الأكاديمية العربية الدولية

الأكاديمية العربية الدولية

المقررات الجامعية

www.aiacademy.info | care@aiacademy.info

المملكة العربية السعودية
المؤسسة العامة للتدريب التقني والمهني
الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج

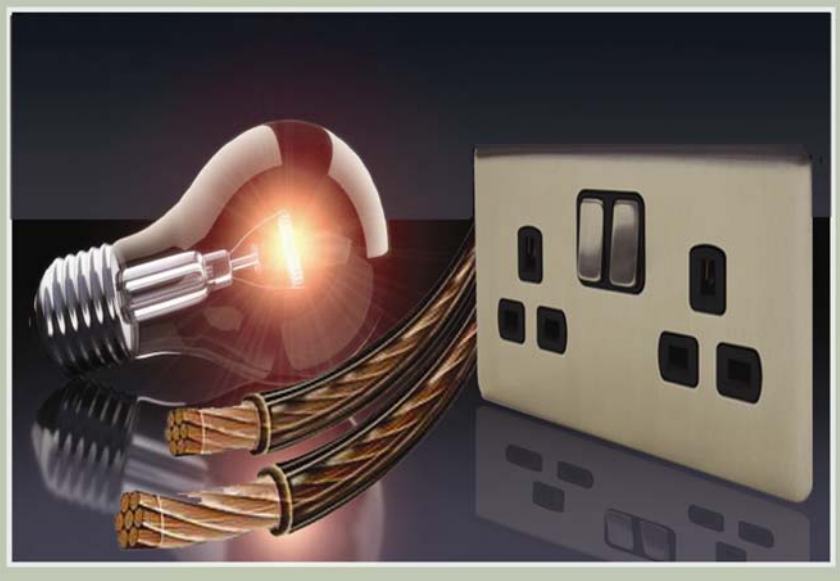
الكليات التقنية

الحقيبة التدريبية :

شبكات النقل والتوزيع

في تخصص

مشغل لوحة التحكم



الفهرس

الموضـــوع	رقم الصفحة
الوحدة الأولى : عناصر نظم التوزيع الكهربائي	5
(1- 1) مقدمة	6
(1- 2) التوزيع الأولي وأنواعه	8
(1- 3) التوزيع الثانوي وأنواعه	12
(1- 4) الوحدة الأساسية الحلقية المدمجة	15
(1- 5) محطات التوزيع الفرعية	16
الوحدة الثانية : الموزعات الكهربائية	28
(2- 1) موزعات التيار المستمر	29
(2- 1- 1) طرق تغذية موزعات التيار المستمر	30
(2- 2) موزعات التيار المتردد	35
الوحدة الثالثة : خطوط النقل الكهربائي	45
(3- 1) مقدمة	46
(3- 2) الموصلات الكهربائية	46
(3- 3) أبراج خطوط النقل الكهربائي	52
(3- 4) تمثيل خطوط النقل الكهربائي	56
الوحدة الرابعة : عوازل خطوط النقل الهوائية	69
(4- 1) المواد التي تصنع منها المواد العازلة	70
(4- 2) أنواع عوازل خطوط النقل الكهربائية	71
(4- 3) انهيار عوازل خطوط النقل الكهربائية	74
(4- 4) توزيع الجهد علي سلسلة العوازل المعلقة	75
(4- 5) طرق تحسين كفاءة السلسلة	76
الوحدة الخامسة : الكيابل الكهربائية	82
(5- 1) أنواع الكيابل وطرق حساب عناصرها	84
(5- 2) فقد القدرة واستعمال الجداول في تحديد السعة الأمبيرية	95
(5- 3) طرق تبريد الكيابل	106

(5- 4) تحديد عدد الكيابل في الأنابيب وصناديق الكيابل	108
(5- 5) فقد الفولطية	109
(5- 6) الأخطاء في الكيابل الكهربائية	110
(5- 7) تحديد أماكن حدوث الأخطاء	110
الوحدة السادسة : دراسة بعض الظواهر علي خطوط النقل	119
(6- 1) الظاهرة السطحية	120
(6- 2) ظاهرة التفريغ الهالى	121
(6- 3) تأثير الصواعق علي خطوط النقل وطرق الحماية منها	126
الوحدة السابعة : انهيار العوازل الكهربائية	135
أولا : انهيار العوازل الغازية	136
(7- 1) عمليات تأين الغازات العازلة	136
(7- 2) أزدياد التيار الكهربائي بوجود العمليات الثانوية	138
(7- 3) آلية تاونسند للانهيار	140
(7- 4) تحديد قيم المعاملات α و γ عمليا	141
(7- 5) جهد الشرارة – قانون باشن	143
(7- 6) انهيار الغازات سالبة الكهربائية	144
(7- 7) غاز سادس فلوريد الكبريت	146
ثانيا : انهيار العوازل السائلة	149
(7- 8) العوازل السائلة النقية والتجارية	149
(7- 9) تنقية السوائل التجارية	149
(7- 10) اختبار انهيار العوازل السائلة	151
(7- 11) التوصيل والانهيار في العوازل السائلة النقية	151
(7- 12) انهيار العوازل السائلة التجارية	152
ثالثا : انهيار العوازل الصلبة	153
(7- 13) الانهيار في العوازل الصلبة	153
(7- 14) العوازل الصلبة المستخدمة عمليا	157

مقدمة

الحمد لله وحده، والصلاة والسلام على من لا نبي بعده، محمد وعلى آله وصحبه، وبعد:

تسعى المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني لتأهيل الكوادر الوطنية المدربة القادرة على شغل الوظائف التقنية والفنية والمهنية المتوفرة في سوق العمل، ويأتي هذا الاهتمام نتيجة للتوجهات السديدة من لدن قادة هذا الوطن التي تصب في مجملها نحو إيجاد وطن متكامل يعتمد ذاتياً على موارده وعلى قوة شبابه المسلح بالعلم والإيمان من أجل الاستمرار قدماً في دفع عجلة التقدم التنموي، لتصل بعون الله تعال لمصاف الدول المتقدمة صناعياً.

وقد خطت الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج خطوة إيجابية تتفق مع التجارب الدولية المتقدمة في بناء البرامج التدريبية، وفق أسإلىب علمية حديثة تحاكي متطلبات سوق العمل بكافة تخصصاته لتلبي متطلباته ، وقد تمثلت هذه الخطوة في مشروع أعداد المعايير المهنية الوطنية الذي يمثل الركيزة الأساسية في بناء البرامج التدريبية، إذ تعتمد المعايير في بنائها على تشكيل لجان تخصصية تمثل سوق العمل والمؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني بحيث تتوافق الرؤية العلمية مع الواقع العملي الذي تفرضه متطلبات سوق العمل، لتخرج هذه اللجان في النهاية بنظرة متكاملة لبرنامج تدريبي أكثر التصاقاً بسوق العمل، وأكثر واقعية في تحقيق متطلباته الأساسية.

وتتناول هذه الحقيبة التدريبية " شبكات النقل والتوزيع" لمتدربي قسم" مشغل لوحة التحكم " للكليات التقنية موضوعات حيوية تتناول كيفية اكتساب المهارات اللازمة لهذا التخصص.

والإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج وهي تضع بين يديك هذه الحقيبة التدريبية تأمل من الله عز وجل أن تسهم بشكل مباشر في تأصيل المهارات الضرورية اللازمة، بأسلوب مبسط يخلو من التعقيد، وبالاستعانة بالتطبيقات والأشكال التي تدعم عملية اكتساب هذه المهارات.

والله نسأل أن يوفق القائمين على أعدادها والمستفيدين منها لما يحبه ويرضاه، إنه سميع مجيب الدعاء.

الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج

الوحدة الأولى

عناصر نظم التوزيع الكهربائي

عناصر نظم التوزيع الكهربائي

(1 -1) مقدمة

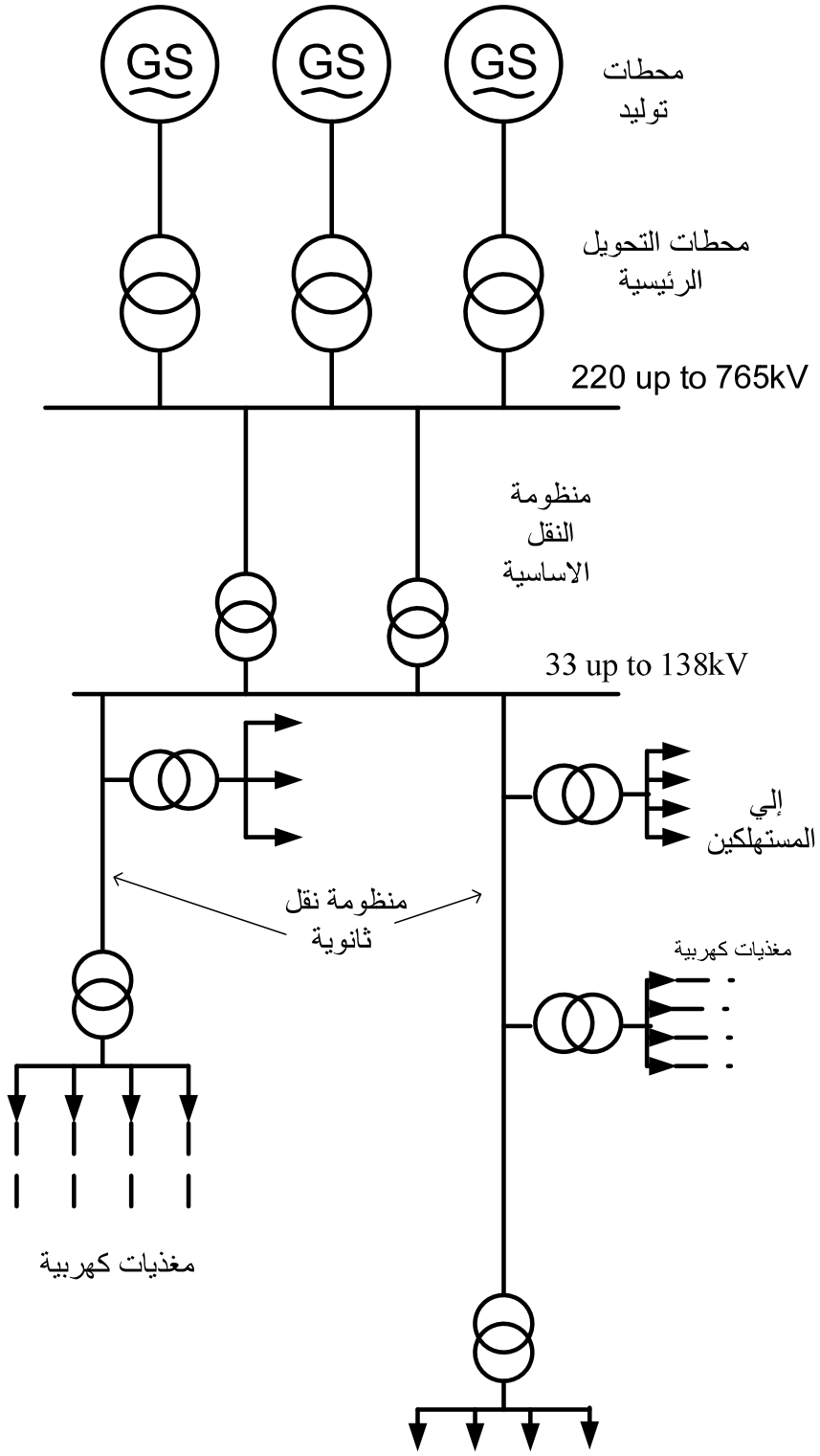
تتكون منظومة القوي الكهربائية من ثلاثة أجزاء رئيسة هي محطات التوليد، ومنظومة نقل القدرة الكهربائية ومنظومة توزيع القدرة الكهربائية.

تنقسم منظومة النقل الكهربائي إلى قسمين رئيسين هما: منظومة أساسية لنقل القدرة الكهربائية وتعمل عند الجهود فوق العالية والجهود الفائقة، ومنظومة نقل فرعية للقدرة الكهربائية وتعمل عند الجهود العالية وتنقل القدرة الكهربائية إلى المحطات الفرعية للتوزيع.

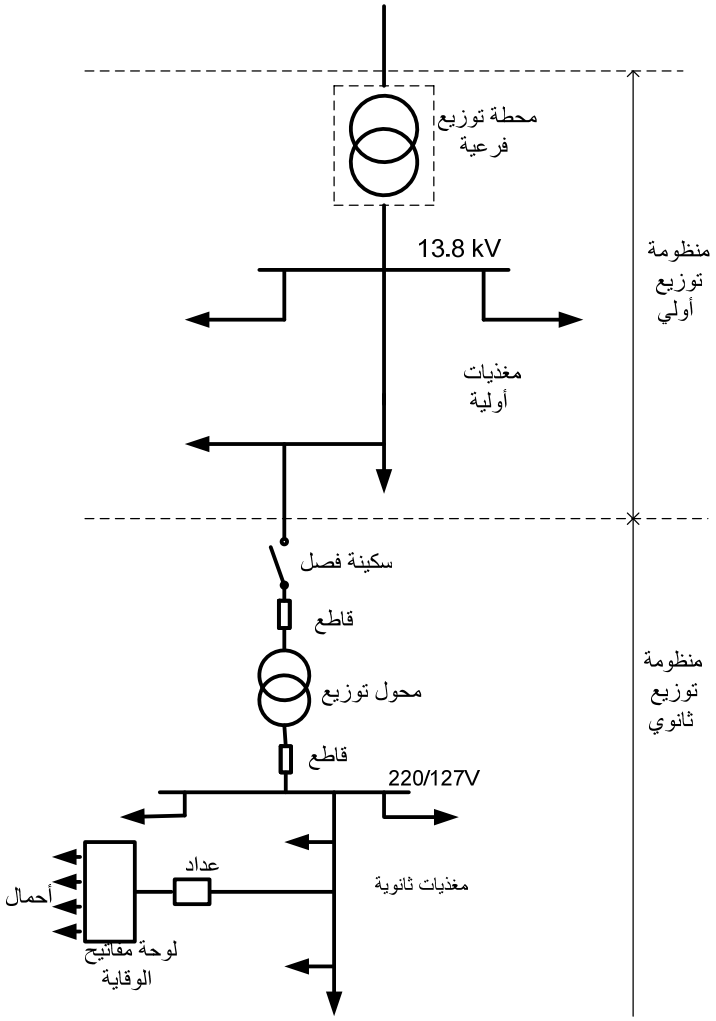
أما منظومة توزيع القدرة الكهربائية فتنقسم إلى جزأين رئيسين هما منظومة توزيع القدرة الكهربائية الأولية (primary distribution system) وتعمل علي جهود تتراوح بين 33-6.6kV - والجهد المستخدم في أكثر مناطق المملكة علي منظومة التوزيع الأولية هو 13.8kV - ومنظومة توزيع القدرة الكهربائية الثانوية (secondary distribution system) وتعمل علي الجهود المنخفضة وهذه المنظومة هي التي توصل الخدمة للأحمال مباشرة علي جهد 220/110V أو 380/220V.

ويبين الشكل(1)نموذجا لمنظومة قوى كهربائية تشتمل على الثلاثة أجزاء الرئيسة. أما شكل (2)فيبين المكونات الأساسية لشبكة توزيع القدرة الكهربائية.

وجدير بالملاحظة هنا أن منظومة التوزيع الكهربائي تمثل أكثر من 40% من التكإلىف الكلية لمنظومة القوي الكهربائية ونظرا لقيمة رأس المال المستثمر في منظومة التوزيع الكهربائية فيجب أعطائها المزيد من الاهتمام والعناية في التصميم والصيانة.



الشكل (1) المكونات الأساسية لمنظومة القوي الكهربائية



شكل (2) العناصر الأساسية لشبكة توزيع القدرة الكهربائية

(2-1) التوزيع الأولي وأنواعه Primary Distribution and its types

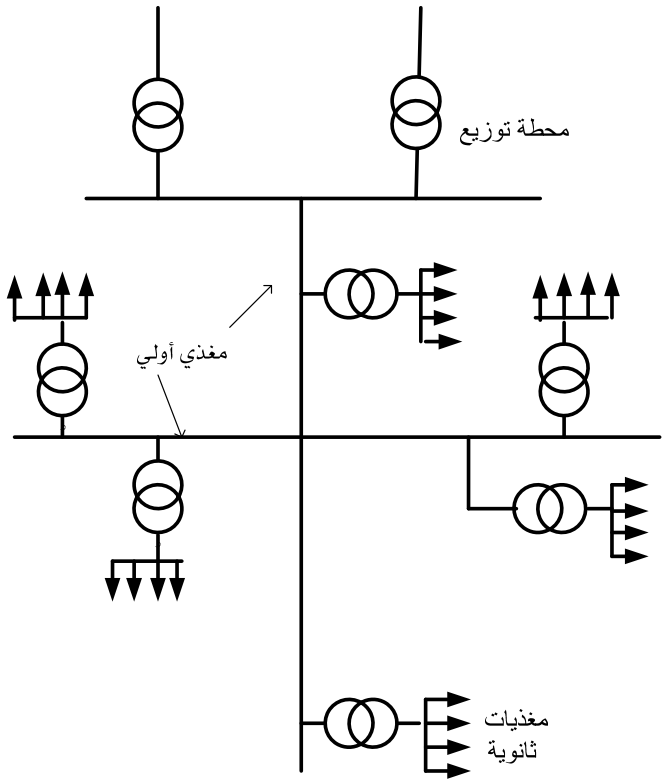
منظومة التوزيع الأولي هي الجزء الواصل بين محطات التوزيع والمستهلكين وهذه المنظومة تغذي الأحمال حتى مناطق جغرافية محددة ويمكن تغذية بعض الأحمال الكبرى مباشرة باستخدام المغذيات الأولية.

وقد أستخدم عدد من نظم التوزيع الأولي والتي يمكن أن نلخصها في التالي:

1- نظام توزيع نصف قطري Radial distribution system
2- نظام توزيع حلقي Loop or Ring distribution system
3- نظام توزيع شبكي Network distribution system
4- نظام توزيع انتقائي أولي Primary selective distribution system

(1- 2- 1) نظام توزيع نصف قطري Radial distribution system

في هذا النظام يمتد المغذي الأولي من محطة التحويل الرئيسة لمناطق الأحمال ثم يخفض الجهد مرة أخرى باستخدام محولات التوزيع الموضوعة أقرب ما يمكن من مراكز الأحمال. ويبين الشكل (3) نظام توزيع نصف قطري. إن الميزة الكبرى للنظام النصف قطري أنه أبسط في الشكل واقتصادي أكثر في التركيب عن الأنظمة الآخرى للموزعات. ولكن لهذا النظام عيوبه الخطيرة منها عدم المرونة وعدم استمرارية التغذية الكهربائية للمستهلك إذا حدث أي عطل بالمغذي حتى يتم إصلاح هذا العطل. كذلك يتم قطع التغذية عن المستهلك عند القيام بعمليات الصيانة الدورية للقاطع الكهربائي الرئيس.



شكل (3) نظام توزيع نصف قطري

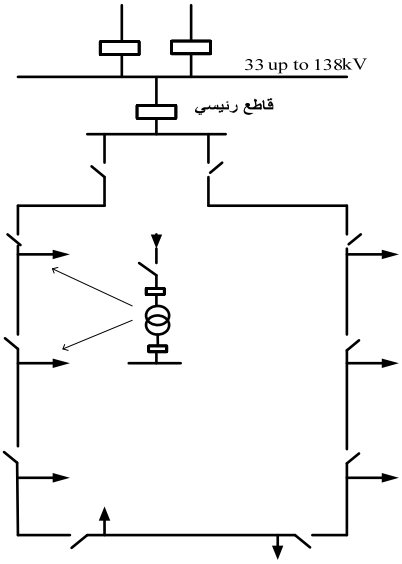
(1- 2- 2) نظام توزيع حلقي Loop or Ring distribution system

نظام التوزيع الحلقي أكثر تكلفة في التركيب عن النظام النصف قطري حيث إنه يتطلب معدات أكثر ولكن في هذا النظام يتم تغذية أية نقطة من المغذي من جهتين دائما. فإذا تم فصل إحدى الجهتين فإن المستهلك يتم تغذيته من الجهة الآخرى. ولابد من وضع قواطع علي نحو دوري حول الحلقة بحيث يتم إصلاح الجزء الذي يمكن أن يحدث عليه عطل بدون اللجوء إلى فصل جزء كبير من المغذي. ويمكننا استخدام إما قاطع رئيس واحد شكل (4) أو قاطعين رئيسين شكل (5) في هذا النظام.

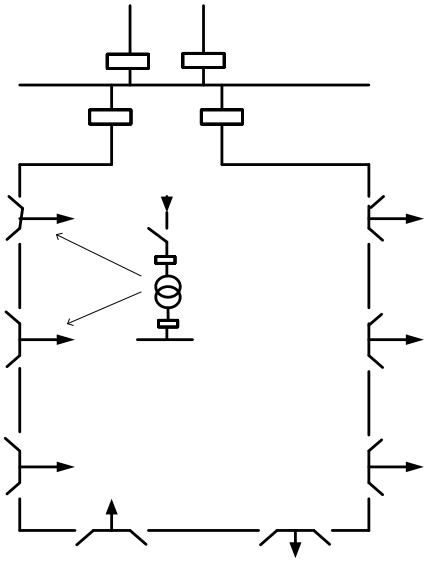
ففي الدائرة المستخدمة لقاطع رئيس واحد تفصل الحلقة كلية عن طريق القاطع الرئيس عند حدوث خطأ داخل الدائرة. وبعد تحديد مكان الخطأ يتم عزل الجزء الواقع عليه الخطأ بترك المفاتيح التي تعزله مفتوحة حتى يتم إصلاح الخطأ.

أما في حالة الدائرة المستخدمة لقاطعين رئيسين ومفتاحي فصل فإن القاطع الرئيس للمغذي الذي يقع عليه الخطأ يفصل الدائرة من جهته ويفصل الخدمة من جهة هذا المغذي حتى نقطة وقوع الخطأ مع استمرار تغذية بقية الأحمال بواسطة المغذي الآخر.

وعند حدوث خطأ في بداية أحد المغذيين فإن المغذي الآخر يكون مطالبا بتغذية جميع الأحمال في الدائرة مما يعد أسوأ خطأ يمكن وقوعه في النظام الحلقي ولابد من مراعاة أن يكون تنظيم الجهد علي طول الدائرة في تلك اللحظة في الحدود المسموح بها.



شكل (4) نظام توزيع حلقي بقاطع رئيس واحد



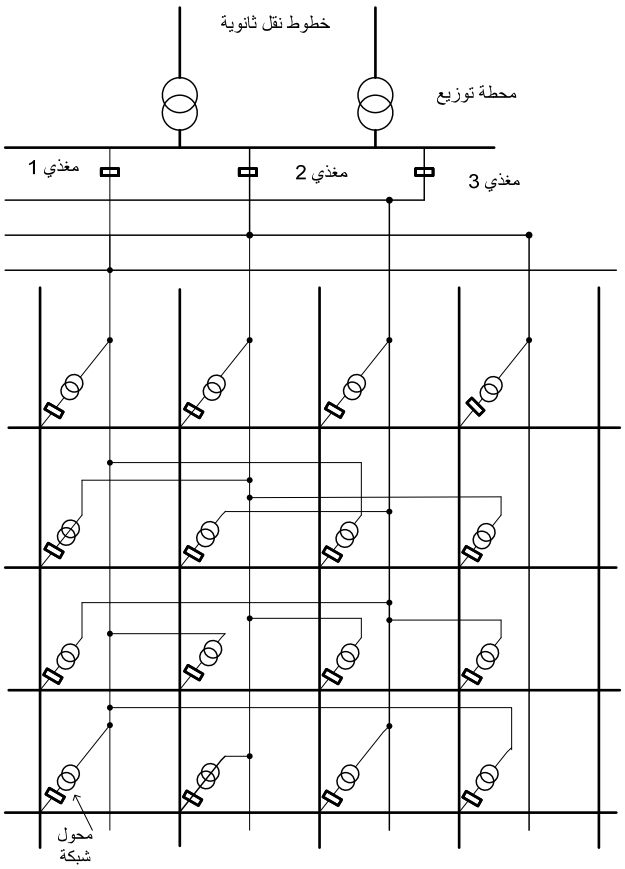
شكل (5) نظام توزيع حلقي بقاطعين رئيسين

(1- 2- 3) نظام توزيع شبكي Network distribution system

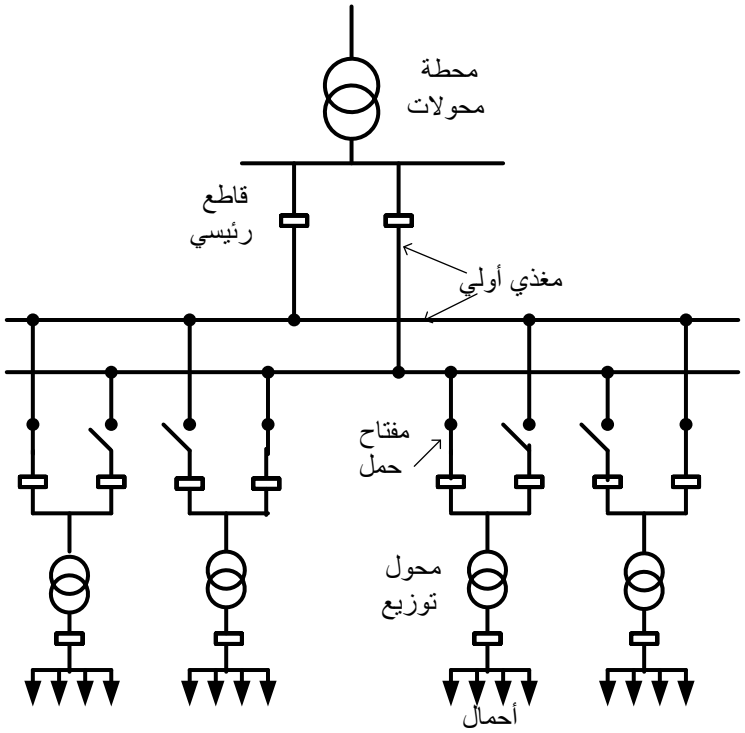
يصمم نظام التوزيع الشبكي ليعطى مرونة كبيرة جدا للخدمة الكهربائية للمناطق ذات الكثافة العالية للأحمال. وتتكون الشبكة من مغذيات أرضية (كيابل) تتصل عند الحواف بمحولات تغذي شبكة التوزيع الثانوية بحيث يكون كل محول يغذي مساحتين محددتين. ويبين الشكل (6) نظام توزيع شبكي. وفي هذا النظام تغذى الشبكة من أكثر من مغذي واحد بحيث إذا حدث عطل بأحد المغذيات تقوم المغذيات الآخرى بتغذية الأحمال علي الشبكة. وتعمل شبكة التوزيع الأولي علي جهود تتراوح بين 12.5 إلى 34.5kV.

(1- 2- 4) نظام توزيع انتقائي أولي Primary selective distribution system

في هذا النظام يستخدم مغذيين أوليين بدلا من مغذي واحد لكل محول. ويتصف هذا النظام بمرونته في توصيل التغذية الكهربائية. فعند حدوث أي خطأ علي أي مغذي يتم فصله ويتم تغذية جميع المحولات من المغذي الآخر لذلك يتم تصميم المغذيين الأوليين علي الحمل الكامل بالدائرة. ويبين الشكل (7) نظام توزيع انتقائي أولي.



الشكل (6) نظام التوزيع الشبكي



شكل (7) نظام توزيع انتقائي أولي

(1-3) التوزيع الثانوي وأنواعه Secondary Distribution Systems

تعمل شبكة التوزيع الثانوي عند جهود منخفضة لتغذية الأحمال التجارية والسكنية وتستخدم في هذه الشبكة خطوط هوائية وكيابل أرضية لا يتعدى طولها بضع المئات من الأمتار كمغذيات لهذه الأحمال. وتغذي شبكة التوزيع الثانوية معظم الأحمال عند جهود 240/120V وجه واحد أو 208/120V ثلاثة أسلاك وجه واحد أو 480Y/277 V أربعة أسلاك ثلاثة أوجه. وقد ازدادت بصورة كبيرة استخدام الكيابل الأرضية كمغذيات في شبكة التوزيع الثانوي عن استخدام الخطوط الهوائية وأصبحت تمثل أكثر من 70% من المغذيات في شبكة التوزيع الثانوي.

وقد أستخدم عدد من نظم التوزيع الثانوي والتي يمكن أن نذكرها في التالي:

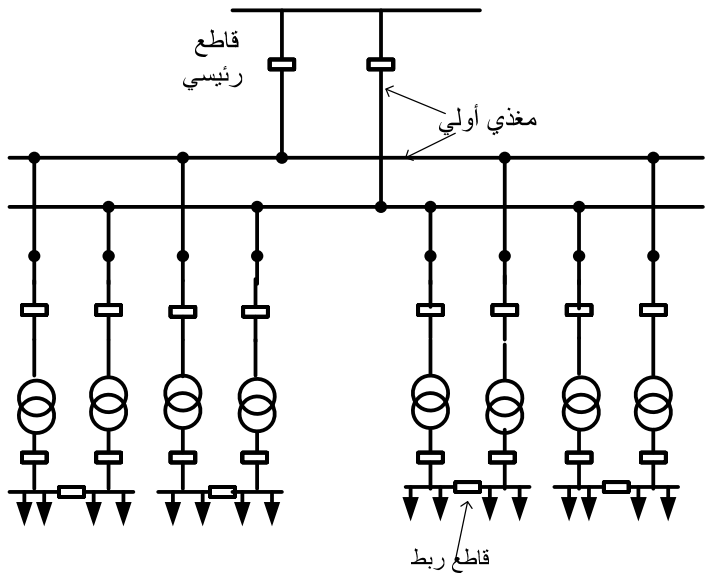
1- نظام توزيع نصف قطري ثانوي Radial secondary distribution system
2- نظام تجميعي ثانوي Secondary banking
3- نظام توزيع شبكي ثانوي Network secondary distribution system

(1- 3- 1) نظام توزيع نصف قطري ثانوي Radial secondary distribution system

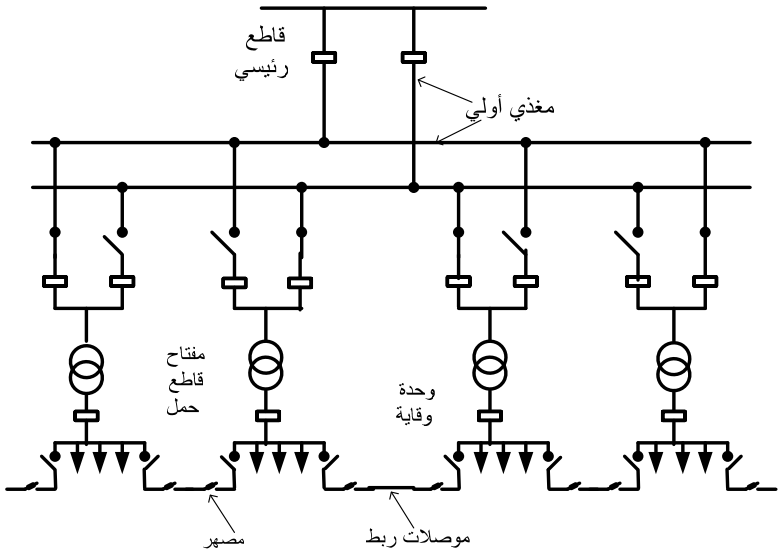
في هذا النظام يتم تغذية مراكز الأحمال عن طريق محولين يغذي كل منهما نصف الحمل وكل محول عليه الحمايات والقواطع الخاصة به ويوصل كل من المحولين إلى قضيب توزيع ثانوي ويوضع قاطع ربط بين كل قضيبين توزيع وهو مفتوح في حالات التشغيل الطبيعية أما عند حدوث أي خطأ علي أحد المحولين فيتم تغذية كامل الحمل من المحول الآخر. لذلك لابد من تصميم المغذي الواحد بحيث يتحمل كامل الحمل للمغذيين المربوطين ببعض. ويبين شكل (8) نظام توزيع نصف قطري ثانوي.

(1- 3- 2) نظام تجميعي ثانوي Secondary banking

يستخدم في هذا النظام محول واحد لكل مركز أحمال ويتم ربط جميع قضبان التوزيع الثانوية ببعض بواسطة موصلات ربط ومصهرات خاصة. ويوفر هذا النظام أكثر من مغذي لأي قضيب توزيع. ويضمن هذا النظام استمرارية الخدمة في حالة فصل أي مغذي أو محول للصيانة أو حدوث خطأ وكذلك يوفر هذا النظام مرونة عالية في توصيل الخدمة الكهربائية للمستهلكين. ويمكننا في هذا النظام أن نوفر حوإلى 30% من سعة المحولات حيث إن حجم الأحمال الموصلة على أي قضيب ثانوي ليس مقيدا بسعة المحول المربوط به. ويبين شكل (9) نظاماً تجميعياً ثانوياً.



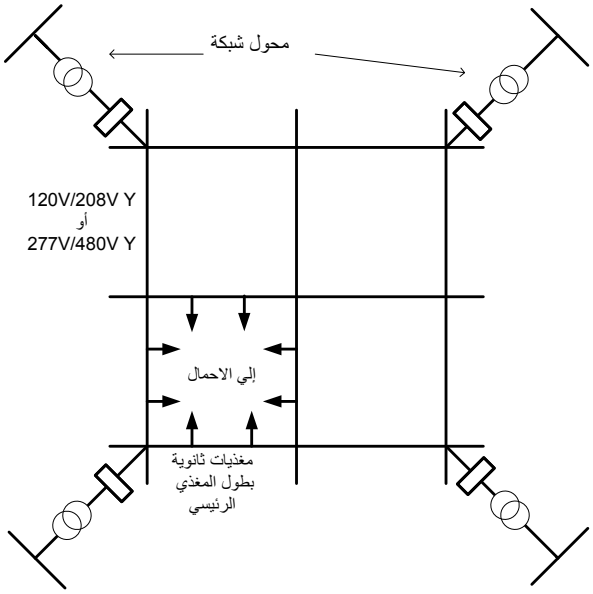
الشكل (8) نظام توزيع نصف قطري ثانوي



شكل (9) نظام تجميعي ثانوي

(1- 3- 3) نظام توزيع شبكي ثانوي Network secondary distribution system

يتكون هذا النظام من مغذيات ثانوية (كيابل) أرضية متصلة عند الحواف بمحولات توزيع. ويغذي الشبكة الثانوية تجمع أحمال واحد أو تجمعان للأحمال وتوضع معدات الشبكة في قباء تحت الأرض بمداخل عبر غرف تفتيش في الشوارع و الأزقة. ويعطي نظام التوزيع الشبكي مرونة كبيرة جدا للخدمة الكهربائية للمناطق ذات الكثافة العالية للأحمال. ويفضل استخدام هذا النظام في تغذية الأماكن الهامة بالدولة حيث استمرارية الخدمة والموثوقية العالية أهم من التكلفة الاقتصادية. ويبين شكل (10) نظام توزيع شبكي ثانوي

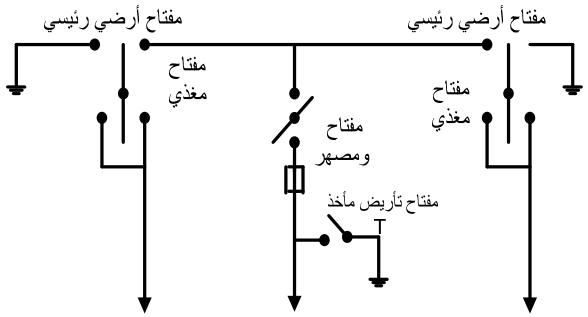


الشكل (10) نظام توزيع شبكي ثانوي

(1- 4) الوحدة الأساسية الحلقية المدمجة compact ring main unit

ينتهي طرف النهاية لكيبل النظام الحلقي الرئيس بقاطع كهربائي وكذلك هناك ضرورة لوجود قاطع دائرة لكل مغذي نصف قطري أو محول توزيع خارج لتغذية الأحمال حول الحلقة الرئيسة. وتتصل محولات التوزيع بشبكة التوزيع على شكل مأخذ T (T-off) وبدلا من تصميم واختيار المكونات المطلوبة لهذا المأخذ كل على حدة فإن هذه المكونات تكون دائما متوفرة في وحدة متكاملة تعرف بالوحدة الرئيسة للنظام الحلقي. ومن الشائع عمليا استخدام وحدة أساسية حلقية مدمجة تحتوي علي قاطع دائرة مركزي أو مفتاح ومصهر منفصلين أو مفتاح ومصهر كمجموعة واحدة مع سكاكين فصل (disconnectors) وذلك لتؤدي هذه الوحدة دورها بسهولة. وتحتوي الوحدة عادة على مفتاح تأريض للمحول. ويبين شكل (11) الشكل الخارجي للوحدة الأساسية الحلقية المدمجة. كما يبين شكل (12) رسم تخطيطياً لوحدة أساسية حلقية مدمجة تتكون من مفتاح ومصهر.

الشكل (11) الوحدة الأساسية الحلقية المدمجة



الشكل (12) رسم تخطيطي لوحدة أساسية حلقية مدمجة

1- 5) محطات التوزيع الفرعية Secondary distribution Substation

تستخدم المحطات المدمجة داخل غرفة من الصلب يمكن سحبها للخارج (metal-clad drawout type) حتى جهد 36kV ويركب القاطع الكهربائي وبعض المكونات الآخرى علي حوامل متحركة. وبعد فتح القاطع الكهربائي يمكن فتح المفاتيح الآخرى وسحب القاطع للخارج. ويمكن أن يستخدم قاطع غاز سادس فلوريد الكبريت أو القاطع الفراغي أو مفتاح غاز سادس فلوريد الكبريت كقاطع حمل أو مجموعة مفتاح/مصهر .

وتتكون محطات التوزيع الفرعية المدمجة من المعدات الضرورية التالية:

- المغذيات الداخلة إلى المحطة
- المغذيات الخارجة من المحطة
- أجهزة التحكم والحماية والقياس
- القواطع والمفاتيح العازلة ومفاتيح الأرضي
- محولات الجهد والتيار
- نظام تأريض المحطة

ومن الخصائص الهامة المطلوبة الارتباط أو التشابك (interlocking) في العمل بين المكونات المختلفة مثل:

1- يجب أن يكون القاطع في وضع الفتح ويمكن خفضه وهو في وضعه لسحبه للخارج
2- لا يمكن غلق القاطع قبل رفعه لوضعية الغلق أولا
3- لابد من ارتباط عمل القاطع والمفاتيح ومفاتيح الأرضي

جدول (1) يبين مقننات محطات التوزيع المدمجة

الجهد المقنن kV	القدرة الظاهرية المقننة MVA	التيار المقنن A
12	250, 350, 500, 750	400, 800, 1200, 1600, 2000, 3000, 3500
7.2	250, 350, 500	400, 600, 800, 1200, 1600, 2400, 3200
3.6	150, 250	400, 800, 1600, 2000, 2400
0.440	15.6, 26, 31	400, 600, 800, 1200, 2400

(1- 5- 1) محولات التوزيع Distribution Transformer

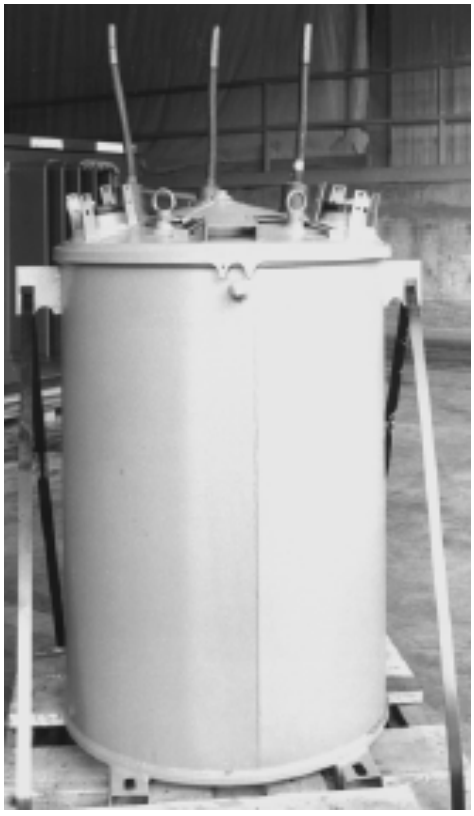
تستخدم محولات التوزيع بغرض خفض الجهد من جهد التوزيع إلى جهد الانتفاع. ومن المعروف أن المحول الكهربائي جهاز إستاتيكي مكون من ملفين أو أكثر ويستخدم لانتقال القدرة الكهربائية للتيار المتردد باستخدام الحث الكهرومغناطيسي من دائرة لأخرى عند نفس التردد ولكن بقيم مختلفة للجهد والتيار.

محولات التوزيع دائما متاحة للاستخدام لمختلف التطبيقات مثل المحولات المحملة علي الأبراج (pole type) الشكل (13) والمحولات المثبتة علي وسادة أرضية (pad-mounted) الشكل (14) والمحولات الموجودة في قباء تحت الأرض أو محولات الشبكات (vault or network type) الشكل (15) والمحولات المغمورة في الماء (submersible type) الشكل (16).

الشكل (13) المحولات المحملة علي الأبراج

الشكل (14) المحولات المثبتة علي وسادة أرضية

الشكل (15) المحولات الموجودة في قباء تحت الأرض أو محولات الشبكات



الشكل (16) المحولات المغمورة في الماء

المحولات المحملة علي الأبراج هي محولات محمية ذاتيا فهي مزودة بمانع صواعق ومصهر وقاطع كهربائي ثانوي ولمبة تحذير. يوصل الملف الابتدائي للمحول بوجه واحد من الثلاثة أوجه من خلال مصهر للحد من التيار ويؤرض جسم المحول.

والمحولات المثبتة علي وسائد أرضية تستخدم مع المغذيات الأرضية (الكيابل) وتستخدم فيها محولات الثلاثة أوجه للتركيبات الاقتصادية ويمكن أن تستخدم محولات وجه واحد للتركيبات المنزلية الأرضية.

وتستخدم المحولات الموجودة بقباء تحت الأرض للعملاء التجاريين عندما تكون المساحة المطلوبة للمحولات المثبتة علي وسائد أرضية غير متاحة ويمكن تركيبه في الشارع في قباء تحت رصيف المشاة أو في مبان. وتستخدم غالبا في مناطق الشبكات الأرضية.

ويمكن تصنيف المحولات الكهربائية إلى **المحولات الزيتية والمحولات الجافة**.

ففي المحولات الزيتية يملأ خزان المحول بزيت العزل ويستخدم هذا الزيت كعازل ومبرد وبذلك نزيد من العمر الافتراضي لعوازل المحول. والزيت المستخدم يبقى متزنا عند درجات الحرارة العالية لذلك فإن حدوث أية شرارة داخلية لن تتسبب في حدوث انهيار للعازل أو حرائق. هذا الزيت يدور في مشعات يتم تبريد الزيت خلالها بواسطة الإشعاع الحراري الطبيعي. ومع زيادة قدرة المحول فإنه يمكن استخدام مراوح على جانبي المحول لزيادة تبريد الزيت. ويمكن استخدام التدوير القصري للزيت باستخدام مضخات للزيت مع استخدام المراوح للتبريد وذلك للمحولات ذات القدرات الكهربائية العالية.

أما المحولات الجافة فإنها توضع داخل خزان يتحمل الضغط ويتم تبريد المحول باستخدام غاز النيتروجين أو غاز سادس فلوريد الكبريت وللتأكد من أن الغاز لن يتسرب ولن تتضرر قدرة العزل للغاز العازل فلابد من أن يكون جسم المحول محكم الغلق.

(1- 5- 1- 1) مقننات محولات التوزيع Distribution Transformers Ratings

تحدد سعة محولات التوزيع بكمية التيار التي يمكن أن تحملها باستمرار عند الجهد المقنن بدون زيادة درجة الحرارة القصوى المصمم عليها المحول. وتقنن المحولات بالكيلوفولت أمبير kVA حيث إن سعة المحول تحد بقيمة تيار الحمل والذي يتناسب مع القدرة الظاهرية بدون النظر إلى معامل القدرة. ويبين جدول (2) المقننات القياسية لمحولات التوزيع.

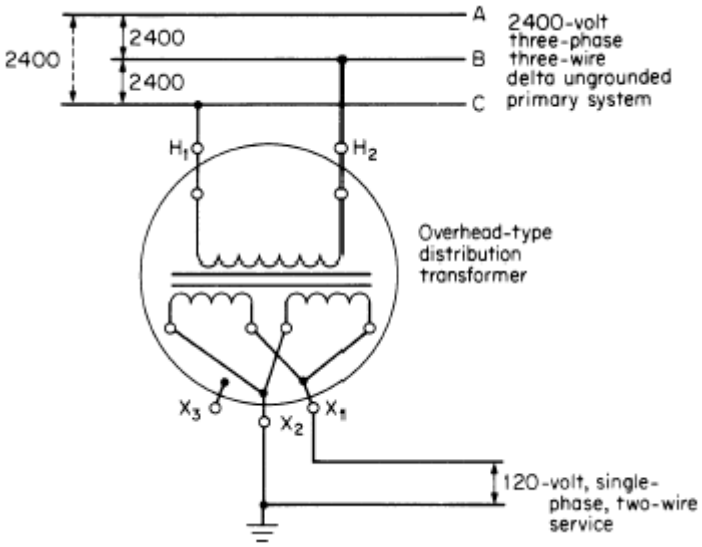
جدول (2) المقننات القياسية لمحولات التوزيع (kVA)

المحولات المحملة على الأبراج		المحولات المثبتة على وسائد أرضية	
وجه واحد	ثلاثة أوجه	وجه واحد	ثلاثة أوجه
5	15	25	75
10	30	37.5	112.5
15	45	50	150
25	75	75	225
37.5	112.5	100	300
50	150	167	500
75	225		750
100	300		1000
167	500		1500
250			2000
333			2500
500			

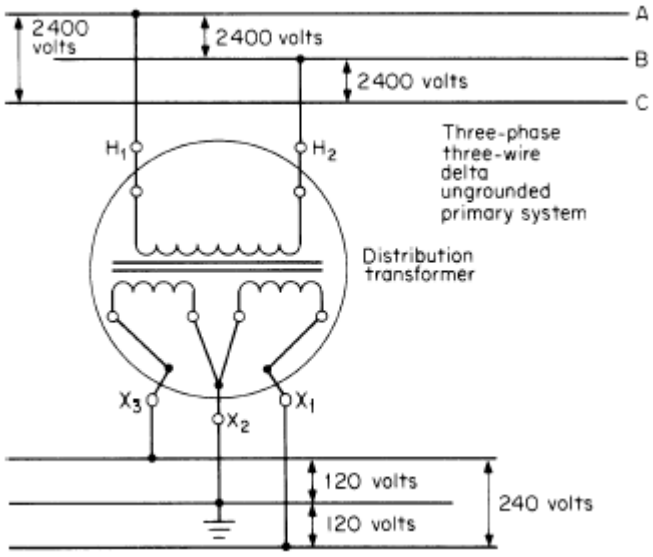
(1- 5- 1- 2) توصيلات محولات التوزيع Distribution Transformers Connections

تصمم محولات التوزيع ذات الوجه الواحد بطرف توصيل خارجي واحد للملف الابتدائي أو طرفي توصيل ويستخدم الطرف الواحد فقط في أنظمة الدوائر المتصلة علي شكل نجمة المؤرضة. ويستخدم طرفي توصيل ابتدائي لمحول التوزيع في أنظمة الدوائر المتصلة علي شكل دلتا ذات ثلاثة أسلاك وكذلك في أنظمة الدوائر المتصلة علي شكل نجمة ذات أربعة أسلاك إذا وصلت كما ينبغي. ويوضح شكل 17 شكلاً تخطيطياً لتوصيلات محول ذي وجه واحد لدائرة نظام ثلاثي الأوجه متصل دلتا غير مؤرض جهده 2400V للحصول علي جهد 120V أحادي الوجه ذو سلكين علي دائرة الثانوي لمحول التوزيع. والجدير بالذكر هنا أن نفس التوصيلات تطبق علي الأنظمة المماثلة ذات جهود التوزيع الأولية 4800V و 7200V و 13200V و34400V.

ويوضح شكل (18) التوصيلات المناسبة لمحول ذي وجه واحد لدائرة نظام ثلاثي الأوجه متصل دلتا غير مؤرض جهده 2400V للحصول علي جهد 120/240V أحادي الوجه ذو ثلاثة أسلاك علي دائرة الثانوي لمحول التوزيع. وعادة يكون السلك المتصل للطرف الأوسط علي دائرة الثانوي مؤرضا وهذا التأريض يحد من الجهد الأعلى من الأرضي للحد 120V حتى ولو كان الجهد علي الأطراف الخارجية الثانوية 240V.



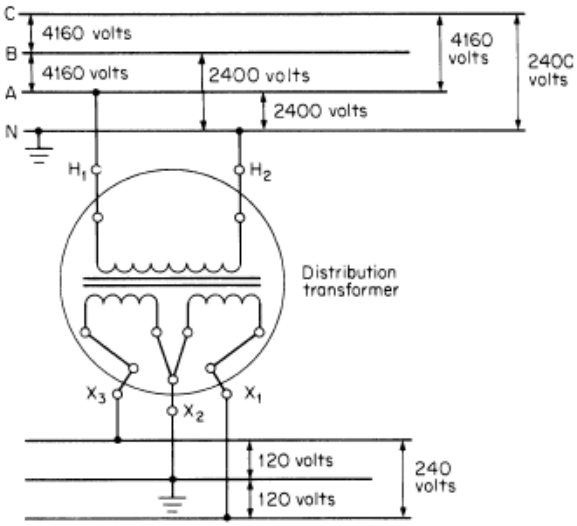
شكل (17) توصيل محول أحادي الوجه لإعطاء طرفين علي الثانوي جهد 120V



شكل (18) توصيل محول أحادي الوجه لإعطاء ثلاثة أسلاك وجه واحد جهد 120/240V

ويوضح شكل (19) شكلاً تخطيطياً لتوصيلات محول ذي وجه واحد متصل بدائرة نظام ثلاثي الأوجه ذي أربعة أسلاك متصل نجمة مؤرض عند نقطة التعادل جهده 4160Y/2400V

للحصول علي جهد 120/240V أحادي الوجه. والجدير بالذكر أن الجهد 4160V هو جهد الخط بينما الجهد 2400V هو جهد الوجه. والمقننات القياسية الآخرى للجهود الابتدائية لأنظمة الثلاثة أوجه ذات الأربعة أسلاك المؤرضة والمتصلة نجمة هي 8320Y/4800 و 12470Y/7200 و 13200Y/7620 و 13800Y/7970 و 22860Y/13200 و 24940Y/14400 و 34500Y/19920.



شكل (19) توصيل محول أحادي الوجه لإعطاء ثلاثة أسلاك وجه واحد جهد 120/240V الملف الابتدائي موصل بخط التعادل أو الأرضي

والجدير بالذكر أن توصيلات المحول للحصول علي جهد 120V أو 120/240V أو 240V علي الملف الثانوي يمكن الحصول عليها بتغيير أطراف التوصيلات الموجودة علي لوحة داخل جسم المحول. وتعطي اللوحة الرئيسة للمحول المعلومات الضرورية لاستكمال التوصيلات. ويجب قياس الجهد علي أطراف الثانوي قبل توصيل الحمل.

ويمكن استخدام ثلاثة محولات وجه واحد للحصول علي ثلاثة أوجه علي أطراف الثانوي للمحولات الثلاثة. وهناك أربع توصيلات للملفات الابتدائية والملفات الثانوية للثلاثة محولات للحصول علي خرج ثلاثة أوجه وهي توصيلة دلتا- دلتا وتوصيلة نجمة- نجمة وتوصيلة دلتا- نجمة وتوصيلة نجمة- دلتا.

ويبين شكل (20) مجموعة محولات وجه واحد محملة علي برج لتعطي ثلاثة أوجه.

شكل (20) ثلاث محولات وجه واحد متصلة لتكون محول ذي ثلاثة أوجه

(1- 5- 2) مفاتيح الربط

علي الجهود المنخفضة (الأقل من 1000V) تستخدم :

1- القواطع الكهربائية الصغيرة Miniature circuit breaker
2- القواطع الكهربائية ذات الإطار المقولب Moulded case circuit breaker
3- القاطع الهوائي Air circuit breaker

أما علي الجهود المتوسطة والعالية فتستخدم:

1- قواطع غاز سادس فلوريد الكبريت SF_6 circuit breaker
2- القواطع الفراغية Vacuum circuit breaker

(أ) مفاتيح الجهد المنخفض

1- القواطع الكهربائية الصغيرة Miniature circuit breaker

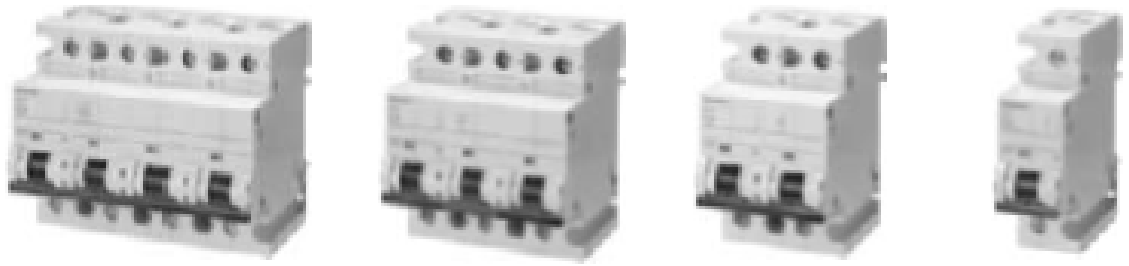
بالرغم من أن هناك العديد من المصهرات التي استخدمت بنجاح ومازالت تستخدم حتى الآن في حماية محولات التوزيع الكهربائية إلا أن القواطع الكهربائية الصغيرة زادت شعبيتها ازديادا كبيرا وتحسن تصميمها إلى حد كبير. ومن أهم مميزات هذا القاطع أنه يمكن التحقق من عمله بعد تركيبه بالإضافة إلى استخدامه كمفتاح عمل عادي للفتح والغلق مع أداء مهام المصهر. وتصمم هذه القواطع لتيار حمل لا يزيد عن 100A عند جهد 415V. ويمكن تركيب القاطع مباشرة علي قضبان التوزيع أو باستخدام مسامير للربط ويمكن استخدام قواطع الوجه الواحد أو قواطع الثلاثة أوجه.

وتتضمن خصائص الحماية لهذه القواطع تحسس مغناطيسي- هيدروليكي وحراري- مغناطيسي وبمساعدة ميكانيزم فتح باستخدام معدنين bimetallic tripping mechanism يحقق خصائص التأخير الزمني ويكون مناسبا للحماية من تيار الحمل الزائد وتيار القصر. قاطع تيار التخلف هو تطوير آخر للقواطع الصغيرة والتي تحقق الحماية من تيارات التسريب الأرضية الصغيرة.

تيارات الحمل المقننة لهذه القواطع (BS 3871 part1) هي

5, 6, 10, 15, 16, 20, 25, 30, 32, 40, 50, 80, 100 A

وتستخدم هذه القواطع بصورة كبيرة في التركيبات الصناعية والتجارية للحماية النهائية للدائرة نظرا لصغر سعة القصر لهذه القواطع حيث تبلغ أعلى سعة لها 16kA بينما الكمية العظمى من هذه القواطع تستخدم فعليا عند سعة قصر 9kA. ويبين شكل (21) قاطع دائرة صغير.



(أ) خط واحد (ب) خطان (ت) ثلاثة خطوط (ث) أربعة خطوط

شكل (21) قاطع دائرة صغير

2- القواطع الكهربائية ذات الإطار المقولب Moulded case circuit breaker

تستخدم القواطع الكهربائية الإطار المقولب عند ازدياد قيمة تيار القصر وهي شبيهة في التركيب بالقواطع الكهربائية الصغيرة ويبلغ أقصى مقنن لها عند بعض المصنعين إلى أكثر من 3000A ويمكن أن تقوم بالوظائف الإضافية التالية: فصل الدائرة عند انخفاض الجهد undervoltage trips و محددات للتيار current limiters وملامسات مساعدة. ويمكن تركيب هذا القاطع كوحدة مستقلة أو داخل كبائن مدمجة. وكما هو المتوقع فإن مقننات تيار الخطأ لهذه القواطع أكبر من مقننات تيار الخطأ في القواطع الصغيرة مما يسمح بتركيبها أو استخدامها بالقرب من مصادر التيار حيث يكون مستوى تيار الخطأ أعلى في الدائرة. ويبين شكل (22) قاطعاً كهربائياً ذا إطار مقولب

شكل (22) قاطع كهربائي ذو إطار مقولب

3- القاطع الهوائي Air circuit breaker

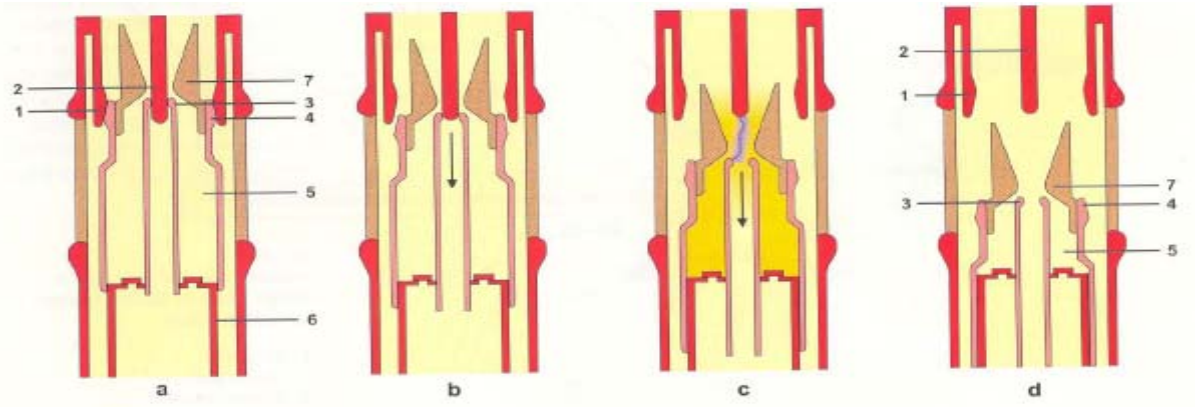
القاطع الهوائي أحد أقدم أجهزة الحماية الأوتوماتيكية وكثيرة الأشكال القديمة لهذا القاطع مازالت في الخدمة حتى الآن. ويعتمد هذا القاطع علي الهواء عند الضغط الجوي كعازل بين الملامسات الكهربائية لهذا القاطع. ويعتبر الهواء أرخص أنواع العوازل ولكن من عيوبه احتوائه علي الرطوبة والغبار مما يضعف كثيرا من شدة عزله. وقد قلل شكل تركيب القاطع من مشاكل الرطوبة والغبار أثناء التشغيل ولكن يجب أخذ الاحتياط عند فتح القاطع لأغراض الصيانة. وقد قل بصورة ملحوظة استخدام هذا القاطع بوجود القاطع لكهربائي ذي الإطار المقولب والذي يعتبر قاطعاً محكم الغلق وأيضا أرخص في السعر .

وتتاح للقاطع الكهربائي جميع الأجهزة المساعدة والتي تقدم الحماية الضرورية ضد زيادة التيار والتسريب الأرضي باستخدام أو عدم استخدام خصائص التأخير الزمني وذلك بالتشغيل المباشر أو باستخدام نظم المرحلات.

(ب) مفاتيح الجهد المتوسط

1- قواطع غاز سادس فلوريد الكبريت SF_6 circuit breaker

هناك أنواع عديدة من قاطع غاز سادس فلوريد الكبريت حيث تصنف هذه القواطع إلى صنفين أحدهما أحادي الضغط والآخر ثنائي الضغط. ويستخدم النوع الأول بكثرة حيث يملأ القاطع بالغاز عند ضغط معين ويحقق الضغط وانسياب الغاز المطلوبين أثناء اندلاع الشرارة لسرعة إطفائها. ويعتبر القاطع من نوع مخفف الصدمة (Puffer type circuit breaker) من أكثر الأنواع شيوعا في الاستخدام لأنه يوفر ذاتيا ضغط الغاز المطلوب لإطفاء الشرارة أثناء عملية الفتح. وتتكون وحدة الإطفاء في هذا القاطع من الملامس الثابت والملامس المتحرك مع أسطوانة دفع الغاز الخاصة به. فأثناء عملية فتح القاطع يعمل الملامس المتحرك كمكبس لذلك يرتفع ضغط الغاز بسرعة داخل غرفة إطفاء الشرارة عند فتح الملامسات لمستويات عالية حتى تنفصل الملامسات المتحركة عن الثابتة تماما. ويتسبب انفصال الملامسات عن بعضها في حدوث شرارة بين الملامسات والتي تتسبب أيضا في رفع ضغط الغاز وعندما يكون ضغط الغاز عالا بما يكفي يحرر الغاز المضغوط من غرفة إطفاء الشرارة مما يؤدي إلى سحب الشرارة واستنزاف طاقتها ثم إطفائها.



وضع الغلق بداية وضع الفتح انفصال ملامسات الشرارة وضع الفتح

شكل (23) ترتيب الفتح للقاطع الكهربائي

1- ملامسات تيار الحمل الثابتة
2- ملامسات الشرارة الثابتة
3- ملامسات الشرارة المتحركة
4- ملامسات تيار الحمل المتحركة
5- أسطوانة الضغط
6- مكبس الضغط
7- فوهات الأنزلاق الدفعية

2- القاطع الفراغي Vacuum circuit breaker

تفرغ غرفة إطفاء الشرارة تفريغا عالا في حدود 4-10 بسكال ليعطي مميزات عزل عالية وقدرة عالية في إطفاء الشرارة وفي هذا القاطع تكون مسافة 1سم بين الملامسات كافية لإطفاء الشرارة. ويستطيع القاطع فتح الدائرة علي التيارات السعوية والتيارات الحثية الصغيرة بدون حدوث جهود عابرة زائدة عن الحد.

ويتكون كل وجه في القاطع الفراغي من حجرة إطفاء شرارة مفرغة تفريغا عالا وميكانيزم تشغيل خارجي. وتكون أسطح الملامسات كبيرة مع أجزاء حلزونية حيث إن تيار الشرارة ينتج مجالاً مغناطيسياً طولياً للمساعدة في تحريك الشرارة علي أسطح الملامس وسرعة إطفائها. وتحرك الشرارة هذا يقلل من تبخر المعدن وتآكله. وتصنع غرفة الشرارة كليا أو جزئيا من مادة عازلة.

وتختلف طريقة إطفاء الشرارة في القاطع الفراغي عنها في القواطع الآخرى. فعند انفصال الملامسات ترتفع درجة حرارة آخر نقط انفصال بين الملامسات حتى درجة غليان المعدن ويكون بخار المعدن المتأين الشرارة لذلك فالمعدن أو السبيكة المصنعة منها الملامسات تؤثر تأثيرا مباشرا في خصائص القاطع الفراغي.

ويندفع طوليا بخار المعدن إلى الخارج من مسار الشرارة ويتكثف علي جدران غرفة الشرارة. لذلك يجب على الأجزاء العازلة من الجدار المواجهة لمنطقة الشرارة أن تحجب من بخار المعدن حتى تحتفظ بشدة عزلها.

(أ)

(ب)

شكل (24) القاطع الفراغي
(أ) غرفة الملامسات (ب) مقطع بغرفة الملامسات

الوحدة الثانية

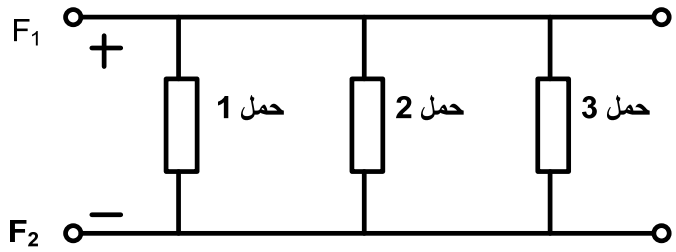
الموزعات الكهربائية

الموزعات الكهربائية

(2- 1) موزعات التيار المستمر DC Distributors

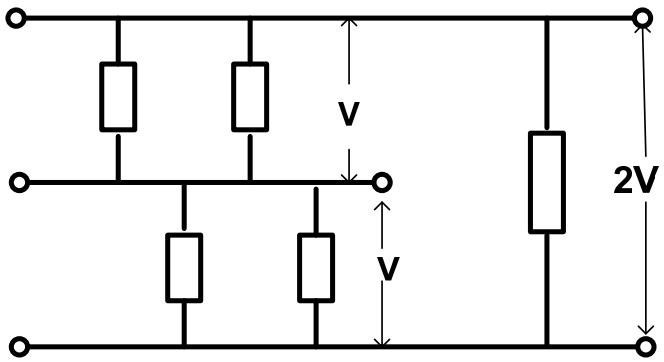
في نظم التيار المستمر يمكن تغذية القدرة من خلال نظم التوزيع ذات الموصلين أو من خلال نظم التوزيع ذات الثلاثة موصلات.

ففي نظم توزيع التيار المستمر ذات الموصلين يكون أحد الموصلين هو الموجب بينما الآخر هو السالب ويتم توصيل الأحمال علي التوازي بين الموصلين كما في شكل (1). ويلاحظ أن أقصى قيمة لكل من الجهد والتيار هي عند نقاط التغذية.



شكل (1) نظام توزيع ذو موصلين

ولزيادة الكفاءة وتحسين التكلفة الاقتصادية لنظم توزيع التيار المستمر تستخدم نظم التوزيع ذات الثلاثة موصلات ويتيح هذا النظام قيمتين للجهد عند طرف الاستهلاك. وتتكون نظم التوزيع ذات الثلاثة موصلات من موصل موجب وآخر سالب أما الموصل الأوسط فهو متعادل ويتم تأريضه عند المصدر. وبفرض أن الجهد بين الموصلين الموجب والسالب 2V فإن جهد الموصل الموجب تكون قيمته V أعلي من الصفر وجهد الموصل السالب تكون قيمته V أقل من الصفر. ويوضح شكل (2) نظام توزيع تيار مستمر ذا ثلاثة موصلات.



شكل (2) نظام توزيع ذو ثلاثة موصلات

(2- 1- 1) طرق تغذية موزعات التيار المستمر:

هناك طرق عدة لتغذية موزعات التيار المستمر منها:

أ- موزع مغذي من أحد طرفيه

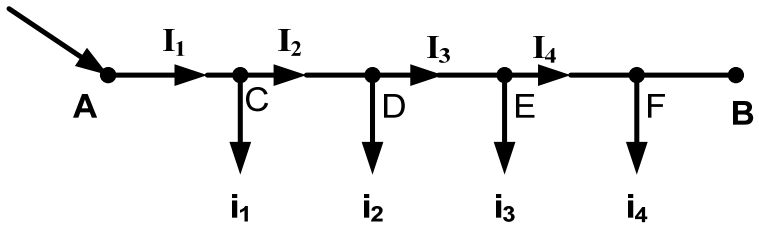
ب- موزع مغذي من طرفيه عند نفس الجهد

ت- موزع مغذي من طرفيه عند جهود مختلفة

ث- الموزع الحلقي

أ- موزع مغذي من أحد طرفيه :

بفرض أن r_1 و r_2 و r_3 و r_4 هي مقاومة الأجزاء AC و CD و DE و EF على الترتيب. وكذلك R_1 و R_2 و R_3 و R_4 هي المقاومة الكلية للأجزاء AC و AD و AE و AF علي الترتيب كما هو موضح بشكل (3).



شكل (3)

الانخفاض الكلي في الجهد علي الموزع يعطى بالمعادلة التالية:-

$$V = I_1r_1 + I_2r_2 + I_3r_3 + I_4r_4 \qquad (1)$$

بتطبيق قانون كيرشوف للتيارات عند النقاط C و D و E و F ينتج:

$$I_1 = i_1 + i_2 + i_3 + i_4 \qquad I_2 = i_2 + i_3 + i_4$$
$$I_3 = i_3 + i_4 \qquad I_4 = i_4$$

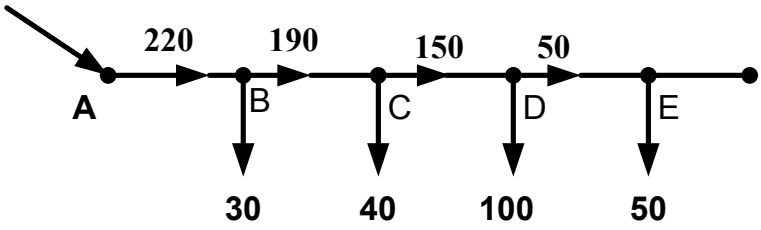
$$V = r_1(i_1 + i_2 + i_3 + i_4) + r_2(i_2 + i_3 + i_4) + r_3(i_3 + i_4) + r_4(i_4)$$
$$= i_1r_1 + i_2(r_1+r_2) + i_3(r_1+r_2+r_3) + i_4(r_1+r_2+r_3+r_4)$$
$$= i_1R_1 + i_2R_2 + i_3R_3 + i_4R_4 \qquad (2)$$

الانخفاض في الجهد عند نقطة متوسطة ولتكن D

$V_{AE} = i_1R_1+i_2R_2+R_2\ (i_3+i_4)$

(3) عزم الحمل الكلي بعد D مفترضا أنه عند D + مجموع العزوم حول D =

مثال1: موزع تيار مستمر منتظم ذو موصلين طوله 300m يغذى من أحد طرفيه وهذا الموزع يغذي أربعة أحمال قيمتها 30A و 40A و 100A و 50A على بعد 40m و 100m و 150m و 250m على التوالى من طرف التغذية A فإذا كانت القيمة العظمى للانخفاض في الجهد التي لا يجب تجاوزها 10V أوجد مساحة مقطع موصل كيبل التغذية إذا كانت المقاومة النوعية لمادة الموصل $1.78x10^{-8}\Omega.m$.



شكل (4)

الحل :

الهبوط في الجهد لموزعات الموصل الواحد $V = i_1R_1 + i_2R_2 + i_3R_3 + i_4R_4$

الهبوط في الجهد للموزعات ذات الموصلين $V =2(i_1R_1 + i_2R_2 + i_3R_3 + i_4R_4)$

وبما أن $R = \rho\frac{L}{A}$

فإن الهبوط في الجهد للموزعات ذات الموصلين $V = 2\frac{\rho}{A}(i_1L_1 + i_2L_2 + i_3L_3 + i_4L_4)$

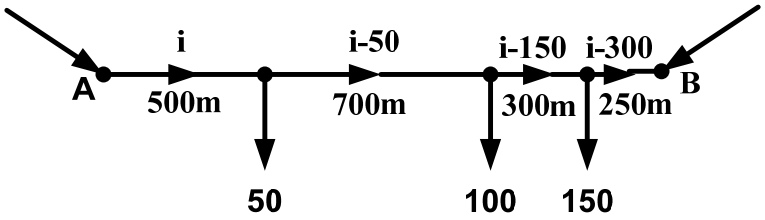
$$10 = 2x\frac{1.78x10^{-8}}{A}(30x40 + 40x100 + 100x150 + 50x250)$$

$$A = 1.163x10^{-4} \quad m^2$$

ب- موزع مغذى من طرفيه عند نفس الجهد:

في هذه الحالة فإن أقصى انخفاض في الجهد يحدث دائما عند أحد نقاط الأحمال. أي إن الانخفاض في الجهد بين كل طرف، وهذه النقطة لابد أن يكون متساويا وبتعبير آخر فإن مجموع العزوم حول الأطراف لابد أن يكون متساويا.

مثال 2: مقاومة موصل كيبل لموزع تيار مستمر ذي موصلين هي 0.1Ω/km لكلا الموصلين بالكيبل أوجد التيار المغذي عند الطرفين إذا كان الجهد عند الطرفين 200V.



شكل (5)

الحل: المقاومة لكل متر من الموصل $r = 0.1 \div 1000 = 10^{-4}\ \Omega/m$

مجموع الانخفاض في الجهد علي طول المغذي = صفر

$$ix10^{-4}x500 + (i-50)x10^{-4}x700 + (i-150)x10^{-4}x300 + (i-300)x10^{-4}x250 = 0$$

$$i = 88.6\ A$$

$$i-50 = 88.6 - 50 = 38.6\ A$$

$$i-150 = 88.6-150 = -61.4\ A$$

$$i-300 = 88.6-300 = -211.4\ A$$

تيار التغذية عند الطرف A = 88.6 أمبير

تيار التغذية عند الطرف B = 211.4 أمبير

ت- موزع مغذى من طرفيه عند جهود مختلفة

مثال 3: وزع تيار مستمر AB منتظم ذو موصلين طوله 800m يغذى من طرفيه محمل كالتالي:

المسافة من A بالمتر	100	250	500	600	700
الحمل بالأمبير	20	80	50	70	40

الجهد عند النقطة A مثبت عند 248 V وعند النقطة B 245V مقاومة الموصل 0.05Ω أوجد:

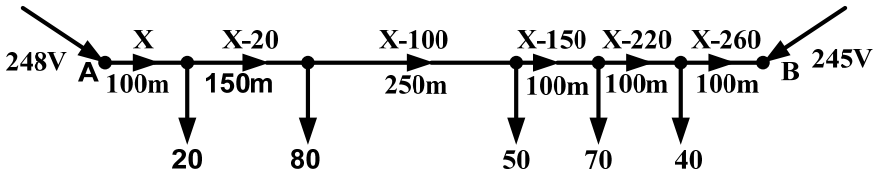
(أ) التيار عند طرفي التغذية A و B (ب) القدرة المفقودة في الموزع

الحل:

المقاومة الكلية للمغذي ذي الموصلين $R = 2 \times 0.05 = 0.1\ \Omega$

بفرض أن التيار عند النقطة A هو x أمبير فيمكننا إيجاد التيارات في المقاطع المختلفة كما بالشكل.

الانخفاض الكلي في الجهد علي الموزع AB $V_{AB} = 248 - 245 = 3\ V$



شكل (6)

المقاومة لكل متر طولي من المغذي $r = \frac{0.1}{800} = \frac{1}{8000}\ \ \Omega/m$

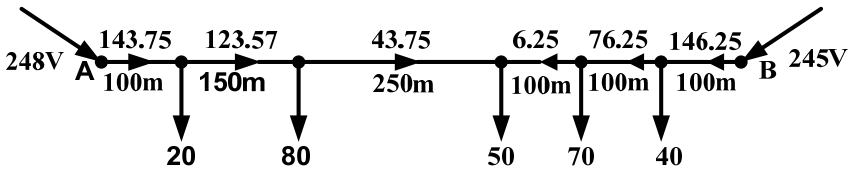
$$\frac{1}{8000}[100x + 150(x-20) + 250(x-100) + 100(x-150) + 100(x-220) + 100(x-260)] = 3$$

$$\therefore 800x = 115000 \qquad \therefore x = 143.75\ \ A$$

التيار عند طرف التغذية A $i_A = x = 143.75\ A$

التيار عند طرف التغذية B $i_A = x\text{-}260 = 143.75\text{-}260 = -146.25\ \ A$

وتكون توزيعات التيار علي المغذي كما يلي:



شكل (7)

القدرة المفقودة في الموزع

$$P=\frac{1}{8000}[143.75^2 x100+123.75^2 x150+43.75^2 x250+6.25^2 x100+76.25^2 x100+116.25^2 x100]$$

$$\therefore P=847.3 \quad W$$

ث- الموزع الحلقي Ring Distributor

الموزع الحلقي هو الموزع الذي يكون دائرة مغلقة ويمكن تغذيته من أكثر من نقطة. والنظام الحلقي من أكثر أنظمة التوزيع موثوقية ومرونة في تغذية الأحمال.

مثال4: موزع تيار مستمر حلقي الجهد عند نقطة A مقداره 400V ومحيطه 1500m ومقاومة كل موصل 0.03Ω/km ويوجد حمل مقداره 150A عند النقطة B علي بعد 500m من A وحمل مقداره 200A عند النقطة C علي بعد 300m من B أوجد الجهد عند النقطتين B و C وكذلك أوجد التيار في جزء المغذي BC.

الحل: مجموع الانخفاضات في الجهود داخل الحلقة = 0

$$\Delta V = (\rho/A)[500I + 300(I-150) +700(I-350)] = 0$$

$$I=193.3 \text{ A}$$

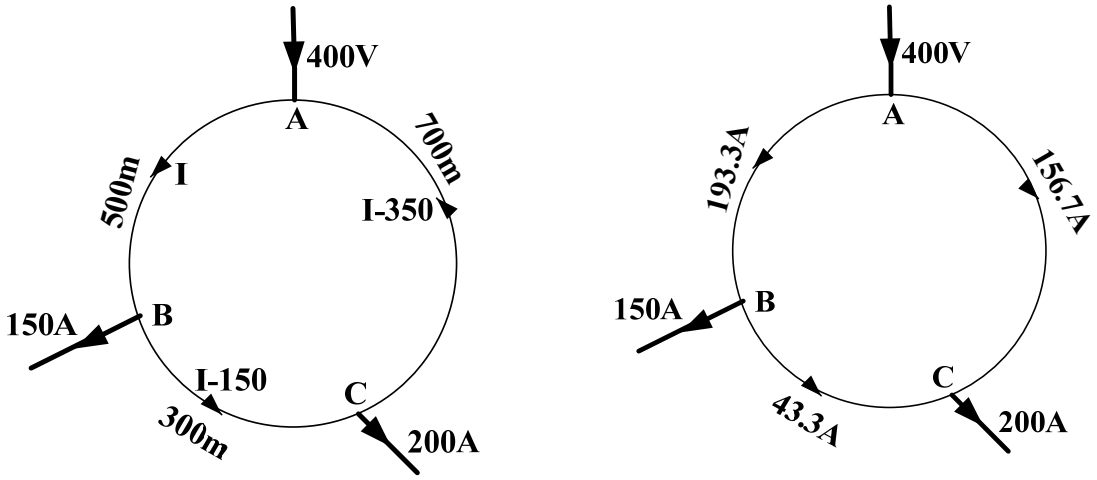
التيار في الجزء AB من المغذي $i_{AB} = I = 193.3 \quad A$

الانخفاض في الجهد علي الجزء AB $V_{AB}=2(193.3x500x0.03/1000)=5.8 \text{ V}$

الانخفاض في الجهد علي الجزء BC $V_{AB}=2(43.3x300x0.03/1000)=0.78 \text{ V}$

الجهد عند النقطة B $V_B = 400-5.8 = 394.2 \text{ V}$

الجهد عند النقطة C $V_C = 394.2-0.78 = 393.42 \text{ V}$



شكل (8)

(2-2) موزعات التيار المتردد AC Distributors

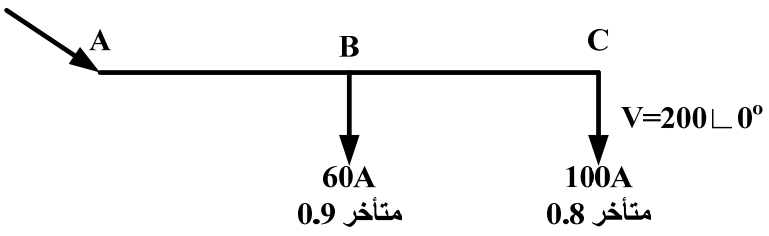
تتشابه موزعات التيار المتردد مع موزعات التيار المستمر مع الأخذ في الاعتبار الفوارق التالية:

1- كل حمل له معامل قدرة مختلف ولابد من أخذ جهد نقطة التغذية كأساس لمعرفة معامل القدرة للأحمال المختلفة.

2- التيارات في المقاطع المختلفة للمغذي هي المجموع الاتجاهي لتيارات الأحمال

3- الانخفاض في الجهد نتيجة مرور التيار في معاوقة المغذي

مثال5: موزع تيار متردد ذو موصلين طوله 1km يغذى من أحد طرفيه ويغذي حمل مقداره 100A عند معامل قدرة 0.8 متأخر وجهد مقداره 200V عند طرفه الآخر وكذلك يغذي حمل مقداره 60A عند معامل قدرة 0.9 متأخر عند منتصفه. المقاومة والمعاوقة الحثية لكل كيلومتر من طول المغذي هي علي الترتيب 0.06Ω و 0.08Ω احسب الانخفاض في الجهد علي طول المغذي من طرف الإرسال حتى منتصف المغذي ومن منتصفه حتى طرف النهاية للمغذي.



شكل (9)

الحل: الجهد عند النقطة C
$V_c = 200 + j0$ V

التيار عند النقطة C
$I_c = 100(0.8-j0.6) = 80 - j60$ A

معاوقة الجزء BC من المغذي
$Z_{BC} = (0.06+j0.08)/2 = 0.03+j0.04\ \Omega$

الانخفاض في الجهد في الجزء BC
$V_{BC} = I_C Z_{BC} = (80-j60)(0.03+j0.04) = 4.8+j1.4$ V

الجهد عند النقطة B
$V_B = 200+j0+4.8+j1.4 = 204.8+j1.4$ V

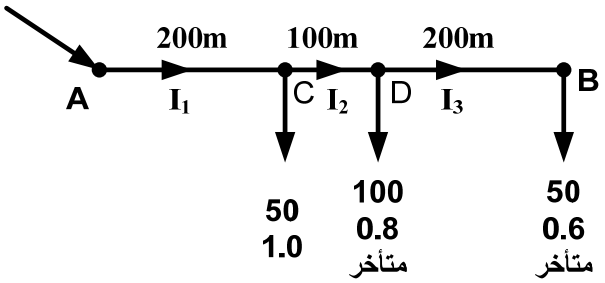
تيار الحمل عند النقطة B
$I_B = 60(0.9-j0.4357) = 54-j26.14$ A

التيار في الجزء AB من المغذي
$I_{AB} = I_C + I_B = (80-j60) + (54-j26.14) = 134-j86.14$ A

الانخفاض في الجهد في الجزء AB
$V_{AB} = I_{AB} Z_{AB} = (134-j86.14)(0.03+j0.04) = 7.46+j2.78$ V

الانخفاض الكلي في الجهد على المغذي
$V_{AC} = V_{AB}+V_{BC} = (7.46+j2.78) + (4.8+j1.4) = 12.26+j4.18$ V

مثال 6: موزع تيار متردد أحادي الوجه طوله 500m المعاوقة الكلية له $(0.02+j0.04)\Omega$ ويغذى من أحد طرفيه عند جهد 250V ويغذي هذا الموزع حمل مقداره 50A عند معامل قدره 1.0 على بعد 200m من نقطة التغذية. وحمل ثان مقداره 100A عند معامل قدرة 0.8 متأخر علي بعد 300m من نقطة التغذية. وحمل ثالث مقداره 50A عند معامل قدرة 0.6 متأخر عند الطرف الآخر للمغذي. احسب مقدار الانخفاض الكلي في الجهد علي المغذي وكذلك الجهد علي الطرف الثاني للمغذي.



شكل (10)

الحل: $I_1 = 50(1+j0) + 100(0.8-j0.6) + 50(0.6-j0.8) = 160-j100$ A

$I_2 = 100(0.8-j0.6) + 50(0.6-j0.8) = 110-j100$

A

$I_3 = 50(0.6-j0.8) = 30-j40$

A

$$Z_{AC} = (0.02 + j0.04)x\frac{200}{500} = 0.008 + j0.016 \quad \Omega$$

$$Z_{CD} = (0.02 + j0.04)x\frac{100}{500} = 0.004 + j0.008 \quad \Omega$$

$$Z_{DB} = (0.02 + j0.04)x\frac{200}{500} = 0.008 + j0.016 \quad \Omega$$

الانخفاض في الجهد علي طول المغذي

$V_{AB} = I_1Z_{AC} + I_2Z_{CD} + I_3Z_{DB}$

$=(160-j100)(0.008+j0.016)+(110-j100)(0.04+j0.008)+(30-j40)(0.008+j0.016)$
$= 5 + j2.4$ V

الجهد عند الطرف الآخر $V_B = V_A - V_{AB} = 250(1+j0) - (5+j2.4) = 245 - j2.4$

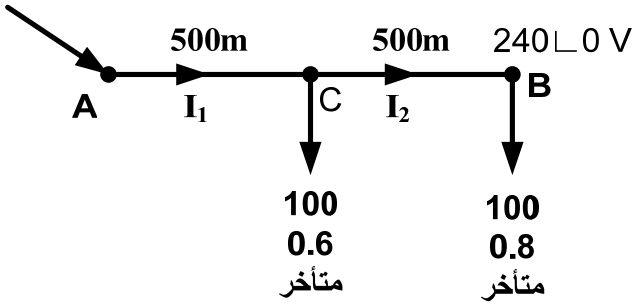
مثال 7: موزع تيار أحادي الوجه طوله 1km يغذى من أحد طرفيه المقاومة لكل موصل 0.2Ω والمعاوقة الحثية لكل موصل 0.3Ω الجهد عند الطرف الآخر 240V والحمل عند هذا الطرف

100A عند معامل قدرة 0.8 متأخر. الحمل عند منتصف المغذي 100A عند معامل قدرة 0.6 متأخر احسب الجهد عند نقطة التغذية.

الحل: المعاوقة الكلية للموصل $Z = 2(0.2+j0.3) = 0.4+j0.6\ \Omega$

$I_2 = 100(0.8-j0.6) = 80-j60\ \ A$

$I_1=100(0.8-j0.6) + 100(0.6-j0.8) = 140-j140\ \ A$



شكل (11)

$$V_{CB} = I_2 \frac{Z}{2} = (80 - j60)\frac{0.4 + j0.6}{2} = 34 + j12 \quad V$$

$$V_{AC} = I_1 \frac{Z}{2} = (140 - j140)\frac{0.4 + j0.6}{2} = 70 + j14 \quad V$$

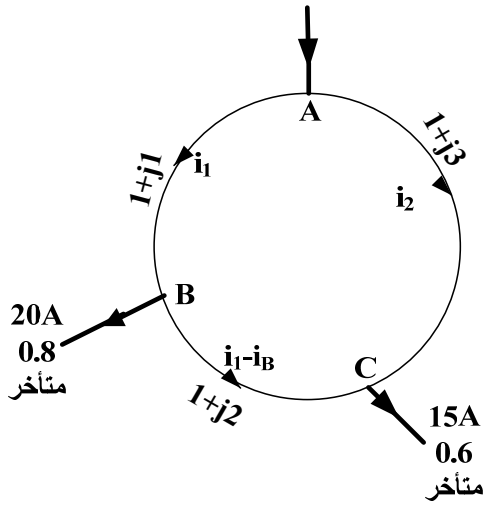
$V_{AB} = V_{AC} + V_{CB} = (34+j12) + (70+j14) = 104+j26\ \ V$

$V_A = V_B + V_{AB} = (240+j0) + (104+j26) =344+j26$

مثال 8: موزع حلقي أحادي الوجه مغذى عند نقطة A. الحمل عند نقطة B هو 20A عند معامل قدرة 0.8 متأخر والحمل عند نقطة C هو 15A عند معامل قدرة 0.6 متأخر. المعاوقة الكلية للجزء AB من المغذي هي (1+j2) وللجزء BC هي (1+j2) وللجزء CA (1+j3) احسب التيار الكلي للمغذي عند نقطة A والتيارات في كل جزء من أجزاء المغذي.

الحل: $i_B = 20(0.8-j0.6) = 16-j12$

$i_C = 15(0.6-j0.8) = 9-j12$



شكل (12)

مجموع الهبوط في الجهد علي المغذي = 0

$$i_1(1+j1) + (i_1-(16-j12))(1+j2) - i_2(1+j3) = 0$$

$$i_1(2+j3) - i_2(1+j3) = (16-j12)(1+j2) \qquad (4)$$

$$i_A = i_1 + i_2 = (16-j12) + (9-j12) = 25 - j24 \qquad (5)$$

بالتعويض من معادلة (5) في معادلة (4)

$$i_1(2+j3) - ((25-j24)-i_1)(1+j3) = (16-j12)(1+j2)$$

$$i_1(3+j6) = (16-j12)(1+j2) + (25-j24)(1+j3)$$

$$i_1 = 18.6 - j13.53$$

التيار في الجزء AB من المغذي $i_{AB} = i_1 = 18.6-j13.53$ A

بالتعويض في معادلة (5) لإيجاد i_2

$$i_2 = (25-j24)-i_1 = (25-j24) - (18.6-j13.53) = 6.4 - j10.47 \text{ A}$$

التيار في الجزء AC من المغذي $i_{AC} = i_2 = 6.4-j10.47$ A

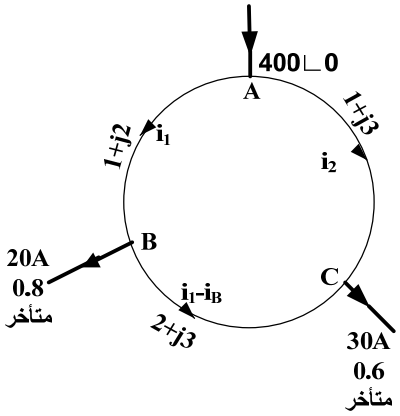
التيار في الجزء BC من المغذي

$$i_{BC} = i_1 - i_B = (18.6-j13.53) - (16-j12) = 2.6-j1.53 \text{ A}$$

التيار الكلي للمغذي عند نقطة A

$$i_A = i_1 + i_2 = (18.6-j13.53) + (6.4-j10.47) = 25 - j\,24 \text{ A}$$

مثال 9: موزع حلقي ذو موصلين يغذى عند نقطة A عند جهد مقداره 400V يغذي حمل مقداره 20A عند معامل قدرة 0.8 متأخر عند نقطة B ويغذي كذلك حمل مقداره 15A عند معامل قدرة 0.6 متأخر عند نقطة C. فإذا كانت المعاوقة الكلية للأجزاء AB و BC و CA هي (1+j2) و(2+j3) و(1+j3) علي الترتيب احسب التيارات في كل جزء من أجزاء المغذي وكذلك الجهد عند نقطتي B و C.



شكل (13)

الحل:

$i_B = 20(0.8-j0.6) = 16-j12$

$i_C = 30(0.6-j0.8) = 18-j24$

مجموع الهبوط في الجهد علي المغذي = 0

$$i_1(1+j2) + (i_1-(16-j12))(2+j3) - i_2(1+j3) = 0$$

$$i_1(3+j5) - i_2(1+j3) = (16-j12)(2+j3) \quad (6)$$

$$i_A = i_1 + i_2 = (16-j12) + (18-j24) = 34 - j36 \quad (7)$$

بالتعويض من معادلة (7) في معادلة (6)

$$i_1(3+j5) - ((34-j36)-i_1)(1+j3) = (16-j12)(2+j3)$$

$$i_1(4+j8) = (16-j12)(2+j3) + (34-j36)(1+j3)$$

$$i_1 = 19.5 - j16.5 \text{ A}$$

التيار في الجزء AB من المغذي $i_{AB} = i_1 = 19.5-j16.5$ A

بالتعويض في معادلة (7) لإيجاد i_2

$$i_2 = (34-j36)-i_1 = (34-j36) - (19.5-j16.5) = 14.5 - j19.5 \text{ A}$$

التيار في الجزء AC من المغذي $i_{AC} = i_2 = 14.5-j19.5$ A

التيار في الجزء BC من المغذي

$$i_{BC} = i_1 - i_B = (19.5\text{-}j16.5) - (16\text{-}j12) = 3.5\text{-}j4.5 \quad A$$

الجهد عند نقطة B

$$V_B = V_A - i_1 Z_{AB} = 400\angle 0^o - (19.5\text{-}j16.5)(1+j2)$$
$$= 347.5 - j22.5 \quad V$$

الجهد عند نقطة C

$$V_C = V_A - i_2 Z_{AC} = 400\angle 0^o - (14.5\text{-}j19.5)(1+j3)$$
$$= 327 - j24 \quad V$$

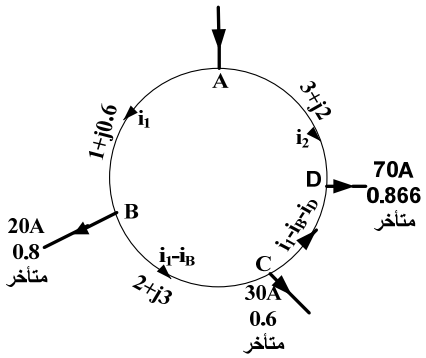
مثال 10: موزع حلقي ثلاثي الأوجه مغذى عند نقطة A. يغذي أحمال متزنة مقدارها 50A عند معامل قدرة 0.8 متأخر عند نقطة B وحمل مقداره 120A عند معامل قدرة 1.0 وحمل مقداره 70A عند معامل قدرة 0.866 متأخر عند نقطة D. المعاوقة الكلية للجزء AB من المغذي هي (1+j0.6) وللجزء BC هي (1.2+j0.9) وللجزء CD (0.8+j0.5) وللجزءDA (3+j2) احسب التيارات في كل جزء من أجزاء المغذي.

الحل:

$$i_B = 50(0.8\text{-}j0.6) = 40\text{-}j30$$

$$i_C = 120+j0$$

$$i_D = 70(0.866\text{-}j0.5) = 60.62\text{-}j35$$



شكل (14)

مجموع الهبوط في الجهد علي المغذي = 0

$$i_1(1+j0.6) + (i_1-(40-j30))(1.2+j0.9) + (i_1-(40-j30)-(120+j0))(0.8+j0.5) - i_2(3+j2) = 0$$

$$i1(3+j2) - i2(3+j2) = (40-j30)(1.2+j0.9) + (160-j30)(0.8+j0.5)$$

$$i1(3+j2) - i2(3+j2) = 218+j56 \qquad (8)$$

$$i_A = i_1 + i_2 = (40-j30) + 120 + (60.62-j35) = 220.62 - j65 \qquad (9)$$

بالتعويض من معادلة (9) في معادلة (8)

$$i_1(3+j2) - ((220.62-j65)-i_1)(3+j2) = 218+j56$$

$$i_1(6+j4) = (220.62-j65)(3+j2) + (218+j56)$$

$$i_1(6+j4) = 1009.86 + j302.24$$

$$i_1 = 139.77 - j42.813$$

التيار في الجزء AB من المغذي $i_{AB} = i_1 = 139.77-42.813$ A

بالتعويض في معادلة (9) لإيجاد i_2

$$i_2 = (220.62-j65)-i_1 = (220.62-j65) - (139.77-j42.813) = 80.85 - j22.187 \text{ A}$$

التيار في الجزء AD من المغذي $i_{AD} = i_2 = 80.85-j22.187$ A

التيار في الجزء BC من المغذي

$$i_{BC} = i_1 - i_B = (139.77-j42.813) - (40-j30) = 99.77-j12.813 \text{ A}$$

التيار في الجزء CD من المغذي

$$i_{CD} = i_{BC} - i_C = (99.77-j12.813) - (120+j0) = -20.23-j12.813 \text{ A}$$

تمارين

(1) موزع تيار مستمر منتظم ذو موصلين طوله 500m يغذى من أحد طرفيه وهذا الموزع يغذي أربعة أحمال قيمتها 40A و 50A و 120A و 60A على بعد 80m و 200m و 350m و 500m على التوإلى من طرف التغذية A فإذا كانت القيمة العظمى للانخفاض في الجهد التي لا يجب تجاوزها 8V أوجد مساحة مقطع موصل كيبل التغذية إذا كانت المقاومة النوعية لمادة الموصل $1.78x10^{-8}\Omega.m$.

(2) موزع تيار مستمر AB منتظم ذو موصلين طوله 1km يغذى من طرفيه وهذا الموزع يغذي أربعة أحمال قيمتها 80A و 70A و 40A و 20A على بعد 250m و 600m و 800m و 920m على التوإلى من طرف التغذية A أوجد التيار المغذي عند الطرفين إذا كان الجهد عند الطرفين 220V.

(3) موزع تيار مستمر AB منتظم ذو موصلين طوله 400m يغذى من طرفيه محمل كالتالي:

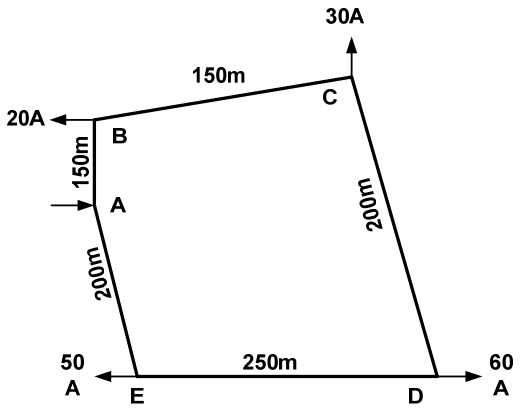
المسافة من A بالمتر	100	150	200	300
الحمل بالأمبير	30	70	60	50

الجهد عند النقطة A مثبت عند 245 V وعند النقطة B 240V مقاومة الموصل 0.5Ω/km

أوجد :

(أ) التيار عند طرفي التغذية A و B (ب) القدرة المفقودة في الموزع

(4) موزع حلقي كما بالشكل أوجد تيار التغذية الكلي عند نقطة A



شكل (15)

(5) موزع تيار متردد أحادي الوجه طوله 1km المعاوقة الكلية له $\Omega(0.04+j0.08)$ ويغذى من أحد طرفيه عند جهد 250V ويغذي هذا الموزع حمل مقداره 80A عند معامل قدرة 0.866 متأخر علي بعد 400m من نقطة التغذية. وحمل ثان مقداره 120A عند معامل قدرة 0.8 متأخر علي بعد 600m من نقطة التغذية. وحمل ثالث مقداره 60A عند معامل قدرة 0.6 متأخر عند الطرف الآخر للمغذي. احسب مقدار الانخفاض الكلي في الجهد علي المغذي وكذلك الجهد علي الطرف الثاني للمغذي.

(6) موزع حلقي ثلاثي الأوجه مغذي عند نقطة A. يغذي أحمال متزنة مقدارها 80A عند معامل قدرة 0.866 متأخر عند نقطة B وحمل مقداره 100A عند معامل قدرة 0.6 متأخر وحمل مقداره 60A عند معامل قدرة 0.8 متأخر عند نقطة D. المعاوقة الكلية للجزء AB من المغذي هي (1+j0.4) وللجزء BC هي (1.1+j0.8) وللجزء CD (1+j0.6) وللجزءDA (2+j1.6)احسب التيارات في كل جزء من أجزاء المغذي.

الوحدة الثالثة

خطوط النقل الكهربائي

خطوط النقل الكهربائي

(3- 1) مقدمة

نقل القدرة الكهربائية لمسافات طويلة بدأ في التطور في العشرينات من القرن التاسع عشر ومنذ ذلك الوقت حدث تطور هائل في طرق التصميم وطرق التشغيل لوسائل نقل القدرة الكهربائية والتي زادت من مرونة واستمرارية التغذية الكهربائية. وتعتبر خطوط النقل الهوائية للطاقة الكهربائية أرخص الطرق المستخدمة لنقل وتوزيع الطاقة الكهربائية.

ويشترك في تصميم وتركيب خطوط نقل القدرة الكهربائية العديد من التخصصات الهندسية مثل الهندسة الكهربائية والهندسة المدنية والميكانيكية.

إن المكونات الرئيسة لخط النقل الكهربائي تتمثل في:

- الموصلات الكهربائية
- أبراج خط النقل الكهربائي
- العوازل الصلبة المستخدمة

(3- 2) الموصلات الكهربائية Electrical Conductors

الموصلات الكهربائية عنصر رئيس داخل الكيابل الكهربائية وخطوط نقل القدرة الكهربائية وكذلك لخطوط النقل المغلقة بالغاز. وإن الوظيفة الرئيسة للموصلات الكهربائية هي نقل القدرة الكهربائية من مكان إلى آخر لذلك لابد أن تتوفر بها الخصائص الهامة التالية:

أ) موصلية كهربائية عالية.

ب) قوة شد عالية.

ت) كثافة قليلة.

ث) تكاليف منخفضة.

والمعادن التي تتوفر بها الخصائص سابقة الذكر هي النحاس والألمنيوم أو سبائكهما والصلب ويمكن استخدامها منفصلة أو مع بعضها. ومن الخبرات الطويلة بالخطوط الكهربائية فإنها تتكون من موصلات الألمنيوم المقواة بالصلب أو المصنعة من سبائك الألمنيوم.

استخدم النحاس لفترة طويلة في السابق في نقل القدرة الكهربائية لكن موصلات الألومنيوم أصبحت منذ فترة طويلة بديلا للموصلات النحاسية لرخص سعرها ووزنها الأقل مقارنة بالنحاس لنفس المقاومة. حقيقة أن موصل الألومنيوم له قطر أكبر من موصل النحاس عند

نفس المقاومة يمثل أيضا ميزة لموصل الألومنيوم حيث انه مع زيادة قطر الموصل تقل قيمة المجال الكهربائي على سطح الموصل مما يقلل من تأين الهواء المحيط بالموصل مما يقلل من وجود ظاهرة التفريغ الهالى (Corona) .

وتستخدم موصلات الألومنيوم المقوى بالصلب على نطاق واسع في نقل القدرة الكهربائية وحديثا أصبح الاستخدام الأكثر للموصل من سبيكة الألومنيوم حيث إن هذا النوع من الموصلات له قوة شد (tensile strength) أعلى من موصلات الألومنيوم العادية.

وتتكون موصلات الألومنيوم المقوى بالصلب من قلب مركزي من شعيرات الصلب المجلفن محاط بطبقات من شعيرات الألومنيوم.

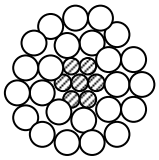
ويتكون الموصل المجدول من طبقات متبادلة من شعيرات الأسلاك يتم لفها حلزونيا كل طبقة في اتجاه يخالف الطبقة السابقة وتزيد مقاومة الموصل بنسبة 1% إذا كان الموصل ذا شعيرات عبارة عن ثلاث طبقات وبنسبة 2% لأكثر من ثلاث طبقات. ويعتمد عدد الشعيرات علي عدد الطبقات وهل جميع الشعيرات لها نفس القطر أم لا. والمعادلة العامة لحساب عدد الشعيرات هي:

$$n = 3X^2 - 3X + 1 \qquad (1)$$

حيث إن : n– عدد الشعيرات ، X – عدد الطبقات

فإذا كان عدد الطبقات X=2 فإن عدد الشعيرات n=7

فإذا كان عدد الطبقات X=3 فإن عدد الشعيرات n=19



شكل (1) شعيرات موصل ACSR

ويبين شكل (1) مقطعاً من موصل ألمنيوم مقوى بصلب، 7 شعيرات من الصلب، 24 شعيره من الألمنيوم

وإذا افترضنا أن قطر الشعيرات المستعملة d فإن القطر الخارجي للموصلات المجدولة المنتظمة تكون كالآتي:

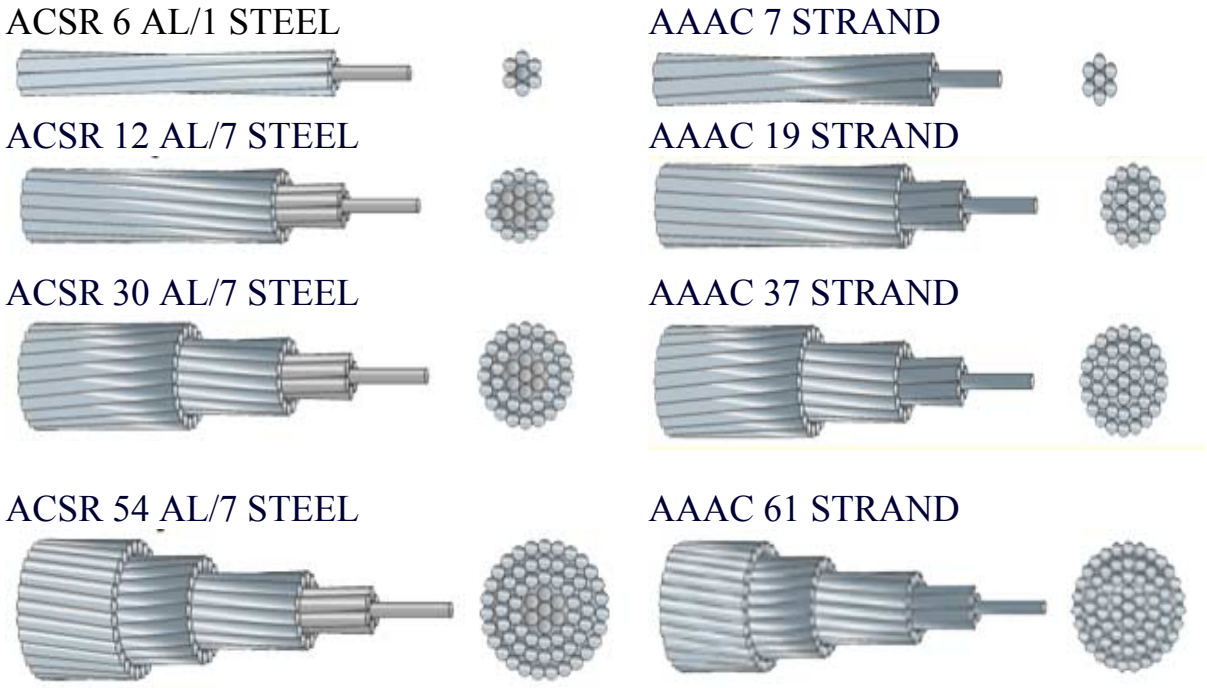
عدد الشعيرات	3	7	19	37	61
القطر الكلي	2.15d	3d	5d	7d	9d

وتصنف موصلات الألمنيوم في الاستخدام العادي لخطوط النقل الهوائية كالآتي:

AAC	- كل الشعيرات من الألمنيوم (BS215, IEC207)
ACSR	- شعيرات من الألمنيوم مقواة بالصلب (BS215, IEC209)
AAAC	- كل الشعيرات من سبائك الألمنيوم (BS3242, IEC208)
AACSR	- شعيرات من سبائك الألمنيوم مقواة بالصلب (IEC210)
ACAR	- شعيرات ألمنيوم مقواة بالسبائك

أي من الأنواع سابقة الذكر يمكن أن تستخدم كموصل أرضي ولكن دائما يفضل استخدام الصلب وفي بعض الأماكن التي تحوي تيار قصر عالٍ يمكن إضافة طبقة أو أكثر من شعيرات الالمنيوم على شعيرات الصلب. وحديثا أصبح من المفضل استخدام الموصل الأرضي المحتوي علي الإلياف البصرية وأصبح يسمي موصلات الأرضي البصرية (Optical ground wires, OPGW) ويستخدم لأغراض الاتصالات.

ويبين شكل(2) أمثلة عن موصلات الألومنيوم المقواة بالصلب وكذلك موصلات سبائك الألومنيوم المستخدمة بخطوط النقل الكهربائي.



شكل (2) أمثلة للموصلات الكهربائية المستعملة في خطوط النقل

جدول (1) الخصائص الكهربائية لموصل الألومنيوم المقوى بالصلب ACSR

Code word	Alumin. area, cmil	Strand Al/St	Layers of Al.	Outside diameter	Resistance			GMR D_s,ft	Reactance/conductor, 1-ft spacing 60 Hz	
						AC, 60 Hz			Inductive, X_a, Ω/mi	Capacitive, X'_a,MΩ.mi
					Dc, 20°C, Ω/1000 ft	20°C Ω/mi	50°C Ω/mi			
Warming	266.8	18/1	2	0.609	0.0646	0.3488	0.3831	0.0198	0.476	0.1090
Partridge	266.8	26/7	2	0.642	0.0640	0.3452	0.3792	0.0217	0.465	0.1074
Ostrich	300.0	26/7	2	0.680	0.0569	0.3070	0.3372	0.0229	0.458	0.1057
Merlin	336.4	18/1	2	0.684	0.0512	0.2767	0.3037	0.0222	0.462	0.1055
Linnet	336.4	26/7	2	0.721	0.0507	0.2737	0.3006	0.0243	0.451	0.1040
Oriole	336.4	30/7	2	0.741	0.0504	0.2719	0.2987	0.0255	0.445	0.1032
Chickadee	397.5	18/1	2	0.743	0.0433	0.2342	0.2572	0.0241	0.452	0.1031
Ibis	397.5	26/7	2	0.783	0.0430	0.2323	0.2551	0.0264	0.441	0.1015
Pelican	477.0	18/1	2	0.814	0.0361	0.1957	0.2148	0.0264	0.441	0.1004
Flicker	477.0	24/7	2	0.846	0.0359	0.1943	0.2134	0.0284	0.432	0.0992
Hawk	477.0	26/7	2	0.858	0.0357	0.1931	0.2120	0.0289	0.430	0.0988
Hen	477.0	30/7	2	0.883	0.0355	0.1919	0.2107	0.0304	0.424	0.0980
Osprey	556.5	18/1	2	0.879	0.0309	0.1679	0.1843	0.0284	0.432	0.0981
Parakeet	556.5	24/7	2	0.914	0.0308	0.1669	0.1832	0.0306	0.423	0.0969
Dove	556.5	26/7	2	0.927	0.0307	0.1663	0.1826	0.0314	0.420	0.0965
Rook	636.0	24/7	2	0.977	0.0269	0.1461	0.1603	0.0327	0.415	0.0950
Grsebeak	636.0	26/7	2	0.990	0.0268	0.1454	0.1596	0.0335	0.412	0.0946
Drake	795.0	26/7	2	1.108	0.0215	0.1172	0.1284	0.0373	0.399	0.0912
Tern	795.0	45/7	3	1.063	0.0217	0.1188	0.1302	0.0352	0.406	0.0925
Rail	954.0	45/7	3	1.165	0.0181	0.0997	0.1092	0.0386	0.395	0.0897
Cardinal	954.0	54/7	3	1.196	0.0180	0.0988	0.1082	0.0402	0.390	0.0890
Ortolan	1033.5	45/7	3	1.213	0.0167	0.0924	0.1011	0.0402	0.390	0.0885
Bluejay	1113.0	45/7	3	1.259	0.0155	0.0861	0.0941	0.0415	0.386	0.0874
Finch	1113.0	54/19	3	1.293	0.0155	0.0856	0.0937	0.0436	0.380	0.0866
Bittern	1.272.0	45/7	3	1.345	0.0136	0.0762	0.0832	0.0444	0.378	0.0855
Pheasant	1272.0	54/19	3	1.382	0.0135	0.0751	0.0821	0.0466	0.372	0.0847
Bobolink	1431.0	45/7	3	1.427	0.0121	0.0684	0.0746	0.0470	0.371	0.0837
Plover	1431.0	54/19	3	1.465	0.0120	0.0673	0.0735	0.0494	0.365	0.0829
Lapwing	1590.0	45/7	3	1.502	0.0109	0.0623	0.0678	0.0498	0.364	0.0822
Falcon	1590.0	54/19	3	1.545	0.0108	0.0612	0.0667	0.0523	0.358	0.0814
bluebird	2156.0	84/19	4	1.762	0.0080	0.0476	0.0515	0.0586	0.344	0.0776

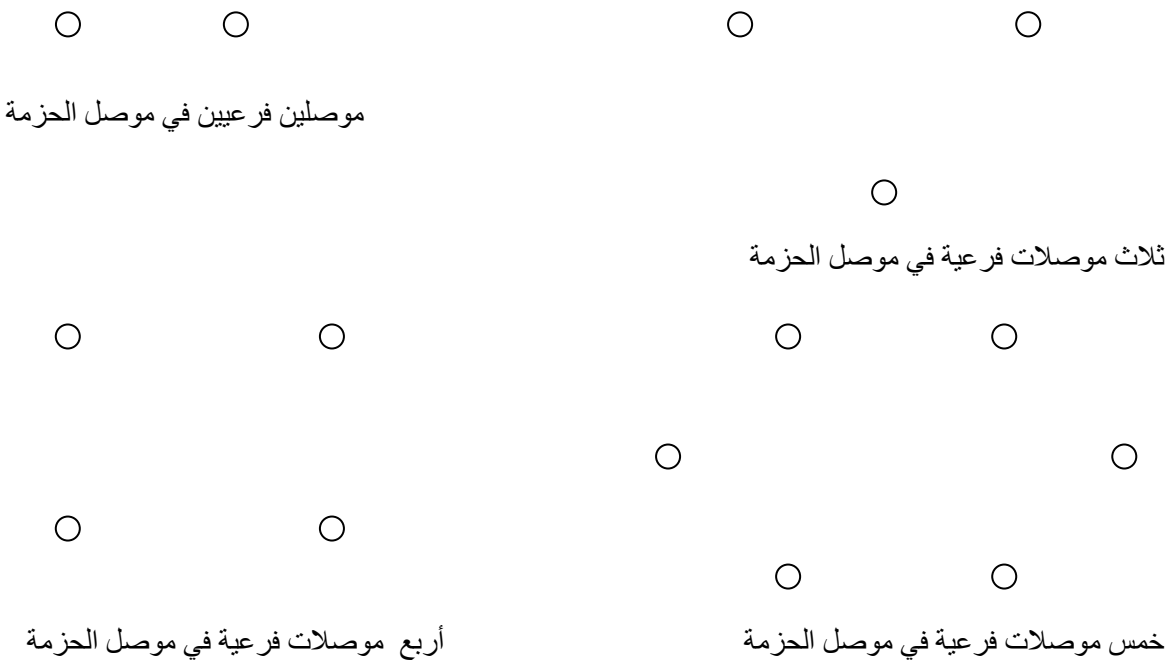
(3- 2- 1) ترتيب الموصلات Conductors Arrangement

يعتمد تصميم خط النقل الكهربائي علي أهمية هذا الخط من حيث كمية القدرة الكهربائية التي ينقلها والأماكن التي يغذيها هذا الخط لذلك فتصميم خط النقل الكهربائي لابد أن يحقق مرونة عالية في نقل القدرة الكهربائية وعدم فقدها كلية حتى في أشد الظروف. ومن أهم الحلول في عملية النقل المرن للقدرة الكهربائية استخدام أكثر من دائرة لنقل القدرة الكهربائية ويمكن تحميل دائرتين أو أكثر علي برج واحد. ويعتمد تصميم الدائرة الواحدة ونسبة نقلها للقدرة الكهربائية الكلية علي الأداء الاقتصادي للخط الكهربائي. ويبين الجدول التالي مزايا وعيوب تصميم دائرة واحدة وكذلك تصميم دائرتين للخط الواحد:

تصميم دائرة واحدة للخط	تصميم دائرتين للخط
المزايا - يتعرض لضغط هوائي أقل على الموصلات والأبراج لذلك تتطلب الأبراج أجزاء صلبة ذات وزن أقل. - أقل خطورة أثناء إصلاح الخط **العيوب** - هذا التصميم غير مرن بالنظر لتواصل تغذية المصدر الكهربائي. - هذا الخط يتطلب مسافة أكبر بين الموصلات - هذا الخط له معاوقة حثية أكبر حيث إن المسافة بين الموصلات أكبر	**العيوب** - يتعرض لضغط هوائي أكبر لذلك فالأجزاء الصلبة المكونة للبرج تكون ثقيلة وارتفاع البرج كبير - الخطورة موجودة دائما من الدائرة الآخرى الحية **المزايا** - هذا التصميم مرن جدا في استمرارية تغذية المصدر - يحتاج لمسافة أقل بين الموصلات - ذو معاوقة حثية أقل حيث إن المسافة بين الموصلات أقل

(3- 2- 2) موصل الحزمة Bundle conductor

مع الزيادة الهائلة في القدرات الكهربائية المطلوب نقلها علي الشبكات الكهربائية ازداد في السنوات الأخيرة استخدام الجهود فوق العالية والجهود الفائقة لتحقيق الهدف المنشود من نقل هذه القدرات الهائلة بكفاءة عالية. ومع استخدام هذه الجهود ظهرت بعض المشاكل التي تم حلها بطرق فنية. ومن أهم الظواهر التي ظهرت مع استخدام الجهود العالية ظاهرة التفريغ الهإلى وهذه الظاهرة تعتمد علي عدة عوامل مثل: قطر الموصل الكهربائي، وحالة سطح الموصل، وحالة الهواء المحيط بالموصل الكهربائي. ومن أهم عيوب هذه الظاهرة: الفقد في القدرة الكهربائية والتداخل في موجات المذياع وموجات التلفاز. وقد طرح العديد من الحلول لهذه الظاهرة ومن أهم هذه الحلول المطبقة عمليا هي استخدام موصل الحزمة شكل(3). ونعني بموصل الحزمة بالموصل الذي يحتوي علي أكثر من موصل فرعي subconductor في الوجه الواحد. ويجب الحفاظ علي المسافة بين الموصلات الفرعية في موصل الحزمة متساوية علي طول الخط الكهربائي وذلك باستخدام المباعدات spacers وتعتمد المسافة بين الموصلات الفرعية وكذلك عددها علي جهد الخط.



شكل (3) موصلات الحزمة لجهود مختلفة

وموصلات الحزمة لها العديد من المزايا مقارنة بالموصل المفرد منها:

- موصل الحزمة ينقل القدرات الكبيرة بأقل فقد فيها مما يعني كفاءة أكبر للخط.
- حث ذاتي أقل للوجه الواحد مما يقلل المعاوقة الحثية.
- ذو سعة أكبر بين الخط وخط التعادل مما يساعد علي بعض التحسين في القدرة الكهربائية.
- حيث إن الحث الذاتي أقل والسعة أكبر مما ينتج عنه قيمة أقل لمعاوقة الدفعة للخط surge impedance أي إن:

$$\Omega \quad z_s = \sqrt{\frac{L}{C}} \qquad (2)$$

وهذا التقليل من معاوقة الدفعة يزيد من سعة التحميل لمعاوقة الدفعة للخط الكهربائي (surge impedance loading, SIL) وهذا يعني أننا يمكن زيادة كمية القيمة القصوى للقدرة الكهربائية التي يمكن نقلها علي الخط الكهربائي بدون فقد اتزان الشبكة.

$$SIL = \frac{V^2}{Z_s} \quad \text{kW} \qquad (3)$$

حيث إن V هو جهد الخط بالكيلوفولت و I هو التيار الكهربائي بالأمبير.

(3-3) أبراج خطوط النقل الكهربائي Overhead Transmission Line Towers

أبراج خطوط النقل الكهربائي تستخدم لحمل وتثبيت موصلات خط النقل الهوائي ولابد أن تكون مطابقة للمواصفات الجمآلية للمنطقة التي تركب بها.

وتتلخص المتطلبات الرئيسة للأبراج الكهربائية في:

- ذات قوة ميكانيكية عالية ومعامل أمان يتراوح بين 2.5 إلى 3.0
- ذات وزن خفيف بدون فقد قوة الشد التي تتحملها
- عدد أقل من الأجزاء المكونة للبرج
- تكون رخيصة الثمن
- أقل تكلفة وصيانة ممكنة
- ذات عمر افتراضي طويل
- ذات شكل بسيط

ويعتمد شكل البرج ومواصفاته علي جهد الخط المرتبط به.

(3-3-1) الأبراج الخشبيةً Wooden Towers

هذه الأبراج محدودة في استخدامها علي خطوط النقل ذات الجهود المتوسطة وتستعمل بصورة رئيسة في خطوط التوزيع الكهربائية. هذه الأبراج رخيصة الثمن وتوفر العزل المطلوب لهذه الجهود لكن عيوب هذه الأبراج تكمن في مرونتها وإمكانية تعفنها وبذلك يكون العمر الافتراضي لها قصيراً لذلك يتم معالجتها بمشتقات قطران الفحم (الكريوزوت) مما يزيد من عمرها الافتراضي. ولابد من معالجة الجزء المدفون في الأرض بنوعية خاصة من الزيوت. وتصنع هذه الأبراج من أخشاب شجر الأرز أو الصنوبر وذلك لطولها واستقامتها. وتوجد الأبراج الخشبية علي شكلين: أبراج الذراع الكتفي (bracket wooden tower) و أبراج الأذرع المستعرضة.

شكل (4) الأبراج الخشبية

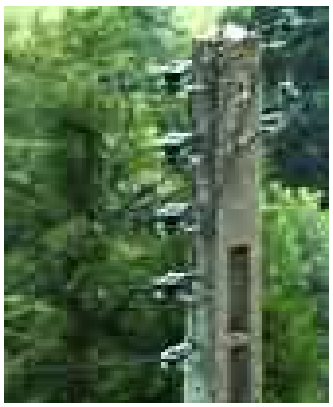
(3- 3- 2) الأبراج المعدنية المجوفة Hollow Metallic Towers

يمكن استبدال الأبراج الخشبية بالأبراج المعدنية المجوفة للتغلب علي عيوب هذه الأبراج حيث إن الأبراج المعدنية أقوى من الخشبية وبالتالي يمكن زيادة المسافة بين الأبراج. ويستغل التجويف داخل العمود في تمرير الكيابل التي تقوم بتوصيل الكهرباء من وإلى العمود. ولزيادة العمر الافتراضي للأبراج المعدنية المجوفة لابد أن تجلفن أو تدهن بانتظام. ولأغراض الأمن والسلامة المهنية لابد من تأريض هذه الأبراج.

شكل (5) الأبراج المعدنية المجوفة

(3- 3- 3) أبراج الخرسانة المقواة Concrete Reinforced Towers

حلت أبراج الخرسانة المقواة مكان الأبراج الخشبية والأبراج المعدنية المجوفة. وتصنع هذه الأبراج بمقاطع دائرية أو مضلعة وتكون هذه الأبراج مجوفة وذلك لتقليل الوزن. ويستغل أيضا التجويف داخل العمود في تمرير الكيابل التي تقوم بتوصيل الكهرباء من وإلى العمود. وحيث إن وزن هذه الأبراج ثقيل لذلك فتكلفة النقل ستكون مرتفعة لكن في المقابل فإن تكلفة صيانتها قليلة وقوية جدا ميكانيكيا ولذلك فعمرها الافتراضي طويل. كذلك لا تتأثر الأعمدة الخراسانية بالتعفن أو بالطيور أو بالنار أو بالمواد الكيميائية.



شكل (6) أبراج الخرسانة المقواة

(3- 3- 4) أبراج الصلب Steel Towers

تستخدم هذه الأبراج لنقل القدرة الكهربائية لمسافات طويلة وفي العموم تستخدم الأبراج المعدنية المتشابكة بكثرة نظرا لقوتها الميكانيكية الفائقة وعمرها الافتراضي الطويل وبإعطاء عناية خاصة في عملية التصميم يمكننا القول بأن أبراج الصلب جيدة بدون حدود. ونظرا لتركيبها القوي فإننا يمكن أن نطيل المسافة بين الأبراج وهذه الأبراج مفيدة جدا في عبور خطوط النقل للأنهار وطرق السكك الحديدية والأماكن الزراعية. وتصنع هذه الأبراج من عدة أجزاء يسهل نقلها وتجميعها في موقع تركيب البرج. ويعتمد ارتفاع البرج وأبعاده والمسافة بين أذرع البرج والمسافة بين البرج والبرج الذي يليه علي مستوي الجهد لخط النقل.

شكل (7) أبراج الصلب

وتتعدد أنواع الأبراج المستخدمة علي طول خط النقل الكهربائي تبعا لموقع البرج من الخط وهناك أربعة أنواع هامة تستخدم بدءا من خطوط النقل ذات الجهد المتوسط حتى خطوط النقل ذات الجهد الفائق وهي برج التعليق وبرج الشد وبرج الزاوية وبرج بداية ونهاية الخط.

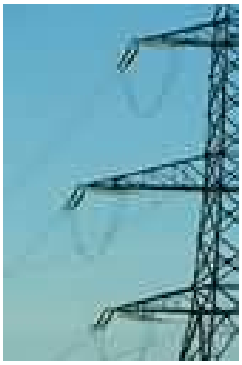
أ. برج التعليق Suspension tower

وهو البرج الأكثر استخداماً في خطوط النقل الكهربائي ويستخدم لتعليق موصلات خط النقل الكهربائي لذلك فليس هناك شد في الموصل الكهربائي عند هذه الأبراج. وفي هذه الأبراج تثبت سلسلة عوازل التعليق في وضع رأسي ويعلق الموصل في نهاية السلسلة

شكل (8) برج التعليق

ب- برج الشد **Tension tower**

يستخدم هذا البرج بعد عدة أبراج تعليق (كل عشرة أبراج في المتوسط) وذلك لتثبيت وشد الموصل الكهربائي وكذلك لتفادي سقوط السلك من علي العديد من أبراج التعليق إذا حدث قطع في الموصل الكهربائي مما يؤدي إلى بذل وقت ومجهود وتكلفة كبيرة في إعادة تركيب الموصل الكهربائي. وباستخدام أبراج الشد تقلص المسافة التي يمكن أن يسقط فيها الموصل الكهربائي إذا حدث قطع في الموصل الكهربائي. ويتعرض هذا البرج إلى شد متساو من جهتيه. ويمكن تمييز هذا البرج بوجود سلسلتين من عوازل التعليق في وضع أفقي في كلتا جهتي البرج ويربط ويشد في نهايتهما الموصل الكهربائي.



شكل (9) برج الشد

ت- برج الزاوية **Angle tower**

يستخدم هذا البرج عند تغيير اتجاه خط النقل الكهربائي ويشبه هذا البرج برج الشد مع ملاحظة أن الموصل الكهربائي يغير اتجاهه علي هذا البرج - أي إن الموصل الكهربائي يصنع زاوية علي هذا البرج ويتعرض هذا البرج لقوة شد تساوي محصلة قوى الشد في الموصلين المربوطين عند كل من طرفي سلسلة العوازل.

شكل (10) برج الزاوية

ث- برج نهاية خط النقل End tower

يستخدم هذا النوع من الأبراج عند نهاية خط النقل الكهربائي حيث يكون الموصل الكهربائي مربوطا ومثبتا في اتجاه واحد علي هذا البرج مما يعرضه لقوى الشد من اتجاه واحد. وتوضع قوى الشد من اتجاه واحد في الاعتبار عند تصميم هذا البرج.

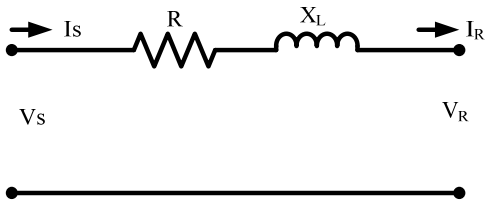
شكل (11) برج نهاية خط النقل

(3- 4) تمثيل خطوط النقل الكهربائي Transmission Lines Modeling

تمثل خطوط النقل الكهربائي بنموذج مكافئ باستخدام عناصر الدائرة الملائمة. ونظرا لتماثلية الثلاثة أوجه فإن القيم يعبر عنها دائما لكل وجه ولذلك يخفض نظام الثلاثة أوجه إلى نظام مكافئ أحادي الوجه. ويعتمد النموذج المستخدم لحساب الجهد والتيار والقدرة الكهربائية علي طول خط النقل الكهربائي فعناصر الخط هي عناصر موزعة توزيعا منتظما علي طول خط النقل الكهربائي. ولكن عند اعتبار خط النقل الكهربائي قصيرا أي إن طوله لا يزيد عن 80km (50miles) وخط النقل متوسط الطول أي إن طوله لا يزيد عن 240km (150 miles) فإن استخدام العناصر المجمعة لهذين الخطين تعطي دقة جيدة في عملية التحليل.

(3- 4- 1) خطوط النقل القصيرة Short Transmission Lines

في خطوط النقل القصيرة تكون قيمة مكثفات التوازي لخط النقل صغيرة جدا بحيث يمكن إهمالها وتستخدم فقط مقاومة التوإلى وكذلك محاثة التوإلى للطول الكلي للخط الكهربائي. ويبين شكل (12) نموذج الدائرة المكافئة لكل وجه لخط النقل القصير. حيث إن V_s و I_s هما جهد الوجه وتيار الوجه عند طرف الإرسال للخط الكهربائي وV_R و I_R هما جهد الوجه وتيار الوجه عند طرف الاستقبال للخط الكهربائي.



شكل (12) نموذج الدائرة المكافئة لخط النقل القصير

المعاوقة الكلية لخط النقل الكهربائي

$$Z = (r + j\,\omega\,L)\,l$$
$$= R + j\,X_L \qquad (4)$$

حيث r و L هما المقاومة والمحاثة لكل وجه لكل وحدة طول علي الترتيب و l هو طول الخط.

جهد الوجه عند طرف الإرسال لخط النقل الكهربائي يمكن استنتاجها من المعادلة:

$$V_s = V_R + Z\,I_R \qquad (5)$$

وحيث إن مكثفات التوازي قد تم إهمالها في خطوط النقل القصيرة فإن:

$$I_s = I_R \qquad (6)$$

ويمكن الحصول علي تيار الاستقبال بمعرفة القدرة الظاهرية للحمل كما يلي:

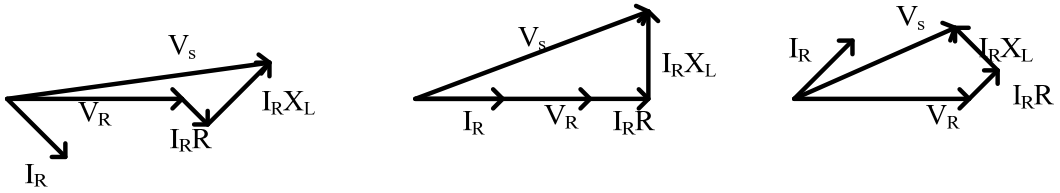
$$I_R = \frac{S_R^*}{3V_R^*} \qquad (7)$$

حيث S_R هي القدرة الظاهرية للحمل الثلاثي الأوجه.

تنظيم الجهد لخط النقل الكهربائي يمكن أن يعرف بأنه: نسبة التغير في الجهد عند طرف الاستقبال لخط النقل الكهربائي (كنسبة من جهد الحمل الكامل) من اللاحمل إلى الحمل الكامل.

$$\%regulation = \frac{|V_{R,NL}| - |V_{R,FL}|}{|V_{R,FL}|}\,x100\% \qquad (8)$$

حيث إن $|V_{R,NL}|$ هي قيمة الجهد عند طرف الاستقبال عند اللاحمل و $|V_{R,FL}|$ هي قيمة الجهد عند طرف الاستقبال عند الحمل الكامل مع اعتبار أن الجهد عند الإرسال V_s ثابت.



(أ) معامل قدرة متأخر (ب) معامل قدرة الوحدة (ت)معامل قدرة متقدم

شكل (13) رسم تخطيطي طوري لخط نقل قصير

ويبين شكل (13) رسماً تخطيطياً طورياً لخط نقل قصير حيث يتبين من الشكل أن قيمة جهد الإرسال المطلوبة لتثبيت جهد الاستقبال عندما يكون تيار طرف الاستقبال متأخراً عن الجهد تكون أكبر من القيمة المطلوبة عندما يكون الجهد والتيار عند نفس الطور. وتكون قيمة جهد الإرسال المطلوبة لتثبيت جهد الاستقبال أقل عندما يكون تيار طرف الاستقبال متقدماً عن الجهد.

ومن المعادلتين (5) و (6) يمكن تمثيل خط النقل الكهربائي بشبكة ثنائية الدخل كما في شكل (14) كما يمكن إعادة كتابة المعادلتين في ضوء ثوابت الدائرة العامة والتي تعرف بثوابت ABCD

$$V_s = A\,V_R + B\,I_R \qquad (9)$$

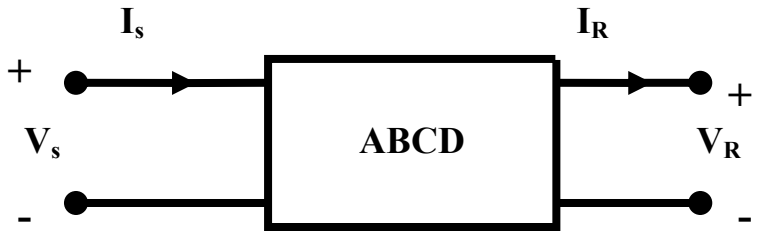
$$I_s = C\,V_R + D\,I_R \qquad (10)$$

أو في صورة المصفوفات

$$\begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \qquad (11)$$

وطبقا للمعادلتين (5) و (6) فإن الثوابت بالنسبة لخط النقل القصير تكون:

$A = 1 \qquad B = Z \qquad C = 0 \qquad D = 1$



شكل (14) تمثيل ثنائي الدخل لخط النقل الكهربائي

مثال (1) خط نقل ثلاثي الأوجه جهد 220 kV وطوله 40km المقاومة لكل وجه هي 0.15Ω لكل كيلومتر والمحاثة لكل وجه هي 1.3263mH لكل كيلومتر. استخدم نموذج الخط القصير لإيجاد الجهد والقدرة عند طرف الإرسال للخط وتنظيم الجهد والكفاءة عندما يغذي الخط الكهربائي حمل ثلاثي الأوجه:

(أ) مقداره 381MVA عند معامل قدرة 0.8 متأخر عند جهد 220 kV.

(ب) مقداره 381MVA عند معامل قدرة 0.8 متقدم عند جهد 220 kV.

الحل: معاوقة التوإلى لكل وجه هي:

$$Z=(r+j\omega L)\,l=(0.15+j2\pi \times 60 \times 1.3263 \times 10^{-3})\,40=6+j20\ \Omega$$

جهد الاستقبال لكل وجه: kV

$$V_R=\frac{220\angle 0^o}{\sqrt{3}}=127\angle 0^o$$

(أ) القدرة الظاهرية MVA

$$S_R=381\angle \cos^{-1}0.8=381\angle 36.87=304.8+j228.6$$

التيار لكل وجه A

$$I_R=\frac{S_R^*}{3V_R}=\frac{381\angle -36.87x10^3}{3x127\angle 0}=1000\angle -36.87$$

الجهد عن طرف الإرسال

$$V_s=V_R+ZI_R=127\angle 0+(6+j20)(1000\angle -36.87)(10^{-3})$$

kV

$$V_s=144.33\angle 4.93^o$$

قيمة جهد الخط عند طرف الإرسال هي: kV

$$V_{s(L-L)}=\sqrt{3}x144.33=250$$

القدرة الكهربائية عند طرف الإرسال

$$S_s=3V_sI_s^*=3x144.33\angle 4.93x1000\angle 36.87x10^{-3}$$

$$S_s=322.8MW+j288.6M\ \text{var}=433\angle 41.8^o\,MVA$$

تنظيم الجهد

$$\%regulation=\frac{250-220}{220}x100\%=13.6\%$$

كفاءة خط النقل

$$\eta=\frac{P_R}{P_s}=\frac{304.8}{322.8}x100=94.4\%$$

(ب) التيار لكل وجه A

$$I_R=\frac{S_R^*}{3V_R}=\frac{381\angle 36.87x10^3}{3x127\angle 0}=1000\angle 36.87$$

الجهد عن طرف الإرسال

$$V_s = V_R + ZI_R = 127\angle 0 + (6 + j20)(1000\angle 36.87)(10^{-3})$$

kV

$$V_s = 121.39\angle 9.29^o$$

kV قيمة جهد الخط عند طرف الإرسال هي:

$$V_{s(L-L)} = \sqrt{3}x121.39 = 210.26$$

القدرة الكهربائية عند طرف الإرسال

$$S_s = 3V_s I_s^* = 3x121.39\angle 9.29x1000\angle -36.87x10^{-3}$$

$$S_s = 322.8MW - j168.6M \text{ var} = 364.18\angle -27.58^o MVA$$

تنظيم الجهد

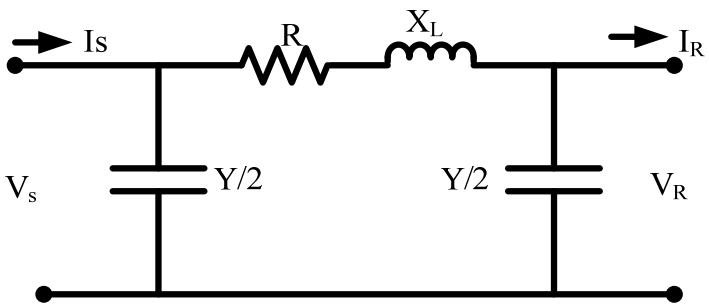
$$\%regulation = \frac{210.26 - 220}{220} x100\% = -4.43\%$$

كفاءة خط النقل

$$\eta = \frac{P_R}{P_s} = \frac{304.8}{322.8} x100 = 94.4\%$$

(3- 4- 2) خطوط النقل المتوسطة Medium Transmission Line

عندما يزداد طول الخط عن 80km فإن تيار الشحن يصبح له قيمة لابد من أخذها في الاعتبار لذلك لابد من الأخذ في الاعتبار مكثفات التوازي لخط النقل الكهربائي. فخطوط النقل الكهربائي الأطول من 80km والأقصر طولا من 250km يطلق عليها خطوط النقل متوسطة الطول. وتفضل الدائرة π المكافئة لتمثيل خط النقل المتوسط. في هذه الدائرة المكافئة تقسم المسامحة السعوية Y إلى نصفين بحيث تكون نصف القيمة عند طرف الإرسال والنصف الآخر عند طرف الاستقبال لخط النقل الكهربائي متوسط الطول. ويمثل شكل (15) الدائرة الاسمية π والتي تمثل خط النقل المتوسط الطول.



شكل 15 الدائرة الاسمية π التي تمثل خط النقل المتوسط

التيار المار في المكثف عند طرف الاستقبال هو $V_R Y/2$ وبالتالي فإن التيار المار في معاوقة خط النقل الكهربائي هو $(I_R + V_R Y/2)$ لذلك فإن:

$$V_s = \left(V_R \frac{Y}{2} + I_R\right) Z + V_R$$

$$V_s = \left(\frac{ZY}{2} + 1\right) V_R + ZI_R \qquad (12)$$

لإيجاد قيمة I_s فإن

$$I_s = V_s \frac{Y}{2} + V_R \frac{Y}{2} + I_R$$

وبالتعويض عن قيمة V_s من المعادلة (12) فإن قيمة I_s تصبح:

$$I_s = V_R Y\left(1 + \frac{ZY}{4}\right) + \left(\frac{ZY}{2} + 1\right) I_R \qquad (13)$$

طبقا للمعادلات العامة فإن الثوابت العامة بالنسبة لخط النقل المتوسط تكون:

$$A = D = \frac{ZY}{2} + 1 \quad , \quad , \quad B = Z \quad C = Y\left(1 + \frac{ZY}{4}\right)$$

ومن المعادلة رقم (11) يمكننا استنتاج أن:

$$\begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D & -B \\ -C & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} \qquad (14)$$

نسبة تنظيم الجهد علي الخط

$$\%regulation = \frac{|V_s|/|A| - |V_{R,FL}|}{|V_{R,FL}|} x100 \qquad (15)$$

مثال (2): خط نقل ثلاثي الأوجه جهد 345 kV وتردد 60Hz وطول 130km المقاومة لكل وجه هي 0.036Ω لكل كيلومتر والمحاثة لكل وجه هي 0.8mH لكل كيلومتر. مكثف

التوازي 0.0112μF لكل كيلومتر. الحمل عند طرف الاستقبال مقداره 270MVA عند معامل قدرة 0.8 متأخر عند جهد 325 kV. استخدم نموذج الخط المتوسط لإيجاد الجهد والقدرة عند طرف الإرسال للخط وكذلك تنظيم الجهد.

الحل:

$$V_{R,ph} = \frac{325\angle 0}{\sqrt{3}} = 187.639\angle 0$$

$$I_R = \frac{270x10^3 \angle -\cos^{-1} 0.8}{3x187.639\angle 0} = 479.645\angle -36.87$$

$$Z = (r + j\omega L)\, l = (0.036 + j2x\pi x60x0.8x10^{-3})\ x130 = 4.68 + j39.207$$

$$Y = \omega C l = 2x\pi x60x0.0112x10^{-6}x130 \ = \ 5.489x10^{-4} \ \text{mho}$$

$$A = D = 1 + \frac{ZY}{2} = 1 + \frac{(4.68 + j39.207)xj5.489x10^{-4}}{2} = 0.989 + j1.284x10^{-3}$$

$$B = Z = 4.68 + j39.207$$

$$C = Y\left(1 + \frac{ZY}{4}\right) = j5.489x10^{-4}\left(1 + \frac{(4.68 + j39.207)(j5.489x10^{-4})}{4}\right)$$

$$C = 3.525x10^{-7} + j5.459x10^{-4}$$

$$V_s = AV_R + BI_R$$

$$V_s = (0.989 + j1.284x10^{-3})x187.639\angle 0x10^3 + (4.68 + j39.207)x479.645\angle -36.87$$

$$V_s = 198699.67 + j13937.83 = 199187.908\angle 4 \quad V = 1.99.19 \quad kV$$

$$V_{s,L-L} = \sqrt{3}V_s = \sqrt{3}x199.19 = 345 \quad kV$$

$$I_s = CV_R + DI_R$$

$$I_s = (3.525x10^{-7} + j5.459x10^{-4})x187.639\angle 0x10^3 + (0.989 + j1.28x10^{-3})x479.645\angle -36.87$$

$$I_s = 380 - j181.785 = 421.243\angle -25.56 \quad A$$

$$S_s = 3V_s I_s^* x10^{-3} = 3x199.188\angle 4x421.244\angle 25.56x10^{-3} = 251.72\angle 29.56$$

$$S_s = 218.93 + j124.22$$

$$\%reg. = \frac{|V_s|/|A| - V_R}{V_R} x100 = \frac{(345/0.989) - 325}{325} x100 = 7.3\%$$

مثال (3) : خط نقل ثلاثي الأوجه جهد 345 kV وتردد 60Hz وطول 130km معاوقة التوإلى لكل وجه $Z=0.036+j0.3\ \Omega/km$ ومسامحة التوازي $Y=j4.22x10^{-6}$ mho/km جهد الإرسال 345kV والتيار عند طرف الإرسال 400A متأخر. استخدم نموذج الخط المتوسط لإيجاد الجهد والتيار والقدرة عند طرف الاستقبال للخط وكذلك تنظيم الجهد.

الحل:

$$V_{s,ph} = \frac{345\angle 0}{\sqrt{3}} = 199.186\angle 0$$

$$I_S = 400\angle -\cos^{-1} 0.95 = 400\angle -18.2$$

$$A = D = 1 + \frac{ZY}{2} = 1 + \frac{(0.036 + j0.3)xj4.22x10^{-6}x(130)^2}{2} = 0.989 + j1.2$$

$$A = D = 0.989\angle 0.07$$

$$B = Z = (0.036+j0.3)\ x\ 130 = 4.68 + j39$$

$$C = Y\left(1 + \frac{ZY}{4}\right) = j4.22x10^{-6}x130\left(1 + \frac{(4.68 + j39)(j4.22x10^{-6}x130)}{4}\right)$$

$$C = -3.521x10^{-7} + j5.457x10^{-4} = 5.457x10^{-4}\angle 90.04$$

$$\begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D & -B \\ -C & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix}$$

$$V_R = DV_s - BI_s = 0.989\angle 0.07x199.186\angle 0 - 39.279\angle 83.16x10^{-3}x400\angle -18.19$$

$$V_R = 197.055\angle 0.07 - 15.712\angle -64.97 = 190.407 - j13.995 = 190.921\angle -4.2$$

$$V_{R,L-L} = \sqrt{3}V_R = \sqrt{3}x190.921 = 330.685 \quad kV$$

$$I_R = -CV_s + AI_s = -5.457x10^{-4}\angle 90.04 x 199.186x10^3\angle 0 + 0.989\angle 0.07 x 400\angle -18.19$$

$$I_R = -108.689\angle 90.04 + 395.72\angle -18.12 = 376.171 - j231.761 = 441.834\angle -31.64$$

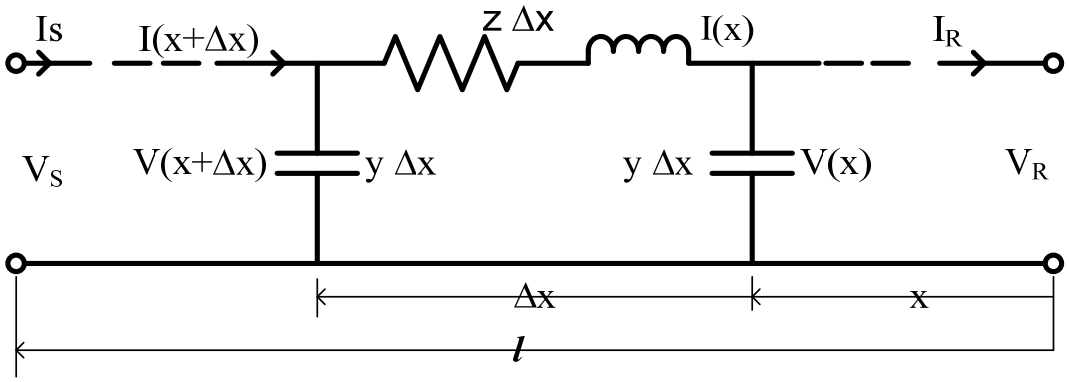
$$S_R = 3V_R I_R^* x10^{-3} = 3x190.921\angle -4.2 x 441.834\angle 31.64 x10^{-3} = 253.066\angle 27.44 \quad MVA$$

$$S_R = 224.594 + j116.618$$

$$\%reg. = \frac{|V_s|/|A| - V_R}{V_R} x100 = \frac{(345/0.989) - 330.685}{330.685} x100 = 5.46\%$$

(3- 4- 3) خطوط النقل الطويلة Long Transmission Lines

في خطوط النقل الأطول من 250km ومتطلبات الدقة الأكثر في تحليل هذه الخطوط لابد من استخدام العناصر الموزعة توزيعا منتظما علي طول خط النقل بدلا من استخدام العناصر المجمعة كما في خطوط النقل القصيرة والمتوسطة. ويبين شكل (16) وجه واحد لخط النقل موزع عليه عناصر الخط توزيعا منتظما.



شكل (16) وجه واحد لخط النقل موزع عليه عناصر الخط توزيعا منتظما

باعتبار جزء صغير من الخط قدره ΔX علي بعد مسافة x من طرف الاستقبال للخط الكهربائي. ويظهر الجهد الطوري والتيار الطوري في طرفي هذا الجزء الصغير كدالة في المسافة. وبتطبيق قانون كيرشوف للجهود:

$$V(x + \Delta x) = V(x) + z\Delta x I(x) \qquad (16)$$

$$\frac{V(x+\Delta x)-V(x)}{\Delta x}=zI(x) \qquad (17)$$

عندما $\Delta x \to 0$ فإن

$$\frac{dV(x)}{dx}=zI(x) \qquad (18)$$

وبتطبيق قانون كيرشوف للتيارات

$$I(x+\Delta x)=I(x)+y\Delta xV(x+\Delta x) \qquad (19)$$

$$\frac{I(x+\Delta x)-I(x)}{\Delta x}=yV(x+\Delta x) \qquad (20)$$ أو

عندما $\Delta x \to 0$ فإن

$$\frac{dI(x)}{dx}=yV(x) \qquad (21)$$

بتفاضل معادلة (18) والتعويض من معادلة (21) يمكن الحصول على:

$$\frac{d^2V(x)}{dx^2}=z\frac{dI(x)}{dx}=zyV(x) \qquad (22)$$

بأخذ $\gamma^2=zy$ يمكن الحصول علي المعادلة التفاضلية من الدرجة الثانية التالية:

$$\frac{d^2V(x)}{dx^2}-\gamma^2V(x)=0 \qquad (23)$$

وحل هذه المعادلة التفاضلية هو:

$$V(x)=A_1e^{\gamma x}+A_2e^{-\gamma x} \qquad (24)$$

من المعادلة (18) فإن قيمة التيار:

$$I(x)=\frac{1}{z}\frac{dV(x)}{dx}=\frac{\gamma}{z}(A_1e^{\gamma x}-A_2e^{-\gamma x})$$

$$I(x)=\sqrt{\frac{y}{z}}(A_1e^{\gamma x}-A_2e^{-\gamma x}) \qquad (25)$$

$$I(x)=\frac{1}{Z_c}(A_1e^{\gamma x}-A_2e^{-\gamma x}) \qquad (26)$$

حيث إن Z_c معاوقة الدفعة للخط الكهربائي (surge impedance)

بوضع القيم الابتدائية أي عندما x=0 يكون الجهد $V(x)=V_R$ وكذلك $I(x)=I_R$ في المعادلتين (24) و (26) وذلك لإيجاد قيم A_1 و A_2 كالتالي:

$$A_2 = \frac{V_R - Z_c I_R}{2} \qquad \text{و} \qquad A_1 = \frac{V_R + Z_c I_R}{2} \qquad (27)$$

وبالتعويض في المعادلتين (24) و (26) فإن:

$$V(x) = \frac{V_R - Z_c I_R}{2} e^{\gamma x} + \frac{V_R + Z_c I_R}{2} e^{-\gamma x} \qquad (28)$$

$$I(x) = \frac{\frac{V_R}{Z_c} - I_R}{2} e^{\gamma x} - \frac{\frac{V_R}{Z_c} + I_R}{2} e^{-\gamma x} \qquad (29)$$

ويمكن إعادة ترتيب معادلات الجهد والتيار كالتالي:

$$V(x) = \frac{e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}}{2} V_R + Z_c \frac{e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}}{2} I_R \qquad (30)$$

$$I(x) = \frac{1}{Z_c} \frac{e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}}{2} V_R + \frac{e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}}{2} I_R \qquad (31)$$

ويمكن كتابة المعادلتين السابقتين بالدوال الزائدية كالتالي:

$$V(x) = \cosh(\gamma x) V_R + Z_c \sinh(\gamma x) I_R \qquad (32)$$

$$I(x) = \frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma x) V_R + \cosh(\gamma x) I_R \qquad (33)$$

بوضع $x=l$ فإن $V(l)=V_s$ و $I(l)=I_s$ ويمكن إعادة كتابة المعدلتين السابقتين كالتالي:

$$V_s = \cosh(\gamma l) V_R + Z_c \sinh(\gamma l) I_R \qquad (34)$$

$$I_s = \frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma l) V_R + \cosh(\gamma l) I_R \qquad (35)$$

ويمكن إعادة كتابة معادلتي الجهد والتيار بثوابت ABCD

$$\begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \qquad (36)$$

حيث

$$A = \cosh(\lambda l) \qquad \text{و} \qquad B = Z_c \sinh(\lambda l)$$

$$C = \frac{1}{Z_c} \sinh(\lambda l) \qquad \text{و} \qquad D = \cosh(\lambda l)$$

أسئلة

(1) اذكر أهم الموصلات الكهربائية المستخدمة في خطوط النقل الهوائية

(2) اذكر مميزات وعيوب كل من خط النقل المزدوج وخط النقل ذو الدائرة المفردة

(3) اذكر أهم مميزات موصل الحزمة

(4) اذكر أهم أنواع الأبراج الكهربائية من حيث المادة المصنع منها ومن حيث الاستخدام

(5) خط نقل ثلاثي الأوجه طوله 20km يغذي حمل مقداره 10MW عند جهد مقداره 11kV وبمعامل قدرة 0.707 متأخر عند طرف الاستقبال. المقاومة والممانعة الحثية للخط لكل كيلومتر لكل وجه هما 0.02Ω و 0.07Ω علي الترتيب. احسب نسبة تنظيم الجهد وكفاءة خط النقل.

(6) خط نقل قصير ثلاثي الأوجه المقاومة الكلية للخط 5.31Ω والحث الذاتي الكلي 0.0176H يغذي حمل مقداره 3.6MW بمعامل قدرة 0.8 متأخر فإذا كان الجهد عند طرف الإرسال مقداره 33kV بتردد 50Hz. احسب تيار الخط وجهد الاستقبال ومعامل القدرة عند طرف الاستقبال وكفاءة خط النقل.

(7) خط نقل ثلاثي الأوجه طوله 100km يغذي حمل مقداره 75MW عند جهد مقداره 132kV وبمعامل قدرة 0.8 متأخر عند طرف الاستقبال. المقاومة والممانعة الحثية للخط لكل كيلومتر لكل وجه هما 0.28Ω و 0.63Ω علي الترتيب بينما المسامحة السعوية لكل كيلومتر $4x10^{-6}S$. احسب الجهد والتيار ومعامل القدرة عند طرف الإرسال.

(8) خط نقل ثلاثي الأوجه طوله 100km يغذي حمل مقداره 20MW عند جهد مقداره 66kV وتردد 50Hz وبمعامل قدرة 0.9 متأخر عند طرف الاستقبال للخط الكهربائي. المقاومة والممانعة الحثية للخط لكل كيلومتر لكل وجه هما 0.1Ω و 0.5Ω علي الترتيب والمسامحة السعوية لكل وجه لكل كيلومتر $10x10^{-6}S$. احسب نسبة تنظيم الجهد وكفاءة خط النقل.

الوحدة الرابعة

عوازل خطوط النقل الكهربائية

عوازل خطوط النقل الكهربائي

تلعب العوازل الكهربائية دورا هاما وحيويا في التشغيل الآمن والناجح لخطوط النقل والتوزيع إذ تستخدم لتثبيت موصلات خطوط النقل الكهربائي علي أجسام الأبراج الحاملة لها ولمنع تسرب التيار الكهربائي للأرض عند نقاط التثبيت مع جسم البرج. لذلك لابد أن تتوفر بها الخصائص الهامة والضرورية التالية:

(ا) قوية جدا ميكانيكيا.

(ب) شدة العزل لها عالية جدا.

(ت) توفر مقاومة عزل عالية جدا ضد تيار التسريب.

(ث) خالية تماما من الشوائب أو الشروخ الداخلية.

(ج) غير مسامية.

(ح) غير قابلة لنفاذ الغازات أو السوائل إلى داخل المادة.

(خ) لا تتأثر بتغير درجة الحرارة المحيطة.

(د) مادة مقاومة للانهيار الداخلي (puncture) و كذلك لانهيار السطح الكهربائي (flashover).

وباستعراض أسباب انهيار العوازل الصلبة، نجد أن السطح هو المسبب الرئيس لانهيار تلك العوازل ويمكن أن يحدث بين الموصلات الكهربائية لخطوط النقل والأرض- أي بين الموصل ومسمار ربط العازل- كما يحدث نتيجة الحرارة العالية جدا الناتجة عن الشرارة الكهربائية.

(4- 1) المواد التي تصنع منها العوازل الكهربائية

البورسلين هي المادة شائعة الاستعمال لكن بالإضافة للبورسلين يستخدم الزجاج الملدن و الاسيتايت.

(أ) **عوازل البورسلين**: يصنع البورسلين من الطينة الصينية والتي تنتج في الطبيعة في صورة سيليكات الألمنيوم وتخلط مع مادة الكاولين البلاستيكية ومادة الكوارتز. يسخن الخليط داخل قمينة لدرجة الحرارة المطلوبة حيث ينتج عازل صلب وناعم ومصقول وخال من المسامية. إن .تصنيع مادة العازل عند درجة حرارة منخفضة يحسن من

خصائصها الميكانيكية ولكن المادة تصبح مسامية وتتضرر عند استخدامها. وعند تصنيعها في درجات الحرارة العالية جدا تقل مسامية المادة ولكنها تصبح قابلة للكسر لذلك تختار درجة الحرارة المناسبة للتوازن بين القوة الميكانيكية المطلوبة ومسامية المادة والتي تؤثر علي شدة العزل الكهربائي. وتكون شدة عزل البورسلين المستعمل في عوازل خطوط النقل في حدود 60 كيلو فولت/سم وقوة الضغط والشد الميكانيكي له في حدود 70,000 كيلو جرام/سم^2 و 500 كيلو جرام/سم^2.

(ب) **العوازل الزجاجية**: تستخدم العوازل الزجاجية في عمليات العزل الكهربائي حتى الجهود المتوسطة. والزجاج المستخدم كعوازل له المميزات التالية:

(1) شدة عزل عالية جدا في حدود 140 كيلو فولت/سم من سمك المادة.

(2) عندما يقسي جيدا يكون للمادة مقاومية عالية جدا.

(3) له معامل تمدد حراري منخفض.

(4) عازل شفاف لذلك فإن أية شوائب أو فقاعات غازية أو شروخ يمكن بسهولة معرفتها.

(5) مادته متجانسة جدا.

(6) رخيص السعر مقارنة بالبورسلين.

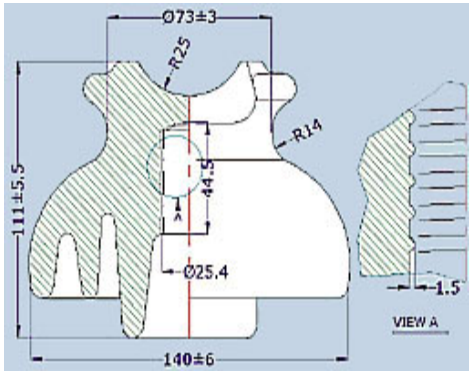
(ت) **عوازل الإسيتايت**: الإسيتايت هو سيليكات الماغنسيوم الموجودة بنسب مختلفة لأوكسيد الماغنسيوم والسيليكا في أجزاء كثيرة من العالم. والإسيتايت لها قوة شد ميكانيكية عالية بالمقارنة بعازل البورسلين ويمكن استعمالها بكفاءة في أبراج الشد والتي تكون عند الدورانات الحادة للخط الكهربائي.

(4- 2) أنواع عوازل خطوط النقل الكهربائية

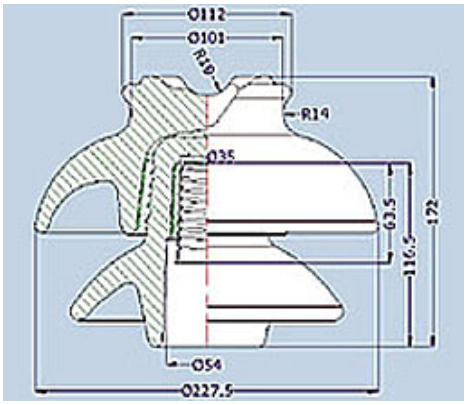
(4- 2- 1) العوازل المسمارية Pin type insulator

يستخدم في الجهود المنخفضة والجهود المتوسطة لتثبيت الموصلات الكهربائية. وتستخدم عادة قطعة واحدة من العازل ويوضح شكل (1a, 1b and 1c) العوازل المسمارية المستعملة في تثبيت الخطوط الهوائية ذات الجهد المتوسط. ولزيادة طول مسار التسرب يتم عمل مظلة أمطار أو أثنتين أو ثلاثة بالعازل. هذه المظلات تصمم بحيث عندما تتبلل العوازل (يصبح سطحها

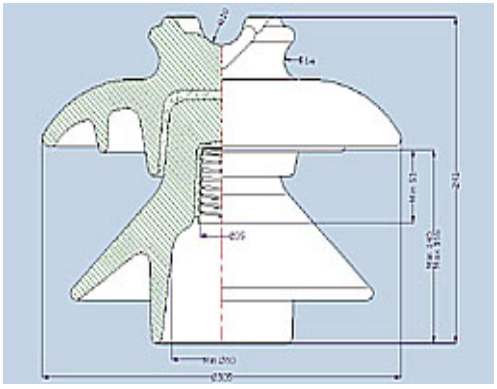
تقريبا موصل) تكون هناك أماكن كافية بسطح العازل جافة توفرها المظلات الداخلية بالعازل.



شكل (1a) قطعة عازل مسماري جهد 11 كيلو فولت



شكل (1b) قطعة عازل مسماري جهد 25 كيلو فولت



شكل (1c) عازل مسماري من جزأين جهد 33 ك ف

يتم قلوظة العازل المسماري ويتم ربطه بواسطة مسامير من الحديد المجلفن.

(4- 2- 2) عوازل التعليق Suspension Insulators

مع زيادة الجهد يصبح العازل المسماري ثقيل ومعقد في التركيب وتزداد تكلفته وأيضا يكون تغيير القطع التالفة مكلف جدا لذلك يكون استخدام العازل المسماري غير اقتصادي للجهود الأعلى.

وللجهود العالية والفائقة تستخدم عوازل التعليق حيث يربط عدد من الوحدات علي التوإلى برابط معدني لتكوين سلسلة وتعلق موصلات الخط الكهربائي في نهاية سلسلة العوازل.

مميزات عوازل التعليق:

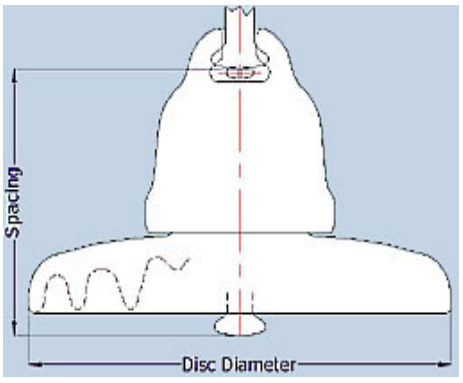
(1) تصمم كل وحدة من عوازل التعليق لجهد 11 ك ف، لذلك فبتوصيل عدد من الوحدات تتكون سلسلة العوازل والتي يمكن تصميمها علي أي جهد مطلوب.

(2) عند انهيار إحدى الوحدات بالسلسلة يمكن استبدالها بسهولة وبأقل تكلفة.

(3) تقل الإجهادات الميكانيكية علي السلسلة لمرونة تعليق الخط الكهربائي وإمكانية تأرجحه وتكون الإجهادات من قوى الشد فقط في هذه الحالة.

(4) عند استخدام سلسلة العوازل مع الأبراج المعدنية تكون موصلات الخط الكهربائي أقل تأثرا بالصواعق الكهربائية حيث إن ارتفاع الموصلات أقل من الذراع المعدنية للبرج والمؤرضة.

(5) استخدام أكثر من موصل لكل وجه من الخط الكهربائي لا تمثل أية مشكلة ولا تكلف أكثر.



شكل (2) وحدة عازل تعليق لخطوط النقل الكهربائي

تكون عوازل التعليق من أقراص البورسلين التي تجوف من الأسفل لزيادة مسافة الانهيار السطحي للعازل flashover distance وعلى أعلى العازل يوجد غطاء من حديد الزهر المملوء

بالإسمنت وفي تجاويف العازل مسمار من الصلب المجلفن. يثبت طرف مسمار الصلب في تجويف الغطاء الصلب للعازل الذي يليه. والعيب الرئيس لهذا النوع من العوازل هو أن التمدد التكعيبي (الثلاثي) للمواد الثلاثة الحديد والبورسلين والإسمنت مختلف ولا يوجد احتياط لتمددهم وبذلك يمكن أن ينهار العازل.ويبين شكل2 وحدة من النوع المستخدم للغطاء الإسمنتي والمستخدمة بكثرة لتعليق موصلات خطوط النقل الكهربائية.

(4- 2- 3) عوازل الإجهاد Stress Insulators

عند طرف نهاية الخطوط الكهربائية أو وجود دورانات للخط أو منحنى حاد للخط الكهربائي أو عبور الخط الكهربائي لنهر أو ما شابه يتعرض الخط لإجهادات ميكانيكية عالية جدا. وفي الجهود المنخفضة يمكن استخدام عوازل القيد أو البكرة أما في خطوط الجهد العال فتستخدم عوازل الإجهاد والتي تتكون من عوازل تعليق وهي عبارة عن خطين أو ثلاثة من عوازل التعليق متوازيين ومرتبطين ببعضهما.

(4- 3) انهيار عوازل خطوط النقل

أسباب انهيار العوازل هي:

1- **كسر العازل:** السبب الرئيس لكسر العازل هو الإجهادات الناتجة في عازل البورسلين من خلال التمدد غير متساوي و الانكماش الناتج في الإسمنت والبورسلين والصلب والذي تتسبب فيه الحرارة الموسمية والبرودة والجفاف وتسخين العازل. ولتجنب مثل هذا الكسر أدخلت تحسينات كثيرة علي العازل أحيانا بوضع وسادة بين الطبقات ومسمار التثبيت الصلب للسماح بمثل هذا التمدد.
2- **عيوب مادة العزل:** إذا كان بمادة العزل أي عيب، مثل وجود فراغات أو وجود شوائب، بأي مكان بها فإن هذا العيب يؤدي لكسر هذا العازل.
3- **مسامية مادة العزل:** لو صنعت مادة البورسلين للعازل تحت درجات حرارة منخفضة فإن البورسلين يصبح مساميا ونتيجة لهذا يمتص البورسلين الرطوبة من الهواء ومن الإسمنت وتقل بصورة خطيرة شدة عزله ويبدأ تيار التسريب في السريان خلال العازل مما يؤدي لانهيار المادة العازلة.
4- **الصقل غير الكافي:** إذا لم يتم صقل العازل بصورة كافية فإن الماء المتبقي على سطح العازل نتيجة الأمطار أو الندى يمكن أن يؤدي لتراكم الغبار على السطح مكونا

مناطق موصلة كهربائياً تتسبب في خفض مسافة شرارة السطح للعازل والتي تتسبب في انهيار العازل.

5- **شرارة السطح:** لو حدثت شرارة على سطح العازل فإنها يمكن أن تؤدي إلى تسخين العازل تسخينا زائدا وبالتالي تؤدي لانهياره.

6- **الإجهاد الميكانيكي:** في بعض الأحيان يمكن أن يؤدي شد العازل إلى إجهاد العازل ميكانيكيا (إذا كانت مادة العزل بها عيب) وبالتالي تؤدي إلى كسره.

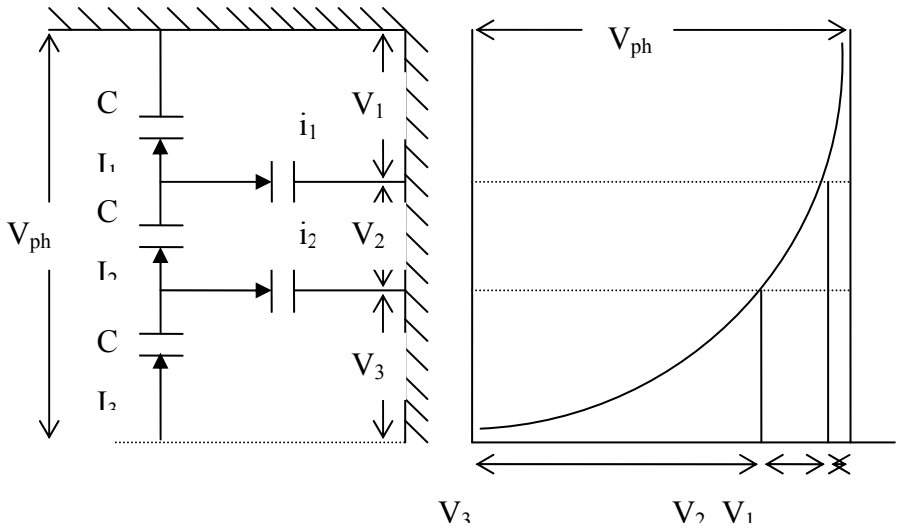
7- **القصر:** أحيانا تتسبب الطيور الضخمة في حدوث شرارة ومن ثم يمكن أن يؤدي ذلك لانهيار العازل (وهذا محتمل فقط إذا كانت المسافة بين الموصلات قليلة).

(4-4) توزيع الجهد على سلسلة العوازل المعلقة

نفترض أن هناك سلسلة عوازل معلقة تحتوي علي ثلاث وحدات عازلة، جزء البورسلين ينحصر بين معدني الربط لذلك فهي تكون مكثف سعته C فاراد وتسمى السعة المتبادلة . بالإضافة لهذه السعة هناك سعة بين كل معدن ربط والذراع المعدني للبرج أي إن بين معدن ربط العوازل والأرض وفي هذا المكثف يكون الهواء هو العازل. وهنالك أيضا سعة بين معدن الربط وموصل الخط ولكن قيمتها صغيرة جدا ويمكن إهمالها.

بفرض أن m هي النسبة بين السعة للأرض إلى السعة الذاتية لوحدة العزل

فإن m = (السعة للأرض / C) السعة للأرض = mC فاراد



شكل (3) توزيع الجهود علي وحدات سلسلة العوازل

نفترض أن الجهد الواقع علي وحدة العازل العلوي هو V_1, والتي تليها V_2 والثالثة V_3 كما بشكل (3) فإن قيم التيارات تكون كالتالي:

$$I_1 = [V_1/(1/\omega C)] = V_1\omega C \quad (1)$$
$$I_2 = [V_2/(1/\omega C)] = V_2\omega C \quad (2)$$
$$I_3 = [V_3/(1/\omega C)] = V_3\omega C \quad (3)$$
$$i_1 = [V_1/(1/\omega mC)] = V_1\omega mC \quad (4)$$
$$i_2 = [(V_1+V_2)/(1/\omega mC)] = (V_1+V_2)\,\omega mC \quad (5)$$

بتطبيق قانون كيرشوف فإن:

$$I_2 = I_1 + i_1 \quad (6)$$

وبالتعويض عن قيمتي I_1 و I_2 و i_1 من المعادلات (1) و (2) و (4) في المعادلة (6)

$$\therefore V_2\omega C = V_1\omega C + mV_1\omega C = V_1\omega C(1+m) \quad (7)$$

وبقسمة طرفي المعادلة علي ωC تصبح:

$$\therefore V_2 = V_1\,(1+m) \quad (8)$$

بتطبيق قانون كيرشوف فإن:

$$I_3 = I_2 + i_2 \quad (9)$$

بالتعويض من المعادلات (2) و (3) و (5) في المعادلة (9)

$$V_3\omega C = V_2\omega C + (V_1+V_2)\omega mC$$
$$= V_1\omega C + V_2\,\omega C\,(1+m)$$

وبقسمة طرفي المعادلة علي ωC فإن:

$$V_3 = V_1 + V_2\,(1+m)$$

وبالتعويض عن قيمة V_2 من المعادلة رقم (8) فإن:

$$V_3 = V_1 + V_1(1+m)(1+m)$$
$$\therefore V_3 = V_1\,(1 + 3m + m^2) \quad (10)$$

وحدة العازل في السلسلة المجاورة للموصل الكهربائي يقع عليها أكبر فرق جهد وبالتالي فهي معرضة للإجهاد الكهربائي العال والذي يمكن أن يؤدي إلى انهيارها. فكفاءة السلسلة هي النسبة بين الجهد الكلي الواقع علي السلسلة V_{ph} وعدد الوحدات (n) مضروبا في الجهد الواقع علي الوحدة المجاورة للموصل الكهربائي.

$$\eta = \frac{V_{ph}}{nV_n} x100\% \quad (11)$$

(4- 5) طرق تحسين كفاءة السلسلة

(1) تقليل قيمة m : بالنظر في المعادلات (8) و (10) نلاحظ أنه عندما تقترب قيمة m إلى الصفر فإن الجهد علي وحدات العازل تتساوى تقريبا. لذلك لكي نقلل السعة للأرض

فإن المسافة بين سلسلة العوازل و البرج المعدني لابد أن تزيد أو بتعبير آخر زيادة ذراع البرج. لكن هناك حدود لزيادة ذراع البرج لذلك فإن هذه الطريقة غير عملية.

(2) **بتدرج العوازل** : إذا قمنا بتدرج في قيم السعة التبادلية للعوازل بحيث تكون الوحدة العليا في سلسلة العوازل لها أقل سعة والسعة التبادلية للوحدة السفلى لها أكبر سعة يمكن أن نساوي الجهود على وحدات السلسلة. وهذه الطريقة غير عملية حيث تكون الوحدات غير منتظمة ومتغيرة وتستخدم وحدات مختلفة بالسلسلة الواحدة.

(3) **استخدام حلقة الحماية (guard ring) :**

يمكن مساواة الجهد الواقع علي وحدات العوازل بالسلسلة باستخدام حلقة الحماية وهي حلقة معدنية لها قطر كبير وتوصل كهربائياً بالخط الكهربائي وتحيط بالوحدة السفلي من سلسلة العوازل. وهذه الحلقة تزيد السعة المكثفات بين الروابط المعدنية بالسلسلة و الخط الكهربائي والتي أهملت سابقا.

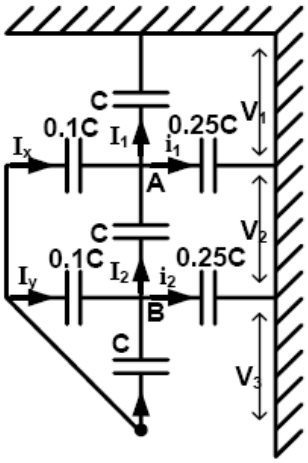
شكل (4) حلقة الحماية في نهاية السلسلة

<u>أمثلة محلوله:</u>

مثال 1 : سلسلة من العوازل مكونة من 3 وحدات احسب:

(أ) الجهد علي كل وحدة منسوبا إلى جهد الوجه للخط الكهربائي.

(ب) كفاءة السلسلة.



شكل 5

الحل

$$I_1 = V_1\,\omega C$$

$$i_1 = 0.25\,V_1\,\omega C$$

$$i_x = 0.1(V_2+V_3)\omega C$$

أيضا

$$I_2 = V_2\,\omega C$$

$$i_2 = 0.25(V_1+V_2)\omega C$$

$$i_y = 0.1\,V_3\omega C$$

$$I_3 = V_3\omega C$$

وبتطبيق قانون كيرشوف عند النقطة A

$$I_2 + i_x = I_1 + i_1$$

وبتطبيق قانون كيرشوف عند النقطة A

$$I_2 + i_x = I_1 + i_1$$

I_2 =

$$0.1\omega C(V_2+V_3)=V_1\omega C+0.25V_1\omega C$$

$$V_2\omega C+0.1\omega C(V_2+V_3)=V_1\omega C+0.25V_1\omega C$$

$$V_2+0.1V_2+0.1V_3=1.25V_1$$

$$1.25V_1-1.1V_2-0.1V_3=0 \qquad (12)$$

وبتطبيق قانون كيرشوف عند النقطة B

$$I_3 + i_y = I_2 + i_2$$

$$V_3\omega C+0.1V_3\omega C=V_2\omega C+0.25(V_1+V_2)\omega C$$

$$\therefore 1.1V_3=0.25V_1+1.25V_2$$

$$\therefore 0.25V_1+1.25V_2-1.1V_3=0 \qquad (13)$$

بضرب المعادلة (12) في 11 تصبح:

$$13.75V_1-12.1V_2-1.1V_3=0 \qquad (14)$$

بطرح المعادلة (14) من المعادلة (13) نجد أن:

$$13.5V_1-31.35V_2=0$$

$$\therefore V_1=31.35V_2/13.5 = 0.988V_2$$

بضرب المعادلة (13) في 5

$$1.25V_1+6.25V_2-5.5V_3=0 \qquad (15)$$

بطرح المعادلة (15) من المعادلة (12) نجد أن:

$$-7.35V_2+5.4V_3=0$$

$\therefore V_3=7.35V_2/5.4 = 1.362V_2$

لكن $V=V_1+V_2+V_3$

$= 0.988V_2+V_2+1.362V_2$

$= 3.35V_2$

أو $\therefore V_2 =0.2985V$

$\therefore V_1= 0.2985x0.988V =0.295V$

$\therefore V_3=1.362x0.2985V=0.4065V$

لذلك فإن $V_1=29.5\%$

$V_2=29.85\%$

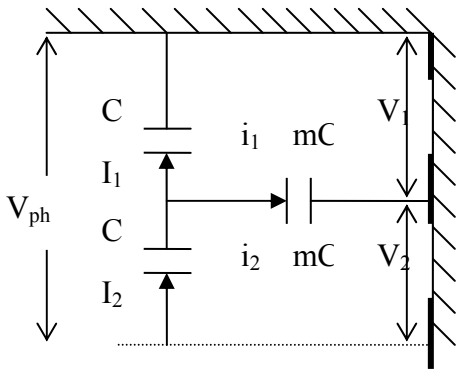
$V_3=40.65\%$

كفاءة السلسلة=η حيث إن:

$$\eta = \frac{V_{ph}}{3V_3} x100\% = \frac{V}{3x0.4065V} x100\% = 82.1\%$$

مثال 2: احسب أقصى جهد تتحملها سلسلة عوازل إذا كان أقصى جهد لكل وحدة من السلسلة لا تزيد عن 17 ك ف. وكانت السعة بين كل وصلة معدنية والأرض 20% من السعة الذاتية للعازل. إذا كانت سلسلة العوازل مكونة من (أ) وحدتين (ب) ثلاث وحدات

الحل $m = 20\% = 0.2$



(أ) $V_2=V_1(1+m)$

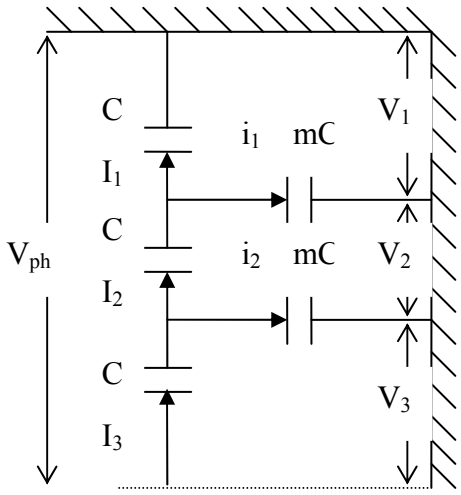
$17 = V_1(1+0.2)$

$V_1 = 17 /1.2 = 14.17$ kV

$V_{ph} = V_1 + V_2 = 14.17 + 17$ kV

$=31.17$

$\therefore V = 17/0.5454 = 31.16$ kV



(ب) $V_3 = V_2(1+3m+m^2)$

$17=V_2(1+3x0.2+(0.2)^2)$

$V_2 = 17 / 1.64 = 10.366$ kV

$V_2 = V_1 (1+m)$

$10.366 = V_1(1+0.2)$

$V_1 = 10.366 / 1.2 = 8.638$ kV

$V_{ph} = V_1 + V_2 + V_3$

$V_{ph} = 8.638 + 10.366 + 17 = 36.004$ kV

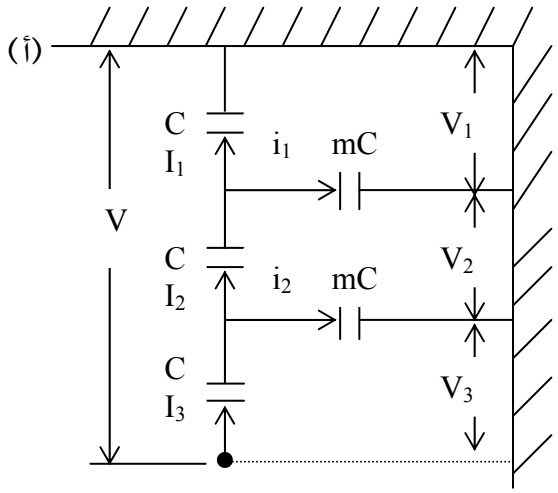
مثال 3: خط نقل ثلاثي الأوجه مثبت بواسطة سلسلة عوازل تحتوي علي ثلاث وحدات عازل. الجهد على العازل الأول والثاني هو 8 و 11 ك ف علي التوإلى. احسب:

(أ) النسبة بين السعة بين الرابط المعدني والأرض إلى السعة الذاتية للعازل

(ب) جهد الخط

(ت) كفاءة السلسلة

الحل :



$V_2=(1+m)V_1$

$11= (1+m)\ 8$

$(1+m) = 11/8 = 1.375$

$\therefore m = 0.375$

(ب) $V_3 = (1+3m+m^2)V_1$

$= (1+1.125+0.14)x8$

$= 18.12$ kV

جهد الوجه هو V

$V=V_1+V_2+V_3$

$= 8 + 11 + 18.12$

$= 37.12$ kV

جهد الخط = $\sqrt{3}$ x جهد الوجه = $\sqrt{3}$ x 37.12 = 64.28 kV

(ث) كفاءة السلسلة η

$\eta = [V/(3xV_3)]x100$

$= [37.12/(3x18.12)]x100$

$= 68.28\%$

أسئلة

1- اذكر متطلبات عوازل خط النقل الهوائي
2- اذكر المواد التي تصنع منها عوازل خط النقل الهوائي
3- اذكر أنواع عوازل خط النقل الهوائي
4- اذكر مميزات عوازل التعليق لخط النقل الهوائي
5- اذكر طرق زيادة كفاءة سلسلة العوازل لخط النقل الهوائي
6- خط نقل ثلاثي ثبت بثلاثة عوازل تعليق متماثلة إذا كان الجهد علي الوحدة الثالثة المجاورة لخط النقل الكهربائي 20kV والنسبة بين سعة المكثف للأرض وسعة وحدة العزل 0.1 أوجد الجهد على سلسلة العوازل وكذلك كفاءة سلسلة العوازل.
7- سلسلة عوازل مكونة من ثلاثة عوازل متماثلة النسبة بين سعة المكثف للأرض وسعة وحدة العزل 0.17 إذا كان أقصى جهد لوحدة العزل لا تزيد عن 35kV احسب أقصى جهد تعمل عنده سلسلة العوازل.
8- خط نقل ثلاثي مثبت بثلاثة عوازل متماثلة الجهد علي الوحدة الأولى والثانية هي 8kV و 11kV علي الترتيب احسب:

(أ) جهد الخط (ب) النسبة بين سعة المكثف للأرض وسعة وحدة العزل

(ج) كفاءة سلسلة العوازل

9- موصلات قضبان توزيع لمحطة محولات جهد عال مفتوحة مثبته بعوازل تثبيت، كل وحدة من العوازل تتكون من ثلاث وحدات عازلة تعليق مثبتة على بعضها والجهد عبر العازل الثاني 21.6kV والجهد عبر التي تليها 24kV إذا كان النظام ثلاثي الأوجه أوجد الجهد بين قضبان التوزيع.

الوحدة الرخامسة

الكيابل الكهربائية

الكيابل الكهربائية

تستخدم الكيابل الأرضية و خطوط النقل الهوائية في نقل القدرة الكهربائية من مناطق التوليد إلى أماكن الاستهلاك. وتعتبر الخطوط الهوائية الأكثر استخداما في نقل القدرة الكهربائية حيث إن تكلفتها أقل بكثير جدا من تكلفة الكيابل الأرضية نظرا للاعتبارات التالية:

- تكلفة الموصل الكهربائي : السعة الأمبيرية لموصل خط النقل الهوائي أكبر من السعة الأمبيرية لموصل الكيابل الكهربائية - نظرا لاعتبارات درجة الحرارة- وبالتالي فإن مساحة مقطع الموصل في الكيابل الكهربائية أكبر منها في خطوط النقل الهوائية عند نفس القدرة المنقولة ونفس مادة الموصل لذلك فتكلفة موصل الكيبل أكبر من تكلفة موصل خط النقل الهوائي.
- تكلفة العازل : الموصلات في خطوط النقل الهوائية موصلات عارية غير معزولة وتثبت فقط عند الأبراج باستخدام عوازل التعليق أما في الكيابل فيتم إحاطة الموصل بمادة عازلة عالية التكلفة وكذلك مواد لحماية الموصل من الرطوبة والإجهادات الميكانيكية. لذلك فتكلفة العزل في الكيابل الأرضية أكبر منها بكثير في خطوط النقل الهوائية.
- تكلفة التركيب : تعتبر تكلفة التركيب للكيبل الكهربائي أعلى بكثير من تكلفة التركيب لخط النقل الهوائي حيث تصل في بعض الأحيان إلى عشرة أضعاف أو يزيد من تكلفة خط النقل الهوائي.

لكن يعتبر استخدام الكيابل الأرضية أمرا ضروريا عندما تكون اعتبارات الأمان مطلبا ملحا أو أساسيا مثل المناطق المأهولة بالسكان وعبور الموانع المائية وداخل المنشآت وبالقرب من المطارات.

(5- 1) أنواع الكيابل وطرق حساب عناصرها

تصنف الكيابل الكهربائية تبعا لجهد التشغيل إلى كيابل الجهد المنخفض LV وكيابل الجهد المتوسط MV وكيابل الجهد العال HV وكيابل الجهد فوق العال EHV وكيابل الجهد الفائق UHV. كما يمكن تصنيف الكيابل تبعا للتصميم إلى كيابل مصمتة وكيابل مضغوطة. أو تصنف تبعا لنوع العزل إلى الكيابل الورقية والكيابل البوليمرية والكيابل المعزولة بالغاز. أو تصنف تبعا لنوع التيار إلى كيابل التيار المستمر وكيابل التيار المتردد. أو تصنف تبعا للاستخدام الخاص مثل الكيابل البحرية والكيابل المستخدمة بالمناجم والكيابل المستخدمة في مصافي البترول والكيابل البصرية.....وهكذا.

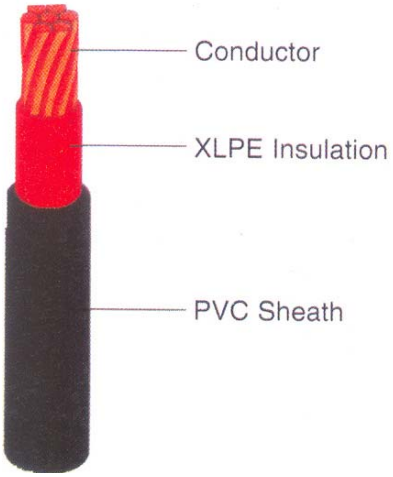
ويعبر دائما عن جهد الكيبل ذي الثلاثة أوجه بالعبارة (V_o/V) حيث V_o هي القيمة الفعالة للجهد الواقع بين الموصل الكهربائي والأرض (جهد الوجه) و V هي القيمة الفعالة للجهد الواقع بين موصلات الكيبل (جهد الخط) وهي القيم التي يصمم عندها الكيبل.

تتشابه كل الكيابل في أنها تحتوي علي موصلات لحمل التيار وعازل يحيط بالموصلات ونوع من الغطاء الخارجي لتقديم الحماية الميكانيكية وكذلك الحماية من التآكل وذلك لضمان عمل العازل بطريقة جيدة خلال فترة العمر الافتراضي لعمل الكيبل. وتصنع الكيابل إما بقلب واحد (single core) أو قلبين أو ثلاثة أو أربعة قلوب (multicore cables). وتخضع المفاضلة بين الكيبل وحيد القلب والكيبل عديد القلوب لعوامل كثيرة منها ما هو فني تقتضيه الظروف للحصول علي أداء معين تحت شروط معينة ومنها ما هو اقتصادي ويمكن القول بصفة عامة أن استخدام الكيابل عديدة القلوب يؤدي إلى خفض التكإليف وكذلك خفض الهبوط في الجهد بالإضافة إلى الاستخدام الاقتصادي الأمثل لمجار الكيابل. وعلي الجانب الآخر فإن استخدام الكيبل وحيد القلب يهيئ مرونة أفضل وسهولة في التركيب والتوصيل ولهذا يفضل استخدام الكيابل وحيدة القلب داخل المباني نظرا لكثرة وحدة تعرض الكيبل للانحناءات وكثرة عمل التفريعات والتوصيلات علي الكيبل.

أمثلة للكيابل المستخدمة

1- كيبل أحادي القلب جهد 0.6/1kV يتكون من

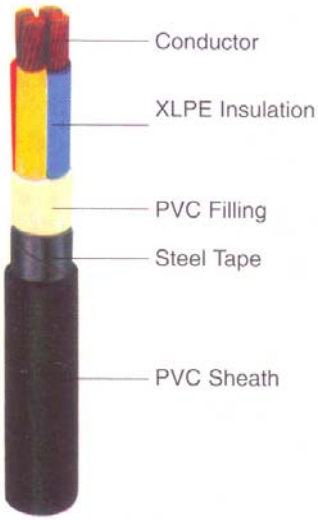
- موصل نحاسي
- عازل من البولي إيثلين التشابكي XLPE
- غلاف من البولي فينيل كلورايد PVC



شكل (1)

2- كيبل ثلاثي القلوب جهد 0.6/1kV يتكون من

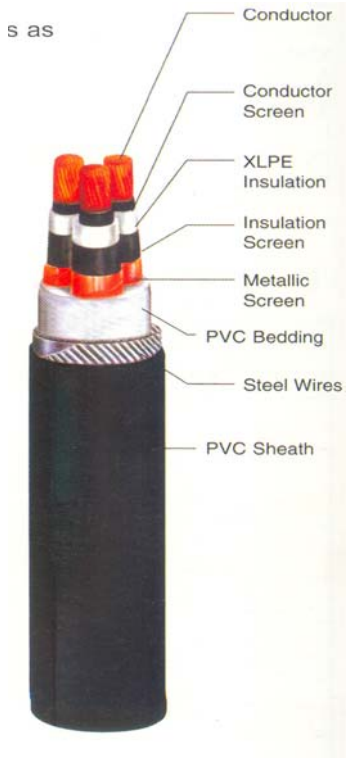
- موصل نحاسي
- عازل من البولي إيثلين التشابكي XLPE
- حشو من البولي فينيل كلورايد PVC لملء الفراغ بين القلوب
- شريط من الصلب لمنع تسرب الرطوبة داخل الكيبل
- الغلاف الخارجي من البولي فينيل كلورايد PVC لحماية الأجزاء المعدنية من التآكل



شكل (2)

3- كيبل ثلاثي القلوب جهد 18/30kV يتكون من:

- موصل نحاسي مجدول
- ستارة الموصل من مادة شبه موصلة للحصول علي توزيع أفضل للمجال الكهربائي داخل العازل
- عازل من البولي إيثيلين التشابكي XLPE
- ستارة العازل طبقة رقيقة جدا من مادة شبه موصلة
- ستارة العازل المعدنية شريط نحاسي سمك 0.1mm
- حشو من البولي فينيل كلورايد لملء الفراغ بين الموصلات
- التسليح من أسلاك الصلب المجلفن وقد يتكون من شريط من الصلب المجلفن لحماية الكيبل من الإجهادات الميكانيكية
- الغلاف الخارجي من البولي فينيل كلورايد



شكل (3)

(1) مقاومة الموصل الكهربائي Conductor resistance

تعد المقاومة النوعية من الصفات المميزة للموصلات الكهربائية، حيث إنها تساعد على تقييم المقاومة التي يبديها الموصل عند مرور التيار الكهربائي عبره ، فكلما انخفضت المقاومة النوعية كانت المادة الموصلة أكثر جودة ، حيث إنها تسمح بمرور كمية أكبر من التيار.

تتأثر المقاومة النوعية بدرجة الحرارة كما يلي :

$$\rho_t = \rho_o [1 + \gamma (T-T_o)] \qquad (1)$$

حيث إن :

ρ_t – المقاومة النوعية عند درجة حرارة (T) .

ρ_o – المقاومة النوعية عند درجة الحرارة الابتدائية والتي تساوي 20^oC .

γ – المعامل الحراري لمقاومة المادة الموصلة عند درجات الحرارة الابتدائية

وتتأثر المقاومة النوعية للموصلات تأثرا شديدا بالشوائب الموجودة فيها ، فبعض الشوائب مثل المنجنيز والألمنيوم تقلل من موصلية النحاس النقي بشدة ، أما إضافة الذهب والزنك إلى النحاس فتؤدى إلى خفض موصلته بشكل أقل. كذلك يؤدى التشكيل اللدن للمعادن (الدرفلة والسحب) إلى التأثير على مقدار الموصلية ، فمع ارتفاع نسبة التشكيل اللدن للمعدن

فإن موصليته تنخفض لذلك فإن موصلات النحاس المشكلة على البارد تتسم بمقاومة نوعية أكبر بالمقارنة مع النحاس الطري.

وتعتمد مقاومة موصل الكيبل على العوامل التالية :

أ. مادة الموصل (نحاس ، ألمنيوم..... إلخ).

ب. طول السلك.

ت. مساحة مقطع السلك.

ويمكن حساب مقاومة الموصل بالمعادلة التالية :

$$R = \rho (L / A) \qquad (2)$$

حيث إن :

R – مقاومة الموصل (Ω)

ρ – المقاومة النوعية للمادة المصنوع منها الموصل $(\Omega.m)$

L – طول الموصل (m)

A – مساحة مقطع الموصل (m^2)

لذلك فان مقاومة الموصل تزداد بزيادة طول الموصل وتقل بزيادة مساحة مقطعه، كذلك تتأثر مقاومة الموصل بدرجة حرارة تشغيله والتي تعتمد على عاملين هما :

جدول (1) المعامل الحراري لبعض المواد

المادة	معامل الحراري عند درجة حرارة (20^oC)
فضة	0.00380
نحاس	0.00393
ألمنيوم	0.00377
زنك	0.00370
نيكل	0.006-0.0037
حديد	0.006-0.0045
قصدير	0.0042
بلاتين	0.0025
رصاص	0.0042
النيكل كروم	0.0001

أ. درجة حرارة الوسط المحيط Ambient Temperature

وهى درجة حرارة الوسط المحيط بالموصل عندما يكون غير محمل Unloaded . وتعتبر درجة حرارة الوسط المحيط بالموصلات في الهواء مساوية 30^oC أما موصلات الكيابل الأرضية فإن درجة حرارة الوسط المحيط تساوي 20^oC.

ب. درجة حرارة الموصل نفسه Conductor Temperature

تزداد درجة حرارة الموصل عند مرور تيار كهربائي به وذلك للفقد الحادث في القدرة الكهربائية من مرور تيار كهربائي عبر موصل له مقاومة R. ومع زيادة درجة حرارة الموصل تزداد مقاومته.

ويمكن حساب المقاومة في أية درجة حرارة بمعرفة درجة الحرارة المستدلة للمقاومة الصفرية Inferred temperature for zero resistance والتي تقاس عادة بالدرجة المئوية كما يلي:

$$R_2 = R_1 + \frac{IZR + T_2}{IZR + T_1} \qquad (3)$$

حيث إن :

R_1 – المقاومة عند درجة الحرارة المنخفضة (Ω).

R_2 – المقاومة عند درجة الحرارة العالية (Ω).

T_1 – درجة الحرارة المنخفضة.

T_2 – درجة الحرارة العالية.

IZR - درجة الحرارة المستدلة للمقاومة الصفرية.

جدول (2) درجة الصفر المستدل لبعض المواد

المادة	درجة الصفر المستدل
فضة	-243
نحاس	-243.5
ألمنيوم	-236
تنجستن	-202
نيكل	-147
حديد	-108
نيكروم	-6250

مقياس السلك الأمريكي:

يمكن استخدام مقياس السلك الأمريكي American Wire Gauge والذي يشار إليه اختصارا AWG في قياس أحجام الموصلات الكهربائية. وترتب أحجام الموصلات في هذا المقياس من الأرقام الأعلى إلى الرقم 0 والذي يشار إليه بالرقم 1/0 وتشير الأرقام الأكبر في هذا المقياس إلى الحجم الأقل للموصلات الكهربائية فكيبل رقمه 12 هو أكبر حجما من كيبل رقمه 14 وأكبر حجم للكيبل في هذا المقياس هو رقم 4/0 والذي يكتب أحيانا كأربعة أصفار (0000). وللكيابل التي حجمها أكبر من ذلك نستخدم المل الدائري Circular mil. وحيث إن المل المربع هو رقم صغير فإننا نستخدم وحدة ألف مل دائري Thousand Circular mil (ويشار إليها اختصارا kcmil) والمل الدائري هو عبارة عن مقياس مساحة اصطناعية تمثل مربع قطر الكيبل عندما يكون قطر الكيبل مقاسا بالمل، أي إن:

$$\text{kcmil} = \text{mill} \div 1000 = d^2 \div 1000$$

حيث إن : d قطر الكيبل بالمل

وعلاقة المل بالبوصة هي:

$$1\ \text{mill} = \text{inch} \div 1000$$

$$1000\ \text{mill} = \text{inch} = 25.3\ \text{mm}$$

لذلك فإن العلاقة بين المليمتر والمل هي:

$$1\ \text{mm} = 39.526\ \text{mill}$$

فإذا كان قطر الكيبل مقاسا بالمليمتر فيمكننا إيجاد مساحة مقطعه بوحدة ألف مل دائري kcmil كما يلي:

$$\text{kcmil} = \frac{\text{mill}}{1000} = \frac{d^2}{1000} = \frac{[39.526\ d(mm)]^2}{1000} \qquad (4)$$

مثال1: أوجد مساحة مقطع كيبل بوحدة ألف مل دائري إذا كانت مساحة مقطع الكيبل $53.5mm^2$.

الحل:

مساحة مقطع الكيبل = $(\pi /4)\ d^2$

$$53.5 = (\pi / 4\ )\ d^2$$

$$d = 8.253\ \text{mm}$$

مساحة مقطع الكيبل بوحدة ألف مل دائري kcmil كما يلي:

$$A = \frac{(39.526 \ x \ 8.253)^2}{1000} = 106 \ \text{kcmil}$$

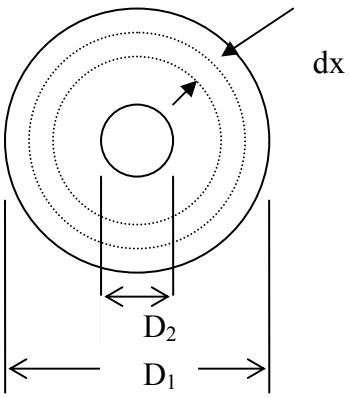
ويمكن تحويل مساحة الكيبل بالمليمتر إلى مل دائرى كما يلي:

$mm^2 = mill \div 1973.5$

فإذا كانت مساحة مقطع الكيبل تساوي $53.5\ mm^2$ فإن مساحته بوحدة mill تكون كالتالي:

$$A = 1973.5 \times 53.5 = 105582 \text{ mill} = 106 \text{ kcmil}$$

(2) مقاومة العزل للكيبل Insulation Resistance



شكل 4

مقاومة رقاقة رفيعة من العازل سمكها dx وعلي بعد x من مركز كيبل أحادي القلب طوله L

$$dR = \frac{\rho}{2\pi \ x \ L}$$

حيث ρ هي المقاومة النوعية لمادة العزل.

ومقاومة العازل هي:

$$R = \int_{D_2/2}^{D_1/2} \frac{\rho \ dx}{2\pi \ xL} = \frac{\rho}{2\pi L} Log_e \frac{D_1}{D_2}$$

$$R = \frac{2.3\rho}{2\pi L} Log_{10} \frac{D_1}{D_2} \qquad (5)$$

(3) الإجهاد الكهربائي والسعة لكيبل ذي قلب واحد:

بتطبيق قانون جاوس (Gauss Law)، فإن كثافة الفيض الكهربائي هي:

$$D = \frac{q}{2\pi x}$$

والمجال الكهربائي:

$$E = -\frac{dv}{dx} = \frac{q}{2\pi\varepsilon x}$$

$$V = \int_{D_2/2}^{D_1/2} \frac{q}{2\pi\varepsilon x} dx = \frac{q}{2\pi\varepsilon} Log_e \frac{D_1}{D_2}$$

$$C = \frac{q}{V} = \frac{2\pi\varepsilon}{Log_e \frac{D_1}{D_2}} \qquad (6)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_o \varepsilon_r = \frac{\varepsilon_r}{4\pi x \ 9 * 10^9}$$

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_r}{4\pi x 9 x 10^9 \, x 2.3 Log_{10} \frac{D_1}{D_2}} = \frac{0.024 x 10^{-9} \varepsilon_r}{Log_{10} \frac{D_1}{D_2}} \qquad \text{F/m}$$

$$\therefore C = \frac{0.024\varepsilon_r}{Log_{10} \frac{D_1}{D_2}} \qquad \mu\text{F/km} \qquad (7)$$

إما قيمة المجال الكهربائي داخل العازل فتكون:

$$E = \frac{q}{2\pi\varepsilon x} = \frac{1}{2\pi\varepsilon x} \frac{2\pi\varepsilon}{Log_e \frac{D_1}{D_2}} V$$

$$\therefore E = \frac{V}{x Log_e \frac{D_1}{D_2}} \qquad (8)$$

من المعادلة (8) نجد أن المجال الكهربائي يصبح قيمة عظمى علي سطح الموصل الكهربائي أي إن ($x=D_2/2$)

$$E_{max} = \frac{2V}{D_2 Log_e \frac{D_1}{D_2}} \qquad (9)$$

القيمة العظمى للمجال الكهربائي تكون عند أقل قيمة لها عند

$$Log_e D_1/D_2 = 1$$

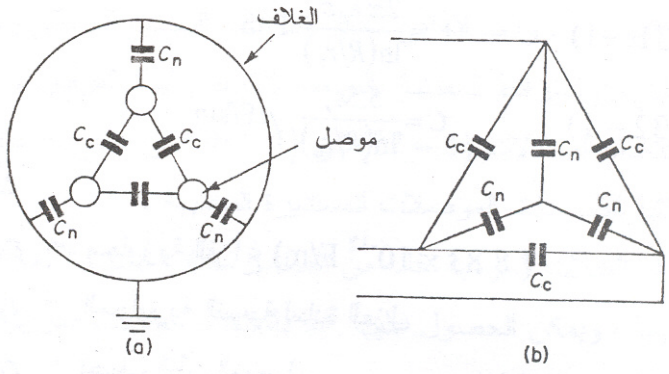
أي إن $$D_1/D_2 = 2.718 \qquad (10)$$

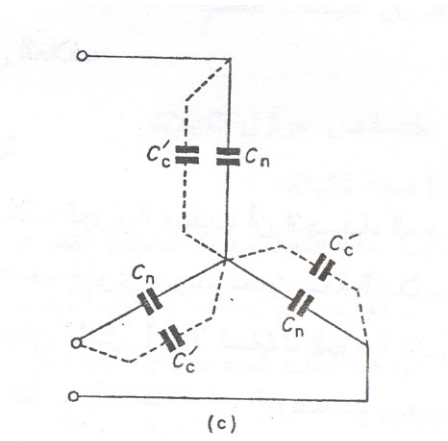
(4) سعات الكيابل ذوات الثلاثة قلوب Three Phase Cables Capacitances

يبين شكل(5) موصلاً ثلاثي القلوب، والسعة بين كل موصل وآخر C_C و C_n السعة بين كل موصل والغلاف المعدني المؤرض. من الشكل نجد أن المكثفات C_C موصلة علي شكل دلتا بينما المكثفات C_n موصلة على شكل نجمة. ولإيجاد المكثف الكلي لابد أولا من تحويل المكثفات المتصلة دلتا إلى مكثفات متصلة نجمة

$$\frac{1}{\varpi\ C_c^{\setminus}} = \frac{1}{3\varpi\ C_c}$$

$$\therefore C_c^{\setminus} = 3C_c$$





شكل (5)

لذلك فإن السعة الكلية بين الموصل والغلاف المؤرض هي:

$$C=3C_c + C_n \qquad (11)$$

ويمكن أيضا إيجاد السعة الكلية بين أي موصل والغلاف المؤرض للكيابل ذات الحزام باستخدام المعادلة التالية:

$$C = \frac{0.111\ \varepsilon_r}{\ln \frac{a^2(3R^2 - a^2)^3}{r_o^2(27R^6 - a^6)}} \quad \mu F/km \qquad (12)$$

حيث إن: r_o نصف قطر الموصل (mm)

R نصف قطر الداخلي الغلاف أو الحجاب (mm)

a المسافة بين الموصلات (mm)

(5) تيار الشحن للكيبل Charging Current

تيار الشحن للكيبل هو التيار السعوي الذي يمر في العازل عندما يعمل الكيبل علي جهد متردد نتيجة للسعة بين موصلات الكيبل والأرضي ويكون هذا التيار متقدما عن الجهد بزاوية قدرها 90^o ويتم حساب تيار الشحن من العلاقة التالية:

$$I_c = V\ \omega\ C\ 10^{-6} \quad A/km \qquad (13)$$

حيث إن:

V الجهد بين الوجه والأرض

ω السرعة الزاوية وتساوي $2\pi f$ حيث f التردد

C السعة بين الموصل والأرض

(6) المحاثة Inductance

المحاثة L لكل قلب لكيبل ذي ثلاثة قلوب أو ثلاثة كيابل أحادية القلب تتكون من جزأين المحاثة الذاتية للموصل الكهربائي والمحاثة المتبادلة مع الموصلات الآخرى وتعطى بالمعادلة:

$$L = K + 0.2 \ Log_e \frac{2S}{d} \qquad \text{mH/km} \qquad (14)$$

حيث : K ثابت يعتمد تكوين الموصل

S المسافة بين الموصلات الكهربائية (mm)

أو المسافة بين الموصلات في الشكل المثلثي للكيابل عديدة القلوب

أو تساوي (1.26 x مسافة الوجه في الشكل المسطح للكيابل عديدة القلوب)

جدول (3) الثابت K لمختلف الموصلات المجدولة

عدد الشعيرات في الموصل	K
3	0.0778
7	0.0642
19	0.0554
37	0.528
61 فأعلي	0.514
الموصل الصلب	0.500

(5- 2) فقد القدرة واستعمال الجداول في تحديد السعة الأمبيرية

(5- 2- 1) فقد القدرة power Loss

تتحدد السعة الأمبيرية للكيبل طبقا للحد الأقصى لدرجة الحرارة التي يمكن أن يتحملها الكيبل تحت ظروف التشغيل المختلفة. وتعتمد درجة الحرارة علي الخصائص الحرارية لمكونات الكيبل وكذلك درجة حرارة الوسط المحيط وخصائصه الحرارية. وهناك ثلاثة مصادر تتسبب في رفع درجة حرارة الكيبل هي الفقد في القدرة الكهربائية لموصل الكيبل، والفقد في القدرة في الغلاف المعدني والدرع نتيجة للتيارات الدوامية المتولدة فيهما، وكذلك الفقد في القدرة في العازل نتيجة التيار المتسرب.

1- الفقد في القدرة في موصل الكيبل

$$P_c = I^2 R \qquad \text{Watt/m} \qquad (15)$$

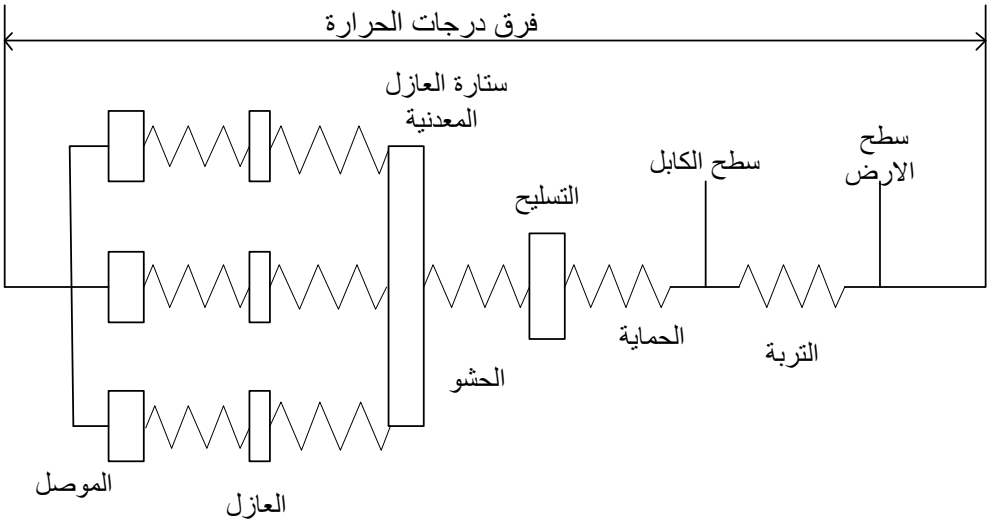
حيث I هو تيار الموصل ، R مقاومة الموصل

2- الفقد في العازل

$$P_i = V^2 \omega C \tan\delta \qquad \text{watt/m} \qquad (16)$$

حيث إن V هو جهد الوجه للموصل الكهربائي،وC سعة الكيبل، وTanδ زاوية الفقد لمادة العزل وهي النسبة بين مقاومة العازل وسعته.

الارتفاع في درجة حرارة الكيبل ينتج عن الفقد في القدرة الكهربائية في كل من الموصل الكهربائي، والعازل، والغلاف المعدني وكذلك التسليح.



شكل(6) الدائرة المكافئة التي تمثل كمية الحرارة المتولدة في كيبل ثلاثي القلوب

باعتبار الدائرة المكافئة في شكل(6) يمكن حساب الارتفاع في درجة حرارة الموصل (^{o}K) بالمعادلة التالية:

$$\Delta\theta = (I^2R+0.5W_d)T_1 + [I^2R(1+\lambda_1)+W_d]nT_2 + [I^2R(1+\lambda_1+\lambda_2)+W_d]\, n(T_3+T_4)$$

حيث إن I هو التيار المار في الموصل ، وR هو مقاومة الموصل الكهربائي لكل متر طولي، وW_d الفقد في العزل لكل متر طولي و T_1 المقاومة الحرارية بين كل موصل والغلاف و T_2 المقاومة الحرارية للحشو بين الغلاف المعدني والتسليح و T_3 المقاومة الحرارية للغلاف الخارجي و T_4 المقاومة الحرارية بين السطح الخارجي للكيبل والوسط المحيط و n عدد الموصلات الحاملة للتيار و λ_1 النسبة بين الفقد في الغلاف المعدني والفقد في موصل الكيبل و λ_2 النسبة بين الفقد في التسليح والفقد في موصل الكيبل.

ويمكن إعادة كتابة المعادلة السابقة لنحصل علي التيار المقنن للكيبل:

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - W_d[\frac{1}{2}T_1 + n(T_2+T_3+T_4)]}{RT_1 + nR(1+\lambda_1)T_2 + nR(1+\lambda_1+\lambda_2)(T_3+T_4)} \right]^{1/2} \qquad (17)$$

(5- 2- 2) حساب السعة الأمبيرية باستخدام الجداول

جدول(4) السعة الأمبيرية للكيابل الورقية المسلحة جهد 600/1000V (BS 6346:1989)

مساحة مقطع الموصل (mm^2)	في الهواء				مدفونة في الأرض			
	قلب واحد		قلبان	3 أو 4 قلوب	قلب واحد		قلبان	3 أو 4 قلوب
	مثلثي (o o o)	مسطح (o o o)			مثلثي (o o o)	مسطح (o o o)		
أولا موصلات النحاس								
16			105	91			120	105
25			145	120			160	135
35			175	150			195	165
50	215	235	210	180	220	230	230	195
70	275	300	265	230	270	280	285	240
95	335	370	325	280	320	335	345	290
120	390	430	380	325	365	380	395	335
150	445	490	430	375	410	430	445	375
185	520	570	495	430	460	485	500	425
240	620	710	590	510	530	560	580	490
300	710	810	670	590	600	620	650	550
400	820	930	780	680	680	700	740	620
500	940	1040			760	770		
630	1080	1170			850	860		
800	1220	1300			940	930		
1000	1350	1410			1010	980		
ثانيا : موصلات الألمنيوم								
16			81	70			94	80
25			110	93			125	105
35			135	115			150	125
50	165	180	165	140	170	175	180	150
70	210	230	205	175	210	220	220	185
95	260	285	255	220	250	260	270	225
120	305	335	295	255	285	300	305	255
150	350	385	335	290	320	335	345	290
185	405	445	390	335	360	380	395	330
240	485	560	460	400	420	440	455	380
300	560	640	530	460	475	495	520	430
400	650	740	620	540	540	560	590	500
500	760	840			610	630		
630	880	970			690	710		
800	1020	1090			780	780		
1000	1150	1220			860	850		

(5- 2- 2- 1) للكيابل الموضوعة في الهواء

الظروف القياسية للكيابل الموضوعة في الهواء حسب المواصفات القياسية العالمية IEC287 هي:

- درجة حرارة الجو المحيط: $25^{o}C$ للكيابل الورقية وكيابل XLPE ذات الجهد الأعلى من 1.9/3.3kV و $30^{o}C$ لكيابل PVC وكيابل XLPE ذات الجهد الأقل من 1.9/3.3kV والكيابل داخل المباني.
- للكيابل المثبتة بالحوائط : أقل مسافة بين الكيبل والحائط 20mm.
- أقل مسافة بين كيبل والكيبل المجاور له : 150cm. لمنع الحرارة المتبادلة
- الكيبل لابد أن يكون معزولا عن ضوء الشمس المباشر.

الجداول التالية تعطي قيم التيارات المقننة لبعض أنواع الكيابل إذا تم وضعها في الهواء أو تم دفنها في الأرض:

جدول (5) السعة الأمبيرية للكيابل XLPE المسلحة جهد 600/1000V (BS 6724:1990)

مساحة مقطع الموصل (mm^2)	في الهواء				مدفونة في الأرض			
	قلب واحد		قلبان	3 أو 4 قلوب	قلب واحد		قلبان	3 أو 4 قلوب
	مثلثي o oo	مسطح o o o			مثلثي o oo	مسطح o o o		
أولا موصلات النحاس								
16			115	99			141	119
25			152	131			183	152
35			188	162			219	182
50	222	288	228	197	231	242	259	217
70	285	358	291	251	284	295	317	266
95	346	425	354	304	340	350	381	319
120	402	485	410	353	386	395	433	363
150	463	549	472	406	431	434	485	406
185	529	618	539	463	485	482	547	458
240	625	715	636	546	558	545	632	529
300	720	810	732	628	623	597	708	592
400	815	848	847	728	691	637	799	667
500	918	923			765	688		
630	1027	992			841	737		
800	1119	1042			888	760		
1000	1214	1110			942	797		
ثانيا : موصلات الألمنيوم								
16			85	74			108	91
25			112	98			138	116
35			138	120			165	139
50	162	215	166	145	177	185	196	165
70	207	270	211	185	218	227	241	203
95	252	324	254	224	260	270	288	244
120	292	372		264	296	306		278
150	337	424		305	331	339		311
185	391	477		350	374	380		353
240	465	554		418	433	435		409
300	540	626		488	486	483		461

جدول (6) معاملات التقنين لدرجة حرارة الوسط المحيط

نوع العازل	أقصى درجة تشغيل لموصل (^oC)	درجة حرارة الهواء المحيط (^oC)						
		25	30	35	40	45	50	55
ورق	65	1.00	0.93	0.85	0.77	0.68	0.58	0.47
ورق	70	1.00	0.93	0.87	0.80	0.72	0.64	0.55
ورق	80	1.00	0.94	0.89	0.84	0.77	0.72	0.65
PVC	70	1.06	1.00	0.94	0.87	0.79	0.71	0.61
XLPE*	90	1.00	0.95	0.91	0.86	0.80	0.75	0.69
XLPE**	90	1.04	1.00	0.96	0.91	0.87	0.82	0.76

* أعلي من 1.9/3.3 kV **أقل من 1.9/3.3 kV

مثال 2: أحسب السعة الأمبيرية لكيبل ورقي جهد 600/1000V ذو موصل نحاسي بثلاثة قلوب مساحة مقطع كل قلب $240mm^2$ وأقصى درجة حرارة تشغيل له 70^oC موضوع في الهواء الجوي إذا كانت درجة حرارة الجو المحيط 40^oC.

الحل: من جدول 4 عند مساحة مقطع $240mm^2$ لكيبل ورقى بثلاثة قلوب نحاسية في الهواء

السعة الأمبيرية= 510 أمبير

من جدول 6 لكيبل ورقي أقصى جهد تشغيل له 70^oC أفقيا حتي درجة حرارة 40^oC

معامل التقنين لدرجة الحرارة = 0.8

لذلك تكون السعة الأمبيرية للكيبل عند 40^oC = 0.8 x 510 = 408 أمبير

مثال 3: أحسب السعة الأمبيرية لكيابل XLPE جهد 600/1000V ذات موصل ألمنيوم واحد مساحة مقطعه $240mm^2$ ومرتبة في وضع مسطح في الهواء الجوي إذا كانت درجة حرارة الجو المحيط 45^oC.

الحل: من جدول 5 عند مساحة مقطع $240mm^2$ لكيبل XLPE بثلاثة قلوب نحاسية في الهواء

السعة الأمبيرية= 529 أمبير

من جدول 6 لكيبل XLPE أقل من 1.9/3.3kV أفقيا حتى درجة حرارة 45^oC

معامل التقنين لدرجة الحرارة = 0.87

لذلك تكون السعة الأمبيرية للكيبل عند 45^oC = 0.87 x 529 = 460.2 أمبير

(5- 2- 2- 2) للكيابل المدفونة في الأرض

الظروف القياسية :
- درجة حرارة الأرض $15^{o}C$
- المقاومية الحرارية للتربة المدفون بها الكيبل $1.2\ ^{o}Km/W$
- المسافة بين الكيابل المتجاورة أكبر من 1.8m
- عمق الدفن 0.5m للكيابل حتى جهد 1kV
0.8m للكيابل أعلي من 1kV وأقل من 33kV

إذا تغير أي من الظروف القياسية السابقة فلابد من تصحيح السعة الأمبيرية لتتوائم مع ظروف التشغيل وذلك باستخدام الجداول التالية لمعاملات التقنين لدرجة حرارة الأرض والمقاومية الحرارية للتربة والمسافة بين الكيابل المتجاورة وكذلك عمق الدفن للكيبل:

جدول (7) معامل تقنين درجة حرارة الأرض

نوع العزل	أقصى درجة تشغيل للموصل (^{o}C)	درجة حرارة الأرض (^{o}C)							
		10	15	20	25	30	35	40	45
ورق	65	1.05	1.00	0.95	0.89	0.84	0.77	0.71	0.63
ورق	70	1.04	1.00	0.95	0.90	0.85	0.80	0.74	0.67
ورق	75	1.04	1.00	0.96	0.92	0.88	0.83	0.78	0.73
PVC	70	1.04	1.00	0.95	0.90	0.85	0.80	0.74	0.67
XLPE	90	1.03	1.00	0.97	0.93	0.89	0.85	0.81	0.77

جدول (8) معامل تقنين المقاومية الحرارية للتربة (قيم متوسطة)

مساحة مقطع الموصل (mm^2)	المقاومة الحرارية للتربة ($^{o}Km/W$)						
	0.8	0.9	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
كيبل ذو قلب واحد							
- إلى 150	1.16	1.11	1.07	0.91	0.81	0.73	0.67
- من 185 إلى 400	1.17	1.12	1.07	0.90	0.80	0.72	0.66
- من 500 إلى 1200	1.18	1.13	1.08	0.90	0.79	0.71	0.65
كيبل عديد القلوب							
- إلى 16	1.09	1.06	1.04	0.95	0.86	0.79	0.74
- من 25 إلى 150	1.14	1.10	1.07	0.93	0.84	0.76	0.70
- من 185 إلى 400	1.16	1.11	1.07	0.92	0.82	0.74	0.68

جدول (9) معامل التقنين التجميعي لكيابل عديدة القلوب في وضع أفقي

جهد الكيبل (kV)	عدد الكيابل	تلامس	المسافة بين مراكز مجموعة الكيابل (m) 0.15	0.30	0.45	0.60
0.6/1 kV	2	0.81	0.87	0.91	0.93	0.94
	3	0.70	0.78	0.84	0.87	0.90
	4	0.63	0.74	0.81	0.86	0.89
	5	0.59	0.70	0.78	0.83	0.87
	6	0.55	0.67	0.76	0.82	0.86
من 1.9/3.3kV إلى 12.7/22kV	2	0.80	0.85	0.89	0.90	0.92
	3	0.69	0.75	0.80	0.84	0.86
	4	0.63	0.70	0.77	0.80	0.84
	5	0.57	0.66	0.73	0.78	0.81
	6	0.55	0.63	0.71	0.76	0.80
19/33kV	2	0.80	0.83	0.87	0.89	0.91
	3	0.70	0.73	0.78	0.82	0.85
	4	0.64	0.68	0.74	0.78	0.82
	5	0.59	0.63	0.70	0.75	0.79
	6	0.56	0.60	0.68	0.74	0.78

جدول (10) معامل تقنين عمق الدفن (حتى مركز الكيبل أو المجموعة المثلثية للكيابل)

عمق الدفن (m)	0.6/1.0 kV		1.9/3.3kV حتى 19/33kV	
	حتى $50mm^2$	من 70 إلى $300mm^2$	أعلي من $300mm^2$	حتى $300mm^2$	أعلي من $300mm^2$
0.50	1.00	1.00	1.00	--	--
0.60	0.99	0.98	0.97	--	--
0.80	0.97	0.96	0.94	1.00	1.00
1.00	0.95	0.94	0.92	0.98	0.97
1.25	0.94	0.92	0.90	0.96	0.95
1.50	0.93	0.91	0.89	0.95	0.94
1.75	0.92	0.89	0.87	0.94	0.92
2.00	0.91	0.88	0.86	0.92	0.90
2.50	0.90	0.87	0.85	0.91	0.89
3.0 أو أكثر	0.89	0.86	0.83	0.90	0.88

مثال 4 : ثلاثة كيابل XLPE جهد 600/1000V ذات ثلاثة قلوب نحاسية مساحة مقطع كل منها $240\ mm^2$ مدفونة في الأرض علي عمق 1.0m فإذا كانت المسافة بين مركز أي كيبل ومركز الكيبل المجاور 60cm ودرجة حرارة الأرض 30^oC والمقاومية الحرارية للتربة $2.0\ ^oK.m/W$ احسب السعة الأمبيرية للكيبل.

الحل:

نتبع الخطوات التالية في الحل:

- من جدول (5) عند مساحة مقطع $240mm^2$ أفقيا حتى العمود الأخير (كيبل ثلاثة قلوب مدفون)

السعة الأمبيرية للكيبل في الظروف القياسية = 529 أمبير

- من جدول (7) لكيبل XLPE أفقيا حتى 30^oC

معامل التقنين لدرجة حرارة الأرض = 0.89

- من جدول (8) لمساحة مقطع موصل بين 185 حتى $400mm^2$ لكيبل عديد القلوب أفقيا حتى $2.0^oK.m/W$ معامل التقنين للمقاومية الحرارية للتربة = 0.82

- من جدول (9) لجهد 0.6/1.0kV لثلاثة كيابل أفقيا حتى مسافة 60cm

معامل التقنين التجميعي للكيابل = 0.90

- من جدول (10) لعمق دفن 1.0m أفقيا لكيبل 0.6/1.0kV حتى مساحة مقطع موصل من 70 إلى $300mm^2$ معامل تقنين عمق الدفن = 0.94

السعة الأمبيرية الفعلية للكيبل = 529 x 0.89 x 0.82 x 0.90 x 0.94 = 326.6 أمبير

(5- 2- 2- 3) للكيابل الموضوعة في مجار

الظروف القياسية للكيابل الموضوعة في مجار هي:

- درجة حرارة الأرض 15^oC
- المقاومية الحرارية للأرض والمجرى $1.2^oK.m/W$
- المسافة بين أي كيبل والكيبل المجاور لا تقل عن 1.8m
- عمق الدفن 0.5m للكيابل حتى جهد 1kV

0.8m للكيابل أعلى من 1kV وأقل من 33kV

إذا تغير أي من الظروف القياسية السابقة فلابد من تصحيح السعة الأمبيرية لتتوائم مع ظروف التشغيل وذلك باستخدام جداول معاملات التقنين لدرجة حرارة الأرض والمقاومية الحرارية للتربة الموضوعة في مجار والمسافة بين الكيابل المتجاورة داخل مجار وكذلك عمق الدفن للكيبل حتى مركز المجرى التالية:

جدول (11) معامل تقنين المقاومية الحرارية للتربة الموضوعة في مجار (قيم متوسطة)

مساحة مقطع الموصل (mm^2)	المقاومة الحرارية للتربة (Km/W)						
	0.8	0.9	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
كيبل ذو قلب واحد							
- إلى 150	1.10	1.07	1.04	0.94	0.87	0.81	0.75
- من 185 إلى 400	1.11	1.08	1.05	0.94	0.86	0.79	0.73
- من 500 إلى 1200	1.13	1.09	1.06	0.93	0.84	0.77	0.70
كيبل عديدة القلوب							
- إلى 16	1.05	1.04	1.03	0.97	0.92	0.87	0.83
- من 25 إلى 150	1.07	1.05	1.03	0.96	0.90	0.85	0.78
- من 185 إلى 400	1.09	1.06	1.04	0.95	0.87	0.82	0.76

جدول (12) معامل التقنين التجميعي لكيابل عديدة القلوب في مجري واحد في وضع أفقي

جهد الكيبل (kV)	عدد الكيابل	المسافة بين مراكز مجموعة الكيابل (m)			
		تلامس	0.30	0.45	0.60
0.6/1 kV	2	0.90	0.93	0.95	0.96
	3	0.82	0.87	0.90	0.93
	4	0.78	0.85	0.89	0.91
	5	0.75	0.82	0.87	0.90
	6	0.72	0.81	0.86	0.90
من 1.9/3.3kV إلى 12.7/22kV	2	0.88	0.91	0.93	0.94
	3	0.80	0.84	0.87	0.89
	4	0.75	0.81	0.84	0.87
	5	0.71	0.77	0.82	0.85
	6	0.69	0.75	0.80	0.84
19/33kV	2	0.87	0.89	0.92	0.93
	3	0.78	0.82	0.85	0.87
	4	0.73	0.78	0.82	0.85
	5	0.69	0.75	0.79	0.83
	6	0.67	0.73	0.78	0.82

جدول (13) معامل تقنين عمق الدفن (حتى مركز المجرى)

عمق الدفن (m)	0.6/1.0 kV		1.9/3.3kV حتى 19/33kV	
	قلب واحد	عديد القلوب	قلب واحد	عديد القلوب
0.50	1.00	1.00		
0.60	0.98	0.99		
0.80	0.95	0.97	1.0	1.00
1.00	0.93	0.96	0.98	0.99
1.25	0.90	0.95	0.95	0.97
1.50	0.89	0.94	0.93	0.96
1.75	0.88	0.94	0.92	0.95
2.00	0.87	0.93	0.90	0.94
2.50	0.86	0.3	0.89	0.93
3.0 أو أكثر	0.85	0.2	0.88	0.92

مثال 5 : منشأة صناعية تحتاج إلى كيابل XLPE جهد 0.6/1.0kV لتغذية حمل مقداره 1500A لكل وجه وقد اقتضت ظروف التشغيل استعمال 6 كيابل ثلاثية القلوب داخل مجار، والمسافة بين مراكزها 45cm والمجاري كلها مدفونة في وضع أفقي مسطح علي عمق 1.25m فإذا كانت المقاومية الحرارية للتربة $1.0^{o}K.m/W$ ودرجة حرارتها $30^{o}C$ اختر الكيبل المناسب لحمل هذا التيار في هذه الظروف.

الحل: السعة الأمبيرية للكيبل الواحد = 1500 ÷ 6 = 250 أمبير

- من جدول (7) لكيبل XLPE أفقيا حتى $30^{o}C$

معامل التقنين لدرجة حرارة الأرض = 0.89

- من جدول (5) لكيبل XLPE ثلاثي القلوب مدفون لتيار مقنن 250A

لموصل نحاسي بين 217 إلى 266 أمبير مساحة المقطع بين 50 إلى $70mm^2$

لموصل ألمنيوم بين 244 إلى 278 أمبير مساحة المقطع بين 95 إلى $120mm^2$

- من جدول (11) لمساحة مقطع موصل بين 25 حتى $150mm^2$ لكيبل عديد القلوب أفقيا حتى $1.0^{o}K.m/W$

معامل التقنين للمقاومية الحرارية للتربة = 1.03

- من جدول (12) لجهد 0.6/1.0kV لستة مجاري كيابل أفقيه بمسافة 45cm بين المراكز

معامل التقنين التجميعي للكيابل = 0.86

- من جدول (13) لعمق دفن 1.25m أفقيا لكيبل 0.6/1.0kV

معامل تقنين عمق الدفن = 0.95

معامل التقنين الكلي = 0.89 x 1.03 x 0.86 x 0.95 = 0.749

السعة الأمبيرية في الظروف العملية = السعة الأمبيرية في الظروف القياسية x معامل التقنين الكلي

250 = السعة الأمبيرية في الظروف القياسية x 0.749

السعة الأمبيرية في الظروف القياسية = 250 ÷ 0.749 = 333.78 أمبير

- من جدول (6) لكيبل XLPE ثلاثي القلوب مدفون لتيار مقنن 334A

لموصل نحاسي بين 319 إلى 363 أمبير مساحة المقطع بين 95 إلى $120mm^2$

يختار الكيبل ذو الموصل النحاسي بمساحة مقطع $120mm^2$

لموصل ألمنيوم بين 311 إلى 353 أمبير مساحة المقطع بين 150 إلى $185mm^2$

أو يختار الكيبل ذو موصل الألمنيوم بمساحة مقطع $185mm^2$

(5- 3) طرق تبريد الكيابل

1- أنظمة التبريد القصرية للكيابل

يمكن استخدام بعض أشكال التبريد القصري لتحقيق أقصى قيم مقننة مطلوبة مثل:

أ- استخدام أنبوب تبريد منفصل

يستخدم في تركيبات التمديدات المباشرة للكيابل المملوءة ذاتيا بسائل self-contained fluid-filled cables. وتستخدم هذه الطريقة في بريطانيا حيث يدفع ماء في أنابيب مصنعة من البولي إيثيلين ذو الكثافة العالية ملاصقة للكيابل. وتوضع الأنابيب بين الكيبل والكيبل المجاور حيث يدفع فيها الماء ويبرد الماء الخارج من الأنبوب باستخدام مبادل حراري قبل إدخالها مرة أخرى للأنابيب. ولتحقيق أعلى قيم مقننة لابد من إزالة أكبر قيمة حرارية من الكيابل. ولابد من عمل محطات للتبريد علي أبعاد مناسبة علي طول الكيبل واضعا في الاعتبار البيئة المحيطة والاعتبارات الفنية. والعديد من المتغيرات مثل:

- وضع الأنابيب والكيبل
- شكل انسياب الماء
- عدد أنابيب التبريد
- حجم أنابيب التبريد
- الضغط الذي تتحمله الأنابيب وعمرها الافتراضي
- درجة حرارة ماء التبريد
- درجة حرارة التبريد للمبرد الحراري

ب- تبريد متكامل للغلاف

وهي امتداد لأنابيب التبريد المنفصلة مع اختلاف وضع أنبوب التبريد فبدلا من أن يكون مجاوراً للكيبل وممتداً معه يوضع الكيبل - في هذه الطريقة- داخل أنبوب التبريد. لذلك فقطر أنبوب التبريد أكبر من الطريقة السابقة. ولتجنب مفاقيد التيار المتولد ومشاكل التآكل يفضل استخدام أنابيب غير معدنية والمواد المناسبة لذلك هي البولي فنيل كلورايد غير البلاستيكي والأنسجة الزجاجية المقواة بالبولي فنيل كلورايد أو الإسبيستوس. ولهذا التطبيق يفضل استخدام الكيابل ذات غلاف الألمنيوم الموج المحمي بمادة البولي ايثيلين عال الكثافة. في هذه الحالة تهبط المقاومة الحرارية الخارجية للصفر ولهذا تعتمد القيم المقننة للكيبل في هذه الحالة علي خصائص الكيبل وأقصى قيمة لدرجة حرارة ماء التبريد والتي تعتمد علي درجة حرارة الماء الداخل ومفاقيد الكيبل ومعدل انسياب ماء التبريد وخصائص المبادل الحراري.

ج- تبريد السائل الداخلي

الطريقة الأكثر كفاءة لزيادة مقننات الكيابل هي إيجاد طريقة لإزالة المفاقيد من المصدر نفسه. وهذا هو المبدأ في طريقة تبريد السائل الداخلي للكيبل بحيث يدور سائل التشبيع الهيدروكربوني في الموصل وهو المصدر الأساسي للفقد الكهربائي. وللحصول علي معدل مناسب لانسياب للسائل نزيد اتساع الأنبوب المركزي ويحقن السائل ويسحب عند وصلات تغذية توضع علي مسافات علي طول الكيبل. وصلات التغذية هذه متماثلة تماما في تصميمها مع وصلات الوقف (stop joint) المستخدمة في الكيابل المحتواة ذاتيا علي سائل عازل self-contained fluid-filled cable ولكن بمقطع دخول أكبر.

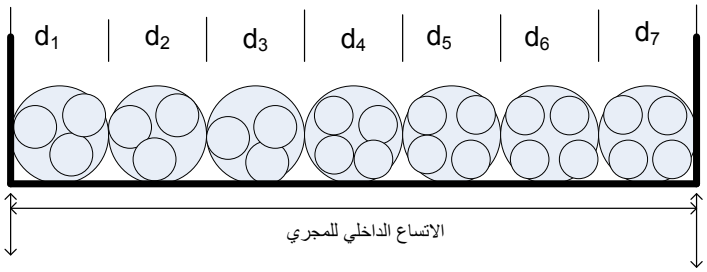
2- الكيابل المعزولة بالغاز المضغوط

خطوط نقل القدرة الكهربائية المعزولة بالغاز تتكون من أنابيب تحتوي علي موصلات كهربائية معزولة بغاز سادس فلوريد الكبريت ذي العزل الفائق وتحمل هذه الموصلات قدرات كهربائية هائلة وقد بدأ تطور خطوط نقل القدرة الكهربائية في الستينات من القرن الماضي حيث كان طولها محدوداً جداً (بضع مئات من الأمتار) وقد تم تطويره في نهاية التسعينات ليصل مداه إلى عدة كيلومترات ويتكون من دائرتين مزدوجتين تحملان قدرات هائلة ويتكون خط النقل المعزول بالغاز من محتوي من الألمنيوم أو الصلب وموصلات من الألمنيوم ويستخدم الغاز كعازل قوي بين الموصلات كذلك يستخدم كمبرد حيث إن المحتوي الحراري للغاز وكذلك قابليته للانتقال الحراري كبيرة.

(5- 4) تحديد عدد الكيابل في الأنابيب وصناديق الكيابل

(5- 4- 1) عدد الكيابل عديدة الموصلات جهد أقل من 2000V

- لكيابل عديدة الموصلات مصنوعة من موصلات رقمها 4/0 ($107mm^2$) أو أكبر بحيث إن مجموع الأقطار الخارجية لكل الكيابل عديدة الموصلات في المجرى لابد أن تكون أقل من اتساع المجرى ولابد من وضع الكيابل جنبا إلى جنب في المجرى في طبقة مفردة كما بالشكل (7).



شكل (7)

- للكيابل عديدة الموصلات مصنوعة من موصلات رقمها أقل من ($107mm^2$) فإن مجموع مساحات المقطع لجميع الكيابل لابد أن تكون أقل من أقصى كيبل مسموح به في الجداول القياسية لمجار الكيابل. فمثلا إذا استخدم مجري عرضه 457mm لكيابل أقل من $107mm^2$ فإن أقصى قيمة لمجموع مساحات المقطع لجميع الكيابل المستخدمة لا تزيد عن $13545mm^2$.

- لكيابل عديدة الموصلات مصنوعة من موصلات رقمها أكبر من $107mm^2$ ومعها واحد أو أكثر من كيابل عديدة الموصلات مصنوعة من موصلات رقمها أقل من $107mm^2$ فإن هناك خطوتين لتحديد أقصى تعبئة للمجرى الأولى لابد أن يكون مجموع مساحات المقطع الخارجية للكيابل أقل من $107mm^2$ أقل من أقصى قيمة مسموح بها لملء المجرى بعد ذلك نضع الكيابل الأكبر من $107mm^2$ في طبقة واحدة بدون وضع كيابل فوقها مع ملاحظة أن مساحة مقطع المجرى لابد أن تلائم الكيابل الأقل من $107mm^2$ في المجرى.

(5- 4- 2) عدد الكيابل أحادية القلب جهد أقل من 2000V

- لابد أن يكون عرض المجرى علي الأقل مساويا لمجموع أقطار الكيابل التي ستوضع بالمجرى

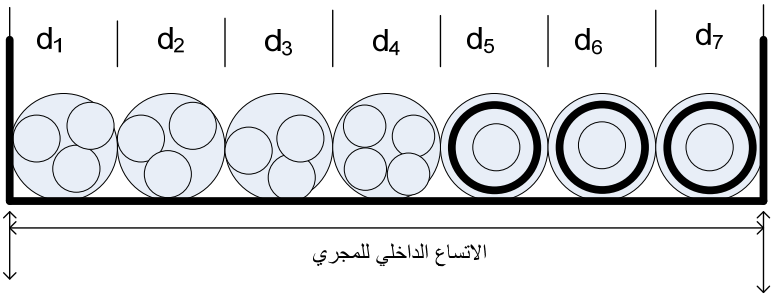
- مجموع مساحات المقطع للكيابل يجب أن تكون أقل من أقصى قيمة مسموح بها لملء المجرى.

(5- 4- 3) عدد كيابل الجهد العال لجهد أعلى من 2000V

هذا الجزء خاص بالكيابل التي جهدها أعلى من 2000V

1- اتساع مجرى الكيابل لابد أن يكون أكبر من أو يساوي $d_1+d_2+d_3+d_4+d_5+d_6+d_7$

2- لابد من وضع الكيابل أفقيا في وضع مسطح بجوار بعضه كما بالشكل (8).



شكل (8)

(5- 5) فقد الفولطية Voltage Drop

عند مرور تيار كهربائي في موصل الكيبل فإنه يحدث انخفاض في الجهد بين طرفي الكيبل (IZ) فإذا كان هذا الانخفاض كبيرا فإن الجهد الواصل إلى المعدات التي يغذيها الكيبل يمكن أن يكون غير كافياً بحيث تعمل هذه المعدات بكفاءة أقل من كفاءتها المطلوبة. وهذا الانخفاض في الجهد لابد أن يعطي عناية كبيرة في الجهود المنخفضة عنها في الجهود العالية. وعموما فإن فقد الفولطية لكيبل جهده أعلي من 1000V لا يمثل أية مشكلة تذكر إلا إذا كان طول مسار الكيبل كبيرا جدا.

ويعطى فقد الفولطية (تبعا لـ BS7671) بالوحدة التالية mV/A/m ويتم استنتاجها من العلاقات التالية:

لدوائر الوجه الواحد $mV/A/m = 2Z$

لدوائر الثلاثة أوجه $mV/A/m = \sqrt{3}\ Z$

ويعطى فقد الفولطية بالميلي فولت لكل 1 أمبير لكل متر من طول الكيبل حيث Z هي المعاوقة لكل موصل لكل كيلو متر من طول الكيبل عند أقصى درجة حرارة تشغيل.

وإذا أردنا التعبير في دوائر الوجه الواحد بفقد الفولطية كنسبة من جهد المصدر فلابد من تنسيب فقد الفولطية لجهد الوجه V_o أي مثلا 240V في المصدر 240/415V. أما في دوائر

الثلاثة أوجه فلابد من تنسيب فقد الفولطية لجهد الخط V أي مثلا 415V في المصدر 240/415V.

(5- 6) الأخطاء في الكيابل الكهربائية:

تتعرض المهمات الكهربائية المختلفة بالشبكات الكهربائية أثناء تشغيلها لأخطاء قد تمنعها من أداء عملها علي الوجه الصحيح بما في ذلك الكيابل الكهربائية ومع ذلك تعتبر الكيابل من أقل عناصر المنظومة الكهربائية تعرضا للأخطاء . ويمكن تصنيف أخطاء الكيابل علي النحو التالي:

1- قطع بالموصل الكهربائي نتيجة أعمال حفر بجوار الكيبل المدفون لذلك لابد من وضع شريط تحذيري فوق مسار الكيبل لتنبيه القائمين بأعمال الحفر.
2- القصر عند أطراف التوصيل للكيابل (صندوق أطراف الكيابل) نتيجة القوارض أو وجود جسم معدني موصل.
3- انهيار عزل الكيبل نتيجة جهد دفعي أكبر من تحمله
4- انهيار عزل الكيبل نتيجة وجود فقاعات غازية أو شوائب
5- انهيار عزل الكيبل نتيجة ارتفاع درجة حرارة الكيبل لأعلي من درجة تحمل العازل
6- تدهور خواص العازل نتيجة للتقادم وطول فترة الاستخدام أو لتسرب الرطوبة إلى داخل الكيبل.

(5- 7) تحديد أماكن حدوث الأخطاء

هناك العديد من الطرق يمكن استخدامها لتحديد الخطأ ولكن لابد أن تلبي طريقة تحديد الخطأ بالكيابل الكهربائية المتطلبات التالية:

- لابد من تحديد مكان الخطأ خلال نطاق ضيق كاف وذلك لتحديد مكانه بدقة وسرعة إصلاحه بأقل كمية من الحفر و الارتباك.
- الطريقة المستعملة لتحديد مكان الخطأ يجب أن تكون غير ضارة بالكيبل.

1- طريقة الطرقة Thumping method

الطرق هي طريقة تستعمل لتحديد مكان الخطأ المصاحب بمقاومة عالية والمبدأ الأساسي للطرق هو دفع نبضات متكررة ذات طاقة عالية علي الكيبل مستخدما مولد جهد نبضي

وعندما تصل النبضة إلى موقع الخطأ يتسبب الجهد النبضي العال في انهيار مكان الخطأ وحدوث شرارة وعندها يمكن معرفة مكان الخطأ بإحدى الطرق التالية:

- بالشعور باهتزازات الشرارة تحت الأرض
- باستخدام معدات حساسة للصوت إذا كانت الشرارة الناتجة ليس لديها القوة الكافية.

شكل (9) جهاز الطرقة

وهذه الطريقة لها العديد من المميزات والعيوب. فمميزاتها تتلخص في أنها:

- طريقة بسيطة وصريحة ولا تحتاج لفني ذي خبرة عالية
- تستطيع تحديد الخطأ حتى في حالات الأخطاء المصاحبة بالمقاومة العالية

وعيوب هذه الطريقة هي أنها:

- يمكن أن تضر الكيابل المجاورة ولذلك لا ينصح بها في الكيابل الموجودة بمجار
- لها تأثير سيئ علي العمر الافتراضي للكيابل الكهربائية
- صدى الصوت يمكن ن يجعل عملية تحديد مكان الخطأ صعبة حتى ولو حدث انهيار لمكان الخطأ

2- طريقة التردد المنخفض جدا Extremely Low Frequency Method

بعض أعطال الكيابل المصاحبة بمقاومة عالية جدا لا يمكن أن تنهار بالطرق التقليدية نظرا لضعف الجهد في هذه الأجهزة وفي هذه الحالات استخدمت نظم الجهد العال المستمر الذي أثبت كفاءة في السابق ولكن ظهرت بعض الصعوبات في استخدامها مع الأنواع الجديدة للكيابل. وعلي إثر ذلك ظهرت إلى السطح طريقة التردد المنخفض جدا لاختبار وتحديد أعطال الكيابل والتي استعملت بنجاح كبير.

واستخدمت هذه الطريقة في اختبار وتحديد أعطال كيابل الجهد المتوسط لسنوات عديدة وذلك للكيابل الجديدة والمستعملة علي حد سواء وتستخدم هذه الطريقة لاكتشاف أعطال التلف الميكانيكي للكيابل والفراغات والتشجير المائي داخل عازل الكيبل. كذلك استخدمت هذه الطريقة لاختبار الكيابل البوليمرية والكيابل الورقية وكيابل البولي فينيل كلورايد. وقد أثبتت هذه التقنية أنها لا تسبب أي إجهاد للكيبل مقارنة بطريقة التيار المستمر.

وتستخدم هذه الطريقة موجة جيبية مربعة وتردد 0.1Hz مما يزيد في حجم الخلل الميكانيكي والتشجير في عازل الكيبل ليحدث الانهيار خلال فترة الاختبار الثلاثي الأوجه الذي يدوم ساعة واحدة.

3- نظام الارتداد الزمني وتطبيقاته Time Domain Reflection Method

يستخدم نظام الارتداد الزمني في كل مراحل العمر الافتراضي للكيابل، من مرحلة التركيب لمرحلة الصيانة لمرحلة اكتشاف الأعطال وإعادة الكيابل للعمل.

ويستخدم نظام الارتداد الزمني في:

- تحديد الأماكن المتضررة بالكيابل الناتجة عن استخدام الآلات غير السليمة في تمديدها.
- تحديد مكان الوصلات الرديئة بالكيابل.
- تحديد أماكن الوصلات غير المعروفة
- تحديد أماكن المياه أو الرطوبة بالكيابل
- تحديد الكيابل المحطمة أو المضغوطة أو المثعبنة
- تحديد أماكن القصر أو القطع بالكيابل
- تحديد أماكن الثقوب أو الأعطال بالكيبل
- قياس الديسبل للفقد المرتجع للقصر

- تحديد أماكن المشكلات التي تسببها شركات التركيب
- الاستخدام لعمل ملف خاص بخريطة متكاملة لشبكة الكيابل

واستخدم جهاز قياس الارتداد الزمني لسنوات طويلة وما زال الجهاز الأسرع والأكثر دقة لتحديد مشكلات الكيابل وقد أصبح استعماله شائعا إلىوم. وقد أصبح تشغيل وتحليل نتائج جهاز الارتداد الزمني أكثر بساطة ودقة هذه الأيام وذلك من خلال التطور الكبير في التقنية. تستخدم كذلك أجهزة الارتداد الزمني لتحديد مشكلات الكيابل المزدوجة الملفوفة (twisted pair cable) والكيابل الطولية (coaxial cable) سواء كانت في الهواء أو مدفونة بالأرض.

ويمكن لأجهزة الارتداد الزمني أن تحدد المشكلات الكبيرة والصغيرة بالكيابل مثل إعطاب شريط الحماية، أو الموصلات المكسورة، أو الانهيار المائي، أو فقد التوصيلات، أوانضغاط الكيابل علي السطح، أو القطع بالكيبل، أو قصر الموصلات، أو حالات القصر الآخرى. كما يستخدم لاختبار تعرج الكيابل من الشحن الخطأ أو تخزين الكيابل أو استعمال الكيبل.

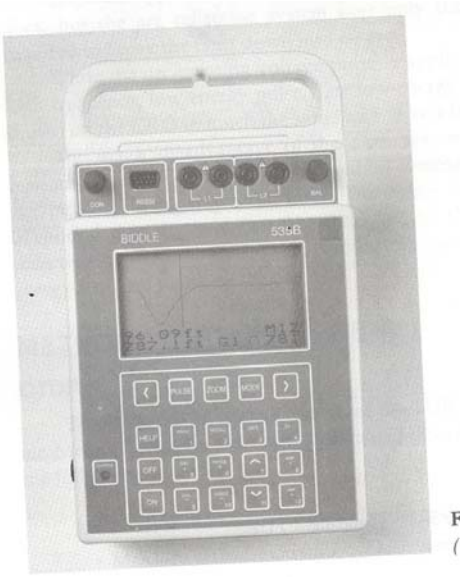
وتعمل أجهزة الارتداد الزمني علي إرسال دفعة من الطاقة علي طول الكيبل وعندما تصل لطرف الكيبل أو إلى منطقة الخطأ فإن جزءاً من الدفعة يمر والجزء الآخر يرتد مرة أخرى للجهاز. فيقيس جهاز الارتداد الزمني الزمن الذي تأخذه الدفعة للذهاب إلى منطقة العطل أو المشكلة والعودة مرة أخرى للجهاز ويحول الجهاز هذا الوقت إلى مسافة وتظهر المعلومات كموجة وقراءة مسافة.

وهناك طريقتان لأجهزة قياس الارتداد الزمني لإظهار المعلومات التي تستقبلها:

- الأولي وهي إظهار الموجة الحقيقة- الموجة المرسلة والموجة المرتدة- أو تأثير الكيبل
- الثانية وهي إظهار قراءة رقمية للمسافة لأول ارتداد موجي بسبب عدم تماثلية المعاوقات.

ومعظم أجهزة قياس الارتداد الزمني لها اتساع موجة دفعية مضبوطة عليها أو يمكن أن يحتوي الجهاز الواحد علي كل الاتساعات المتاحة (2، 10، 100، 1000، 2000، 4000 نانو ثانية) وكلما اتسعت الموجة تزداد طاقتها. فنبدأ دائما في خطوات تحديد العطل بأقل اتساع موجي –لأن العطل يمكن أن يكون علي مسافة قصيرة- فإذا لم يتم تحديد مكان العطل نبدأ بتغيير الاتساع الموجي للأكبر حتى يتم تحديد مكان الخطأ. ويتيح الاتساع الموجي

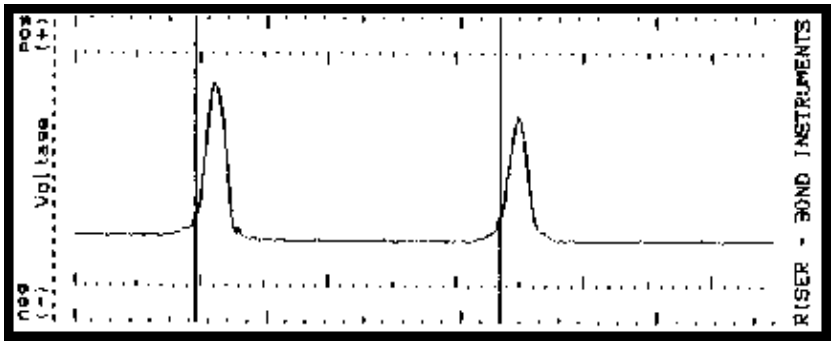
الأكبر تحديد الأخطاء الصغيرة التي تكون الموجة المرتدة منها ضعيفة بالإضافة إلى تضعيف الكيبل نفسه للموجات مما يزيد من صعوبة تحديد الموجة المرتدة في الاتساعات الموجية الصغيرة.



شكل (10) جهاز الارتداد الزمني

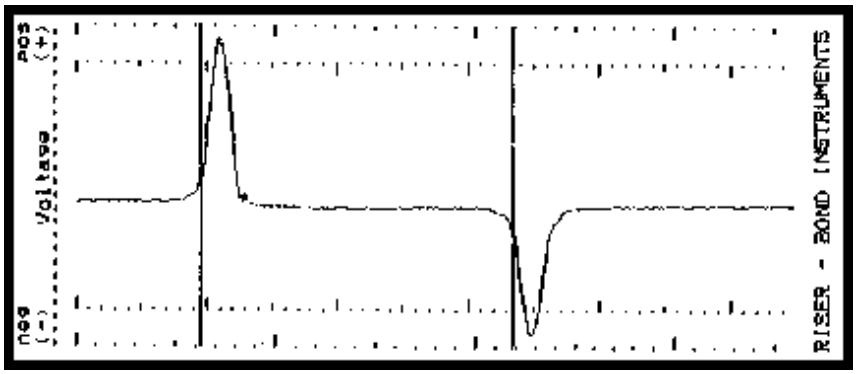
أمثلة علي الموجات التي تظهر علي جهاز الارتداد الزمني

1- ارتداد بنفس القطبية يدل علي قطع بالكيبل (open circuit) وله معاوقة عالية كما بشكل11.



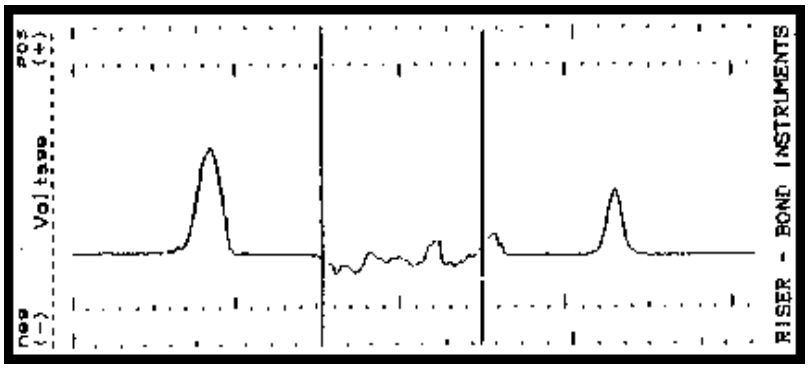
شكل (11)

2- ارتداد بعكس القطبية يدل علي قصر كامل (short circuit) ذي معاوقة عالية كما بشكل(12).



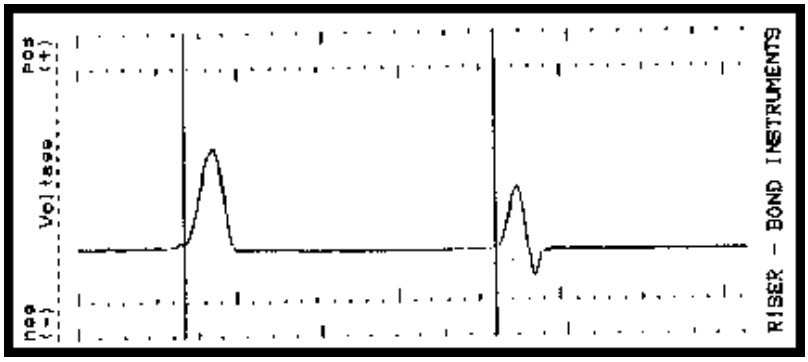
شكل (12)

3- كيبل موجود جزء منه مغمور بالماء حيث تتبين في بداية ميل الموجة لأسفل حتى ترتفع مرة أخري لأعلي وعامة تتشوه الموجة في المنطقة المغمورة بالماء كما بشكل (13).



شكل (13)

4- لحام أو وصلة عالية المقاومة ينتج عنهما ارتداد علي هيئة حرف S. ارتداد عال المقاومة لأعلى يتبعه ارتداد منخفض المقاومة لأسفل كما بشكل (14).

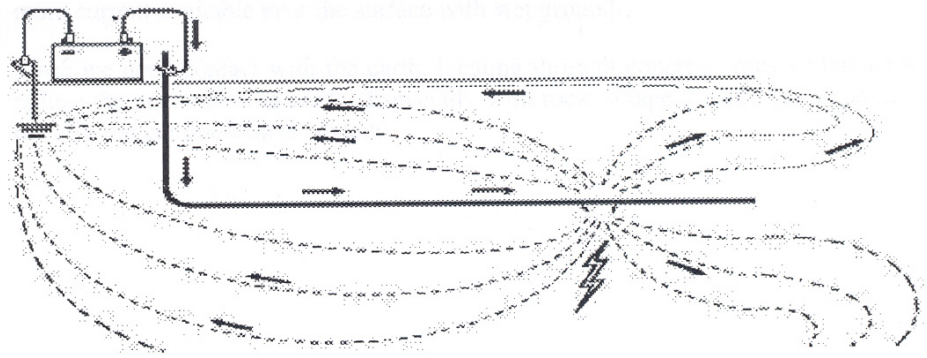


شكل (14)

4- طريقة A-Frame

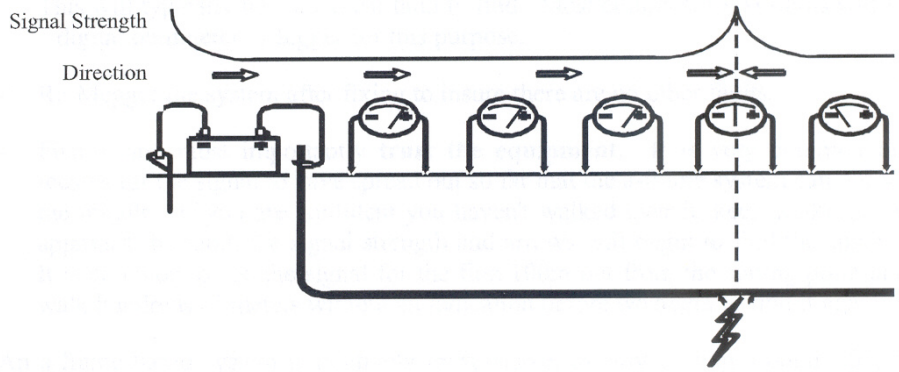
تستعمل هذه الطريقة لاكتشاف العطل الأرضي بالكيبل بسهولة ودقة كبيرة. في هذه الطريقة يستعمل التيار المستمر الدفعي لتحديد العطل الأرضي بحيث يربط الطرف السالب

بوتد أرضى ويوصل الطرف الموجب بطرف الكيبل تحت الاختبار كما بشكل (15). ويتركز التيار بصورة كبيرة حول العطل الأرضي وحول الوتد ولكن من هذه النقاط سيتحرك التيار بعيدا في المسارات التي لها أقل مقاومة. وينتج عن مرور التيار في المقاومة الأرضية جهداً مستمراً بسيطاً نستطيع من خلاله تحديد مكان العطل الأرضي.



شكل (15) توزيع التيارات الكهربائية حول كيبل به عطل أرضي

نبدأ بالمشي علي مسار الكيبل بجهاز A-Frame حيث يوجد مؤشران هما شدة الإشارة واتجاه العطل كما بشكل (16). قريبا من الوتد الأرضي تكون الإشارة كبيرة جدا ثم تنخفض الإشارة تدريجيا حتى تضعف بصورة كبيرة ثم تعاود الزيادة حتى تصل إلى قيمة عظمى عندما نصل إلى العطل. ويحدد مكان العطل عند حدوث شيئين الأول ازدياد تركيز التيار وانعكاس الأسهم فجأة عند العبور علي العطل.



شكل (16) باحث العطل باستخدام الإشارة

أسئلة

(1) اذكر التصنيفات المختلفة للكيابل الكهربائية

(2) اذكر أهمية استخدام الكيابل الكهربائية

(3) اذكر وظيفة كل من ستارة الموصل والتسليح والغلاف الخارجي للكيبل

(4) اذكر مصادر الفقد في القدرة الكهربائية والتي تتسبب في رفع درجة حرارة الكيبل

(5) اذكر الطرق لمختلفة المستعملة في تبريد الكيابل الكهربائية

(6) اذكر الطرق المختلفة المستعملة في تحديد أماكن حدوث الأخطاء بالكيابل الكهربائية

(7) اشرح طريقة الارتداد الزمني في تحديد أماكن الأخطاء بالكيابل

(8) اشرح طريقة A-Frame في تحديد أماكن الأخطاء بالكيابل

(9) اذكر أهم عيوب طريقة طريقة الطرقة في تحديد أماكن الأخطاء بالكيابل

(10) ضع علامة (✓) أمام العبارة الصحيحة وعلامة (✗) أمام العبارة الخاطئة فيما يلي:

1- السعة الأمبيرية للموصلات المكشوفة المستخدمة في خطوط النقل الهوائية أكبر بكثير من السعة الأمبيرية للكيابل. ( )

2- تكلفة العازل في الخطوط الهوائية أقل بكثير من تكلفته في الكيابل ( )

3- مقاومة الموصل للتيار المتردد أقل من مقاومته للتيار المستمر ( )

4- تكلفة تركيب الكيبل أقل من تكلفة تركيب خط النقل الكهربائي ( )

5- الكيابل الكهربائية أقل أمانا للأفراد وأكثر عرضة للحوادث من خطوط النقل ( )

6- تتحدد السعة الأمبيرية للكيبل بأقصى درجة حرارة يمكن أن يتحملها الكيبل بصفة مستمرة ( )

7- فقد الفولطية ذو أهمية كبري في دوائر الجهد العال عنها في دوائر الجهد المنخفض ( )

(11) احسب القطر الاقتصادي لكيبل أحادي القلب جهد 66kV وأوجد ايضا القطر الكلي للعازل إذا كان أقصى إجهاد كهربائي لايزيد عن 40kV/cm.

(12) احسب تيار الشحن لكيبل زيتي أحادي الوجه جهده 66kV بتردد 50Hz وطوله 7km وقطر موصله 3.5cm والقطر الداخلي للعازل 7.8cm وسماحيته النسبية 2.8.

(13) احسب المقاومة النوعية لعازل قطر موصله 1.5cm وقطر الغلاف 5cm لكيبل طوله 3km ومقاومة عازله 1820MΩ.

(14) احسب السعة الأمبيرية لكيابل XLPE موضوعة في الهواء جهد 0.6/1kV ذات ثلاثة قلوب نحاسية (ألمنيوم) مساحة مقطع كل منها $120mm^2$ إذا كانت درجة حرارة الجو 30^oC.

(15) ستة كيابل XLPE جهد 0.6/1kV ذات ثلاثة قلوب نحاسية (ألمنيوم) مساحة مقطع كل منها $240mm^2$ مدفونة في الأرض علي عمق 1m فإذا كانت المسافة بين مركز الكيبل والكيبل المجاور له 45cm ودرجة حرارة الأرض 20^oC والمقاومية الحرارية للتربة $1.5^oKm/W$. احسب السعة الأمبيرية للكيبل.

(16) منشأة صناعية تحتاج إلى كيابل XLPE بمقنن جهد 0.6/1kV لتغذية حمل مقداره 1200A لكل وجه. اقتضت ظروف التشغيل استعمال 4 كيابل ثلاثية القلوب يفصل بينها مسافات 60cm والمجاري مدفونة في وضع مسطح علي عمق 100cm. فإذا كانت المقاومية الحرارية للتربة $1.5^oKm/W$ ودرجة حرارة التربة 25^oC اختر الكيبل المناسب لحمل هذا التيار في هذه الظروف.

الوحدة السادسة

الظاهرة السطحية

دراسة بعض الظواهر على خطوط النقل الكهربائية

(6- 1) الظاهرة السطحية Skin Effect

يتوزع التيار الكهربائي المتردد توزيعا غير منتظماً على مساحة مقطع الموصل الكهربائي حيث يزيد قيمة التيار المار عبر المقطع كلما بعدنا عن نقطة المركز لمقطع الموصل في اتجاه السطح الخارجي. وتسمى هذه الظاهرة بالظاهرة السطحية للموصل الكهربائي. ويمكن تفسير هذه الظاهرة علي النحو التالي: لو افترضنا أن الموصل الكهربائي المصمت مكون من عدد لانهائي من شعيرات الأسلاك وبمرور التيار الكهربائي المتردد في هذه الشعيرات ينتج مجالاً مغناطيسياً حول كل شعيرة هذا المجال يقطع ما يجاوره من شعيرات. في هذه الحالة نجد أن الشعيرات المتواجدة في مركز الموصل الكهربائي يقطعها عدد كبير من خطوط الفيض المغناطيسي وتقل عدد خطوط الفيض المغناطيسي كلما اتجهنا إلى سطح الموصل مما يتسبب في زيادة المعاوقة الحثية في قلب الموصل الكهربائي وتقل هذه المعاوقة كلما اتجهنا إلى السطح. لذلك يتجه التيار الكهربائي للأماكن التي تقل بها المعاوقة الكهربائية وهي سطح الموصل. وتسمي هذه الظاهرة بالظاهرة السطحية. لذلك فمقاومة الموصل الكهربائي في حالة مرور التيار المتردد به تكون أكبر من قيمة المقاومة في حالة مرور التيار المستمر.

$$R_{A.C.} = K\, R_{D.C.} \qquad (1)$$

حيث إن R_{AC} هي مقاومة الموصل للتيار المتردد و R_{DC} هي مقاومة الموصل للتيار المستمر وK ثابت يعتمد علي قيمة المعامل P

$$P = 0.52\sqrt{\frac{f}{R_{DC}}} \qquad (2)$$

حيث إن R_{DC} هي مقاومة التيار المستمر لكل كيلومتر و f التردد

جدول (1) العلاقة بين المعاملين P و K

P	1.0	1.4	1.8	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0	3.2	3.8
K	1.005	1.020	1.052	1.111	1.152	1.200	1.256	1.318	1.385	1.600

(6- 2) ظاهرة التفريغ الهإلى Corona Phenomena

عندما يزداد الجهد بين موصلين بينهما مسافة كبيرة مقارنة بأقطار الموصلات إلى قيم عالية جدا ترتفع قيمة المجال الكهربائي علي أسطح الموصلات مما يؤدي إلى تأين الهواء المحيط بالموصلات وعند قيمة معينة من الجهد يسمع صوت ضجيج خافت يسببه تكوين التفريغ الهإلى. ويسمى الجهد الذي يحدث عنده هذا الضجيج بالجهد الحرج. فإذا زاد الجهد عن ذلك فإنه سيتسبب في ظهور وهج بنفسجي مرئي حول الموصلات الكهربائية. وهذا الجهد يسمى الجهد المبدئي للتفريغ الهإلى المرئي.

إذا كان الجهد المطبق جهداً عالياً مستمراً فإن الوهج المرئي سيكون منتظما علي الموصل الموجب أما علي الموصل السالب سيكون علي أجزاء صغيرة وغالبا مما يصاحب بسيل من الشحنات عند نقاط متعددة ومتقاربة. وفي حالة الجهد العال المتردد سيظهر وهج منتظم علي الموصلين. إذا زاد الجهد أكثر من ذلك ستزداد ظاهرة التفريغ الهإلى وأخيرا تحدث شرارة بين الموصلات الكهربائية.

(6- 2- 1) الجهد الحرج Disruptive Critical Voltage

توجد دائما بعض الإلكترونات في الجو ناتجة عن الأشعة الكونية وهذه الإلكترونات تتأثر بالمجال الكهربائي المحيط بالموصلات الكهربائية. ويكون المجال الكهربائي علي سطح الموصلات أكبر ما يمكن ويقل بسرعة كلما ابتعدنا عن سطح الموصل. هذا المجال يؤثر بقوة علي الإلكترونات مما يكسبها سرعة تزيد من طاقة حركتها. فإذا كان الجهد عالا بما يكفي لوجود مجال كهربائي عال حول الموصلات فإن طاقة الحركة التي تكتسبها الإلكترونات تجعلها قادرة على إحداث تأين للذرات المتعادلة كهربائياً ويصبح الهواء حول الموصلات موصلا.

فتحت الظروف العادية فإن شدة عزل الهواء تكون $30kV_{peak}/cm$. وبالطبع فإن التفريغ الهإلى يتأثر بالحالة الفيزيائية للجو المحيط ففي حالة الطقس العاصف فإن الجهد الذي تحدث عنده ظاهرة التفريغ الهإلى أقل بكثير من الجو الصحو.

ويمكن تحليل حالة ظاهرة التفريغ الهإلى المستقرة كما يلي:

بفرض أن هناك موصلين A و B يبعدان عن بعضهما مسافة D ونصف قطر كل منهما r كما بشكل(1)

بتطبيق نظرية جاوس (Gauss) فإن شدة المجال الكهربائي علي مسافة x من الموصل هي:

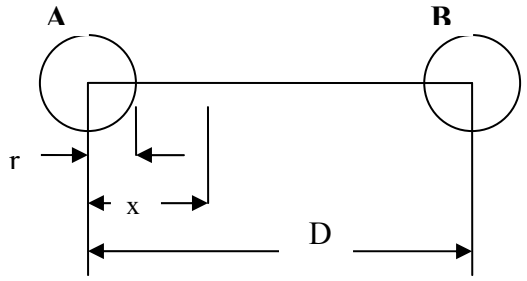
$$E = \frac{q}{2\pi x \varepsilon} \qquad (3)$$

حيث إن

$$q = VC = \frac{V 2\pi\varepsilon}{Log_e(D/r)}$$

لذلك فإن

$$E = \frac{V}{xLog_e(D/r)} \qquad (4)$$



شكل (1)

حيث إن q هي الشحنة و V هو فرق الجهد بين الموصلين و C هي سعة الخط و E هي شدة المجال الكهربائي علي سطح الموصل.

تصبح شدة المجال أكبر ما يمكن عندما x = r لذلك فإن:

$$E_{max} = \frac{V}{rLog_e(D/R)} \qquad (5)$$

لذلك فإن المجال الكهربائي الحرج علي سطح الموصل عند ضغط 1 ضغط جوي و 25 ^oC هو:

$$E_C = \frac{V_C}{rLog_e(D/r)} \qquad (6)$$

حيث V_C هو جهد الوجه للموصل الذي يحدث عنده الانهيار علي السطح.

لذلك فإن قيمة الجهد الحرج للموصل هي:

$$V_C = E_C\, r\, Log_e(D/r) \qquad (7)$$

ومع التغير في درجة الحرارة والضغط للغاز حول الموصلات الكهربائية تتغير قيمة المجال الحرج الذي تحدث عنده ظاهرة التفريغ الهإلى لذلك فلابد أولا من معرفة معامل الكثافة للغاز δ حول الموصل عند درجة حرارة T^oC وضغط P مليمتر زئبق:

$$\delta = \frac{p}{760}\frac{293}{273+T} \qquad (8)$$

وتعدل معادلة الجهد الحرج إلى:

$$V_C = E_C \delta r \, Log_e(D/r) \qquad (9)$$

إن شدة عزل الهواء الجوي المحيط بموصلات خطوط النقل الكهربائية حوالى 30 kV(peak)/cm أو 21.2 kV(rms)/cm عند درجة الحرارة والضغط العاديين. لذلك فإن قيمة الجهد الحرج تكون:

$$V_C = 21.2 \delta r \, Log_e(D/r) \qquad (10)$$

وعند الأخذ بعين الاعتبار الخشونة وعدم انتظامية سطح الموصل الكهربائي والتي تزيد من المجال الكهربائي علي سطح الموصل وتتسبب في حدوث هذه الظاهرة مبكرا فإن قيمة الجهد الحرج تصبح:

$$V_C = 21.2 \, m \, \delta r \, Log_e(D/r)$$

$$V_C = 48.5 \, m \, \delta r \, Log_{10}(D/r) \qquad (11)$$

حيث m هي معامل الخشونة وعدم انتظامية سطح الموصل الكهربائي. وتكون قيم m كالتالي:

m تساوي 1 للأسطح الناعمة للموصلات الكهربائية

وتساوي 0.93 to 0.98 للموصلات الخشنة.

وتساوي 0.90 للموصلات المجدولة التي بها أكثر من 7 شعيرات.

وتساوي 0.83 to 0.87 للموصلات المجدولة التي بها 7 شعيرات.

(6- 2- 2) ظاهرة التفريغ الهالى المرئية Visual Corona Phenomena

تحدث ظاهرة التفريغ الهالى المرئية عند جهد أعلى من الجهد الحرج وينتج الضوء أثناء عملية التفريغ عندما تطلق الجزيئات الطاقة الزائدة علي هيئة ضوء وموجات كهرومغناطيسية أخرى وللحصول علي الجهد الحرج لظاهرة التفريغ الهالى المرئية نقوم بضرب قيمة الجهد الحرج (معادلة 11) بمعامل يعتمد علي كثافة الهواء ونصف قطر الموصلات. وكذلك تختلف قيمة معامل الخشونة وعدم انتظامية سطح الموصل.

ولذلك تصبح ظاهرة التفريغ الهالى ظاهرة مرئية بضوء بنفسجي حول الموصل الكهربائي عندما يصل الجهد إلى:

$$V_v = 48.5 m_v \delta r \left[1 + \frac{0.3}{\sqrt{\delta r}}\right] \log_{10}\left(\frac{D}{r}\right) \qquad (12)$$

حيث m_v هي معامل الخشونة وعدم انتظامية سطح الموصل الكهربائي لظاهرة التفريغ الهإلى المرئية وتكون قيمها كالتالي:

m_v تساوي 1 للأسطح الناعمة للموصلات الكهربائية

وتساوي 0.72 لظاهرة التفريغ الهإلى الموضعية علي الموصلات المجدولة (علي نقاط علي الموصل).

وتساوي 0.82 لظاهرة التفريغ الهإلى الحاسمة علي الموصلات المجدولة (أي علي الموصل كله).

(6- 2- 3) القدرة المفقودة خلال ظاهرة التفريغ الهإلى

يصاحب ظاهرة التفريغ الهإلى فقد في القدرة الكهربائية وهذا الفقد له تأثير بسيط علي كفاءة خط النقل الكهربائي وليس له تأثير فعال علي تنظيم الجهد علي الخط. والتأثير الأكثر أهمية هو التداخل مع موجات المذياع وموجات التلفاز.

والفقد في القدرة الكهربائية خلال ظاهرة التفريغ الهإلى يتناسب مع مربع الفرق بين جهد الوجه للخط والجهد الحرج لظاهرة التفريغ الهإلى ويعطي الفقد في القدرة الكهربائية بالمعادلة التالية:

$$P = 240\frac{(f+25)}{\delta}\sqrt{\frac{r}{D}}(V - V_C)^2 x10^{-5} kw/km/phase \qquad (13)$$

حيث V جهد الوجه للموصل الكهربائي و f التردد بـ Hz.

وعيوب هذه الظاهرة يتمثل في الآتي:

1. الفقد في القدرة الكهربائية
2. التداخل في موجات المذياع
3. التداخل في موجات التلفاز

ويمكن الحد من هذه الظاهرة علي خطوط نقل القدرة الكهربائية بزيادة قطر الموصل الكهربائي وذلك باستخدام موصل الحزمة (bundle conductor) بحيث يكون القطر المكافئ D لهذا الموصل كبيرا للحد من هذه الظاهرة.

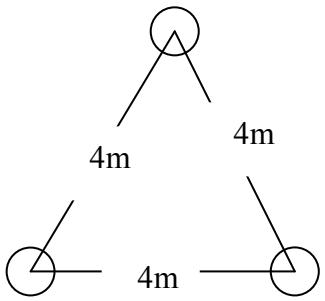
مثال1 : احسب الجهد الحرج وجهد التفريغ الهإلى المرئي لخط نقل كهربائي يعمل عند 132kV وله المعلومات التالية:

- نصف قطر الموصل الكهربائي 1cm
- المسافة بين الموصلات المرتبة في شكل دلتا 4m
- درجة الحرارة 15^oC
- معامل عدم انتظامية سطح الموصل 0.9
- معامل سطح الموصل 0.8

الحل:

r=1cm

$D_1=D_2=D_3=4m=400cm$



شكل 2

$$D=\sqrt[3]{D_1D_2D_3}=\sqrt[3]{4x4x4}=4m$$

$$\delta=\frac{760}{760}\frac{293}{273+15}=1.017$$

m = معامل عدم الانتظامية x معامل السطح

m = 0.8 x 0.9 = 0.72

$V_C= 48.5\ m\ \delta\ r\ Log_{10}(D/r)$

$V_C=48.5 \times 0.72 \times 1.017 \times Log_{10}(400/1) = 92.4\ kV\ (r.m.s)$

جهد التفريغ الهإلى المرئي :

$$V_v=\left(1+\frac{0.3}{\sqrt{\delta r}}\right)V_c=\left(1+\frac{0.3}{\sqrt{1.017x1}}\right)x92.4=119.88kV(r.m.s)$$

مثال2: احسب قيمة الجهد الحرج والجهد الحرج لظاهرة التفريغ الهإلى المرئية والفقد في القدرة الكهربائية خلال الجو الصحو والجو العاصف لخط ثلاثي الوجه طوله 100km وجهده 132kV بتردد 50Hz وموصلاته قطرها 1.04cm ومرتبة في وضع دلتا بين كل موصل والآخر 3m علما بأن درجة حرارة الجو المحيط 40^oC والضغط 750torr (معامل خشونة السطح $m_v=0.72$, $m=0.85$)

الحل:

معامل الكثافة

$$\delta=\frac{P}{760}.\frac{273+20}{273+t}=\frac{750}{760}.\frac{293}{273+40}=0.925$$

الجهد الحرج

$V_C = 48.5\ m\ \delta\ r\ Log_{10}(D/r)$

$= 48.5x0.85x0.925x0.52xLog_{10}(3/0.0052)=55.1kV$

الجهد الحرج للتفريغ الهإلى المرئي

$$V_v = 48.5 m_v \delta r \left[1 + \frac{0.3}{\sqrt{\delta r}}\right] \log_{10}\left(\frac{D}{r}\right) = 48.5x0.72x0.925x0.52\left[1 + \frac{0.3}{\sqrt{0.925x0.52}}\right] Log_{10}\left(\frac{3}{0.0052}\right) = 67.2kV$$

القدرة المفقودة في الجو الصحو

$$P_c = \frac{243}{0.925}(50+25)\sqrt{\frac{0.0052}{3}}\left(\frac{132}{\sqrt{3}} - 55.1\right)^2 .10^{-5}.100 = 365kW / phase$$

القدرة المفقودة في الجو العاصف

$$P_c = \frac{243}{0.925}(50+25)\sqrt{\frac{0.0052}{3}}\left(\frac{132}{\sqrt{3}} - 55.1x0.8\right)^2 .10^{-5}.100 = 847kW / phase$$

(6- 3) تأثير الصواعق علي خطوط النقل وطرق الحماية منها

يتعرض خط النقل الكهربائي أثناء تشغيله إلى ارتفاع فجائي ولحظي للجهد الكهربائي ناتج إما عن مصدر خارجي هو الصواعق الكهربائية أو من مصادر داخلية مثل عمليات فتح وغلق القاطع الكهربائي وكذلك حالات القصر وحالات الرنين علي الشبكات الكهربائية وتتسبب هذه المصادر في الارتفاع المفاجئ اللحظي للجهد الكهربائي.

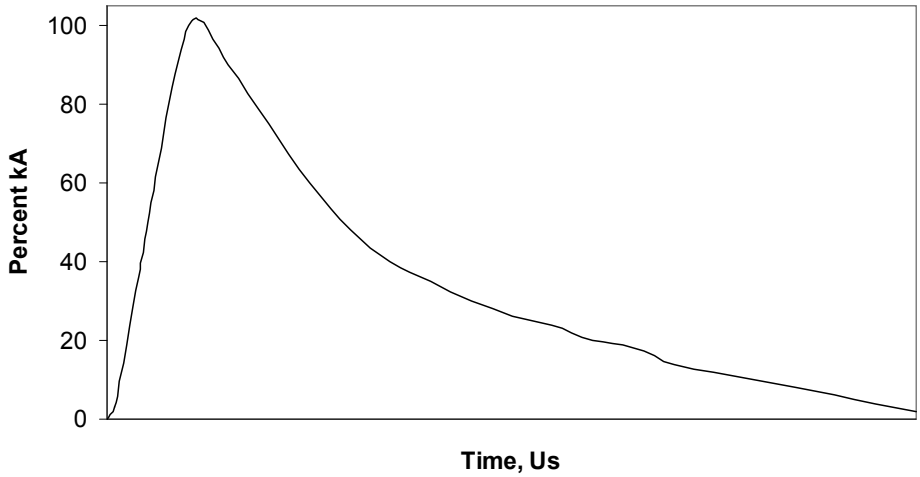
(6-3-1) الصواعق الكهربائية Lightning Strokes

تمثل الصواعق الكهربائية أهم المصادر الخطيرة للجهد الفجائي اللحظي علي الشبكات الكهربائية لذلك فإن هذه الجهود يمكنها أن تتسبب في مشاكل كبيرة للشبكة الكهربائية مثل انهيار عوازل الخط الكهربائي أو تلف عوازل ملفات المحولات الكهربائية أو عوازل ملفات المولدات الكهربائية وبذلك يمكن أن تؤدي إلى فصل كامل للشبكة الكهربائية.

الصاعقة الكهربائية هي عبارة عن شرارة ضخمة ناتجة عن تفريغ كهربائي بين سحابة والأرض. وهناك العديد من النظريات التي تحاول أن تشرح كيفية تكون الشحنات الكهربائية بالسحب ولكنها كافية لافتراض أنه عند حدوث العواصف الرعدية وبعض العمليات الجوية تتراكم الشحنات في السحب أو جزء منها وتلتصق الأيونات الموجبة أو السالبة بقطرات المياه الصغيرة المعلقة في الهواء لذلك فإن السحب تشحن إما بشحنة موجبة أو شحنة سالبة. وهذه السحابة المشحونة تولد شحنات تأثيرية علي الأرض أسفلها مباشرة وينشأ فرق

جهد بين السحابة والأرض وكلما ازداد تراكم الشحنات بالسحابة ازداد فرق الجهد بينها وبين الأرض وتبدأ الصاعقة من السحابة إلى الأرض عندما يصل فرق الجهد مابين 5 إلى 20 ميجافولت أو بتعبير اخر عندما يصل المجال الكهربائي إلى قيمة كافية لانهيار الهواء الرطب (من 5 إلى 10 كيلوفولت/سم) حول السحابة. وعندما تقترب رأس الصاعقة من الأرض يزداد المجال الكهربائي وتنطلق الشحنات المعاكسة من الأرض لمعادلة الشحنات في رأس الصاعقة مما يمثل شرارة ضخمة يصاحبها تيار عال جدا يتحرك بسرعة كبيرة (حوإلى 2500 أمبير/ثانية) تجاه الصاعقة، تزداد موجة الجهد للصاعقة الرعدية بسرعة حتى تصل لأعلي قيمة في زمن صغير جدا ثم تبدأ في التناقص ببطء نسبيا كما في شكل(4) .

شكل (3) صورة فوتوغرافية لصاعقة رعدية



شكل (4) العلاقة بين التيار والزمن

ويمكن تصنيف هذه الموجة بالبيانات التالية:

- القيمة العظمي. ويمكن ملاحظة أن أقصى قيمة للتيار هي 400 كيلوأمبير
- مقدمة الموجة. يتراوح زمنها من 1 حتى 10 ميكوثانية.
- زمن موجة المؤخرة. وهو الزمن الذي يمر من ظهور الموجة حتى تصل إلى 50% من أقصى قيمة للموجة علي مؤخرتها وتتراوح بين 10 إلى 100 ميكروثانية.

وهذه الموجة ضارة جدا بالمعدات الكهربائية التي بالشبكة لذلك يجب حمايتها من هذه الموجات الفجائية

(6- 3- 2) طرق حماية الخطوط الكهربائية من الصواعق

يتم حماية خطوط النقل الكهربائية من الصواعق بالتصميم المناسب للخط ووضع خطوط حماية أرضية واستعمال مانعات الصواعق.

فالزيادة الفجائية للجهود علي الشبكة الكهربائية الناتجة عن الصواعق الكهربائية يمكن تجنبها أو التقليل من أخطارها في الواقع بالوسائل التالية:

(ا)حماية الخطوط الهوائية باستخدام الخطوط الأرضية.

(ب) استخدام القضبان الأرضية

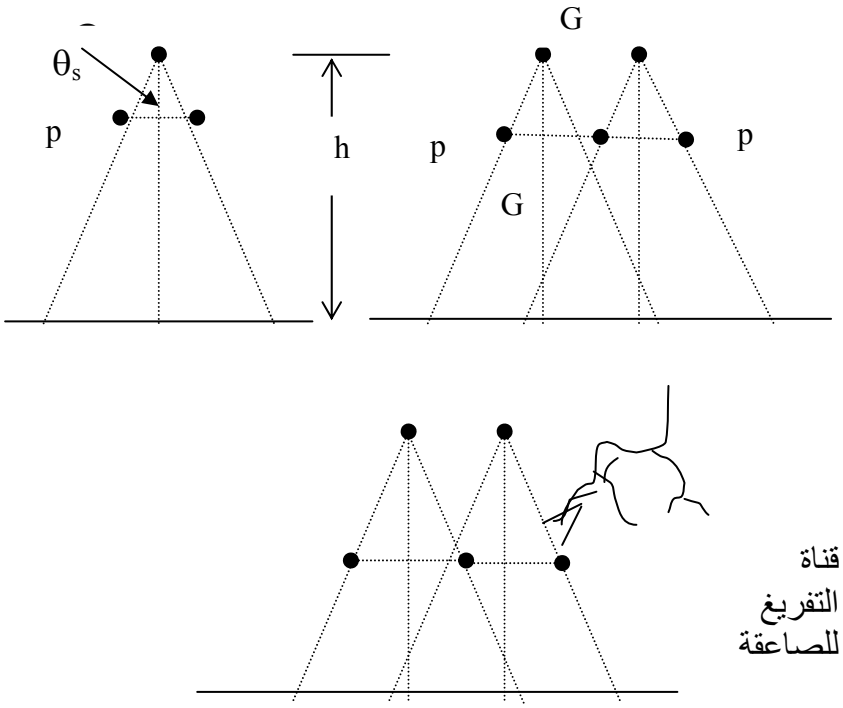
(ت)استخدام أجهزة الحماية مثل ثغرات التفريغ (expulsion gaps) وأنابيب الحماية علي الخطوط ومانعات الصواعق عند نهايات الخطوط وكذلك بمحطات التحويل.

(6- 3 – 2- 1) الخطوط الأرضية Earthing Lines

الخط الأرضي هو موصل كهربائي موجود علي التوازي مع الموصلات الرئيسة لخط النقل الكهربائي الموضوعة علي نفس البرج ومؤرض عند كل الأبراج. يوضع الخط الأرضي أعلى الخطوط لرئيسة لخط النقل الكهربائي. ويعمل هذا الخط علي حماية خط النقل الكهربائي من الصواعق الكهربائية. ويوضح شكل(5) الخط الأرضي بالنسبة لخطوط النقل.

ويمكن شرح كيفية حماية الخط الأرضي للخطوط الكهربائية كما يلي. بفرض أن السحابة الموجبة الشحنة موجودة أعلى الخط فإنها توجد شحنات كهربائية تأثيرية سالبة علي الجزء من الخط الكهربائي والموجود أسفل منها. وبوجود الخط الأرضي مع الخط الكهربائي فإن كلا منهما سيكتسب شحنات تأثيرية ولكن الخط الأرضي يكون مؤرضا عند مسافات منتظمة لهذا فإن الشحنات التأثيرية المتولدة علي الخط الأرضي تسرب للأرض

عند نقاط التأريض ويكون فرق الجهد بين الخط الأرضي والسحابة وبين الخط الأرضي والخط الكهربائي متناسبا تناسبا عكسيا مع السعة (capacitances) بينهما. وحيث إن الخط الأرضي أقرب للخط الكهربائي فإن الشحنات التأثيرية عليه تكون قليلة جدا ولذلك فإن الارتفاع في الجهد يكون بسيطاً جدا. وتعتمد الحماية الفعالة للخط الأرضي علي ارتفاع الخط الأرضي عن سطح الأرض وزاوية الحماية. وتكون زاوية الحماية تقريبا 30^o مناسبة جدا للأبراج ذات الارتفاع حتى 30 متر. ويمكن استخدام خط حماية أرضي أو أكثر ويعتمد ذلك علي نوع البرج.



G= الخط الأرضي h=ارتفاع الخط الأرضي عن سطح الأرض

P= خط النقل θ_s= زاوية الحماية = 30^o

شكل (5) ترتيب الحماية للخطوط الكهربائية من الصواعق

(6- 3- 2- 2) الحماية باستخدام قضبان التأريض وأسلاك الموازنة العكسية

عند حماية الخطوط الكهربائية بالخط الأرضي فإن الصاعقة الكهربائية تفرغ شحنتها إما علي البرج أو علي الخط الأرضي. وفي حالة التفريغ علي الخط الأرضي فإن مسار الشحنات للأرض تكون من خلال نقاط توصيل الخط الأرضي بالبرج ثم إلى الأرض عن طريق المقاومة الأرضية للبرج وتنقسم الصاعقة إلى جزأين يسيران في اتجاه معاكس. لذلك فإن الخط

الأرضي يقلل من الجهد اللحظي للصاعقة حيث يكون مسار تيار الصاعقة في ثلاثة اتجاهات.

الجهد اللحظي لأعلى البرج يكون:

$$V_T = \frac{I_o Z_T}{(1 + \frac{Z_T}{Z_s})} \qquad (14)$$

حيث إن Z_T هي معاوقة الدفعة للبرج (surge impedance) و Z_s هي معاوقة الدفعة للخط الأرضي. لو قللنا من قيمة معاوقة الدفعة للبرج والتي هي في نفس الوقت معاوقة تأريض البرج فإن جهد الدفعة سيقل في نفس الوقت.

القضبان الأرضية التي تستخدم يكون قطرها حوإلى 15 مم وطولها يتراوح بين 2.5 إلى 3 أمتار وفي الأرض الصلبة يزداد طول القضيب ويمكن أن يصل لأعماق حوإلى 50 متراً. وتصنع القضبان الأرضية عادة من الحديد المجلفن أو النحاس. ويعتمد عدد القضبان الأرضية والمسافات بينها وعمق الدفن علي القيمة المطلوبة للمقاومة الأرضية.

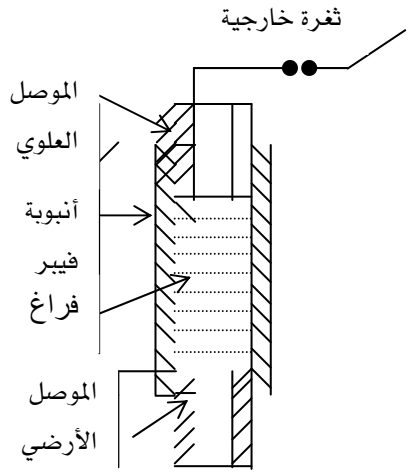
نفس التأثير السابق يمكن الحصول عليه باستخدام أسلاك الموازنة العكسية (counter poise wires) وتدفن هذه الأسلاك علي عمق يتراوح بين 0.5 إلى 1.0 متراً وموازيا لموصلات خطوط النقل الكهربائي وتوصل بأرجل الأبراج. طول هذه الأسلاك يتراوح بين 50 و 100 متراً. وقد وجد أن هذه الأسلاك أكثر فعالية من القضبان الأرضية وتقلل قيمة معاوقة الصاعقة بفعالية والتي يمكن أن تصل إلى 25 أوم. ولا يؤثر عمق الدفن علي مقاومة الأسلاك ولكن فقط يجب أن تدفن لعمق كافي لمنع السرقة. ومن المطلوب استخدام أطوال اكبر أو عدد منها علي التوازي بدلا من استخدام سلك واحد ولكن من الصعب أن نضع أكثر من سلك موازنة بالمقارنة بالقضبان الأرضية.

(6- 3- 2- 3) أجهزة الحماية

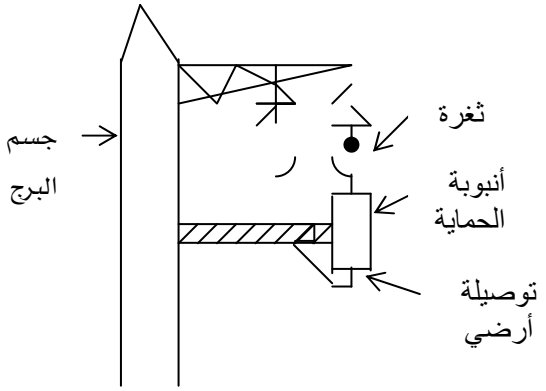
في المناطق كثيفة حدوث الصواعق الكهربائية لابد من وجود أجهزة حماية من الصواعق الكهربائية علي التوازي مع الخطوط الكهربائية. فعلي الخطوط الكهربائية نستخدم نوعين من الأجهزة تعرف بثغرات الانفجار وأنابيب الحماية. وغالبا ما يثبت بأطراف الخطوط الكهربائية ونقاط التوصيل الكهربائية علي الخطوط ومحطات التوزيع الكهربائية مانعات الصواعق.

(6- 3- 2- 3- 1) ثغرات الانفجار

ثغرات الانفجار هي أجهزة تحتوي علي ثغرات الشرارة spark gaps مع أجهزة لإطفاء الشرارة والتي تتدلع عندما تنهار الثغرات خلال الزيادة الفجائية للجهد.ويبين شكل (6b) ثغرة الانفجار وتتكون من ثغرة قضيب هوائية بالتوإلى مع ثغرة ثانية داخل أنبوبة فيبر. وفي حالة حدوث جهد فجائي تنهار كلا من ثغرات الشرارة علي التوإلى. وتحد قيمة التيار الفجائي فقط بمقاومة تأريض الأبراج والمعاوقة الدفعية للأسلاك الأرضية. وتتسبب الشرارة الداخلية في أنبوبة الفيبر خلال التيار الدفعي في تبخر جزء صغير من مادة الفيبر وتنتج بعض الغازات. هذه الغازات الناتجة تكون خليطاً من بخار الماء ومنتجات تحلل مادة الفيبر وتعمل علي طرد نواتج الشرارة والهواء المتأين. وعندما يصل التيار المار ذو التردد القوي للصفر تنطفئ الشرارة ويصبح المسار مفتوحاً كهربائياً ويستعيد العازل شدته ويحتفظ مرة أخرى بحالته الطبيعية.



شكل (6b) ثغرة الانفجار



شكل (6a) تركيب أنبوبة الحماية

(6-3- 2- 3- 2) أنابيب الحماية

أنابيب الحماية مماثلة لثغرة الانفجار في التركيب ومبادئ التشغيل وتتكون من قضيب أو ثغرة شرارة في الهواء مكونة من موصل الخط وطرف جهدها العال وتثبت تحت الموصل علي البرج. ويستبدل الفراغ الموجود بأنبوبة الانفجار بعنصر غير خطي (nonlinear element) والذي يوفر معاوقة عالية جدا عند التيارات المنخفضة وتقل المعاوقة بسرعة جدا عند التيارات العالية أو التيارات الدفعية. وعند حدوث الجهود الدفعية تنهار الثغرات الهوائية ويحد قيمة التيار بواسطة المقاومة و مقاومة الأرضي للأبراج. وتقل الجهود الدفعية علي الخط حتى يتساوى مع الجهد الواقع علي أنبوبة الحماية. وبعد تفريغ الجهد الدفعي للأرض فإن التيار المتتابع ذا التردد القوي سوف يحد بالمقاومة العالية وبعد قيمة الصفر الطبيعي لتيار الخط الكهربائي ذا التردد القوي تستعيد ثغرة الشرارة وبسرعة قوة العزل. وعادة ما يكون جهد

الانهيار السطحي (flashover voltage) لأنبوبة الحماية أقل من جهد الانهيار السطحي لعوازل الخط الكهربائي لذلك فهي قادرة علي التفريغ الفعال للجهود الزائدة للصواعق الكهربائية.

(6- 3- 2- 3- 3) مانعات الصواعق Lightning Arresters

مانعات الصواعق هي أجهزة تستخدم في محطات المحولات الكهربائية وعند نهايات الخطوط الكهربائية وذلك لتفريغ الجهود الزائدة للصواعق الكهربائية والجهود الدفعية أثناء عمليات الفتح والغلق للقواطع الكهربائية. و مانعات الصواعق لها جهد انهيار سطحي أقل من أي عازل أو أجهزة بالمحطات الكهربائية ولها القدرة أيضا علي تفريغ تيارات تتراوح بين 10 إلى 20 كيلو أمبير لجهود دفعية ذات فترات زمنية طويلة (8/20 µs) وتيارات تتراوح بين 100 إلى 250 كيلو أمبير لجهود دفعية ذات فترات زمنية قصيرة (1/5 µs) .

وهناك نوعان من مانعات الصواعق الكهربائية:

أ- مانعة الصواعق المكونة من مقاومات السيليكون- كاربيد وثغرات الشرارة وقد استخدم هذا النوع منذ أكثر من 35 عاما.

ب- مانعة الصواعق المكونة من مقاومات أوكسيد الزنك وبدون ثغرات الشرارة وهو النوع المفضل حاليا.

أ- مانعة الصواعق من نوع السيليكون - كاربيد Silicon-Carbide Arresters

يتكون هذا النوع من مانعات الصواعق من مقاومات غير خطية علي التوإلى مع ثغرات شرارة والتي يمكن تمثيلها بمفاتيح سريعة العمل. وتتكون مانعة الصواعق من عدد من عناصر مقاومة غير خطية مصنوعة من السيليكون- كاربيد (silicon carbide) مصفوفة واحدة علي الآخرى لجزأين أو ثلاثة يفصل بينها ثغرات شرارة. ويوضع التركيب الداخلي في محتوى من البورسلين. وتكتب خاصية العلاقة بين الجهد والتيار لعناصر المقاومة كالتالي:

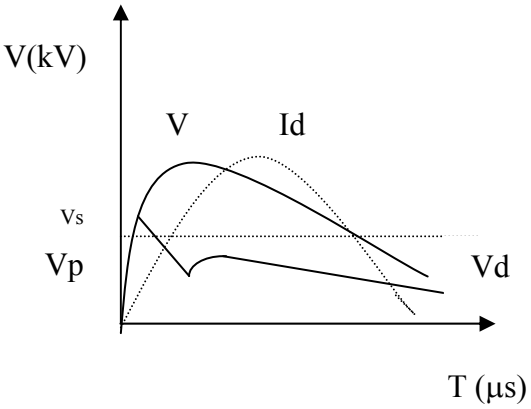
$$I = \frac{k}{V^a} \qquad (15)$$

حيث إن I هو تيار التفريغ و Vهو الجهد الواقع علي العنصر و k و a هي ثوابت تعتمد علي مادة وأبعاد العنصر.

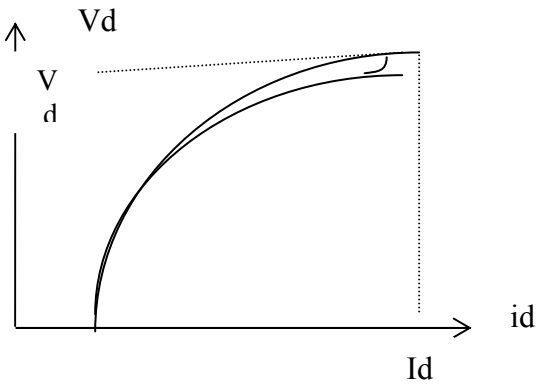
وعند وقوع الجهد الدفعي علي مانعة الصواعق فإنها تنهار (انهيار للثغرات الهوائية) لتعطي تيار تفريغ i_d ويكون الجهد عليها V_d لذلك فهي توفر الحماية للأجهزة أعلى من مستوى الحماية V_p .

والتصميم البسيط لمانعات الصواعق تعمل علي التيارات ذات الفترات الزمنية الصغيرة وتعمل علي تيارات تتراوح بين 100 إلى 300 أمبير لتيارات ذات التردد القوي وحوإلى 5,000 أمبير للتيارات الدفعية. بينما مانعات الصواعق ذات التيارات العالية والفترات الزمنية الكبيرة والتي

تعمل علي التيارات الأعلى يزداد بها عدد العناصر المتوآلية أو نستخدم طريقة أخرى للحد من التيارات.



شكل (7a) عمل مانعات الصواعق



شكل (7b)خاصية الجهد/التيار للمقاومة غير الخطية

ب- مانعات الصواعق الزنك- أوكسيد Zinc-Oxide Arresters

وتعتبر مانعة الصواعق المكونة من مقاومات أوكسيد الزنك وبدون ثغرات الشرارة من أفضل الأنواع التي تستخدم حإلىا لأن لها قدرة عالية علي امتصاص الطاقة.

ويعطي جدول (1) خصائص مانعات الصواعق لجهد يتراوح بين 100 إلى 200 كيلو فولت و 10 كيلو أمبير (نوع ذا واجبات ثقيلة).

جدول (1)خصائص مانعات صواعق 100- 200 ك ف، 10 ك أ

الخصائص	القيمة بالوحدة (نسبة إلى القيم المقننة لمانعات الصواعق)
1- أقصى (1.2/50 µs) جهد دفعي لانهيار السطح	2.2 – 2.8
2- أكبر مقدمة موجة جهد دفعي لانهيار السطح	2.9 – 3.1
3- أكبر قيمة جهد فتح دفعي لانهيار السطح	2.3 – 3
4- أكبر جهد تفريغ (V_d) لموجة تيار (8/20µs)	
5 كيلو أمبير	2 –2.7
10 كيلو أمبير	2.2 – 3
20 كيلو أمبير	2.5 – 3.3

أسئلة

1- اشرح ظاهرة البشرة في موصلات التيار المتردد
2- اذكر مساوئ ظاهرة التفريغ الهإلى علي خطوط النقل الكهربائي
3- اذر مصادر الجهد الدفعي علي خطوط النقل الكهربائية
4- ارسم موجة الجهد الدفعي علي الشبكات الكهربائية وعرف عناصرها الرئيسة
5- اذكر الطرق المختلفة لحماية خطوط النقل الكهربائية من الصواعق
6- اشرح كيفية استخدام الخطوط الأرضية لحماية خطوط نقل القدرة الكهربائية الهوائية من الصواعق
7- اشرح كيفية استخدام ثغرات الانفجار لحماية خطوط نقل القدرة الكهربائية الهوائية من الصواعق
8- اشرح كيفية استخدام أنابيب الحماية لحماية خطوط نقل القدرة الكهربائية الهوائية من الصواعق
9- اشرح كيفية عمل مانعة الصواعق الكهربائية في حماية خطوط نقل القدرة الكهربائية الهوائية من الصواعق
10- خط نقل ثلاثي جهد 220kV وتردد 50Hz مكون من ثلاثة موصلات علي شكل مثلث متساوي الأضلاع نصف قطر كل موصل 1.2cm والمسافة بين كل موصل والآخر 2m. احسب الجهد الحرج لظاهرة التفريغ الهإلى لخط النقل إذا كان معامل عدم انتظام الموصل 0.96 ودرجة الحرارة المحيطة $20^{o}C$ والضغط 72cmHg .
11- احسب فقد القدرة لكل كيلومتر لظاهرة التفريغ الهإلى لخط نقل ثلاثي الأوجه جهد 280kV وتردد 60Hz يتكون من موصلات مجدولة بقطر مكافئ 3.64cm موضوعة عند أركان مثلث متساوي الأضلاع والمسافة بين كل موصلين 2.2m فإذا كانت درجة الحرارة لجو المحيط $25^{o}C$ والضغط 78cmHg ومعامل عدم انتظام الموصل 0.82.
12- خط نقل ثلاثي جهده 166kV بتردد 50Hz وطوله 150km يغذي حمل مقداره 50MW بمعامل قدرة 0.9 متأخر. موصلات الخط في وضع أفقي (مسطح) المسافة بين كل موصل والموصل المجاور 5m أحسب الفقد في القدرة الكهربائية من ظاهرة التفريغ الهإلى معتبرا أن الموصل مجدول ومعمل كثافة الهواء يساوي الوحدة.
13- خط نقل ثلاثي الأوجه موصلاته في وضع أفقي (مسطح) المسافة بين كل موصل والموصل الموصل المجاور 244cm وقطر الموصل 1.04cm ومعامل سطح الموصل 0.85 ودرجة حرارة الجو المحيط 21oC وضغطه 74cmHg احسب الجهد الحرج لظاهرة التفريغ الهإلى المرئية.

الوحدة السابعة

انهيار العوازل الكهربائية

انهيار العوازل الكهربائية

أولا : انهيار العوازل الغازية Gas Insulation Breakdown

تستخدم العوازل الغازية بصورة كبيرة كعازل في المعدات الكهربائية مثل القواطع الهوائية وقواطع الهواء المضغوط والخطوط الهوائية لنقل القدرة الكهربائية وقواطع غاز سادس فلوريد الكبريت والمحطات المغلقة بالغاز وخطوط النقل المغلقة بالغاز ومحولات القوى الجافة وهكذا. وأهم هذه الغازات المستعملة هي الهواء وغاز سادس فلوريد الكبريت وبنسبة أقل النيتروجين والفريون وثاني أوكسيد الكربون. وتحدث مختلف الظواهر داخل العوازل الغازية عندما يطبق عبرها جهد كهربائي حيث يسري تيار صغير جدا بين الأقطاب الكهربائية المعزولة بالغاز ، ويستعيد الغاز العازل خصائصه الكهربائية عند فصل المصدر. وعلى الجانب الآخر إذا كان الجهد كبيراً تزداد شدة المجال الكهربائي Electric Field Intensity ويحدث التأين ومن ثم يزداد التيار الساري بين الأقطاب زيادة كبيرة ويحدث الانهيار الكهربائي وعندئذ تحدث شرارة موصلة قوية بين الأقطاب ويسمي أقصى جهد يفقد بعده العازل خاصية العزل بجهد الانهيار للغاز العازل.

(7- 1) عملية تأين الغازات العازلة:

الغاز في وضعه العادي يكون عازلا تماما وعند وضع جهد بسيط بين لوحين (قطبين) متوازيين بينهما ثغرة غازية يسري تيار كهربائي صغير ناتج عن حركة الإلكترونات والأيونات المتواجدة بالغاز العازل وبزيادة الجهد تزداد شدة المجال الكهربائي E ويتأين الوسط العازل بين الأقطاب الكهربائية مما يؤدي إلى انهيار العازل الغازي وفقدانه خاصية العزل.

ولشرح ميكانيزم الزيادة في التيار الكهربائي في الغاز العازل فقد عرف تاونسند "معامل التأين الأول لتاونسند α" بأنه العدد المتوسط للتصادمات التأينية للإلكترون لكل سنتيمتر في اتجاه المجال الكهربائي (وتعتمد α علي قيمة المجال الكهربائي بين الأقطاب الكهربائية وضغط الغاز)

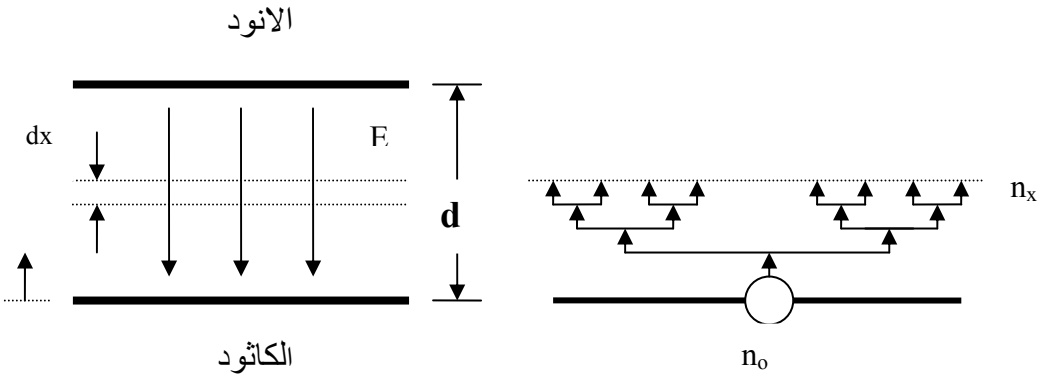
ويعتبر التأين بالتصادم بين الالكترونات السالبة والذرات المتعادلة كهربائيا من أهم الطرق التي تؤدي إلى زيادة التيار في الثغرة بين الأقطاب الكهربائية (وتسمى العملية الابتدائية بالغاز العازل). ولفهم هذه الطريقة نفترض أن هناك لوحين موصلين متوازيين بينهما مسافة d وغمسا في غاز عازل ضغطه p وعند تطبيق جهد كهربائي بين اللوحين يظهر مجال كهربائي

منتظم بينهما وبإسقاط إشعاع خارجي مثل الأشعة فوق البنفسجية تخرج إلكترونات حرة من الكاثود. وعند خروج الإلكترون بشحنته e في مجال كهربائي E يكتسب عجلة تحت تأثير قوة مقدارها eE باتجاه الانود ويكتسب طاقة الحركة التالية:

$$K.E. = e\,E\,x = 0.5\,m\,v^2 \qquad (1)$$

حيث x هي المسافة التي يتحركها الإلكترون من الكاثود في اتجاه الأنود و m هي كتلة الإلكترون و v هي سرعة الإلكترون.

والإلكترون في حركته تجاه المصعد يصطدم بجزيئات الغاز فإذا كانت طاقة حركته كافية عند الاصطدام فإنه يسبب تحلل الجزيئات أو تأين الذرات إلى أيون موجب وإلكترون سالب وتزداد عدد الإلكترونات داخل الفجوة بين الأقطاب من خلال عمليات التصادم المتتالية مكونة كتلة هائلة (Avalanche) تصل إلى الأنود وتلاحظ وصول الإلكترونات للأنود كتيار كهربائي في الدائرة الخارجية فإذا وصلت أعداد هذه الإلكترونات إلى أرقام هائلة تتسبب في تكوين مسار موصل بين الأقطاب مسببة انهيار الفجوة الكهربائية بين الأقطاب Breakdown



شكل (1) تمثيل تخطيطي لزيادة الالكترونات

(أ) ترتيب الثغرة الغازية (ب) الزيادة الكبيرة للالكترونات

بافتراض أن هناك عدد n من الإلكترونات علي مسافة x من الكاثود في اتجاه المجال الكهربائي فإن الزيادة في عدد الإلكترونات dn لمسافة إضافية مقدارها dx يمكن التعبير عنها بالمعادلة التالية:

$$dn = \alpha\, n\, dx \qquad (2)$$

$$\therefore \int_{n_o}^{n} dn = \alpha n \int_{0}^{d} dx$$

$$n = n_o\, e^{\alpha d} \qquad (3)$$

حيث إن n_o هي العدد الابتدائي المتولدة عند سطح الكاثود.

لذلك فمتوسط قيمة التيار الكهربائي داخل الثغرة الغازية والتي تساوي عدد الإلكترونات العابرة في الثانية الواحدة هو:

$$I = I_o\, e^{\alpha d} \qquad (4)$$

حيث إن I_o هو التيار الابتدائي عند الكاثود

ويمثل الحد $e^{\alpha d}$ في المعادلة السابقة الزيادة الكبيرة في التيار الكهربائي (electron avalanche) وهي عدد الإلكترونات الناتجة من حركة إلكترون واحد من سطح الكاثود حتى يصل إلى الانود.

(7- 2) ازدياد التيار الكهربائي بوجود العمليات الثانوية

مع زيادة الجهد بين الكاثود والأنود تزداد عمليات التأين وتزداد احتمالية إضافة الكترونات جديدة بواسطة إلى ات أخرى (تسمى العمليات الثانوية) مما يتسبب في زيادة الشحنات الكهربائية بين الأقطاب مما يتسبب في زيادة أسرع للتيار الكهربائي بين الأقطاب. ويمكن تلخيص هذه العمليات الثانوية كالتالي:

(1) التأين الضوئي Photoionization

الإلكترونات ذات مستويات الطاقة الأقل من طاقة التأين eV ربما تستطيع عند التصادم إثارة ذرات الغاز إلى مستويات أعلى. ويكون التفاعل على الشكل التالي:

$$A + e + k\ \text{energy} \rightarrow A^* + e \qquad (5)$$

$$A^* \rightarrow A + h\nu \qquad (6)$$

A^* تمثل ذرة في وضع الإثارة و A ذرة محايدة و $h\nu$ طاقة الفوتون. تستمر الذرة في وضع الإثارة لمدة تتراوح بين 10^{-7} إلى 10^{-10} من الثانية تعود بعدها إلى حالة الاستقرار وتطلق كمية من الطاقة الضوئية تسمى الفوتونات ($h\nu$) والتي تؤدي بدورها إلى تأين ذرة محايدة أخرى

عندما تكون طاقتها التأينية مساوية أو أقل من طاقة الفوتون $h\nu \geq eV_i$. تسمى هذه الطريقة بطريقة التأين الضوئي وتمثل بالمعادلة التالية:

$$A + h\nu \rightarrow A^{+} + e \qquad (7)$$

وإذا كانت طاقة الفوتونات أقل من طاقة الذرة التأينية ستمتص الطاقة الضوئية وتصبح ذرة مثارة ضوئيا ولن يحدث لها تأين.

التأين الناتج من التفاعل مع الأيونات الموجبة:

الأيونات الموجبة الناتجة من عمليات التأين داخل الثغرة بين الأقطاب تتحرك في اتجاه المهبط مما يكسبها طاقة حركية يمكن أن تكون هذه الطاقة كافية لتحرير إلكترونات من الكاثود عند اصطدامها به وهو ما يسمى بالتأين بالتصادم

(2) التأين الناتج من التفاعل مع العناصر التي تحتفظ بالطاقة لفترة طويلة:

في بعض العناصر يمكن أن يمتد المدى الزمني للاحتفاظ بالطاقة الزائدة حتى يصل إلى عدة ثوان وفي هذه الحالة يطلق عليها العناصر التي تحتفظ بالطاقة لفترة طويلة (metastable atoms) وتأخذ الرمز A^m هذه العناصر تكون لها طاقة وضع عالية نسبيا ولذلك فهي في بعض الأحيان تكون قادرة علي تأيين جزيئات متعادلة. إذا زادت V^m ، طاقة الذرة التي تحتفظ بالطاقة، عن V^i ، طاقة التأين لذرة أخرى B، عندئذ يمكن أن يحدث التأين بالاصطدام ما بين الذرتين طبقا للمعادلة الآتية:

$$A^m + B \rightarrow A + B^{+} + e \qquad (8)$$

احتمالية ثانية إذا كانت الطاقة V^m أقل من الطاقة المطلوبة لعملية التأين V^i هذا الاصطدام يمكن أن يتولد عنه إثارة للذرة الثانية B والتي يمكن تمثيلها بالمعادلة:

$$A^m + B \rightarrow A + B^{*} \qquad (9)$$

هناك أيضا احتمالية ثالثة للتأين بالاصطدام بين ذرتين تحتفظان بالطاقة فإذا كان $2V^m$ للذرة التي تحتفظ بالطاقة A^m أكبر من طاقة التأين V^i للذرة A فإن التفاعل الآتي يمكن حدوثه:

$$A^m + A^m \rightarrow A^{+} + A + e + K.E. \qquad (10)$$

والتفاعل الأخير هام فقط عندما تكون كثافة الذرات التي تحتفظ بالطاقة لفترة طويلة عالية.

(3) التأين الحراري Thermal Ionization

يطبق تعريف التأين الحراري عامة علي العمليات التأينية للتصادمات الجزيئية والإشعاع والتأين بالتصادم والذي يحدث داخل الغاز عند درجات حرارة عالية. فإذا تم تسخين الغاز العازل إلى درجات حرارة عالية فإن الإلكترونات وجزيئات الغاز تكتسب سرعات عالية كافية لعملية التأين عند التصادم مع ذرات أو جزيئات أخرى. ويعتبر التأين الحراري المصدر الأساسي في الشعلات وشرارة الضغط العال.

(7- 2- 1) معامل التأين الثانوي لتاونسند

تسمى الإلكترونات الناتجة من هذه العمليات الإلكترونات الثانوية. معامل التأين الثانوي لتاونسند γ ويعرف بأنه "عدد الإلكترونات الثانوية الناتجة لكل أيون موجب،فوتون،جزئ مثار،جزيء محتفظ بالطاقة لفترة طويلة. والقيمة الكلية لـ γ هي مجموع المعاملات من الآليات المذكورة سابقا.

$$\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 + \ldots \qquad (11)$$

وتصبح معادلة التيار الكهربائي :

$$I = \frac{I_o e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \qquad (12)$$

(7- 3) آلية تاونسند للانهيار

يذكر تاونسند أن الغاز العازل ينهار عندما يصل التيار للمعادلة السابقة إلى ما لانهاية أي إن المقام يصبح صفر:

$$1 - \gamma\,[\exp(\alpha d) - 1] = 0 \qquad (13)$$

$$\gamma\,[\exp(\alpha d) - 1] = 1 \qquad (14)$$

وهو ما يسمى بشرط الانهيار عند تاونسند.

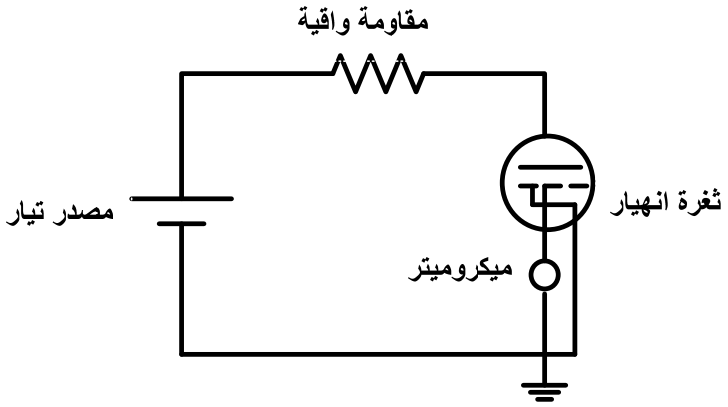
وعادة فإن $e^{\alpha d}$ تكون قيمتها كبيرة جدا لذلك تختصر المعادلة السابقة إلى:

$$\gamma \exp(\alpha d) = 1 \qquad (15)$$

ولثغرة معينة وضغط غاز معلوم فإن الجهد الكهربائي الذي يعطى قيم α و γ تحقق خاصية الانهيار يسمى جهد الانهيار وتسمى المسافة المناظرة مسافة الانهيار.

(7- 4) تحديد قيم المعاملات α و γ عمليا

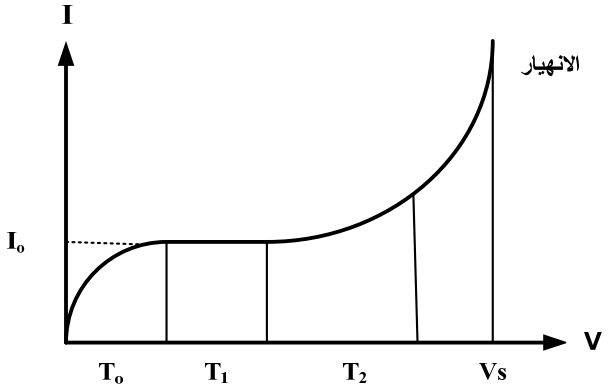
يستخدم في هذه التجربة قطبان مستويان بينهما مجال كهربائي منتظم. يوصل قطب الجهد العال بمصدر جهد عال مستمر ومتغير (يتراوح بين 2 إلى 10 كيلو فولت). ويتكون قطب الجهد المنخفض من قضيب مركزي وقضيب ستارة (guard electrode) ، ويوصل القضيب المركزي بالأرض من خلال ميكروأميتر مكبر عال المقاومة وتتراوح مقاومة الدخل للأميتر من 10^9 إلى 10^{12} أوم. ويؤرض قضيب الستارة مباشرة. ويقيس الميكروأميتر المكبر تيارات صغيرة جدا في حدود من 10^{-14} إلى 10^{-8} أمبير. يوضع نظام الأقطاب هذا داخل غرفة تأين والتي يمكن أن تكون من الصلب اللين المطلي بمادة الكروم أو من الصلب الذي لا يصدأ أو غرفة زجاجية. وتصنع الأقطاب عادة من النحاس الأصفر أو الصلب الذي لا يصدأ. تفرغ الغرفة تفريغا عالا حتى 10^{-4} إلى 10^{-6} ضغط جوي بعدئذ تملأ الغرفة بالغاز المطلوب تحت الضغط المناسب لمسافة الثغرة بين الأقطاب وتترك لمدة نصف ساعة تقريبا ليملأ الغاز الغرفة بانتظام.



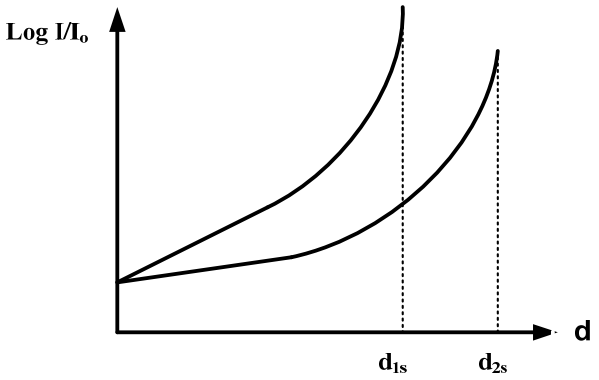
شكل (2) الترتيب العملي لقياس معاملات التأين

يسلط على الكاثود أشعة فوق البنفسجية من خارج الغرفة والتي ينتج عنها خروج الإلكترونات المبدئية (n_o) وعند تطبيق الجهد المستمر ويكون صغيرا تبدأ نبضات التيار في الظهور من خلال الإلكترونات والأيونات الموجبة المتواجدة بالغاز وبزيادة الجهد تدريجيا تختفي النبضات ونحصل على تيار مستمر كما في شكل (3). في المنطقة T_o يزداد التيار الكهربائي ببطء لكن بغير انتظام وذلك مع ازدياد الجهد. في المنطقة T_1 وكذلك المنطقة T_2 يزداد التيار تدريجيا وبانتظام طبقا لميكانيزم تاونسند. بعد المنطقة T_2 يزداد التيار بصورة أكبر وتحدث الشرارة الكهربائية.

ولتحديد قيم المعاملات α و γ لابد من الحصول أولا على العلاقة بين التيار والجهد لفجوات كهربائية مختلفة. ترسم العلاقة بين $Log(I/I_o)$ و المسافة بين الأقطاب d عند قيمة متساوية للمجال الكهربائي E كما في شكل(4). فميل الجزء الأولي للمنحنى يعطي قيمة α وبمعرفة هذه القيمة يمكن لنا إيجاد قيمة γ من المعادلة العامة للانهيار لتاونسند.وبنظرة عامة للنتائج نرى أن قيم المعاملات α ،γ تعتمد على النسبة بين المجال الكهربائي إلى ضغط الغاز (E/P) .



شكل (3) منحنى ازدياد التيار طبقا لتاونسند



شكل (4) العلاقة بين $Log(I/I_o)$ و مسافة الفجوة طبقا لتاونسند

مثال1: في تجربة لغاز ما وجد أن تيار الاستقرار (steady state) هو $5.5x10^{-8}$ A عند 8kV ومسافة مقدارها 0.4cm بين الأقطاب. بالاحتفاظ بقيمة المجال الكهربائي ثابتاً وتقليل المسافة إلى 0.1cm وجد أن التيار أصبح $5.5x10^{-9}$ A احسب قيمة المعامل الابتدائي لتاونسند α.

الحل: التيار عند الأنود $I = I_o \exp(\alpha d)$

$$I_1 = I_o \exp(\alpha d_1) \quad , \quad \therefore I_2 = I_o \exp(\alpha d_2)$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{I_o \exp(\alpha d_1)}{I_o \exp(\alpha d_2)} = \exp\alpha(d_1 - d_2)$$

$$\frac{5.5x10^{-8}}{5.5x10^{-9}} = \exp\alpha(0.4 - 0.1)$$

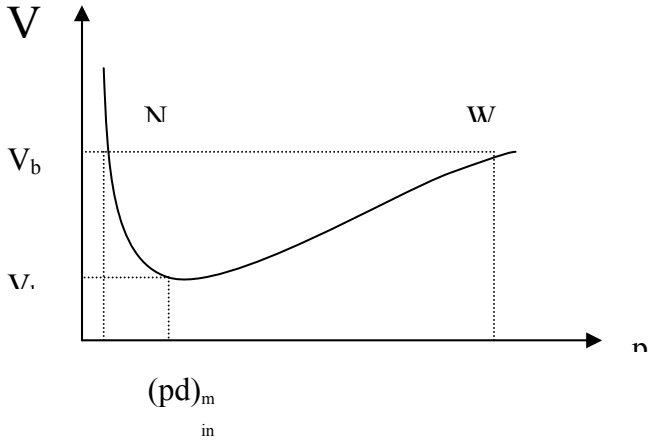
$$\therefore 10 = \exp(0.3\alpha)$$

$$\therefore 0.3\alpha = \ln(10)$$

$$\therefore \alpha = 7.676 \text{ /cm}$$

(7- 5) جهد الشرارة – قانون باشن Paschen's Law

انهيار العوازل الغازية لا يعتمد فقط على المسافة بين القطبين d بل يعتمد أيضا على حاصل ضرب ضغط الغاز P بين القطبين والمسافة P*d بحيث يتحقق جهد الانهيار Breakdown Voltage بالعلاقة التالية $V_b=f(P*d)$ ويمثل الشكل(5) العلاقة بين جهد الانهيار وحاصل ضرب ضغط الغاز والمسافة بين القطبين كما يوضح جدول (1) الجهد الأدنى V_{bmin} للانهيار للعديد من الغازات العازلة والذي يعتمد علي الحد الأدنى من حاصل ضرب ضغط الغاز والمسافة بين القطبين كما يعتمد علي حالة الكاثود والمواد المصنع منها.



شكل (5) العلاقة بين جهد الانهيار و(ضغط الغاز Xمسافة الثغرة)

جدول (1)

الغاز	$(pd)_{min}$ Torr.cm	$V_{b\ min}$ (فولت)
الهواء	0.55	352
النيتروجين	0.65	240
الهيدروجين	1.05	230
الأوكسجين	0.7	450
سادس فلوريد الكبريت	0.26	507
ثاني أوكسيد الكربون	0.57	420
النيون	4.0	245
الهليوم	4.0	155

(7- 6) انهيار الغازات سالبة الكهربائية Electronegative gases

التصاق الإلكترونات بالذرات (Electron attachment) هي إحدى العمليات الداخلية بالغاز والتي تعطي جهد انهيار عال للغاز الذي له هذه الميزة. وظاهرة التصاق الإلكترونات هي اجتذاب إلكترونات حرة الحركة إلى الذرة المتعادلة كهربائيا وتكوين أيون سالب. وحيث إن الأيون السالب مثل الأيون الموجب تماما له كتلة كبيرة جدا نسبيا لذلك فاحتمآلية تحريره إلكترونات من الذرات المتعادلة عند اصطدامه بها تكون ضعيفة ولذلك تمثل عملية التصاق الإلكترونات طريقة فعالة لإزالة الإلكترونات والتي تلعب دورا هاما في عملية انهيار الغازات تحت الجهود المنخفضة. ويسمى الغاز الذي تلعب فيه عملية التصاق الإلكترونات دورا فعالا غاز سالب الكهربائية.

عمليات الالتصاق الأكثر فعالية الموجودة بالغازات هي:

أ. **الالتصاق المباشر** وفيه تلتصق الإلكترونات مباشرة بالذرات مكونة أيوناً سالباً

$$AB + e \rightarrow AB^- \qquad (16)$$

ب. **الالتصاق التحللي** وفيه تنقسم جزيئات الغاز إلى الذرات المكونة لها والذرة سالبة الكهربائية تكون أيوناً سالباً

$$AB + e \rightarrow A + B^- \qquad (17)$$

الغاز الأبسط لهذا النوع هو الأوكسجين والغازات الآخرى مثل سادس فلوريد الكبريت والفريون وثاني أوكسيد الكربون والنيتروجين والغازات التي تحتوي على الفلور والكربون. وفي هذه الغازات يكون A عادة ذرة الكبريت أو الكربون وB ذرة الأوكسجين أو إحدى ذرات أو جزيئات الهالوجينات.

وفي هذا النوع من الغازات تعدل معادلة تاونسند لزيادة التيار وذلك لأخذ عملية التصاق الإلكترونات في الحسبان. ويعرف معامل الالتصاق (η) بعدد التصادمات الالتصاقية بإلكترون واحد في سم واحد في اتجاه المجال الكهربائي. وتحت هذه الظروف يمكن كتابة التيار الواصل إلى الأنود كما يلي:

$$I = I_o \frac{[\frac{\alpha}{\alpha-\eta}\exp(\alpha-\eta)d] - [\frac{\eta}{\alpha-\eta}]}{1-\{\gamma\frac{\alpha}{\alpha-\eta}[\{\exp(\alpha-\eta)d\}-1]\}} \qquad (18)$$

وبمساواة المقام بالصفر يمكن أن نحصل على خاصية تاونسند للانهيار كما يلي:

$$\gamma\frac{\alpha}{\alpha-\eta}[\exp(\alpha-\eta)d-1]=1 \qquad (19)$$

وهذه المعادلة توضح أنه عندما تكون α أكبر من η تكون هناك دائما احتمآلية لانهيار الغاز بدون النظر لقيم α و η و γ. وعلى الجانب الآخر إذا كانت η أكبر من α تقترب خاصية الانهيار لتاونسند إلى الشكل التقاربي:

$$\gamma\,[\alpha/(\alpha-\eta)]=1\;; \qquad \text{or} \qquad \alpha=\eta/(1-\gamma) \qquad (20)$$

وعادة تكون γ قيمة صغيرة جدا ($\geq 10^{-4}$) ويمكن إعادة كتابة المعادلة السابقة كما يلي α=η. وفي هذه الحالة يمكن وضع حدود الانهيار للنسبة بين المجال الكهربائي إلى ضغط الغاز (E/P) بحيث لا يحدث أي إنهيار لأقل من هذه الحدود بدون النظر لقيمة مسافة الفجوة بين الأقطاب وقيمة هذا الحد يطلق عليه النسبة الحرجة بين المجال الكهربائي وضغط الغاز.

(7- 7) غاز سادس فلوريد الكبريت Sulfur hexafluride (SF_6)

غاز سادس فلوريد الكبريت غاز خامل له خصائص جيدة كعازل وكوسط طافئ للشرارة داخل قواطع غاز سادس فلوريد الكبريت وتزداد قوة العزل للغاز بزيادة الضغط. ويستخدم الآن غاز سادس فلوريد الكبريت على نطاق واسع داخل المعدات الكهربائية مثل القواطع الكهربائية، والمكثفات ، ومحولات التيار ، والكيابل الكهربائية، والمحطات المغلقة بالغاز وخطوط النقل الكهربائية المغلقة بالغاز، وأطراف التوصيل...وهكذا. ويتحول الغاز إلى الصورة السائلة عند قيمة منخفضة لدرجة الحرارة وتعتمد هذه الدرجة على ضغط الغاز.

(7- 7- 1) خصائص غاز سادس فلوريد الكبريت

(7- 7- 1- 1) الخصائص الفيزيقية

1- عديم اللون والرائحة وغير سام ، الغاز النقي غير ضار بالصحة
2- غير قابل للاشتعال، لكن الغاز غير النقي يحتوي على شوائب سامة.
3- يكون في الحالة الغازية عند درجة الحرارة والضغط العاديين.
4- كثافة الغاز حوإلى خمس مرات كثافة الهواء عند 20 درجة مئوية والضغط الجوي.
5- تحويل غاز سادس فلوريد الكبريت إلى سائل : يبدأ الغاز في التحول لسائل عند درجة حرارة منخفضة وتعتمد على ضغط الغاز. عند ضغط 15 كجم/سم^2 ودرجة حرارة 10^oC يتحول الغاز إلى سائل أي إن الغاز يصبح غير مناسب للاستعمال لضغط أعلى من 15 كجم/سم^2. ولتجنب تحويل الغاز لسائل لابد من الاحتفاظ بدرجة الحرارة عند حد معين. عند 15 ضغط جوى يبدأ الغاز في التحول لسائل عند درجة حرارة 10^oC لذلك لابد أن يكون هناك سخان يتحكم فيه بواسطة ثيرموستات وذلك للاحتفاظ بدرجة حرارة الغاز أعلى من 16^oC في حالة أنظمة الضغط العال.
6- قدرته على الانتقال الحراري: قدرة الغاز على الانتقال الحراري تعادل من 2 إلى 2.5 مرة القدرة على الانتقال الحراري. للهواء عند نفس الضغط لذلك لنفس حجم الموصل سعة التيار تكون أكبر.
7- المحتوى الحراري. خاصية المحتوى الحراري عند درجة حرارة أقل من 6000oK أكبر منها بكثير لغاز النيتروجين وهذا يساعد على تبريد منطقة الشرارة داخل القواطع الكهربائية من خلال إزالة الحرارة من غرفة إطفاء الشرارة بواسطة الغاز.
8- الثابت الزمني للشرارة : ويعرف الثابت الزمني للوسط بأنه الزمن بين التيار الصفري واللحظة التي تصل عندها الموصلية الكهربائية لمنطقة التلامس إلى الصفر.

9- (7- 7- 1- 2) الخصائص الكيميائية:

أ. متزن كيميائيا حتى $500^{o}C$ كما أنه لا يتفاعل مع الأجزاء المعدنية حتى هذه الدرجة

ب. خامل. وهي ميزة كبرى للقواطع الكهربائية حيث لا تتعرض الأجزاء المعدنية والملامسات للتلف لعدم وجود الأكسدة للمعادن وبالتالي تقل عمليات الصيانة المطلوبة.

ت. غاز سالب الكهربائية (Electronegative gas).

ث. يتحلل الغاز أثناء إطفاء الشرارة إلى رابع فلوريد الكبريت وثاني فلوريد الكبريت. وتتحد هذه الغازات مرة أخرى بعد إطفاء الشرارة وعملية التبريد لتكون الغاز الأصلي وأية مخلفات أخرى يمكن إزالتها بالمرشحات التي تحتوى على الألومينا (Al_2O_3) . كما أن نتائج التحلل سامة ويمكن أن تهاجم بعض تركيبات المواد.

ج. الفلورايد المعدني مادة عازلة جيدة لذلك تستخدم بأمان للمعدات الكهربائية.

ح. تؤثر الرطوبة بشكل فعال على خصائص الغاز ويتكون فلوريد الهيدروجين أثناء الشرارة داخل القواطع والتي يمكن أن تهاجم الأجزاء المعدنية والعازلة

(7- 7- 1- 3) خصائص العزل الكهربائي:

1. شدة العزل لغاز سادس فلوريد الكبريت عند الضغط الجوي حوإلى 2.35 مرة أعلى من شدة عزل الهواء وأقل حوإلى 30% من شدة عزل الزيت المستخدم في القواطع الزيتية.
2. عند الضغط العال تزداد شدة عزل الغاز وعند ضغط حوإلى 3 كجم/سم^2 تكون شدة عزل الغاز أكبر من شدة عزل الزيت العازل وهذه الخاصية تتيح مسافات أصغر بين الموصلات الكهربائية وحجم أقل للمعدات الكهربائية لنفس الجهد.
3. جهد الانهيار للغاز يعتمد على العديد من العوامل مثل شكل الموصلات الكهربائية، وخشونة أسطح الموصلات، وتوزيع المجالات الكهربائية، وقرب عازلات التثبيت، والرطوبة، وشكل الموجات الكهربائية.....وهكذا. يزداد جهد الانهيار للغاز مع زيادة ضغطه ويتبع الغاز قانون باشون.
4. منطقة الضغط الحرجة. إذا كان المجال الكهربائي غير منتظم فالعلاقة بين جهد الانهيار وضغط الغاز لا يتبع قانون باشون تماما.
5. تأثير سطح الموصل. خشونة سطح الموصل تقلل من جهد الانهيار للغاز حيث تتكون مجالات كهربائية قوية حول خشونة السطح تبدأ معها عمليات تأين قوية عند جهود منخفضة مما يتسبب في حدوث الانهيار الكلى للغاز مبكرا لذلك لابد أن تكون أسطح الموصلات ملساء.

6. تأثير عوازل التثبيت على جهد الانهيار. تثبت الموصلات الكهربائية داخل المعدات المعزولة بالغاز على عوازل من الأيبوكسي أو البور سلين ويمكن حدوث الانهيار على أسطح العوازل ويمكن حدوث ذلك عند جهود قليلة إذا كانت أسطح العوازل مغطاة بالرطوبة والغبار الموصل لذلك يجب أن تكون العازلات نظيفة تماما.
7. الأطراف الحادة. الانهيار يبدأ عند الأطراف الحادة للأجزاء الموصلة والتي تتركز عندها المجالات الكهربائية العالية لذلك التنظيم الجيد لتوزيع الأجهادات الكهربائية مهم جدا للمعدات الكهربائية المعزولة بغاز سادس فلوريد الكبريت ويجب تجنب الأطراف الحادة.
8. تأثير شكل الموجات الكهربائية وقطبيتها. يعتمد جهد الانهيار على شكل الموجات الكهربائية والتي تميز بأقصى قيمة للجهد والزمن من الصفر لأقصى قيمة للجهد وقطبية الموجة. القطبية السالبة عامة أخطر من القطبية الموجبة.

(7- 7- 1- 4) الاعتبارات العملية في استخدامات الغاز لأغراض العزل الكهربائي

ظهرت في الأعوام القليلة الماضية أعمال كثيرة لتبني غاز معين للاستخدامات العملية، ولكي يستخدم غاز معين في التطبيقات الكهربائية فإنه لابد أولا من الإلمام بمعلومات عن الغاز بما في ذلك تركيبه وما هي العوامل التي تؤثر علي أدائه. وكلما زادت متطلبات التشغيل، زادت المتطلبات الكثيرة والعنيفة التي تكون مطلوبة من الغاز العازل.

الخصائص المفضلة المطلوب توفرها في الغاز العازل لتطبيقات الجهد العال هي:

أ. شدة عزل عالية.
ب. اتزان حراري و عدم نشاط كيميائي تجاه المواد المستخدمة.
ت. غير قابل للاشتعال وغير ضار بالصحة العامة.
ث. درجة حرارة تكثيف أقل.
ج. انتقال حراري جيد.
ح. تكلفة اقتصادية متوسطة.

غاز سادس فلوريد الكبريت له معظم الخصائص السابقة الذكر وقد أخذ الكثير من الاهتمام في السنوات السابقة. كما تستخدم خلائط غاز سادس فلوريد الكربون مع النيتروجين أيضاً.

ثانيا: انهيار العوازل السائلة Liquid Insulation Breakdown

العوازل السائلة تستخدم لزيادة عزل كيابل الجهد العال و المكثفات ولملء المحولات والقواطع وهكذا. و بالإضافة لوظيفتها كعازل فلها وظائف أخرى مثل وسط ناقل للحرارة في المحولات وكوسط طافئ للشرارة في القواطع.

يعتبر زيت البترول من أكثر الزيوت استخداما كعوازل سائلة وتستخدم أيضا الهيدروكربونات الصناعية والهيدروكربونات الهالوجينية في بعض التطبيقات. وتستخدم زيوت السيليكون والهيدروكربونات التي تحتوى على الفلورايد للتطبيقات ذات درجات الحرارة العالية. وحديثا استخدمت بعض الزيوت النباتية والأسترات.

ومن أهم الخصائص المطلوبة للزيوت العازلة الموصلية الكهربائية و ثابت العزل و شدة العزل. بالإضافة إلى ذلك فالخصائص الفيزيائية والكيميائية مثل اللزوجة و الاتزان الحراري والكيميائي و الجاذبية النوعية هامة أيضا.

(7- 8) العوازل السائلة النقية والتجارية

العوازل السائلة النقية هي السوائل النقية كيميائيا ولا تحتوي حتى على نسبة $1:10^9$ من الشوائب وتركيبها الكيميائي بسيط مثل ن- هيكسان و ن- هيبتان والهيدروكربونات البرافينية الآخرى.

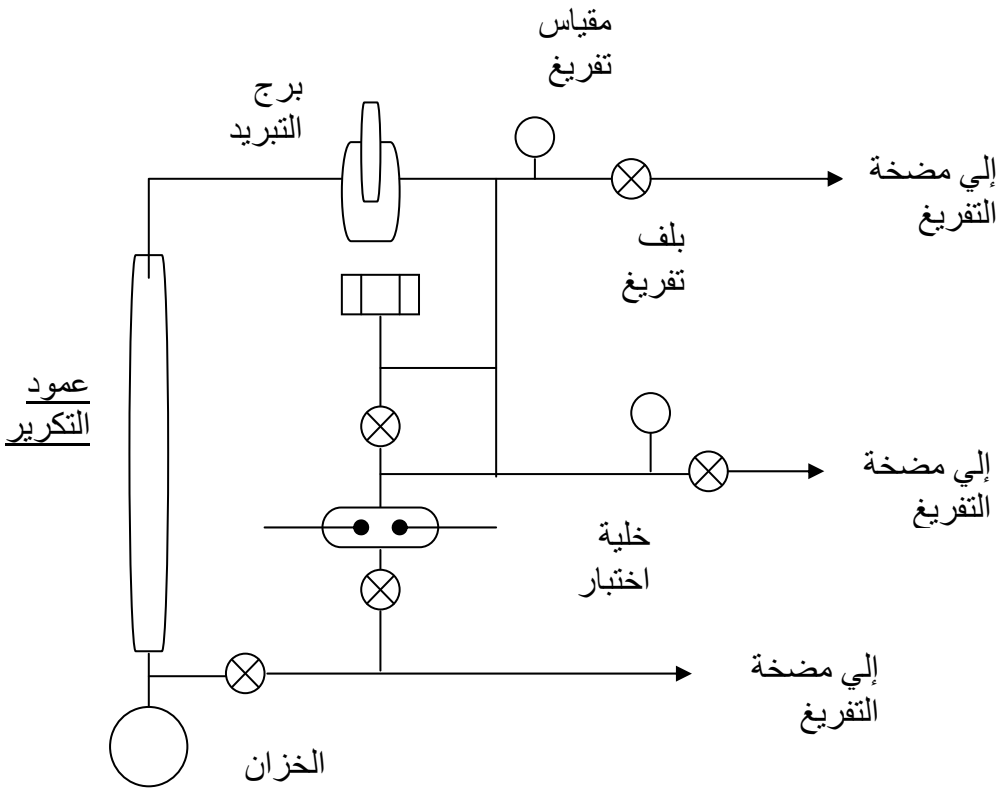
على الجانب الآخر فالعوازل السائلة التجارية تكون غير نقية كيميائيا وتحتوي على خليط من الجزيئات العضوية المركبة والتي لا يمكن بسهولة توصيفها أو إعادة إنتاجها في تجارب متسلسلة.

(7- 9) تنقية السوائل التجارية:

يعتبر الغبار المعدني والرطوبة و الغازات المحللة والشوائب الأيونية هي الشوائب الرئيسة التي تتواجد بالزيوت العازلة والتي تقلل كثيرا من شدة عزل الزيت العازل. وهناك طرق عديدة توظف لتنقية الزيوت العازلة هي الترشيح (الفلترة)، من خلال ترشيح ميكانيكي وترشيح كهروستاتيكي، وسحب الغازات بقوة الطرد المركزي والتقطير و التعامل الكيميائي. ويمكن إزالة جزيئات الغبار المعدني بواسطة الترشيح أما الغازات مثل الأوكسجين وثاني أوكسيد الكربون فيمكن إزالتها بواسطة التقطير وتتم إزالة بخار الماء بواسطة أجهزة تجفيف وأحيانا يتم إضافة حمض الكبريتيك المركز إلى العوازل السائلة لإزالة الشمع والأجزاء المتبقية ثم تشطف بالصودا الكاوية والماء المقطر.

جدول (2) خصائص العزل لبعض العوازل السائلة

الخاصية		زيت الكيابل	زيت المكثفات		زيوت السيليكون
- شدة العزل عند 20oC على 2.5mm موصلات كروية قياسية (kV/mm)	15	30	20	20-25	30-40
- النفازية النسبية (50 Hz)	2.2 – 2.3	2.3 – 2.6	2.1	4.8	2.- 73.0
- Tan δ عند 50Hz عند 1 kHz	0.001	0.002	$0.25x10^{-3}$	$0.60x10^{-3}$	10^{-3}
- المقاومة النوعية (أوم.سم)	0.0005	0.0001	$0.10x10^{-3}$	$0.50x10^{-3}$	10^{-4}
- الجاذبية النوعية عند 20oC	10^{12}-10^{13}	10^{12} - 10^{13}	10^{13} – 10^{14}	$2x10^{13}$	$3x10^{14}$
- اللزوجة عند 20oC	0.89	0.93	0.88–0.89	1.4	1.0 – 1.1
- القيمة الحامضية (mg/gm of KOH)	30	30	30	100 – 150	10 – 1000
- معامل الانكسار	Nil	Nil	Nil	Nil	Nil
- التصبن (mg of KOH/gm of oil)	1.4820	1.4700	1.4740	1.6000	1.50–1.60
- أقصى محتوى مائي مسموح (ppm)	0.01	0.01	0.01	< 0.01	< 0.01
	50	50	50	< 30	< 30
				negligible	negligible



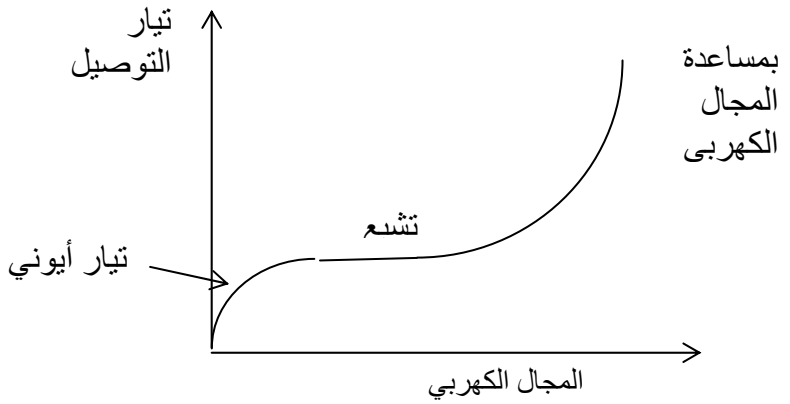
شكل (6) نظام تنقية الزيت مع خلية اختبار

(7- 10) اختبار انهيار العوازل السائلة

اختبارات الانهيار عادة ما تنجز داخل خلايا اختبار صغيرة لاختبار عينة الزيت بعد التنقية. والأقطاب الكهربائية المستخدمة داخل خلية الاختبار لقياس جهد الانهيار عادة ما تكون كرات قطرها يتراوح بين 0.5 إلى 1.0 سم والثغرة بين الأقطاب تتراوح بين 100 إلى 200 ميكروميتر وفي بعض الأحيان تستخدم الأقطاب المستوية والتي هي عبارة عن مستويين متوازيين. وجهد الاختبار يتراوح بين 50 إلى 100 كيلو فولت. ويرفع الجهد تدريجيا حتى تنهار عينة الزيت العازلة وتتم إعادة الاختبار 10 مرات ثم يؤخذ متوسط القراءات لجهد الانهيار فإذا كان أكبر من المطلوب فيستعمل الزيت العازل أما إن كان الجهد أقل من المطلوب فيعاد تنقية الزيت العازل حتى يتم الحصول علي جهد الانهيار المطلوب.

(7- 11) التوصيل والانهيار في العوازل السائلة النقية

عند الجهود الصغيرة يتكون التيار الكهربائي نتيجة تحلل الأيونات وعندما يزيد الجهد المطبق يزداد المجال الكهربائي ويزداد معه التيار الكهربائي حتى يصل التيار الكهربائي إلى قيمة التشبع وعندما يصل المجال الكهربائي إلى قيمة كافية لانبعاث الإلكترونات من الكاثود تتضاعف قيمة التيار المار بواسطة آلية تاونسند وتزداد تلك التيارات حتى يحدث الانهيار. ويعتمد جهد الانهيار على المجال الكهربائي ومسافة الثغرة بين الأقطاب الكهربائية ودرجة حرارة الكاثود بالإضافة إلى لزوجة السائل ودرجة حرارة السائل وكثافة السائل والتركيب الجزيئي له. ويبين جدول (3) أقصى قيمة لجهد الانهيار لبعض السوائل النقية والغازات المسالة.



شكل (7) خصائص تيار التوصيل/المجال الكهربائي للهيدروكربون السائل

جدول (3) أقصى قيمة لشدة العزل لبعض السوائل العازلة

السائل	أقصى قيمة لشدة العزل (MV/cm)
هيكسان	1.1 – 1.3
بنزين	1.1
زيت المحولات	1.0
سيليكون	1.0 – 1.2
الأوكسجين السائل	2.4
النيتروجين السائل	1.6 – 1.9
الهيدروجين السائل	1.0
الهليوم السائل	0.7
الأرجون السائل	1.1 – 1.42

(7- 12) انهيار العوازل السائلة التجارية

كما ذكرنا سابقا أن العوازل السائلة التجارية غير نقية كيميائيا وتحتوي على شوائب مثل الفقاعات الغازية والجزيئات المعلقة وهكذا. وهذه الشوائب تتسبب في انخفاض شدة العزل لهذه السوائل انخفاضا ملحوظا وفي بعض الأحيان انخفاضا كبيرا. ويتأثر ميكانيزم الانهيار بوجود مثل تلك الشوائب بالإضافة إلى أنه عند حدوث الانهيار الكهربائي لهذه السوائل تنتج غازات إضافية وفقاعات غازية وتتكون نواتج التحليل الصلبة لهذه السوائل.

وتعتمد آلية (ميكانيزم) الانهيار لتلك السوائل على عدة عوامل هامة مثل طبيعة وحالة الأقطاب الكهربائية والخصائص الفيزيائية للسائل والشوائب والغازات المتواجدة بالسائل.

1. وجود شوائب (Particles). عند تطبيق جهد عال ينشأ مجال كهربائي بين القطبين شدته E. وإذا كانت سماحية الشوائب ε_1 (Particles Permitivity) أكبر من سماحية العازل السائل ε_2 فإنه ينشأ قوة تدفع بالشوائب للمساحة التي يكون فيها المجال الكهربائي أعلى ما يمكن. فإذا كانت الشوائب كروية لها نصف قطر r فإن القوة تعطى بالعلاقة التالية $F = \frac{1}{2} r^3 \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{2\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \cdot \nabla E^2$ وعندما تتجه هذه الشوائب

باتجاه المنطقة التي يكون فيها المجال الكهربائي أعلى ما يمكن فإنها تتابع حتى تصل ما بين القطبين مما ينشأ عنه توصيل ثم انهيار كهربائي Breakdown.

2. وجود ماء: عند وجود قطرات من الماء في العازل السائل فإنها تستطيل في اتجاه المجال الكهربائي مما يؤدي إلى التوصيل بين القطبين وحدوث الانهيار الكهربائي.

3. وجود فقاعات هوائية. توجد في بعض الأحيان فقاعات غازية في السائل العازل إما نتيجة لوجود شرخ في الإطار الخارجي أو وجود نتوءات في أحد الأقطاب. وعند تطبيق الجهد بين القطبين ينشأ مجال كهربائي شدته E=V/d (Kv/cm) وحيث إن شدة العزل للهواء أقل منه للعازل السائل فإن الوسط الغازي داخل الفقاعة الغازية سينهار مما ينشأ عنه شرارة كهربائية وبخار مما يؤدي إلى توليد المزيد من الفقاعات حتى تملأ الفراغ الموجود بين القطبين مما ينشأ عنه انهيار كامل للوسط العازل بين القطبين الكهربائيين.

ثالثا: انهيار العوازل الصلبة Solid Insulation Breakdown

تستخدم العوازل الصلبة في كل أنواع الدوائر الكهربائية والمعدات لعزل الموصلات الكهربائية. ولابد أن يتوفر في العازل الجيد الخصائص التالية:

أ) شدة ميكانيكية عالية
ب) فقد كهربائي قليل
ج) خال من الفراغات الغازية والرطوبة
د) مقاوم للتلف الحراري والكيميائي

(7- 13) الانهيار في العوازل الصلبة

من عوامل الضعف في العوازل المصنوعة من اللدائن Polymers ضعفها في مقاومة الشرارة الكهربائية والتفريغ الكهربائي مما يجعله عرضة للانهيار عند تعرضها للمجالات الكهربائية العالية. ويمكن أن يحدث الانهيار على السطح وتسمى هذه الظاهرة بظاهرة التسيير Tracking أو في لب العازل وتسمى هذه الظاهرة بظاهرة التشجير Treeing. وسيتم استعراض هاتين الظاهرتين باختصار.

(7- 13- 1) انهيار سطح العازل Tracking

يحدث هذا النوع من الانهيار على أسطح العوازل الصلبة المستخدمة في الأجهزة أو في الأماكن المعرضة للتلوث، مثل المواقع القريبة من البحر أو المناطق الصناعية، حيث تحمل الرياح الأملاح والغبار ومخلفات المصانع والتي عادة ما تكون مواد أيونية شبه موصلة وترسبها على أسطح العوازل. وعندما يكون السطح جافاً يتسرب تيار ضئيل Leakage Current من النوع السعوي وعند تبلل السطح بالرطوبة فإن سطح العازل يصبح مبتلاً وبذلك تزداد شدة وقيمة التيار المتسرب بصورة كبيرة وتكون قيمته حقيقية. ومع ازدياد حرارة العازل نتيجة لمرور التيار فإن سطح العازل المبتل يجف في بعض المناطق التي تكون فيها كثافة التيار أعلى ما يمكن، وعادة ما تكون هذه المناطق قريبة من أقطاب الجهد العال، وتصل درجة الحرارة على السطح إلى درجة الغليان مما ينتج عنه تبخير الرطوبة الموجودة على السطح وتكوين مناطق جافة صغيرة على شكل حزام Dry Bands تفصل بين القطبين فإذا كان فرق الجهد بين القطبين على هذه المنطقة كافيا لإحداث شرارة مما ينتج عنها حرارة ربما تكون كافية لتكسير الروابط التساهمية للعازل المصنوع من اللدائن (هيدروكربونات) والتي تكون بين الكربون والهيدروجين C-H مما يجعل الكربون يظهر على سطح العازل على شكل نقاط متفرقة بينما يصعد الهيدروجين على السطح ويتحد مع الأوكسجين مما يتولد عنه ماء H_2O الذي يزيد بدوره عملية البلل واستمرار الشرارة والتي تؤدي في بعض الأحيان إلى تآكل السطح Erosion الذي يضعف العازل ميكانيكياً. وتستمر العملية بنفس لطريقة السابقة حتى يتكون الكثير من نقاط الكربون تتصل فيما بينها في النهاية مكونة قناة كربونية تصل بين القطبين العلوي والسفلي، حيث تكون موصلة وتسمح بمرور التيار وبذلك ينهار العازل الكهربائي ويفقد خاصية العزل وفي العوازل الجيدة التي لا تتأثر بالشرارة مثل العوازل المصنوعة من البورسلين والزجاج فإن الظاهرة السابقة لا تتم لأنها مواد خاملة وينشأ بين القطبين بدلاً من ذلك قوس كهربائي Flashover.

(7- 13- 2) انهيار لب العازل (التشجير) Treeing

عادة ما ينشأ هذا النوع من وجود جيوب هوائية مفرغة داخل العازل، وعند تطبيق جهد عال بين قطبين كهربائيين أحدهما مدبب Point Electrode والآخر مسطح Plain Electrode فإن الوسط الهوائي داخل العازل الصلب سينهار نظراً لأن شدة المجال الكهربائي E عند القطب المدبب هي أعلى ما يمكن وتفوق شدة الانهيار الكهربائي للهواء فينتج عنه تفريغ

جزئي Partial Discharge يعمل على تآكل العازل داخلياً، ويحدث شرخ صغير عند الحواف المدببة للجيب الهوائي نتيجة لتمركز المجال الكهربائي عند هذه الحواف الحادة مما يزيد من نشاط التفريغ الجزئي واتجاه الشروخ الصغيرة الميكروسكوبية باتجاه المجال الكهربائي، الذي تقع خطوطه بين القطبين الكهربائيين، وتفرعها على شكل شجيرات Trees حتى تصل بين القطبين، ونتيجة لترسب الكربون على سطح هذه القنوات الميكروسكوبية فإنها تصبح موصلة فينهار العازل ، وتسمى هذه الظاهرة بالتشجير Treeing. وعادة ما تحدث هذه الظاهرة في الكيابل المصنوعة من مادة البولي إيثيلين والتي تعمل عند جهود عالية. وفي المناطق ذات منسوب المياه العال تتشرب الكيابل المصنوعة من مادة البولي إيثيلين نسبة من الماء تختزن في الجيوب الهوائية الناتجة من عيوب التصنيع وعند تعرضها للمجال الكهربائي أثناء عمل الكيبل تستطيل هذه الجيوب المائية حتى تصل بين الموصل والغلاف المعدني المؤرض للكيبل مما يؤدي إلى انهيارها، وتسمى هذه الظاهرة بظاهرة التشجير المائي Water Treeing .

(7- 13- 3) الانهيار الإلكترو ميكانيكي:

عندما يتعرض العازل الصلب لمجالات كهربائية عالية يمكن أن يحدث الانهيار بسبب قوى الضغط الكهرو ستاتيكية والتي يمكن أن تزيد عن أقصى قيمة ضغط ميكانيكية يتحملها العازل. لو افترضنا أن سمك عينة الاختبار d_o وتم ضغطها لسمك d تحت جهد كهربائي V فإن إجهاد الضغط الميكانيكي يكون متعادلا إذا كان :

$$\varepsilon_o \varepsilon_r \frac{V^2}{2d^2} = Y \ln[\frac{d_o}{d}] \qquad (21)$$

حيث إن Y هو معامل يونج وتصبح المعادلة:

$$V^2 = d^2[\frac{2Y}{\varepsilon_o \varepsilon_r}]\ln[\frac{d_o}{d}] \qquad (22)$$

وغالبا يحدث الاتزان الميكانيكي عندما : $d/d_o=0.6$ or $d_o/d=1.67$

لذلك تكون أكبر قيمة للمجال الكهربائي قبل الانهيار هي.

$$E_{max} = \frac{V}{d_o} = 0.6\sqrt{\frac{Y}{\varepsilon_o \varepsilon_r}} \qquad (23)$$

(7- 13- 4) الانهيار الحراري Thermal Breakdown

تزداد قيمة جهد الانهيار للعازلات الصلبة مع زيادة سمك العازل حتى درجة معينة، بعده يتحدد التوصيل الكهربائي بالعازل بناءً على الحرارة المتولدة داخله. وعند تطبيق الجهد على العازل يمر تيار توصيل صغير جدا خلال المادة. فيتسبب التيار في زيادة درجة حرارة العازل وتنتقل الحرارة المتولدة للوسط المحيط بالتوصيل خلال العازل وبالإشعاع من سطح العازل. ويحدث الاتزان عندما تتساوى قيمتي الحرارة المتولدة داخل العازل والحرارة المفقودة بالتوصيل والإشعاع.

الحرارة المتولدة تحت تأثير التيار المتردد هي:

$$W = \frac{E^2 f \varepsilon_r \tan\delta}{1.8x10^{12}} \qquad (24)$$

بحيث إن f هو التردد بالهيرتز و δ هي زاوية الفقد للعازل و E هي القيمة الفعالة للمجال الكهربائي.

الحرارة المفقودة هي:

$$W_T = C_v \frac{dT}{dt} + div(K.gradT) \qquad (25)$$

حيث إن C_v هي الحرارة النوعية للعينة و T هي درجة حرارة العينة و K هي الموصلية الحرارية للعينة و t هو زمن الفقد الحراري. ويحدث الاتزان الحراري عندما تتساوى قيمة الحرارة المتولدة مع الحرارة المفقودة. ويحدث الانهيار عندما تكون كمية الحرارة المتولدة أكثر من كمية الحرارة المفقودة.

(7- 13- 5) التلف والانهيار الكيميائي:

في وجود الهواء وبعض الغازات تحدث لبعض المواد العازلة تغيرات كيميائية عندما تتعرض هذه المواد لإجهاد كهربائي مستمر. فالأكسدة والتحلل المائي والتفاعل الكيميائي هي أهم أنواع التفاعلات الكيميائية التي يمكن أن تحدث للعوازل الصلبة.

- **التأكسد:** في وجود الهواء أو الأوكسجين تتأكسد بعض المواد مثل المطاط والبولي إيثيلين مما يؤدي إلى الزيادة في شروخ السطح للعازل الصلب.
- **التحلل المائي:** في وجود الرطوبة أو بخار الماء على سطح العازل الصلب يحدث التحلل المائي وتفقد المادة العازلة- مثل الورق و القطن والمواد السليوليزية الآخرى- كثيرا من خصائصها الكهربائية والميكانيكية. وينخفض العمر الافتراضي للمواد البلاستيكية مثل البولي إيثيلين بصورة ملحوظة في وجود الرطوبة.

- **التفاعل الكيميائي** : العديد من العمليات مثل عدم الاتزان الكيميائي عند درجات الحرارة العالية، والتأكسد في وجود الهواء والأوزون والذي يحدث شروخاً بالمادة العازلة، وكذلك التحلل المائي نتيجة وجود الرطوبة ودرجات الحرارة العالية يمكن أن تحدث حتى في غياب الإجهاد الكهربائي.

(7- 14) العوازل الصلبة المستخدمة عمليا

تتغير العوازل الصلبة تغيراً واسعاً من حيث المصدر والخصائص ويمكن أن تكون مواد طبيعية، أوعضوية مثل الورق والمطاط أو مواد صناعية غير عضوية مثل الميكا والزجاج والسيراميك واللدائن. ومن أهم المواد العازلة التي تستخدم في الشبكات الكهربائية هي:

1- الورق (Paper)

الورق المستخدم عادة في عمليات العزل الكهربائي يكون دائما من نوعية خاصة وهو ورق رقيق جدا أو ورق لف أسمر. ويعتمد سمك وكثافة الورق على التطبيق فمثلا الورق ذو الكثافة القليلة يفضل في مكثفات التردد العال والكيابل، بينما الورق ذو الكثافة المتوسطة يستخدم في مكثفات القوى، والورق ذو الكثافة العالية يفضل في التيار المستمر ومكثفات تخزين الطاقة وكعازل في آلات التيار المستمر. وبالرغم من أن الورق يمتاز بخواص كهربائية جيدة وهو في الحالة الجافة إلا أن طبيعته المسامية تجعله شديد الامتصاص للرطوبة وللتغلب على هذه المشكلة يغمر الورق بعد تجفيفه تحت الحرارة والتفريغ في مركب خاص من زيوت العزل. وثابت العزل النسبي للورق المشبع يعتمد على سماحية السليلوز المكون للورق وسماحية الزيت وكثافة الورق.

2- الميكا ومشتقاتها (Mica)

الميكا أسم مشتق لنوع من بلورات السيليكون المعدنية للألو مينا والصودا الكاوية. ويمكن تقسيمها إلى شرائح رقيقة متساوية. وتجمع الميكا خصائص كهربائية عدة مثل شدة العزل العالية وفقد العزل المنخفض ومقاومة درجة الحرارة العالية وقوتها الميكانيكية الجيدة لذلك يتم استخدام الميكا في العديد المعدات الكهربائية. وتستخدم الميكا النقية في تطبيقات التردد العال. وتستخدم الميكا التجارية (التي تحتوي على شوائب) في عوازل الجهد المنخفض والمفاتيح الكهربائية وآلات التيار المستمر وملفات العضو الدوار ومعدات التبريد والتسخين الكهربائية.

3- الزجاج (Glass)

ثابت العزل للزجاج يتراوح بين 3.7 إلى 10وكثافته تتراوح بين 2.2 إلى 6 g/cm^3 وعند درجة حرارة الغرفة تتراوح المقاومة النوعية الحجمية ما بين 10^{12} إلى 10^{20} أوم.سم. ويتراوح فقد العازل للزجاج بين 0.004 إلى 0.02 معتمدا على التردد بحيث إن أكبر قيمة عند التردد الأقل. وشدة العزل للزجاج تتراوح بين 3000 حتى 5000 كيلو فولت/سم وتقل مع زيادة درجة الحرارة وتصل لنصف قيمتها عند 100 درجة مئوية. ويستخدم في صناعة عوازل التعليق وعوازل التثبيت للموصلات الكهربائية حتى الجهد المتوسط.

4- السيراميك (Ceramics)

السيراميك هو مادة غير عضوية ويمكن تقسيمه إلى مجموعتين معتمدا على ثابت العزل. فالسيراميك ذو السماحية القليلة ($\varepsilon_r<12$) يستعمل كعوازل تعليق وعوازل تثبيت للموصلات الكهربائية حتى الجهد الفائق بينما السيراميك ذو السماحية العالية ($\varepsilon_r>12$) يستخدم في المكثفات.

5- البولي إيثيلين (Polyethylene)

هي مواد ثيرموبلاستيكية والتي لها خصائص فريدة مثل مقاومة عالية للرطوبة والكيماويات وهي سهلة الإنتاج ومنخفضة التكإلىف وكذلك لها مقاومة نوعية عالية وخصائص عزل ممتازة عند الترددات العالية. لذلك تستخدم بكثرة في كيابل القوى والاتصالات وكيابل التحكم وكيابل التلفاز. وبتغيير طريقة التصنيع يمكن عمل أنواع مختلفة من البولي إيثيلين لها كثافة مختلفة وذلك لاستخدامها في مختلف التطبيقات. ويستخدم البولي إيثيلين في الكيابل الكهربائية حتى 70^oC ولزيادة درجة الحرارة التي يتحملها فقد طورت عملية البلمرة بإضافة مواد كيمائية أو أشعة لتكوين بولي إيثيلين ذي روابط متشابكة XLPE والذي يمكنه من يعمل حتى 90^oC .

5- البولي فينيل كلورايد Polyvinyle Chloride (PVC)

يتميز البولي فينيل كلورايد بخواص كهربائية ممتازة عند الجهود المنخفضة وكذلك درجات الحرارة المنخفضة، وهو يستعمل كعازل جيد في الكيابل حتى جهد 3.3kV إلا أنه يصبح غير مناسب للجهود الأكبر من ذلك حيث ترتفع مفقودات العزل بسبب ارتفاع قيمة ثابت العزل. ومن الملاحظ أيضا أن مقاومية البولي فنيل كلورايد تتغير تغيرا شديدا مع درجة الحرارة مما يجعله عند درجة حرارة مرتفعة غير مناسب بالمرة حيث تهبط مقاومية العزل عند 70^oCإلى ألف مرة من قيمتها عند 20^oC. علاوة على ذلك فإنه يلين بالحرارة ويصلد بالبرودة ولهذا لا يجب أن يتعرض لدرجات حرارة مستمرة تزيد عن 70^oC أو تقل عن 0^oC.

أسئلة

1. اشرح ظاهرة ازدياد التيار الكهربائي في الغاز المسلط عليه مجال كهربائي منتظم.
2. اشرح الجهاز العملي المستخدم لقياس تيار ما قبل الانهيار في الغازات.
3. عرف معاملات التأين الابتدائي والثانوي لتاونسند. وما هو شرط الانهيار لتاونسند؟
4. عرف الغازات سالبة الكهربائية. ولماذا يكون جهد الانهيار لهذه الغازات أكبر من غيرها؟
5. استنتج خاصية الانهيار للغازات سالبة الكهربائية.
6. اذكر مختلف العوامل المؤثرة على انهيار الغازات العازلة.
7. اشرح ظاهرة التوصيل الكهربائي في السوائل العازلة وكيف تختلف عنها في الغازات العازلة؟
8. ما السوائل العازلة التجارية وكيف تختلف عن السوائل النقية العازلة؟
9. ما العوامل المؤثرة على انهيار العوازل السائلة النقية والعوازل السائلة التجارية؟
10. اشرح الأسباب المختلفة لانهيار العوازل السائلة التجارية.
11. اذكر أهم الخصائص التي يجب أن تتوفر في العازل الجيد
12. اذكر أهم الانهيارات التي يمكن أن تحدث في العازل الصلب
13. اشرح كيفية انهيار سطح العازل الصلب
14. اشرح كيفية انهيار لب العازل الصلب
15. اشرح كيفية حدوث الانهيار الإلكتروميكانيكي للعازل الصلب
16. اشرح كيف يحدث التلف والانهيار الكيميائي للعازل الصلب
17. اشرح كيفية حدوث الانهيار الحراري للعازل الصلب
18. اذكر أهم أنواع العوازل الصلبة المستخدمة عمليا.

المراجع

المؤلف (Author)	اسم المرجع (Name of the reference)
(1) د. محمد عدنان سراج	نقل وتوزيع وحماية القدرة الكهربائية، وزارة التعليم العاليين سوريا، 1996.
(2) د. هاني عبيد ود. محمد عالية	التمديدات الكهربائية وحمايتها ، المؤسسة العربية للدراسات والنشر ، 1992.
(3) د. أسر على ذكي و د. أحمد حلمي راشد	نظم التوزيع وتنظيم الجهد، منشأة المعارف بالإسكندرية ، 1984
Leo L. Grigsby (4)	The Electrical Power Engineering Handbook, Marcel Dekker, New York, 1994.
H. Lee Willis (5)	Power Distribution Planning Reference Book, ABB Inc., North Carolina, 2004.
L. M. Faulkenberry and W. Coffer (6)	Electrical Power istribution and Transmission, Prentice Hall, 1996.
Syed Nasar and F. C. Trutt (7)	Electric Power Systems, Taylor and Francis, 2001.
Turan Gonen (8)	Electrical power distribution system engineering , McGraw-Hill 1986.
William A. Thu (9)	Electrical Power Cable Engineering, 2nd Edition, Taylor and Francis, 2003.
J. A. Harrison (10)	Electric Power Systems, McGraw Hill, 1996.
C. A. Gross (11)	Power System Analysis, John Willy and Sons Ltd, 1997.
W. D. Stevenson (12)	Elements of Power System Analysis, McGraw Hill.
C. Denis Poole and Trevor E. Marks (13)	Electrical Distribution in Buildings, 2nd Edition, Blackwell Science Ltd, Oxford, 1994.
Stephen W. Fardo and Dale R. Patrick (14)	Electrical Power System Technology, Butterworth-Heinemann, 1997.