

كبلات القوى الكهربائية



لتحميل المزيد من الكتب والمراجع باللغة العربية

تابعونا على

صفحة موسوعة الهندسة الكهربائية على الفيس بوك
Electrical Engineering Encyclopedia-Arabic
www.facebook.com/EEE.Arabic

جروب موسوعة الهندسة الكهربائية على الفيس بوك
EEE-Arabic
www.facebook.com/groups/EEE.Arabic

دكتور

محمد صلاح الدين خليل

رئيس القسم التسليح بالكلية البحرية سابقاً
أستاذ مشارك
بمعهد اسكندرية العالي للتكنولوجيا

دكتور

أسر على زكى

أستاذ بكلية الهندسة - جامعة الإسكندرية
ومستشار بالأكاديمية العربية
للعلوم والتكنولوجيا

الناشر

منشأة المعارف

بالاسكندرية

بسم الله الرحمن الرحيم

مقدمة

استخدمت الكبلات الكهربائية في نقل وتوزيع الطاقة الكهربائية في المناطق المأهولة بالسكان سواء في المدن أو خارجها منذ بداية استخدام الطاقة الكهربائية ونقلها وتوزيعها في بريطانيا وأوروبا في أواخر القرن التاسع عشر وبالتحديد في عام 1890 عندما استخدم فيرانتى (Ferranti) الورق المشرب في عزل الوصلات .

ومن المعروف أن هناك طريقتان أساسيتان لنقل الطاقة الكهربائية إلي مناطق الاستهلاك وهاتان الطريقتان هما استخدام الخطوط الهوائية أو استخدام الكبلات تحت الأرض ، ويعتبر استخدام الخطوط الهوائية أكثر اقتصادية ، ففي الولايات المتحدة -على سبيل المثال - وحتى أواخر القرون العشرين هناك 1% فقط من خطوط نقل الطاقة الكهربائية تستخدم الكبلات إلا أن هذه النسبة في ازدياد . ويرجع تفضيل استخدام الخطوط الهوائية على استخدام الكبلات الى أن تكلفة خطوط الكبلات تبلغ من 10 الي 20 مرة تكلفة استخدام الخطوط الهوائية ذات الامكانيات المتساوية ، ولكن هذا الرقم قد قل كثيرا بحلول الألفية الثالثة. ففي عام 1993 بدأت مؤسسة بحوث القدرة في الولايات المتحدة مشروعاً يهدف الي تقليل نفقات مد خطوط الكبلات بنسبة 50% ، وبحلول عام 2000 تم تحقيق الهدف واصبحت نسبة تكلفة نقل الطاقة باستخدام الكبلات إلي تكاليف نقلها باستخدام الخطوط الهوائية حوالي 1: 5 .

مقدمة

ولقد أدت جميع هذه الأسباب الى زيادة ميزانيات الأبحاث في اتجاه محاولة تخفيض كل من تكاليف إنتاج ومد الكبلات الكهربائية وتحسين موقف استخدام الكبلات الأرضية عموماً كمنافس لخطوط النقل الهوائية. وربما كانت الدول الغنية هي الأسبق في هذا الاتجاه وذلك لتوافر ميزانيات الأبحاث والتكنولوجيا من جهة ولقوة تأثير جماعات المهتمين بالبيئة من جهة أخرى .

ومن الأهمية بمكان إدراك أن على الرغم من ارتفاع تكاليف منظومات الكبلات ، فإن خطوط النقل الكهربائي للجهود العالية والزائدة والفائقة باستخدام الكبلات تتميز علي نظراتها الهوائية بما يلي :

- لا تتعرض الكبلات المدفونة تحت الأرض للتغيرات الجوية والعوامل الطبيعية كالرياح وتراكم الجليد والتلوث ، وبالتالي يزيد من عمرها الافتراضي عن خطوط النقل الهوائية وكذلك قلّة تعرض الكبلات لعمليات التخريب .

- ارتفاع عول الكبلات مقارنة بالخطوط الهوائية مما يرجح استخدامها عندما يكون العول علي المعدات المستخدمة في منظومات القوى الكهربائية ضرورة قصوى .

- يمكن استخدام الكبلات في ربط الشبكات الكهربائية ونقل الطاقة الكهربائية عبر الأنهار والبحار والممرات المائية ولا يمكن في هذه الحالة استخدام خطوط لنقل الهوائية .

وعلى الرغم من صعوبة حصر جميع التطورات التكنولوجية في مجال صوير الكبلات الا انه يمكن تلخيص أهم الإنجازات التكنولوجية في هذا المجال منذ ان قام فرانتني في عام 1890 باستخدام الورق المشرب لعزل الموصلات وحتى الآن كالآتي :

والى جانب ذلك فهناك ثلاثة أسباب رئيسية أدت إلى ترجيح كفة استخدام الكبلات وزيادة الاتجاه نحو استخدامها بدلاً من استخدام الخطوط الهوائية. والسبب الأول هو التطور الواضح في تكنولوجيا الكبلات نتيجة لإستخدام الكبلات ذات العوازل البلمرية والتقدم في صناعتها. والسبب الثاني هو التغير في هيكل صناعة القوى الكهربائية وذلك بالتحول من أن تكون صناعة الكهرباء تابعة للدولة الي أن تكون مملوكة للقطاع الخاص ، والسبب الثالث المهم هو ازدياد وتنامي الوعي بالاهتمام بالبيئة وحمايتها .

وربما ساعد على ذلك الازدياد الملحوظ في استخدام الخطوط الهوائية بازدياد الحاجة للطاقة الكهربائية واستخدام جهود عالية لنقل هذه الطاقة وبالتالي زيادة مساحة الأرض المطلوبة لإنشاء خطوط النقل الهوائية في حالة استخدام الجهود الزائدة والفائقة. فأصبحت تكلفة الأراضي اللازمة لهذه الخطوط ذات قيمة لا يمكن تجاهلها ؛ فعلي سبيل المثال فان إنشاء خط هوائي للجهود الزائد يتطلب 30.000 م² / كم ، بينما يتطلب إنشاء خط للجهود الفائقة مساحة أكبر بلا شك ؛ وبازدياد ثمن الأرض سوف تزداد تكلفة إنشاء مثل هذه الخطوط.

وعلى الرغم من عدم وجود دليل علمي صارم علي تأثير خطوط النقل الهوائية علي الصحة العامة ، فلقد نجحت الدعاية التي قام بها المهتمون بشئون البيئة في زيادة العداء نحو بناء خطوط هوائية لنقل الطاقة الكهربائية. وظهر أخيراً اتجاه جديد لم يكن لأحد أن يتصوره ألا وهو إستبدال خطوط النقل الهوائية بكبلات أرضية في المدن وضواحيها ، مثال ذلك المشروع الدانمركي لمدينة كوبنهاجن وضواحيها حيث تم في هذا المشروع إستبدال خطوط النقل الهوائية التي تعمل بجهود 132 ك ف بكبلات أرضية بلمرية تعمل بجهود 400 ك ف ، وهناك مشروعات أخرى مماثلة في كل من الولايات المتحدة واليابان .

خصائصها الكهربائية والحرارية وزيادة العول عليها ومقاومتها للتقادم ، الا انه في هذا الصدد لابد لنا من الاشارة الى الابحاث الهامة الجارية والتي قطعت شوطاً كبيراً للتوصل الى مواد جديدة لاستخدامها في صناعة الموصلات باستخدام ظاهرة التوصيل الفائق عند درجات حرارة معقولة . وقد تختلف تكنولوجيا تصميم وتصنيع الكبلات من دولة الى اخرى كما قد يختلف الاهتمام بتطوير مادة معينة لصناعة عزل للكبلات الجديدة أو التركيز على تطوير كبلات على مدى جهود معينة ، الا ان هناك أسس وقواعد عامة لتصميم وتقنين أداء الكبلات لا تختلف جوهرها من دولة الى اخرى نتيجة للالتزام معظم الدول المصنعة للكبلات ، وخاصة الأوروبية، بالمواصفات القياسية التي تقوم باعدادها واصدارها اللجنة الدولية للمواصفات الفنية الكهربائية IEC .

وقد وضع هذا الكتاب ليكون مرجعاً باللغة العربية للمهندسين العاملين في مجال القوى الكهربائية علي وجه العموم ولهؤلاء العاملين في مجالات تصميم وتصنيع ومد كبلات القوى الكهربائية على وجه الخصوص.

ولقد كان من ضمن الصعوبات والدوافع أيضاً التي شجعتنا على وضع هذا الكتاب ندره المادة المتاحة من الكتب والمراجع في موضوع كبلات القدرة سواء باللغة الإنجليزية أو باللغة العربية .

وقد رأينا عند اختيار محتويات هذا الكتاب التركيز على الخصائص الكهربائية والحرارية للكبلات، وتناولنا المواد العازلة المستخدمة في صناعة الكبلات الحديثة ببعض التفصيل كما قدمنا وصفاً شاملاً لمختلف أنواع الكبلات المستخدمة في العالم ، وتعرضنا للأسس التي يتم على أساسها اختيار الكبل المناسب لظروف تشغيل معينة .

- اختراع هوشتاوتر (Hochstadter) عام 1914 للحجاب المصنوع من الورق المدني والموضوع حول السطح الخارجي للعزل وذلك لجعل المجال الكهربائي داخل العزل نصف قطري .

- اختراع اما نيولي (Emmanueli) للكبلات المضغوطة بالزيت للتغلب على مشكلة تكون الفراغات في العزل والتي كانت تحد من قيمة الجهد المستخدم في الكبلات ذات الورق المشرب .

- اختراع الكبلات المستخدمة في نقل الطاقة الكهربائية تحت الماء باستخدام التيار المستمر ، والذي أدى تطويرها الى إمكانية نقل الطاقة الكهربائية تحت الماء وربط الشبكات الكهربائية الكبرى عبر البحار والممرات المائية .

- اختراع المواد البلمرية الاصطناعية وتطويرها كموازل للعزل للكبلات بدلاً من الورق المشرب مما أدى الى حدوث طفرة هائلة في صناعة وأداء الكبلات الكهربائية .

- تطوير تقنية استخدام الغاز المضغوط كوسط عازل بين الموصل والغلاف .

- علي الرغم من انها لازالت في مرحلة الاختبار والتطوير فان التوصل الى كبلات تيار متغير باستخدام ظاهرة التوصيل الفائق (superconductivity) اصبح وشيكاً ، مما سيؤدي الى مضاعفة القدرة المنقولة عدة مرات مع خفض الفقد في الكبلات .

وهناك كم هائل من البحوث التي أجريت وما زالت تجري لتطوير جميع المواد التي تدخل في تصنيع الكبلات، وكذا تطوير طرق صناعة الكبلات وتقنيات مدها تحت الأرض. وربما كانت أهم البحوث التي أدت إلى تطوير أداء الكبلات هي تلك التي إختصت بالمواد العازلة لتحسين

ويقدم الباب الأول الخصائص الكهربائية للكبلات ، أما الباب الثاني فيغطي أنواع المواد المستخدمة في صناعة الكبلات ويختص الباب الثالث بمعالجة الأنواع المختلفة للكبلات ومكوناتها . ويعرض الباب الرابع الخصائص الحرارية للكبلات ويقدم وصفا وافيا للأسس التي يتم على أساسها اختيار الكبل المناسب لظروف التشغيل والمد. أما الباب الخامس فقد أفرد لطرق اختبار الكبلات والتقنيات المختلفة المستخدمة لتحديد مكان الخطأ في الكبل. وقد استعنا في إعداد هذا الكتاب بعدد من الكتب والمراجع المتخصصة والمواصفات الدولية كما قمنا باستخدام بعض الأشكال التوضيحية والجداول التي وردت في بعض تلك المراجع كلما رأينا الحاجة إلى ذلك. وقد أدرجنا في نهاية الكتاب قائمة بالمراجع التي استخدمناها في اعداد هذا الكتاب والتي يمكن للقارئ أن يعود إليها عند الحاجة .

والله ولي التوفيق

المؤلفان

الاسكندرية - يوليو 2001

محتويات الكتاب

الباب الأول

الخواص الكهربائية للكبلات

- 1.1 المكونات الأساسية لكبلات القوى 1
- 2.1 مقاومة الموصلات 7
- 1.2.1 المقاومة في حالة التيار المستمر 7
- 2.2.1 المقاومة في حالة التيار المتردد 10
- 1.2.2.1 التأثير السطحي أو الظاهرة السطحية 11
- 2.2.2.1 تأثير التقارب 13
- 3.2.2.1 التيارات الحثية والتيارات الدوامية والتخلفية المغناطيسية 14
- 3.1 تأثير الغلاف (أو الحجاب) المعدني لكبل احادى القلب 16
- 1.3.1 التقارن المغناطيسي بين الغلاف والموصل الداخلى 16
- 4.1 المحانة 25
- 5.1 توزيع المجال الكهربى فى كبل ذي موصل واحد 30
- 6.1 خصائص عوازل الكبلات 32
- 1.6.1 سعة الكبلات 32
- 1.1.6.1 سعة الكبلات ذات المجال القطرى 32
- 2.1.6.1 سعة الكبلات الحزمية 33
- 3.1.6.1 تيار الشحن 39
- 4.1.6.1 الطول الحرج للكبل 40
- 2.6.1 الفقد فى عزل الكبلات 41
- 3.6.1 مقاومة عزل الكبل 45

الباب الثالث أنواع كبلات القدرة

- 1.3 التسميات المختلفة لكبلات القدرة 82
- 2.3 كبلات التوزيع للجهد المنخفض 84
- 3.3 كبلات الجهد المتوسط 88
- 1.3.3 الكبلات المحزمة 88
- 2.3.3 الكبلات الثلاثية القلب المحجبة 92
- 4.3 كبلات الجهد العالى والزائد والفاثق 93
- 1.4.3 كبلات الزيت المضغوط 95
- 2.4.3 الكبلات المضغوطة بالغاز 98
- 3.4.3 الكبلات ذات العوازل البلمرية 99
- 4.4.3 الكبلات المعزولة بالغاز المضغوط 102
- 5.3 كبلات التيار المستمر 105
- 1.5.3 مقدمة 105
- 2.5.3 مميزات وعيوب منظومات الجهد العالى للتيار المستمر 106
- 3.5.3 موصلات كبلات التيار المستمر 107
- 4.5.3 عزل كبلات التيار المستمر 107
- 6.3 الكبلات ذات الأداء المحسن فى حالة الحريق 111
- 1.6.3 الخصائص الإضافية للكبلات المقاومة للحريق 111
- 2.6.3 تحسين خصائص الكبلات فى ظروف الحريق 113

- 4.6.1 انهيار عزل الكبلات 46
- 5.6.1 المثانة الكهربية الدفعية لعزل الكبلات 48
- 7.1 الجهد المقتن للكبلات 49

الباب الثانى المواد المستخدمة فى صناعة الكبلات

- 1.2 المواد المستخدمة فى صناعة الموصلات 52
- 2.2 المواد المستخدمة فى صناعة عوازل الكبلات 57
- 1.2.2 الخواص الواجب توافرها فى عوازل الكبلات 57
- 2.2.2 أنواع المواد المستخدمة فى صناعة عوازل الكبلات 58
- 3.2.2 العوازل الورقية المشربة وزيت التشريب 58
- 4.2.2 العوازل الاصطناعية 61
- 1.4.2.2 العوازل المتلدنة بالحرارة 62
- 2.4.2.2 العوازل المتصلدة بالحرارة 63
- 3.4.2.2 البولى ايثيلين 64
- 4.4.2.2 البولى ايثيلين المشبك 67
- 5.4.2.2 مطاط الايثيلين بروبيلين 69
- 6.4.2.2 كلوريد البوليفينيل 70
- 7.4.2.2 عيوب العوازل البلمرية 72
- 8.4.2.2 نبذة عن ظاهرة التشجير فى العوازل البلمرية 74
- 9.4.2.2 وسائل تحسين خصائص المواد البلمرية كمواد عازلة للكبلات 77
- 5.2.2 الغازات المضغوطة 79

| | |
|----------|-----------------------|
| 178..... | 7.4 الهبوط في الجهد |
| 179..... | 1.7.4 حساب هبوط الجهد |

الباب الخامس

اختبارات الكبلات وتحديد موضع الخطأ في الكبل

| | |
|----------|--|
| 182..... | 1.5 اختبارات الكبلات |
| 183..... | 1.1.5 الاختبارات الروتينية |
| 184..... | 2.1.5 الاختبارات الخاصة |
| 185..... | 3.1.5 الاختبارات النوعية |
| 186..... | 4.1.5 اختبارات ما بعد التركيب |
| 186..... | 2.5 تحديد موضع الخطأ |
| 188..... | 1.2.5 تحديد موضع الخطأ باستخدام الدوائر القنطرية |
| 191..... | 2.2.5 تحديد موضع الخطأ باستخدام تقنية الصدى النبضي |
| 195..... | ملحق 1: جداول قدرة حمل التيار لمختلف أنواع الكبلات حتى 30 ك ف. |
| 203..... | ملحق 2: أهم المواصفات القياسية (IEC) الخاصة بكبلات القوى |
| 208..... | المراجع |

الباب الرابع

تحديد سعة الكبل لحمل التيار

| | |
|----------|--|
| 115..... | 1.4 مقدمة |
| 117..... | 2.4 التدفق الحرارى في الكبل |
| 117..... | 1.2.4 التدفق الحرارى عند إهمال الفقد في العزل |
| 122..... | 2.2.4 التدفق الحرارى مع الأخذ في الإعتبار الفقد في العزل |
| 125..... | 3.4 المقاومة الحرارية |
| 125..... | 1.3.4 المقاومة الحرارية لكبل أحادى القلب |
| 126..... | 2.3.4 المقاومة الحرارية لكبل ثلاثى القلب |
| 126..... | 3.3.4 المقاومة الحرارية للوسط المحيط بالكبل |
| 127..... | 1.3.3.4 المقاومة الحرارية للأرض |
| 131..... | 2.3.3.4 المقاومة الحرارية للهواء |
| 139..... | 4.4 عوامل التقنين |
| 141..... | 1.4.4 عامل الحمل |
| 148..... | 2.4.4 الظروف القياسية للكبلات الموضوعة في الهواء |
| 149..... | 3.4.4 الظروف القياسية للكبلات المدفونة مباشرة في الأرض |
| 150..... | 4.4.4 التشكل التجمعي للكبلات |
| 152..... | 5.4.4 بعض الأمثلة لاستخدام عوامل التقنين |
| 154..... | 5.4 تأثير القصر على التحمل الحرارى للكبلات |
| 156..... | 1.5.4 خصائص تيار القصر |
| 159..... | 2.5.4 الإجهاد الحرارى |
| 159..... | 3.5.4 السعة الحرارية المقننة للكبل |
| 162..... | 4.5.4 استخدام منحنيات القصر |
| 173..... | 5.5.4 تأثير تيار القصر على الحجاب والغلاف والدرع |
| 173..... | 6.4 الإجهاد الكهروميكانيكى |

الباب الأول

الخصائص الكهربائية للكبلات

1.1 المكونات الأساسية لكبلات القوى

تستخدم كبلات القوى في نقل وتوزيع الطاقة الكهربائية وعادة ما يتم وضع هذه الكبلات تحت الأرض (underground cables) ، وفي أحوال خاصة يتم وضعها في أعماق البحار والمحيطات والممرات المائية ، (submarine cables) ، وذلك إما على القاع أو على عمق عدة أمتار من قاع البحر نفسه .

وتتكون كبلات القوى عادة من الأجزاء الرئيسية التالية :

(أ) موصل معدني (conductor) : وعادة ما يصنع من معدن ذي مقاومة كهربائية منخفضة ويقوم هذا الموصل بدور حمل وتوصيل التيار الكهربى والطاقة الكهربائية .

(ب) عزل الكبل (cable insulation) : وهو يتكون أساساً من مادة عازلة كهربياً (dielectric) .

وتتخصص مهمته في عزل الموصل المعدنى الذى يحمل الطاقة الكهربائية ، ويمنع خطر التوصيل بين الموصل الكهربى وأى عنصر محيط به ، ويختلف نوع العزل طبقاً لتصميم الكبل . ومن أشهر العوازل المستخدمة فى الكبلات العوازل الورقية (paper insulation) والعوازل البلمرية (polymeric insulation) وكذلك العوازل الغازية

(gaseous insulation) وغيرها وسوف نتعرض لهذه العوازل بشيء من التفصيل في الباب الثاني .

وإذا كان موصل الكبل والعزل يمثلان الأجزاء الرئيسية لأي كبل فهناك أجزاء إضافية أخرى تدخل في تكوين الكبلات وتزداد أهميتها حسب الجهد الذي يعمل عليه الكبل ومجالات استخدام هذا الكبل . وهذه الأجزاء هي :

(ج) حجاب الموصل (conductor shield) : ويسمى أحياناً بشبكة الموصل (conductor screen) ، وهو عبارة عن طبقة رقيقة تصنع عادة من مادة شبه موصلة (semiconductive layer) يتم وضعها بين الموصل وعزل الكبل . والغرض الأساسي من استخدام هذا الحجاب هو التقليل من قيمة المجال الكهربى على السطح المشترك بين الموصل والعزل والذي قد يؤدي إلى إنبهار عزل الكبل في بعض الأحيان . ومن المعروف أن القيمة القصوى للمجال الكهربى داخل كبلات التيار المتغير تكون عند سطح التماس بين العزل (طبقة شبه الموصل) والموصل . وهناك عدة أسباب لارتفاع المجال الكهربى على سطح الموصل عن هذه القيمة ، منها خشونة سطح الموصل الكهربى أو وجود جيوب هوائية (voids) ، ولذلك فإن سطح التلامس بين الموصل والعزل يجب أن يكون أملساً ويجب الاهتمام بهذا السطح خصوصاً عند عمل وصلات الكبلات .

وهناك أنواع مختلفة من المواد تستخدم في تصنيع هذه الطبقة تختلف باختلاف نوع العزل المستخدم في الكبل والجهد المقنن له . ومن المعروف أن موصل الكبل يصنع أحياناً من حزمة من الموصلات بدلاً من استخدام موصل واحد ذي قطر كبير وذلك لإعطاء الكبل مرونة ، ويسمى الموصل في هذه الحالة بالموصل المجدول (stranded conductor) . و سطح هذا الموصل أبعد ما يكون عن النعومة ، وللتغلب على تعرج هذا السطح وخشونة وللحصول على سطح ناعم نسبياً تستخدم العديد من الوسائل منها

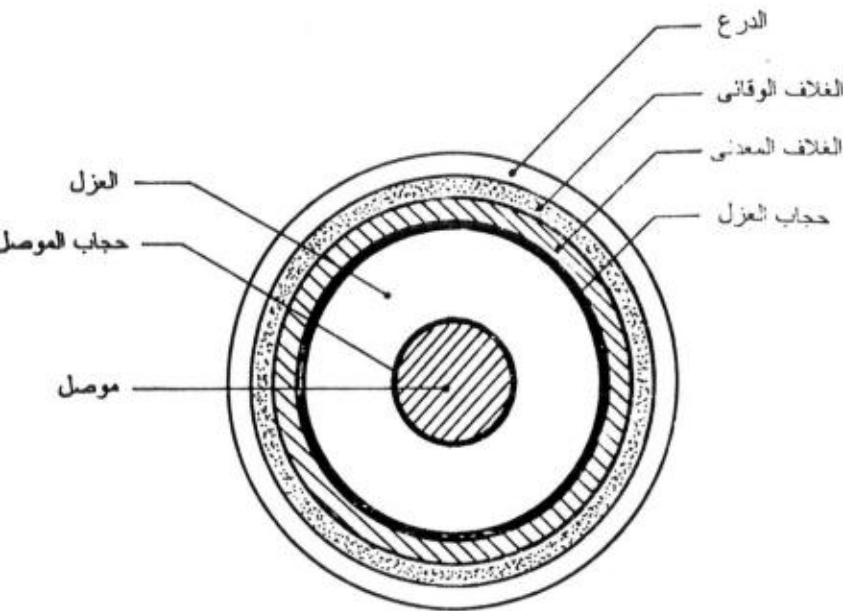
لف الموصل بعدة حلقات من الورق الممعدن (metallized paper) أو الورق المشبع بالكربون (carbon paper) ، وتمثل هذه الطبقات حجاب الموصل في حالات الكبلات ذات العوازل الورقية والزيتية . أما في حالة العوازل البلمرية فهناك طريقتان للحصول على حجاب الموصل :

الأولى : هي لف الموصل بشريط من القماش أو البلاستيك المشبع بالكربون ، وتستخدم هذه الطريقة في كبلات الضغط المنخفض (12 ك. ف مثلاً) .

الثانية : وضع طبقة من المادة شبه موصلة على الموصل أثناء عملية بثق العزل (extrusion) . وفي هذه الحالة تصنع هذه الطبقة من مواد بلمرية خاصة مثل carbon-filed ethylvinyl acetate – EVA . ويجب ألا تقل المقاومة الحجمية لهذه الطبقة عن $10^5 - 10^4$ أوم ، وتستخدم الطريقة الثانية في كبلات الضغط المتوسط والعالي (33 ك ف) وأكثر .

(ء) غلاف العزل (insulation shield) : ويستخدم هذا الغلاف فى جميع أنواع الكبلات سواء ذات العوازل الورقية المشربة أو الكبلات البلمرية وإن اختلف التصميم فى كل حالة . ويمكن تلخيص الغرض من غلاف العزل كما يلى :

- ضمان الاحتفاظ بالمجال الكهربى داخل الكبل .
- توفير مجال دائرى متساوى التوزيع (symmetrical) للمجال الكهربى داخل العزل وبالتالي تقليل إمكانية حدوث تفريغ كهربى على السطح (surface discharges) وذلك بالتخلص من الإجهادات الكهربائية المماسية والطولية .
- التقليل من خطر الصدمة الكهربائية وذلك بتأريض غلاف العزل جيداً .
- الحد من التداخل مع موجات الراديو .



شكل 1. i. قطاع في كبل يبين الطبقات المختلفة التي تتكون منها الكابلات بوجه عام

معدنية مؤرضة (earthed metallic screen) لابد من تصميمها لتكون قادرة على حمل تيار الخطأ أيضاً.

(و) الغلاف الوقائي (sheath cover) : من عيوب الألومنيوم سهولة تعرضه للتحات الكيميائي ، ولذلك تستخدم طبقة أخرى من مادة كلوريد البولي فينيل (PVC) عالية الجودة وقد تستخدم أيضاً مادة البولي إيثيلين عالي الكثافة (HDPE) في حالة كابلات الجهد الزائد (EHV) .

وتزود معظم الكابلات البلمرية الحديثة للجهد العالي بغلاف عزل مصنوع من مادة شبه موصلة وفي هذه الحالة تستخدم تقنية حديثة أثناء عملية البثق حيث يتم البثق على ثلاثة مستويات في وقت واحد ، بثق غلاف الموصل ، بثق العزل ، وبثق غلاف العزل. وتسمى هذه التقنية بتقنية البثق الثلاثي (triple extrusion technique) . ويساعد هذه التقنية على التقليل من ظاهرة التفريغ الجزئي (partial discharge) على الأسطح المشتركة بين العزل والموصل والعزل وغلاف العزل .

وعلى الرغم من ضرورة توفر شرط أن يكون غلاف العزل ملتصق جيداً بالعزل وأن يكونا معاً سطحاً متماسكاً مشتركاً ، فهناك أنواع من الكابلات يتم تصنيعها بحيث يكون غلاف العزل قابلاً للسنزع (stripable) وذلك يسهل من عميات توصيل الكابلات - وعادة ما يستخدم هذا النوع من الأغلفة في كبلات الجهد المنخفض (12 ك ف) ، ويتم التحكم في قابلية الغلاف للسنزع عن طريق التحكم في درجة تشبيك هذه الطبقة (degree of cross-linking) .

(هـ) الغلاف المعدني (metallic sheath) : ويستخدم هذا الغلاف أساساً لحماية الكبل من تسرب الرطوبة إلى داخله ويستخدم في الكابلات ذات العوازل الورقية أو العوازل البلمرية على حد سواء. ويقوم الغلاف أيضاً بحماية الكابلات - خصوصاً ذات العوازل الورقية - من أي صدمات ميكانيكية . قد كان الغلاف المعدني للكابلات يصنع من الرصاص في الماضي إلا أن الألومنيوم قد حل محل الرصاص في الكابلات الحديثة وذلك لعدة ميزات يتميز بها الألومنيوم مقارنة بالرصاص منها قلة الوزن وخص الثمن وموصلية كهربية جيدة بالإضافة إلى عدة مميزات ميكانيكية أخرى أهمها هي أن الألومنيوم لا يتأثر بالاهتزازات الميكانيكية مثل التي قد تتواجد على الكبارى أو بجوار السكك الحديدية . ويستخدم هذا الغلاف كشبكة

ولحماية الغلاف المعدني من التآكل في حالة تلف الغلاف الوقائي ، تستخدم طبقة إضافية من الورق والجوت المشبع بالبيتومين المضاف إليه مادة لمنع التآكل بين الغلاف المعدني والغلاف الوقائي .

(ز) الدرع (armour) : الغرض من الدرع هو توفير الحماية الميكانيكية للكبل وعموماً فالكبلات ذات الأغلفة المعدنية المصنوعة من الألومنيوم لا تحتاج عادة إلى طبقة تدرية نظراً للخصائص الميكانيكية الجيدة للألومنيوم. أما كبلات التيار المتغير ذات الموصل المنفرد والغلاف المعدني المصنوع من الرصاص فتزود بدرع مصنوع من مادة غير مغناطيسية وهي مرتفعة الثمن نسبياً .

وعادة ما تزود الكبلات بطبقة مبطنة تحت الدرع وتتكون هذه الطبقة من مواد ليفية أو من مادة كلوريد البوليفينيل على هيئة شرائط ملفوفة أو طبقة مبطوقة .

ومعظم كبلات القوى ذات الموصلات المتعددة (multicore cables) يتم توفير الحماية الميكانيكية لها عن طريق دروع لها أشكال متعددة نذكر منها ما يلي :

(أ) شرائط من الصلب تلف حول الطبقة المبطنة ويستخدم عادة شريطان متداخلان لضمان التغطية الكاملة للكبل .

(ب) أسلاك من الصلب المجلفن وتلف حول الكبل وتتكون من طبقة أو طبقتين .

(ج) أسلاك أو شرائح من الألومنيوم تستخدم عادة في الكبلات ذات العوازل البلمرية .

ويبين الشكل 1.1 قطعاً لكبل ذي موصل واحد موضحاً عليه الطبقات المختلفة السابق شرحها .

2.1 مقاومة الموصلات

1.2.1 المقاومة في حالة التيار المستمر (R_{dc})

يمكن إيجاد مقاومة أى موصل طوله l ومساحة مقطعه S مم² من المعادلة:

$$R = \frac{\rho l}{S} \text{ ohm} \quad (1-1)$$

حيث ρ هي مقاومة الموصل بوحدات أوم - متر ، ويمكن تحويل هذه الوحدات كالآتي :

$$\rho \text{ ohm.cm} = \rho (\text{ohm.m}) \times 10^2$$

$$\rho \text{ ohm.mm}^2/\text{m} = \rho (\text{ohm.m}) \times 10^6$$

ومقاومة النحاس الملتن (annealed copper) عند 20°C طبقاً للمواصفات القياسية التي وضعتها اللجنة الدولية IEC هي :

$$\rho_{20} = 1.7241 \times 10^{-8} \text{ ohm.m}$$

وتؤخذ موصلية هذا النوع من النحاس على أنها تمثل 100 % . وتزداد مقاومة النحاس مع ازدياد درجة الصلادة (hardness) ومع إزدياد نسبة الشوائب . وتصنع الموصلات النحاسية التي تستخدم في الكبلات إما من النحاس الملتن أو من الألومنيوم المسحوب صلد (hard-drawn) ودرجة نقاوته 99.7 % . وطبقاً لمواصفات ال IEC فإن مقاومة هذا النوع من الألومنيوم عند 20° C هي :

$$\rho_{20} = 2.8264 \times 10^{-8} \text{ ohm.m}$$

وتمثل موصلية قيمتها 61 % من موصلية النحاس الملتن . وكما هو في حالة النحاس فإن قيمة هذه المقاومة تعتمد على درجة نقاء الألومنيوم التي

وحيث أن المقاومة تتناسب طردياً مع المقاومة ، فإنه يمكن إيجاد قيمة المقاومة R_θ عند أي درجة حرارة θ من المعادلة :

$$R_\theta = R_{20}[1 + \alpha_{20}(\theta - 20^\circ\text{C})] \quad (3-1)$$

$$= R_{20}g$$

ويعطى الجدول 1 - 2 قيم المعامل g لحساب المقاومة للتيار المستمر عند درجات حرارة أعلى من 20°C .

جدول 1 - 2 قيم المعامل g لدرجات حرارة حتى 100°C

| المعامل g | نحاس | ألومنيوم | درجة حرارة الموصل $^\circ\text{C}$ |
|-------------|--------|----------|------------------------------------|
| 1.0 | 1.0 | | 20 |
| 1.0202 | 1.0197 | | 25 |
| 1.0403 | 1.0393 | | 30 |
| 1.0604 | 1.0590 | | 35 |
| 1.0806 | 1.0786 | | 40 |
| 1.101 | 1.0983 | | 45 |
| 1.121 | 1.1180 | | 50 |
| 1.141 | 1.138 | | 55 |
| 1.161 | 1.157 | | 60 |
| 1.181 | 1.177 | | 65 |
| 1.202 | 1.197 | | 70 |
| 1.222 | 1.216 | | 75 |
| 1.242 | 1.236 | | 80 |
| 1.262 | 1.255 | | 85 |
| 1.282 | 1.275 | | 90 |
| 1.302 | 1.295 | | 95 |
| 1.322 | 1.314 | | 100 |

وبناء على التجربة العملية فإنه يمكن إيجاد قيمة تقريبية لمقاومة موصل مساحة مقطعة S مم² من المعادلات الآتية :

يجب ألا تقل عن 99.57 % وفي هذه الحالة فإن قيمة المقاومة عند 20°C هي :

$$\rho_{20} = 2.828 \times 10^{-8} \text{ ohm.m}$$

وتزداد مقاومة جميع المعادن مع إزدياد درجة الحرارة ويمكن إيجاد قيمة المقاومة عند درجة حرارة جديدة θ_2 من المعادلة ،

$$\rho_{\theta_2} = \rho_{\theta_1}[1 + \alpha_{\theta_1}(\theta_2 - \theta_1)] \quad (2-1)$$

حيث

$$\rho_{\theta_1} = \text{المقاومة عند درجة حرارة } \theta_1$$

$$\theta_2 = \text{درجة الحرارة الجديدة (وهي عادة درجة حرارة التشغيل المسموح بها)}$$

$$\alpha_{\theta_1} = \text{المعامل الحراري عند } \theta_1$$

ويعطى الجدول 1 - 1 المقاومة الكهربائية والمعامل الحراري لها للثلاثة معادن الأكثر استخداماً في صناعة الموصلات .

جدول 1 - 1 المقاومة الكهربائية والمعامل الحراري لها للثلاثة معادن الأكثر استخداماً في صناعة الموصلات

| المعدن | الاستخدام | المقاومة عند 20°C $\rho \times 10^{-8} \text{ ohm.m}$ | المعامل الحراري $\alpha_{20} \times 10^{-3}$ |
|--------------------|-----------|--|---|
| ألومنيوم نقي | | 2.670 | 4.50 |
| ألومنيوم مسحوب صلب | موصلات | 2.826 | 4.03 |
| ألومنيوم | أغلفة | 2.840 | |
| نحاس ملدن | موصلات | 1.724 | 3.93 |
| رصاص | أغلفة | 21.4 | 4.00 |

وسوف نتناول فيما يلي كل جزء على حدة - بطريقة مبسطة - وذلك حتى نوضح للقارئ أصل الزيادة في المقاومة في حالة التيار المتردد .

1.2.2.1 التأثير السطحي أو الظاهرة السطحية

يوزع التيار على مساحة مقطع الموصل بكثافة منتظمة إذا كان التيار مستمراً ولكن إذا كان التيار متردداً فإن توزيعه على المقطع لا يكون منتظماً بل يميل إلى التركيز بالقرب من السطح الخارجي للموصل . والسبب في ذلك هو الآتي :

إذا افترضنا أن مقطع الموصل مكون من عدة عناصر كما هو مبين في الشكل 1. 2a وأن كل عنصر له نفس المقطع (أي نفس المقاومة) فمن الواضح أن الفيض المغنطيسي الذي يتواصل مع العنصر الداخلي 1 أكبر من الفيض الذي يتواصل مع العنصر الخارجي 2 أي أن محانة العنصر 1 أكبر من محانة العنصر 2 . وحيث أن الفيض متردد فالجهد المستحدث في العنصر 1 أكبر من الجهد المستحدث في العنصر 2 أي :

$$L_1 (di/dt) > L_2(di/dt)$$

وهذا يعني أن المفاعلة الحثية ωL للعنصر 1 أكبر من مفاعلة العنصر 2. وحيث أن العنصرين موصلان على التوازي فالانخفاض في الجهد لكل وحدة طول هو نفسه للعنصرين . ولتحقيق ذلك فإن التيار في العنصر الخارجي يجب أن يكون أكبر من التيار في العنصر الداخلي ومعنى ذلك هو أن الفقد الأومي في العنصر الخارجي يكون أكبر من الفقد الأومي في العنصر الداخلي . ويمكن التعبير عن هذا الفقد الزائد عن طريق مقاومة ظاهرية قيمتها أكبر من المقاومة الفعلية .

ونتيجة لما سبق فمن الواضح أنه في حالة مرور تيار متردد في موصل ما فإن كثافة التيار لن تكون منتظمة عبر مقطع الموصل . وتبلغ كثافة هذا

$$R_{Cu} = 20/S \text{ ohm/km} \quad \text{للنحاس}$$

$$R_{Al} = 32/S \text{ ohm/km} \quad \text{للألومنيوم}$$

2.2.1 المقاومة في حالة التيار المتردد R_{ac}

تعطى المعادلة (1-1) القيمة الصحيحة لمقاومة الموصل فقط عندما يكون التيار ماراً فيه بتوزيع منتظم على مساحة المقطع . وهذا الشرط لا يتحقق إلا إذا كان التيار مستمراً . أما إذا كان التيار متردداً فإن قيمة المقاومة تكون أعلى من قيمتها للتيار المستمر بمقدار ΔR أي

$$R_{ac} = R_{dc} + \Delta R \quad (4 - 1)$$

والسبب في هذه الزيادة في قيمة المقاومة يرجع إلى ظهور فقد أومي إضافي في الموصل نفسه وفي باقي الأجزاء المعدنية - مثل الغلاف والحجاب والتسليح - ناشيء عن التأثيرات الحثية الناتجة عن التغير الزمني للفيض المغنطيسي الذي يولده التيار المتردد . وتعتمد مقدار الزيادة في المقاومة على عدة عوامل أهمها مقدار التردد وحجم الموصل ونوع الكبل ومكوناته ومدى تقارب الموصلات بعضها من بعض . وعامة تكون ΔR من الأجزاء الأتية :

(أ) الجزء الناجم عن التأثير السطحي skin effect

(ب) الجزء الناجم عن التأثير التقاربي proximity effect

(ج) الأجزاء الناجمة عن التيارات الحثية والتيارات الدوامية (eddy currents) في الغلاف والدرع (إن وجد) والتخلفية المغنطيسية (magnetic hysteresis) في الدرع .

التيار قيمتها الصغرى عند مركز الموصل وقيمتها العظمى عند سطح الموصل .

وتؤخذ في الاعتبار الزيادة في المقاومة الناتجة عن الظاهرة السطحية بواسطة ما يعرف بنسبة المقاومة (resistance ratio) وهي النسبة بين مقاومة التيار المتردد ومقاومة التيار المستمر (R_{ac}/R_{dc}) . وتزداد هذه النسبة كلما زاد التردد وكلما زاد قطر الموصل .

وعند ترددات القوى (50-60 Hz) يمكن إهمال تأثير الظاهرة السطحية على مقاومة الموصلات التي يقل مساحة مقطعها عن 100 مم² .

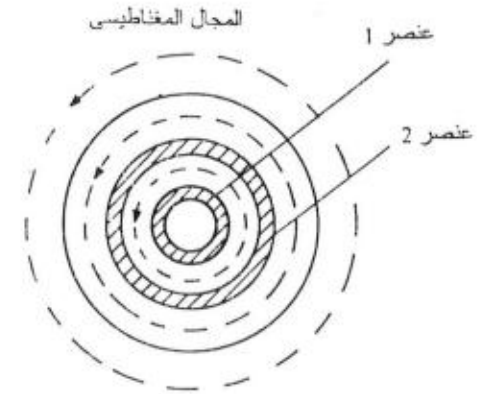
2.2.2.1 تأثير التقارب

يرجع ظهور تأثير التقارب إلى نفس السبب الذي يؤدي إلى ظهور التأثير السطحي ، وهو التوزيع الغير منتظم للتيار على مقطع أى موصل نتيجة الفيض المغنطيسي المتردد الناتج عن التيارات التي تمر في الموصلات المجاورة له .

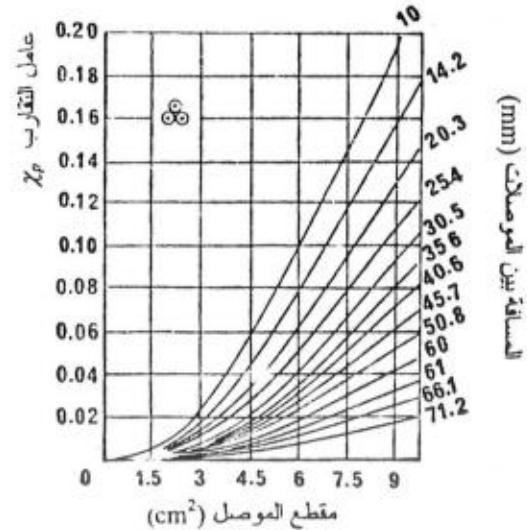
ويتوقف مدى هذا التأثير عند أى تردد على نسبة المسافة ما بين الموصلات وبعضها إلى أبعاد الموصلات . فكلما صغرت هذه النسبة زاد التأثير بينما يتناقص سريعاً مع إزدياد هذه النسبة .

يتضح مما سبق أن كل من الظاهرتين السطحية والتقريبية ينتج عنها زيادة فعلية في مقاومة الموصل نفسه . ويمكن التعبير عن هذه الزيادة كالتالى :

$$\begin{aligned} R_{ac} &= R_{dc} + \Delta R_s + \Delta R_p \\ &= R_{dc} [1 + (\Delta R_s/R_{dc}) + (\Delta R_p/R_{dc})] \\ (5-1) \quad &= R_{dc}(1 + \chi_s + \chi_p) \end{aligned}$$



(a)



(b)

شكل 2.1 (a) التأثير السطحي (b) تأثير المسافة بين الموصلات على عامل التقارب

1 الخصائص الكهربائية للكبلات

حيث

$$\chi_s = \text{عامل زيادة المقاومة لتأثير الظاهرة السطحية}$$

$$\chi_p = \text{عامل زيادة المقاومة لتأثير التقارب}$$

ويعطى الجدول 1 - 3 قيمة العامل χ_s لعدة موصلات ذات مقطع دائري صلب كما يعطى الشكل 1. 2b العلاقة بين مقطع الموصل والعامل χ_p لموصلات ثلاثية الشكل (trefoil formation) ومن الواضح أنه كلما قلت المسافة بين الموصلات (أى قل سمك العزل) كلما زادت قيمة χ_p .

جدول 1 - 3 عامل زيادة المقاومة للظاهرة السطحية (χ_s) عند تردد 50 Hz لموصلات دائرية صلبة

| مقطع الموصل (mm ²) | 120 | 150 | 300 | 400 | 500 | 800 | 1000 | 1300 | 2000 |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|------|
| النسبة R_s/R_a | 0.004 | 0.005 | 0.023 | 0.038 | 0.059 | 0.148 | 0.24 | 0.328 | 0.53 |

وجدير بالذكر أنه يمكن إهمال الفقد الناتج عن التيارات الدوامية فى الأغلفة المعدنية للكبلات الثلاثية القلب المحزومة (belted) أو المحجبة (screened) حيث أن محصلة المجال المغنطيسى للتيارات الثلاثية الطور المارة فى موصلات هذه الكبلات أقل بكثير من المجال عند مرور نفس التيار الطورى فى كبل أحادى القلب .

وإذا كان الدرع من الصلب فقد تصل قيمة الفقد فيه إلى % 20 من الفقد الكلى بالنسبة للكبلات الثلاثية القلب وإلى قيمة أعلى من الفقد فى الموصل نفسه بالنسبة للكبلات الأحادية القلب . ولذلك فلا يجوز استخدام درع من الصلب فى هذه الكبلات . وإذا كانت ظروف مد الكبل تستوجب وجود درع فيجب أن يكون الدرع من الألومنيوم أو أى معدن لامغنطيسى آخر بالنسبة للكبلات الأحادية القلب - وقد يكون من الصاب المجلفن فى حالة الكبلات الثلاثية القلب .

وتؤخذ فى الاعتبار أنواع الفقد الأومى سواء فى الغلاف أو فى الدرع بواسطة زيادة ظاهرية فى مقاومة الموصل للتيار المتردد لتصبح المقاومة الفعالة للموصل (effective resistance) :

$$\begin{aligned} R_w &= R_{ac} + \Delta R_{sheath} + \Delta R_{armour} \\ &= R_{ac}[1 + (\Delta R_s/R_{ac}) + (\Delta R_a/R_{ac})] \\ &= R_{ac} (1 + \lambda_s + \lambda_a) \end{aligned} \quad (6-1)$$

حيث

$$\lambda_s = \text{عامل الفقد فى الغلاف}$$

$$\lambda_a = \text{عامل الفقد فى الدرع}$$

3.2.2.1 التيارات الحثية والتيارات الدوامية والتخلفية المغنطيسية

تتولد فى الغلاف المعدني للكبل تيارات حثية والتيارات الدوامية نتيجة للفيض المغنطيسى المتغير الناتج عن مرور التيار المتردد فى موصل أو موصلات الكبل نفسه أو فى موصلات الكبلات المجاورة له . وتتسبب هذه التيارات فى ظهور فقد أومى فى الغلاف . وبما أن الفقد الأومى الذى ينتج عن التيار الحثى المار فى الغلاف قد يمتد جزءاً كبيراً من الفقد الكلى فى الكبل فسوف نتولى موضوع تأثير الغلاف المعدني بشيء من التفصيل فى الفقرة التالية .

وإذا كان الكبل له درع وقائي مصنوع من معدن مغنطيسى (مثل الصلب) ، فبالإضافة إلى الفقد الناتج عن التيارات الدوامية فى الدرع ، يوجد فقد آخر ناتج عن التخلفية المغنطيسية (magnetic hysteresis) .

وبالتعويض عن R_{ac} من المعادلة (1 - 5) نجد أن :

$$(7-1) \quad R_w = R_{dc}(1 + \chi_s + \chi_p)(1 + \lambda_s + \lambda_a) \\ = R_{dc} + \Delta R$$

حيث ΔR هي المقاومة الإضافية التي يجب أن تضاف إلى مقاومة الموصل للتيار المستمر للحصول على مقاومة الموصل للتيار المتردد عند الأخذ في الاعتبار جميع المقفودات الأومية في الكبل ككل . وبالتعويض عن قيمة R_{dc} من المعادلة (1 - 3) تصبح المعادلة (1 - 7) :

$$(8-1) \quad R_w = R_{20}[1 + \alpha_{20}(\theta_m - 20^\circ\text{C})] + \Delta R$$

حيث θ_m هي أقصى درجة حرارة تشغيل مسموح بها بالنسبة لنوع الكبل . ويعطى الجدول 1 - 4 نموذجاً من جداول خصائص إحدى أصناف الكبلات الأحادية القلب من إنتاج شركة سيمنز (Siemens) مبينا فيه قيم R_w و ΔR ويلاحظ أن هذه القيم تعتمد على مساحة المقطع وعلى ترتيب الكبلات في النظام الثلاثي الطور (العمود الثاني من الجدول) .

3.1 تأثير الغلاف (أو الحجاب) المعدني لكبل أحادي القلب

1.3.1 التقارن المغنطيسي بين الغلاف والموصل الداخلي

يبين الشكل 1 . 3a المجال المغنطيسي حول موصل أنبوبي يحمل تياراً I_s له كثافة منتظمة حول محيط الأنبوبة . ويلاحظ أنه لا يوجد مجال

جدول 1 - 4 مقاومات كبلات XLPE أحادية القلب

| Number of cores and cross-sectional area mm ² | Arrangement in three-phase system | DC resistance at 20 °C R_{20} Ω/km | Extra resistance ΔR | Effective resistance at maximum temperature R_w | Extra resistance ΔR | Effective resistance at maximum temperature R_w | Extra resistance ΔR | Effective resistance at maximum temperature R_w |
|---|-----------------------------------|---|-----------------------------|---|-----------------------------|---|-----------------------------|---|
| | | | Ω/km × 10 ⁻³ | Ω/km | Ω/km × 10 ⁻³ | Ω/km | Ω/km × 10 ⁻³ | Ω/km |
| | | | 6 10 kV | | | 12 20 kV | | 18 30 kV |
| 1 × 25 mm | | 0.708 | 3.4 | 0.9062 | — | — | — | — |
| | | 1.180 | 19.3 | 0.9221 | — | — | — | — |
| 1 × 35 mm | | 0.514 | 3.3 | 1.516 | — | — | — | — |
| | | 0.854 | 19.2 | 1.532 | — | — | — | — |
| 1 × 50 mm | | 0.379 | 3.4 | 0.6588 | 3.2 | 0.6586 | — | — |
| | | 0.628 | 18.5 | 0.6739 | 16.4 | 0.6718 | — | — |
| 1 × 70 mm | | 0.262 | 3.3 | 1.104 | 3.1 | 1.104 | — | — |
| | | 0.435 | 18.5 | 1.119 | 16.4 | 1.117 | — | — |
| 1 × 95 mm | | 0.189 | 3.4 | 0.4867 | 3.1 | 0.4864 | 2.9 | 0.4862 |
| | | 0.313 | 17.8 | 0.5011 | 15.9 | 0.4992 | 14.1 | 0.4974 |
| 1 × 120 mm | | 0.150 | 3.3 | 0.8085 | 3.0 | 0.8082 | 2.8 | 0.8080 |
| | | 0.248 | 17.7 | 0.8229 | 15.7 | 0.8209 | 14.0 | 0.8192 |
| 1 × 150 mm | | 0.122 | 3.4 | 0.3375 | 3.1 | 0.3372 | 2.9 | 0.3370 |
| | | 0.202 | 16.8 | 0.3509 | 15.1 | 0.3492 | 13.5 | 0.3476 |
| 1 × 185 mm | | 0.0972 | 3.3 | 0.561 | 3.0 | 0.5607 | 2.9 | 0.5606 |
| | | 0.161 | 16.8 | 0.5745 | 15.1 | 0.5728 | 13.5 | 0.5712 |
| 1 × 240 mm | | 0.0740 | 3.5 | 0.2445 | 3.3 | 0.2443 | 3.1 | 0.2441 |
| | | 0.122 | 16.2 | 0.2572 | 14.6 | 0.2556 | 13.2 | 0.2542 |
| 1 × 300 mm | | 0.0590 | 3.3 | 0.4046 | 3.0 | 0.4043 | 2.9 | 0.4042 |
| | | 0.0976 | 16.0 | 0.4173 | 14.5 | 0.4158 | 13.0 | 0.4143 |
| 1 × 400 mm | | 0.0461 | 3.6 | 0.1949 | 3.4 | 0.1947 | 3.2 | 0.1945 |
| | | 0.0763 | 15.6 | 0.2069 | 14.2 | 0.2055 | 12.8 | 0.2041 |
| 1 × 500 mm | | 0.0366 | 3.3 | 0.3213 | 3.1 | 0.3211 | 2.9 | 0.3209 |
| | | 0.0605 | 15.4 | 0.334 | 14.0 | 0.3320 | 12.7 | 0.3307 |
| | | | 5.3 | 0.1609 | 5.0 | 0.1606 | 4.7 | 0.1603 |
| | | | 22.9 | 0.1785 | 20.9 | 0.1765 | 19.1 | 0.1747 |
| | | | 4.9 | 0.2639 | 4.6 | 0.2636 | 4.4 | 0.2634 |
| | | | 22.6 | 0.2816 | 20.7 | 0.2797 | 18.9 | 0.2279 |
| | | | 5.6 | 0.1295 | 5.2 | 0.1291 | 5.0 | 0.1289 |
| | | | 22.1 | 0.1460 | 20.3 | 0.1442 | 18.6 | 0.1425 |
| | | | 5.0 | 0.2114 | 4.7 | 0.2111 | 4.6 | 0.2110 |
| | | | 21.8 | 0.2282 | 20.0 | 0.2264 | 18.4 | 0.2248 |
| | | | 6.0 | 0.1094 | 5.6 | 0.1090 | 5.3 | 0.0997 |
| | | | 21.1 | 0.1177 | 19.6 | 0.1140 | 18.1 | 0.1125 |
| | | | 5.3 | 0.1617 | 4.9 | 0.1613 | 4.7 | 0.1611 |
| | | | 20.8 | 0.1772 | 19.2 | 0.1756 | 17.8 | 0.1742 |
| | | | 6.5 | 0.0517 | 6.0 | 0.0512 | 5.8 | 0.0810 |
| | | | 20.4 | 0.0956 | 19.1 | 0.0943 | 17.8 | 0.0930 |
| | | | 5.4 | 0.1305 | 5.2 | 0.1303 | 5.0 | 0.1301 |
| | | | 20.1 | 0.1452 | 18.7 | 0.1438 | 17.3 | 0.1424 |
| | | | 8.7 | 0.0675 | 8.2 | 0.0670 | 7.8 | 0.0666 |
| | | | 26.4 | 0.0852 | 24.8 | 0.0836 | 23.2 | 0.0820 |
| | | | 7.1 | 0.1052 | 7.1 | 0.1049 | 6.8 | 0.1126 |
| | | | 25.5 | 0.1236 | 24.2 | 0.1220 | 22.7 | 0.1205 |
| | | | 9.6 | 0.0563 | 9.0 | 0.0557 | 8.5 | 0.0552 |
| | | | 25.7 | 0.0724 | 24.1 | 0.0708 | 22.8 | 0.0695 |
| | | | 8.0 | 0.0856 | 7.6 | 0.0852 | 7.3 | 0.0849 |
| | | | 24.9 | 0.1025 | 23.5 | 0.1011 | 22.1 | 0.0997 |

موصلات نحاس

موصلات ألومنيوم

حيث Φ هو الفيض المغنطيسي الذي يحيط بالغلاف والناشئ عن مرور التيار I_s فيه .

والمحانة التبادلية بين الغلاف والموصل الداخلي هي :

$$M = \Phi' / I_s$$

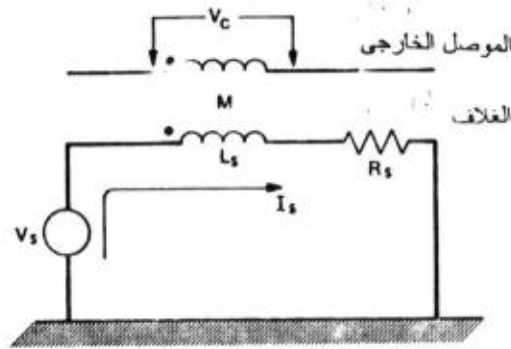
حيث Φ' هو الفيض المغنطيسي الذي يحيط بالموصل الداخلي عند مرور تيار I_s في الغلاف . ومن الواضح أنه في هذه الحالة $\Phi = \Phi'$ أى :

$$M = L_s$$

وبناء على قانون تبادل معامل المحانة التبادلية فالعكس صحيح أى أن المحانة التبادلية بين الموصل الداخلي والغلاف هي أيضاً L_s .

ويمكن إيجاد الجهد المستحث فى الموصل الداخلي نتيجة لمرور تيار I_s

في الغلاف الخارجى كالآتي (شكل 1 - 4) :



شكل 1 . 4

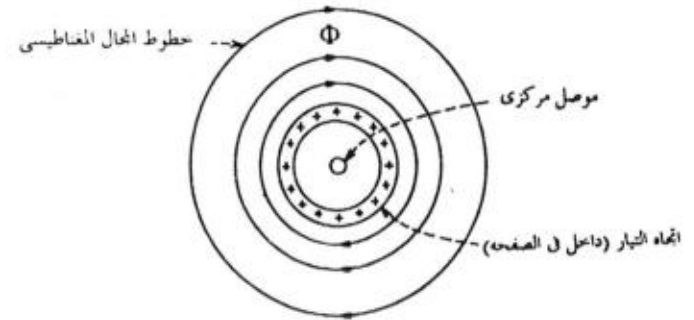
يكون الجهد المستحث في الغلاف عندما يمر تيار متردد I في الموصل هو :

$$V_s = j\omega M I \quad (9 - 1)$$

وإذا كان الغلاف مؤرضاً عند نهايته فإن قيمة التيار الذي يمر فيه هو :



(a)



(b)

شكل 1 . 3

كبل ذو موصلين متحدى المحور كما هو مبين في الشكل 1 . 3b فإن كل الفيض المغنطيسى Φ الناشئ عن التيار I_s يحيط بالموصل الداخلي .

والمحانة الذاتية للموصل الأنبوبى الذى يمثل غلاف الكبل ، هي :

$$L_s = \Phi / I_s$$

$$(14-1) \quad \Delta L = \frac{M}{(R_s / X_s)^2 + 1}$$

ويمكن إيجاد قيمة المحاثة التبادلية M بدقة كافية من المعادلة الآتية ،

$$(15-1) \quad M = 2l \left(-1 + \ln \frac{4l}{r_o + r_i} \right) \times 10^{-7} \text{ H}$$

حيث

l = طول الغلاف بالمنز

r_o = نصف القطر الخارجى للغلاف (م)

r_i = نصف القطر الداخلى للغلاف (م)

ويمر التيار I_s فى غلاف الكبل عندما يكون الغلاف مؤرضاً عند نهايته (solid bonding) مكوناً بذلك دائرة مغلقة .

وحتى يكون لدى القارئ فكرة عن حجم التيار الذى يمكن أن يمر فى الغلاف فلنأخذ كمثال كبل أحادى القلب له المواصفات الآتية :

نوع الكبل : XLPE - 66\33 ك ف

مساحة مقطع الموصل (نحاس) : 500 مم²

قطر الموصل : 25.5 مم

سمك العزل : 11 مم

سمك الغلاف : 2.1 مم

طول الكبل : 1000 متر

$$r_i = 13.25 + 11 = 24.25 \text{ mm}$$

$$r_o = 24.25 + 2.1 = 26.35 \text{ mm}$$

مساحة مقطع الغلاف

$$(10-1) \quad I_s = \frac{V_s}{R_s + j\omega L_s}$$

حيث R_s هي مقاومة الغلاف و $L_s = M$ هي المحاثة الذاتية للغلاف .
والجهد المستحث فى الموصل الداخلى نتيجة المحاثة التبادلية هو :

$$V_c = -j\omega M I_s$$

وتظهر علامة السالب حيث أن اتجاه التيار I_s هو عكس التيار I .
وبالتعويض عن I_s من المعادلة (10-1) نجد أن :

$$(11-1) \quad V_c = \frac{-j\omega M V_s}{R_s + j\omega L_s} = \frac{-j\omega M}{R_s + j\omega L_s} j\omega M$$

$$= \frac{j\omega M [(R_s / X_s) - j]}{(R_s / X_s)^2 + 1}$$

$$= I \left[\frac{R_s}{(R_s / X_s)^2 + 1} - \frac{j\omega M}{(R_s / X_s)^2 + 1} \right]$$

$$(12-1) \quad V_c = I (\Delta R - j\omega \Delta L)$$

ومعنى ذلك أن مرور التيار I_s فى الغلاف يؤدي إلى زيادة فى مقاومة الموصل قيمتها :

$$(13-1) \quad \Delta R = \frac{R_s}{(R_s / X_s)^2 + 1}$$

وإلى تقليل قيمة المحاثة الذاتية للموصل بمقدار

الإستقبال ، وعزل الطرف الآخر . وفى هذه الحالة يظهر الجهد المستحث بين الطرف المعزول للغلاف (أو الحجاب) والأرض . وفى النظام الثلاثى الطور فإن قيمة الجهد المستحث بين أى غلافين هي $\sqrt{3}$ قيمة الجهد المستحث فى الغلاف الواحد .

ومن ناحية الأمان يجب ألا تزيد قيمة الجهد المستحث الذى يظهر بين طرف الغلاف المؤرض وطرفه المعزول عن حوالى 25 فولت . وبما أن هذا الجهد يتناسب طردياً وطول الكبل (المعادلة 1 - 9) فالمسافة القصوى بين الطرف المؤرض والطرف المعزول تحدد على هذا الأساس . وإذا كان الكبل طويلاً فيجب أن يقسم إلى أطوال مناسبة باستخدام وصل خاصة لعزل الأغلفة بعضها عن بعض عند نقط التوصيل ويتم تأريض غلاف كل جزء من الكبل عند طرف واحد فقط .

وتأريض الغلاف عند طرف واحد له عدة مثالب :

- تكلفة تركيب عالية
- إذا كان الكبل مستخدم للربط بين محطتين فلا توجد هناك توصيلة أرضية بينهما الأمر الذى قد يتطلب إقامة نظم تأريض مناسبة عند المحطات مما يزيد من التكلفة .
- احتمال حدوث ارتفاع كبير فى الجهد المستحث الذى قد يظهر عند الطرف الغير مؤرض من الغلاف عند مرور تيارات القصر أو التيارات العابرة الناتجة عن تشغيل المفاتيح (switching operations) ، فى موصل الكبل .

2 - استخدام طريقة الترابط المستعرض للأغلفة (cross-bonding) وهى تستخدم فى الأنظمة الثلاثية الطور المكونة من ثلاثة كبلات أحادية الطور . ويتم تقسيم غلاف كل كبل إلى ثلاثة أجزاء متساوية لطول كما هو مبين فى

$$\pi (r_o^2 - r_i^2) = 334 \text{ mm}^2$$

من المعادلة (1 - 15) نجد أن :

$$M = 2000 \left(-1 + \ln \frac{4 \times 10^6}{50.60} \right) \times 10^{-7} \text{ H}$$

$$= 2 \text{ mH}$$

$$X_s = \omega M = 100 \pi \times 2 \times 10^{-3} = 0.628 \text{ ohm}$$

وإذا افترضنا أن الغلاف من الرصاص ، ففي هذه الحالة مقاومة الغلاف هي :

$$R_{s(lead)} = (0.214 \times 1000/334) = 0.64 \text{ ohm}$$

وإذا كان الغلاف من الألومنيوم

$$R_{s(Al)} = (0.0284 \times 1000/334) = 0.085 \text{ ohm}$$

ومن المعادلتين (1 - 9) و (1 - 10) نجد أن التيار فى الغلاف هو :

$$I_s = \frac{\omega MI}{\sqrt{R_s^2 + X_s^2}}$$

وإذا كان الغلاف من الرصاص ،

$$I_s = 0.7I$$

وإذا كان الغلاف من الألومنيوم ،

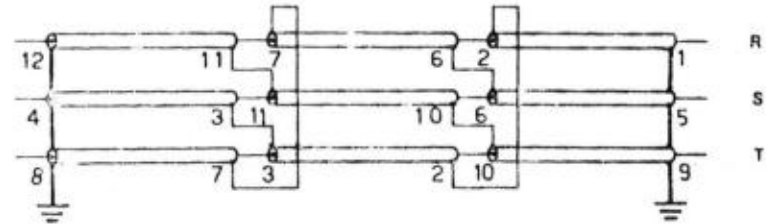
$$I_s \cong I$$

ويوضح هذا المثال أن التيار الذى يمر فى الغلاف تياراً كبيراً . ويؤدى هذا التيار إلى ظهور مفقودات أومية إضافية فى الكبل مما يقلل من سعته لحمل التيار (current carrying capacity) .

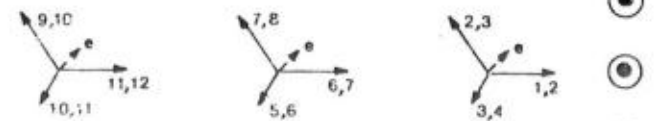
وهناك طريقتان لمنع مرور التيارات المستحثة فى أغلفة الكبلات :

1 - تأريض الغلاف (أو النهايات الموصلة به) عند طرف واحد فقط (single-point bonding) إما عند طرف الإرسال أو عند طرف

الشكل 1 . 5. ويوصل غلاف الجزء الأول من الكبل R إلى غلاف الجزء الثاني من الكبل S ثم يوصل غلاف S إلى غلاف الجزء الثالث من الكبل T ، وهكذا بالنسبة لأجزاء الأغلفة الأخرى ، أى أنه يتم تبديل وضع الأغلفة (transposition) مثلما يتم تبديل الموصلات في خطوط القوى الهوائية . وبما أنه لا يجوز توصيل الأغلفة بالأرض إلا عند نهايات الكبلات فقط ، لذلك يتم عزلها عن الأرض بواسطة طبقة لدائية عازلة



$$e_{1,4} = e_{1,2} + e_{2,3} + e_{3,4} = 0$$



$$e_{1,4} = e_{5,8} = e_{9,12} = e \neq 0$$

شكل 1 . 5. الترابط المستعرض للأغلفة

تشكل على الغلاف أثناء التصنيع . ويتم الترابط المستعرض عند صنابير التوصيل ويتبع عادة بتقسيم الكبلات إلى ثلاثة أجزاء متساوية الطول . إن الجهد الذي يظهر بين نهايات الأغلفة المؤرضة هو محصلة الجهود المستحثة في كل جزء من الأجزاء الثلاثة المتتالية . وفي حالة التشكل الثلاثي المتماثل (trefoil configuration) للكبلات فإن هذه الجهود تكون متساوية المقدار نتيجة التماثل . وبما أن زاوية الطور بين الجهود وبعضها هي 120 درجة فإن محصلة هذه الجهود تكون مساوية للصفر .

وفي كثير من الحالات تمد الكبلات بتشكيل منبسط (flat formation) ونتيجة لعدم التماثل في وضع الكبلات فإن محصلة الجهود المستحثة في الأغلفة ليست صفراً ولكن قيمتها صغيرة إلى حد يمكن إهمالها . ويمكن القول أن الترابط المستعرض هي وسيلة فعالة لتجنب الفقد في أغلفة الكبلات حتى إذا كان شكلها غير متماثل .

ويتضح مما سبق أنه إذا سمح بمرور تيار في الغلاف بتأريضه عند نهايته (solid bonding) فإن ذلك يؤخذ في الاعتبار بإنقاص سعة حمل التيار للكبل . ويبين الجدول (1 - 5) مثالاً نموذجياً لتأثير طريقة توصيل الغلاف على سعة حمل التيار لأحدى أصناف الكبلات من إنتاج شركة NKF الهولندية .

4.1 المحاطة

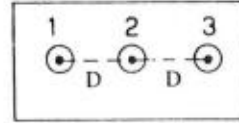
تعتمد محاطة موصلات الكبلات في النظم ثلاثية الطور على التشكل الهندسي لهذه الموصلات . وسنكتفي هنا بإعطاء المعادلات التي يمكن من خلالها حساب معامل فعال للمحاطة الذاتية (effective self inductance) لكل موصل من الموصلات الثلاثة على حسب شكلها . ويمكن للقارئ أن يجد تفاصيل اشتقاق هذه المعادلات في المرجع [2] .

تشكل الموصلات

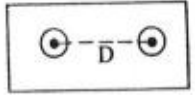
$$(23-1) \quad L_1 = 0.2 \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{2D}{r} \right) \text{ mH/km}$$

$$(24-1) \quad L_2 = 0.2 \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{D}{2r} \right)$$

$$(25-1) \quad L_3 = 0.2 \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{2D}{r} \right)$$



$$(16-1) \quad L = 0.2 \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{D}{r} \right) \text{ mH/km}$$



$$(26-1) \quad L_m = 0.2 \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{D \sqrt[3]{2}}{r} \right)$$

وبرغم أنه يمكن حساب المفاعلة الحثية (ωL) باستخدام المعادلات المبينة أعلاه إلا أن قيم هذه المفاعلة المدرجة في جداول خصائص الكبلات التي يصدرها مصنع الكبلات هي القيم التي يتم الحصول عليها بالقياس وذلك لأن مقطع الموصلات في كثير من الكبلات ليس دائرياً وأيضاً لأن القيمة الفعلية للمحاثة تعتمد على النظام المستخدم في تأريض الغلاف ونظام الترابط بين الأغلفة وبعضها (انظر الفقرة 1.3.1) وعلى ما إذا الكبل له درع أم لا .

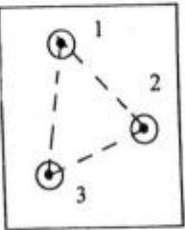
وبصفة عامة فإن قيمة المفاعلة الحثية للكبلات تقع في حدود 0.24 - 0.08 أوم/كم.

وبيين الجدول 1-6 نموذجاً لتأثير طريقة توصيل الغلاف على المفاعلة الحثية لأحدى أصناف الكبلات . ويلاحظ أن قيمة المفاعلة الحثية في الحالة التي تسمح بمرور تيار في الغلاف (solid bonding) هي أقل من قيمتها في حالة استخدام نظام لايسمح بمرور هذه التيارات (cross-bonding) - انظر المعادلة 1-14 .

$$(17-1) \quad L_1 = 0.2 \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{D_{12} D_{31}}{r D_{23}} \right) \text{ mH/km}$$

$$(18-1) \quad L_2 = 0.2 \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{D_{23} D_{12}}{r D_{31}} \right) \text{ mH/km}$$

$$(19-1) \quad L_3 = 0.2 \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{D_{31} D_{23}}{r D_{12}} \right) \text{ mH/km}$$



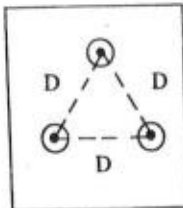
والقيمة المتوسطة للمحاثة هي:

$$(20-1) \quad L_m = 0.2 \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{D_m}{r} \right) \text{ mH/km}$$

حيث $D_m =$ متوسط البعد الهندسي المتبادل للبعد بين مركز الموصلات

$$(21-1) \quad D_m = \sqrt[3]{D_{12} D_{23} D_{31}}$$

$$(22-1) \quad L_1 = L_2 = L_3 = 0.2 \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{D}{r} \right) \text{ mH/km}$$



| area of conductor mm ² | cables direct in ground | | | | | | cables in underground ducts | | | cables in air | | |
|-----------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------|--|
| | solid-bonded sheath | | cross-bonded sheath | | solid-bonded sheath | | solid-bonded sheath | cross-bonded sheath | solid-bonded sheath | | cross-bonded sheath | |
| | cables spaced 0.15 m c/c | cables spaced 0.15 m c/c | cables spaced 0.45 m c/c | cables spaced 0.30 m c/c | cables spaced 0.30 m c/c | cables spaced 0.30 m c/c | cables touching | cables spaced 0.15 m c/c | cables spaced 0.15 m c/c | cables spaced 0.15 m c/c | | |
| 185 | 422 | 421 | 444 | 485 | 485 | 403 | 444 | 535 | 574 | 590 | | |
| 240 | 487 | 480 | 515 | 565 | 565 | 454 | 516 | 627 | 672 | 698 | | |
| 300 | 547 | 533 | 582 | 641 | 641 | 499 | 584 | 716 | 765 | 803 | | |
| 400 | 619 | 603 | 663 | 733 | 733 | 548 | 666 | 823 | 877 | 934 | | |
| 500 | 697 | 657 | 755 | 839 | 839 | 597 | 760 | 946 | 1003 | 1069 | | |
| 630 | 779 | 718 | 857 | 957 | 957 | 640 | 866 | 1080 | 1136 | 1202 | | |
| 800 | 861 | 779 | 958 | 1080 | 1080 | 682 | 974 | 1230 | 1276 | 1452 | | |

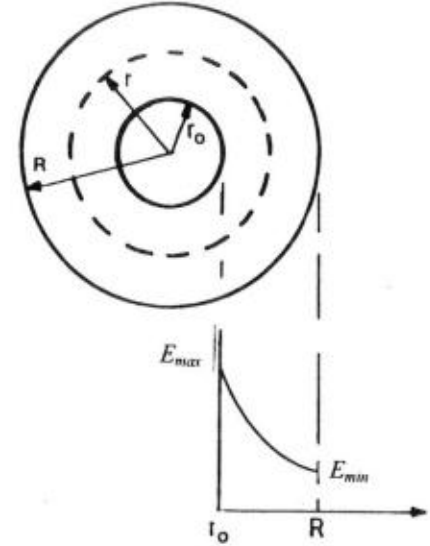
| STRANDED ALUMINIUM CONDUCTOR | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------|--|
| area of conductor mm ² | cables direct in ground | | | | | | cables in underground ducts | | | cables in air | | |
| | solid-bonded sheath | | cross-bonded sheath | | solid-bonded sheath | | solid-bonded sheath | cross-bonded sheath | solid-bonded sheath | | cross-bonded sheath | |
| | cables spaced 0.15 m c/c | cables spaced 0.15 m c/c | cables spaced 0.45 m c/c | cables spaced 0.30 m c/c | cables spaced 0.30 m c/c | cables spaced 0.30 m c/c | cables touching | cables spaced 0.15 m c/c | cables spaced 0.15 m c/c | cables spaced 0.15 m c/c | | |
| 185 | 330 | 345 | 394 | 377 | 493 | 407 | 448 | 550 | 594 | 632 | | |
| 240 | 381 | 400 | 453 | 439 | 567 | 454 | 516 | 638 | 688 | 716 | | |
| 300 | 430 | 453 | 519 | 483 | 655 | 505 | 594 | 745 | 803 | 847 | | |
| 400 | 490 | 519 | 602 | 572 | 798 | 555 | 679 | 856 | 917 | 982 | | |
| 500 | 558 | 594 | 703 | 658 | 932 | 599 | 771 | 979 | 1042 | 1137 | | |
| 630 | 631 | 679 | 803 | 756 | 1040 | 637 | 866 | 1105 | 1168 | 1301 | | |
| 800 | 709 | 768 | 919 | 860 | 1200 | 685 | 937 | 1197 | 1262 | 1424 | | |

| area of conductor mm ² | approx. reactance per phase at 50 Hz in ohm/km | | | | | | max. D.C. conductor resistance at 20°C ohm/km | approx. A.C. conductor resistance at 90°C ohm/km | approx. capacitance per phase μF/km |
|-----------------------------------|--|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------|---|--|-------------------------------------|
| | cross-bonding | | | solid-bonding | | | | | |
| | cables spaced 0.45 m c/c | cables spaced 0.30 m c/c | cables spaced 0.15 m c/c | cables spaced 0.30 m c/c | cables spaced 0.15 m c/c | cables touching | | | |
| 300 | 0.267 | 0.241 | 0.198 | 0.227 | 0.193 | 0.151 | 0.078 | 0.0601 | 0.114 |
| 400 | 0.259 | 0.234 | 0.190 | 0.219 | 0.185 | 0.143 | 0.062 | 0.0470 | 0.128 |
| 500 | 0.251 | 0.226 | 0.182 | 0.211 | 0.177 | 0.135 | 0.049 | 0.0366 | 0.142 |
| 630 | 0.244 | 0.218 | 0.175 | 0.203 | 0.169 | 0.129 | 0.030 | 0.0283 | 0.158 |
| 800 | 0.236 | 0.210 | 0.166 | 0.195 | 0.161 | 0.122 | 0.030 | 0.0220 | 0.178 |

| STRANDED ALUMINIUM CONDUCTOR | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------|--|
| area of conductor mm ² | cables direct in ground | | | | | | cables in underground ducts | | | cables in air | | |
| | solid-bonded sheath | | cross-bonded sheath | | solid-bonded sheath | | solid-bonded sheath | cross-bonded sheath | solid-bonded sheath | | cross-bonded sheath | |
| | cables spaced 0.15 m c/c | cables spaced 0.15 m c/c | cables spaced 0.45 m c/c | cables spaced 0.30 m c/c | cables spaced 0.30 m c/c | cables touching | cables spaced 0.15 m c/c | cables spaced 0.15 m c/c | cables spaced 0.15 m c/c | cables spaced 0.15 m c/c | | |
| 300 | 0.267 | 0.241 | 0.198 | 0.227 | 0.193 | 0.151 | 0.078 | 0.0601 | 0.114 | | | |
| 400 | 0.259 | 0.234 | 0.190 | 0.219 | 0.185 | 0.143 | 0.062 | 0.0470 | 0.128 | | | |
| 500 | 0.251 | 0.226 | 0.182 | 0.211 | 0.177 | 0.135 | 0.049 | 0.0366 | 0.142 | | | |
| 630 | 0.244 | 0.218 | 0.175 | 0.203 | 0.169 | 0.129 | 0.030 | 0.0283 | 0.158 | | | |
| 800 | 0.236 | 0.210 | 0.166 | 0.195 | 0.161 | 0.122 | 0.030 | 0.0220 | 0.178 | | | |

5.1 توزيع المجال الكهربى فى كبل ذى موصل واحد

يبين الشكل 6.1 توزيع المجال الكهربى فى كبل أحادى القلب. ويمكن كتابة معادلة شدة المجال الكهربى E على بعد r من مركز الموصل كما يلى :



شكل 6.1

حيث

U_0 : فرق الجهد بين الموصل والغلاف وعادة ما يكون الغلاف مؤرضاً ،
بالتالى يمثل هذا الجهد - جهد الطور بالنسبة للنظم الثلاثية الطور وهو
الجهد المقنن للكبل .

r_0 : نصف قطر الموصل

R : نصف القطر الداخلى لغلاف الكبل .

ومن المعادلة (1 - 27) يمكن استنتاج أن :

(1) أقصى قيمة لشدة المجال الكهربى تكون عند السطح الفاصل بين
الموصل والعزل (أو الطبقة الشبة موصلة) وقيمتها :

$$(28 - 1) \quad E_{\max} = \frac{U_0}{r_0 \ln \frac{R}{r_0}}$$

(ب) أدنى قيمة لشدة المجال الكهربى تكون عند $r = R$ وتساوى

$$(29 - 1) \quad E_{\min} = \frac{U_0}{R \ln \frac{R}{r_0}}$$

من المعادلة (1 - 28) يمكن حساب سمك العزل t_i وهو:

$$(30 - 1) \quad t_i = R - r_0 = r_0 \left[\exp \frac{U_0}{r_0 E_{\max}} - 1 \right]$$

والمعادلات (1 - 27) إلى (1 - 30) مستنتجه بإفتراض أن سمك العزل
متجانس وأن الموصل أملس . ومن الوجهة العملية ونظراً لأن الموصل
عادة ما يكون مجدولاً ، فإن قيمة E_{\max} الفعلية قد تكون أكبر بكثير من
القيمة التى يمكن حسابها من المعادلة (1 - 28) ويتم معالجة تلك الزيادة ،
الغير مرغوب فيها ، فى قيمة E_{\max} إما باستخدام موصل مدمج أو بوضع

(27 - 1)

$$E = \frac{U_0}{r \ln \frac{R}{r_0}} \text{ kV/mm}$$

$$(31-1) \quad C = \frac{2\pi \epsilon_0 \epsilon_r}{\ln(R/r_0)} \text{ F/m}$$

$$(32-1) \quad C = \frac{5.5\epsilon_r}{\ln(R/r_0)} \mu\text{F/km}$$

حيث

$$\epsilon_0 = \text{مجاوزية الفراغ} (8.83 \times 10^{-12} \text{ F/m})$$

$$\epsilon_r = \text{المجاوزية النسبية لمادة العزل}$$

$$r_0 = \text{نصف قطر الموصل}$$

$$R = \text{نصف القطر الداخلى للغلاف}$$

2.1.6.1 سعة الكبلات الحزمية

من الصعب حساب السعة للكبلات الحزمية ، حيث أن اتجاه المجال الكهربى في هذه الكبلات ليس نصف قطري ، ويتم تعيين سعة الكبلات في هذه الحالة عن طريق القياس . ويبين الشكل 1.7a السعات الجزئية لكبل حزمي ثلاثي القلب حيث تمثل المكثفات C_c السعة بين الموصلات وبعضها والمكثفات C_n السعة بين كل موصل والغلاف المعدني . وبتحويل التوصيل المتثنى (delta) للمفاعلات السعوية ($1/\omega C$) الى توصيل نجمي (star) مكافئ نجد أن (شكل 1.7b,c) :

$$\frac{1}{\omega C_c'} = \frac{1}{3\omega C_c}$$

$$C_c' = 3C_c$$

و علي ذلك تصبح السعة الكلية بين أي من الموصلات والغلاف المؤرض هي

$$(33-1) \quad C = 3C_c + C_n$$

وتعرف C بسعة التشغيل (operating capacity) .

حجاب حول الموصل . ونجد أنه في معظم كبلات الجهد العالى يتم استخدام طبقات من الشرائط المعدنية المحملة بالكربون لهذا الغرض . ويمكن استخدام المعادلات (1-27) إلى (1-30) فى جميع حالات الكبلات الثلاثية القلب ذات الموصلات المستديرة المحجبة .

أما فى حالة الكبلات الحزمية فإنه من الصعب حساب شدة المجال الكهربى تحليليا ، ويمكن الحصول عليها إما باستخدام معادلات تجريبية أو عن طريق القياسات العملية .

6.1 خصائص عوازل الكبلات

1.6.1 سعة الكبلات

1.1.6.1 سعة الكبلات ذات المجال القطرى

تشمل كبلات القوى ذات المجال القطرى (radial-field cables) ، الكبلات ذات القلب المنفرد (single core cables) والكبلات الثلاثية القلب (باستثناء الكبلات المحزومة) والكبلات ذات العزل البلمرى . وعموماً فإن الكبلات يمكن اعتبارها - من الوجهة الكهربائية - كمكثفات حيث أنها أساساً عبارة عن مادة عازلة بين موصلين (الموصل - الغلاف الخارجى أو الاحجبة الخارجية) .

وفى حالة منظومات التيار المتغير فإن التيار اللازم لشحن هذا المكثف والذي ينساب باستمرار بين الموصل والدرع الخارجى يتسبب فيما يسمى بالفولت- أمبير الغير فاعل (reactive volt-ampere-VAR) .

وفى حالة الكابل ذى القلب المنفرد أو الموصل الواحد (شكل 1.6) فإن السعة C بين الموصل والغلاف الخارجى أو الحجاب الخارجى هي :

$$C_c = (3C_a - C_b)/6$$

$$C_n = C_b/3$$

وبالتعويض عن هذه القيم في المعادلة (1 - 33) نجد أن السعة الكلية للكبل هي:

$$C = (9C_a - C_b)/6$$

وجدير بالذكر أنه يمكن إيجاد قيمة تقريبية لسعة الكبلات الحزمية من المعادلة الآتية:

$$(36 - 1) \quad C = \frac{0.111\epsilon_r}{\ln \frac{a^2(3R^2 - a^2)^3}{r_0^2(27R^6 - a^6)}} \mu F/km$$

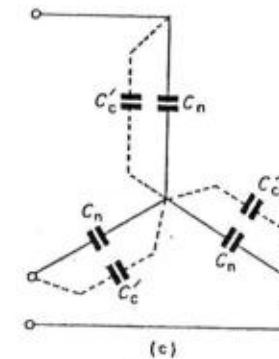
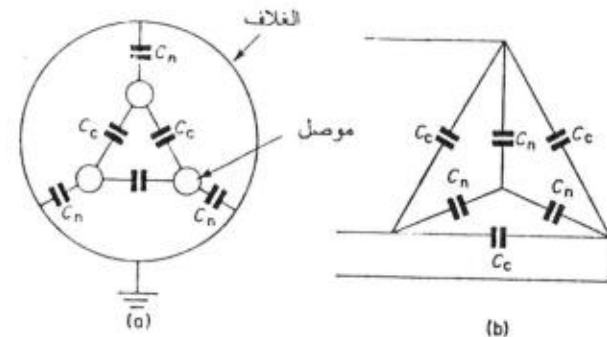
حيث

$$r_0 = \text{نصف قطر الموصل (mm)}$$

$$R = \text{نصف القطر الداخلي للغلاف أو الحجاب (mm)}$$

$$a = \text{المسافة بين الموصلات (mm)}$$

وتبين الأشكال 8.1 و 9.1 و 10.1 العلاقة بين مساحة مقطع الموصل والمفاعلة الحثية X وكذلك يبين مساحة مقطع الموصل وسعة التشغيل C لبعض أنواع الكبلات من إنتاج شركة سيمنز ويمكن دائماً الحصول على هذه القيم من جداول خصائص الكبلات التي يصدرها المصنع. وقد اكتسبت سعة كبلات الجهد العالي والفائق أهمية اقتصادية كبيرة نظراً لإعتماد كل من تيار الشحن I_c والقدرة الغير فعالة (MVAR) والفقء في العزل عليها اعتماداً مباشراً كما تلعب هذه السعة دوراً هاماً في تحديد مسافة نقل الطاقة باستخدام الكبلات وكلما قلت قيمة السعة كلما كان ذلك أفضل من وجهة نظر العوامل السابق ذكرها .



شكل 7.1 السعات الجزئية لكبل حزمي ثلاثي القلب

ويتم تحديد قيمة كل من C_c و C_n عن طريق القياس كالآتي:

(أ) يوصل أي إثنين من الموصلات الثلاثة بغلاف الكبل وتُقاس السعة

C_a بين الموصل الثالثة والغلاف:

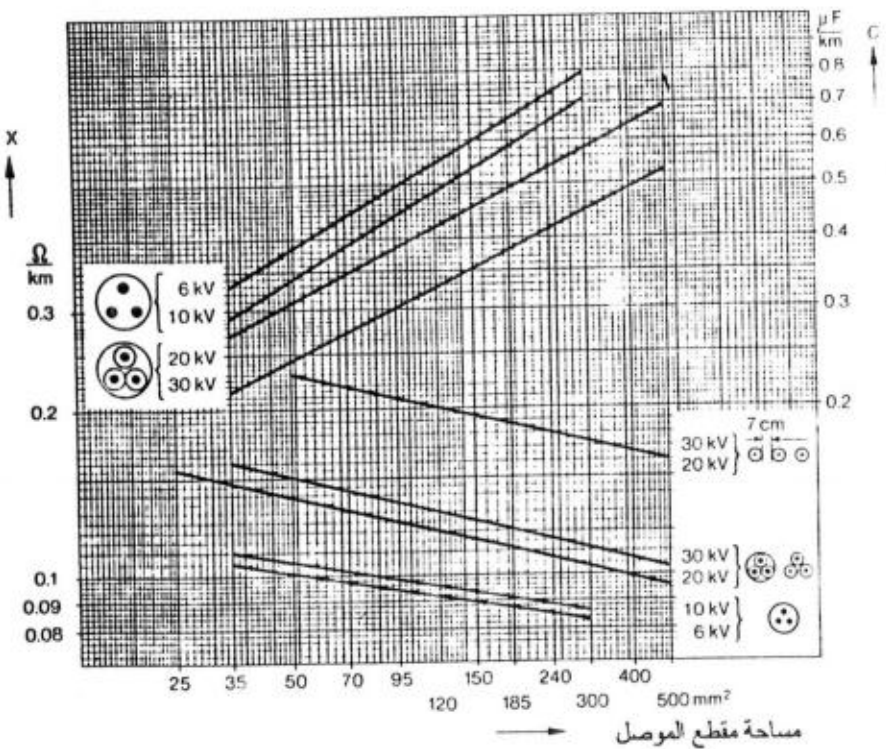
$$(34 - 1) \quad C_a = C_n + 2C_c$$

(ب) توصل الموصلات الثلاثة ببعضها وتُقاس السعة C_b بينها وبين

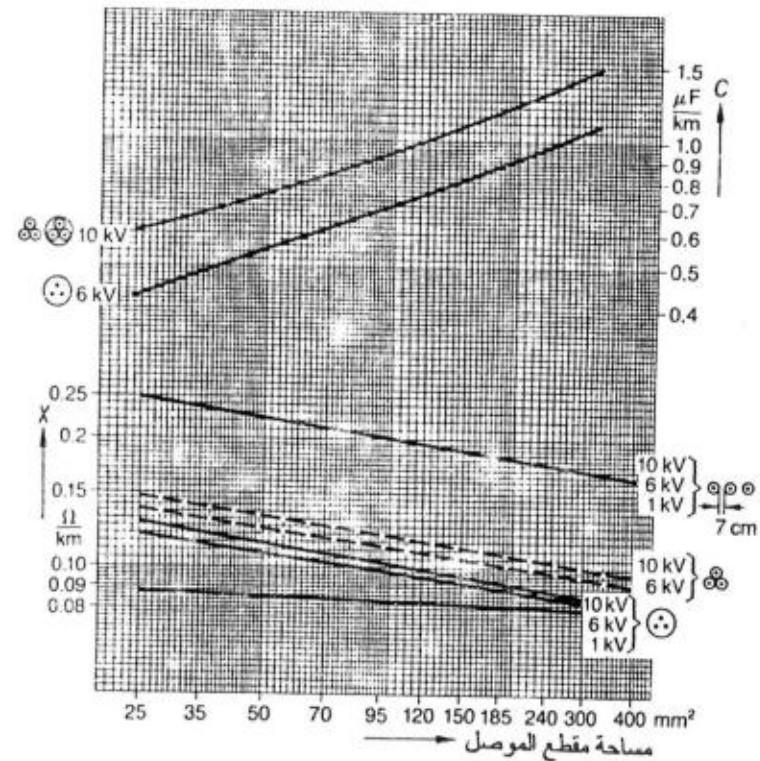
الغلاف:

$$(35 - 1) \quad C_b = 3C_n$$

ومن المعادلتين (1 - 34) و (1 - 35) نجد أن:



شكل 9.1 المعادلة الحثية X وسعة التشغيل C لكبلات الورق المشبع التي لها غلاف من الرصاص



شكل 8.1 المعادلة الحثية X وسعة التشغيل C لكبلات الـ PVC

3.1.6.1 تيار الشحن

ويمكن حساب تيار الشحن I_c من المعادلة الآتية:

$$(37-1) \quad I_c = U_o \omega C \quad \text{A/m}$$

حيث U_o هو جهد الموصل بالنسبة لغلاف الكبل وهو عادة ما يمثل جهد الطور في النظام الثلاثي الطور.

وتعتبر الكبلات مصدرا لتوليد القدرة الغير فعالة كنتيجة لارتفاع قيمة السعة المتوازية (shunt capacitance) مقارنة بسعة بالموصلات الهوائية. ويمكن الحصول على قيمة هذه القدرة الغير فعالة لمنظومة كبلات ثلاثية الطور من المعادلة الآتية:

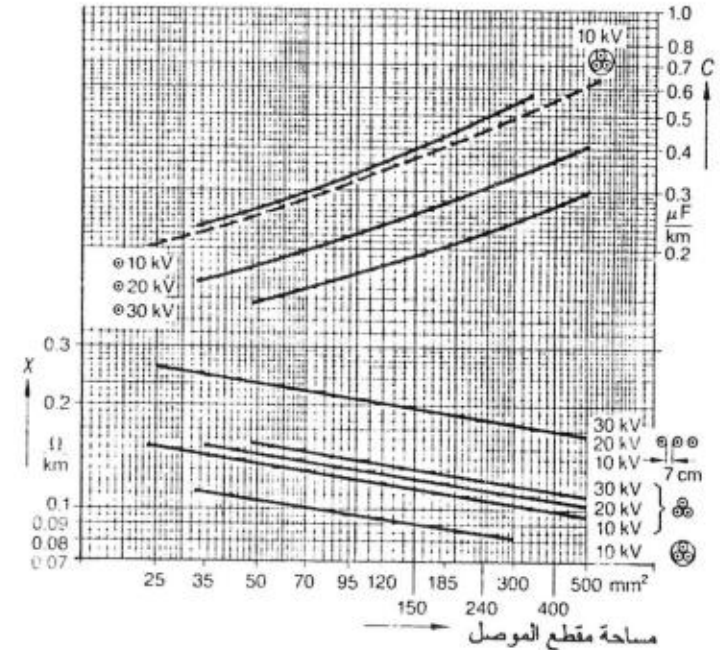
$$(38-1) \quad \text{MVAR} = 12\pi^2 U_o^2 \frac{\epsilon_o \epsilon_r}{\ln(R/r_o)}$$

ويتضح من هذه المعادلة مدى اعتماد القدرة الغير فعالة على قيمة ϵ_r وكذلك على مربع الجهد U_o^2 . وجدير بالذكر ان سريان القدرة الغير فعالة يؤثر على مستوى الجهد في الدائرة.

ويبين الجدول 1 - 7 بعض قيم للقدرة الغير فعالة في بعض منظومات الكبلات. ونظرا لما تمثله هذه القدرة الغير فعالة من مشاكل خصوصا اذا وصلت الى قيم كبيرة، فانه تم معالجة ذلك بتكريب مفاعلات على التوازي حتى يمكن معادلة هذه القدرة الغير فعالة التي تولدها الكبلات ويؤدي ذلك الى ارتفاع تكلفة منظومات الكبلات.

جدول 1 - 7 القدرة الغير فعالة لبعض منظومات الكبلات

| القدرة الغير فعالة المولدة (MVAR/km) | جهد المنظومة (kV) |
|--------------------------------------|-------------------|
| 0.125 | 33 |
| 1.9 - 1.25 | 132 |
| 7.5 - 6.25 | 275 |



كبل ثلاثي القلب من طراز H
كبل أحادي القلب C

شكل 1. 10 المفاعلة الحثية X وسعة التشغيل C لكبلات ال PE و XLPE

4.1.6.1 الطول الحرج للكبل

عندما يصل طول الكبل الي قيمة معينة فان قيمة تيار الشحن المار في الكبل تكون مساوية لقيمة التيار المقنن الذي يمكن أن يحمله الكبل ويسمى هذا الطول بالطول الحرج للكبل (critical length). ويمكن حساب الطول الحرج للكبل من المعادلة الآتية :

$$I_r = \omega U_0 C l_c$$

$$l_c = I_r / \omega U_0 C \quad (39 - 1)$$

حيث I_r هو التيار المقنن للكبل.

وتبين هذه المعادلة أن الطول الحرج يقل مع ازدياد سعة الكبل ومع زيادة الجهد أيضاً. ومعني ذلك أنه كلما قلت السعة كلما زاد هذا الطول وهذا أمر مرغوب فيه لأنه عند وصول الكبل إلى الطول الحرج يستهلك التيار المقنن تماماً في شحن سعة الكبل ويصبح الكبل في هذه الحالة عاجز عن نقل أي تيار للأحمال بدون ارتفاع كبير في درجة الحرارة - ويمكن القول بطريقة أخرى ان الكبل يصبح غير قادر علي نقل أي قدرة فعالة لمسافة أكبر من المسافة الحرجة . وتمثل المسافة الحرجة حداً لمسافة نقل القدرة . وكما سبق القول فانه يتم معالجة ذلك بتركيب مفاعلات على التوازي ، ويتم تركيب هذه المفاعلات علي ابعاد معينة من خط النقل ويبين الجدول 1 - 8 العلاقة بين الطول الحرج (مسافة وضع المفاعلات المتوازية) وجهد المنظومة لبعض منظومات الكبلات .

جدول 1 - 8 العلاقة بين الطول الحرج وجهد المنظومة

| الطول الحرج (km) | جهد المنظومة (kV) |
|------------------|-------------------|
| 64 | 132 |
| 40 | 200 |
| 24 | 400 |

2.6.1 الفقد في عزل الكبلات (dielectric losses)

يمكن تقسيم المواد العازلة الي نوعين أساسين : مواد غير قطبية (non-polar) ومواد قطبية (polar) والمواد الغير قطبية هي تلك المواد التي تتكون من جزيئات تتطابق فيها مركزي الشحنات الموجبة والسالبة . وعندما تتعرض هذه الجزيئات لمجال كهربى خارجي ،فان الشحنات الموجبة تنزحزح في اتجاه المجال وبالتالي تصبح الجزيئات مستقطبة أي ثنائية القطب ويعرف هذا النوع من الاستقطاب بالاستقطاب الحثي (induced polarization) . أما المواد القطبية فجزئياتها ثنائية القطب نتيجة لطبيعة الترابط الكيميائي بين ذراتها وفي حالة غياب أي مجال كهربى خارجى فان اتجاهات هذه الجزيئات الثنائية القطب تكون اتجاهات عشوائية؛ وعند تعرض هذه الجزيئات لمجال كهربى خارجى فانه تتولد نتيجة لهذا المجال عزوم دورانية على الجزيئات تؤدي إلى صفها في اتجاه المجال لتصبح المادة في هذه الحالة مستقطبة؛ ويعرف هذا النوع من الاستقطاب بالاستقطاب الاتجاهى (orientational polarization). وتختلف درجة الاستقطاب من مادة إلى أخرى حسب تركيبها الجزيئى ويعتبر البولى إيثيلين (PE) مثالا للمادة العازلة الغير قطبية؛ كما يعتبر كلوريد البوليفينيل (PVC) مثالا للمادة العازلة القطبية.

وتؤدي خاصية الاستقطاب إلى زيادة سعة المكثفات بمقدار يعرف بانماجزة النسبية (relative permittivity) وهي تمثل النسبة بين سعة المكثف في حالة وجود المادة العازلة وسعته في حالة وجود فراغ :

$$\epsilon_r = C/C_0$$

وعندما تعرض أي مادة عازلة لمجال كهربى متردد فبالإضافة إلى

الفقد الأومى الناتج عن المقاومة الأومية للمادة (فقد التوصيل) ينشأ فقد آخر نتيجة لتغير اتجاه الاستقطاب الحثي مع التغير في اتجاه المجال وكذلك

وتعرف الزاوية δ بزاوية الفقد في العزل (dielectric loss angle) وظل هذه الزاوية δ $\tan \delta$ هو عامل الفقد في العزل (loss factor) . والفقد في المكثف هو:

$$P_l = VI_a = VI \sin \delta = V^2 \omega C \tan \delta \quad \text{W/m} \quad (42 - 1)$$

$$\tan \delta = \frac{I_a}{I_r} = \frac{V/R}{\omega CV} = \frac{1}{\omega CR} \quad (43 - 1)$$

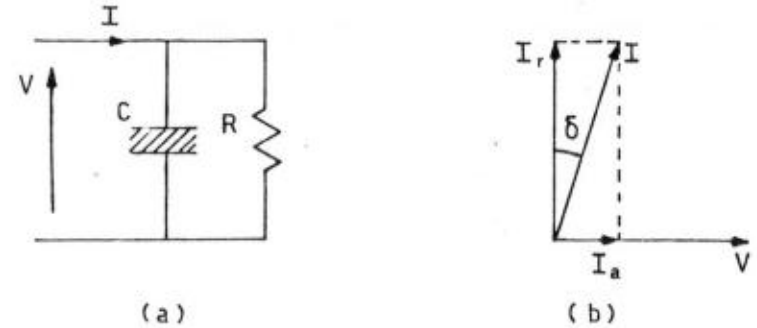
وبالتعويض عن قيمة C من المعادلة (1 - 31) في المعادلة (1 - 42) نجد أن الفقد في العزل بالنسبة للكبلات هو :

$$P_l = \frac{\omega U_0^2}{18 \ln(R/r_0)} \epsilon_r \tan \delta \times 10^{-9} \quad \text{W/m} \quad (44 - 1)$$

وهذه معادلة هامة، حيث تظهر العوامل التي تؤثر في العزل وهي التردد المستخدم، مربع الجهد، أبعاد الكبل، وحاصل ضرب المجاوزية النسبية وعامل الفقد $\epsilon_r \tan \delta$. وجدير بالذكر أن المجاوزية النسبية للمواد المستخدمة في الكبلات لا تتأثر كثيرا بارتفاع درجة الحرارة في المدى الحراري الذي تستخدم فيه الكبلات - على عكس معامل الفقد فهو معامل حساس لارتفاع درجة الحرارة.

ويعطى الجدول 1 - 9 مقارنة بين المواد العازلة المستخدمة في صناعة الكبلات وقيم كل من المجاوزية النسبية ومعامل الفقد لكل نوع من هذه المواد. ويبين هذا الجدول بوضوح أن الفقد في العزل في حالة البولي إيثيلين أقل بكثير جدا من الفقد في العزل في الكبلات المعزولة بمادة كلوريد البوليفينيل نظرا للفرق الكبير في حاصل الضرب $\epsilon_r \tan \delta$ وبالتالي فإن هذه المادة لا تستخدم عادة في صناعة كبلات الجهد العالي والفائق على عكس مادة البولي إيثيلين . كذلك تبرز أهمية استخدام الكبلات ذات العوازل الغازية في الجهود العالية والفائقة وذلك رغم ارتفاع تكلفة هذه

نتيجة للاحتكاك الناتج عن حركة الجزيئات القطبية أثناء دورانها لمتابعة هذا التغير. والفقد الاحتكاكي هو الفقد السائد عند ترددات القوى؛ ويزداد هذا الفقد كلما ازدادت قطبية المادة أي كلما زادت مجاوزيتها النسبية ويسمى هذا الفقد فقد الاستقطاب . وبالتالي فإن الفقد في العزل يأخذ في الاعتبار الفقد الناتج عن التوصيل والفقد الناتج عن الاستقطاب . وعادة فأنه عند دراسة العوازل تحت تأثير التيار المتغير فإن العازل يمكن تمثيله بجزيئين: جزء خال تماما من الفقد موضوع بين موصلين مكثف وجزء يمثل الفقد ويتم تمثيله بمقاومة إما على التوالي أو على التوازي مع المكثف كما هو مبين بالشكل 11.1 . وفي هذه الحالة فإن التيار الكلي I المار في الوسط



شكل 11.1 تمثيل الفقد في العزل

العازل يتكون من جزئين: تيار الفقد I_a وهو متطاور مع الجهد وتيار غير فعال I_r وهو متقدم على الجهد بـ 90° :

$$I_a = I \sin \delta \quad (40 - 1)$$

$$I_r = I \cos \delta = \omega CV \quad (41 - 1)$$

جدول 1 - 9 المجاوزية النسبية ϵ_r وعامل الفقد $\tan \delta$ للمواد العازلة المختلفة المستخدمة في صناعة الكبلات

| نوع العزل | المجاوزية النسبية ϵ_r | عامل الفقد $\tan \delta$ |
|------------------------------|--------------------------------|--------------------------|
| ورق مشبع | 4 - 3.5 | 10×10^{-3} |
| مطاط البيوتاييل Butyl rubber | 4.5 | 50×10^{-3} |
| كلوريد البوليفينيل PVC | 8 - 5 | 100×10^{-3} |
| * EPR | 3.3 | 6×10^{-3} |
| * XLPE | 2.4 | 0.55×10^{-3} |
| PE | 2.5 - 2.3 | 0.4×10^{-3} |
| ورق + زيت oil filled cables | 3.6 - 3.3 | 4×10^{-3} |
| غاز | 1 | ≈ 0 |

* قد تختلف هذه القيم بعض الشيء لاعتمادها على نوع وكمية مادة الحشو (filler) المضافة

الكبلات . فعلى سبيل المثال بالنسبة للكبلات المعزولة بغاز سداس فلوريد الكبريت (SF_6) ، فإن المجاوزية النسبية لهذا الغاز تساوى تقريباً الواحد صحيح بينما يبلغ معامل الفقد تقريباً صفر، وبالتالي فإن الفقد في العزل في هذه الكبلات يعتبر منعدماً . وإلى جانب حاصل الضرب $\epsilon_r \tan \delta$ يلعب الجهد المقنن U_0 للكبل دوراً هاماً في اختيار نوع العزل لكبل معين في منظومة بذاتها حيث تبين المعادلة (1 - 44) اعتماد الفقد على مربع قيمة هذا الجهد .

ويمكن التوصل إلي اختيار نوع معين من العزل للاستخدام تحت جهد معين بحيث لا تؤدي الحرارة الناتجة عن الفقد في العزل إلى زيادة ملموسة في ارتفاع درجة حرارة الكبل وذلك باستخدام مواد لها عامل فقد مركب ($\epsilon_r \tan \delta$) منخفض في صناعة كبلات ذات جهد تشغيل مرتفع وباستخدام المواد التي لها عامل فقد مركب كبير في صناعة كبلات ذات جهد تشغيل منخفض . وعلى سبيل المثال يمكن إهمال الحرارة الناتجة عن الفقد في

العزل بالنسبة للكبلات الآتية وتحت جهود التشغيل المحددة لكل نوع من العوازل:

- كبلات البولي إيثيلين لجهود تشغيل حتى 110 kV

- كبلات الورق المشرب لجهود تشغيل حتى 60 kV

- كبلات كلوريد البوليفينيل لجهود تشغيل حتى 10 kV

وبلاحظ في هذه الأمثلة المذكورة أعلاه أن زيادة الجهد المستخدم لعزل معين بالنسبة لعزل آخر مرتبطة بانخفاض مقابل في عامل الفقد المركب $\epsilon_r \tan \delta$.

3.6.1 مقاومة عزل الكبل (insulation resistance)

مقاومة عزل الكبل هي المقاومة لمرور التيار في الاتجاه القطري بين الموصل والغلاف أي في الاتجاه العمودي على تدفق التيار المار في موصل الكبل .

وتعتمد مقاومة عزل الكبل على عدة عوامل هي:

(أ) الأبعاد الهندسية للكبل وهي مساحة مقطع الموصل وسُمك العزل وطول الكبل .

(ب) نوع وتكوين العزل .

(ج) مدى احتواء العزل على أي رطوبة أو بخار ماء .

(د) درجة الحرارة .

ويمكن الحصول على قيمة مقاومة العزل للكبلات من المعادلة الآتية:

$$R_{ms} = \frac{\rho}{2\pi l} \ln(R/r_0) \quad \text{ohm} \quad (45 - 1)$$

حيث

$$\rho = \text{مقاومة مادة العزل (ohm.m)}$$

العوامل مثل الخواص الطبيعية للعزل والظروف المحيطة بالعزل ونوع الجهد المستخدم والتعرض للمجال الكهربى ومدى انتظام هذا المجال داخل العزل؛ وأيضاً طبيعة وكثافة تواجد الجيوب الغازية والشوائب ذلك إلى جانب التغيرات الكيميائية التي قد تحدث في مادة العزل.

وتقارن مئانة العزل بمتوسط قيم جهود الإنهيار والتي يتم الحصول عليها من نتائج اختبار عدة عينات مستقلة من الكبل الجارى بتقييمه . ويعتمد مدى تشتت قيم جهود الانهيار - لعزل معين - على مدى تجانس العزل حيث يدل وجود تشتت كبير في جهود الانهيار إلى وجود نقط ضعف بالعزل وعدم تجانسه. وبالنسبة لعزل الكبلات - ونتيجة لطول الكبل - فأنه عادة ما يكون مطلوباً تحديد القيم الصغرى لمئانة العزل.

يعرف الإجهاد الكهربى للتيار المتغير للتشغيل (a.c. working stress) بأنه القيمة القصوى للإجهاد الكهربى عند سطح الموصل عند تعريض الكبل لأقصى جهد تشغيل له. وتتحدد قيم اجهادات التشغيل للتيار المتغير بناء على متطلبات اختبار الجهد الدفعى. ويعتبر التوصل إلى تحديد قيمة أمنة لمجال تشغيل العزل أثناء تصميم الكبل عملية صعبة نتيجة لاعتماد مئانة العزل على عوامل متعددة كما ذكرنا سابقاً. ومن المفضل استخدام اكبر قيمة ممكنة لإجهاد تشغيل العزل وذلك لتقليل من القطر الكلى للكبل . وعلى الرغم من ذلك فإن القيم العملية لإجهادات تشغيل العزل في الكبلات دائماً ما يتم اختيارها لتكون اقل كثيراً من قيم مئانة العزل وذلك لضمان الأداء الأمان للعزل. ومثال ذلك فأنه عند استخدام جهد متردد 50 هرتز في كبل ذى عزل ورقى مشرب فإن العزل ينهار عندما يصل الإجهاد الكهربى عند سطح الموصل إلى 40 ميغافولت/متر؛ وعلى الرغم من ذلك فإن الإجهاد المستخدم في تصميم هذا النوع من الكبلات يصل إلى 4 ميغافولت/متر فقط وذلك نظراً لعدم التجانس الكامل لهذا النوع من العزل

l = طول الكبل (m)

R = نصف القطر الخارجى للكبل

r_0 = نصف قطر الموصل

وعلى خلاف مقاومة الموصل فإن مقاومة العزل تتناسب عكسياً بـ طول الكبل كما أن مقاومة المادة العازلة تتناسب عكسياً أيضاً و درجة الحرارة أى أن مقاومة المادة العازلة تقل بارتفاع درجة الحرارة. وعادة فإن قيمة مقاومة عزل الكبل لا تؤخذ كمعيار يقاس به عول أداء الكبل إلا في حالة تسرب مياه أو رطوبة إلى العزل - حيث يؤدي ذلك إلى انخفاض كبير في مقاومة العزل مما يشير إلى سوء حالته في هذه الظروف.

4.6.1 إنهيار عزل الكبلات

إذا زادت شدة المجال الكهربى المؤثر على العزل عن حد معين فإن العزل يشقّب ويقال أن العزل قد أنهار كهربياً . تسمى شدة المجال الذى يحدث عنده هذا الإنهيار بالمئانة الكهربائية للعزل (dielectric strength or electric breakdown strength) . وتقاس مئانة العزل بالـ ميغافولت/متر (MV/m) أو كـ ف/مـم (kV/mm) . ويرجع إنهيار عوازل الكبلات إلى أسباب مختلفة قد تكون كهربية أو حرارية أو ميكانيكية؛ هذا إلى جانب سبب هام أيضاً لانهايار العوازل الصلبة ألا وهو الإنهيار الناتج عن التأين (ionization breakdown) والذى قد يحدث نتيجة لتأين الغازات الموجودة في الجيوب التي قد تتواجد في العوازل الصلبة.

وتتأثر آلية انهيار العزل في حالة استخدام شرائط الورق المشرب لظهور ما يسمى شحنات الزحف (creep charges) على طول هذه الشرائط . وعموماً فإن مئانة عزل أى مادة عازلة تعتمد على العديد من

يحدد على أساسها سمك العزل. وبالتعويض عن قيمة U_0 في المعادلة (1 - 30) بقيمة V_{BIL} نجد أن سمك العزل في الكبل لا يجب أن يقل عن t_i حيث

$$(1 - 46) \quad t_i = r_0 \left[\exp \left(\frac{V_{BIL}}{r_0 E_{max}} \right) - 1 \right]$$

وقد تم وضع مواصفات قياسية لاختبار الكبلات باستخدام الجهود الدفعية (impulse testing) ويتم على أساسها التأكد من الأداء السليم لهذه الكبلات.

وقد شملت أبحاث الكبلات في خلال الخمسين سنة الأخيرة ضمن ما شملت محاولة زيادة المتانة الكهربائية الدفعية لعوازل الكبلات وذلك للسماح باستخدام جهد تشغيل تيار متغير U_0 أعلى لنفس السمك أو الاقتصاد في سمك العزل لنفس الجهد .

7.1 الجهد المقنن للكبلات

نوصى ال IEC باستخدام المصطلحات الآتية لتعريف الجهود المقننة لكبلات القوى (IEC 183) :

U_0 = القيمة المقننة للجهد (جذر متوسط المربعات -ج. و.ر) بين الموصل والغلاف أو الحجاب (جهد الطور) .

U = القيمة المقننة للجهد (ج.و.ر.) بين الموصلات وبعضها (جهد الخط)
($U = \sqrt{3} U_0$)

U_n = القيمة القصوى المسموح بها للجهد (ج.و.ر.) بين الموصلات تحت ظروف التشغيل العادية.

U_p = القيمة الزنوية لجهد الصمود الدفعي (peak impulse withstand voltage) بين الموصل والغلاف (IEC 71-1) .

حيث يتكون من رقائق عازلة (laminated insulation) . وقد أدى اختراع الكبلات المضغوطة مثل الكبلات المملوءة بالزيت (oil-filled cables) إلى زيادة قيمة إجهاد التصميم في هذا النوع من الكبلات إلى 10 ميجافولت/متر و 12 ميجافولت/متر و 15 ميجافولت/متر للكبلات 66 ك.ف و 132 ك.ف و 400 ك.ف على الترتيب. ويضاف إلى هذه الأمثلة إجهاد تصميم كبلات البولي إيثيلين حيث يقع ما بين 6 و 8 ميجافولت/المتر على الرغم أن المتانة الكهربائية للبولي إيثيلين في الزمن القصير تبلغ 800 ميجافولت/متر .

وجدير بالذكر أيضاً أن جهد تصميم منظومات الكبلات المضغوطة بالغاز أقل من مثيلة المستخدم في منظومات الكبلات المملوءة بالزيت.

5.6.1 المتانة الكهربائية الدفعية لعزل الكبلات (impulse strength)

قد تتعرض دوائر الكبلات الكهربائية أثناء عملها لجهود عارمة أو اندفاعية (surge voltage) نتيجة للصواعق أو لعمليات تشغيل المفاتيح. وتتميز هذه الجهود العارمة بأنها جهود عابرة تدوم لفترة زمنية قصيرة وتبلغ أضعاف قيمة الجهود المقننة للكبلات . وقد أثبتت خبرات التطوير والاختبارات خلال سنوات طويلة أن المتانة الدفعية للكبلات المضغوطة للجهد العالي والفائق تتناسب والقيمة القصوى لشدة المجال الكهربائي عند سطح الموصل . وباستثناء بعض الحالات فإن تصميم جميع الكبلات يقوم على هذا الأساس وبالتالي فإن سمك العزل - لجهد مقنن معين - يتحدد على أساس مستوى العزل الأساسي للمنظومة التي يستخدم فيها الكبل وهي القيمة القصوى للجهد العارم لهذه المنظومة. وتقوم المواصفات القياسية بتحديد هذه القيمة التي تعرف بالمستوى الأساسي للعزل (basic insulation level - V_{BIL}) وهي إحدى العوامل الأساسية التي

يعتمد اختيار الجهد المقنن المناسب لأي كبل على جهد المنظومة وكذا على نوع التأسيس المستخدم لنقط التعادل في المنظومة (neutral point earthing) وعلى تصميم النظام الوقائي في المنظومة. وبناء على هذه الاعتبارات يتم تصنيف المنظومات إلى ثلاث فئات:

منظومات من الفئة A: وهي المنظومات التي إذا حدث بها خطأ للأرض يتم فصلها فوراً (أى خلال ثانية واحدة) وفي هذه المنظومات يمكن استخدام جميع أنواع الكبلات .

منظومات من الفئة B: وهي المنظومات التي إذا حدث بها خطأ للأرض لا يتم فصلها فوراً ولكنها تستمر في العمل لفترة محددة. ولا يجوز أن تزيد هذه الفترة عن 8 ساعات متواصلة أو أن يزيد مجموع الساعات عن 125 ساعة خلال عام واحد . وهذه المنظومات هي تلك التي تكون فيها نقطة التعادل معزولة ويمكن استخدام جميع أنواع الكبلات في هذه المنظومات حتى جهد 18/30 ك.ف. أما إذا زاد الجهد المقنن عن ذلك فيجب مراجعة مصنعي الكبلات لاختيار السمك المناسب للعزل.

منظومات من الفئة C: وهي المنظومات التي لا تخضع لظروف منظومات أى من الفئتين A أو B وفي هذه المنظومات وبالنسبة لجميع أنواع الكبلات حتى جهد 12/20 ك.ف يجب إختيار جهدها المقنن بحيث تكون قيمته أعلى درجة من الجهد المقنن للمنظومة أى إذا كان هذا الأخير 6/10 ك.ف مثلاً فيجب استخدام كبلات جهدها المقنن 12/20 ك.ف. أما إذا زاد الجهد المقنن للمنظومة عن 12/20 ك.ف فيجب في هذه الحالات مراجعة مصنعي الكبلات لإختيار الكبل المناسب لفئة المنظومة.

ويعطى الجدول 1 - 10 قيم هذه الجهود طبقاً لمواصفات ال IEC.

جدول 1 - 10 الجهود المقننة للكبلات طبقاً للمواصفات IEC 71-1 و IEC 183

| الجهد المقنن U/U_0 (kV) | القيمة القصوى للجهد U_m (kV) | جهد الصمود الدفعي U_p (kV) |
|------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
|------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|

كبلات ذات مجال نصف قطري

| | | |
|---|---------|---------|
| - | 1.2 | 1/0.6 |
| 40 | 3.6 | 3/1.8 |
| 60 | 7.2 | 6/3.6 |
| 75 | 12 | 10/6 |
| 95 | 17.5 | 15/8.7 |
| 125 | 24 | 20/12 |
| 170 | 36 | 30/18 |
| لهذه الجهود المقننة يتم اختيار سمك العزل بناء على المعادلة (46-1) | 52 | 45/26 |
| | 72.5 | 60/36 |
| | 123 | 110/64 |
| | 145 | 132/76 |
| | 170 | 150/87 |
| | 245 | 220/127 |
| | 420 | 380/220 |
| | 525 | 500/290 |
| 765 | 700/430 | |

كبلات محزومة ثلاثية القلب (مجال لا نصف قطري)

| | | |
|----|-----|--------|
| - | 1.2 | 1/0.6 |
| 40 | 3.6 | 3/1.8 |
| 60 | 7.2 | 6/3.6 |
| 75 | 12 | 10/6 |
| 75 | 12 | 10/8.7 |

ويبين الجدول 2 - 1 تقسيم المعادن حسب الموصلية الكهربائية بالنسبة للنحاس ، ويتضح من هذا الجدول أن موصلية الصوديوم تأتي مباشرة بعد

جدول 2 - 1 تقسيم المعادن حسب الموصلية الكهربائية

| المعدن | الموصلية الكهربائية (النحاس = 100) |
|-----------|---------------------------------------|
| فضة | 106.3 |
| نحاس | 100 |
| ذهب | 73.8 |
| الألمنيوم | 61.7 |
| صوديوم | 35.4 |
| زنك | 29.0 |
| حديد | 17.2 |
| قصدير | 15.0 |
| رصاص | 7.9 |

الباب الثاني

المواد المستخدمة في صناعة الكبلات

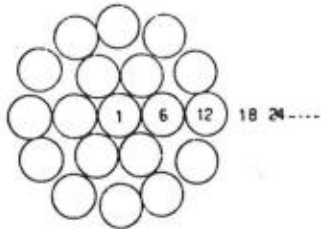
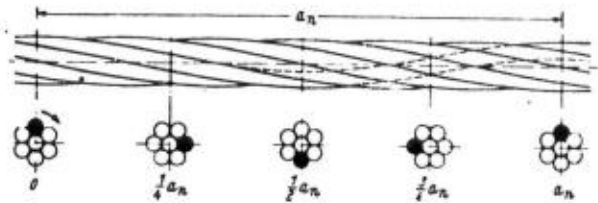
1.2 المواد المستخدمة في صناعة الموصلات

يعتبر النحاس هو المادة التقليدية التي شاع استخدامها في موصلات الكبلات ، ولابد للنحاس المستخدم في صناعة موصلات الكبلات أن يكون على درجة عالية جداً من النقاء ولذلك فإنه يتم تحسين درجة نقائه بالمعالجة الالكتروليتيّة حتى تصبح نسبة النحاس فيه 99.9 %.

ونظراً للارتفاع الكبير في ثمن النحاس ، خصوصاً في الخمسين سنة الأخيرة ، فقد شاع استخدام الألمنيوم ، بدلاً من النحاس ، كموصل في كبلات القدرة . ومن عيوب الألمنيوم الأساسية ، والتي عرقلت استخدامه بدلاً من النحاس في البداية ، هي صعوبة لحام الألمنيوم . ولقد تم التغلب على هذه الصعوبة مما أدى إلى استخدام الألمنيوم على نطاق واسع في كبلات القدرة وبالتالي إلى انخفاض كبير في تكلفة صناعة هذه الكبلات .

ويصنف الألمنيوم كرابع معدن بعد الفضة والنحاس والذهب بالنسبة للموصلية الكهربائية ، حيث تبلغ موصليته ثلثي موصلية النحاس ، ولكن كثافة الألمنيوم تبلغ % 30 فقط من كثافة النحاس . وبالتالي فإن موصل مصنوع من الألمنيوم العالي النقاء يمكنه حمل ضعف القدرة التي يحملها موصل من النحاس له نفس الوزن .

الألمنيوم . وقد سبق التفكير في استخدام هذا المعدن الخفيف في صناعة موصلات الكبلات ، نظراً لعدة مميزات منها انخفاض كثافته ، وسهولة الحصول عليه نقياً وانخفاض ثمنه بالمقارنة بالنحاس أو الألمنيوم ، وقد ثبت أن كبلات الصوديوم المصنوعة من البولي إيثيلين كعازل لها مميزات عديدة بالمقارنة بمثيلاتها التي تستخدم النحاس أو الألمنيوم سواء من ناحية التصنيع أو من ناحية المتانة الكهربائية للكبل ، حيث أن المتانة الكهربائية للبولي إيثيلين ذي الموصل المصنوع من الصوديوم تزيد عن المتانة الكهربائية لمثيله ذي الموصل المصنوع من النحاس أو الألمنيوم بحوالي % 25 . والسبب في ذلك هو سهولة التحام معدن الصوديوم بالبولي إيثيلين وتكون سطح أملس تماماً بين الموصل والعازل وبالتالي تلافى العديد من العوامل التي تؤدي إلى انخفاض المتانة الكهربائية في الكبلات ذات



شكل 2. 1 موصل مجدول

المتعاقبة . وتغيير اتجاه البرم بين طبقة وأخرى يزيد من متانة الموصل عادة يتم تجميع (compaction) الموصلات بعد تجديدها . ويبين الشكل 2. 2 المقاطع المختلفة للموصلات المستخدمة في صناعة الكبلات.

تستخدم الموصلات ذات المقطع الدائري في الكبلات الأحادية والثلاثية القلب ، والموصلات ذات المقطع المشكل (shaped conductors) فقط في الكبلات المتعددة القلب حتى جهد 30 ك.ف . وتستخدم موصلات الألمونيوم ذات المقطع المشكل الصلب في الكبلات المعزولة بالمواد نيوليمرية أو بالورق المشرب لمقاطع من 50 حتى 185 مم².

وموصلات الكبلات الأحادية القلب المملوءة بالزيت والمستخدم لنقل كمية كبيرة من الطاقة والتي لها مقطع 1000 مم² أو أكثر تكون إما موصلات مجوفة (hollow conductors) أو موصلات من نوع ميلين

الموصلات المصنوعة من الألمونيوم أو النحاس . وإلى جانب ذلك فإن كبلات الصوديوم تتميز عن مثيلاتها الأخيرة بالمرونة وخفة الوزن مما يؤدي إلى توفير كبير في تكلفة إنتاجها ، رغم الأخذ في الاعتبار أن موصل الصوديوم سيكون أكبر من مثيله من النحاس الذي يحمل نفس التيار بحوالي 45% .

ومن مميزات الكبلات ذات موصلات الصوديوم أيضاً ، هو الأداء المتزن لها تحت ظروف قصر الدائرة ، فدرجة حرارة انصهار الصوديوم تبلغ 97.8 درجة مئوية ، كما أن للصوديوم حرارة نوعية وحرارة كامنة عالية لذلك فإن موصل الصوديوم يحتاج إلى وقت طويل حتى ينصهر تماماً.

ومن الطبيعي أن تكون كبلات الصوديوم ضعيفة من الناحية الميكانيكية ، إلى جانب أنه معدن نشط للتفاعل مع كل من الأوكسجين والماء ولكن عزله بالبولي إيثيلين يجعل تداوله آمن نسبياً ، ولقد أثبتت التجارب إمكانية استخدام كبلات ذات موصلات من الصوديوم حتى جهد 15/ك.ف ، على أن انتشار استخدام الصوديوم كموصل للكبلات لا يزال محل اختبارات واعتبارات عملية كثيرة .

إن غالبية الموصلات سواء من النحاس أو الألمونيوم المستخدمة في الكبلات هي موصلات مجدولة (stranded conductors) . والغرض الأساسي من الجدل هو إعطاء الكبل المرونة الكافية للتمكن من لف أطوال كبيرة على البكرات لتسهيل تخزينها ونقلها ومدها . والموصلات المجدولة الأكثر استخداماً في كبلات الجهد العالي هي الموصلات ذات الجدل المتحد المركز (concentrically stranded conductors) كما هو مبين في الشكل 1a.2 . تبرم 6 أسلاك حول السلك المحوري والطبقة التالية تحتوي على 12 سلك مبرومة في عكس اتجاه الطبقة السفلية وهكذا للطبقات

(milliken conductors). ويتكون الموصل من نوع ميليكن من ست أجزاء مستقلة معزولة بعضها عن بعض ويتكون كل جزء من عدة أسلاك مجدولة ومشكلة على شكل قطاع (sector shaped) وموضوعة حلزونياً حول شريط حلزوني من الصلب يكون مجرى يمر فيها الزيت . وهذا التصميم للموصل يقلل الفقد الناتج عن الظاهرة السطحية حيث أن كل سلك من أسلاك أى من الأجزاء الست يبدل موقعه دورياً على طول الكبل من داخل الموصل إلى خارجه وذلك بفضل التجديل والتدميج .
وتستخدم الموصلات البيضية في كبلات الغاز المضغوط وفي الكبلات الثلاثية القلب المملوءة بالزيت حتى 30 ك.ف

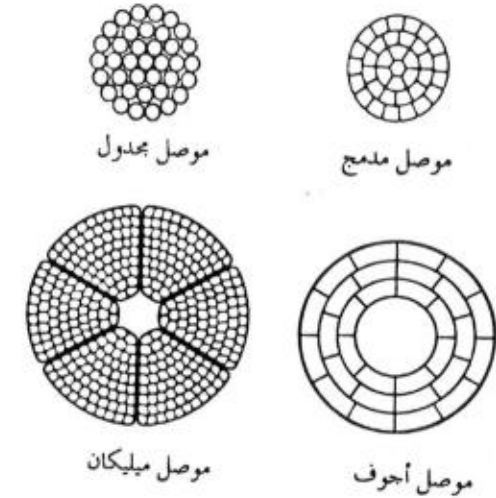
2.2 المواد المستخدمة في صناعة عوازل الكبلات

1.2.2 الخواص الواجب توافرها في عوازل الكبلات

يمكن تلخيص الخواص الواجب توافرها في عوازل الكبلات كما يلي :

- أن تكون لها متانة عزل كبيرة high dielectric strength
- أن تتوفر لها مقاومة عزل عالية high insulation resistivity
- أن تكون مقاومتها الحرارية منخفضة
- أن تكون لها مجاوزية نسبية ϵ_r منخفضة ومعامل فقد $\tan \delta$ منخفض أيضاً.
- أن تكون هذه المواد غير قابلة لامتصاص الرطوبة (non-hygroscopic)

موصلات ذات مقطع دائري



موصل ميليكان

موصل أحرف

موصلات ذات مقطع مشكل



موصل صلب

موصل مدمج

موصل بيضى

شكل 2.2 بعض المقاطع المختلفة للموصلات

استخدامها . وعند الحديث عن الورق المستخدم في صناعة الكبلات يؤخذ في الاعتبار العوامل الآتية :

أولاً : سمك الورق المستخدم ويتراوح هذا السمك بين 0.075 . و 0.200 مم .

ثانياً : الكثافة والتي تتراوح بين 950 كجم / متر³ إلى 1250 كجم / متر³ ثالثاً : لا إنفاذية الهواء (air impermeability) وهي عكس المسامية (porosity). وبارتفاع قيمة اللانفاذية ، تزداد كثافة الورق كما تزداد صعوبة تجفيفه وتشريبه أيضاً بالزيوت والمركبات .

رابعاً : القوة الميكانيكية للشرائط الورقية والتي يجب أن تكون كافية لتلافي أي تمزقات أثناء نفيها أو أثناء نفي الكبل أو مده سواء في المصنع أو في الموقع . وتبلغ قوة شد الكبل في الاتجاه الطولي للألياف حوالي 77 ميغا نيوتن/المتر المربع وفي الاتجاه العمودي 35 ميغا نيوتن للمتر المربع .

وحيث أن الورق مادة ليفية قابلة لإمتصاص الرطوبة لذلك لابد من تجفيفه في الفراغ ثم تشريبه بالزيت العازل أو مادة مركبة مناسبة. وتؤدي عملية تشريب الورق إلى زيادة المتانة الكهربائية للورق العازل ، كما تؤدي أيضاً إلى خفض قيمة المجاوزية النسبية وبالتالي إلى تقليل الفقد في العزل في الكبلات التي يستخدم فيها هذا النوع من العزل . ويبين الجدول 2 - 2 تأثير التشريب على خصائص العوازل الورقية للكبلات.

جدول 2 - 2 تأثير تشريب العوازل الورقية على بعض خصائصها الكهربائية

| حالة العزل | المتانة الكهربائية MV/m | المجاوزية النسبية ϵ_r |
|------------|----------------------------|-----------------------------------|
| غير مشرب | 6 - 8 | 6 |
| مشرب | 50 | 3.3 - 4 |

ويفضل أن تكون المواد المستخدمة منخفضة التكاليف مع توافر الشروط المذكورة أعلاه كما أنه يجب ألا تكون لهذه المواد أية خصائص مضررة للبيئة ، وألا تكون قابلة لتلويث البيئة بأي صورة من الصور ، كما يجب أن تخضع لمعايير حماية البيئة سواء أثناء التصنيع أو الخدمة ، وبعد الخدمة أيضاً . وعلى سبيل المثال ، فهناك اتجاه نحو تصنيع كبلات كهربية خالية من الهالوجينات خلال القرن الواحد والعشرين .

2.2.2 أنواع المواد المستخدمة في صناعة الكبلات

يمكن تقسيم أنواع المواد المستخدمة في صناعة عوازل كبلات القوى الكهربائية إلى الأنواع الأساسية التالية :

- 1- العوازل الورقية المشربة impregnated paper
- ب- العوازل الاصطناعية synthetic dielectrics
- ج- الغازات المضغوطة compressed gases

3.2.2 العوازل الورقية المشربة وزيوت التشريب

كان الورق هو أكثر المواد العازلة استخداماً في عوازل الكبلات منذ بداية صنعها ، ويصنع الورق العازل من لب الخشب ويتم تعريضه لعدة عمليات لإزالة الأملاح القابلة للذوبان في الماء. وينتج عن ذلك تحسناً ظاهراً في الفقد عند درجات الحرارة العالية. وعادة ما يستخدم الورق العازل على هيئة شرائط ، حيث تلف هذه الشرائط طبقة تلو الأخرى بشكل حلزوني ، ويسمح استخدام الورق العازل لهذه الطريقة بإمكانية نفي أو سد الكبل بدون اتلاف الطبقات العازلة وبالتالي يمكن تصنيع ومد أطوال كبيرة من الكبلات دون اللجوء إلى استخدام أطوال قصيرة وبالتالي عدم الاكثار في استخدام الوصلات ، والتي تعتبر نقطة ضعف كبيرة في الكبلات عند

ويتم اشتقاق معظم الزيوت العازلة المستخدمة في تشريب عزل الكبلات حالياً من البترول ، وعادة ما يستخدم مركبات من هذه الزيوت ، فعلى سبيل المثال ، يتكون المركب المستخدم في تشريب عزل الكبلات المصممة (solid type) ، من مخلوط من زيت معدني ومادة راتنجية ويجب أن تتوفر في زيوت التشريب خصائص معينة كأن تكون خالية من الأحماض ، ومقاومة للأكسدة عند التعرض لمدة طويلة لارتفاع في درجة الحرارة مع وجودها إلى جوار معدن مثل النحاس والألمنيوم . ويجب أن تكون لزوجته المركب وتغيرها مع درجة الحرارة معروفة جيداً حيث أن اللزوجة يجب أن تكون منخفضة عند درجة حرارة التشريب حتى تسمح بتشريب جيد للورق العازل ثم انها أيضاً لايد وأن تكون عالية عند درجة حرارة التشغيل العادية حتى تقلل من تسرب المركب بعد تمديد الكبل . وكلما زادت نسبة احتواء المركب على المادة الراتنجية كلما زادت لزوجته عند أى درجة حرارة . وتعمل مواد التشريب بأنواعها المختلفة كمواد تشحيمية بحيث تسهل الحركة النسبية لسرائط العوازل الورقية عند ثنى الكبلات ، كما أنها تقلل بدرجة ملحوظة المقاومة الحرارية للعزل المشرب .

وتوجد تقنيات مختلفة لتشريب العوازل الورقية للكبلات وتختلف هذه التقنيات باختلاف نوع الكبل والجهد المستخدم . ويراعى في هذه التقنيات ضرورة تخلص الورق من الرطوبة قبل تشريبه ، ثم حماية العوازل المشربة من تسرب الرطوبة إليها باستخدام الأغلفة المعدنية (sheaths) . وقد استخدمت الكبلات ذات العوازل الورقية المشربة في مدى عريض من الجهود بداية من الجهود المتوسطة والعالية والفائقة وفي استخدامات التيار المتغير والمستمر ولها سجل جيد من الخدمة الطويلة .

4.2.2 العوازل الاصطناعية (synthetic insulating materials)

على الرغم من ما اثبتت الكبلات ذات العوازل الورقية المشربة من كفاءة ، على مر السنين ، فإن استخدام الكبلات ذات العوازل الاصطناعية بدأ يحل محل هذه الكبلات خلال الثلاثين عاماً الماضية سواء في كبلات الضغط المنخفض أو حتى في كبلات الجهد العالي والفائق ويرجع ذلك إلى عدة أسباب نذكر منها ما يلي :

- الاستغناء عن استخدام الغلاف المعدني المستخدم في الكبلات الورقية بغرض حماية العزل من تسرب الرطوبة ، ويعتبر هذا الغلاف أحد عيوب استخدام الكبلات ذات العوازل الورقية ، وذلك نظراً لتقل وزنه وارتفاع ثمنه .
- تبسيط عمليات توصيل الكبلات وعمل نهاياتها إلى جانب سهولة عمليات إصلاح الكبلات ذات العوازل الاصطناعية ، وبالتالي توفير في تكاليف صيانة الكبل .
- التخلص من المشاكل الناجمة عن تسرب الزيوت أو المركبات المستخدمة في تشريب العوازل الورقية إلى البيئة المحيطة بها خصوصاً عند نهايات الكبل . وجدير بالذكر أنه بالإضافة إلى التأثير السلبي لهذا التسرب على البيئة سواء كان الكبل موضوعاً تحت الأرض أو تحت الماء فإن تسرب زيوت التشريب له آثار سلبية أيضاً على كفاءة العزل ذاته .
- التخلص من المشاكل الناجمة عن استخدام الكبلات المضغوطة بالتالي توفير العديد من التكاليف التي يتطلبها وضع هذه الكبلات سواء تحت الأرض أو في الأنهار أو البحار
- يؤدي استخدام العوازل الاصطناعية إلى تقليل كبير في الفقد في العزل وكذلك في سعة الكبل نتيجة للفرق الواضح في قيمة المجاوزية النسبية

وعامل الفقد بين كل من العوازل الورقية والعوازل الاصطناعية خصوصاً مادة البولي إيثيلين بأنواعه (انظر جدول 1 - 9) .
يمكن تقسيم مواد العزل الاصطناعية أو البلمرية أو البلاستيكية إلى أربعة أنواع رئيسية كالأتي

- البولي إيثيلين polyethylene - PE

- البولي إيثيلين المشبك cross-linked polyethylene-XLPE

- مطاط الإيثيلين بولي بروبيلين ethylene polypropylene rubber - EPR

- كلوريد البولي فينيل polyvinyl chloride - PVC

وتتدرج هذه الاصناف الأربعة تحت ما يسمى بالبوليميرات وهي مواد تتكون أساساً من جزيئات ضخمة (giant molecules) أو (macromolecules) وهذه بالتالي مكونة من مجموعة كبيرة من الجزيئات المتكررة . وقبل التعرض لتركيب وخصائص كل نوع من هذه الأنواع لابد من الإشارة هنا إلى أن هذه البوليميرات يمكن أن تقسم إلى مجموعتين رئيسيتين بالنسبة لتأثير درجة الحرارة عليها وهو عامل مهم في اختيار المواد العازلة للكبلات وتصميمها وهاتين المجموعتين هما :

- العوازل المتلدنة بالحرارة thermoplastic dielectrics

- العوازل المتصلدة بالحرارة thermosetting dielectrics

1.4.2.2 العوازل المتلدنة بالحرارة

وهذه المواد يمكن أن تلين بالحرارة ثم تعود إلى حالتها الصلبة بالتبريد مرة ثلث الأخرى ، وينتمي كل من البولي إيثيلين وكلوريد البولي فينيل إلى هذه المجموعة . وهذه المواد تفقد صلابتها الميكانيكية عند درجة حرارة معينة (بين 70 درجة مئوية و 75 درجة مئوية) وتفقد تماسكها تماماً

عند درجة حرارة حوالي 100 درجة مئوية ، ويعود إلى التماسك عند درجات الحرارة العادية .

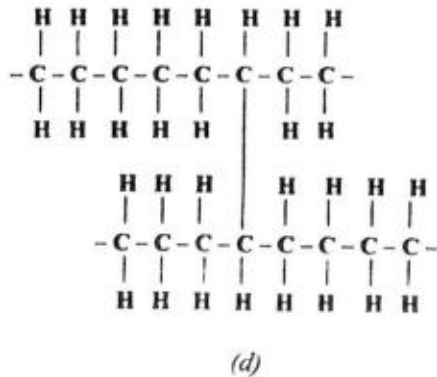
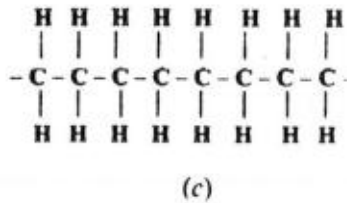
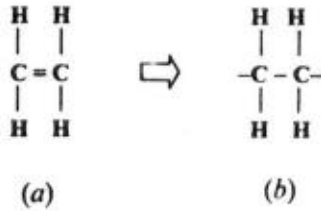
2.4.2.2 العوازل المتصلدة بالحرارة

وينتمي إلى هذا النوع من العوازل كل من البولي إيثيلين المشبك ومطاط الإيثيلين بروبيلين وهذه المواد تلين مرة واحدة فقط بارتفاع درجة الحرارة ولكنها لا تلين أكثر عند الاستمرار في رفع درجة الحرارة ، أي أنها تتميز بمقاومتها لأي تشوه ميكانيكي قد يحدث نتيجة لارتفاع درجة الحرارة ، ويعتبر آخر فإن لهذه المواد خصائص محسنة حيث أنها لا تفقد تماسكها وشكلها بارتفاع درجة الحرارة . وترجع هذه الخصائص إلى تركيبها الجزيئية وتشابك سلاسلها الجزيئية ، ومن مميزات هذه العوازل أنه يمكن السماح برفع درجة حرارة الموصل إلى 90 درجة مئوية مما يزيد مقدرة الكبل على حمل التيار .

جدول 2 - 3 درجات الحرارة القصوى المسموح بها لبعض المواد العازلة

| درجة الحرارة القصوى في حالة القصر °C | درجة الحرارة القصوى للأداء المستمر °C | نوع العزل |
|--------------------------------------|---------------------------------------|--------------|
| 250 - 140 | 80 - 65 | الورق المشبع |
| 150 | 70 | PE |
| 250 | 90 | XLPE |
| 250 | 90 | EPR |
| 160 - 150 | 70 | PVC |

ويبين الجدول 2 - 3 درجات الحرارة القصوى للعوازل المتلذنة والمتصلدة بالحرارة بالمقارنة بالعوازل الورقية المشربة.



شكل 2 . 3 (a) تركيب جزيء الإيثيلين (b) فتح الترابط الثاني (c) سلسلة البوليمر الإيثيلين (d) سلسلة البوليمر المشبك

3.4.2.2 البولي إيثيلين

ويعرف في بريطانيا أيضاً باسم "بوليثين"، وقد تم اكتشاف هذه المادة العازلة الممتازة في أوائل الثلاثينات من القرن العشرين باستخدام غاز الإيثيلين الناتج من الفحم، والبولي إيثيلين مادة صلبة تشبه في ملمسها وشكلها شمع البرافين، وينتمي البولي إيثيلين إلى سلسلة من المركبات الكيميائية تسمى البولي أوليفينات (polyolefins) وهو كما أسلفنا مادة متلذنة بالحرارة. ويعتبر تركيب البولي إيثيلين من أبسط تركيبات البوليمرات، حيث يتكون من سلسلة من مونومرات الأيثيلين.

والمعروف أن الأيثيلين عبارة عن غاز هيدروكربوني يتكون من ذرتين من الكربون وأربع ذرات من الهيدروجين (C_2H_4) كما هو مبين في الشكل 2 . 3a. وترتبط ذرتا الكربون في هذه المادة بترابط ثنائي (double bond). ويتم تحت تأثير ظروف تفاعلية معينة كسر الترابط الثنائي (شكل 2 . 3b) ويسمح ذلك لجزء الأيثيلين بالانضمام إلى جزيئات أخرى منه لتكوين سلسلة ترتبط فيها ذرات الكربون ببعضها (شكل 2 . 3c) وبالتالي ينضم عدد كبير من جزيئات الإيثيلين مكوناً ما يسمى بالبولي إيثيلين (polyethylene). ومن هنا جاءت تسمية هذه المادة، وتعرف عملية تحويل الإيثيلين إلى بولي إيثيلين بعملية البلمرة (polymerization).

وقد تكون سلاسل البولي إيثيلين قصيرة أو طويلة تتكون من آلاف الذرات. وتؤدي عملية بلمرة الإيثيلين إلى تكوين خليط من السلاسل المتفاوتة الطول، فبعضها قصير يتكون من 12 جزيء من الإيثيلين،

وبعضها عملاق يضم بضعة مئات من الآلاف من وحدات الايثيلين. وتوجد أنواع مختلفة من البولي ايثيلين كالبولي ايثيلين منخفض الكثافة (LDPE) أو البولي ايثيلين عالي الكثافة (HDPE).

ويعتبر البولي ايثيلين عازلاً مثالياً للكبلات خصوصاً كبلات التيار المنخفض حيث تتوفر فيه العديد من الخصائص سواء الكهربائية أو الكيمائية أو الطبيعية. ويبين الجدول 2 - 4 بعض الخصائص الكهربائية والطبيعية

جدول 2 - 4 مقارنة بين خصائص العوازل الاصطناعية والورق المشرب

| نوع العزل | المتانة الكهربائية MV/m | مقاومية العزل ohm.m | المجاوزية النسبية ϵ_r | معامل الفقد $\tan \delta$ | الكثافة Kg/m ³ | المقاومية الحرارية ° C.m/W |
|-----------|-------------------------|---------------------|--------------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|
| ورق مشرب | 50(ac) 170(dc) | 5×10^{12} | 3.5 - 4 | 10×10^{-3} | 1250 | 5 - 6 |
| PE | 900 | $10^{14} - 10^{17}$ | 2.3 - 2.5 | 0.4×10^{-3} | 910-925 | 3.5 |
| *XLPE | 700 | $10^{14} - 10^{17}$ | 2.4 | 0.55×10^{-3} | 900 | 3.5 |
| *EPR | 100(dc) | - | 3.3 | 6×10^{-3} | 1200 | 5 |
| PVC | 450 - 630 | 7×10^{11} | 5 - 8 | 100×10^{-3} | 1400 | 6 |

*تختلف القيم لهذه المواد بعض الشيء لاعتمادها على نوع وكمية مادة الحشو (filler) المضافة

التيار المستمر ويتطلب هذا العيب معالجة خاصة للتغلب عليه. والخصائص الطبيعية للبولى ايثيلين جيدة وله قدرة على مقاومة قطاع عريض من الكيماويات كما يمكن الحصول عليه فى شكل نقى. ومنتجاته بدرجة كافية.

ومن عيوب البولى ايثيلين أن مقاومته لنفاذ الرطوبة ليست كبيرة بدرجة كافية كما أن خاصية مقاومته للاشتعال ليست جيدة، وكذلك فإن مقاومته للزيوت ضعيفة.

وينصهر البولى ايثيلين عند درجة حرارة 115 درجة مئوية ولذلك فإن درجة حرارة الموصل المسموح بها فى الكبلات المعزولة بهذه المادة لا تتجاوز 70 درجة مئوية. كذلك فإن معامل التمدد الحراري للبولى ايثيلين على نسبياً ويزيد بارتفاع درجة الحرارة ولا بد من أخذ فى الاعتبار عند تصميم أغلفة الكبلات المصنوعة من البولى ايثيلين.

4.4.2.2 البولى ايثيلين المشبك

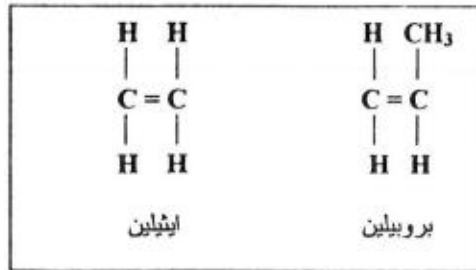
تتميز هذه المادة بأن لها خصائص حرارية أفضل من البولى ايثيلين العادى بأنواعه، وهو يعادل فى هذه الخصائص بل ويفوق الخصائص الحرارية للورق المشرب (أنظر الجدول 2 - 2)، هذا بالإضافة أنه يفوق الأخير فى جميع الخصائص الكهربائية والطبيعية الأخرى كما هو واضح من الجدول 2 - 4. والبولى ايثيلين المشبك يتصلد بالحرارة وبالتالي فإن له القدرة على الاحتفاظ بتماسكه وقوته الميكانيكية عند ارتفاع درجة حرارة الموصل بالتشغيل وتبلغ درجة حرارة الموصل المسموح بها فى الكبلات المعزولة بهذه المادة 90 درجة مئوية، كما أن له القدرة على تحمل درجات أعلى لمدة قصيرة وذلك فى الحالات الطارئة مثل حدوث قصر فى الدائرة. ويستخدم البولى ايثيلين المشبك حالياً فى كبلات الجهد

لهذه المادة بالمقارنة بالمواد العازلة الأخرى التى تستخدم فى صناعة الكبلات. ويتضح من هذا الجدول أن مادة البولى ايثيلين تفوق هذه المواد جميعاً سواء من ناحية المتانة الكهربائية، مقاومية العزل، المجاوزية النسبية، معامل الفقد والمقاومية الحرارية والعيب الوحيد للبولى ايثيلين كمادة عازلة للكبلات يتمثل فى صعوبة استخدامه كعزل لكبلات التيار المستمر نظراً لقابليته لتخزين الشحنات الفراغية (space charges) والاحتفاظ بها لمدة طويلة مما يؤثر على أداء الكبل المصنوع من هذه المادة تحدث تأثير

استخدام بخار الماء المحمص في عمليات التشبيك عادة ما يؤدي إلى تكوين جيوب صغيرة من بخار الماء مما يتسبب في خلق مراكز لعمليات التشجير المائي والتي تضر المادة العازلة وتؤثر على خصائصها الكهربائية وتؤدي إلى خفض عمرها الافتراضي وانهارها كهربياً بعد فترات زمنية قصيرة .

5.4.2.2 مطاط الإيثيلين بروبيلين

ينتج هذا البوليمر من التفاعل بين الإيثيلين والبروبيلين تحت ظروف خاصة وبتأثير عامل مساعد ، ويبين الشكل 4.2 جزيئات الإيثيلين والبروبيلين التي يتكون منها هذا البوليمر .



شكل 4.2

وهناك أنواع عديدة من هذا البوليمر تعتمد على نوع المادة الإضافية المستخدمة لتقويته (fillers) وتحسين خصائصه حتى يمكن استخدامه في تطبيقات معينة بما في ذلك كعزل لكبلات الجهد المنخفض والمتوسط ، وينتمي هذا البوليمر ، كما سبق ذكره ، إلى مجموعة البوليمرات المتصلدة بالحرارة .

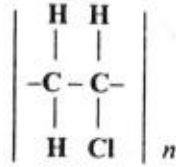
العالي والزائد والفائق حتى 500 ك ف للتيار المتغير كما تم تعديله أخيراً بحيث أمكن استخدامه كعزل لكبلات التيار المستمر حتى حوالي 160 ك ف. وهناك طريقتان رئيسيتان لتحويل البولي إيثيلين العادي إلى بولي إيثيلين مشبك (الشكل 2 . 3d) وهما : طريقة الإشعاع الالكتروني (electron irradiation) وطريقة التشبيك الكيميائي (chemical crosslinking). وتستخدم الطريقة الأولى على نطاق محدود حيث أنها عملية بطيئة وتتطلب معدات باهظة التكاليف إلى جانب أنها تهدد صحة العاملين عليها بالإضافة إلى أنه من الصعب التأكد من درجة التشبيك عند استخدام هذه الطريقة في تشبيك العوازل السمكية كما في حالة عوازل كبلات الضغط العالي .

أما في صناعة الكبلات ، فتتم عملية تشبيك البولي إيثيلين بالتشبيك الكيميائي باستخدام إحدى التقنيتين الرئيسيتين :

الأولى : التشبيك باستخدام البيروكسيد (peroxide crosslinking) مثل بيروكسيد الديكوميل (dicumyl peroxide) وفي هذه الحالة لا يتفاعل البيروكسيد أثناء بثق البوليمر ولكنه يبدأ في التفاعل عند معالجة الكبل عند درجات الحرارة العالية باستخدام غاز النيتروجين المضغوط أو باستخدام البخار المحمص .

الثانية : وهي التقنية المعروفة باسم التشبيك باستخدام السيلين (silane crosslinking) وفي هذه الحالة فإن عملية التشبيك لا تتم إلا بتوفير الماء .

وتؤثر التقنية المستخدمة في عملية التشبيك الكيميائي على وجود البولي إيثيلين الناتج ، حيث أن عملية التشبيك الكيميائي تؤدي إلى تكون غازات معينة ، ويجب اتخاذ الإجراءات اللازمة للتخلص من هذه الغازات ومنع تكون جيوب صغيرة (voids) في المادة الناتجة . كما أنه قد ثبت أيضاً أن



شكل 2 . 5 التركيب الكيميائي لمادة كلوريد البوليفينيل

ويمكن تقسيم مركبات كلوريد البوليفينيل إلى ثلاث أقسام رئيسية :

- مركبات ذات أغراض عامة :

ويتم إعداد هذه المركبات بحيث تتوفر لها خصائص مناسبة لأغراض العزل أو التغليف وتحافظ هذه المركبات على مرونتها عند درجات الحرارة المنخفضة .

- مركبات صلبة :

ويتم إعداد هذه المركبات بطريقة مماثلة للطريقة المستخدمة في إعداد المركبات ذات الأغراض العامة ولكن باستخدام كمية أقل من المواد اللدنة وتتميز هذه المركبات بقدرتها على تحمل درجات الحرارة العالية نسبياً دون أن تفقد صلابتها الميكانيكية كما أنها أقل مرونة من المركبات ذات الأغراض العامة عند درجات الحرارة المنخفضة .

- مركبات مقاومة للحرارة :

ونظراً لضبيعة كلوريد البوليفينيل المتلذنة بالحرارة ، فلا بد من تصميم الكبلات التي تستخدم هذا النوع من العوازل بحيث لا تزيد قيمة التيار الذي تحمله عن قيمة قصوى محددة وإلا أدى ذلك إلى ارتفاع درجة الحرارة والتسبب في تليين أو انصهار العزل .

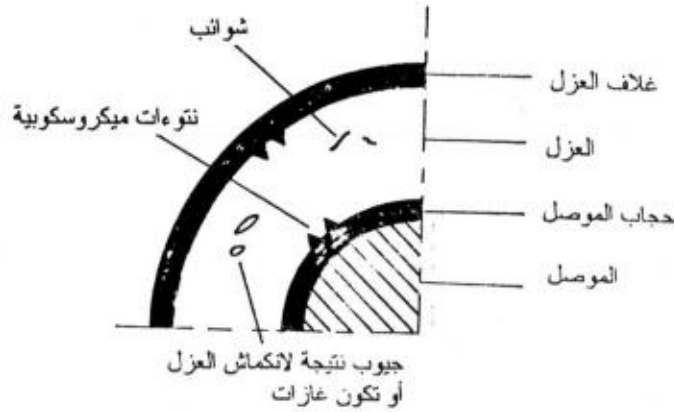
وطبقاً للجدول 2 - 4 فإن المجاوزية النسبية لهذه المادة أكبر من المجاوزية النسبية للبولي إيثيلين وكذلك فإن معامل الفقد فيها عالي نسبياً ، إلا أنها تتميز بمقاومتها الجيدة للتفريغ الجزئي (partial discharges) أو ما يسمى بالتفريغ الهالي الداخلي (internal corona) كما تتميز أيضاً بخصائصها الميكانيكية الممتازة خصوصاً عندما تتطلب ظروف الخدمة توفير المرونة في الكبل . كذلك فهذه المادة خصائص جيدة في مقاومة الكيماويات القلبية كالأحماض والقلويات والمذيبات الأوكسوجينية وكذلك للماء والرطوبة والبخار ، وهذه الأخيرة تعتبر ذات أهمية كبيرة للعوازل المستخدمة في صناعة الكبلات ، ورغم عدم استخدام هذه المادة كعزل لكبلات الجهد العالي أو الفائق إلا أنها قد أثبتت جدارتها كعزل لكبلات الجهد المتوسط . وقد أثبتت الدراسات في الولايات المتحدة الأمريكية أن هذه المادة تحتل المرتبة الثانية كالمادة المفضلة لصناعة عزل كبلات الجهد المتوسط (15- 35 ك.ف) بعد مادة البولي إيثيلين المشبك المضاد للتشجير المائي (TRXLPE) نظراً لخصائصها المتميزة في مقاومة التشجير .

6.4.2.2 كلوريد البوليفينيل

يتم الحصول على هذا البوليمر بإضافة الكلور أو الهيدروجين المخروط بالكلور إلى أى من الإيثيلين أو الأستيلين . وقد عرفت الصناعة هذا النوع من البوليمرات في الفترة التي سبقت الحرب العالمية الثانية في ألمانيا . ويبين الشكل 5.2 التركيب الكيميائي لهذا البوليمر . ومادة كلوريد البوليفينيل بدون إضافات ، مادة صلبة وهشة وغير متزنة حرارياً ، وبالتالي لا تصلح كمادة عازلة للكبلات ولذلك تضاف إليها العديد من المواد الإضافية لتكوين مركبات مختلفة تتوفر فيها الخصائص المطلوبة.

ج - احتواء هذا النوع من العوازل على جيوب وشوائب من مواد أخرى نتيجة لعمليات التصنيع المختلفة مما لا يمكن ملاحظته اثناء العمليات المختلفة للتحكم في الجودة ، وكذلك قابلية هذه المواد للتأكسد والتحول الكيميائي وازضافة الى ذلك فان وجود نتوءات ميكروسكوبية على الأسطح المشتركة بين حجاب الموصل والعزل وبين العزل وغلظه مما يؤدي الى زيادة المجال الكهربى عند هذه النقط و بالتالى تعرض العزل للانهييار .

وبين الشكل 6.2 مقطع في كبل ذى عزل بلمرى ومصادر العيوب المختلفة



شكل 2 . 6 مقطع في كبل ذى عزل بلمرى يوضح مصادر العيوب المختلفة

في هذا النوع من الكبلات وتؤثر هذه العوامل جميعا على عمر العزل وتؤدي الى التحلل الكهربى وبدء عمليات التشجير المختلفة وفي نهاية الأمر الى الانهييار المبكر للكبلات ذات العوازل البلمرية.

وعموماً فإن كلوريد البوليفينيل يعتبر مادة رخيصة نسبياً ، وتستخدم في صناعة كبلات الجهد المنخفض وكذلك الجهد المتوسط في دوائر التغذية . ويوجد في أوروبا كبلات تستخدم عزل كلوريد البوليفينيل في مدى الجهد المتوسط أيضا (17.3 ك ف -- 30 ك ف). وبمقارنة خصائص هذه المادة بالمواد العازلة الأخرى (انظر جدول 2 - 4) نجد الارتفاع الملحوظ فى كل من المجاوزية النسبية ومعامل الفقد لهذه المادة. ويعتبر الفقد في هذه المادة كبيراً جداً بالمقارنة مع الفقد في مادة البولى ايثيلين . ويظهر الجدول أيضاً انخفاض مقاومة عزل هذه المادة بالنسبة للبوليمرات الأخرى ، ولذلك لا تستخدم مادة كلوريد البوليفينيل كعزل لكبلات الجهد العالى والزائد والفائق . ومما هو جدير بالذكر ، أنه طبقاً لمعايير حماية البيئة ، فهناك اتجاه عام نحو استخدام كبلات خالية من الهالوجينات (halogen-free cables) فليس غريباً أن نتوقع التقليل من استخدام البوليفينيل في صناعة الكبلات في المستقبل .

7.4.2.2 عيوب العوازل البلمرية

يمكن تلخيص العيوب الرئيسية للعوازل البلمرية للكبلات فيما يلى :

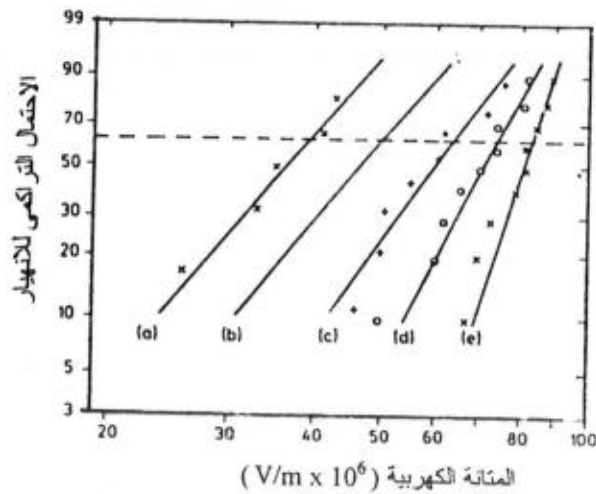
أ - ضعف مقاومة هذه العوازل للتفرغ الجزئى وتؤدي هذه الظاهرة الى تحلل العزل البلمرى والانهييار المبكر للكبل.

ب - ضعف مقاومة هذه العوازل لنفاذية الرطوبة وبالتالي فان الرطوبة يمكن ان تتسرب خلال العوازل البلمرية - ما لم يوجد غلاف يمنع ذلك - مما يؤدي الى عمليات التشجير المائى وخصوصا فى الكبلات المدفونة فى الأرض مباشرة وتؤدي هذه العمليات ايضا فى آخر الأمر الى الانهييار المبكر للكبل.

8.4.2.2 نبذة عن ظاهرة التشجير في العوازل البلمرية

اكتشفت ظاهرة التشجير الكهربى (electrical treeing) منذ فترة طويلة وربما يعود اكتشاف هذه الظاهرة الى زمن تطوير منظومات العوازل الكهربائية / الزيتية ، أما ظاهرة التشجير المائى (water treeing) فقد تم اكتشافها فى اوائل السبعينات من القرن العشرين ففى هذا الوقت كان قد مر حوالى عشر سنوات على استخدام مادة البولى ايثيلين فى صناعة كبلات الجهد المتوسط (15.5 ك ف) فى شبكات التوزيع الاسكانى فى الولايات المتحدة الأمريكية وقد كان الانهيار المبكر والغير متوقع لهذه الكبلات بعد عشر سنوات فقط من وضعها تحت الارض وبداية خدمتها ، علما بأنه كان متوقع لها ان تستمر فى الخدمة بدون مشاكل لفترة تتراوح من خمسين الى مائة عام وكان ذلك الانهيار المبكر سببا فى اكتشاف التشجير المائى فى هذه الكبلات وقد لوحظ وجود هذا النوع من التشجير فى جميع انواع البوليمرات المعروفة، فانى جانب ظهورها فى البولى ايثيلين العادى و المشبك تم اكتشافها فى مطاط الايثيلين بولى بروبيلين (EPR) ، وكلوريد البوليفينيل (PVC) ، بينما لم يثبت ظهور هذه الظاهرة فى العوازل الغير عضوية وقد كان من المعتقد فى البداية ان عملية التشجير تحدث فقط فى وجود التيار المتغير او الدفعى ولكن هناك دلائل تشير الى وجود ظاهرة التشجير ايضا تحت تأثير الجهد المستمر.

وعلى الرغم من الاعتقاد القديم بان انهيار منظومات الكبلات يرجع فى % 90 من الاحوال الى أسباب ميكانيكية او انهيار فى الموصلات او فى نهايات الكبلات وليس الى الانهيار داخل عوازل الكبلات ذاتها الا ان هذا الاعتقاد قد تغير الآن - واصبح التشجير هو اكثر الأسباب التى تؤدى الى انهيار الكبلات البلمرية.

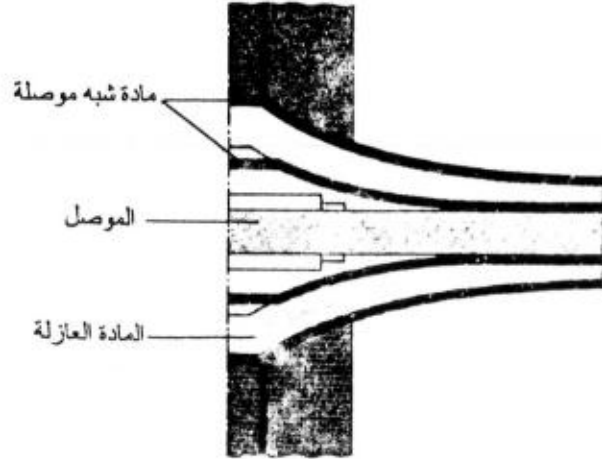


شكل 2 . 7 تأثير التشجير المائى على المتانة الكهربائية للبولى ايثيلين لعينات تعرضت للتقادم لفترات زمنية مختلفة:
 (a) 500 ساعة (b) 340 ساعة (c) 195 ساعة
 (d) 50 ساعة (e) عينة لم تتعرض للتقادم

وقد ثبت عمليا ان تشجير العزل يؤدي الى انخفاض متانته الكهربية لشكل ملحوظ ، و بين الشكل 7.2 الانخفاض المتتابع للمتانة الكهربية لعينات من البولي ايثيلين والتي تم تعريضها لعملية تقادم (ageing) داخل محلول الكتروليتي لتكوين شجيرات مائية لفترات زمنية مختلفة بالمقارنة لعينة اخرى من نفس المادة لم تتعرض إطلاقا لعملية التقادم ، ويلاحظ انخفاض قيمة المتانة الكهربية من حوالي 80 ك/متر في العينة التي لم تتعرض لاي تقادم الى حوالي 38 ك/متر في العينة التي تعرضت لعملية التقادم لمدة خمسمائة ساعة.

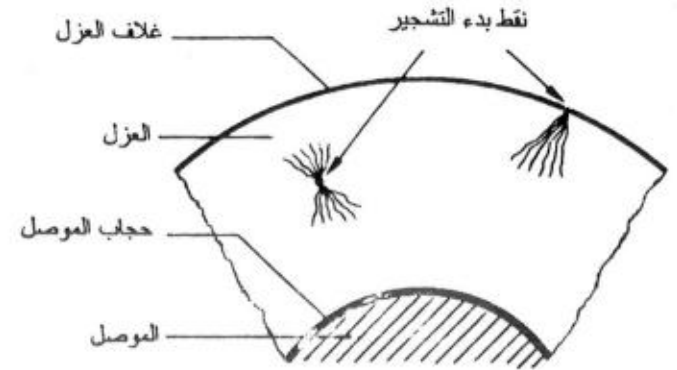
ومن الجدير بالذكر ان الاعتقاد السائد هو ان التشجير المائي في حد ذاته لا يتسبب في انهيار العزل مباشرة ولكنه يتسبب في بداية تكون التشجير الكهربي والذي يؤدي بالتالي إلى انهيار العزل داخل الكبل عند تعرض الكبل للجهود العارمة الناتجة من الصواعق او من عمليات تشغيل المفاتيح . ويعطى الشكل 8.2 توضيحا للتشجير المائي في كبل بلمري.

9.4.2.2 وسائل تحسين خصائص المواد البلمرية كمواد عازلة للكبلات
يعتبر الحد من عملية التشجير والتحكم في جودة عوازل الكبلات البلمرية إحدى أهداف مصنعي هذا النوع من الكبلات. وقد استحدثت تقنيات جديدة للتغلب على عيوب الكبلات المصنوعة من العوازل البلمرية والحد من عمليات التشجير فيها ويمكن تلخيص هذه التقنيات كما يلي:
(أ) استحداث تقنية البثق الثلاثي (triple extrusion) وقد ادى استخدام هذه التقنية الى إزالة مراكز تكون الشجيرات الكهربية على سطح الموصل ويوضح الشكل 9.2 هذه التقنية.



شكل 9.2 تقنية البثق الثلاثي

(ب) الاهتمام بتنقية المادة البلمرية من الشوائب واستخدام تقنيات تنقية متطورة مما أدى الى التقليل من حجم الشوائب وبالتالي الى مادة نقية الى حد كبير .



شكل 8.2 التشجير المائي في كبل بلمري

ايثيلين في مقاومة التشجير المائي وأقبلت العديد من شركات الكهرباء فى الولايات المتحدة الأمريكية على استخدام الكبلات المصنوعة من البولى ايثيلين المشبك العادى خصوصا فى كبلات الجهد المتوسط (15-25 ك ف) المستخدمة فى التوزيع فى المناطق السكنية.

(و) استخدام المواد المضادة للتأكسد (antioxidants) لتقاييل خاصية الميل الى التأكسد فى البوليمرات وعند استخدام مثل هذه المواد ، لا بد من ضمان التوزيع المتجانس لها داخل البوليمر وإلا أدى ذلك الى تكون تجمعات ضاره من هذه المواد وقد أظهرت بعض الدراسات ان هذه المواد حتى فى حالة توزيعها المتجانس يمكنها ان تتسرب الى طبقات المادة نصف الموصلة حيث تمتصها جزيئات الكربون الأسود الموجود فى هذه الطبقات ويؤدى ذلك الى تكون مراكز لبداية تكوين الشجيرات المائية ولذلك فلا بد من الحذر والحيطه عند اختيار المواد المضادة للتأكسد وذلك للتقليل من مثل هذه الاحتمالات.

5.2.2 الغازات المضغوطة (compressed gases)

تستخدم بعض الغازات كعوازل للكبلات فيما يسمى بالكبلات المعزولة بالغاز المضغوط (compressed gas-insulated cables – c.g.i) وهذه الغازات عموماً هي

(أ) غاز سداس فلوريد الكبريت SF_6

(ب) غاز الفريون $(CCl_2 F_3)$

(ج) غاز النيتروجين .

وعموماً فإن افضل طريقة لتقليل سعة الكبل يمكن ان تتحقق باستخدام عزل غازى بدلا من اى نوع من المواد العازلة الاخرى حيث انه

(ج) استخدام مواد محسنة فى تصنيع أغلفة شبه الموصلات مما يمنع تسرب الشوائب الى داخل المادة العازلة وكذلك زيادة الاهتمام بتطوير غلاف خارجي للكبل بحيث يمنع تسرب الماء وذلك بخلط المواد البوليمرية التى تصنع منها بعض الأغلفة (PVC) بإضافات مضادة للماء وعلى الرغم من عدم ضمان منع تسرب المياه الا باستخدام أغلفة معدنية للكبلات، اذ ان استخدام الأغلفة المعدنية غير مستحب لما قد يحدث بها من تشققات أثناء عمليات مد الكبل مما يسمح بتكون الشجيرات المائية ويصبح فى هذه الحالة استخدام الغلاف المعدني غير فعال.

(د) التحكم الحراري أثناء عمليات بنق العزل مما يساعد على منع تكوين الفراغات الكبيرة ويحد من كثافة الفراغات الصغيرة وقد ادى استخدام عمليات التشبيك الجافة الى الحصول على بولى ايثيلين مشبك ذى جودة عالية.

وعادة ما تستخدم غازات مثل النيتروجين N_2 وسداس فلوريد الكبريت (SF_6) فى عمليات التشبيك الجاف ، ويؤدى تسرب هذه الغازات الى الجيوب الصغيرة (micro voids) داخل العازل الى الحد من تكون الشجيرات الكهربائية وعمليات التفريغ الجزئى وبالتالي الى تحسين خصائص العزل فى مقاومته للتشجير . وجدير بالذكر انه يمكن أيضا استخدام هذه الغازات فى تشريب العوازل البلمرية لإحداث نفس الاثر السابق ذكره ولكن تسرب الغازات بعد ذلك مع الوقت يقلل من فاعلية عملية التشريب.

(هـ) تعديل التركيب الكيميائي للبولى ايثيلين والبولى ايثيلين المشبك بغرض زيادة مقاومة المادة المعدلة للتشجير المائي ، وقد تم خلال الخمسة عشر عاما الأخيرة استحداث نوعين رئيسيين وهما البولى ايثيلين المقاوم للتشجير (TRPE) والبولى ايثيلين المشبك المقاوم للتشجير (TRXLPE او TRXL). وقد اثبتت هذه المواد فاعليتها فى تحسين خصائص البولى

في هذه الحالة تكون مجاوزية العزل مساوية تقريبا للواحد صحيح ، هذا بالإضافة الى انخفاض كبير في الفقد في العزل.

(أ) غاز سادس فلوريد الكبريت :

يعتبر هذا الغاز عازلا ممتازا لكبلات الجهد العالي حيث يتميز بمناخية عزل عالية وخصائص جيدة للتوصيل الحرارى ، كما أنه يحتفظ بحالته الغازية في مدى واسع من درجات الحرارة ، هذا الى جانب انه غير قابل للاشتعال كما انه غير سام.

وتبلغ المتانة الكهربية لهذا الغاز اكثر من ضعف القيمة المماثلة للهواء عند الضغط الجوى وتترايد المتانة الكهربية بسرعة مع تزايد الضغط و تصبح مساوية للمتانة الكهربية للزيوت المعدنية العازلة العالية الجودة عند ضغط حوالى 300 كيلو باسكال (3 ضغط جوى) ويتميز هذا الغاز ايضا بان تسرب كمية بسيطة من الهواء إليه واختلاطه به لا يؤثر تأثيرا كبيرا على متانته الكهربية وهذا عامل مهم يساعد على تخفيف ، القيود الموضوعه على إجراءات تداول مثل هذا الغاز . ويعتبر غاز الـ SF_6 افضل الغازات السالبة كهريا (electronegative) حيث انه له مقدرة كبيرة على امتصاص الإلكترونات مكونا أيونات سالبة بطيئة الحركة وهو غاز خامل ومتزن بطريقة ليس لها مثل.

(ب) غاز الفريون :

غاز الفريون هو ثاني نوع من الغازات الذى يمكن ان يستخدم فى منظومات الكبلات المعزولة بالغاز المضغوط نظرا لارتفاع متانته الكهربية عند ضغوط منخفضة - نسبيا - كما يتميز بمعامل توصيل حرارى جيد. ولكن غاز الفريون عند مقارنته بغاز سادس فلوريد الكبريت نجد انه له عيب هام الا وهو امكانية تكون كربون عند تعرضه لاي تفرغ كهربي وهى عملية واردة فى اى معدات تستخدم فى القوى الكهربية وخصوصا فى

وجود الجهود العالية ، وهذا لا يمكن ان يحدث عند استخدام غاز سادس فلوريد الكبريت ولذلك فليس مستعربا انه رغم ان سعر الفريون قد يصل الى ثلث سعر الـ SF_6 ولكنه لا يجد إقبالا كبيرا كعزل للكبلات.

(ج) غاز النيتروجين:

وهو غاز خامل يستخدم عادة فى منظومات كبلات الجهد الفائق و العالى وذلك لإخماد تأثيرات التأين. ويمكن ايضا استخدام النيتروجين فى منظومات الغاز المضغوط كعزل للكبلات علما بأنه أقل فى كفاءته من غاز سادس فلوريد الكبريت.

وعموما فان اختيار الغاز المستخدم فى العزل فى منظومات كبلات الغاز المضغوط يتم عادة بين غاز سادس فلوريد الكبريت وغاز النيتروجين ويحدد التفضيل فى استخدام ايهما على القيمة القصوى للمجال الكهربي فى الكبل وعلى التكلفة.

ويتم رفع الضغط داخل العزل إما باستخدام الزيت المضغوط أو الغاز المضغوط ، وعادة ما تستخدم هذه الكبلات في كبلات الضغط العالي والزائد والفائق .

ب- حسب نوع العزل : وهناك ثلاثة أنواع رئيسية للعزل تستخدم في كبلات القدرة وهي إما العزل الورقي (paper insulation) أو العزل البامري أو العزل الغازي ، وقد سبق تناول خواص هذه العوازل في البلب الثاني .

ج- حسب نوع التيار : وتنقسم الكبلات إلى نوعين : كبلات التيار المتغير وكبلات التيار المستمر .

د- كبلات ذات استخدام خاص : وتصمم هذه الكبلات للأغراض الخاصة. وامثلة ذلك:

- الكبلات المغلفة بالرصاص التي تستخدم في الأماكن التي تتطلب الظروف المحيطة بها حمايتها من التفاعلات الكيميائية مثل محطات البنزين أو مصافي البترول.
- كبلات الإضاءة بالمطارات : وهي كبلات ذات قلب واحد ، وعادة ما تكون معزولة بمركبات كلوريد البوليفينيل وتصمم للعمل حتى 10 ك ف.
- الكبلات التي تتعرض لجهودات شد عالية سواء أثناء المد أو أثناء الاستخدام.
- الكبلات المستخدمة في المناجم.
- الكبلات البحرية التي تستخدم تحت الماء (submarine cables)
- الكبلات المستخدمة في السفن (ship- wiring cables)

الباب الثالث

أنواع كبلات القدرة

1.3 التقسيمات المختلفة لكبلات القدرة

يمكن تقسيم كبلات القدرة طبقاً للعوامل الآتية :

أ- حسب التصميم : وتنقسم في هذه الحالة إلى :

• كبلات مصمتة (solid type): وفي هذا النوع من الكبلات يكون الضغط داخل العزل مساوياً للضغط خارجه ولا تستخدم في هذا النوع أى وسيلة لزيادة الضغط داخل العزل. وتنقسم الكبلات المصمتة إلى نوعين أساسيين :

1- كبلات ذات عازل شريطي (taped insulation) مثل الكبلات ذات العزل الورقي المشرب .

2- كبلات ذات عزل ميثوق (extruded insulation) وقد تسمى أيضاً بالكبلات الميثوقة (extruded cables). وعادة ما تستخدم العوازل البلمرية الاصطناعية (synthetic polymeric insulation) في صناعة هذه الكبلات ، وتوجد كبلات مصمتة لجميع الجهود ، ابتداء من الجهود المنخفضة ومروراً بالجهود المتوسطة والعالية وانزائدة والفائقة.

3- الكبلات المضغوطة : ويصمم هذا النوع من الكبلات بحيث يكون الضغط داخل الكبل أعلى من الضغط الجوي في جميع ظروف تحميل الكبل

هـ- حسب الجهد المستخدم : تقسم الكبلات من حيث الجهد المستخدم إلى خمسة أقسام رئيسية :

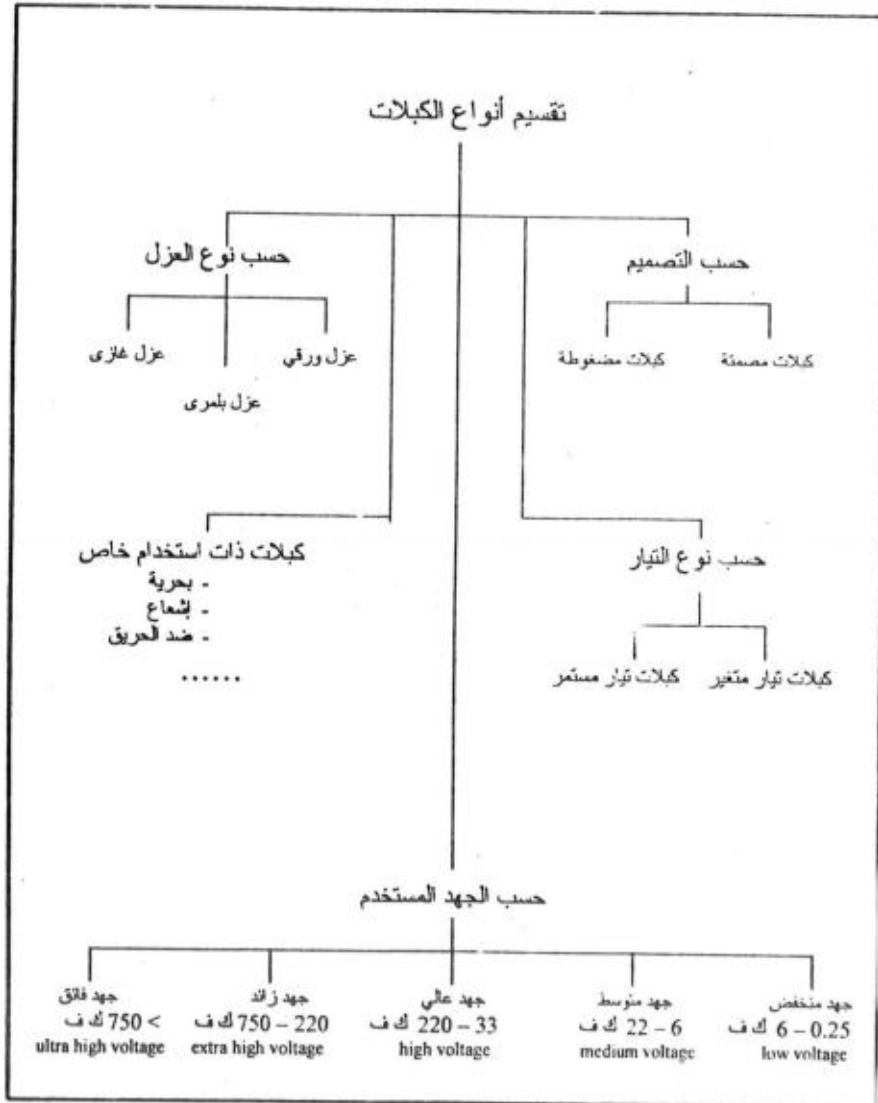
- كبلات الجهد المنخفض : وهي تلك الكبلات المستخدمة في المدى من 250 إلى 600 فولت وحتى 6 ك ف .
- كبلات الجهد المتوسط : وهي تلك الكبلات المستخدمة في المدى بين 6.6 ك ف إلى 22 ك ف .
- كبلات الجهد العالي : وهي تلك الكبلات المستخدمة في المدى بين 22 إلى 33 ك ف .
- كبلات الجهد الزائد : وهي تلك الكبلات المستخدمة في المدى بين 220 ك ف إلى 345 ك ف وحتى 750 ك ف .
- كبلات الجهد الفائق : وهي تلك المستخدمة في المدى الأكثر من 750 ك ف .

ويبين الشكل 3.1 التقسيمات المختلفة للكبلات وكما هو واضح فإن هذه التقسيمات تتداخل فيما بينها ولا يوجد تقسيم قاطع لأنواع الكبلات فهناك ، كما سبق القول ، كبلات مصممة تغطي مدى واسع من الجهود كما أن هناك مواد عازلة معينة تستخدم لجهود محددة مثل العوازل الغازية المضغوطة .

2.3 كبلات التوزيع للجهد المنخفض

تستخدم هذه الكبلات في منظومات توزيع القدرة الكهربائية في مدى جهد يتراوح بين 250 فولت و 650 فولت ، ويتم استخدام بعض هذه المنظومات في أوروبا وفي أجزاء أخرى من العالم للعمل على أساس استخدام التأريض المتعدد للحماية (protective multiple earthing – p.m.e) حيث يستخدم موصل التعادل كموصل وقائي أيضاً وذلك بتأريضه عند نقط متعددة على طول الكبل وجدير بالذكر أنه لا يجوز استخدام هذا النظام إلا

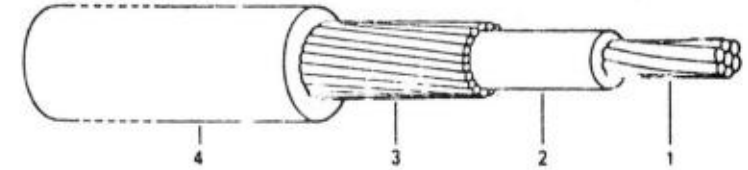
تقسيم أنواع الكبلات



شكل 3.1 تقسيم أنواع الكبلات

إذا كان مصدر التغذية يخضع لشروط نظام التأسيس المتعدد التي تحددها المواصفات القياسية .

يوضح الشكل 2.3 تركيب كبل من هذا النوع وقد صنع عزل هذا الكبل من داورييد البوليفينيل ويعتبر موصل التعادل في هذه الحالة درعاً أو غلافاً لحماية الكبل نظراً لأنه يتم توصيله ليكون على نفس مستوى جهد الأرض.

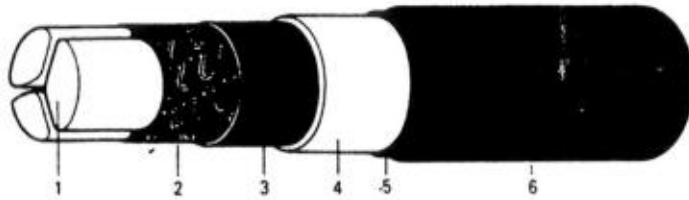


شكل 2.3 كبل ذو موصل التعادل والأرض المشترك
1- موصل - 2- عزل - 3- موصل التعادل والأرض المشترك،
مكون من أسلاك نحاسية عارية - 4- غلاف خارجي من الـ PVC

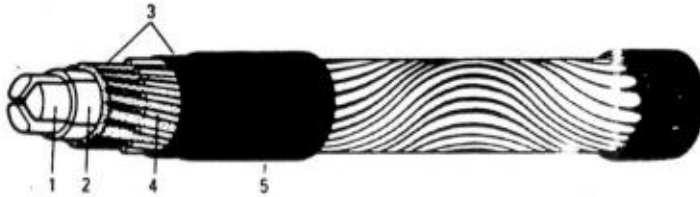
وهناك العديد من التصميمات للكبلات ذات موصل التعادل والأرضي المشترك. ونظراً لانتشار مبدأ التأسيس الوقائي المتعدد في كثير من منظومات التوزيع كمنظومات اضاءة الشوارع والمراكز التجارية وانوار المرور بالإضافة إلى منظومات توزيع القدرة الكهربائية في المناطق السكنية والصناعية أيضاً سنقوم هنا باعطاء مثالين لهذا النوع من الكبلات أحدهما ذي عزل ورقي والآخر ذي عزل بلمرى ، وهذان المثالان هما :

- الكبل الألومنيوم المصمت ذو موصل التعادل المركزي (شكل 3.3). (consac).

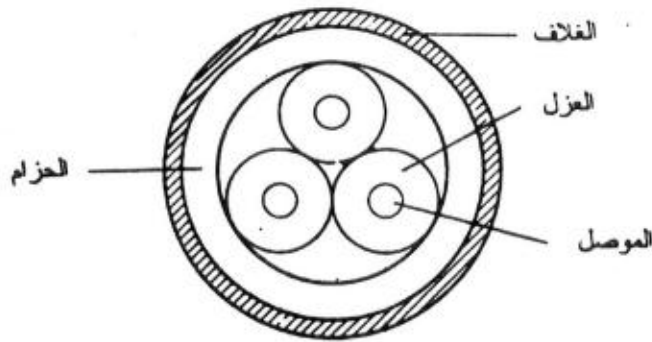
- الكبل السلكي المتموج ذو موصل التعادل المشترك (شكل 4.3) (waveconal).



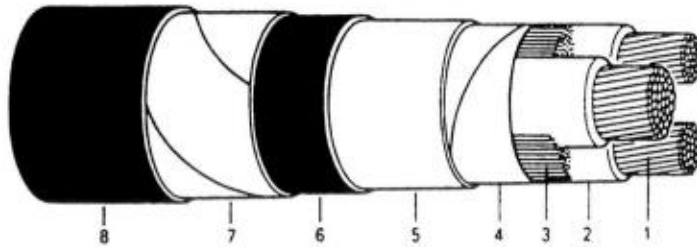
شكل 3.3 كبل الألومنيوم مصمت ذو موصل التعادل المركزي
1- موصلات الألومنيوم مصممة ومشكلة - 2- عزل ورقي
2- أحزام الورقي 4- غلاف من الألومنيوم المبثوق
5- طبقة رقيقة من البيتومين تحتوى على مركب مضاد للتآكل
6- غلاف خارجي من الـ PVC أو البولييثين المبثوق



شكل 4.3 الكبل السلكي المتموج ذو موصل التعادل المركزي
1- موصلات الألومنيوم مشكلة ومصممة - 2- عزل XLPE
3- بطانة من المطاط مضادة للتآكل - 4- أسلاك من الألومنيوم
5- غلاف من الـ PVC المبثوق



شكل 5.3



شكل 6.3 كبل محزم ثلاثي الموصلات معزول بالورق

- 1- موصل
- 2- عزل من الورق المشرب
- 3- حشو
- 4- الحزام العازل
- 5- غلاف من الرصاص
- 6- طبقة مبطنة
- 7- درع مكون من طبقتين من شرائط الصلب
- 8- غلاف خارجي من الألياف الجوت

والسمة المشتركة في تصميم هذين النوعين من الكبلات، هي أن موصلات الأطوار الثلاث تحاط بغلاف موصل ومؤرض وفي حالة إصابة الكبل بضرر ميكانيكي فإن الغلاف المؤرض يتكفل بحجب الموصلات عن ملامسة الأفراد المحيطين بالكبل.

3.3 كبلات الجهد المتوسط

والمقصود بهذه الكبلات هي تلك المستخدمة في شبكات توزيع القدرة الكهربائية تحت جهود 6.6 ك ف، - 11 ك ف و 22 ك ف، وهناك تصميمان أساسيان لهذا النوع من الكبلات :

- الكبلات المحزمة (belted type cables)
- الكبلات المحجبة الثلاثية القلب من طراز H (-H-type shielded 3-core cables).

1.3.3 الكبلات المحزمة

تعتبر هذه الكبلات من أقدم تصميمات الكبلات ذات الموصلات الثلاثية، وقد شاع استخدامها بنجاح منذ أوائل هذا القرن في الجهود المنخفضة والمتوسطة وحتى 22 ك ف. ويبين الشكل 5.3 التركيب الأساسي للكبل المحزم، وكما هو مبين بالشكل المذكور، فإن لكل موصل عزل منسمل خاص به، ويصنع عادة من الورق، ويستخدم طوق أو حزام من نفس المادة العازلة بحيث يلف حول الموصلات المعزولة ويلبى الحزام غلاف خارجي مصنوع من الرصاص.

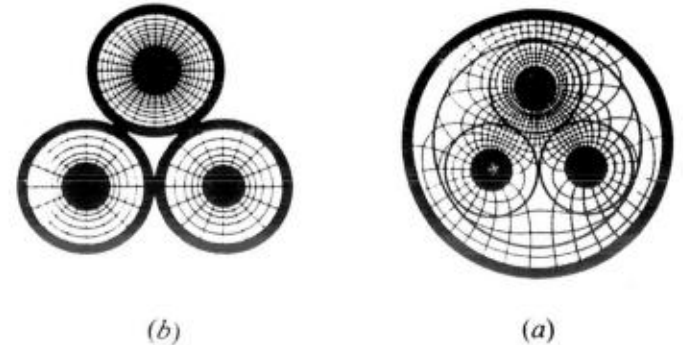
ويبين الشكل 6.3 كبل من هذا النوع ذي عزل ورقي، ومن الواضح استخدام حشو في الفراغات بين الموصلات لإعطاء الكبل الشكل الأسطواني. وعادة ما يستخدم الغلاف المعدني - المصنوع في هذه الحالة

محزم. ويلاحظ في هذا الشكل أن العزل الورقي المكون من شرائح (laminated paper insulation) يتعرض لإجهاد كهربي تسمى مما قد يؤدي إلى انهياره عند الجهود العالية. ويرجع ذلك إلى أن المتانة الكهربية للعزل عند التعرض لإجهادات مماثلة تبلغ 15% فقط من المتانة الكهربية له عند تعرضها لإجهادات قطرية. ومن نقت الضعف الأخرى للكبل المحزم، أن متانة العزل في الحزام تعتبر أقل منها في عزل الموصل، فهذه الدلية من العزل، تقتصر إلى التجانس والمتانة الميكانيكية أيضاً حيث يتم وضعها - أثناء صناعة الكبل - حول مجموعة الموصلات بعوازلها والحشو بينها فلا تتحقق لها المتانة التي يمكن اكتسابها لطبقة العزل حول الموصل نفسه. هذا بالإضافة إلى أن استخدام الحشو أيضاً يعتبر نقطة ضعف ثالثة سواء من الناحية الميكانيكية أو من الناحية الكهربية حيث أن المتانة الكهربية للمادة المصنوع منها الحشو أقل من المتانة الكهربية للعزل الورقي. وتمثل أسطح التماس بين القلوب الثلاثة للعزل (الموصل وعزله) نقاط ضعف أخرى حيث أثبتت التجربة العملية أن انهيار كبل من هذا النوع يبدأ عادة إما عند أحد هذه الأسطح أو في الحشو بين القلوب وذلك على الرغم من أن المجال الكهربي داخل الكبل يبلغ قيمته العظمى عند السطح المشترك للموصل والعزل. ونتيجة لهذه العوامل جميعاً فإن استخدام الكبلات الحزمية بتصميمها السابق وصفه أثبت عدم كفاءة في الأداء عند استخدام هذه الكبلات لجهود أعلى من 22 ك.ف. وقد تم التغلب على هذه العيوب باستخدام حجاب موصل حول عزل كل موصل من الموصلات الثلاث، مما يجعل المجال الكهربي بين كل موصل والحجاب، مجالاً نصف قطري (شكل 3. 7b). وقد سميت هذه الكبلات بكبلات من طراز H نسبة إلى مخترع هذا التصميم وهو Hochshtader.

من الرصاص - كمسار للتيار عند حدوث خطأ إلى الأرض ويلقى ذلك طبقة مبطنة لطبقة التدريع والتي تتكون من شرائط أو أسلاك من الصلب يليها الغلاف الوقائي للتدريع.

وكما هو مبين في الشكل 3. 5 فإن سمك العزل بين كل موصل والغلاف الخارجي يساوي مجموع سمك عزل كل موصل بالإضافة إلى سمك الحزام. وسمك العزل بين كل موصل وآخر يكون ضعف سمك العزل لكل موصل على حدة. ومن المفهوم أن الجهد بين كل موصل وآخر (جهد الخط) يساوي $\sqrt{3}$ الجهد بين كل موصل والأرض (جهد الطور)، وبالتالي فإن النسبة بين السمك الكلي بين كل موصل وآخر وبين كل موصل والغلاف الخارجي تساوي تقريباً هذه النسبة.

والجدير بالذكر أن توزيع المجال الكهربي داخل هذا التصميم من الكبلات المحزمية لا يكون قطرياً بالنسبة للموصل كما هو الحال في الكبلات ذات الموصل الواحد. ويبين الشكل 3. 7a توزيع المجال الكهربي في كبل



(b)

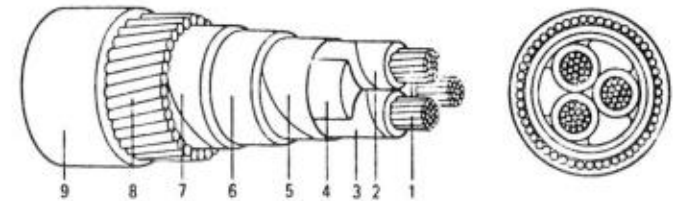
(a)

شكل 7.3

2.3.3 الكبلات الثلاثية القلب المحجبة

روعى فى تصميم هذه الكبلات الإستغناء عن الحزام واستخدم حجاب موصل حول عزل كل موصل من الموصلات الثلاثة. ويصنع هذا الحجاب إما من شرائط من الورق الممعدن المتقنب (لعدم إعاقة عملية التشريب) أو من شرائح الألومنيوم أو النحاس نلف بحيث تترك مسافة صغيرة بين كل لفة وأخرى حتى لا تؤثر على تشرب الورق العازل كما يراعى أن تحقق هذه الطبقة تلامس مباشر وجيد مع طبقة العزل. ويتم تصميم سمك العزل بحيث يعوض ما فقد فى السمك بالاستغناء عن الحزام .

ويستخدم حشو ورقى للإبقاء على الشكل الاسطوانى الخارجى للقلوب الثلاثة كما يستخدم شريط خارجى من النحاس المنسوج يلف حول القلوب الثلاثة والحشو ، وذلك للمحافظة على وجود اتصال بين الحجاب والغلاف الخارجى للكبل وذلك حتى يمكن تأريض الأسطح الخارجية للقلوب. ويعطى الشكل 8.3 مثالاً لتركيبة كبل محجب من طراز H .



شكل 8.3 كبل محجب من طراز H
1- موصل 2- عزل 3- غلاف موصل
4 - حشو 5 - شريط من النحاس المجدول
6 - غلاف من الرصاص 7- بطانة 8 - طبقة تدريع
9 - غلاف خارجى

ويمكن تلخيص مميزات هذا النوع من الكبلات فيما يلى :

- توزيع الاجهاد الكهربى الداخلى نصف قطرى ولا يتعرض الحشو للمجال الكهربى.
 - انخفاض احتمال حدوث اخطاء بين كل قلب وآخر .
 - التقليل من تكون فراغات فى العزل نتيجة لانفصال القلوب عن بعضها بسبب التمدد الحرارى أو التشوه الميكانيكى .
 - سهولة تبديد الحرارة خصوصاً من قلوب الكبل نتيجة لوجود الأغلفة الموصلة حول كل قلب مما يسمح باستخدام تيارات مقننة أعلى.
- وقد استخدم هذا النوع من الكبلات بنجاح فى الكبلات المصممة المعزولة بالورق لجهد 33 ك ف.

4.3 كبلات الجهد العالى والزائد والغائق

والمقصود بهذا النوع من الكبلات ، هى تلك الكبلات التى تستخدم لجهود أعلى من 33 ك ف . وعند ظهور الحاجة إلى تصميم كبلات تعمل على جهود أعلى من 33 ك ف ، كانت الخطوة الأولى فى الصناعة ، هى الاتجاه نحو تصميم كبلات 66 ك ف بنفس التصميم الأساسى للكبلات المحجبة . وقد باءت المحاولات الأولى بالفشل عند صناعة كبل ذى ثلاثة موصلات ويعمل على 66 ك ف فى حين أمكن تصنيع كبل ذى موصل واحد يعمل على هذا الجهد باستخدام عزل ورقى مشرب . إلا أن استخدام كبل ذى موصل منفرد يعمل على 66 ك ف يعتبر حلاً غير عملى نظراً لزيادة سمك العزل الواجب استخدامه .

وترجع الصعوبة فى صناعة كبلات من هذا النوع تعمل على 66 ك ف إلى تكون جيوب غازية داخل عزل الكبل أثناء التشغيل ومروره بدورات من التبريد والتسخين . وقد يؤدي تكون هذه الجيوب إلى انهيار العزل .

1.4.3 كبلات الزيت المضغوط

توجد العديد من التصميمات لهذا النوع من الكبلات نذكر منها ما يلي :
 أولاً : الكبلات التي يستخدم فيها ضغط عالي (حوالى 3.8 ضغط جوى).
 ويتم فى هذه الحالة وضع الموصلات المعزولة أو قلوب الكبل المعزولة
 بالورق العازل داخل أنابيب، ويتم ملء هذه الأنابيب بالزيت المضغوط .
 وبين الشكل 3 . 9 تصميماً لهذا النوع من الكبلات.

وقد شاع استخدام هذا التصميم فى العديد من الدول كالولايات المتحدة
 الأمريكية وكندا وفرنسا والاتحاد السوفيتى السابق واليابان، وصممت كبلات

وللتغلب على تكوين الجيوب والتفريغ الجزئى فى عزل كبلات الضغط
 العالى ذات العوازل الورقية تم اللجوء إلى استخدام تقنية الضغط
 (pressurization). وتعتبر هذه الطريقة وسيلة فعالة للتقليل من تكون
 الجيوب والتخلص من عمليات التأين داخل العزل . ويمكن تلخيص
 المميزات التى تتميز بها الكبلات المضغوطة بالمقارنة بالكبلات الغير
 مضغوطة كما يلي:

1 - يمكن استخدام إجهادات تصميم عالية مما ينتج عنه التقليل فى أبعاد
 و أوزان الكبلات المستخدمة للجهد العالى .
 2 - يمكن الوصول إلى جهود أعلى من تلك المتاحة بدون استخدام
 تقنية الانضغاط .

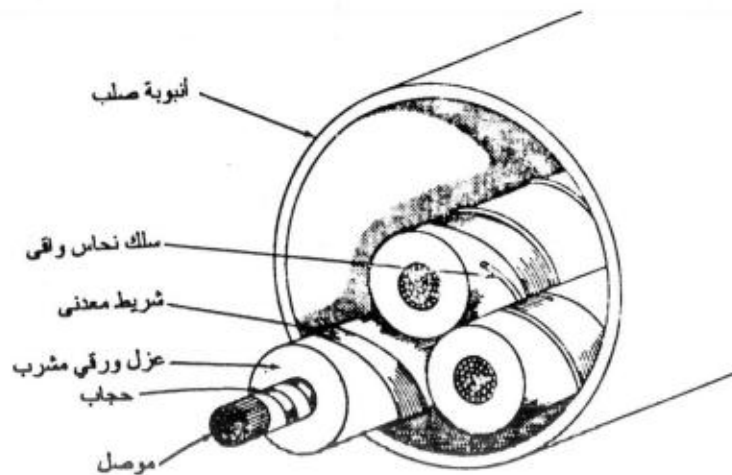
3 - يمكن زيادة التيارات المقننة التى تحملها الكبلات المضغوطة نتيجة
 لزيادة درجات الحرارة المسموح بها فى تلك الكبلات .

4 - تتميز الكبلات المضغوطة بمناعتها العالية ضد الانهيار نظراً للتأثير
 الإيجابى لتقنية الانضغاط التى تؤدى إلى منع تكون الجيوب والتقليل
 من التفريغ الجزئى.

وتصمم الكبلات المضغوطة بحيث يكون الضغط داخل الكبل أعلى من
 الضغط الجوى فى جميع ظروف عمل الكبل وهناك تقنيتان لرفع الضغط
 داخل العزل :

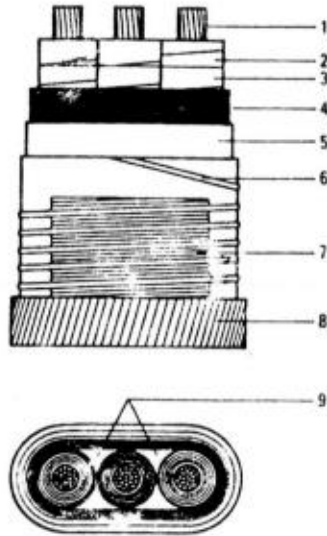
تقنية استخدام الزيت المضغوط فيما يسمى بكبلات الزيت المضغوط
 (oil - filled cables).

تقنية استخدام الغازات المضغوطة وتسمى الكبلات فى هذه الحالة بكبلات
 الغاز المضغوط (gas- pressurized cables) ويستخدم لهذا الغرض -
 كما سيأتى فيما بعد - غاز خامل كالنيتروجين .



شكل 3 . 9 كبل الزيت المضغوط ذو الضغط العالى والمعروف باسم
 كبل الأنابيب

بالزيت ، وقد استخدم هذا التصميم بنجاح منذ منتصف القرن العشرين تقريباً وحتى الآن في كبلات التيار المتغير والمستمر ، وهذا التصميم لا يحتاج الى توصيله بمستودعات زيت بعد التركيب نظراً لتصميمه الخاص ، وقد استخدم أيضاً ككبل بحري (تحت الماء) للجهد العالي والجهد الزائد أيضاً وينتشر استخدامه في الدول الاسكندنافية وشمال أوروبا.

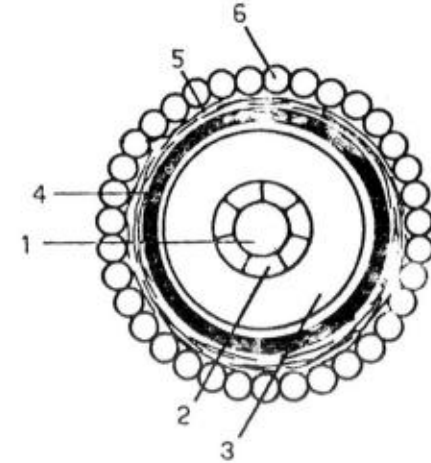


شكل 11.3 الكبل المسطح المضغوط بالزيت ذي الضغط المنخفض من طراز (Mollerhoj) .

- 1 - موصل من النحاس - 2 - عزل - 3 - حجاب - 4 - غلاف
- 5 - ورق كربي وقماش مشبع ببيتومين - 6 - شريط غير حديدي
- 7 - شريحتان متعرجتان من المعدن وسلك تحزيم
- 8 - غلاف خارجي - 9 - قناة الزيت

من هذا النوع لتعمل على جهود تصل إلى 500 ك ف ويتم توفير الضغط العالي للزيت بواسطة محطات ضخ أوتوماتيكية توضع في نهايات دائرة الكبل.

ثانياً : الكبلات التي يستخدم فيها الضغط المنخفض. تزود هذه الكبلات بأنبوبة مركزية (duct) داخل موصل الكبل ويتم ضخ الزيت داخل هذه الأنبوبة وبالتالي يضغط على العزل ولا يسمح بتكون أي جيوب داخلية. وبين الشكل 3 . 10 قطاع في كبل من هذا النوع. وقد انتشر استخدام هذا النوع في أوروبا والولايات المتحدة في 5 لآت الجهد العالي التيار المستمر والمتغير خصوصاً في الستينات حتى الثمانينات وقبل التقدم في صناعة كبلات الجهد العالي والزائد من العوازل البلمرية . وبين الشكل 3 . 11 الكبل الدائري المسطح (Mollerhoj flat-type-FT) وهو كبل مضغوط



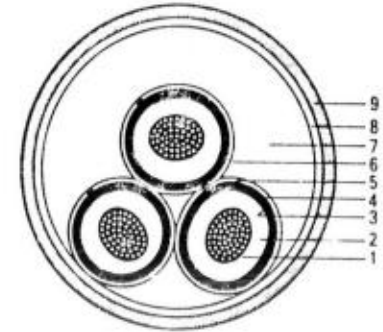
شكل 10.3 قطاع في كبل زيت مضغوط ذي ضغط منخفض

- 1 - أنبوبة الزيت - 2 - موصل مجدول - 3 - عزل ورقي
- 4 - غلاف من الرصاص - 5 - حشو من الجوت - 6 - تدريع

2.4.3 الكبلات المضغوطة بالغاز (gas - pressurized cables)

تختلف هذه الكبلات عن الكبلات المعزولة بالغاز المضغوط (compressed-gas insulated cables-c.g.i). فهذه الكبلات تكون معزولة بالورق المشرب بالزيت ويتم ضغط العزل من الخارج بواسطة الغاز ، او قد تكون معزولة باستخدام شرائط البلاستيك الملفوفة (lapped plastic insulation) وتوضع داخل انبويه مملوءة بالغاز المضغوط ، وهذا النوع الأخير لم يلاقى نجاحاً كبيراً فى الاستخدام العملي، وفيما يلي وصف أحد أنواع هذه الكبلات كمثال وهى الكبلات المليئة بالزيت والمضغوطة بالغاز (gas compression oil-filled cables) وبين الشكل 3 . 12 التركيب الأساسي لهذا الكبل.

وتتكون هذه الكبلات من ثلاثة قلوب (موصلات معزولة بالورق المشرب) وتكون هذه القلوب على شكل بيضى حتى تسمح لضغط حوالي 14 كجم/سم² على العزل خلال غلاف غشائي رقيق . ويتمدد هذا الغلاف



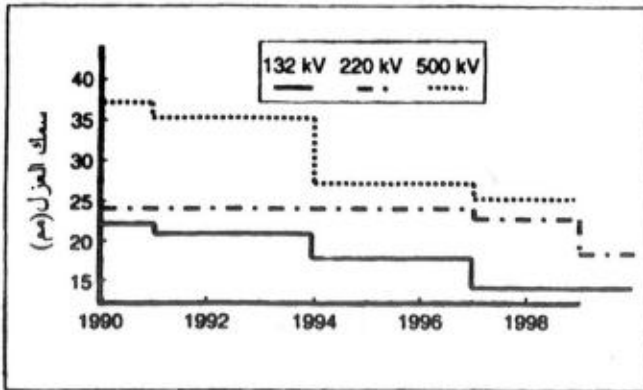
شكل 12.3 التركيب الأساسي لكبل مضغوط بالغاز
1- موصل 2- عزل ورقي 3- حجاب العزل 4- غشاء
5- شرائط تقوية 6- اسلاك تقوية 7- غاز النيتروجين
8- انبوية من الصلب 9- غلاف مضااض للتآكل

وينقبض تبعاً للتغيرات فى درجة حرارة وحجم القلب وبالتالي يمكن تقادى تكون اى جيوب داخل العزل. يتم تغليف القلوب كل على حده ، وتوضع داخل انبويه من الصلب بدون أى حشو أو وسيلة ربط بينها ، وتستخدم أسلاك تقوية خاصة (skid wires) حول كل قلب لمنع الاحتكاك والتآكل بين القلوب أثناء وضعهم داخل الأنبوية . وتعتبر الأنبوية الصلبة مع مكوناتها كوعاء محكم للغاز (gas-tight enclosure) يحتوى فى داخله على القلوب المعزولة ، حيث تملأ الأنبوية بغاز (نيتروجين) يصل ضغطه حوالي 15 كجم/سم² .

ويستخدم هذا النوع من الكبلات فى المدى من 60 ك ف الى 150 ك ف.

3.4.3 الكبلات ذات العوازل البلمرية

شهدت السبعينات والثمانينات من القرن العشرين تطورات حاسمة فى تقنيات الكبلات المصنوعة من البولي إيثيلين خصوصاً البولي إيثيلين



شكل 13.3 التطور فى قيمة سمك العزل لكبلات ال XLPE

المشبك (XLPE) في مدى الجهود المتوسطة والعالية ، كما تم في التسعينيات استخدام هذه المادة في صناعة كبلات الجهود الزائدة والفائقة ، حيث أمكن التوصل إلى إنتاج بولي إيثيلين مشبك فائق النقاء وتقنيات متقدمة في تصنيع كبلات XLPE حتى جهد 500 ك.ف. وكما يبين الشكل 3. 13 فمن المتوقع ان يستمر تطوير هذه الكبلات باستخدام سمك عزل اقل لجهود أعلى مما يتطلب الاستمرار في تقنيات الحصول عزل فائق الجودة مع التقدم في تقنيات تصنيع الكبلات من هذا النوع.

إلا ان من الضرورة بمكان ، ادراك ان تقليل سمك العزل غير مفضل حيث ان ذلك يعنى زيادة سعة الكبل ، وزيادة في الفقد في الكبل أيضا ، وبالتالي يصبح من المفضل استخدام موصل أكبر مما يؤدي الى خفض الفقد في الشبكة.

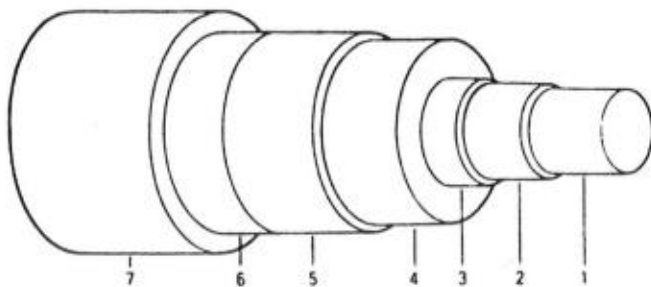
ولاشك أن الاهتمام بتأثير التكنولوجيا على البيئة سوف يكون عاملاً مؤثراً لتفضيل هذا النوع من الكبلات ذات العازل الصلب مقارنة بالكبلات التي تحتوي على سوائل او غازات. هذا بالإضافة الى الاتجاه نحو صناعة كبلات قليلة الاحتياج الى الصيانة ، وقد احتل البولي إيثيلين المشبك المكانة الأولى حالياً بالمقارنة بالبولي إيثيلين المنخفض الكثافة والبولي إيثيلين العالي الكثافة وكذا مطاط الايثيلين بروبيلين. وعلى الرغم من انتاج وتشغيل كبل بولي إيثيلين مشبك لجهد 500 ك.ف ، فان العول على هذا النوع من الكبلات في الأداء والخدمة لمدة طويلة لا يزال محل اختبار في مدى الجهود الفائقة.

ويبين الشكل 3. 14 احد التصميمات لكبل الجهد العالي ذي العزل البلمري المصنوع من البولي إيثيلين المشبك ويوضح الشكل استخدام طبقتين لمنع تسرب المياه الى العزل البلمري وحمايته من التشجير المائي. الطبقة الأولى (2) موضوعة فوق الموصل مباشرة لمنع تسرب المياه من

الموصل الى العزل والطبقة الثانية (9) تسبق الغلاف الخارجي للكبل وتمنع تسرب المياه من الوسط المحيط بالكبل الى العزل. كما زود الكبل بغلاف من البولي إيثيلين (8) وشريط مبطن شبه موصل قابل للانفخاض لمنع انتشار الرطوبة في الاتجاه الطولي للكبل (6).

ويبين الشكل 3. 15 تصميم كبل ذي عزل بلمري من البولي إيثيلين المشبك للجهود الفائقة ، وهو تصميم أمريكي. والجديد في هذا التصميم هو استخدام طبقة جديدة بين طبقة الحجاب شبه الموصل وطبقة العزل ،وتسمى حجاب الانبعاث (emission shield) وتصنع هذه الطبقة من مادة ذات مجاوزية

| فهد (kV) | سمك عزل (mm) | قطر كبل (mm) |
|----------|--------------|--------------|
| 138 | 12.6 | 68 |
| 230 | 19.0 | 72 |
| 345 | 26.2 | 96 |



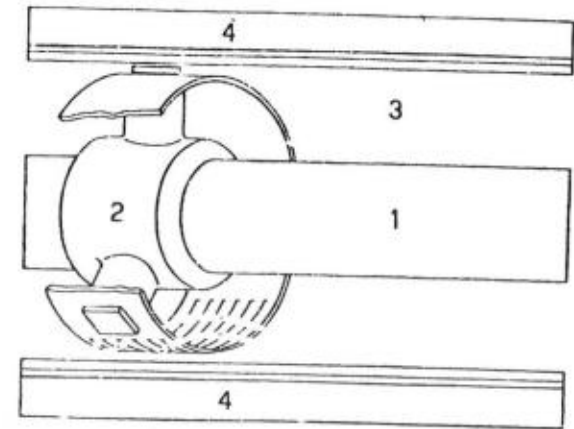
شكل 3.15 تصميم كبل ذي عزل بلمري للجهود الفائقة

- 1 - موصل 2 - حجاب شبه موصل 3 - درع الانبعاث
- 4 - عزل XLPE 5 - حجاب شبه موصل
- 6 - غلاف من الورق الكربوني 7 - غلاف من الرصاص

نسبية أعلى من مجاوزية العزل والغرض منها هو التقليل من قيمة المجال الكهربى على سطح طبقة شبه الموصل . على سبيل المثال ، فقد أستخدم مركب بلمرى يحتوى على ثانى اكسيد التيتانيوم (TiO_2) لصناعة حجاب الانبعاث فى احد الكبلات الروسية للجهد العال (110 ك ف) وتبلغ قيمة المجاوزية النسبية لهذا المركب البلمرى 4.5 .

4.4.3 الكبلات المعزولة بالغاز المضغوط

ويستخدم هذا النوع من الكبلات أساسا كامتداد لخطوط النقل الهوائية مع الاحتفاظ بالجهد والتيار المستخدمين فى هذه الخطوط ، وفى هذه الحالة يكون الامتداد للخط الهوائي ككبل تحت الارض وخلال الأنفاق. ويمكن اعتبار هذا النوع من الكبلات ككبل يستخدم فى نطاق الجهود الفائقة (EHV) بما له من مميزات هائلة بالمقارنة بالكبلات المليئة بالزيت



شكل 16.3 التركيب الأساسي لكبل أحادى الموصل ومعزول بالغاز المضغوط
1 - موصل - 2 - مبادئ - 3 - عزل غازي مضغوط - 4 - غلاف

والمعزولة بالورق المشرب ، وتستخدم هذه الكبلات فى الجهود حتى 500 ك ف. ويبين الشكل 3 . 16 التكوين الأساسي لكبل أحادى الموصل من هذا النوع ويشمل الآتى:

الموصل وهو عبارة عن أنبوبة من الألومنيوم (1) تكون متمركزة فى مركز الكبل بواسطة عنصر عزل مبادئ (spacer insulator) (2) ويكون مصنوعا من راتنج الايبوكسى. ويوضع الموصل داخل غلاف الكبل وهو عبارة عن ماسورة من الألومنيوم يتراوح سمكها بين 250 الى 500 مم أما عزل الكبل - فهو عبارة عن غاز سادس فلوريد الكبريت. والذي يضغط الغاز داخل الغلاف لضغط يصل الى 3.5 كجم/سم² ويعتبر هذا ضغطا منخفضا . وهناك تصميمات تستخدم فيها ضغوطا عالية (حوالى 15 كجم/سم²). وبطبيعة الحال ، فان استخدام ضغوط عالية يؤدي الى مئانة كهربية اعلى للغاز ، ولكن مثل هذا التصميم له متطلبات اكثر تعقيدا عند تصميم الاجزاء المختلفة للكبل. وهناك تصميم آخر لهذا النوع من الكبلات حيث، تستخدم ثلاثة موصلات داخل وعاء واحد مؤرض يحتوى على الغاز العازل المضغوط.

ويتم تصميم الكبل من عدة اجزاء صلبة يبلغ طولها حوالى 10 متر ، ويتم نقلها الى مكان مد الكبل وتوصيلها معا لتكوين الطول المطلوب للكبل. ولا يخفى على القارئ الصعوبة الفنية والتكاليف التى تصحب مد هذا النوع من الكبلات وهذا النوع من التصميم بالذات وهو النوع الصلب (rigid type) ولذلك فقد تم الاتجاه نحو تصميم أنواعا أخرى من الكبلات ذات العزل الغازي لتكون مرنة حيث يمكن لفها على بكرات تكفى البكرة ذات من 100 الى 200 متر من طول الكبل ويتم نقل هذه البكرات الى مكان مد الكبل ، وبهذه الطريقة تقل عدد الوصلات وتسهل عملية نقل أجزاء الكبل.

| | | |
|-----------|-----------------|---------|
| قدرة الخط | 2850 | ميجاوات |
| الجهد | 275 | ك ف |
| التيار | 6300 | أمبير |
| العزل | SF ₆ | |
| طول الكبل | 3.3 | كم |

الاستخدام : نقل القدرة الكهربائية من محطة القوى الحرارية الى مركز مدينة ناجويا (Nagoya) في اليابان.

5.3 كبلات التيار المستمر

1.5.3 مقدمة

من المعروف ان تطور منظومات القوى الكهربائية الحديثة فى خلال النصف الأول من القرن العشرين قد تركز على استخدام التيار المتغير لما له من مميزات بالمقارنة بالتيار المستمر وخصوصاً فى مجالات توليد وتوزيع الطاقة الكهربائية. ومما لاشك فيه ان استخدام التيار المتغير سوف يستمر فى المستقبل فى هذه المجالات ، ولكن بزيادة الجهود المستخدمة فى منظومات نقل الطاقة ، وظهور الحاجة الى نقل الطاقة لمسافات طويلة ، وعبر البحار والأنهار والممرات المائية ، وظهور الاتجاه نحو ربط الشبكات الكهربائية الكبرى ، بدأ الاتجاه نحو استخدام الخيار الآخر – وهو استخدام التيار المستمر لنقل الطاقة الكهربائية باستخدام الجهود الزائدة والفائقة مثل 200 kV، 400 kV، 800 kV . ويرجع ذلك الى المميزات التقنية والاقتصادية التي تحققها تكنولوجيا منظومات الجهد العالي للتيار المستمر فى مجال نقل الطاقة الكهربائية . والجدير بالذكر ان هذا التحول نحو استخدام التيار المستمر قد بدأ فى حوالي الخمسينيات من القرن العشرين وتزايد الاهتمام به فى العشرين سنة الأخيرة. ويبين الجدول 3-1

ويمكن تلخيص مميزات هذا النوع من الكبلات فيما يلى :-
 (أ) ارتفاع المتانة الكهربائية لهذا النوع من العزل والتي قد تزيد عن المتانة الكهربائية للزيوت العازلة خصوصاً عند رفع الضغط المستخدم.
 (ب) تصل قيمة ثابت العزل فى هذا النوع من العزل الى الواحد صحيح وهذه خاصية هامة جدا حيث تؤدي الى خفض تيار الشحن وخفض سعة الكبل وبالتالي القدرة الغير فعالة للكبل مما يتيح باستخدام كبلات طويلة من هذا النوع دون الحاجة الى عناصر تعويض لهذه القدرة كما هو الحال عند استخدام كبلات التيار المتغير ذات العوازل الأخرى.
 (ج) تتميز هذه الكبلات بخصائص حرارية ممتازة مما يسمح باستخدام تيارات مقننة عالية.
 (د) يعتبر الفقد فى العزل فى هذه الكبلات منعدماً.
 (هـ) يمكن استخدام قدرات مقننة عالية لهذا النوع من الكبلات قد تتساوى مع القدرات المقننة لخطوط النقل الهوائية لنفس الجهد ، ويعتبر ذلك ميزة كبيرة للكبلات المعزولة بالغاز المضغوط حيث يمكن استخدامها كبديل للخطوط الهوائية والتي تلاقى معارضة كبيرة حالياً – خصوصاً فى المناطق السكنية.
 (و) تعتبر منظومات الكبلات المعزولة بالغاز المضغوط منظومات مغلقة لا تؤثر على البيئة المحيطة بها.
 (ز) العزل المستخدم غير قابل للاشتعال مما يزيد من امان استخدام هذه المنظومات.
 وفيما يلى بعض المعلومات عن كبل من هذا النوع تم البدء فى تشغيله فى اليابان عام 1955 ، وربما توضح مواصفاته من حيث الجهد المستخدم والتيار الذى يحمله مدى أهمية وحيوية هذا النوع من الكبلات:

الزيادة في الطاقة الكهربائية المنقولة باستخدام كبلات تحت الماء (submarine cables) للتيار المستمر في الخمسين سنة الأخيرة.

جدول 3 - 1 الزيادة في الطاقة الكهربائية المنقولة تحت الماء باستخدام كبلات التيار المستمر

| الفترة الزمنية | الطاقة الكهربائية المنقولة (ميغا وات) |
|----------------|---|
| 1954 - 1964 | 210 |
| 1964 - 1974 | 2067 |
| 1974 - 1984 | 1445 |
| 1984 - 1994 | 5075 |
| 1994 - 2001 | أكثر من 6257 |

2.5.3 مميزات وعيوب منظومات الجهد العالي للتيار المستمر

يمكن تلخيص مميزات وعيوب منظومات الجهد العالي للتيار المستمر فيما يلي:

- يسهل استخدام هذه المنظومات إمكانية الربط بين الشبكات الكهربائية الكبرى للتيار المتغير بدون الحاجة إلى عمليات ضبط الأتزان والتزامن، بل ويمكن استخدام هذه المنظومات للربط بين شبكات كهربائية للتيار المتغير ذات ترددات مختلفة.

- يحقق استخدام هذه المنظومات في الربط بين الشبكات، الكبرى وبين الدول سرعة التحكم في سريان الطاقة وتساهم في المحافظة على اتزان هذه الشبكات.

- لا تحتاج كبلات التيار المستمر إلى استخدام مفاعلات لتعويض التيار السعوي كما أنه لا يوجد حد لطول خط النقل كما في حالة كبلات التيار المتغير. وبالتالي يمكن استخدام أطوال كبيرة من هذه الكبلات للربط بين الشبكات الكبرى خصوصاً تحت الماء.

- يعتبر استخدام منظومات الجهد العالي للتيار المستمر أكثر اقتصادية في نقل الطاقة الكهربائية - سواء باستخدام الخطوط الهوائية أو باستخدام الكبلات وذلك سواء من ناحية تكلفة النقل أو الفقد أثناء النقل.

3.5.3 موصلات كبلات التيار المستمر

حيث أنه لا يوجد أي تأثيرات كهرومغناطيسية حثية في حالة التيار المستمر باستثناء الحالة أثناء التوصيل والفصل فلا توجد ضرورة عند التصميم، الأخذ في الاعتبار للتأثيرات السطحية أو التأثيرات التقاربية (أنظر الفقرة 2.2.1).

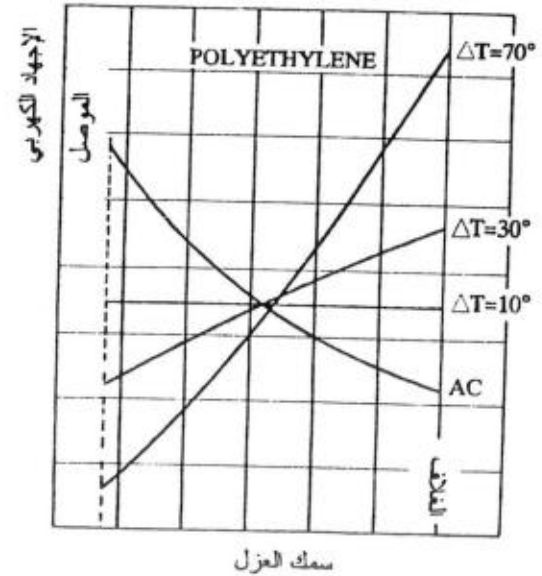
وحيث أن المقاومة للتيار المستمر أقل بحوالي 20% من المقاومة للتيار المتغير فإن الفقد الأومي في موصلات كبلات التيار المستمر تصبح أقل من مثيلتها في موصلات كبلات التيار المتغير كذلك فليس هناك حاجة إلى استخدام موصلات ميلليكين (milliken) ذات التصميم المعقد وذلك عند الحاجة إلى استعمال موصلات لها مقطع كبير.

4.5.3 عزل كبلات التيار المستمر

توجد اختلافات أساسية في تصميم كبلات التيار المستمر بالمقارنة بكبلات التيار المتغير وذلك يرجع إلى أن خصائص العزل تحت تأثير التيار المستمر تختلف اختلافاً كبيراً عن هذه الخصائص عند استخدام التيار المتغير. ويمكن تلخيص هذه الاختلافات فيما يلي:

- العتانة الكهربائية للعوازل في المدى الطويل في حالة التيار المستمر أكبر بكثير من مثيلتها للتيار المتغير، ومثال ذلك يبلغ إجهاد التشغيل للتيار المستمر في الورق المشرب 25 ميغا فولت/متر مقابل 4 ميغا فولت/متر في حالة التيار المتغير.

• يعتبر تصميم العزل في كبلات التيار المستمر أكثر تعقيدا من تصميم العزل في كبلات التيار المتغير ويرجع ذلك الى الاختلاف فى توزيع المجال الكهربى فى الحالتين. ففي حالة التيار المستمر يعتمد توزيع المجال داخل العزل على مقاومة العزل ، والتي تعتمد بدورها اعتمادا كبيرا على درجة الحرارة وعلى شدة المجال الكهربى أيضا ، أما فى حالة التيار المتغير فان توزيع المجال الكهربى داخل العزل لا يعتمد على التغير فى درجة حرارة العزل ، و بالتالى فان هذا التوزيع لا يتغير



شكل 17.3 توزيع الإجهاد الكهربى داخل عزل كبل تيار مستمر بالمقارنة بكبل تيار متغير.

تغيرا محسوسا نتيجة لحالة تحميل الكبل كما فى حالة كبلات التيار المستمر.

وبين الشكل 3. 17 توزيع المجال الكهربى داخل العزل فى عزل كبل مصنوع من البولى ايثيلين فى حالة التيار المستمر بالمقارنة بتوزيع المجال الكهربى فى حالة التيار المتغير. ونجد فى حالة التيار المتغير أن القيمة القصوى للمجال الكهربى تكون عند سطح الموصل وتقل فى اتجاه الغلاف الخارجى للكبل بصرف النظر عن الفرق فى درجة الحرارة بين سطح الموصل و سطح الغلاف اى بصرف النظر عن تحميل الكبل ، أما فى حالة التيار المستمر فان فى حالة عدم وجود فرق فى درجة الحرارة بين الموصل والغلاف الخارجى ، فان توزيع المجال الكهربى داخل العزل يكون مماثلا لتوزيعه فى حالة التيار المتغير. وعندما يبدأ الكبل فى توصيل التيار وبزيادة قيمة التيار فان الفرق فى درجة الحرارة بين الموصل والغلاف الخارجى (ΔT) تبدأ فى الارتفاع وفى مقابل ذلك نجد ان توزيع المجال الكهربى داخل العزل يبدأ فى التغير ويبدأ توزيع الإجهاد الكهربى فى الانعكاس حيث يزيد على سطح الغلاف مع الانخفاض عند سطح الموصل. ويتحدد التيار المقنن للكبل بحيث لا يتسبب هذا التيار عند التحميل فى زيادة المجال الكهربى عند الغلاف عن قيمة المجال عند سطح الموصل فى حالة اللاحمل. والى جانب هذه الخاصية لتوزيع المجال الكهربى فى عوازل كبلات التيار المستمر فان تصميم عزل هذه الكبلات يتأثر أيضا بعدة عوامل أخرى مثل تأثير قطبية الجهد وانعكاسه ، وتأثير الشحنات الفراغية (space charges) المتركمة داخل العزل خصوصا فى العوازل البلمرية. وتؤدى هذه الشحنات الى تشويه توزيع المجال الكهربى داخل العزل وزيادة تركيزه فى نقط معينة مما قد يؤثر على متانة العزل وقد يؤدى الى انهياره. وقد أدت هذه العوامل جميعا الى تأخير استخدام

6.3 الكبلات ذات الأداء المحسن في حالة الحريق

1.6.3 الخصائص الإضافية للكبلات المقاومة للحريق

تدل الخبرة المكتسبة من عدد كبير من الحرائق ، خصوصاً في المباني والمنشآت التي تحتوي على كثافة عالية من الأسلاك والكبلات والتي تتواجد بها أعداد كبيرة من البشر أو التي تحتوي على معدات الكترونية حساسة أو منقولات ثمينة ، أن الأضرار الناتجة عن الحرائق في مثل هذه المنشآت تكون هائلة خصوصاً عندما يصيب الحريق الكبلات الكهربائية المغذية لها. وتشمل هذه المنشآت الأنفاق والمستشفيات والمدارس والفنادق والمسارح والمباني المرتفعة ، والمنشآت الصناعية ومحطات القوى والمراكز التجارية الكبرى. ولذلك فإن إجراءات الأمان تتطلب استخدام كبلات ذات أداء محسن في حالة نشوب حريق ، وقد قامت العديد من شركات الكبلات بتطوير مواد جديدة تستخدم في إنتاج هذه الكبلات حيث تتوفر فيها جميع الخصائص الكهربائية والميكانيكية والكيميائية اللازم توافرها في الكبلات الكهربائية. ويمكن تصنيف الكبلات المقاومة للحريق إلى ثلاث فئات:

- أ - كبلات تستمر في الأداء أثناء الحريق وعند تعرضها للمياه المستخدمة لإخماد النار أو ارتطامها بالأنقاض المتساقطة.
 - ب - كبلات تستمر في الخدمة لمدة محددة أثناء الحريق وذلك حتى يمكن المحافظة على النظام والتحكم في طريقة إنهاء العمل.
 - ج - كبلات يمكن فصلها عند نشوب حريق ولا حاجة إلى بقائها بعد انقضائه.
- ويجب أن تتوفر في جميع هذه الفئات من الكبلات، عند تعرضها للحريق، الخواص التالية :

مادة البولي إيثيلين كعزل لكبلات التيار المستمر لمدة تزيد عن عشرين عاماً ويكفي العلم بأن هذه المادة استخدمت بنجاح في صناعة كبلات تيار متغير حتى 500 ك ف بينما تم أخيراً (1997) إنتاج كبلات ذات عزل بلمرى للتيار المستمر لجهد من 80 الى 150 ك ف فقط وفي نطاق محدود للغاية. وقد صنع العزل في هذا الكبل من مركب بلمرى خاص يدخل فيه البولى إيثيلين المشبك كمكون رئيسي واطلق على المركب الجديد اسم XDC. ويتميز هذا النوع من الكبلات بخفة الوزن (نسبياً) والقدرة على التحمل وكذلك بسهولة وسرعة مده (سواء تحت الأرض أو تحت الماء) مما يقلل من تكاليف عمليات المد ، كما ان استخدامه لا يؤثر على البيئة المحيطة به. وقد استخدمت الأنواع الآتية من الكبلات في منظومات الجهد العالى للتيار المستمر :

- الكبلات ذات العوازل الورقية المشربة (النوع المصمت)
- الكبلات ذات العوازل الورقية المشربة (المليئة بالغاز).

وفي هذين النوعين من الكبلات فإن الموصل يتم عزله باستخدام شرائط ورقية مشربة ويتم ، بعد مد الكبل ، شحنه بالنتروجين. وتزود خطوط هذه الكبلات بخزانات من الغاز وأجهزة للتحكم فى الضغط داخل الكبل أثناء الخدمة.

- الكبلات ذات العوازل الورقية المشربة المليئة بالزيت.

وبين الشكل 3. 18 للتكوين النمطي لكبل تيار مستمر ذي عزل ورقى مشرب من النوع المصمت، كما يبين الشكل 3. 19 كبل تيار مستمر من الطراز الدانمركى (Mollerhoj) المسطح المملوء بالزيت.

أحماض (مثل حمض الهيدروكلوريك) مما يؤدي إلى تآكل المعدات الكهربائية والأضرار بها - أو بأى معدات أخرى بالمباني.

وقد تم وضع طريقة لاختبار مدى تآكلية الغازات الناتجة عن احتراق أى من هذه المواد ، وبناء على نتيجة هذا الاختبار يتم تقرير ما إذا كانت هذه المواد خالية من الهالوجين وغير تآكلية (halogen-free and non-corrosive) من عدمه. ولمعالجه هذه الحالة الأخيرة تستخدم إضافات أخرى للمواد التي يصنع منها الكبل بهدف التقليل من الدخان الناتج على الأقل.

كثافة الدخان :

ينتج من احتراق كبلات يحتوى عازلها أو أغلفتها على الكلورين تكون دخان اسود كثيف ، ويتسبب هذا الدخان فى اعاقة عمليات مكافحة النيران وكذا عمليات إخلاء المباني وإنقاذ السكان اثناء الحريق ولذلك فهناك اختبار خاص تم توصيفه لتقييم الكبلات المصنوعة من مواد خاصة ينتج عن احتراقها كثافة اقل للدخان فى حالة الحريق (IEC-TC20) .

المحافظة على العزل فى ظروف الحريق :

تتطلب بعض المنشآت ان تظل الكبلات الكهربائية تؤدي وظيفتها فى تغذية الطاقة الكهربائية ولفترة من الزمن أثناء الحريق ، وقد تم وضع اختبارات قياسية معينة تخضع لها الكبلات للتأكد من توفير هذه الخاصية فيها. وطبقا لتوصيات اللجنة الكهربائية الدولية IEC 331 فان الكبل المقاوم للحريق هو ذلك الكبل الذي يستمر فى أدائه العادي أثناء وبعد تعرضه للحريق لمد طويلة.

2.6.3 تحسين خصائص الكبلات فى ظروف الحريق

هناك اتجاهان رئيسيان يمكن اتباعهما لتحسين خصائص الكبلات فى ظروف الحريق:

- عدم المساهمة فى انتشار النار سواء فى الوضع الرأسى أو الأفقى.
 - عدم توليد توليد دخان كثيف.
 - عدم توليد غازات تآكلية (corrosive) أو سامة.
- وسنتناول فيما يلي كل خاصية من هذه الخواص بشيء من التفصيل.

الحد من انتشار النار:

أظهرت الخبرة العملية ان الكبل المنفرد المعزول بمادة كلوريد البوليفينيل والمغلف بنفس المادة لا يساعد على انتشار الغاز اذا كان فى وضع راسى وذلك عل عكس اذا وضعت الكبلات فى شكل حزمة او على التوازي. وهناك اختبار خاص لهذه الخاصية حيث توضع الكبلات على شكل حزمة رأسية ويتم اشعال النار بها تحت ظروف معينة ، واذا اجتازت هذا الاختبار تصنف على انها مثبتة الاشتعال (flame retardant). وهناك اختبار آخر يستخدم للتمييز بين المواد من وجهة نظر مقاومتها للاشتعال الا وهو اختبار مؤشر الأوكسوجين (oxygen index - OI) فكلما زادت قيمة هذا المؤشر كما كانت المادة اكثر مقاومة لانتشار النار او لا تساعد على الاحتراق.

تآكلية غازات الاحتراق :

يؤدي وجود الهالوجينات فى المواد التي تصنع منها الكبلات سواء فى العوازل او فى الأغلفة - مثل الكلورين والبرومين والفلورين - الى رفع درجة اشتعال المادة وبالتالي الى رفع مقاومتها لانتشار النار فى الكبل. ومن جهة أخرى - كما ذكر سابقا - فان احتواء المواد التي تصنع منها الكبلات على هذه الهالوجينات يؤدي بعد احتراقها الى تكون غازات تتسبب بدورها - باتحادها مع الماء الموجود فى الجو المحيط - فى تكوين

الاتجاه الأول:

زيادة نسبة احتواء المواد المصنوع منها الكبل (الأغلفة والعزل) على الهالوجين ، او إضافة مواد لها تأثير متعاون مع الهالوجين وبذلك يمكن إنتاج كبلات ذات خصائص جيدة بالنسبة للحد من انتشار النار . وفي هذه الحالة تتولد عند الاحتراق غازات تآكلية سامة ، ولمعالجة ذلك يستخدم إضافات أخرى للمواد التي يصنع منها الكبل بهدف التقليل من كمية الدخان الناتج على الأقل وتستخدم هذه الكبلات في بعض الدول الأوروبية في محطات القوى الكهربائية ويطلق عليها كبلات كلوريد البوليفينيل ذات الاشتعال المثبط (flame-retardant low smoke PVC cable—FR PVC) .

الاتجاه الثاني :

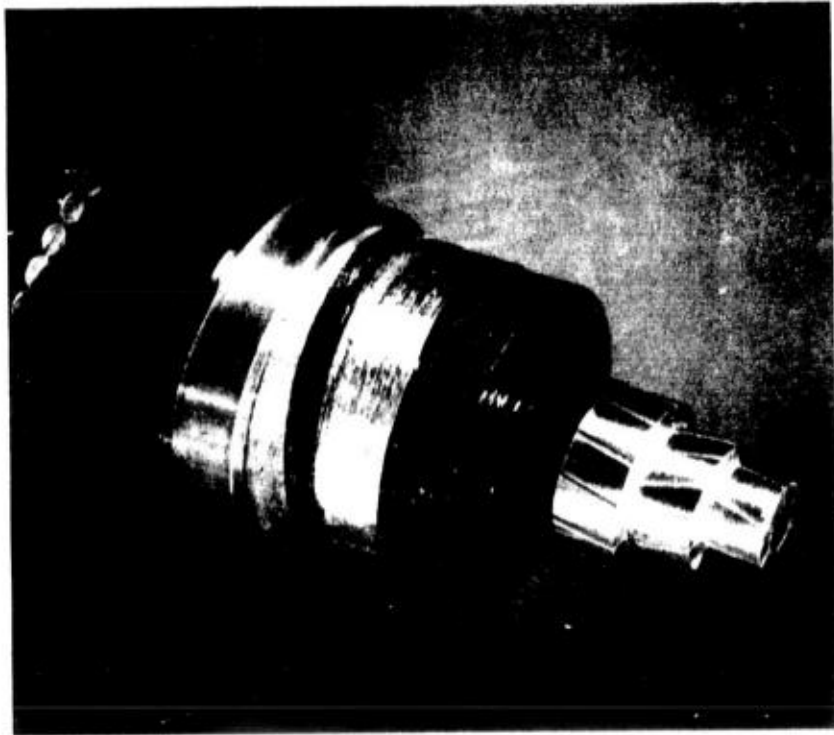
استخدام مواد بلمرية نقية (pure polyolefines) خالية تماما من أى هالوجينات في تصنيع العزل والأغلفة وذلك بهدف منع تكون لغازات التآكلية السامة اثناء الاحتراق. ويتحقق ذلك باستخدام مركبات خاصة ، ومثال ذلك إضافة مادة ثالث اوكسيد هيدرات الألومنيوم (aluminum trihydrate) - حوالي 60% بالوزن - في تصنيع هذه الكبلات. وفي حالة حدوث حريق ينتج عن هذه المادة تكون ماء عند درجة حرارة 170 °C :



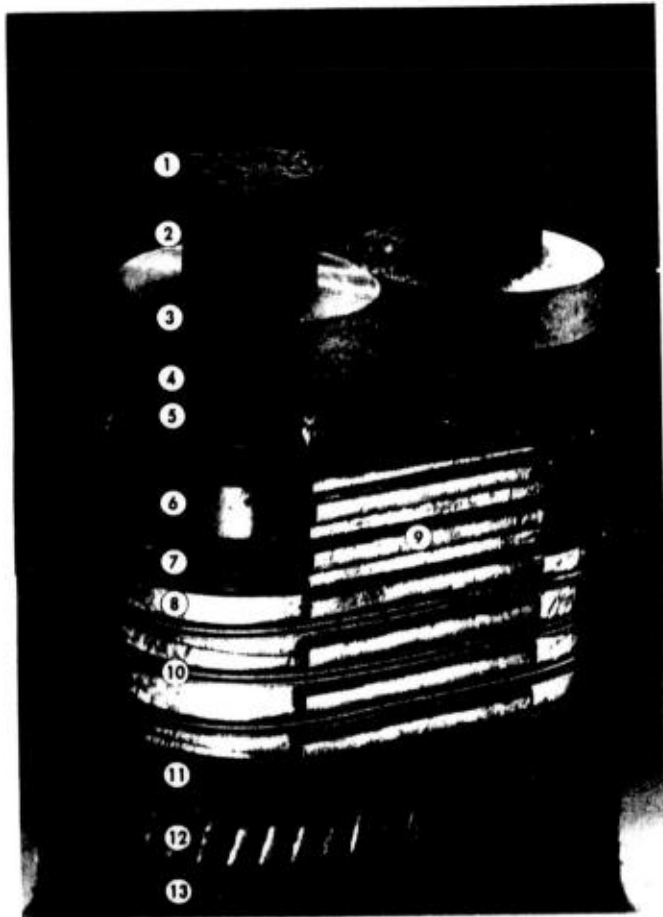
والبخار الناتج عن تبخر هذا الماء يخفف من تركيز الغازات القابلة للاحتراق ويساعد على إخماد النار.



شکل 14.3



شكل 18.3



FT-cable cross section

- | | |
|-------------------------------------|--------------------------------------|
| 1- Copper conductor | 7- Protection layer |
| 2- Carbon black paper | 8- Galvanised steel tape |
| 3- Oil-impregnated paper insulation | 9- Corrugated, galvanised steel tape |
| 4- Carbon black paper | 10- Galvanised steel binding wire |
| 5- Copper foil | 11- Layer of polypropylene yarn |
| 6- Lead sheath | 12- Galvanised steel wire armour |
| | 13- Layer of polypropylene yarn |

شكل 19.3

الباب الرابع

تحديد سعة الكبل لحمل التيار

1.4 مقدمة

يعتبر العامل الأساسى الذى يتم بناء عليه اختيار حجم ونوع الكبل المناسب لظروف التشغيل هو سعة الكبل لحمل التيار (current carrying capacity) تحت ظروف التشغيل المعنية . وتتحدد هذه السعة لطرز معين من الكبلات طبقاً للحد الأقصى لدرجة حرارة الموصل المسموح بها عند التشغيل (maximum permissible conductor temperature) والتي تعتمد على الخصائص الحرارية للكبل ذاته وكذا البيئة المحيطة به (حسب طريقة مد الكبل) أى أنها تعتمد على معدل تبديد الحرارة المولدة فى الكبل نفسه .

ويعطى الجدول 1-4 درجة حرارة الموصل القصوى المسموح بها لمختلف أنواع الكبلات طبقاً للمواصفات الدولية IEC .

وهناك ثلاثة مصادر للحرارة فى الكبل :

(أ) الفقد الأومى الناتج عن المقاومة الأومية للموصل

(ب) الفقد الأومى فى الغلاف والدرع

(ج) الفقد فى العزل

وقد أوضحنا في الباب الثاني أن المفقودات الأومية (ا، ب) تؤخذ فى الاعتبار باستخدام المقاومة الفعالة للموصل (معادلة 2-6). أما الفقد فى

جدول 4-1 القيمة القصوى لدرجة حرارة الموصل لمختلف أنواع الكبلات

| القيمة القصوى لدرجة حرارة الموصل (°C) | تصميم الكبل | نوع العزل |
|---------------------------------------|-------------|------------------------|
| 80 | حزمى | ورق مشرب (حتى 6 ك ف) |
| 65 | حزمى | ورق مشرب (6 - 10 ك ف) |
| 70 | ذو حجاب | ورق مشرب (6 - 15 ك ف) |
| 65 | ذو حجاب | ورق مشرب (12 - 30 ك ف) |
| 70 | أيا كان | PVC |
| 70 | أيا كان | PE |
| 85 | أيا كان | مطاط البيوتاتيل |
| 60 | أيا كان | مطاط طبيعى |
| 90 | أيا كان | EPR |
| 90 | أيا كان | XLPE |

العزل فيتم حسابه من المعادلة (1 - 42) ويمكن إهماله بالنسبة للكبلات إلى PVC حتى جهد تشغيل 6 ك ف وللكبلات ذات العزل المشرب حتى 30 ك ف وللكبلات ال XLPE حتى 110 ك ف. ويجب أن يؤخذ هذا الفقد فى الاعتبار بالنسبة لجميع الكبلات الأخرى .

وفى حالة الاستقرار فإن معدل تبديد الحرارة يكون مساوياً لمعدل توليد الحرارة الناتجة عن جميع المفقودات فى الكبل .

وإذا كان الكبل موضوعاً فى الهواء تنتقل الحرارة من الكبل إلى الهواء المحيط عن طريق الحمل والإشعاع ، أما إذا كان الكبل مدفوناً فى الأرض فتنتقل الحرارة من سطح الكبل إلى المحيط الجوى عن طريق الحمل عبر الأرض . ويعتمد التبديد الحرارى - وبالتالي درجة الحرارة التى يصل إليها الموصل - على المقاومة الحرارية للكبل وعلى طبيعة التربة .

ونظراً لأهمية الاعتبارات الحرارية فى تحديد سعة الكبلات لحمل التيار فسوف نقدم فيما يلى تحليلاً نظرياً لكيفية تحديد هذه السعة حتى تتوفر للقارئ خلفية علمية لطريقة التوصل إلى قيم سعة حمل التيار المدرجة فى الجداول التى يصدرها مصنعي الكبلات .

2.4 التدفق الحرارى فى الكبل

يمكن اعتبار أن قانون سريان الحرارة فى الكبل مناظر لقانون أوم لسريان التيار الكهربى :

- التدفق الحرارى H (W/m) يناظر التيار I

- الفرق فى درجة الحرارة $\Delta\theta$ (°C) يناظر الفرق فى الجهد V

- المقاومة الحرارية S (°C.m/W) تناظر المقاومة الكهربائية R وحيث

أن :

$$V = IR$$

إذن

$$\Delta\theta = HS \quad (1-4)$$

وسوف ندرس التدفق الحرارى عبر الكبل فى حالتين : الحالة الأولى عندما يهمل الفقد فى العزل والحالة الثانية عندما يؤخذ هذا الفقد فى الاعتبار .

1.2.4 التدفق الحرارى عند إهمال الفقد فى العزل

يمكن تمثيل التدفق الحرارى فى الكبل بالدائرة المكافئة المبينة فى

شكل 1.4 .

تتكون المقاومة الحرارية للكبل نفسه من خمسة أجزاء :

- المقاومة الحرارية لعزل الموصل الواحد (S_i)

- المقاومة الحرارية للغلاف

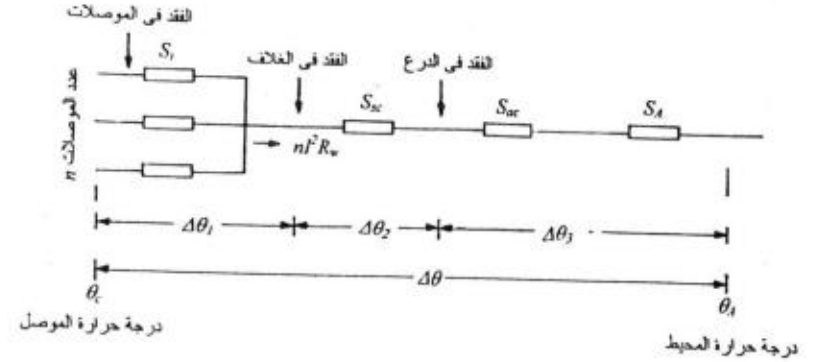
- المقاومة الحرارية للغطاء الوقائى للغلاف (S_{sc})

- المقاومة الحرارية للدرع (إن وجد)

- المقاومة الحرارية للغطاء الوقائي للدرع (S_{ac})

- المقاومة الحرارية للوسط المحيط (S_A)

ويمكن دائماً إهمال المقاومة الحرارية لكل من الغلاف والدرع نظراً لصغر قيمتها بالنسبة للمقاومات الأخرى .



شكل 1.4 الدائرة المكافئة للتدفق الحراري في كبل

ويبين الشكل 1.4 نقط تغذية المفقودات الحرارية المختلفة . وفي الشكل تمثل S_A المقاومة الحرارية للوسط الذي يتواجد فيه الكبل (هواء أو أرض). ويمكن حساب الفرق في درجة الحرارة عبر كل جزء من المقاومات الحرارية من المعادلة (1-4) كالتالي :

أ- الارتفاع في درجة الحرارة $\Delta\theta_1$ عبر العزل الناتج عن الفقد الأومي في الموصل :

$$\Delta\theta_1 = I^2 R_{dc} (1 + \chi_s + \chi_p) S_i$$

حيث I هو التيار في الموصل و $R_{dc} (1 + \chi_s + \chi_p)$ هي مقاومة الموصل للتيار المتردد (معادلة 1-5) .

ب- الارتفاع في درجة الحرارة $\Delta\theta_2$ عبر غطاء الغلاف الناتج عن الفقد الأومي في الغلاف والفقد الأومي في الموصلات :

$$\Delta\theta_2 = nI^2 R_{dc} (1 + \chi_s + \chi_p) (1 + \lambda) S_{sc}$$

ونلاحظ هنا ضرورة استخدام عامل الضرب n (عدد الموصلات) حيث أن الفقد الحراري عبر الغلاف ناتج عن الفقد الأومي في جميع الموصلات.

ج- الارتفاع في درجة الحرارة $\Delta\theta_3$ عبر غطاء الدرع والناتج عن الفقد الأومي في الدرع والغلاف والموصلات :

$$\Delta\theta_3 = nI^2 R_{dc} (1 + \chi_s + \chi_p) (1 + \lambda + \lambda_1) (S_{ac} + S_A)$$

والارتفاع في درجة حرارة الموصل بالنسبة لدرجة حرارة المحيط θ_A هو إذن :

$$\Delta\theta = \Sigma \Delta\theta_i = nI^2 R_{dc} (1 + \chi_s + \chi_p) (1 + \lambda + \lambda_1) \left[\frac{S_i/n}{1 + \lambda + \lambda_1} + \frac{S_{sc}(1 + \lambda)}{1 + \lambda + \lambda_1} + S_{ac} + S_A \right]$$

وبالتعويض بقيمة R_w من المعادلة (1-7) نجد أن :

$$\Delta\theta = nI^2 R_w \left[\frac{S_i/n + S_{sc}(1 + \lambda)}{1 + \lambda + \lambda_1} + S_{ac} + S_A \right]$$

$$(2-4) \quad \Delta\theta = nI^2 R_w [S_c' + S_A]$$

حيث

$$S_c' = \frac{S_i/n + S_{sc}(1 + \lambda)}{1 + \lambda + \lambda_1} + S_{oc}$$

وهي تمثل المقاومة الحرارية الافتراضية للكبل حيث أن المقاومة الفعلية هي :

$$S_c = \frac{S_i}{n} + S_{sc} + S_{oc}$$

وإذا كان الكبل غير مدرع $\lambda_1 = 0$ و $S_{oc} = 0$ ونجد أن:

$$S_c' = S_c = (S_i/n) + S_{sc}$$

ومن المعادلة (2-4) نجد أن سعة الكبل لحمل التيار هي :

$$I = \sqrt{\frac{\Delta\theta}{nR_w(S_c' + S_A)}}$$

$$I = \sqrt{\frac{\theta_c - \theta_A}{nR_w(S_c' + S_A)}} = k\sqrt{\Delta\theta} \quad (3-4)$$

حيث تمثل θ_c القيمة القصوى لدرجة حرارة الموصل المسموح بها .

وتحدد السعة المقننة لحمل التيار (rated current-carrying capacity) لأي كبل بقيمة التيار الذي يمكن أن يمر في موصل الكبل دون أن تتعدى درجة حرارة الموصل الحد الذي يحدده نوع العزل (جدول 4 - 1) وذلك على أساس أن الوسط المحيط بالكبل هو هواء عند درجة حرارة θ_{An} نعين قيمتها على حسب المواصفات القياسية المتبعة. وتصبح المعادلة (3 - 4):

$$I_n = k\sqrt{\Delta\theta_n} \quad (4-4)$$

$$\Delta\theta_n = \theta_c - \theta_{An}$$

حيث $\Delta\theta_n$ هو الارتفاع المقنن في درجة حرارة الموصل . وإذا اختلفت درجة حرارة الهواء عن القيمة القياسية ، وكانت θ_A بدلا من θ_{An} فإن سعة حمل التيار تصبح :

$$I = k\sqrt{\theta_c - \theta_A} = k\sqrt{\Delta\theta}$$

جدول 4 - 2 عامل التعتين f_θ لدرجة حرارة الهواء [1]

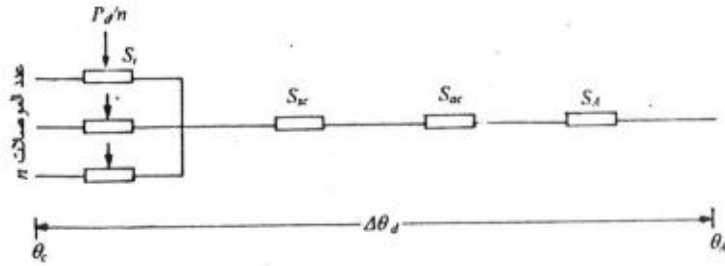
| نوع الكبل | درجة حرارة الهواء | | | | | | | | |
|---|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 10 °C | 15 °C | 20 °C | 25 °C | 30 °C | 35 °C | 40 °C | 45 °C | 50 °C |
| | عامل التعتين | | | | | | | | |
| XLPE | 1.15 | 1.12 | 1.08 | 1.04 | 1.0 | 0.96 | 0.91 | 0.87 | 0.82 |
| PE & PVC | 1.22 | 1.17 | 1.12 | 1.06 | 1.0 | 0.94 | 0.87 | 0.79 | 0.71 |
| كبلات الورق المشرب | | | | | | | | | |
| حزمية حتى 6 ك ف | 1.05 | 1.05 | 1.05 | 1.05 | 1.0 | 0.95 | 0.89 | 0.84 | 0.77 |
| حزمية حتى 10 ك ف | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 0.93 | 0.85 | 0.76 | 0.65 |
| كبلات أحادية القلب بغلاف من الرصاص أو من طراز H حتى 6 ك ف | 1.05 | 1.05 | 1.05 | 1.05 | 1.0 | 0.95 | 0.89 | 0.84 | 0.77 |
| حتى 10 ك ف | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.0 | 0.94 | 0.87 | 0.79 | 0.71 |
| حتى 20 ك ف | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 0.93 | 0.85 | 0.76 | 0.65 |
| حتى 30 ك ف | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 0.91 | 0.82 | 0.71 | 0.58 |

ومن المعادلتين (3 - 4) و (4 - 4) نجد أن :

$$\frac{I}{I_n} = \sqrt{\frac{\Delta\theta}{\Delta\theta_n}}$$

$$I = I_n \sqrt{\Delta\theta/\Delta\theta_n}$$

$$= f_\theta I_n \quad (5-4)$$



شكل 4.2 الدائرة المكافئة للفقد في العزل

والارتفاع الاضافى فى درجة حرارة الموصل نتيجة لتدفق الفقد فى العزل هو :

$$\Delta\theta_d = \frac{1}{2n} P_d S_i + P_d (S_{sc} + S_{ac} + S_A)$$

$$= P_d (\frac{1}{2n} S_i + S_{sc} + S_{ac}) + P_d S_A$$

$$\Delta\theta_d = P_d (S_{cd}' + S_A)$$

حيث

$$S_{cd}' = (\frac{1}{2n} S_i + S_{sc} + S_{ac})$$

وتمثل المقاومة الافتراضية للكبل .

والارتفاع الكلى فى درجة حرارة الموصل هو إذن $\Delta\theta_T$ حيث :

$$\Delta\theta_T = \Delta\theta + \Delta\theta_d = \theta_c - \theta_A$$

ومنها فإن :

$$\Delta\theta = (\theta_c - \theta_A) - \Delta\theta_d$$

حيث $\Delta\theta$ هى الارتفاع فى درجة حرارة الموصل نتيجة للفقد الأومى .
وتصبح سعة الكبل لحمل التيار من المعادلة (4 - 3) هى :

$$I = \sqrt{\frac{(\theta_c - \theta_A) - \Delta\theta_d}{nR_n (S_{cd}' + S_A)}} \quad (6-4)$$

حيث f_θ يمثل عامل تقنين (rating factor) لدرجة حرارة الهواء .
ويعطى الجدول 2-4 قيم هذا العامل على أساس أن $\theta_{An} = 30^\circ\text{C}$.

فمثلاً إذا افترضنا أن نوع الكبل هو XLPE وأن درجة حرارة الهواء المحيط هى 40°C نجد من المعادلة (4 - 5) أن

$$I = I_n \sqrt{\frac{90 - 40}{90 - 30}}$$

$$= 0.91 I_n$$

وإذا كان الكبل من الورق المشرب ومحزم لجهد حتى 10 ك ف نجد أن

$$I = I_n \sqrt{\frac{65 - 40}{65 - 30}}$$

$$= 0.85 I_n$$

وهناك عوامل أخرى تؤثر على قيمة السعة المقننة لحمل التيار مثل نوع الوسط الذى يمد فيه الكبل ودرجة حرارته ومقاوميته الحرارية الخ .
وسوف نتناول هذا الموضوع بالتفصيل فى الفقرة 4.4 .

2.2.4 التدفق الحرارى مع الأخذ فى الإعتبار الفقد فى العزل

يبين الشكل 4 . 2 الدائرة المكافئة لكبل به فقد فى العزل . ويمكن تمثيل تأثير ذلك الفقد تماماً كما لو أن الفقد الكلى يدخل من عند منتصف المقاومة الحرارية للعزل ($S_i/2$) ذلك علماً أنه فى واقع الأمر هذا الفقد موزع خلال جسم العزل بأكمله .

والفقد الكلى فى العزل لكبل به عدد n من الموصلات هو طبقاً للمعادلة (1 - 42) هو :

$$P_d = \frac{1}{3} n \omega C U^2 \tan \delta$$

حيث C هى سعة التشغيل (operating capacitance) و U جهد التشغيل.

حيث θ_c هي القيمة القصوى المسموح بها لدرجة حرارة الموصل . من الواضح من المعادلتين (4 - 3) و (4 - 6) أن الفقد في العزل يقلل من قيمة سعة الكبل لحمل التيار .

من الواضح مما سبق أن سعة الكبل لحمل التيار تعتمد أساساً على المقاومة الحرارية لأجزاء الكبل المختلفة والمقاومة الحرارية للوسط المحيط بالكبل وسوف نبين فيما يلي كيف يمكن حساب هذه المقاومات .

3.4 المقاومة الحرارية

1.3.4 المقاومة الحرارية (thermal resistance) لكبل أحادي القلب

فلنفرض أن لدينا كبل أحادي القلب طوله متر واحد ومكون من موصل وعزل وغطاء وقائي للغلاف وغطاء وقائي للدرع كما هو مبين في الشكل 3.4 . المقاومة الحرارية لحاقة سمكها dx هي :

$$dS = \frac{\sigma dx}{2\pi x}$$

حيث σ = المقاومة الحرارية للوسط ، ووحداتها [°C.m/W]

المقاومة الحرارية للعزل هي إذا :

$$S_i = \frac{\sigma_i}{2\pi} \ln \frac{D}{d}$$

ومن الواضح أن المقاومة الحرارية للكبل هي

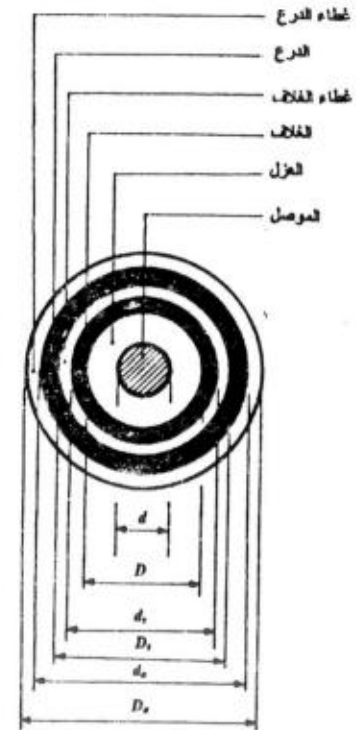
$$S_c = S_i + S_{sc} + S_{ac}$$

$$(7-4) \quad S_c = \frac{\sigma_i}{2\pi} \ln \frac{D}{d} + \frac{\sigma_{sc}}{2\pi} \ln \frac{D_s}{d_s} + \frac{c_{ac}}{2\pi} \ln \frac{D_o}{d_o}$$

وقد تم إهمال المقاومة الحرارية للغلاف وللدرع نظراً لصغر قيمة المقاومة الحرارية للمعادن .

جدول 3-4 المقاومة الحرارية للمواد المستخدمة في صناعة الكبلات

| المادة | σ [°C.m/W] |
|-------------------|-----------------------|
| رصاص | 2.9×10^{-2} |
| ألومنيوم | 0.48×10^{-2} |
| XLPE | 3.5 |
| PE | 3.5 |
| PVC | 6.0 |
| ورق مشرب | 5 - 6 |
| جوت مشرب بالقطران | 6 |

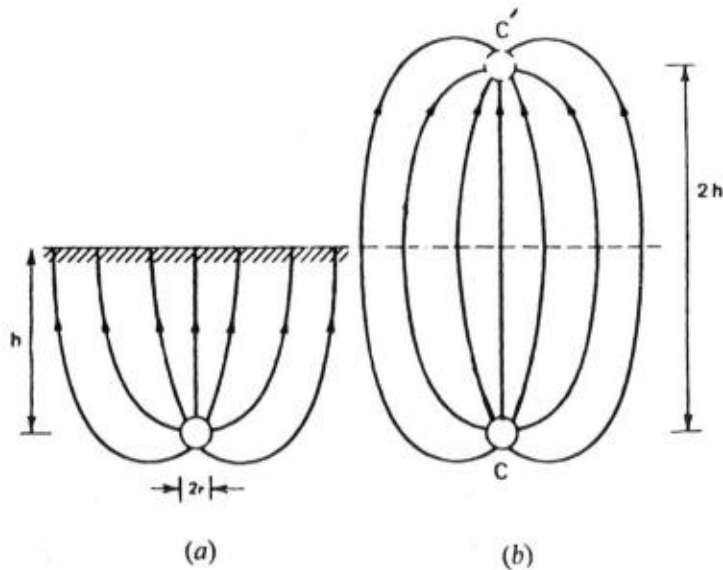


شكل 3.4

ويعطى الجدول 4 - 3 قيم المقاومة الحرارية σ للمواد المستخدمة فى صناعة الكبلات .

1.3.3.4 المقاومة الحرارية للأرض

فلنفرض أن لدينا كبل نصف قطره r مدفون مباشرة فى الأرض على عمق h متر من السطح . سنفترض أن المقاومة الحرارية للتربة منتظمة وأن سطح الأرض يمثل مستوى متساوى الحرارة . وبما أن الغلاف المعدني للكبل له موصلية حرارية جيدة فيمكن اعتبار أن سطح الكبل يمثل هو أيضاً سطحاً متساوياً الحرارة . ويمكن إيجاد المقاومة الحرارية



شكل 4.4 المجال الحرارى لكبل مدفون فى الأرض

للأرض بطريقة تناظر تلك التى تستخدم فى إيجاد السعة بين موصل والأرض وهى طريقة الصور (method of images) . ويبين الشكل 4.4 مجال انقيص الحرارى بين الكبل وسطح الأرض . وهذا

2.3.4 المقاومة الحرارية لكبل ثلاثي القلب

حيث أن المجال الحرارى ليس نصف قطرياً فى الكبل الثلاثي القلب ، لذلك فإنه لمن الصعب حساب المقاومة الحرارية بين أى من الموصلات وغلاف الكبل . ولكن بناء على العديد من التجارب العملية فيمكن الحصول على قيمة المقاومة الحرارية بدقة كافية من المعادلة التجريبية الآتية ، وذلك للكبلات الثلاثية القلب المحزمة (belted):

$$(7-4) \quad S_r = \frac{\sigma_r}{6\pi} \left(0.85 + \frac{0.2t}{T} \right) \ln \left[\left(4.15 - \frac{1.1t}{T} \right) \left(\frac{T+t}{r} \right) + 1 \right]$$

حيث t = سمك الخزام

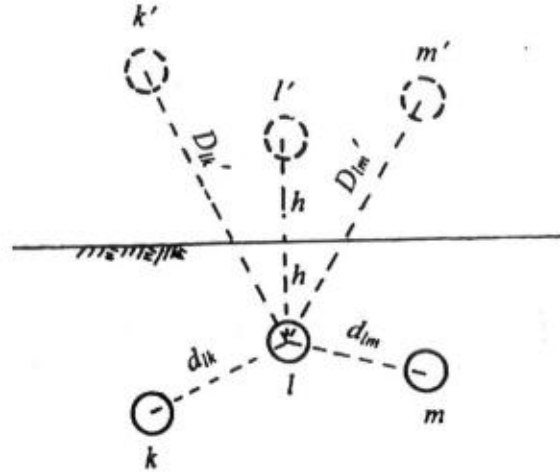
T = سمك العزل حول كل موصل

r = نصف قطر الموصل

σ_r = المقاومة الحرارية للعزل

3.3.4 المقاومة الحرارية للوسط المحيط بالكبل

نرى من المعادلتين (4-3) و (4-6) أن قيمة الارتفاع فى درجة حرارة موصل الكبل تعتمد على المقاومة الحرارية للكبل و على المقاومة الحرارية S_r للوسط المحيط بالكبل . وفى غالبية التطبيقات نمد الكبلات إما فى الأرض (حيث يتم دفنها مباشرة أو بداخل برالبخ - ducts) أو فى الهواء .



شكل 5.4

$$S_l = \frac{\sigma_g}{2\pi} \left[\ln \frac{2h}{r} + \ln \frac{D'_{lm} D'_{lk} \dots}{d_{lm} d_{lk} \dots} \right] \quad (9-4)$$

$$= \frac{\sigma_g}{2\pi} \ln \frac{2h}{r} + \sigma_g \Sigma \delta$$

حيث

$$\Sigma \delta = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{D'_{lm} D'_{lk} \dots}{d_{lm} d_{lk} \dots} \quad (10-4)$$

وهي كمية تعرف بعامل التجمع (grouping factor). والكمية $H\Sigma\delta$ تمثل الارتفاع الإضافي في درجة حرارة الكبل l نتيجة لوجود الكبلات الأخرى بجواره. ومن الواضح أن هذا الارتفاع الإضافي في الحرارة يؤدي إلى الإقلال من سعة الكبل لحمل التيار. ويؤخذ هذا في الاعتبار عملياً باستخدام عامل تقنين مناسب كما سنوضح في الفقرة 4.5.5.

المجال مساو للمجال بين الكبل C وصورته الحرارية C' (thermal image) كما هو مبين في الشكل 4b.4.

وتكون السعة الكهربائية بين الكبل وصورته هي،

$$C = \frac{2\pi\epsilon}{\ln \frac{2h}{r}}$$

وحيث أن العلاقة بين السعة والمقاومة الكهربائية هي،

$$RC = \rho\epsilon$$

فالمقاومة بين سطح الأرض والكبل هي إذن،

$$R = \rho\epsilon/C = \frac{\rho}{2\pi} \ln \frac{2h}{r}$$

ومن التناظر بين الخواص الكهربائية والخواص الحرارية فإن المقاومة الحرارية بين الكبل والأرض S_g تكون،

$$S_g = \frac{\sigma_g}{2\pi} \ln \frac{2h}{r} \quad ^\circ\text{C.m/W} \quad (8-4)$$

وإذا افترضنا أن

$$d = 5 \text{ cm}, \quad \sigma_g = 1.0 \text{ } ^\circ\text{C.m/W}, \quad h = 1 \text{ m}$$

نجد أن:

$$S_g = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{200}{2.5} = 0.7 \quad ^\circ\text{C.m/W}$$

وفي حالة وجود أكثر من كبل واحد (شكل 5.4) يمكن تعميم المعادلة (8-4) لكي تصبح المقاومة الحرارية للأرض بالنسبة للكبل l مثلاً:

2.3.3.4 المقاومة الحرارية للهواء

تنتقل الحرارة من الكبل إلى الهواء المحيط به عن طريق الحمل (convection) وعن طريق الإشعاع (radiation). والمقاومة الحرارية للهواء S_A هي محصلة المقاومة الحرارية للحمل على التوازي مع المقاومة الحرارية للإشعاع أى أن :

$$(11-4) \quad S_A = \frac{1}{\pi d (f_c \alpha_c + f_r \alpha_r)} \text{ } ^\circ\text{C.m/W}$$

حيث

$$d = \text{قطر الكبل}$$

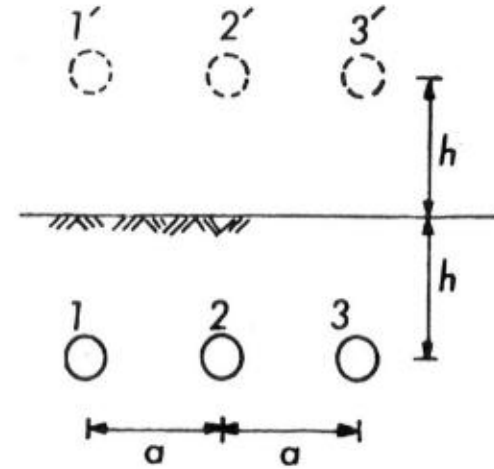
$$\alpha_c = \text{عامل انتقال الحرارة عن طريق الحمل}$$

$$\alpha_r = \text{عامل انتقال الحرارة عن طريق الإشعاع}$$

$$f_c, f_r = \text{عوامل تعتمد قيمة كل منهما على شكل الكبلات (شكل 4 . 7)}.$$

ولكبل ممتد أفقياً فى الهواء الطلق بدون إعاقة لانتقال الحرارة عن طريق الحمل أو الإشعاع وعند درجة حرارة متوسطة 30°C وضغط جوى عادى (760 mmHg) :

¹ تعرف درجة الحرارة المتوسطة بأنها $(\theta_0 + \theta_1) / 2$



شكل 6.4

وفى أغلب الحالات يكون الشكل التجمعي مكوناً من ثلاثة كبلات منفردة ذات شكل منبسط كما هو مبين فى الشكل 6.4 . وفى هذه الحالة نجد أن:

$$S_1 = S_3 = \frac{\sigma_k}{2\pi} \left(\ln \frac{2h}{r} + \ln \frac{\sqrt{(2h)^2 + a^2} \sqrt{(2h)^2 + (2a)^2}}{2a^2} \right)$$

$$S_2 = \frac{\sigma_k}{2\pi} \left(\ln \frac{2h}{r} + \ln \frac{\sqrt{(2h)^2 + a^2} \sqrt{(2h)^2 + a^2}}{a^2} \right)$$

$$(12a-4) \quad \alpha_c = \frac{0.0185}{kd} + 1.08 \left(\frac{\Delta\theta_0}{kd} \right)^{1/4} \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$(12b-4) \quad \alpha_c = \varepsilon_0 \cdot 5.67 \times 10^{-8} \left[\frac{(273 + \theta_0)^4 - (273 + \theta_A)^4}{\Delta\theta_0} \right] \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

حيث

الارتفاع في درجة حرارة سطح الكبل = $\Delta\theta_0$ الابتعاثية الحرارية (emissivity) لسطح الكبل = ε_0

لكبل مغطى بطبقة من الجوت = 1

لكبل مغطى بطبقة من ال PVC = 0.95

عامل تعتمد قيمته على تشكل الكبلات (شكل 7.4) = k

من الواضح من المعادلات (4-1) و (4-12) انه بالنسبة لكبل ما له قطر معين d فإن كل من المقاومة الحرارية للهواء لهذا الكبل (S_A) والارتفاع في درجة حرارة سطحه $\Delta\theta_0$ تعتمد كل منهما على الاخرى . ويمكن الحصول على $\Delta\theta_0$ كالآتي (شكل 8.4) :

الارتفاع في درجة الحرارة عند سطح الكبل نتيجة للفقد في العزل P_d :

$$\Delta\theta' = P_d S_A$$

الارتفاع في درجة الحرارة عند سطح الكبل نتيجة للفقد الأومي في الكبل :

$$\Delta\theta'' = nI^2 R_w S_A$$

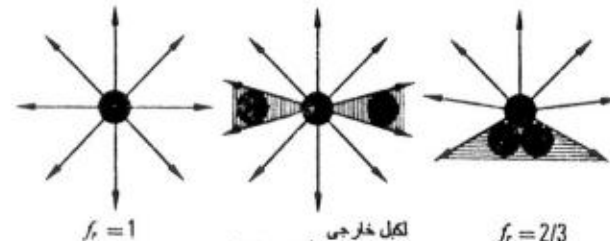
وحيث أن من المعادلة (4-6) :

$$nI^2 R_w = \frac{(\theta_c - \theta_A) - \Delta\theta_d}{S'_c + S_A}$$

فالارتفاع الكلي لدرجة حرارة سطح الكبل هو إذا

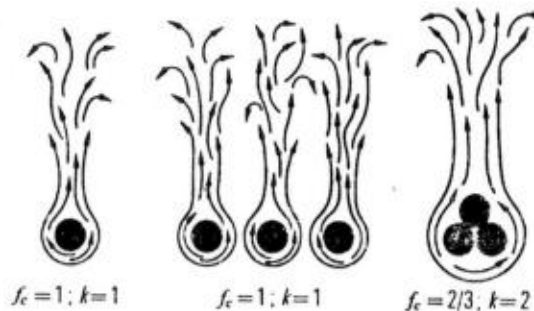
$$\Delta\theta_0 = \Delta\theta' + \Delta\theta''$$

$$(13-4) \quad = P_d S_A + \frac{[(\theta_c - \theta_A) - \Delta\theta_d] S_A}{S'_c + S_A}$$



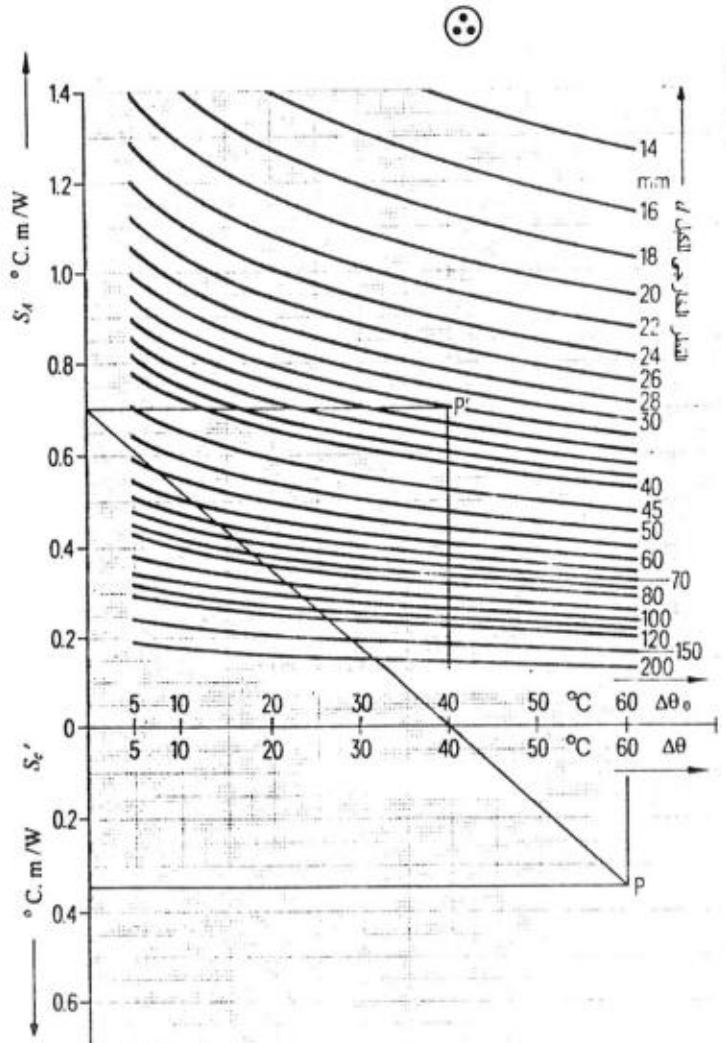
لكبل خارجي
 $f_c = 1 - \sin^{-1}((d/2a)/180^\circ)$
 للكل المركزي
 $f_c = 1 - 2 \sin^{-1}((d/2a)/180^\circ)$
 a = المسافة بين الكبلات

تبديد الحرارة بالاشعاع

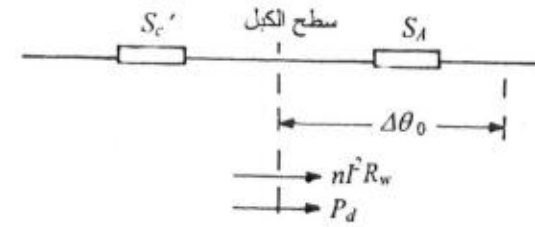


تبديد الحرارة بالحمل

شكل 7.4 التبديد الحراري للكبلات الموضوعة في الهواء [1]



شكل 9.4 المقاومة الحرارية للهواء للكابلات الثلاثية القلب



شكل 8.4

وإذا أهملنا الفقد في العزل نجد أن

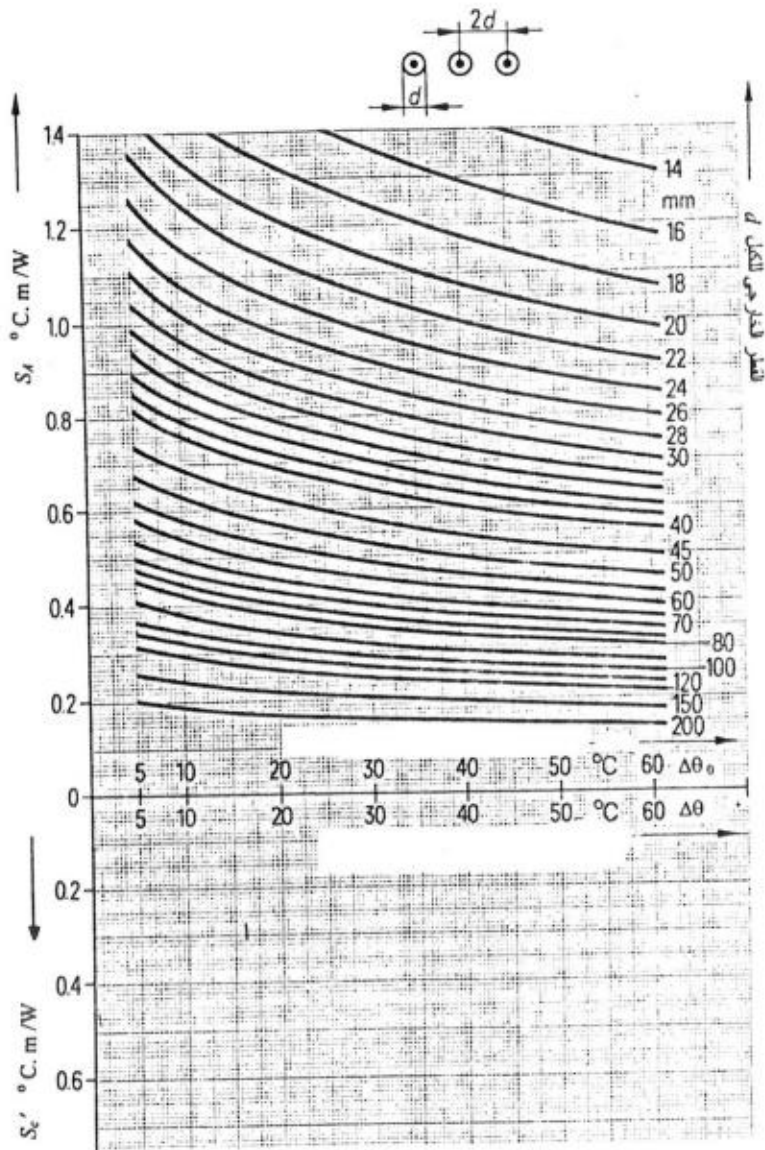
$$(14-4) \quad \Delta\theta_0 = \frac{\theta_c - \theta_A}{S'_c + S_A} S_A = \frac{\Delta\theta}{S'_c + S_A} S_A$$

حيث $\Delta\theta$ هو الحد الأقصى المسموح به للارتفاع في درجة حرارة موصل الكابل . ومن المعادلة (14 - 4) نجد أن :

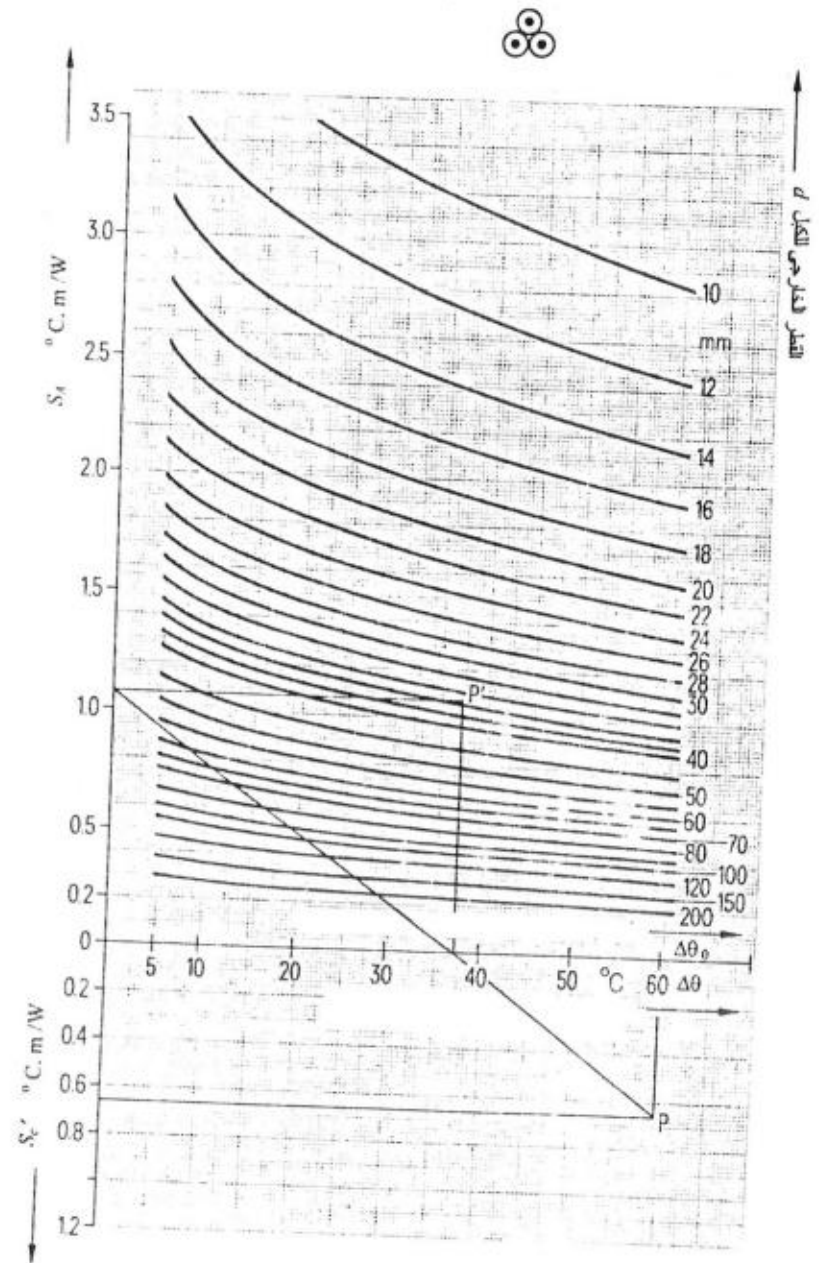
$$(15-4) \quad \frac{\Delta\theta}{\Delta\theta_0} = \frac{S'_c + S_A}{S_A}$$

وكما ذكرنا أعلاه فإن قيمة S_A ليست ثابتة . وإنما تتوقف على الارتفاع في درجة حرارة سطح الكابل $\Delta\theta_0$ وعلى قطر الكابل d كما هو واضح من المعادلات (11 - 4) و (12 - 4). وعادة يتم تمثيل العلاقة بين $\Delta\theta_0$ و S_A لمختلف تشكيلات الكابلات بواسطة مجموعة من المنحنيات لكل

تشكل كما هو مبين في الأشكال 9.4 إلى 11.4 .



شكل 4. 11 المقاومة الحرارية للهواء لكبلات أحادية القلب ذات شكل منبسط



شكل 4. 10. المقاومة الحرارية للهواء لكبلات أحادية القلب ذات شكل ثلاثي

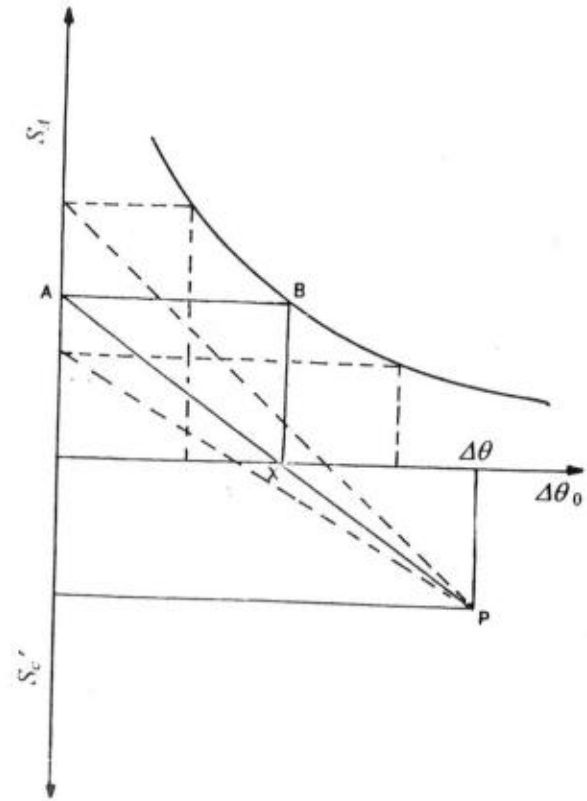
ولعل أفضل طريقة لحل المعادلة (4 - 15) هي طريقة الحل البياني بالمحاولة والخطأ (trial and error) كالآتي :

إذا كان لدينا كبل من نوع معين وقطره d فإن قيمة كل من الارتفاع المسموح به في درجة حرارة الموصل $\Delta\theta_c$ ومقاومته الحرارية الافتراضية S_c' معلومة ويمكن تمثيلها بالنقطة P في الشكل 4 . 12. ويجب اختيار ميل الخط المستقيم PA بحيث يتحقق شرط تطابق نقطة تقاطع PA بالمحور الأفقى (عند X) مع مسقط النقطة B على نفس المحور حيث النقطة B هي تقاطع الخط الأفقى AB مع المنحنى الخاص بالقطر d . ويمكن التوصل الى الميل الصحيح للخط PA بعد ثلاث أو أربع محاولات (الخطوط المنقطة في الشكل 4 . 12).

4. 4 عوامل التقنين (rating factors)

يتضح مما سبق أن حساب المقاومات الحرارية المختلفة لتحديد سعة الكبل لحمل التيار هي عملية شاقة ولكنها ضرورية بالنسبة لتصميم الكبلات إلا أن هذه الحسابات ليست عملية بالنسبة لاختيار الكبل المناسب لتطبيق معين ، ولذلك فإن الشركات المصنعة للكبلات تصدر جداول سعة حمل التيار للكبلات المختلفة الأنواع التي تنتجها . ويتم تحديد هذه السعة على أساس أن الكبلات تعمل تحت ظروف تشغيل " طبيعية " أو قياسية (normal conditions) . وإذا اختلفت ظروف التشغيل الواقعية عن الظروف القياسية فيجب تصحيح القيمة القياسية لسعة التيار تبعاً لكل ظرف على حدة بضرب هذه القيمة في عامل تقنين (rating factor) خاص بهذا الظرف . وتقوم شركات الكبلات بأعداد جداول خاصة لعوامل التقنين المختلفة التي يجب استخدامها تحت ظروف التشغيل الفعلية .

وقد تختلف الظروف التي تعتبر طبيعية من بلد إلى آخر ولذلك فإن كل بلد يقوم بتحديد هذه الظروف طبقاً لمواصفاته القياسية التي تخص الكبلات ، إلا أنه يمكن القول أن الاختلاف بين المواصفات المختلفة لا يؤدي إلى أي



شكل 4 . 12

جدول 4 - 4 الظروف القياسية لعدة بلاد

| عمق الدفن m | مقاومية التربة °C.m/W | درجة حرارة الوسط المحيط (°C) هواء أرض | البلد |
|---|--------------------------|---|------------------|
| 1.2 - 0.7 | 1.0 | 20 | المانيا |
| 1.2 | 1.0 | 25 | اليابان |
| 0.5 (> 1 كـف) 0.8 (> 33 كـف) | 1.2 | 15 25 داخل المباني 45 في السفن | المملكة المتحدة |
| 0.9 | 0.9 | 20 | الولايات المتحدة |
| 0.8 (> 12 كـف) 1.0 (> 17.5 كـف) 1.2 (> 24 كـف) 1.5 (> 36 كـف) 1.8 (> 72 كـف) 2.2 (> 120 كـف) | 1.0 | 20 | إيطاليا |
| 0.5 (> 1 كـف) 0.8 (< 1 كـف) | 1.2 | 15 25 داخل المباني 30 في السفن 35 في السفن | IEC |

1.4.4 عامل الحمل (load factor)

يبين الشكل 4 . 13 منحنى حمل يومي نموذجي وهو يمثل التغير الذي يطرأ على الحمل (المغذى بواسطة كبل أو كبلات مدفونة) خلال 24 ساعة. ومعامل الحمل هو النسبة بين القيمة المتوسطة والقيمة القصوى للحمل خلال هذه الفترة . ولأى منحنى حمل فان القيمة القصوى للتيار (الحمل) خلال الأربع وعشرين ساعة تمثل قيمة تيار التشغيل الذي يجب ألا تقل عنها سعة الكبل لحمل التيار عند عامل الحمل للمنحنى .

وأهمية معرفة عامل الحمل هي أنه يعكس تأثير الفقد الحراري على المقاومة الحرارية للتربة المحيطة بالكبل . فكلما زادت قيمة عامل الحمل

اختلاف يذكر في تحديد مقطع الكبل المناسب لظروف تشغيله خاصة بالنسبة لكبلات التوزيع حتى جهد 33 كـف. وعلى أى حال فان جداول سعة حمل التيار التي يعدها مصنعي الكبلات تذكر فيها دائما الظروف القياسية المستخدمة لتحديد هذه السعة .

ولكى نعطي للقارئ صورة متكاملة عن كيفية إختيار عوامل التقنين عندما تختلف ظروف التشغيل عن الظروف القياسية ، فلقد فضلنا أن نستخدم المواصفات الألمانية نظرا لشمولها .
والظروف التي تؤثر على سعة الكبل لحمل التيار هي :

- عامل الحمل (load factor) - وذلك في حالة الكبلات المدفونة في الأرض فقط .
- درجة حرارة الوسط المحيط بالكبل (هواء أو أرض) ambient temperature
- عمق الدفن في حالة مد الكبل في الأرض مباشرة depth of laying
- المقاومة الحرارية للتربة soil thermal resistivity
- التشكل التجمعي للكبلات arrangement and grouping

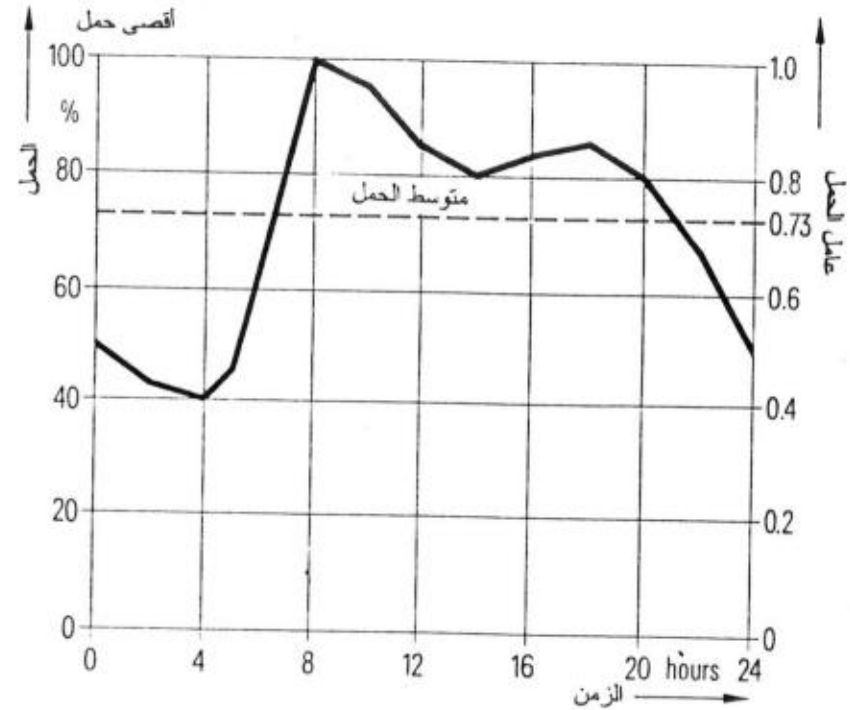
ويعطى الجدول 4 - 4 ظروف التشغيل القياسية لعدة بلاد وايضا الظروف القياسية طبقا لل IEC .

تزداد درجة جفاف هذه التربة مما يزيد بالتالي من قيمة مقاومتها الحرارية ويقلل من سعة الكبل لحمل التيار .

جدول 4 - 5 عامل التقنين لكبلات موضوعة في الهواء [1]

| Rating factors f_R for groups in air ¹⁾ | | | | | | | |
|---|--------------------------------------|--|------|------|---|------|------|
| Single-core cables in three-phase systems | | | | | | | |
| Arrangement of cables | Number of cable trays or cable racks | Installed in one plane Clearance = cable diameter d distance from wall ≥ 2 cm | | | Installation in bunches Clearance = $2d$ distance from wall ≥ 2 cm | | |
| | | Number of systems | | | Number of systems | | |
| | | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| On the floor | - | 0.92 | 0.89 | 0.88 | 0.95 | 0.90 | 0.88 |
| On cable trays | 1 | 0.92 | 0.89 | 0.88 | 0.95 | 0.90 | 0.88 |
| | 2 | 0.87 | 0.84 | 0.83 | 0.90 | 0.85 | 0.83 |
| | 3 | 0.84 | 0.82 | 0.81 | 0.88 | 0.83 | 0.81 |
| | 6 | 0.82 | 0.80 | 0.79 | 0.86 | 0.81 | 0.79 |
| On cable racks | 1 | 1.00 | 0.97 | 0.96 | 1.00 | 0.98 | 0.96 |
| | 2 | 0.97 | 0.94 | 0.93 | 1.00 | 0.95 | 0.93 |
| | 3 | 0.96 | 0.93 | 0.92 | 1.00 | 0.94 | 0.92 |
| | 6 | 0.94 | 0.91 | 0.90 | 1.00 | 0.93 | 0.90 |
| On supports or on the wall | - | 0.94 | 0.91 | 0.89 | 0.89 | 0.86 | 0.84 |
| Arrangement for which a reduction is not required ¹⁾ | | In installations in one plane with increased clearance the increased sheath or screen losses counteract the otherwise reduced temperature rise. Therefore indications as to reduction-free arrangements cannot be made here. | | | | | |

1) الأسلاك المدفونة يجب الأخذ في الاعتبار ارتفاع درجة حرارة المحيط نتيجة للتدفق واستخدام عامل التقنين المناسب من الجدول 4-2 .



شكل 4. 13 نموذج لمنحنى حمل يومي وعامل الحمل

ويعتبر (طبقاً للمواصفات الألمانية) عامل الحمل الطبيعي هو 0.7 بالنسبة للكبلات المدفونة في الأرض ، أما إذا كانت الكبلات ممدودة في الهواء فعامل الحمل لا يؤخذ في الاعتبار . وتعطى الجداول 4 - 5 إلى 4 - 9 عامل التقنين الذي يجب إن يستخدم إذا كان عامل الحمل مختلفاً عن 0.7 .

جدول 4 - 7 عامل التآين لكبلات موضوعة في الأرض [1]

Conversion factors f_1 for installation in ground¹⁾
All cables except PVC-insulated cable for $U_0/U = 6/10$ kV

| Permissible operating temperature °C | Soil temperature °C | Thermal resistivity of soil (K m/W) | | | | | | | | |
|--------------------------------------|---------------------|-------------------------------------|------|------|-------------|------|------|-------------|--|--|
| | | 1.0 | | | 1.5 | | | 2.5 | | |
| | | Load factor | | | Load factor | | | Load factor | | |
| | | 0.7 | 0.85 | 1.0 | 0.7 | 0.85 | 1.0 | 0.7 to 1.0 | | |
| 90 | 10 | 1.05 | 1.01 | 0.98 | 0.95 | 0.93 | 0.91 | 0.86 | | |
| | 15 | 1.02 | 0.99 | 0.95 | 0.92 | 0.91 | 0.89 | 0.84 | | |
| | 20 | 1.00 | 0.96 | 0.93 | 0.90 | 0.88 | 0.86 | 0.81 | | |
| | 25 | 0.98 | 0.94 | 0.90 | 0.87 | 0.85 | 0.84 | 0.78 | | |
| | 30 | | | | 0.84 | 0.83 | 0.81 | 0.75 | | |
| | 35 | | | | 0.82 | 0.80 | 0.78 | 0.72 | | |
| 80 | 10 | 1.05 | 1.01 | 0.97 | 0.94 | 0.92 | 0.91 | 0.85 | | |
| | 15 | 1.03 | 0.99 | 0.95 | 0.92 | 0.90 | 0.88 | 0.82 | | |
| | 20 | 1.00 | 0.96 | 0.92 | 0.89 | 0.87 | 0.85 | 0.78 | | |
| | 25 | 0.97 | 0.93 | 0.89 | 0.86 | 0.84 | 0.82 | 0.75 | | |
| | 30 | | | | 0.83 | 0.81 | 0.78 | 0.72 | | |
| | 35 | | | | 0.80 | 0.77 | 0.75 | 0.68 | | |
| 70 | 10 | 1.06 | 1.01 | 0.97 | 0.94 | 0.92 | 0.89 | 0.83 | | |
| | 15 | 1.03 | 0.99 | 0.94 | 0.91 | 0.88 | 0.86 | 0.79 | | |
| | 20 | 1.00 | 0.96 | 0.91 | 0.87 | 0.85 | 0.83 | 0.76 | | |
| | 25 | 0.97 | 0.93 | 0.88 | 0.84 | 0.82 | 0.79 | 0.72 | | |
| | 30 | | | | 0.80 | 0.78 | 0.76 | 0.68 | | |
| | 35 | | | | 0.77 | 0.74 | 0.72 | 0.63 | | |
| 65 | 10 | 1.06 | 1.02 | 0.97 | 0.93 | 0.91 | 0.89 | 0.82 | | |
| | 15 | 1.03 | 0.98 | 0.94 | 0.90 | 0.88 | 0.85 | 0.78 | | |
| | 20 | 1.00 | 0.95 | 0.90 | 0.86 | 0.84 | 0.82 | 0.74 | | |
| | 25 | 0.97 | 0.92 | 0.87 | 0.83 | 0.80 | 0.78 | 0.70 | | |
| | 30 | | | | 0.79 | 0.77 | 0.74 | 0.65 | | |
| | 35 | | | | 0.75 | 0.72 | 0.70 | 0.60 | | |
| 60 | 10 | 1.06 | 1.02 | 0.97 | 0.93 | 0.90 | 0.88 | 0.80 | | |
| | 15 | 1.03 | 0.98 | 0.93 | 0.89 | 0.87 | 0.84 | 0.76 | | |
| | 20 | 1.00 | 0.95 | 0.90 | 0.86 | 0.83 | 0.80 | 0.72 | | |
| | 25 | 0.97 | 0.92 | 0.86 | 0.82 | 0.79 | 0.76 | 0.67 | | |
| | 30 | | | | 0.78 | 0.75 | 0.72 | 0.62 | | |
| | 35 | | | | 0.75 | 0.70 | 0.67 | 0.57 | | |

The conversion factors for soil temperatures below 20 °C can not be applied to mass-impregnated paper-insulated cables, except the factors for 15 °C and cables with 0.6/1 kV

جدول 4 - 6 عامل التآين لكبلات موضوعة في الهواء [1]



Rating factors f_R for groups in air¹⁾
Multi-core cables and single-core cables in d.c. systems


| Arrangement of cables | Number of cable trays or cable racks | Clearance = cable diameter d / distance from wall ≥ 2 cm | | | | | Side by side without clearance and touching wall | | | | | |
|---|--------------------------------------|---|------|------|------|------|--|------|------|------|------|--|
| | | Number of cables | | | | | Number of cables | | | | | |
| | | 1 | 2 | 3 | 6 | 9 | 1 | 2 | 3 | 6 | 9 | |
| On the floor | - | 0.95 | 0.90 | 0.88 | 0.85 | 0.84 | 0.90 | 0.84 | 0.80 | 0.75 | 0.73 | |
| On cable trays | 1 | 0.95 | 0.90 | 0.88 | 0.85 | 0.84 | 0.95 | 0.84 | 0.80 | 0.75 | 0.73 | |
| | 2 | 0.90 | 0.85 | 0.83 | 0.81 | 0.80 | 0.95 | 0.80 | 0.76 | 0.71 | 0.69 | |
| | 3 | 0.88 | 0.83 | 0.81 | 0.79 | 0.78 | 0.95 | 0.78 | 0.74 | 0.70 | 0.68 | |
| | 6 | 0.86 | 0.81 | 0.79 | 0.77 | 0.76 | 0.95 | 0.76 | 0.72 | 0.68 | 0.66 | |
| On cable racks | 1 | 1.00 | 0.98 | 0.96 | 0.93 | 0.92 | 0.95 | 0.84 | 0.80 | 0.75 | 0.73 | |
| | 2 | 1.00 | 0.95 | 0.93 | 0.90 | 0.89 | 0.95 | 0.80 | 0.76 | 0.71 | 0.69 | |
| | 3 | 1.00 | 0.94 | 0.92 | 0.89 | 0.88 | 0.95 | 0.78 | 0.74 | 0.70 | 0.68 | |
| | 6 | 1.00 | 0.93 | 0.90 | 0.87 | 0.86 | 0.95 | 0.76 | 0.72 | 0.68 | 0.66 | |
| On supports or on the wall | - | 1.00 | 0.93 | 0.90 | 0.87 | 0.86 | 0.95 | 0.78 | 0.73 | 0.68 | 0.66 | |
| Arrangement for which a reduction is not required ²⁾ | - | Number of cables arranged above each other is not restricted | | | | | Number of cables arranged side by side is not restricted | | | | | |

1) في الأماكن الضيقة يجب الأخذ في الاعتبار ارتفاع درجة حرارة المحيط نتيجة للتعدي واستخدام عامل التآين المناسب من الجدول 4-2.

جدول 4 - 9 عامل التقنين لكابلات موضوعة في الأرض [1]

Conversion factors f_c , installation in ground¹⁾

| Number of groups | Single-core cables in three-phase systems | | | | | |
|------------------|---|------|------|---|------|------|
| |  | | |  | | |
| | Load factor | | | Load factor | | |
| | 0.7 | 0.85 | 1.0 | 0.7 | 0.85 | 1.0 |
| 1 | 1.00 | 0.92 | 0.85 | 1.00 | 0.93 | 0.87 |
| 2 | 0.87 | 0.78 | 0.71 | 0.89 | 0.82 | 0.75 |
| 3 | 0.78 | 0.69 | 0.62 | 0.81 | 0.74 | 0.67 |
| 4 | 0.74 | 0.65 | 0.58 | 0.77 | 0.70 | 0.64 |
| 5 | 0.70 | 0.61 | 0.55 | 0.73 | 0.67 | 0.60 |
| 6 | 0.68 | 0.60 | 0.53 | 0.71 | 0.65 | 0.59 |
| 8 | 0.65 | 0.57 | 0.51 | 0.68 | 0.62 | 0.56 |
| 10 | 0.63 | 0.55 | 0.49 | 0.65 | 0.60 | 0.54 |

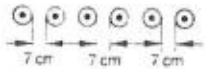
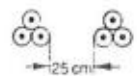
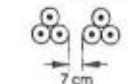

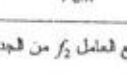
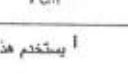
| Number of cables | Three-core cables | | | | | |
|------------------|---|------|------|-------------|------|------|
| |  | | | | | |
| | Load factor ²⁾ | | | Load factor | | |
| | 0.7 | 0.85 | 1.0 | 0.7 | 0.85 | 1.0 |
| 1 | 1.00 | 0.93 | 0.87 | 1.00 | 0.96 | 0.91 |
| 2 | 0.85 | 0.77 | 0.71 | 0.89 | 0.82 | 0.76 |
| 3 | 0.75 | 0.67 | 0.61 | 0.80 | 0.72 | 0.66 |
| 4 | 0.70 | 0.62 | 0.56 | 0.75 | 0.67 | 0.61 |
| 5 | 0.65 | 0.58 | 0.52 | 0.71 | 0.63 | 0.57 |
| 6 | 0.63 | 0.55 | 0.50 | 0.68 | 0.60 | 0.55 |
| 8 | 0.58 | 0.52 | 0.46 | 0.64 | 0.56 | 0.51 |
| 10 | 0.56 | 0.49 | 0.44 | 0.61 | 0.54 | 0.48 |

¹⁾ يستخدم هذا العامل مع العامل f_c من الجدول 7-4 أو 8-4.²⁾ These values apply also to bunched single-core cables in three-phase systems with a clearance between the systems reduced from 125 cm to 7 cm

جدول 4 - 8 عامل التقنين لكابلات موضوعة في الأرض [1]

Conversion factors f_c , installation in ground¹⁾
PVC-insulated cable for $U_0/U = 6/10$ kV

| Number of systems | Number of cables | Soil temperature °C | Thermal resistivity of soil (K m/W) | | | | | | | | | |
|-------------------|------------------|---------------------|-------------------------------------|------|------|-------------|------|------|-------------|------|-----|--|
| | | | 1.0 | | | 1.5 | | | 2.5 | | | |
| a | b | c | Load factor | | | Load factor | | | Load factor | | | |
| | | | 0.7 | 0.85 | 1.0 | 0.7 | 0.85 | 1.0 | 0.7 | 0.85 | 1.0 | |
| 1 | 1 | 1 | 10 | 1.06 | 1.02 | 0.97 | 0.93 | 0.91 | 0.89 | 0.81 | | |
| | | | 15 | 1.03 | 0.98 | 0.94 | 0.90 | 0.87 | 0.85 | 0.77 | | |
| | | | 20 | 1.00 | 0.95 | 0.90 | 0.86 | 0.84 | 0.81 | 0.73 | | |
| | | | 25 | 0.97 | 0.92 | 0.87 | 0.83 | 0.80 | 0.77 | 0.69 | | |
| | | | 30 | | | | 0.79 | 0.76 | 0.73 | 0.64 | | |
| | | | 35 | | | | 0.75 | 0.72 | 0.69 | 0.60 | | |
| 4 | 3 | 3 | 10 | 1.03 | 0.98 | 0.93 | 0.89 | 0.87 | 0.84 | 0.77 | | |
| | | | 15 | 0.99 | 0.95 | 0.90 | 0.86 | 0.83 | 0.81 | 0.73 | | |
| | | | 20 | 0.96 | 0.91 | 0.86 | 0.82 | 0.79 | 0.77 | 0.68 | | |
| | | | 25 | 0.93 | 0.88 | 0.83 | 0.78 | 0.76 | 0.73 | 0.64 | | |
| | | | 30 | | | | 0.74 | 0.71 | 0.68 | 0.59 | | |
| | | | 35 | | | | 0.70 | 0.67 | 0.64 | 0.53 | | |
| 10 | 5 | 6 | 10 | 0.99 | 0.94 | 0.89 | 0.85 | 0.83 | 0.80 | 0.72 | | |
| | | | 15 | 0.96 | 0.91 | 0.86 | 0.81 | 0.79 | 0.76 | 0.68 | | |
| | | | 20 | 0.93 | 0.87 | 0.82 | 0.77 | 0.75 | 0.72 | 0.63 | | |
| | | | 25 | 0.89 | 0.84 | 0.78 | 0.73 | 0.70 | 0.68 | 0.58 | | |
| | | | 30 | | | | 0.69 | 0.66 | 0.63 | 0.52 | | |
| | | | 35 | | | | 0.64 | 0.61 | 0.58 | 0.46 | | |

| Column a | Column b | Column c |
|---|---|---|
|  |  |  |
|  |  |  |

¹⁾ يستخدم هذا العامل مع العامل f_c من الجدول 9-4.

2.4.4 الظروف القياسية للكبلات الموضوعة في الهواء

تختلف درجة حرارة المحيط من منطقة إلى أخرى على حسب مناخ الموقع الجغرافي للمنطقة وبين الجدول 4-10 القيم العظمى والصغرى لدرجات حرارة الهواء والأرض (على عمق متر واحد) التي توصى ال IEC باستخدامها عند حساب سعة الكبلات لحمل التيار .

جدول 4 - 10 درجات حرارة الوسط المحيط (IEC 287)

| المناخ | درجة حرارة الهواء °C | | درجة حرارة الأرض عند عمق متر واحد °C | |
|--------------------|----------------------|------|--------------------------------------|------|
| | صغرى | عظمى | صغرى | عظمى |
| مناطق استوائية | 25 | 55 | 25 | 40 |
| مناطق شبة استوائية | 10 | 40 | 15 | 30 |
| مناطق معتدلة | 0 | 25 | 10 | 20 |

والقيمة القياسية لدرجة حرارة الهواء هي 30°C . وإذا اختلفت درجة الحرارة الفعلية للهواء عن هذه القيمة فيجب استخدام عامل التقنين المناسب من الجدول 4 - 2. وعند وضع الكبلات في الهواء يجب :

- التأكد من أن التهوية جيدة بحيث لا يؤدي الفقد الحرارى إلى ارتفاع درجة حرارة المحيط.
- حماية الكبلات من الإشعاع الشمسي المباشر.
- أن لا تقل المسافة بين الكبل وأى سطح مجاور (حائط أو أرض أو سقف) عن 2 سم .

3.4.4 الظروف القياسية للكبلات المدفونة مباشرة في الأرض

يعطى الجدول 4 - 11 درجات الحرارة العظمى والصغرى على عمق متر واحد من سطح الأرض بالنسبة لمناخ المناطق الجغرافية المختلفة والتي توصى ال IEC باستخدامها عند حساب سعة الكبلات لحمل التيار . والقيمة القياسية لدرجة حرارة الأرض (طبقاً للمواصفات الألمانية) هي 20°C . وإذا اختلفت عن هذه القيمة فيجب استخدام عامل التقنين المناسب من الجدول 4 - 7 أو الجدول 4 - 8.

أما المقاومة الحرارية للتربة فهي تعتمد أساساً على محتوى الرطوبة في التربة أى على معدل سقوط المطر. ويعطى الجدول 4 - 11 قيمة المقاومة الحرارية بالنسبة لدرجات الرطوبة المختلفة طبقاً لتوصيات ال IEC .

جدول 4 - 11 المقاومة الحرارية للتربة [IEC 287]

| المقاومة [°C.m/W] | حالة التربة | المناخ |
|-------------------|-------------|-------------------|
| 0.7 | رطبة جدا | أمطار غزيرة |
| 1.0 | رطبة | أمطار منتظمة |
| 2.0 | جافة | أمطار نادرة |
| 3.0 | جاف جدا | غير ممطر (صحراوي) |

والقيمة القياسية للمقاومة الحرارية للتربة هي 1.0 °C.m/W . وإذا اختلفت عن المقاومة الفعلية فيجب استخدام عامل التقنين المناسب من الجدول 4 - 7 أو الجدول 4 - 8.

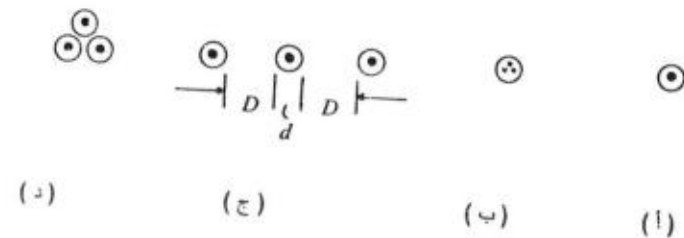
ويبلغ عمق الدفن القياسى طبقاً للمواصفات الألمانية 0.7 متر . ولا داعى لاستخدام عامل تقنين حتى عمق 1.2 متر وذلك بالنسبة للكبلات حتى جهد 33 ك . ف . أما إذا زاد الجهد عن ذلك فيجب الرجوع إلى نشرات المصنّع للاطلاع على الظروف القياسية التى وضعت على أساسها سعة الكبل لحمل التيار .

وفى بعض الحالات يتم وضع الكبلات (كل كبل على حدة) داخل مواسير من الصلب أو ال PVC أو بوابخ من الفخار مما يقلل من سعتها لحمل التيار . وعامل التقنين فى هذه الحالات هو 0.85 . ولا يستخدم هذا العامل إلا إذا كان طول الكبل الذى بداخل الماسورة أو البربخ أكثر من 6 متر .

4.4.4 التشكل التجمعى للكبلات (cable grouping)

إن القيم القياسية لسعة الكبل لحمل التيار محسوبة بناء على التشكلات

الآتية (شكل 14.4) :



شكل 14.4 التشكلات المختلفة للكبلات

(أ) - كبل منفرد ذو قلب واحد فى حالة كبلات التيار المستمر .

(ب) - كبل منفرد ثلاثى القلب فى حالة كبلات النظم الثلاثية الطور

(ج) - ثلاثة كبلات منفردة أحادية القلب ذات تشكّل منبسط

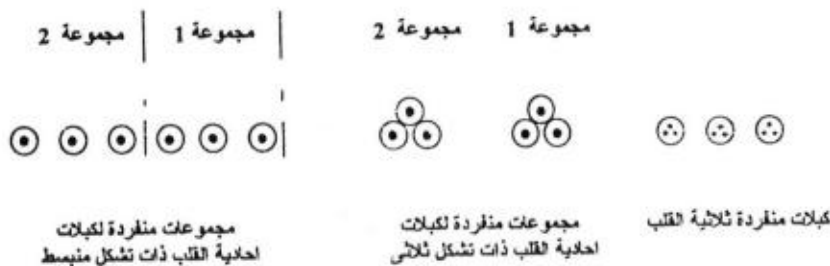
فى حالة كبلات النظم الثلاثية الطور:

$D = d$ للكبلات الموضوعه فى الهواء .

$D = 7 \text{ cm}$ للكبلات الموضوعه فى الأرض

(د) - ثلاثة كبلات ثلاثية التشكل (trefoil) فى حالة كبلات النظم الثلاثية الطور

ويبين الشكل 4 . 15 النظم التجميعية المختلفة المستخدمة عادة عند مد



شكل 15.4 النظم التجميعية للكبلات

الكبلات سواء فى الأرض أو الهواء . ويتم اختيار عامل التقنين المناظر للنظام التجمعى الذى سوف يستخدم عند مد الكبلات من الجدول 4 - 8 أو الجدول 4 - 9 على حسب نوع الكبل وجهده .

5.4.4 بعض الأمثلة لاستخدام عوامل التقنين

يراد تغذية حمل مقداره 5 م. ف. أ بجهد 10 ك. ف باستخدام كبلات XLPE ثلاثية القلب ومدفونة في الأرض مباشرة. وظروف التشغيل هي كالاتى :

عامل الحمل = 1.0

المقاومية الحرارية للتربة = 1.5°C.m/W

درجة حرارة التربة = 25°C

عمق الدفن = 0.7 m

والمطلوب هو إيجاد مقطع الكبلات المناسب لهذه الظروف .

تيار الحمل :

$$I = 5000/(\sqrt{3} \times 10) = 290 \text{ A}$$

درجة الحرارة القصوى للموصل في حالة ال XLPE هي 90°C (من الجدول 4 - 1). وعوامل التقنين لظروف التشغيل الفعلية هي :

$$f_1 = 0.84 \text{ من الجدول 4 - 8}$$

$$f_2 = 0.71 \text{ من الجدول 4 - 10}$$

وعامل التقنين الكلى هو إذا

$$f = f_1 f_2 = 0.84 \times 0.71 = 0.6$$

إذا فرضنا أن الحمل سيغذى بواسطة كبلين فالتيار الذي يجب أن يتحمله كل كبل هو

$$I = 290/(2 \times 0.6) = 242 \text{ A}$$

ومن الجدول م 1 - 4 بالملحق 1 نجد أن مقطع الكبل لموصلات من النحاس هو 70 مم² والتيار المقنن لهذا الكبل هو 256 أمبير . وإذا كانت الموصلات من الألمنيوم فمقطع الكبل هو 120 مم² والتيار المقنن 271 أمبير .

وإذا فرضنا أن الكبلات من نوع ال PE بدلاً من ال XLPE فإن أقصى درجة حرارة للموصلات هي 70°C . ومن الجدول 4 - 8 نجد أن بالنسبة لكبلين :

$$f_1 = (0.77 + 0.73)/2 = 0.75$$

حيث عامل التقنين هنا هو متوسط العامل لكبل واحد والعامل لثلاثة كبلات.

ومن الجدول 4 - 9 نجد أن

$$f_2 = 0.76$$

وعامل التقنين الكلى هو إذا

$$f = f_1 f_2 = 0.57$$

والتيار الذى يجب أن يتحمله كل كبل هو :

$$I = 290/(2 \times 0.57) = 253 \text{ A}$$

ومن الجدول م 1 - 4 نجد أن مقطع الكبل لموصلات نحاس هو 95 مم² ولموصلات الومنيوم هو 150 مم².

وإذا افترضنا فى المثال السابق أن كبلات ال XLPE كانت أحادية

القلب بدلاً من ثلاثية القلب ففى هذه الحالة نجد من الجدول 4 - 10 أن

$$f_2 = 0.71 \text{ للتشكل المنبسط}$$

$$f_2 = 0.75 \text{ للتشكل الثلاثى}$$

للتشكل المنبسط إذا

$$f = f_1 f_2 = 0.84 \times 0.71 = 0.6$$

$$I = 242 \text{ A}$$

ومن الجدول م 1 - 6 نجد أن مقطع الكبل المناسب هو 50 مم².

وللتشكل الثلاثى :

$$f = f_1 f_2 = 0.84 \times 0.75 = 0.63$$

$$I = 230 \text{ A}$$

ومن الجدول م 1 - 6 المقطع المناسب هو 70 مم².

وجدير بالذكر هنا أن اختيار مقطع الكبل المناسب لظروف التشغيل الفعلية باستخدام عوامل التقنين هو اختيار مبدئي حيث أن الاختيار النهائي للمقطع يجب أن يتم بناء على مقدرة الكبل على تحمل تيار القصر . وسوف نتناول هذا الموضوع بالتفصيل في الفقرة التالية .

5.4 تأثير القصر على التحمل الحراري للكبلات

تحدد مساحة مقطع موصل الكبل أساساً بناء على مقدرة الكبل على تحمل تيارات القصر التي تتعرض لها الشبكة والتي يكون الكبل جزءاً منها بدون أن يؤثر ذلك على أدائه أو عوله . وتتعين هذه المقدرة بالقيمة القصوى لدرجة الحرارة التي يسمح أن يرتفع إليها الموصل تحت ظروف القصر . ونظراً أن العزل هو العنصر الأساسي في الكبل الذي يتأثر بهذا الارتفاع في درجة الحرارة نجد أن مادة العزل المستخدمة هي التي تحدد هذه القيمة القصوى لدرجة حرارة الموصل .

وقد تصل قيمة تيار القصر في منظومات القوى إلى أكثر من عشرين ضعف قيمة تيار الحمل الطبيعي . وتعتمد فترة دوام القصر على الوقت المنصرم منذ لحظة حدوث القصر حتى قيام نظم الحماية (مرحلات وقواطع) بفصل هذا التيار نهائياً . وخلال هذه الفترة (التي عادة لا تزيد عن خمس ثوان) يجب ألا تزيد درجة الحرارة التي يرتفع إليها الموصل عن القيمة المسموح بها (permissible short-circuit temperature) والتي تعتمد على نوع الكبل وتعتمد أيضاً على نوع الوصل بين الموصلات عند صناديق التوصيل . ففي حالة استخدام وصل لحام (بواسطة سبيكة لحام رخوة - soft solder) يجب ألا تزيد درجة الحرارة تحت ظروف القصر عن 160 °C وذلك لجميع أنواع الكبلات ذات الموصلات النحاسية . أما في حالة استخدام الوصل الانضغاطية

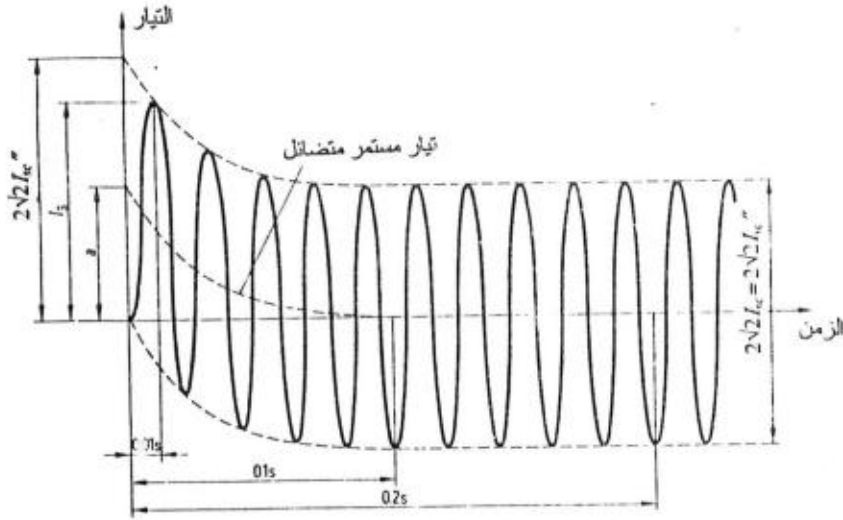
جدول 4-12 القيمة المسموح بها لدرجة حرارة الموصل والقيمة المقابلة لكثافة تيار القصر لمختلف أنواع الكبلات.

| نوع الكبل | θ_c °C | θ_{sc} °C | كثافة التيار J_{thr} A/mm ² | |
|--|---|---------------------|---|----------|
| | | | نحاس | ألومنيوم |
| XLPE | 90 | 250 | 143 | 94 |
| PE | 70 | 150 | 109 | 72 |
| PVC(<300mm ²) | 70 | 160 | 115 | 76 |
| PVC(>300mm ²) | 70 | 140 | 103 | 68 |
| كبلات الورق المشرب الكبلات الحزمية حتى 6 ك ف حتى 10 ك ف | 80 | 180 | 119 | 78 |
| | 65 | 165 | 121 | 80 |
| | كبلات أحادية القلب ذات غلاف من الرصاص وكبلات من طراز H حتى 6 ك ف حتى 10 ك ف حتى 20 ك ف حتى 30 ك ف | 80 | 180 | 119 |
| 70 | | 170 | 120 | 80 |
| 65 | | 155 | 116 | 77 |
| 60 | | 140 | 111 | 73 |
| | | | | |

θ_c = القيمة القصوى لدرجة حرارة الموصل المسموح بها تحت ظروف التشغيل

θ_{sc} = القيمة القصوى لدرجة حرارة الموصل المسموح بها في حالة القصر

J_{thr} = كثافة تيار القصر المقننة لقصر مدته ثانية واحدة



شكل 16.4 تغير تيار القصر مع الزمن عند نقطة قصر بعيدة عن المصدر

ومن الواضح أن في هذه الحالة

$$I_{sc}'' = I_{sc}$$

ويبين الشكل 17.4 تغير تيار القصر مع الزمن عندما تكون نقطة القصر قريبة من المصدر وفي هذه الحالة فبالإضافة الى وجود مركبة تيار مستمر فإن التيار المتمائل قيمته غير ثابتة وإنما تتضائل قيمته الابتدائية I_{sc}'' مع الزمن حتى تصل الى القيمة المستقرة I_{sc} . وإذا كانت القيمة المستقرة لتيار القصر معلومة فيمكن إيجاد قيمة I_{sc}'' من العلاقة :

$$I_{sc}'' = I_{sc} / \mu$$

(compression joints) - وهي الطريقة الحديثة - فلا يسرى هذا التقييد على الإرتفاع في درجة الحرارة .

ويعطى الجدول 4 - 12 القيمة القصوى لدرجة حرارة الموصل المسموح بها عند القصر وقيمة كثافة تيار القصر المقننة لقصر زمن دوامه ثنائية واحدة ، وذلك لمختلف أنواع الكبلات.

ويتسبب تيار القصر في ظهور نوعين من الإجهاد يخضع لهما الكبل : إجهاد حراري وإجهاد كهروميكانيكي . وقبل أن نتولى هذين الإجهادين كل على حدة يجدر بنا ان نوضح للفقراء الأطوار المتعاقبة التي يمر بها تيار القصر منذ لحظة حدوث قصر متمائل عند نقطة ما في الشبكة الكهربائية .

1.5.4 خصائص تيار القصر

يمر تيار القصر بعدة مراحل عابرة قبل أن يصل إلى قيمته المستقرة . وتعتمد هذه المراحل على ما إذا كانت النقطة التي يحدث عندها القصر بعيدة عن المولدات (محطات التوليد) أو قريبة منها . ويبين الشكل 4 . 16 تغير تيار القصر مع الزمن عندما تكون نقطة القصر بعيدة عن مصدر التيار . والتيار غير متمائل بالنسبة لمحور الزمن بسبب وجود مركبة تيار مستمر يتضائل سريعاً مع الزمن وبعد ذلك يصبح تيار القصر متمائلاً وقيمته مستقرة ويعرف بتيار القصر المتمائل المداوم (sustained symmetrical short-circuit current).

وتمثل قيم التيارات المختلفة المبينة بالشكل التيارات الأتية :

$$I_{sc}'' = \text{القيمة الابتدائية لتيار القصر المتمائل}$$

$$I_s = \text{القيمة الذروية لتيار القصر الغير متمائل}$$

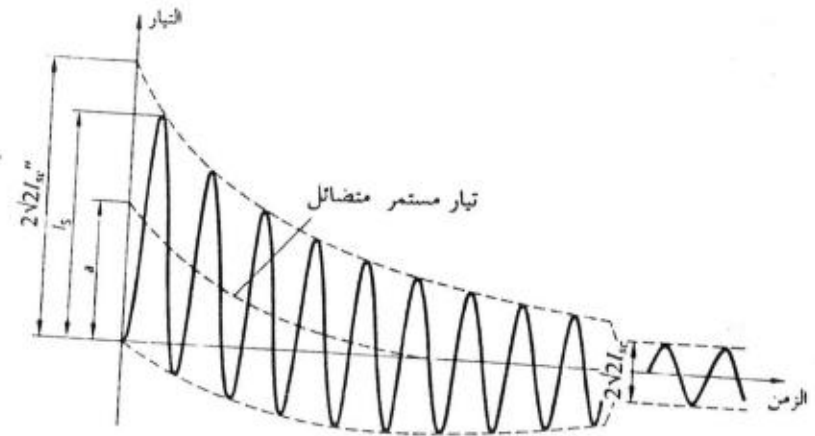
$$a = \text{القيمة الابتدائية لمركبة التيار المستمر}$$

$$I_{sc} = \text{القيمة المستقرة لتيار القصر المتمائل}$$

حيث

$$\mu = 0.8 \text{ بالنسبة للأحمال الصناعية}$$

$$= 1.0 \text{ بالنسبة لأحمال المنافع العامة}$$



شكل 17.4 تغير تيار القصر مع الزمن عند نقطة قصر قريبة من المصدر

4 تحديد سعة الكبل لحمل التيار

2.5.4 الإجهاد الحراري

يعتمد التأثير الحراري لتيار القصر على القيمة الفعالة (rms) لهذا التيار وعلى مدة دوام القصر . وبما أن التيار الفعلي يتغير مع الزمن منذ لحظة بدء القصر حتى يصل الي قيمته المتماثلة أو يتم فصله ، فلذلك يتم تعريف تيار فعال I_{th} مكافئ للتيار الفعلي . والتيار المكافئ هو ذلك التيار الذي ينتج عنه خلال فترة دوام القصر كمية حرارة مساوية لكمية الحرارة التي تنتج عن التيار الفعلي .

وبدون الخوض في أسباب عدم تماثل التيار في اللحظات الأولى من القصر فانه يتم أخذ هذا اللاتماثل في الاعتبار كالآتي :

$$I_{th} = I_{sc}'' \sqrt{m + n} \quad (16-4)$$

حيث

m = عامل اللاتماثل الناتج عن وجود مركبة التيار المستمر وتعتمد قيمته على زمن دوام التيار وعلى عامل الذروة χ (peak factor) حيث،

$$\chi = I_p / \sqrt{2} I_{sc}'' \quad (17-4)$$

وإذا كانت القيمة الذروية لتيار القصر الغير متماثل I_p ليست معلومة يمكن اعتبار

$$\chi = 1.8$$

n = عامل يأخذ في الاعتبار القيمة المتضائلة للتيار المتماثل ويعتمد على الزمن وعلى النسبة I_{sc}''/I_{sc} .

ويمكن إيجاد قيمة كل من m و n من الشكل 4 . 18 .

3.5.4 السعة الحرارية المقنتة للكبل (rated thermal capacity)

يتم تحديد السعة الحرارية المقنتة للكبل (سعة القصر) تحت ظروف القصر المتماثل من المعادلة الآتية :

$$(18-4) \quad I_{thr} = \frac{J_{thr} S}{1000} \sqrt{\frac{t_r}{t}} \quad \text{kA}$$

حيث :

S = مساحة مقطع الموصل (مم²)t_r = الزمن المقنن لدوام تيار القصر وهو عادة يساوي ثانية واحدة

t = الزمن الفعلي لدوام تيار القصر (ثانية)

J_{thr} = كثافة تيار القصر المقنن للزمن المقنن t_r

وتعتبر مساحة مقطع الموصل مناسبة إذا كانت قيمة التيار الفعال المكافئ

I_{th} لزمن دوام t_r اقل من أو تساوي القيمة المقننة I_{thr} أي :

$$(19-4) \quad I_{th} \leq I_{thr}$$

مثال :

إذا كانت معطيات القصر كالتالي :

نقطة القصر : بعيدة عن المصدر

منسوب القصر : 500 م. ف. أ.

جهد التشغيل 20 ك. ف

نوع الكبل : XLPE وموصلات من الألمنيوم

زمن دوام القصر : 0.5 ثانية

المطلوب إيجاد المقطع المناسب للكبل .

تيار القصر هو ،

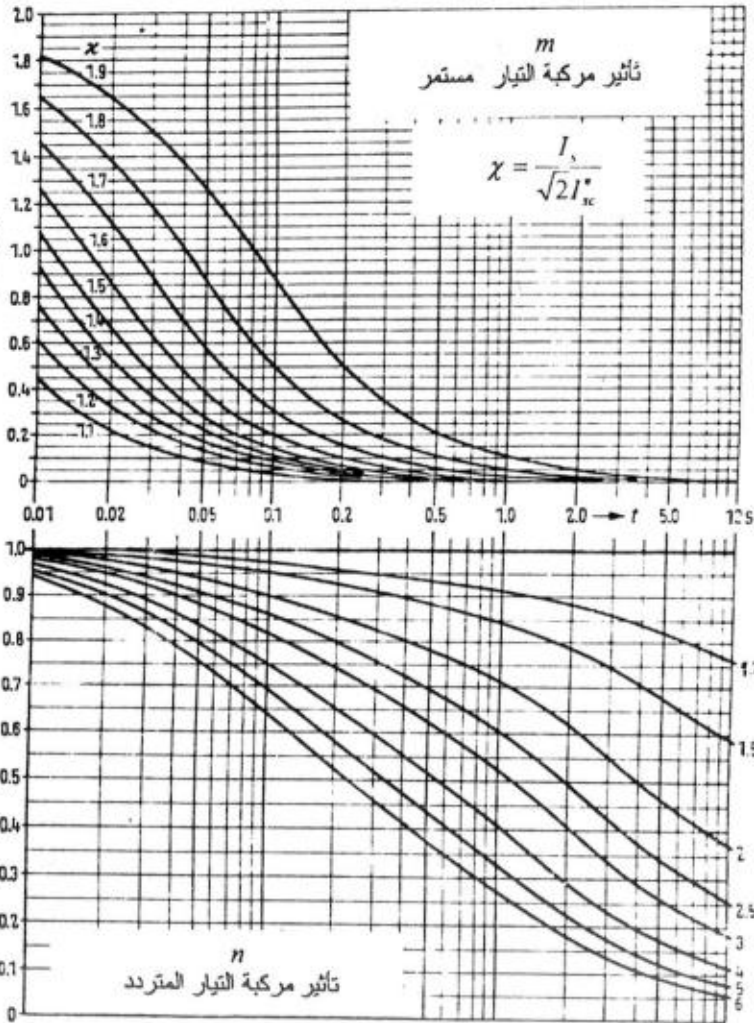
$$I_{sc} = I_{sc}'' = 500 / (\sqrt{3} \times 20) = 14.4 \text{ kA}$$

وبما أن I_s غير معلومة ،

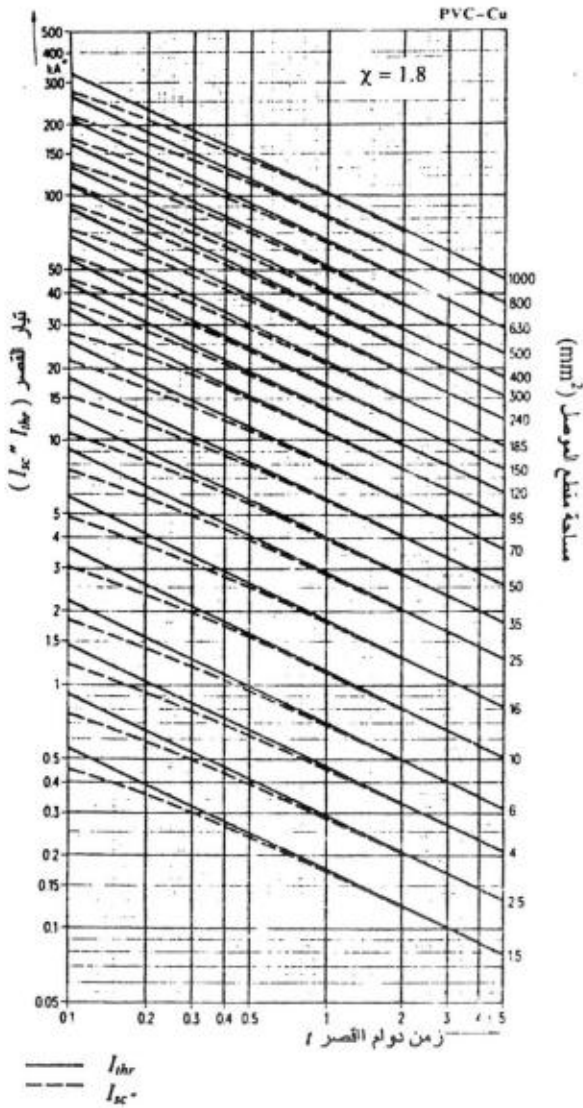
$$\chi = 1.8$$

وحيث أن نقطة القصر بعيدة عن المصدر n = 1 . وقيمة m من

الشكل 19.4 هي m = 0.1 . ومن المعادلة (4-16) نجد أن :



شكل 18.4



شكل 19-4. تيارات القصر لكبلات PVC - موصلات نحاس

$$I_{th} = 14.4\sqrt{(1 + 0.1)} = 15.1 \text{ kA}$$

ومن الجدول 4-12 نجد أن :

$$J_{thr} = 94 \text{ A/mm}^2$$

ومن المعادلتين (4-18) و (4-19) نجد أن :

$$I_{thr} = \frac{J_{thr} S}{1000\sqrt{0.5}} \geq I_{th}$$

$$S \geq \frac{1000\sqrt{0.5}}{J_{thr}} I_{th}$$

$$\geq \frac{1000\sqrt{0.5} \times 15.1}{94} \geq 113 \text{ mm}^2$$

وبالرجوع إلي الجدول م 1 - 6 نجد أن المقطع القياسي الأكبر من 113 مم² مباشرة هو 120 مم². وقيمة التيار المقنن I_{thr} لكبل له هذا المقطع هي

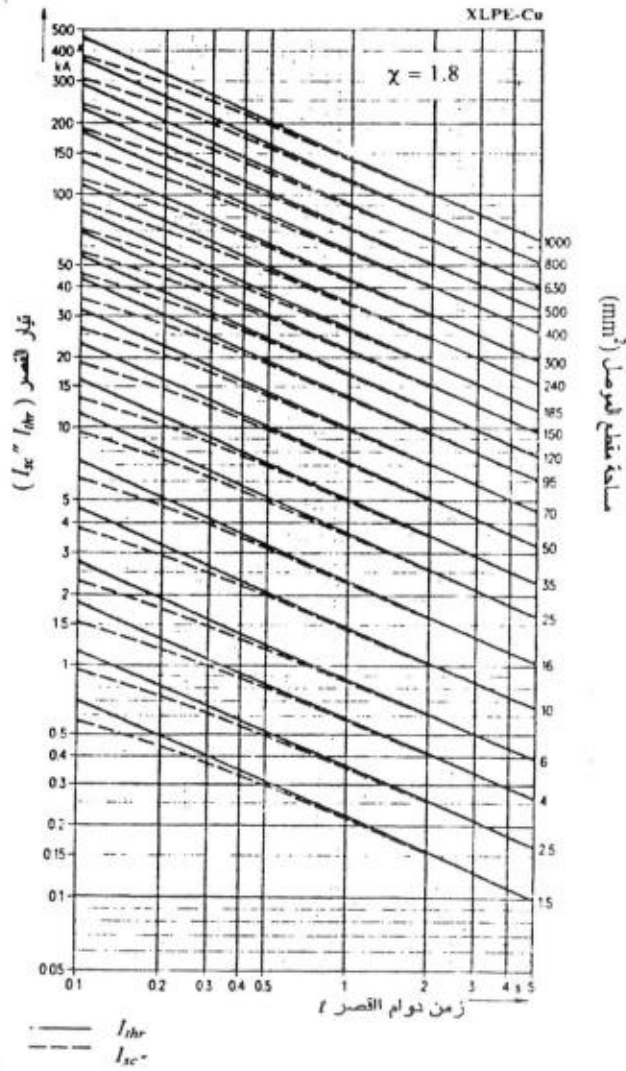
من المعادلة (4-18) :

$$I_{thr} = \frac{94 \times 120}{1000\sqrt{0.5}} = 16 \text{ kA}$$

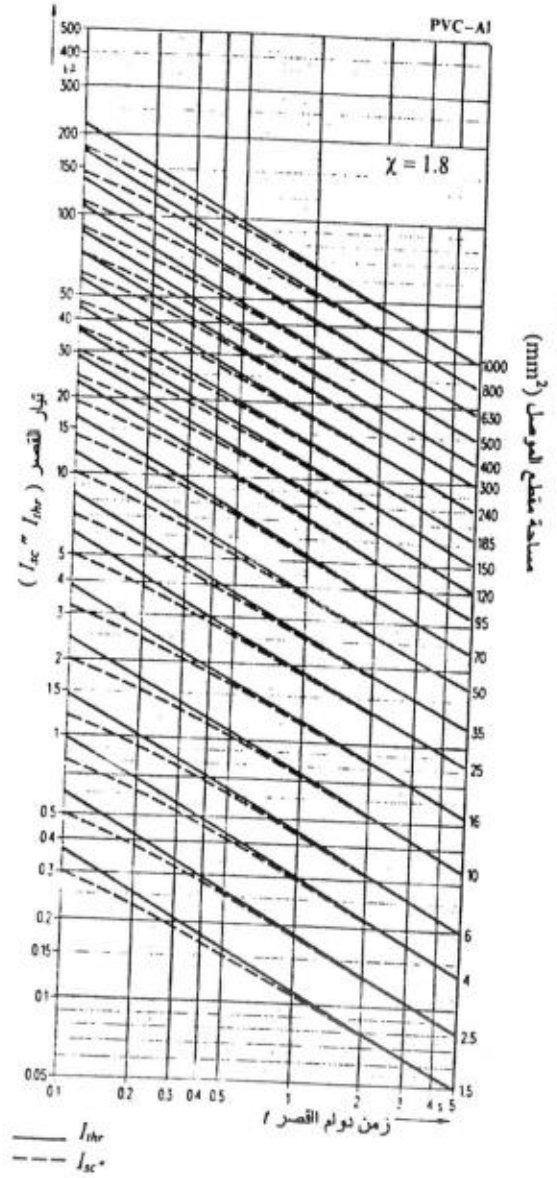
4.5.4 استخدام منحنيات القصر

يقوم مصنعي الكبلات بأعداد مجموعة منحنيات تعطي العلاقة بين زمن دوام القصر t وقيمة تيار القصر الفعال المكافئ المقنن I_{thr} وتيار القصر I_{sc} لمختلف أنواع الكبلات ولمختلف المقاطع القياسية للموصلات. وتعطي الأشكال (4.19) إلي (4.28) مجموعة من هذه المنحنيات وهي من إعداد شركة سيمنز.

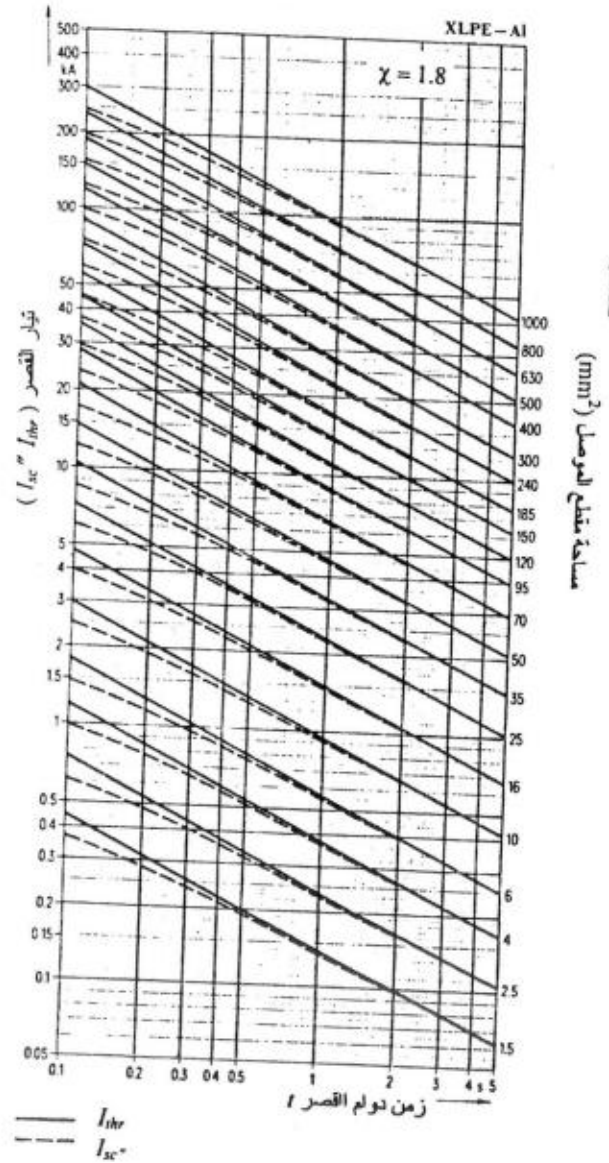
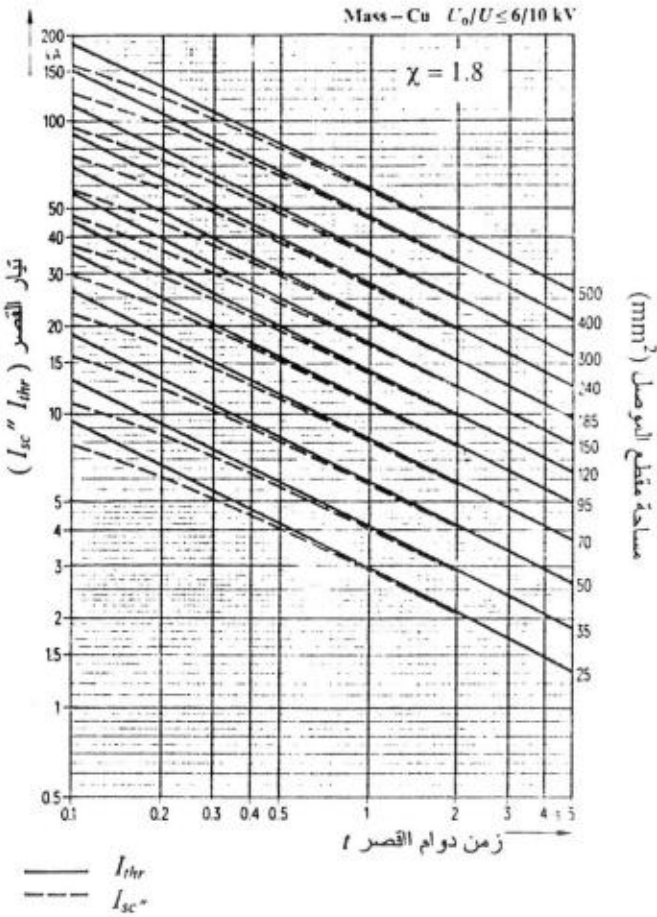
ولإيجاد مساحة مقطع الموصل المناسبة لكبل ما ، يتم أولاً حساب هذه المساحة بناء علي مقدرة الكبل لحمل التيار وذلك طبقاً للمعايير التي سبق أن قدمناها في الفقرات السابقة من 1.4.4 الي 6.4.4 . وبعد ذلك يجب



شكل 4-21. تيارات القصر لكبلات XLPE - موصلات نحاس

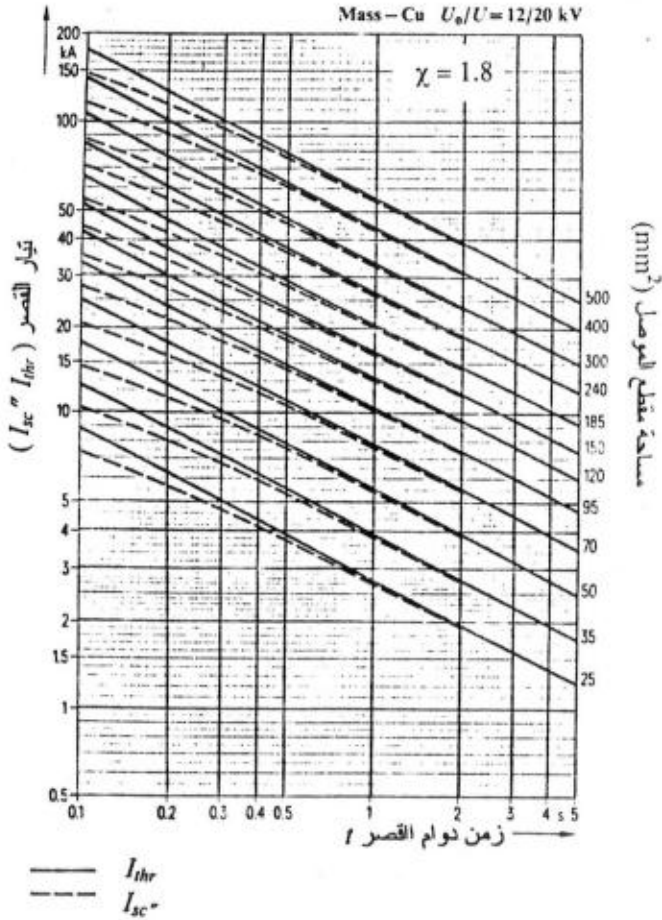


شكل 4-20. تيارات القصر لكبلات PVC - موصلات الألمنيوم

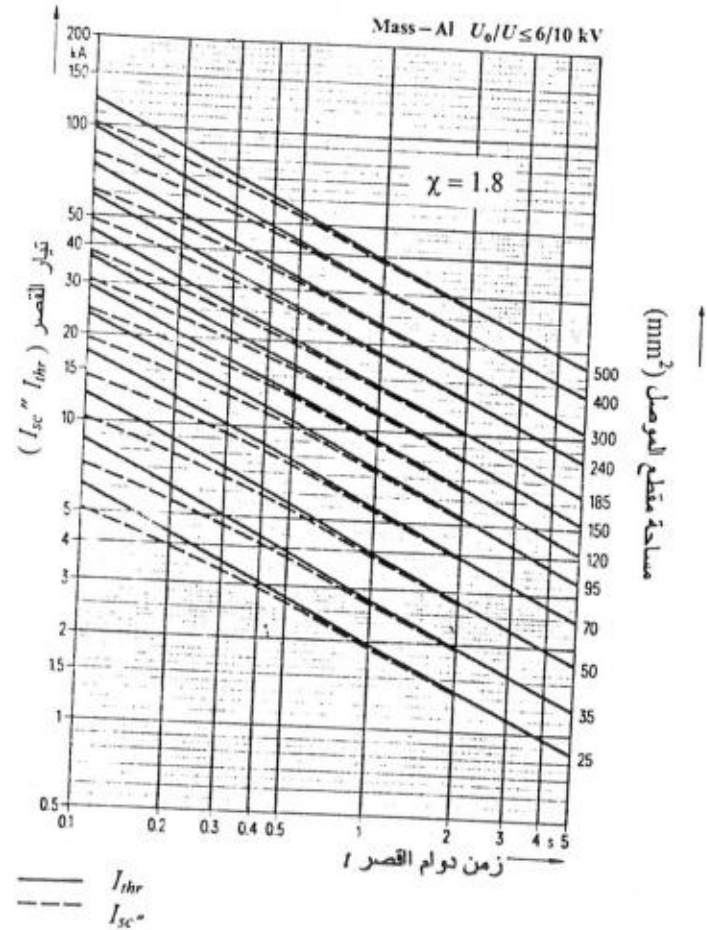


شكل 4-23. تيارات القصر لكبلات المشربة حتى 10 ك فـ. موصلات نحاس

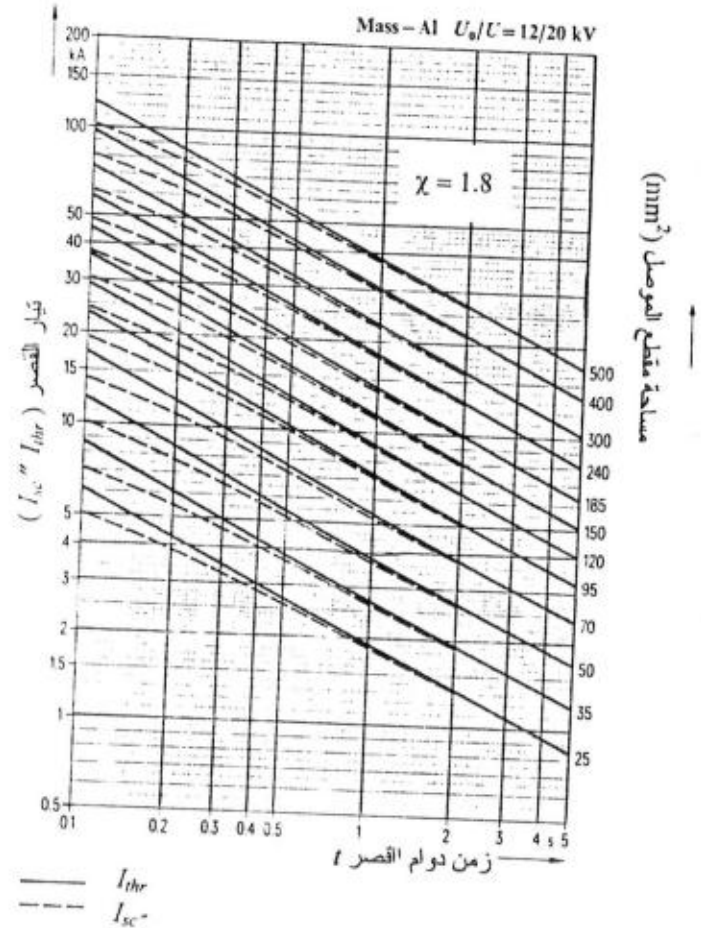
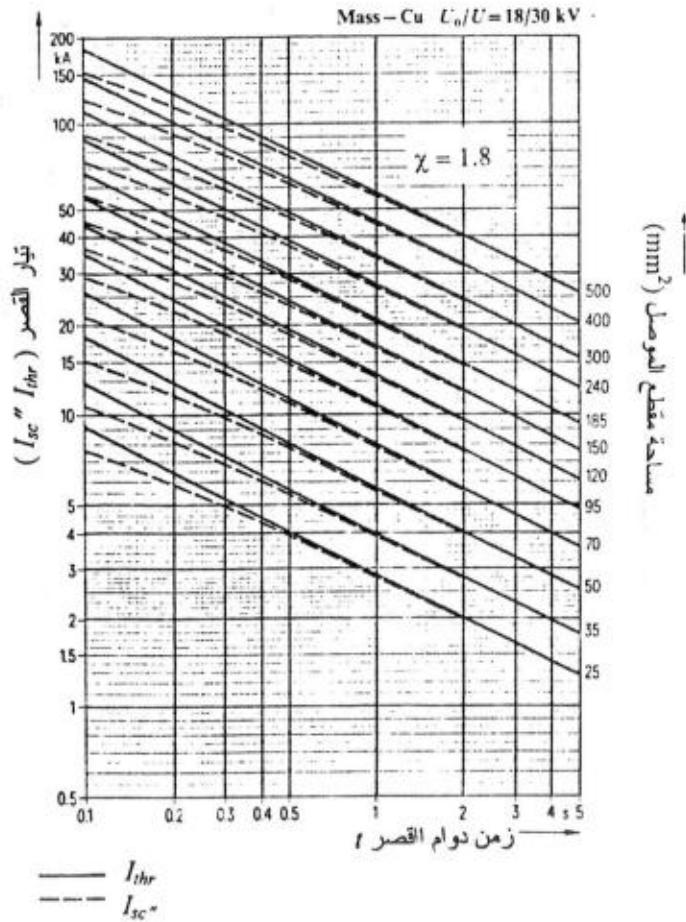
شكل 4-22. تيارات القصر لكبلات XLPE-موصلات ألومنيوم



شكل 4-25. تيارات القصر للكابلات المشربة حتى 12\20 ك.ف. موصلات نحاس



شكل 4-24. تيارات القصر للكابلات المشربة حتى 10 ك.ف. موصلات ألومنيوم



شكل 4-26. تيارات القصر للكابلات المشربة 20\12 ك.ف. - موصلات الألمنيوم

شكل 4-27. تيارات القصر للكابلات المشربة 30\18 ك.ف. - موصلات نحاس

4 تحديد سعة الكبل لحمل التيار

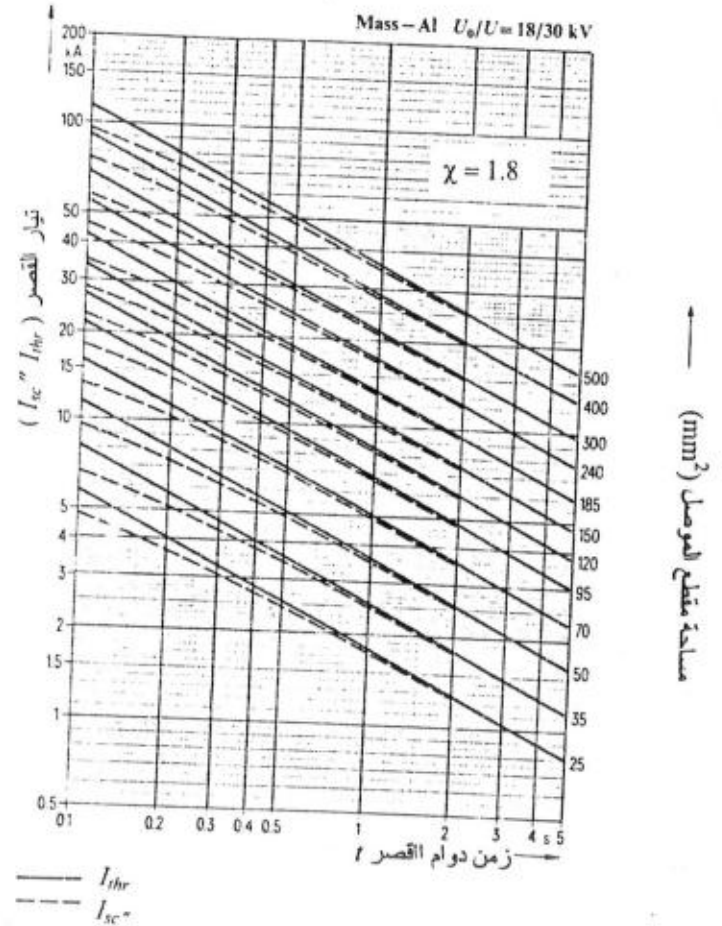
التأكد من أن هذا المقطع مناسب أيضاً من حيث قدرة الكبل لتحمل تيار القصر المتوقع مروره في الكبل تحت ظروف التشغيل . ويتم ذلك بتحديد قيمة التيار I_{th} كما أوضحنا في المثال أعلاه ، ثم تقارن هذه القيمة بقيمة التيار I_{thr} التي يتم تعيينها من المنحنيات الخاصة بنوع الكبل المعني . وإذا وجد أن لهذا المقطع قيمة I_{th} أقل من أو تساوي I_{thr} يعتبر المقطع مناسب . وان لم يتحقق هذا الشرط يجب اختيار المقطع الأكبر .

5.5.4 تأثير تيار القصر علي الحجاب والغلاف والدرع

عند حدوث قصر بين موصل والأرض في النظم التي بها نقطة تعادل مؤرضة ، يمر تيار القصر الغير متماثل عبر الحجاب والغلاف والدرع (إن وجد) ولذلك فإنه يجب التحقق من أن الأغطية المعدنية للكبل الذي تم اختيار مقطعة بناء علي سعة تحمله تيار القصر تستطيع أن تتحمل تيار القصر في حالة حدوث خطأ بين الموصل والأرض . ويتم ذلك باستخدام نفس الطريقة التي وصفناها أعلاه لتحديد سعة الموصلات لتحمل تيار القصر للخطأ المتماثل ، وذلك بالرجوع إلي الرسومات البيانية الخاصة بالأغطية المعدنية المختلفة التي يعدها مصنعي الكبلات .

6.4 الاجهاد الكهروميكانيكي

تولد التيارات التي تمر في الموصلات، المتجاورة قوة كهروديناميكية علي هذه الموصلات . تتناسب القوة بين أي موصلين \propto تتناسب طردياً وحاصل ضرب التيار في كل موصل وعكسياً والمسافة بينهما . ويمكن التعبير عن القوة لكل وحدة طول بين موصلين طوليين متوازيين تفصلهما مسافة a ويحمل كل موصل تيارا I بالمعادلة الآتية :



شكل 4-28. تيارات القصر للكبلات المشربة 18، 30 ك ف- موصلات ألومنيوم

وهي تتكون من جزئين ، جزء مستمر وجزء متردد بتردد ضعف تردد التيار . ومن الواضح من المعادلة (4-23) أن القوة لها قيمة قصوى عند

$$2\omega t = 180$$

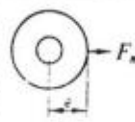

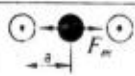
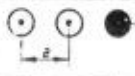

$$(24-4) \quad F_m = k I_s^2$$

وفي النظام الثلاثي الطور فإن القيمة القصوى للقوة الكهروديناميكية على أي من الموصلات عند حدوث خطأ متماثل هي :

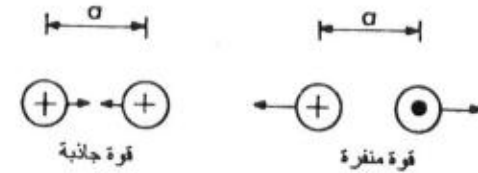
$$(25-4) \quad F_{3m} = \alpha F_m$$

حيث α هو عامل تعتمد قيمته على وضع الموصل بالنسبة للتشكل المستخدم.

جدول 4 - 13 عامل القوة الكهروديناميكية α

| النظام | نوع القصر | العامل α |
|----------------------|-----------|---|
| أحادي أو ثلاثي الطور | خط أرض |  $\frac{1}{2}$ |
| أحادي الطور | خط/خط |  1 |
| متماثل | خط/خط |  $\frac{1}{2}$ |
| | |  0.806 |
| | |  $\frac{1}{2}$ |

$$(20-4) \quad F = \frac{\mu_0 I^2}{2\pi a} = 2 \times 10^{-7} \frac{I^2}{a} = k I^2 \text{ N/m}$$



شكل 4. 29

وتكون القوة قوة جاذبة إذا كانت التيارات لها نفس الاتجاه وقوة منفرة إذا كانت التيارات متضادة الاتجاه (شكل 4 . 29). والقوة تحت ظروف القصر هي،

$$(21-4) \quad F = k I_s^2$$

حيث I_s هي القيمة الذروية لتيار القصر الغير متماثل (شكل 4 . 16) ويمكن حسابها من المعادلة (4 - 17) :

$$(22-4) \quad I_s = \sqrt{2} \chi I''_{sc}$$

وتعطي المعادلة (4-21) القوة الكهروديناميكية على الموصلات في حالة حدوث قصر بين موصلين في نظام أحادي الطور أو نظام ثلاثي الطور. وإذا كان التيار مترددا ففي حالة النظام الأحادي الطور تصبح القوة ،

$$f = k I_s^2 \sin^2 \omega t$$

$$= k I_s^2 \frac{1}{2} (1 - \cos 2\omega t)$$

$$(23-4) \quad = k I_s^2 (0.5 - 0.5 \cos 2\omega t)$$

ويعطي الجدول 4-13 قيم α للتشكلات المختلفة .

وحتى نتصور حجم القوة الكهروديناميكية في حالة القصر، فلنعتبر المثال

الآتي :

نوع الكبل : ثلاثة كبلات أحادية الطور XLPE 1 x 240 ذات تشكّل

منبسط . قطر الكبل 36 مم والمسافة بين الكبلات $a = 2 \times 36$ مم .

مشروع القصر : 750 م.ف.أ.

جهد التشغيل : 10 ك.ف

عامل الذروة : 1.8

تيار القصر هو ،

$$I_{sc} = \frac{750 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 10 \times 10^3} = 43.3 \text{ kA}$$

ومن المعادلة (4 - 22) نجد أن

$$I_s = \sqrt{2} \times 1.8 \times 43.3 = 110.2 \text{ kA}$$

ومن الجدول 4 - 13 نجد أن $\alpha = \sqrt{3}/2$. ومن المعادلة (4 - 25) نجد

أن:

$$F_{sm} = \frac{\sqrt{3} \cdot 2 \times 10^{-7} \times (110.2 \times 10^3)^2}{2 \cdot 2 \times 36 \times 10^{-3}} = 29.2 \text{ kN/m}$$

$$= 29.2 \times 10^3 / 9.81 = 3 \times 10^3 \text{ kg-force/m}$$

أي ان القوة تساوي ثلاثة أطنان لكل متر طول . وفي حالة الكبلات الثلاثية القلب قد تكون قيمة القوة أكبر من ذلك نظراً لقرب المسافة بين الموصلات وبعضها . وقد تؤدي القوى الكهروديناميكية إلى انفجار الكبل ، خاصة الكبلات الثلاثية القلب الغير مدرعة المعزولة بالورق المشبع . أما إذا كانت

هذه الكبلات مدرعة فإن الدرغ كغفل بان يتحمل الإجهاد الميكانيكي ويمنع الكبل من الانفجار . ويعطي الجدول 4-14 الحد الأقصى لتيار القصر

جدول 4 - 14 الحد الأقصى لتيار القصر لضمان عدم انفجار كبلات الورق المشرب المحزّمة الغير مدرعة.

| موصلات نحاس | | موصلات ألومنيوم | | الحد kV |
|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------|
| kA | mm ² | kA | mm ² | |
| 25 | 120 | 33 | 240 | 1 - 0.6 |
| 27 | 150 | 35 | 300 | |
| 29 | 185 | 37 | 400 | |
| 33 | 240 | | | |
| 36 | 300 | | | |
| 38 | 400 | | | |
| 33 | 185 | 33 | 240 | 6.6 - 1.9 |
| 35 | 240 | 35 | 300 | |
| 37 | 300 | 38 | 400 | |
| 38 | 400 | | | |
| 36 | 185 | 39 | 240 | 11 - 6 |
| 39 | 240 | 41 | 300 | |
| 41 | 300 | 43 | 400 | |
| 43 | 400 | | | |
| | | | | |

المسموح به للكبلات المحزّمة المعزولة بالورق والغير مدرعة وذلك لضمان عدم انفجارها . ورغم أن قدرة الكبلات الغير مدرعة المعزولة بالمواد البوليمرية (سواء المتلدنة أو المتصلدة بالحرارة) على تحمل تيارات القصر اكبر من قدرة الكبلات المعزولة بالورق المشبع ، الا ان هي أيضاً تخضع لتحديد تيار القصر الذي يمكن أن تتحمّله بدون تلف .

أما بالنسبة للكبلات الأحادية القلب التي تمد في الهواء فيجب أن تتحمل التوامط او المماسك (clamps or cleats) المستخدمة لتثبيتها القوة الكهروديناميكية المولدة تحت ظروف القصر . ويجب مراجعة المواصفات انشائية التي تحدد المسافة بين نقاط التثبيت . وجدير بالذكر أنه لمنع الإرتفاع

في درجة حرارة القوامط (الذي قد يؤدي إلى تلف الكابل) الناتج عن المقطوعات التخلفية يجب أن تكون القوامط إما مصنوعة من مادة غير مغناطيسية أو مصممة بحيث لا تشكل القامطة دائرة مغناطيسية مغلقة حول الكابل.

7.4 الهبوط في الجهد (voltage drop)

على الرغم أن الإعتبارات الحرارية هي التي تحدد سعة الكابل لحمل التيار وبالتالي مساحة مقطع الموصلات ، إلا انه في كثير من الحالات وخاصة بالنسبة للكبلات التي تستخدم في شبكات التوزيع الثانوي ، فإن هذا المقطع قد يكون غير مناسب من حيث مقدار الهبوط في الجهد بين طرفي الكابل عند الحمل الكامل .

ويحدد مقدار هبوط الجهد المسموح به بناء على المواصفات القياسية لتنظيم الجهد (voltage regulation) . ويعرف تنظيم الجهد بأنه الفرق بين جهد الإرسال في حالة اللحمل وجهد الاستقبال في حالة الحمل الكامل، ويعطي عادة كنسبة مئوية من قيمة جهد الاستقبال في حالة الحمل الكامل :

$$\Delta V\% = \frac{V_s - V_r}{V_r} \times 100 \quad (26-4)$$

حيث

V_s = مقدار جهد الإرسال

V_r = مقدار جهد الاستقبال في حالة الحمل الكامل

ويجب الرجوع الى المواصفات القياسية لتحديد مدى تنظيم الجهد المسموح

به الا انه بصفة عامة يمكن الاهتداء بالنسب المئوية الآتية :

جهد الانتفاع (الجهد عند المقابس الخاصة بتغذية الأجهزة الكهربائية) : -9%

الى +6%

جهد الخدمة (الجهد عند أطراف تجهيزات دخول الخدمة الكهربائية للمستهلك) : -3% الى +6% .

1.7.4 حساب هبوط الجهد

(أ) الكبلات القصيرة (حتى 4 كم طول) :

إذا كان طول الكابل 4 كم أو أقل فإنه يمكن اهمال سعة الكابل C . ويبين الشكل 4. 30a الدائرة الكهربائية المكافئة لموصل واحد والشكل 4. 30b الرسم الطوري لهذه الدائرة . وحيث ان الزاوية δ عادة ما تكون صغيرة جداً فيمكن كتابة مقدار الهبوط في الجهد كالتالي :

$$\Delta V_0 = I(R_w \cos \phi \pm X_L \sin \phi) \quad (27-4)$$

حيث:

l = طول الكابل (m)

R_w = المقاومة الفعالة (ohm/m)

X_L = المفاعلة (ohm/m)

ϕ = زاوية الاختلاف الطوري بين التيار وجهد الطور عند الاستقبال

+ = تستخدم في حالة التيار المتخلف

- = تستخدم في حالة التيار المتقدم

وبالنسبة للدوائر الأحادية الطور

$$\Delta V = 2 \Delta V_0$$

وبالنسبة للدوائر الثلاثية الطور

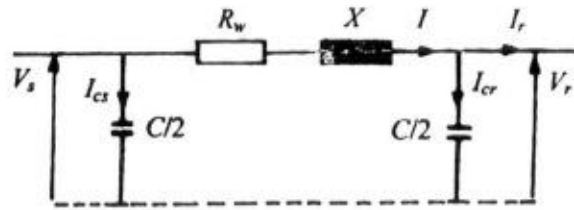
$$\Delta V = \sqrt{3} \Delta V_0$$

$$I_r = [(I_L \cos \phi)^2 + (I_L \sin \phi - I_{Cr})^2]^{1/2}$$

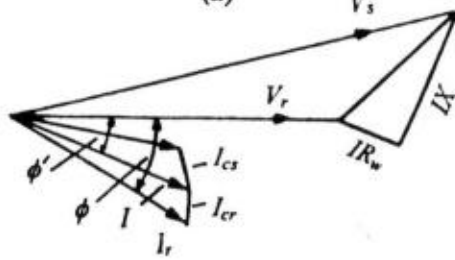
(30-4)

$$I_{Cr} = \frac{V_r \omega C l}{2}$$

حيث C هي سعة الكابل لكل وحدة طول.



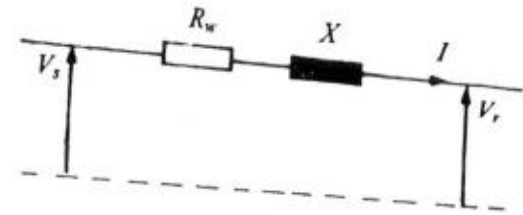
(a)



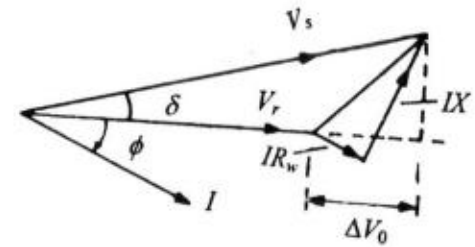
(b)

شكل 31.4 الدائرة المكافئة لكابل طويل

بعد اختيار مقطع الكابل بناء على الإعتبارات الحرارية يجب التأكد من أن مقدار الهبوط في الجهد بالنسبة لطول هذا الكابل لا يتعدى الحدود المسموح بها في المواصفات القياسية .



(a)



(b)

شكل 30.4 الدائرة المكافئة لكابل قصير

(ب) الكابلات الطويلة :

في هذه الحالات تؤخذ سعة الكابل في الإعتبار بافتراض أن نصف السعة مركزة عند كل طرف من أطراف الكابل كما هو مبين بالشكل 4. 31a وبيين الشكل 4. 31b الرسم الطوري لهذه الدائرة . والهبوط في الجهد هو:

$$\Delta V_0 = I_r l (R_w \cos \phi' \pm X_L \sin \phi') \quad (28-4)$$

حيث

$$\cos \phi' = (I_L \cos \phi) / I_C \quad (29-4)$$

ويمكن الرجوع إلى تفاصيل الاختبارات لمختلف أنواع الكبلات فى المواصفات التى أصدرتها IEC والتي نوردتها هنا وهى :

IEC : 55-1 , 141 , 229 , 230 , 502 , 840 , 885

(انظر أيضاً الملحق رقم 2)

1.1.5 الاختبارات الروتينية

يتم إجراء هذه الاختبارات على جميع أطوال الكبلات المصنعة وذلك للتأكد أن هذه الكبلات تحقق المعايير المطلوبة. فعلى سبيل المثال تعتبر الاختبارات الآتية اختبارات روتينية للكبلات البوليمرية للجهود المقننة من 30 ك ف حتى 150 ك ف وذلك طبقاً للمواصفة IEC- 840 :

- اختبار التفريغ الجزئي (partial discharge)
- اختبار الجهد
- الاختبار الكهربى على الغلاف اللامعدنى .

أما الاختبارات الروتينية بالنسبة للكبلات المعزولة بالورق المشرب والمملوءة بالزيت فهي فى مدى جهد حتى 275 ك ف طبقاً للمواصفة IEC- 141 :

- اختبار مقاومة الموصل
- اختبار السعة
- اختبار معامل القدرة ($\tan \delta$)
- اختبار الجهد العالى

الباب الخامس

إختبارات الكبلات وتحديد موضع الخطأ فى الكبل

1.5 اختبارات الكبلات

تخضع الكبلات للعديد من الاختبارات بعد إنتاجها وكذلك بعد مدنها. ويمكن تقسيم هذه الاختبارات عموماً إلى أربع فئات :

- | | |
|-------------------------|---------------------------------------|
| اختبارات الروتينية | 1 - Routine tests |
| اختبارات خاصة | ب- Special tests |
| اختبارات نوعية | ج- Type tests |
| اختبارات ما بعد التركيب | د- Electrical tests after instalation |

وقد قامت اللجنة الكهربية الدولية IEC بوضع تفاصيل هذه الاختبارات لكل نوع من أنواع الكبلات وذلك طبقاً لنوع العزل المستخدم ونطاق الجهود التى تستخدم فيها هذه الكبلات. وتعطى هذه المواصفات بالتفصيل قيم لجهود الاختبار والشروط اللازمة لها مثل درجة الحرارة وأنواع الجهود المستخدمة وطول ونوع العينة التى تستخدم لكل اختبار، كما نتناول بالوصف المفصل طرق وخطوات تنفيذ هذه الاختبارات ومعايير القبول بالنسبة للاختبارات الخاصة .

ونظراً لتعدد الاختبارات وخصوصياتها لكل نوع من أنواع الكبلات فسوف نورد هنا فقط الفئات المختلفة لهذه الاختبارات وما تتضمنه كل فئة.

- الإختبار الميكانيكى والجهد الدفعى الساخن hot impulse voltage test

3.1.5 الإختبارات النوعية

يتم إجراء الإختبارات النوعية قبل أن يقوم المصنع بإنتاج نوع معين من الكبلات على المستوى التجارى وذلك لبيان أن هذا المنتج يفي على نحو مرض بمتطلبات الأداء. ولا يوجد ضرورة لتكرار القيام بهذه الإختبارات ما دام الكبل قد اجتازها بنجاح إلا إذا قام المنتج بعمل تغييرات فى التصميم أو المواد المستخدمة فى صناعة الكبل مما قد يؤثر على أدائه.

ومن أمثلة هذه الإختبارات الإختبارات النوعية التى يجب إجراؤها على الكبلات، البلمرية للجهود المقننة من 30 ك ف حتى 150 ك ف (IEC 840) :

- اختبار شى يتبعه اختبار للتفريغ الجزئى
- اختبار قياس عامل الفقد ($\tan \delta$)
- اختبار جهد مع دورة تسخين يتبعه اختبار قياس للتفريغ الجزئى
- اختبار صمود للجهد الدفعى يتبعه اختبار باستخدام الجهد ذى التردد الصناعى

ويتم القيام بهذه الإختبارات على عينات من لكبلات لا يقل طولها عن 10 متر. وجدير بالذكر أن هذه الإختبارات النوعية يجب أن تتم بالترتيب التعاقبى المدرج أعلاه .

2.1.5 الإختبارات الخاصة

تجرى هذه الإختبارات على عينات من الكبلات ، وقد تكون هذه العينات بكرة كاملة من الكبل المنتج فى بعض الأحيان ، أو أطوال محددة من الكبل حسب الشروط التى تحددها مواصفات ال IEC لكل اختبار. ومن أمثلة الإختبارات الخاصة الواجب إجراؤها على الكبلات ذات العوازل البلمرية للجهود المقننة من 30 ك ف حتى 150 ك ف طبقاً لـ IEC 840 :

- فحص الموصل conductor examination
- قياس مقاومة الموصل
- قياس سمك العزل والأغلفة اللامعدنية
- قياس سمك الغلاف المعدنى
- قياس الأقطار
- اختبار التصلد الساخن (hot set test) لكل من البولي إيثيلين المشبك XLPE ومطاط الإيثيلين بروبيلين EPR
- قياس السعة
- قياس الكثافة للبولى إيثيلين عالى الكثافة HDPE

أما الإختبارات الخاصة المطلوب إجراؤها على الكبلات المعزولة بالورق المشرب والمملوءة بالزيت فى مدى جهد حتى 275 ك ف وطبقاً لـ IEC-141 هي:

- تغير عامل الفقد (معامل القدرة) مع درجة الحرارة
- اختبار أمان العزل

- الأجهزة التي تستخدم الدوائر القنطرية (bridge devices)
- الأجهزة التي تستخدم بعينه الصدى النبضي (pulse echo devices)

وقبل استخدام جهاز القياس (أيا كان نوعه) يجب القيام ببعض القياسات المبدئية لمعرفة نوع الخطأ ، أى هل هو قصر بين موصل والأرض أم قصر بين موصلين أو قطع فى موصل، وتحديد الموصل أو الموصلات التي بها الخطأ.

ويتم تحديد الموصل الذي به خطأ إلى الأرض باتباع الخطوات التالية :

- تفصل جميع الموصلات عند طرفيها وتعزل الأطراف بعضها عن بعض وعن الأرض .

- يتم قياس مقاومة العزل إلى الأرض على النحو التالي :

(أ) بالنسبة للكبلات ذات المجال الكهربى اللاقطرى : تقاس المقاومة بين الغلاف وكل من الموصلات بالتعاقب مع توصيل الموصلين الآخرين بالغلاف .

(ب) بالنسبة للكبلات ذات المجال النصف قطري : تقاس المقاومة بين كل موصل والغلاف (أو الحجاب فى حالة الكبلات الثلاثية القلب).

وإذا كانت المقاومة المقاسة هي R_m فإن مقاومة العزل لكل وحدة طول هي

$$R_i = R_m L \quad \text{megohm/km}$$

حيث L هو طول الكبل . ويتم مقارنة قيم هذه المقاومات المقاسة بقيمة المقاومة المدرجة بجدول المصنع لهذا النوع من الكبلات ومن ثم يمكن تحديد الموصل الذي به خطأ إلى الأرض .

ولتحديد عما إذا كان الخطأ نتيجة لقصر بين موصلين تقاس مقاومة العزل بين كل موصلين على التعاقب .

4.1.5 اختبارات، ما بعد التركيب

يتم إجراء هذه الاختبارات بعد إتمام تركيب الكبل وملحقاته. ومن أمثلة هذه الاختبارات الاختبارات التي يجب إجراؤها على الكبلات البلمرية للجهود المقننة من 30 ك ف حتى 150 ك ف (IEC 840) :

- اختبار التيار المستمر
- اختبار التيار المتغير
- اختبار الغلاف اللامعدني

والاختبارات المتضمنة فى فئة معينة قد تختلف باختلاف نوع الكبل. فمثلا الاختبار الذي يعتبر اختبارا روتينيا بالنسبة لنوع معين من الكبلات قد يصنف كاختبار خاص بالنسبة لنوع آخر من الكبلات . ولذلك فإنه يجب دائما الرجوع إلى المواصفات القياسية - قومية كانت أو دولية - الخاصة بالاختبارات التي يجب إجراؤها بالنسبة لنوع كبل معين.

2.5 تحديد موضع الخطأ (fault location)

هناك ثلاثة أنواع من الأخطاء التي قد تقع فى الكبلات :

- (1) خطأ بين موصل والأرض (الغلاف أو الحجاب) وذلك نتيجة لانتهيار كهربى فى العزل ،
 - (2) قصر بين موصلين فى الكبلات المتعددة القلب والغير محببة ،
 - (3) قطع فى أحد الموصلات .
- وهناك عدة أجهزة قياس لتحديد الخطأ حيث يمكن ، بصفة عامة ، تقسيم

هذه الأجهزة إلى نوعين :

(أ) دائرة موري القنطرية

يبين الشكل 5.1a توصيلات الدائرة لتحديد موقع خطأ بين موصل الأرض ، والشكل 5.1b لتحديد موقع خطأ بين موصلين . وكنتا الدائرتان هما أساساً دوائر لقنطرة ويستون (Wheatstone) .
في الدائرة الأولى يتم توصيل الموصل الذي به الخطأ بموصل سليم عند إحدى نهايات الكبل، وأذرع القنطرة مكونة من أربع مقاومات: P و Q و R+X و X مقاومات متغيرة و R و X هي:

$$R = rL + r(L - x)$$

$$X = rx$$

حيث :

$$r = \text{مقاومة الموصل لكل وحدة طول}$$

$$L = \text{طول الموصل}$$

$$x = \text{بعد مكان الخطأ عن طرف القياس}$$

وعند اتزان القنطرة فإن،

$$\frac{P}{Q} = \frac{R}{X} = \frac{r(2L - x)}{rx}$$

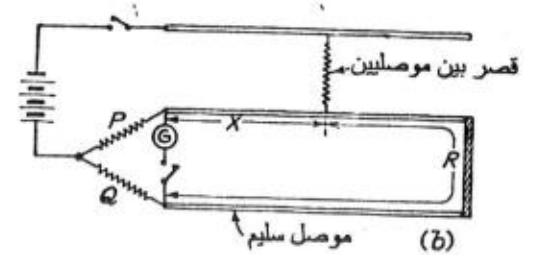
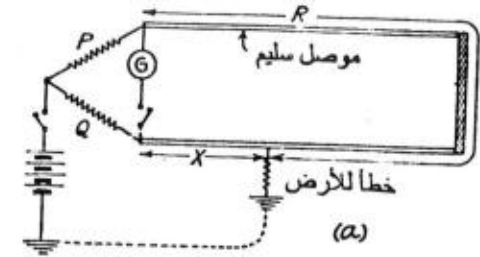
ويكون بعد مكان الخطأ عن طرف القياس هو إذن:

$$x = 2L \frac{Q}{P + Q}$$

والدائرة الثانية لا تختلف عن الدائرة الأولى فيما عدا توصيل إحدى ضراف البطارية بالموصل السليم بدلاً من توصيله بالأرض .
ويلاحظ أنه في كلتا الدائرتين لا تؤثر مقاومة الخطأ على النتيجة إلا أنه إذا كانت قيمتها مرتفعة فقد يقلل ذلك من حساسية القنطرة .

1.2.5 تحديد موضع الخطأ باستخدام الدوائر القنطرية

يوجد العديد من الدوائر القنطرية التي تستخدم في تحديد موقع الخطأ ولكننا سنكتفي هنا بوصف الدائرتين الأكثر استخداماً في هذا المجال وهما دائرة موري (Murray loop) ودائرة فارلي (Varley loop) .



شكل 1.5 دائرة موري (Murray) القنطرية
(a) خطأ بين موصل والأرض
(b) خطأ بين موصلين

$$\frac{P}{Q} = \frac{R}{X + S}$$

$$(1-5) \quad X = \frac{Q(R + X) - SP}{P + Q}$$

وعند إتزان القنطرة والمفتاح في الوضع d في الدائرة الأولى :

$$(2-5) \quad \frac{P}{Q} = \frac{R + X}{S_1}$$

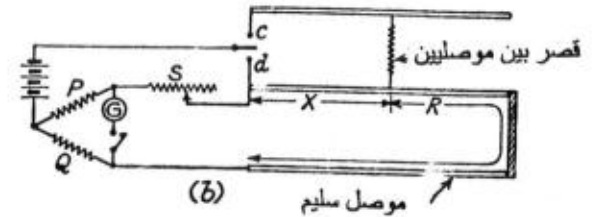
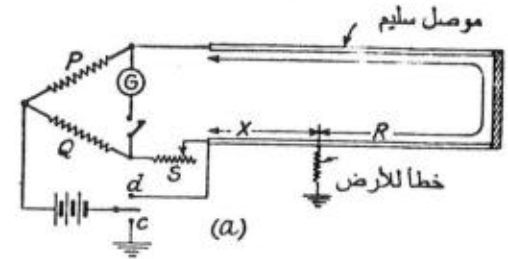
وعند إتزان القنطرة والمفتاح في الوضع d في الدائرة الثانية

$$(3-5) \quad \frac{P}{Q} = \frac{S_2}{R + X}$$

وفي كلتا الحالتين يتم إيجاد قيمة x من المعادلات (1 - 5) و (2 - 5) و (3 - 5) ، ومن ثم ،

$$x = X/r$$

وفي هذه الطريقة يتم إيجاد تحديد موضع الخطأ بدون الحاجة إلى معرفة طول الكبل.



شكل 2.5 دائرة فارلي (Varley) القنطرية
(a) خطأ بين موصل والأرض
(b) خطأ بين موصلين

(ب) دائرة فارلي القنطرية

يبين الشكل 2a . 5 توصيلات الدائرة لتحديد موضع الخطأ بين موصل والأرض والشكل 2b . 5 يبين توصيلات الدائرة لتحديد موضع الخطأ بين موصلين.

وفي هذه الدائرة تكون المقاومتان P , Q ثابتتين ويتم إتزان القنطرة بواسطة المقاومة المتغيرة S والموصلة بطرف الكبل الذي به الخطأ. وعند إتزان القنطرة والمفتاح في الوضع c في أي من الدائرتين نحد أن:

ويصبح عامل الإنعكاس

$$\rho = \frac{-Z}{2R_f + Z}$$

وعند القصر ($Z_2 = R_f = 0$):

$$\rho = -1$$

وعند فتح الموصل ($Z_2 = \infty$)

$$\rho = +1$$

ومن الواضح مما سبق أنه إذا كانت مقاومة الخطأ صغيرة تكون الموجة المنعكسة سالبة وقوية وإذا كانت المقاومة كبيرة فالموجة المنعكسة تكون سالبة وضعيفة .

وفي حالة القصر تنعكس الموجة بأكملها بالسالب وفي حالة القطع (open circuit) تنعكس الموجة بأكملها بالموجب .

ويقوم جهاز تحديد الأخطاء بالصدى النبضي بإرسال نبضة كهربية فى الموصل الذي به الخطأ وقياس الزمن المنصرم من لحظة إرسال هذه النبضة حتى وصول النبضة المنعكسة . ويتم تحديد موضع الخطأ من المعادلة الآتية

$$x = \frac{1}{2} vt$$

حيث ،

x = بعد نقطة الخطأ عند نهاية الكبل

v = سرعة انتشار النبضة على الموصل (من المعادلة 5 - 4)

t = الزمن المقاس

وستطيع أجهزة الصدى النبضي الحديثة أن تحدد موضع الخطأ بدقة فائقة وذلك بغض النظر عن قيمة مقاومة الخطأ . أما الأجهزة القديمة الصنع فهي لا تعطى قياسات دقيقة إذا زادت قيمة مقاومة الخطأ عن 500 أوم .

$$(4-5) \quad v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

حيث c هى سرعة الضوء فى الفضاء و ϵ_r المجاوزية النسبية لمادة العزل. وينعكس جزء من الموجة المنتقلة عند نقط تحول (transition points) وهى النقط التى تتغير عندها المعاوقة المميزة للموصل. وتمثل النقطة التى يقع عندها الخطأ نقطة تحول. ومعامل الانعكاس عند نقطة التحول هى بصفة عامة:

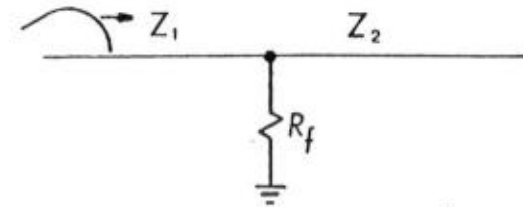
$$(5-5) \quad \rho = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

حيث

Z_1 = المعاوقة قبل نقطة التحول

Z_2 = معاوقة الدخول عند نقطة التحول

وإذا اعتبرنا أن الخطأ فى الكبل له مقاومة R_f كما هو مبين فى الشكل 3.5 فإن المعاوقة عند نقطة التحول هي:



شكل 3.5 نقطة تحول عند الخطأ

$$(6-5) \quad Z_2 = \frac{R_f Z}{R_f + Z}$$

فبالنسبة لهذه الأجهزة يجب قياس القيمة التقريبية لمقاومة الخطأ بواسطة جهاز " أومتر " يعمل بالبطاريات وخاص باختبار الكبلات. ولايجوز استخدام جهاز الميجر (megger) حيث أن الجهد العالي الذي يولده هذا الجهاز قد يتسبب في حدوث تفريغ بالشرر (spark - over) مما يعطى قراءة خاطئة لمقاومة الخطأ . وإذا وجد أن مقاومة الخطأ عالية يتم تخفيضها بواسطة جهاز خاص يؤدي الى حرق الخطأ وتخفيض مقاومته ولذلك يعرف بجهاز احتراق الخطأ (burn-through device).

ملحق 1

جداول قدرة حمل التيار لمختلف أنواع الكبلات حتى 30 ك ف
(طبقاً للمواصفات الألمانية)

جدول م 1 - 1 كبلات PVC أحادية وثنائية القلب : 1 ك ف

| | | | | |
|------------------------------|---|--------------|----------------|--------------|
| Nominal cross-sectional area | Rated voltage U_0 / U (kV) | | | |
| | 0.6/1 | | | |
| | Permissible operating temperature | | | |
| | 70°C | | | |
| mm ² | Single-core | | Twin-core | |
| | Ambient temperature and installation medium | | | |
| | 20 °C earth | 30 °C air | 20 °C earth | 30 °C air |
| Carrying capacity (A) | | | | |

Copper conductors

| | | | | |
|-----|------|------|-----|-----|
| 1.5 | 40 | 26 | 32 | 20 |
| 2.5 | 54 | 35 | 42 | 27 |
| 4 | 70 | 46 | 54 | 37 |
| 6 | 90 | 58 | 68 | 48 |
| 10 | 122 | 79 | 90 | 66 |
| 16 | 160 | 105 | 116 | 89 |
| 25 | 206 | 140 | 150 | 118 |
| 35 | 249 | 174 | 181 | 145 |
| 50 | 296 | 212 | 215 | 176 |
| 70 | 365 | 269 | 264 | 224 |
| 95 | 438 | 331 | 317 | 271 |
| 120 | 499 | 386 | 360 | 314 |
| 150 | 561 | 442 | 406 | 361 |
| 185 | 637 | 511 | 458 | 412 |
| 240 | 743 | 612 | 537 | 484 |
| 300 | 843 | 707 | - | - |
| 400 | 986 | 859 | - | - |
| 500 | 1125 | 1000 | - | - |

Aluminium conductors

| | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| 25 | - | - | 117 | 91 |
| 35 | 192 | 145 | 139 | 113 |
| 50 | 229 | 176 | 167 | 138 |
| 70 | 282 | 224 | 206 | 174 |
| 95 | 339 | 271 | 246 | 210 |
| 120 | 388 | 314 | 281 | 244 |
| 150 | 435 | 361 | 316 | 281 |
| 185 | 494 | 412 | 358 | 320 |
| 240 | 578 | 484 | 419 | 378 |
| 300 | 654 | 548 | - | - |
| 400 | 765 | 666 | - | - |
| 500 | 873 | 776 | - | - |

جدول م 1- 3 كبلات PVC أحادية القلب : 1 إلى 10 ك ف

| Cables in flat formation | | | | | | Cables in trefoil formation | | | | | | |
|------------------------------|---|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------------------------|-----------------------------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|
| Nominal cross-sectional area | Rated voltage U_0/U (kV) | | | | | | Rated voltage U_0/U (kV) | | | | | |
| | 0.6/1 | | 3.5/6 | | 6/10 | | 0.6/1 | | 3.5/6 | | 6/10 | |
| | Permissible operating temperature | | | | | | Permissible operating temperature | | | | | |
| mm ² | 70 °C | | 70 °C | | 70 °C | | 70 °C | | 70 °C | | 70 °C | |
| | Ambient temperature and installation medium | | | | | | | | | | | |
| | 20 °C earth | 30 °C air | 20 °C earth | 30 °C air | 20 °C earth | 30 °C air | 20 °C earth | 30 °C air | 20 °C earth | 30 °C air | 20 °C earth | 30 °C air |
| Carrying capacity (A) | | | | | | Carrying capacity (A) | | | | | | |

Copper conductors

| | | | | | | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 16 | 127 | 103 | — | — | — | — | 107 | 89 | — | — | — | — |
| 25 | 163 | 137 | 159 | 143 | 155 | 140 | 137 | 118 | 140 | 122 | 138 | 120 |
| 35 | 195 | 169 | 190 | 174 | 185 | 170 | 165 | 145 | 167 | 147 | 164 | 145 |
| 50 | 230 | 206 | 223 | 210 | 217 | 205 | 195 | 176 | 198 | 178 | 193 | 174 |
| 70 | 282 | 261 | 272 | 263 | 264 | 256 | 239 | 224 | 242 | 222 | 236 | 217 |
| 95 | 336 | 321 | 323 | 321 | 313 | 311 | 287 | 271 | 289 | 271 | 281 | 264 |
| 120 | 382 | 374 | 364 | 370 | 353 | 359 | 326 | 314 | 328 | 312 | 318 | 304 |
| 150 | 428 | 428 | 396 | 413 | 384 | 401 | 366 | 361 | 366 | 354 | 354 | 343 |
| 185 | 483 | 494 | 443 | 472 | 429 | 457 | 414 | 412 | 413 | 406 | 399 | 393 |
| 240 | 561 | 590 | 505 | 553 | 490 | 536 | 481 | 484 | 478 | 480 | 460 | 464 |
| 300 | 632 | 678 | 560 | 625 | 543 | 607 | 542 | 549 | 536 | 547 | 515 | 528 |
| 400 | 730 | 817 | 610 | 711 | 590 | 690 | 624 | 657 | 605 | 643 | 579 | 619 |
| 500 | 823 | 940 | — | — | — | — | 698 | 749 | — | — | — | — |

Aluminium conductors

| | | | | | | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 35 | 151 | 131 | 147 | 135 | 143 | 132 | 127 | 113 | 129 | 114 | 127 | 112 |
| 50 | 179 | 160 | 174 | 164 | 169 | 159 | 151 | 138 | 154 | 138 | 150 | 135 |
| 70 | 218 | 202 | 213 | 205 | 207 | 200 | 186 | 174 | 188 | 173 | 183 | 168 |
| 95 | 261 | 249 | 254 | 251 | 246 | 243 | 223 | 210 | 225 | 210 | 219 | 205 |
| 120 | 297 | 291 | 287 | 290 | 278 | 281 | 254 | 244 | 256 | 244 | 248 | 237 |
| 150 | 332 | 333 | 316 | 327 | 306 | 316 | 285 | 281 | 286 | 277 | 277 | 268 |
| 185 | 376 | 384 | 355 | 375 | 343 | 363 | 323 | 320 | 324 | 318 | 312 | 307 |
| 240 | 437 | 460 | 409 | 444 | 395 | 429 | 378 | 378 | 377 | 379 | 363 | 365 |
| 300 | 494 | 530 | 457 | 505 | 441 | 488 | 427 | 433 | 425 | 434 | 408 | 418 |
| 400 | 572 | 642 | 509 | 587 | 490 | 568 | 496 | 523 | 488 | 517 | 465 | 496 |
| 500 | 649 | 744 | — | — | — | — | 562 | 603 | — | — | — | — |

جدول م 2 - 1 كبلات PVC ثلاثية القلب : 1 إلى 10 ك ف

| Nominal cross-sectional area | Rated voltage U_0/U (kV) | | | | | |
|------------------------------|---|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|
| | 0.6/1 | | 3.5/6 | | 6/10 | |
| | Permissible operating temperature | | | | | |
| | 70 °C | | 70 °C | | 70 °C | |
| mm ² | Three and four-core | | Three-core | | Three-core | |
| | Ambient temperature and installation medium | | | | | |
| | 20 °C earth | 30 °C air | 20 °C earth | 30 °C air | 20 °C earth | 30 °C air |
| Carrying capacity (A) | | | | | | |

Copper conductors

| | | | | | | |
|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|
| 1.5 | 26 | 18.5 | — | — | — | — |
| 2.5 | 34 | 25 | — | — | — | — |
| 4 | 44 | 34 | — | — | — | — |
| 6 | 56 | 43 | — | — | — | — |
| 10 | 75 | 60 | — | — | — | — |
| 16 | 98 | 80 | — | — | — | — |
| 25 | 128 | 106 | 126 | 105 | 133 | 114 |
| 35 | 157 | 131 | 158 | 131 | 160 | 138 |
| 50 | 185 | 159 | 187 | 157 | 189 | 165 |
| 70 | 228 | 202 | 230 | 197 | 230 | 204 |
| 95 | 275 | 244 | 275 | 241 | 275 | 247 |
| 120 | 313 | 282 | 313 | 277 | 312 | 284 |
| 150 | 353 | 324 | 352 | 316 | 350 | 322 |
| 185 | 399 | 371 | 397 | 362 | 394 | 367 |
| 240 | 464 | 436 | 460 | 427 | 455 | 430 |
| 300 | 524 | 481 | 518 | 487 | 512 | 490 |
| 400 | 600 | 560 | 587 | 565 | 584 | 574 |

Aluminium conductors

| | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 25 | 99 | 83 | — | — | — | — |
| 35 | 118 | 102 | 122 | 101 | 123 | 106 |
| 50 | 142 | 124 | 145 | 122 | 146 | 128 |
| 70 | 176 | 158 | 178 | 153 | 179 | 158 |
| 95 | 211 | 190 | 214 | 187 | 213 | 192 |
| 120 | 242 | 220 | 243 | 215 | 243 | 221 |
| 150 | 270 | 252 | 274 | 246 | 272 | 250 |
| 185 | 308 | 289 | 310 | 283 | 307 | 286 |
| 240 | 363 | 339 | 361 | 335 | 356 | 336 |
| 300 | 412 | 377 | 408 | 384 | 402 | 385 |
| 400 | 475 | 444 | 468 | 450 | 464 | 456 |



جدول م 1 - 5 كبلات PE أحادية القلب : 10 إلى 30 ك ف

| Cables in flat formation | | | | | | | Cables in trefoil formation | | | | | | |
|------------------------------|---|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------------------|-----------------------------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|--|
| Nominal cross-sectional area | Rated voltage U_0/U (kV) | | | | | | Rated voltage U_0/U (kV) | | | | | | |
| | 6/10 | | 12/20 | | 18/30 | | 6/10 | | 12/20 | | 18/30 | | |
| | Permissible operating temperature | | | | | | Permissible operating temperature | | | | | | |
| mm ² | 70 °C | | | | | | 70 °C | | | | | | |
| | Ambient temperature and installation medium | | | | | | | | | | | | |
| | 20 °C earth | 30 °C air | 20 °C earth | 30 °C air | 20 °C earth | 30 °C air | 20 °C earth | 30 °C air | 20 °C earth | 30 °C air | 20 °C earth | 30 °C air | |
| Carrying capacity (A) | | | | | | Carrying capacity (A) | | | | | | | |

Copper conductors

| | | | | | | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 25 | 166 | 158 | — | — | — | — | 146 | 133 | — | — | — | — |
| 35 | 197 | 190 | 198 | 193 | — | — | 174 | 161 | 176 | 164 | — | — |
| 50 | 231 | 228 | 233 | 230 | 234 | 232 | 205 | 192 | 208 | 197 | 210 | 199 |
| 70 | 281 | 284 | 283 | 287 | 284 | 288 | 251 | 240 | 254 | 244 | 257 | 248 |
| 95 | 333 | 344 | 335 | 347 | 337 | 348 | 299 | 291 | 302 | 295 | 306 | 300 |
| 120 | 375 | 396 | 378 | 398 | 381 | 400 | 339 | 335 | 343 | 340 | 347 | 344 |
| 150 | 408 | 440 | 412 | 444 | 416 | 446 | 377 | 378 | 381 | 383 | 386 | 388 |
| 185 | 455 | 500 | 460 | 504 | 465 | 507 | 425 | 432 | 430 | 438 | 435 | 442 |
| 240 | 519 | 585 | 525 | 589 | 532 | 590 | 490 | 509 | 496 | 515 | 503 | 520 |
| 300 | 575 | 660 | 583 | 665 | 590 | 666 | 549 | 579 | 556 | 586 | 564 | 590 |
| 400 | 618 | 728 | 628 | 734 | 638 | 737 | 614 | 665 | 623 | 671 | 632 | 675 |
| 500 | 678 | 810 | 689 | 817 | 702 | 821 | 682 | 750 | 692 | 757 | 703 | 763 |

Aluminium conductors

| | | | | | | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 35 | 153 | 148 | — | — | — | — | 135 | 124 | — | — | — | — |
| 50 | 181 | 178 | 181 | 179 | 182 | 180 | 159 | 149 | 161 | 152 | 163 | 155 |
| 70 | 220 | 222 | 221 | 223 | 222 | 224 | 195 | 186 | 197 | 189 | 199 | 192 |
| 95 | 261 | 269 | 263 | 271 | 264 | 272 | 232 | 226 | 235 | 230 | 238 | 233 |
| 120 | 296 | 310 | 297 | 312 | 299 | 313 | 264 | 261 | 267 | 265 | 270 | 268 |
| 150 | 325 | 348 | 327 | 351 | 330 | 351 | 294 | 295 | 298 | 299 | 302 | 302 |
| 185 | 365 | 398 | 369 | 400 | 371 | 401 | 333 | 338 | 337 | 342 | 341 | 346 |
| 240 | 420 | 469 | 423 | 471 | 427 | 471 | 387 | 401 | 391 | 406 | 396 | 408 |
| 300 | 468 | 534 | 473 | 535 | 477 | 535 | 435 | 459 | 440 | 463 | 446 | 465 |
| 400 | 514 | 603 | 521 | 604 | 527 | 605 | 493 | 533 | 499 | 536 | 505 | 538 |
| 500 | 572 | 680 | 579 | 683 | 587 | 683 | 555 | 609 | 562 | 612 | 569 | 615 |

| Nominal cross-sectional area | Rated voltage U_0/U (kV) | | | | | | |
|---|-----------------------------------|-----------|-------|-------------|-------|------------------|--|
| | 0.6/1 | | 6/10 | | 6/10 | | |
| | Permissible operating temperature | | | | | | |
| mm ² | 90 °C | | 90 °C | | 70 °C | | |
| | Three and four-core | | | Three-core | | Three-core | |
| | PROTOTHEN-X cables | | | | | PROTOTHEN cables | |
| Ambient temperature and installation medium | | | | | | | |
| 20 °C earth | | 30 °C air | | 20 °C earth | | 30 °C air | |
| Carrying capacity (A) | | | | | | | |

Copper conductors

| | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1.5 | 30 | 24 | — | — | — | — |
| 2.5 | 40 | 32 | — | — | — | — |
| 4 | 52 | 42 | — | — | — | — |
| 6 | 64 | 53 | — | — | — | — |
| 10 | 86 | 73 | — | — | — | — |
| 16 | 111 | 96 | — | — | — | — |
| 25 | 143 | 130 | — | — | — | — |
| 35 | 173 | 160 | 178 | 173 | 166 | 143 |
| 50 | 205 | 195 | 210 | 206 | 195 | 170 |
| 70 | 252 | 247 | 256 | 257 | 238 | 212 |
| 95 | 303 | 305 | 307 | 313 | 286 | 258 |
| 120 | 346 | 355 | 349 | 360 | 325 | 297 |
| 150 | 390 | 407 | 392 | 410 | 364 | 338 |
| 185 | 441 | 469 | 443 | 469 | 412 | 386 |
| 240 | 511 | 551 | 513 | 553 | 477 | 455 |
| 300 | 580 | 638 | — | — | — | — |
| 400 | 663 | 746 | — | — | — | — |

Aluminium conductors

| | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 25 | 111 | 100 | — | — | — | — |
| 35 | 132 | 122 | — | — | — | — |
| 50 | 157 | 147 | 162 | 160 | 151 | 132 |
| 70 | 195 | 189 | 199 | 199 | 185 | 165 |
| 95 | 233 | 232 | 238 | 242 | 222 | 200 |
| 120 | 266 | 270 | 271 | 280 | 252 | 231 |
| 150 | 299 | 308 | 304 | 318 | 283 | 262 |
| 185 | 340 | 357 | 345 | 365 | 321 | 301 |
| 240 | 401 | 435 | 401 | 431 | 373 | 356 |
| 300 | 455 | 501 | — | — | — | — |
| 400 | 526 | 592 | — | — | — | — |

جدول م 1 - 7 كبلات الورق المشرب : 1 إلى 10 ك ف

| Nominal cross-sectional area | Rated voltage U_0/U (kV) | | | | | |
|------------------------------|---|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|
| | 0.6/1 | | 3.5/6 | | 6/10 | |
| | Permissible operating temperature | | | | | |
| | 80 °C | | 80 °C | | 65 °C | |
| mm ² | Three and four-core | | Three-core | | Three-core | |
| | Ambient temperature and installation medium | | | | | |
| | 20 °C earth | 30 °C air | 20 °C earth | 30 °C air | 20 °C earth | 30 °C air |
| Carrying capacity (A) | | | | | | |
| Copper conductors | | | | | | |
| 25 | 133 | 114 | 133 | 115 | 117 | 99 |
| 35 | 161 | 140 | 161 | 142 | 143 | 120 |
| 50 | 191 | 169 | 190 | 169 | 171 | 144 |
| 70 | 235 | 212 | 234 | 212 | 212 | 181 |
| 95 | 281 | 259 | 281 | 259 | 257 | 221 |
| 120 | 320 | 299 | 321 | 301 | 293 | 254 |
| 150 | 361 | 343 | 362 | 344 | 332 | 290 |
| 185 | 410 | 397 | 409 | 394 | 377 | 332 |
| 240 | 474 | 467 | 474 | 465 | 437 | 389 |
| 300 | 533 | 533 | 532 | 527 | 493 | 442 |
| 400 | 602 | 611 | 601 | 608 | 561 | 509 |
| Aluminium conductors | | | | | | |
| 25 | 103 | 89 | 103 | 89 | 91 | 76 |
| 35 | 124 | 108 | 124 | 109 | 110 | 93 |
| 50 | 148 | 131 | 147 | 131 | 132 | 112 |
| 70 | 182 | 165 | 182 | 165 | 165 | 140 |
| 95 | 218 | 201 | 218 | 201 | 200 | 172 |
| 120 | 249 | 233 | 250 | 234 | 229 | 198 |
| 150 | 281 | 267 | 281 | 268 | 259 | 226 |
| 185 | 320 | 310 | 320 | 308 | 295 | 260 |
| 240 | 372 | 366 | 372 | 365 | 343 | 305 |
| 300 | 420 | 420 | 419 | 415 | 389 | 349 |
| 400 | 481 | 488 | 481 | 485 | 449 | 407 |

جدول م 1 - 6 كبلات XLPE أحادية القلب : 10 إلى 30 ك ف

| Cables in flat formation | | | | | | | Cables in trefoil formation | | | | | |
|------------------------------|---|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-----------------------------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|
| Nominal cross-sectional area | Rated voltage U_0/U (kV) | | | | | | Rated voltage U_0/U (kV) | | | | | |
| | 6/10 | | 12/20 | | 18/30 | | 6/10 | | 12/20 | | 18/30 | |
| | Permissible operating temperature | | | | | | Permissible operating temperature | | | | | |
| | 90 °C | | 90 °C | | 90 °C | | 90 °C | | 90 °C | | 90 °C | |
| mm ² | Ambient temperature and installation medium | | | | | | | | | | | |
| | 20 °C earth | 30 °C air | 20 °C earth | 30 °C air | 20 °C earth | 30 °C air | 20 °C earth | 30 °C air | 20 °C earth | 30 °C air | 20 °C earth | 30 °C air |
| | Carrying capacity (A) | | | | | | Carrying capacity (A) | | | | | |
| Copper conductors | | | | | | | | | | | | |
| 25 | 179 | 191 | — | — | — | — | 157 | 162 | — | — | — | — |
| 35 | 212 | 231 | 213 | 233 | — | — | 187 | 195 | 189 | 199 | — | — |
| 50 | 249 | 277 | 250 | 279 | 251 | 279 | 220 | 234 | 223 | 238 | 226 | 241 |
| 70 | 303 | 345 | 304 | 347 | 306 | 348 | 269 | 292 | 273 | 296 | 276 | 299 |
| 95 | 358 | 418 | 361 | 420 | 363 | 421 | 321 | 354 | 325 | 358 | 329 | 362 |
| 120 | 404 | 481 | 407 | 483 | 410 | 483 | 364 | 407 | 368 | 412 | 373 | 416 |
| 150 | 441 | 537 | 445 | 540 | 449 | 540 | 405 | 460 | 410 | 466 | 415 | 469 |
| 185 | 493 | 612 | 498 | 614 | 503 | 615 | 457 | 527 | 463 | 532 | 468 | 536 |
| 240 | 563 | 716 | 569 | 718 | 576 | 718 | 528 | 621 | 534 | 627 | 541 | 630 |
| 300 | 626 | 811 | 633 | 813 | 641 | 812 | 593 | 709 | 601 | 715 | 608 | 717 |
| 400 | 676 | 901 | 686 | 904 | 697 | 904 | 665 | 815 | 674 | 819 | 684 | 823 |
| 500 | 743 | 1006 | 756 | 1011 | 768 | 1011 | 739 | 921 | 750 | 927 | 762 | 929 |
| Aluminium conductors | | | | | | | | | | | | |
| 35 | 164 | 178 | — | — | — | — | 144 | 151 | — | — | — | — |
| 50 | 194 | 215 | 195 | 217 | 196 | 217 | 171 | 181 | 173 | 184 | 175 | 187 |
| 70 | 236 | 260 | 237 | 270 | 238 | 270 | 209 | 226 | 211 | 229 | 214 | 232 |
| 95 | 281 | 327 | 282 | 328 | 284 | 328 | 249 | 275 | 252 | 278 | 255 | 281 |
| 120 | 318 | 377 | 320 | 378 | 322 | 378 | 292 | 317 | 297 | 320 | 299 | 323 |
| 150 | 350 | 424 | 353 | 425 | 355 | 425 | 316 | 359 | 329 | 362 | 324 | 365 |
| 185 | 393 | 455 | 396 | 455 | 400 | 455 | 358 | 412 | 372 | 415 | 364 | 418 |
| 240 | 453 | 553 | 457 | 573 | 461 | 572 | 415 | 489 | 421 | 491 | 426 | 494 |
| 300 | 507 | 652 | 511 | 652 | 516 | 649 | 465 | 559 | 474 | 563 | 479 | 564 |
| 400 | 559 | 741 | 566 | 740 | 572 | 737 | 512 | 651 | 518 | 652 | 545 | 654 |
| 500 | 622 | 838 | 630 | 838 | 638 | 835 | 599 | 744 | 606 | 746 | 614 | 747 |

جدول م 1 - 8 كبلات الورق المشرب : 6 إلى 30 ك ف

ملحق 2

أهم المواصفات القياسية الخاصة بكبلات القوى التي تصدرها اللجنة الدولية للمواصفات القياسية الكهربائية:

International Electrotechnical Commission - IEC

| Nominal cross-sectional area | Rated voltage U_n / U (kV) | | | | | | | |
|------------------------------|---|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|
| | 3.5/6 | | 6/10 | | 12/20 | | 18/30 | |
| | Permissible conductor temperature | | | | | | | |
| | 80 °C | | 70 °C | | 65 °C | | 60 °C | |
| mm ² | Ambient temperature and installation medium | | | | | | | |
| | 20 °C earth | 30 °C air | 20 °C earth | 30 °C air | 20 °C earth | 30 °C air | 20 °C earth | 30 °C air |
| | Carrying capacity (A) | | | | | | | |
| Copper conductors | | | | | | | | |
| 25 | 140 | 125 | 133 | 114 | 126 | 109 | — | — |
| 35 | 167 | 152 | 159 | 138 | 151 | 132 | 142 | 124 |
| 50 | 198 | 182 | 189 | 165 | 180 | 158 | 169 | 147 |
| 70 | 243 | 227 | 233 | 205 | 222 | 196 | 209 | 183 |
| 95 | 291 | 276 | 281 | 251 | 268 | 238 | 252 | 221 |
| 120 | 332 | 320 | 321 | 289 | 304 | 272 | 287 | 254 |
| 150 | 374 | 364 | 360 | 328 | 343 | 309 | 324 | 288 |
| 185 | 422 | 415 | 407 | 375 | 388 | 352 | 367 | 328 |
| 240 | 490 | 491 | 471 | 440 | 453 | 414 | 428 | 385 |
| 300 | 550 | 554 | 530 | 501 | 511 | 471 | 483 | 437 |
| 400 | 631 | 653 | 608 | 589 | 591 | 552 | 558 | 512 |
| 500 | 705 | 740 | 678 | 665 | 661 | 623 | 623 | 576 |
| Aluminium conductors | | | | | | | | |
| 25 | 108 | 97 | 103 | 89 | 97 | 85 | — | — |
| 35 | 129 | 117 | 123 | 106 | 117 | 102 | 110 | 95 |
| 50 | 154 | 141 | 147 | 128 | 140 | 123 | 131 | 114 |
| 70 | 189 | 176 | 181 | 160 | 173 | 153 | 163 | 142 |
| 95 | 226 | 214 | 218 | 195 | 208 | 185 | 196 | 172 |
| 120 | 256 | 249 | 250 | 225 | 237 | 212 | 224 | 198 |
| 150 | 291 | 283 | 280 | 256 | 267 | 241 | 252 | 224 |
| 185 | 329 | 324 | 318 | 293 | 304 | 275 | 287 | 257 |
| 240 | 384 | 384 | 370 | 345 | 355 | 325 | 336 | 302 |
| 300 | 432 | 436 | 417 | 394 | 403 | 371 | 380 | 344 |
| 400 | 503 | 520 | 485 | 470 | 471 | 440 | 445 | 408 |
| 500 | 570 | 597 | 548 | 537 | 534 | 503 | 504 | 466 |

IEC document No. and title :

- 55 Paper-insulated metal-sheathed cables for rated voltages up to 18/30 kV (with copper or aluminium conductors and excluding gas-pressure and oil-filled cables).
Part 1: Tests
Part 2: General and construction requirements
- 141 Tests on oil-filled and gas-pressure cables and their accessories.
Part 1: Oil-filled, paper-insulated, metal-sheathed cables and accessories for alternating voltages up to and including 400 kV.
Part 2: Internal gas-pressure cables and accessories for alternating voltages up to 275 kV.
Part 3: External gas pressure (gas compression) cable and accessories for alternating voltages up to 275 kV.
- 183 Guidance to the selection of HV cables.
Gives guidance in the selection of the conductor size, insulation level and construction of the cable to be used on three phase AC systems operating at voltages exceeding 1 kV.
- 227 PVC-insulated cables of rated voltages up to and including $U_0/U = 450/750$ V.
Covers small power and lighting cables mainly applicable to building services applications. Gives details of core marking, core identification, test methods, non-sheathed single core cables, light PVC sheathed cables for rated voltage 300/500, flexible cables for lift applications, etc.

- 331 Fire resisting characteristics of electric cables.
Gives performance requirements, sample and test conditions, source of heat and test procedures.
- 332 Tests on electric cables under fire conditions.
Part 1: Test on a single vertical insulated wire or cable.
Part 2: Test on a single small vertical insulated copper wire or cable.
Part 3: Tests on bunched wires or cables.
- 364 Electrical installations in buildings.
- 502 Extruded and dielectric insulated power cables for rated voltages from 1 kV up to 30 kV.
Specifies the construction, dimensions and test requirements for PVC, PE-, EPR- and XLPE-insulated cables.
- 724 Guide to the short circuit temperature limits of electric cables with a rated voltage not exceeding 0.6/1.0 kV.
Gives guidance on calculation of permissible short circuit currents, and short circuit maximum temperature rating.
- 754 Test of gases evolved during combustion of electric cables.
Part 1: Determination of amount of halogen acid gas.
Part 2: Determination of degree of acidity of gases evolved during combustion.
Gives methods for the determination of the amount of halogen gas emission (as might be expected from PVC-sheathed and-insulated cables) and the degree of acidity of gases evolved during the combustion of materials taken from cable components

- 228 Conductors of insulated cables.
Specifies standardized nominal cross-sectional areas from 0.5 mm² to 2000 mm², numbers and diameters of wires and resistance values. Classifies solid and stranded copper and aluminium conductors.
- 229 Tests on cable oversheaths which have a special protective function and are applied by extrusion.
Provides tests required for extruded protective coverings that are required for special functions.
- 230 Impulse tests on cables and their accessories.
Gives conditions and procedures for impulse testing of cables and accessories and for coordinating practice used in different laboratories and facilitate comparison between results obtained on cables made to different specifications.
- 287 Electric cables – Calculation of current rating.
Part 1: Current rating equations (100% load factor) and calculation of losses.
Part 2: Thermal resistance
Part 3: Operating conditions
Deals with steady-state operation at all alternating voltages as well as direct voltages to 5 kV for cables buried directly in ground, in ducts, troughs, steel pipes and cables in air installations. Appendices include details of ambient temperatures and soil thermal resistivities in various countries, information required from the purchaser for the selection of the appropriate type of cable plus digital calculation of quantities given graphically.

885 Electrical test methods for electric cables.

Part 1: Electrical tests for cable cords and wires for voltages up to and including 450/750V.

Part 2: Partial discharge tests

Part 3: Test methods for partial discharge measurements on lengths of extruded power cables.

1034 Measurement of smoke density of electric cables burning under defined conditions.

Part 1: Test apparatus.

Part 2: Test procedure and requirements.

This technical report describes the means of preparing and assembling test cables having an overall diameter from 10 mm upwards, and gives the requirements for evaluating test results.

1084 Cable trunking and ducting systems for electrical installations.

Specifies requirements for trunking and ducting systems intended for the accommodation and, where necessary, the segregation of conductors, cables or cords and/or other electrical equipment in electrical installations. Does not apply to conduit, cable tray or cable ladder or current-carrying parts within the system.

811 Common test methods for insulating and sheathing materials of electric cables.

Part 1: Methods of general application.

Part 2: Methods specific to elastometric compounds.

Part 3: Methods specific to PVC compounds.

Part 4: Methods specific to polyethylene and polypropylene compounds.

Part 5: Methods specific to filling compounds.

Concerns dimensional tolerances, elongation, water absorption, thermal stability, etc. More applicable to manufacturers but specific features may be quoted by purchasers in technical Enquirer specification.

840 Tests for power cables with extruded insulation for rated voltages above 30kV up to 150kV.

Specifies test requirements for power cables for fixed installations with extruded-type cables. The requirements apply to cables for usual conditions of installation and operation, but not to special cables such as submarine cables. Tests for accessories are not included.

853 Calculation of the cyclic and emergency current rating of cables.

Part 1: Cyclic rating factor for cables greater than 18/30 (36) kV.

Part 2: Cyclic rating of cables greater than 18/30(36) kV and emergency ratings for cables of all voltages.

Gives manual methods for calculating cyclic rating factors for cables when their internal thermal capacitance can be neglected and when it cannot be neglected [voltages greater than 18/30(36) kV]. It also gives a method for calculating the emergency rating for cables of any voltage.

10. Thue, W.A., *Electrical Power Cable Engineering*, M.Dekker, N.Y. 1999.
11. Anders, G.A., *Rating of Electric Power Cables*, McGraw-Hill, N.Y. 1997.
12. Dissado, L.A. and Fothergill, J.C., *Electrical Degradation and Breakdown in Polymers*, Peter Peregrinus, London, 1992.

المراجع

(أ) الكتب

1. Heinhold, L., *Power Cables and their Applications*, Siemens Aktiengesellschaft, Berlin, 1990.
2. Zaky, A.A. and Megahed, I.Y., *Electrical Power Engineering*, Al Maaref Establishment, Alexandria, 1972.
3. Graneau, P., *Underground Power Transmission*, Wiley, N.Y. 1979.
4. McAllister, D., *Electric Cables Handbook*, Granada Publishing, 1982.
5. King, S.Y. and Halfter, N.A., *Power Cables*, Longman, London, 1982.
6. Tanaka, T and Greenwood, A., *Advanced Power Cable Technology*, CRS Press Inc., Boca Raton, Florida, 1983.
7. Weedy, B.M., *Underground Transmission of Electric Power*, Wiley, Chichester, 1980.
8. Privezentsev, V. et al. *Fundamentals of Cable Engineering*, (translated from Russian), Mir Publishers, Moscow, 1973.
9. IEEE-IPCEA, *Power Cable Ampacities*, IEEE-135, IPCEA Pub. No. P- 46-426, Institute of Electrical and Electronics Engineers, N.Y., 1984.

(ب) مختارات من الأوراق البحثية

1. Eichorn, R.M., *Treeing in Solid Extruded Insulation*, IEEE Trans. Electr. Insul., EI-12, pp 1-12, 1977.
2. Selle, F. and Schulte, D., *Electrical Breakdown of EPR-Insulated Cables at DC and Impulse Voltages*, IEEE Trans. Electr. Insul. EI-22, pp 139-143, 1987.
3. Gleizer, S.E., Mechanov, G.I., Obrastsov, Yu., Peshkov, L.B., and Shuvalov, M.V., *High Voltage Cable with XLPE Insulation in the USSR - Operational Experience. Investigations of Ageing Process and Long-Term Tests*, CIGRE, Session, Committee 21-0. 1990.
4. Arhart, R.A., *The Chemistry of Ethylene Propylene Insulation, Part 1*, IEEE Electr. Insulation Magazine, Vol 9, pp 31-34, 1993.
5. Bow, K.E., *New Developments in Medium and High Voltage Cable with Laminate Sheath as Moisture Barriers*, IEEE Electr. Insulation Magazine, Vol 9, pp 17-28, 1993.
6. Khalil, M.S., *International Research and Development Trends and Problems of HVDC Cables with Polymeric Insulation*, IEEE Electr. Insulation Magazine, Vol 13, pp 35-47, 1997.

7. Okubo,H., Hoshino,T., Takahachi,T., Hikita,M.,and Miyazaki,A., *Insulation Design and On-site Testing Method for a Long Distance, Gas Insulated Transmission Line*, IEEE Electr. Insulation Magazine, Vol 14, pp 13-21, 1998.
8. Byggeth,M., Johannsson,K., Liljegren,C., Palmqvist,L., Axelsson,U., Jonsson,J., and Tornkuist,C., *The Development of an Extruded HVDC Cable System and its First Application in the Gotland HVDC Light Project*, Proceedings of the 5th International Conference on Insulated Power Cables (Jicable), France, 1999.
9. Dudas,J.H. and Cochran,W.H., *Technical Advances in the Underground Medium Voltage Cable Specification of the Largest Investor-owned Utilities in the USA*, IEEE Electr. Insulation Magazine, Vol 15, pp 29-37, 1999.
10. Christensen,P., Lagersted,K., and Okholm,A., *Installation of 400 kV XLPE Cables in the NESA Supply Area*, Proceedings of the 5th International Conference on Insulated Power Cables (Jicable), France, 1999.
11. Dudas,J.H., *Technical Trends in Medium Voltage URD Cable Specifications*, IEEE Electr. Insulation Magazine, Vol 10, pp7-16, 1999.
12. Barber,K., *Trends in Power Cable Development*, IEEE Electr. Insulation Magazine, Vol 15, pp 29-37, 1999.