدى إلى حدوث انهيار للجهد Voltage Collapse كما سنرى.

## 11-29 أساسيات دراسة استقرار الجهد

ولدراسة هذا النوع من الاستقرار نحتاج دائما لدراسة بعض أنواع من المنحنيات أهمها P-V and Q-V . ودراسة هذا الموضوع فإننا نبدأ بمنظومة صغيرة كما في الشكل 12-29.



شكل 29- 12

فقيمة القدرة الفعالة المنقولة عبر هذا الخط التي ستصل للحمل ، وكذلك الـ Reactive Power الوصلة للحمل ستساويان على التوالي :

$$P_L = -\frac{V_S V_R}{X_L} \sin \delta$$

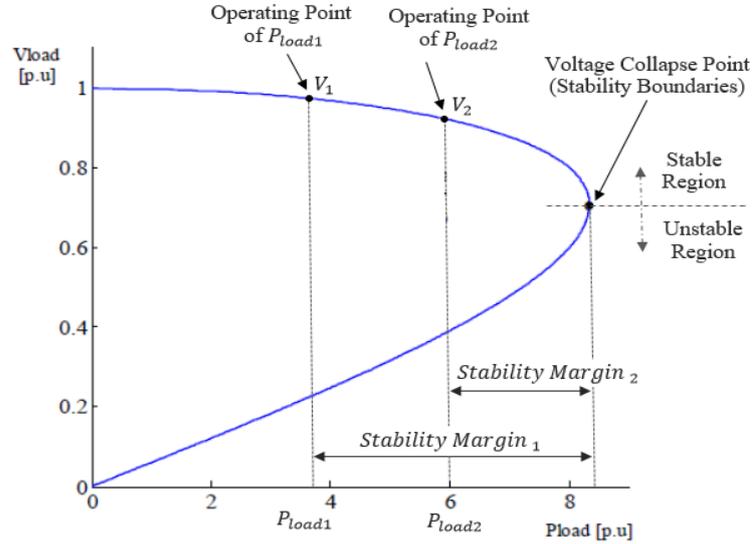
$$Q_L = -\frac{V_R^2}{X_L} + \frac{V_S V_R}{X_L} \cos \delta$$

بحل المعادلتين السابقتين بحثاً عن قيمة  $V_R$  وهي قيمة الجهد عن الحمل نحصل على المعادلة:

$$V_R = \sqrt{\frac{V_S^2}{2} - Q_L X_L} \pm \sqrt{\frac{V_S^4}{4} - X_L^2 P_L^2 - X_L V_S^2 Q_L}$$

وهذه المعادلة لها حلين وهذا واضح من رسم منحنى الـ P-V في الشكل 29-13 والذي يسمى في معظم المراجع بالـ Nose curve أو منحنى الأنف. بمعنى أنه لكل قيمة للقدرة الوصلة للحمل (سواء كان Load1 or Load2) سيكون لدينا قيمتان للجهد المتوقع عند جهة الحمل إحداهما في الجزء العلوى من المنحنى والأخرى في الجزء السفلى:

1- إحدى هاتين القيمتين (القيمة العلوية) تمثل نقطة التشغيل الطبيعية ، والجهد عندها ينخفض بزيادة التحميل ولكن بانخفاض طفيف مالم تتواصل الزيادة في التحميل حتى يصل إلى جهد الانهيار ، حيث تتحرك هذه النقطة يمينا مع تزايد التحميل فيتناقص في نفس الوقت ما يسمى بحد الاستقرار أو Stability Margin كما هو واضح في الشكل عند المقارنة بين نقطتي تشغيل Load1 و Load2 . بمعنى أنه كلما كانت نقطة التشغيل بعيدة عن نقطة الانهيار كلما زاد ما يعرف بالـ Stability Margin.



شكل 29 - 13 :

2- وأما (القيمة السفلى) فغير مقبولة وتعتبر Unstable لأنها صغيرة جدا مقارنة بالقيمة الطبيعية ، و لو حدث ووصلت نقطة التشغيل - لو لحظيا - لهذه القيمة فسينهار النظام فورا بسبب تتابع و تزايد الانهيار الناتج عن تجاوز حد الاتزان حتى نصل إلى مرحلة الـ Voltage Collapse ويصل الجهد إلى قيمة تساوى صفرا. والسبب في ذلك أن أى قيمة على الجزء السفلى من المنحنى هي قيمة منخفضة جدا ويترتب على انخفاض قيمتها أن الحمل يسحب تيارا شديدا الارتفاع (دائما نفترض ثبات القدرة) وهذا سيؤدى إلى مزيد من الانخفاض للجهد بسبب الـ Voltage drop الهائل الذى سينتج من التيار ومن ثم ندخل فى دوامة تنتهى بنا إلى قيمة جهد = صفر كما فى الشكل.

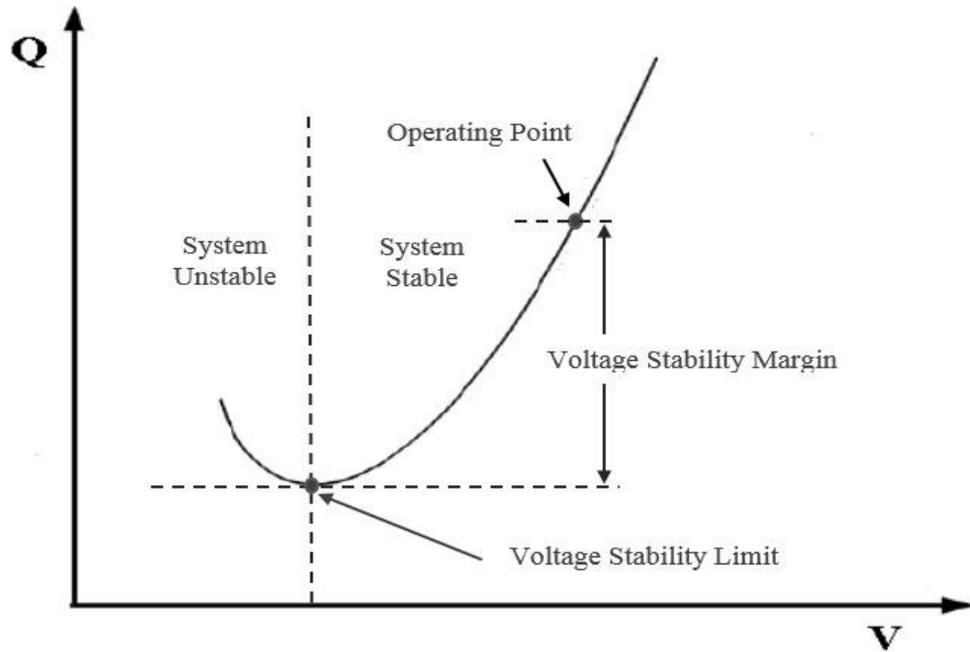
ومعنى أن الجهد يساوى صفرا أن لدينا وضع يشبه حالة الـ Short Circuit دون أن يكون لدينا Short Circuit ، فالجهد غالبا لا يساوى صفرا إلا إذا اتصل الموصل بالأرض فى حالة الـ Short Circuit ، ولكن هذه إحدى مظاهر خطورة ظاهرة عدم اتزان الجهد أن نصل إلى وضع كارثى كما فى حالة الـ SC دون أن يحدث SC حقيقى.

## 12-29 العلاقة بين الجهد و القدرة غير الفعالة

من المعادلة السابقة وصلنا إلى أن

$$V_R = \sqrt{\frac{V_s^2}{2} - Q_L X_L} \pm \sqrt{\frac{V_s^4}{4} - X_L^2 P_L^2 - X_L V_s^2 Q_L}$$

يمكن من هذه العلاقة رسم المنحنى الممثل للعلاقة بين الـ  $V_R$  وبين الـ  $Q$  كما في الشكل 14-29



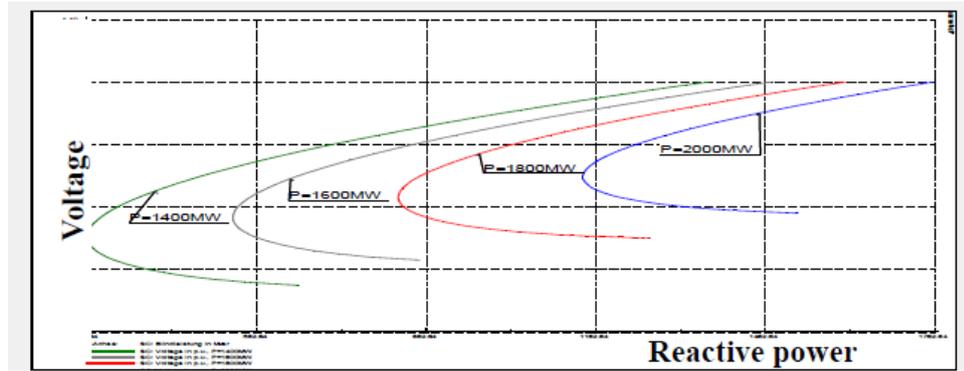
شكل 14-29 :

والذى يتضح منه أن حدوث أى انخفاض فى قيم الـ  $Q$  المتاحة من المصدر سيصاحبه انخفاض فى قيمة الجهد الواصل للأحمال يمكن أن تتسبب فى حدوث Voltage collapse. أيضا.

أما المنحنى فى الشكل 15-29 فيمثل عدة مستويات للتحميل وتظهر فيها العلاقة السابقة بين الجهد وبين الـ  $Q$  المتاحة من المصدر ، ومنها يتبين أن الجهد يرتفع بارتفاع قيمة الـ  $Q$  المتاحة من المصدر ، وينخفض بانخفاضها عند ثبات قيمة الـ  $P$  ، وأن المشكلة دائما تكمن فى حدوث انخفاض حرج للـ  $Q$

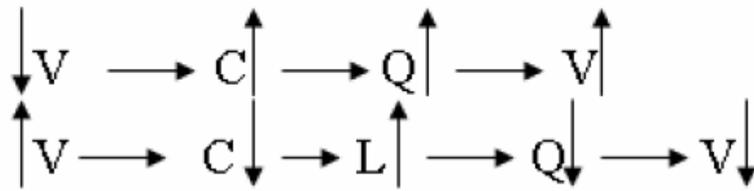
المتاحة من المصدر أى عدم قدرة الـ Supply على توفير الـ Q المطلوبة مع ثبات القدرة الفعالة المسحوبة ، عندها سيحدث حتما انهيار للجهد Voltage Collapse . قارن ذلك بمنحنيات العلاقة بين الـ Active Power والجهد السابقة والتي رأينا فيها أن الانهيار للجهد يحدث مع الارتفاع فى التحميل للـ P .

والواقع أن أغلب حالات انهيار الجهد تحدث حين تغشل المنظومة فى توفير الـ Q الكافية للأحمال المركبة على الشبكة ( وكان هذا هو السبب فى حدوث أكبر Blackout فى التاريخ ، والذى وقع فى أمريكا وتحديدا شمال شرق ، ووسط غرب أمريكا بالإضافة إلى مقاطعة أونتاريو بكندا ، وكان ذلك يوم 2003/8/14 ) ، ومن ثم فنحن نخشى دائما من حدوث أى ارتفاع فى قيمة الـ P المطلوبة أو حدوث أى انخفاض فى قيمة الـ Q المتاحة فى الشبكة.



شكل 29-15 :

والشكل 29-16 يلخص دور الـ Q التى نتحكم فيها بواسطة المكثفات C أو الملفات L من أجل التحكم فى تثبيت قيمة الجهد V .



شكل 29 - 16

والمعادلة السابقة لها صورة مبسطة كالتالى :

$$V_r = \frac{V_s + \sqrt{V_s^2 - 4X_1 Q_r}}{2}$$

$$Q_r = Q_s - Q_L \text{ حيث}$$

ومنها يمكن استنباط عدة مفاهيم:

$$1- \text{ إذا كانت } Q_L = Q_s \text{ عندها تكون } Q_r = 0 \text{ وتصبح } V_s = V_r$$

$$2- \text{ إذا كانت } Q_L > Q_s \text{ عندها تكون } Q_r = + \text{ وتصبح } V_s > V_r$$

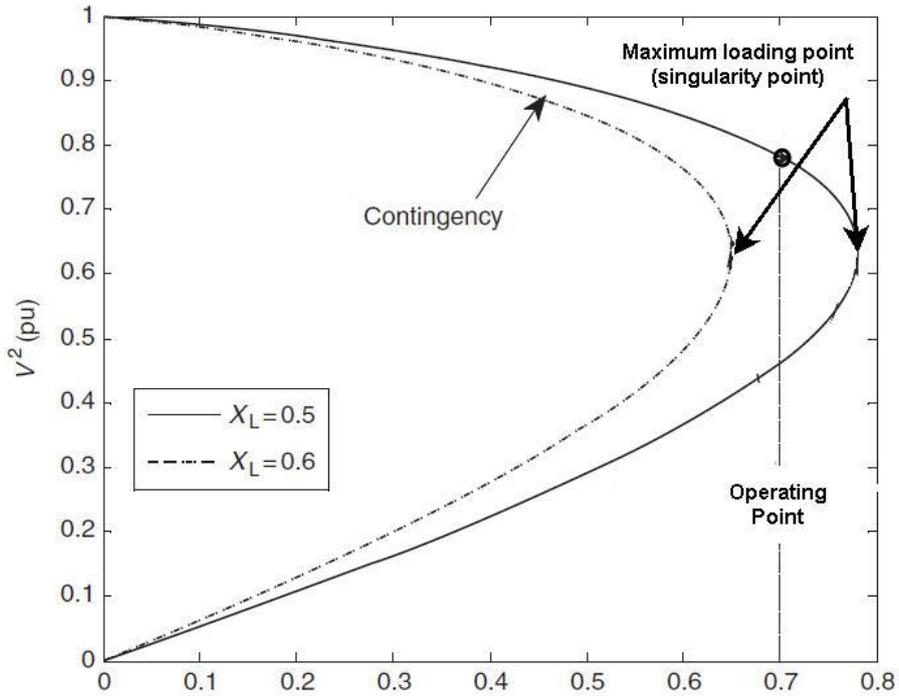
$$3- \text{ إذا كانت } Q_L < Q_s \text{ عندها تكون } Q_r = - \text{ وتصبح } V_s < V_r$$

- الحالة الأولى تمثل الوضع النموذجي
- الحالة الثانية تمثل حالة أن المطلوب أكثر من المتاح وهذا يمثل الواقع أثناء النهار ويترتب عليه حدوث Voltage Dip
- الحالة الثالثة تمثل حالة أن المطلوب أقل من المتاح وهذا يمثل الواقع أثناء الليل ويترتب عليه حدوث Ferranti Effect أى ارتفاع الجهد عند الحمل ويصبح أعلى من الجهد عند المصدر. ومن ثم يتضح تأثير قيمة الـ Q على ثبات قيمة والجهد وتغيرها في الشبكات

## 13-29 العوامل المؤثرة على سرعة انهيار الجهد

هناك عدة أسباب تؤدي لحدوث هذه الظاهرة أهمها بالطبع زيادة الأحمال كما سبق شرحه. ومن الأسباب الأخرى:

- 1- تغير قيمة  $X_{line}$  المكافئة الواصلة بين الـ Source وبين الـ Load وذلك قد يحدث نتيجة فتح مفاجئ مثلاً لأحد الخطوط بينهما فتزيد القيمة المكافئة للـ X ومن ثم فإن مساحة منحنى P-V ستقل (الخط المنقط في الشكل 17-29) وهذا يعنى كما هو واضح فى الشكل أن الـ Stability Limit قد صار أصغر واحتمالية اقتراب نقطة التشغيل من حد الاستقرار تزداد (لاحظ أن القدرة تتناسب مع مربع الجهد فى الشكل السابق).

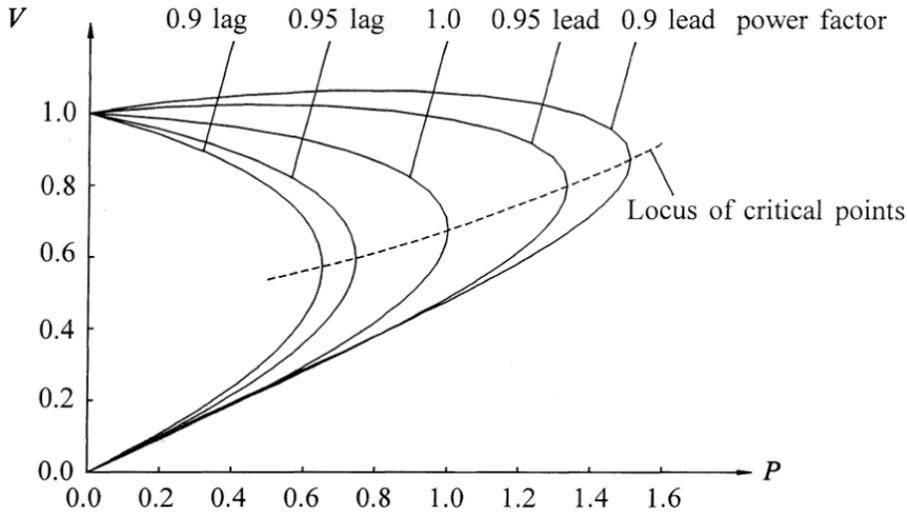


شكل 29-17

- 2- ومن الظواهر التي قد تؤدي لانهايار الجهد تزامن حدوث Starting لعدد كبير من المحركات الحثية في نفس الوقت ، وهذا يعني سحب تيار بدء عالي جدا ويتسبب ذلك في انخفاض جهد الشبكة بسبب الـ Voltage drop . وهذه المحركات تصنف ضمن معدات Constant Power Devices بمعنى أن انخفاض الجهد عليها يصاحب بارتفاع التيار (  $P = V \cdot I$  ) وهذا يعني تقاوم المشكلة بسبب تزايد قيمة التيار المسحوب وربما وصلنا لحد الانهايار .
- 3- ومن الظواهر التي تساعد في تسارع انهيار الجهد انخفاض قيمة معامل القدرة للأحمال المركبة . و بالمنحنيات الموجودة في الشكل 29-18 تبين مدى تأثر الـ Stability Margin بتغير قيمة الـ PF لارتباط ذلك بقيمة الـ Reactive Power المسحوبة للأحمال . وهذا يحتاج لشيء من الشرح كما في الجزء التالي .

## 1-13-29 ملحوظات على استقرار الجهد

1- منحنى الـ Nose Curve يمكن إعادة رسمه مع قيم مختلفة لمعامل القدرة كما في الشكل 29-1- حيث نلاحظ أن الوضع يزداد سوءا كلما اتجه معامل القدرة لليمين أي كلما أصبح  $\text{PF}$  leading فيصبح مدى الاستقرار Stability Limit أصغر ، فعندما يكون معامل القدرة leading ستلاحظ أن أي انخفاض ولو بسيط في الجهد يمكن أن يؤدي إلى انهيار الجهد بينما في حالة الـ lagging PF فيسمح بالانخفاض في الجهد لمدى أكبر قبل الوصول إلى حافة الأنف التي بعدها ينهار الجهد (لا أدري هل لهذا علاقة بالجملة الدارجة لمن يتضايق من شيء ما فيشير لأنفه ويقول : وصلت معي إلى هنا!!!! ) .



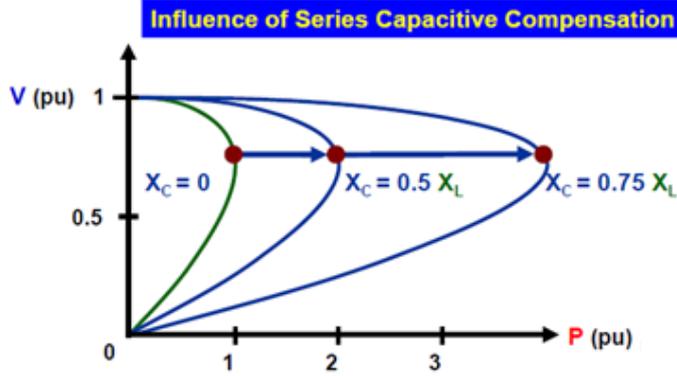
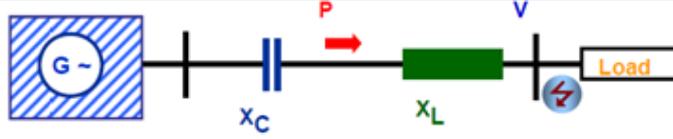
شكل 29- 18 :

2- أحد الأسباب الرئيسية لهذه الظاهرة هو ارتفاع الأحمال حتى تجاوزت قيمة أقصى قدرة يمكن نقلها على الخط ، وهو ما يؤدي إلى انتقالنا للعمل على الجزء السفلي من منحنى نقل القدرة.  
3- ومن الأسباب الرئيسية أيضا أن أي انخفاض في الجهد سيؤدي إلى زيادة سحب الـ Reactive Power وهو ما يؤدي إلى مزيد من الانخفاض في الجهد وربما نصل لحافة منحنى الـ Nose Curve سريعا وندخل إلى الجزء السفلي من المنحنى ومن ثم نتجه مباشرة إلى انهيار الجهد .

## 14-29 طرق تحسين استقرار الجهد فى الشبكات

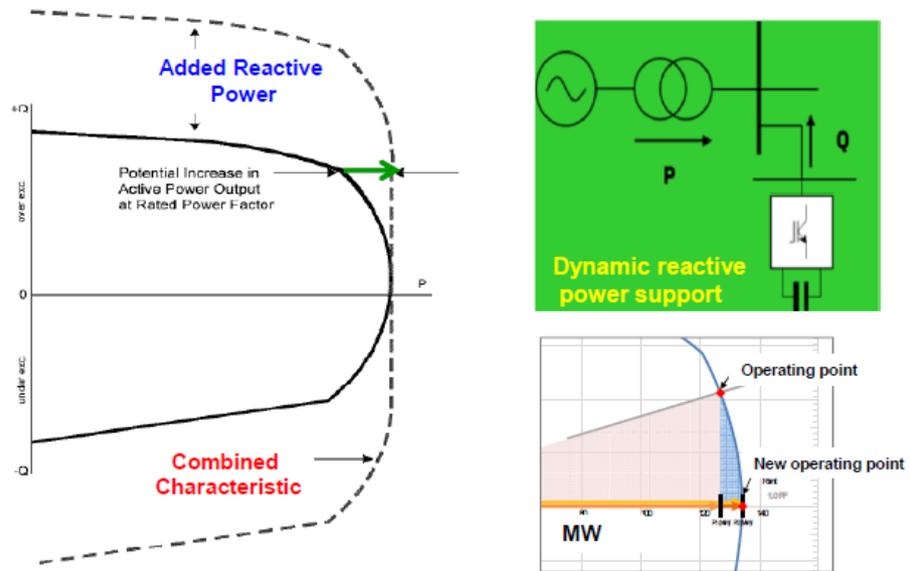
### 1-14-29 أولا فى شبكات الجهد العالى :

1. تغيير التغذية الخاصة بالـ Exciter لوحات التوليد الموجودة بالخدمة مما يؤدي إلى زيادة أو نقصان القدرة الغير فعالة المولدة.
2. فصل وتوصيل الـ Reactors على الشبكة جهد 500 ك.ف ( توجد فى مصر سبع ممانعات سعة 165 MVAR/Unit وحدتان بالسد العالى - وحدتان بنجع حمادى - ثلاث وحدات فى سمالوط).
3. تشغيل المكثفات المتزامنة (كما فى محطة محولات القاهرة 500 ك.ف حيث توجد 3 وحدات سعة 65 MVAR/Unit)
4. ضبط مغيرات الجهد فى محطات محولات 220 /500 - 66/220 ك.ف.
5. يستعمل مغير الجهد Tap Changer لرفع وخفض الجهد فى المحولات جهد 11/66 ك.ف.
6. استخدام الـ Series Capacitive Compensation كما فى المخطط شكل 19-29. لاحظ فى الـ P-Q Curve الخاص بالمولد أن إضافة أى Q جديدة ستساعد فى تغذية P إضافية جديدة عند نفس معامل القدرة.



شكل 19-29 :

7. استخدام أدوات تساعد في عمل Dynamic Voltage support عن طريق استخدام Dynamic Reactive Power Support ، والنتيجة واضحة في الشكل 20-29.



شكل 20-29

## 29-14-2 ثانياً : في الجهد المتوسط والمنخفض

ويتم هنا بعدة طرق منها :

## 1- استخدام المكثفات الثابتة :

تستخدم وحدة أو أكثر من المكثفات ، ويتم توصيلها بطريق مباشرة ومستديمة على قضبان التوزيع الرئيسية لتعطي مستوى ثابت من تعويض القدرة الغير فعالة.

## 2- استخدام بطاريات المكثفات الأوتوماتيكية :

وتستخدم في معظم الأماكن حيث يكون معدل التغير في كل من القدرة الفعالة والغير فعالة كبيراً نسبياً نتيجة لتغير الأحمال ويكون استخدام المكثفات الثابتة أوفر اقتصادياً وأبسط فنياً من بطاريات المكثفات الأوتوماتيكية .

غير أن تحديد استخدام أي من الطريقتين السابقتين وتقادى احتمال حدوث مشاكل عند توصيل مكثفات على الشبكة مع عدم وجود أحمال يتوقف على كل من قدرة محول التوزيع وقدرة المكثفات طبقاً للقاعدة الآتية :

إذا كانت  $\frac{Q_c}{S_n} \geq 15\%$  فعندها يمكن استخدام المكثفات الثابتة.

وإذا كانت  $\frac{Q_c}{S_n} < 15\%$  فعندها يمكن استخدام بطاريات المكثفات الأوتوماتيكية

حيث:

$Q_c$  : قدرة المكثفات (kVAR)

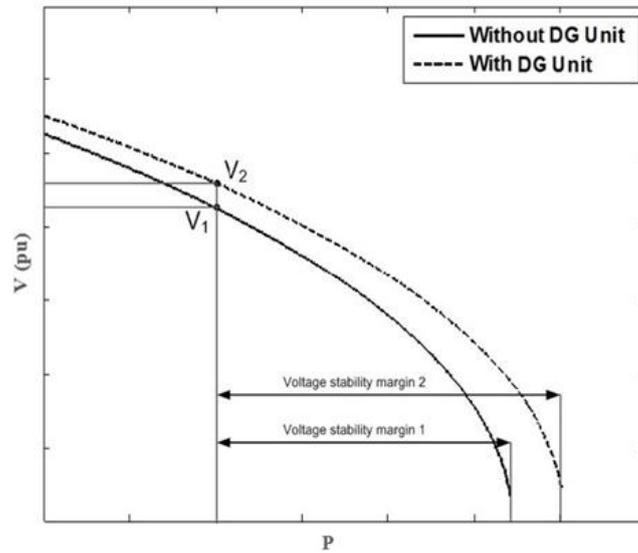
$S_n$  : قدرة محول التوزيع (kVA)

## 3- استخدام وحدات التوليد الموزعة DG

وحدثاً أضيفت طريقة ثالثة لتحسين اتزان الجهد بالشبكة وذلك بإضافة ما يسمى بالـ Distributed Generation, DG وهي مولدات (غالباً تعمل على إحدى أنواع مصادر الطاقة الجديدة مثل الطاقة الشمسية أو الرياح) لكنها تدخل في مرحلة التوزيع وليس في مرحلة التوليد كما في نظم القوى الكهربائية التقليدية والتي تتكون عادة من ثلاثة مراحل هي التوليد ثم النقل ثم التوزيع. أما في هذا النظام الجديد

DG فإن المولدات تدخل في المرحلة الأخيرة (مرحلة التوزيع) لتحقيق عددا من المكاسب من أهمها أن تكون بالقرب من الأحمال فتقل القدرة المفقودة في الخطوط.

وأیضا لتساهم بكفاءة في تحسين اتزان الجهد بالشبكة كما سنرى من المنحنى شكل 21-29 الذي يمثل نفس منحنى الـ Nose Curve السابق لكن في وجود وعدم وجود الـ DG ومنه يتبين أن الـ Stability Margin زادت وبالتالي تحسن استقرار النظام .



شكل 21-29

#### 4- فصل الأحمال.

إذا لم يتيسر شئ من الطرق السابقة فلن يكون هناك حل للمحافظة على استقرار الجهد مع تزايد الأحمال واقترب نقطة التشغيل من حافة الـ Nose Curve سوى بفصل بعض الأحمال أو ما يعرف بالـ Load Shedding

#### 5- إعادة توزيع الأحمال

هناك حل خامس لكنه حل على المدى البطيء وفكرته هو إعادة توزيع الأحمال داخل الشبكة لتقليل الضغط على الموزعات أو المحولات المحملة بشدة ، وهو ما يسمى بالـ Network Reconstruction أو Network Reconfiguration.

## 6- حلول أخرى

بالطبع هناك حلول أخرى مثل عمل خليط بين حلين أو ثلاثة من الحلول السابقة معا كأن نستخدم DG مع مكثفات مثلا.

الخلاصة:

مما سبق يمكن أن نخلص إلى أن من أهم وسائل تجنب ظاهرة عدم اتزان الجهد ما يلي:

- 1- تحسين معامل القدرة للأحمال
- 2- تركيب مكثفات ثابتة ومتغيرة في شبكات التوزيع بغرض الوصول لتحسين الـ Stability Limit وليس مجرد تحسين معامل القدرة وهذا يستلزم استخدام الـ Optimization Techniques لتحديد أفضل الأماكن وأدق القيم لهذه المكثفات
- 3- التوسع في استخدام الـ VAR Compensators وتعنى معوضات الـ Reactive Power وهى أشكال عديدة ويمكن الرجوع لموضوع القدرة غير الفعالة بهذا الكتاب (الباب الثانى) للمزيد حول هذه النقطة خاصة أنها تساهم بشكل فعال جدا فى تحسن ثبات الجهد عند حدوث اهتزازات قوية Dynamic Stability.

## 30

## التوافقيات في الشبكات الكهربائية

## HARMONICS

معلوم أن المولدات تقوم في الأحوال العادية بإنتاج voltage signals على صورة sin wave بتردد ثابت. ويتم توصيل الأحمال لهذه المولدات عبر خطوط لنقل الطاقة تصل بين المولد والحمل ، ثم عند إغلاق الدائرة يمر تيار إلى الحمل تتوقف شدته على قيمة الجهد وقيمة مقاومة الحمل كما هو معلوم طبقاً لقانون أوم. ويكون شكل موجة التيار في هذه الحالة تشبه تماماً موجة الجهد وتختلف فقط في القيمة . وحتى لو كان الحمل مكوناً من مقاومات وملفات فستظل شكل موجة التيار على شكل sin wave مثل الجهد مع وجود Phase angle بين موجتي الجهد والتيار.

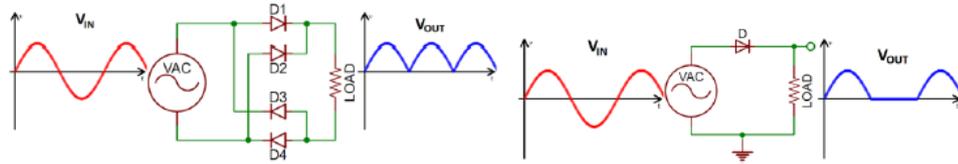
وكل ما سبق صحيح بشرط أن يكون الحمل من النوع الـ Linear Load ، حيث تزيد قيمة التيار أو تقل مع تغير قيمة معاوقة الحمل بمعدلات ثابتة.

ثم بدأت مشاكل التوافقيات في الظهور مع انتشار non-linear loads ، ومع التوسع في استخدام أجهزة إلكترونيات القوى Power Electronics, PE في مغيرات السرعة للمحركات الكهربائية Speed Drives ، وكذلك استخدام الأجهزة الإلكترونية التي تحتاج إلى DC supply تحصل عليه من أجهزة switching power supplies ، واستخدام لمبات الفلورسنت ذات البالست الإلكترونية في الإضاءة . كل هذا أدى إلى واقع جديد مختلف عما سبق ، حيث تسببت هذه الأحمال و هذه الأجهزة في ظهور ترددات جديدة في موجة الجهد والتيار لم تكن موجودة في الأصل ، وهذه الترددات الجديدة هي التي نسميها بالتوافقيات أو الـ Harmonics .

## 1-30 ماهى الـ HARMONICS وكيف تنشأ ؟

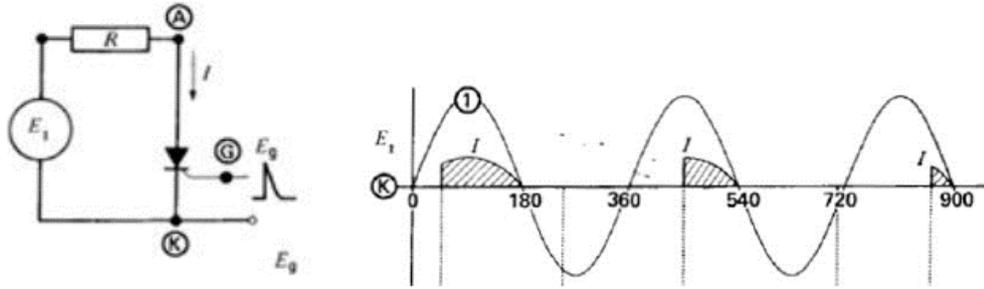
فى العقود الأخيرة كما ذكرنا ظهرت أنواع جديدة من الأحمال لا تتغير قيمة التيار خلالها بوتيرة ثابتة ومحددة ، أو بمعنى آخر لا تتبع قانون أوم ، وبأسلوب آخر نقول أن هذه الأحمال الجديدة إذا وضعت عليها جهد على شكل  $\sin wave$  فليس بالضرورة أن يمر خلالها تيار له نفس الشكل ومن هنا سميت هذه الأحمال بأحمال Non-linear أو أحمال غير خطية . فإذا علمنا أن أكثر من 50% من الأحمال المنزلية وبنسبة أكبر فى الأحمال الصناعية الآن تصنف على أنها nonlinear loads فهذا يعطى مؤشرا لخطورة هذا الموضوع.

على سبيل المثال ظهرت دوائر توحيد التيار المتردد rectifier circuits التى تدخل عليها pure sin ويخرج منها التيار إلى الحمل بأشكال مختلفة حسب نوع العنصر المستخدم فى الدائرة وهل هو مثلا دايود واحد أم Bridge أم ثايرستور SCR. لاحظ مثلا فى الشكل 1-30 الاختلاف الكبير بين شكل الجهد فى الـ Input وشكله فى الـ Output علما بأن شكل التيار المار فى الحمل (المقاومة) سيأخذ نفس شكل Output Voltage لأن الحمل مقاومات كما هو معلوم من أساسيات الـ Phasor Diagrams .



شكل 1-30 :

وقد يتشوه التيار بصورة أكبر إذا كانت الـ Rectifier circuits تعتمد على عنصر الـ SCR كما فى الشكل 2-30 الذى تظهر فيه إشارة جهد الدخول كـ Pure sin بينما التيار (الجزء المظلل) مختلف فى الشكل تماما.



شكل 2-30 :

هذه التوافقيات لا يقتصر تأثيرها فقط على مجرد تشوه شكل الموجة ، فلو كان الأمر فقط كذلك لما كان هناك مشكلة ، بل سيتعدى ذلك إلى سخونة المعدات واضطراب في العمل وربما تدمير لبعض الأجهزة كما سنرى ذلك تفصيلا في هذا الباب.

ونشير هنا إلى أن التوافقيات كانت موجودة حتى قبل ظهور هذه النوعية من الأحمال أو الأجهزة ، فقد كانت موجودة وإن كان ذلك بنسبة ضئيلة في الجهود الناتجة من المولدات ، وكانت أيضا موجودة بنسب بسيطة بسبب محولات القوى في الشبكة ، لكن الظهور الأقوى للتوافقيات كان بعد انتشار الأحمال غير الخطية وأجهزة الـ PE.

### 1-1-30 طبيعة التوافقيات

تبين من خلال استخدام أجهزة تحليل الموجات Spectrum Analyzer المعتمدة على نظرية Fourier Transform (شكل 3-30) أن موجة التيار أو الجهد  $f(t)$  ، لم تعد تشتمل على تردد الـ 50Hz فقط كما كان في حالة الأحمال الخطية ، بل أصبحت تتكون من عدد من الترددات من مضاعفات الـ 50Hz ، وهذه الترددات الجديدة - الغير موجودة أصلا في موجة مصدر التغذية (جهد الدخول) - هي التي نسميها بالتوافقيات أو الـ Harmonics ، وتصبح  $F(t)$  تكتب رياضيا على الصورة التالية:.

$$f(t) = a_0 + r_1 \cos(\omega_0 t + \varphi_1) + \sum_n r_n \cos(\omega_{0n} t + \varphi_n)$$

↓ DC component     
 ↓ Fundamental     
 ↓ Harmonics

ويتم تقسيم التوافقيات إلى توافقيات ذات رتبة فردية (H3، H5، H7) وتوافقيات ذات الرتبة الزوجية (H2، H4، H6). والتوافقيات الفردية هي الأكثر شيوعا في الشبكات الكهربائية ، ويكون تردد التوافقية هو

حاصل ضرب رتبها في 50 بمعنى أن تردد التوافقية الخامسة مثلا يساوي 5 ضرب 50 أى يساوي 250Hz .



شكل 3-30 :

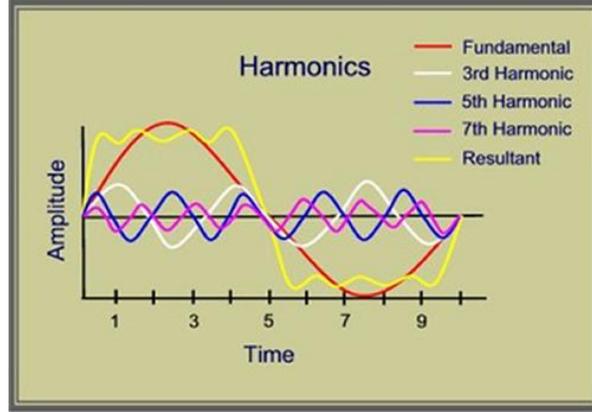
والسبب في عدم انتشار التوافقيات الزوجية الـ Even harmonics هو أن معظم الأحمال الإلكترونية لها half symmetrical wave ، مثل منحنى الـ Sin ، والتي يكون فيها الجزء الموجب والجزء السالب متماثلين تماما ، وفي هذه الحالة تسحب فقط ترددات من الفئة الفردية ، بينما الترددات من الفئة الزوجية تحتاج لوجود أحمال تسحب Full symmetrical waveforms وهي غير شائعة اللهم إلا في حالات Arc Furnaces .

والشكل 3-4 يظهر نموذجا لبعض التوافقيات مقارنة بالتردد الأصلي الذي يسمى Fundamental حيث تظهر

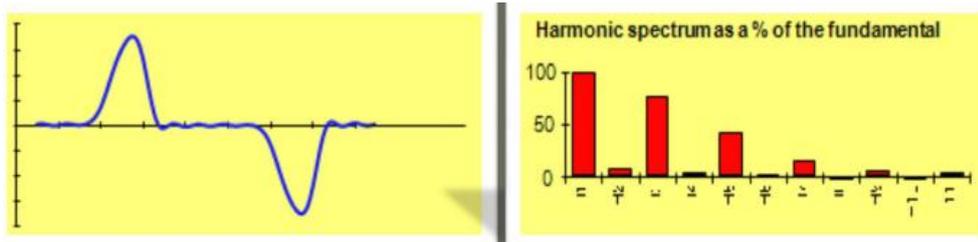
- 150 Hz (Third Harmonic)
- 250 Hz (Fifth Harmonic)
- 350 Hz (seventh Harmonic)

كما تظهر الموجة المشوهة المحصلة Resultant الناتجة عن جمع كل هذه التوافقيات معا.

وبعض الأجهزة تعطى نتائج التحليل على شكل نسب مئوية لقيمة الـ Spectrum المختلفة كما في الشكل 3-5.



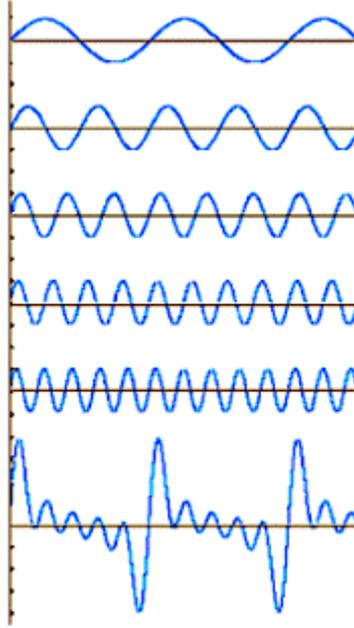
شكل 4-30 :



شكل 5-30 :

مع ملاحظة أننا إذا قمنا بجمع الترددات المنفردة سواء رياضياً أو بالرسم فسنحصل مرة أخرى على الموجة المشوهة الأصلية كما في المعادلة والشكل 6-30.

$$I_{rms} = \sqrt{I_{h1}^2 + I_{h3}^2 + I_{h5}^2 + \dots + I_{hn}^2}$$

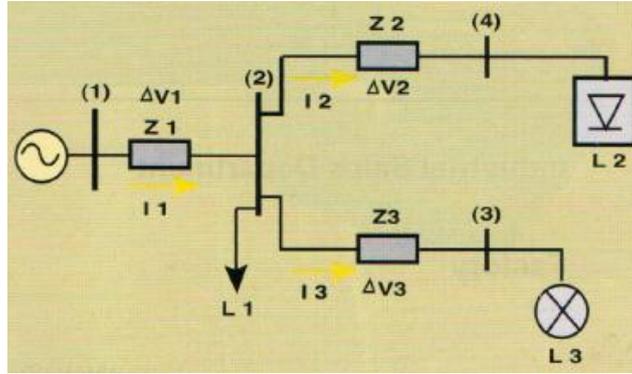


شكل 30-6 :

### 2-1-30 لماذا تختلف الـ Harmonics في إشارتي الجهد والتيار لنفس الحمل؟

نستنتج مما سبق أن الـ Harmonics تتولد بسبب الأحمال الغير خطية أو الأحمال التي تستخدم أجهزة PE ، فهذه الأحمال تسحب تيارا من المصدر بتردد مختلف عن تردد الشبكة الأساسي ( 50Hz ) ، وهذا التيار المتجه من المصدر إلى الحمل الغير خطي يمر خلال معاوقات الخطوط الواصلة من الحمل للمصدر فينشأ عن مروره جهودا بترددات مختلفة عن الـ 50Hz ، وتجمع هذه الجهود الجديدة على الجهد الأصلي عند كل نقطة فينشأ جهودا جديدة مشوهة لأنها نتاج جمع جهود ذات ترددات مختلفة كما في المثال التالي في الشكل 30-7.

في البداية إذا تم تشغيل الحمل L3 فقط وهو Linear Load فسيمر تيار بالدائرة يشبه تماما إشارة الجهد ولن تتأثر لا شكل ولا قيمة إشارة الجهد على الـ BBs المختلفة اللهم إلا بقدر الـ Voltage drop .



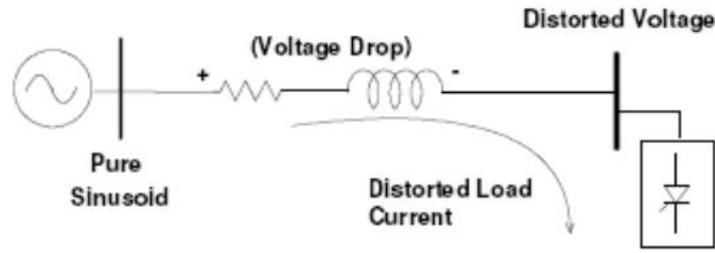
شكل 7-30 :

لكن بمجرد تشغيل الحمل  $L_2$  وهو من النوع الـ Non Linear فسيسحب تيارا مشوها ، وينشأ هبوط في الجهد قدرة  $\Delta V_2 = I_2 \times Z_2$  وأيضا ينشأ هبوطا في الجهد يساوى  $\Delta V_1 = I_1 \times Z_1$  .  
وبإضافة هذه القيم بإشارتها على قيم الجهود الأصلية سنكتشف أن الجهود على جميع الـ BBS أصبحت مشوهة وتزداد درجة التشوه كلما كانت قيم الـ Impedances,  $Z_1, Z_2$  عالية بينما يكون التشوه محدودا إذا كانت الـ  $Z$  صغيرة.

ومن هنا نقول :

يتوقف وجود أثر التوافقيات في إشارة الجهد على قيم معاوقة النظام والخطوط. وبالتالي ففي بعض الحالات قد تجد التوافقيات عالية في إشارة التيار (لأنها أصلا تظهر في التيار) بينما لا وجود لها في إشارة الجهد بسبب انخفاض معاوقات الخطوط.

أن الشبكات التي لها Short circuit Capacity مرتفعة والتي تسمى Strong Grid (وهذا يعنى Xgrid منخفضة) سيكون تأثير الـ Harmonics عليها محدودا لصغر قيمة ( $Z \times I$ ) والعكس صحيح. والشكل 8-30 يوضح أكثر هذه النقطة ، فرغم تشوه الجهد عند الحمل يظل الجهد عند المصدر غير مشوه.



شكل 30-8 :

## 2-30 كيف نقيس حجم تأثير التوافقيات؟

يوجد معاملان مستخدمان لهذا الغرض :

- الأول هو الـ Individual Harmonic Distortion ويقاس نسبة التشوه الناتج من وجود توافقية محددة واحدة مقارنة بالموجة الأصلية (سواء في الجهد أو التيار)
- الثاني هو الـ Total Harmonic Distortion ويقاس نسبة التشوه الناتج من وجود كل التوافقيات مقارنة بالموجة الأصلية (سواء في الجهد أو التيار)

$$THD_I = \sum_n \sqrt{\frac{I_n^2}{I_1^2}} \quad THD_V = \sum_n \sqrt{\frac{V_n^2}{V_1^2}} \quad THD = \frac{RMS \text{ Value all Harmonics}}{RMS \text{ Value Fundamental}}$$

### حساب الـ Individual Harmonic Distortion

يمكن حساب هذا المعامل كما في المعادلة التالية (للتيار) .

$$IHD_n = I_n / I_1$$

### حساب الـ Total Harmonic Distortion

يمكن حساب هذا المعامل كما في المعادلة التالية (للتيار) .

$$I_H = \sqrt{(I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + I_5^2 + I_6^2 + I_7^2 + \dots)}$$

$$THD = (I_H/I_1) \times 100\%$$

**مثال:**

احسب الـ THD فى إشارة الجهد علما بأن القياسات أظهرت وجود توافقيات بالقيم التالية.  
احسب أيضا الـ IHD .

$$\text{Fundamental} = V_1 = 114 \text{ V}$$

$$3^{\text{rd}} \text{ harmonic} = V_3 = 4 \text{ V}$$

$$5^{\text{th}} \text{ harmonic} = V_5 = 2 \text{ V}$$

$$7^{\text{th}} \text{ harmonic} = V_7 = 1.5 \text{ V}$$

$$9^{\text{th}} \text{ harmonic} = V_9 = 1 \text{ V}$$

**الحل:**

$$\text{RMS value of the harmonics} = V_H = \sqrt{(4^2 + 2^2 + 1.5^2 + 1^2)} = 4.82 \text{ V}$$

$$THD = (4.82/114) \times 100 \cong 4.23\%$$

ولحساب الـ Individual Harmonic Distortion, IHD

$$IHD_3 = 4/114 = 3.51\%$$

$$IHD_5 = 2/114 = 1.75\%$$

$$IHD_7 = 1.5/114 = 1.32\%$$

$$IHD_9 = 1/114 = 0.88\%$$

## 3-30 سمات هامة للتوافقيات .

الاختلاف بين التوافقيات ليس فقط اختلاف في قيمة التردد ، حيث التوافقية الثالثة مثلا ترددها 150 والخامسة ترددها 250 وهكذا ، فليس هذا هو الاختلاف الوحيد بين التوافقيات وبعضها البعض ، ولكن التوافقيات تختلف أيضا فيما بينها حسب الـ Phase Sequence .

$$\begin{array}{l}
 I_a(t) = I_1 \sin(\omega_o t) + I_2 \sin(2\omega_o t) + I_3 \sin(3\omega_o t) \\
 I_b(t) = I_1 \sin\left(\omega_o t - \frac{2}{3}\pi\right) + I_2 \sin\left(2\omega_o t - \frac{4}{3}\pi\right) + I_3 \sin(3\omega_o t) \\
 I_c(t) = I_1 \sin\left(\omega_o t + \frac{2}{3}\pi\right) + I_2 \sin\left(2\omega_o t - \frac{2}{3}\pi\right) + I_3 \sin(3\omega_o t)
 \end{array}$$

Fundamental	2 <sup>nd</sup> order harmonic	3 <sup>rd</sup> order harmonic
-------------	--------------------------------	--------------------------------

لاحظ في المعادلات السابقة الأجزاء الخاصة بالتوافقية الثالثة في الـ 3-phases:

$$i_{a3} = I_{a3} \sin 3\omega t$$

$$i_{b3} = I_{b3} \sin 3(\omega t - 120^\circ) = I_{b3} \sin (3\omega t - 360^\circ) = I_{b3} \sin 3\omega t$$

$$i_{c3} = I_{c3} \sin 3(\omega t - 240^\circ) = I_{c3} \sin (3\omega t - 720^\circ) = I_{c3} \sin 3\omega t$$

وهنا تظهر المفاجأة الغريبة وهي أن الـ three phases الممثلة للتوافقية الثالثة جميعها في نفس الاتجاه ولا يوجد بينهم أى Phase Sequence ولذا سميت التيارات التي تحمل هذه التوافقية بالـ Zero Sequence Currents .

أما المفاجأة الثانية فتظهر حين نكتب معادلات التوافقية الخامسة في الـ three phases على النحو التالي:

$$i_{a5} = I_{a5} \sin 5\omega t$$

$$i_{b5} = I_{b5} \sin 5(\omega t - 120^\circ) = I_{b5} \sin(5\omega t - 600^\circ) = I_{b5} \sin(5\omega t - 240^\circ)$$

$$i_{c5} = I_{c5} \sin 5(\omega t - 240^\circ) = I_{c5} \sin(5\omega t - 1200^\circ) = I_{c5} \sin(5\omega t - 120^\circ)$$

وهنا تظهر المفاجأة الثانية وهي أن الـ three phases الممثلة للتوافقية الخامسة جميعها تدور في نفس اتجاه عقارب الساعة أى أن التيارات التي تحمل هذه التوافقية تتميز بأنها من النوع المعروف بالـ Negative Sequence Currents.

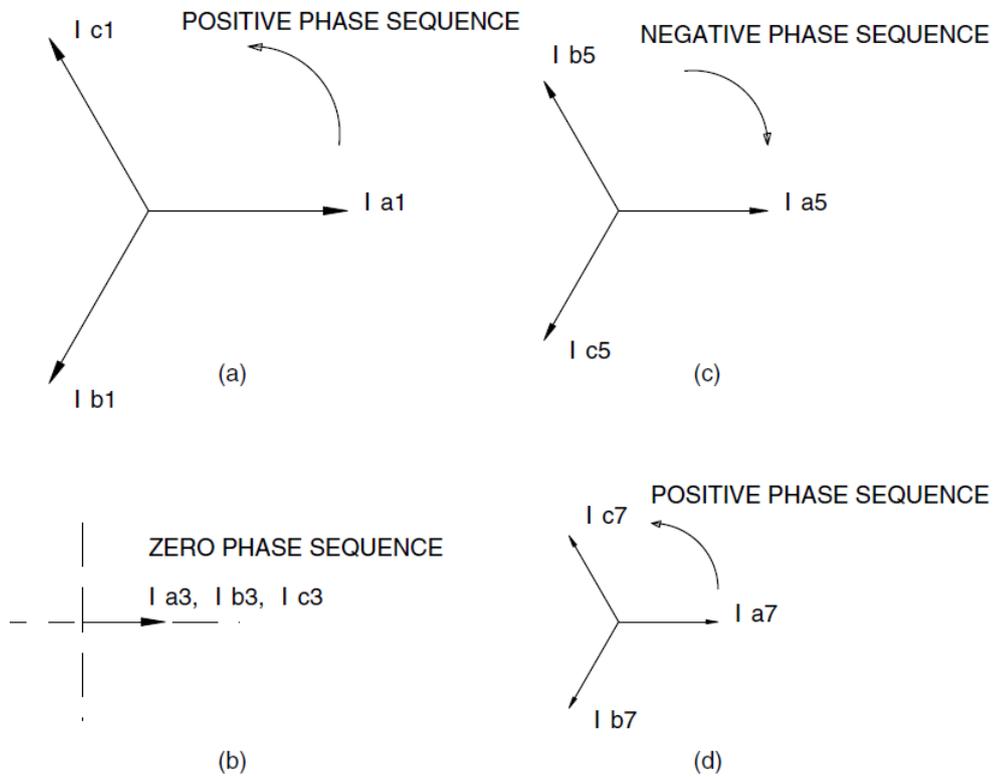
فإذا نظرنا إلى معادلات التوافقية السابعة سنكتشف أنها من النوع المعروف بالـ Positive Sequence Currents كما هو واضح من المعادلات التالية

$$i_{a7} = I_{a7} \sin 7\omega t$$

$$i_{b7} = I_{b7} \sin 7(\omega t - 120^\circ) = I_{b7} \sin(7\omega t - 840^\circ) = I_{b7} \sin(7\omega t - 120^\circ)$$

$$i_{c7} = I_{c7} \sin 7(\omega t - 240^\circ) = I_{c7} \sin(7\omega t - 1680^\circ) = I_{c7} \sin(7\omega t - 240^\circ)$$

والشكل 30-9 يلخص ما سبق



شكل 9-30 :

كما أن الجدول 1-30 يجمل نتائج بقية التوافقيات المعروفة والـ Phase Sequence الخاص بكل واحدة.

جدول 1-30

### Harmonic Order vs. Phase Sequence

Harmonic Order	Sequence
1, 4, 7, 10, 13, 16, 19	Positive
2, 5, 8, 11, 14, 17, 20	Negative
3, 6, 9, 12, 15, 18, 21	Zero

الخلاصة حتى الآن أن التوافقيات لها ترددات مختلفة ولها أيضا Phase Sequences مختلفة . والنقطة الثانية هامة جدا حين ندرس موضوع الـ Harmonic Cancellation حيث يمكن إجراء بعض التعديلات على قيم الزوايا من أجل أن تلغى مركبة ما مركبة أخرى كما سنرى.

## 4-30 مصادر توليد الـ HARMONICS :

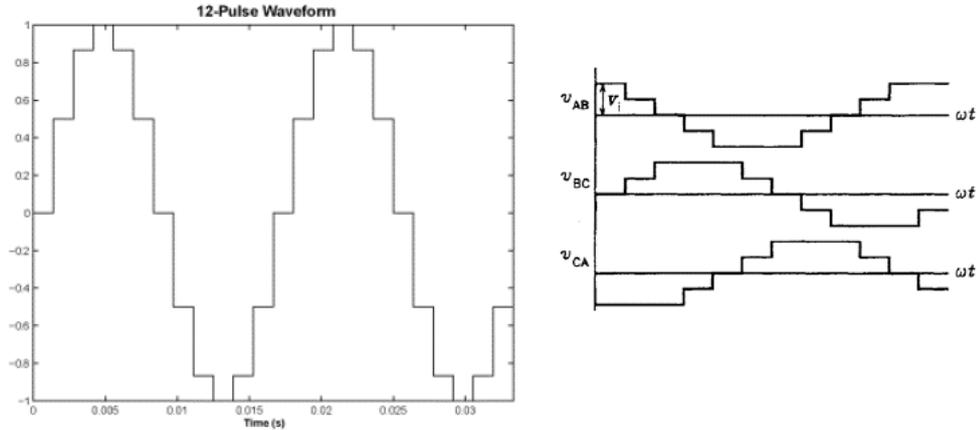
تعتبر الأجهزة التالية هي أهم مصادر توليد التوافقيات في الشبكات:

- أجهزة الـ PE ومصابيح الـ LED
- مصابيح الفلورسنت
- المعدات ذات القوس الكهربى
- محولات القوى

### 1-4-30 أجهزة التي تستخدم معدات الـ Power Electronics :

مثل موحدات التيار Rectifiers وكذلك الـ Inverters ومغيرات السرعة Drives . هذه الأجهزة تنتج كما كبيرا من التوافقيات بسبب تغيير شكل الموجة الخارجة عن الموجة الداخلة . وبالرغم من أن تأثير كل جهاز إلكترونى فى زيادة توافقيات الشبكة يعتبر صغيرا ، إلا أن كثرة عدد الأجهزة الإلكترونية تجعلها مصدرا مؤثرا للتوافقيات فى الشبكة .

ومن أشهر وأهم هذه الأجهزة أجهزة الـ 6-Pulse Converter ، وأجهزة الـ 12-Pulse Converters لكثرة انتشارها فى أجهزة الـ UPS. حيث هذه الأجهزة يمكنها تحويل الـ DC إلى AC والعكس كما فى الصورة شكل 10-30 التي تقارن بين الـ AC الناتجة من 6-pulse Inverter وبين الـ AC الناتجة من 12-pulse Inverter . لاحظ أيضا أنه كلما زادت عدد النبضات كلما كانت الموجة الناتجة أقرب للموجة الجيبية المرجوة وهذا يعنى أنها أقل فى التوافقيات.



شكل 30-10 :

وهناك قاعدة تقول أن الـ Converter ذو  $p$ -pulse يولد توافقيات من الرتبة  $pk \pm 1$ . حيث  $p$  عدد النبضات pulse ، و  $k$  التسلسل ( 1 ، 2 ، 3 ، ..... )

وعلى هذا ، فهذه الأجهزة تسبب تشويه في موجتى الجهد والتيار وأغلب التوافقيات الناتجة هو من الرتب الفردية طبقاً للقاعدة السابقة . على سبيل المثال أجهزة الـ 6-Pulse ستولد توافقيات بأرقام تساوى  $6k \pm 1$  أى يتولد التوافقيات الـ 5 و 7 و 11 و 13 (لاحظ غياب مضاعفات التوافقية الثالثة).

أما النوع الثانى الـ 12-Pulse فينتج توافقيات من رتب  $12k \pm 1$  أى توافقيات رقم 11 و 13 و 23 و 25 وهكذا . وبالطبع مع ارتفاع رتبة التوافقية ستقل قيمتها بحيث يمكن إهمال التوافقيات الأعلى مثلاً من 49. وهذا سبب آخر لتمييز الـ 12-Pulse عن الـ 6-Pulse.

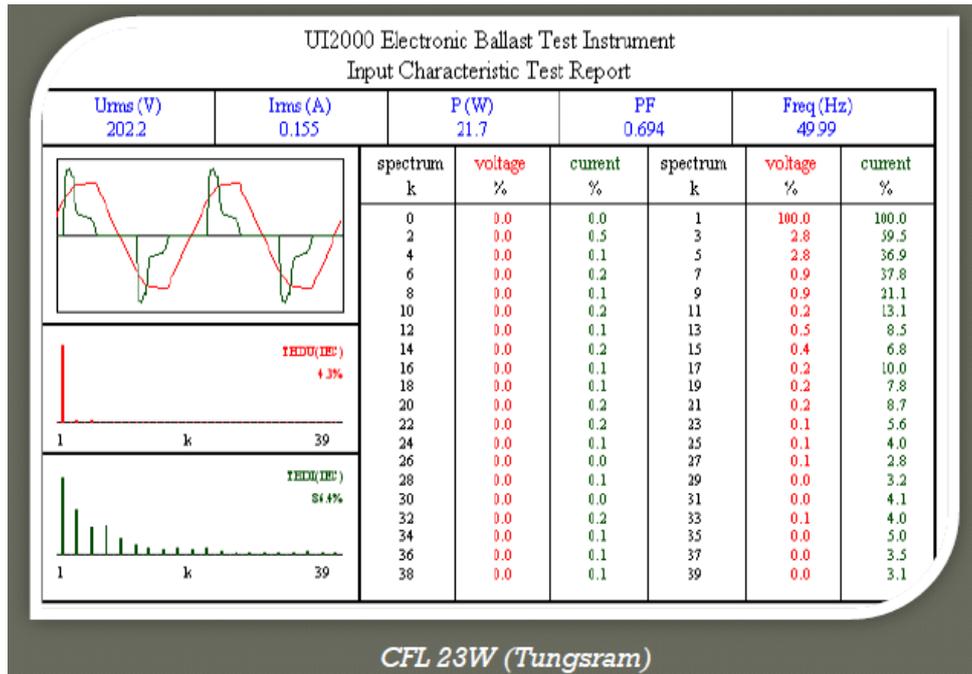
والأفضل من الاثنين استخدام الـ 18-pulse والذي ينتج التوافقيات ( 17 ، 19 ، 35 ، 37 ) ولكن مشكلته الوحيدة هو ارتفاع ثمنه لذا فهو نادر جداً في المكونات الكهربائية بالشبكة المصرية.

### 30-4-2 مصابيح الفلورسنت:

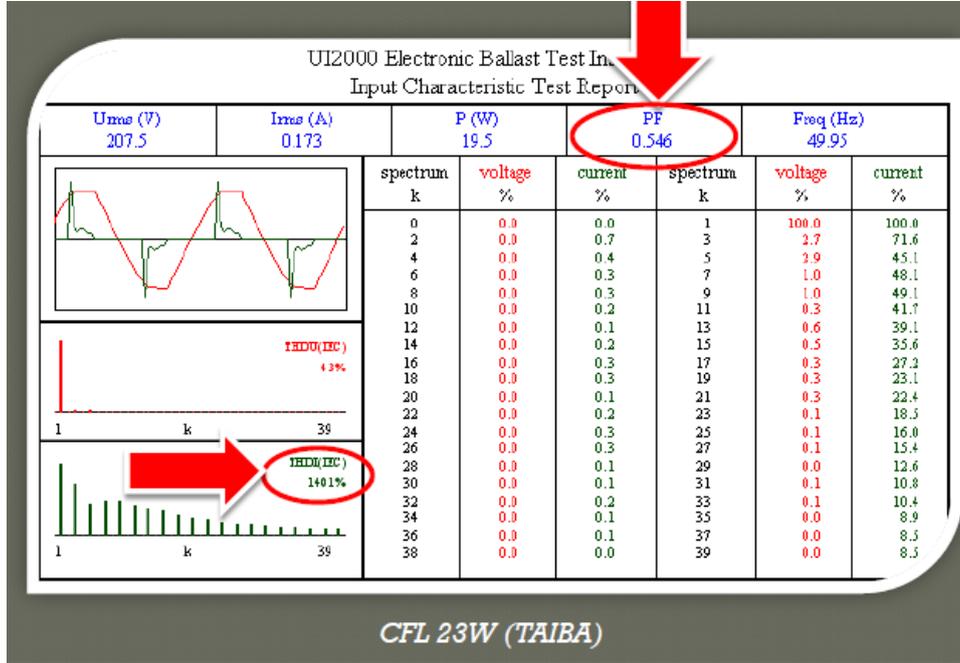
تولد المصابيح قوساً كهربياً ويتولد عنها توافقيات من الدرجة الثالثة . و الخبرة العملية دلت على أن قيمة تيار التوافقيات فى هذه المصابيح قد تصل إلى 30% من قيمة تيار التردد الأساسى.

وفي الجداول التالية (من 2-30 إلى 4-30) دراسة عن حجم وجود التوافقيات في الجهد والتيار في بعض أنواع اللمبات المعروفة باسم Compact Florescent Lamp CFL . وواضح من هذه الجداول ارتفاع قيمة التشوه بدرجة هائلة في إشارات التيار في النموذجين الأول والثاني وهذا متوقع لاسيما بعد أن تنظر لشكل إشارة التيار في الرسم الموجود في يسار كل جدول.

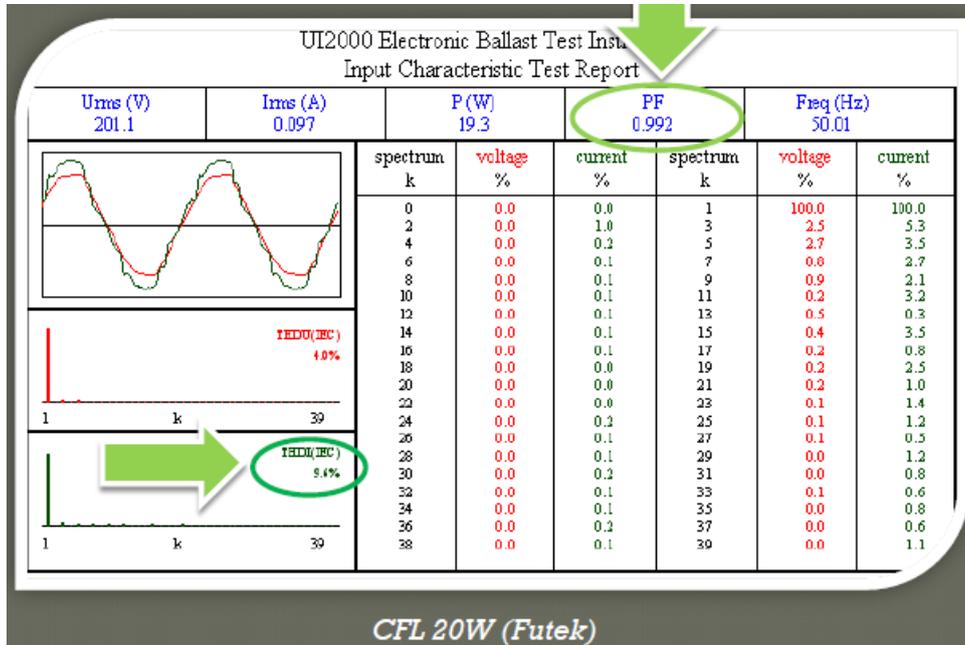
جدول 2-30 :



جدول 3-30 :

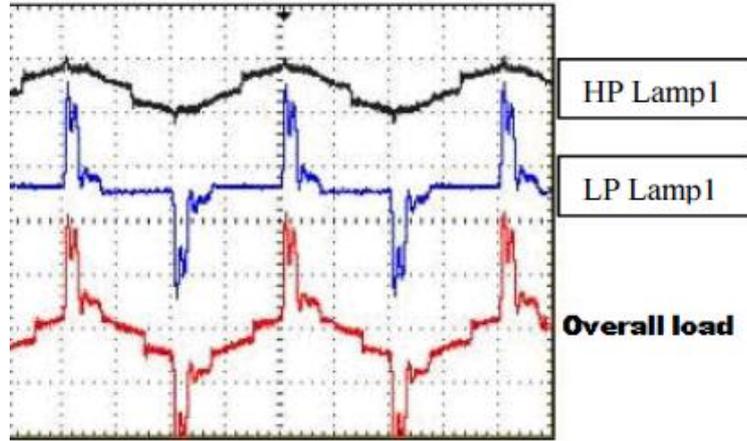


جدول 4-30 :



ويمكن تقسيم هذا النوع من المصابيح إلى نوعين :

الأول ذو خصائص جيدة وله High Performance, HP ، كما في النموذج الثالث السابق ، وهذا النوع يتميز بأن THD له صغير جدا وفي الحدود المسموح بها طبقا ، وذلك حسب المواصفات الدولية رقم IEC 61000 -3-2 . وهذا النوع نادر جدا في السوق المصري ، وإن وجد فأسعاره مبالغ جدا فيها ، نتيجة تركيب نوع من الفلتر بهذا النوع من اللمبات لتتنقية الموجة. ويصل THD فيه إلى 18% . الثاني ذو خصائص سيئة ( Low Performance, LP ) كما في النموذجين الأول والثاني السابقين ، وهذا النوع تصل فيه THD إلى 100% ، وهو منتشر جدا بالسوق المصري للأسف لرخص سعره. والشكل 11-30 يوضح شكل موجة التيار لكل من النوعين منفردين ومجتمعين.

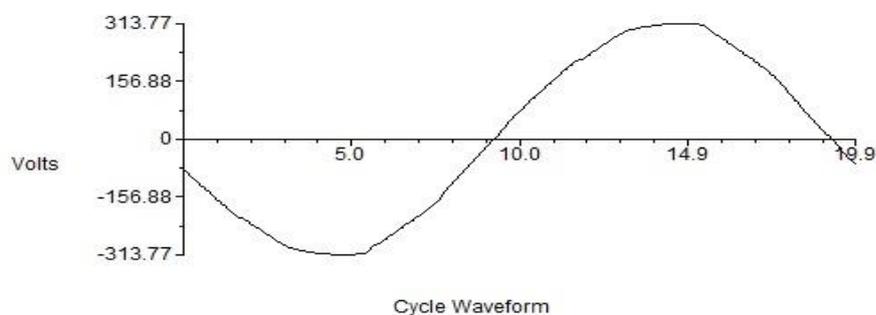


شكل 11-30 :

وفيما يلي دراسة تفصيلية على لمبة CFL قدرتها 25 وات من النوع low performance (أجراها أحد الطلاب الذين أشرف عليهم بالماجستير) . وقد وجد لها الخصائص التالية :

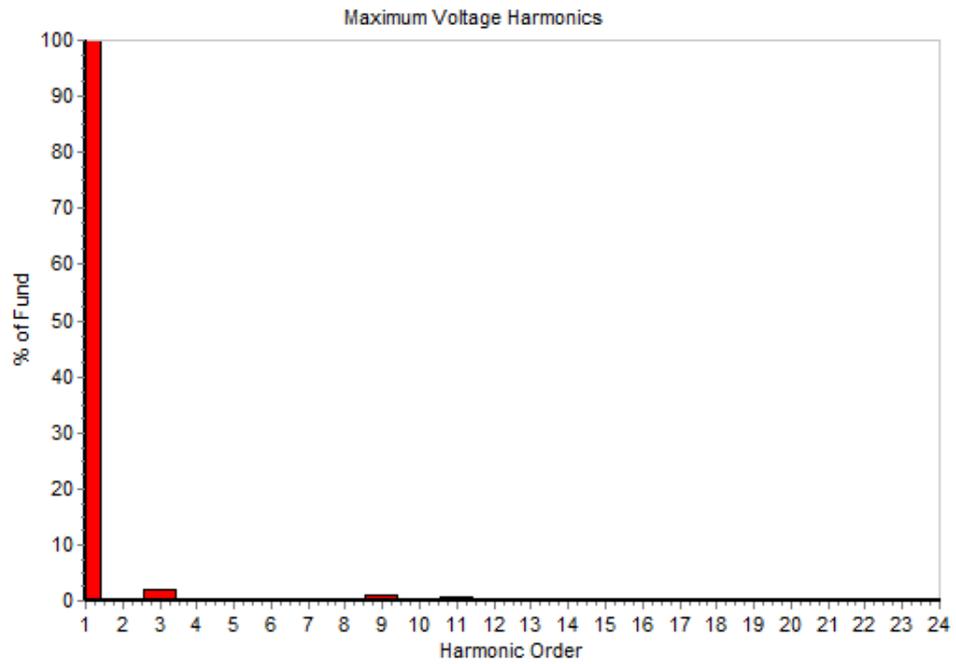
- القدرة الفعلية ( power ) للمبة 22 وات
- التيار (current) 0.158 أمبير
- معامل القدرة الحقيقي (يأخذ في الحسبان التوافقيات) (total power factor) (lead) 0.66
- معامل القدرة الظاهري (displacement power factor) (lead) 0.92

وبالقياسات وجد أن التوافقيات في إشارة الجهد كانت في الحدود المسموح بها وشكل الموجه كما بالشكل التالي:

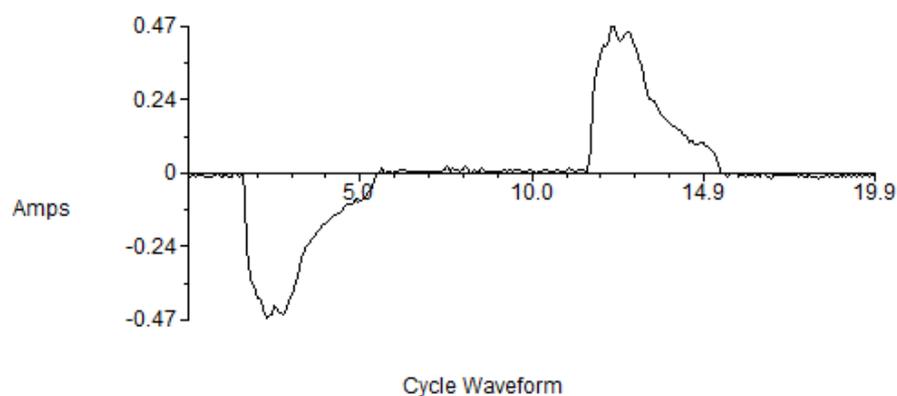


Total Harmonic Distortion	2.40 %
Odd Contribution	2.40 %
Even Contribution	0.08 %
RMS Of Fundamental	222.36 V
RMS Of Fund + Harm	222.42 V

Harm Fund	% Of Fund	Volts	Angle	Harm	% Of Fund	Volts	Angle
0	100.00	222.4	0°	0	0.00	0.0	0°
3	2.03	4.5	93°	2	0.04	0.1	193°
5	0.33	0.7	342°	4	0.01	0.0	126°
7	0.32	0.7	53°	6	0.02	0.0	81°
9	0.95	2.1	182°	8	0.01	0.0	113°
11	0.52	1.2	340°	10	0.01	0.0	36°
13	0.18	0.4	299°	12	0.02	0.0	348°
15	0.25	0.6	233°	14	0.01	0.0	355°
17	0.15	0.3	80°	16	0.01	0.0	1°
19	0.12	0.3	201°	18	0.01	0.0	11°
21	0.20	0.4	312°	20	0.00	0.0	163°
23	0.04	0.1	214°	22	0.01	0.0	253°
25	0.10	0.2	235°	24	0.02	0.0	8°
27	0.15	0.3	13°	26	0.01	0.0	163°
29	0.02	0.0	200°	28	0.01	0.0	276°
31	0.09	0.2	233°	30	0.01	0.0	103°
33	0.05	0.1	104°	32	0.00	0.0	120°
35	0.03	0.1	216°	34	0.01	0.0	126°
37	0.10	0.2	325°	36	0.01	0.0	165°
39	0.01	0.0	131°	38	0.01	0.0	112°
41	0.04	0.1	196°	40	0.01	0.0	14°
43	0.01	0.0	310°	42	0.04	0.1	28°
45	0.02	0.0	159°	44	0.02	0.0	195°
47	0.05	0.1	295°	46	0.01	0.0	174°
49	0.02	0.0	220°	48	0.01	0.0	332°
51	0.03	0.1	146°	50	0.01	0.0	98°
53	0.03	0.1	26°	52	0.01	0.0	74°
55	0.01	0.0	156°	54	0.00	0.0	51°
57	0.01	0.0	263°	56	0.00	0.0	341°
59	0.01	0.0	54°	58	0.01	0.0	203°
61	0.03	0.1	154°	60	0.01	0.0	119°
63	0.01	0.0	61°	62	0.00	0.0	260°

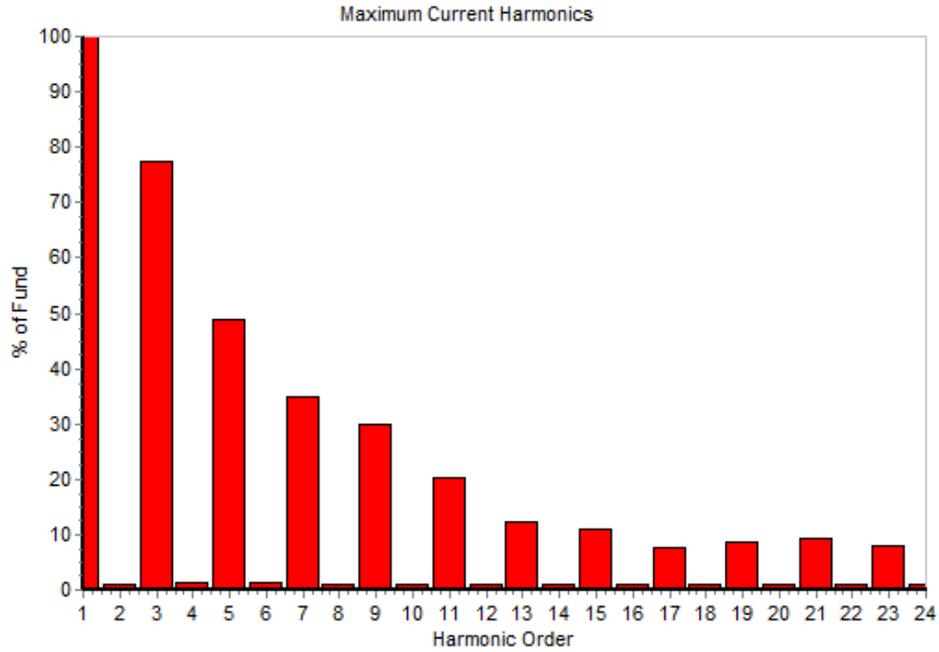


أما التوافقيات فى إشارة التيار فكانت كارثية كما هو متوقع و كما هو موضح بشكل الموجه التالي :



Total Harmonic Distortion	93.03 %
Odd Contribution	93.02 %
Even Contribution	1.51 %
RMS Of Fundamental	0.13 A
RMS Of Fund + Harm	0.18 A

Harm	% Of Fund	Amps	Angle	Harm	% Of Fund	Amps	Angle
Fund	100.00	0.1	0°	0	0.00	0.0	0°
3	71.89	0.1	175°	2	0.07	0.0	68°
5	40.76	0.1	11°	4	0.09	0.0	116°
7	29.32	0.0	225°	6	0.21	0.0	90°
9	22.72	0.0	64°	8	0.23	0.0	99°
11	10.57	0.0	270°	10	0.27	0.0	148°
13	7.45	0.0	153°	12	0.29	0.0	117°
15	6.14	0.0	12°	14	0.05	0.0	327°
17	4.93	0.0	269°	16	0.30	0.0	166°
19	7.83	0.0	118°	18	0.05	0.0	193°
21	6.04	0.0	312°	20	0.18	0.0	59°
23	4.23	0.0	184°	22	0.38	0.0	195°
25	4.64	0.0	33°	24	0.25	0.0	23°
27	2.30	0.0	229°	26	0.24	0.0	308°
29	2.17	0.0	169°	28	0.35	0.0	31°
31	2.78	0.0	12°	30	0.29	0.0	237°
33	2.71	0.0	246°	32	0.34	0.0	53°
35	3.05	0.0	94°	34	0.12	0.0	23°
37	2.50	0.0	309°	36	0.42	0.0	326°
39	2.31	0.0	180°	38	0.12	0.0	148°
41	2.83	0.0	26°	40	0.15	0.0	299°
43	2.31	0.0	246°	42	0.45	0.0	259°
45	2.41	0.0	103°	44	0.33	0.0	290°
47	2.37	0.0	298°	46	0.19	0.0	327°
49	1.54	0.0	145°	48	0.15	0.0	107°
51	0.85	0.0	1°	50	0.26	0.0	343°



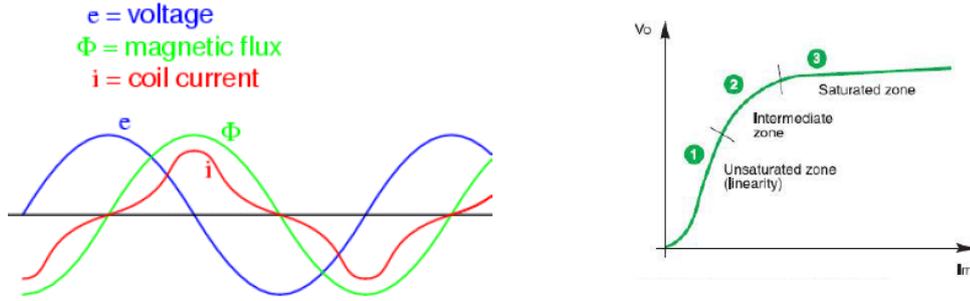
### 3-4-30 المعدات ذات القوس الكهربى "Arc furnaces" .

تعد الأفران ذات القوس الكهربى من أكبر المصادر المولدة للتوافقيات كما فى مصانع الحديد والصلب ، وتتشابه معها معدات اللحام بالقوس الكهربى. حيث تقوم فكرة عمل هذه الأجهزة على عمل تيار قصر "Short Circuit" قيمته مرتفعة جدا فتسحب تيارا عاليا يولد حرارة عالية جدا فى مقاومة المعدن تكفى لصهره، وعن طريق التشغيل المتقطع لهذه العملية نستطيع الوصول لدرجة حرارة معينة لصهر المعادن ، ولكن هذا التقطيع للتيار للأسف ينتج ما تسمى بالتوافقيات "Harmonics" مما يؤثر على جودة القدرة عند المصدر والذى بدوره يؤثر على الأحمال المجاورة لمثل هذه المنشآت الصناعية وداخل المنشآت أيضا.

#### المحولات:

المحولات ومثلها الأجهزة الكهرومغناطيسية لا تولد توافقيات طالما أنها تعمل فى المنطقة الخطية من منحنى مغنطة المواد المغناطيسية ( يعرف أيضا بـ B-H curve ) كما فى الشكل 12-30 ، ورغم أن شكل الفيض الناشئ يشبه شكل الجهد الذى أنشأه إلا أن التيار المسحوب يتأثر بالـ non-linearity

C/C التي تميز علاقة الجهد والفيض فيصبح غير خطى كما فى الشكل وبالتالي يصبح المحول مصدرا للتوافقيات إذا دخل فى منطقة التشبع.



شكل 30-12 :

ورغم أن كمية التوافقيات عادة لا تكون كبيرة ولكن بسبب كثرة عدد المحولات بالشبكة فإنها تصبح مؤثرة. ولاعتبارات عملية تكون غالبا نقطة تشغيل المحولات قريبة من نهاية المنطقة الخطية وهذا يعنى أن أى زيادة طفيفة فى جهد الدخول ستسبب دخول المحول فى منطقة التشبع وتوليد توافقيات ، على سبيل المثال فى الصباح الباكر تكون الأحمال فى الشبكة منخفضة والجهد نسبيا مرتفعا وهذا يجعل المحول يدخل فى منطقة التشبع وهذا يفسر تغير مستوى التوافقيات خلال النهار. والجدول 5-30 يلخص رتب التوافقيات فى بعض من الأجهزة الواسعة الانتشار.

جدول 5-30

Device	Predominant Harmonics					
	3rd	5th	7th	9th	11th	13th
1Ph Computer Power Supplies						
3Ph Computer Power Supplies						
3Ph UPS						
Electronic Ballasts						
6 Pulse Drive						
12 Pulse Drive						

**4-4-30** المشاكل الناتجة عن التوافقيات.

تسبب التوافقيات مشكلات عديدة للمعدات الكهربائية المختلفة وأجهزة التحكم مما يؤدي إلى انخفاض كفاءة تشغيلها أو تعطيل عملها. وفيما يلي أهم المشكلات الناتجة عن التوافقيات في أجهزة ومعدات الشبكة الكهربائية.

**5-4-30** تأثير التوافقيات على المحولات:

تؤثر التوافقيات على المحولات تأثير مزدوجا حيث تسبب زيادة في المفايد النحاسية والمفايد الحديدية ويكون التأثير الإجمالي هو زيادة سخونة المحول.

يعتمد الـ Losses في المحول الناتج عن التوافقيات على التردد وتكون التوافقيات ذات القيمة العالية في التردد لها تأثير ملحوظ على الفقد Losses وتؤدي زيادة درجة الحرارة إلى تدهور العزل مما يؤدي إلى تعطل المحول بالكامل.

**Eddy current Losses** تأثيرها على الـ

$$W_e = k_e B_{\max}^2 f^2$$

**Hysteresis loss** تأثيرها على الـ

$$W_h = k_h B_{\max}^{1.6} fV$$

وينبغي - إذا كان من المتوقع وجود توافقيات بنسب عالية - استعمال محولات خاصة يتم تصميمها على أساس هامش أمان أكبر يعرف بالـ K-Factor ، وبالطبع هذا يؤدي إلى زيادة تكلفة المحول ويكون البديل لذلك هو خفض قدرة تحميل المحول في وجود التوافقيات.

**6-4-30** ما هو الـ K-Factor

ظهرت أهمية هذا المعامل مع تزايد نوعية الأحمال التي بها أجهزة إلكترونية والتي تستخدم Hi Speed-Electronic Switches ، وكذلك مع تزايد استخدام لمبات التفريغ الكهربى Discharge Lamp ، فكل

هذه الأحمال تصنف على أنها أحمال غير خطية Non-Linear loads بمعنى آخر أن احتمال وجود الـ Harmonics المسببة لارتفاع درجة حرارة المحول يكون كبيرا.

ومن هنا ظهرت الحاجة لوجود نوعية من المحولات لها تصميم خاص للتعامل مع النسبة العالية لوجود الأحمال الغير خطية. على سبيل المثال فالـ K-4 Transformers تستخدم إذا كانت نسبة الأحمال الغير خطية تصل نسبتها إلى 50% ، وعادة تستخدم هذه النوعية من المحولات فى تغذية المباني الإدارية التى تكثر بها هذه النوعية من الأحمال . ويمكن الرجوع للجدول 30-6 لمعرفة الـ K-Factor المناسب للمحول حسب نوعية الأحمال الموصلة عليه.

جدول 30-6 :

Load	K-Factor
Electric discharge lighting	K-4
UPS with optional input filtering	K-4
Welders	K-4
Induction heating equipment	K-4
PLCs and solid state controls (other than variable speed drives)	K-4
Telecommunications equipment (e.g. PBX)	K-13
UPS without input filtering	K-13
Multiwire receptacle circuits in general care areas of health care facilities and classrooms of schools, etc.	K-13
Multiwire receptacle circuits supplying inspection or testing equipment on an assembly or production line	K-13
Mainframe computer loads	K-20
Solid state motor drives (variable speed drives)	K-20
Multiwire receptacle circuits in critical care areas and operating/recovery rooms of hospitals	K-20

### 30-4-7 كيف يتم حساب الـ K-Factor ؟

تتوقف قيمة هذا المعامل كما ذكرنا على حسب كمية التوافقيات الموجودة بالتيارات المارة بالأحمال المتصلة بهذا المحول. ولذا فالخطوة الأولى لحساب هذا المعامل هو تحديد قيمة كل توافقية بالتيار بما فيها الـ Fundamental ثم من هذه القيم نحسب قيمة التيار الكلى

$$I_T = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + \dots}$$

ثم نحسب نسبة كل توافقية بالنسبة للتيار الكلي

$$I'_1 = \frac{I_1}{I_T} \text{ and } I'_3 = \frac{I_3}{I_T} \text{ etc}$$

وأخيرا نطبق فى المعادلة التالية لحساب قيمة الـ k-Factor

$$K = I_1'^2 * f_1^2 + I_3'^2 * f_3^2 + I_5'^2 * f_5^2 + \dots$$

**مثال:**

احسب قيمة الـ K-Factor المناسبة لمحول يغذى أحمالا غير خطية علما بأن قيم التيار كالتالي:

200A of fundamental (60 Hz)  
 30A of 3rd harmonic,  
 48A of 5th harmonic  
 79A of 7th harmonic.

**الحل:**

$$I_T = \sqrt{200^2 + 30^2 + 48^2 + 79^2} = 222.4A$$

$$I'_1 = \frac{200}{222.4} = 0.899 \text{ and } I'_3 = \frac{30}{222.4} = 0.135 \text{ and } I'_5 = \frac{48}{222.4} \\ = 0.216 \text{ and } I'_7 = \frac{79}{222.4} = 0.355$$

$$K = 0.899^2 * 1^2 + 0.135^2 * 3^2 + 0.216^2 * 5^2 + 0.355^2 * 7^2 \\ = 8.31$$

وهذا يعنى أننا نحتاج لمحول له تيار مقنن لا يقل عن 222 أمبير وله K-Factor يساوى 9.

### 8-4-30 تأثيرات متنوعة للتوافقيات

#### تأثير التوافقيات على الآلات والمحركات الدوارة:

تتأثر الآلات والمحركات الدوارة بالتوافقيات وتزداد سخونتها الناتجة من الـ Losses فى الحديد والنحاس بسبب هذه التوافقيات ، وقد تؤثر التوافقيات على العزل ، وقد تؤدي أيضا إلى زيادة الضوضاء .

ويمكن بسهولة تفسير سخونة المحرك بسبب هذه التوافقيات من خلال تذكر أن التيار المتردد يميل للمرور على السطح الخارجى للموصل Skin effect ، لاسيما مع زيادة التردد ، فلو علمنا أن لدينا ترددات تصل للرتبة الأربعين فى تيار المحركات بسبب أجهزة التحكم فى البدء لهذه المحركات وغيرها من أجهزة الـ Variable Frequency Drives (VFDs) فإن هذه التوافقيات العالية ستجعل التيار فى بارات الـ Rotor يسير فى شريحة ضيقة جدا من مساحة مقطع الموصلات ، ومن ثم ترتفع قيمة المقاومة وبالتالي يسخن المحرك بشدة.

**ظاهرة الزحف في المحركات Crawling**

يمكن أن تؤدي التوافقيات في المحرك الحثي إلى ظاهرة الامتناع عن الحركة. وتفسير ذلك أن بعض الترددات الناشئة في التيار تكون من النوع الـ negative sequence ستنتج Reverse Torque أو ما يسمى بالـ Breaking Torque ، وقد تؤدي التوافقيات عالية الدرجة إلى تدهور أداء أجهزة التحكم في السرعة وأجهزة بدء الحركة الإلكترونية الخاصة بالمحركات .

ومعلوم أن أساس عمل هذه المحركات مبني على قاعدة أن مرور 3-phase currents سينتج Rotating Field في منطقة الـ Air gap ، ومن ثم فالتشوه بسبب التوافقيات سيجعل القاعدة السابقة مضطربة خلال البدء على الأقل لاسيما بسبب negative sequence torques .

فالموتور الحثي مثلا يدور بسرعة تقريبا تساوي الـ synchronous speed, Ns طالما أن التردد الموجود هو 50 هرتز ، لكن التوافقية الخامسة مثلا تدور بسرعة 5Ns في عكس اتجاه دوران المحرك وكذلك باقى التوافقيات من النوع الـ Negative Sequence Harmonics ، فهذه التوافقيات تحاول جر المحرك ليدير عكس اتجاه دورانه الأصلي ، وكلما كانت نسبة هذه التوافقيات عالية كلما كان ظهور هذه المشكلة أوضح.

**تأثير التوافقيات على الكابلات:**

يظهر تأثير التوافقيات على الكابلات في عدة مظاهر منها زيادة مقاومة الموصل لارتفاع درجة حرارته كما تزداد مقاومة الموصل نتيجة لميل التيار ذات التردد العالي للتواجد بالقرب من السطح الخارجي للموصل و هو ما يعرف باسم Skin Effect ، كما تتسبب التوافقيات في زيادة الهبوط في الجهد نتيجة ارتفاع المقاومة ، و ينتج عن هذا عدم وصول الجهد إلى المستهلك بالقيمة المطلوبة ، و كذلك تتسبب في ارتفاع الجهد عند نقطة التعادل.

نذكر أيضا بأن ارتفاع حرارة الكابل بسبب التوافقيات ليس فقط بسبب Skin Effect كما سبق وإنما هناك مصدر آخر للحرارة وهو ارتفاع قيمة الـ Dielectric losses طبقا للمعادلة:

$$P_d = 2\pi fCV^2 \tan \delta$$

وهذا يعني سخونة إضافية للكابل .

التأثير على موصل التعادل "Neutral Cables".

فى الحالة الطبيعية يكون مجموع التيارات المارة بموصل الـ Neutral يساوى صفرا (جمع اتجاهي وليس جبري ) ، وذلك فى الحالة المتزنة " Balanced " ، أما فى حالة عدم الاتزان "Unbalanced" فيكون تيار خط التعادل لا يساوى صفرا.

ولكن نظرا لوجود التوافقيات "Harmonics" من الرتبة الثالثة ومضاعفاتها والتي تتميز بعدم وجود Phase Angle بين فازاتها الثلاثة فإنه بالتأكيد سيكون مجموع التيارات جبريا ولن يساوى صفرا ، مما سيؤدى إلى رفع درجة حرارة الكبل ويحدث له "Over heating" ، وبالتالي سنحتاج إلى معالجة هذه المشكلة عن طريق زيادة معدلات تحمل كابل التعادل لتقضى هذه التأثيرات وأيضا بعض الحلول الأخرى مثل زيادة مقطع موصل التعادل ، وهذا هو السبب فى ظهور ما يسمى Full size neutral conductor ، حيث كان قديما مع الأحمال الخطية كنا نستخدم ما يسمى Reduced neutral size . بمعنى أنه سابقا مثلا كان يتم استخدام كابلات مساحة مقطعها 240+120\*3مم2 مثلا ، وكان مساحة مقطع كابل التعادل 120 مم2 ، أما الآن فيستخدم 240\*4 مم2 ، وهذا فى المباني الإدارية التي تنتشر بها أجهزة الحاسب الآلي واللمبات الموفرة ولمبات اللد .

مع ملاحظة أن ارتفاع تيار خط التعادل يؤدي بالضرورة إلى ارتفاع الجهد بين الـ Neutral والـ Earth عن القيمة الأساسية (طبقا للمواصفات القياسية العالمية IEEE1100-92) .

تأثير التوافقيات على مصابيح التفريغ الغازية:

من الممكن أن يحدث أعطال فى choke coils بسبب سخونة الزائدة التي تسببها التوافقيات.

تأثير التوافقيات على معامل القدرة

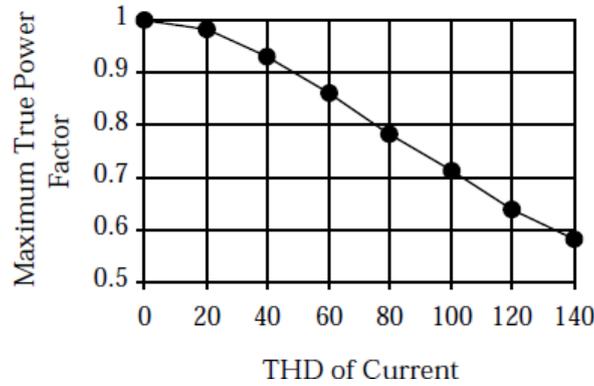
معامل القدرة الذى نحسبه بالمعادلات التقليدية ( P.F = P/(V.I) ) يعتبر صحيحا فقط طالما أن تردد إشارتى الجهد والتيار هو 50Hz ، أما مع تواجد التوافقيات فى الدائرة فإن معامل القدرة الحقيقى True PF يحسب من المعادلة التالية:

$$pf_{true} = \frac{P_{avg}}{V_{1rms}I_{1rms}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + (THD_V / 100)^2} \sqrt{1 + (THD_I / 100)^2}}$$

ويمكن إهمال تأثير التشوه في إشارة الجهد لأنه دائما صغير القيمة كما ذكرنا سابقا ومن ثم تصبح المعادلة السابقة بعد التبسيط كما يلي :

$$pf_{true} \approx \frac{P_{avg1}}{V_{rms}I_{rms}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + (THD_I / 100)^2}}$$

والشكل 30-13 يظهر كيفية تأثر قيمة معامل القدرة مع زيادة التشوه في التيار والذي نعبر عن هذا التشوه بقيمة الـ THD-i ، فمن الواضح أنه مع زيادة التوافقيات تنخفض قيمة معامل القدرة.



شكل 30-13 :

والجدول 30-7 يعطى قيم معامل القدرة لبعض الأجهزة المشهورة ونسبة التشوه في إشارة التيار بهذه الأجهزة.

جدول 30-7 : True PF

Table 1: Power Factor and Current Distortion Measurements for Common Single-Phase Residential Loads

Load Type	<i>pf disp</i>	<i>THDI</i>	<i>pf dist</i>	<i>pf true</i>
Ceiling Fan	0.999	1.8	1.000	0.999
Refrigerator	0.875	13.4	0.991	0.867
Microwave Oven	0.998	18.2	0.984	0.982
Vacuum Cleaner	0.951	26.0	0.968	0.921
Fluorescent Ceiling Lamp	0.956 *	39.5	0.930	0.889
Television	0.988 *	121.0	0.637	0.629
Desktop Computer and Printer	0.999 *	140.0	0.581	0.580

والملاحظ هنا انخفاض المعامل الحقيقي بسبب التوافقيات ، ومعلوم أن أي انخفاض في معامل القدرة يؤدي بالضرورة إلى ارتفاع التيار في الشبكة مما يتسبب عنه فقد في القدرة في الكابلات الأرضية و خطوط النقل و كذلك في المحولات الكهربائية ، وينتج عن ذلك ارتفاع في درجة الحرارة ، مما قد يتسبب في انهيار بعض مكونات الشبكة و كذلك يتسبب انخفاض معامل القدرة في زيادة الهبوط في الجهود .

#### تأثير التوافقيات على أجهزة القياس:

تتم معايرة عدادات استهلاك الطاقة على أساس أن التغذية الكهربائية تتم من موجة ذات شكل جيبي خالص وقد تعطى هذه العدادات قراءات خاطئة عند وجود التوافقيات لاسيما الأجهزة التي تعتمد على قياس Average.

والسبب في ذلك يمكن فهمه من الجزء السابق حيث وجد أن التوافقيات قد أثرت بشدة على قيمة معامل القدرة Power factor وهذا سبب آخر لظهور الأخطاء في أجهزة القياس. فمعامل القدرة الحقيقي True PF هو محصلة جزئين :

- الأول هو displacement power factor الناتج عن الفرق الطبيعي بين الجهد والتيار بسبب طبيعة الحمل
- الثاني هو distortion power factor الناشئ بسبب التوافقيات.

وغالبا ما يكون المعامل الناتج عن جمعها true PF أقل من المعامل الأصلي بسبب التشوه كما في الجدول 7-30 السابق. والقوانين الحاكمة لهذه الكميات تظهر لاحقا.

#### تأثير التوافقيات على المكثفات

تأثير التوافقيات على المكثفات غالبا ما يكون مدمرا ، فمعلوم أن معاوقة المكثف

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}$$

وهذا يعنى أن ارتفاع رتبة التوافقيات سيؤدى إلى انخفاض معاوقة المكثف ومن ثم يسحب تيار عاليا ويحترق.

والمكثفات تعاني من ظاهرة كارثية أخرى مرتبطة بالتوافقيات وهي ظاهرة الرنين والتي سندرسها تفصيلا فى الجزء التالى.

## 5-30 ظاهرة الرنين

من أخطر الظواهر المصاحبة لوجود التوافقيات ظهور ما يعرف بظاهرة الرنين Resonance.

فوجود المكثفات فى الشبكة أصبح شيئا معتادا سواء فى طبيعة المعدات مثل الكابلات ، أو فى كثير من الأجهزة التى شاع استخدامها فى الشبكات مثل معوضات الـ SVC Reactive Power ، وقد يحدث انهيار لبعض مكونات الشبكة إذا تساوت المقاومة الحثية ( Inductive reactance ) الناتجة عن دوائر الحث فى الشبكة مع المقاومة السعوية ( Capacitive reactance ) عند توافقيات معينة ، وبأسلوب آخر قد تحدث ظاهرة الرنين عند بعض الترددات تؤدي إلى زيادة الجهود فى الشبكة.

ويمكن أن تنشأ دائرة رنين بين مكثفات الخطوط والكابلات أو مكثفات تحسين معامل القدرة ، وبين ملفات الأحمال ، سواء كان ذلك ناتجا عن وجود هذه المكثفات والملفات فى وضع توازى أو توالى معا.

### 1-5-30 خطورة ظاهرة الرنين

إذا تواجد فى الشبكة تردد معين  $f_n$  يجعل  $\omega L = 1/\omega C$  أى أن معاوقة الملف تساوى معاوقة المكثف كما فى المعادلة ، فعندئذ يحدث الرنين وعنده يكون مجموع المعاوقتين يساوى صفرا لأن إشارة معاوقة المكثف عكس إشارة معاوقة الملف ، وهذا يعنى أنه - فى عدم وجود مقاومة أومية - تكون معاوقة الدائرة الكلية = صفر ، وكأنه قد حدث لدينا Short circuit (Z= 0) بدون وجود Short مادي فى الدائرة.

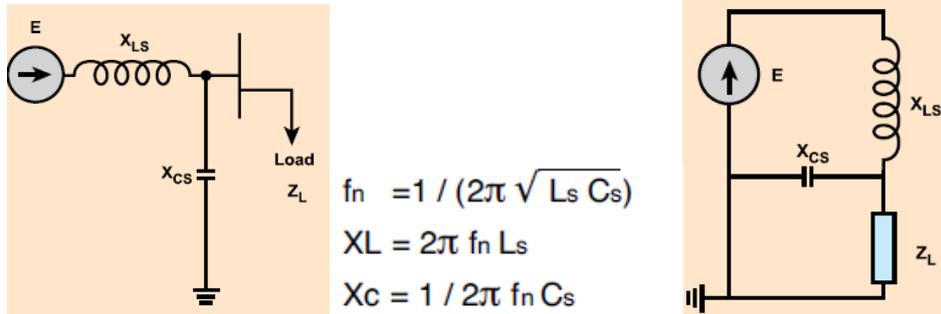
وتتراوح قيم الترددات التي يمكن أن تسبب رنين في مكونات الشبكة بين 800 إلى 1000 هرتز حسب القيم النمطية للـ LS and CS ( Inductance and capacitance of the source ) ، وهذا يفسر عدم حدوث رنين في الظروف العادية حيث التردد هو 50 هرتز وهو بالطبع بعيد عن التردد الرنيني.

ملحوظة: عند حدوث رنين يكون وجود أحمال عبارة عن مقاومات أومية شيئاً مرغوباً جداً لأنها الوحيدة التي لا تتأثر بالتردد ومن ثم تبقى مقاومتها هي المقاومة الوحيدة الباقية في الدائرة وتقوم بعمل تحجيم limitation لقيم التيار المار أثناء حدوث الرنين.

ودوائر الرنين هذه نوعان : رنين توازي ورنين توالي .

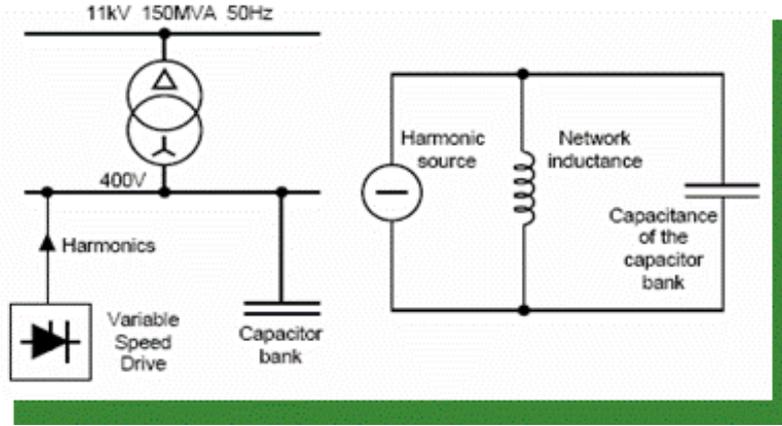
### 2-5-30 رنين التوازي

يحدث عندما تكون المكثفات والملفات في الدائرة موصلين على التوازي ، وقد يحدث هذا الرنين بين Self-capacitance للخط XCS وبين ملفات المعدات XL ، أو يحدث بين الـ Self-capacitance وبين الـ Equivalent reactance, XLS للشبكة والتي تتوقف قيمتها على قيمة الـ Short Circuit capacity, SCC للخط كما في الشكل 14-30.



شكل 14-30 :

وهو النوع الأول ، ويحدث هذا الرنين أيضا عند بين مكثفات تحسين معامل القدرة وبين الـ Network inductance في وجود أحمال غير خطية منتجة للتوافقيات كما في الشكل 15-30 .



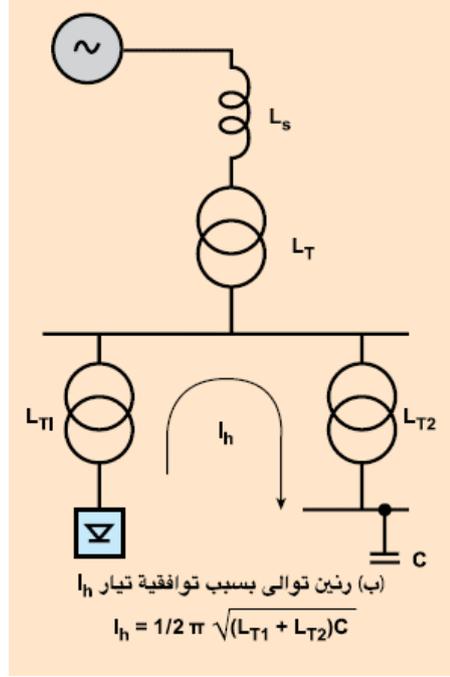
شكل 15-30

### 3-5-30 رنين التوالى

أما النوع الثانى من هذه الظاهرة فهو رنين التوالى ويحدث حين يكون لدينا مكثفات وملفات موصلة على التوالى كما فى الشكل 16-30 ، وعلى سبيل المثال عند توالى محول التوزيع مع مكثف تحسين معامل القدرة المركب على نفس الـ BB . والمشكلة تشبه تماما ما شرحناه فى النوع الأول.

ملحوظة هامة:

رنين التوالى يظهر على شكل زيادة كبيرة فى التيار بدون وجود أى Short ماضى بالدائرة ، بينما رنين التوازى يظهر على شكل زيادة كبيرة فى الجهد . وهذا هو خطورة ظاهرة الرنين.



شكل 30-16

## 6-30 الحدود القياسية لقيم التوافقيات بالشبكة :

تنص معظم المواصفات القياسية العالمية على الحدود المسموح بها للتوافقيات وذلك لحماية معدات ومكونات الشبكة الكهربائية من الآثار الناتجة عن وجود توافقيات التيار والجهد وتحدد هذه المعاملات كما فى الجزء التالى.

### 1-6-30 المواصفة القياسية رقم IEEE 519-1992

تعتبر هذه المواصفة أشهر المواصفات الخاصة بالتوافقيات ، وهى تضع حدودا قصوى للتوافقيات المسموح بظهورها فى إشارات الجهد والتيار عند نقطة اتصال الجهاز بالشبكة Point of Common Coupling .PCC

فالجداول رقم 1- و 2 و 3 فى الشكل التالى تعطى مستوى تشويه التوافقيات المنفردة كنسبة مئوية من أقصى تيار يسحبه الحمل وذلك فى خمس حالات مختلفة حسب نسبة الـ  $SCC/I_{Load}$  .

ونلاحظ أنه كلما كانت الشبكة قوية ( SCC مرتفعة) كلما كانت النسب المسموح بتجاوزها أكبر وذلك كما قلنا سابقا أن ارتفاع قيمة ال Short Circuit Current تعنى انخفاض قيمة المعاوقة وهذا يعنى انخفاض تأثر الجهود عند ال BB المختلفة بمرور تيارات التوافقيات ومن ثم يمكن السماح بقيم أعلى نسبيا.

Individual Harmonic Order (Odd Harmonics)						
جدول رقم (١) : حدود تشويه التيار التوافقي في الشبكات (١٢٠ ف - ٦٩ ك ف)						
Maximum Harmonic Current Distortion (in Percent of $I_L$ )						
$I_{sc}/I_L$	<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	TDD
<20*	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0
Even harmonics are limited to 25% of the odd harmonic limits above. Current distortions that result in a dc offset, e.g., half - wave converters, are not allowed.						
* All power generation equipment is limited to these values of current distortion, regardless of actual $I_{sc}/I_L$ .						
where $I_{sc}$ = maximum short - circuit current at PCC. $I_L$ = maximum demand load current (fundamental frequency component) at PCC.						
جدول رقم (٢) : حدود تشويه التيار التوافقي في الشبكات (٦٩ - ١٦١ ك ف)						
Maximum Harmonic Current Distortion (in Percent of $I_L$ )						
$I_{sc}/I_L$	<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	TDD
<20*	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20<50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50<100	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35	6.0
100<1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
>1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0
Even harmonics are limited to 25% of the odd harmonic limits above. Current distortions that result in a dc offset, e.g., half - wave converters, are not allowed.						
* All power generation equipment is limited to these values of current distortion, regardless of actual $I_{sc}/I_L$ .						
where $I_{sc}$ = maximum short - circuit current at PCC. $I_L$ = maximum demand load current (fundamental frequency component) at PCC.						
جدول رقم (٣) : حدود تشويه التيار التوافقي في الشبكات (< ١٦١ ك ف)						
$I_{sc}/I_L$	<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	THD
< 50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
≥50	3.0	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75
Even harmonics are limited to 25% of the odd harmonic limits above. Current distortions that result in a dc offset, e.g., half - wave converters, are not allowed.						
* All power generation equipment is limited to these values of current distortion, regardless of actual $I_{sc}/I_L$ .						
where $I_{sc}$ = maximum short - circuit current at PCC. $I_L$ = maximum demand load current (fundamental frequency component) at PCC.						

أما الجدول 4 فيعطى النسب المسموح بها في إشارة الجهد وذلك :

للتوافقية الواحدة Individual Voltage Distortion أو لمجموع التوافقيات كلها Total Harmonic Distortion . مع العلم بأنه يسمح بتجاوز هذه القيم بنسبة 50% زيادة عند الفترات العابرة مثل بدء المحركات وبدء تشغيل المحولات.

جدول رقم (٤) : حدود تشوهات الجهد		
Bus Voltage at PCC	Individual Voltage Distortion (%)	Total Voltage Distortion THD (%)
69 KV and below	3.0	5.0
69.001 KV through 161 KV	1.5	2.5
161.001 KV and above	1.0	1.5

NOTE : High - voltage systems can have up to 2.0% THD where the cause is an HVDC terminal that will attenuate by the time it is tapped for a user

#### ملحوظة:

المواصفة السابقة تهتم بالشبكة ككل ونقطة الربط مع المشتركين ، ولكن توجد مواصفات أخرى تهتم بالمكون نفسه ، بمعنى هل التوافقيات التي يصدرها هذا الحاسب الآلي مثلا مسموح بها أم لا؟ دون النظر للشبكة ،

مثل المواصفة IEC 61000-3-2 التي تهتم بمعظم الأجهزة المنزلية والتجارية التي يقل تيارها عن 16 أمبير. وهذه المواصفة الأخيرة لا تنظر إلى THD ولكن تنظر إلى individual harmonic distortion. وقد سبق شرح الفرق بينهما.

Harmonic order n	Maximum permissible harmonic current A
<b>Odd harmonics</b>	
3	2,30
5	1,14
7	0,77
9	0,40
11	0,33
13	0,21
$15 \leq n \leq 39$	$0,15 \frac{15}{n}$
<b>Even harmonics</b>	
2	1,08
4	0,43
6	0,30
$8 \leq n \leq 40$	$0,23 \frac{8}{n}$

فمثلا التوافقية الثالثة لا تتعدى 2.3 أمبير وهكذا ينظر إلى كل order وليس THD.

## 7-30 الحلول المستخدمة لمنع ظهور التوافقيات

هناك طرق للتخلص من التوافقيات في الشبكة المغذية للمستهلك أو تقليل تأثيرها ، من أهمها:  
تقوية الشبكة بزيادة مقطع الكابلات أو إضافة كابلات ، وهذا سيؤدي إلى عدم تغير قيمة إشارة الجهد في الـ BBS التي ستمر خلالها تيارات التوافقيات كما سبق شرحه.  
خفض نسبة تحميل المحولات حتى لا تدخل في منطقة الـ non linearity في منحنى الـ magnetization .

إعادة توزيع الأحمال لتقليل نسب عدم الاتزان بشبكات التوزيع.

تقليل نسبة الأحمال غير الخطية بحيث لا تتجاوز 30% من قدرة كل محول ، مع تخفيض النسبة إلى 15% إذا كان هناك مكثفات مركبة لتحسين معامل القدرة.

تجنب حدوث الرنين ، ويمكن معرفة التردد الذى يحدث عنده رنين بين المكثفات المركبة وبين ملفات الشبكة من المعادلة التالية:

$$hr = \sqrt{\frac{kVA_{sc}}{kVAR_c}}$$

حيث

$hr$  = resonant frequency as a multiple of the fundamental frequency

$kVA_{sc}$  = short circuit current as the point of study

$kVAR_c$  = capacitor rating at the system voltage

غير أن الأسلوب الأشهر هو وضع Filters بالقرب من الأحمال لمنع انتشار تأثيرها فى الشبكة . وهناك أنواع عديدة لهذه الـ Filters منها :

."Passive Harmonic Filters "

."Active Harmonic Filters "

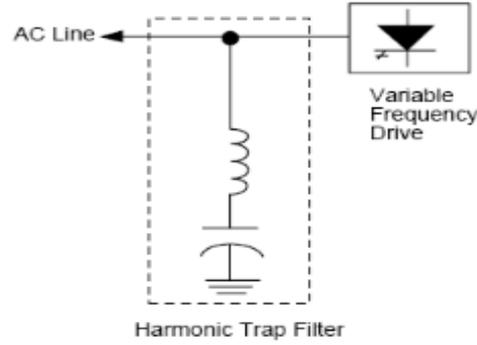
."Compound Harmonic Filters"

### 30-7-1 أولاً :- الـ " Passive Harmonic Filters "

يوجد طريقتان لاستخدام هذا الـ " filters " وهما : التوصيل على التوالى والتوصيل على التوازي .

فى حالة التوصيل هذا الفلتر على التوازي مع الحمل كما فى الشكل 30-16 تكون فكرة تصميم الفلتر هى ضبط قيم الـ L وقيم الـ C الخاصة بالفلتر لتصبح معاوقتها صغيرة جدا بالنسبة لتردد توافقية معينة ومن ثم فعند مرور تيار هذه التوافقية فإنها ستفضل المرور بدائرة الفلتر عن المرور بالحمل ومن ثم نكون قد نجحنا فى اصطياذ هذه الـ " Harmonics " . وغالبا يصمم هذا الفلتر لاصطياذ الرتب الـ 5th " , 7th " .

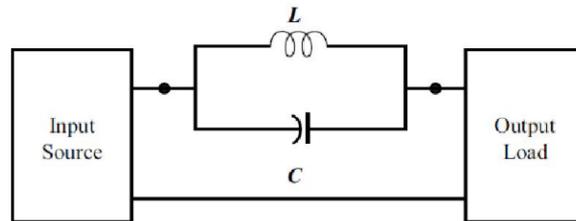
وهذا النوع أثبتت النتائج قدرته على التخلص من التوافقيات الفردية خاصة الـ 3rd ، 5th و 7th و كلما زاد الـ order كلما عملت بكفاءة أعلى .



شكل 16-30 :

وهذه الفلتر مصممة لتحمل تيار التوافقية harmonic current فقط و أيضا تكون قادرة على نسبة من تيار الحمل تصل إلى 30% من قيمة تيار الأحمال إذا كانت تغذى مجموعة من الـ electric drives وهذا ما يميز هذا النوع عن الفلتر عن النوع الـ series ، مما يجعل حجمه صغيرا و غير مكلف .

أما إذا تم تركيب الفلتر على التوالي مع الحمل ، فيكون الفلتر عبارة عن مكثفات و ملفات متصلين على التوازي و يكونوا على التوالي مع الأحمال كما في الشكل 16-30 ، وتكون فكرته هي اختيار قيم الـ L وقيم الـ C لتعطى معاوقة كبيرة لمرور تيار توافقية معينة بينما تكون قيمة هذه المعاوقة عادية أمام التيار الأصلي.



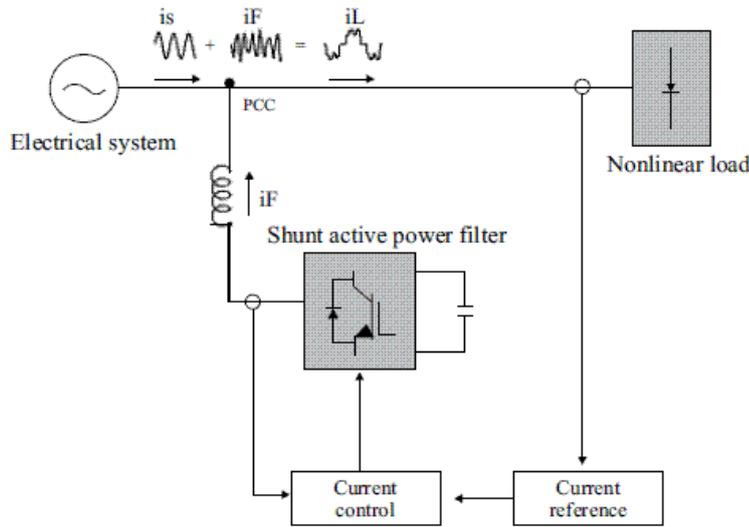
شكل 16-30 :

وغالبا يكون الاستخدام الأساسي لهذا النوع من الـ Filters ليس على التوالي مع الأحمال لأن ذلك سيؤثر على قيمة الجهد ، وإنما يكون استخدامها الأساسي في دوائر الـ Neutral لمنع مرور التوافقية الثالثة مثلا.

ويعيب هذا النوع من الـ Filters أنه يحتاج لمكثفات و ملفات ثقيلة في الحجم و مكلفة و تلك الـ Filters عند استخدامها تصبح جزء من الشبكة و من ثم ربما تؤثر على ظهور مشكلة الرنين.

### 30-7-2 ثانياً: الـ "Active Harmonic Filters"

فكرة عمل هذا النوع (شكل 30-17) من الـ Filters أنه يقوم بتوليد توافقيات مساوية للتوافقيات التي يصدرها الحمل ولكن مضادة لها في الاتجاه فتكون المحصلة النهائية في الحالة المثالية (صفر توافقيات) ، أو صغيرة جدا في الحدود المسموح بها.



شكل 30-17

بمعنى آخر أنه يولد التوافقيات التي يحتاجها الحمل ويمده بها ، ومن ثم يخفف عبء مرورها في الشبكة العامة ، ويقوم بهذا الدور بدقة وعند الأحمال المختلفة ، ومن ثم يكون مجموع الـ "Harmonic Wave" المولدة بالفلتر + والـ "Pure sinusoidal wave" القادمة من مصدر التغذية = الـ "distorted"

"current wave" التي تظهر داخل الحمل فقط (ولا يظهر أثرها على الشبكة الخارجية) . ومن ثم يصبح الميزة الأساسية له هو توفير الأحجام الكبيرة التي كانت تستخدم للملفات والمكثفات في النوع الأول.

### 3-7-30 ثلثنا : الـ "Compound Harmonic Filters" .

نظرا لارتفاع سعر الـ "active harmonic filter" وأيضا المشكلات التي توجد في الـ "passive filter" وأهمها ارتفاع احتمالية حدوث ما يسمى بالـ "Resonance" بسبب وجود المكثفات والملفات داخل الدوائر بكثرة فقد تم اللجوء إلى نوع جديد من الـ Filters وهو الذي يحتوي على كل من الـ "passive filter" و "Active filter" ويعرف بالـ Compound أو الـ Hybrid .

في حالة الـ "5th ,7th harmonic order" يتعامل معها الـ "passive filter" أما في حالة الـ "harmonic orders" الأخرى فيستخدم الـ "Active filter" ، وذلك بالتنسيق معين "coordination" بين النوعين من الـ Filters من أجل الحصول على أفضل أداء ينعكس على الـ "power Quality performance" .

## 8-30 المثال الأول للحد من التوافقيات:

### 1-8-30 فكرة الـ Harmonic Cancellation

أحد الطرق المميزة والجديدة لتقليل تأثير التوافقيات في الشبكة هو جعل التوافقيات تلغى بعضها بعضا Harmonic Cancellation . وقد بنيت فكرة هذه الطريقة على أساس أن كل توافقية لها قيمة وزاوية Magnitude and Angle فإذا استطعنا أن نجمع التوافقيات بحيث يكون المجموع الاتجاهي يساوى صفرا (كما في حالة جمع الـ Balanced Three Phases ) فإننا نكون بذلك قد منعنا ظهورها بدون استخدام الـ Filters وبدون القلق من ظاهرة الـ Resonance . ويمكن تحقيق هذه الفكرة بثلاث طرق:

الأولى بمحاولة جمع الأجهزة المختلفة وذلك بعد دراسة التوافقيات الصادرة لكل جهاز مع بعض ، بحيث أنه حين تعمل هذه الأجهزة معا فإنها تلاشي التوافقيات (cancellation) أو تقللها (mitigation) كما هو ملاحظ في المثال العملي الأول الذي سنشرحه في الجزء التالي.

الثانية باستخدام محولات لها توصيلات مختلفة ( مثلا  $D/Y$  &  $Y/Y$  ) كما في المثال العملي الثاني.

الثالثة تكون باستخدام الـ **Phase Shifting Transformer** ، ففي المحولات العادية يكون دورها هو تغيير قيمة الـ **Magnitude** وذلك بتغيير قيمة الـ **Turns Ratio** ، أما هذا النوع من المحولات فإنه لا يغير الـ **Magnitude** بل يقتصر دوره على تغيير الـ **Angle** ، ومن ثم يمكن إلغاء (أو على الأقل تقليل قيمة) بعض التوافقيات بجمعها اتجاهيا معا .

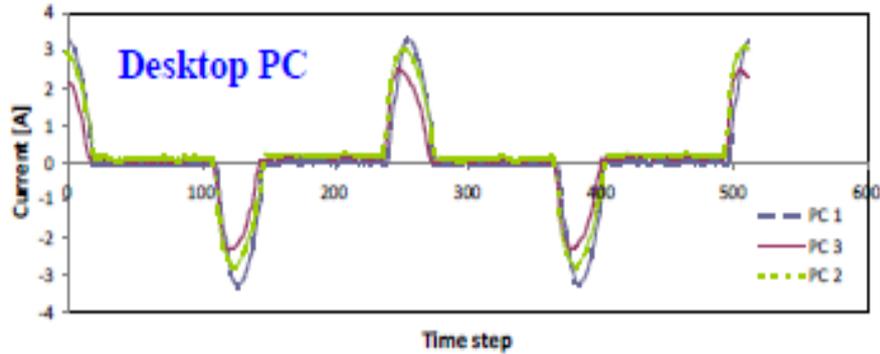
### 2-8-30 تطبيق الفكرة

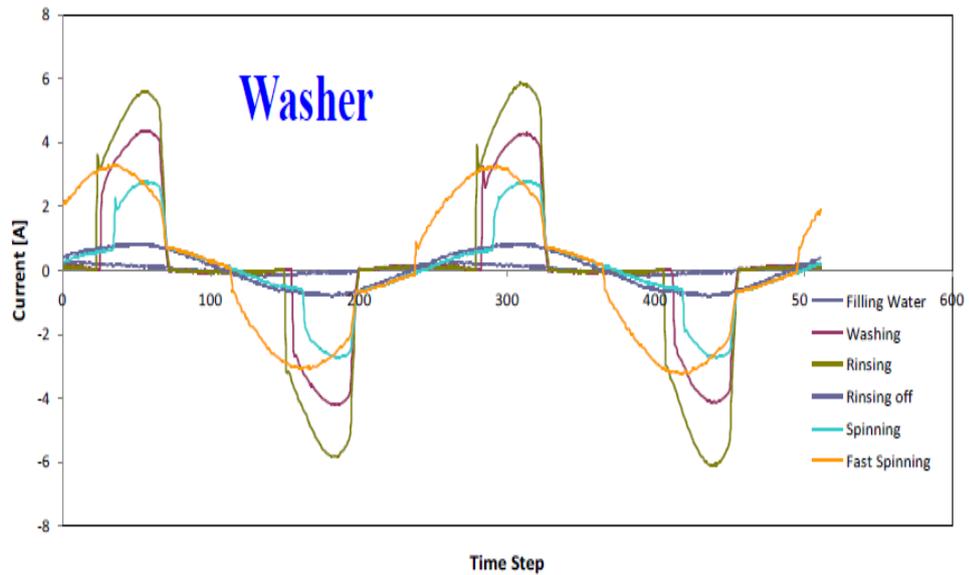
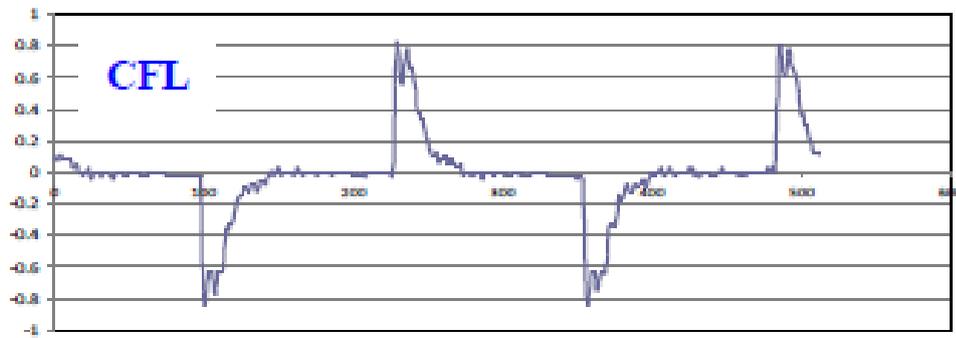
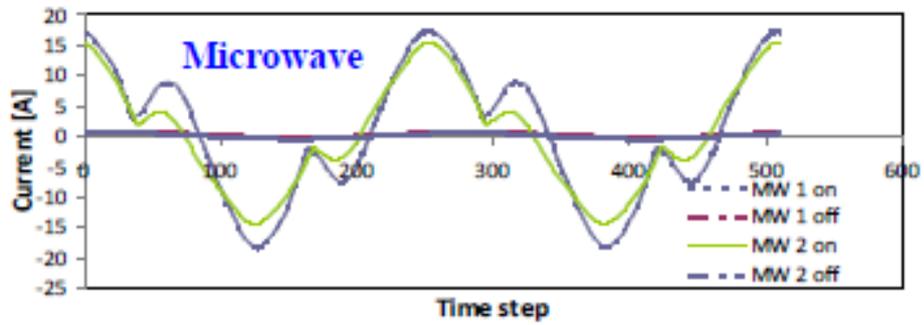
هذه الفكرة هي خلاصة رسالة ماجستير أشرفت عليها ، ويمكن تنفيذها في الأحمال الصغيرة كالأحمال المكتبية والمنزلية حيث يمكن التحكم في الأحمال بسهولة . والفكرة هي دراسة كل حمل على حدة وعمل مخطط للتوافقيات الخاصة به قيمة واتجاه ، ومحاولة جمع الأجهزة التي تختلف فيها التوافقيات اتجاهيا .

ففي هذا المثال تم عمل دراسة على مجموعة من الأجهزة وهي :

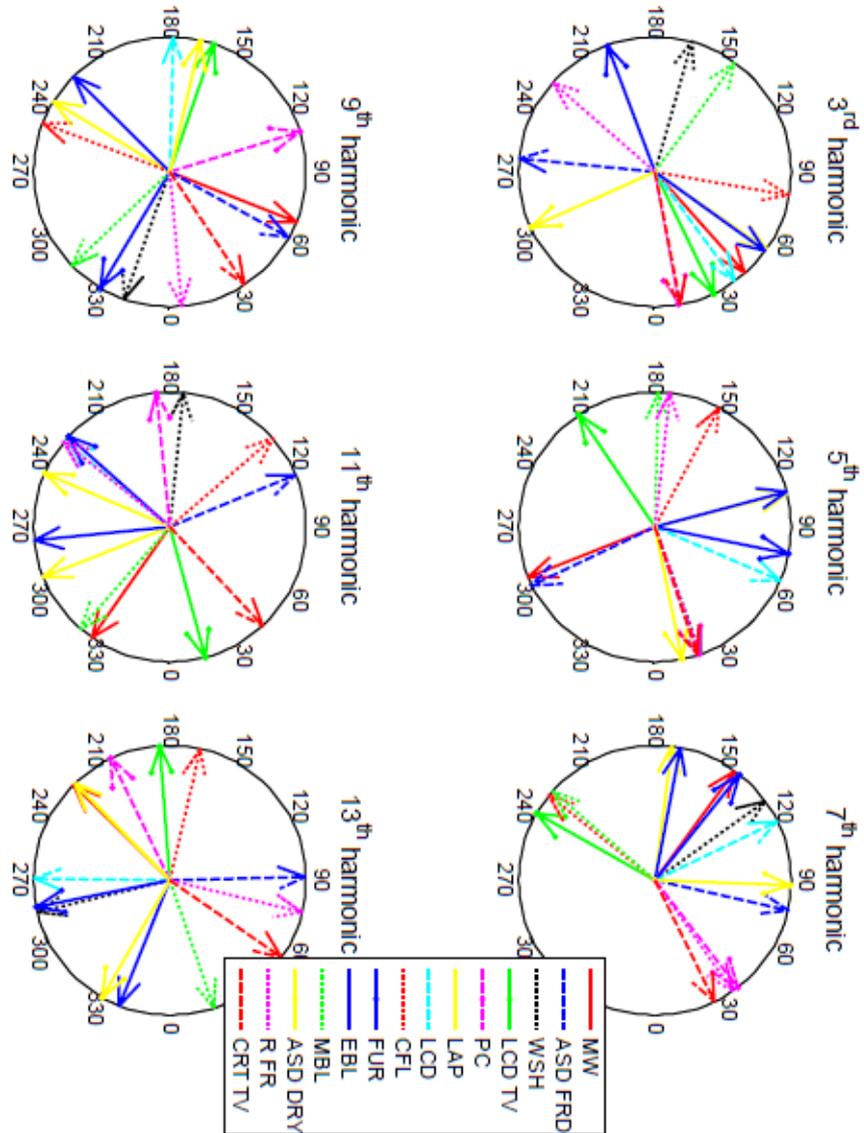
- حاسب إلى
- لمبة من نوع CFL
- ميكروويف
- غسالة ملابس

ووجد اختلاف في موجة التيار المشوهة كما هو ملاحظ في الشكل التالي :





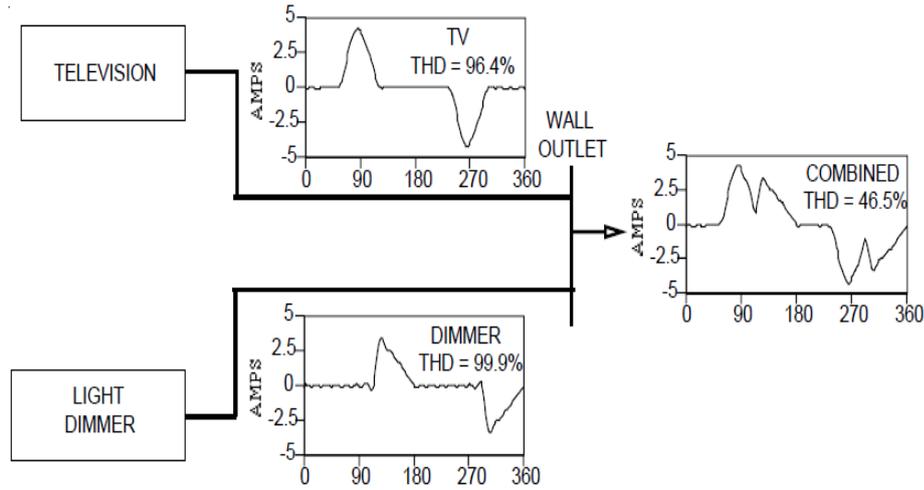
وبدراسة توافقيات هذه الأجهزة مع معظم الأجهزة المنزلية الأخرى ، ومع التركيز على التوافقيات التي لها قيمة واتجاه وليس قيمة فقط ، لوحظ وجود اختلاف بين كل الأجهزة في القيمة والزاوية للتوافقيات كما هو ملاحظ من الشكل التالي :



يلاحظ هنا اختلاف كل جهاز عن الآخر في زاوية التوافقية مما يفسر ظاهرة التلاشي cancellation

ولملاحظة التأثير الدقيق على التوافقيات قيمة واتجاه فقد تم عمل دراسة على جهاز تلفزيون من النوع LED و متحكم في الإنارة light dimmer ودراسة كل جهاز في حالة عمله منفصلا وفي حالة دمجهم.

وتم ملاحظة التالي :



Harmonic	Television		Light Dimmer		Combined	
	Magnitude*	Phase Angle	Magnitude*	Phase Angle	Magnitude*	Phase Angle
1	100.0 (1.20A)	1	100.0 (0.88A)	-50	100.0 (1.88A)	-20.3
3	79.8	-173	76.6	31	23.3	148
5	49.2	12	42.3	122	30.9	49
7	20.5	-159	21.1	-111	21.0	-138
9	4.0	81	21.2	20	11.4	31.3
11	5.5	-13	17.7	128	6.0	106
13	3.1	175	12.2	-108	6.2	-121
15	0.8	-138	11.7	20	5.0	17

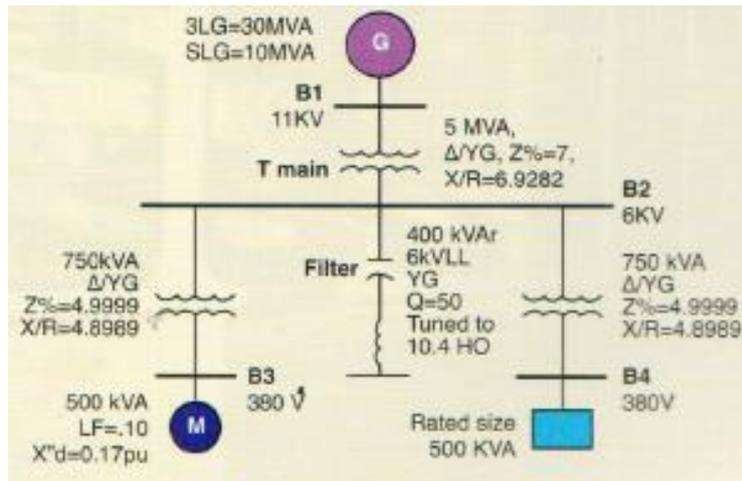
أي عند دمج الأجهزة معا نقل التوافقيات نتيجة اختلاف زاوية التوافقيات ، لذا يفضل أن يتم تعريف التوافقيات بقيمة واتجاه وليس قيمة فقط.

## 9-30 المثال العملي الثانى للحد من التوافقيات

فى المنظومات الصناعية ومع تزايد الاعتماد على variable speed drives وأشباهاها من الأجهزة المنتجة للتوافقيات بكل رتبها أصبح التعامل مع هذه المشكلة ضرورياً وأصبح أخذ قياسات دورية للتأكد من جودة القدرة شيئاً أساسياً.

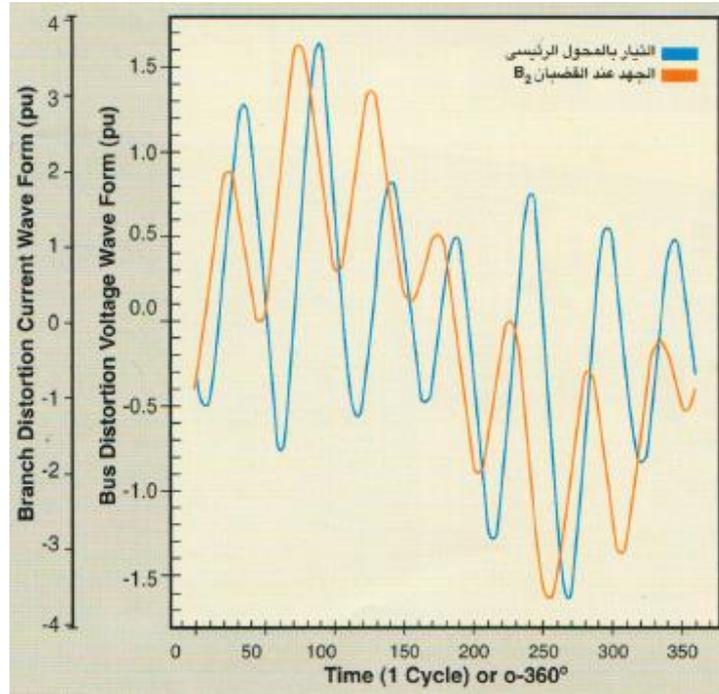
### 1-9-30 وصف المشكلة

فى هذا الجزء نقدم نموذجاً لإحدى هذه الدراسات والتي تظهر فى الشكل 18-30 حيث لدينا محولين قدرة كل منهما 750 kVA يتغذيان من BB B2 المتصل بمحول رئيسي قدرة 5 MVA مع وجود مكثفات لتحسين معامل القدرة.



شكل 18-30 :

والأحمال المغذاة من المحولين الصغيرين تحتويان على أجهزة Six Pulses Inverters وهذا يعنى أن التوافقيات من الرتب 5 و 7 و 11 موجودة بالموجات . وقد ثبت ذلك من تحليل موجات الجهد التي تظهر على BB-B2 والتي تظهر حجم التشوه فيها وكذلك فى التيار المار بالمحول الرئيسي فى الشكل 30-19 .



شكل 19-30 :

وباستخدام أجهزة تحليل القدرة Power Analyzer نحصل على قيم توافقيات الجهد والتيار ونسب التشوه لكل واحدة من هذه التوافقيات .

ومن الجدولين التاليين يتبين حجم التشوه الكبير لاسيما بالتوافقيات الـ 5 و 7 و 11 وهي التوافقيات التي تجاوزت نسبة الـ 3% المسموح بها المواصفات.

جدول رقم (١): طيف توافقيات الجهد على القضبان B2				
رتبة التوافقيات	جهد التوافقيات (ف)	زاوية وجه التوافقيات (درجة)	التشوه (%)	حدود المواصفات القياسية
١	٥٩٢٣,٩٢٤	٢,٣٠-		
٥	١٠٤٥,٠٣١	٧٦,٢٢	١٧,٦٤١	٣,٠٠٠ <
٧	٣٣٢٩,٩٣٨	٦٩,٣٥-	٥٦,٢١٢	٣,٠٠٠ <
١١	١٧٩,٢٥٥	١٦٦,٨٣	٣,٠٢٦	٣,٠٠٠ <
١٣	٥٨,٤٩٤	٥٤,٠٥-	٠,٩٨٧	٣,٠٠٠
١٧	٣٢,٨٧٦	٢٤,٥٦	٠,٥٥٥	٣,٠٠٠
١٩	١٦,٠٤٦	١٤٩,٩١	٠,٢٧١	٣,٠٠٠

الجهد: ٦ ك ف -  $V_{rms}$ : ٦٨٧٨,٢٥ ف  
التشوه الكلي للجهد (THD%): ٥٩ < - حد المواصفات القياسية: ٥%

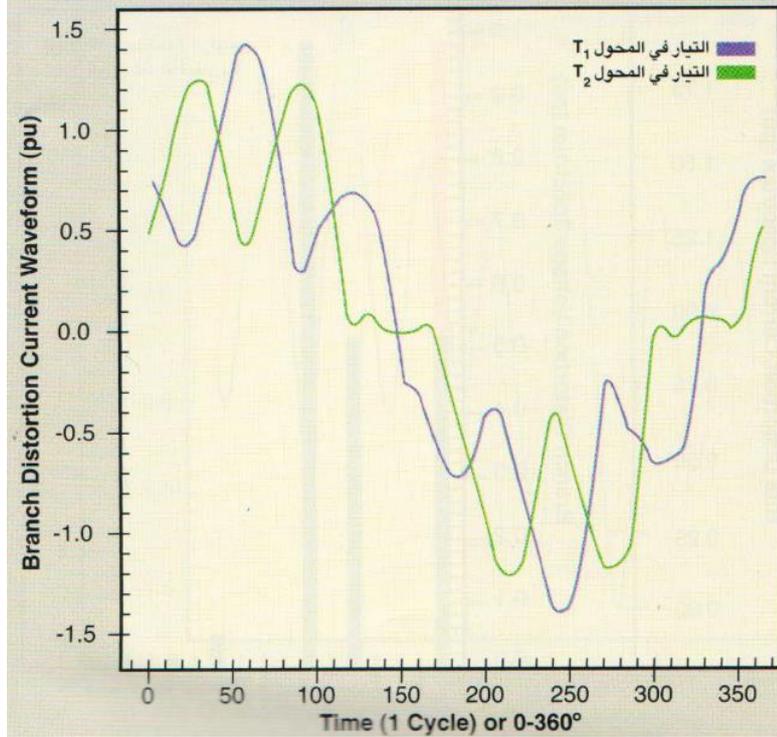
جدول رقم (٢): طيف توافقيات التيار في المحول الرئيسي				
رتبة التوافقيات	تيار التوافقيات (أمبير)	زاوية وجه التوافقيات (درجة)	التشوه (%)	حدود المواصفات القياسية
١	٤٦,٤٧٧	١٣,٦٥		
٥	٣٨,٧٩٩	١٢,٧٦-	٨٣,٤٧٩	٧,٠٠٠ <
٧	٨٨,٣١٤	١٥٨,٦١-	١٩٠,٠١٧	٧,٠٠٠ <
١١	٣,٠٢٥	١٠٢,٧٠-	٦,٥١٠	٣,٠٠٠ <
١٣	٠,٨٣٥	٣٦,٣٥	١,٧٩٧	٣,٠٠٠
١٧	٠,٣٥٩	٦٥,١٥-	٠,٧٧٣	٢,٠٠٠
١٩	٠,١٥٧	٦٠,١٧	٠,٣٣٧	٢,٠٠٠

الجهد: ١١ ك ف - التيار  $I_{rms}$ : ١١٠٧,١٢ أ - المعامل K: ٣٦,٨٨  
التشوه الكلي للتيار (THD%): ٢٠٧,٦٦ < - حد المواصفات القياسية: ٨%

### 30-9-2 آليات الحل

وفى هذا المشروع تم تجربة تقليل أو حذف هذه التوافقيات عن طريقة محاولة جمع التوافقيات الصادرة من المحول الأول والثانى اتجاهاً ولكن بعد تغيير توصيلة أحد المحولين لتصبح  $Y/Y$  مؤرضة بدلاً من  $\Delta/Y$  مؤرضة ، والفكرة من وراء ذلك أن المحولين كانا متمائلين فى كل شئ وهذا يجعل التوافقيات المارة خلالها يتم جمعها جبرياً للتماثل فى القيمة والاتجاه ، فإذا تم تغيير توصيلة أحد المحولات فسينتج phase

shift قدره 30 درجة ، كما فى الشكل 20-30. قارن هذا الشكل بالشكل السابق لترى كيف ساعد الـ phase shift فى حدوث نوع من الـ Cancellation للتوافقيات .



شكل 20-30 :

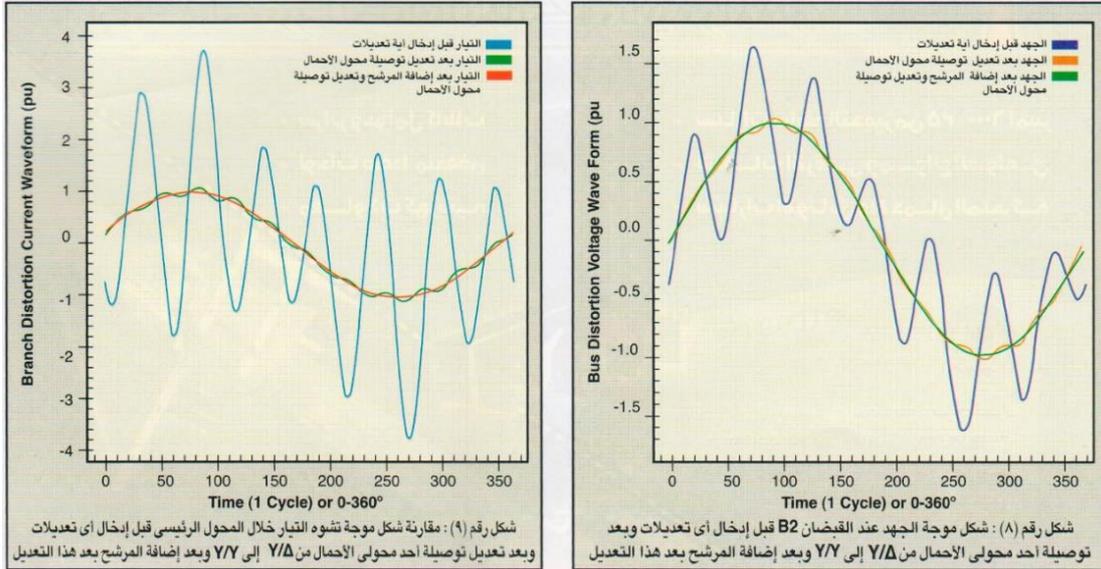
والنتيجة واضحة أكثر بعد إجراء دراسات جديدة بالـ Power Analyzer والتي تظهر نتائجها فى الجدولين التاليين.

وواضح منهما أن نسب التشوه قد انخفضت بدرجة كبيرة اللهم سوى التوافقية رقم 11 التي لم تنزل أعلى من المسموح لاسيما فى التيار. وإن كان من الممكن التخلص من هذا التجاوز البسيط بواسطة فلتر غير مكلف.

جدول رقم (٣): طيف توافقيات الجهد على القضبان B2				
رتبة التوافقيات	جهد التوافقيات (ف)	زاوية وجه التوافقيات (درجة)	التشوه (%)	حدود المواصفات القياسية
١	٥٩٢٣,٩٢٤	٢,٣٠-		
٥	٠,٠٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠٠	٣,٠٠٠
٧	٠,٠٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠٠	٣,٠٠٠
١١	١٧٩,٢٥٥	١٦٦,٨٣	٣,٠٢٦	٣,٠٠٠ <
١٣	٥٨,٤٩٤	٥٤,٠٥-	٠,٩٨٧	٣,٠٠٠
١٧	٠,٠٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠٠	٣,٠٠٠
١٩	٠,٠٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠٠	٣,٠٠٠
الجهد: ٦ ك ف - $V_{rms} : ٥٩٢٦,٩٢$ ف التشوه الكلي للجهد (THD%): ٣,١٨ - حد المواصفات القياسية: ٥%				
جدول رقم (٤): طيف توافقيات التيار في المحول الرئيسي				
رتبة التوافقيات	تيار التوافقيات (أمبير)	زاوية وجه التوافقيات (درجة)	التشوه (%)	حدود المواصفات القياسية
١	٤٦,٤٧٧	١٣,٦٥		
٥	٠,٠٠١	٧٧,٢٥	٠,٠٠٣	٧,٠٠٠
٧	٠,٠٠٣	١١١٠,٣٨	٠,٠٠٧	٧,٠٠٠
١١	٣,٠٢٥	١٠٢,٧٠-	٦,٥١٠	٣,٠٠٠ <
١٣	٠,٨٣٥	٣٦,٣٥	١,٧٩٧	٣,٠٠٠
١٧	٠,٠٠٠	٢٤,٨٧	٠,٠٠٠	٢,٠٠٠
١٩	٠,٠٠٠	٢٩,٨٣-	٠,٠٠٠	٢,٠٠٠
الجهد: ١١ ك ف - التيار $I_{rms} : ٤٦,٥٨$ أ - المعامل K: ١,٥٦ التشوه الكلي للتيار (THD%): ٦,٧٥ - حد المواصفات القياسية: ٨%				

تجدر الإشارة إلى أن هذا الحل قد ساعد في تحسين جودة القدرة على BB B2 ، ولكن مازال كل من المحولين على حدة يعاني من تأثير التوافقيات داخلهما ، وبالتالي تقل كفاءة كل منهما ويمكن أن يتعرضا لمشاكل.

والشكل 21-30 يقارن بين شكل موجات الجهد والتيار الأصليين مقارنة بالشكل بعد مجرد تعديل توصيلة أحد المحولات كما رأينا وأخيرا الشكل بعد استخدام فلتر للتخلص من التوافقية الـ 11 .



شكل 21-30 :

# الملاحق

## ملحق

## قاموس لبعض المصطلحات التي يكثر استخدامها

2	Absolute Temperature	درجة الحرارة المطلقة
3	Admittance, Y	المساهلة وهي عكس المعاوقة Z
4	Arcing Ground	القوس الكهربى الأرضى
5	Arrestor	مانعة صواعق
6	Automatic Voltage Regulator	منظم جهد أتوماتيكي
7	Base Load	الحد الدائم للحمل
8	Blackout	الإظلام التام
9	black start	بدء تشغيل المحطات بعد وقوع إظلام تام
10	Boiler	غلاية
11	Brushes	فرش كربونية
12	Bundle Conductors	موصلات متعددة (حزمية)
13	Capacitance	سعة المكثف
14	Capacitive Reactance	معاوقة المكثف
15	Chimney	المدخنة
16	Circulating current	تيار فى دائرة مغلقة
17	Combined cycle	دورة مركبة
18	common service building	مبنى الخدمات العامة
19	COMMUNICATION	الاتصالات
20	compressor	الضاغط
21	Condenser	المكثف
22	Dampers	مهدئ السرعة
23	Demand Management	إدارة الأحمال

24	Digital Protection	الوقاية الرقمية
25	Disc	قرص
26	Distance relay	وقاية مسافية
27	Dry Transformer	محول جاف (غير زيتي)
28	Economizer	الموفر (في المحطات الحرارية)
29	Electric Field	المجال الكهربى
30	Excitation	الاستثارة (بدء توليد المجال المغناطيسي)
31	Exciter	الجهاز المسئول عن توليد المجال المغناطيسى بالمولد
32	Field Current	تيار المجال
33	Fire fighting pump	مضخة إطفاء الحريق
34	Flashover	شرارة كسر العزل
35	Flux Linkage	الفيض المرتبط
36	Frequency	التردد
37	Generator	المولد
38	Governor	المتحكم فى البخار (المحطات البخارية)
39	Governor Valve	صمام المتحكم
40	Guard Rings	حلقات حماية (فى عوازل الأبراج)
41	Healthy Phases	الأوجه السليمة من الأعطال
42	Heat Recovery Steam Generator, HRSG	منظومة الاستفاده من الحرارة فى توليد البخار فى محطات الدورة المركبة
43	Impedance	المعاوقة
44	in operation	مولد يدور بدون توصيل أحمال عليه
45	in service	مولد يدور و متصل فعلا بأحمال عليه
46	Inductance	القيمة الحثية
47	Inductive reactance	المعاوقة الحثية
48	Infinite Bus Bar	قضبان توزيع لانهاية القدرة

49	inverters	مغير للجهد من مستمر إلى متردد
50	Load Curve	منحى الأحمال
51	Load Demand	مستوى الطلب للأحمال
52	Load Factor	معامل نسبة تشغيل الأحمال
53	Load sharing	التشارك فى تغذية الأحمال
54	Load Shedding	فصل الأحمال
55	Max Demand	الحمل الأقصى
56	Mechanical Torque	العزم الميكانيكى
57	off load tap changer	مغير للجهد اثناء توقف المحول
58	Open Circuit	دائرة مفتوحة
59	Parameters	معاملات
60	Partial Discharge	تفريغ جزئى
61	Peak Load	الحمل الأقصى
62	phase sequence	تتابع الأوجه
63	phase shift	زحزحة الأوجه
64	Phases	الأوجه
65	Power	القدرة
66	Power Angle	زاوية القدرة
67	power factor	معامل القدرة
68	Power Loss	الفقد فى القدرة
69	Reactive Power	القدرة غير الفعالة
70	Reactor	المفاعل (النوى)
71	Receiving End	جهة الأحمال
72	Rectifiers	موحد الجهد من متردد إلى مستمر
73	Reheater	إعادة التسخين
74	Resistive Loads	حمل مقاومات خطية
75	reverse power relay	جهاز وقاية لاكتشاف انعكاس اتجاه سريان القدرة

76	Rotor	العضو الدوار فى الآلات الكهربائية
77	Series Capacitors	مكثفات توصل على التوالى
	Short Circuit	القصر
78	Shunt Capacitors	مكثفات توصل على التوازى
79	Shunt reactors	ملفات توصل على التوازى
80	Single Line Diagram	مخطط رسم الدوائر الكهربائية فى المحطات
81	skin effect	مرور التيار على أطراف الموصل (القشرة الخارجية)
82	Spacer	فواصل توصيل الموصلات (خطوط هوائية)
83	spark gap	حلقات تسمح بتفريغ شرارة كهربية لحماية معدة معينة
84	spinning reserve	الرصيد المتاح من القدرة
85	stability	الاستقرار
86	Stability limit	حد الاستقرار
	Stability Margin	مدى الاستقرار
87	Starting Motor	موتور لبدء التشغيل
88	Stator	العضو الثابت فى الآلات الكهربائية
89	steam valve	صمام البخار
90	String	سلسلة العوازل (فى الأبراج)
91	Synchronized	التزامن
92	synchronous speed	سرعة دوران المولد التزامنى
93	Tariff	تعريفه اسعار الطاقة
94	thermal limit	الحد الحرارى
95	Tidal	المد والجزر
96	Transients	الهزات العابرة
97	Travelling Waves	الموجات الزاحفة
98	turbine shaft	عمود دوران التربينه
	Tutorial	مذكرة علمية مرجعية

99	Vents	فتحات تنفيس
100	Voltage drop	هبوط فى الجهد
101	Voltage Gradient	تدرج الجهد
102		
103		
104		

## أهم المراجع العربية

- 1- كتب المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب - السعودية
- 2- كتب الأستاذ الدكتور عبد المنعم موسى
- 3- كتب الأستاذ الدكتور أسر زكى
- 4- كتاب الأستاذ الدكتور منير محمد مجاهد، مصادر الطاقة في مصر
- 5- مجلة الكهرباء العربية
- 6- ملفات شركة مصر الوسطى لتوزيع الكهرباء - مركز تدريب الكوادر البشرية
- 7- محاضرات مركز تطوير الدراسات العليا والبحوث فى العلوم الهندسية
- 8- ملف عن اختبارات الكابلات للمهندس كامل بدرخان
- 9- ملف وسائل نقل القدرة ومحطات التوزيع للمهندس يسرى عبد السلام
- 10- تقارير ميدانية لطلاب السنة الرابعة بهندسة القاهرة
- 11- التقارير السنوية لوزارة الكهرباء والطاقة.
- 12- كتب الأستاذ الدكتور محمود جيلانى.

## أهم المراجع الأجنبية

- 1- Electric Power Substation Engineering, 2<sup>nd</sup> Edition, Edited by John D. McDonald, CRC press, 2007.
- 2- IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants, 1993
- 3- Power Plant Engineering, A.K.Raja, New Age International (P) Ltd., Publishers, 2006.
- 4- Principles of Power Systems, V.K. Mehta
- 5- Elements of Power System Analysis, William Stevenson, McGraw-Hill Publishing, 4<sup>th</sup> edition
- 6- Electrical Technology, B. L. Theraja, 2005
- 7- SUBSTATION GROUNDING, Inna Baleva, MASTER OF SCIENCE, 2012
- 8- IEEE Definition and Classification of Power System Stability, IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 19, NO. 2, MAY 2004
- 9- ELECTRIC POWER SYSTEM BASICS For the Nonelectrical Professional, Steven W. Blume, A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION, 2007
- 10- Power quality / C. Sankaran, CRC Press, 2002.
- 11- ELECTRIC POWER SYSTEM BASICS For the Nonelectrical Professional, Steven W. Blume, A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION, 2007
- 12- Electrical Machines, Drives and Power Systems, T. Wildi, 6<sup>th</sup> edition, 2008.
- 13- Electrical energy conversion and transport : an interactive computer-based approach /George G. Karady, Keith E. Holbert. , IEEE press, Second edition, 2013.
- 14- HV Substation Design: Applications and Considerations, Dominik Pieniazek, P.E. Mike Furnish, P.E. IEEE CED, 2015

## Contents

## فهرس المحتويات

4	..... ما الجديد في نسخة 2019؟
6	..... لغة الكتاب .
7	..... ما هى منظومة القوى الكهربائية؟
8	..... لمن هذا الكتاب؟
8	..... ماذا ينقص هذا الكتاب؟
16	..... أهم مصادر الطاقة
18	..... علم الطاقة
18	..... وحدات قياس الطاقة
21	..... تصنيف محطات التوليد الكهربائية
22	..... فصول هذا الباب

## 1

## الشبكات الكهربائية الموحدة

23	..... 1-1 مقدمة
	..... 1-1-1 أهمية الشبكات الكهربائية الموحدة
24	.....
	..... 2-1-1 الربط الكهربى بين الدول العربية
25	.....
	..... 3-1-1 أهم ميزات الربط الكهربى
27	.....

- 4-1-1 نماذج للشبكات الموحدة ..... 4-1-1
- 28.....
- 5-1-1 ملاحظات على الشبكة الموحدة المصرية ..... 35
- 6-1-1 الفقد الـ Losses فى الشبكات ..... 35
- 7-1-1 هل كل المولدات المتصلة بالشبكة تعمل طوال الوقت؟ ..... 36
- 8-1-1 ما المقصود بالـ Spinning Reserve ؟ ..... 40
- 2-1 كيف يتم التحكم فى العلاقة بين الأحمال والتوليد؟ ..... 41
- 1-2-1 التردد وعلاقته بالتغير فى الأحمال ..... 41
- 2-2-1 كيف يحدث الـ Blackout ؟ ..... 42
- 3-2-1 أشهر أسباب حدوث الـ Blackout ..... 43
- 4-2-1 خطوات إعادة تشغيل الشبكة Restoration ..... 44
- 3-1 استخدام الـ GOVERNOR فى التحكم فى التردد ..... 45
- 1-3-1 طريقة عمل الـ Governor فى المحطات البخارية: ..... 45
- 2-3-1 أنواع الـ Governor : ..... 46
- 3-3-1 لماذا الخوف من تغير التردد؟ ..... 46
- 4-3-1 لماذا نستخدم نظام الـ 50 أو 60 هيرتز؟ ..... 47
- 4-1 ربط المولدات على التوازي بالشبكة ..... 48
- 1-4-1 ما المقصود بعملية التزامن للمولدات ؟ ..... 48
- 2-4-1 شروط تحقق تزامن المولدات: ..... 49
- 5-1 خطوات توصيل مولد بالشبكة الموحدة يدويا ..... 52
- 1-5-1 الخطوة الأولى: ضبط السرعة ..... 52
- 2-5-1 الخطوة الثانية: ضبط الجهد ..... 52
- 3-5-1 الخطوة الثالثة : ضبط الـ phase sequence ..... 52
- 4-5-1 الخطوة الرابعة : ضبط الـ phase shift ..... 53

- 53..... (Automatic Synchronization) 5-5-1 الطريقة الآلية:
- 54..... 6-5-1 ماذا يحدث لو تمت عملية الربط بدون هذه الشروط؟
- 54 ..... 6-1 توزيع القدرة بين المولدات فى الشبكة
- 55..... 1-6-1 توصيل المولد منفردا على حمل معين
- 58..... 2-6-1 توزيع الأحمال بين المولدات المتصلة على التوازي
- 60..... 3-6-1 توزيع القدرة الفعالة بين المولد والشبكة العامة
- 63..... 4-6-1 توزيع القدرة غير الفعالة بين المولدات
- 64 ..... معلومات إضافية عن الشبكة المصرية
- 65..... تطور الحمل الكهربى على الشبكة :
- 67..... تطور نمو الطلب فى مصر
- 70..... محطات التوليد المتصلة بالشبكة الموحدة المصرية
- 72..... المحطات المائية فى مصر

## 2

### محطات التوليد الحرارية

- 76 ..... 2
- 77 ..... 1-2 أساسيات المحطات البخارية
- 78..... 1-1-2 ملخص الدورة البخارية
- 79..... 2-1-2 اختيار مواقع المحطات البخارية
- 80..... 3-1-2 كفاءة المحطات البخارية
- 81..... 4-1-2 الأقسام الرئيسية بالمحطات البخارية
- 81 ..... 2-2 القسم الكيمياءى فى المحطات البخارية
- 82..... 1-2-2 نظرية عمل القسم الكيمياءى:

- 82-2-2 ما هو الرقم الهيدروجيني PH ؟.....
- 83-2-2 تحسين معامل الـ PH للماء .....
- 83-2-2 اختبارات القسم الكيميائي.....
- 84 : مكونات القسم الميكانيكي فى المحطات البخارية .....
- 84 3-2 الغلاية (BOILER) .....
- 85-2-3 الفرن (Furnace).....
- 86-2-3 الدرم (Drum) .....
- 87-2-3 الموقر (Economizer) .....
- 87-2-3 المسخنات ( Heaters ) .....
- 88-2-3 وظيفة الـ Deaerator .....
- 89-2-3 المدخنة Chimney .....
- 89-2-3 الآلات والمعدات المساعدة .....
- 90 4-2 التربيننة (TURBINE) .....
- 91-2-4 نظام التزييت Lubrication فى التربيننة .....
- 92-2-4 عملية تدوير Rotation التربيننة .....
- 92 5-2 المكثف (CONDENSER) .....
- 94 6-2 الدورة البخارية تفصيليا .....
- 97-2-6 تغيير الحمل على الوحدة .....
- 97-2-6 فصل الوحدة Shut Dawn .....
- 99 7-2 مكونات محطات التوليد الغازية : .....
- 100 1-7-2 الكباس الرئيسي للوحدة .....
- 101 2-7-2 غرفة الاحتراق .....
- 102 3-7-2 التربيننة الغازية Gas Turbine .....
- 103 4-7-2 المولد الكهربى .....

- 103 ..... 5-7-2 الآلات والمعدات المساعدة للترينة الغازية
- 103 ..... 6-7-2 طريقة البدء فى المحطات الغازية
- 103 ..... 8-7-2 صمامات طرد الهواء BLOW OFF VALVES
- 105 ..... 8-2 فكرة عمل الدورة المركبة COMBINED CYCLE
- 106 ..... 1-8-2 وحدة الـ HRSG:
- 107 ..... 2-8-2 كفاءة محطات الدورة المركبة:
- 108 ..... 3-8-2 مزايا محطات الدورة المركبة:
- 108 ..... 4-8-2 أمثلة لمحطات الدورة المركبة في مصر:
- 111 ..... 9-2 توليد الكهرباء بواسطة MICRO CHP

### 3

#### القسم الكهربى فى محطات التوليد

- 113 ..... 3
- 114 ..... 1-3 مكونات المولد الكهربى
- 116 ..... 1-1-3 العضو الثابت Stator والعضو الدوار Rotor
- 117 ..... 2-1-3 منظومة التبريد
- 118 ..... 3-1-3 كيف يتم توليد المجال المغناطيسى؟
- 119 ..... 4-1-3 العناصر المرتبطة بمنظومة الـ Excitation
- 121 ..... 5-1-3 كيف يتم التحكم أوتوماتيكيا فى قيمة الجهد؟
- 122 ..... 6-1-3 الجيل الجديد من المولدات
- 124 ..... 2-3 المحولات فى القسم الكهربى فى محطات التوليد
- 125 ..... 1-2-3 محول الرفع الرئيسى Step up Transformer
- 126 ..... 2-2-3 المحول المساعد Unit Auxiliary Transformer
- 127 ..... 3-2-3 محول بدء التشغيل Start Up Transformer

- 128 ..... Excitation transformer محول المجال المغناطيسي 4-2-3
- 128 ..... 3-3 الغرف والعنابر الرئيسية بمحطة التوليد
- 129 ..... 4-3 منظومات الجهد المنخفض بمحطات التوليد
- 129 ..... Power Center خلايا الجهد المنخفض عالية القدرة
- 129 ..... Motor Control Center 2-4-3 خلايا الجهد المنخفض
- 130 ..... 3-4-3 غرفة الشواحن والبطاريات :
- 131 ..... 5-3 المنظومات المساعدة فى القسم الكهربى
- 131 ..... 1-5-3 منظومة القياس (Measurement System)
- 132 ..... 2-5-3 منظومة الاتصالات (Communication System)
- 133 ..... 3-5-3 نظام التحكم (Control System)
- 133 ..... 4-5-3 منظومة الحماية:- (Protection System)
- 134 ..... 6-3 مكونات النظام الكهربى فى محطة توليد غازية:
- 135 ..... 1-6-3 كيفية عمل المحطة من الناحية الكهربائية:

## 4

### محطات التوليد النووية

- 137 ..... 4
- 138 ..... 1-4 أساسيات المحطات النووية
- 138 ..... 1-1-4 طاقة الربط النووى
- 140 ..... 2-1-4 فكرة الطاقة النووية
- 141 ..... 3-1-4 تخصيب اليورانيوم
- 143 ..... 4-1-4 مكونات المفاعل النووي
- 145 ..... 2-4 مخاطر المفاعلات
- 146 ..... 1-2-4 هل يمكن أن تنفجر المفاعلات النووية كالقنابل؟

- 146 ..... 2-2-4 ما هو الماء الثقيل؟
- 146 ..... 3-2-4 مفاعل كندو
- 147 ..... 3-4 نبذة عن تاريخ القنبلة الذرية
- 149 ..... 4-4 كارثة تشيرنوبيل

## 5

### محطات التوليد المائية

- 152 ..... 5
- 153 ..... 1-5 محطات التوليد المائية
- 153 ..... 1-1-5 طريقة توليد الطاقة الكهرومائية
- 155 ..... 2-1-5 نظرية العمل
- 156 ..... 3-1-5 ما هو الارتفاع الحرج؟
- 157 ..... 4-1-5 محطات الضخ والتخزين

## 6

### محطات التوليد بالطاقة المتجددة

- 158 ..... 6
- 160 ..... 1-6 قواعد أساسية في الطاقة الشمسية
- 160 ..... 1-1-6 لماذا يكون الصيف أعلى في درجة الحرارة؟
- 162 ..... 2-1-6 إلى أي جهة توجه الألواح الشمسية؟
- 162 ..... 3-1-6 كيف أختار زاوية الميل جهة الجنوب؟
- 163 ..... 4-1-6 الاستفادة من الطاقة الشمسية في توليد الكهرباء
- 164 ..... 2-6 أمثلة للمحطات الكهربائية الكهروضوئية
- 167 ..... 3-6 الأنواع المختلفة من محطات الطاقة الحرارية

- 167 ..... 1-3-6 منظومة القطع المكافئ
- 169 ..... 2-3-6 منظومة البرج المركزي
- 170 ..... 3-3-6 منظومة القطع الدائري
- 171 ..... 4-6 طاقة باطن الأرض
- 171 ..... 1-4-6 من أين جاءت حرارة باطن الأرض؟
- 172 ..... 2-4-6 استخلاص الحرارة
- 173 ..... 5-6 أنواع محطات الـ GEOTHERMAL
- 173 ..... 1-5-6 محطات البخار الجاف:
- 174 ..... 2-5-6 محطات الدائرة المزدوجة:
- 176 ..... 6-6 أساسيات عملية المد والجزر TIDAL POWER
- 178 ..... 1-6-6 فكرة التوليد
- 180 ..... 7-6 طاقة الرياح
- 181 ..... 1-7-6 الطاقة الشمسية هي مصدر الرياح
- 181 ..... 2-7-6 كيف تعمل توربينات الرياح؟
- 181 ..... 3-7-6 مكونات محطة توليد الكهرباء من الرياح
- 183 ..... 4-7-6 كمية الطاقة المولدة من الرياح
- 183 ..... 8-6 العوامل المؤثرة في إنتاج الطاقة
- 185 ..... 1-8-6 زاوية الهجوم:
- 185 ..... 2-8-6 منحنى القدرة :
- 186 ..... 3-8-6 مميزات طاقة الرياح وعيوبها:
- 187 ..... 4-8-6 ترتيب التربينات في مزارع الرياح
- 189 ..... 9-6 طساقة الرياح في مصر
- 190 ..... 10-6 محطات الرياح في البحار والمحيطات
- 191 ..... 1-10-6 ميزات وضع تربينات الرياح في البحر :

- 11-6 أسطورة المولدات من النوع FREE ENERGY ..... 192
- 12-6 أنواع الخلايا الشمسية ..... 193
- 1-12-6 الخلايا وحيدة البلورة Monocrystalline Silicon ..... 193
- 2-12-6 النوع الثانى هو الخلايا متعددة الكريستالات Polycrystalline Silicon ..... 194
- 3-12-6 النوع الثالث هو Thin Film ..... 194
- 13-6 خصائص خلية الـ PV ..... 194
- 14-6 ارتباط منظومة التوليد الشمسية بالشبكة الموحدة ..... 201
- 15-6 ارتباط المحطات الشمسية الكبيرة بالشبكة العامة ..... 204
- 16-6 مكونات المحطات الشمسية المربوطة على الشبكات ..... 206
- الـ Inverter ..... 206
- 17-6 القدرة الغير فعالة في المنظومات الشمسية ..... 208
- 18-6 مقارنة بين المحطات الشمسية والبخارية ..... 211
- 19-6 كيف يتأثر خرج المحطة الشمسية بسبب عطل ؟ ..... 212
- 20-6 ما معنى الـ FAULT RIDE THROUGH ..... 217
- 21-6 تأثير وجود المحطات الشمسية على استقرار الشبكة ..... 220
- 22-6 مفهوم الـ ISLANDING ..... 222
- 23-6 تأثير الغيوم على الخلايا الشمسية؟ ..... 222
- ملحق الباب الأول ..... 224
- العوامل المؤثرة فى اقتصاديات المحطات ..... 224
- معدل الفائدة Rate of Interest ..... 225
- معدل الإهلاك Depreciation ..... 226
- تسعير الكهرباء المباعه Tariff ..... 226
- تعظيم عائد الاستثمار فى محطات الكهرباء ..... 230
- مقارنة بين أسعار إنشاء محطات التوليد المختلفة فى أمريكا ..... 231

## 7

## أساليب نقل الطاقة الكهربائية

- 235 ..... مقدمة الباب
- 237 ..... 1-7 الجهود المستخدمة فى شبكات النقل
- 239 ..... 1-1-7 اختيار جهد النقل
- 239 ..... 2-7 نقل القدرة فى منظومة الـ AC (LOADABILITY)
- 240 ..... 1-2-7 الحدود القصوى لنقل الطاقة
- 242 ..... 2-2-7 هل الخطوط القصيرة أفضل فى نقل الطاقة؟
- 243 ..... 3-7 ما هو مفهوم الـ SURGE IMPEDANCE LOADING ؟
- 245 ..... 1-3-7 أهمية قيمة الـ SIL
- 247 ..... 4-7 مقارنة بين النقل باستخدام الـ HV-AC و HV-DC
- 247 ..... 1-4-7 مشاكل النقل بنظام الـ AC
- 248 ..... 2-4-7 عيوب نظام الـ HV-DC
- 250 ..... 3-4-7 مميزات نظام الـ HV-DC
- 252 ..... 4-4-7 متى لا يكون هناك بديل للنقل بنظام الـ HVDC ؟
- 252 ..... 5-4-7 مقارنة التكلفة فى النظامين
- 253 ..... 5-7 مقارنة بين خطوط النقل الهوائية والأرضية
- 255 ..... 6-7 المواضيع الهامة فى دراسة خطوط النقل

## 8

## الأبراج الهوائية لنقل القوى

- 257 ..... 8
- 257 ..... 1-8 تصميم الأبراج

- 258 ..... 1-1-8 عناصر مكونات الأبراج
- 260 ..... 2-8 المسافات فى الأبراج الكهربائية
- 260 ..... 1-2-8 ارتفاع البرج والمسافة بين الموصلات والأرض
- 261 ..... 2-2-8 المسافة بين البرج والذي يليه
- 262 ..... 3-2-8 مسافة طريق مرور الأبراج **Right of Way**
- 264 ..... 4-2-8 الصيانة الحية **Live maintenance** للأبراج
- 266 ..... 5-2-8 التعامل مع الخطوط المفصولة
- 267 ..... 6-2-8 تحديد مدى مسافات خطورة المجالات حول الأبراج
- 270 ..... 3-8 أنواع الأبراج :
- 270 ..... 1-3-8 أبراج تعليق **Suspension Towers** :
- 271 ..... 2-3-8 أبراج شد **Tension Towers** :
- 272 ..... 3-3-8 أبراج التبديل **Transposition Towers** :
- 273 ..... 4-8 الموصلات فى أبراج الجهد العالي :
- 274 ..... 1-4-8 خصائص المواد المستعملة فى صناعة الموصلات
- 275 ..... 5-8 أنواع الموصلات فى خطوط النقل الهوائي
- 275 ..... 1-5-8 الموصلات المجدولة (**Stranded Conductors**) :
- 279 ..... 2-5-8 أطوال الموصلات
- 280 ..... 6-8 الاكسسوارات التى تستخدم فى الخطوط
- 280 ..... 1-6-8 فواصل الموصلات
- 281 ..... 2-6-8 خامد الاهتزازات **Dampers**
- 282 ..... 3-6-8 كرات تحذير الطائرات

## 9

## عوازل خطوط النقل

- 286 ..... 1-9 وظيفة العوازل: .....
- 286 ..... 2-9 تصنيف العوازل حسب الشكل التصميمي: .....
- 286 ..... 1-2-9 تصميم عوازل الطاقة والمسمار .....
- 287 ..... 2-2-9 تصميم عوازل الساق الطويلة.....
- 289 ..... 3-9 تصنيف العوازل حسب مادة الصنع: .....
- 289 ..... 1-3-9 عوازل بورسلين: Porcelain: .....
- 289 ..... 2-3-9 العوازل الزجاجية: Glasses .....
- 290 ..... 3-3-9 العوازل المطاطية: rubber .....
- 291 ..... 4-9 الأعطال التي تتعرض لها العوازل: .....
- 291 ..... 1-4-9 تأثير التلوث على أداء العازل .....
- 292 ..... 2-4-9 كيفية حدوث الومضة الكهربائية Flashover .....
- 293 ..... 3-4-9 ما هي الـ Creepage Distance ؟ .....
- 295 ..... 4-4-9 تنظيف العوازل.....
- 295 ..... 5-9 أسباب ظهور الجهود الزائدة على شبكة النقل .....
- 296 ..... 1-5-9 تأثير الجهود الزائدة على سلسلة العوازل .....
- 297 ..... 6-9 ظاهرة الكورونا.....
- 299 ..... 2-6-9 الحلول الممكنة لظاهرة الكورونا: .....
- 301 ..... 7-9 توزيع جهد التشغيل على سلسلة العازل: .....
- 302 ..... 1-7-9 رفع كفاءة توزيع الجهد .....
- 304 ..... 2-7-9 علاج انخفاض كفاءة سلسلة العزل .....
- 306 ..... 3-7-9 أسلوب الـ Insulation Coordination .....

## 10

## تمثيل خطوط النقل

- 307 ..... 1-10 مقاومة الخط
- 308 ..... 1-1-10 العوامل المؤثرة على قيمة مقاومة الموصل
- 308 ..... 2-1-10 ظاهرة التأثير السطحي Skin Effect
- 309 ..... 3-1-10 العوامل المؤثرة على الـ Skin Effect
- 309 ..... 4-1-10 لماذا نلجأ لاستخدام الـ Bundle Conductors
- 310 ..... 2-10 تأثير قيمة الـ INDUCTANCE للخط
- 310 ..... 1-2-10 ما هي الـ Inductance , L ؟
- 312 ..... 2-2-10 سعة الخطوط Capacitance وتأثيراتها
- 314 ..... 5-2-10 مصطلح الـ Admittance, Y
- 314 ..... 3-10 طرق تمثيل خطوط النقل رياضياً
- 315 ..... 1-3-10 تمثيل الخطوط القصيرة :
- 316 ..... 2-3-10 تمثيل الخطوط متوسطة الطول
- 319 ..... 3-3-10 تمثيل الخطوط الطويلة :
- 322 ..... 4-10 الظواهر التي تترتب على وجود الـ CAPACITANCE
- 322 ..... 1-4-10 ظاهرة Ferranti Effect
- 324 ..... 2-4-10 ظاهرة ارتفاع الجهد عند حدوث قصر Short Circuit
- 326 ..... 3-4-10 ظاهرة القوس الأرضى Arcing Ground

## 11

### تقنيات معوضات القدرة غير الفعالة

- 329 ..... 1-11 مفاهيم أساسية
- 330 ..... 1-1-11 تمثيل الأنواع المختلفة للقدرة الكهربائية
- 331 ..... 2-1-11 مفهوم معامل القدرة Power Factor
- 332 ..... 2-11 القدرة غير الفعالة REACTIVE POWER

- 335 ..... 1-2-11 هل القدرة غير الفعالة لا فائدة لها؟
- 337 ..... 2-2-11 إنتاج واستهلاك الـ Reactive Power
- 338 ..... 3-2-11 دور القدرة غير الفعالة في خطوط النقل
- 340** ..... 3-11 معوضات القدرة غير الفعالة
- 341 ..... 1-3-11 الفرق بين مرور الـ P ومرور الـ Q في الخطوط
- 342 ..... 2-3-11 الهدف من استخدام هذه التقنيات :
- 342 ..... 3-3-11 التحكم في عناصر الشبكة
- 343** ..... 4-11 الأجهزة التقليدية للتحكم في تدفق Q
- 343 ..... 1-4-11 المولدات الكهربائية Electric Generators:
- 344 ..... 2-4-11 المعوضات المتزامنة Synchronous Compensators:
- 345 ..... 3-4-11 استخدام الـ Series Capacitors :
- 346 ..... 4-4-11 استخدام الـ Shunt Capacitors :
- 348** ..... 5-11 ثانيا : أجهزة الـ FACTS
- 349 ..... 1-5-11 أجهزة المعوضات الثابتة SVC
- 352 ..... 2-5-11 أجهزة الـ STATCOM :
- 353 ..... 3-5-11 أجهزة الـ Static Synchronous Series Compensators
- 354 ..... 4-5-11 منظم سريان القدرة الموحد Unified Power Flow Controllers

## 12

### مقدمة عامة عن محطات التحويل

- 356** ..... 12
- 357 ..... 1-12 أهمية محطات الـ TRANSMISSION S/S
- 358 ..... 1-1-12 أمثلة عملية
- 361 ..... 2-1-12 وظائف أخرى لمحطات التحويل

- 2-12 تصنيف محطات التحويل ..... 363
- 3-12 الهيكل العام لمحطة التحويل ..... 365
- 1-3-12 المنطقة الأولى : منطقة معدات الجهد العالي ..... 367
- 2-3-12 المنطقة الثانية: منطقة HV Switchgear ..... 367
- 2-3-12 المنطقة الثالثة: منطقة المحولات ..... 367
- 3-3-12 المنطقة الرابعة: منطقة خلايا الجهد المتوسط ..... 368
- 5-3-12 القسم الخامس: غرفة التحكم ..... 368
- 7-3-12 القسم السادس : القسم الخاص بمنظومة إطفاء الحريق ..... 368
- 4-3-12 القسم السابع: منطقة الـ Capacitor Banks وهى المكثفات الخاصة بضبط وتنظيم الجهد ..... 368
- 4-3-12 القسم الثامن: منظومة الـ DC ..... 368
- 6-3-12 القسم التاسع : منظومة الاتصالات ..... 369
- 8-3-12 القسم العاشر : منظومة الـ Earthing ..... 369
- 4-12 الأعمال الكهربائية لإنشاء محطة تحويل ..... 369
- 5-12 خريطة الباب ..... 372

## 13

### المعدات الرئيسية فى محطات التحويل

- 13 ..... 373
- 1-13 قراءة مخطط المحطة ..... 373
- 2-13 مانعة الصواعق SURGE ARRESTOR ..... 377
- 1-2-13 النوع الأول : (Valve Type Arrestor) ..... 379
- 2-2-13 النوع الثانى : Metal-Oxide ( $Z_nO$ ) Arrestor ..... 380
- 3-13 سكاكين الفصل ISOLATORS ..... 382

- 385 ..... 1-3-13 أساليب فتح سكاكين الفصل
- 387 ..... 4-13 تسلسل عمليات الفصل و التشغيل فى المحطة
- 388 ..... 1-4-13 ما الفرق بين فصل الخط ، وعزل الخط ، وانسحاب الجهد؟
- 389 ..... 5-14 محولات التيار CURRENT TRANSFORMER
- 390 ..... 6-13 محولات الجهد
- 393 ..... 7-13 محولات التأريض (EARTHING TRANSFORMER)
- 398 ..... 8-13 القواطع CIRCUIT BREAKERS
- 399 ..... 1-8-13 أسلوب الفصل داخل القواطع الكهربائية:
- 400 ..... 2-8-13 الأجزاء الرئيسية بالقاطع
- 400 ..... 3-8-13 آليات الحصول على القوة المحركة:
- 402 ..... 9-13 أنواع القواطع بالمحطات
- 403 ..... 1-9-13 النوع الأول : Oil CB
- 406 ..... 2-9-13 النوع الثاني Air Blast CB -
- 407 ..... 3-9-13 النوع الثالث : القاطع المفرغ الهواء (Vacuum CB) :
- 409 ..... 4-9-13 النوع الرابع : قاطع دائرة باستخدام غاز الـ SF6
- 410 ..... 5-9-13 ضغوط تشغيل قواطع الـ SF6:
- 412 ..... 6-9-13 ما هو دور جهاز الـ anti-pumping relay ؟
- 412 ..... 7-9-13 ملحوظات من الواقع:
- 413 ..... 8-9-13 توصيف الـ Circuit Breakers:
- 415 ..... 9-9-13 كيف تتم اختيار قيم الـ rated وقيم الـ SC للقواطع؟
- 416 ..... 10-13 الفحوصات العامة واختبارات القواطع
- 416 ..... 1-10-13 الاختبارات التشغيلية Operation Tests
- 417 ..... 2-10-13 اختبارات قوة العزل بالقاطع
- 418 ..... 3-10-13 فحص مقاومة التلامس بين أقطاب القاطع المغلقة

- 419 ..... 4-10-13 اختبار زمن الفصل والتوصيل وجهد التشغيل:
- 420 ..... 5-10-13 اختبارات تسلسل التشغيل
- 422 ..... 11-13 المهمات فى محطات الـ GIS
- 423 ..... 1-11-13 مكونات الـ Bay
- 426 ..... 2-11-13 الدخول إلى محطة GIS
- 427 ..... 3-11-13 الحماية من الصواعق فى محطات الـ GIS
- 432 ..... 4-11-13 مقارنة المحطات الهوائية والغازية
- 434 ..... 5-11-13 ميزات المحطات الهوائية:
- 435 ..... 6-11-13 عيوب المحطة الهوائية :
- 435 ..... 7-11-13 ميزات محطات الـ GIS:
- 436 ..... 8-11-13 عيوب محطات الـ (GIS):
- 436 ..... 9-11-13 مقارنة بين اقتصاديات المحطات

## 14

### ترتيبات قضبان التوزيع

- 438 ..... 14
- 438 ..... 1-14 تصنيع القضبان العمومية
- 440 ..... 1-1-14 مميزات وعيوب الـ (Rigid Bus):
- 441 ..... 2-1-14 التصنيف حسب شكل الموصل
- 443 ..... 2-14 ترتيبات الـ BB ARRANGEMENTS
- 444 ..... 3-14 النظام الأول: SINGLE BUS BAR:
- 444 ..... 1-3-14 محطات تحويل أحادية القضبان
- 444 ..... 2-3-14 محطات تحويل أحادية القضبان مع فاصل القضبان
- 446 ..... 4-14 النظام الثاني: القضبان المزدوجة. DOUBLE BB:

- 447 ..... Double BB with Single CB النوع الأول: 1-4-14
- 448 ..... Double BB with Double CB النوع الثاني 2-4-14
- 449 ..... Double BB with One and Half CB النوع الثالث: 3-4-14
- 453 ..... Main and Transfer النوع الرابع 4-4-14
- 454 ..... RING SYSTEM النظام الثالث : الـ 5-14
- 455 ..... مقارنات بين الأنواع المختلفة. 6-14

## 15

### تأريض محطات التحويل

- 157 ..... 15
- 459 ..... 1-15 فكرة الأرضى.....
- 459 ..... 1-1-15 أنواع منظومات التأريض .....
- 461 ..... 2-15 الـ EARTHING فى محطات الجهد العالى .....
- 464 ..... 2-2-15 لماذا نحتاج أن تكون مقاومة الأرضى منخفضة جدا؟ .....
- 465 ..... 1-2-15 جهد اللمس .....
- 465 ..... 3-2-15 جهد الخطوة.....
- 467 ..... 4-2-15 كيف تحل مشكلة جهد اللمس وجهد الخطوة؟ .....
- 467 ..... 3-15 شبكات الـ EARTHING فى المحطات الكهربائية .....
- 468 ..... 1-3-15 ما هى الـ Ground mat ؟ .....
- 471 ..... 2-3-15 أشكال الـ Earthing Grid .....
- 472 ..... Secondary Earthing الـ مصطلح .....
- 474 ..... 4-15 خطوات التصميم .....
- 474 ..... 1-4-15 خطوات ما قبل التصميم .....
- 488 ..... 5-15 مثال تفصيلى .....

493 ..... حل المثال السابق باستخدام الـ ETAP 6-15

## 16

### الأنظمة المساعدة في محطات التحويل

500 ..... 16

500 ..... 1-16 منظومة تغذية مساعدات المحطة

500 ..... 1-1-16 التغذية بنظام الـ AC System :

501 ..... 2-16 منظومة التغذية بنظام الـ DC SYSTEM :

503 ..... حساب حجم بطاريات المحطة:

505 ..... 1-2-16 الشواحن : (Battery Chargers)

506 ..... 2-2-16 طرق شحن البطاريات :

506 ..... 3-2-16 هل يؤثر سرعة الشحن على عمر البطارية؟

506 ..... 4-2-16 عيوب وميزات البطارية الحامضية

507 ..... 5-2-16 عيوب وميزات البطارية القلوية

508 ..... 6-2-16 الشروط الواجب توافرها في غرفة البطاريات:

508 ..... 7-2-16 صيانة البطاريات :

509 ..... 8-2-16 أعطال البطارية وكيفية إصلاحها :

509 ..... 3-16 قسم الرقابة والتحكم

511 ..... 1-3-16 نظام الإنذار في المحطات التقليدية

512 ..... 4-16 نظم التحكم الحديثة SAS

513 ..... 1-4-16 وظائف نظام الـ SAS

515 ..... 2-4-16 مقارنة بين التحكم في المحطات التقليدية والمحطات الحديثة

516 ..... 5-16 ما هي IEC 61850؟

525 ..... 6-16 منظومات الوقاية الكهربائية في المحطات

- 526 ..... 1-5-16 نموذج لمنظومة حماية أحد المغذيات
- 527 ..... 2-5-16 نموذج لمنظومة حماية المحول
- 529 ..... 6-16 قسم نظم الاتصالات بالمحطات
- 529 ..... 1-6-16 الاتصال عن طريق خطوط الضغط العالي : PLC
- 530 ..... 2-6-16 دوائر مصيدة الترددات على الخطوط Line Trap
- 531 ..... 3-6-16 الاتصالات عن طريق : Pilot Cable
- 531 ..... 4-6-16 الاتصال عبر الألياف البصرية: Fiber Optic , FO
- 532 ..... 5-6-16 الاتصالات اللاسلكية: Wireless
- 533 ..... 7-16 نظم الوقاية من الحريق بالمحطات
- 533 ..... 1-7-16 مصادر الخطورة فى المحطات
- 534 ..... 2-7-16 نظرية الإطفاء
- 534 ..... 3-7-16 مكونات نظام الإطفاء الثابت:
- 536 ..... 4-7-16 آلية الإطفاء
- 536 ..... 8-16 الأنظمة المختلفة لإطفاء الحريق
- 536 ..... 1-8-16 الماء تحت ضغط الهواء
- 537 ..... 2-8-16 نظام ثاني أكسيد الكربون
- 538 ..... 3-8-16 نظام الماء تحت ضغط ثاني أكسيد الكربون
- 538 ..... 4-8-16 نظام الإطفاء برشاشات الماء لحماية المحول:
- 539 ..... 9-16 ملحق تعليمات التشغيل محطات المحولات

## 17

### ملاحق تخطيط شبكات التوزيع

- 544 ..... 1-17 متطلبات مهندس تخطيط الأحمال
- 544 ..... 1-1-17 معرفة وتحقيق الأهداف الأساسية لعملية تخطيط الشبكات:

- 545 .....:Load Studies 2-1-17 القدرة على عمل الدراسات الخاصة بالأحمال
- 547 ..... : 3-1-17 القدرة على توصيف عناصر شبكات التوزيع
- 548 ..... : 4-1-17 معرفة البدائل المتاحة فى عملية تصميم الشبكات
- 548 ..... 5-1-17 القدرة على عمل الدراسات المطلوبة لعملية التخطيط
- 549 ..... OPTIMIZATION TECHNIQUES 2-17 استخدام
- 549 ..... 1-2-17 كيفية الوصول للحل الأمثل
- 551 ..... 3-17 خريطة هذا الباب

## 18

### أمثلة تطبيقية لتخطيط شبكات الجهد المتوسط

- 553 ..... 18
- 553 ..... 1-18 مراحل تصميم شبكة توزيع
- 553 ..... 1-1-18 المرحلة الأولى: تقدير الأحمال
- 555 ..... 2-1-18 المرحلة الثانية : اختبار جهد محطة التوزيع
- 558 ..... 3-1-18 المرحلة الثالثة : اختبارات المحطة / المحطات الرئيسية
- 560 ..... 4-1-18 المرحلة الرابعة : حسم أسلوب التغذية لشبكة التوزيع
- 562 ..... 5-1-18 المرحلة الخامسة : حسم أسلوب التغذية الفرعية ؟
- 564 ..... 6-1-18 كيف يتم حساب مقطع الكابل فى التغذية الحلقية؟
- 565 ..... 7-1-18 المرحلة السادسة : محطة التحويل الابتدائية هوائية/غازية؟
- 565 ..... 8-1-18 المرحلة السابعة : اختبار نوعية قضبان التوزيع

## 19

### العناصر الأساسية بشبكة التوزيع

- 568 ..... 19

- 569 .....1-19ضخامة منظومة التوزيع
- 571 .....2-19: موزعات الجهد المتوسط DISTRIBUTORS
- 571 .....1-2-19 المهمات داخل مبنى الموزع Distributor' Equipment
- 571 .....2-2-19 لوحة التوزيع ( الموزع )
- 574 .....3-2-19 مكونات الخلية
- 575 .....4-2-19 المهمات الموجودة داخل خلية الدخول Incoming Cubicle
- 576 .....5-2-19 المهمات الموجودة بخلية الخروج: Cubicle Outgoing
- 576 .....6-2-19 المهمات الموجودة بخلية الربط :
- 577 .....7-2-19 مخطط لوحة الموزع
- 578 .....3-19 المهمات الأخرى الموجودة بمبنى الموزع:
- 578 .....1-3-19 البطاريات:
- 578 .....2-3-19 الشاحن (التونجر)
- 579 .....3-3-19 ما معنى انسحاب الجهد على الموزع؟
- 579 .....4-3-19 التحكم فى لوحات الجهد المتوسط
- 581 .....4-19 محولات التوزيع
- 584 .....5-19 الفيوزات فى شبكات التوزيع
- 584 .....1-5-19 ميزات وعيوب الفيوز Fuse
- 585 .....2-5-19 أرقام هامة لتوصيف الفيوز
- 587 .....3-5-19 أنواع الفيوزات
- 589 .....4-5-19 قواعد عامة لاختيار الفيوز المناسب
- 589 .....5-5-19 تنسيق الفيوزات فى شبكات التوزيع
- 597 .....6-19 عناصر منظومة الجهد المتوسط: RMU
- 598 .....7-19 صناديق التوزيع فى شبكة الجهد المنخفض :
- 600 .....1-7-19 تنسيق صناديق التوزيع

## 20

## أنظمة التغذية في الجهد المتوسط

602	20
602	1-20 أشكال منظومة التغذية
602	1-1-20 التغذية الشعاعية Radial System
605	2-1-20 التغذية الحلقية المغلقة Ring System
606	3-1-20 نظام الـ Loop المفتوحة
608	4-1-20 لوحات R.M.U
609	5-1-20 تغذية كبار المشتركين
609	6-1-20 أنظمة من الواقع
612	2-20 تأثير دخول التوليد الموزع DG
613	1-2-20 ميزات وعيوب التوليد الموزع
614	2-2-20 مشكلة التنسيق . Coordination
615	3-2-20 مشكلة الخطأ في تقدير مسافة العطل
615	4-2-20 مشكلة ارتفاع مستوى الـ Short Circuit
616	5-2-20 مشكلة الانعزال Islanding

## 21

## شبكات الجهد المتوسط الهوائية

618	21
618	1-21 أشكال التغذية في شبكات التوزيع الهوائية
618	1-1-21 أولاً الشبكات الشعاعية Radial
620	2-1-21 ثانياً التوصيل الحلقى Ring

- 2-21 العناصر الأساسية فى الشبكات الهوائية ..... 621
- 3-21 أبراج شبكة الجهد المتوسط ..... 621
- 4-21 العوازل المستخدمة فى الجهد المتوسط ..... 625
- 5-21 الإكسسوارات فى الشبكات الهوائية ..... 627
- 1-5-21 كلابات الشد Tension clamp ..... 627
- 2-5-21 السكاكين ..... 628
- 3-5-21 النوع الأول : السكاكين الهوائية ..... 628
- 4-5-21 النوع الثانى : Load Break Switch ..... 629
- 6-21 الموصلات المستخدمة بشبكة الجهد المتوسط ..... 630
- 7-21 أجهزة الفصل وإعادة التوصيل التلقائى ..... 633
- 8-21 مانعة الصواعق ..... 636
- 9-21 أجهزة مبيانات الأعطال ..... 636
- 10-21 الأرضى فى شبكات التوزيع ..... 639
- 11-21 مشاكل خطوط التوزيع الهوائية ..... 640

## 22

### دراسات هامة فى شبكات التوزيع

- 22 ..... 642
- 1-22 الاعتمادية فى الشبكات ..... 642
- 1-1-22 الفرق بين الـ "Reliability & Power Quality" ..... 642
- 2-1-22 مؤشرات الاعتمادية فى الشبكات : ..... 643
- 2-22 تنظيم الجهد فى شبكات التوزيع ..... 645
- 1-2-22 فكرة عمل منظم الجهد ..... 645
- 2-2-22 مثال تطبيقي لتقدير حجم الـ AVR ..... 647

- 651 ..... 3-22 التحكم فى شبكات التوزيع
- 651 ..... 1-3-22 تعريف الـ Distribution Automation
- 651 ..... 2-3-22 أجهزة الـ IED
- 652 ..... 3-3-22 نظام الـ SCADA
- 654 ..... وحدات التحكم الطرفية (Remote terminal Unit RTU)
- 655 ..... 4-3-22 الإشارات المنقولة إلى مركز التحكم من لوحات التوزيع
- 656 ..... 5-3-22 إشارات منقولة من محطات المحولات
- 656 ..... 6-3-22 إشارات منقولة من محولات التوزيع
- 657 ..... 7-3-22 أدوار التحكم فى شبكات الجهد المتوسط:
- 658 ..... 8-3-22 ثانيا التحكم فى شبكة الجهد المنخفض:
- 659 ..... 9-3-22 الـ SCADA فى شبكات التوزيع بمصر
- 660 ..... 4-22 منظومة الاتصالات فى شبكات التوزيع
- 660 ..... 1-4-22 شبكة الاتصالات فى الجهد المتوسط
- 661 ..... 5-22 شبكات التوزيع الذكية
- 661 ..... 1-5-22 مكونات الشبكة الذكية
- 665 ..... 2-5-22 وظائف الشبكة الذكية :
- 666 ..... 6-22 ملحق أشهر برامج تمثيل ودراسة أداء الشبكات

## 23

### المواد المستخدمة فى صناعة الكابلات

- 673 ..... 23
- 673 ..... 1-23 المواد المعدنية المستخدمة فى صناعة الموصلات
- 676 ..... 1-1-23 ثانيا المواد المعدنية المستخدمة للحماية
- 676 ..... 2-23 المواد العازلة المستخدمة فى صناعة الكابلات

- 676 ..... 1-2-23 ما معنى عازل كهربائي؟
- 677 ..... 2-2-23 أهم خصائص المادة العازلة كهربيا
- 677 ..... 3-23 مقدمة عن البوليمرات
- 678 ..... 1-3-23 تطبيقات البوليمرات الصناعية Synthetic Polymer
- 679 ..... 2-3-23 اللدائن الحرارية : البولي فينيل كلورايد PVC
- 680 ..... 3-3-23 الجوامد الحرارية :-Thermo-sets
- 680 ..... 4-3-23 المطاط:-RUBBER
- 680 ..... 5-3-23 عوازل البولي إيثيلين PE ، والبولي بروبيلين PP
- 680 ..... 6-3-23 البولي إيثيلين التشابكي XLPE :-
- 681 ..... 4-23 أبرز مشاكل العوازل
- 681 ..... 1-4-23 المفقودات Losses
- 681 ..... 2-4-23 التيارات المتسربة خلال العوازل
- 682 ..... 3-4-23 ظاهرة WATER TREE :

## 24

### تركيب الكابل

- 683 ..... 24
- 683 ..... 1-24 تركيب كابلات الجهد العالي :
- 684 ..... 1-1-24 الموصل Conductor
- 686 ..... 2-1-24 حجاب الموصل Semiconductor Layer
- 688 ..... 3-1-24 العزل INSULATION
- 689 ..... 4-1-24 حجاب العازل (شبه الموصل الثانى )
- 690 ..... 5-1-24 الغلاف المعدنى Metallic sheath
- 691 ..... 6-1-24 مزايا الأغلفة المعدنية عامة

- 691 ..... :FILLING – BEDDING ( الفرشة ) الحشو أو 7-1-24
- 691 .....: ARMOUR ( التدريع ) التسليح 8-1-24
- 693 .....Sheath Effect المشاكل المرتبطة بالغلاف 9-1-24
- 696 .....:Outer Sheath الغلاف الخارجى 10-1-24
- 697 ..... أطراف التوصيل الخارجية 11-1-24

## 25

### الخواص الكهربائية للكابلات

- 698 ..... 25
- 698.....CONDUCTOR RESISTANCE مقاومة الموصل 1-25
- 699 ..... Insulation resistance مقاومة العزل 2-1-25
- 700 ..... INDUCTANCE للكابلات 2-25
- 702 ..... CABLE CAPACITANCE سعة الكابل 3-25
- 703 ..... المجال المغناطيسى للكابلات : 4-25
- 704 ..... المجال الكهربى للكابلات 5-25
- 704 ..... Electrical field قياس شدة المجال الكهربى 1-5-25
- 706 ..... تأثير المجال الكهربى على الأطراف : 2-5-25
- 707 ..... تأثير المجال الكهربى على ظاهرة WATER TREE : 3-5-25

## 26

### اختبارات الكابلات

- 708 ..... 26
- 708 ..... الفئات المختلفة للاختبارات 1-26
- 709 ..... الاختبارات الروتينية: 1-1-26

- 709 ..... 2-1-26 الاختبارات الخاصة (اختبارات العينة):
- 710 ..... 3-1-26 الاختبارات النوعية:
- 711 ..... 2-26 اختبارات الموقع للكابلات أثناء الخدمة
- 711 ..... 1-2-26 اختبار تحديد الأوجه Phase Checking
- 712 ..... 2-2-26 اختبار الاستمرارية Continuity test
- 713 ..... 3-2-26 اختبار قياس مقاومة الموصل للتيار المستمر
- 714 ..... 4-3-26 اختبار قياس سعة الكابل (Cable Capacitance)
- 715 ..... 5-2-26 اختبار الغلاف الخارجي DC Sheath Test
- 716 ..... 6-2-26 اختبار مقاومة التماس في صناديق التوصيل
- 716 ..... 7-2-26 اختبار صحة الترابط العرضي للغلاف المعدني
- 717 ..... 3-26 مجموعة اختبارات العازل
- 720 ..... 1-3-26 اختبار العازل باستخدام الـ Hipot
- 720 ..... 2-3-26 اختبار تحديد قيمة مقاومة العزل Insulation Resistance
- 721 ..... 3-3-26 اختبار تحديد جهد انكسار العازل Dielectric Breakdown
- 722 ..... 4-3-26 اختبار مدة تحمل مقاومة العازل
- 722 ..... 5-3-26 اختبار كفاءة العزل ( الـ  $\tan \delta$  )
- 723 ..... 6-3-26 مقارنة قيم الاختبارات:
- 724 ..... 7-3-26 اختبار Partial Discharge Testing: (PD)
- 725 ..... 4-26 اختبارات تحمل العزل للجهد العالي
- 726 ..... 1-4-26 اختبار الجهد العالي لدوائر 132kV ، أو أعلى
- 728 ..... 2-4-26 تأثير استخدام الجهد العالي المستمر DC على كابلات القدرة
- 729 ..... 3-4-26 تأثير استخدام الـ HVAC
- 729 ..... 4-4-26 استخدام تردد منخفض VLF (Very Low Frequency)

## 27

## اكتشاف أعطال الكابلات

732	.....	27
732	..... 1-27 الأسباب الأساسية لانهايار الكابلات :	
732	..... 1-1-27 أسباب تتعلق بالكابل نفسه	
733	..... 2-1-27 أسباب تتعلق بالعزل خصوصا	
733	..... 3-1-27 أسباب ميكانيكية	
733	..... 4-1-27 أسباب كيميائية	
734	..... 5-1-27 أسباب تتعلق بسوء طريقة المد	
735	..... 6-1-27 أسباب تتعلق بسوء اللحام	
735	..... 2-27 مراحل اكتشاف الأعطال	
737	..... 3-27 القياس المبدئى لمسافة العطل	
737	..... 1-3-27 جهاز صدى النبضة (الرادار) (Pulse Echo)	
738	..... 2-3-27 كيفية تحديد مسافة العطل باستخدام Pulse Echo	
740	..... 3-3-27 تصنيف الأعطال بالنسبة لجهاز الـ Pulse Echo	
743	..... 4-3-27 كيفية حساب المسافة	
744	..... 5-3-27 مشاكل استخدام الـ TDR :	
744	..... 6-3-27 استخدام جهاز القنطرة (Bridge) لقياس مسافة العطل	
747	..... 7-3-27 طريقة قنطرة مورى Murray Bridge لقياس مسافة العطل	
748	..... 4-27 التحديد الدقيق لمكان العطل	
748	..... 1-4-27 استخدام جهاز مولد النبضات : Surge Generator	
751	..... 2-4-27 سماعات الاستشعار	
752	..... 3-4-27 استخدام طريقة الـ Arc reflector فى تحديد مكان العطل	

- 753 ..... 4-4-27 تحديد مكان العطل باستخدام المجال المغناطيسي
- 754 ..... 5-27 سيارات فحص الكابلات
- 757 ..... 6-27 خلاصة بعض الخبرات الفنية

## 28

### الهزات العابرة في نظم القوى الكهربائية

- 761 ..... 28
- 761 ..... 1-28 مقدمة الفصل:
- 762 ..... 1-1-28 الفرق بين الـ Transient Analysis والـ SS- Analysis
- 763 ..... 2-1-28 مدى الهزات العابرة
- 763 ..... 3-1-28 لماذا ندرس أداء الشبكات أثناء الـ Transient؟
- 764 ..... 4-1-28 كيف يتم تمثيل المعدات أثناء الـ Transients؟
- 766 ..... 5-1-28 تحرير المصطلحات
- 767 ..... 6-1-28 مصدر تغذية الهزات العابرة
- 768 ..... 7-1-28 الأنواع المختلفة من الهزات العابرة
- 769 ..... 2-28 مصطلح جودة القدرة
- 769 ..... 1-2-28 تعريف جودة القدرة الكهربائية Power Quality :
- 770 ..... 2-2-28 جودة القدرة أم جودة الجهد؟
- 771 ..... 3-2-28 أسباب الاهتمام بجودة الطاقة الكهربائية
- 771 ..... 4-2-28 مظاهر عدم جودة القدرة:
- 773 ..... 5-2-28 أهم المواصفات التي تعنى بمشاكل جودة القدرة
- 775 ..... 3-28 الهزات عند تطبيق DC على مكثف ومقاومة
- 777 ..... 1-3-28 مفهوم الـ Time Constant, TC
- 777 ..... 4-28 الهزات عند تطبيق DC على ملف ومقاومة

- 780 ..... 5-28 الهزات عند تطبيق AC على ملف ومقاومة
- 782 ..... 6-28 ظاهرة ارتفاع الجهد
- 783 ..... 1-6-28 طبيعة الـ Voltage surges
- 784 ..... 2-6-28 ماذا نقصد بـ (BIL) Basic Impulse level
- 787 ..... 7-28 الهزات العابرة الناتجة عن الصواعق البرقية
- 787 ..... 1-7-28 ما هو البرق؟
- 788 ..... 2-7-28 تأثير جهود الأجسام بالبرق
- 791 ..... 3-7-28 طرق الحد من تأثير الصواعق في شبكات الجهد العالى:
- 793 ..... 8-28 الهزات الناتجة عن فصل الأعطال
- 797 ..... 1-8-28 طرق الحد من ارتفاع الجهد على أطراف الـ CB
- 798 ..... 9-28 الهزات الناتجة عن فصل/توصيل المكثفات
- 799 ..... 1-9-28 ماذا يحدث عند توصيل المكثفات؟
- 800 ..... 2-9-28 ماذا يحدث عند فصل المكثفات؟
- 802 ..... 10-28 الاهتزاز الناتج عن فصل وتشغيل الأحمال
- 804 ..... 11-28 الهزات العابرة بسبب FERRO RESONANCE
- 805 ..... 12-28 وسائل الحماية من الـ VOLTAGE SURGES
- 808 ..... 13-28 ظاهرة هبوط الجهد
- 808 ..... 1-13-28 الانخفاض المستمر للجهد Under Voltage
- 809 ..... 2-13-28 الانخفاض (العابر) للجهد Voltage Sag
- 810 ..... 3-13-28 انخفاض الجهد المؤقت بسبب حالات الـ Short Circuit
- 811 ..... 4-13-28 انخفاض الجهد المؤقت بسبب بدء تشغيل المحركات الكبيرة
- 811 ..... 5-13-28 ظاهرة ارتعاش الجهد ( Voltage Fluctuation (flicker
- 812 ..... 6-13-28 تأثير هبوط الجهد على الأحمال المختلفة
- 814 ..... 7-13-28 وسائل الحماية من انخفاض وتغير الجهد (شبكة الجهد المنخفض)

815 ..... Power Conditioners استخدام أجهزة الـ 8-13-28

## 29

### استقرار منظومة القوى الكهربائية

818 ..... 29

818 ..... 1-29 ماذا نقصد بالـ STABILITY

819 ..... ماذا نقصد بالاضطراب؟ وما هي توابعه؟

819 ..... 2-29 دلالات استقرار الشبكة

820 ..... 3-29 أهم المصطلحات والتعريفات

821 ..... 1-3-29 مفهوم الـ Rotor Angle Stability

822 ..... 2-3-29 مفهوم الـ Frequency Stability

822 ..... 3-3-29 مفهوم الـ Voltage Stability

822 ..... 4-3-29 صعوبة دراسة موضوع الـ Stability

823 ..... الخلاصة حتى الآن :

825 ..... 4-29 دراسة الـ ROTOR ANGLE STABILITY

826 ..... 1-4-29 تعريف زاوية الـ Rotor Angle

826 ..... 2-4-29 التحكم فى الـ Rotor Angle

826 ..... 3-4-29 تأثيرات ناتجة عن تغير الـ Rotor Angle

827 ..... 4-4-29 صعوبة الدراسات المرتبطة بتغير الـ Rotor Angle

828 ..... 5-4-29 تأثير الـ Inertia على استقرار دوران المولد

829 ..... 5-29 استخدام الـ EQUAL AREA CRITERIA

829 ..... 1-5-29 مقدمة عن هذا المبدأ

834 ..... 2-5-29 تأثير وجود خطين متوازيين على الـ Stability

838 ..... 3-5-29 تأثير سرعة فصل الأعطال على استقرار الشبكة

- 842.....FREQUENCY STABILITY دراسة المـ 6-29
- 843..... INERTIA على التغير فى التردد 7-29
- 843..... 1-7-29 المجالات التى يتغير فيه التردد
- 845..... كيف يمكن علاج مشاكل المـ POWER DEFICIT ؟ 8-29
- 845..... 1-8-29 مراحل التحكم فى التردد:
- 848..... VOLTAGE STABILITY دراسة المـ 9-29
- 849..... VOLTAGE STABILITY أنواع المـ 10-29
- 849..... Voltage Collapse ظاهرة انهيار الجهد المـ 1-10-29
- 849..... أساسيات دراسة استقرار الجهد 11-29
- 852..... العلاقة بين الجهد و القدرة غير الفعالة 12-29
- 854..... العوامل المؤثرة على سرعة انهيار الجهد 13-29
- 856..... 1-13-29 ملحوظات على استقرار الجهد
- 857..... طرق تحسين استقرار الجهد فى الشبكات 14-29
- 857..... 1-14-29 أولاً فى شبكات الجهد العالى :
- 859..... 2-14-29 ثانياً : فى الجهد المتوسط والمنخفض

## 30

### التوافقيات فى الشبكات الكهربائية

- 862..... 30
- 862..... HARMONICS
- 863..... 1-30 ماهى المـ HARMONICS وكيف تنشأ ؟
- 864..... 1-1-30 طبيعة التوافقيات
- 867..... 2-1-30 لماذا تختلف المـ Harmonics فى إشارتى الجهد والتيار لنفس الحمل؟
- 869..... 2-30 كيف نقيس حجم تأثير التوافقيات ؟

- 871 ..... سمات هامة للتوافقيات. 3-30
- 874 ..... مصادر توليد الـ HARMONICS : 4-30
- 874 ..... أجهزة التي تستخدم معدات الـ Power Electronics : 1-4-30
- 875 ..... مصابيح الفلوريسنت: 2-4-30
- 882 ..... المعدات ذات القوس الكهربى "Arc furnaces" . 3-4-30
- 884 ..... المشاكل الناتجة عن التوافقيات. 4-4-30
- 884 ..... تأثير التوافقيات على المحولات: 5-4-30
- 884 ..... ما هو الـ K-Factor ..... 6-4-30
- 885 ..... كيف يتم حساب الـ K-Factor ؟ ..... 7-4-30
- 887 ..... تأثيرات متنوعة للتوافقيات ..... 8-4-30
- 892 ..... ظاهرة الرنين ..... 5-30
- 892 ..... خطورة ظاهرة الرنين ..... 1-5-30
- 893 ..... رنين التوازي ..... 2-5-30
- 894 ..... رنين التوالى ..... 3-5-30
- 895 ..... الحدود القياسية لقيم التوافقيات بالشبكة : ..... 6-30
- 895 ..... المواصفة القياسية رقم IEEE 519-1992 ..... 1-6-30
- 899 ..... الحلول المستخدمة لمنع ظهور التوافقيات ..... 7-30
- 900 ..... أولاً :- الـ "Passive Harmonic Filters" ..... 1-7-30
- 902 ..... ثانياً :- الـ "Active Harmonic Filters" ..... 2-7-30
- 903 ..... ثالثاً : الـ "Compound Harmonic Filters" ..... 3-7-30
- 903 ..... المثال الأول للحد من التوافقيات: ..... 8-30
- 903 ..... فكرة الـ Harmonic Cancellation ..... 1-8-30
- 904 ..... تطبيق الفكرة ..... 2-8-30
- 908 ..... المثال العملي الثانى للحد من التوافقيات ..... 9-30

908 .....	1-9-30 وصف المشكلة
910 .....	2-9-30 آليات الحل

