

شبكات النقل الكهربائية

الكيابل الكهربائية

الجدارة :**الأهداف :**

عندما تكمل هذه الوحدة تكون :

١. ملما بأنواع الكابلات الكهربائية وطرق حساب عناصرها
٢. قد تعلمت استعمال الجداول لاختيار الكابلات وحساب خصائصها
١. ملما بأنواع الأخطاء التي تحدث في الكابلات وأسبابها وكيفية تحديد أماكن حدوثها

مستوى الأداء المطلوب :**الوقت المتوقع للتدريب : ١٢ ساعة****الوسائل المساعدة :**

١. استخدام التعليمات في هذه الوحدة .
٢. صور وبيانات عن أنواع الكابلات المختلفة وكذلك عن الأجهزة الحديثة لتحديد أماكن الأخطاء في الكابلات

متطلبات الجدارة :

يجب التدرب على جميع المهارات لأول مرة .

الفصل الثالث : الكابلات الكهربائية

٣- ١ : مقدمة :

الكابلات الكهربائية هي إحدى الوسائل التي تستخدم لنقل وتوزيع الطاقة الكهربائية وقد درسنا في الوحدة السابقة خطوط النقل الهوائية كوسيلة أخرى لنقل وتوزيع الطاقة الكهربائية، والفارق الجوهرى بين الخطوط الهوائية والكابلات هو أن الموصلات المستخدمة في الخطوط الهوائية تكون موصلات مكشوفة أي غير معزولة ويتم تثبيتها على أبراج للمحافظة على مسافات فاصلة ثابتة بين الموصلات وبين الموصل والأرض، في حين أن الموصلات المستخدمة في الكابلات تكون مغطاة بأكملها بمادة عازلة بالطبع ما عدا عند النهايات حيث التوصيلات بباقي أجزاء منظومة القوى ، ويتم تمديد هذه الكابلات إما بالدفن المباشر في الأرض، أو داخل مواسير مدفونة في الأرض أو خلال مجار تحت سطح الأرض مهيأة خصيصا لهذا الغرض، أو تمدد محمولة على صوان (trays) سواء كانت هذه الصواني مفتوحة أو مغلقة. والكابلات بهذه الطريقة أكثر أمانا من الخطوط الهوائية حيث إن احتمالات تلامس الأفراد أو الطيور والزواحف والحيوانات الصغيرة أو الأجسام المعدنية مع الموصلات الحاملة للجهد الكهربائي تكون ضئيلة جدا مما يحافظ على سلامة الأشخاص وأيضا تقليل فرص تعرض الكابل للأخطاء، أي إن الكابل أكثر أمانا من الخط الهوائي وهذه هي أهم مميزات الكابلات على خطوط النقل الهوائية.

والاختيار بين الكابلات الأرضية والخطوط الهوائية لا يتم وفقا لمعيار واحد ولكنه يخضع - إلى جانب اعتبارات الأمان - لعدة عوامل اقتصادية وفنية عديدة أهمها :

تكلفة الموصل: لنقل نفس القدرة يكون الموصل المستخدم في خط النقل أقل تكلفة من الموصل المستخدم في الكابل حيث إن السعة الأمبيرية للموصلات المكشوفة المستخدمة في خطوط النقل تكون أكبر بكثير من السعة الأمبيرية للموصل داخل الكابل وبالتالي يكون موصل خطوط النقل أصغر حجما وأقل تكلفة من موصل الكابل.

تكلفة العازل: تكلفة العازل في الكابل أكبر بكثير منها في حالة خط النقل الهوائي حيث إن خط النقل يستخدم موصلات مكشوفة مثبتة على أبراج ويتم عزل الموصلات عن جسم البرج باستخدام عوازل من البورسلين ويكون الهواء هو العازل الأساسي بين الموصلات وبعضها حيث يتم تثبيت الموصلات بعيدة عن بعضها بمسافات تعتمد على مقدار الجهد، أما في الكابلات فيتم إحاطة الموصل بمادة عازلة عالية التكلفة ويلزم غطاء معدني لحماية العازل من تأثيرات التربة وحماية ميكانيكية للكابل وفي بعض

أنواع الكابلات وخصوصا التي تستخدم الورق العازل يلزم ملء الكابل بالزيت العازل أو غاز خامل ملء الفراغات بين طبقات الورق وفي هذه الحالة يلزم تركيب خزانات للزيت أو الغاز الخامل على طول مسار الكابل مما يجعل تكلفة العزل أكبر بكثير للكيل منها في حالة خط النقل.

تكلفة التركيب: تكلفة تركيب خطوط النقل الهوائية أقل بكثير من تكلفة تركيب الكابل. وبصفة عامة فإن تكلفة الكابلات أعلى بكثير جدا من تكلفة الخطوط الهوائية حيث قد تصل أحيانا إلى عشرة أضعاف أو يزيد عن تكلفة خط النقل.

بالإضافة إلى هذه العوامل الاقتصادية فإن هناك عامل يحد من استخدام الكابلات لنقل القدرة عند جهود عالية لمسافات طويلة حيث إنه في حالة الكابل تكون السعة $capacitance$ أكبر تأثيرا من المحاثة $inductance$ ويكون تيار الشحن كبيرا جداً مما يسبب ارتفاعاً كبيراً في الجهد ولذلك فإنه لنقل كمية كبيرة من القدرة لمسافات طويلة على جهود عالية لا يمكن استخدام الكابلات وإنما تستخدم الخطوط الهوائية.

وكما سبق أن أوضحنا أن الكابلات تتميز على الخطوط الهوائية بأنها أكثر أمانا للأفراد وأقل عرضة للحوادث وأقل تأثرا بالكوارث الطبيعية والعوامل البيئية ولذلك فهي تستخدم عندما يكون الأمان مطلباً أساسياً أو عندما يكون النقل بخطوط هوائية غير مأمون كما في الحالات التالية:

- داخل المنشآت الصناعية وداخل المدن والمناطق المأهولة بالسكان
- في الأماكن التي قد تتسبب خطوط النقل الهوائية فيها في حدوث أعطال أو حوادث كما هي الحال بالقرب من المطارات
- عبر الموانئ المائية المتسعة
- داخل محطات القدرة ومحطات المحولات

٣- ٢ : تركيب الكابل :

تتكون جميع أنواع الكابلات بصفة أساسية من موصل ذي مقاومة منخفضة لنقل التيار الكهربائي ويسمى هذا الموصل عادة قلب الكابل (CORE) وعازل لعزل الموصلات عن بعضها وعمما يحيط بها وعن الأرض، وفي بعض أنواع الكابلات - وخصوصا الكابلات المرنة التي تستخدم في التمديدات الكهربائية - لا يحتوي الكابل أكثر من الموصل والعازل ولكن بصفة عامة كلما ارتفع الجهد الذي سيعمل عنده الكابل ازداد تركيبه تعقيدا. والمكونات الأخرى للكيل تشمل:

- ستارة من مادة موصلة (screening) للحصول على توزيع أفضل للمجال الكهربائي داخل المادة العازلة
- مواد مائنة (حشو filler) وتستخدم لملء الفراغ بين القلوب في الكابلات متعددة القلوب
- غلاف معدني (metallic sheath) لمنع تسرب الرطوبة داخل الكابل وكذلك لاحتواء الغاز المضغوط أو الزيت العازل في الكابلات التي تستخدم مثل هذه الأوساط
- الدرع (armour) للحماية الميكانيكية للكابل
- الغطاء الخارجي لحماية الأجزاء المعدنية من التآكل
- وقد تحتوي بعض أنواع الكابلات على أنابيب داخلية أو خارجية للتخلص من الحرارة المتولدة نتيجة لفقد القدرة في الكابل

٣-٣ : أنواع الكابلات :

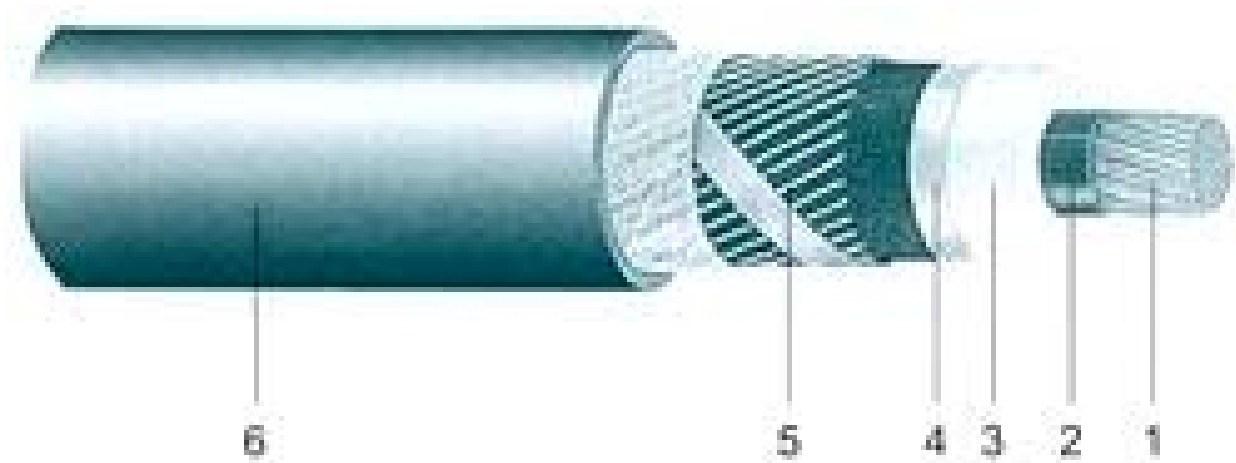
للكابلات أنواع عديدة ويمكن تصنيفها على أسس متعددة كعدد القلوب في الكابل الواحد ونوع المادة العازلة ومستوى الجهد الذي يعمل الكابل عنده وكذلك بالنسبة لمجال استخدامها. وفيما يلي سنستعرض أنواع الكابلات طبقاً للتصنيفات المختلفة.

أولاً: بالنسبة لعدد القلوب في الكابل : يمكن تصنيف الكابلات إلى نوعين :

١. الكابل ذو القلب الواحد single core cable

٢. الكابل متعدد القلوب multi-core cable

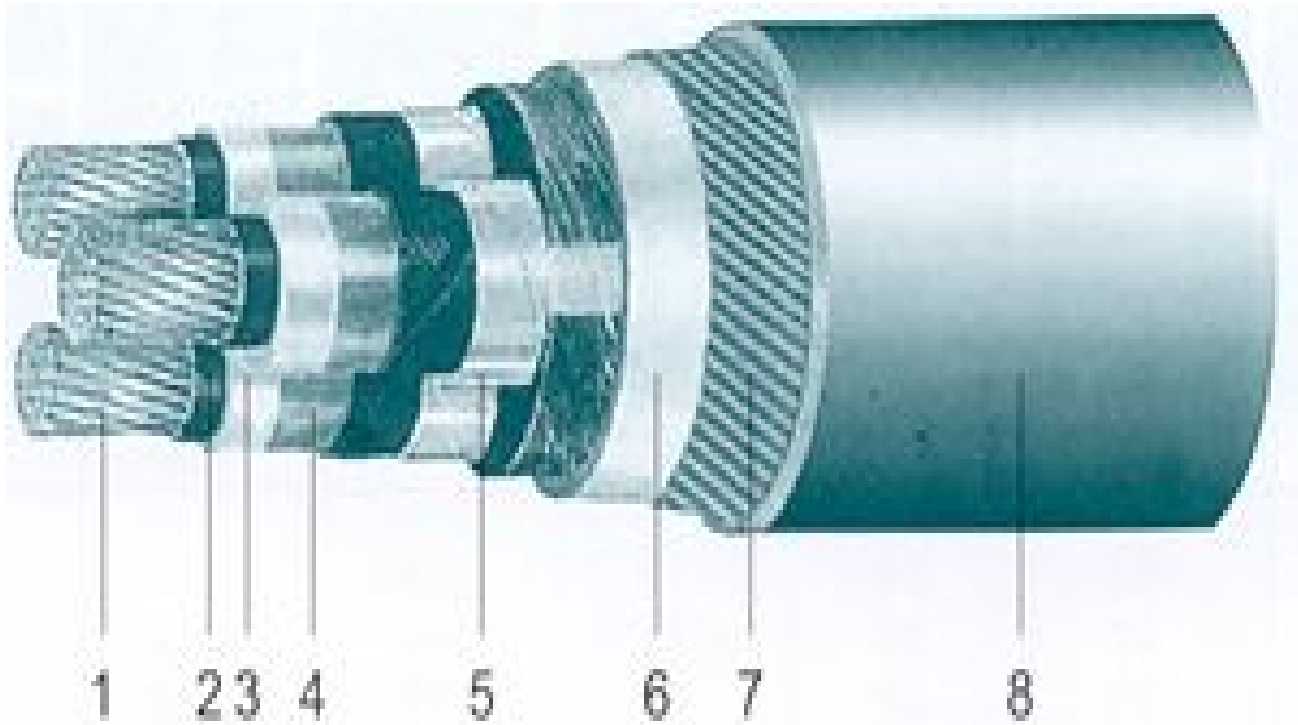
شكل (٣-١) يبين كيبلاً ذا قلب واحد مشتملاً على معظم المكونات التي من الممكن أن توجد في مثل هذا الكيبل، وهذه الأجزاء هي:



شكل (٣-١) - كيبيل ذو قلب واحد

١. موصل مجداول
٢. ستارة الموصل (الكربون أو مادة شبه موصلة)
٣. العازل الرئيسي للكابل
٤. ستارة العازل : طبقة رقيقة جدا من مادة شبه موصلة
٥. الغلاف المعدني : عبارة عن أسلاك نحاس ملفوفة بطريقة حلزونية حول الكابل ومن الممكن أن يكون شريط من الرصاص أو النحاس أو الألمنيوم
٦. الغلاف الخارجي وعادة ما يكون من البولي فينيل كلورايد

والشكل (٣ - ٢) يوضح كيبلاً ذا ثلاثة قلوب وبه معظم المكونات الممكنة تواجدها في الكيبل



شكل (٣ - ٢) - كيبيل ذو ثلاثة قلوب

وهذه الأجزاء هي:

١. موصل مجدول
٢. ستارة الموصل (الكربون أو مادة شبه موصلة)
٣. عازل: العازل الرئيسي لموصلات الكابل وقد يكون من الورق المشبع بالزيت أو المطاط، أو البولي إيثيلين، أو البولي فينيل كلورايد وغيرها)
٤. ستارة العازل : طبقة رقيقة جدا من مادة شبه موصلة
٥. ستارة العازل المعدنية : شريط نحاسي سمك ٠,١ مم
٦. التسليح: وهو في الكابل الموضح عبارة عن أسلاك من الصلب المجلفن ولكن قد يكون أيضا في صورة شريط من الصلب المجلفن وقد يكون أيضا من أسلاك الألمنيوم
٧. الغلاف الخارجي وعادة ما يكون من البولي فينيل كلورايد

وجدير بالذكر هنا أنه ليس من الضروري أن تكون جميع الكابلات لها نفس التركيب بل يختلف تركيب الكابل تبعا لمستوى الجهد الذي يعمل عنده ونوع العازل المستخدم في الكابل وطريقة تركيب الكابل واستخدامه.

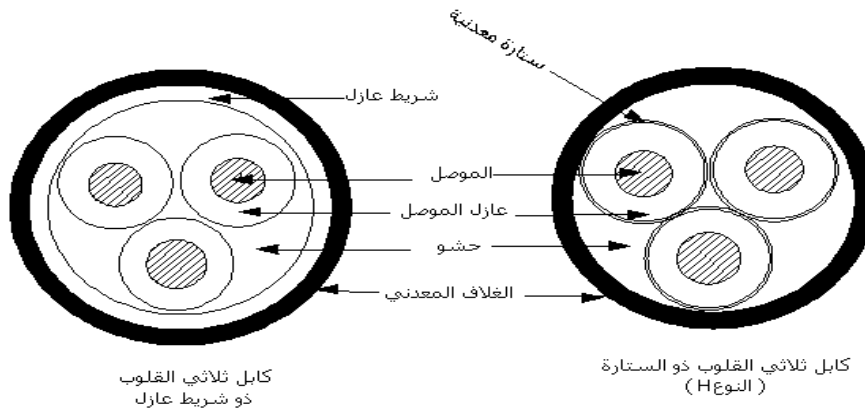
والمفاضلة بين كيابل القلب الواحد والكابلات عديدة القلوب يخضع لعوامل اقتصادية وتقنية كثيرة، فحين نجد أن الكابلات عديدة القلوب تكون أقل في التكلفة وتؤدي إلى استخدام اقتصادي أفضل لمجاري الكابلات فإن الكابل وحيد القلب يهيئ مرونة أفضل وسهولة في التركيب والتوصيل ولذلك يفضل استخدام الكابلات وحيدة القلب داخل المباني نظرا لكثرة تعرض الكابل للانحناءات وكذلك كثرة عمل التفريعات والتوصيلات على الكابل.

ثانيا : بالنسبة لنوع المادة العازلة المستخدمة : يتم تصنيف الكابلات طبقا لنوع المادة العازلة إلى :

كيابل العازل الورقي Paper Insulated Cables : يتمتع العازل الورقي بخواص كهربائية جيدة ولكن عمليات اللحام وتوصيل النهايات لكابل العازل الورقي تحتاج إلى خبرة ودقة في الأداء أعلى من تلك المطلوبة للكيابل التي تستخدم الأنواع الأخرى من العوازل، ويوجد أنواع كثيرة من الكابلات ذات العازل الورقي منها :

كوابل العازل الورقي المصمت :

و هي التي لا تستخدم الزيت أو أي سائل أو غاز لمنع تكون الفقاعات الهوائية داخل العازل ولذلك يكون استخدامها محدودا للجهود الأقل من ٦٦ ك.ف. وتصنع الكابلات المصممة إما بقلب واحد أو بثلاثة قلوب. و الكابل ذو الثلاثة قلوب قد يكون من النوع ذي الشريط "belted cable" حيث يتم عزل كل من الموصلات الثلاثة بالورق المشبع ثم تلف الموصلات المعزولة معا بشريط ورقي عازل ويملأ الفراغ الناشئ بحشو من أية مادة عازلة ثم يحاط الكابل بغلاف معدني واحد ، ويستخدم الكابل ذو الشريط عند الجهود المنخفضة أما عند الجهود العالية يؤدي سوء توزيع المجال الكهربائي داخل الكابل إلى انخفاض شدة الانهيار الكهربائي للعازل، ولتحسين توزيع المجال الكهربائي داخل الكابل يحاط العازل الخاص بكل موصل بستارة معدنية وتوصل الستارة المعدنية لكل موصل مع الغلاف المعدني للكيبل والذي يوصل بالأرض، ويعرف هذا النوع بالكيبل ذي الستارة أو الكابل من النوع "H type cable" ويعتبر الكابل من النوع H من وجهة النظر الكهربائية كما لو كان ثلاثة كابلات أحادية القلب منفصلة. شكل (٣-٣) يبين كلا من الكابل ذي الشريط و الكابل من النوع H.



شكل (٣-٣) الكابل ذو الشريط و الكابل من النوع H ذو الستارة

كابلات العازل الورقي المليئة بالزيت أو الغاز

تحت ضغط منخفض أو تحت ضغط مرتفع وفيها يستخدم الزيت العازل أو غاز النيتروجين الخامل للحد من تكون الفقاعات الهوائية داخل العازل الورقي وكذلك للتبريد وتستخدم هذه الكابلات عند جهود تصل إلى ٧٥٠ ك.ف.، ولا تستخدم هذه الكابلات إلا حين تكون هناك ضرورة قصوى لاستخدامها وذلك لارتفاع تكلفتها وتعقيد التركيبات الخاصة بها وخصوصا التجهيزات اللازمة لسريان الزيت أو الغاز.

كابلات العوازل البوليمرية Polymer insulated cables

المادة العازلة في هذه الكابلات تكون إحدى المواد البوليمرية المستخرجة من صناعات البتروكيميائية وأكثر هذه المواد شيوعاً في الاستعمال هي:

١. البولي فينيل كلورايد PVC:

ويتميز بخواص كهربائية ممتازة عند الجهود المنخفضة ودرجات الحرارة المنخفضة إلى جانب رخص الثمن مقارنة بالكابلات ذات العوازل الأخرى ولذلك تعتبر الكابلات المعزولة بمادة PVC هي الاختيار الأفضل في جميع أنحاء العالم حتى جهد ٣,٣ ك.ف إلا أنها غير مناسبة للجهود الأكبر من ذلك حيث ترتفع مفقودات العزل.

٢. البولي إيثيلين التشابكي XLPE:

وتتميز بمقاومة عالية للرطوبة وتحمل درجات حرارة مرتفعة نسبياً أثناء التحميل العادي وكذلك عند زيادة الحمل أو في حالات القصر: والفقد في العزل أصغر مقارنة بمعظم مواد العزل الأخرى وهي أصلد العوازل المعروفة ولذا لا يحتاج إلى تسليح إلا عند توقع تعرضه لإجهادات ميكانيكية عنيفة ولذلك تستخدم في الجهود الأعلى من ٣,٣ ك.ف وحتى ٢٧٥ ك.ف وهذه الكابلات شائعة الاستعمال في منظومات التوزيع. ولأن XLPE أصلد العوازل المعروفة فإنه يجب مراعاة ذلك عند تركيب الكابل حيث إنه يكون غير مناسب لعمل انحناءات.

٣. العوازل المطاطية:

وأهمها مطاط الإيثيلين بروبيلين EPR ومطاط البيتيل PR وتستعمل عند الحاجة لخواص معينة متوفرة فيهما، إلا أن الاتجاه العام هو تفضيل استخدام XLPE في الأحوال العادية

ثالثاً: بالنسبة لمستوى الجهد : يتم تقسيم الكابلات إلى :

- كابلات الجهد العالي والفائق high voltage cables
- كابلات الجهد المتوسط medium voltage cables
- كابلات الجهد العالي والفائق low voltage cables

ولأنه لا توجد قيم محددة متفق عليها عالمياً لحدود قيم الجهد لكل من هذه المستويات، فمثلاً ما يعتبر جهداً متوسطاً في المملكة يمكن اعتباره ضمن الجهد العالي في مكان آخر أو العكس، ولذلك يفضل تعريف الكابل بقيمة الجهد بين الموصل والأرض أثناء التشغيل (U_0) والجهد الذي تم تصميم الكابل عليه (U) وكل منهما يعطى بالقيمة الفعالة.

رابعاً: أنواع الكابلات طبقاً لاستخدامها :

١. كابلات نقل وتوزيع القوى الكهربائية:

وهي الكابلات التي تستخدم في منظومات القوى الكهربائية بمستوياتها المختلفة والكابلات التي تعمل عند الجهود العالية أكبر من ٤٠ ك.ف تعرف بكابلات النقل ويغلب استعمال الكابلات ذات العازل الورقي عند الجهود العالية وإن كانت كابلات XLPE بدأت تجد طريقها للاستعمال عند جهود تصل حتى ٢٧٥ ك.ف ، وتعمل كابلات التوزيع على جهود تتراوح بين ١١ ك.ف وحتى ٣٣ ك.ف. وكما ذكرنا سابقاً أن الكابلات البوليميرية وخصوصاً XLPE هي الأكثر شيوعاً في شبكات التوزيع وفي المملكة حيث درجات الحرارة المرتفعة في معظم الأنحاء يكون لكابلات مميزات أخرى حيث إنها تتحمل درجات الحرارة العالية بالإضافة إلى سهولة تركيبها وتوصيلها وإصلاحها.

٢. كابلات التمديدات الكهربائية:

وتعرف أيضاً بالكابلات المرنة حيث يكون الكابل مكوناً من موصل مصنوع من النحاس الأحمر والعازل -الذي يكون غالباً من مادة PVC- لضمان مرونة الكابل حيث إنه يتعرض لكثير من الانحناءات ولسهولة تمديده داخل المواسير .

٣. الكابلات البحرية:

وتستخدم في نقل القدرة الكهربائية عبر البحار ويتم تركيبها في قاع البحر أو المجرى المائي الذي تعبره.

٤. كابلات المنشآت الصناعية العامة:

وهي الكابلات المستخدمة لتغذية الطاقة داخل المنشآت الصناعية وتستخدم كابلات PVC بنجاح تام حتى جهد ٣,٣ ك.ف وبعض المنشآت تستخدم هذه الكابلات عند جهد ١١ ك.ف وحتى ١٥ ك.ف إلا أن الاتجاه السائد هو عدم استخدام كابلات لجهود أعلى من ٣,٣ ك.ف نظراً لارتفاع السماحية له يزيد من الفقد في العازل ولذلك تستخدم كابلات EPR , XLPE للجهود ١١ ك.ف وأعلى.

٥. كابلات المصانع الكيميائية وصناعة البتروكيميائية:

الكابلات المستخدمة في مثل هذه الصناعات تكون عرضة لتسرب المواد العضوية التي لها القدرة على اختراق العازل والوصول إلى قلب الكابل مما يتسبب في حدوث الحرائق ولذلك يجب عمل الحماية اللازمة للكابل باستعمال كابلات ذات غلاف أو كابلات عليها طبقة الحماية الخارجية المناسبة أو الطريقتين معا وذلك لمنع تسرب الزيوت والمواد الأخرى القابلة للاشتعال ووصولها إلى الكابل.

٣- ٤: حساب معاملات الكابل :

يتحدد أداء الكابل بمجموعة من العوامل التي يجب أن تحدد بدقة للحكم على ما إذا كان الكابل مناسباً للمهمة المزمع استخدامه لها أم لا ، وهذه العوامل تشمل مقدار الفقد في القدرة الحادث في الكابل، والهبوط في الجهد على الكابل، وتيار الشحن للكابل.

والفقد في القدرة يلزم حسابه ليس فقط للحكم على جودة أو كفاءة الكابل ولكن أيضا لتحديد السعة الأمبيرية له حيث إن هذا الفقد يتحول إلى حرارة تؤدي إلى تسخين الكابل وارتفاع درجة حرارته والتي يجب التأكد من أنها لن تتعدى الحدود المسموح بها حتى لا يتأثر العازل، ولحساب هذا الفقد يلزم حساب مقاومة الموصل وكذلك مقاومة العازل. و يلزم حساب الهبوط في الجهد على الكابل لتحديد ما إذا كان الجهد عند أطراف الحمل الذي يغذيه الكابل داخل نطاق الحدود المسموح بها لتنظيم الجهد أم لا ، و يتحدد الهبوط في الجهد بحاصل ضرب معاوقة الكابل والتيار المار فيه ولذا يلزم تحديد معاوقة الكابل بشقيها المقاومة والمفاعلة الحثية $inductive\ reactance$. ويتحدد تيار شحن الكابل بمقدار الجهد والسعة $capacitance$ للكابل. و على هذا فإنه لحساب أداء الكابل يلزم حساب المعاملات الآتية له:

- مقاومة الموصل $conductor\ resistance$

- مقاومة العازل $insulation\ resistance$

- المحاثية $inductance$

- السعة $capacitance$

ومعظم هذه المعاملات يمكن الحصول عليها من النشرات الفنية التي تصدرها الشركات المنتجة للكابلات ولكن فيما يلي سنعرض الأساس العلمي لكيفية حساب هذه المعاملات وكيفية حساب أداء الكابل باستخدام هذه المعاملات ثم بعدها نوضح كيفية استخدام الجداول لحساب هذه المعاملات.

٣- ٤- ١: مقاومة الموصل :

يعتمد مقدار مقاومة الموصل (R) على نوع مادة الموصل - ممثلة بالمقاومة النوعية للمادة أو المقاومة ρ أوم.متر - ومساحة مقطعه (A متر^٢) وطوله (ℓ متر) وتُحسب المقاومة باستخدام العلاقة المعروفة:

$$R = \frac{\rho \cdot \ell}{A} \quad (3.1)$$

وتتغير مقاومة المادة بتغير درجة الحرارة ولذلك لا يكون كافيا تعريف مقاومة مادة ما دون تحديد لدرجة الحرارة التي قيسَت عندها هذه المقاومة ولذلك اصطلح على اعتبار درجة الحرارة 20°C م قيمة قياسية لتعريف مقاومة المواد المختلفة، وإذا أُريد حساب المقاومة عند درجة حرارة أخرى - كما هو الحال في الكابلات حيث تعمل الكابلات عند درجات حرارة تتراوح من 70°C م إلى 90°C م - يجري تصحيح قيمة المقاومة باستخدام العلاقة التالية:

$$R_t = R_{20}(1 + \alpha_{20}(t - 20)) \quad (3.2)$$

حيث R_t هي المقاومة عند درجة حرارة t و R_{20} هي المقاومة عند درجة 20°C م، α_{20} هو المعامل الحراري للمقاومة عند 20°C م. والجدول (١،٣) يوضح المقاومة والمعامل الحراري للمقاومة لبعض المواد المستخدمة في صناعة الكابلات.

جدول (٣- ١) الخواص الكهربائية لبعض المواد المستخدمة في صناعة الكابلات

المعدن	الموصلية النسبية (النحاس ١٠٠٪)	المقاومية عند 20°C م أوم.متر	المعامل الحراري للمقاومة عند 20°C م
النحاس المخمر	١٠٠	$1.724 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$	٠,٠٠٣٩
النحاس الصلب	٩٧	$1.777 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$	٠,٠٠٣٩
النحاس المقصود	٩٥ - ٩٩	$(1.741 - 1.814) \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$	٠,٠٠٣٩
الألمنيوم	٦١	$2.803 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$	٠,٠٠٤٠
الصلب الطري	١٢	$13.80 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$	٠,٠٠٤٥
الرصااص	٨	$21.4 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$	٠,٠٠٤٠



التأثير السطحي



التأثير التجاوري

شكل (٣- ٤) - توزيع التيار في الموصل نتيجة للتأثير السطحي والتأثير التجاوري

وبالإضافة إلى زيادة مقاومة موصلات الكابلات نتيجة لارتفاع درجة الحرارة فهناك زيادة أخرى في مقاومة الكابلات المستخدمة في دوائر التيار المتردد نتيجة لظاهرتين هما ظاهرة التأثير السطحي و ظاهرة التأثير التجاوري، وشكل (٣- ٤) يوضح كيفية توزيع التيار على مقطع الموصل نتيجة لكل من التأثير السطحي والتأثير التجاوري. في هذا الشكل اللون الأسود يمثل أعلى كثافة للتيار واللون الأبيض يعني أدنى كثافة و تتدرج كثافة التيار مع درجات الرمادي، وجدير بالإشارة هنا أن هذا الرسم للتوضيح فقط وما يحدث أن كثافة التيار تتغير تغييرا تدريجيا لا يمكن معه ملاحظة الفوارق بين المناطق المختلفة بالتحديد الموجود في الرسم.

وكما هو واضح من الشكل فإنه نتيجة للتأثير السطحي يتجه التيار إلى المرور في الحواف الخارجية للموصل تاركا المساحة القريبة من مركز الموصل مما يقلل من المساحة الفعلية للموصل، وكذلك نتيجة لتواجد موصلات الكابلات قريبة من بعضها سواء كانت موصلات داخل نفس الكابل أو موصلات كابلات مختلفة موضوعة في نفس المجري يتجه التيار في كل موصل للسريان في الجانب البعيد عن الموصل الآخر مما يقلل أيضا من المساحة الفعلية للموصل. وتأثير هذه العوامل يعطى في صورة جداول تحدد مقدار الزيادة في المقاومة عند الترددات المختلفة وفي مختلف أوضاع تركيب الكابلات وسوف نوضح استعمال هذه الجداول عند عرض حساب السعة الأمبيرية للكابل.

مثال ٣- ١

احسب مقاومة الموصل لكابل تيار مستمر طوله 1.5 كيلومتر ومساحة مقطع موصله المصنوع من النحاس المخمر هي 185 مم²، إذا كانت درجة حرارة الموصل هي 90 C°

الحل

من الجدول (٣ - ١) نجد أنه للنحاس المخمر $\rho_{20}=1.724 \cdot 10^{-8} \text{ ohm. M}$ و $\alpha_{20}=0.0039/^{\circ}\text{C}$
 طول الكابل $= 1000 \cdot 1.5 = 1500 \text{ متر}$
 مساحة مقطع الموصل $= 185 \text{ مم}^2 = 185 \cdot 10^{-6} \text{ م}^2$
 نحسب المقاومة عند 20°C :

$$R_{20} = \frac{\rho_{20} \cdot \ell}{A} = \frac{1.724 \cdot 10^{-8} \cdot 1500}{185 \cdot 10^{-6}}$$

$$= 0.13978 \Omega$$

نحسب المقاومة عند 90°C :

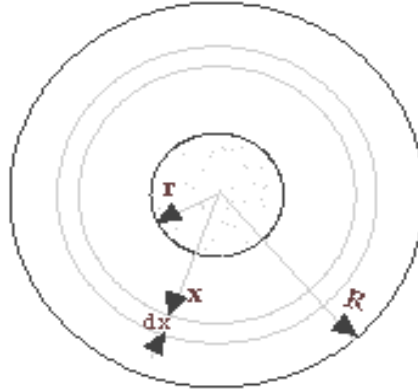
$$R_{90} = R_{20}(1 + \alpha_{20}(90 - 20)) = 0.13978(1 + 0.0039 \cdot 70)$$

$$= 0.17794 \Omega$$

٣ - ٤ - ٢ : سعة الكابل :

تنشأ السعة بصفة عامة بين أي موصلين يفصلهما عن بعضهما عازل وهذا هو الوضع داخل الكابل حيث الموصل والغلاف المعدني يفصلهما العازل والسعة في الكابل أكبر تأثيراً منها في أي من عناصر منظومة القوى الأخرى وأكبر وأوضح تأثيراً من محاطة الكابل، ولذا فهي من أهم المعاملات التي يجب حسابها للكابل. والسعة هي النسبة بين الشحنة والجهد ولذلك سنبدأ بفرض أن الشحنة على كل متر من طول الكابل تساوي q وباستخدام قوانين المجال الكهروستاتيكي نوجد قيمة الجهد V بدلالة q ومن ثم نحسب السعة.

والشكل (٣ - ٥) يبين مقطعا في كابل أحادي القلب حيث نصف قطر الموصل r ونصف القطر الداخلي للغلاف R . وإذا اعتبرنا نقطة داخل العازل وتبعد مسافة x عن مركز الكابل فإن وجود الشحنة q على الموصل ينشئ فيضا كهربائياً عند هذه النقطة كثافته D حيث:



شكل (٥-٣) مقطع في كابل وحيد القلب

$$D = \frac{q}{2\pi x} \quad \text{coulomb/m}^2 \quad (3.3)$$

وتكون شدة المجال الكهربائي عند هذه النقطة:

$$E = \frac{D}{\epsilon} = \frac{q}{2\pi x \epsilon} \quad \text{Volt/m} \quad (3.4)$$

ويمكن حساب فرق الجهد بين الموصل والغلاف المعدني كالآتي:

$$V = \int_R^r -E \cdot dx = \int_R^r -\frac{q}{2\pi \epsilon x} \cdot dx = \frac{q}{2\pi \epsilon} \ln \frac{R}{r} \quad \text{volts} \quad (3.5)$$

وبذلك تكون السعة C هي:

$$C = \frac{q}{V} = \frac{2\pi \epsilon}{\ln \frac{R}{r}} \quad (3.6)$$

وبوضع $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r = \frac{\epsilon_r}{36\pi} \times 10^{-9}$ وعمل الاختصارات اللازمة ينتج أن:

$$C = \frac{\epsilon_r}{18 \times 10^9 \times \ln \frac{R}{r}} \quad \text{F/m} \quad (3.7)$$

حيث ϵ_r هو معامل السماحية النسبية لمادة العازل المستخدم في الكابل

٣- ٤- ٣: حساب شدة المجال الكهربائي داخل الكابل :

المادة العازلة المستخدمة في صناعة الكابل لها كأي مادة عازلة أخرى قيمة قصوى لشدة المجال الكهربائي التي يمكنها تحملها وتعرف هذه القيمة بالمتانة الكهربائية للعازل ويجب أن لا تتعدى شدة المجال الكهربائي داخل العازل هذه القيمة و إلا ينهار العازل مسببا قصر بين الموصل والغلاف المعدني للكابل، وفي الواقع يتم تصميم العازل بحيث تكون أكبر قيمة متوقعة لشدة المجال الكهربائي فيه أقل بنسبة معقولة عن متانته الكهربائية. وواضح أن المعادلة (٣,٤) تمثل العلاقة بين شدة المجال الكهربائي داخل الكابل والشحنة على الموصل ولكن هذه المعادلة لا يتم استخدامها عمليا في حساب شدة المجال حيث إن الكابل يتم تصميمه على أساس جهد التشغيل الذي سيعمل عليه وليس على أساس الشحنة. ولذلك يلزم حساب شدة المجال الكهربائي داخل الكابل بدلالة الجهد. وإذا عوضنا عن قيمة q ، نحصل على علاقة لحساب شدة المجال الكهربائي عند أية نقطة داخل العازل وتبعد مسافة x عن مركز الكابل باستخدام جهد التشغيل للكابل U_0 كالآتي:

$$E = \frac{U_0}{x \cdot \ln \frac{R}{r}} \quad (3.8)$$

ومن هذه المعادلة يتضح أن أكبر قيمة لشدة المجال الكهربائي (E_{\max}) تحدث عندما تكون x أقل ما يمكن أي عند سطح الموصل ($x = r$) وأقل قيمة لشدة المجال (E_{\min}) تحدث عند السطح الداخلي للغلاف المعدني ($x = R$) ، أي إن:

$$E_{\max} = \frac{U_0}{r \cdot \ln \frac{R}{r}} , \quad E_{\min} = \frac{U_0}{R \cdot \ln \frac{R}{r}} \quad (3.9)$$

٣- ٤- ٤ : حساب تيار الشحن للكابل :

تيار الشحن للكابل هو التيار الذي يمر في العازل نتيجة لسعة الكابل ويحدث هذا فقط عندما يعمل الكابل على جهد متردد ويكون هذا التيار متقدما عن الجهد بمقدار 90° وفي حالة زيادة هذا التيار بنسبة كبيرة قد يسبب ارتفاعا كبيرا في الجهد يتسبب في تلف أو أخطاء في مكونات المنظومة المتصلة بالكابل و يتم حساب تيار الشحن من العلاقة الآتية:

$$I_c = \omega C V \text{ Amperes} \quad (3.10)$$

$$\omega = 2 \pi f \quad \text{حيث}$$

$$f \text{ هو التردد (في المملكة التردد 60 Hz)}$$

مثال ٣- ٢ :

احسب السعة وتيار الشحن لكل كيلومتر لكابل وحيد القلب إذا كان قطر الموصل 5 سم والقطر الداخلي للغلاف المعدني 15 سم و معامل السماحية النسبية للعازل $\epsilon_r = 3$ والكابل يعمل عند جهد متردد 132 KV والتردد 60 هرتز ، احسب كذلك أقصى قيمة وأدنى قيمة لشدة المجال الكهربائي داخل الكابل.

الحل:

$$R = 15 \div 2 = 7.5 \text{ cm} , \quad r = 5 \div 2 = 2.5 \text{ cm}$$

سعة الكابل:

$$C = \frac{\epsilon_r}{18 \times 10^9 * \ln \frac{R}{r}} = \frac{3}{18 \times 10^9 * \ln \frac{7.5}{2.5}} = 0.152 * 10^{-9} \text{ F/m}$$

$$C = 0.152 * 10^{-6} \text{ F/km}$$

تيار الشحن

$$\begin{aligned} I_c &= \omega C V = 2 \pi f C V \\ &= 2 \pi * 60 * 0.152 * 10^{-6} * 132000 \\ &= 7.549 \text{ Amper/km} \end{aligned}$$

عند حساب شدة المجال الكهربائي تؤخذ القيمة العظمى للجهد وليست القيمة الفعالة

$$E_{\max} = \frac{U_o}{r \cdot \ln \frac{R}{r}} = \frac{132\sqrt{2}}{2.5 \ln \frac{7.5}{2.5}} = 67.97 \text{ kV/cm},$$

$$E_{\min} = \frac{U_o}{R \cdot \ln \frac{R}{r}} = \frac{132\sqrt{2}}{7.5 \ln \frac{7.5}{2.5}} = 22.66 \text{ kV/cm}$$

٣- ٥: الفقد في القدرة والسعة الأمبيرية :

تحدد السعة الأمبيرية للكابل بأقصى درجة حرارة يمكن أن يتحملها الكابل بصفة مستمرة. عندما يمر تيار كهربائي في الكابل فإن مقاومة الكابل تسبب فقدا في القدرة ، وبالإضافة إلى فقد القدرة الحادث في مقاومة موصل الكابل تحدث مفاوئد أخرى في كل من الغلاف المعدني نتيجة للتيارات الدوامية المتولدة فيه وكذلك في العازل نفسه نتيجة لموصلية مادة العازل. وهذا الفقد في القدرة يتحول إلى طاقة حرارية تؤدي إلى تسخين الكابل وارتفاع درجة حرارته إلى درجة يحدث عندها اتزان حراري حيث يتساوى معدل توليد الحرارة الناتج عن الفقد في القدرة مع معدل تسرب هذه الحرارة من الكابل. ويتأثر الارتفاع في درجة حرارة الموصل - وبالتالي درجة الاتزان الحراري والسعة الأمبيرية للكابل - بالعوامل الآتية:

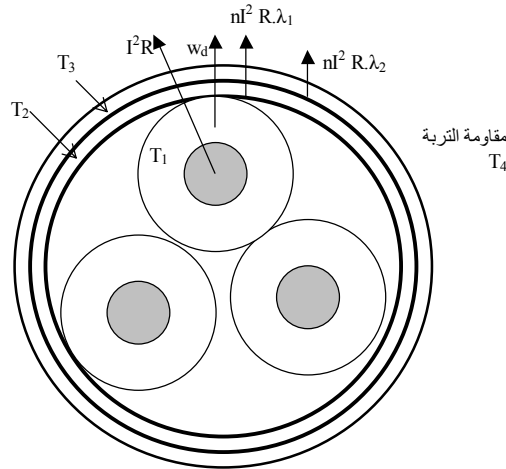
١. تيار الموصل I
٢. مقاومة الموصل R
٣. الفقد في العازل W_d : وهو يساوي $\omega C U_o^2 \tan(\delta)$ وات/متر، حيث (δ) هي زاوية الفقد لمادة العازل المستخدم في الكابل و $\tan(\delta)$ يساوي النسبة بين مقاومة العازل وسعة الكابل.
٤. المقاومات الحرارية لأجزاء الكابل المختلفة وبين سطح الكابل والوسط المحيط به ، والمقاومة الحرارية لجسم هي النسبة بين الفارق في درجات الحرارة بين سطحي الجسم وكمية الحرارة المنتقلة بين هذين السطحين ووحداتها هي كلفن.متر/وات ($^{\circ}\text{K.m/W}$) ، وتعتمد المقاومة الحرارية على تركيب الكابل وطريقة تمديده. وأهم المقاومات الحرارية للكابل هي:

- المقاومة الحرارية بين الموصل والغلاف T_1

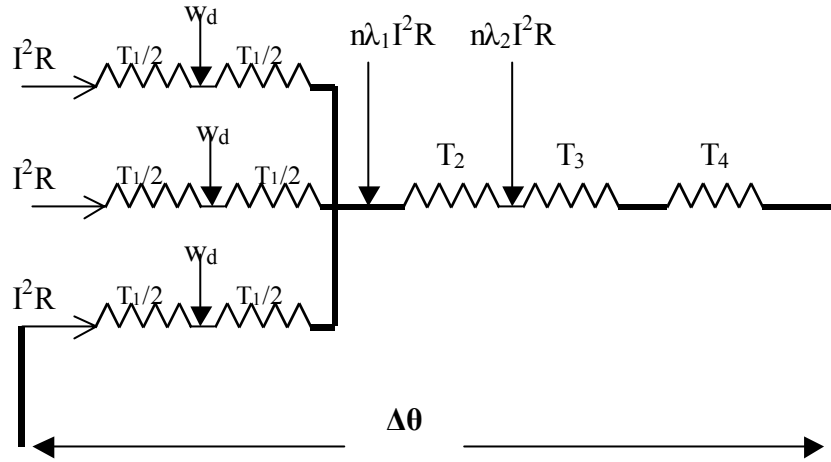
- المقاومة الحرارية للبطانة بين الغلاف المعدني والتسليح T_2

- المقاومة الحرارية للغلاف الخارجي T_3
- المقاومة الحرارية بين السطح الخارجي للكابل والوسط المحيط T_4
- ٥. عدد الموصلات الحاملة للتيار في الكابل n
- ٦. النسبة بين الفقد في الغلاف المعدني والفقد في موصل الكابل λ_1
- ٧. النسبة بين الفقد في التسليح والفقد في موصل الكابل λ_2

وشكل (٦ - ٣) يوضح مصادر الفقد في القدرة في الكابل وكذلك المقاومات الحرارية لأجزاء الكابل المختلفة. في هذا الشكل تم تركيز الفقد في العازل في منتصف سمك العازل وذلك لأن هذا الفقد موزع بانتظام على مقطع العازل ويكون تركيز الفقد الكلي في منتصف سمك العازل مكافئاً للتأثير الحراري الفقد ، ويمكن تمثيل سريان الحرارة من الكابل إلى الوسط المحيط بدائرة كهربائية حيث تناظر درجة الحرارة الجهد في حين تكون الطاقة الحرارية السارية من الكابل إلى الوسط المحيط منازرة للتيار كما في شكل (٧ - ٣) .



شكل (٦ - ٣) - الفقد في القدرة والمقاومات الحرارية في الكابل



شكل (٣ - ٧) - الدائرة المكافئة للعلاقة بين الطاقة المفقودة في الكابل والارتفاع في درجة الحرارة

وبتطبيق قوانين الدوائر الكهربائية على الدائرة في شكل (٣ - ٧) يمكن حساب مقدار الارتفاع في درجة حرارة الموصل ($\Delta\theta$) كالآتي:

$$\Delta\theta = (I^2 R + 0.5w_d).T_1 + (I^2 R(1 + \lambda_1) + w_d)nT_2 + (I^2 R(1 + \lambda_1 + \lambda_2) + w_d)n(T_3 + T_4)$$

ومنها يمكن حساب السعة الأمبيرية للكابل كالآتي:

$$I = \left\{ \frac{\Delta\theta - w_d[0.5T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4)]}{RT_1 + nR(1 + \lambda_1)T_2 + nR(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)} \right\}^{1/2}$$

وقيمة $\Delta\theta$ هنا هي الفرق بين درجة حرارة الكابل ودرجة حرارة الجو المحيط أي إن السعة الأمبيرية للكابل تعتمد أيضا على درجة حرارة الجو بمعنى أن نفس الكابل إذا استخدم في الباحة أو أبها مثلا تختلف عنها إذا استخدم في الرياض، وحتى نفس الكابل في نفس المكان تختلف قدرته على حمل التيار صيفا عنها في الشتاء. كما تعتمد السعة الأمبيرية للكابل على طريقة تمديده، فالسعة الأمبيرية للكابل الموضوع في الهواء تختلف عن السعة الأمبيرية لنظيره الموضوع في مجار أو مواسير أو المدفون في الأرض وتعتمد كذلك على نوعية التربة المدفون فيها الكابل. وتعتمد السعة الأمبيرية للكابل أيضا على ما إذا كانت هناك كابلات أخرى قريبة منه أم لا وعلى عدد الكابلات الموضوع بالقرب منه حال وجودها. وعموما فإن حساب قيمة الارتفاع في درجة الحرارة وتحديد السعة الأمبيرية للكابل عملية شاقة

ولا تتم عادة إلا في مصانع الكابلات نفسها ، وتعطي مصانع الكابلات جداول بها السعة الأمبيرية أوقدرة حمل التيار للكابلات المختلفة عند ظروف تشغيل قياسية. ولأن ظروف التشغيل الواقعية تختلف عن الظروف القياسية فإنه يتم تزويد هذه الجداول بملاحق خاصة لتصحيح السعة الأمبيرية تبعاً للظروف الواقعية وذلك بضرب القيمة المناظرة للحالة القياسية في معامل التقنين المناظر للظروف الواقعية التي يعمل عندها الكابل. وفيما يلي سنتعرف على كيفية استعمال هذه الجداول في تحديد السعة الأمبيرية للكابل.

٣- ٦ : استخدام الجداول لحساب السعة الأمبيرية للكابلات :

كما ذكرنا سابقاً فإن مصانع الكابلات تعطي جداول بالسعة الأمبيرية للكابلات في ظروف قياسية معرفة بالمواصفات القياسية العالمية للكابلات في مختلف أوضاع تركيبها كما يلي :

٣ - ٦ - ١: الكابلات الموضوعة في الهواء :

الظروف القياسية للكابلات الموضوعة في الهواء

١. درجة حرارة الجو المحيط ٢٥ °مئوية لكابلات التوزيع والنقل و ٣٠ °مئوية للكابلات داخل المباني
 ٢. أقل مسافة بين الكابل والحائط هي ٢٠ مم
 ٣. المسافة بين أقرب كابل و الكابل المجاور له لا تقل عن ١٥٠ سم
 ٤. الكابل معزول عن ضوء الشمس المباشر
- والجدول (٣ - ٢) يعطي معاملات التقنين للتصحيح من ٢٥ °مئوية إلى درجات الحرارة الأخرى لأنواع مختلفة من الكابلات.

جدول (٣ - ٢) معاملات التقنين لدرجة حرارة الوسط

نوع العازل	أقصى درجة تشغيل للموصل °م	درجة حرارة الهواء المحيط °م					
		٢٥	٣٠	٣٥	٤٠	٤٥	٥٠
ورق	٦٥	١	٠,٩٣	٠,٨٥	٠,٧٧	٠,٦٨	٠,٥٨
ورق	٨٠	١	٠,٩٤	٠,٨٩	٠,٨٤	٠,٧٧	٠,٧٢
PVC	٧٠	١	٠,٩٣	٠,٨٧	٠,٨٠	٠,٧٢	٠,٦٤
XLPE	٩٠	١	٠,٩٥	٠,٩١	٠,٨٦	٠,٨٠	٠,٧٥

وسنوضح كيفية تحديد السعة الأمبيرية لكابل XLPE جهد ١٠٠٠/٦٠٠ فولت في ظروف مختلفة باستخدام السعة الأمبيرية له في الظروف القياسية ومعاملات التقنين الموضحة بجدول (٣ - ٢) .

مثال ٣ - ٣ :

احسب السعة الأمبيرية لكابلات XLPE جهد ١٠٠٠/٦٠٠ فولت ذات موصل نحاس واحد مساحة مقطعها ١٨٥ مم^٢ و مرتبة في وضع مسطح في الهواء الجوي إذا كانت درجة حرارة الجو ٤٠ °م

الحل:

من جدول (٣ - ٣) نجد أن السعة الأمبيرية للكابل XLPE وحيد القلب المرتب في وضع مسطح ومساحة مقطعه ١٨٥ مم^٢ هي ٦٠٠ أمبير (القيمة المظللة بالجدول)، وهذه القيمة تمثل السعة الأمبيرية للكابل عندما تكون درجة حرارة الجو ٢٥ °م.

ولتصحيح السعة الأمبيرية للكابل، نوجد معامل التقنين من جدول (٣ - ٢) للكابل XLPE عند ٤٠ °م.

$$\text{معامل التقنين} = ٠,٨٦$$

$$\text{السعة الأمبيرية عند } ٤٠^\circ \text{ م} = \text{السعة الأمبيرية عند } ٤٠^\circ \text{ م} \times \text{معامل التقنين}$$

$$= ٠,٨٦ \times ٦٠٠$$

$$= ٥١٦ \text{ أمبير}$$

جدول (٣- ٣) السعة الأمبيرية لكابلات XLPE ١٠٠٠/٦٠٠ فولت

في الأرض				في الهواء				مساحة مقطع الموصل مم ^٢
٣ أو ٤ قلوب	قلبان			٣ أو ٤ قلوب	قلبان	قلب واحد		
		مسطح	مثلثي			مسطح [†]	مثلثي [*]	
موصلات النحاس								
١١٥	١٤٠			١٠٥	١٢٠			١٦
١٥٠	١٨٠			١٤٠	١٦٠			٢٥
١٨٠	٢١٥			١٧٠	٢٠٠			٣٥
٢١٥	٢٥٥	٢٤٥	٢٣٥	٢٠٥	٢٤٠	٢٧٥	٢٣٥	٥٠
٢٦٥	٣١٥	٣٠٠	٢٩٠	٢٦٠	٣٠٠	٣٤٥	٣٠٠	٧٠
٣١٥	٣٨٠	٣٥٥	٣٤٥	٣٢٠	٣٧٥	٤٢٠	٣٦٥	٩٥
٣٦٠	٤٣٠	٤٠٠	٣٩٠	٣٧٠	٤٣٠	٤٨٥	٤٢٥	١٢٠
٤٠٥	٤٨٠	٤٤٠	٤٣٥	٤٣٠	٤٩٠	٥٤٠	٤٨٥	١٥٠
٤٦٠	٥٤٠	٤٨٥	٤٩٠	٤٩٠	٥٧٠	٦٠٠	٥٦٠	١٨٥
٥٣٠	٦٣٠	٥٥٠	٥٦٠	٥٨٠	٦٧٠	٧٠٠	٦٦٠	٢٤٠
٥٩٠	٧٠٠	٦١٠	٦٣٠	٦٦٠	٧٧٠	٧٨٠	٧٥٠	٣٠٠
		٦٤٠	٧٠٠			٨٤٠	٨٦٠	٤٠٠
		٦٩٠	٧٧٠			٩١٠	٩٦٠	٥٠٠
		٧٤٠	٨٤٠			٩٨٠	١٠٨٠	٦٣٠
موصلات الألمنيوم								
٨٩	١٠٥			٧٧	٨٩			١٦
١١٥	١٣٥			١٠٥	١٢٠			٢٥
١٣٥	١٦٥			١٢٥	١٤٥			٣٥
١٦٥	١٩٥	١٨٥	١٧٥	١٥٥	١٧٥	٢٠٠	١٧٠	٥٠
٢٠٠	٢٤٠	٢٣٠	٢٢٠	١٩٥	٢٢٠	٢٥٥	٢١٥	٧٠
٢٤٠	٢٨٥	٢٧٠	٢٦٠	٢٣٥	٢٧٠	٣١٥	٢٦٥	٩٥
٢٧٥		٣١٠	٢٩٥	٢٨٠		٣٦٥	٣١٠	١٢٠
٣١٠		٣٤٥	٣٣٠	٣٢٠		٤١٥	٣٥٥	١٥٠
٣٥٠		٣٩٠	٣٧٥	٣٧٠		٤٧٥	٤١٠	١٨٥
٤١٠		٤٤٥	٤٣٥	٤٤٠		٥٥٠	٤٩٥	٢٤٠

٤٦٠		٤٩٥	٤٩٠	٥٧٠		٦٣٠	٥٧٠	٣٠٠
-----	--	-----	-----	-----	--	-----	-----	-----

○○○

† مسطح : ترتيب الكابلات على الشكل

○○○

* مثلثي : ترتيب الكابلات على الشكل

٣- ٦- ٢: الكابلات المدفونة مباشرة في الأرض :

الظروف القياسية لهذه الكابلات كما يلي:

١. درجة حرارة الأرض ١٥ °مئوية
٢. المقاومة الحرارية للتربة ١,٢ كلفن.متر/وات
٣. المسافة بين الكابل و الكابل المجاور له لا تقل عن ١٨٠ سم.
٤. عمق الدفن ٥٠ سم لكابلات الك ف ، ٨٠ سم لأعلى من ١ ك ف

وأي اختلاف بين الظروف الفعلية التي يتعرض لها الكابل وهذه الظروف القياسية يلزم تصحيح السعة الأمبيرية للكابل، ولهذا الغرض توجد جداول لمعاملات التقنين لأي تغيير في أي من هذه الظروف، والجداول التالية (٣- ٤) إلى (٣- ٧) تعطي معاملات التقنين للحالات المختلفة.

جدول (٣- ٤) معاملات التقنين لدرجة حرارة الأرض

نوع العازل	أقصى درجة تشغيل للموصل °م	درجة حرارة الأرض °م					
		١٠	٢٠	٢٥	٣٠	٣٥	٤٠
ورق	٦٥	١,٠٥	٠,٩٥	٠,٨٩	٠,٨٤	٠,٧٧	٠,٧١
ورق	٧٥	١,٠٤	٠,٩٦	٠,٩٢	٠,٨٨	٠,٨٣	٠,٧٨
PVC	٧٠	١,٠٤	٠,٩٥	٠,٩٠	٠,٨٥	٠,٨٠	٠,٧٤
XLPE	٩٠	١,٠٣	٠,٩٧	٠,٩٣	٠,٨٩	٠,٨٥	٠,٨١

جدول (٣- ٥) معاملات التقنين للمقاومية الحرارية للتربة

المقاومية الحرارية للتربة K.m/W							حجم الموصل (مم ²)
٣,٠	٢,٥	٢,٠	١,٥	١,٠	٠,٩	٠,٨	
							كابل ذو قلب واحد حتى ١٥٠ من ١٨٥ إلى ٤٠٠ من ٥٠٠ إلى ١٢٠٠
٠,٦٧	٠,٧٣	٠,٨١	٠,٩١	١,٠٧	١,١١	١,١٦	
٠,٦٦	٠,٧٢	٠,٨٠	٠,٩٠	١,٠٧	١,١٢	١,١٧	
٠,٦٥	٠,٧١	٠,٧٩	٠,٩٠	١,٠٨	١,١٣	١,١٨	
							كابل عديد القلوب حتى ١٦ من ٢٥ إلى ١٥٠ من ١٨٥ إلى ٤٠٠
٠,٧٤	٠,٧٩	٠,٨٦	٠,٩٥	١,٠٤	١,٠٦	١,٠٩	
٠,٧٠	٠,٧٦	٠,٨٤	٠,٩٣	١,٠٧	١,١٠	١,١٤	
٠,٦٨	٠,٧٤	٠,٨٢	٠,٩٢	١,٠٧	١,١١	١,١٦	

جدول ٣- ٦ معاملات التقنين التجميعية للكابلات عديدة القلوب في وضع مسطح

المسافة بين مراكز الكابلات (متر)					عدد الكابلات في المجموعة	جهد الكابل ك ف
٠,٦٠	٠,٤٥	٠,٣٠	٠,١٥	تلامس		
٠,٩٤	٠,٩٣	٠,٩١	٠,٨٧	٠,٨١	٢	١ / ٠,٦
٠,٩٠	٠,٨٧	٠,٨٤	٠,٧٨	٠,٧٠	٣	
٠,٨٩	٠,٨٦	٠,٨١	٠,٧٤	٠,٦٣	٤	
٠,٨٧	٠,٨٣	٠,٧٨	٠,٧٠	٠,٥٩	٥	
٠,٨٦	٠,٨٢	٠,٧٦	٠,٦٧	٠,٥٥	٦	
٠,٩٢	٠,٩٠	٠,٨٩	٠,٨٥	٠,٨١	٢	١,٩ / ٣,٣ حتى ٢٢/١٢,٧
٠,٨٦	٠,٨٤	٠,٨٠	٠,٧٥	٠,٧٠	٣	
٠,٨٤	٠,٨٠	٠,٧٧	٠,٧٠	٠,٦٣	٤	
٠,٨١	٠,٧٨	٠,٧٣	٠,٦٦	٠,٥٩	٥	
٠,٨٠	٠,٧٦	٠,٧١	٠,٦٣	٠,٥٥	٦	
٠,٩١	٠,٨٩	٠,٨٧	٠,٨٣	٠,٨٠	٢	٣٣/١٩
٠,٨٥	٠,٨٢	٠,٧٨	٠,٧٣	٠,٧٠	٣	
٠,٨٢	٠,٧٨	٠,٧٤	٠,٦٨	٠,٦٤	٤	
٠,٧٩	٠,٧٥	٠,٧٠	٠,٦٣	٠,٥٩	٥	
٠,٧٨	٠,٧٤	٠,٦٨	٠,٦٠	٠,٥٦	٦	

والآن لبيان كيفية استعمال هذه الجداول لتحديد السعة الأمبيرية للكابل تبعا لظروف التركيب الخاصة به سنورد بعض الأمثلة .

مثال ٣- ٤ :

أربعة كابلات XLPE جهد ١٠٠٠/٦٠٠ فولت ذات ٣ قلوب نحاسية مساحة مقطع كل منها ٣٠٠ مم^٢ مدفونة في الأرض على عمق ١,٥ متر، فإذا كانت المسافة بين مركز أي كابل ومركز الكابلات المجاور له ٤٥ سم ودرجة حرارة الأرض ٢٥ °م و المقاومة الحرارية للتربة ٢,٥ كلفن.متر/وات. احسب السعة الأمبيرية للكابل.

الحل:

أولاً: نوجد السعة الأمبيرية للكابل في الظروف القياسية

من جدول (٣- ٣) لكابل نحاسي ذي ٣ قلوب ومساحة مقطعه ٣٠٠ مم^٢ نجد أن السعة الأمبيرية هي ٥٩٠ أمبير (القيمة التي تحتها خط في جدول ٣- ٣)

ثانياً: نقارن الظروف الفعلية للكابل بالظروف القياسية فإذا كانت متماثلة يكون معامل التقنين = ١ وإلا نوجد معامل التقنين للظروف المختلفة عن الظروف القياسية

١. درجة حرارة الأرض ٢٥ °م وهي مختلفة عن درجة الحرارة القياسية ١٥ °م، وبالتالي يجب إيجاد معامل التقنين لدرجة حرارة الأرض، من جدول ٣- ٤ نجد أنه للكابل XLPE عند ٢٥ °م يكون:

$$\text{معامل التقنين لدرجة حرارة الأرض} = ٠,٩٣$$

٢. المقاومة الحرارية للتربة ٢,٥ كلفن.متر/وات وهي مختلفة عن القيمة القياسية ١,٢ كلفن.متر/وات ، وبالتالي يجب إيجاد معامل التقنين لمقاومة التربة، من جدول ٣- ٥ نجد أنه للكابل متعدد القلوب والذي تقع مساحة مقطعه بين ١٨٥ و ٤٠٠ مم^٢ (مساحة مقطع الكابل ٣٠٠ مم^٢ تقع داخل هذا النطاق) عند مقاومة حرارية للتربة مقدارها ٢,٥ كلفن.متر/وات يكون:

$$\text{معامل التقنين للمقاومة الحرارية للتربة} = ٠,٧٤$$

٣. المسافة بين الكيبلين ٤٥ سم وهي أقل من القيمة القياسية ١٨٠ سم، وبالتالي يلزم إيجاد معامل التقنين التجميعي، من جدول ٣- ٦ نجد أنه لأربعة كابلات جهد ١٠٠٠/٦٠٠ فولت مدفونة في وضع مسطح على بعد ٤٥ سم من بعضها يكون:

$$\text{معامل التقنين التجميعي} = ٠,٨٦$$

٤. عمق الدفن ١,٥ متر وهو أكبر من القيمة القياسية (٥٠ سم للكابلات جهد ١ ك ف)، ولذلك يلزم حساب معامل التقنين لعمق الدفن، ومن الجدول ٣- ٧ نجد أنه لكابل ١/٠,٦ ك ف مساحة مقطعه ٣٠٠ مم^٢ مدفون على عمق ١,٥ متر يكون:

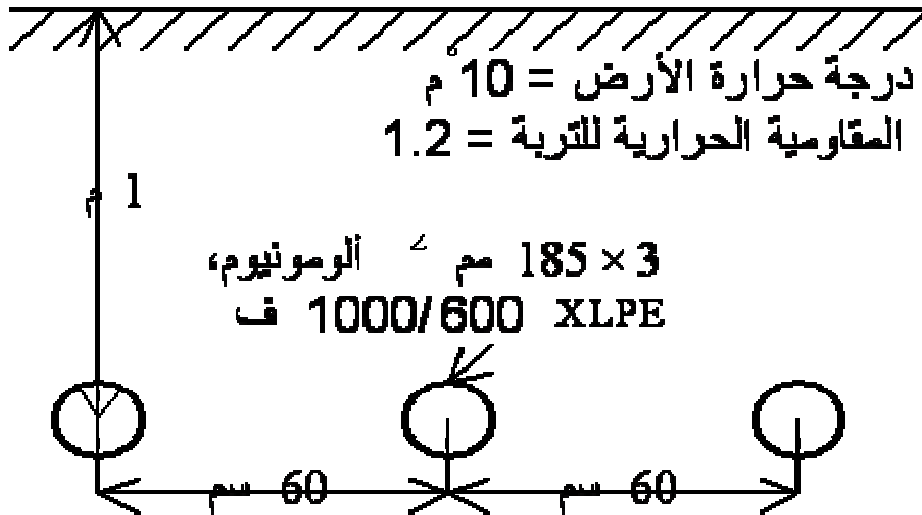
معامل التقنين لعمق الدفن = ٠,٩١

السعة الأمبيرية الفعلية للكابل = السعة الأمبيرية في الظروف القياسية × معامل التقنين لدرجة حرارة الأرض × معامل التقنين للمقاومية الحرارية للتربة × معامل التقنين التجميعي × معامل التقنين لعمق الدفن

$$\text{السعة الأمبيرية الفعلية للكابل} = ٥٩٠ \times ٠,٩٣ \times ٠,٧٤ \times ٠,٨٦ \times ٠,٩١ = ٣١٧,٧٧ \text{ أمبير}$$

مثال ٣- ٥ :

احسب السعة الأمبيرية لنظام الكابلات الموضح بالشكل



من جدول ٣- ٣ السعة الأمبيرية في الظروف القياسية لكابل XLPE ألنيوم ذي ٣ قلوب ومساحة مقطع ١٨٥ مم² = ٣٥٠ أمبير

معامل التقنين لدرجة حرارة الأرض = ١,٠٣ (جدول ٣- ٤، كابل XLPE ودرجة حرارة ١٠ °م)

معامل التقنين للمقاومية الحرارية للتربة = ١ (المقاومية الحرارية للتربة هنا تساوي القيمة القياسية)

معامل التقنين التجميعي = ٠,٩٠ (جدول ٣- ٦ عند جهد ١/٠,٦ ك ف، عدد كابلات ٣، مسافة ٦٠ سم)

معامل التقنين لعمق الدفن = ٠,٩٤ (جدول ٣- ٧ عند عمق ١م، جهد ١/٠,٦ ك ف، مساحة مقطع ٧٠- ٣٠٠ مم²)

$$\text{السعة الأمبيرية الفعلية للكابل} = ٣٥٠ \times ١,٠٣ \times ١ \times ٠,٩ \times ٠,٩٤ = ٣٠٥ \text{ أمبير}$$

جدول (٣- ٧) معاملات تقنين عمق الدفن (حتى مركز الكابل)

١,٩ / ٣,٣ حتى ٣٣/١٩ ك ف		١ / ٠,٦ ك ف			عمق الدفن (متر)
أعلى من ٣٠٠ مم	حتى ٣٠٠ مم	أعلى من ٣٠٠ مم	من ٧٠ إلى ٣٠٠ مم	حتى ٥٠ مم	
- -	- -	١,٠٠	١,٠٠	١,٠٠	٠,٥٠
- -	- -	٠,٩٧	٠,٩٨	٠,٩٩	٠,٦٠
١,٠٠	١,٠٠	٠,٩٤	٠,٩٦	٠,٩٧	٠,٨٠
٠,٩٧	٠,٩٨	٠,٩٢	٠,٩٤	٠,٩٥	١,٠٠
٠,٩٥	٠,٩٦	٠,٩٠	٠,٩٢	٠,٩٤	١,٢٥
٠,٩٤	٠,٩٥	٠,٨٩	٠,٩١	٠,٩٣	١,٥٠
٠,٩٢	٠,٩٤	٠,٨٧	٠,٨٩	٠,٩٢	١,٧٥
٠,٩٠	٠,٩٢	٠,٨٦	٠,٨٨	٠,٩١	٢,٠٠
٠,٨٩	٠,٩١	٠,٨٥	٠,٨٧	٠,٩٠	٢,٥٠
٠,٨٨	٠,٩٠	٠,٨٣	٠,٨٦	٠,٨٩	٣ أو أكثر

٣- ٦- ٣ : الكابلات الموضوعة في مجار :

الظروف القياسية لهذه الكابلات كما يلي:

١. درجة حرارة الأرض ١٥ ° مئوية
٢. المقاومة الحرارية للتربة ١,٢ كلفن.متر/وات
٣. المسافة بين الكابل و الكابل المجاور له لا تقل عن ١٨٠ سم.
٤. عمق الدفن ٥٠ سم لكابلات الك ف ، ٨٠ سم لأعلى من ١ ك ف

وكما في الحالات السابقة أي اختلاف بين الظروف الفعلية التي يتعرض لها الكابل وهذه الظروف القياسية يلزم تصحيح السعة الأمبيرية للكابل، وبالنسبة لمعاملات التقنين لدرجة حرارة الأرض هي نفسها كما في حالة الكابلات المدفونة مباشرة في التربة أما باقي معاملات التقنين لباقي الظروف فهي موضحة بالجدول (٣- ٨) إلى (٣- ١٠). وخطوات تحديد السعة الأمبيرية للكابلات في هذه الحالة هي نفس الخطوات المتبعة في الحالات السابقة.

جدول (٣- ٨) معاملات التقنين للمقاومية الحرارية للتربة للكابلات الموضوعة في مجارٍ

المقاومية الحرارية للتربة K.m/W							حجم الموصل (مم ^٢)
٣,٠	٢,٥	٢,٠	١,٥	١,٠	٠,٩	٠,٨	
							كابل ذو قلب واحد
٠,٧٥	٠,٨١	٠,٨٧	٠,٩٤	١,٠٤	١,٠٧	١,١٠	حتى ١٥٠
٠,٧٣	٠,٧٩	٠,٨٦	٠,٩٤	١,٠٥	١,٠٨	١,١١	من ١٨٥ إلى ٤٠٠
٠,٧٠	٠,٧٧	٠,٨٤	٠,٩٣	١,٠٦	١,٠٩	١,١٣	من ٥٠٠ إلى ١٢٠٠
							كابل عديد القلوب
٠,٨٣	٠,٨٧	٠,٩٢	٠,٩٧	١,٠٣	١,٠٤	١,٠٥	حتى ١٦
٠,٧٨	٠,٨٥	٠,٩٠	٠,٩٦	١,٠٣	١,٠٥	١,٠٧	من ٢٥ إلى ١٥٠
٠,٧٦	٠,٨٢	٠,٨٧	٠,٩٥	١,٠٤	١,٠٦	١,٠٩	من ١٨٥ إلى ٤٠٠

مثال ٣- ٦ :

منشأة صناعية تحتاج إلى كابلات XLPE بمقنن جهد ١٠٠٠/٦٠٠ فولت لتغذية حمل مقداره ١٥٠٠ أمبير لكل وجه. اقتضت ظروف التشغيل استعمال ٦ كابلات ثلاثية القلوب داخل مجارٍ يفصل بينها مسافات ٤٥ سم (بين مراكز المجاري المتجاورة) والمجاري كلها مدفونة في وضع أفقي مسطح على عمق ١,٢٥ متر. فإذا كانت المقاومية الحرارية للتربة ١ كلفن.متر/وات ودرجة حرارتها ٣٠ °م. اختر الكابل المناسب لحمل هذا التيار في هذه الظروف.

الحل:

خلافا لكل الأمثلة السابقة فالمعلوم هنا هو السعة الأمبيرية في ظروف التشغيل العادية، وحيث إن جداول الكابلات تعطي السعة الأمبيرية في الظروف القياسية فإنه لاختيار الكابل المناسب يلزم تحديد السعة الأمبيرية القياسية المطلوبة.

السعة الأمبيرية للكابل الواحد في ظروف التشغيل الطبيعية = $1500 \div 6 = 250$ أمبير
معاملات التقنين لهذه الحالة كما يلي:

معامل تقنين درجة حرارة الأرض = $0,89$ (جدول ٣- ٤ لكابل XLPE عند ٣٠ °م)

معامل تقنين المقاومة الحرارية للتربة = $1,03$ (جدول ٣-٨ لكابل ذي قلوب عديدة بمساحة مقطع من ٢٥ إلى ١٥٠ مم^٢ كما هو متوقع تبعا لقيمة التيار)

معامل التقنين التجميعي = $0,86$ (جدول ٣-١٠ لكابل جهد ١/٠,٦ ك ف وعدد ٦ مجارٍ ومسافة ٤٥ سم بين مركز المجاري)

معامل تقنين عمق الدفن = $0,95$ (جدول ٣-٩ لكابل عديد القلوب جهد ١/٠,٦ ك ف داخل مجارٍ على عمق ١,٢٥ متر)

معامل التقنين الكلي = حاصل ضرب معاملات التقنين الأربعة

$$0,7489439 = 0,95 \times 0,86 \times 1,03 \times 0,89 =$$

السعة الأمبيرية في ظروف التشغيل العادية = السعة الأمبيرية القياسية \times معامل التقنين الكلي

$$250 = \text{السعة الأمبيرية القياسية} \times 0,7489439$$

$$\text{السعة الأمبيرية في الظروف القياسية} = 250 \div 0,7489439 = 333,8 \text{ أمبير}$$

وبالبحث في جدول (٣-٣) عن كابل عديد القلوب سعته الأمبيرية مساوية أو قريبة من ٣٣٣,٨ أمبير نجد أن أقرب كيلين لهذه السعة هما:

- الكابل ذو مساحة مقطع ٩٥ مم^٢ سعته الأمبيرية ٣١٠ أمبير

- الكابل ذو مساحة مقطع ١٢٠ مم^٢ سعته الأمبيرية ٣٦٠ أمبير

ولذا نختار الكابل الذي مساحة مقطعه ١٢٠ مم^٢ حتى يكون أكثر أمانا.

جدول (٣- ٩) معاملات تقنين عمق الدفن (حتى مركز المجرى)

٣,٣ / ١,٩ حتى ٣٣ / ١٩ ك ف		١ / ٠,٦ ك ف		عمق الدفن (متر)
عديد القلوب	قلب واحد	عديد القلوب	قلب واحد	
- -	- -	١,٠٠	١,٠٠	٠,٥٠
- -	- -	٠,٩٩	٠,٩٨	٠,٦٠
١,٠٠	١,٠٠	٠,٩٧	٠,٩٥	٠,٨٠
٠,٩٩	٠,٩٨	٠,٩٦	٠,٩٣	١,٠٠
٠,٩٧	٠,٩٥	٠,٩٥	٠,٩٠	١,٢٥
٠,٩٦	٠,٩٣	٠,٩٤	٠,٨٩	١,٥٠
٠,٩٥	٠,٩٢	٠,٩٤	٠,٨٨	١,٧٥
٠,٩٤	٠,٩٠	٠,٩٣	٠,٨٧	٢,٠٠
٠,٩٣	٠,٨٩	٠,٩٣	٠,٨٦	٢,٥٠
٠,٩٢	٠,٨٨	٠,٩٢	٠,٨٥	٣ أو أكثر

جدول (٣- ١٠) معاملات التقنين التجميعية للكابلات عديدة القلوب
داخل مجاري في وضع مسطح

المسافة بين مراكز المجاري (متر)				عدد المجاري في المجموعة	جهد الكابل ك ف
٠,٦٠	٠,٤٥	٠,٣٠	تلامس		
٠,٩٦	٠,٩٥	٠,٩٣	٠,٩٠	٢	١ / ٠,٦
٠,٩٣	٠,٩٠	٠,٨٧	٠,٨٢	٣	
٠,٩١	٠,٨٩	٠,٨٥	٠,٧٨	٤	
٠,٩٠	٠,٨٧	٠,٨٢	٠,٧٥	٥	
٠,٩٠	٠,٨٦	٠,٨١	٠,٧٢	٦	
٠,٩٤	٠,٩٣	٠,٩١	٠,٨٨	٢	١,٩ / ٣,٣ حتى ٢٢ / ١٢,٧
٠,٨٩	٠,٨٧	٠,٨٤	٠,٨٠	٣	
٠,٨٧	٠,٨٤	٠,٨١	٠,٧٥	٤	
٠,٨٥	٠,٨٢	٠,٧٧	٠,٧١	٥	
٠,٨٤	٠,٨٠	٠,٧٥	٠,٦٩	٦	
٠,٩٣	٠,٩٢	٠,٨٩	٠,٨٧	٢	٣٣ / ١٩
٠,٨٧	٠,٨٥	٠,٨٢	٠,٧٨	٣	
٠,٨٥	٠,٨٢	٠,٧٨	٠,٧٣	٤	
٠,٨٣	٠,٧٩	٠,٧٥	٠,٦٩	٥	
٠,٨٢	٠,٧٨	٠,٧٣	٠,٦٧	٦	

٣ - ٧ : مقياس السلك :

إنه من غير العملي تصنيع كابلات أو حتى أسلاك مكشوفة بأية مساحة مقطع ولكن يتم تصنيع الأسلاك والكابلات بأحجام قياسية ومساحات مقطع محددة (انظر الجداول السابقة). وعموما فإن مساحة الموصل أو السلك يمكن التعبير عنها بعدة طرق:

الأولى: بالملي متر المربع كما هو معطى في جميع الجداول السابقة

الثانية: بالمل الدائري circular mil أو بالمل المربع square mil. المل

الدائري هو مساحة دائرة قطرها يساوي ١ مل و ١ مل = ٠,٠٠١ بوصة =

٠,٠٢٥٤ مم ، والمل المربع عبارة عن مساحة مربع طول ضلعه ١ مل. والعلاقة

بين المل الدائري (c.mil) والمل المربع (sq.mil) يمثلها الشكل المقابل

حيث تمثل نسبة مساحة الدائرة المظللة إلى مساحة المربع نفس نسبة المل

الدائري إلى المل المربع

وعموما فإن:

$$1 \text{ c.mil} = 0.7854 \text{ sq.mil} = 0.7854 \times 10^{-6} \text{ in}^2 = 506.71 \times 10^{-6} \text{ mm}^2$$

الثالثة : وهي الأكثر شيوعا واستعمالا وهي استخدام مقياس السلك wire guage و مقياس السلك هو

عبارة عن رقم صحيح يعطي فكرة عن حجم السلك وأشهر مقياس سلك مستخدم هو مقياس السلك

الأمريكي American Wire Guage (AWG) وهذا الرقم يتراوح من (4/0) 0000 وحتى 0.12

والجدير بالذكر هنا أنه كلما كبر مقياس السلك صغرت مساحته أي إن أكبر مساحة هي للسلك

الذي يكون مقياسه 0000 (تكتب أيضا 4/0) وأصغر مساحة مقطع هي للسلك الذي مقياسه 0.12

وهناك علاقة تربط بين مساحة مقطع السلك مقدرة بالمل الدائري ورقم المقياس لنفس السلك، وهذه

العلاقة هي كالآتي:

$$a, (\text{c mil}) = \frac{105500}{1.261^n}$$

حيث (a) هي مساحة مقطع السلك مقدرة بالمل الدائري، (n) هو رقم مقياس السلك مع مراعاة أنه

لأرقام المقياس 0000,000,00,0 فإن قيم n المناظرة هي 0,(-1),(-2),(-3) على الترتيب.

٣- ٨. فقد الفولطية

عند مرور التيار في موصلات الكابل يحدث هبوط في الجهد - فقد الفولطية - بين طرفي

الموصل، وهذا الفقد في الجهد يساوي حاصل ضرب التيار ومعاوقة الكابل. إذا كان فقد الفولطية هذا

كبيرا فإنه يتسبب في انخفاض الجهد الواصل للمعدات و الأجهزة بطريقة لا تناسب الأداء السليم لهذه

المعدات والأجهزة. وفقد الفولطية يكون ذا أهمية كبرى ويجب أن يولى عناية خاصة في دوائر الجهد

المنخفض عنها في دوائر الجهد المتوسط والجهد العالي، وعموما فإن فقد الفولطية في دوائر الجهد الأعلى من ١٠٠٠ فولت لا يمثل نسبة تذكر إلا عندما تكون مسارات الكابل طويلة جدا. وعادة ما تعطى قيم فقد الفولطية في جداول خصائص الكابلات بالملي فولت/أمبير/متر ($mV/A/m$) أي مقدار فقد الفولطية مقدرا بالملي فولت لكل متر من طول الكابل لكل ١ أمبير من التيار المار في موصل الكابل، وفي حالة عدم إعطاء هذه القيم يتم استنتاجها من العلاقات الآتية:

لدوائر الوجه الواحد يكون: $mV / A / m = 2Z$

لدوائر الأوجة الثلاثة يكون: $mV / A / m = \sqrt{3} Z$

حيث Z هي معاوقة موصل الكابل مقدرة بالأوم/كيلومتر (Ω/km)

جدول (٣- ١١) يوضح قيم هبوط الجهد لعدد من كابلات XLPE جهد ١٠٠٠/٦٠٠ فولت عند تردد ٥٠ هرتز - التردد في المملكة ٦٠ هرتز - ولكن على أي الأحوال سيفي هذا الجدول بغرض إيضاح كيفية حساب فقد الفولطية باستخدام الجدول. أما جدول (٣- ١٢) فيعطي الخواص الكهربائية لكابلات XLPE جهد ١٠٠٠/٦٠٠ فولت - تم تعديل قيم المفاعلة بالجدول من تردد ٥٠ هرتز إلى تردد ٦٠ هرتز وسوف نستخدم هذا الجدول في إيضاح كيفية حساب فقد الفولطية في حالة عدم توافر الجداول الخاصة بها. وسوف نوضح أيضا كيفية حساب فقد القدرة في موصل الكابل باستخدام نفس الجدول.

جدول (٣- ١١) فقد الفولطية ($mV/m/A$) لكابلات XLPE جهد ١٠٠٠/٦٠٠ فولت

ألنيوم				نحاس				مساحة مقطع الموصل (مم ^٢)
٣ أو ٤ قلوب	قلبان	قلب وحيد		٣ أو ٤ قلوب	قلبان	قلب وحيد		
		مسطح	مثلثي			مسطح	مثلثي	
١,٤٠	١,٧٠	١,٥٠	١,٤٠	٠,٨٧	١,٠٠	٠,٨٧	٠,٨٦	٥٠
٠,٩٩	١,٢٠	١,٠٠	٠,٩٨	٠,٦١	٠,٧٠	٠,٦٥	٠,٦٢	٧٠
٠,٧٢	٠,٨٣	٠,٧٨	٠,٧٢	٠,٤٥	٠,٥٢	٠,٥٢	٠,٤٦	٩٥
٠,٥٨		٠,٦٥	٠,٥٨	٠,٣٦	٠,٤٢	٠,٤٥	٠,٣٧	١٢٠
٠,٤٨		٠,٥٦	٠,٤٨	٠,٣٠	٠,٣٥	٠,٤١	٠,٣٢	١٥٠

مثال :

احسب مستعينا بجدول (٣- ١١) فقد الفولطية في كابلات XLPE جهد ١٠٠٠/٦٠٠ فولت الآتية:

١. كابل ٣ * ٩٥ مم^٢ نحاس طوله ٥٠ مترو يحمل تياراً مقداره ٢٠٠ أمبير
٢. كابل ٢ * ٧٠ مم^٢ ألومنيوم طوله ١٠٠ مترو يحمل تياراً مقداره ١٥٠ أمبير
٣. كابل ١ * ١٢٠ مم^٢ نحاس مستخدم في دائرة ثلاثية الطور ومرتب في وضع تلامس مثلثي مع الكيبلين الآخرين طوله ٤٥ مترو يحمل تيار ٣٠٠ أمبير

الحل:

١. للكابل الأول نجد من الجدول أن فقد الفولطية = ٠,٤٥ ملي فولت/متر/أمبير
فقد الفولطية على طول الكابل = فقد الفولطية من الجدول × طول الكابل × التيار
= ٠,٤٥ × ٥٠ × ٢٠٠ = ٤٥٠٠ ملي فولت = ٤,٥ فولت
٢. للكابل الثاني نجد من الجدول أن فقد الفولطية = ١,٢ ملي فولت/متر/أمبير
فقد الفولطية على طول الكابل = فقد الفولطية من الجدول × طول الكابل × التيار
= ١,٢ × ١٠٠ × ١٥٠ = ١٨٠٠٠ ملي فولت = ١٨ فولت
٣. للكابل الثالث نجد من الجدول أن فقد الفولطية = ٠,٣٧ ملي فولت/متر/أمبير
فقد الفولطية على طول الكابل = فقد الفولطية من الجدول × طول الكابل × التيار
= ٠,٣٧ × ٤٥ × ٣٠٠ = ٤٩٩٥ ملي فولت = ٤,٩٩٥ فولت

جدول (٣- ١٢) الخواص الكهربائية لكابلات XLPE جهد ١٠٠٠/٦٠٠ فولت

كابل ذو قلب واحد			كابل متعدد القلوب				مساحة مقطع الموصل (مم ^٢)
مقاومة التيار المتردد عند ٦٠ هرتز (Ω/km)		مقاومة التيار المتردد عند ٩٠ م (Ω/km)		مقاومة التيار المتردد عند ٩٠ م (Ω/km)			
نحاس	ألومنيوم	نحاس	ألومنيوم	نحاس	ألومنيوم		
١٦	٠,٤٩٤	٠,٨٢٢	٠,١٢٧	٠,١٧٤	٠,٤٩٤		
٢٥	٠,٣٤٢	٠,٥٦٨	٠,١٢٤	٠,١٩٤	٠,٣٤٢		
٣٥	٠,٢٤٧	٠,٤١١	٠,١١٨	٠,١٨٨	٠,٢٤٧		
٥٠	٠,١٩٧	٠,٣٢٥	٠,١١٥	٠,١٨٦	٠,١٩٧		
٧٠	٠,١٦٠	٠,٢٦٥	٠,١١٦	٠,١٨٧	٠,١٦٠		
٩٥							
١٢٠							
١٥٠							

الوحدة الثالثة		٢٦٢ كهر		التخصص		قوى الكهربائية	
الكابلات الكهربائية		شبكات النقل الكهربائية					
٠,٠٨٨	٠,٢١١	٠,١٢٨	٠,١٨٦	٠,١١٥	٠,٢١١	٠,١٢٨	١٨٥
٠,٠٨٨	٠,١٦٢	٠,٠٩٨	٠,١٨١	٠,١١٠	٠,١٦٢	٠,٠٩٨	٢٤٠

وكما ذكرنا سابقا فإنه في حالة عدم توافر قيم فقد الفولطية فإنه يمكن حسابها من الخواص الكهربائية للكابل كما يلي:
في حالة دوائر الوجه الواحد

$$mv / m / A = 2Z$$

$$z = \sqrt{R^2 + X^2}$$

أما في حالة دوائر الثلاثة أوجه فإن:

$$mv / m / A = \sqrt{3}Z$$

فمثلا للكابل النحاسي ذي قلب واحد ومساحة مقطع ٢٤٠ مم² في وضع مسطح نجد أن:
المقاومة (R) = ٠,٠٩٨ أوم/كيلومتر ، المفاعلة (X) = ٠,١٨١ أوم/كيلومتر

$$z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{(0.098)^2 + (0.181)^2} = 0.2058 \Omega / km \text{ وتكون}$$

$$mV/m/A = 2 * 0.2058 = 0.4116 \text{ mV/m/A} \text{ ويكون فقد الفولطية:}$$

أما إذا استخدم نفس الكابل في دائرة ثلاثة أوجه يكون فقد الفولطية:

$$mv / m / A = \sqrt{3}Z = \sqrt{3} \times 0.2058 = 0.3564 \text{ mv / m / A}$$

الأخطاء في الكابلات الكهربائية

الكابلات الكهربائية من أقل عناصر منظومة القوى تعرضا للأخطاء وذلك لتعرضها لاختبارات عديدة لضمان جودتها في المصنع وكذلك اختبارات بعد التركيب وقبل التشغيل ولكن هذا لا يمنع من حدوث بعض الأخطاء. ولأن الكابل مكون من عدة طبقات (الموصل - والعازل - والغلاف المعدني - وطبقة الحماية الخارجية) فسوف نصنف الأخطاء في الكابلات تبعا للجزء الذي يحدث فيه الخطأ.

٣- ٩ : أنواع الأخطاء في الكابلات وأسباب حدوثها

أولاً: أخطاء الموصل :

الأخطاء التي تحدث في الموصل تكون غالباً لأسباب خارجية وأهم هذه الأخطاء:

١. انقطاع موصل الكابل: ويحدث هذا الخطأ نتيجة لأعمال الحفر في مسار الكابلات المدفونة في الأرض ولتلافي حدوث مثل هذا الخطأ يتم وضع شريط تحذيري فوق مسار الكابل لينبه القائمين بأعمال الحفر بوجود كابل في هذا المكان. ويدفن شريط التحذير في الأرض فوق الكابل بمسافة كافية لتنبيه القائمين بالحفر قبل إحداث ضرر في الكابل وعادة يكون تحت سطح الأرض بعمق حوالي ٢٠ سم وفوق الكابل بمسافة ٥٠ سم. وطريقة أخرى لتلافي هذا الخطأ هي استخدام أجهزة خاصة لتحديد مسار الكابل cable locators قبل البدء في عملية الحفر.
٢. أخطاء القصر عند نهايات الكابل وتحدث بسبب وجود أي جسم موصل سواء كان جسماً معدنياً أو كائنات حية كالأفاعي تقوم بتوصيل الجزء المكشوف من نهاية موصل من موصلات الكابل بالأرضي أو بنهاية موصل آخر .

ثانياً: أخطاء العازل

وظيفة العازل هي عزل الموصل عن الغلاف المعدني وعن الموصلات الأخرى ويصمم العازل على تحمل الإجهاد الكهربائي الذي يتعرض له في التشغيل العادي وكذلك في الحالات العابرة التي قد يتعرض لها الكابل، وعندما يتعدى الإجهاد الكهربائي في العازل الحدود التي يتحملها العازل يحدث له انهيار ويفقد خاصية العزل. ويحدث هذا نتيجة لأسباب مختلفة هي:

١. انهيار الحالة العابرة: يصمم الكابل على تحمل جهد دفعي أكبر بكثير من جهد التشغيل وذلك لفترة زمنية قصيرة جداً (في حدود الملي ثانية أو أقل) وإذا تعرض العازل إلى جهد دفعي أكبر من الذي يمكنه تحمله نتيجة البرق أو عمليات الفصل والتوصيل أو أية ظاهرة عابرة أخرى فإنه ينهار مسبباً تفريغاً كهربائياً داخل الكابل و حدوث دائرة قصر بين موصل والأرض أو بين موصلين وبعضهما.
٢. انهيار العازل نتيجة التأين: ويحدث هذا النوع من الانهيار نتيجة لوجود فقاعات غازية أو شوائب داخل العازل والتي تسبب تفريغاً جزئياً داخل الفقاعة ونتيجة لهذا التفريغ يحدث تدهور تدريجي في خواص العازل إلى أن يحدث انهيار كامل له ما لم يتم اكتشاف هذا العيب قبل ذلك.
٣. الانهيار الحراري: لكل مادة عازلة درجة حرارة تعمل عندها بطريقة سليمة، فإذا ارتفعت درجة حرارة العازل عن تلك الدرجة تبدأ خواص العازل في التدهور تدريجياً إلى أن ينهار. وارتفاع درجة

الحرارة يكون بسبب تعرض الكابل لحمل زائد لفترة طويلة أو تعرضه لتيارات قصر أكبر من تيار القصر المقنن للكابل.

٤. تدهور خواص العازل نتيجة للتقادم وطول فترة الاستخدام أو نتيجة للعوامل البيئية كتسرب الرطوبة لداخل الكابل نتيجة لتآكل الغلاف المعدني.

ثالثاً: أخطاء الغلاف المعدني

للغلاف المعدني أهمية كبرى في حماية العازل الرئيسي من العوامل البيئية وكذلك في توزيع المجال الكهربائي داخل الكابل وأيضا في احتواء الموائع كالزيت أو الغاز حالة استخدامها للعزل أو للتبريد. ولذلك فإن أخطاء الغلاف المعدني تؤدي حتماً إلى أخطاء في الكابل. وتتسبب أخطاء الغلاف المعدني نتيجة للأسباب التالية:

١. تعرض الكابل للاهتزازات أثناء عملية النقل قد تسبب شروخاً في الغلاف المعدني وكذلك تعرض الكابل للثني مرات عديدة

٢. تعرض الغلاف المعدني لتعاقب التمدد والانكماش الحراري نتيجة للتغير الكبير في الحمل زيادة ونقصا بصفة مستمرة يؤدي إلى حدوث إجهاد ميكانيكي وقد يحدث شروخا فيه إذا استمرت هذه العملية لفترات طويلة

٣. أخطاء أثناء عملية البثق (للغلاف الرصاصي) مما يتسبب في وجود شوائب في الغلاف المعدني تمثل نقاط ضعف له.

٤. تعرض الغلاف المعدني للتآكل وخصوصا بعد تآكل طبقة الحماية الخارجية

٥. حدوث تلف ميكانيكي نتيجة زيادة الضغط داخل الكابل في الكابلات التي تستخدم الموائع المضغوطة

رابعا: أخطاء طبقة الحماية الخارجية.

رغم أن طبقة الحماية الخارجية ليس لها أية وظيفة كهربائية إلا أن حدوث أي خطأ بها يؤدي إلى حدوث خطأ في الغلاف المعدني والذي بدوره يؤدي إلى حدوث تلف في العازل، وأهم خطر يواجهه طبقة الحماية الخارجية هو مهاجمة القوارض والنمل الأبيض لها.

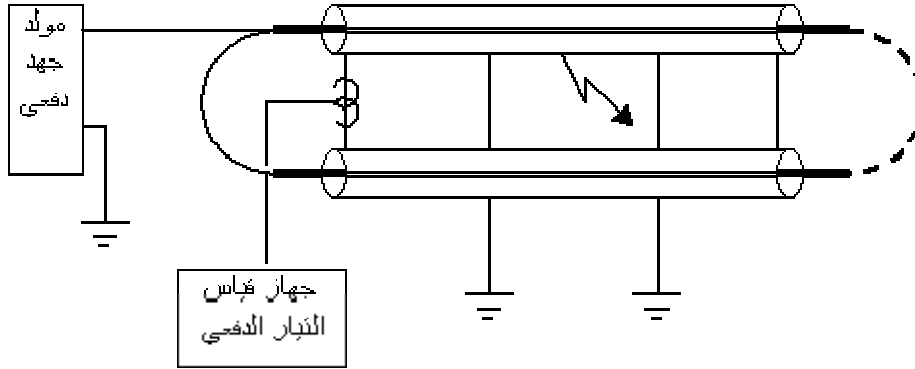
٣- ١٠ : تحديد أماكن حدوث الأخطاء في الكابل :

تحديد مكان الخطأ في الكابل ذو أهمية قصوى وذلك لأنه من غير العملي وغير الممكن حفر طول مسار الكابل كله لمعاينة الخطأ وإصلاحه ، و في كابات الجهد المنخفض يكون من السهل تحديد مكان الخطأ باستخدام فكرة قنطرة القياس المعروفة حيث يتم تكوين قنطرة ضلعها المجهول هو الكابل الذي حدث به الخطأ وعند حدوث ائزان للقنطرة يمكن حساب مقاومة الكابل حتى نقطة الخطأ وبمعلومية مقاومة وحدة الأطوال من الكابل يمكن تحديد طول الكابل من نقطة القياس حتى نقطة الخطأ وتتم هذه الطريقة باستخدام جهد منخفض. أما في حالة كابات الجهد العالي تكون مقاومة الخطأ عالية حيث لا يمكن تحديد مكان الخطأ بنفس الطريقة. وسنتعرف هنا على طرق تحديد مكان حدوث الخطأ في العازل الرئيسي وكذلك في طبقة الحماية الخارجية.

٣- ١٠- ١ : تحديد مكان الخطأ في العازل الرئيسي

الطريقة الأساسية لاكتشاف وتحديد مكان الخطأ في العازل الرئيسي للكابل هي طريقة التيار الدفعي. في هذه الطريقة يتم توصيل جهد دفعي عالٍ باستخدام مولد جهد دفعي خاص إلى الكابل الذي حدث به الخطأ ويقاس التيار الدفعي في الكابل ويتم تسجيل شكل موجة التيار على كاشف موجات ذي إمكانية تخزين. وأثناء عملية القياس يجب أن تكون كل الأغلفة المعدنية موصولة ببعضها. وللتغلب على تأثير أية وصلات قد تكون موجودة بين بداية الكابل ومكان الخطأ يتم توصيل كابل آخر مع الكابل الذي به الخطأ على التوازي وقياس الفرق بين تياريهما كما في شكل ٣- ٨.

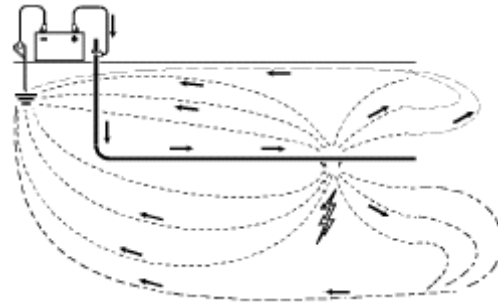
ما يحدث هو أن الجهد الدفعي يسري (ينقل أو يسافر) كموجة راحلة على طول الكابل، وعند نقطة الخطأ تكون قيمة الجهد صفراً مما يسبب موجات منعكسة على صورة نبضات تنتقل على طول الكابل في الاتجاهين، وهذه النبضات تبدأ في الانعكاس مرات متتالية. ويتم تحديد مكان الخطأ عن طريق قياس الزمن بين انعكاسين متتاليين. وحيث إن الزمن الذي تستغرقه الموجة للانتقال من أول الكابل إلى آخره يكون معلوماً من قبل حيث إنه خاصية للكابل - يعرف بزمن الانتشار propagation time - فإنه يمكن تحديد مكان الخطأ عن طريق حساب نسبة الزمن بين انعكاسين متتاليين إلى زمن الانتشار الخاص بالكابل فيمكن تحديد مكان الخطأ. ولأن سرعة انتقال الموجات في الكابل تعتمد فقط على نوع العازل فإنه يمكن حساب سرعة انتقال الموجة في الكابل ومن ثم ضربها في الزمن بين انعكاسين متتاليين فنحصل على المسافة بين نقطة القياس و نقطة الخطأ.



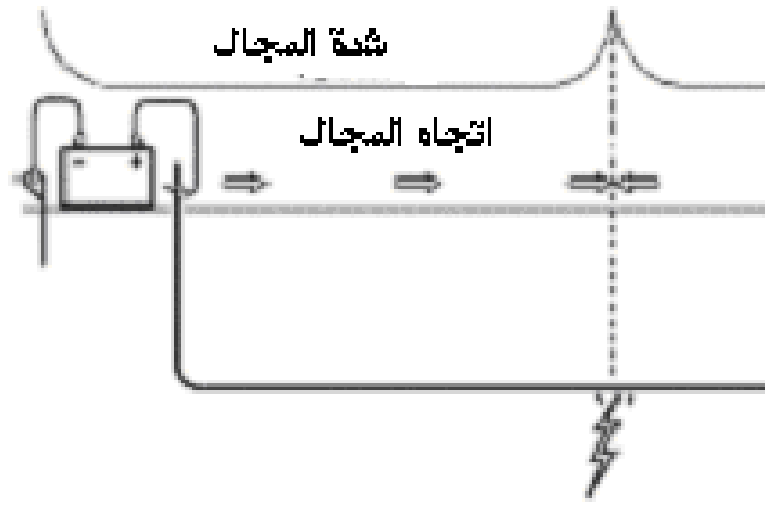
شكل (٣- ٨) طريقة التيار الدفعي لتحديد مكان الخطأ في الكابلات

٣- ١٠- ٢ : تحديد مكان الخطأ المتصل بالأرض :

تعتمد طريقة تحديد هذه النوعية من الأخطاء على حقن تيار مستمر في الكابل، هذا التيار سيجد له مساراً إلى الأرض من خلال نقطة الخطأ ويكون توزيع المجال الكهرومغناطيسي الناتج عن هذا التيار كما هو موضح بشكل (٣- ٩). ومن شكل توزيع المجال الكهرومغناطيسي يمكننا ملاحظة أن شدة المجال أعلى ما يمكن عند نقطة الخطأ وأيضاً خطوط المجال الخارجة من عند نقطة الخطأ تتوزع في اتجاهين متضادين. وبالتالي باستخدام أي جهاز كاشف للمجال الكهرومغناطيسي وتتبع المجال حول الكابل - عادة عن طريق قياس الجهد المتولد - نجد أن المجال يزداد كلما اتجهنا نحو نقطة الخطأ إلى أن يصل إلى أقصى قيمة له ثم ينعكس اتجاهه نكون قد وصلنا إلى نقطة الخطأ. وشكل (٣- ١٠) يبين تغير قيمة المجال واتجاهه بدءاً من مصدر التيار المستمر وحتى نقطة الخطأ.



شكل (٣- ٩) تحديد مكان الخطأ الأرضي بالكابل



شكل (٣- ١٠) شدة واتجاه المجال وتحديد نقطة الخطأ