## 1- مقدمة:

وظيفة الكابلات هى نقل الطاقة بطريقة سليمة من المصدر إلى أجهزة الاستخدام فى المدن والمناطق المزدحمة بالسكان ، حيث يصعب مد الخطوط الهوائيةو يرجع استخدام الكبلات الى عام1926 حيث تم وضع موصل بين طبقتين من الزجاج للعزل داخل مجرى ، وعرفت المجموعة المكونة من الموصل و العزل باسم الكابل. وتصنف الكابلات بصورة عامة تبعا للمادة العازلة المستخدمة أو ضمنيا الجهد.

## ٢ - مكونات الكابلات:

تصنع الكابلات إما بقلب واحد Single Core أو قلبين أو ثلاثة قلوبThree-Cores وربما أكثر من ذلك ويمكن القول بصفة عامة أن استخدام الكابلات ثلاثية القلب يؤدي إلى خفض التكاليف وخفضقيمة هبوط الجهد أما الكابل أحادي القلب فهو أكثر مرونة واسهل في التركيب والتوصيل ويتكون الكابل وحيد القلب من الموصلوالعازل و غطاء والحماية الخارجية ( شكل1 ) .

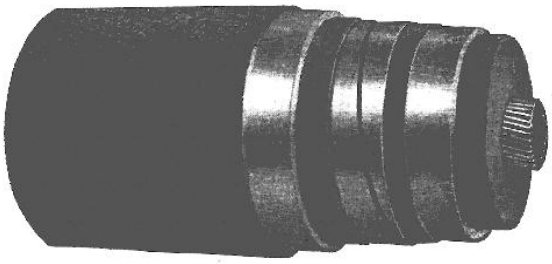
أما الكابل ثلاثي القلب فيتكون من الموصل و العازل و مادة الحشو وحزام الربطBel و ستارة Screen و الغطاء والحماية الخارجية ( شكل2و 3 ) .

## 3- تصنيف الكابلات:

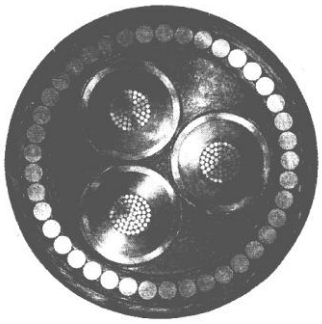
### 3-1 كابلات ذات جهد أكبر من أو يساوى11 كيلو فولت :

وهي عادة من الأنواع المعزولة بالورقويبين شكل (4) بعض من هذه الكابلات، وقد تستخدم بعض الكابلات عزل من الكتان ، ويوضح الجدول التالي أقل سمك ممكن لطبقة العزل الورق لمختلف الجهود والذي يتم استخدامه في الكابلات الثلاثية القلب ولها مساحة مقطع يساوى0 بوصة مربعة .

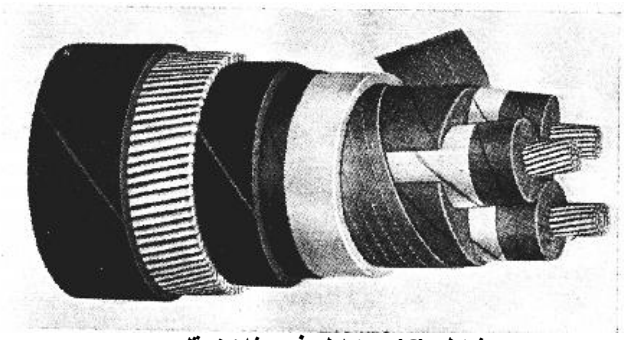
| الجهد (فولت ) | 3300 | 6600 | 11000 |
|---|---|---|---|
| السمك (بوصة ) | 0.1 الي 0.12 | 0.13 الي 0.16 | 0.16 الي 0.22 |



شكل (1) : كابل احادي القلب مملوء بالزيت

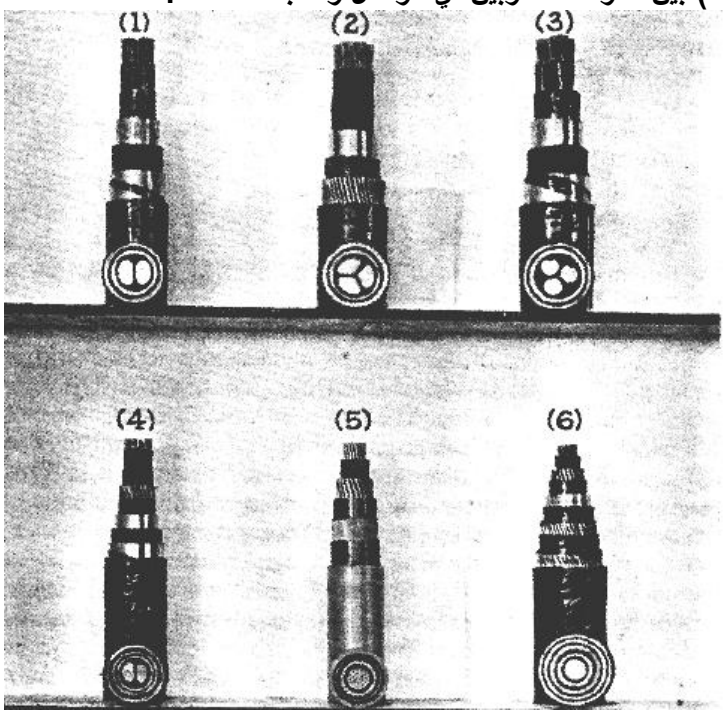


شكل (2) : كابل ذو حجاب معدني



شكل (3) : كابل ذو ثلاث قلوب

وفى الكابلات الشريطية Belted Cables ثلاثية القلب يتم عزل كل الموصلات بالورق ويتم ربط جميع القلوب بطريقة لولبية لتجميعهم ثم يتم حشو الفراغات لتجميع الكابل على شكل دائري المقطع ، و يتم إحاطة الثلاث قلوب بحزام عازل إضافي من الورق المغموس، ثم يتم إحاطته بغلاف رصاصي لمنع دخول الرطوبة ، وإذا كان الكابل سيتعرض لقوي ميكانيكية فيتم تسليحه بالصلب وتستخدم طبقة خارجية من الخيش أو كسوة من الجوت مع استخدام مواد واقية . وعند استخدام الكابلات الشريطية ذات الثلاث قلوب (11 ك ف ) يكون سمك العازل (0.3 بوصة ) بين الموصلات وبين أي موصل والطبقة المغلفة .




شكل (4) : كابلات معزولة بالورق

**2-3 كابلات جهد (22 و 33 ك ف)**

يتكون الكابل (22 ك ف ) من نوع الكابلات الشريطية ثلاثية القلب ويكون سمك العازل ( 0.45 ) بين الموصلات ، أما سمك العازل في حالة الكابل أحادي القلب فيتراوح من (0.24 إلى 0.28 بوصة ) .

و فى كابلات الـ (33 ك ف ) يكون سمك العازل يساوي 0.6 بوصة ) . ولكن قد تحدث بعض المشاكل للكابل مما يؤدى لتعرضه للكسر . وظهر أن الاجهادات تسبب تلفه وقد تم التغلب على هذه المشكلة بالكابلات ذات الحجاب المعدنى Screened cable بإحاطة كل قلب بورق معدني مثقب و يؤخذ جهد الأرض . و في بعض الكابلات الأخرى تكون هناك طبقة مغلقة من الرصاص لكل قلب ويتم إحاطة الثلاث قلوب معًا بطبقة رصاص رابعة وقد تستخدم طبقة رصاص للتغليف منفصلة لكل قلب ( كما هو موضح في شكل (2)) و فى بعض الأحيان يتم استبدال الورق المعدني بشريط نحاسي .

**3-3 كابلات الجهد العالى ( 66 ك ف وأعلى)**

وفى هذه الحالة يكون الكابل الثلاثي القلب كبير جدًا لذلك يتم استخدام الكابل أحادي القلب. وعيوب هذا النوع (أحادي القلب ) تتمثل في أن التسليح بالصلب يسبب فقد في طبقة التغليف بما يساوي أو يزيد عن الفقد في النحاس لذلك لا يتم تسليحه . وقد وجد أن تغير الأحمال والتغير في درجة الحرارة التي يتعرض لها الكابل تسبب تمدد طبقة الرصاص الدائرية المغلفة عندماترتفع درجة حرارتهاولا ترجع مرة أخرى عندما تبرد . ومع توالي حدوث ذلك ينتج تمدد زائدللطبقة المغلفة مما يؤدي لتكوين الفقاعات في المادة العازلة ومن ثم حدوث انهيار نهائي . وكمحاولة للتغلب على هذه الظاهرة يتم صنع الكابلات بموصل بيضاوي وطبقة تغليف تقارب شكل الدائرة ومن ثميكون التغليف غير محكم علىالقلب .

والكابلات المصمتةالتى تم وصفها من قبل يتم استخدامها بنجاحلجهد 66 ك ف . ولكن لا يتم استخدامها بالجهود الأعلىالا اذا تم التغلب علىمشكلة تأين الفقاعات.وتوجد طريقتانلتجنب حدوث التأينوهما:

فى الطريقة الأولى يتم منع تكون الفقاعات باستخدام زيت مضغوط رفيع جدًا . وهذا النوع من الكابلات يسمي بالكابلات المعبأة بالزيت Oil- filled cable وفيه الموصل المفرغ يتم تغذيته بزيت من خزانات موضوعة على مسافات على طول الخط . ويوضح شكل 1 كابل معبأ بالزيت أحادي القلب يعمل عند جهد 220 ك ف.

و فى الطريقة الثانيةيتم منع تأين الفقاعاتباستخدام ضغط هيدروستاتيكي وتسمى هذه الكبلات بالكابلات الضغطية Pressure Cable والكابلات تكون من النوع العادي المصمتمن ثلاث قلوب مع وجود طبقة تغليف واحدةلها ذات شكل مثلثي . ويتم إدخال الكابل داخل أنبوبة من الصلب مملوءة بالنيتروجين عند ضغط180-200 باوند لكل بوصة مربعة . ويعمل الضغط على إبقاء الفقاعات صغيرة بضغطها وأيضًا بجعل الرصاص ينكمش عندما يبرد الزيت . بالإضافة إلى أن الضغط داخل الفقاعة يعمل على تقليل عملية التأين بطريقةملحوظة.

وكذلك توجد الكابلات الغازية Gas cable والتى يستخدم فيها الورق الجاف أو المغموس في الزيت مع استخدام النيتروجين المضغوط عند200 باوند لكل بوصة مربعة داخل طبقة الرصاص المغلفة حتى يتم إيقاف عملية التأين ومن ثم تعمل هذه الكابلات بكفاءة عند الجهود العليا بدون أي تكوين للفقاعات

## 4- الإجهاد وسعوية كابل أحادي القلب

Dielectric Stress and Capacitance of a Single Core Cable

### 4-1 طريقة الحساب

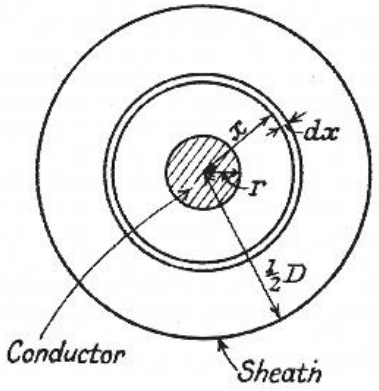
بافتراض أن الكابل الموضح في شكل (5) له ثابت عزل (ε) بدون فقد في القدرة والشحنة هي ( q ) لكل (سم ) من الطول المحوريو بتطبيق نظريةجاوس على اسطوانة دائرية بنصف قطرX نحصل على :

$$\varepsilon S 2\pi x = 4\pi q$$

$$S = 2q / \varepsilon x$$

حيث ( S ) هي الإجهاد الكهربي عند مسافة (x) من المحور وإذا كان (E) هو الفرق في الجهد بين الموصل والغلاف من خلال العلاقة:

$$E = \int_{r}^{1/2D} S dx = \frac{2q}{\varepsilon} \ln \frac{D}{2r}$$




شكل (5)

ومن ثم تكون السعوية لكل سم من الطول هي

$$C = \frac{q}{E} = \frac{\varepsilon}{2\ln(D/2r)} = \frac{\varepsilon}{2\ln(D/d)} \text{ cm. per cm. Length}$$ **وحدات إلكتروستاتيكية**

**حيث** d **هي قطر الموصل، و نحصل علي :**

$$C = \frac{0.388\,\varepsilon}{\log D/d}\,\mu F \text{ per mile length}$$

**وبالتعويض عن (q ) بدلالة (E) نجد أن الإجهاد هو :**

$$S = \frac{E}{x\ln(D/d)}$$

**وقيمة الإجهاد العظمي تحدث عند سطح الموصل وهي**

$$S_{\max} = \frac{E}{r\ln(D/d)} = \frac{2E}{d\ln(D/d)}$$

**والإجهاد عند الغلاف الرصاص هو**

$$S = \frac{2E}{D\ln(D/d)}$$

**ومن ثم سيتغير الإجهاد من القيمة العظمي عند الموصل لقيمة صغري ( d/D مرة من العظمي ) عند الغلاف. وهناك طريقتان اساسيتان يمكن بواسطتهما الحصول على توزيع أكثر انتظاما للاجهاد وذلك باستخدام طبقات معدنية داخلية ( بينية ) أو باستخدام طبقات من المادة العازلة لها ثوابت عزل مختلفة**

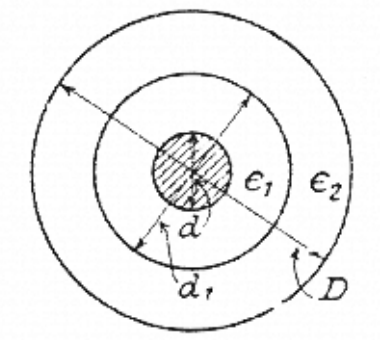
## 2-4 التدرج في السعوية : Capacitance grading

**بافتراض أن المادة العازلة تتكون من طبقتين بقطر تقسيم بينهما يساوي d1 وثوابت العزل هي** $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ **كما هو موضح في شكل (6) وباستخدام نظريةجاوس يكون الإجهاد عند الطبقة الداخلية هو :**

$$S = \frac{2q}{\varepsilon_1 x}$$

**بينما يكون في الطبقة الخارجية يساوي :**

$$S = \frac{2q}{\varepsilon_2 x}$$




**شكل (6)**

**ومن ثم :**

$$E = \int_{\frac{1}{2}d}^{\frac{1}{2}d_1} S_1 dx = \int_{\frac{1}{2}d_1}^{\frac{1}{2}D} S_2 dx = 2q\left(\frac{1}{\varepsilon_1}\ln\frac{d_1}{d} + \frac{1}{\varepsilon_2}\ln\frac{D}{d_1}\right)$$

**ولذلك :**

$$S = \frac{q}{E} = \frac{1}{\frac{2}{\varepsilon_1}\ln\frac{d_1}{d} + \frac{2}{\varepsilon_2}\ln\frac{D}{d_1}}$$

فالقيمة العظمي هي :

$$S_{1\max} = \frac{4q}{\varepsilon_1 d} = \frac{2E}{d(\ln\frac{d_1}{d} + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}\ln\frac{D}{d_1})}$$

$$S_{2\max} = \frac{4q}{\varepsilon_2 d_1} = \frac{2E}{d_1(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}\ln\frac{d_1}{d} + \ln\frac{D}{d_1})}$$

**5- معامل القدرة لكابل أحادي القلب Power factor of single core cable**

**بافتراض أن المقاومة النوعية للعزل هي (ρ) وهي غير معتمدة على الإجهاد لذلك يمكن اعتبارها ثابتة على طول الكابل وعند وضع مصدر جهد متردد (E) له تردد (w/2π) سيكون هناك تيار في نفس الاتجاه يساوي (E/R) لكل سم من الطول حيث قيمة (R) هي القيمة الكلية لمقاومة العزل.**
**وسيكون هناك أيضًا تيار شحن وهو (ωCE) حيث (C) هي سعة الكابل احادي القلب والذي يسبق الجهد بزاوية (90 درجة) ويوضح شكل (7) الرسم الاتجاهي لهذه الحالة التيار الكلي (I) هو المجموع الاتجاهي لـ (E/R) و(ωCE) ويسبق الجهد بزاوية (ϕ) حيث :**

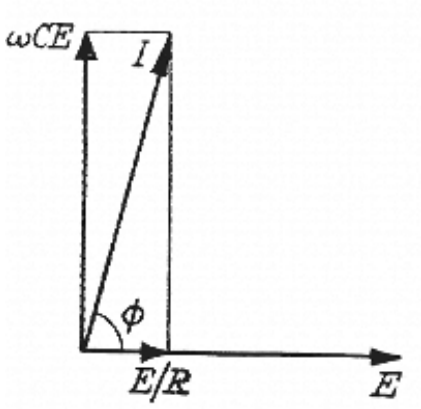
$$\text{Cot } \phi = (E/R) / \omega CE = 1/ \omega CE$$

**ومعامل القدرة للكابل يساوي :**

$$\text{P.F.} = \text{Watts}/ EI = (E^2/R) / EI = (E/R)/I = \cos \phi$$

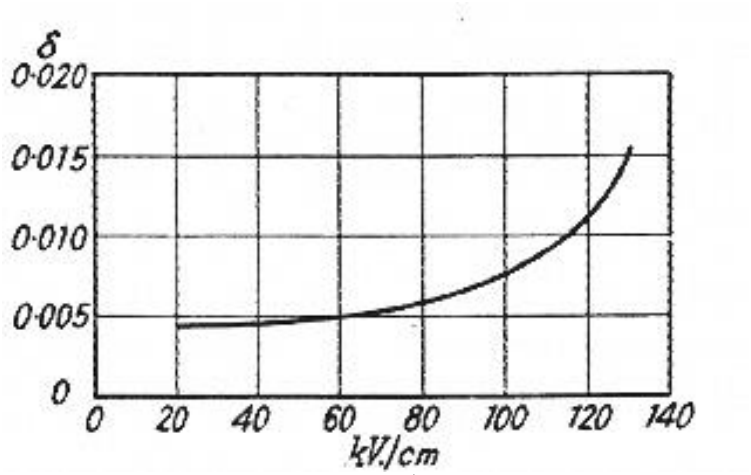
**وفى الكابلات جيدة العزل تكون (ϕ) قريبة جدًا من 90 وعلى ذلك تكون قيم جيب تمام الزاوية صغير جدا ومساوي تقريبًا (δ) حيث (δ) تساوي ((π/2 – ϕ)) بالتقدير الدائري**
**ويكون الفقد في العزل يساوي**

$$E^2/R = \omega CE^2 \delta$$

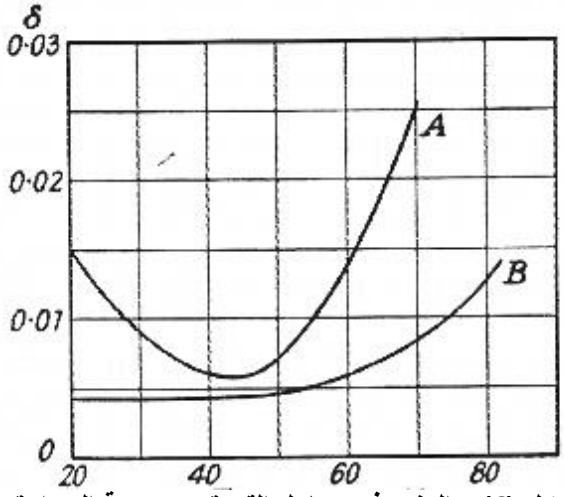



**شكل (7) : الرسم الاتجاهي لمعامل القدرة لكابل أحادي القلب**

**و يوضح الشكلان (8 و 9) تغير معامل القدرة مع الاجهاد ومع درجة الحرارة .**




شكل (8) : التغير في معامل القدرة مع الاجهاد

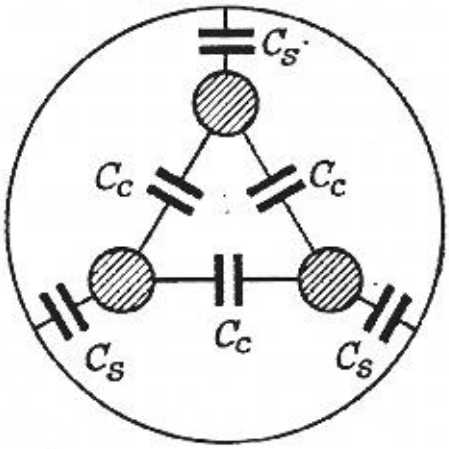



شكل (9) : التغير في معامل القدرة مع درجة الحرارة

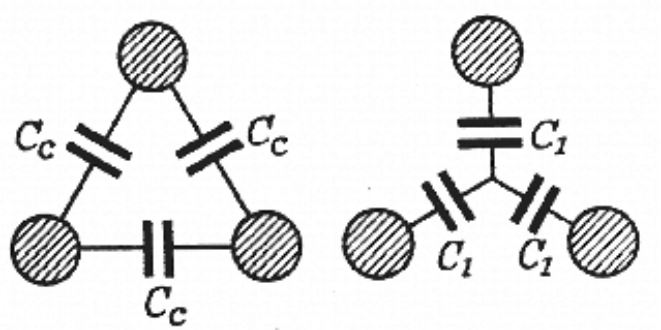
**6- سعوية الكابلات الشريطية ثلاثية القلب Capacitance of three core cable**

في حالة الكابلات ثلاثية القلب يتم اعتبار السعة لثلاث كابلات أحادية القلب منفصلة . وفى الكابلات الشريطية يكون السعة بين الموصلات بعضها لبعض ($C_c$) و بين الموصلات و الغلاف ($C_S$) كما هو موضح في الشكل (10) . ويمكن تبديل السعويات $C_c$ والتى تكون شكل مثلثي إلى الشكل النجمي المكافئ السعوية قدرها $C_1$ كما هو موضح في شكل (11) وحتى يتحقق ذلك يجب أن تكون السعوية بين إي موصلين في هذه الأشكال واحدة . لذلك ($C_c+1/2\ C_c=1/2C_1$) أو ($C_1= 3C_c$) حيث أن نقطة المركز للنجمة هي نقطة التعادل ، ولأن جهد الغلاف هو الجهد الأرضي يمكن أعتبار هذه السعة تأثر تعلي الغلاف . ولذلك تعتبر السعات لنقطة التعادل neutral capacitance لأي موصل كالتالي :

$$C_o=C_s+3C_2$$




شكل (10) : السعويات في كابلات شريطية ثلاثية القلب




شكل (11) : تحويل الشكل المثلثي إلى النجمة

**7- الإجهاد في كابل ثلاثي القلب Stress of three core cables**

في حالة تجانس المادة العازلة لا يمكن حساب الاجهاد بدقة، ولأن المادة العازلة لا يمكن أن تكون متجانسة بسبب الألياف فلا يكون هناك أهمية لإستعمال الصيغ و في الكابل ثلاثي القلب يوجد مجال كهربي دوار وقيمة الإجهاد العظمي تحدث عند نقطة قريبة من المركز على الموصل عند قيمة الجهد العظمي . ومع ذلك فعادة لا يكون الإجهاد هو العامل المحدد لعمر الكابل فقد وجد أن الكابلات ثلاثية القلب ( 3 ك ف ) يبدأ التدهور في الألياف وليس عند نقطة الإجهاد العظمي على الموصلات، ولذلك يتم تصميم الكابلات بحيث تتلاشي هذه الإجهادات المماسية.

**8- مفاعلة الكابلات Inductance of cable**

يمكن استخدام طرق حساب المفاعلة للخطوط الهوائية في الكابلات الأرضية ، ولكن سيكون هناك أخطاء في النتائج وذلك بسبب تأثير الظاهرة السطحية والتقارب Skin and Proximity effects وتأثير وجود الغلاف . وفى الكابلات قليلة الجهد تكون المسافة بين الموصلات صغيرة بالمقارنة بأقطار الموصلات وعلى ذلك لا يمكن إهمال التأثيرات السابقة . وعلى ذلك فمن الأفضل قياس المفاعلة عند الاحتياج إليها لأن الحسابات تكون صعبة وغير دقيقة .

أما في كابلات الجهد العالي فيتم إهمال تأثير الظاهرة السطحية والتقارب بسبب ازدياد سمك العازل وفى مثل هذه الكابلات يتم تغليف القلوب المنفصلة أو احاطتها بورق معدني يتم توصيله بالغلاف، وللأغلفة المعدنية مفاعلة تبادلية إلى الموصلات وتؤثر بطريقة ملحوظة على المقاومة والمفاعلة بين القلوب ونقطة التعادل وفى هذه الحالة يتم الأخذ في الاعتبار التأثيرات الناتجة عن الغلاف المعدني .

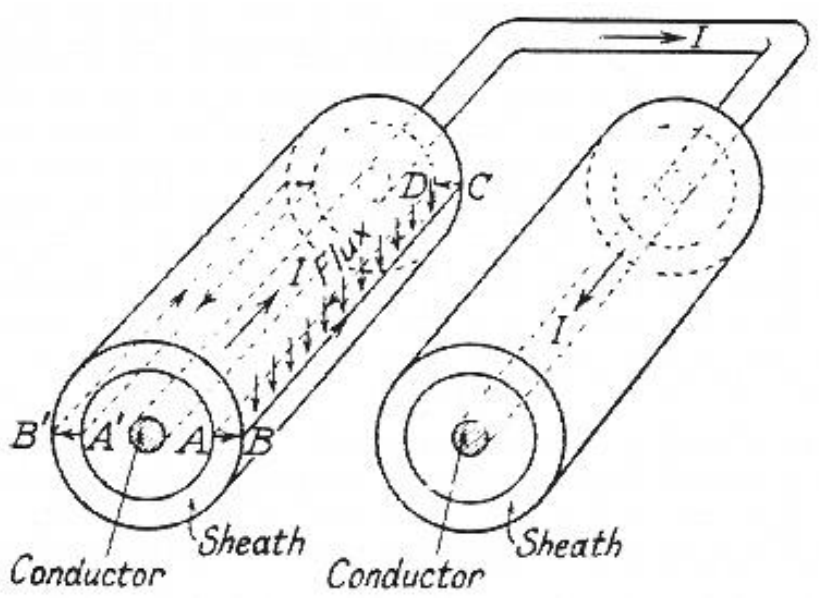
**9- تأثيرات الغلاف Sheath effects**

يتولد نوعان من التيارات الحثية في الأغلفة المعدنية وهما :

١ - تيارات الغلاف الدوامية ومساراتها على غلاف الكابل الواحد وتسري حتى عندما يتم عزل الأغلفة المعدنية بعضها عن بعض

٢ - التيارات الدوامية لدائرة الغلاف ومساراتها تقع على الأغلفة المعدنية للكابلات المنفصلة وتسري عندما يتم ترابط الأغلفة

ويوضح شكل (12) تكوين تيارات الغلاف الدوامية في حالة اثنين من الكابلات أحادية القلب ذات الأغلفة الرصاصية المعزولة والمنفصلة .وعلى سبيل المثال تيارالموصل (I) يولد فيض إلى أسفل خلال مقطع الغلاف (ABCD) .وعندما يزداد التيار والفيض سيكون هناك تيار دوامي يدور من A إلى B إلى C إلى D إلى A . وتيار الغلاف الدوامي عند (A') يكون للخارج الى (B') على الطول الخارجي للغلاف داخل و الى الخلف مرة ثانية داخل الغلاف إلى A . وكمية الفقد بسبب تيارات الغلاف الدوامية تكون بقيمة عظمي عندما تكون القلوب قريبة من بعضها البعض ولكن في الحالة العملية لا تتعدي نسبة مئوية صغيرة من الفقد في النحاس مما يمكننا من إهمالها ، والتأثير الأكثر أهمية هو تأثير الجهد المتولد بالحث في الأغلفة بسبب التيارات.

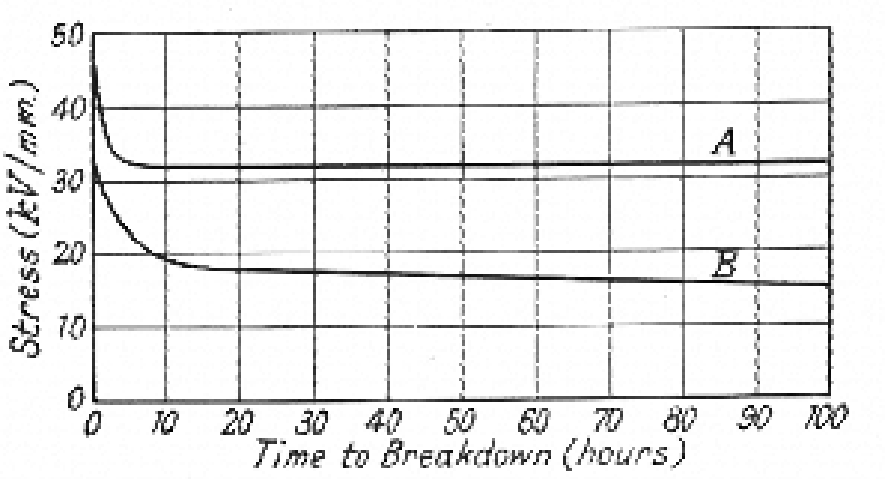



شكل (12) : مسارات تيارات الغلاف الدوامية

**10- جهد وآليات الإنهيار Cable faults**

الجهد اللازم لإنهيار نوع معين من العزل يعتمد على عدد من العوامل مثل فترة تعرضه للجهد ، شكل الأقطاب ، درجة الحرارة ، الضغط ، وجود الرطوبة أو وجود فراغات غازية. واعتماد قيمة الجهد على الزمن يمثل عاملا هاما جدًا وعلى ذلك يتم إجراء الاختبارات لتحديد المنحني الذي يمثل الجهد مع الزمن ومثل هذا المنحني يسمي ( V.T.B) ويعني منحني الجهد و الزمن والإنهيار Voltage –Time – Breakdown وللرطوبة نفس تأثير الفقاعات الغازية على منحني (V.T.B) .

والكابلات المغموسة الجيدة الصنع لن تحتوي على أي فقاعات في البداية وسيكون لها منحني (V.T.B) مثل المنحني (A) في شكل (13) ومع ذلك عندما يتعرض هذا الكابل لأحمال متغيرة ستسبب سخونة و تمدد الزيت واستطالة الغلاف وعندما يبرد الكابل لن يرجع الغلاف لوضعه الأصلي وعلى ذلك تتكون فقاعات صغيرة في التجاويف ، ويصاحب تكون الفقاعات عملية تأين بالتصادم وارتفاع في معامل القدرة للكابل . وبعد عدد من التغيرات في الأحمال يمكن أن تصبح العلاقة كما في الشكل (B) وأخيرًا يمكن أن يحدث إنهيار إذا كان الجهد الموضوع على الكابل أكبر من القيمة المقاربة ( النهائية ) الجديدة.




شكل (13)

وحتى يتم تحديد ما إذا كان منحني (V.T.B) مستقر أم لا فيتم تعرض الكابل لجهد التشغيل أو جهد أعلي بينما يسخن الكابل ثم يسمح له بالتبريد بطريقة متناوبة ومثل هذا الاختبار يسمي اختبار الاستقرار ويتم تطبيقه على كل أنواع الكابلات عالية الجهد .

ويمكن تحسين أداء الكابل إزالة الفقاعات في الكابلات الضغطية والمعبأة بالزيت Oil-filled or pressure cables بينما تمنع الكابلات الغازية Gas cable عملية التأين بواسطة الضغط الهيدروستاتيكي وكل هذه الأنواع من الكابلات لها منحنيات (V.T.B) جيدة.

وهناك طريقتان يمكن أن يحدث بهما إنهيار للكابلات هما أن يحدث تكون التجاويف المتتالية والتى تبدأ عادة من الموصل أو الغلاف وأخيرًا إلى الأقطاب وفى الطريقة الأخري التى تتم بعدم الإستقرارا الحراري والذي يحدث عندما يزيد معامل القدرة بطريقة سريعة مع الارتفاع في درجة الحرارة حيث يعمل الارتفاع القليل في درجة الحرارة على زيادة الفقد في العازل بكمية كبيرة والفرق الواضح بين الطرق التى يحدث بها الإنهيار هو حدوث التجاويف لأنه عندما يبدا تكون التجاويف فستستمر حتى ينهار الكابل مع العلم أن الزمن يمثل عامل هام لإتمام العملية وفى حالة عدم الاستقرارا الحراري لا يحدث أي تدمير إلا عند حدوث الإنهيار التام ولذلك فانه يمكن تجنب الانهيار بفصل الحمل.

## 11- الخواص الحرارية للكابلات Thermal Characteristic of Cables

### 1-11 حمل التيار الأعظم Maximum current capacity:

هناك العديد من الأسباب والتى تمنع تشغيل الكابلات عند زيادة سخونة الكابل ومنها التمدد الذي ربما ينتج عنه فقاعات ويحدث تأين ، كذلك التمدد في الزيت ربما يؤدي لإنفجار الغلاف وربما يفقد الزيت لزوجته ويتسرب من المستويات العليا، وقد يحدث عدم الاستقرارار الحراري نتيجة الزيادة السريعة في الفقد في العازل مع درجة الحرارة والظاهرة الأخيرة لا يحتمل حدوثها في الكابل حتى 33 ف ك ) ولكن تحدث في الكابلات الأعلي جهد ، ولمنع التأثيرات الضارة يجب أن تضبط درجة الحرارة العظمي للموصل عند 65 درجة مئوية في الكابلات المغموسة بزيوت لزجة.

### 2-11 المقاومة الحرارية Thermal resistance :

ووحدتها هي الأوم الحراري وهي المقاومة الحرارية التى تتطلب فرق في درجة الحرارة يساوي واحد درجة مئوية لتنتج سريان الحرارة مقداره واحد واط ( اي 1 جول لكل ثانية )