

## شبكات النقل الكهربائية

دراسة بعض الظواهر التي تحدث على خطوط النقل

**الجدارة:****الأهداف:**

عندما تكمل هذه الوحدة تكون:

ملما بتفسير وتعريف بعض الظواهر التي تحدث على خطوط النقل الكهربائي

**مستوى الأداء المطلوب:**

الوقت المتوقع للتدريب: ٣ ساعات

**الوسائل المساعدة:**

استخدم التعليمات في هذه الوحدة .

**متطلبات الجدارة:**

يجب التدرب على جميع المهارات لأول مرة .

## دراسة بعض الظواهر على خطوط النقل

### ٥- ١ : مقدمة

تكون خطوط النقل عرضة للعديد من الظواهر الداخلية والخارجية تؤثر على العمل الطبيعي لهذه الخطوط. ونذكر منها :

- الظاهرة السطحية (skin effect)
- ظاهرة التفريغ الهالي (Corona)
- الصواعق (lightning strokes)

فالظاهرة السطحية وظاهرة التفريغ الهالي يسببان فقدًا في الطاقة المنقولة عبر الخط وتؤثران سلبًا على جودة الموجة الكهربائية. أما الصواعق فإنها تسبب ارتفاعًا شديدًا في جهد الخط قد يؤدي إلى انهيار العوازل.

إن ضمان استمرارية الخدمة لمصادر الطاقة الكهربائية وموثوقيتها وكذلك جودتها يتطلب توجيه عناية خاصة لحماية الخطوط الكهربائية من هذه الظواهر.

### ٥- ٢ : الظاهرة السطحية (skin effect)

تعرف المقاومة الكهربائية لموصل ما بأنها ذلك الشيء الذي يعوق سريان التيار الكهربائي في الموصل ، وعلى الرغم من أن المقاومة النوعية لمادة الموصل تظل ثابتة في حالة كل من التيار المتردد والمستمر إلا أن المقاومة الكلية لأي موصل تكون أكبر في حالة التيار المتردد منها في حالة التيار المستمر. ويرجع السبب في ذلك إلى أنه في حالة التيار المتردد يظهر مجال مغناطيسي متردد يعمل على توليد قوة دافعة كهربائية مضادة في هذا المجال حيث تكون قيمتها عند مركز الموصل أكبر منها عند محيط الموصل الخارجي. وينتج عن ذلك وجود تيار معاكس للتيار الأصلي في الموصل عند المركز بينما يساعد مرور التيار عند السطح الخارجي . وبالتالي فإن التيار المتردد النهائي يسري في الموصل بالقرب من السطح الخارجي له مما ينتج عنه تقليل مساحة المقطع الفعلية فتزداد قيمة المقاومة الكلية للموصل وهذا هو ما يعرف باسم الظاهرة السطحية (أو الجلدية) للموصلات عند استخدامها في دوائر التيار المتردد.

وتتوقف النسبة بين مقاومة الموصل في حالة التيار المتردد ومقاومته في حالة التيار المستمر على شكل مساحة مقطع الموصل وخواصه المغناطيسية والكهربائية إضافة إلى التردد . وعلى ذلك في حالة الموصلات

الأسطوانية الشكل تأخذ في الاعتبار قيمة النفاذية المغناطيسية والمقاومة النوعية للموصل ، ويمكن حساب نسبة التغير نتيجة الظاهرة السطحية في الموصلات من العلاقة :

$$m_r = \sqrt{\frac{8 \pi^2 * 10^{-7} * f * \mu_r * r}{\rho}} \quad (5.1)$$

حيث :  $\mu_r$  : النفاذية المغناطيسية لمادة الموصل مقدرة بوحدات (H/m)

$\rho$  : المقاومة النوعية لمادة الموصل مقدرة بوحدات ( $\Omega.m$ )

$f$  : تردد التيار المار في الموصل مقدرا بوحدات (Hz)

$r$  : نصف قطر مقطع الموصل مقدرا بوحدات (m)

$m_r$  : النسبة بين المقاومة في حالة التيار المتردد وحالة التيار المستمر

#### ٥- ٢- ١ : الظاهرة السطحية لأسلاك وكابلات الصلب

لا يمكن حساب الظاهرة السطحية في أسلاك وكابلات الصلب بصورة دقيقة وذلك نظرا لتغير قيمة النفاذية المغناطيسية في مدى كبير خلال كل دورة من دورات التيار المتردد لذلك يفضل استخدام منحنيات الخواص المقاسة لهذه الأنواع.

#### ٥- ٢- ٢ : الظاهرة السطحية للموصلات المفرغة

تصنع الكابلات كبيرة الحجم عادة من موصلات دائرية مفرغة . ويمكن حساب المقاومة الفعالة لهذه الموصلات باستخدام جداول خاصة ، كما تستخدم صيغة رياضية خاصة لتعيين قيمة المقاومة الفعالة وتأثير الظاهرة السطحية لقضبان التوزيع المفرغة أو ذات المقطع المربع حيث تكون مقاومة هذا النوع أكبر من مقاومة النوع ذات المقطع المستدير.

#### ٥- ٣ : ظاهرة التفريغ الهالي (corona)

تستخدم العوازل الغازية بصورة كبيرة في المعدات الكهربائية وأهم هذه الغازات المستعملة هي الهواء وغاز سادس فلوريد الكبريت وبنسبة أقل النيتروجين والفرينون وثاني أكسيد الكربون. وتحدث مختلف الظواهر داخل العوازل الغازية عندما يطبق عبرها جهد كهربائي حيث يسري تيار صغير جدا بين الأقطاب الكهربائية المعزولة بالغاز ، ويستعيد الغاز العازل خصائصه الكهربائية عند فصل المصدر. على الجانب الآخر إذا كان الجهد كبيرا تزداد شدة المجال الكهربائي Electric Field Intensity حيث

( $E = V/D$  kV/cm) ويحدث التأين ومن ثم يزداد التيار الساري بين الأقطاب زيادة كبيرة ويحدث الانهيار الكهربائي وعندئذ تحدث شرارة موصلة قوية بين الأقطاب ويسمى أقصى جهد يفقد بعده العازل خاصية العزل بجهد الانهيار للغاز العازل.

إذا كان المجال الكهربائي منتظما فالزيادة التدريجية للجهد على الثغرة تحدث انهيارا كهربائيا للثغرة على هيئة شرارة بدون أية تفريغات ابتدائية. وعلى الجانب الآخر إذا كان المجال غير منتظم فالزيادة في الجهد تسبب أولا تفريغات في الغاز تظهر عند النقاط التي يكون عندها أعلى قيم للمجال الكهربائي أي عند النقاط الحادة في الموصلات الكهربائية. هذه التفريغات تسمى التفريغ الهالي (corona) ويمكن ملاحظتها كوميض لامع مائل إلى الزرقة وهذه الظاهرة مصاحبة بصوت أزيز. وظاهرة التفريغ الهالي على خطوط النقل الكهربائي تؤدي إلى فقدان في القدرة الكهربائية وتؤدي لتلف العازل الكهربائي ويصاحب ظاهرة التفريغ الهالي أيضا تداخل في موجات الراديو. وتتأثر ظاهرة التفريغ الهالي بقوة بالعوامل التالية :

- أ- حالة سطح الموصل
  - ب - حالة الغاز المحيط (نسبة الرطوبة، ودرجة الحرارة، ونوع الغاز، وضغط الغاز..... إلخ)
  - ج- شكل الموصلات الكهربائية.
- المجال الكهربائي المطلوب لعمل ظاهرة التفريغ الهالي لجهد متردد مرئية في الهواء على سطح الموصل، ويسمى مجال بدء ظاهرة التفريغ الهالي، لموصلين متوازيين نصف قطر كل منهما  $r$  :

$$E_w = 30 \text{ m.d} \left[ 1 + \frac{0.301}{\sqrt{d.r}} \right] \quad (5.2)$$

وفي حالة الاسطوانتين متحدتي المحور ونصف قطر الاسطوانة الداخلية  $r$  تصبح المعادلة :

$$E_C = 31 \text{ m.d} \left[ 1 + \frac{0.308}{\sqrt{d.r}} \right] \quad (5.3)$$

حيث إن :

$E_w$  مجال بدء ظاهرة التفريغ الهالي لموصلين متوازيين مقدرا بوحدات (V/m)  
 $E_w$  مجال بدء ظاهرة التفريغ الهالي لاسطوانتين متحدتي المركز مقدرا بوحدات (V/m)

$r$  نصف قطر الموصل مقدرا بوحدات (m)

$m$  هي معامل عدم انتظام سطح الموصل

$d$  هو معامل التصحيح لكثافة الهواء النسبية ويعطى بالمعادلة التالية :

$$d = \frac{3.92 P}{(273 + T)} \quad (5.4)$$

حيث إن :  $P$  هو الضغط الجوي مقدرا بوحدات ( torr )  
 $T$  درجة الحرارة بالدرجة المئوية.

ويمكن التقليل من حدوث ظاهرة التفريغ الهالي بما يأتي :

- ١- تنعيم أسطح الموصلات الكهربائية المستخدمة.
- ٢- تجنب الأحرف الحادة للموصلات الكهربائية.
- ٣- التنظيف المستمر لأسطح الموصلات من الغبار والأتربة.
- ٤- زيادة قطر الموصل في حالة الجهود العالية والجهود الفائقة وذلك باستخدام عديدة الموصلات (bundle conductors).
- ٥- زيادة ضغط الغاز.
- ٦- تجنب وجود الرطوبة بالغاز.

#### ٥- ٤ : ظاهرة الصواعق ( lightning strokes )

تعتبر ظاهرة الصواعق الكهربائية تفريغ كبير للشحنات المتراكمة في السحب إلى سحابة مجاورة أو إلى الأرض. وفي هذه الحالة فإن المسافة بين الأقطاب الكهربائية، وهي المسافة بين السحابة والأخرى أو المسافة بين السحابة والأرض ، تكون كبيرة جدا قد تصل إلى ١٠ كيلومترات أو ربما أكثر. إن آلية تكون الشحنات داخل السحب وتفرغها هي عملية معقدة جدا.

## ٥- ٤- ١ : تكون الشحنات الكهربائية في السحب

العوامل التي تشترك في تكوين الشحنات الكهربائية في السحب كثيرة وغير محددة، لكن أثناء العواصف الرعدية تتفصل الشحنات الكهربائية السالبة والموجبة بالتيارات الهوائية العنيفة التي تؤدي إلى دفع البلورات الثلجية للأجزاء العليا للسحابة والأمطار إلى الجزء السفلي للسحابة. هذا الفصل للشحنات يعتمد على ارتفاع السحب والذي يتراوح بين 200 و 10000 متر مع احتمالية تركيز الشحنات على مسافة تتراوح بين 300 و 2000 متر. حجم السحب التي تشترك في تفريغ الصواعق الكهربائية للأرض غير محددة لكن الشحنات الكهربائية داخل السحابة يمكن أن تصل إلى 100 كولوم. لذلك فالسحب في هذه الحالة يمكن أن يكون جهدا كهربائي يتراوح بين  $10^2$  إلى  $10^8$  فولت، مع مجال كهربائي بين 100 فولت/متر داخل السحابة إلى 10000 فولت/متر عند نقطة التفريغ الابتدائية. وتصل قيمة الطاقة الكهربائية المصاحبة لعمليات التفريغ إلى حوالي 250 كيلوات ساعة. وتكون المنطقة العليا من السحابة دائما موجبة الشحنة بينما المنطقة السفلى وقاعدة السحابة تهيمن عليهما الشحنات السالبة ماعدا المنطقة الموضعية - بالقرب من القاعدة والرأس للسحابة - والتي تكون موجبة الشحنة. ويمكن أن تصل أقصى قيمة للجهد الكهربائي على الأرض الناتجة عن السحب المشحونة إلى 300 فولت/سم بينما هذه القيمة تكون حوالي 1 فولت/سم في الأجواء الصحو.

## ٥- ٤- ٢ : العواصف الرعدية والبرق وآلية الصاعقة الرعدية

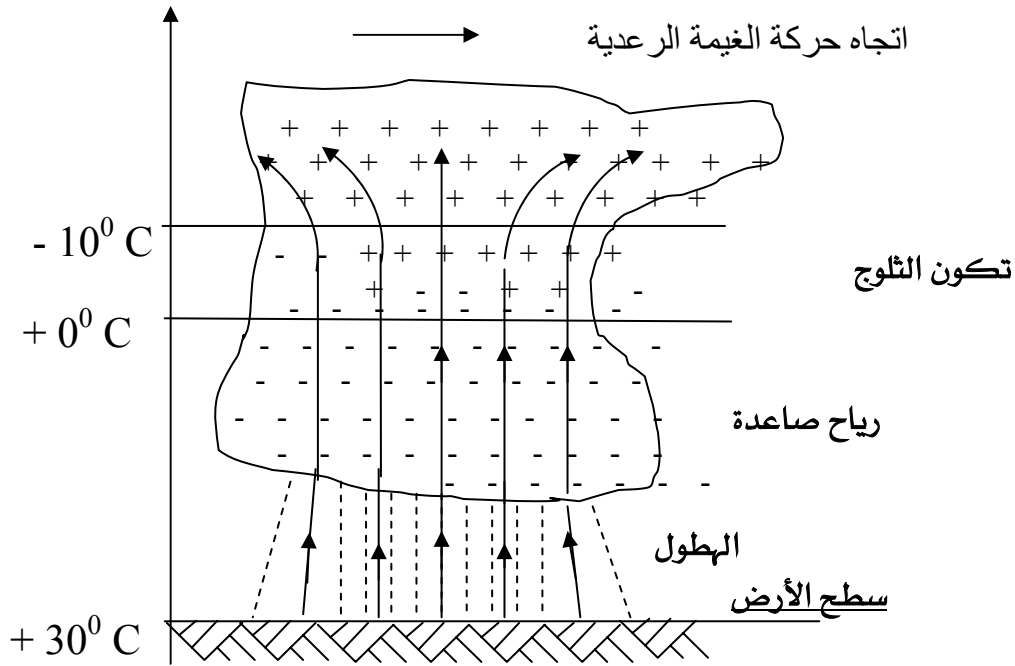
تتكون العواصف الرعدية عندما يتصاعد الهواء الرطب والدافئ بسرعة كبيرة إلى طبقات الهواء الباردة. ويمكن لذلك أن ينتج عن قدوم جبهة هوائية باردة تندفع تحت الهواء الدافئ وترغمه على الصعود : جبهة رعدية أو رياح تدفع الهواء الدافئ والرطب على سفح جبل شديد الانحدار ، وترغمه على الصعود : عاصفة رعدية جبلية . أو إشعاع شمسي محلي يسخن الهواء الرطب على الأرض مما يؤدي إلى تمدده ويصبح بذلك أخف من الهواء المحيط فيرتفع : عاصفة رعدية حرارية محلية.

يبرد الهواء الرطب المتصاعد مع تزايد ارتفاعه. وتتكاثف الرطوبة فتتحول إلى سحب رعدية. فعندما يتم تخطي حد درجة الصفر في الريح الصاعدة يتكون ثلج يتساقط كحبيبات برد.

ويتم فصل الشحنات في السحب الرعدية بشكل رئيس من خلال تكون الثلج، وجزئيا من خلال احتكاك نقاط الماء في الريح الصاعدة، ويزداد نتيجة تأثير الهطول. وفي تأثير الهطول تنقسم نقاط المطر الكبيرة فتسقط الأجزاء الثقيلة من النقاط مع الشحنة القطبية وترتفع الأجزاء الخفيفة ذات القطبية المعاكسة مع الرياح الصاعدة كما هو موضح في شكل (٥- ١)

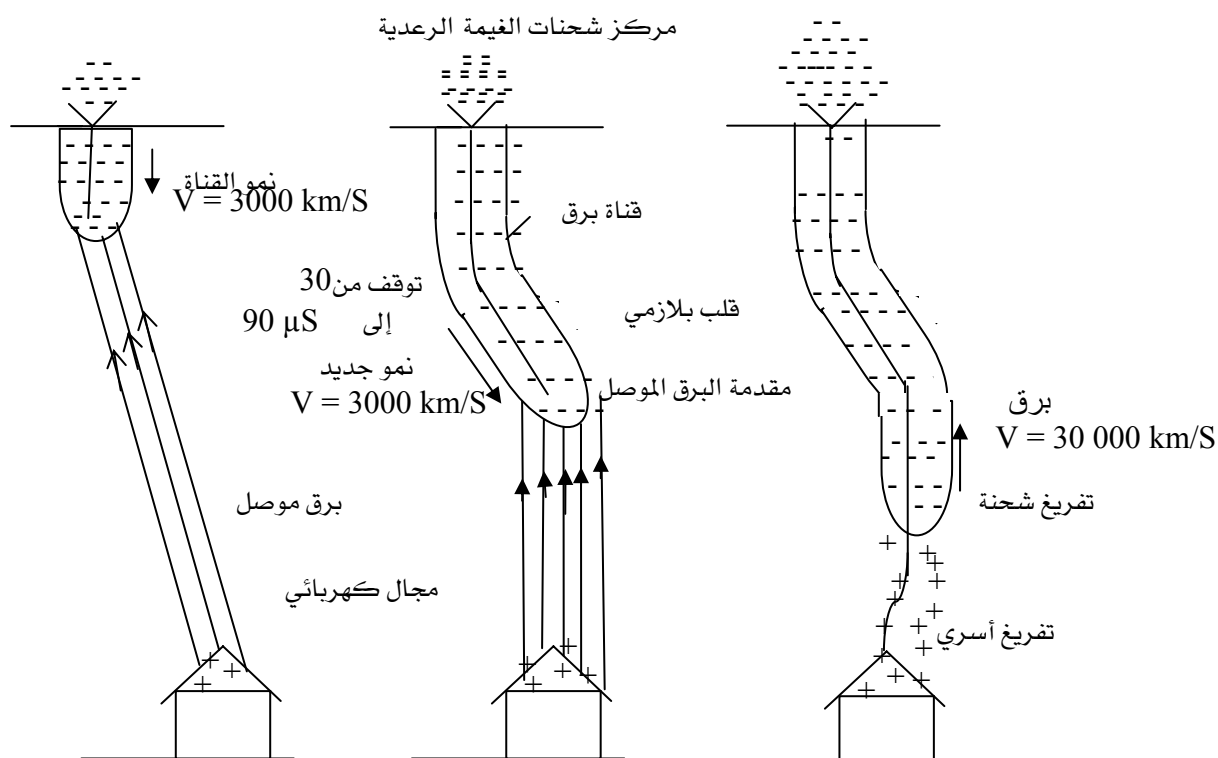
إذا حصل فصل كبير في الشحنات ، تتكون ابتداء من مركز الشحنات قناة برق يمكن أن يبلغ نصف قطرها عدة أضعاف من 10 أمتار. وتنمو بشكل تدريجي في اتجاه الشحنة ذات القطبية المعاكسة شكل (٥ - ٢) . وفي نفس الوقت ينمو في قناة البرق قلب من البلازما بتأين عال يسمى البرق الموصل، وتبلغ سرعته  $3000 \text{ km/S}$  ويكون مصحوبا بضوء خافت (ضوء جوي) . إذا التقى البرق الموصل مع الشحنة ذات القطبية المعاكسة - التي يمكن أن تنمو منها أيضا قنوات برق - يحصل ما يسمى التفريغ الأسري وتنهار الشحنات بسرعة تبلغ  $30000 \text{ km/S}$  ويصحب ذلك ضوء شديد يسمى البرق. ينتج البرق تيارا عاليا يصل أحيانا إلى  $400 \text{ kA}$  يولد مجالا مغناطيسيا شديدا يضغط الهواء الذي سخنه تيار البرق. ويمكن أن يصل الضغط في قناة البرق إلى  $100 \text{ bar}$ .

وبما أن عملية التفريغ تتم في زمن يتراوح بين  $100 \mu\text{s}$  إلى  $150 \mu\text{s}$  في المتوسط شكل (٥ - ٣ أ ، ب)، فإن الهواء المضغوط في قناة البرق يتحرر بشكل مفاجئ، مما يؤدي إلى حدوث الرعد.

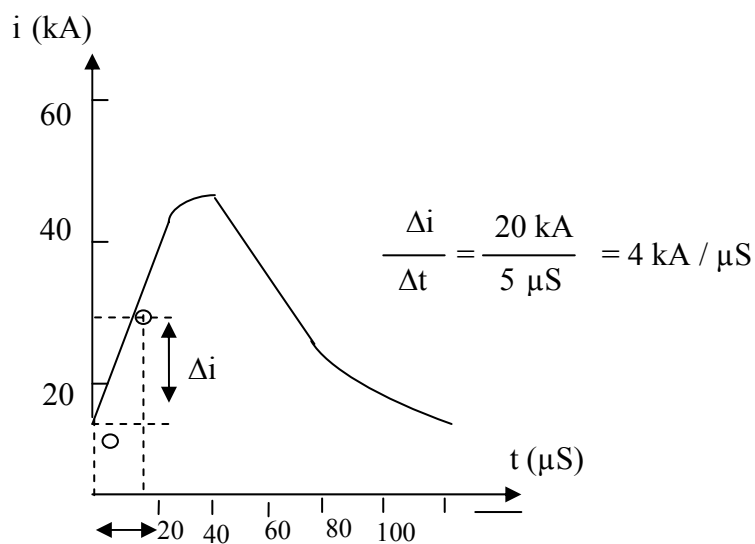


شكل (٥ - ١) توزيع الشحنات في غيمة رعدية لعاصفة حرارية محلية

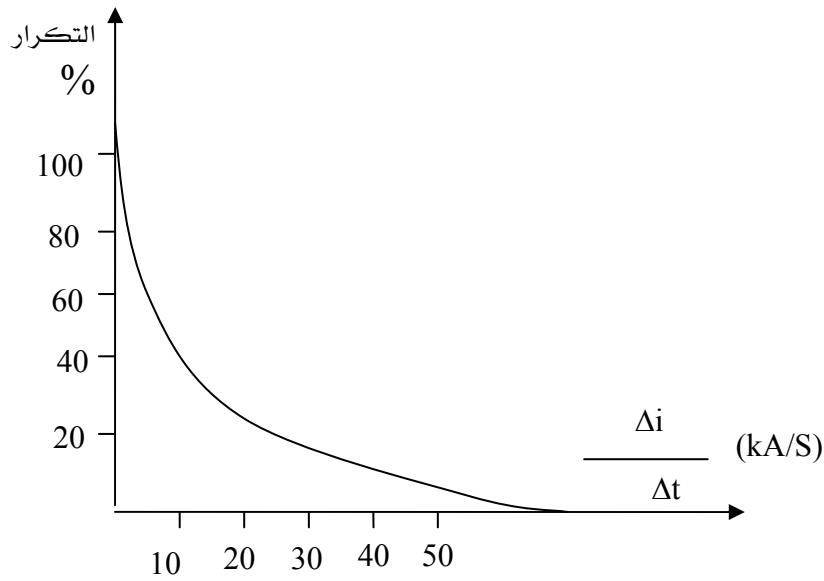




شكل (٥ - ٢) : تمثيل مبسط لتكوين برق سالب بين السحابة والأرض



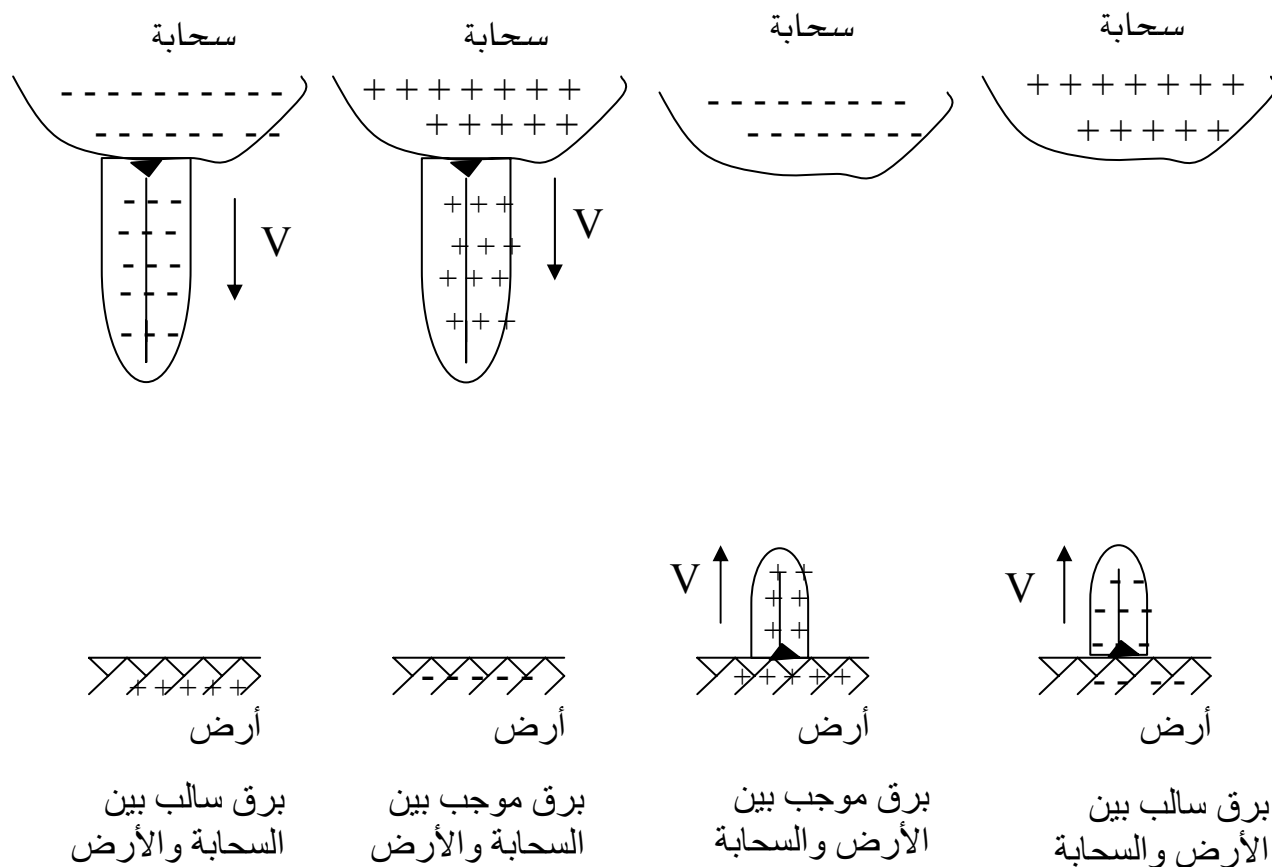
شكل (٥ - ٣ - أ) : منحنى زمني لتيار البرق



$$\frac{\Delta i}{\Delta t} = 7 \text{ (kA/S)} \quad 50 \% \text{ من البرق لها}$$

شكل (٥ - ٣ - ب) : تكرار  $\Delta i/\Delta t$

يمكن أن تتعاقب عدة تفريغات للشحنات عبر قناة البرق الواحدة ، ويمكن أن تتطلق قناة البرق ذات البرق الموصل من الشحنات الموجبة أو السالبة . كما يمكن أن يحدث تفريغ شحنات من سحابة إلى سحابة أو من سحابة إلى الأرض أو من الأرض إلى سحابة كما في شكل (٥ - ٤) . ويحمل البرق الموجب في العادة طاقة أكبر .



شكل (٥ - ٤) : أنواع البرق

## ٥ - ٤ - ٣ : تأثيرات البرق

يظهر التيار البرقي جميع التأثيرات التي يظهرها التيار الكهربائي.

## أ - التأثير على الإنسان والحيوان

يكمن الخطر الأكبر في جهد التلامس وفي جهد الخطوة. فحتى على بعد ٣٠٠ متر من المكان الذي يضرب فيه البرق يمكن أن تظهر جهود خطوة خطيرة . والحيوانات معرضة للخطر على وجه الخصوص بسبب جهد الخطوة الأكبر . 40% من الإصابات بالبرق هي مميتة ويقع 70% من جميع الحوادث في الخلاء.

## ب - التأثير الحراري

ترتفع درجة الحرارة في المواد الموصلة عند مرور تيار البرق فيها. ويمكن أثناء ذلك أن تسخن الموصلات الرفيعة بشكل كبير جدا بحيث يحترق العزل أو تشتعل المواد المجاورة القابلة للاشتعال. الطاقة الحرارية المنطلقة عند مواضع دخول البرق وخروجه في الأجزاء الموصلة يمكن أن تذيب بضعة

مليمترات مكعبة من المعدن. هذا يعني أنه يوجد خطر خاص في الأماكن المعرضة لخطر الانفجار. عندما يمر تيار البرق من خلال موصل رديء ورطب ، يتبخر السائل فيه بشكل مفاجئ ويؤدي إلى انفجار في الأعمدة الخشبية، أو الجدران ، أو الأشجار.

### ج - التأثير الكهروديناميكي:

إذا تدفق تيار البرق في موصلات متوازية قريبة من بعضها (القضبان العمومية مثلاً) فيمكن أن تظهر قوى كهروديناميكية بينها تصل إلى  $400000 \text{ N/m}$  يمكنها أن تحطم منشآت الموصلات الكهربائية بالكامل.

### د - التأثير الكهروكيميائي :

يمكن أن يحلل تيار البرق بضعة ملي غرامات من المعدن على الأكثر.

### ٥ - ٤ - ٤ : قفز البرق :

إذا مر تيار برق مقداره  $100 \text{ kA}$  في تجهيزة وقاية من البرق بمقاومة أرضية تبلغ  $5 \Omega$  فسيكون جهد تجهيزة الوقاية بالنسبة للمنطقة المجاورة :

$$U = i \cdot R = 100 \times 10^3 \times 5 = 500 \text{ kV} \quad (5.5)$$

وتقع جميع الأجزاء المعدنية المرتبطة بتجهيزة الوقاية من البرق تحت هذا الجهد العالي بالنسبة للأجزاء المعدنية الأخرى غير الموصولة بها والتي تقع على جهد الأرض مما يؤدي إلى قفز شرر إذا لم تكن المسافة بينهما كبيرة إلى الحد الكافي.

كما يمكن أن ينشأ جهد حث عال  $U_s$  على ملف مفتوح داخل تجهيزة الوقاية من البرق، والذي سببه هو جبهة تيار البرق  $(\Delta i / \Delta t)$  ذات الميل العالي جداً .

$$U_s = L \Delta i / \Delta t \text{ أو } U_s = M \Delta i / \Delta t \quad (5.6)$$

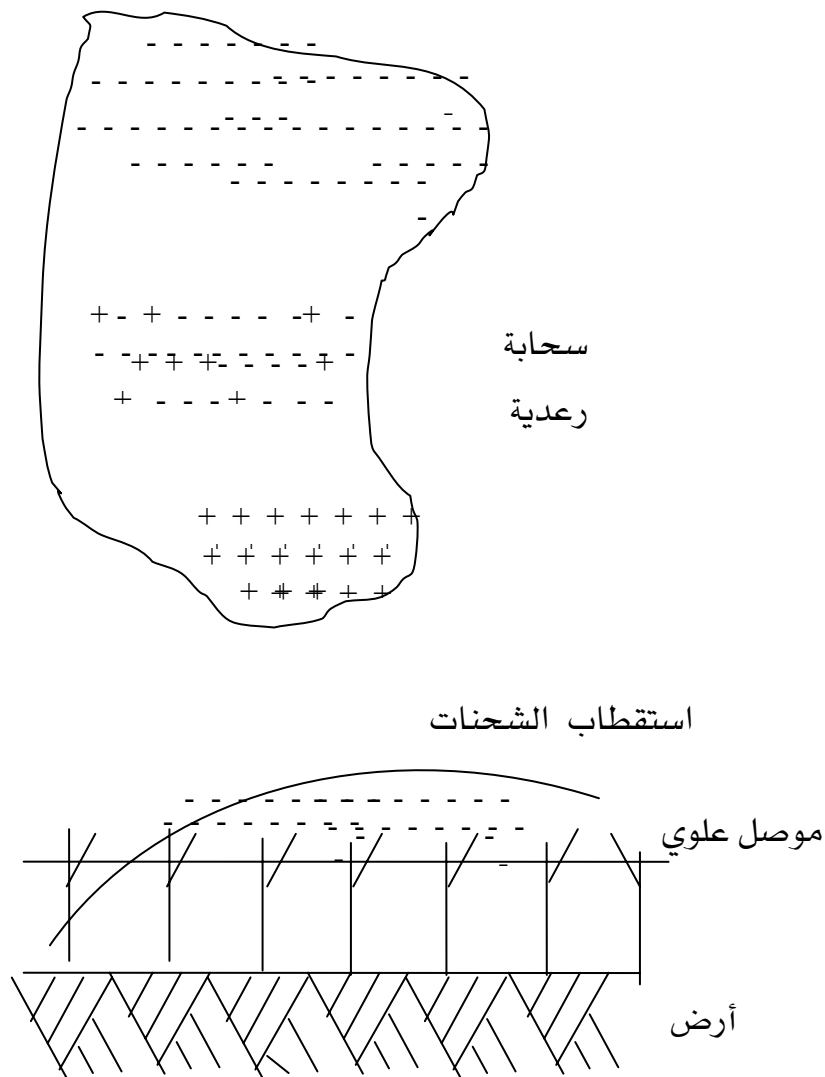
ويمكن أن يظهر شرر عرضي على هذه المواقع المفتوحة . هذا الشرر العرضي يسمى قفز البرق.

### ٥ - ٤ - ٥ : الجهود الناتجة عن تشويشات جوية

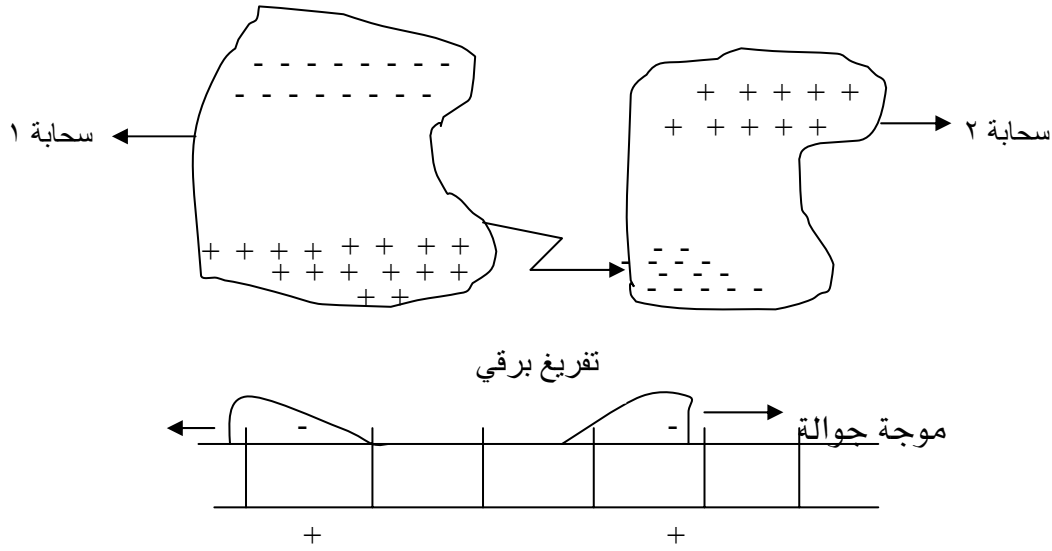
إذا اقتربت مثلاً سحابة رعدية موجبة من موصل علوي شكل (٥ - ٥) ، فتربط السحابة الموجبة شحنة سالبة على هذا الموصل (الشحن غير المباشر) ، في حين تتحرر الشحنات الموجبة نتيجة هذا الاستقطاب وتسري إلى الأرض عبر العزل والملفات. وعندما تفرغ هذه السحابة شحناتها عن طريق برق إلى

سحابة مجاورة كما في شكل (٥ - ٦) ، تصبح الشحنات السالبة على الموصل حرة بشكل مفاجئ ، ويتولد جهد بالنسبة إلى الأرض. فتنشر هذه الشحنات كموجة جواله إلى كلا الجانبين في نظام التوصيل. ومن خلال الحث والحث الذاتي نتيجة الجبهات الحادة  $\Delta i / \Delta t$  للموجة الجواله ينشأ خطر على عزل الموصلات والمحولات والآلات.

عند الصعق المباشر على الموصلات العلوية تتلف العوازل عند موقع الصعق وتسري الشحنات كأموج جواله في الموصلات وتعرضها للخطر كما في الشحن المباشر . كما تنتشر الموجة الجواله في نظام الموصلات وجهد العزل



شكل (٥ - ٥) : الشحنة على موصل علوي بسبب اقتراب سحابة رعدية



شكل (٥ - ٦) : تفريغ الشحنات إلى السحابة المجاورة من خلال التفريغ البرقي.

#### ٥ - ٤ - ٦ : حماية خطوط النقل الكهربائية من الصواعق:

يتم حماية خطوط النقل الكهربائية من الصواعق بالتصميم المناسب للخط ووضع خطوط حماية أرضية واستعمال مانعات الصواعق . ويمكن تجنب الزيادة الفجائية للجهود على الشبكة الكهربائية الناتجة عن الصواعق الكهربائية أو التقليل من أخطارها بالوسائل التالية :

- (أ) حماية الخطوط الهوائية باستخدام خطوط أرضية على الأوجه لخطوط النقل
- (ب) استخدام القضبان الأرضية
- (ج) استخدام أجهزة الحماية مثل ثغرات التفريغ (expulsion gaps) وأنابيب الحماية على الخطوط ومانعات الصواعق عند نهايات الخطوط وكذلك بمحطات التحويل.

#### أ - الحماية باستخدام خطوط الحماية أو الخطوط الأرضية:

الخط الأرضي هو موصل كهربائي موجود على التوازي مع الموصلات الرئيسية لخط النقل الكهربائي الموضوعة على نفس البرج ومؤرض عند كل الأبراج المتساوية الأبعاد والمنتظمة. ويكون الخط الأرضي موجوداً أعلى الخطوط الرئيسية لخط النقل الكهربائي. هذا الخط الأرضي يعمل على حماية خط النقل الكهربائي من الشحنات المتولدة من السحب وكذلك من تفريغ الصواعق الكهربائية.

ويمكن شرح كيفية حماية الخط الأرضي للخطوط الكهربائية كما يلي. بفرض أن السحابة الموجبة الشحنة موجودة أعلى الخط فإنها توجد شحنات كهربائية تأثيرية سالبة على الجزء من الخط الكهربائي والموجود أسفل منها. وبوجود الخط الأرضي مع الخط الكهربائي فإن كلا منهما سيكتسب شحنات تأثيرية ولكن الخط الأرضي يكون مؤرضاً عند مسافات منتظمة لهذا فإن الشحنات التأثيرية المتولدة على الخط الأرضي تسرب إلى الأرض عند نقاط التأريض ويكون فرق الجهد بين الخط الأرضي والسحابة وبين الخط الأرضي والخط الكهربائي متناسبا عكسياً مع السعة (capacitances) بينهما  $(V = Q/C)$  ، وحيث إن الخط الأرضي أقرب للخط الكهربائي فإن الشحنات التأثيرية عليه تكون قليلة جداً ولذلك فإن الارتفاع في الجهد يكون بسيطاً جداً.

#### ب - الحماية باستخدام قضبان التأريض وأسلاك الموازنة العكسية:

عند حماية الخطوط الكهربائية بالخط الأرضي فإن الصاعقة الكهربائية تضرب إما البرج أو الخط الأرضي . وفي هذه الحالة فإن مسار الشحنات إلى الأرض يكون من خلال البرج للأرض أو من خلال الخط الأرضي في الاتجاهات العكسية من نقطة الضرب . لذلك فإن الخط الأرضي يقلل من الجهد اللحظي لأعلى البرج حيث يكون مسار الصاعقة في ثلاث اتجاهات. الجهد اللحظي لأعلى البرج يكون :

$$V_T = I_0 Z_T / (1 + Z_T / Z_S) \quad (5.7)$$

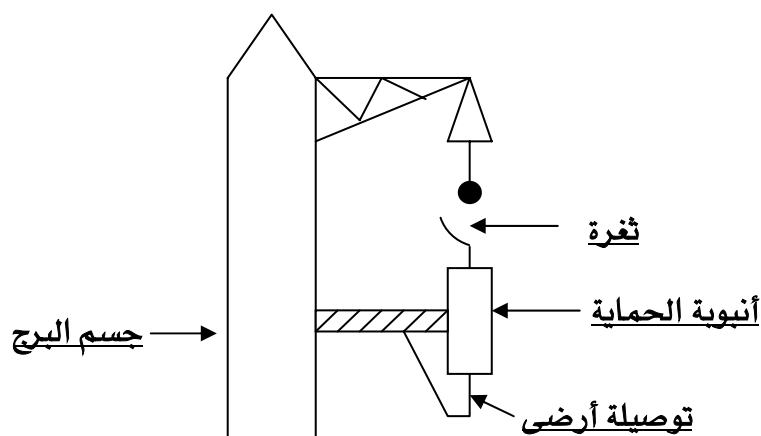
حيث  $Z_T$  هي معاوقة الدفعة للبرج (surge impedance) و  $Z_S$  هي معاوقة الدفعة للخط الأرضي. لو قللنا من قيمة معاوقة الدفعة للبرج والتي هي في نفس الوقت معاوقة تأريض البرج فإن جهد الدفعة سيقبل في نفس الوقت.

القضبان الأرضية التي تستخدم يكون قطرها حوالي ١٥ مم وطولها يتراوح بين ٢,٥ إلى ٣ متر. وفي الأرض الصلبة يزداد طول القضيب ويمكن أن يصل للعمق حوالي ٥٠ متر. وتصنع القضبان الأرضية عادة من الحديد المجلفن أو النحاس. ويعتمد عدد القضبان الأرضية والمسافات بينها على القيمة المطلوبة للمقاومة الأرضية . نفس التأثير السابق يمكن الحصول عليه باستخدام أسلاك الموازنة العكسية (counter poise wires) وتدفن هذه الأسلاك على عمق يتراوح بين 0.5 إلى 1 متر وموازيا لخطوط النقل الكهربائي وتوصل بأرجل والأبراج. طول هذه الأسلاك يتراوح بين 50 و 100 متر. وقد وجد أن هذه الأسلاك أكثر فعالية من القضبان الأرضية وتقلل قيمة معاوقة الصاعقة بفعالية والتي يمكن أن تصل إلى 25 أوم. ولا يؤثر عمق الدفن على مقاومة الأسلاك ولكن فقط يجب أن تدفن لعمق كاف لمنع

السرقه. ومن المطلوب استخدام أطوال أكبر أو عدد منها على التوازي بدلا من استخدام سلك واحد ولكن من الصعب أن نضع أكثر من سلك واحد موازنة بالمقارنة بالقضبان الأرضية.

ج - استخدام أجهزة الحماية:

في المناطق كثيفة حدوث الصواعق الكهربائية لابد من وجود أجهزة حماية من الصواعق الكهربائية على التوازي مع الخطوط الكهربائية. وعلى الخطوط الكهربائية نستخدم نوعين من الأجهزة تعرف بثغرات الانفجار وأنابيب الحماية شكل (٥ - ٧). وغالبا ما يثبت بأطراف الخطوط الكهربائية ونقاط التوصيل الكهربائية على الخطوط ومحطات التوزيع الكهربائية مانعات صواعق.



شكل (٥ - ٧) : تركيب أنبوبة الحماية

## ١ - ثغرات الانفجار:

ثغرات الانفجار هي أجهزة تحتوي على ثغرات الشرارة spark gaps مع أجهزة إطفاء الشرارة والتي تطفئ شرارة التيار عندما تنهار الثغرات خلال الزيادة الفجائية للجهد. فتغرة الانفجار تتكون من تغرة قضيب هوائية بالتوالي مع تغرة ثانية داخل أنبوبة فيبر. وفي حالة حدوث جهد فجائي تنهار كل من ثغرات الشرارة على التوالي. وتحد قيمة التيار الفجائي فقط بمقاومة تأريض الأبراج والمعاوقة الدفعية للأسلاك الأرضية. وتسبب الشرارة الداخلية في أنبوبة الفيبر خلال التيار الدفعي في تبخر جزء صغير من مادة الفيبر وتنتج بعض الغازات. هذه الغازات الناتجة تكون خليطاً من بخار الماء ومنتجات تحلل مادة



الفير وتعمل على طرد نواتج الشرارة والهواء المتأين . وعندما يصل التيار المار ذو التردد للصفر تنطفئ الشرارة ويصبح المسار مفتوحا كهربائيا ويستعيد العازل شدته ويحتفظ مرة أخرى بحالته الطبيعية .

## ٢ - أنابيب الحماية:

أنابيب الحماية مماثلة لثغرة الانفجار في التركيب ومبادئ التشغيل وتتكون أيضا من قضيب أو ثغرة شرارة في الهواء مكونة من موصل الخط وطرف جهدها العالي وتثبت تحت الموصل على البرج. ويستبدل الفراغ الموجود بأنبوبة الانفجار بعنصر خطي (nonlinear element) والذي يوفر معاوقة عالية جدا عند التيارات المنخفضة وتقل المعاوقة بسرعة جدا عند التيارات العالية أو التيارات الدفعية. وعند حدوث الجهود الدفعية تنهار الثغرات الهوائية وتحد قيمة التيار بواسطة المقاومة ومقاومة الأرضي للأبراج. وتقل الجهود الدفعية على الخط حتى يتساوى مع الجهد الواقع على أنبوبة الحماية. وبعد تفريغ الجهد احلدفعي للأرض فإن التيار المتتابع ذا التردد سوف يحد بالمقاومة العالية وبعد قيمة الصفر الطبيعي لتيار الخط الكهربائي ذي التردد تستعيد ثغرة الشرارة وبسرعة قوة العزل. وعادة ما يكون جهد الانهيار السطحي (flashover voltage) لأنبوبة الحماية أقل من جهد الانهيار السطحي لعوازل الخط الكهربائي لذلك فهي قادرة على التفريغ الفعال للجهود الزائدة للصواعق الكهربائية.

## ٣ - مانعات الصواعق:

مانعات الصواعق هي أجهزة تستخدم في محطات المحولات الكهربائية وعند نهايات الخطوط الكهربائية وذلك لتفريغ الجهود الزائدة للصواعق الكهربائية والجهود الدفعية أثناء عمليات الفتح والغلق للقواطع الكهربائية. ومانعات الصواعق لها جهد انهيار سطحي أقل من أي عازل أو أجهزة بالمحطات الكهربائية ولها القدرة أيضا على تفريغ تيارات تتراوح بين 10 kA إلى 20 kA لجهود دفعية ذات فترات زمنية طويلة (20.8  $\mu$ S) والتيارات تتراوح بين 100 kA إلى 250 kA لجهود دفعية ذات فترات زمنية قصيرة (1.5  $\mu$ S)

تتكون مانعات الصواعق من مقاومات غير خطية على التوالي مع ثغرات شرارة والتي يمكن تمثيلها بمفاتيح سريعة العمل. وتتكون مانعة الصواعق من عدد من عناصر مقاومة غير خطية مصنوعة من كربيد السيلكون (silicon carbide) مصفوفة واحدة على الأخرى لجزأين أو ثلاثة يفصل بينها ثغرات شرارية. ويوضع التركيب الداخلي في محتوى من البرسولين. وتكتب خاصية العلاقة بين الجهد والتيار لعناصر المقاومة كالتالي :

$$I = kV^a \quad (5.8)$$

حيث إن  $I$  هو تيار التفريغ و  $V$  هو الجهد الواقع على العنصر و  $k$  و  $a$  هي ثوابت تعتمد على مادة وأبعاد العنصر. وعند وقوع الجهد الدفعي على مانعة الصواعق فإنها تنهار (انهيار الثغرات الهوائية).

التصميم البسيط لمانعات الصواعق يعمل على التيارات ذات الفترات الزمنية الصغيرة ويعمل على تيارات تتراوح بين 100 و 300 أمبير لتيارات ذات تردد القوى وحوالي 5000 أمبير للتيارات الدفعية. بينما مانعات الصواعق ذات التيارات العالية والفترات الزمنية الكبيرة والتي تعمل على التيارات الأعلى يزداد بها عدد العناصر المتوالية أو نستخدم طريقة أخرى للحد من التيارات في الطريقة المستعملة على نطاق واسع اليوم للحد من التيارات العالية جدا تصمم الثغرات بحيث يتم احتراق الشرارة في المجال المغناطيسي للملفات والتي تثار بواسطة تيار ذي تردد القوى. وأثناء تفريغ الصاعقة الكهربائية يتولد جهد عال في الملف بواسطة مقدمة الموجة الدفعية الطويلة وتحدث الشرارة في الثغرة المساعدة. وعند التيارات ذات تردد تنطفئ الشرارة في الثغرة المساعدة حيث يكون الجهد على الثغرة غير كاف لوجود الشرارة. وتحدث شرارة الثغرة الرئيسة في المجال المغناطيسي للملفات. ويتسبب المجال المغناطيسي وشكل البوق لإلكترونيات الثغرة الرئيسة في إطالة الشرارة وعنصر المقاومة أثناء تفريغ الجهد الدفعي ويصبح مستوى الحماية ضد الصواعق الكهربائية أقل.

وفي بعض الأحيان يمكن الحد من تردد القوى والجهود الزائدة الأخرى بعد عدد معين من الموجات باستخدام مانعات الصواعق ويعتمد الجهد والزمن المسموح به على السعة الحرارية لمانعات الصواعق. ويختار الجهد المقنن للصواعق بحيث يكون أكبر من الجهد الزائد ذي تردد القوى المتوقع (الجهد بين الخط والأرض) عند نقطة التركيب تحت أية ظروف للأخطاء أو ظروف طبيعية.

## ٥ - ٤ - ٧ : مستوى العزل للمعدات الكهربائية وتنسيق العزل للمحطات الكهربائية

يمكن أن تتعدى جهود الموجات الدفعية ذات الزمن الأطول عند المحطات الكهربائية وعند مختلف النقاط على الخط الكهربائي مستوى الحماية لهذه المحطات وتعتمد هذه الموجات الدفعية على المسافة وموقع أجهزة الحماية من الصواعق. لذلك فمن الهام أن نحدد عدد المواقع المطلوبة لأجهزة الحماية التي تحقق أفضل تكلفة كلية اقتصادية. وغالبا في محطات محولات الجهد العالي تركيب مانعات الصواعق بين المحول الكهربائي والقاطع الخاص به لحماية المحول من عملية تقطع التيار ( current chopping) والتي تسبب في الجهود الزائدة والأكثر من ذلك فإن قرب مانعات الصواعق من المحول الكهربائي يوفر حماية أفضل للمحول. وغالبا ما يتحدد مستوى العزل الأساسي ( basic insulation level) بإعطاء سماحية تقدر بحوالي 30% لمستوى الحماية لمانعات الصواعق واختيار مستوى الحماية الأساسية القياسي الأقرب التالي.

مستوى الحماية لعوازل محطات المحولات يعتمد على موقع المحطة ومستوى الحماية لمانعات الصواعق وخط التحجيب (line shielding) المستعمل. فالعوازل الكهربائية في نهاية الخط الكهربائي والقريبة من المحطات الفرعية عادة ما توضع لتقلل من الجهود الدفعية للصواعق التي تصل للمحطات الفرعية. أما في داخل المحطات فإن مستوى العزل لقضبان التوزيع يكون عاليا جدا وذلك لضمان استمرارية تدفق القدرة الكهربائية. وتعطى القواطع والمفاتيح الكهربائية وأجهزة القياس ومحولات التيار والجهد....وهكذا مستوى الحماية الأقل التالي. وبما أن محول القوى هو الأكثر تكلفة والجهاز الحساس فإن مستوى العزل له هو الأقل.

المثال التالي لمحطة محولات جهد 132 kV يوضح مبادئ تنسيق العزل.

- جهد النظام الاسمي : 132 kV
- أعلى جهد للنظام : 145 kV
- أعلى جهد للوجه :  $145 \times (\sqrt{2}\sqrt{3}) = 119 \text{ kV}_{\text{peak}}$
- الجهد الدفعي للفتح المتوقع :  $3 \times 119 = 357 \text{ kV}_{\text{peak}}$
- (أ) مانعات الصواعق:
- الجهد المقنن : 123 kV
- مقدمة جهد الانهيار :  $510 \text{ kV}_{\text{peak}}$
- جهد التفريغ عند 10 kA وموجة جهد دفعي  $8/20 \mu\text{S}$  :  $443 \text{ kV}_{\text{peak}}$
- (ب) المحولات:

- الجهد الدفعي الذي تتحمله المحولات :  $550 \text{ kV}_{\text{peak}}$
- مستوى الجهد التأثيري الذي تتحمله المحولات :  $550 \text{ kV}_{\text{rms}}$
- سماحية الحماية من الجهد الدفعي للصواعق :  $[(550 - 443)/443] \times 100 = 24\%$

(ج) أجهزة الحماية من الأخطاء switchgear

- الجهد الدفعي المحتمل :  $650 \text{ kV}_{\text{peak}}$
  - الجهد الدفعي للصاعقة الذي تتحمله عوازل قضبان التوزيع :  $650 \text{ kV}_{\text{peak}}$
- وعند استخدام قضبان ثغرات الشرارة لحماية المحولات من الجهود الدفعية ، يمكن اختيار قضبان ثغرات الشرارة ذات جهد انهيار سالب قدره 440 kV (ثغرة طولها 59 سم) لتعطي سماحية قدرها 25% وتعطي حماية جيدة للجهود الدفعية التي يكون زمن مقدمتها أكبر من 2 ميكرو ثانية.

## أسئلة وتمارين

- (١) اشرح النظريات المختلفة لتكون الشحنات بالسحب.
- (٢) اشرح ميكانيزم تطور الصاعقة الرعدية والجهود المتولدة على خطوط النقل الكهربائي.
- (٣) اشرح الطرق المختلفة لحماية خطوط النقل الكهربائي من الصواعق الرعدية.
- (٤) اشرح مبادئ ووظيفة كل من ثغرات الانفجار وأنابيب الحماية
- (٥) اشرح وظيفة مانعات الصواعق كجهاز حماية.
- (٦) اكتب نبذة مختصرة عن الآتي :
  - (أ) قضبان ثغرات الشرارة كجهاز حماية من الجهود الزائدة
  - (ب) الخطوط الأرضية لحماية خطوط النقل من الصواعق .