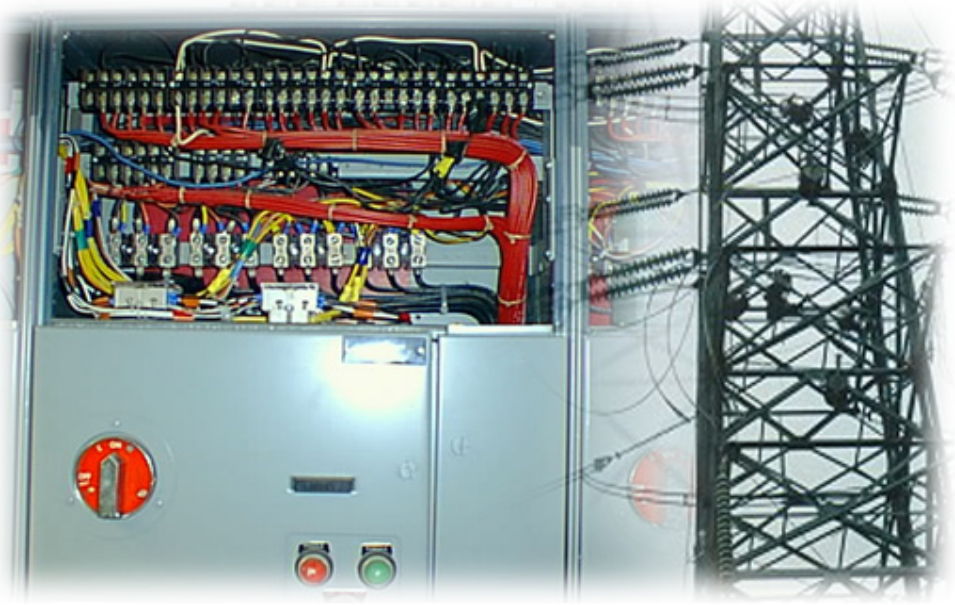
المملكة العربية السعودية
المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني
الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج

قوى كهربائية

تقنية الجهد العالي

٢٥٦ كهر



جميع الحقوق محفوظة للمؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني

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

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

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

وتتناول هذه الحقيبة التدريبية " تقنية الجهد العالي " لمتدربي قسم" قوى كهربائية " للكليات التقنية موضوعات حيوية تتناول كيفية اكتساب المهارات اللازمة لهذا التخصص.

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

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

الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج

نظراً للطلب المتزايد على استخدام الطاقة الكهربائية في البلدان المختلفة فقد أصبح إنتاج كميات كبيرة منها ضرورة ملحة. ولنقل هذه الكميات الضخمة من القدرة الكهربائية عبر خطوط النقل الكهربائية فقد تم الاتجاه إلى نقلها عبر خطوط نقل ذات جهود فائقة وذلك لعدة مزايا، منها تحقيق كفاءة نقل عالية و تقليل التكاليف الاقتصادية لخط النقل والحصول على تنظيم جيد للجهد في جميع أجزاء الخط بتقليل المفاقيد. وفي البلدان الصناعية مثل أمريكا وأوربا وروسيا وصلت الجهود التي تنقل عندها الطاقة الكهربائية إلى قيم تتراوح مابين ٧٦٥ إلى ١١٠٠ كيلو فولت.

ونظراً لارتباط متطلبات العزل للأجهزة والمعدات والعوازل الكهربائية التي تعمل عند جهود عالية بمستوى الجهد. فقد بات من الضروري الاهتمام بتقنية الجهد العالي والتي استخدمت تطبيقاتها في العديد من المجالات منها؛ أنظمةالكهربائية والصناعة ومعامل الأبحاث. وقد دخلت هذه التطبيقات في مجالات كثيرة منها على سبيل المثال: تقليل التلوث البيئي عن طريق المرسبات الكهرو ستاتيكية والتي توفر أيضاً بيئة خالية من الشوائب العالقة في الهواء والضرورية للعديد من الصناعات مثل صناعة الرقائق الإلكترونية. كما تستخدم تقنيات الجهد العالي في ملفات بدء الاحتراق للمركبات و معدات أشعة X للتطبيقات الصناعية والطبية والتي تتطلب جهود عالية تصل في بعض الأحيان إلى ١٠٠ كيلو فولت. وفي معامل أبحاث الجهد العالي الحديثة يتم إنتاج جهوداً عالية مترددة ومستمرة ونبضية تصل إلى ٦ ميغافولت أو أكثر وذلك لأغراض اختبارات العزل للأجهزة والمعدات والعوازل الكهربائية لدراسة مدى تحملها للظروف التشغيلية قبل تركيبها في مواقع العمل، أو لتطوير عوازل جديدة محسنة ومقاومة للظروف البيئية. حيث تتطلب المعدات التي تعمل عند الجهود العالية والفائقة تصميما دقيقا لعزلها الكهربائي.

وتحتوي هذه الحقيبة على ستة فصول، يهتم الفصل الأول بدراسة التقنيات المختلفة لتوليد الجهد العالي المتردد والمستمر والجهود النبضية. ويتضمن الفصل الثاني التقنيات المختلفة لقياس الجهود العالية. كما يتم استعراض العوازل الكهربائية المستخدمة في خطوط نقل القدرة في الفصل الثالث، من حيث المواد المكونة لها وطرق زيادة كفاءتها. وحيث إن كفاءة العوازل الكهربائية تلعب دورا هاما في استمرارية وموثوقية نظام الطاقة الكهربائية وخاصة في الشبكات التي تعمل عند جهود فائقة مما جعل تركيز الأبحاث ينصب في مجمله على زيادة كفاءة العازل الكهربائي واستنباط مواد عزل جديدة ذات كفاءة عالية. لذلك يقدم الفصل الرابع آلية (ميكانيزم) الانهيار للعوازل الكهربائية المختلفة من غازية وسائلة وصلبة وأهم المواد العوازل المستخدمة عملياً مما يجعل المتدرب على دراية تامة بكيفية تلافي أو التقليل من حدوث انهيار أو تلف لتلك العوازل. أما الفصل الخامس فيقدم شرحا لظاهرة الصواعق الكهربائية وكيفية تكون الشحنات الكهربائية بالسحب وآلية (ميكانيزم) الصاعقة الرعدية وكيفية حماية

خطوط النقل والمعدات الكهربائية منها. كما يستعرض الفصل السادس ظاهرة الكهرباء الساكنة التي تنتج عن تراكم الشحنات على أجسام الموصلات والعوازل، والتعريف بأخطارها التي تؤدي إلى كوارث من انفجارات وحرائق إلى تعطيل وتلف العديد من العمليات الصناعية، وذلك بسرد العديد من الأمثلة. ويعالج الفصل أيضاً كيفية التخلص من هذه الظاهرة وتقليلها باستخدام طرق التأريض والمعادلات Neutralizers والمؤينات Ionizers.

تقنية الجهد العالي

توليد الجهد العالي

جميع الحقوق محفوظة للمؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني

(١-١) مقدمة

عادة ما تستخدم أجهزة اختبار الجهد العالي في معامل الأبحاث والتي تختلف من مؤسسة إلى أخرى حسب الاحتياجات التي تحددها تلك الجهة. وتحتوي معامل الجهد العالي على أجهزة لتوليد وقياس الجهود العالية. كما تستخدم أجهزة اختبار الجهد العالي في معامل الاختبار الروتيني للأجهزة، كالكيبلات والمحولات والقواطع الكهربائية والجلب العازلة وغيرها. وتستخدم أجهزة الجهد العالي لدراسة سلوك العوازل الكهربائية ومدى تحملها للجهود المطبقة عليها في مواقع العمل. وعادة ما يكون جهد الاختبار أعلى من الجهد الذي تعمل عنده تلك الأجهزة والعوازل، وذلك لتحديد عامل الأمان لعملها.

ولابد لأي معمل جهد عالٍ أن يحتوي على أجهزة لتوليد الجهود المرتفعة التالية:

١. الجهود العالية المترددة Alternating High Voltage.
٢. الجهود العالية المستمرة Direct High Voltage.
٣. الجهود العالية النبضية أو الدفعية Impulse High Voltage.

وكذلك تجهيزات لقياس تلك الجهود. وسنستعرض فيما يلي الأنواع المختلفة للجهود وطرق توليدها والدوائر المستخدمة لذلك.

(١-٢) توليد الجهود العالية المترددة

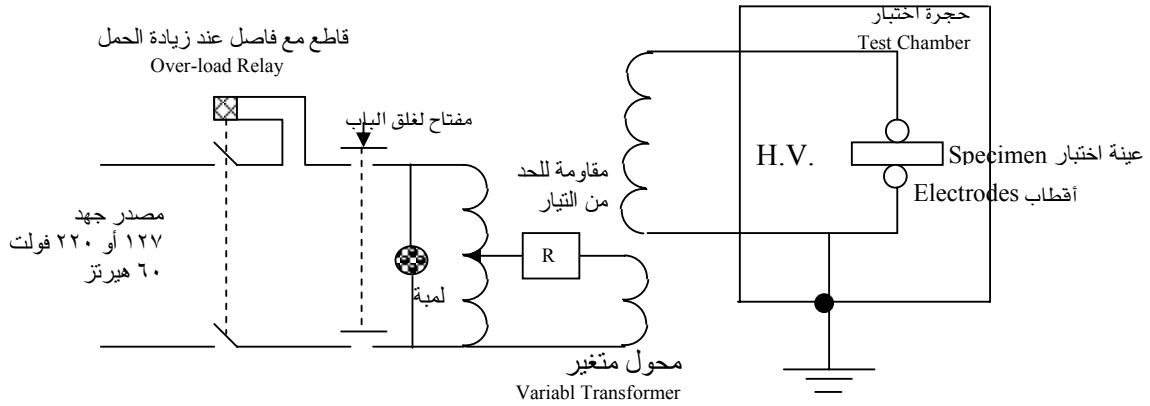
من الممكن توليد الجهد المتردد باستخدام المولدات المتزامنة، ولكن للتكلفة الباهظة لهذه الطريقة ولمحدوديتها بالنسبة لمقدار الجهد العالي المتولد، فقد اعتمدت طريقتان لتوليد الجهد العالي المتردد وهما: باستخدام محولات الجهد العالي، وهي محولات رفع تختلف في تصميمها عن محولات القدرة بزيادة عزل الملفات لتتحمل الإجهادات الناشئة عن القصر في حالة انهيار العينة التي تم اختبارها. والطريقة الثانية باستخدام دوائر الرنين. وسيتم فيما يلي شرح كل طريقة. وميزة الطرق المذكورة أعلاه أنه يمكن توليد جهد عالٍ متردد باستخدام محولات موصلة بمصدر الجهد العام والذي عادةً ما يكون ١٢٧ أو ٢٢٠ فولت بذبذبة ٦٠ هرتز في المملكة العربية السعودية.

(١-٢-١) توليد الجهود العالية المترددة باستخدام محولات الجهد

١. توليد الجهد العالي باستخدام محول مفرد Single Unit Transformer

تستخدم محولات مفردة لاختبار الأجهزة والعوازل الكهربائية لضمان تحملها للإجهادات التي تنشأ عن هذه الجهود عند تركيب تلك الأجهزة والعوازل في الموقع. والشكل (١,١) يبين التجهيزات الأساسية لمعمل جهد عالٍ يحتوي على محول مفرد. يتم تغذية المحول المتغير Variable Transformer أو VARIAC عن طريق مصدر جهد يعمل عند ذبذبة ٦٠ هرتز، مما يؤدي إلى

إمكانية التحكم في مقدار الجهد الذي يغذي الملف الابتدائي لمحول الرفع المفرد وبالتالي نحصل على جهد عالٍ متردد من الطرف الثانوي يتناسب مع نسبة عدد الملفات لطرفي المحول $n_1:n_2$. كما يوجد قاطع كهربائي حساس لزيادة الحمل ومقاومة للحد من التيار في حالة حدوث قصر عند انهيار إحدى العوازل تحت الاختبار. ويتضح من الشكل أيضاً الجزء الخاص بالاختبار من المعمل والذي يوجد به محول الجهد العالي والجزء الخاص بالتحكم والقياس. ويتولد بهذه الطريقة جهد يمكن التحكم في قيمته بحيث يتراوح ما بين صفر فولت إلى جهد يصل إلى ٢٠٠ كيلوفولت. وعادةً ما تقسم هذه المحولات من حيث الجهد الخارج والسعة الظاهرية KVA إلى قسمين: (١) محولات نقالة لها جهد خارج يصل إلى ٥٠ كيلوفولت وسعة ظاهرية تتراوح ما بين ١ إلى ٢ كيلوفولت أمبير KVA. (٢) محولات كبيرة وثابتة خرج الجهد لها يصل إلى ٢٠٠ كيلوفولت وسعتها الظاهرية تصل إلى ١٠٠ كيلوفولت أمبير KVA.

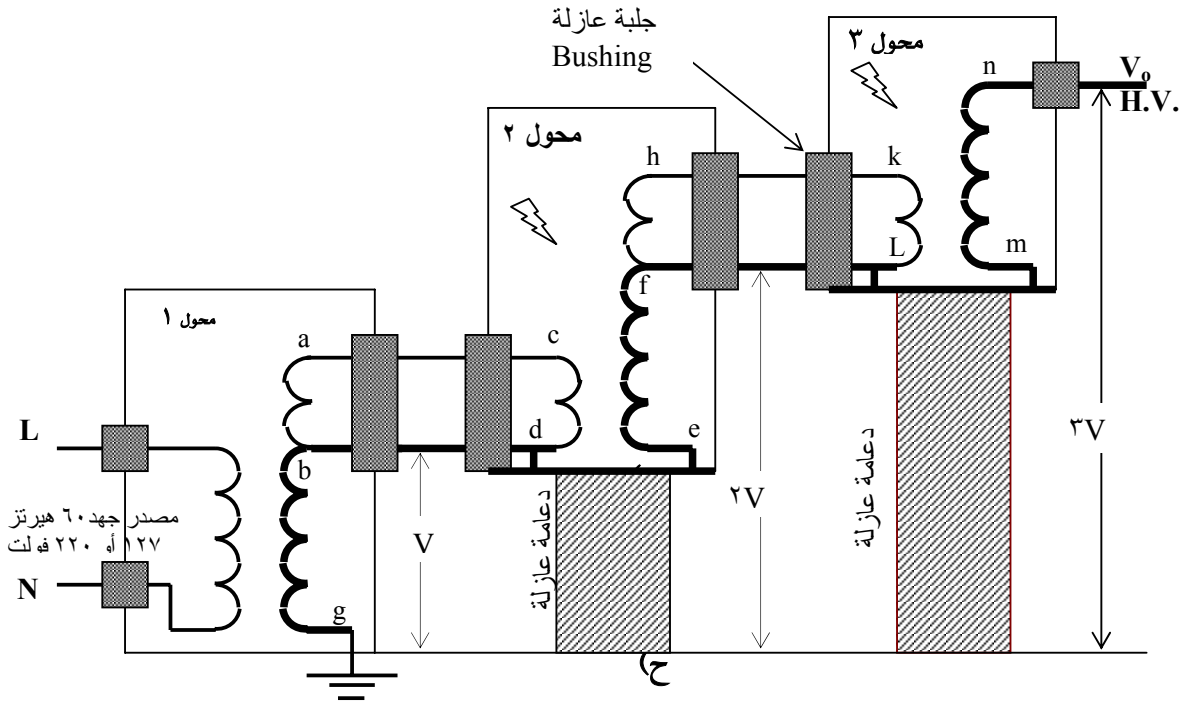


أ) شكل (١,١) توليد الجهد العالي باستخدام محول مفرد

وكما سبق ذكره بأن مستوى العزل لملفات هذه المحولات يختلف عن محولات القدرة بحيث تتحمل الإجهادات القاسية الناتجة عن انهيار العوازل الكهربائية للأجهزة أثناء الاختبار، وحيث إنه سبق أن ذكر بأن جهد الاختبار عادة ما يكون أعلى من الجهد الذي تعمل عنده الأجهزة والعوازل لذلك فإن مستوى العزل المطلوب للمحولات المفردة المستخدمة في توليد جهود فائقة EHV عادة ما يكون عالٍ ومكلف مما يؤدي إلى تصنيع محولات كبيرة الحجم وغالية وصعبة التحميل والتركيب. لذلك فإنه من الأنسب تصنيع عدة محولات ذات حجم أصغر وتكلفة أقل ويتم توصيلها على التوالي لنحصل على جهد يتناسب مع عدد المراحل أو الوحدات.

٢. توليد الجهد العالي باستخدام محولات موصلة على التوالي Cascaded Transformer

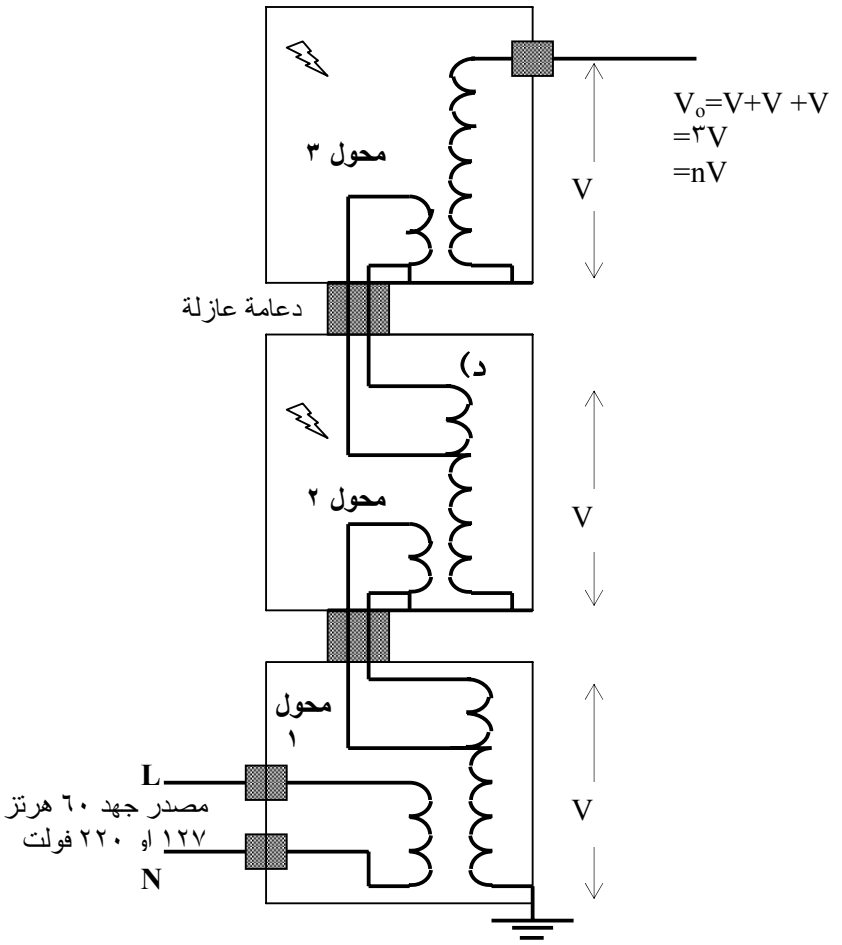
تستخدم وحدات المحولات الموصلة على التوالي لتوليد جهود عالية تصل قيمتها إلى عدة مئات من الكيلوفولتات والتي يتعذر على المحولات المفردة توليدها. الشكل (١,٢) يوضح المحولات الموصلة ببعض على التوالي.



خ) شكل (١,٢) توليد الجهد العالي باستخدام عدة وحدات موصلة على التوالي أفقياً.

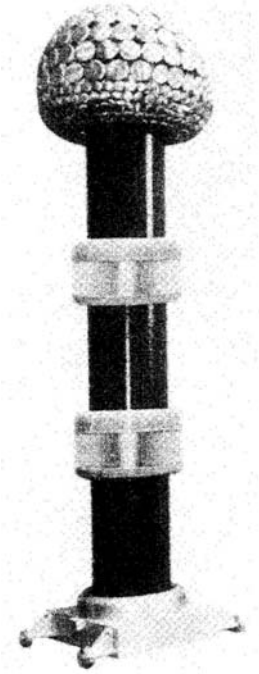
يتم توصيل ملفات الوحدات ببعض على التوالي (كما هو موضح بالخط الغامق g-b-d-e-f-L-m-n)، ويوصل مصدر الجهد بالمحول الأول فقط بينما يوصل الملف الابتدائي لكل وحدة بتفريعه من الملف الثانوي للمحول الذي قبله بحيث يكون الجهد عبرها يساوي جهد المصدر. وحيث إن جميع المحولات متماثلة لذلك فإن الجهد الخارج من المحولات بعد توصيلها على التوالي يساوي حاصل ضرب عدد المراحل n في الجهد الخارج من كل مرحلة V أي أن $V_o=n\times V$. وحيث إن الإطار المعدني لكل محول هو نقطة التوصيل المشتركة للتوصيل على التوالي، لذلك فإن الإطار المعدني يكون معرضاً لجهد عالٍ مما يؤدي إلى تشكيل خطورة على المستخدم. ولتحقيق متطلبات السلامة فإنه يجب عزل المحول المتعدد المراحل داخل منطقة الاختبار في معمل الجهد العالي، بالإضافة إلى عزل كل وحدة عن الأرض بعازل تتناسب شدة عزله مع فرق الجهد بين كل وحدة

والأرض. ويوجد شكلان لتوصيل المحولات على التوالي وهما التوصيل الأفقي والذي يأخذ حيزاً من الفراغ كما هو موضح بالشكل (١,٢) والتوصيل الرأسي والموضح بالشكل (١,٣).



ذ) شكل (١,٣) توليد الجهد العالي باستخدام عدة وحدات موصلة على التوالي رأسياً.

ويتساوى التصميمان من ناحية مبدأ العمل والتوصيل الأفقي والخرج ولكن التصميم الرأسي يوفر حيزاً أكبر من المساحة ويستخدم في المعامل التي لديها سقف مرتفع ومساحة أفقية أقل. كما يختلف التصميم الرأسي من حيث المتطلبات الكهربائية والميكانيكية بأن العوازل بين كل وحدة والأخرى يجب أن تتناسب مع الجهد المطبق عليها بالإضافة إلى الثقل الملقى عليها من الوحدات العلوية. ويوضح الشكل (١,٤) صورة لمحول مكون من عدة وحدات موصلة على التوالي في الوضع الرأسي.

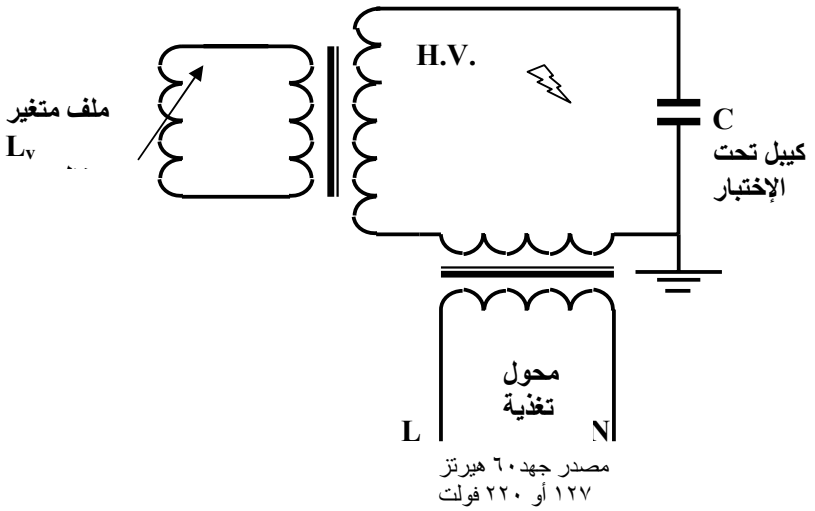


ر) شكل (١,٤) توليد الجهد العالي باستخدام عدة وحدات موصلة على التوالي رأسياً.

(٢-٢-١) توليد الجهود العالية المترددة باستخدام دوائر الرنين (Resonant Circuit)

عادةً ما تحفز التوافيق (Harmonics) الناشئة عن المصدر الرئيسي للجهد وتيارات المغنطة في المحولات الاهتزازات الطبيعية عند ترددات مختلفة مما يؤدي إلى تشوهات وتضخيم لقيمة جهد الخرج في الجهة الثانوية من المحول الذي يغذي حملاً حثياً، وذلك عن طريق رنين التوالي Series Resonance. الرنين المفاجئ الذي يحدث عن تردد القدرة (عادةً ما يكون ٦٠ هرتز) ينتج عنه انفجارات أثناء اختبار كبلات الجهد العالي. وقد أمكن استخدام هذه الظاهرة السيئة بالنسبة لنظام القدرة إيجابياً في توليد جهد عالٍ متردد خال من الرنين عند التوافيق الأخرى. الشكل (١,٥) يبين لنا دائرة مبسطة لرنين التوالي حيث يتضح فيها بأن العنصر المراد اختباره هو عنصر سعوي وعادةً ما يكون كبلاً أو جلبة عازلة.

وحيث إن الرنين المطلوب إحداثه يجب أن يكون عند التردد الطبيعي (f_r) Natural Frequency والذي يحدث عندما تتساوى الممانعة الحثية (X_L) Inductive Reactance مع الممانعة السعوية Capacitive Reactance (X_C) . لذلك يمكن الحصول على رنين بمعايرة الملف المتغير ليحدث لنا ممانعة X_L تتساوى مع ممانعة الكبل المراد اختباره X_C عند تردد المصدر ٦٠ هيرتز والذي سيكون في هذه الحالة هو التردد الطبيعي f_r.



شكل (١,٥) توليد الجهد العالي المتردد باستخدام دائرة رنين.

ويمكن اشتقاق معادلة التردد الطبيعي الذي يحدث عنده الرنين كالتالي:

يحدث الرنين عندما تتساوى المانعة الحثية Inductive Reactance (X_L) مع المانعة السعوية Capacitive Reactance (XC) . أي أن $X_L = X_C$ وبالتعويض عن قيم الممانعات تصبح العلاقة كالتالي:

$$\omega L = ١/(\omega C)$$

$$\therefore ٢\pi f_o L = ١/(٢\pi f_o C)$$

حيث تصبح علاقة التردد الطبيعي كالتالي:

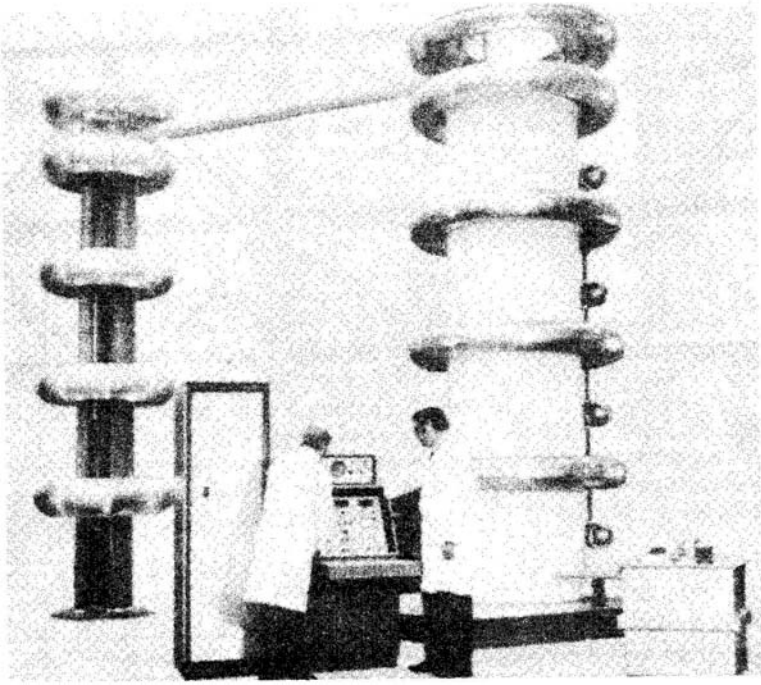
$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \qquad (١,١)$$

و من مميزات استخدام دوائر الرنين لتوليد الجهد العالي المتردد ما يلي:

- تحسين شكل موجة الجهد العالي المتردد وذلك بالتخلص من الرنين غير المرغوب فيه عند ترددات غير تردد المصدر وتوهين التوافيق المصاحبة لجهد المصدر والناتجة أيضاً عن دوائر المغنطة في محول الجهد العالي. وسينعكس ذلك إيجابياً على دقة قياس الجهد المتولد بهذه الطريقة خاصةً عند استعمال قنطرة شيرينق Schering Bridge لقياس التفريغات الجزئية Partial Discharges. كما تتراوح قيمة الجهد المتولد بهذه الطريقة ما بين ١٠ إلى ٢٠ ضعف القيمة العظمى للموجة الأساسية للجهد Fundamental Voltage Amplitude.

- إن القدرة المطلوبة من المصدر لتوليد جهد عالٍ متردد بهذه الطريقة أقل من السعة الظاهرية KVA في الدائرة الرئيسية. وتمثل حوالي ٥٪ من السعة الأساسية KVA عند معامل قدرة يساوي واحد.
- عندما يحدث انهيار كهربائي لعينة تحت الاختبار مثل الكبلات، فإن أطراف الدائرة الكهربائية لا يحدث لها قصر. ولكن بدلاً من ذلك تفقد الموالفة بين الممانعة الحثية والسعوية حيث يتلاشى الرنين عند التردد الطبيعي والذي هو في هذه الحالة تردد المصدر وبالتالي يهبط الجهد إلى القيمة المنخفضة له والتي كانت قبل الموالفة. مما يوفر حماية لدائرة الاختبار من الإجهادات التي تنشأ عند حدوث قصر وانخفاض الجهد بين أقطاب الاختبار إلى الصفر فجأة.
- حازت هذه الطريقة على موافقة جماعية من مصنعي الكبلات وأصبحت جزءاً من مواصفات الهيئات الدولية للمقاييس مثل IEC وغيرها، نظراً لأنها آمنة واقتصادية.
- يمكن استخدام هذه الطريقة أيضاً مع المحولات الموصلة على التوالي والمكونة من عدة وحدات لتوليد جهود عالية جداً.

أما بالنسبة لعيوبها فالعيب الأساسي هو أنه يجب أن يتحمل الملف المتغير المستخدم للموالفة كامل الجهد والتيار الذين يتولدان بعد الموالفة وحدوث الرنين. ولذلك يمكن الموالفة وتغيير قيمة الحث بمعايرة ثغرة هوائية في القلب الحديدي للملف وتغيير مسافتها ميكانيكياً. يوضح لنا الشكل (١,٦) صورة لمولد جهد عالٍ متردد باستخدام دائرة توالي للرنين.



شكل (١,٦) صورة لمولد جهد عالٍ متردد باستخدام دائرة رنين.

(١-٣) توليد الجهود العالية المستمرة

تستخدم الجهود العالية المستمرة في أنظمة نقل الطاقة HVDC بالإضافة لاستخدامها في معامل الجهد العالي لاختبار العناصر الكهربائية ذات السعة العالية مثل الكبلات والجلب العازلة Bushings والتي تطلب تيارات عالية إذا ما تم اختبارها عند جهود عالية مترددة، وكذلك اختبار سلوك العوازل الكهربائية المعرضة لإجهادات الجهد العالي ومدى تحملها لظروف التشغيل في الطبيعة. ويوجد طريقتان لتوليد الجهود العالية المستمرة هما: (١) باستخدام دوائر لتوحيد الجهود العالية المترددة Rectification. (٢) باستخدام المولدات الكهروستاتيكية Electrostatic Generators.

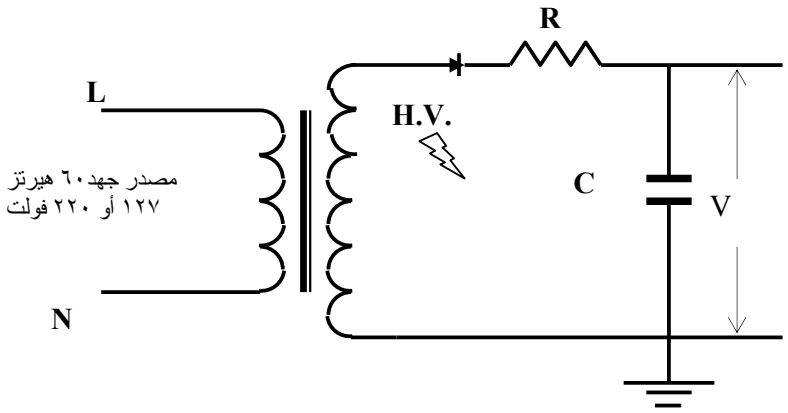
(١-٣-١) توليد الجهود العالية المستمرة باستخدام دوائر التوحيد

يمكن الحصول على جهد عالٍ مستمر بتحويل الجهد العالي المتردد وذلك عن طريق الموحدات السليكونية. وأبسط أنواع الموحدات المستخدمة هو الدايود Diode من النوع Si . وبما أن قيمة الجهد العكسي العظمى Peak Reverse Voltage لها محدود إلى أقل من ٢٥٠٠ فولت ، لذلك فإنه يمكن الحصول على موحدات لها جهد مقنن يصل إلى عدة مئات من الكيلوفولتات بتوصيل عدة دايودات Diodes بالتوالي ووضعها في إطار مملوء بمادة عازلة. وسنستخدم في الدوائر التالية رمز الدايود للتعبير عن الموحدات بغض النظر عن قيمتها. وتنقسم دوائر التوحيد من حيث العمل إلى ثلاثة أقسام هي: (أ) دوائر توحيد نصف الموجة. (ب) دوائر توحيد كامل الموجة. (ج) الدوائر المضاعفة للجهود. ويعتمد هذا التصنيف على عدد الموحدات وطريقة توصيلها في الدوائر المختلفة. وفيما يلي سنستعرض هذه الأنواع من الدوائر.

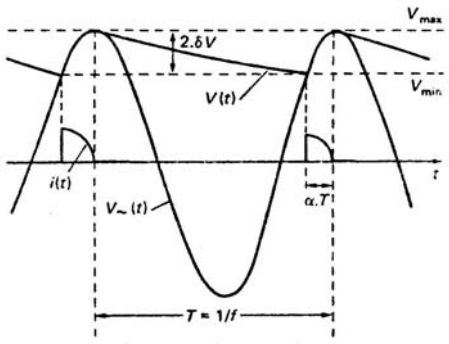
(أ) دائرة توحيد نصف الموجة Half-Wave Rectification

تستخدم دوائر توحيد نصف الموجة بصورة كبيرة خاصة في مجال الإلكترونيات لتوليد جهد مستمر وذلك بتوحيد الجهد المتردد. وتستخدم نفس المباديء لتوليد الجهود العالية المستمرة بتوحيد الجهود العالية المترددة والتي سبق شرحها سابقاً. الشكل (١,٧) يوضح لنا دائرة توحيد نصف موجة حيث يوجد موحد Rectifier موصل بمحول جهد عالٍ لتوليد جهد عالٍ متردد. ويوصل الموحد عندما تكون نصف الموجة للجهد المتردد موجبة مما يجعل المكثف، والذي هو عبارة عن مستودع لتخزين الجهد عبر الحمل، يشحن عند القيمة العظمى V_{max}. أما في النصف السالب من الجهد فيكون الموحد في الانحياز الخلفي ولا يعمل ويبقى الجهد عبر المكثف هو نفسه بينما يرتفع الجهد عبر طرف الجهد العالي للمحول إلى القيمة العظمى V_{max}. لذلك لابد أن يؤخذ في الاعتبار أن يتحمل الموحد عند تصميمه ضعف الجهد $2V_{max}$. وتوفر المقاومة R حماية للموحد من

زيادة التيار عند انهيار عينة الاختبار وحدوث قصر. الشكل (١,٨) يوضح لنا شكل موجة الجهد. وتستخدم هذه الطريقة بصورة كافية لتوليد جهد عالٍ مستمر يصل إلى ٣٠ كيلو فولت.



شكل (١,٧) توليد الجهد العالي المستمر باستخدام دائرة توحيد نصف الموجة.

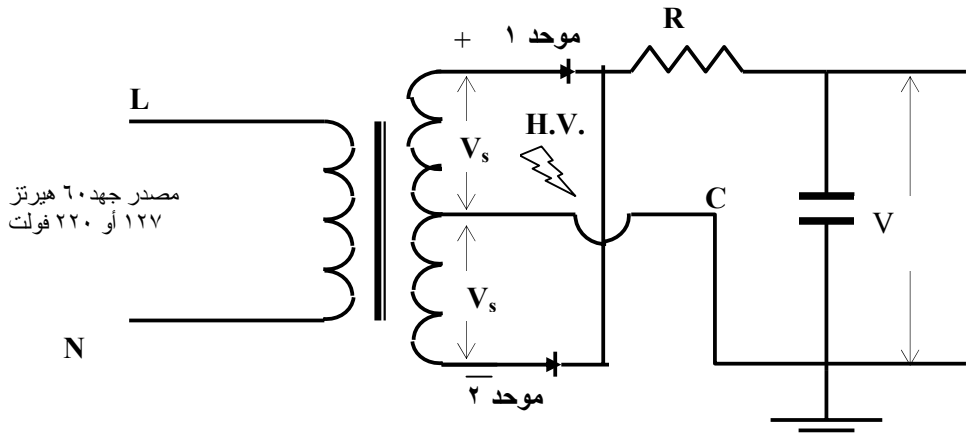


شكل (١,٨) توليد الجهد العالي المستمر باستخدام دائرة توحيد نصف الموجة.

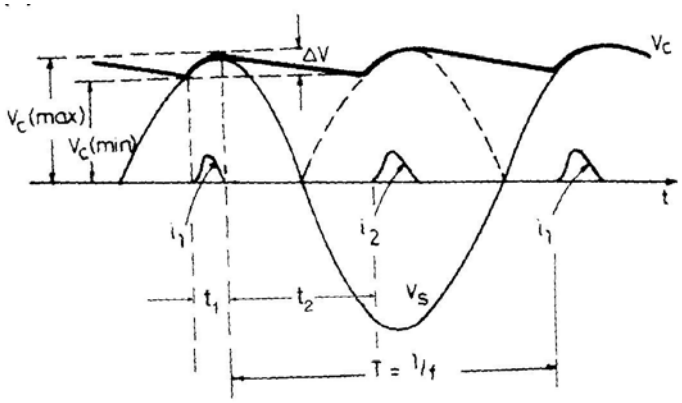
(ب)دائرة توحيد كامل الموجة Full-Wave Rectification

نظراً لأن نصف جهد المصدر المستخدم في هذه الحالة مهدر لذلك فيمكن استخدام دوائر توحيد كامل الموجة لاستغلال كامل الجهد لينتج لنا جهداً عالٍ مستمراً ذو تنظيم أفضل وتشوهات أقل. ويمكن توحيد كامل الموجة باستخدام طريقة المحول ذي التفريعة الوسطية (Mid-point transformer).

يوضح الشكل (١,٩) الدائرة المستخدمة لتوليد جهد عالٍ مستمر بتوصيل محول جهد عالٍ متردد ذو تفريعة وسطية بموحدين متصلين بمكثف. حيث يمكن شحن المكثف عند القيمة العظمى للجهد العالي المتردد V_{max} المتولد عبر طرفي المحول وذلك نظراً لتوصيل الموحد ١ عندما تكون نصف موجة الجهد المتردد موجبة وتوصيل الموحد ٢ عندما يكون نصف الموجة سالب. وكما نلاحظ من الدائرة بأن قطبية الجهد عبر المكثف تكون موجبة دائماً، وذلك نتيجة لطريقة توصيل الموحد ٢. وفي هذه الدائرة لابد من الأخذ في الاعتبار عند تصميم الموحدات أن تتحمل ضعف الجهد $2V_{max}$. الشكل (١,١٠) يبين موجة الجهد بعد توحيدها.



شكل (١,٩) توليد الجهد العالي المستمر باستخدام دائرة توحيد نصف الموجة.



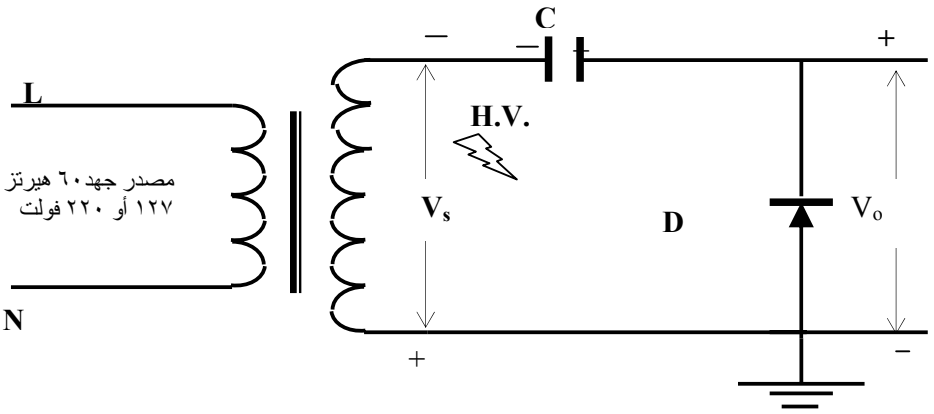
شكل (١,١٠) توليد الجهد العالي المستمر باستخدام دائرة توحيد نصف الموجة.

الدوائر المضاعفة للجهود Voltage Multiplying Circuits

سيتم فيما يلي استعراض أشهر أنواع الدوائر المضاعفة للجهد حيث يمكن الحصول على ضعف الجهد أو مضاعفاته بعمل تعديلات بسيطة للدوائر السابقة، بعد الأخذ في الاعتبار القيم المقننة للجهود التي تتحملها عناصر الدائرة، مثل الموحدات والمكثفات.

١. دائرة فيلارد Vilard

تعتبر دائرة فيلارد من أبسط الدوائر المضاعفة للجهد. والشكل (١,١١) يبين الدائرة وطريقة عملها. فعندما يكون جهد المصدر (الجهد العالي المتردد) في النصف الثاني من الموجة (سالب)، فإن الموحد D يقفل الدائرة وبذلك يشحن المكثف بشحنة مساوية للقيمة العظمى لجهد المصدر V_{max} . وفي النصف الموجب يصبح الجهد الخارج من الدائرة V_o يساوي ضعف الجهد أي $2V_{max}$ (جهد المصدر بالإضافة للجهد المخزون في المكثف C).

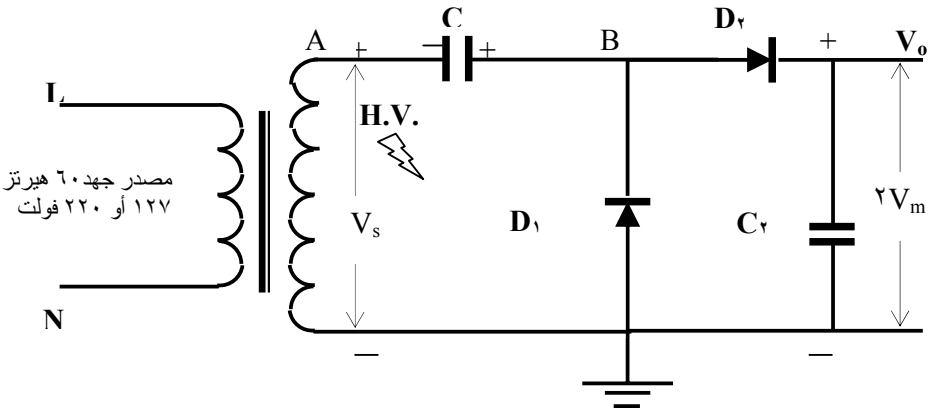


شكل (١,١١) توليد الجهد العالي المستمر باستخدام دائرة فيلارد المضاعفة للجهد.

٢. دائرة كوكروفت -والتون Cockroft- Walton

تعتبر دائرة كوكروفت -والتون تطوير لدائرة قراياناخر Greinacher الذي طور دائرة فيلارد السابقة بإضافة موحد ومكثف كما هو موضح بالشكل (١,١٢). وتتميز هذه الدائرة بإضافة عنصر التنعيم الذي هو عبارة عن المكثف $C_٢$ ، حيث يتعذر في الدائرة السابقة تنعيم الجهد الخارج. وتعمل الدائرة عندما يكون الجهد عند النقطة A سالبة، أي في النصف السالب من موجة جهد المصدر العالي المتردد حيث يوصل الموحد $D_١$ ويشحن المكثف $C_١$ بجهد مساو للقيمة العظمى لجهد المصدر V_{max}. وفي النصف الموجب من الموجة، أي عندما تكون النقطة A سالبة، فإن الجهد عند النقطة B سيصبح مساوياً لضعف القيمة العظمى للجهد أي $٢V_{max}$ (جهد المصدر بالإضافة للجهد المخزون في المكثف $C_١$) نظراً لأن الموحد $D_١$ سيصبح في الانحياز الخلفي، وسيصبح الموحد $D_٢$ في الانحياز الأمامي ويوصل ليشحن المكثف $C_٢$ بضعف القيمة العظمى لجهد المصدر $٢V_{max}$. ويعمل المكثف $C_٢$ كمستودع لتخزين الجهد عبر الحمل أثناء أنصاف الموجة التي يتم فيها شحن المكثف $C_١$. ويتم اختيار المكثف $C_٢$ بحيث تقلل تشوهات جهد الخرج إلى أقل من ٥٪.

وبالنسبة لتوليد الجهود المرتفعة جداً والتي تزيد عن ١ميغافولت فيمكن الحصول عليها بتوصيل عدة وحدات بالتوالي. ويستخدم محول جهد عالٍ متردد واحد لتغذية جميع المراحل، حيث يمكن الحصول على خرج بجهد عالٍ مستمر قدره ١٠٠كيلوفولت وتيار ١٠ملي أمبير من مرحلتين لتوحيد الجهد موصلة بمحول جهد عالٍ متردد خرجه ٢٥كيلوفولت وسعته ١كيلوفولت أمبير. بينما نحتاج إلى محول جهد عالٍ متردد خرجه يتراوح بين ٧٥ كيلوفولت إلى ١٠٠كيلوفولت لو استخدمنا دائرة توحيد نصف الموجة لإنتاج ذلك الجهد العالي المستمر.



شكل (١,١٢) توليد الجهد العالي المستمر باستخدام دائرة كوكروفت -والتون المضاعفة للجهد.

الشكل (١,١٣) يبين لنا دائرة كوكروفت - والتون المتعددة المراحل لتوليد أضعاف الجهد العالي المستمر الذي يمكن الحصول عليه من الدائرة السابقة. ونحصل على الخرج المطلوب بتوصيل عدة مراحل من الموحدات والمكثفات مع الدائرة الأساسية لكوكروفت - والتون والموضحة بالشكل (١,١٢).

عندما يكون الجهد عند النقطة A سالبة، أي في النصف السالب من موجة جهد المصدر العالي المتردد حيث يوصل الموحد D_1 ويشحن المكثف C_1 بجهد مساو للقيمة العظمى لجهد المصدر V_{max}. وفي النصف الموجب من الموجة، أي عندما تكون النقطة A سالبة، فإن الجهد عند النقطة B سيصبح مساوياً لضعف القيمة العظمى للجهد أي $2V_{max}$ (جهد المصدر بالإضافة للجهد المخزون في المكثف C) نظراً لأن الموحد D_1 سيصبح في الانحياز الخلفي، وسيصبح الموحد D_2 في الانحياز الأمامي ويوصل ليشحن المكثف C_2 بضعف القيمة العظمى لجهد المصدر $2V_{max}$. وتكون النقطة D عند جهد قدره $2V_{max}$ ويكون الجهد المطبق على المكثف C_2 عبر الموحد D_2 يتراوح بين $2V_{max}$ والصفر وبالتالي يشحن المكثف C_2 إلى جهد يصل إلى $2V_{max}$. يتراوح الجهد عند النقطة E مابين $2V_{max}$ إلى $4V_{max}$ ويشحن المكثف C_4 عبر الموحد D_4 بجهد تصل قيمته $2V_{max}$ ، حيث إنه مواز للمكثف C_2 عندما يكون جهد المصدر المتردد عند النقطة A سالب. وتكون النقطة F في هذه الحالة عند جهد قدره $4V_{max}$ (مجموع الجهد في C_2 و C_4). وحيث إن الدائرة تتابعية فإننا نجد إن المكثفات C_2 و C_6 C_4 و C_8 تشحن كل منها بجهد قدره $2V_{max}$. وبالتالي فإن النقاط D و F و G و L ترتفع إلى جهود قدرها $2V_{max}$ و $4V_{max}$ و $6V_{max}$ و $8V_{max}$ بالترتيب، وبمعنى آخر فإنه يمكن الحصول على جهد خرج يساوي $V_o=2nV_{max}$ قبل تحميل الدائرة، حيث n تساوي عدد المراحل، والشكل (١,١٤) يبين لنا شكل موجة الجهد. وتتيح لنا هذه الدائرة الحصول على جهود عالية

جداً. وفي هذه الدائرة لابد من اختيار مكثفات وموحدات تتحمل ضعف جهد المصدر العالي المتردد (خرج المحول) بغض النظر عن جهد الخرج للدائرة.

استطعنا الحصول على عدة أضعاف الجهد باستخدام هذه الدائرة حيث إن الجهد الخارج في حالة عدم تحميل الدائرة هو $V_o=2nV_{max}$. أما في حالة تحميل الدائرة بعينة اختبار مثلاً فإن الجهد لا يصبح على تلك الصورة ولا يمكن أن يصل إلى $2nV_{max}$ حيث يحدث هبوط في الجهد ΔV_o، كما ينشأ أيضاً تشوهات ripple في شكل الموجة δV، كما يتضح في الشكل (١,١٥). وتحسب هذه التشوهات من العلاقة التالية:

$$\delta V = \frac{1}{fC}.\frac{n(n+1)}{2} \qquad (١,٢)$$

بينما يحسب الهبوط في الجهد من العلاقة:

$$\Delta V_o = \frac{I}{fC}\left(\frac{2n^3}{3}+\frac{n^2}{2}-\frac{n}{6}\right) \qquad (١,٣)$$

ويصبح الجهد الخارج كالتالي:

$$V_{o\,max}=2nV_{max} - \Delta V_o \qquad (١,٤)$$

ويوضح لنا الشكل (١,١٦) صورة لمولد كوكروفت -والتون المتعدد المراحل. وكما نلاحظ بأن الجهد الخارج يتزايد مع عدد المراحل بشرط ألا تزيد عن عدد معين، ولكن عند عدد معين من المراحل يتناقص الجهد الخارج خطياً مع تيار الحمل I عند تردد ثابت. لذلك كان لابد من معرفة العدد الأمثل للمراحل n_{opt} والذي يكون الجهد الخارج أعلى ما يمكن، وبمفاضلة العلاقة السابقة بالنسبة لعدد المراحل نحصل على المعادلة التالية:

$$n = \sqrt{\frac{V_{max}fC}{I}} \qquad (١,٥)$$

مثال ١,١: مولد كوكروفت -والتون بعشرة مراحل (n=١٠) وسعة المكثف في جميع المراحل C=٠,١ μF وجهد المصدر V_{max}=١٠٠kV عند تردد يساوي f=٦٠Hz وإذا كان التيار المطلوب إنتاجه I=٥mA، احسب ما يلي **(أ)** تشوهات الجهد δV. **(ب)** الهبوط في الجهد ΔV_o **(ج)** الجهد الخارج $V_{o\,max}$.

الحل: (أ) بالتعويض في المعادلة (١,٥) لإيجاد تشوهات الجهد:

$$\delta V = \frac{I}{fC}.\frac{n(n+1)}{n} = \frac{5x10^{-3}}{60x0.1x10^{-6}}.\frac{10(10+1)}{2}$$

$$\therefore \delta V = 45833V \cong 45.83kV$$

وبالقسمة على $2nV_{max}$ والضرب في ١٠٠ نستطيع الحصول على نسبة التشوهات، حيث إن:

$$\%\delta V = \frac{\delta V}{2nV_{max}} x100$$

$$\%\delta V = \frac{45.83x10^{3}}{2x10x100x10^{3}} x100 = 2.29\%$$

(ب) بالتعويض في المعادلة (١,٣)

$$\Delta V_o = \frac{5x10^{-3}}{60x0.1x10^{-6}}\left(\frac{2x10^{3}}{3} + \frac{10^{2}}{2} - \frac{10}{6}\right)$$

$$= 595833V = 595.833kV$$

وتحسب النسبة بالقسمة على $2nV_{max}$ والضرب في ١٠٠ وبالتالي فإن

$$\%\Delta V_o = ٢٩,٨٪$$

(ج) الجهد الخارج يعطى بالمعادلة (١,٤)

$$V_{o\max} = 2x10x100x10^{3} - 595.833x10^{3}$$

$$= 1404167V \approx 1.4MV$$

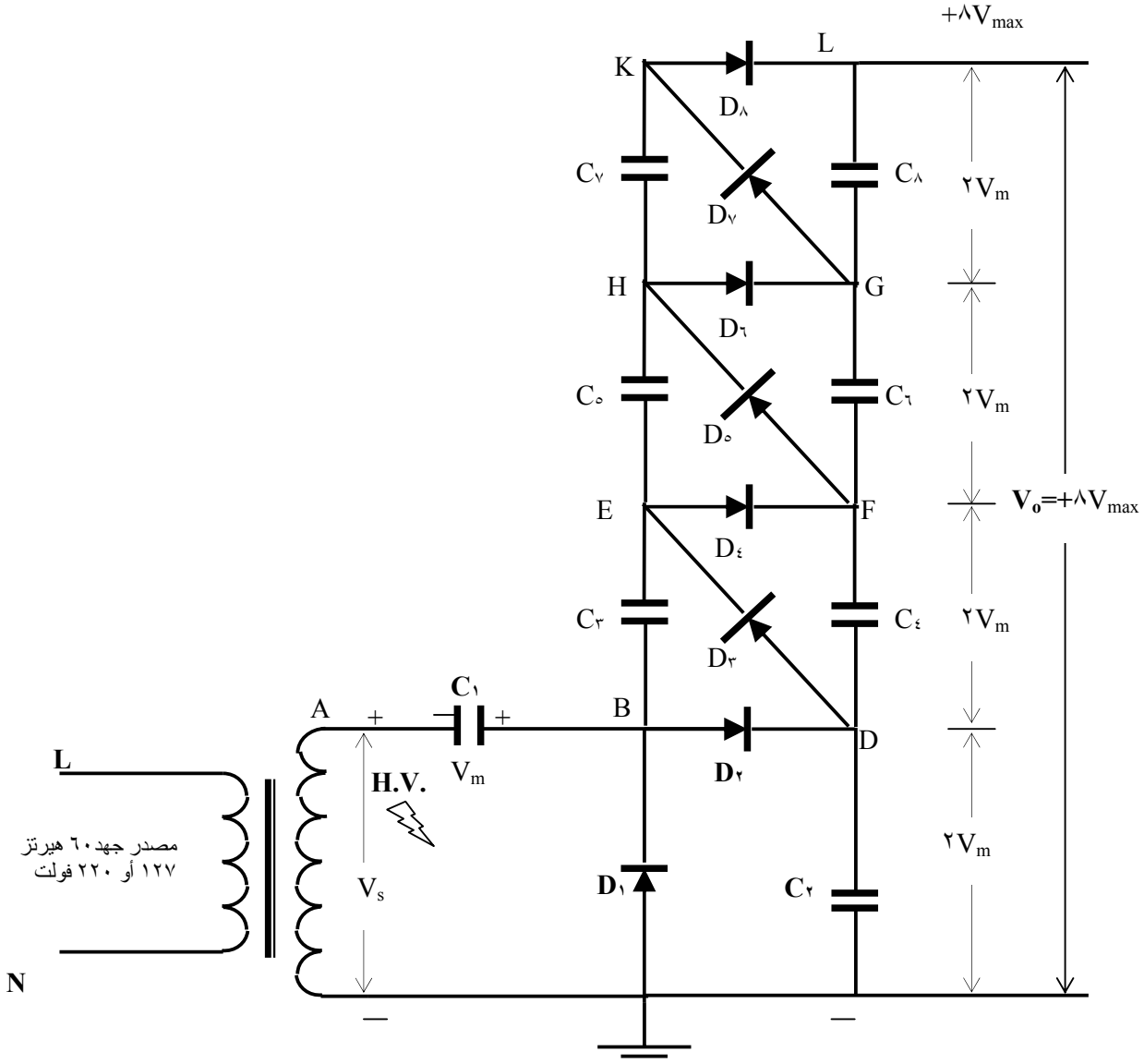
الجهد الخارج يساوي ١,٤ ميغافولت تقريباً، بينما يفترض أن يساوي ٢ميغافولت وذلك بسبب الهبوط في الجهد.

مثال ١,٢: احسب عدد المراحل المثالية n_{opt} لمولد كوكروفت -والتون متعدد المراحل إذا كان جهد المصدر V_{max}=١٠٠kV وتردده f=٦٠Hz وسعة المكثف C=٠,١μF وتيار الحمل I=٥mA.

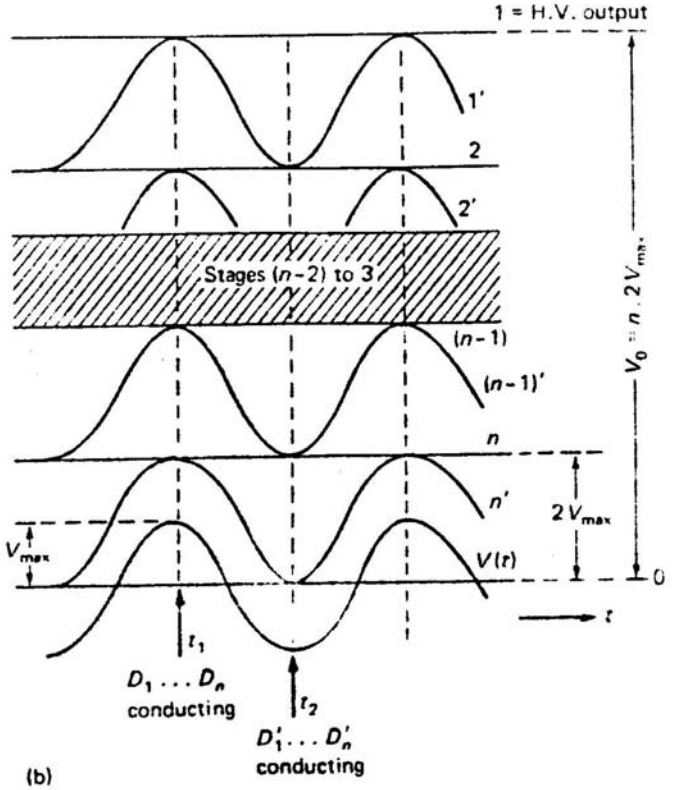
الحل: بالتعويض في المعادلة (١,٥)

$$n_{opt} = \sqrt{\frac{V_{max}fC}{I}} = \sqrt{\frac{100x10^{3}x60x0.1x10^{-6}}{5x10^{-3}}} = 11$$

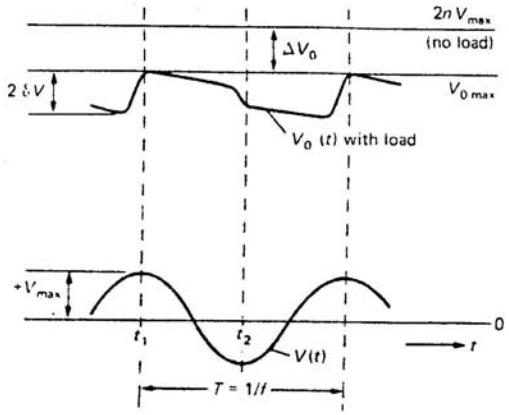
عدد المراحل المثالية n_{opt} يساوي ١١ مرحلة تقريباً.



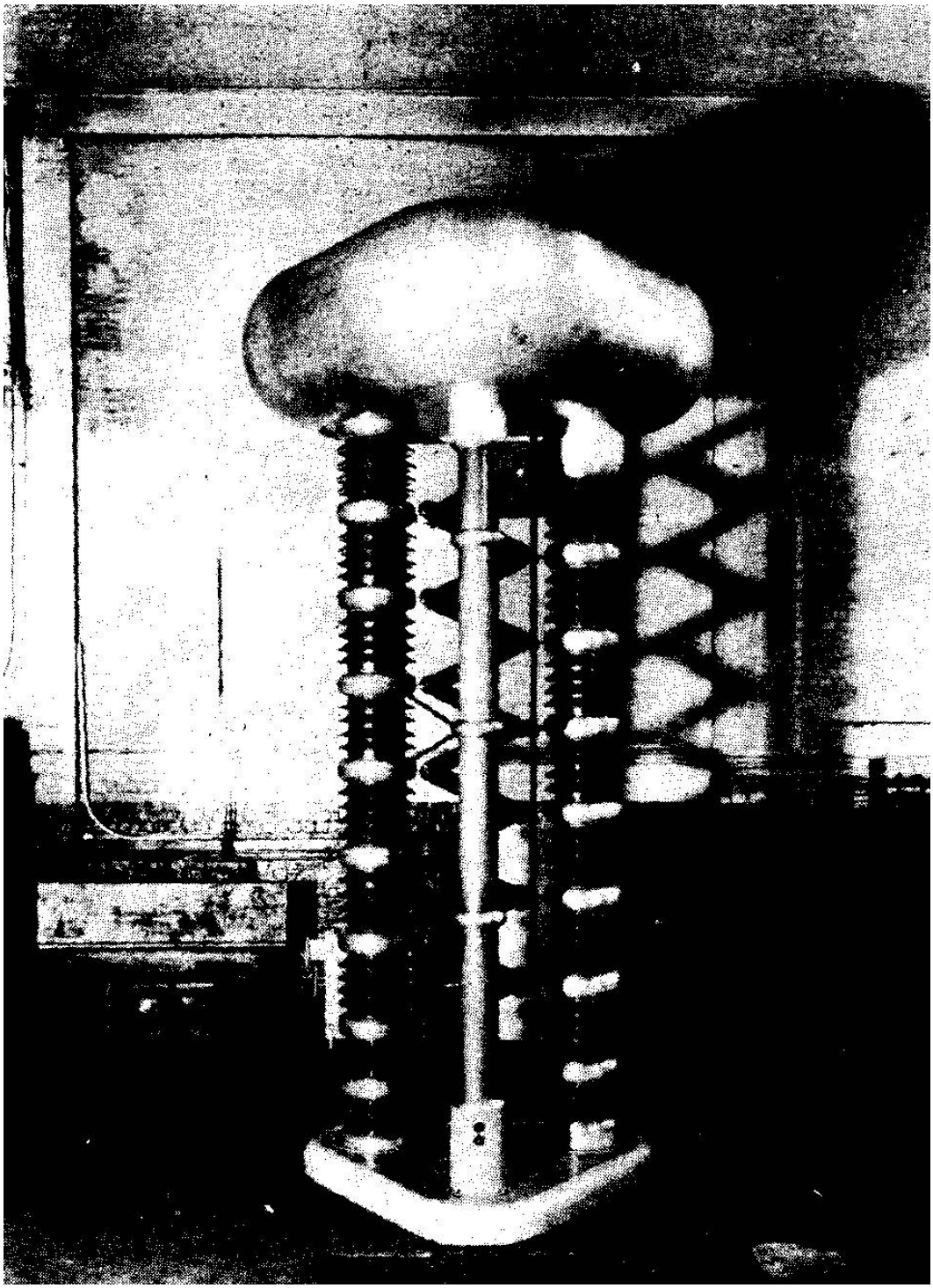
شكل (١,١٣) توليد الجهد العالي المستمر باستخدام دائرة كوكروفت -والتون المتعددة المراحل.



شكل (١,١٤) هبوط الجهد ΔV_o والتشوهات δV لدائرة كوكروفت -والتون متعددة المراحل قبل التحميل.



شكل (١,١٥) هبوط الجهد ΔV_o والتشوهات δV لدائرة كوكروفت -والتون المتعددة المراحل بعد التحميل.



شكل (١,١٦) صورة لدائرة كوكروفت -والتون المتعددة المراحل لتوليد الجهد العالي المستمر.

(٢-٣-١) المولدات الكهروستاتيكية Electrostatic Generators

يوجد العديد من المولدات الكهروستاتيكية لتوليد الجهود العالية المستمرة مثل: فان دي غراف Van de Graff وفيليسي Felici و سيمز Sames، حيث تعمل جميعها بنفس المبدأ لتوليد جهود عالية مستمرة تصل إلى ملايين الفولتات، ولكنها تختلف عن بعض من ناحية التصميم فقط. وفي هذا الفصل سنستعرض أكثرها استخداماً وهو مولد فان دي قراف Van de Graff (قام بتصميمه عام ١٩٣١ معتمداً على الأساسيات التي وضعها كلفن Kelvin عام ١٨٩٠). ويستخدم هذا المولد في العديد من معامل أبحاث الفيزياء النووية والتي تحتاج لجهود عالية مستمرة لتسارع الجسيمات لتكتسب طاقة عالية. حيث يستطيع أن ينتج في التسارع الواحد بروتونات لها طاقة تصل إلى ١٠ ميغا إلكترون فولت ١٠MeV. نستطيع أن نتبع عمل المولد من الشكل (١,١٧). يقوم المؤين بتوليد تفريغ هالي Corona - بتطبيق جهد عالٍ مستمر متغير يتراوح مابين ١٠ إلى ١٠٠ كيلوفولت على طرف حاد مدبب - والذي ينتج عنه شحنات يتم رشها على الحزام المعزول (عرضه تقريباً ٥٠ سم) الذي يتم تدويره بواسطة محرك (سرعته مابين ٩٠٠ إلى ١٨٠٠ متر/دقيقة). تجمع الشحنات على سطح إطار معدني معزول (إطار الجهد العالي) عن طريق أطراف معدنية ملامسة للحزام وموصلة بالإطار الداخلي للإطار المعدني. وجميع تلك الأجزاء من الجهاز محاطة بإطار معدني خارجي مؤرض، حيث يكّون مع إطار الجهد العالي مكثف له سعة C ، يقوم بخزن الشحنات المجمعة فيها. ويكون فرق الجهد بين إطار الجهد العالي والأرض في أي لحظة هو:

$$V = Q/C \qquad (١,٦)$$

حيث إن Q هي الشحنات المخزنة في المكثف. ويمكن حساب تيار الشحن المحمول عن طريق السير إلى المجمع من المعادلة التالية:

$$I_c = bv\sigma \quad Amp. \qquad (١,٧)$$

حيث إن υ هي السرعة (م/ث) و σ هي كثافة الشحنات على الحزام (كولومب/م^2) وتعطى من العلاقة $\sigma = E \times \varepsilon_r$ حيث هي شدة المجال الكهربائي التي يبدأ عندها تأين الوسط العازل وتساوي للهواء ٣٠ كيلوفولت/سم^2 و ε_r للهواء هي ٨,٨٥×١٠$^{-12}$ فاراد/م. ونجد أنه عند زمن معين t (s) تتجمع الشحنات Q=It على إطار الجهد العالي الذي يمكن حساب جهده من المعادلة: V=Q/C، نجد أن الجهد العالي على الإطار يمكن أن يصل إلى مالا نهاية في حالة عدم وجود مفاقيد. ولكن في الحقيقة نجد أن الجهد العالي يستقر عند قيمة معينة، حيث يتوازن تيار الشحن مع تيارات التفريغ والتي هي عبارة عن تيارات الحمل والمفاقيد الناتجة عن التفريغ الهالي والتيار المتسرب على سطح العازل، أي أن:

$$I_c = I_{Load} + I_{Leakage} + I_{Corona} \qquad (١,٨)$$

حيث إن:

$I_{Corona}=a(V-V_o)^2$ و a و V_o عبارة عن ثابت و V هو الجهد العالي المتولد.

بالتعويض في المعادلة (١,٦) تصبح كالتالي:

$$bv\sigma = I_{Load} + I_{Leakage} + a(V-V_o)^2 \qquad (١,٩)$$

ومنها نستطيع حساب الجهد العالي V المتولد ليصبح:

$$V = \sqrt{\frac{bv\sigma - I_{Load} - I_{Leakage}}{a}} + V_o \qquad (١,١٠)$$

مثال ١,٣: احسب تيار الشحن I_c لمولد كهروستاتيكي من نوع (فان دي قراف) عرض حزامه b يساوي ١م ويدور الحزام بسرعة υ قدرها ٢٠م/ث والوسط العازل هو الهواء والذي سماحيته ε_r تساوي $٨,٨٥x١٠^{-١٢}$ فاراد/م و شدة المجال الكهربائي E التي يبدأ عندها تؤين الوسط العازل تساوي ٣٠ كيلوفولت/سم^2.

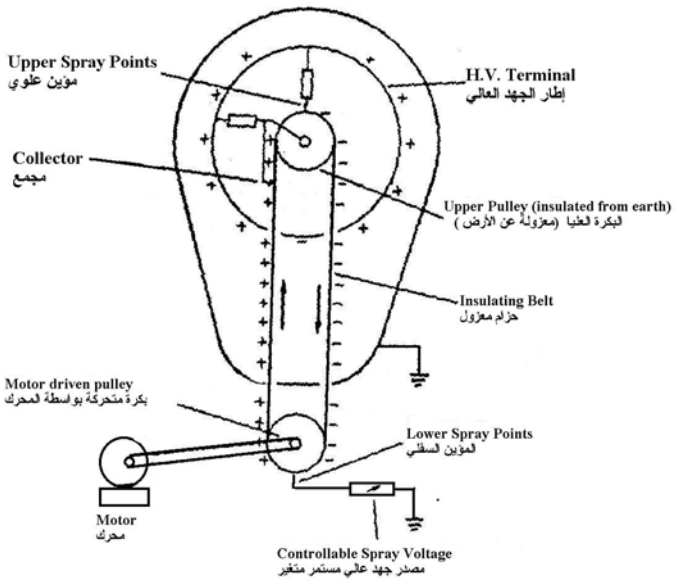
الحل: نحسب أولاً كثافة الشحنات بالتعويض في المعادلة

$$\sigma = E \times \varepsilon_r = ٣٠ \times ١٠^3 x ٨,٨٥ x ١٠^{-١٢} = ٢,٦٦ x ١٠^{-٧} \text{ coulomb/m}^2$$

ثم نعوض عنها في المعادلة:

$$I_c = bv\sigma = ١x٢٠x٢,٦٦x١٠^{-٧} = ٥,٣٢ \times ١٠^{-٦} \text{ Amp.}$$

$$= ٥,٣٢ \ \mu A$$



شكل (١,١٧) صورة لدائرة كوكر وفت -والتون المتعددة المراحل لتوليد الجهد العالي المستمر.

(١-٤) توليد الجهود العالية النبضية (الدفعية) Impulse Voltages

(١-٤-١) تعريف الجهود العالية النبضية وخواصها

تتعرض خطوط نقل الطاقة والأجهزة المصاحبة لها لإجهادات متكررة نتيجةً للجهد العابر Transient Voltage الناشىء عن الصواعق أو عند وصل أو فصل دائرة من دوائر النقل بواسطة القواطع الكهربائية. وتكون هذه الجهود الزائدة Overvoltages ، والتي هي عبارة عن جهود مسافرة Travelling Waves نتيجة للصعقة، على شكل موجة نبضية Impulse Voltage ذات مقدمة منحدرة. ويكون الجهد النبضي عبارةً عن جهد أحادي الاتجاه يرتفع بصورة سريعة، أثناء مقدمة الموجة Wave Front، إلى القيمة العظمى V_{max} خلال زمن يسمى زمن المقدمة Front Time (t_f)، وتتناقص بعدها تدريجياً إلى الصفر أثناء مؤخرة أو ذيل الموجة Wave Tail، خلال زمن يسمى زمن المؤخرة أو الذيل Tail Time (t_t).

ويكون الفرق عادةً بين الموجة النبضية الناتجة عن الصواعق Lightning Impulse Voltage وتلك الناتجة عن توصيل وفصل الدوائر الكهربائية Switching Impulse Voltage هو زمن مقدمة وذيل الموجة. وتختلف أشكال الموجات النبضية بصورة كبيرة من وقت لآخر، حسب معاوقة نظام الطاقة الكهربائية وحالات التشغيل، كما تتغير القيمة العظمى للجهد حسب جهد الشبكة.

لذلك كان لابد من تمثيل موجة الجهد النبضي بصورة بسيطة وقياسية. وقد قامت الهيئة الدولية الكهروتقنية International Electrotechnical Commission (IEC) بوضع مواصفة قياسية تحدد شكل الموجة النبضية، ويوضح لنا الشكل (١,١٨) الشكل القياسي لموجة الجهد النبضي. كما قامت بتحديد الفرق بين الموجة النبضية الناتجة عن الصواعق وتلك الناتجة عن الوصل والفصل في دوائر الشبكة الكهربائية، حيث وصفت موجة الصواعق بالرمز ١,٢\٥٠ (زمن المقدمة t_f=١,٢μs وزمن الذيل t_t=٥٠μs) وموجة الوصل والفصل بالرمز ٢٥٠\٢٥٠٠ (زمن المقدمة t_f=٢٥٠μs وزمن الذيل t_t=٢٥٠٠μs).

ويبين الشكل (١,١٩) كيفية تحديد زمن مقدمة الموجة وزمن ذيل الموجة على أي شكل أو صورة للجهد النبضي الناتج عن الصواعق. كما يبين الشكل (١,٢٠) كيفية تحديد زمن المقدمة والذيل على الموجة النبضية الناتجة عن الوصل والفصل.

(٢-٤-١) توليد الجهود العالية النبضية باستخدام مولد مفرد

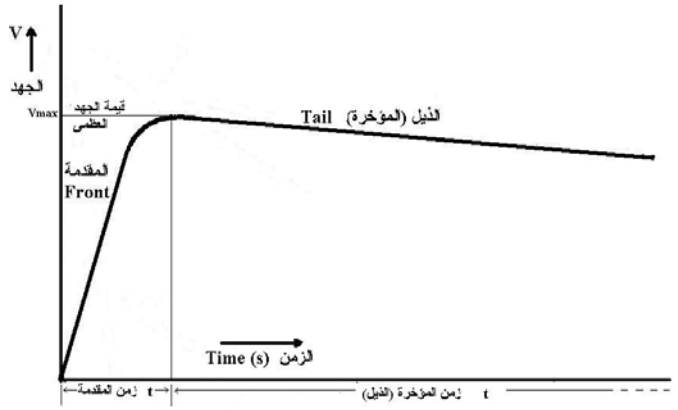
وحيث أصبح من الضروري إنتاج هذا النوع من الجهود النبضية، الخاصة بالصواعق والوصل والفصل، في معامل الجهد العالي الخاصة بمصانع الأجهزة والعوازل التي تعمل عند جهود عالية وكذلك معامل الأبحاث، للتأكد من مدى تحمل تلك الأجهزة والعوازل للإجهادات الناتجة عن الجهود النبضية. لذلك فقد تم تصميم دائرة مفردة لتوليد الجهد النبضي، انظر الشكل (١,٢١).

فعند تطبيق جهد عالٍ مستمر على أطراف الدائرة (عن طريق إحدى دوائر توليد الجهد العالي المستمر السابقة) فإن المكثف C_1 يشحن إلى القيمة V ، والتي تكون كافية لانهيار ثغرة الشرارة الكروية Spherical Spark Gap (وتسمى أحياناً الثغرات الهوائية Air Gap) والمصنوعة عادةً من النحاس الأحمر (والتي تنهار بالنسبة للهواء عندما تزيد شدة المجال الكهربائي E عن ٣٠ كيلوفولت/سم. ولذلك فإن الثغرة تعمل كمفتاح يوصل عند انهيارها مما يجعل الجهد يظهر فجأةً عبر المكثف C_2 والذي يمكن أن يكون عينة اختبار (مثل الكيبلات والجلب العازلة وعوازل الجهد العالي المختلفة).

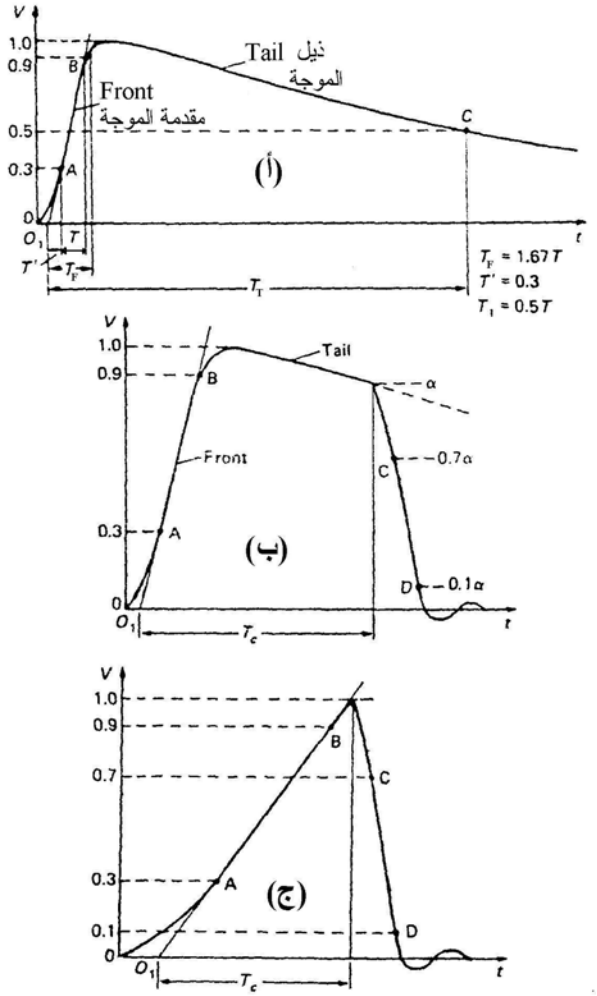
ويمكن التحكم في زمن مقدمة وذيل الموجة النبضية بتغيير قيم عناصر الدائرة أو عن طريق تغيير عناصر دائرة مولد دفعي أو تموّري Surge Generator - يحاكي المولد النبضي الحقيقي، بحيث يمكن مشاهدة الموجة على أوسيليسكوب وقياس زمن المقدمة والذيل ثم ضبط قيم عناصر الدائرة على المولد الحقيقي. وبعد تحليل دائر المولد النبضي المفرد أعلاه عن طريق حل المعادلات التفاضلية الناتجة (يمكن مطالعة المراجع لمزيد من التفصيل)، نجد أن الجهد الخارج يمثل بالعلاقة التالية:

$$(١,١١)\ v(t) = V\left[\exp\left(-\frac{t}{R_2C_1}\right) - \exp\left(-\frac{t}{R_1C_2}\right)\right]$$

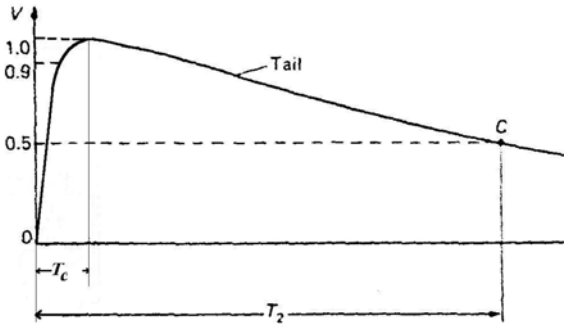
وبرسم المنحنى الذي يمثل المعادلة أعلاه والتي هي عبارة عن الفرق بين منحنيين تناقصّيين أسيّين، ينتج شكل موجة الجهد النبضي القياسية كما في الشكل (١,٢٢)، والتي سبق شرحها. ويتضح من المنحنى بأن المقاومة $R_١$ والمكثف $C_٢$ تتحكمان في شكل مقدمة الموجة حيث يمثل $R_١C_٢$ الثابت الزمني لشحن المكثف $C_٢$، فكلما كان الثابت الزمني Time Constant أصغر كلما وصلت الموجة في مقدمتها للقيمة العظمى أسرع وبالتالي فإن زمن مقدمة الموجة سيكون أقصر. أما بالنسبة لشكل ذيل الموجة فإنه يحدد بالمقاومة $R_٢$ والمكثف $C_١$، حيث يحدد الثابت الزمني $R_٢C_١$ ذيل الموجة وزمن تناقصها.



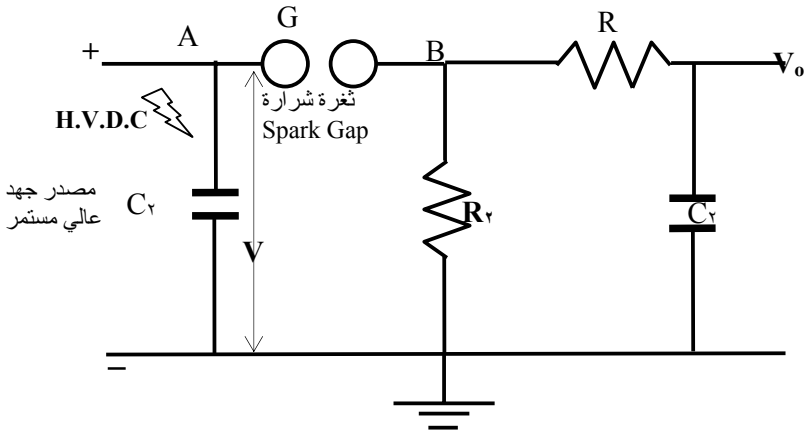
شكل (١,١٨) الشكل القياسي للموجة النبضية.



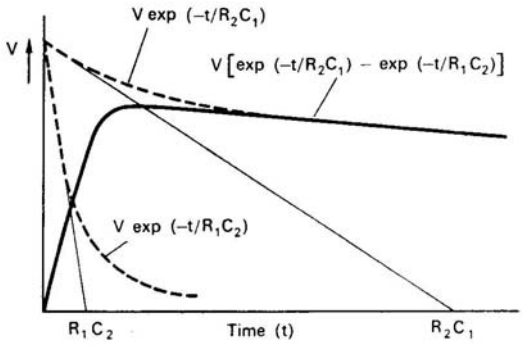
شكل (١,١٩) الشكل القياسي للموجة النبضية الناتجة عن الصواعق. (أ) الموجة الكاملة. (ب) موجة مقطوعة عند الذيل. (ج) موجة مقطوعة عند المقدمة.



شكل (١,٢٠) الشكل القياسي للموجة النبضية الناتجة عن الفصل والوصل.



شكل (١,٢١) مولد نبضي مفرد.



شكل (١,٢٢) الشكل القياسي للموجة النبضية الناتجة عن الدائرة المفردة.

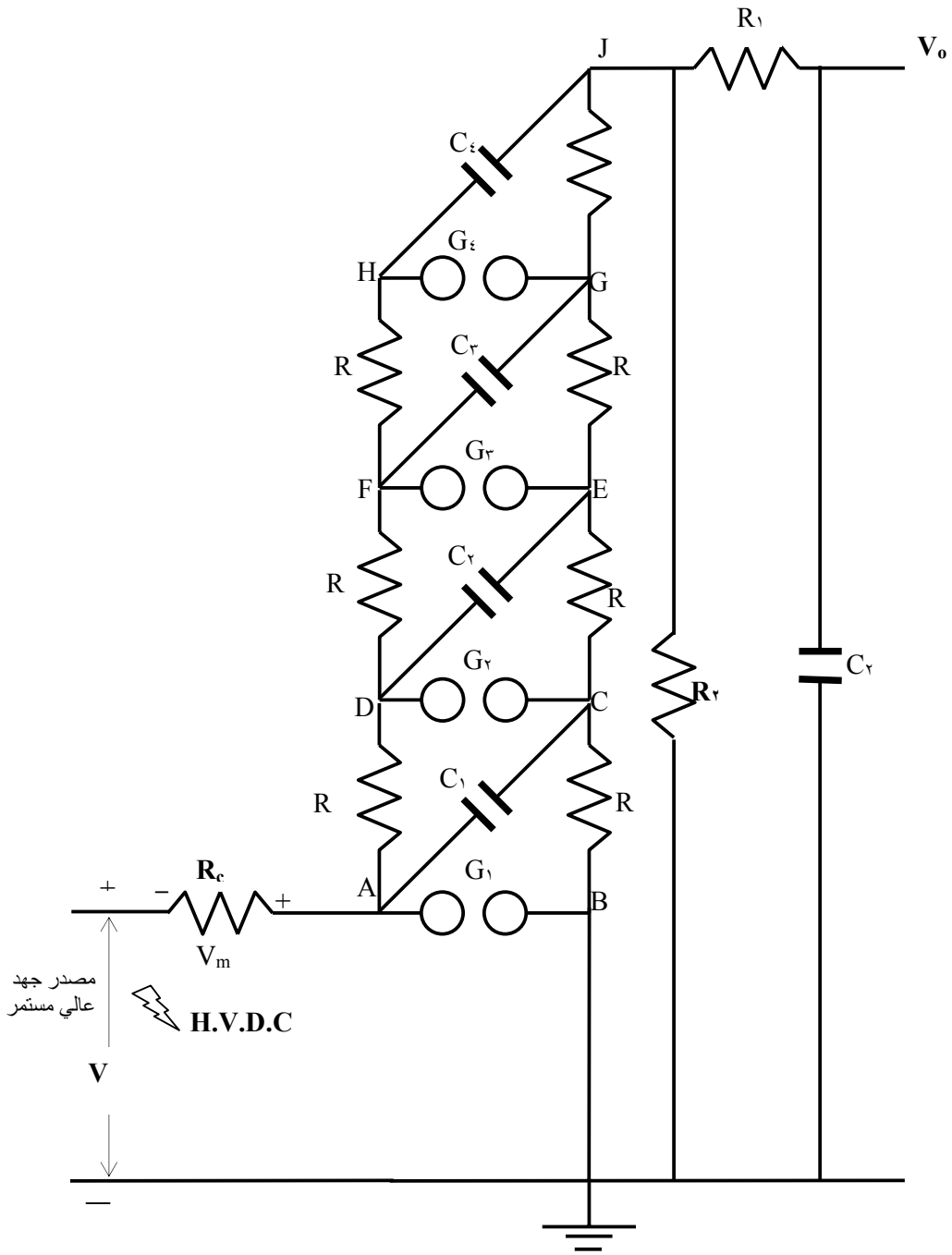
(٣-٤-١) توليد الجهود العالية النبضية باستخدام عدة مراحل متوالية من نوع ماركس Marx

وحيث إن جهد موجة الصواعق والفصل والوصل قد يتجاوز المليون فولت خاصة في الشبكات التي تعمل عند جهود فائقة، لذلك نجد أن تصميم مولد مفرد لإنتاج هذا الجهد المرتفع غير عملي. فالقيمة العظمى للجهد محدودة بجهد الشحن المستمر للدائرة كما أن تصميم مكثف جهد فائق إضافي يكون كبير الحجم وغالي الثمن. لذلك فإنه من الأنسب أن نولد جهداً عالياً نبضياً بتوصيل المولد المفرد بعدة وحدات من عناصر الدائرة بالتوالي. ولذلك فقد توصل ماركس Marx عام ١٩٢٤م إلى تصميم مولد متعدد المراحل يعطى جهداً مرتفعاً وفائقاً وفي نفس الوقت نستطيع أن نتحكم في شكل الموجة (زمن مقدمة الموجة وذيلها). حيث كانت فكرته الذكية في تصميم الدائرة باستخدام ثغرات الشرارة الكروية

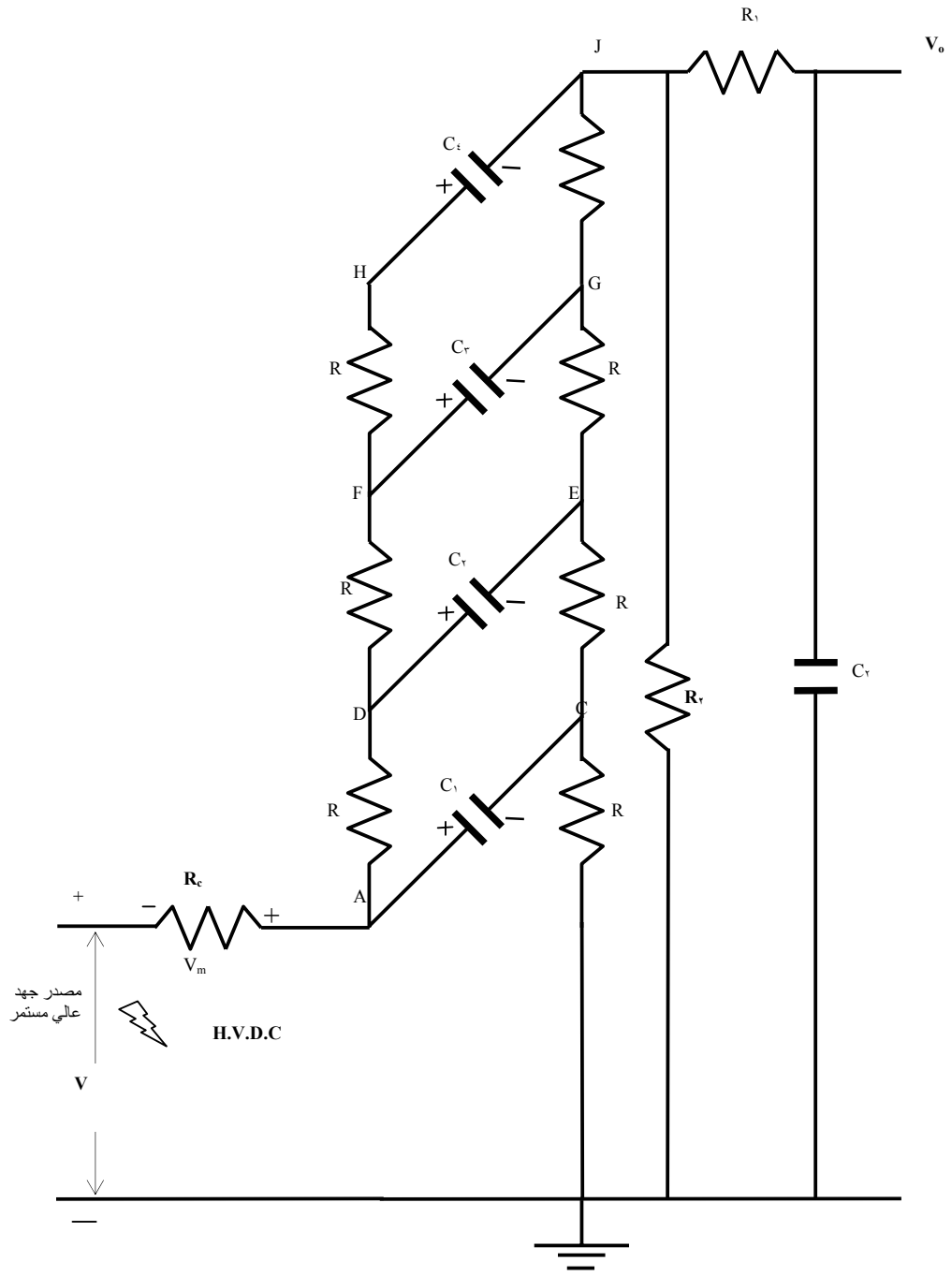
Spherical Spark Gaps بحيث تعمل كمفاتيح تمكن المكثفات المتعددة أن تشحن بالتوازي وتفرغ بالتوالي عند انهيار الثغرات.

الشكل (١,٢٣) يبين لنا مولداً مكوناً أربعة مراحل موصلاً بدائرة شحن عبارة عن مصدر جهد عالٍ مستمر (انظر الفصل السابق). ولتبسيط الدائرة لغرض تتبع عملها وتحليلها فإنه يمكن اعتبارها دائرة مركبة من دائرة شحن كما في الشكل (١,٢٤(أ)) ودائرة تفريغ كما في الشكل (١,٢٤(ب)). يتم تطبيق جهد عالٍ مستمر عن طريق دائرة الشحن وبالتالي فإن المكثفات من C_1 إلى C_4 يتم شحنها عبر المقاومة R والتي تتراوح قيمتها من ١٠ إلى ١٠٠ كيلوأوم. وعندما يتم شحن المكثفات بالكامل بجهد قدره V حسب القطبية الموضحة في الشكل (١,٢٤(أ)) فإن تيار الشحن يتوقف وبالتالي فإن اللوح الأيمن من المكثف ومقاومة الشحن وكرات الشرارة تكون عند جهد مساو لجهد الأرض. وبالمثل فإن لوح المكثف الأيسر والعناصر اليسرى الواضحة في الشكل (١,٢٤(أ)) تكون عند جهد مساو لجهد المصدر V. ويبدأ تفريغ المولد عند انهيار أول ثغرة شرارة (يحصل قوس كهربائي بين أطرافها عند زيادة شدة المجال الكهربائي E فيها عن ٣٠كيلوفولت/سم عندما يكون الوسط العازل هواء) والتي يمكن أن تهيأ بتعريضها لمصباح أشعة فوق بنفسجية UV أو عن طريق مقلاد Trigatron (يمكن معرفة تفاصيل ذلك بالرجوع لأحد المراجع في الخلف). ثم يتوالى بعد ذلك انهيار الثغرات الباقية تباعاً وتصبح المكثفات موصلة على التوالي وتفرغ جهدها عبر المكثف C_2 والذي هو مكثف الحمل للمولد، (انظر دائرة التفريغ في الشكل (١,٢٤(ب)) والتي اعتبرت فيها مقاومات الشحن دائرة مفتوحة نظراً لقيمها الكبيرة) .

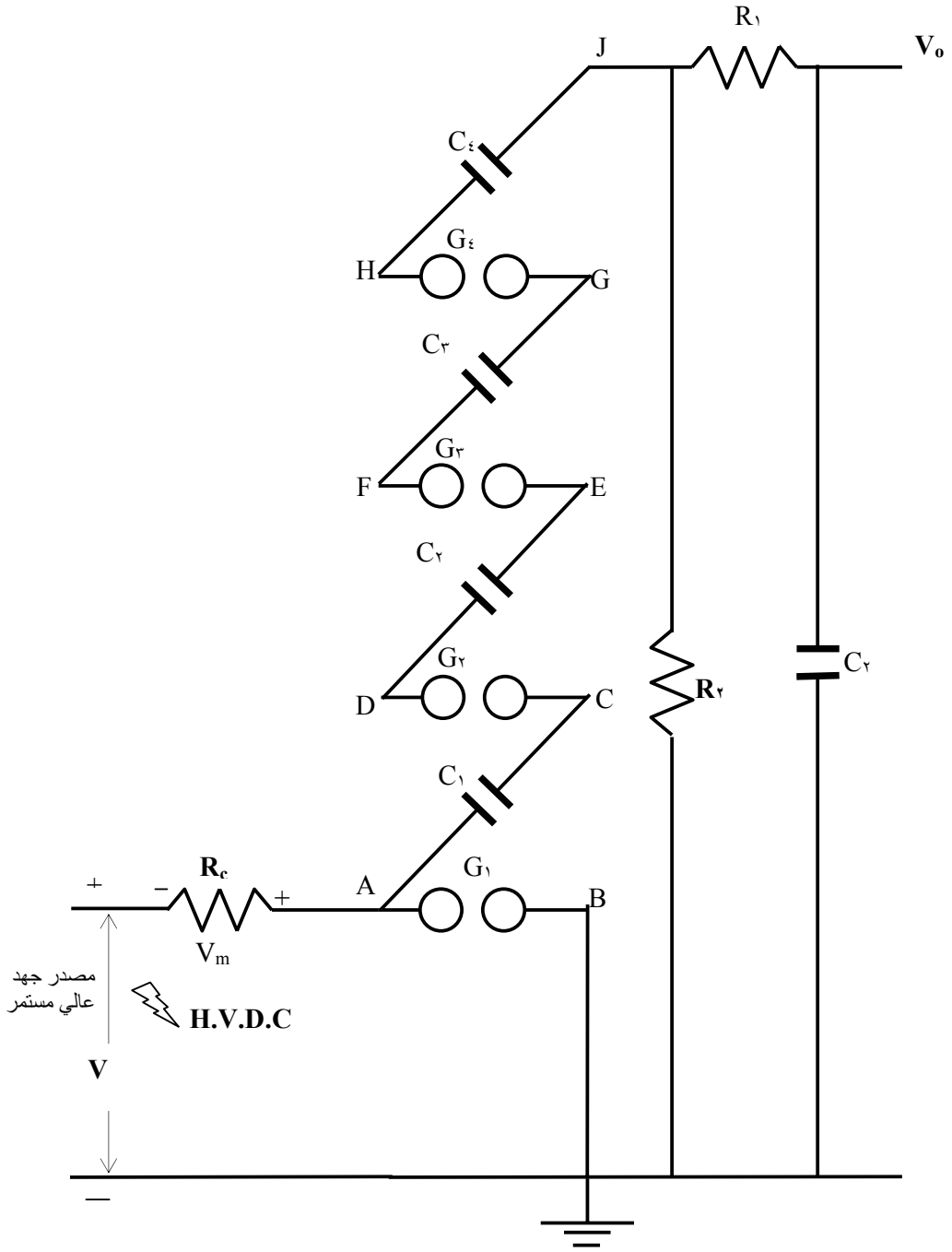
ولذلك فإن الجهد الخارج يساوي مجموع الجهود المخزنة في المكثفات أو حاصل ضرب الجهد في عدد المراحل، أي أن $V_o=n\%V$ ، حيث إن n هو عدد مراحل المولد. وتتحكم المقاومة R_1 و المكثف C_2 في مقدمة الموجة النبضية بينما تتحكم المقامة R_2 والمكثفات الموصلة على التوالي (تمثل C_1) في ذيل الموجة. ويمكن تبسيط ذلك برسم دائرة مكافئة كما في الشكل (١,٢٥) والتي تشبه دائرة المولد النبضي المفرد الذي سبق توضيحه في الشكل (١,٢١). يبين الشكل (١,٢٦)صورة حقيقية لمولد ماركس (أنتجته شركة هيفلي بسويسرا).



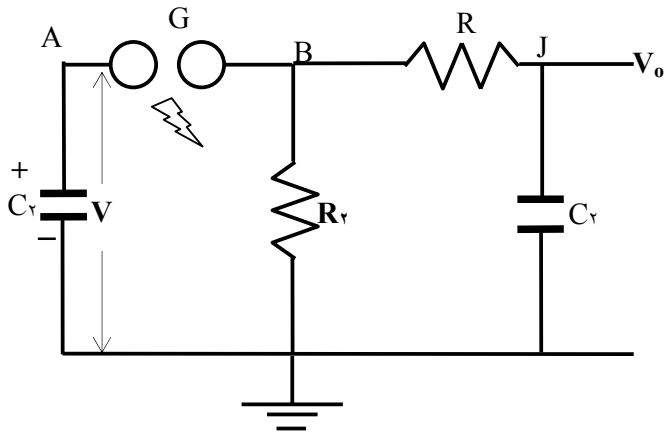
شكل (١,٢٣) مولد ماركس Marx النبضي المتعدد المراحل.



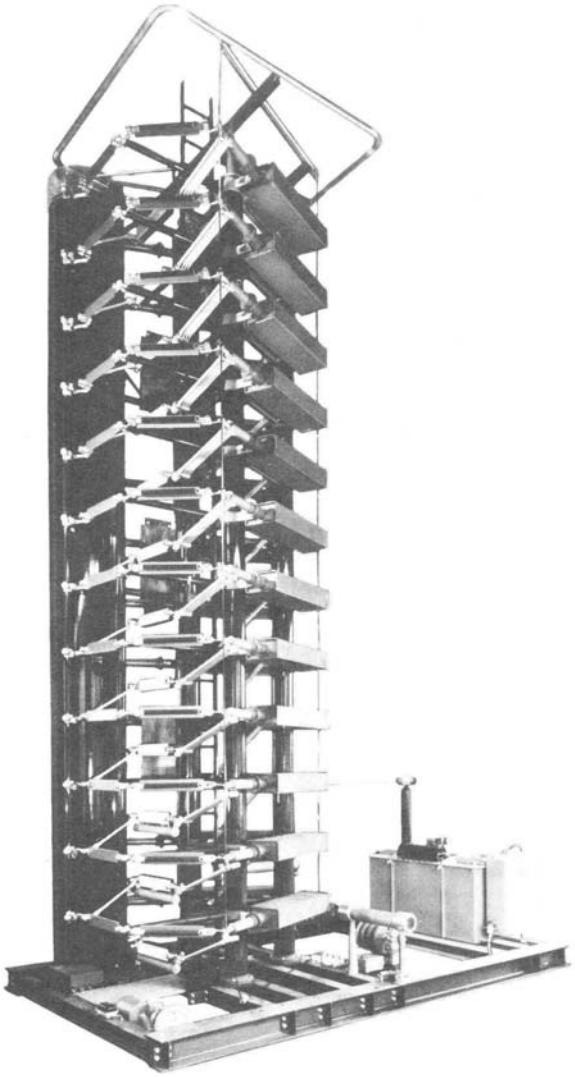
شكل (١,٢٤) أ - دائرة الشحن لمولد ماركس Marx النبضي المتعدد المراحل.



شكل (١,٢٤) ب - دائرة التفريغ لمولد ماركس Marx النبضي المتعدد المراحل.



شكل (١,٢٥) دائرة مكافئة ممثلة لمولد ماركس Marx النبضي المتعدد المراحل.



شكل (١,٢٥) صورة لمولد ماركس Marx النبضي المتعدد المراحل.

أسئلة

١. اشرح الهدف من توليد جهود عالية داخل مختبرات الجهد العالي؟

٢. اشرح مع الرسم كيفية توليد الجهد العالي المتردد باستخدام المحولات المفردة؟

٣. اشرح مع الرسم كيفية توليد الجهود العالية المترددة باستخدام عدة وحدات موصلة على التوالي؟ واشرح مزايا وعيوب الطريقتين الأفقية والرأسية؟

٤. ما الفرق بين دوائر توحيد الموجات والدوائر المضاعفة للجهد بالنسبة لتوليد الجهد العالي المستمر؟

٥. اشرح مع الرسم دائرة كوكروفت والتون المفردة؟ وبين كيف يمكن جعلها دائرة متعددة المراحل؟

٦. مولد كوكروفت -والتون بتسعة مراحل (n=٩) وسعة المكثف في جميع المراحل C=٠,٣ μF وجهد المصدر V_{max}=١٥٠kV عند تردد يساوي f=٦٠Hz وإذا كان التيار المطلوب إنتاجه I=٧mA، احسب ما يلي **(ا)** تشوهات الجهد δV. **(ب)** الهبوط في الجهد ΔV_o **(ج)** الجهد الخارج $V_{o\,max}$.

٧. احسب عدد المراحل المثالية n_{opt} لمولد كوكروفت -والتون متعدد المراحل والذي عناصره لها القيم المذكورة في السؤال السابق ٦ .

٨. اشرح مع الرسم كيفية توليد الجهود العالية المستمرة باستخدام المولد الكهروستاتيكي؟

٩. احسب تيار الشحن I_c لمولد كهروستاتيكي من نوع (فان دي قراف) عرض حزامه b يساوي ١,٥م ويدور الحزام بسرعة υ قدرها ١٨م/ث والوسط العازل هو الهواء والذي سماحيته ε_r تساوي ٨,٨٥X١٠$^{-١٢}$ فاراد/م و شدة المجال الكهربائي E التي يبدأ عندها تؤين الوسط العازل تساوي ٣٠ كيلوفولت/سم^{٢}.

١٠. لماذا يستخدم المولد النبضي؟

١١. اشرح مع الرسم كيفية توليد موجة نبضية باستخدام مولد مفرد؟ وارسم الموجة النبضية المتولدة؟

١٢. كيف يمكن تحديد زمن مقدمة الموجة وزمن ذيل الموجة على موجة نبضية حسب مواصفات الهيئة الدولية الكهروتقنية IEC.

١٣. حدد زمن مقدمة الموجة وذيل الموجة بالنسبة للموجات التي تحاكي الصواعق وكذلك بالنسبة للتي تحاكي موجات الوصل والفصل في دوائر الشبكة الكهربائية؟

١٤. اشرح مع الاسم كيفية توليد الجهود العالية النبضية باستخدام مولد ماركس؟ وما هي الفكرة الذكية التي توصل لها ماركس في تصميمه لتوليد جهود فائقة؟

تقنية الجهد العالي

طرق قياس الجهد العالي

جميع الحقوق محفوظة للمؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني

(١-٢) مقدمة

من الضروري قياس الجهد العالي بدقة في اختبارات الصناعة (اختبار الأجهزة والعازلات المنتجة داخل المصانع) وكذلك في معامل الأبحاث والتأكد بدقة من سلامة الأشخاص والمعدات المستعملة. لابد كذلك من حماية الفنيين المتعاملين مع معدات الجهد العالي وأجهزة القياس من الجهود الزائدة التي يمكن أن تحدث وكذلك من الجهود المتولدة خلال مكثفات التسرب، ولذلك فإن موقع ووضعية الأجهزة من الأمور الهامة جدا التي يجب أن ينتبه إليها المهندسون والفنيون. ويمثل التداخل الكهرومغناطيسي مشكلة هامة جدا في قياس الجهد الدفعي للصواعق ولابد من تجنبه أو على الأقل التقليل من تأثيره على القياسات وتقليل أخطاء القياس. وهناك العديد من الطرق والأجهزة المستعملة في قياس الجهد العالي ويمكن لنا تصنيفها كما في جدول (١-٢).

جدول (١-٢) تقنيات قياس الجهد العالي

نوع الجهد المراد قياسه	تقنية أو طريقة القياس
(أ) الجهود المستمرة	١ -مقاومة توالي مع ميكرو أميتر
	٢ -مجزئ جهد باستخدام المقاومات
	٣ -ثغرات الشرارة
(ب) الجهود المترددة ذات التردد القوي	١ -معاوقة توالي مع أميتر
	٢ -مجزءات الجهد (باستخدام المقاومات أو المكثفات)
	٣ -محولات الجهد (الكهرومغناطيسية أو السعوية)
	٤ - فولتميتر كهروستاتيكي
	٥ -ثغرات الشرارة
(ت) الجهود عالية التردد والجهود الدفعية والجهود الأخرى سريعة التغيير	١ -مجزءات الجهد مع راسم ذبذبات (oscilloscope)
	٢ -فولتميتر القيمة العظمى peak voltmeter
	٣ -ثغرات الشرارة

(٢-٢) قياس الجهد العالي المستمر

يتم قياس الجهد العالي المستمر عادة كما في قياس الجهود المنخفضة بتمديد مدى جهاز القياس وذلك باستخدام مقاومة عالية على التوالي للحد من التيار المار في جهاز القياس ويتراوح التيار عادة من ١ إلى ١٠

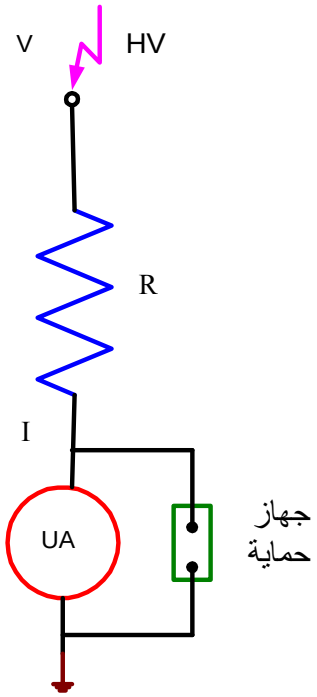
ميكروأمبير لمدى القياس الكامل للجهاز. وتحدث مشاكل عند قياس الجهود فوق العالية التي تزيد عن ١,٠٠٠ كيلوفولت وتتمثل في الفقد العالي في القدرة الكهربائية وتيارات التسريب ومحدودية الإجهاد الكهربائي على وحدة الطول وتغير المقاومة بتغير درجة الحرارة.....وهكذا. لذلك فإن استخدام مجزئات الجهد باستخدام المقاومات مع الفولتميتر الكهروستاتيكي يفضل أحيانا عندما نريد الحصول على دقة أكثر للقياسات. وتعاني مجزئات الجهد أيضا من العيوب السابق ذكرها. تتسبب كل من أجهزة مقاومات التوالي ومجزئات الجهد في سحب تيار من المصدر. ثغرات الشرارة مثل ثغرات الشرارة الكروية هي أجهزة تفريغ غازية وتعطي نتائج عالية الدقة للجهود العظمى (peak voltages) وهي طرق بسيطة جدا ولا تتطلب أي تركيبات خاصة ولكن قياساتها تتأثر بالعوامل الجوية مثل درجة الحرارة والرطوبة...إلخ وكذلك تتأثر بوجود أي جسم معدني مؤرض بالقرب منها حيث إن المجالات الكهربائية داخل الثغرة تتأثر بوجود مثل تلك الأجسام المعدنية المؤرضة. ولكن في نفس الوقت فإن قياسات ثغرات الشرارة الكروية لا تعتمد على شكل موجة الجهد أو ترددها.

(١-٢-٢) مقاومة عالية موصلة على التوالي مع ميكرو أميتر

يقاس الجهد العالي المستمر عادة باستخدام مقاومة عالية جدا (عدة مئات من الميجا أوم) على التوالي مع ميكرو أميتر، كما في شكل (٢,١). وبوجود الجهد العالي يمر تيار I في المقاومة العالية المعايرة R ويقاس هذا التيار باستخدام ميكرو أميتر ذو ملف متحرك. يعطى جهد المصدر بالمعادلة:

$$V = I R \qquad (٢,١)$$

ويمكن إهمال قيمة الانخفاض في الجهد على جهاز القياس حيث إن معاوقة الميكروأميتر عدة أوم فقط مقارنة بعدة مئات من الميجا أوم لمقاومة التوالي R. ويستخدم جهاز حماية مثل ثغرة ورقية أو أنبوب نيون مضئ أو زنر ديود (zener diode) مع مقاومة مناسبة على التوازي مع جهاز القياس كحماية من الجهد العالي الفجائي في حالة حدوث شرارة سطحية على المقاومات. وتختار القيمة الأومية لمقاومة التوالي بحيث يسمح لتيار يتراوح بين ١ و ١٠ أمبير بالمرور للمدى الكامل لجهاز القياس. وتصنع المقاومة من عدد من مقاومات السلك الملفوف على التوالي. ويختار الانخفاض في الجهد في كل عنصر مقاومة بحيث نتجنب شرارة السطح ويسمح للمجال الكهربائي أن يكون في حدود ٥ كيلوفولت/سم إذا كانت عناصر المقاومة في الهواء وأقل من ٢٠ كيلوفولت/سم إذا كانت عناصر المقاومة مغموسة في الزيت. وتصمم الأطراف بحيث تكون خالية من ظاهرة التفريغ الهالي (corona) (غير مدببة أو حادة). وتستخدم سبيكة الكربون ذات المعامل الحراري الأقل من $10^{-4}/^{o}C$ عادة في تصنيع عناصر المقاومة.



شكل (٢,١) مقاومة توالي مع ميكرو أميتر

العناصر المحددة في تصميم مقاومة التوالي هي:

١ - القدرة المفقودة وتحميل المصدر.

٢ -تأثيرات درجة الحرارة و الاتزان الطويل المدى.

٣ -اعتمادية الجهد لعناصر المقاومة.

٤ -الحساسية للإجهادات الميكانيكية.

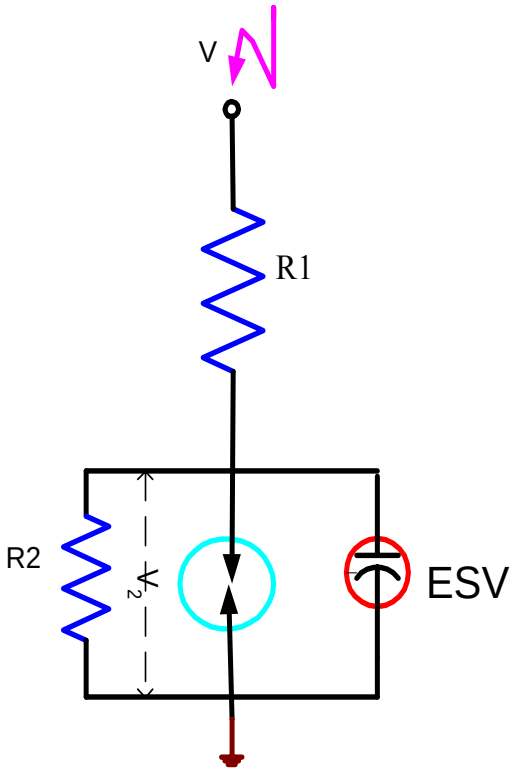
وقد صممت مقاومة التوالي للجهود المستمرة حتى ٥٠٠ كيلو فولت بدقة أفضل من ٠,٢٪.

(٢□٢□٢) مجزئات الجهد باستخدام المقاومات

يستخدم مع مجزئات الجهد باستخدام المقاومات جهاز قياس عبارة عن فولتيمتر كهروستاتيكي أو فولتيمتر ذو مقاومة عالية كما في شكل (٢,٢) ويلغي تأثير درجة الحرارة والجهد على العناصر في استخدام مجزئات الجهد. وتعطى قيمة الجهد العالي بالمعادلة:

$$V = \frac{R_1 + R_2}{R_2} V_2 \qquad (٢,٢)$$

حيث إن V_2 هو الجهد المستمر على ذراع الجهد المنخفض R_2.



شكل (٢,٢) مجزئات الجهد المستخدمة للمقاومات

مع التغيير المفاجئ في الجهد (مثل عمليات الفتح أو شرارة السطح أو قصر المصدر الكهربائي) يمكن حدوث شرارة أو عطب لعناصر المقاومة خلال مكثفات التسريب عبر عناصر المجزئ للأرض ولتجنب هذا الجهد العابر نستخدم على التوازي مع العناصر مكثفات تحكم في الجهد. وتستخدم أيضا أطراف حرة من ظاهرة التفريغ الهالي لتجنب التفريغ غير المرغوب فيه عند أطراف الجهد العالي. تصنع مجزئات الجهد بدقة تصل إلى ٠,٠٥٪ حتى جهد ١٠٠ كيلو فولت، وبدقة تصل إلى ٠,١٪ حتى جهد ٣٠٠ كيلو فولت، وبدقة أفضل من ٠,٥٪ حتى جهد ٥٠٠ كيلو فولت.

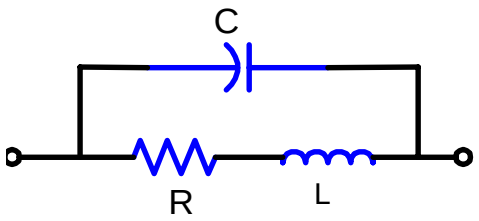
(٣□٢) قياس الجهد العالي المتردد والجهود النبضية (الدفعية)

تستخدم طرق تقليدية عديدة لقياس الجهد العالي المتردد مثل فولتميتر مع معاوقة على التوالي، ومجزئات الجهد، ومحولات الجهد أو الفولتميتر الكهروستاتيكي مع اختلاف تصميمهم عن تلك التي تستخدم لقياس الجهد العالي ومن أهم العوامل التي يجب أن تؤخذ في الاعتبار تصميمات العزل وتحميل المصدر. عند قياس القيمة العظمى للجهد فقط يمكن استخدام فولتميتر القيمة العظمى (peak voltmeter) وثغرات الشرارة. أما عند قياس الجهد الدفعي والجهد المتردد ذو الترددات العالية تستخدم مجزئات الجهد

مع راسم ذبذبات لتسجيل موجة الجهد وتستخدم ثغرات الشرارة عند قياس القيمة العظمى للجهد فقط وكذلك لأغراض المعايرة للأجهزة.

(١-٣-٢) فولتميتر معاوقة التوالي

لقياس الجهد المتردد فإن معاوقة التوالي يمكن أن تكون مقاومات فقط أو مفاعلات وحيث إن وجود المقاومة ينتج عنها فقد في القدرة الكهربائية فغالبا ما يفضل استعمال المكثفات كمفاعلات على التوالي. والأكثر من ذلك فإن التغيير في قيمة المقاومة مع درجة الحرارة تمثل مشكلة كبيرة وكذلك فإن الحث المتبقي (residual inductance) للمقاومة يزيد من قيمة المعاوقة الكلية وبالتالي يغير من المقاومة الأومية لها. وحدات المقاومة العالية التي تستخدم في الجهود العالية يكون لها مكثفات تسرب وبالتالي فإن وحدة المقاومة يكون لها الدائرة المكافئة المبينة بشكل (٢,٣).



شكل (٢,٣) الدائرة المكافئة للمقاومة الأومية العالية

عند السرعة الزاوية ω للجهد المتردد فإن معاوقة عنصر المقاومة تكون:

$$Z = \frac{R + j\omega L}{(1 - \omega^2 LC) + j\omega CR} \qquad (٢,٣)$$

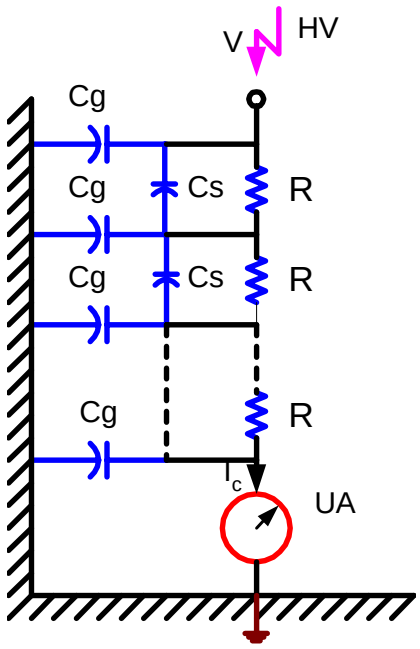
إذا تم إهمال ωL و ωC مقارنة بقيمة R فإن قيمة المعاوقة تصبح:

$$Z \approx R\left[1 + j(\frac{\omega L}{R} - \omega CR)\right] \qquad (٢,٤)$$

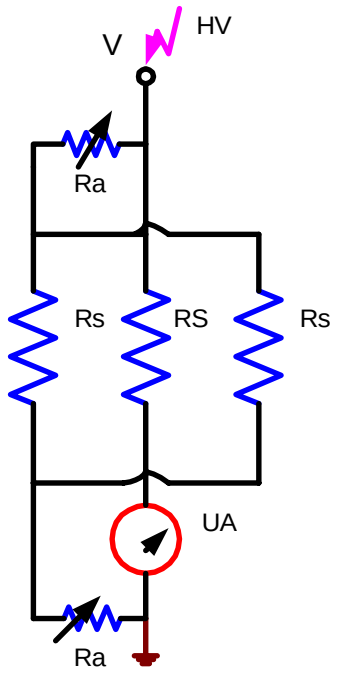
ويمكن في هذه الحالة إهمال تأثير L و C وتصبح القياسات غير معتمدة على التردد إذا كان:

$$L/C = R^2 \qquad (٢,٥)$$

وفي حالة المقاومات الممتدة والضخمة لا تتحقق هذه الدائرة المكافئة للمقاومة الكلية ويقرب كل عنصر من عناصر المقاومة بهذه الدائرة المكافئة، أي أن وحدات المقاومة الداخلية تعامل معاملة خطوط النقل الطويلة.في حساب المقاومة الفعالة وأيضا تؤثر الأرض أو مكثفات التسريب لكل عنصر على التيار المار في كل وحدة وينتج عن ذلك وجود خطأ في قراءة الجهاز. ويوضح شكل (٢,٤a)الدائرة المكافئة لمقاومة الجهد العالي بإهمال الحث وكذلك يبين شكل (٢,٤b) مقاومة التوالي مع استخدام مقاومة تحجيب (guard resistance) ومقاومة ضبط (tuning resistance). .ويمكن إلغاء تأثير مكثفات التسرب بتحجيب المقاومة R بلولب يحيط بالمقاومة R_s وتكون على التوازي مع المقاومة الفعلية ولكنها لا تساهم في التيار المار خلال جهاز القياس.



شكل (٢,٤a) مقاومة التوالي بإهمال الحث



شكل (٢,٤b) مقاومة التوالي مع مقاومة التحجب ومقاومة الضبط

فولتميتر مكثفات التوالي

لتجنب العيوب السابقة تستخدم مكثفات التوالي بدلا من المقاومات لقياس الجهد العالي المتردد. التيار السعوي الذي يمر في جهاز القياس I_c تكون قيمته:

$$I_c = j\,\omega\,C\,V \qquad (٢,٦)$$

حيث C هي السعة لمكثف التوالي

ω هي السرعة الزاوية

V هي الجهد العالي المتردد

وجود توافقيات في الجهد المتردد يحدث خطأ في القراءة نتيجة التغيير الذي سيحدث في معاوقة التوالي. القيمة الفعالة للجهد V مع وجود التوافقيات هو:

$$V = \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + ... + V_n^2} \qquad (٢,٧)$$

حيث إن $V_١$ و $V_٢$ و ..... V_n تمثل القيمة الفعالة للتوافقيات.

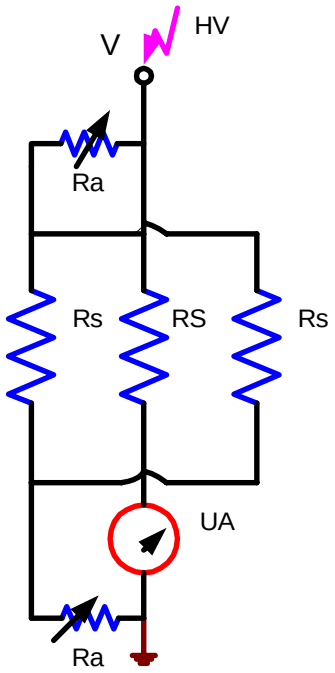
التيارات الناتجة عن التوافقيات هي:

$$I_١ = \omega\,C\,V_١$$

$$I_2 = 2\,\omega\, C\, V_2$$

لذلك فإن القيمة الفعالة الكلية هي:

$$I = \omega C\sqrt{V_1^2 + 4V_2^2 + \ldots\ldots\ldots + n^2V_n^2} \qquad (٢,٨)$$



شكل (٢,٥) مكثف على التوالي مع ميللي أميتر

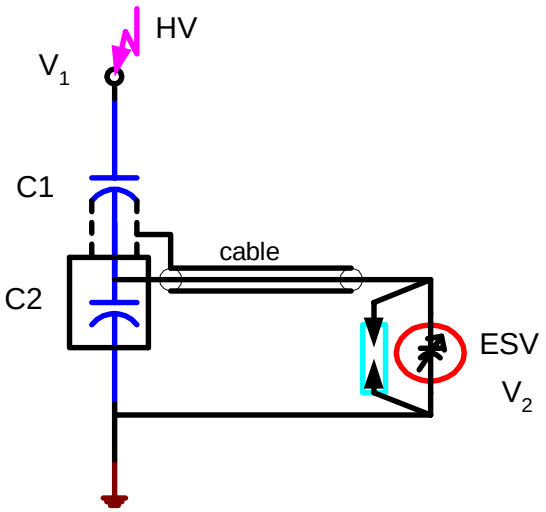
مع ١٠٪من التوافقيات الخامسة فقط نجد أن التيار يزداد بنسبة ١١,٢٪. لذلك فالخطأ في قياس الجهد في هذه الحالة يمثل ١١,٢٪.

وهذه الطريقة لا تفضل في القياس عندما يحتوي الجهد العالي المتردد على توافقيات ذات قيمة. وقد استخدم فولتميتر مكثف التوالي مع محولات التوالي (cascaded transformers) وذلك بغرض قياس القيمة الفعالة حتى ١,٠٠٠ كيلو فولت.

(٢□٣□٢) مجزئات الجهود باستخدام المكثفات ومحول الجهد السعوي

الأخطاء التي تحدثها التوافقيات يمكن تجنبها باستخدام مجزئات الجهود المستخدمة للمكثفات مع فولتميتر كهروستاتيكي أو راسم ذبذبات (oscilloscope). إذا وصل جهاز القياس بكابل طويل فلابد من أخذ سعة الكابل في الحسبان في عمليات المعايرة للجهاز. يستخدم المكثف C_1 معزولاً بالهواء المضغوط أو غاز سادس فلوريد الكبريت أما المكثف C_2 فمن الممكن استعماله من المكثفات المعزولة

بالميكا أو الورق أو أي مكثف قليل الفقد. المكثف C_1 ذو ثلاثة أطراف ويوصل بالمكثف C_2 بكابل محجب وكذلك يحجب C_2 تحجيبا كاملا في صندوق لتجنب مكثفات التسرب.



شكل (٢,٦) مجزئ الجهد السعوي

الجهد العالي V_1 يعطى بالعلاقة:

$$V_1 = V_2\left(\frac{C_1 + C_2 + C_m}{C_1}\right) \qquad (٢,٩)$$

حيث إن C_m هي سعة جهاز القياس وكابل التوصيل والتوصيلات

V_2 هي قراءة جهاز القياس

ويضبط مجزئ الجهد السعوي مع محول جهد عازل مناسب (isolating potential transformer) بحيث يكونان دائرة رنين وهذا الترتيب يستخدم غالبا في قياس الجهد لأنظمة القوى ذات الجهود العالية والفائقة وتسمى محولات الجهد السعوية.

(٢-٣-٣) محولات الجهد

محولات الجهد هي أقدم الأجهزة المستعملة في قياس الجهد العالي المتردد وهي بسيطة جدا في تركيبها ويمكن تصميمها لتناسب معظم الجهود. نسبة التحويل لمحولات الجهد هي:

$$\frac{V_1}{V_2} = a = \frac{N_1}{N_2} \qquad (٢,١٠)$$

حيث أن: V_1 و V_2 هما الجهد الابتدائي والجهد الثانوي

N_1 و N_2 هما عدد لفات الملف الابتدائي والملف الثانوي

هذه الأجهزة تعاني من الأخطاء في نسبة التحويل وكذلك زاوية الطور والتي تتسبب فيها معاوقة التمغنط ومعاوقة التسرب لملفات المحول. وهذه الأخطاء يمكن معالجتها عن طريق ضبط نسبة التحويل باستخدام التفريع (tapping) على جهة الجهد العالي أثناء التحميل. محولات الجهد لا تستطيع قياس الجهود العابرة ذات الارتفاع السريع وكذلك الجهود المترددة ذات التردد العالي ولكن توافقيات الجهد تقاس عادة بدقة كافية.

عند اختبار العازلات والكابلات....وهكذا، والتي تعتبر سعوية بطبيعتها، يحدث ارتفاع في الجهد على الحمل الموجود على محول الاختبار وتعطي ملفات محول الجهد قيم جهود أقل من القيم الحقيقية الموجودة على عينة الاختبار.

لو علمت قيمة المعاوقة النسبية لمحول الاختبار يمكن وضع هذا التصحيح للجهد المقاس بواسطة ملفات محول الجهد:

$$V_2 = V_{2o}(1+0{,}01\ v_x\ C/C_N) \qquad (2{,}11)$$

حيث أن: V_{2o} جهد الدائرة المفتوحة لملفات محول الجهد.

C_N سعة الحمل المستخدم للاختبار.

C سعة عينة الاختبار ($C \le C_N$).

v_x نسبة الانخفاض في المفاعلة في المحول.

(٤-٣-٢) الفولتيمتر الكهروستاتيكي

مبادئ التشغيل:

قوة الجذب بين الكترودات مكثف ذو لوحين متوازيين بينهما مجال كهرو ستاتيكي هي:

$$F = \left|\frac{-\delta W_s}{dS}\right| = \left|\frac{\delta}{\delta S}\left(\frac{1}{2}CV^2\right)\right| = \left|\frac{1}{2}V^2\,\frac{\delta C}{\delta S}\right|$$

$$= \frac{1}{2}\varepsilon_o V^2\,\frac{A}{S^2} = \frac{1}{2}\varepsilon_o A\left(\frac{V}{S}\right)^2 \qquad (2{,}12)$$

حيث أن: V الجهد الموجود بين اللوحين.

C السعة بين اللوحين.

A مساحة اللوح.

S المسافة بين اللوحين.

ε_o السماحية المطلقة أو سماحية الهواء.

W_s شغل المبذول في إزاحة اللوح.

عندما يكون أحد اللوحين حر الحركة فإن القوة المؤثرة على اللوح يمكن قياسها بالتحكم فيها بواسطة زنبرك أو معادلتها بواسطة وزن مع عداد. ويكون كافيا عند قياس الجهود العالية إزاحة أحد اللوحين جزء من المليمتر حتى عدة مليمترات. يمكن استعمال الفولتميتر الإستاتيكي في قياس الجهود المترددة والمستمرة حيث إن القوة المؤثرة تتناسب مع مربع الجهد.

التركيب:

يتكون الفولتميتر الإستاتيكي من لوحين متوازيين وحلقة تحجيب (guard ring) لتجنب ظاهرة التفريغ الهالي. وعادة يكون الفولتميتر الإستاتيكي له سعة صغيرة، تتراوح بين ٥ إلى ٥٠ بيكو فاراد، ومقاومة عزل عالية، في حدود $١٠^{١٣}$ أوم.، ولذلك فهو يعتبر من الأجهزة ذات معاوقة الدخل الكبيرة. ويحدد مستوى التردد العالي لتطبيقات الجهد المتردد من خلال الاعتبارات التالية:

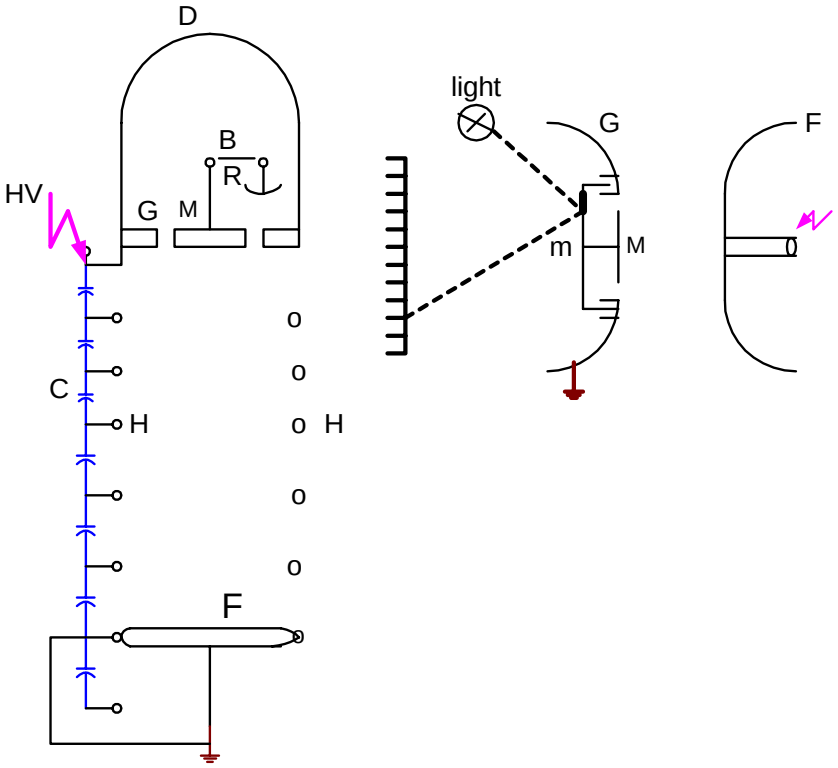
أ -التردد الطبيعي للنظام المتحرك.

ب -تردد الرنين لأطراف التوصيل والحث المتسرب مع سعة الجهاز.

ت -تصرف الدائرة المحتوية على R و C لزنبرك التحكم (خلال مقاومة الاحتكاك والمرونة)

ويمكن تحقيق قياس الجهد بتردد عالٍ يصل إلى ١,٠ ميجاهيرتز وبتصميم خاص للفولتميتر الاستاتيكي. دقة قياس الجهد العالي المتردد بواسطة الفولتميتر الإستاتيكي تكون أفضل من $\pm$٠,٢٥٪ ودقته في قياس الجهد المستمر تصل إلى $\pm$٠,١٪ أو أقل. ويبين شكل (٢,٧) رسم تخطيطي للفولتميتر الإستاتيكي ويتكون من الكترودات من أقراص مستوية ومتوازية وتفصلها عن بعضها مسافات صغيرة. ويحاط الالكترود حر الحركة بحلقة تحجيب لجعل المجال الكهربائي منتظما عند المنطقة المركزية. ولقياس جهد ما بدقة يفضل زيادة قطر القرص وتقليل المسافة بينهما. مسافة الثغرة تتحدد بالإجهاد الآمن (V/S) المسموح به في الهواء وقيمته ٥ كيلوفولت/متر أو أقل. وتكبر الحركة البسيطة للألكترودات الحرة الحركة خلال وسائل بصرية (مثل لمبة وبيان مدى مثل التي تستخدم في جلفانومتر الملف المتحرك) وتستخدم مراوح هوائية لتقليل الاهتزازات في نظام التحرك وكذلك يحافظ على أقل استطالة للزنبرك لتجنب التغيير في المجال الكهربائي. ويتغير مدى الجهاز بتغير مسافة الثغرة بحيث إن V/S أو المجال

الكهربائي لا يتعدى أقصى قيمة له في أي مدى. ويمكن استخدام الأجهزة ذات المدى المتعدد للجهود الأكبر من $٦٠٠kV_{rms}$.



شكل (٢,٧) فولتميتر كهروستاتيكي

توفر كتلة الاتزان عزم الاتزان المطلوب ويمثل القرص الحر الحركة القلب المركزي لحلقة التحجيب والتي لها نفس قطر المستوى الثابت. الغطاء D يحتوي على الاتزان الحساس B وأحد الذراعين يحمل حامل القرص المتحرك. ويحمل ذراع الاتزان مرآة لعكس شعاع الضوء وبذلك يتم تكبير حركة القرص المتحرك. حلقة التحجيب H توضع للحفاظ على المجال الكهربائي منتظما مع زيادة المسافة بين الألكترودات وهي تحيط المسافة بين الأقراص F و M. ويحافظ على جهد حلقة التحجيب ثابتا باستخدام مجزئ جهد سعوي والذي يحافظ على توزيعات منتظمة للجهد.

(٥□٣□٢) فولتيمتر القيمة العظمى للجهد المتردد

في بعض التطبيقات يكون مطلوبا قياس القيمة العظمى لموجة الجهد المتردد وذلك للحصول على شدة العزل القصوى للعوازل الصلبة.....وهكذا. القيمة العظمى للجهد في الموجات غير المنتظمة لا تساوي $\sqrt{٢}$ مضروبا في القيمة الفعالة لذلك فإن جهاز قياس القيمة العظمى هام جدا في تطبيقات الجهد العالي.

فولتميتر القيمة العظمى مع مكثف توالي

عند توصيل مكثف مع مصدر جهد متردد فإن تيار الشحن يساوي:

$$i_o = C\int_0^t v dt = j\omega CV \qquad (٢,١٣)$$

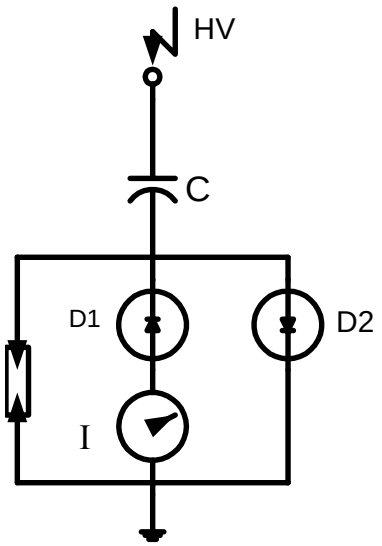
حيث إن V هي القيمة الفعالة للجهد

إذا استخدمنا موحد نصف موجي فإن المتوسط الرياضي للتيار الموحد يتناسب مع القيمة العظمى للجهد المتردد. ويبين شكل (٢,٨) شكلاً تخطيطياً لدائرة فولتميتر القيمة العظمى. قراءة التيار المستمر للجهاز تتناسب مع القيمة العظمى للجهد V_m أو:

$$V_m = \frac{I}{2\pi fC} \qquad (٢,١٤)$$

حيث إن: I هي قراءة التيار المستمر بواسطة الجهاز

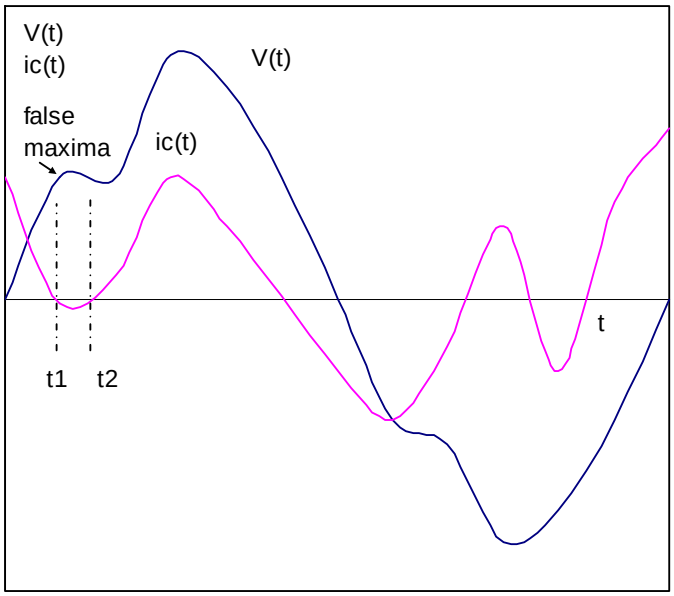
C هي سعة المكثف.



شكل (٢,٨) فولتميتر القيمة العظمى مع مكثف توالي

الموحد $D_١$ يستخدم لتوحيد التيار المتردد في نصف الموجة بينما $D_٢$ يوحد التيار في النصف الآخر لموجة التيار وهذا الترتيب مناسب فقط لنصف الموجة الموجب أو السالب لذلك فهو مناسب عندما تكون أنصاف الموجات متماثلة ومتساوية. إذا كانت موجة الجهد تحتوي على قيمة عظمى خاطئة كما في شكل (٢,٩) فإن تيار الشحن يغير قطبيته داخل نفس نصف الموجة لذلك فإن التيار المنعكس المار أثناء المدة $t_١$-$t_٢$ لن

تتضمن في قيمة القيمة المتوسطة. حيث إن نصف الموجة لا يحتوي إلا على قيمة واحدة عظمى للتيار فإنه من السهل تحديد القيمة العظمى الخطأ بمشاهدة تيار الشحن على جهاز راسم الذبذبات وهذه المشكلة يمكن أيضا تفاديها باستخدام مقاومة R على التوالي مع مكثف C حيث إن ($CR<< 1/\omega$) للجهود ذات تردد قوي.



شكل (٢,١٩) موجة الجهد تحتوي على توافقيات

الخطأ في القراءة الناتج من استخدام المقاومة هو:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{V - V_m}{V} = \left(1 - \frac{1}{1 + \omega^2 C^2 R^2}\right) \qquad (٢,١٥)$$

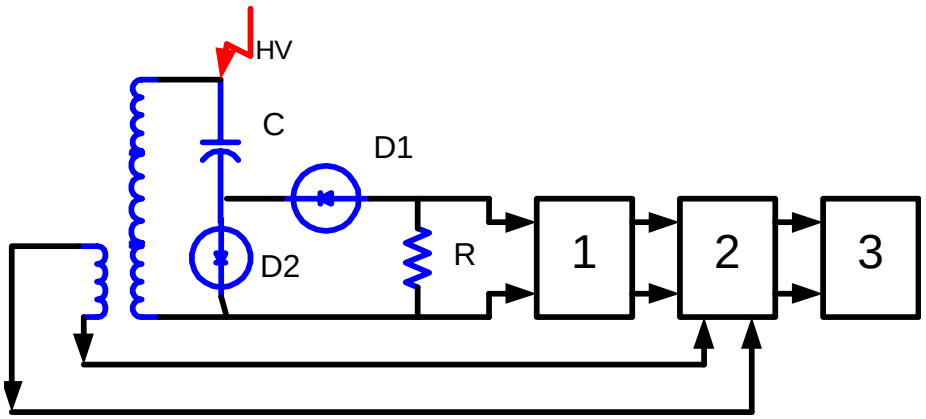
حيث إن V القيمة الحقيقية للجهد

V_m القيمة المقاسة للجهد

ولتحديد قيم الخطأ فلابد أولا من تحديد القيمة الحقيقية لسرعة الزاوية ω.

يبين شكل (٢,١٠) جهاز قياس القيمة العظمى الرقمي لقياس الجهد وفي هذا الجهاز تأخذ قيمة متناسبة من إشارة الجهد التماثلية (analog voltage signal) ثم تحول إلى تردد متوسط متناسب f_m. تقاس

النسبة بين الترددين f_m/f باستخدام دائرة بوابة (gate circuit) يتحكم فيها بواسطة تردد القوى f وعداد يفتح لزمن محدد $\Delta t=p/f$.



شكل (٢,١٠) جهاز قياس القيمة العظمى الرقمي

١ -مغير الجهد للتردد ٢ -دائرة البوابة ٣ -عداد قراءة

أثناء هذه المدة فإن عدد الدفعات التي يتم تسجيلها n هي:

$$N= f_m.\Delta t = p\ .\ (f_m/f) = 2pCV_mAR \qquad (٢,١٦)$$

حيث أن p ثابت الجهاز

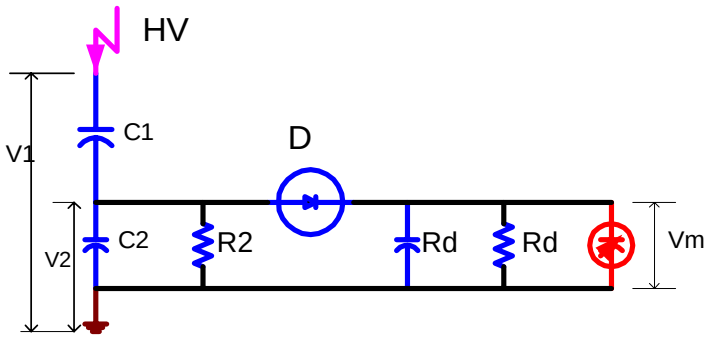
A عامل التحويل من التيار المتردد إلى المستمر $A=f_m/(R\ i_m)$

i_m هو التيار الموحد المار بالمقاومة R

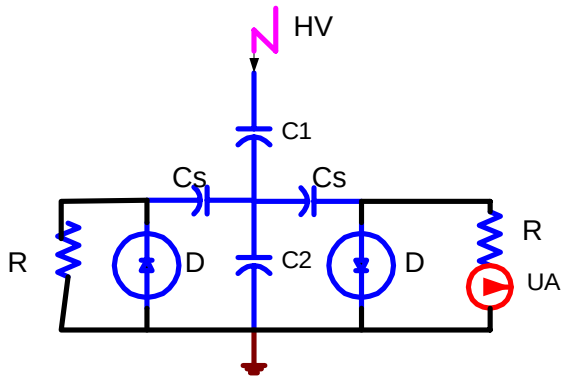
وباختيار القيم المناسبة للمقاومة R وعدد الموجات الكاملة p يمكننا قراءة الجهد مباشرة بالكيلو فولت.

فولتميتر القيمة العظمى مع مجزئ جهد

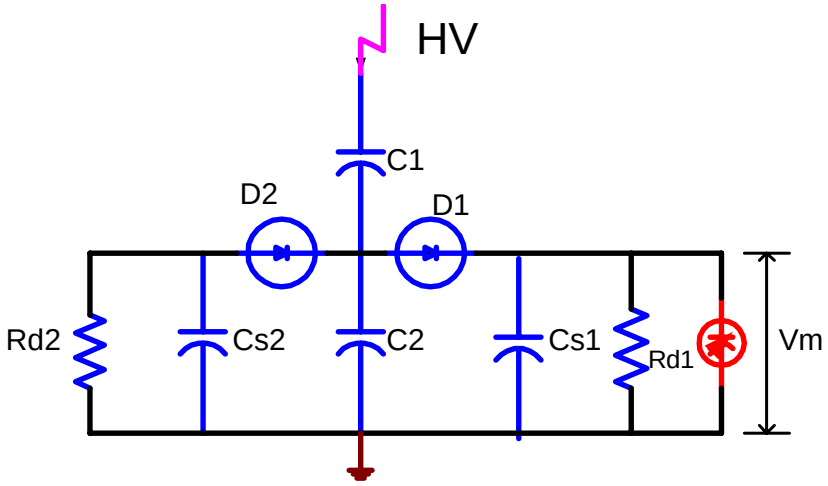
يبين شكل (٢,١١) فولتميتر القيمة العظمى مع مجزئ جهد ويستخدم في هذا التصميم الجهد عبر المكثف C_2 في شحن مكثف التخزين C_s وتوضع مقاومة التفريغ R_d للسماح بتغير V_m عندما تقل V_2. وتشحن C_s لجهد يتناسب مع القيمة العظمى المراد قياسها. الثابت الزمني للتفريغ C_sR_d يصمم بحيث يتراوح من ١ إلى ١٠ ثواني. وهذا يسمح بزيادة أخطاء التفريغ والتي تعتمد على تردد مصدر الجهد ولمعادلة أخطاء الشحن والتفريغ الناتجة عن المقاومات تعدل الدائرة كما بشكل (٢,١٢) وتقاس القيمة العظمى بواسطة ميكرو أميتر. ويوضح شكل (٢,١٣) دائرة أخرى لمعادلة أخطاء الشحن.



شكل (٢,١١) فولتميتر القيمة العظمى مع مجزئ جهد



شكل (٢,١٢) دائرة فولتميتر القيمة العظمى لمعادلة أخطاء الشحن والتفريغ



شكل (٢,١٣)دائرة فولتميتر القيمة العظمى لمعادلة أخطاء الشحن

(٦□٣□٢) ثغرات الشرارة

ثغرات الشرارة ذات المجال الكهربائي المنتظم لها دائما جهد شرارة (sparkover voltage) معروف داخل سماحية معروفة تحت حالات بيئية ثابتة. لذلك فيمكن استخدام ثغرات الشرارة لقياس القيمة العظمى للجهد لو علمت قيمة مسافة الثغرة بين الكرتين. ويحدث جهد الشرارة عند جهد $٣٠kV_{peak}$ لمسافة ثغرة مقدارها ١سم في الهواء عند درجة حرارة $٢٠^{o}C$ وضغط مقداره ١ ضغط جوي (٧٦٠ torr) لثغرة شرارة كروية أو أي ثغرة ذات مجال كهربائي منتظم ولكن مع الخبرة وجدنا أن هذه القياسات مرنة فقط لشكل ثغرة معينة وعادة ما تستخدم ثغرات الشرارة الكروية لقياس الجهد العالي. في بعض الحالات تستخدم ثغرات الشرارة ذات المجال الكهربائي المنتظم أو قضبان ثغرات الشرارة ولكن دقة القياس لها أقل. ولا تعتمد ثغرات الشرارة وبالذات ثغرات الشرارة الكروية على شكل موجة الجهد وبالتالي فهي مناسبة جدا لكل أنواع وأشكال الموجات من الجهد المستمر حتى الجهد الدفعي الذي له زمن مقدمة موجة صغير (short rise time≥٠,٥μs) وكذلك فهي مناسبة لقياس القيمة العظمى للجهد العالي ذي تردد موجات الراديو (حتى ١ ميجا هيرتز).

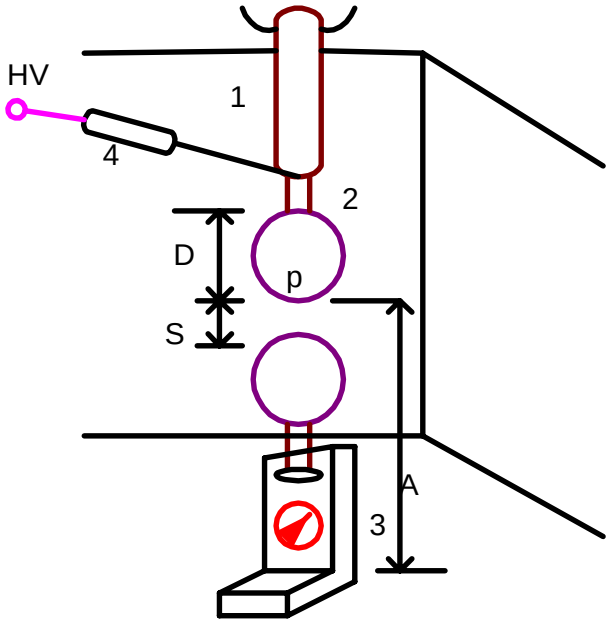
قياسات ثغرات الشرارة الكروية

ثغرات الشرارة الكروية يمكن استخدامها:

(أ) في الوضع الرأسي مع تأريض الكرة السفلية.

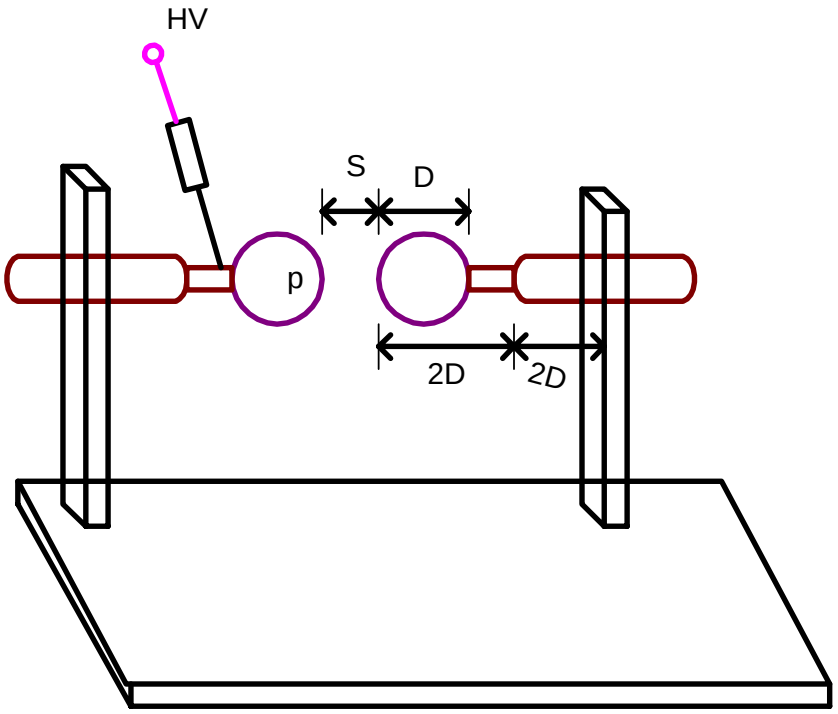
(ب) في الوضع الأفقي مع توصيل الكرتين بالمصدر أو تأريض إحداهما.

في الوضع الأفقي لابد من وضع الكرتين متماثلتين وعلى نفس البعد عن الأرض. الكرتان المستخدمتان لابد أن تكونا متماثلتين في الحجم والشكل. شكلي (٢,١٤a) و (٢,١٤b) يبينان الشكل التخطيطي للوضعين الرأسي والأفقي للكرتين. يطبق الجهد المراد قياسه بين الكرتين وتعطي المسافة بين الكرتين القياس لجهد الشرارة. وتوصل مقاومة توالي بين المصدر والثغرة الكروية للحد من تيار الانهيار (أي التيار الذي يمر عند انهيار الثغرة بين الكرتين) وكذلك للحد من الاهتزازات غير المرغوب بها في جهد المصدر عند حدوث الانهيار (في حالة الجهود الدفعية). قيمة هذه المقاومة تتراوح بين ١٠٠ إلى ١,٠٠٠ كيلوأوم للجهود المترددة والمستمرة وأقل من ٥٠٠ أوم للجهود الدفعية.



١ قضيب تعليق عازل
٢ ساق الكرة
٣ تروس تشغيل ومحرك لتغيير مسافة الثغرة
٤ توصيلة جهد عالي
P نقطة الشرارة
D قطر الكرة
S المسافة بين الكرتين
A ارتفاع نقطة الشرارة عن الأرض

شكل (٢,١٤a) الوضع الرأسي لثغرات الشرارة الكروية



شكل (٢,١٤b) الوضع الأفقي لثغرات الشرارة الكروية

في حالة قياس القيمة العظمى للجهد المتردد والجهد المستمر نزيد قيمة الجهد المطبق تدريجيا بانتظام حتى تحدث الشرارة في الثغرة وعادة يأخذ متوسط خمس قراءات لجهد الانهيار وذلك عندما تتفق هذه القراءات في حدود ٣٪±.

وفي حالة الجهود الدفعية، للحصول على ٥٠٪ جهد شرارة سطحية، يوضع حدان للجهد لا يختلفان بأكثر من ٢٪ بحيث أنه بتطبيق الحد الأدنى للجهد يحدث من ٢ إلى ٣ شرارة سطحية وعند تطبيق الحد الأعلى للجهد يحدث من ٨ إلى ٦ شرارة سطحية ومتوسط هذين الحدين يؤخذ على أنها جهد الـ ٥٠٪ شرارة سطحية. وفي أي حالة يقاس جهد الشرارة السطحية المبدئي قبل أخذ القياسات الحقيقية. ويوضح جداول (٢□٢) و (٣□٢) جهد الشرارة السطحية لمختلف مسافات الثغرة والأقطار القياسية للكرات المستخدمة.

جدول (٢□٢) أقصى قيمة لجهد الشرارة بالكيلوفولت عند درجة حرارة $25^{o}C$ وضغط ١ جوي

(A) للجهد المتردد والمستمر بأي قطبية وجهد دفعي قياسي سالب القطبية

و (B) للجهد الدفعي القياسي موجب القطبية مع زمن موجة طويل

مسافة الثغرة (سم)	قطر الكرة (سم)															
	٥		١٠		١٥		٢٥		٥٠		١٠٠		١٥٠		٢٠٠	
	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A
٠,٥	١٧,٤	١٧,٤	١٦,٩	١٦,٨	١٦,٩	١٦,٩										
١,٠	٣٢,٠	٣٢,٠	٣١,٧	٣١,٧	٣١,٤	٣١,٤	٣١,٤	٣١,٤								
١,٥	٤٤,٧	٤٥,٥	٤٤,٧	٤٥,١	٤٤,٧	٤٥,١	٤٤,٧	٤٤,٧								
٢,٠	٥٧,٥	٥٨,٠	٥٨,٠	٥٨,٠	٥٨,٠	٥٨,٠	٥٨,٠	٥٨,٠	٧١,٥	٧١,٥						
٢,٥			٧١,٥	٧١,٥	٧١,٥	٧١,٥	٧١,٥	٧١,٥	٨٥,٠	٨٥,٠						
٣,٠			٨٤,٠	٨٥,٠	٨٥,٠	٨٥,٠	٨٥,٠	٨٥,٠	٩٧,٠	٩٧,٠						
٣,٥			٩٥,٥	٩٦,٠	٩٧,٠	٩٧,٠	٩٧,٠	٩٧,٠	١١٠	١١٠						
٤,٠			١٠٦,٠	١٠٨,٠	١١٠,٠	١٠٨,٠	١١٠,٠	١١٠,٠	١٣٦	١٣٦	٢٦٢	٢٦٢	٢٦٢	٢٦٢	٢٦٢	٢٦٢
٥,٠			١٢٣,٠	١٢٧,٠	١٣٢,٠	١٢٧,٠	١٣٥,٠	١٣٦	١٩٩	١٩٩						
٧,٥					١٨٧,٠	١٨١,٠	١٩٥,٠	١٩٦	٢٥٩	٢٥٩	٣٨٣	٣٨٤	٣٨٤	٣٨٤	٣٨٤	٣٨٤
١٠,٠							٢٥٧	٢٦٨	٣١٧	٣١٥						
١٢,٥							٢٧٧	٢٩٤	٣٧٤	٣٦٧	٥٠٠	٥٠٠	٥٠٠	٥٠٠	٥٠٠	٥٠٠
١٥							٣٠٩	٣٣١	٤٢٥	٤١٣	٦٠٥	٦١٠				
١٧,٥							٣٣٦	٣٦٢	٤٧٢	٤٥٢	٧٠٠	٧١٥	٧٣٥	٧٣٠	٧٣٥	٧٤٠
٢٠,٠									٥٤٥	٥٢٠	٧٨٥	٨٠٠				
٢٥,٠									٦١٠	٥٧٥	٨٦٢	٨٨٥	٩٥٠	٩٤٠	٩٦٠	٩٦٥
٣٠,٠									٧٥٥	٧٢٥	٩٢٥	٩٦٥	١١٣٠	١١١٠	١١٦٠	
٣٥,٠											١٠٠٠	١٠٢٠	١٤٦٠	١٤٢٠	١٥١٠	١٥٩٠
٥٠,٠											١٢١٠	١٢٦٠			١٨٧٠	١٩٠٠

٧٥,٠																
١٠٠																
١٥٠																
٢٠٠																

جدول (٣-٢) جهد الانهيار للثغرات الكروية بالكيلوفولت في الهواء للجهود المترددة والمستمرة والجهود الدفعية لثغرات كروية متماثلة عند درجة حرارة $20^{o}C$ وضغط ١ جوي.

مسافة الثغرة (سم)	قطر الكرة (سم)								ملاحظات
	٥	١٠	١٥	٢٥	٥٠	١٠٠	١٥٠	٢٠٠	
٠,٥	١٧,٥	١٦,٩	١٦,٥						لمسافة ثغرة أقل من ٠,٥D الدقة ±٣٪ ولمسافة ثغرة ≤ ٠,٥D بدقة ±٥٪
١,٠	٣٢,٢	٣١,٦	٣١,٣	٣١,٠					
١,٥	٤٦,١	٤٥,٨	٤٥,٥	٤٥,٠					
٢,٠	٥٨,٣	٥٩,٣	٥٩,٢	٥٩,٠					
٢,٥	٦٩,٤	٧٢,٤	٧٢,٩	٧٣,٠					
٣,٠	٧٩,٣	٨٤,٩	٨٥,٨	٨٦,٠					
٤,٠		١٠٧,٠	١١١,٠	١١٣,٠	١١٢,٠				
٥,٠		١٢٨,٠	١٣٤,٠	١٣٨,٠	١٣٨,٠	١٣٧,٠	١٣٧,٠	١٣٧,٠	
٨,٠		١٧٧,٠	١٩٤,٠	٢٠٧,٠	٢١٤,٠				
١٠,٠				٢٤٨,٠	٢٦٣,٠	٢٦٦,٠	٢٦٧,٠	٢٦٧,٠	
١٢,٠				٢٨٦,٠	٣٠٩,٠				
١٤,٠				٣٢٠,٠	٣٥٣,٠				
١٦,٠				٣٥٢,٠	٣٩٤,٠				
١٨,٠					٤٥٢,٠				
٢٠,٠					٤٩٥,٠	٥٠٤,٠	٥١١,٠	٥١١,٠	
٢٥,٠					٥٥٨,٠	٦١٣,٠	٦٢٨,٠	٦٣٢,٠	
٣٠,٠						٧٤٤,٠	٧٤١,٠	٧٤٦,٠	
٣٥,٠						٨١٢,٠	٨٤٨,٠	٨٦٠,٠	
٤٠,٠						٩٠٢,٠	٩٥٠,٠	٩٧٢,٠	
٥٠,٠						١٠٧٠,٠	١١٤٠,٠	١١٨٠,٠	
٦٠,٠						١٢١٠,٠	١٣٢٠,٠	١٣٨٠,٠	
٧٠,٠							١٤٩٠,٠	١٥٦٠,٠	
٨٠,٠							١٦٤٠,٠	١٧٣٠,٠	
٩٠,٠								١٩٠٠,٠	
١٠٠,٠								٢٠٥٠,٠	

تصميم الثغرات الكروية

الثغرات الكروية تصنع من كرتين معدنيتين لهما نفس القطر مع الساق المعدنية للكرة وتروس التشغيل وعوازل التثبيت. وتصنع الكرات عادة من النحاس أو النحاس الأصفر أو الألومونيوم ويستخدم الألومونيوم فقط لرخص سعره.

الأقطار القياسية المستعملة للكرات هي٢ ,٥ ,٦,٢٥ ,١٠ ,١٢,٥ ,١٥ ,٢٥ ,٥٠ ,٧٥ ,١٠٠ ,١٥٠ و ٢٠٠ سم. وتصمم وتختار المسافة بين الكرتين بحيث تحدث الشرارة السطحية بالقرب من نقطة الشرارة. تصمم الكرات وتصنع بحرص بحيث يكون سطحها ناعم الملمس ومنتظمة التقوس. ويقاس نصف قطر التقوس بجهاز قياس الكرات عند مختلف النقاط على المساحة المتضمنة داخل دائرة قطرها ٠,٣D حول نقطة الشرارة ويجب أن لا تختلف إلا في حدود ٢٪± من القيمة الاسمية. ويجب أن يكون سطح الكرات خالياً تماما من الأتربة والغبار وأي طلاء ولا يحتاج السطح لأي صقل وإذا حدثت حفر على سطح الكرات نتيجة حدوث شرارة السطح فيجب إعادة تنعيم السطح. قطر ساق الكرة المستخدم وحلقة تدرج المجال الكهربائي (guard ring) إذا استخدمت مع الكرات والمسافة بين الكرات والأرض لابد أن تخضع للقيم القياسية المعطاة بالأشكال والجدول (٤□٢). ويجب وضع موصل الجهد العالي بحيث لا يؤثر على توزيعات المجال الكهربائي للكرات المستخدمة ويجب وضع مقاومة التوالي بعيدا عن أرجل الكرات على مسافة ٢D من الكرة المطبق عليها الجهد العالي أو من نقطة الشرارة.

جدول (٤□٢) المسافات المختلفة لثغرات الشرارة

قطر الكرة (سم)	ارتفاع نقطة الشرارة عن الأرض		أقل بعد للكرات عن المباني الخارجية
	أقصى قيمة	أقل قيمة	
حتي ٦,٢٥	٩D	٧D	١٤S
١٠□٢٥	٨D	٦D	١٢S
٢٥	٧D	٥D	١٠S
٥٠	٦D	٤D	٨S
١٠٠	٥D	٣,٥D	٧S
١٥٠	٤D	٣D	٦S
٢٠٠	٤D	٣D	٦S

العوامل المؤثرة على جهد الشرارة السطحية للثغرات الكروية هي:

أ -الأشياء القريبة المؤرضة.

ب -الظروف البيئية والرطوبة.

ت -الإشعاعات الساقطة على كرات القياس.

ث -قطبية وزمن مقدمة الموجة لموجة الجهد المراد قياسه.

(أ) تأثير الأشياء القريبة المؤرضة

حدد كافيل تأثير الأشياء القريبة المؤرضة بوضع الكرة المؤرضة داخل أسطوانة مؤرضة وقد لاحظ أن جهد الشرارة قد انخفض . الانخفاض في جهد الشرارة يعطى بالمعادلة التالية:

$$\Delta V = m \log (B/D) + C \qquad (٢,١٧)$$

حيث إن: ΔV هي نسبة الانخفاض

B هي قطر الأسطوانة المؤرضة

D قطر الكرات

S مسافة الثغرة

m و C ثوابت

وقد لوحظ أن نسبة الانخفاض أقل من ٢٪ للنسبة $S/D \leq ٠,٥$ و $S/D \leq ٠,٨$. كذلك فإن نسبة الانخفاض حوالي ٣٪ للنسبة $S/D \geq ١,٠$.

(ب) تأثير الظروف البيئية

يعتمد جهد الشرارة للثغرات الكروية على كثافة الهواء والتي تتغير بتغير كل من درجة الحرارة والضغط. إذا كان جهد الشرارة V تحت الاختبار في درجة حرارة T وضغط p وأن جهد الشرارة V_o تحت الظروف القياسية من درجة الحرارة والضغط أي $٢٠^{o}C$ و ٧٦٠ torr عندئذ:

$$V = k\, V_o \qquad (٢,١٨)$$

حيث إن k دالة في معامل كثافة الهواء d ويعطى بالمعادلة الآتية:

$$d = \frac{p}{760}\,\frac{293}{273 + T} \qquad (٢,١٩)$$

ويوضح جدول (٥□٢)العلاقة بين d و k.

جدول (٥-٢) العلاقة بين معامل التصحيح k ومعامل كثافة الهواء d.

d	٠,٧	٠,٧٥	٠,٨٠	٠,٨٥	٠,٩٠	٠,٩٥	١,٠٠	١,٠٥	١,١٠	١,١٥
K	٠,٧٢	٠,٧٧	٠,٨٢	٠,٨٦	٠,٩١	٠,٩٥	١,٠٠	١,٠٥	١,٠٩	١,١٢

ويمكن استنتاج العلاقات الآتية بين جهد الشرارة والرطوبة من النتائج التي حصل عليها الباحثون

١ -يزداد تأثير الرطوبة مع زيادة حجم الكرات المستعملة وتبلغ أقصى تأثير لها مع ثغرات الشرارة ذات المجالات الكهربائية المنتظمة.

٢ -يزداد جهد الشرارة مع الضغط الجزئي لبخار الماء في الهواء وعند ثبات الرطوبة يزداد التغير في جهد الشرارة مع زيادة طول الثغرة.

(ت) تأثير الإشعاعات الساقطة

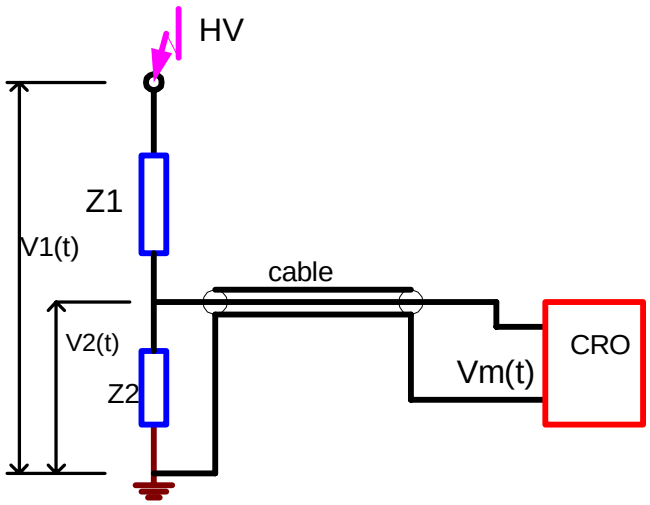
إسقاط الأشعة فوق البنفسجية أو أشعة إكس يساعد في عمليات التأين داخل الثغرة بين الكرتين ويسرع بانهيارها ويكون هذا التأثير مميزا في مسافات الثغرة الصغيرة. يكون الانخفاض في جهد الشرارة في حدود ٢٠٪ لمسافات ثغرة ٠,١D و ٠,٣D مع قطر كرة يقدر بـ ١,٣ سم تحت تأثير الجهود المستمرة. ويكون الانخفاض في جهد الشرارة أقل من ٥٪ لمسافة ثغرة أكبر من ١,٠ سم وفي حدود ١,٥٪ لمسافة ثغرة ≤ ٢ سم. الأشعة الساقطة هامة في ثغرات الشرارة الكروية الصغيرة ذات مسافة الثغرة الأقل من ١,٠ سم وذلك للحصول على قيم متطابقة.

(ث) تأثير القطبية وموجة الجهد

لوحظ أن جهد الانهيار للموجات الدفعية ذات القطبية الموجبة مختلفة عن تلك التي للموجات الدفعية ذات القطبية السالبة. النتائج العملية أوضحت أن الاختلاف في جهد الشرارة للموجات الموجبة والسالبة لا تزيد عن ١٪ للكرات ذات الأقطار من ٦,٢٥ إلى ٢٥ سم. للكرات الأقل من ٢ سم فإن الاختلاف في جهد الشرارة للموجة الدفعية ذات القطبية السالبة والموجبة ذات الموجة ١/٥٠ ميكروثانية يكون في حدود ٨٪. وكذلك فإن زمن مقدمة وذيل الموجة أيضا له تأثير كبير على جهد الانهيار للثغرة. وتكون ثغرات الشرارة الكروية غير مناسبة لموجة جهد ذات زمن مقدمة مقداره أقل من ٠,٥ ميكروثانية وزمن ذيل الموجة أقل من ٥ ميكروثانية حيث إن جهود الانهيار تكون غير متطابقة.

(٧-٣-٢) مجزئات الجهد لقياس الجهد الدفعي

مجزءات الجهد التي تستخدم في قياس الجهود الدفعية أو الجهود العالية المترددة أو الجهود العابرة ذات الارتفاع السريع في الجهد عادة ما تكون مجزئات جهد باستخدام المقاومات أو المكثفات أو عناصر مختلطة من المقاومات والمكثفات. ويوصل ذراع الجهد المنخفض للمجزئ عادة بجهاز تسجيل سريع للموجات أو جهاز قراءة القيمة العظمى من خلال كابل تأخير (delay cable). ويوضح شكل (٢,١٥) رسماً تخطيطياً لمجزئ جهد مع المعدات المستعملة. Z_1 تكون إما مقاومة أو مجموعة مقاومات على التوالي في حالة مجزئ الجهد باستخدام المقاومات أو مكثف أو عدة مكثفات في حالة مجزئ الجهد باستخدام المكثفات. ويمكن أيضا أن تكون خليطا من المقاومات والمكثفات. Z_2 يمكن أن تكون مقاومة أو مكثف أو معاوقة R-C طبقا لنوع المجزئ. كل عنصر من عناصر المجزئ المستخدم في الجهد العالي يكون له مقاومة ذاتية أو مكثف ذاتي وبالإضافة لذلك فإن عناصر المقاومات تكون لها حث متبقي (residual inductance) ومكثفات تسريب عند الأطراف.



شكل (٢,١٥) شكل تخطيطي لمجزئ جهد مع كابل تأخير وراسم ذبذبات

العناصر التالية تتسبب في الأخطاء المختلفة للقياسات:

١ -الحث المتبقي في عناصر المجزئ.

٢ -مكثفات التسرب الآتية:

أ -بين عناصر المجزئ.

ب -من أجزاء وأطراف العناصر للأرض.

ت -بين طرف توصيل الجهد العالي للعناصر أو الأجزاء.

٣ -أخطاء المعاوقات والتي تسببها:

أ -أطراف التوصيل بين المجزئ وعينة الاختبار.

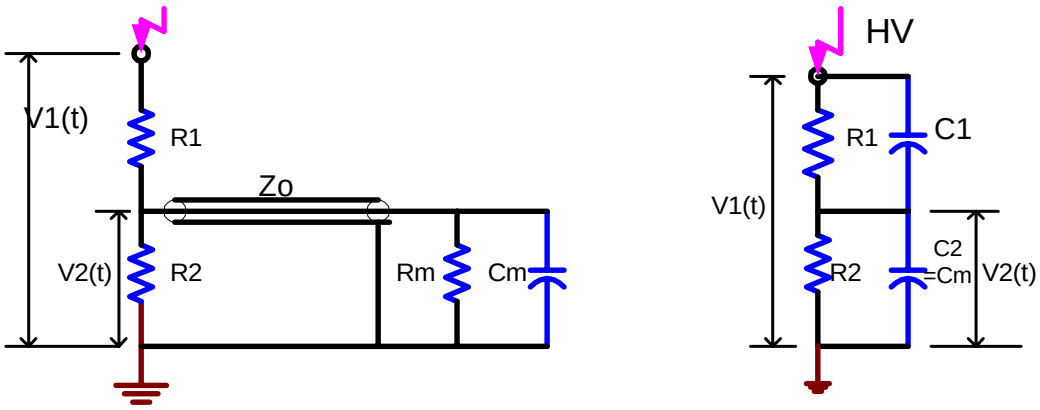
ب -أطراف الرجوع الأرضية والتيار الخارجي في أطراف التوصيل الأرضية.

٤ -الاهتزازات المتطفلة على الجهد الأصلي من خلال أطراف التوصيل وحث الكابل وسعة طرف الجهد العالي للأرض.

مجزئ الجهد باستخدام المقاومات لقياس الجهود الدفعية المنخفضة والنبضات ذات الارتفاع السريع للجهد

مجزئ الجهد البسيط باستخدام المقاومات يتكون من مقاومتين R_1 و R_2 على التوالي كما في شكل (٢,١٦) عامل التضعيف للمجزئ أو نسبة الجهد تعطى بالعلاقة الآتية:

$$a = \frac{V_1(t)}{V_2(t)} = 1 + \frac{R_1}{R_2} \qquad (٢,٢٠)$$



شكل (٢,١٦) مجزئ الجهد باستخدام المقاومات

عمليا يوصل عنصر المجزئ R_2 من خلال كابل محوري لراسم ذبذبات. معاوقة الدفعة للكابل Z_o تكون على التوازي مع معاوقة الدخل لراسم الذبذبات (R_m, C_m) وعادة ما تكون R_m أكبر من ١,٠ ميجاأوم و السعة C_m تتراوح بين ١٠ إلى ٥٠ بيكو فاراد. للترددات العالية والجهود الدفعية. النسبة في حيز التردد (frequency domain) تعطى بالعلاقة:

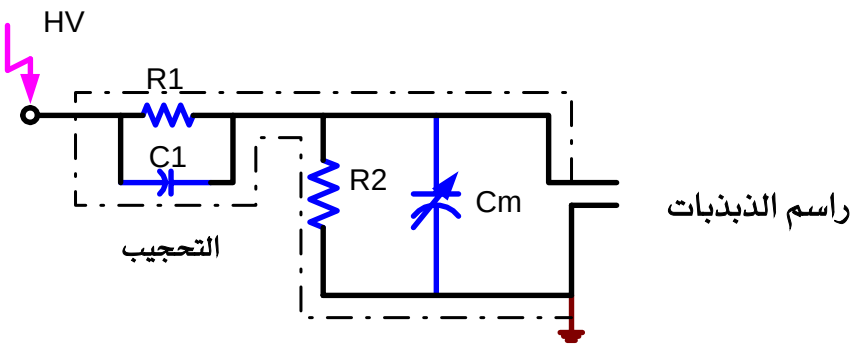
$$a = \frac{V_1}{V_2} = 1 + \frac{R_1}{R_2 /(1 + j\omega R_2 C_m)} \qquad (٢,٢١)$$

لذلك فإن النسبة دالة في التردد. لتجنب اعتادية نسبة الجهد a على التردد ، يضاف إلى المجزئ مكثف إضافي C_1 على التوازي مع R_1 وتجعل قيمة C_1 المجزئ غير معتمد على التردد ويمكن تحديد قيمة C_1 من العلاقة الآتية:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{C_1}{C_2} \qquad (٢,٢٢)$$

$$\text{i.e.} \quad R_1 C_1 = R_2 C_2$$

وهذا يعني أن الثابت الزمني لذراعي المجزئ لابد أن يكونا متساويين. مجس (probe) راسم الذبذبات عادة ما تضبط قيمة سعته بحيث تتضمنه قيمته C_m وكذلك تتضمن سعة الكابل المحوري. ويبين شكل (٢,١٧) رسماً تخطيطياً لدائرة مجس راسم الذبذبات.

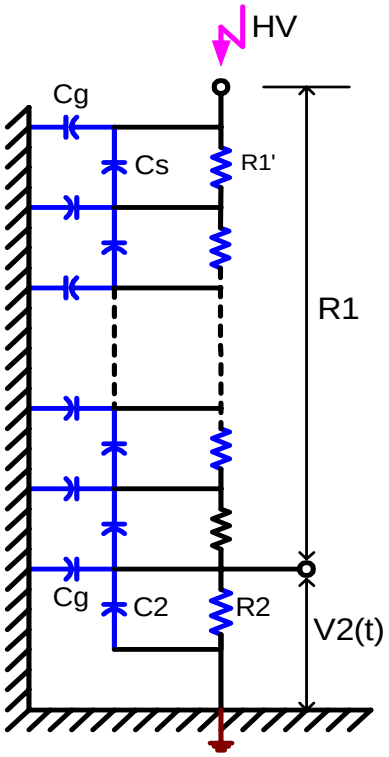


شكل (٢,١٧) رسم تخطيطي لدائرة مجس راسم ذبذبات لمجزئ جهد

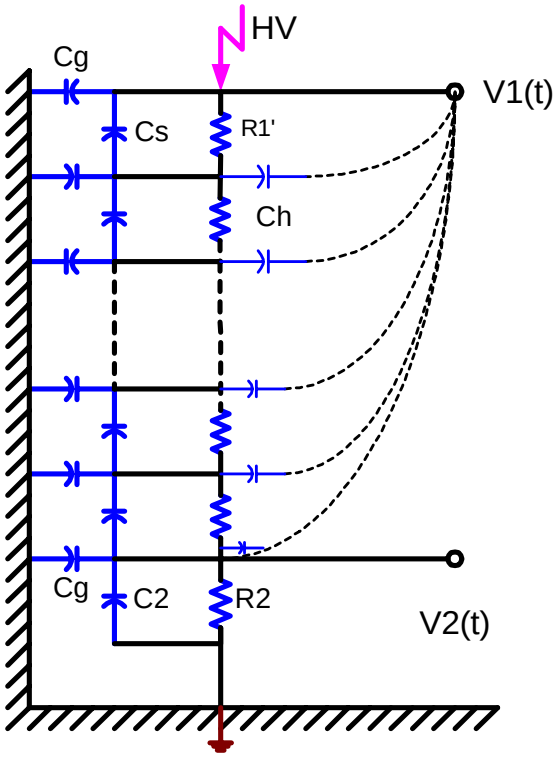
مجزءات الجهد المستخدمة في قياس الجهود النبضية (الدفعية) العالية

تعتبر R_1 و R_2 في مجزئات الجهد المستخدمة للمقاومات والتي تستخدم في قياس الجهود المنخفضة السابقة كمقاومات ذات أبعاد صغيرة. ولكن في حالة الجهود الأعلى من ١٠٠kV لم تعد R_1 صغيرة الأبعاد وتصنع عادة من عدد من المقاطع ولذلك لم يعد المجزئ الذي يستخدم في قياس الجهود العالية يعتبر كمقاومة صغيرة مجمعة العناصر ولكنه يعتبر كدائرة مكافئة موزعة مع وجود مكثفات التسريب والمكثفات بين العناصر على التوالي كما في شكل (٢,١٨).

المقاومة الكلية على التوالي R_1 تصنع من عدد n من المقاومات قيمة كل منها R_1' وقيمة المقاومة الكلية $R=nR_1'$ وتمثل C_g السعة بين طرف كل مقاومة والأرض و C_s السعة بين أطراف كل مقطع. حث كل عنصر عادة ما يكون صغيرا ويمكن إهماله بالمقارنة مع المقاومة والسعة. ويوضح شكل (٢,١٩) الدائرة المكافئة بوضع حلقة تحجيب عند مختلف نقاط العناصر حيث C_h تمثل سعة التسريب بين طرف الجهد العالي وحلقة التحجيب ووضع هذه الحلقة يقلل من التشوه الموجود في المجزئ العادي.



شكل (٢,١٨) مجزئ جهد باستخدام المقاومات مع مكثفات التسريب



شكل (٢,١٩) الدائرة المكافئة لمجزئ الجهد باستخدام المقاومات

مجزئ الجهد باستخدام المكثفات

مجزئ الجهد باستخدام المكثفات مثالي لقياس الجهود النبضية وكذلك لقياس الجهود ذات مقدمة الموجة السريعة. ولا تعتمد نسبة السعة على التردد إذا كانت مقاومة التسرب كبيرة بقيمة كافية لإهمالها. ولكن في نفس الوقت فإن المجزئ يتصل بالمصدر عن طريق طرف توصيل طويل له حث ومقاومة متبقية لابد من أخذهم في الاعتبار. وأيضا فإن المكثف المستخدم للجهد العالي تكون أبعاده كبيرة وبالتالي لا يعتبر كعناصر مجمعة (lumped element) ولذلك فإن الجهد الخارج على أطراف المجزئ للترددات العالية والجهود الدفعية يحدث بها تشوه كما في مجزئ الجهد باستخدام المقاومات.

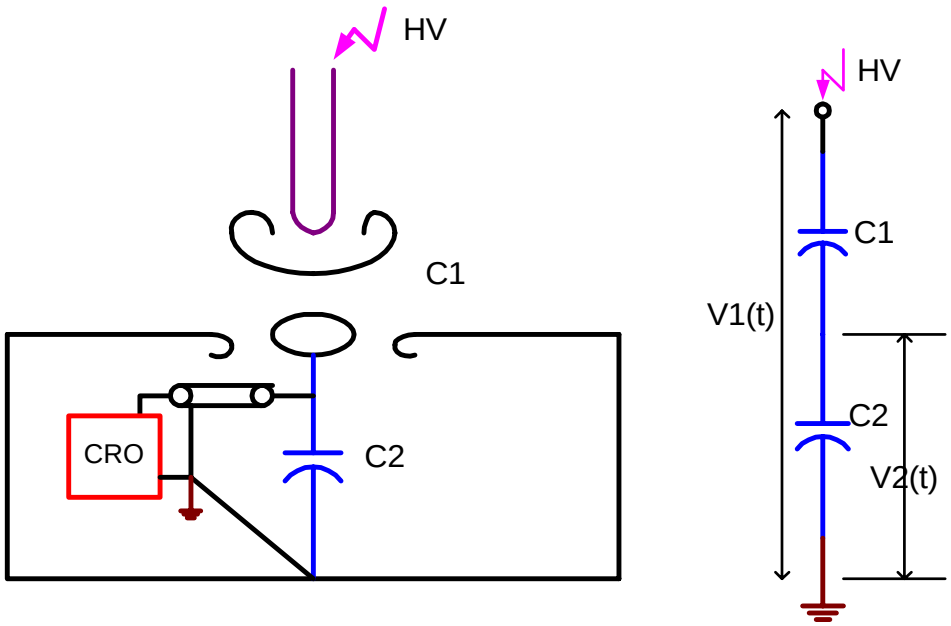
مجزئات الجهد باستخدام المكثفات النقية

تستخدم مجزئات الجهد باستخدام المكثفات النقية لقياس الجهود العالية وتهمل فيها قيمة عناصر التسريب كما في شكل (٢,٢٠). نسبة الجهد للمجزئ هي:

$$a = \frac{V_1(t)}{V_2(t)} = 1 + \frac{C_2}{C_1} \qquad (٢,٢٣)$$

وتتكون السعة C_1 بين طرف الجهد العالي للمصدر وطرف الجهد العالي للعينة تحت الاختبار أو أي نقطة أخرى للقياس. ويوضع راسم الذبذبات في محيط السعة المحجبة C_2 وتتضمن C_2 سعة المكثف المستخدم وسعة أطراف التوصيل وسعة الدخل لراسم الذبذبات والسعات الأخرى للأرض. من مميزات هذا التوصيل أن الحمل على المصدر يمكن إهماله ولكن نسبة الجهد للمجزئ يمكن أن تتأثر بأي تغيير في مكان C_2 أو مصدر الجهد العالي أو وجود أي أشياء مؤرضة قريبة من C_1.

تستخدم المكثفات المعزولة بالغاز المضغوط في وعاء أسطواني متحد المحور. يمكن الحصول على نسبة جهد دقيقة حتى ١٠٠٠:١ لجهد دفعي قيمته العظمى ٣٥٠ kV والحد الأعلى للتردد ١٠ MHz. وللجهود الأقل (حتى ١٠٠kV) يمكن الوصول بالحد الأعلى للتردد إلى ٢٠٠MHz.



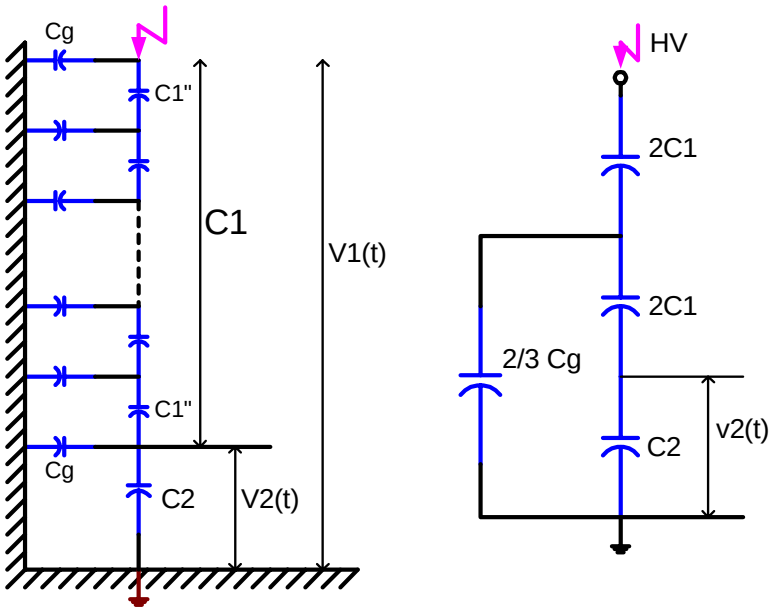
شكل (٢,٢٠) مجزئ جهد باستخدام المكثفات والدائرة المكافئة

نوع آخر من المجزءات باستعمال المكثفات ويستعمل غالبا بجعل C_1 تتكون من عدد من المكثفات C_1' على لتوالي للجهد المطلوب V_1 ويبين شكل (٢,٢١) مجزئ الجهد السعوي مع شبكة التوزيع ودائرتها المكافئة إذا كان $C_1 << C_2$ و $C_g << C_1$. توزيع الجهود على سلسلة المكثفات هو توزيع غير خطي ويتسبب في توزيع الموجة الخارجة لكن الخطأ في نسبة الجهد تكون ثابتة ولا تعتمد على التردد مقارنة بمجزئ الجهد المستخدم للمقاومات.

نسبة الجهد للمجزئ هي:

$$a = \frac{V_1(t)}{V_2(t)} \approx \left[1 + \frac{C_1}{C_2}\right]\left[1 + \frac{C_g}{6C_1}\right] \qquad (٢,٢٤)$$

النسبة ثابتة وتعطي نسبة خطأ أقل من ٥٪. تكون الدائرة المكافئة مستقرة تماما حتى ١MHz عندما تكون $C_1 = 3C_g$.



شكل (٢,٢١) مجزئ الجهد السعوي مع شبكة التوزيع ودائرتها المكافئة

مجزءات الجهد المختلطة

لتحسين أداء المجزءات وموجة الجهد الخارجة المقاسة وتقليل التشوه الناتج في موجة الجهد يصنع مجزئ الجهد مستخدما المقاومات والمكثفات بالإضافة إلى بعض أجهزة التعويض (compensated devices). وتعطي دائما خصائص التردد العالي لمجزئ الجهد كدالة في زمن الخرج (response time) . في تقنيات النبضة يعرف زمن الارتفاع في موجة التيار بأنه الوقت المطلوب لكمية التيار للارتفاع من ١٠٪ إلى ٩٠٪ من القيمة النهائية. ويوضح شكل (٢,٢٢) تعريف زمن الخرج. ويعرف زمن الخرج بالمساحة الداخلة بخرج جهد الوحدة للمجزئ أي أن:

$$T_{res} = \int_0^{\infty} [1 - h(t)]dt = T_1 - T_2 + T_3 - T_4 + ... \qquad (٢,٢٥)$$

حيث إن :

$$h(t) = \frac{aV_2(t)}{V_1}$$

a نسبة الجهد للمجزئ

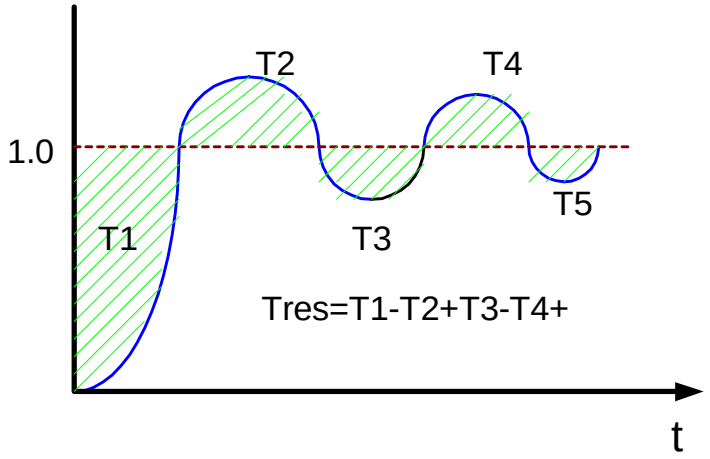
$V_٢(t)$ خرج المجزئ

$V_١$ جهد الوحدة الدخلة للمجزئ

ويستخدم زمن الخرج لحساب قيمة الخطأ التي تكون في قياسات الجهد الدفعي المقطع (chopped impulse voltage). القيمة النسبية للخطأ δ يعطى بالمعادلة الآتية:

$$\delta = \frac{T_{res}}{T_c} \qquad (٢,٢٦)$$

حيث إن T_c هو زمن القطع.



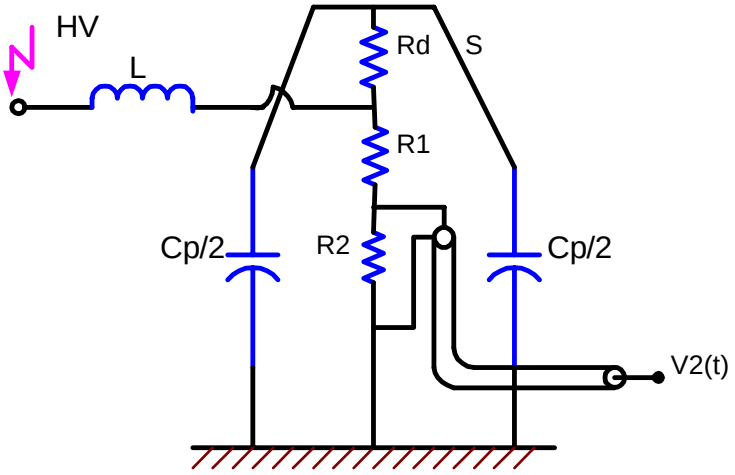
شكل (٢,٢٢) تعريف زمن الخرج

مجزءات الجهد المحكمة المجال الكهربائي

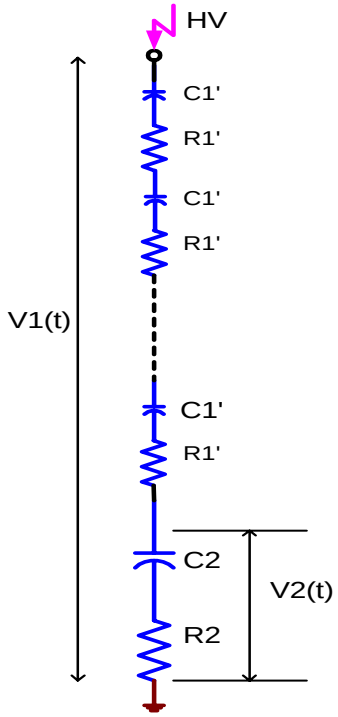
توزيع الجهد الكهروستاتيكي أو السعوي لحلقة التحجيب الموضوعة أعلى مجزئ الجهد باستخدام المقاومات لدفع المجال الكهربائي ليصبح منتظما بجوارها وعلى طول المجزئ يمكن استخدامه لقياس الجهد العالي. ويوضح شكل (٢,٢٣) الرسم التخطيطي للمجزئ. يكون التحجيب على هيئة مخروط، $R_١$ هي مقاومة غير خطية وفي نفس الوقت فإن المقاومة لكل وحدة طول غير متساوية ولكنها متغيرة. الميزة الرئيسية لهذا المجزئ هي أن السعة لكل وحدة طول تكون صغيرة ولذلك فإن تأثير التحميل يقل وأحيانا فإن المقاومة $R_٢$ مع حث الطرف وسعات التوازي تتسبب في حدوث اهتزازات في الجهد الخارج. وهذه الاهتزازات يمكن تخفيضها بإضافة مقاومة إخماد R_d (damping resistance). يمكن استخدام هذا المجزئ حتى جهد ٢ ميجافولت بزمن خرج أقل من ٣٠ نانوثانية. يصنع عمود المقاومات $R_١$ من المحاكة وقيمتها تكون حوالي ٢٠ كيلوأوم.

مجزءات الجهد المختلطة R-C

تستعمل مجزئات الجهد المختلطة العناصر(مقاومات ومكثفات) على التوالي أو على التوازي. مجزئ الجهد المستخدم لمكثفات على التوازي مع كل عنصر مقاومة $R_١'$ يوظف بنجاح للجهود الدفعية ≤ ٢ ميغافولت. التركيب الأفضل للمجزئ هو بجعل المكثفات على التوالي مع عناصر المقاومة، كما في شكل (٢,٢٤) ويستخدم هذا لمجزئ حتى جهد ٥ ميجافولت بزمن خرج أقل من ٣٠ نانوثانية.



شكل (٢,٢٣) مجزئات الجهد المحكمة المجال الكهربائي مع مقاومة إخماد



شكل (٢,٢٤) الدائرة المكافئة لمجزئ جهد بمكثفات توازي مع عناصر المقاومة

تقنية الجهد العالي

عوازل خطوط النقل الهوائية

جميع الحقوق محفوظة للمؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني

مقدمة(١□٣)

لمنع تسرب التيار الكهربائي للأرض من نقاط تثبيت خطوط النقل أو التوزيع الكهربائية فإن كل هذه النقاط يجب تأمينها باستخدام عوازل صلبة بين الخطوط الكهربائية وأجسام الأبراج الحاملة لها. لذلك فإن العوازل الكهربائية الصلبة تلعب دورا هاما وحيويا في التشغيل الآمن والناجح لخطوط النقل والتوزيع. المتطلبات الرئيسية للعوازل هي:

(ا) لابد أن تكون قوية جدا ميكانيكيا.

(ب) يجب أن تكون شدة العزل لها عالية جدا.

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

(ث) خالية تماما من الشوائب أو الشروخ الداخلية.

(ج) يجب أن تكون غير مسامية.

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

(خ) لا تتأثر بتغير درجة الحرارة المحيطة.

(د) أن تكون المادة العازلة مقاومة للانهيار الداخلي (puncture) و كذلك لانهيار السطح الكهربائي (flashover).

وباستعراض أسباب انهيار العوازل الهوائية الكهربائية، نجد أن السطح هو المسبب الرئيسي لانهيار تلك العوازل. ويمكن أن يحدث هذا الانهيار بين الموصلات الكهربائية لخطوط النقل والأرض (التي هي عبارة عن البرج المعدني الحامل لخطوط النقل) - أي بين الموصل ومسمار ربط العازل - ، كما يحدث نتيجة للحرارة العالية جدا الناتجة عن الشرارة الكهربائية.

(٢□٣) مواد العوازل الكهربائية

البورسلين (الخزف) هو المادة شائعة الاستعمال لكن بالإضافة للبورسلين يستخدم الزجاج الملدن و الاسيتايت كما تستخدم أيضاً العوازل المصنوعة من اللدائن البيتروكيميائية. وسنستعرض عوازل البورسلين والزجاج الملدن والأسيتايت نظراً لكثرة استخدامها مقارنة بعوازل اللدائن، وخاصة في المملكة.

(أ) **عوازل البورسلين**: يصنع البورسلين من الطينة الصينية والتي تنتج في الطبيعة في صورة سيليكات الألومنيوم وتخلط مع مادة الكاولين البلاستيكية ومادة الكوارتز ويسخن الخليط داخل قمينة لدرجة الحرارة المطلوبة. والعازل الناتج يكون صلباً وناعماً ومصقولاً وخالياً من المسامية، ولصقل مادة العازل

يجب أن يكون السطح خالياً من أي ندى أو قطرات مائية. ومسامية مادة العازل تقلل من شدة عزله كما أن الشوائب والفقاعات الغازية داخل المادة تتسبب في تقليل شدة العزل وبصورة كبيرة.

تصنيع مادة العازل عند درجة حرارة منخفضة يحسن من خصائصها الميكانيكية ولكن المادة تصبح مسامية مما ينعكس سلباً على تقليل شدة العزل. وعند تصنيعها في درجات الحرارة العالية جدا تقل مسامية المادة ولكن خواصها الميكانيكية تضعف و تصبح قابلة للكسر، لذلك يتم اختيار درجة الحرارة المناسبة للتوازن بين القوة الميكانيكية المطلوبة ومسامية المادة والتي تؤثر على شدة العزل الكهربائي. عازل البورسلين المستعمل تكون شدة عزله (شدة المجال الكهربائي التي يتحملها العازل دون انهيار) في حدود ٦٠ كيلو فولت/سم وقوة الضغط والشد الميكانيكي له في حدود ٧٠,٠٠٠ كيلو جرام/سم^{٢} و ٥٠٠ كيلو جرام/سم^{٢}.

(ب) **العوازل الزجاجية**: العوازل الزجاجية تستخدم في عمليات العزل الكهربائي حتى الجهود المتوسطة. ويصبح الزجاج قاسيا بتقسية المادة حرارياً (annealing) ويكون له المميزات التالية:

(١) شدة عزل عالية جدا في حدود ١٤٠ كيلو فولت/سم من سمك المادة.

(٢) يصبح للمادة مقاومية عالية جدا عندما تتقسى جيدا.

(٣) يكون له معامل تمدد حراري منخفض.

(٤) يكون تصميم العازل الزجاجي بسيطاً عندما يتطلب الجهد المطبق عبر العازل شدة عزل عالية ويمكن استخدام قطعة عزل واحدة تفي بالغرض.

(٥) له شدة ضغط ميكانيكي عالية مقارنة بعازل البورسلين.

(٦) عازل شفاف مما يجعل رؤية أي شوائب أو فقاعات غازية أو شروخ ممكنة بالعين المجردة في معظم الأحيان.

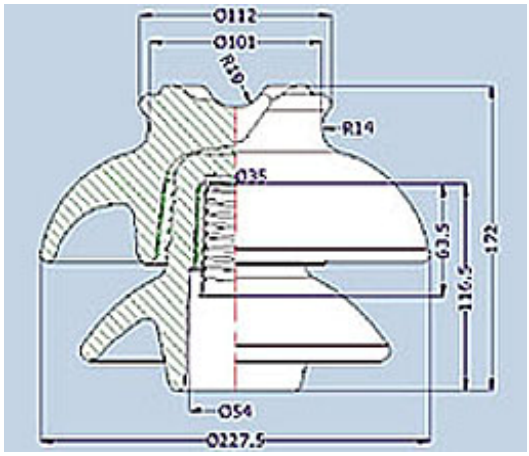
(٧) مادة متجانسة جدا.

(٨) رخيص السعر مقارنة بالبورسلين.

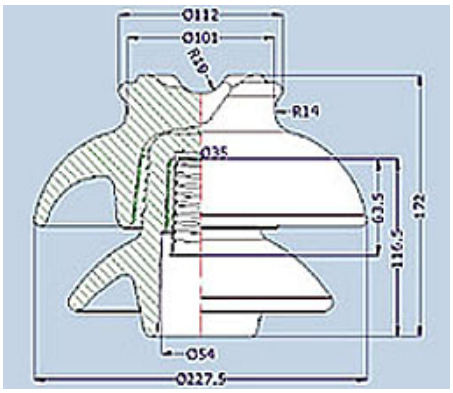
(ت) عوازل الاسيتايت: الاسيتايت هو سيليكات الماغنسيوم الموجودة بنسب مختلفة لأكسيد الماغنسيوم والسيليكا في أجزاء كثيرة من العالم. وللاسيتايت قوة شد ميكانيكية عالية بالمقارنة بعازل البورسلين ويمكن استعمالها بكفاءة في أبراج الشد والتي تكون عند الدورانات الحادة للخط الكهربائي.

(٣-٣) العوازل المسمارية Pin type insulator

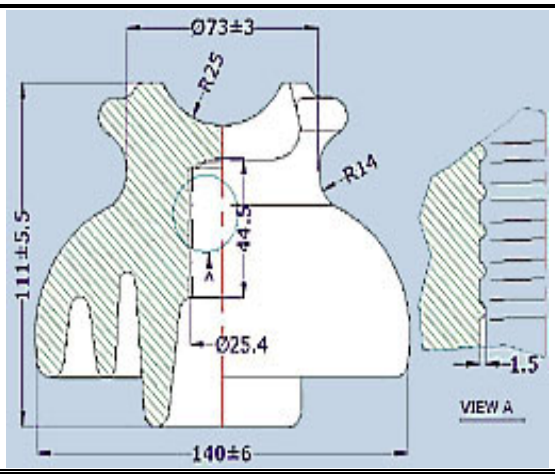
إن تصميم هذا النوع من العوازل والمستخدم لتثبيت موصلات الخط قديم جداً. ومنذ ذلك الحين أدخلت الكثير من التعديلات في تصميمها ولكن مظهرها العام لم يتغير. ويستخدم عادةً في الجهود المنخفضة قطعة واحدة من العازل، ويوضح شكل (٣,١) قطعتين من العازل ومسار التسرب على سطح العازل. .ولزيادة طول مسار التسرب يتم عمل مظلة (تجويف) أمطار واحدة أو اثنتين أو ثلاثة بالعازل. وتصمم هذه المظلات بحيث تطول المسافة أو المسار بين خط النقل الذي يعمل على جهد عالٍ والأرض، كما توفر هذه المظلات مناطق جافة كافية لمنع سطح العازل من التوصيل الكهربائي عندما تتبلل العوازل، ويساعد في ذلك السطح الداخلي للمظلات.



شكل (٣,١a) قطعة عازل مسماري جهد ٢٥ كيلو فولت



شكل (٣,١a) قطعة عازل مسماري - جهد ٢٥ كيلو فولت.



شكل (٣,١b) قطعة عازل مسماري جهد ١١ كيلو فولت

شكل (٣,١c) مسمار تثبيت من الحديد المجلفن

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

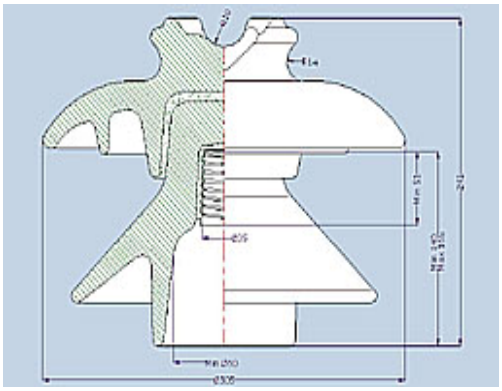
هناك العديد من الطرق لربط العازل بمسمار القلاووظ وهي:

(أ) يكون العازل له قلوظة خشنة وكذلك المسمار وتوضع وردة مع المسمار في الأعلى.

(ب) عازل البورسلين به قلوظة خشنة ولكنها تبطن بمادة ناعمة والتي يدخل بها مسمار القلاووظ وهي الطريقة التي غالبا ما تستعمل.

(ت) القلاووظ الخشن لعازل البورسلين الداخلي يربط بالمسمار الحديدي مع رأس مصفحة بالرصاص.

تزداد سمك المادة المطلوبة لأغراض العزل عند الجهود العالية ولكن من وجهة النظر العملية لا نستطيع زيادة السمك زيادة مطلقة ولذلك نستخدم أجزاء متعددة من العازل المسماري عند الجهود العالية. لذلك فعند الجهود العالية يمكننا استخدام العازل المسماري ذي الأجزاء المتعددة والمربوطة ببعضها باستخدام الأسمنت البورتلاندي. ويوضح شكل (٣,٢) أحد العوازل متعددة الأجزاء والتي يمكن استخدامها عند جهد ٣٣ كيلو فولت.



شكل (٣,٢) عازل مسماري من جزئين جهد ٣٣ ك ف

(٤-٣) عوازل التعليق Suspension type insulator

مع زيادة الجهد يصبح العازل المسماري ثقيلاً ومعقداً في التركيب وتزداد تكلفته وأيضا يكون تغيير القطع التالفة مكلفاً جدا لذلك يكون استخدام العازل المسماري غير اقتصادي للجهود الأعلى. فعند الجهود المرتفعة تستخدم عوازل التعليق ويربط عدد منها على التوالي برابط معدني لتكوين سلسلة وتعلق موصلات الخط الكهربائي في نهاية سلسلة العوازل.

ومن مميزات عوازل التعليق مايلي::

(١) تصمم كل وحدة من عوازل التعليق لتتحمل جهد ١١ ك ف، لذلك فبتوصيل عدد من الوحدات تتكون سلسلة العوازل والتي يمكن تصميمها لتتحمل أي جهد مطلوب.

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

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

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

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

ويوجد ثلاثة أنواع من عوازل التعليق هي:

(أ) النوع المنحوت لعوازل التعليق

وهو من أقدم التصميمات في عوازل التعليق ويتكون من أقراص البورسلين. ويتكون الجزء المركزي العلوي للعازل من نفقين منحنيين ومستوى النفقين متعامدين على بعضهما ويمر رابط على شكل حرف u من الرصاص المغطي بالصلب داخل النفقين ويربط أسفل الوحدة الأولى من العازل مع الوحدة التي تليها..وهكذا. ومميزات هذا النوع من العوازل هي:

١ -بساطة تصميمها

٢ -لا تتطلب اسم نت أو ما شابه.

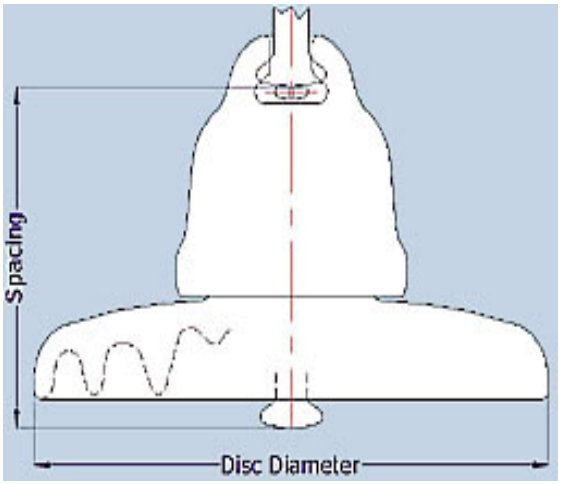
٣ -البورسلين الموجود بين النفقين تحت قوة ضغط فقط وتوفر شدة ميكانيكية للعازل.

٤ -عند كسر عازل البورسلين في أي حادث فإن موصلات الخط لا تسقط.

العيب الوحيد لهذا النوع هو أن البورسلين الموجود بين الروابط يكون تحت تأثير إجهاد الكترو ستاتيكي قوي والذي بسببه يمكن أن يكون قابلا للانهيار الكهربائي.

(ب) النوع المستخدم للغطاء الأسمنتي

يتكون أيضا من أقراص البورسلين التي تجوف من الأسفل لزيادة مسافة الانهيار السطحي للعازل flashover distance وعلى أعلى العازل يوجد غطاء من الحديد الزهر المملوء بالأسمنت وفي تجاويف العازل مسمار من الصلب المجلفن. طرف مسمار الصلب يثبت في تجويف الغطاء الصلب للعازل الذي يليه وتكون رابطة الكرة والتجويف. العيب الرئيسي لهذا النوع من العوازل هو أن التمدد التكعيبي (الثلاثي) للمواد الثلاثة الحديد والبورسلين والأسمنت مختلف ولا يوجد احتياط لتمددها وبذلك يمكن أن ينهار العازل.ويبين شكل (٣,٣) وحدة من النوع المستخدم للغطاء الأسمنتي والمستخدمة بكثرة لتعليق موصلات خطوط النقل الكهربائية.



شكل (٣,٣) وحدة عازل تعليق لخطوط النقل الكهربائي

(ت) العوازل ذات وصلات الربط والقلب

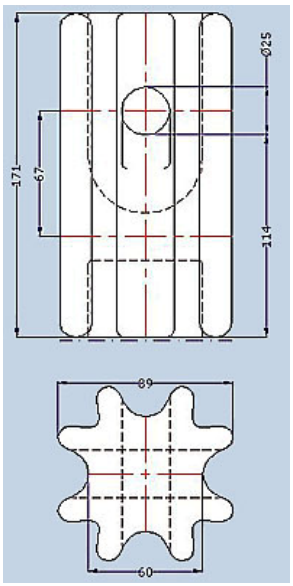
هي مزيج من النوعين السابقين ولذلك يتميز هذا العازل بأنه يجمع مميزات كل منهما. وفي هذا النوع من العوازل كل قرص عازل يوضع متماثلا ويتطابق مع خطوط الألكترو ستاتيكية. وتشكل الروابط كأسطوانات معدنية مضغوطة لربطهم على البورسلين. وبهذا التنسيق يتم تجنب الإجهادات الميكانيكية العالية الناتجة عن تغيرات درجات الحرارة. وهذا العازل يسمح لأقراص البورسلين لتشكل من السمك المناسب للعازل ولذلك يسمح للعازل بأن يتكون من قرص واحد فقط. والميزة الكبيرة لهذا العازل هو توفر شدة عزل عالية High puncture strength.

(٣-٥) عوازل الإجهاد

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

(٣-٦) عوازل الدعم

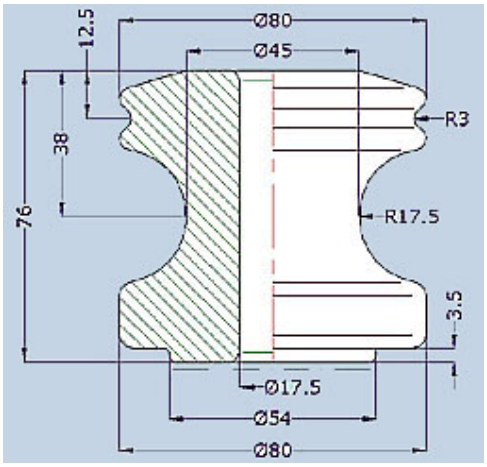
في الجهود المنخفضة تعزل شدات الأسلاك عن الأرض على ارتفاع أكبر من ١٣ متر عن الأرض ويسمى العازل المستخدم في سلك الشد عازل الدعم ويكون غالبا من البورسلين ويصمم بحيث إنه في حالة انهيار العازل لا يسقط سلك التثبيت على الأرض.



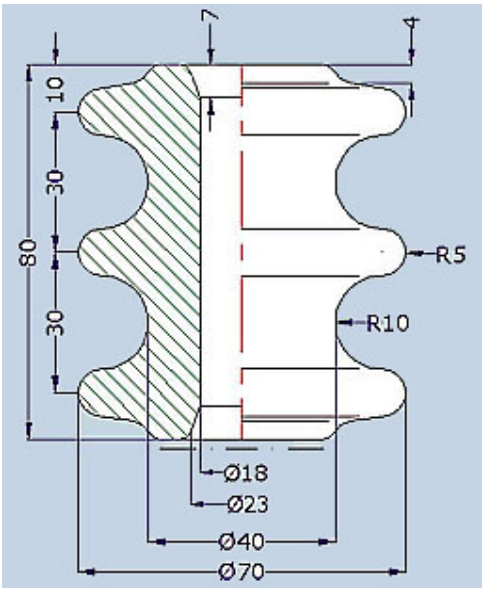
شكل (٣,٤) عوازل الدعم

(٣-٧) عوازل البكرة أو القيد

وتستخدم عادة في خطوط التوزيع الكهربائية ذات الجهود المنخفضة وتستخدم مثل هذه العوازل في الوضع الأفقي أو الوضع الرأسي. وتثبت الموصلات الكهربائية للخط الكهربائي في تجويف العازل بمساعدة سلك ناعم مرن.



شكل (٣,٥a) عوازل البكرة من طبقة واحدة



شكل (٣,٥b) عوازل البكرة من طبقتين

(٣□٨) انهيار عوازل خطوط النقل

أسباب انهيار العوازل هي:

١ - كسر العازل: السبب الرئيسي لكسر العازل هو الإجهادات الناتجة في عازل البورسلين من خلال التمدد غير المتساوي و الانكماش الناتج في الأسمنت والبورسلين والصلب والذي يتسبب فيه الحرارة الموسمية والبرودة والجفاف وتسخين العازل. ولتجنب مثل هذا الكسر أدخلت تحسينات كثيرة على العازل أحيانا بوضع وسادة بين الطبقات ومسمار التثبيت الصلب للسماح بمثل ذلك التمدد.

٢ -عيوب مادة العزل: إذا كان بمادة العزل أي عيب، مثل وجود فراغات أو وجود شوائب، بأي مكان بها فإن هذا العيب يؤدي لكسر هذا العازل.

٣ - مسامية مادة العزل: لو صنعت مادة البورسلين للعازل تحت درجات حرارة منخفضة فإن البورسلين يصبح مساميا ونتيجة لهذا يمتص البورسلين الرطوبة من الهواء ومن الأسمنت وتقل بصورة خطيرة شدة عزله ويبدأ تيار التسريب في السريان خلال العازل مما يؤدي لانهيار المادة العازلة.

٤ -الصقل غير الكافي: إذا لم يتم صقل العازل بصورة كافية فإن الماء المتبقي على سطح العازل نتيجة الأمطار أو الندى يمكن أن يؤدي لتراكم الغبار على السطح مكونا مناطق موصلة كهربائيا تتسبب في خفض مسافة شرارة السطح للعازل والتي تتسبب في انهيار العازل.

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

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

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

(٩□٣) توزيع الجهد على سلسلة العوازل المعلقة

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

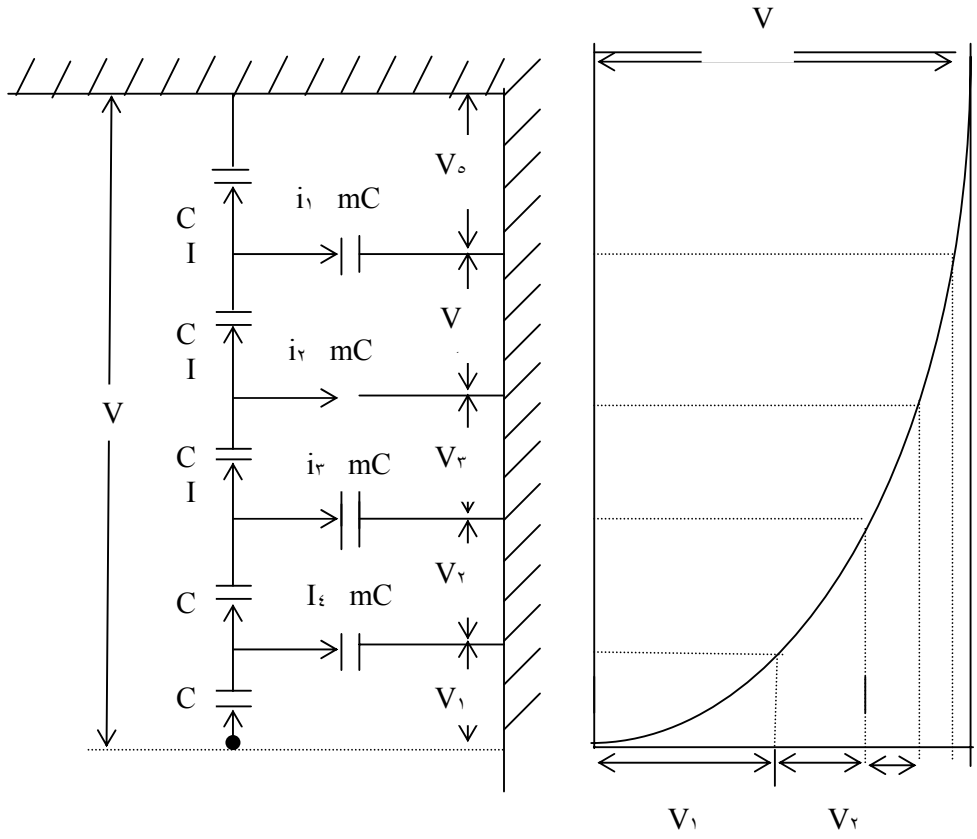
بفرض أن m = (السعة للأرض / السعة المتبادلة) (١)

فإن m = (السعة للأرض / C)

السعة للأرض = mC فاراد (٢)

∴ مفاعلة المكثف التبادلي = (١/ωC) (٣)

∴ مفاعلة المكثف للأرض = (١/ωmC) (٤)



شكل (٣,٦) توزيع الجهود على وحدات سلسلة العوازل

نفترض أن الجهد الواقع على وحدة العازل العلوي هو V_1 فإن قيمتا التيارين I_1 ، i_1 هما:

$$\therefore \quad I_1 = [V_1/(1/\omega C)] = V_1\omega C \qquad (٥)$$

$$\therefore \quad i_1 = [V_1/(1/\omega mC)] = V_1\omega mC \qquad (٦)$$

$$\therefore \quad I_2 = I_1 + i_1 \qquad (٧)$$

وبالتعويض عن قيمتي I_1 و i_1 من المعادلتين (٥) و (٦) في المعادلة (٧)

$$\therefore I_2 = V_1\omega C + mV_1\omega C = V_1\omega C(1+m) \qquad (٨)$$

$$\therefore \quad V_2 = I_2/\omega C \qquad (٩)$$

في ضوء المعادلتين (٨) و (٩) فإن:

$$\therefore V_2 = V_1\omega C(1+m) / \omega C = V_1(1+m) \qquad (١٠)$$

$$\therefore i_2 = (V_1+V_2)/(1/\omega mC) \qquad (١١)$$

وبالتعويض من المعادلة (١٠) في المعادلة (١٢)

$$\therefore i_2 = m[V_1+(1+m)V_1]\omega C = mV_1\omega C(2+m) \qquad (١٢)$$

$$I_٣ = I_٢ + i_٢ \qquad (١٣)$$

بالتعويض من المعادلتين (٨) و (١٢) في المعادلة (١٣)

$$I_٣ = V_١\omega C(١+m)+mV_١\omega C(٢+m) = V_١\omega C(١+٣m+m^٢) \qquad (١٤)$$

$$V_٣ = I_٣ / \omega C \qquad (١٥)$$

وفي ضوء المعادلتين (١٤) و (١٥) فإن

$$V_٣ = V_١ (١ + ٣m + m^٢) \qquad (١٦)$$

$$I_٣ = (V_١+V_٢+V_٣)/(١/\omega mC) \qquad (١٧)$$

وفي ضوء المعادلتين (١٠) و (١٦) يمكن إعادة كتابة المعادلة (١٧) كما يلي:

$$i_٣ = m\,(V_١+V_٢+V_٣)\omega C$$
$$=m[V_١+(١+m)V_١+(١+٣m+m^٢)V_١]\omega C$$
$$= mV_١\omega C(٣+٤m+m^٢) \qquad (١٨)$$

$$I_٤ = I_٣ + i_٣ \qquad (١٩)$$

بالتعويض من المعادلتين (١٤) و (١٨) في المعادلة (١٩)

$$I_٤ = V_١\omega C(١+٣m+m^٢)+mV_١\omega C(٣+٤m+m^٢)$$
$$= V_١\,\omega C(١+٦m+٥m^٢+m^٣) \qquad (٢٠)$$

$$V_٤ = I_٤ / \omega C \qquad (٢١)$$

وفي ضوء المعادلتين (٢٠) و (٢١) فإن

$$V_٤=V_١(١+٦m+٥m^٢+m^٣) \qquad (٢٢)$$

$$i_٤=(V_١+V_٢+V_٣+V_٤)/(١/\omega mC) \qquad (٢٣)$$

في ضوء المعادلتين (١٠) و (١٦) و(٢٢) يمكن إعادة كتابة المعادلة (٢٣) كما يلي:

$$i_٤=m[V_١+(١+m)V_١+(١+٣m+m^٢)V_١+(١+٦m+٥m^٢+m^٣)V_١]\omega C$$
$$=mV_١\omega C(٤+١٠m+٦m^٢+m^٣) \qquad (٢٤)$$

$$I_٥ = I_٤ + i_٤ \qquad (٢٥)$$

بالتعويض من المعادلتين (٢٠) و (٢٤) في المعادلة (٢٥)

$$I_٥=V_١\omega C(١+٦m+٥m^٢+m^٣)+mV_١\omega C(٤+١٠m+٦m^٢+m^٣)$$
$$=V_١\omega C(١+١٠m+١٥m^٢+٧m^٣+m^٤) \qquad (٢٦)$$

$$V_٥=I_٥/\omega C \qquad (٢٧)$$

و في ضوء المعادلتين (٢٦) و (٢٧)

$$V_5=V_1(1+10m+15m^2+7m^3+m^4) \quad (28)$$

$$V=V_1+V_2+V_3+V_4+V_5 \quad (29)$$

بالتعويض من المعادلات (١٠) و (١٦) و (٢٢) و (٢٨) في المعادلة (٢٩)

$$V=V_1+(1+m)V_1+(1+3m+m^2)V_1+(1+6m+5m^3+m^3)V_1+(1+10m+15m^2+7m^3+m^4)V_1$$

$$\therefore V = V_1(5+20m+21m^2+8m^3+m^4) \quad (30)$$

مثال : بفرض أن $m=0,1$

إذاً من المعادلة (٣٠) $V=V_1(5+2+0,21+0,008+0,0001)=7,2181V_1$

$$\therefore V_1=0,1386V$$

ومن المعادلة (١٠) $V_2=V_1(1+m)$

$$=0,1386x1,1V$$

$$= 0,15246V$$

ومن المعادلة (١٦) $V_3=V_1(1+3m+m^2)$

$$=V_1(1+0,3+0,01)$$

$$=0,1386x1,31V = 0,1815V$$

ومن المعادلة (٢٢) $V_4=V_1(1+6m+5m^2+m^3)$

$$= V_1(1+0,6+0,05+0,001)$$

$$= 0,1386x1,651V = 0,2288V$$

ومن المعادلة (٢٧) $V_5=V_1(1+10m+15m^2+7m^3+m^4)$

$$=V_1(1+1+0,15+0,007+0,0001)$$

$$=0,1386x2,1571V = 0,2987V$$

(١٠-٣) كفاءة السلسلة

وحدة العازل في السلسلة المجاورة للموصل الكهربائي يقع عليها أكبر فرق جهد وبالتالي فهي معرضة للإجهاد الكهربائي العالي والذي يمكن أن يؤدي إلى انهيارها. كفاءة السلسلة هي النسبة بين الجهد الكلي الواقع على السلسلة وعدد الوحدات (n) مضروبا في الجهد الواقع على الوحدة الأولى المجاورة للموصل الكهربائي.

كفاءة السلسلة = (الجهد الواقع على السلسلة) / (n x الجهد الواقع على وحدة العازل المجاورة للموصل الكهربائي)

(١١-٣) طرق زيادة كفاءة السلسلة

(١) **تقليل قيمة m** : بالنظر في المعادلات (١٠) و (١٦) و (٢٢) و (٢٨) نلاحظ أنه عندما تقترب قيمة m إلى الصفر فإن الجهد على وحدات العازل تتساوى تقريبا. لذلك لكي نقلل السعة للأرض فإن المسافة بين سلسلة العوازل و البرج المعدني لابد أن تزيد أو بتعبير آخر نزيد طول ذراع البرج. لكن هناك حدود لزيادة ذراع البرج لذلك فإن هذه الطريقة غير عملية.

(٢) **بتدرج العوازل** : إذا قمنا بتدرج في قيم السعة التبادلية للعوازل بحيث تكون الوحدة العليا في سلسلة العوازل لها أقل سعة والسعة التبادلية للوحدة السفلى لها أكبر سعة فيمكن بالتالي أن نساوي الجهود على وحدات السلسلة.

نفترض أن C هي سعة الوحدة العليا وأن سعات الوحدات الأخرى C_2 و C_3 و C_4 .

m = (السعة للأرض / سعة الوحدة العليا)

السعة للأرض = mC (٣١)

نفترض أن V' هو الجهد الموجود على كل وحدة من وحدات السلسلة

$$I_1 = V' \omega C \quad (٣٢)$$

$$i_1 = m V' \omega C \quad (٣٣)$$

$$I_2 = I_1 + i_1 \quad (٣٤)$$

في ضوء المعادلات (٣٢) و (٣٣) و (٣٤) نستطيع كتابة المعادلة الآتية:

$$I_2 = V'\omega C + mV'\omega C$$

$$= V'\omega C(1+m) \quad (٣٥)$$

وبفرض أن الجهد على الوحدة الثانية هو V' فإن:

$$V' = I_2/\omega C_2 \quad (٣٦)$$

في ضوء المعادلات (٣٥) و (٣٦) نجد أن :

$$V' = V'\omega C(1+m)/\omega C_2 \quad (٣٧)$$

أو

$$C_2 = C(1+m) \quad (٣٨)$$

$$i_2 = 2V_1/(1/m\omega C)$$

$$= m2V'\omega C \quad (٣٩)$$

$$I_3 = I_2 + i_2 \quad (٤٠)$$

وفي ضوء المعادلات (٣٥) و (٣٩) و (٤٠) نجد أن :

$$I_3 = V'\omega C(1+m) + m2V'\omega C$$

$$= V'\omega C(١+m+٢m)$$

$$= V'\omega C(١+٣m) \quad (٤١)$$

ومرة أخرى $$V' = I_٣ / \omega C_٣ \quad (٤٢)$$

وبالتعويض عن قيمة $I_٣$ من المعادلة (٤١) في المعادلة (٤٢) فإن

$$V' = V'\omega C(١+٣m)/\omega C_٣$$

أو $$C_٣ = C(١+٣m) \quad (٤٣)$$

$$i_٣ = ٣V'/(١/m\omega C)$$

$$= m٣V'\omega C \quad (٤٤)$$

$$I_٤ = I_٣ + i_٣ \quad (٤٥)$$

و في ضوء المعادلات (٤١) و (٤٤) نجد أن :

$$I_٤ = V'\omega C(١+٣m)+m٣V'\omega C$$

$$= V' \omega C(١+٦m) \quad (٤٦)$$

$$V' = I_٤ / \omega C_٤ \quad (٤٧)$$

بالتعويض بقيمة $I_٤$ من المعادلة (٤٦) في المعادلة (٤٧) نجد أن :

$$V' = V'\omega C(١+٦m)/\omega C_٤$$

أو $$C_٤ = C(١+٦m) \quad (٤٨)$$

لذلك فمن المحتمل مساواة الجهود الواقعة على وحدات سلسلة العوازل لو أن سعات هذه الوحدات متناسبة كالتالي:

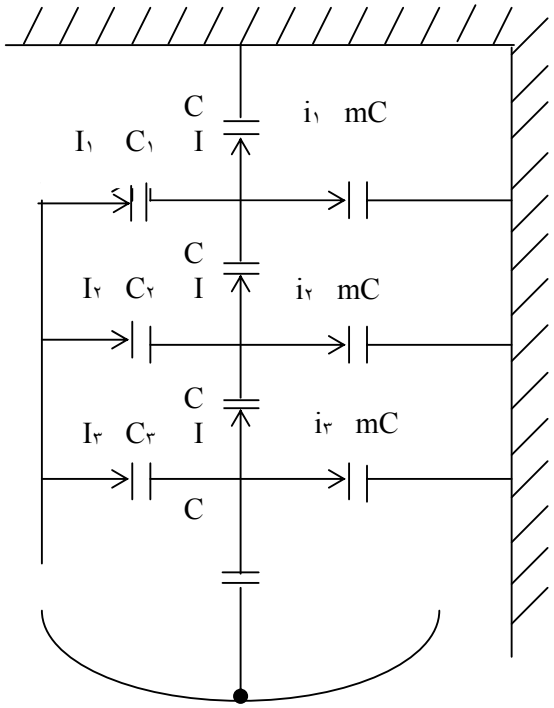
١: (١+m) : (١+٣m) : (١+٦m)..... وهكذا

ولكن هنالك صعوبة كبيرة للحصول على مثل تلك الوحدات والتي لها سعات بهذه النسبة ولهذا فإن النتيجة القريبة التي يمكن الحصول عليها هي استعمال وحدات عوازل قياسية لأغلب الوحدات وتستعمل أكبر وحدة ملاصقة لخط النقل الكهربائي.

(٣) استخدام حلقة الحماية (guard ring) :

يمكن مساواة الجهد الواقع على وحدات العوازل بالسلسلة باستخدام حلقة الحماية وهي حلقة معدنية لها قطر كبير وتوصل بخط النقل الكهربائي وتحيط بالوحدة السفلى من سلسلة العوازل. وهذه الحلقة تزيد سعة المكثفات بين الروابط المعدنية بالسلسلة و الخط الكهربائي والتي أهملت سابقا.

بفرض أن هناك سلسلة مكونة من أربع وحدات عازلة حيث C هي سعة كل وحدة. والسعة بين الروابط المعدنية والحلقة هي C_1 و C_2 و C_3 و بفرض أن V هو الجهد الواقع على كل وحدة من وحدات السلسلة وحيث إن سعات وحدات السلسلة متساوية فإن تيار الشحن I سيكون أيضا متساويا .



شكل (٣,٧) استخدام حلقة الحماية لمساواة الجهود على وحدات السلسلة العازلة

تيار الشحن للوحدة رقم (٢) يساوي I عند نقطة التفريع الأولى وبالتالي فإن :

$$I = I + i_1 - I_1 \qquad (٤٩)$$

$$\therefore i_1 = I_1 \qquad (٥٠)$$

وبالمثل فإن: $i_2 = I_2$ (٥١)

$$i_3 = I_3 \qquad (٥٢)$$

$$i_1 = V/(1/\omega mC)$$

$$= mV\omega C \qquad (٥٣)$$

الجهد الذي يتسبب في مرور التيار I_1 هو $3V$ الواقع على الوحدة الأولى

أيضا فإن $I_1=3V/(1/\omega C_1)$

$$= 3V\omega C_1 \qquad (٥٤)$$

لذلك فإنه في ضوء المعادلات (٥٠) و (٥٣) و (٥٤)

$$3V\omega C_1 = mV\omega C$$

أو $$C_1=mC/3 \qquad (٥٥)$$

$$I_2 = 2V/(1/\omega C_2) = 2V\omega C_2 \qquad (٥٦)$$

$$I_2 = 2V/(1/\omega mC) = 2mV\omega C \qquad (٥٧)$$

وفي ضوء المعادلات (٥١) و (٥٦) و (٥٧) فإن :

$$2V\omega C_2 = 2mV\omega C$$

$$C_2= mC \qquad (٥٨)$$

$$I_3 = v/(1/\omega C_3) = V\omega C_3 \qquad (٥٩)$$

$$I_3 = 3V/(1/\omega mC) = 3mV\omega C \qquad (٦٠)$$

وفي ضوء المعادلات (٥٢) و (٥٩) و (٦٠) فإن :

$$V\omega C_3 = 3mV\omega C$$

$$C_3= 3mC \qquad (٦١)$$

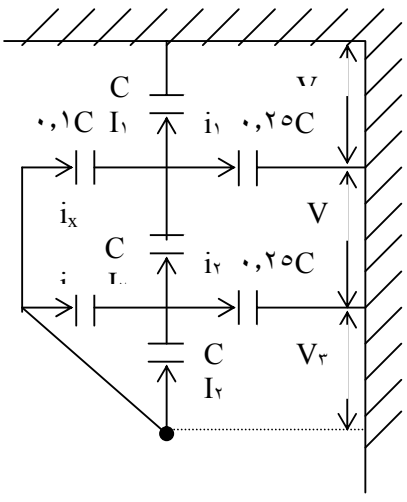
أمثلة محلولة

مثال ١ : سلسلة من العوازل مكونة من ٣ وحدات احسب:

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

(ب) كفاءة السلسلة.

الحل :



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

$$i_1 = 0{,}25\ V_1\,\omega C$$

$$i_x = 0{,}1(V_2+V_3)\omega C$$

أيضا $$I_2 = V_2\,\omega C$$

$$i_2 = 0{,}25(V_1+V_2)\omega C$$

$$i_y = 0{,}1\ V_3\omega C$$

$$I_3 = V_3\omega C$$

وبتطبيق قانون كيرشوف عند النقطة A فإن

$$I_٢ + i_x = I_١ + i_١$$

أو $$I_٢ = ٠,١\omega C(V_٢+V_٣)=V_١\omega C+٠,٢٥V_١\omega C$$

أو $$V_٢\omega C+٠,١\omega C(V_٢+V_٣)=V_١\omega C+٠,٢٥V_١\omega C$$

$$V_٢+٠,١V_٢+٠,١V_٣=١,٢٥V_١$$

أو $$١,٢٥V_١ \square ١,١V_٢ \square ٠,١V_٣=٠ \qquad (٦٢)$$

وبتطبيق قانون كيرشوف عند النقطة B

$$I_٣ + i_y = I_٢ + i_٢$$

$$V_٣\omega C+٠,١V_٣\omega C=V_٢\omega C+٠,٢٥(V_١+V_٢)\ \omega C$$

$$\therefore ١,١V_٣=٠,٢٥V_١+١,٢٥V_٢$$

$$\therefore ٠,٢٥V_١+١,٢٥V_٢ \square ١,١V_٣=٠ \qquad (٦٣)$$

بضرب المعادلة (٦٢) في ١١

$$١٣,٧٥V_١ \square ١٢,١V_٢ \square ١,١V_٣=٠ \qquad (٦٤)$$

بطرح المعادلة (٦٤) من المعادلة (٦٣) نجد أن:

$$١٣,٥V_١ \square ٣١,٣٥V_٢=٠$$

$$\therefore V_١=٣١,٣٥V_٢/١٣,٥ = ٠,٩٨٨V_٢$$

بضرب المعادلة (٦٣) في ٥

$$١,٢٥V_١+٦,٢٥V_٢ \square ٥,٥V_٣=٠ \qquad (٦٥)$$

بطرح المعادلة (٦٥) من المعادلة (٦٢) نجد أن:

$$\square ٧,٣٥V_٢+٥,٤V_٣=٠$$

$$\therefore V_٣=٧,٣٥V_٢/٥,٤ = ١,٣٦٢V_٢$$

لكن $$V=V_١+V_٢+V_٣$$

$$=٠,٩٨٨V_٢+V_٢+١,٣٦٢V_٢$$

$$= ٣,٣٥V_٢$$

أو $$\therefore V_٢ = ٠,٢٩٨٥V$$

$$\therefore V_١= ٠,٢٩٨٥x٠,٩٨٨V =٠,٢٩٥V$$

$$\therefore V_٣=١,٣٦٢x٠,٢٩٨٥V=٠,٤٠٦٥V$$

لذلك فإن $$V_١=٢٩,٥٪$$

$$V_٢=٢٩,٨٥٪$$

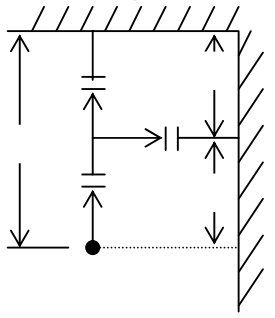
$V_٣$=٤٠,٦٥٪

كفاءة السلسلة=η حيث إن :

η = جهد الوجه للخط/(عدد وحدات العازلx فرق الجهد على العازل المجاور للخط الكهربائي)

η=(V/(٣x٠,٤٠٦٥V))x١٠٠ = ١٠٠/١,٢١٩٥ = ٨٢,١٪

مثال ٢ : احسب أقصى جهد تتحملها سلسلة عوازل إذا كان أقصى جهد لكل وحدة من السلسلة لا يزيد عن ١٧ ك ف. وكانت السعة بين كل وصلة معدنية والأرض ٢٠٪ من السعة الذاتية للعازل. إذا كانت سلسلة العوازل مكونة من (أ) وحدتين (ب) ثلاث وحدات



الحل : m = ٢٠٪ = ٠,٢

(أ) $I_١=V_١/(١/\omega C) = V_١\omega C$

$i_١ =V_١/(١/\omega mC) = mV_١\omega C$

$I_٢ = I_١ + i_١$

$=V_١\omega C+mV_١\omega C$

$= V_١\omega C(١+m)$

$V_٢=I_٢/\omega C = V_١\omega C(١+m)/ \omega C$

$= V_١(١+m)$

بفرض أن V هي أقصى جهد للخط الكهربائي

$\therefore V = V_١ + V_٢$

$=V_١ +V_١(١+m)$

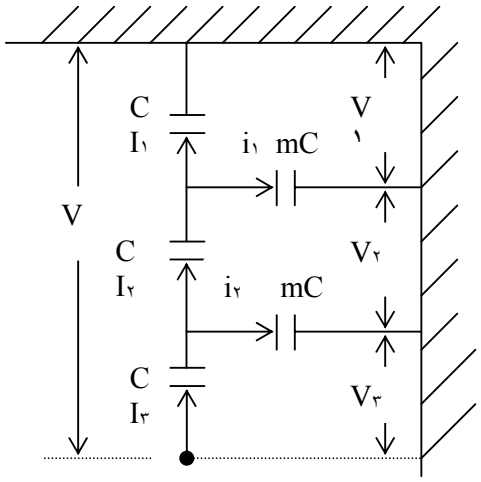
$= V_١(٢+m)$

$V_١=V/(٢+m) = V/(٢+٠,٢) = ٠,٤٥٤٥V$

لذلك فإن أقصى جهد على العازل $V_٢$ هو ١٧ ك ف

$\therefore$ ٠,٥٤٥٤V =١٧

$\therefore$ V = ١٧/٠,٥٤٥٤ = ٣١,١٦ kV



(ب) كما سبق $V_٢=V_١(١+m)$

$i_٢=(V+V_٢)/(١/\omega mC)$

$= m[V_١+V_١(١+m)]\ \omega C$

$= mV_١\omega C(٢+m)$

$I_٣ = I_٢ + i_٢$

$= V_١\omega C(١+m)+mV_١\omega C(٢+m)$

$= V_١\omega C(١+٣m+m^٢)$

$V_٣ = I_٣/\omega C$

$= V_١(١+٣m+m^٢)$

$V=V_١+V_٢+V_٣$

$= V_١+V_١(١+m)+V_١(١+٣m+m^٢)$

$= V_١(٣+٤m+m^٢)$

$= V_١(٣+٤x٠,٢+٠,٢^٢)$

$= ٣,٨٤V_١$

أو $V_١=V/٣,٨٤ = ٠,٢٦٠٤V$

إذاً أقصى قيمة للجهد $V_٣=V_١(١+٣m+m^٢)$

$= ٠,٢٦٠٤\ V(١+٣x٠,٢+٠,٢^٢)$

$= ٠,٤٢٧V$

لكن $V_٣=١٧\ kV$ $\therefore V = ١٧/٠,٤٢٧ = ٣٩,٨\ kV$

مثال ٣: خط نقل ثلاثي الأوجه مثبت بواسطة سلسلة عوازل تحتوي على ثلاث وحدات عازل. الجهد على العازل الأول والثاني هو ٨ و ١١ ك ف على التوالي. احسب:

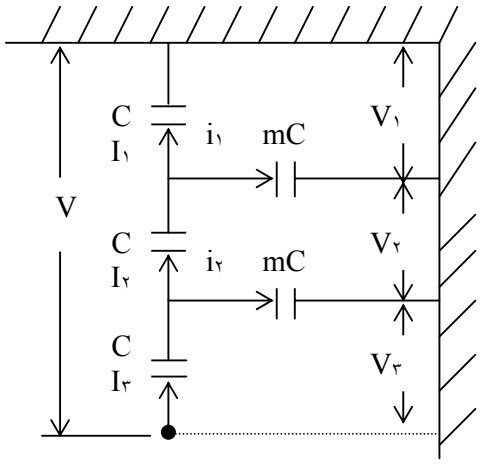
(أ) النسبة بين السعة بين الرابط المعدني والأرض إلى السعة الذاتية للعازل

(ب) جهد الخط

(ت) كفاءة السلسلة

الحل :

(أ) نفترض أن C هي السعة الذاتية لكل وحدة من العازل و mC هي السعة بين الرابط المعدني للعوازل والأرض.



$V_٢=(١+m)V_١$

$١١= (١+m)\ ٨$

$(١+m) = ١١/٨ = ١,٣٧٥$

$\therefore m = ٠,٣٧٥$

(ب) $V_٣ = (١+٣m+m^٢)V_١$

$= (١+١,١٢٥+٠,١٤)x٨$

$= ١٨,١٢\ kV$

جهد الوجه هو V

$V=V_١+V_٢+V_٣$

$= ٨ + ١١ + ١٨,١٢$

$= ٣٧,١٢\ kV$

جهد الخط = $\sqrt{٣}$ x جهد الوجه = $\sqrt{٣}$ x ٣٧,١٢ = ٦٤,٢٨ kV

(ث) كفاءة السلسلة η

$\eta = [V/(٣xV_٢)]x١٠٠$

$= [٣٧,١٢/(٣x١٨,١٢)]x١٠٠$

$= ٦٨,٢٨٪$

مسائل

(١) خط نقل ثلاثي الأوجه جهد ٦٦ كيلو فولت محمول بسلسلة عوازل مكونة من ٥ وحدات تعليق. النسبة بين سعة كل عازل إلى السعة للأرض هي ١:٤ احسب الجهد عبر كل وحدة عازل وكفاءة السلسلة. بفرض عدم وجود تسريب:

[٣,٣٢kV, ٤,١٦kV, ٦,١٦kV, ٩,٣٦kV, ١٥,١kV, ٥٠,٤٪]

(٢) احسب توزيع الجهد وكفاءة السلسلة لأربع وحدات عازل تعليق إذا كانت السعة بين الغطاء المعدني والأرض السعة للخط وهي ٢٥٪ و ١٠٪ من سعة العازل على الترتيب.

[٠,٢١٥٩V, ٠,١٩١٤V, ٠,٢٣٤١V, ٠,٣٥٨٦V ٦٩,٧٪]

(٣) موصلات قضبان توزيع لمحطة محولات جهد عالٍ مفتوحة مثبتة بعوازل تثبيت. كل وحدة من العوازل تتكون من ٣ وحدات عازل تعليق مثبتة على بعضهما البعض. الجهد عبر العازل الثاني ٢١,٦ كيلو فولت والجهد عبر التي تليها هو ٢٤ كيلو فولت. إذا كان النظام ثلاثي الأوجه ثلاثي الموصلات أوجد الجهد بين قضبان التوزيع.

[١١٤,٢٥kV]

(٤) سلسلة عوازل مكونة من ثلاث وحدات. السعة بين كل غطاء معدني والأرض تساوي ١/٦ سعة العازل. إذا كان أقصى جهد مسموح به للعازل لا يزيد عن ٣٥ كيلو فولت. حدد أقصى جهد تعمل عنده سلسلة العوازل وكفاءة السلسلة.

[٨٤,٦٤kV, ٨٠,٥٪]

(٥) سلسلة عوازل تعليق تتكون من ٦ وحدات. سعة العازل والسعة بين الغطاء المعدني والأرض هي C و ٠,٢C على الترتيب احسب: توزيع الجهد على الوحدات من أعلى لأسفل نسبة من الجهد الكلي وكفاءة السلسلة.

[٤٦٪, ٣٦,٢٥٪, ٢٣,٥٪, ١٥,٥٤٪, ١٠,٥٦٪, ٧,٧٢٪, ٦,٤٣%]

المملكة العربية السعودية
المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني
الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج

تقنية الجهد العالي

انهيار العوازل الكهربائية

جميع الحقوق محفوظة للمؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني

أولا : انهيار العوازل الغازية

(١-٤) مقدمة

تستخدم العوازل الغازية بصورة كبيرة في المعدات الكهربائية وأهم هذه الغازات المستعملة هي الهواء وغاز سادس فلوريد الكبريت وبنسبة أقل النيتروجين والفريون 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 كبيراً تزداد شدة المجال الكهربائي Electric Field Intensity (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.

(٢-٤) عملية تأين الغازات العازلة

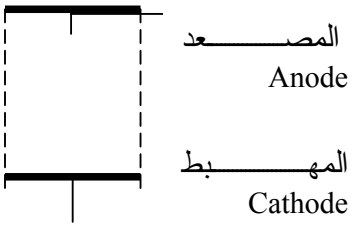
الغاز في وضعه العادي يكون عازلا تماما وعند وضع جهد بسيط بين الأقطاب يسري تيار كهربائي بسيط وبزيادة الجهد تزداد شدة المجال الكهربائي E و يتأين الوسط العازل بين القطبين مما يؤدي إلى انهيار العازل Breakdown وفقدانه خاصية العزل. ويوجد عدة آليات للتأين منها :

١) التأين بالتصادم Ionization by Electron Collision:

وتعتبر من أهم الطرق التي تؤدي إلى انهيار العازل. ولفهم هذه الطريقة نفترض أن هناك لوحين موصلين متوازيين بينهما مسافة d وغمسا في غاز عازل ضغطه p وعند تطبيق جهد كهربائي بين اللوحين يظهر مجال كهربائي منتظم بينهما وبإسقاط إشعاع خارجي مثل الأشعة فوق البنفسجية تخرج إلكترونات حرة من المهبط Cathode. وعند خروج الإلكترون بشحنته e في مجال كهربائي E يكتسب عجلة بقوة مقدارها eE باتجاه المصعد Anode ويكتسب طاقة الحركة التالية:

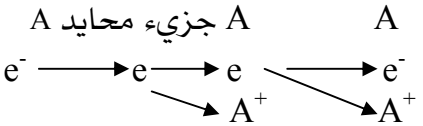
$$U = e\,E\,x = ٠,٥\ m\ v^{٢}$$

حيث x هي المسافة التي يتحركها الإلكترون من المهبط في اتجاه المصعد Anode ، m هي كتلة الإلكترون و v هي سرعة الإلكترون.



شكل (٤,١) غرفة التأين مع الأقطاب الكهربائية

الإلكترون في حركته تجاه المصعد يصطدم بجزيئات الغاز فإذا كانت طاقة حركته كافية عند الاصطدام فإنه يسبب تحلل الجزيئات أو تأين الذرات إلى أيون موجب وإلكترون سالب وتزداد عدد الإلكترونات داخل الفجوة بين الأقطاب من خلال عمليات التصادم المتتالية مكونة كتلة هائلة (Avalanche) وتصل إلى المصعد Anode وتلاحظ وصول الإلكترونات للمصعد Anode كتيار كهربائي في الدائرة الخارجية فإذا وصلت أعداد هذه الإلكترونات إلى أرقام هائلة تتسبب في تكوين مسار موصل بين الأقطاب مسببة انهيار الفجوة الكهربائية بين الأقطاب Breakdown



ب) التأين الضوئي Photo Ionization:

الإلكترونات ذات مستويات الطاقة الأقل من طاقة التأين eV ربما تستطيع عند التصادم إثارة ذرات الغاز إلى مستويات أعلى. ويكون التفاعل على الشكل التالي:

$$A+e+k\ energy \rightarrow A^{*} + e \ ; \quad A^{*} \rightarrow A+h\nu$$

A^{*} تمثل ذرة في وضع الإثارة و A ذره محايدة و $h\nu$ طاقة الفوتون. تستمر الذرة في وضع الإثارة لمدة تتراوح بين 10^{-7} إلى 10^{-10} من الثانية تعود بعدها إلى حالة الاستقرار وتطلق كمية من طاقة الفوتون $(h\nu)$ والتي تؤدي بدورها إلى تأين ذرة محايدة أخرى عندما تكون طاقتها الكامنة مساوية أو أقل من طاقة الفوتون. تسمى هذه الطريقة بطريقة التأين الضوئي Photoionization وتمثل بالمعادلة التالية

$$A+h\nu \rightarrow A^{*}+e$$

ولكي يحدث التأين يجب أن يتوفر الشرط التالي: $h\nu \geq eV_i$. وعملية التأين الضوئي هي عملية ثانوية لآلية تونسند للانهيار والتي سيتم إيضاحها لاحقاً وهي عملية مهمة في آلية انهيار العازل بواسطة عمود من الأيونات Streamer وكذلك في بعض عمليات الانهيار بواسطة التفريغ الهالي Corona.

ت)**التأين بالتفاعل بين الجزيئات التي تحتفظ بالطاقة لمدة طويلة Metastables والذرات.**

الجزيئات التي تحتفظ بالطاقة لمدة طويلة نسبيا تكون في حالة عدم استقرار دائم لذلك فهي عند اصطدامها بذرة تفقد الطاقة التي اكتسبتها. وربما تكون هذه الطاقة قادرة على تأين تلك الذرة وخروج إلكترونات من المدارات الخارجية لها.

ث)**التأين الحراري Thermal Ionization.**

عند ارتفاع درجة الحرارة تكتسب الإلكترونات الحرة الحركة طاقة حرارية. وعند اصطدام تلك الإلكترونات بذرة متعادلة تفقد هذه الطاقة والتي قد تكون كافية لتأين تلك الذرة.

(٣-٤) آلية (ميكانيزم) تاونسند للإنهيار Townsend Breakdown Mechanism

بافتراض أن عدد الإلكترونات المنبعثة من الكاثود n_o إلكترون وعندما تصطدم هذه الإلكترونات بالجزيئات المتعادلة تتكون الأيونات الموجبة والإلكترونات السالبة ويسمى هذا اصطدام تأيني. وتعرف α بأنها العدد المتوسط للتصادمات التأينية للإلكترون لكل سنتيمتر في اتجاه المجال الكهربائي (وتعتمد α على ضغط الغاز والمجال الكهربائي). عند أي مسافة x من الكاثود نفترض أن عدد الإلكترونات أصبحت n_x إلكترون وعندما يتحرك هذا العدد من الإلكترونات لمسافة d_x تزداد عدد الإلكترونات بـ $(\alpha x d_x)$

عند $x=0$ فإن عدد الإلكترونات $n_x = n_o$

وأيضا $dn_x=\alpha n_x$ أو $n_x = n_o \exp(\alpha x)$

عدد الإلكترونات التي تصل إلى الأنود $(x = d)$ ستكون $n_d = n_o \exp(\alpha d)$

لذلك فمتوسط التيار الكهربائي داخل الثغرة الهوائية والتي تساوي عدد الإلكترونات العابرة في الثانية هو :

$$I = I_o \exp(\alpha d)$$

حيث إن I_o هو التيار المبدئي عند المهبط (Cathode) .

(٤-٤) ازدياد التيار الكهربائي بوجود العمليات الثانوية

مع زيادة الجهد تزداد عمليات التأين وتزداد احتمالية إضافة إلكترونات جديدة بواسطة آليات أخرى وتتسبب هذه الإلكترونات الإضافية في زيادة الشحنات الكهربائية بين الأقطاب مما يتسبب في زيادة سريعة للتيار الكهربائي بين الأقطاب. ويمكن تلخيص الآليات الأخرى كالتالي:

أ. **الأيونات الموجبة** الناتجة من عمليات التأين داخل الثغرة بين الأقطاب تتحرك في اتجاه المهبط مما يكسبها طاقة حركة يمكن أن تكون هذه الطاقة كافية لتحرير إلكترونات من الكاثود عند اصطدامها به وهو ما يسمى بالتأين بالتصادم.

ب. الذرات المثارة تفقد الطاقة الزائدة على شكل **فوتونات** (كم من الطاقة ليس له كتلة) يمكن أن تؤدي لانبعاث إلكترونات من خلال الانبعاث الفوتوني (Photo-emission) وهو ما يسمى بالتأين الضوئي.

ج. **الجزيئات التي تحتفظ بالطاقة المكتسبة لفترة طويلة** (Metastable particles)يمكن أن تتسبب في عملية تأين للذرات في حالة اصطدامها بذرات تكون الطاقة المكتسبة كافية لإحداث عملية تأين.

د. **التأين الحراري** Thermal Ionization

وسميت الإلكترونات الناتجة من هذه العمليات الإلكترونات الثانوية. معامل التأين الثانوي لتاونسند γ ويعرف بأنه "عدد الإلكترونات الثانوية الناتجة لكل أيون موجب، فوتون، جزيء مثار، جزيء محتفظ بالطاقة لفترة طويلة. القيمة الكلية لـ γ هي مجموع المعاملات من الآليات المذكورة سابقا.

$$\Gamma = \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 + \ldots$$

وتصبح معادلة التيار الكهربائي

$$I = \frac{I_o \exp(\alpha d)}{1 - \gamma[\exp(\alpha d) - 1]}$$

ويذكر تاونسند أن الغاز العازل ينهار عندما يصل التيار للمعادلة السابقة إلى ما لانهاية أي أن المقام يصبح صفر:

$$١ - \gamma\,[\exp(\alpha d) - ١] = ٠$$

$$\gamma\,[\exp(\alpha d) - ١] = ١$$

وهو ما يسمى بشرط الانهيار.

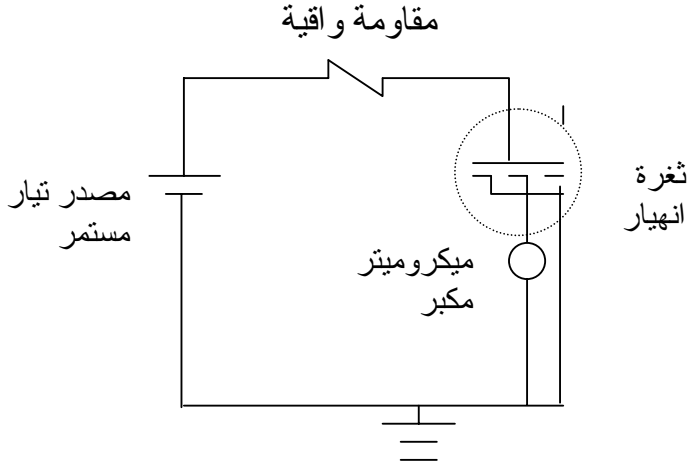
وعادة فإن $\exp(\alpha d)$ تكون قيمتها كبيرة جدا لذلك تختصر المعادلة السابقة إلي:

$$\gamma \exp(\alpha d) = ١$$

ولثغرة معينة وضغط غاز معلوم فإن الجهد الكهربائي الذي يعطى قيم α و γ تحقق خاصية الانهيار يسمى جهد الانهيار وتسمى المسافة المناظرة مسافة الانهيار.

(٥-٤) - تحديد قيم المعاملات α و γ عمليا

يستخدم في هذه التجربة قطبين مستويين بينهما مجال كهربائي منتظم. يوصل قطب الجهد العالي بمصدر جهد عالٍ مستمر ومتغير (يتراوح بين ٢ إلى ١٠ كيلو فولت). يتكون قطب الجهد المنخفض من قضيب مركزي وقضيب ستارة (guard electrode) ، ويوصل القضيب المركزي بالأرض من خلال ميكروميتر مكبر عالٍ المقاومة وتتراوح مقاومة الدخل للأميتر من 10^{9} إلى 10^{12} أوم. ويؤرض قضيب الستارة مباشرة. ويقيس الميكروميتر المكبر تيارات صغيرة جدا في حدود من 10^{-14} إلى 10^{-8} أمبير. يوضع نظام الأقطاب هذا داخل غرفة تأين والتي يمكن أن تكون من الصلب اللين المطلي بمادة الكروم أو من الصلب الذي لا يصدأ أو غرفة زجاجية. وتصنع الأقطاب عادة من النحاس الأصفر أو الصلب الذي لا يصدأ. تفرغ الغرفة تفريغا عاليا حتى 10^{-4} إلى 10^{-6} ضغط جوي بعدئذ تملأ الغرفة بالغاز المطلوب تحت الضغط المناسب لمسافة الثغرة بين الأقطاب وتترك لمدة نصف ساعة تقريبا ليملأ الغاز الغرفة بانتظام.

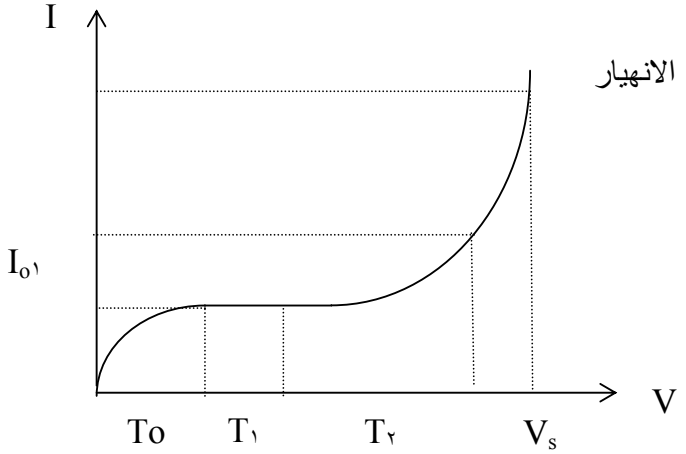


شكل (٤,٢) الترتيب العملي لقياس معاملات التأين

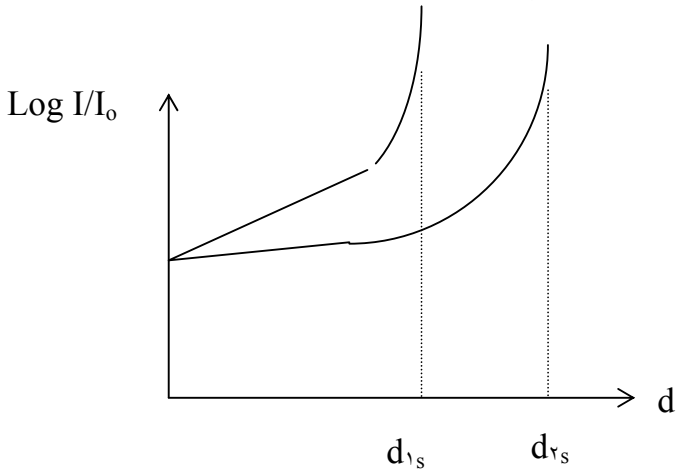
يسلط على المهبط أشعة فوق البنفسجية من خارج الغرفة والتي ينتج عنها خروج الإلكترونات المبدئية (n_o) الإشعاع الفوتو -كهربائي.

عند تطبيق الجهد المستمر ويكون صغيرا تبدأ نبضات التيار في الظهور من خلال الإلكترونات والأيونات الموجبة وبزيادة الجهد تدريجيا تختفي النبضات ونحصل على تيار مستمر كما في شكل ٣. في المنطقة T_o يزداد التيار الكهربائي ببطء لكن بغير انتظام وذلك مع ازدياد الجهد. في المنطقة T_1 وكذلك

المنطقة $T_٢$ يزداد التيار تدريجيا وبانتظام طبقا لميكانيزم تاونسند. بعد المنطقة $T_٢$ يزداد التيار بصورة أكبر وتحدث الشرارة الكهربائية.



شكل (٤,٣) منحني ازدياد التيار طبقا لتاونسند



شكل (٤,٤) العلاقة بين $Log(I/I_o)$ و مسافة الفجوة طبقا لتاونسند

ولتحديد قيم المعاملات α و γ لابد من الحصول أولا على العلاقة بين التيار والجهد لفجوات كهربائية مختلفة. ترسم العلاقة بين $Log(I/I_o)$ و المسافة بين الأقطاب d عند قيمة متساوية للمجال الكهربائي E كما في شكل(٤,٤). ميل الجزء الأولى للمنحني يعطى قيمة α وبمعرفة هذه القيمة يمكن لنا إيجاد قيمة γ من المعادلة العامة للانهيار لتاونسند.وبنظرة عامة للنتائج نري أن قيم المعاملات α،γ تعتمد على النسبة بين المجال الكهربائي إلى ضغط الغاز (E/P) .

مثال١ في تجربة لغاز ما وجد أن تيار الاستقرار (steady state) هو $٥,٥x١٠^{-٨}$ عند ٨ كيلو فولت ومسافة مقدارها ٠,٤ سم بين الأقطاب. بالاحتفاظ بقيمة المجال الكهربائي ثابت وتقليل المسافة إلى ٠,١ سم وجد أن التيار أصبح $٥,٥x١٠^{-٩}$ احسب قيمة المعامل الابتدائي لتاونسند α.

الحل: التيار عند الأنود

$$I = I_o \exp(\alpha d)$$

$$\therefore I_2 = I_o \exp(\alpha d_2) \quad , \quad I_1 = I_o \exp(\alpha d_1)$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{I_o \exp(\alpha d_1)}{I_o \exp(\alpha d_2)} = \exp \alpha (d_1 - d_2)$$

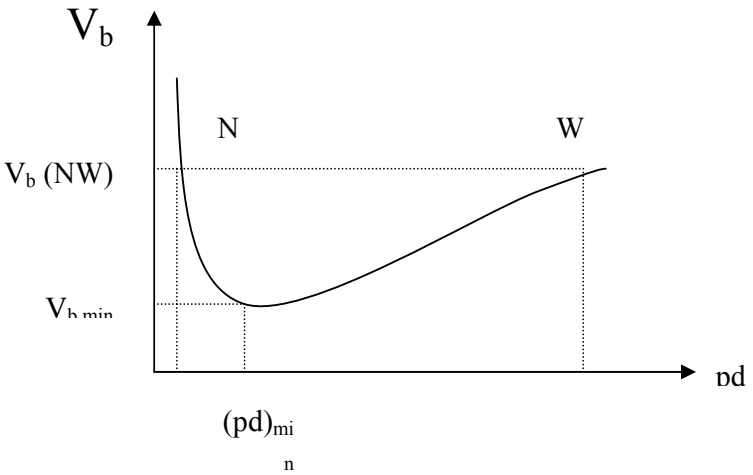
$$\frac{5.5x10^{-8}}{5.5x10^{-9}} = \exp \alpha (0.4 - 0.1)$$

$$\therefore ١٠ = \exp(٠,٣\alpha) \qquad \therefore ٠,٣\alpha = \ln(١٠)$$

$$\therefore \alpha = ٧,٦٧٦ \ /cm$$

(٦-٤) جهد الشرارة – قانون باشن Paschen,s Law

انهيار العوازل الغازية لا يعتمد فقط على المسافة بين القطبين d بل يعتمد أيضا على حاصل ضرب ضغط الغاز P بين القطبين والمسافة P*d بحيث يتحقق جهد الانهيار Breakdown Voltage بالعلاقة التالية $V_b=f(p*d)$ ويمثل الشكل ٤,٥ العلاقة بين جهد الانهيار وحاصل ضرب ضغط الغاز والمسافة بين القطبين. كما يوضح جدول (٤-١) الجهد الأدنى $V_{b\ min}$ للشرارة للعديد من الغازات والذي يعتمد على الحد الأدنى من حاصل ضرب الضغط للغاز في المسافة بين القطبين كما يعتمد على حالة المواد المصنع منها المهبط Cathode.



شكل (٤,٥) العلاقة بين جهد الانهيار و(ضغط الغاز Xمسافة الثغرة)

جدول(١-٤)

الغاز	$(pd)_{min}$ Torr.cm	$V_{b\,min}$ (فولت)
الهواء	٠,٥٥	٣٥٢
النيتروجين	٠,٦٥	٢٤٠
الهيدروجين	١,٠٥	٢٣٠
الأوكسجين	٠,٧	٤٥٠
سادس فلوريد الكبريت	٠,٢٦	٥٠٧
ثاني أكسيد الكربون	٠,٥٧	٤٢٠
النيون	٤,٠	٢٤٥
الهليوم	٤,٠	١٥٥

(٧-٤) انهيار الغازات سالبة الكهربائية Electronegative gases

التصاق الإلكترونات بالذرات (Electron attachment) هي أحد العمليات الداخلية بالغاز والتي تعطى جهد انهيار عالٍ للغاز الذي له هذه الميزة. وظاهرة التصاق الإلكترونات هي اجتذاب إلكترونات حرة الحركة إلى الذرة المتعادلة كهربائيا وتكوين أيون سالب. وحيث إن الأيون السالب مثل الأيون الموجب تماما له كتلة كبيرة جدا نسبيا لذلك فاحتمالية تحريره إلكترونات من الذرات المتعادلة عند اصطدامه بها تكون ضعيفة ولذلك تمثل عملية التصاق الإلكترونات طريقة فعالة لإزالة الإلكترونات والتي تلعب دورا هاما في عملية انهيار الغازات تحت الجهود المنخفضة. ويسمى الغاز الذي تلعب فيه عملية التصاق الإلكترونات دورا فعالا غاز سالب الكهربائية.

عمليات الالتصاق الأكثر فعالية الموجودة بالغازات هي:

أ. **الالتصاق المباشر** وفيه تلتصق الإلكترونات مباشرة بالذرات مكونة أيون سالب

$$AB + e \rightarrow AB^-$$

ب. الالتصاق التحللي وفيه تنقسم جزيئات الغاز إلى الذرات المكونة لها والذرة سالبة الكهربائية تكون أيون سالب

$$AB + e \rightarrow A + B^-$$

الغاز الأبسط لهذا النوع هو الأكسجين والغازات الأخرى مثل سادس فلوريد الكبريت والفريون وثاني أكسيد الكربون والنيتروجين والغازات التي تحتوي على الفلور والكربون. وفي هذه الغازات يكون A عادة ذرة الكبريت أو الكربون و B ذرة الأكسجين أو أحد ذرات أو جزيئات الهالوجينات.

وفي هذا النوع من الغازات تعدل معادلة تاونسند لزيادة التيار وذلك لأخذ عملية التصاق الإلكترونات في الحسبان. ويعرف معامل الالتصاق (η) بعدد التصادمات الالتصاقية بإلكترون واحد في سم واحد في اتجاه المجال الكهربائي. وتحت هذه الظروف يمكن كتابة التيار الواصل إلى الأنود كما يلي:

$$I = I_o \frac{[\frac{\alpha}{\alpha-\eta}\exp(\alpha-\eta)d] - [\frac{\eta}{\alpha-\eta}]}{1 - \{\gamma\frac{\alpha}{\alpha-\eta}[\{\exp(\alpha-\eta)d\}-1]\}}$$

وبمساواة المقام بالصفر يمكن أن نحصل على خاصية تاونسند للانهيار كما يلي:

$$\gamma\frac{\alpha}{\alpha-\eta}[\exp(\alpha-\eta)d-1]=1$$

وهذه المعادلة توضح أنه عندما تكون α أكبر من η تكون هناك دائما احتمالية لانهيار الغاز بدون النظر لقيم α و η و γ. وعلى الجانب الآخر إذا كانت η أكبر من α تقترب خاصية الانهيار لتاونسند إلى الشكل التقاربي:

$$\gamma\,[\alpha / (\alpha - \eta)] = ١ ; \qquad or \qquad \alpha = \eta / (١ - \gamma)$$

وعادة تكون γ قيمة صغيرة جدا ($\geq$ ١٠$^{-٤}$) ويمكن إعادة كتابة المعادلة السابقة كما يلي $\alpha=\eta$. وفي هذه الحالة يمكن وضع حدود الانهيار للنسبة بين المجال الكهربائي إلى ضغط الغاز (E/P) بحيث لا يحدث أي انهيار لأقل من هذه الحدود بدون النظر لقيمة مسافة الفجوة بين الأقطاب وقيمة هذا الحد يطلق عليه النسبة الحرجة بين المجال الكهربائي وضغط الغاز.

(٨-٤) الانهيار في المجالات غير المنتظمة والتفريغ الهالي

إذا كان المجال الكهربائي منتظماً فالزيادة التدريجية للجهد على الثغرة تحدث انهياراً كهربائياً للثغرة على هيئة شرارة بدون أي 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 ويمكن ملاحظتها كوميض لامع مائل للزرقة وهذه الظاهرة مصاحبة بصوت أزيز. وظاهرة التفريغ الهالي على خطوط النقل الكهربائي تؤدي إلى فقد في القدرة الكهربائية وتؤدي لتلف العزل الكهربائي ويصاحب ظاهرة التفريغ الهالي أيضا تداخل في موجات الراديو.

وتتأثر ظاهرة التفريغ الهالي بقوة بالعوامل الآتية:

أ - حالة سطح الموصل

ب - حالة الغاز المحيط (نسبة الرطوبة، درجة الحرارة، نوع الغاز، ضغط الغاز.....إلخ)

ت - شكل الموصلات الكهربائية.

المجال الكهربائي المطلوب لعمل ظاهرة تفريغ هالي لجهد متردد مرئية في الهواء على سطح الموصل، ويسمى مجال بدء ظاهرة التفريغ الهالي، لموصلين متوازيين نصف قطر كل منهما r .

$$E_w = 30md\left[1+\frac{0.301}{\sqrt{dr}}\right]$$

وفي حالة الأسطوانتين متحدتي المحور ونصف قطر الأسطوانة الداخلية r تصبح المعادلة :

$$E_c = 31md\left[1+\frac{0.308}{\sqrt{dr}}\right]$$

حيث إن m هي معامل عدم انتظام سطح الموصل و d هو معامل التصحيح لكثافة الهواء النسبية وتعطي بالمعادلة:

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

حيث إن P هو الضغط الجوي بوحدة torr و 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 الموصلات عديدة الموصلات (bundle conductors) .

٥ - زيادة ضغط الغاز.

٦ - تجنب وجود الرطوبة بالغاز.

(٩-٤) غاز سادس فلوريد الكبريت Sulfur hexafluride (SF_6)

غاز سادس فلوريد الكبريت غاز خامل له خصائص جيدة كعازل وكوسط طافئ للشرارة داخل قواطع غاز سادس فلوريد الكبريت وتزداد قوة العزل للغاز بزيادة الضغط. يستخدم الآن غاز سادس فلوريد الكبريت على نطاق واسع داخل المعدات الكهربائية مثل القواطع الكهربائية، المكثفات ، محولات التيار ، الكابلات الكهربائية، المحطات المغلقة بالغاز وخطوط النقل الكهربائية المغلقة بالغاز، أطراف التوصيل....وهكذا. ويتحول الغاز إلى الصورة السائلة عند قيمة منخفضة لدرجة الحرارة وتعتمد هذه الدرجة على ضغط الغاز.

(١-٩-٤) خصائص غاز سادس فلوريد الكبريت

(١-١-٩-٤) الخصائص الفيزيقية

- عديم اللون
- عديم الرائحة
- غير سام ، الغاز النقي غير ضار بالصحة
- غير قابل للاشتعال، لكن الغاز غير النقي يحتوى على شوائب سامة.
- يكون في الحالة الغازية عند درجة الحرارة والضغط العاديين.
- كثافة الغاز حوالي خمس مرات كثافة الهواء عند ٢٠ درجة مئوية والضغط الجوي.
- تحويل غاز سادس فلوريد الكبريت إلى سائل

يبدأ الغاز في التسبيل عند درجة حرارة منخفضة وتعتمد على ضغط الغاز. عند ضغط ١٥ كجم/سم^2 ودرجة حرارة ١٠ درجة مئوية يتحول الغاز إلى سائل أي أن الغاز يصبح غير مناسب للاستعمال لضغط أعلى من ١٥ كجم/سم^2

ولتجنب تحويل الغاز لسائل لابد من الاحتفاظ بدرجة الحرارة عند حد معين. عند ١٥ ضغط جوي يبدأ الغاز في التحول لسائل عند درجة حرارة ١٠ درجة مئوية لذلك لابد أن يكون هناك سخان يتحكم فيه بواسطة ثيرموستات وذلك للاحتفاظ بدرجة حرارة الغاز أعلى من ١٦ درجة مئوية في حالة أنظمة الضغط العالي.

- قدرته على الانتقال الحراري

قدرة غاز سادس فلوريد الكبريت على الانتقال الحراري تعادل من ٢ إلى ٢,٥ مرة القدرة على الانتقال الحراري للهواء عند نفس الضغط لذلك لنفس حجم الموصل سعة التيار تكون أكبر.

- المحتوى الحراري

خاصية المحتوى الحراري عند درجة حرارة أقل من ٦٠٠٠ درجة كيلفن أكبر منها بكثير لغاز النيتروجين وهذا يساعد على تبريد منطقة الشرارة داخل القواطع الكهربائية من خلال إزالة الحرارة من غرفة إطفاء الشرارة بواسطة الغاز.

- الثابت الزمني للشرارة

ويعرف الثابت الزمني للوسط بأنه الزمن بين التيار الصفري واللحظة التي تصل عندها الموصلية الكهربائية لمنطقة التلامس إلى الصفر.

(٢□١□٩□٤) الخصائص الكيميائية

أ. متزن كيميائيا حتى ٥٠٠ درجة مئوية.

ب. خامل. وخمول الغاز الكيميائي ميزة كبرى للقواطع الكهربائية حيث لا تتعرض الأجزاء المعدنية والملامسات للتلف لعدم وجود الأكسدة للمعادن وبالتالي تقل عمليات الصيانة المطلوبة. وتؤثر الرطوبة بشكل فعال على خصائص الغاز ويتكون فلوريد الهيدروجين أثناء الشرارة داخل القواطع الكهربائية والتي يمكن أن تهاجم الأجزاء المعدنية والعازلة.

ت. غاز سالب الكهربائية (Electronegative gas).

ث. لا يتفاعل مع الأجزاء المعدنية حتى ٥٠٠ درجة مئوية.

ج. يتحلل الغاز أثناء إطفاء الشرارة إلى رابع فلوريد الكبريت وثاني فلوريد الكبريت. وتتحد هذه الغازات مرة أخرى بعد إطفاء الشرارة وعملية التبريد لتكون الغاز الأصلي وأي مخلفات أخرى يمكن إزالتها بالمرشحات التي تحتوي على الألو مينا (Al_2O_3) . كما أن نتائج التحلل سامة ويمكن أن تهاجم بعض تركيبات المواد.

ح. الفلورايد المعدني مادة عازلة جيدة لذلك تستخدم بأمان للمعدات الكهربائية.

خ. احتواء الغاز على أي رطوبة أثناء ضخ الغاز من الخارج يوجد العديد من المشاكل الخطيرة لقواطع غاز سادس فلوريد الكبريت.

(٣□١□٩□٤) خصائص العزل الكهربائي

١. شدة العزل لغاز سادس فلوريد الكبريت عند الضغط الجوى حوالي ٢,٣٥ مرة أعلى من شدة عزل الهواء وأقل حوالي ٣٠٪ من شدة عزل الزيت المستخدم في القواطع الزيتية.

٢. عند الضغط العالي تزداد شدة عزل الغاز وعند ضغط حوالي ٣ كجم/سم^{٢} تكون شدة عزل الغاز أكبر من شدة عزل الزيت العازل وهذه الخاصية تتيح مسافات أصغر بين الموصلات الكهربائية وحجم أقل للمعدات الكهربائية لنفس الجهد.

٣. جهد الانهيار للغاز يعتمد على العديد من العوامل مثل شكل الموصلات الكهربائية ، خشونة أسطح الموصلات، توزيع المجالات الكهربائية، قرب عازلات التثبيت، الرطوبة، شكل الموجات الكهربائية.....وهكذا. يزداد جهد الانهيار للغاز مع زيادة ضغطه ويتبع الغاز قانون باشون (Paschen's Law) والذي ينص على أن "جهد الانهيار للغاز في مجال كهربائي منتظم يتناسب تناسبا طرديا مع حاصل ضرب ضغط الغاز و مسافة الثغرة بين الأقطاب الكهربائية أي أن $V_b \ \alpha \ pd$.

٤. منطقة الضغط الحرجة: إذا كان المجال الكهربائي غير منتظم فالعلاقة بين جهد الانهيار وضغط الغاز لا يتبع قانون باشون تماما.

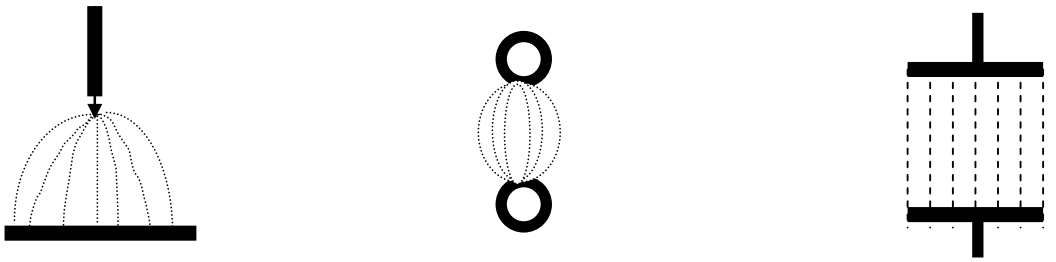
٥. تأثير سطح الموصل: خشونة سطح الموصل تقلل من جهد الانهيار للغاز حيث تتكون مجالات كهربائية قوية حول خشونة السطح تبدأ معها عمليات تأين قوية عند جهود منخفضة مثل التفريغ الهالي (Corona) مما يتسبب في حدوث الانهيار الكلى للغاز مبكرا لذلك لابد أن تكون أسطح الموصلات ملساء.

٦. تأثير عوازل التثبيت على جهد الانهيار: الموصلات الكهربائية داخل المعدات المعزولة بالغاز تثبت على عوازل من الأيبوكسي أو البور سلين ويمكن حدوث الانهيار على أسطح العوازل ويمكن حدوث ذلك عند جهود قليلة إذا كانت أسطح العوازل مغطاة بالرطوبة والغبار الموصل لذلك يجب أن تكون العازلات نظيفة تماما.

٧. الأطراف الحادة:الانهيار يبدأ عند الأطراف الحادة للأجزاء الموصلة والتي تتركز عندها المجالات الكهربائية العالية لذلك التنظيم الجيد لتوزيع الإجهادات الكهربائية مهم جدا للمعدات

الكهربائية المعزولة بغاز سادس فلوريد الكبريت ويجب تجنب الأطراف الحادة. انظر الشكل التالي الذي يبين أشكال الأقطاب الكهربائية وشكل المجال الكهربائي لكل منها.

٨. تأثير شكل الموجات الكهربائية وقطبيتها: جهد الانهيار يعتمد على شكل الموجات الكهربائية والتي تميز بأقصى قيمة للجهد والزمن من الصفر لأقصى قيمة للجهد وقطبية الموجة. القطبية السالبة عامة أخطر من القطبية الموجبة.



أقطاب مستوية (مجال كهربائي منتظم) أقطاب كروية (شبه منتظم) أقطاب حادة ومستوية (غير منتظم)

شكل ٦ الأشكال المختلفة للأقطاب الكهربائية والمجال الكهربائي لكل منها

(٢□٩□٤) الاعتبارات العملية في استخدامات الغاز لأغراض العزل الكهربائي

ظهرت في الأعوام القليلة الماضية أعمال كثيرة لتبني غاز معين للاستخدامات العملية، ولكي يستخدم غاز معين في التطبيقات الكهربائية فإنه لابد أولا من الإلمام بمعلومات عن الغاز بما في ذلك تركيبه وما هي العوامل التي تؤثر على أدائه. وكلما زادت متطلبات التشغيل، زادت المتطلبات الكثيرة والعنيفة التي تكون مطلوبة من الغاز العازل.

الخصائص المفضلة المطلوب توفرها في الغاز العازل لتطبيقات الجهد العالي هي:

أ. شدة عزل عالية.

ب. اتزان حراري و عدم نشاط كيميائي تجاه المواد المستخدمة.

ت. غير قابل للاشتعال وغير ضار بالصحة العامة.

ث. درجة حرارة تكثيف أقل.

ج. انتقال حراري جيد.

ح. تكلفة اقتصادية متوسطة.

غاز سادس فلوريد الكبريت له معظم الخصائص السابقة الذكر وقد أخذ الكثير من الاهتمام في السنوات السابقة. كما تستخدم خلائط غاز سادس فلوريد الكربون مع النيتروجين أيضاً.

جدول (٢□٤)خصائص العازلات الغازية

أسم الغاز	التركيب الكيميائي	الوزن الجزيئي	درجة الانصهار عند ٧٦٠ torr	درجة الغليان عند ٧٦٠ Torr	شدة العزل النسبية (N_s=١)	ثابت العزل	الجاذبية النوعية الهواء=١	قابليته للاشتعال	سام
Air	- - -	٢٩	- - -	□١٩٤	١	١,٠٠٠٥٩	١,٠٠٠٠٠	لا	خامل
Nitrogen	- - -	٢٨	- - -	□١٩٦	١	١,٠٠٠٥٨	٠,٩٦٧٢٤	لا	لا
Hydrogen	N_2	٢	□٢١٠	□٢٥٣	--	١,٠٠٠٢٦	٠,٠٦٩٥٢	نعم	لا
Carbon tetraflouride	H_2	٨٨	-٢٥٩	□١٢٨	١,٠١	١,٠٠٠٦٠	---------	لا	لا
Hexafluoro-ethane	CF_4	١٣٨	□١٨٣	□٧٨	٢,٠٢	١,٠٠٢٠٠	- - -	لا	لا
Perfluoro-propane	C_2F_6	١٨٨	□١٠١	□٣٧	٢,٢	---------	- - -	لا	لا
Perfluoro-butane	C_3F_8	٢٣٨	□١٦٠	□٢	٢,٦	- - -	- -	لا	لا
Perfluoro-n-butane	C_4F_{10}	٢٠٠	□٨٠	+٢	٣,٦	- - -	- - -	لا	لا
Sulfur hexafluoride	C_4F_8	١٤٦		□٦٣	٦٢,٥	- -	- - -	لا	لا
٣٠٪SF_6 + ٧٠٪ Air	SF_6	١٢١		□٣٠	٢,٠	١,٠٠٣٤٠	-	لا	لا
Freon□١٢	CCl_2F_2		□١٥٨		٢,٤٦	١,٠٠١٩١	- - -	لا	*
						١,٠٠١٦٠	- - -		
							- -		
							٧,٣٣٢٣		
							٥,١٩٠٠		
							---------		

* خامل لمدة ساعتين أو أقل مع تركيز ٢٠٪

أسئلة

١. اشرح ظاهرة ازدياد التيار الكهربائي في الغاز المسلط عليه مجال كهربائي منتظم.
٢. اشرح الجهاز العملي المستخدم لقياس تيار ما قبل الانهيار في الغازات.
٣. عرف معاملات التأين الابتدائي والثانوي لتاونسند. وما هو شرط الانهيار لتاونسند.
٤. عرف الغازات سالبة الكهربائية. ولماذا يكون جهد الانهيار لهذه الغازات أكبر من غيرها؟
٥. استنتج خاصية الانهيار للغازات سالبة الكهربائية.
٦. اذكر مختلف العوامل المؤثرة على انهيار الغازات العازلة.

ثانيا : انهيار العوازل السائلة

(٤□١٠) مقدمة

العوازل السائلة تستخدم لزيادة عزل كابلات الجهد العالي و المكثفات ولملء المحولات والقواطع وهكذا. و بالإضافة لوظيفتها كعازل فلها وظائف أخرى مثل وسط ناقل للحرارة في المحولات وكوسط طافىء للشرارة في القواطع.

يعتبر زيت البترول من أكثر الزيوت استخداما كعوازل سائلة وتستخدم أيضا الهيدروكربونات الصناعية والهيدروكربونات الهالوجينية في بعض التطبيقات. وتستخدم زيوت السيليكون والهيدروكربونات التي تحتوي على الفلوريد للتطبيقات ذات درجات الحرارة العالية. وحديثا تستخدم بعض الزيوت النباتية والأسترات.

العوازل السائلة عادة ما تكون خليطاً من الهيدروكربونات الضعيفة الاستقطاب والتي يجب أن تكون خالية من الرطوبة ومنتجات الأكسدة و الملوثات الأخرى والتي تؤثر تأثيرا كبيرا على شدة العزل للزيوت العازلة. ومن الخصائص الهامة المطلوبة للزيوت العازلة الموصلية الكهربائية و ثابت العزل و شدة العزل. بالإضافة إلى ذلك فالخصائص الفيزيائية والكيميائية مثل اللزوجة و الاتزان الحراري و الجاذبية النوعية هامة أيضا. عمليا يتم اختيار العازل السائل لتطبيق معين على أساس الاتزان الكيميائي.

(٤□١١) العوازل السائلة النقية والتجارية

العوازل السائلة النقية هي السوائل النقية كيميائيا ولا تحتوي حتى على نسبة ١:10^9 من الشوائب وتركيبها الكيميائي بسيط مثل ن -هيكسان و ن -هيبتان والهيدروكربونات البرافينية الأخرى.

على الجانب الآخر فالعوازل السائلة التجارية تكون غير نقية كيميائيا وتحتوي على خليط من الجزيئات العضوية المركبة والتي لا يمكن بسهولة توصيفها أو إعادة إنتاجها في تجارب متسلسلة.

التنقية(٤□١٢)

الغبار المعدني والرطوبة و الغازات المحللة والشوائب الأيونية هي الشوائب الرئيسية الموجودة بالزيوت العازلة والتي تقلل كثيرا من شدة عزل الزيوت. وهناك طرق عديدة توظف لتنقية الزيوت العازلة هي الترشيح (الفلترة)، من خلال ترشيح ميكانيكي وترشيح كهروستاتيكى، وسحب الغازات وقوة الطرد

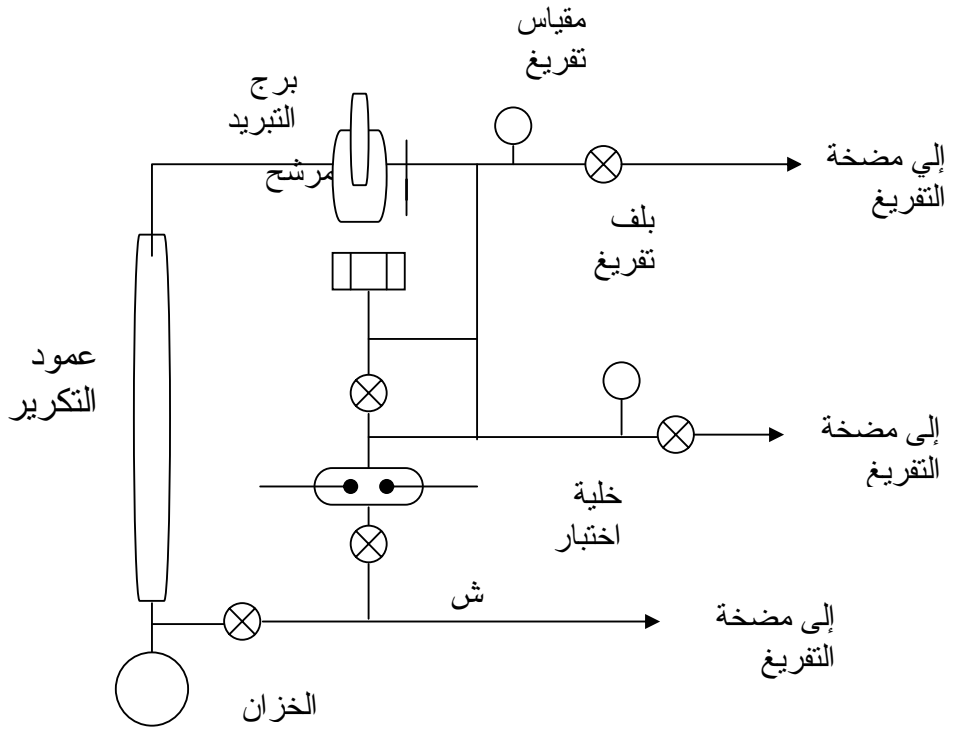
المركزي والتقطير و التعامل الكيميائي. جزيئات الغبار المعدني يمكن إزالتها بواسطة الترشيح والغازات مثل الأكسجين وثاني أكسيد الكربون يمكن إزالتها بواسطة التقطير وإزالة الغازات والشوائب الأيونية مثل بخار الماء يمكن إزالتها بواسطة أجهزة تجفيف أو التجفيف الفراغي وأحيانا يتم إضافة حمض الكبريتيك المركز إلى العوازل السائلة وترج جيدا لإزالة الشمع والأجزاء المتبقية ثم تشطف بالصودا الكاوية والماء المقطر.

جدول (٣□٤) خصائص العزل لبعض العوازل السائلة

الخاصية	*زيت المحولات*	زيت الكابلات	زيت المكثفات	*الأسكرال*	زيوت *السيليكون*
- شدة العزل عند ٢٠°C على ٢,٥mm	١٥	٣٠	٢٠	٢٠-٢٥	٣٠-٤٠
موصلات كروية قياسية (kV/mm)	٢,٢ – ٢,٣	٢,٣ – ٢,٦	٢,١	٤,٨	٢,٠ - ٧٣,٠
- النفاذية النسبية (٥٠ Hz)	٠,٠٠١	٠,٠٠٢	$٠,٢٥x١٠^{-٣}$	$٠,٦٠x١٠^{-٣}$	$١٠^{-٣}$
- Tan δ عند ٥٠Hz	٠,٠٠٠٥	٠,٠٠٠١	$٠,١٠x١٠^{-٣}$	$٠,٥٠x١٠^{-٣}$	$١٠^{-٤}$
عند ١ kHz	$١٠^{١٢}$-$١٠^{١٣}$	$١٠^{١٢}$ - $١٠^{١٣}$	$١٠^{١٣}$ – $١٠^{١٤}$	$٢x١٠^{١٣}$	$٣x١٠^{١٤}$
- المقاومة النوعية (أوم.سم)	٠,٨٩	٠,٩٣	٠,٨٨–٠,٨٩	١,٤	١,٠ – ١,١
- الجاذبية النوعية عند ٢٠°C	٣٠	٣٠	٣٠	١٠٠ – ١٥٠	١٠ – ١٠٠٠
- اللزوجة عند ٢٠°C	Nil	Nil	Nil	Nil	Nil
- القيمة الحامضية (mg/gm of KOH)	١,٤٨٢٠	١,٤٧٠٠	١,٤٧٤٠	١,٦٠٠٠	١,٥٠–١,٦٠
- معامل الانكسار	٠,٠١	٠,٠١	٠,٠١	< ٠,٠١	< ٠,٠١
- التصبن (mg of KOH/gm of oil)	$٧x١٠^{-٤}$/°C	$٧x١٠^{-٤}$/°C	$٧x١٠^{-٤}$/°C	$٧x١٠^{-١}$/°C	$٥x١٠^{-٤}$/°C
- التمدد (٢٠□١٠٠°C)	٥٠	٥٠	٥٠	< ٣٠	< ٣٠
- أقصى محتوى مائي مسموح (ppm)				negligible	negligible

اختبار انهيار العوازل السائلة(١٣□٤)

اختبارات الانهيار عادة ما تنجز داخل خلايا اختبار صغيرة لاختبار عينة الزيت بعد التنقية. الأقطاب الكهربائية المستخدمة داخل خلية الاختبار لقياس جهد الانهيار عادة ما تكون كرات قطرها يتراوح بين ٠,٥ إلى ١,٠ سنتيمتر والثغرة بين الأقطاب تتراوح بين ١٠٠ إلى ٢٠٠ ميكروميتر في بعض الأحيان تستخدم الأقطاب المستوية والتي هي عبارة عن مستويين متوازيين. جهد الاختبار يتراوح بين ٥٠ إلى ١٠٠ كيلو فولت.



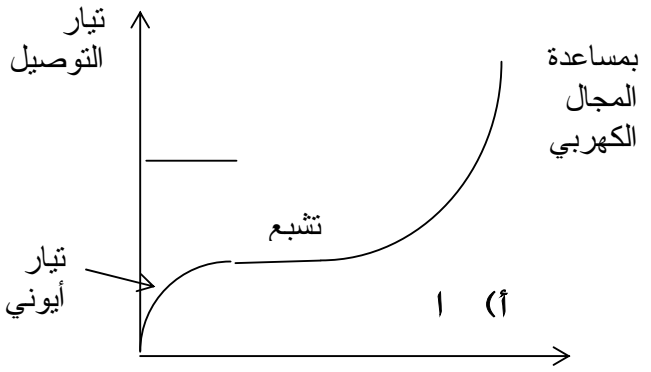
شكل (٤,٧) نظام تنقية الزيت مع خلية اختبار

(١٤□٤) التوصيل والانهيار في العوازل السائلة النقية

عند وجود مجال كهربائي أقل من ١ kV/cm تتراوح الموصلية للعازل من ١٠□١٨ إلى ١٠□٢٠(مهو لكل سم). وهذا من احتمال وجود بعض الشوائب بعد عملية التنقية وعندما يصل المجال الكهربائي لأعلى من ١٠٠kV/cm فإن التيارات الكهربائية تزداد بسرعة وتتغير قيمها بسرعة وتنتهي بعد وقت قصير.

عند المجال الكهربائي الصغير يتكون التيار الكهربائي نتيجة تحلل الأيونات وعند القيم المتوسطة للمجال الكهربائي يصل التيار الكهربائي إلى قيمة التشبع وعند المجال الكهربائي العالي تتولد التيارات نتيجة انبعاث الإلكترونات من المهبط (Cathode) نتيجة المجال العالي والتي تتضاعف بواسطة آلية تاونسند وتزداد التيارات حتى يحدث الانهيار.

الآلية الصحيحة لزيادة التيار غير معروفة بالضبط ويعتمد جهد الانهيار على المجال الكهربائي ومسافة الثغرة بين الأقطاب الكهربائية ودرجة حرارة الكاثود بالإضافة إلى لزوجة السائل ودرجة حرارة السائل وكثافة السائل والتركيب الجزيئي له. يبين جدول (٤□٤) أقصى قيمة لجهد الانهيار لبعض السوائل النقية والغازات المسالة.



شكل (٤,٨) خصائص تيار التوصيل/المجال الكهربائي للهيدروكربون السائل

(١٥□٤) انهيار العوازل السائلة التجارية

كما ذكرنا سابقا أن العوازل السائلة التجارية غير نقية كيميائيا وتحتوي على شوائب مثل الفقاعات الغازية والجزيئات المعلقة وهكذا. هذه الشوائب تتسبب في انخفاض شدة العزل لهذه السوائل انخفاضا ملحوظا وفي بعض الأحيان انخفاضا كبيرا. ويتأثر ميكانيزم الانهيار بوجود مثل تلك الشوائب بالإضافة إلى أنه عند حدوث الانهيار الكهربائي لهذه السوائل تنتج غازات إضافية وفقاعات غازية وتتكون نواتج التحليل الصلبة لهذه السوائل.

جدول (٤□٤) أقصى قيمة لشدة العزل لبعض السوائل العازلة

السائل	أقصى قيمة لشدة العزل (MV/cm)
هيكسان	١,٣ – ١,١
بنزين	١,١
زيت المحولات	١,٠
سيليكون	١,٢ – ١,٠
الأوكسجين السائل	٢,٤
النيتروجين السائل	١,٩ – ١,٦
الهيدروجين السائل	١,٠
الهليوم السائل	٠,٧
الأرجون السائل	١,٤٢ – ١,١٠

وتعتمد آلية (ميكانيزم) الانهيار لتلك السوائل على عدة عوامل هامة مثل طبيعة وحالة الأقطاب الكهربائية والخصائص الفيزيائية للسائل والشوائب والغازات المتواجدة بالسائل.

١. وجود شوائب (Particles) : عند تطبيق جهد عالٍ ينشأ مجال كهربائي بين القطبين شدته E. وإذا كانت سماحية الشوائب (ε_1 Particles Permitivity) أكبر من سماحية العازل السائل ε_2 فإنه ينشأ قوة تدفع بالشوائب للمساحة التي يكون فيها المجال الكهربائي أعلى ما يمكن. فإذا كانت الشوائب كروية لها نصف قطر r فإن القوة تعطى بالعلاقة التالية $F = \frac{1}{2} r^3 \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{2\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \cdot \nabla E^2$ وعندما تتجه هذه الشوائب باتجاه المنطقة التي يكون فيها المجال الكهربائي أعلى ما يمكن فإنها تتابع حتى تصل ما بين القطبين مما ينشأ عنه توصيل ثم انهيار كهربائي Breakdown.

٢. وجود ماء: عند وجود قطرات من الماء في العازل السائل فإنها تستطيل في اتجاه المجال الكهربائي مما يؤدي إلى التوصيل بين القطبين وحدوث الانهيار الكهربائي.

٣. وجود فقاعات هوائية: يوجد في بعض الأحيان فقاعات غازية في السائل العازل إما نتيجة لوجود شرخ في الإطار الخارجي أو وجود نتوءات في أحد الأقطاب. وعند تطبيق الجهد بين القطبين ينشأ مجال كهربائي شدته E=V/d (Kv/cm) وحيث إن شدة العزل للهواء أقل منه للعازل السائل فإن الوسط الغازي داخل الفقاعة الغازية سينهار مما ينشأ عنه شرارة كهربائية وبخار مما يؤدي إلى توليد المزيد من الفقاعات حتى تملأ الفراغ الموجود بين القطبين مما ينشأ عنه انهيار كامل للوسط العازل بين القطبين الكهربائيين.

أسئلة

١. اشرح ظاهرة التوصيل الكهربائي في السوائل العازلة وكيف تختلف عنها في الغازات العازلة؟

٢. ما هي السوائل العازلة التجارية وكيف تختلف عن السوائل النقية العازلة؟

٣. ما هي العوامل المؤثرة على انهيار العوازل السائلة النقية والعوازل السائلة التجارية؟

٤. اشرح الأسباب المختلفة لانهيار العوازل السائلة التجارية.

ثالثا: انهيار العوازل الصلبة

(١٦□٤) مقدمة

تستخدم العوازل الصلبة في كل أنواع الدوائر الكهربائية والمعدات لعزل الموصلات الكهربائية. ولابد أن يتوفر في العازل الجيد الخصائص الآتية:

أ) شدة ميكانيكية عالية　　ب) فقد كهربائي قليل

ج) خالي من الفراغات الغازية voids والرطوبة　　د) مقاوم للتلف الحراري والكيميائي.

كما أن للعوازل الصلبة شدة عزل أكبر من العوازل الغازية والعوازل السائلة.

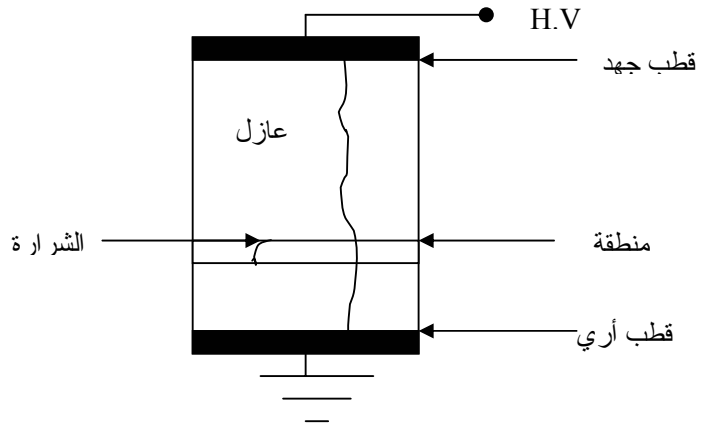
(١٧□٤) الانهيار في العوازل الصلبة

من عوامل الضعف في العوازل المصنوعة من اللدائن Polymers ضعفها في مقاومة الشرارة الكهربائية والتفريغ الكهربائي مما يجعلها عرضة للانهيار عند تعرضها للمجالات الكهربائية العالية. ويمكن أن يحدث الانهيار على السطح وتسمى هذه الظاهرة بظاهرة التسيير Tracking أو في لب العازل وتسمى هذه الظاهرة بظاهرة التشجير Treeing. وسيتم استعراض هاتين الظاهرتين باختصار.

(١□١٧□٤) انهيار سطح العازل Tracking

يحدث هذا النوع من الانهيار على سطوح العوازل الصلبة المستخدمة في الأجهزة أو في الأماكن المعرضة للتلوث، مثل المواقع القريبة من البحر أو المناطق الصناعية، حيث تحمل الرياح الأملاح والغبار ومخلفات المصانع والتي عادة ما تكون مواد أيونية شبه موصلة وترسبها على أسطح العوازل. وعندما يكون السطح جافا يتسرب تيار ضئيل Leakage Current من النوع السعوي وعند تبلل السطح بالرطوبة أو الترشيح والضباب والرش فإن سطح العازل يصبح مبتلاً وبذلك تزداد شدة وقيمة التيار المتسرب بصورة كبيرة وتكون قيمته حقيقية. ومع ازدياد حرارة العازل نتيجة لمرور التيار فإن سطح العازل المبتل يجف في بعض المناطق التي تكون فيها كثافة التيار أعلى ما يمكن، وعادة ما تكون هذه المناطق قريبة من أقطاب الجهد العالي، وتصل درجة الحرارة على السطح إلى درجة الغليان مما ينتج عنه تبخير الرطوبة الموجودة على السطح وتكوين مناطق جافة صغيرة على شكل حزام Dry Bands تفصل بين القطبين فينطبق فرق الجهد بين القطبين على هذه المنطقة والتي تكون المسافة بين طرفيها صغيرة جداً فتزداد شدة المجال الكهربائي بين طرفيه حيث إن E=v\d و d هي المسافة بين القطبين فتنهار الثغرة الموجودة بين طرفي المنطقة الجافة والتي يكون الوسط فيها عبارة عن هواء. وإذا ما استمر السطح في البلل فإن الشرارة

ستستمر مما ينتج عنها حرارة ربما تكون كافية لتكسير الروابط التساهمية للعازل المصنوع من اللدائن (هيدروكربونات) والتي تكون بين الكربون والهيدروجين C-H مما يجعل الكربون يظهر على سطح العازل على شكل نقاط متفرقة بينما يصعد الهيدروجين على السطح ويلتقي مع الأوكسجين مما يتولد عنه ماء H_2O الذي يزيد بدوره عملية البلل واستمرار الشرارة والتي تؤدي في بعض الأحيان إلى تآكل السطح Erosion الذي يضعف العازل ميكانيكياً. وتستمر العملية بنفس الطريقة السابقة حتى يتكون الكثير من نقاط الكربون تتصل فيما بينها في النهاية مكونة قناة كربونية تصل بين القطبين العلوي والسفلي، حيث تكون موصلة وتسمح بمرور التيار وبذلك ينهار العازل الكهربائي ويفقد خاصية العزل، وقد تؤدي زيادة الحرارة الناشئة عن مرور التيار في بعض العوازل إلى تلفها بالحريق. وفي العوازل الجيدة التي لا تتأثر بالشرارة مثل العوازل المصنوعة من البورسلين والزجاج فإن الظاهرة السابقة لا تتم لأنها مواد خاملة وينشأ بين القطبين بدلاً من ذلك قوس كهربائي Flashover.



(٢-١٧-٤) انهيار لب العازل (التشجير) Treeing

عادة ما ينشأ هذا النوع من وجود جيوب هوائية مفرغة داخل العازل، وعند تطبيق جهد عالٍ بين قطبين كهربائيين أحدهما مدبب Point Electrode والآخر مسطح Plain Electrode فإن الوسط الهوائي داخل العازل الصلب سينهار نظراً لأن شدة المجال الكهربائي E عند القطب المدبب هي أعلى ما يمكن وتفوق شدة الانهيار الكهربائي للهواء فينتج عنه تفريغ جزئي Partial Discharge يعمل على تآكل العازل داخلياً، ويحدث شرخ صغير عند الحواف المدببة للجيب الهوائي نتيجة لتمركز المجال الكهربائي عند هذه الحواف الحادة مما يزيد من نشاط التفريغ الجزئي واتجاه الشروخ الصغيرة الميكروسكوبية باتجاه المجال الكهربائي، الذي تقع خطوطه بين القطبين الكهربائيين، وتفرعها على شكل شجيرات Trees حتى تصل بين القطبين، ونتيجة لترسب الكربون على سطح هذه القنوات الميكروسكوبية فإنها تصبح موصلة فينهار العازل ، وتسمى هذه الظاهرة بالتشجير Treeing. وعادة ما تحدث هذه الظاهرة

في الكابلات المصنوعة من مادة البولي إيثيلين والتي تعمل عند جهود عالية. وفي المناطق ذات منسوب المياه العالي تتشرب الكابلات المصنوعة من مادة البولي إيثيلين نسبة من الماء تختزن في الجيوب الهوائية الناتجة من عيوب التصنيع وعند تعرضها للمجال الكهربائي أثناء عمل الكابل تستطيل هذه الجيوب المائية حتى تصل بين الموصل والغلاف المعدني المؤرض للكابل مما يؤدي إلى انهيارها، وتسمى هذه الظاهرة بظاهرة التشجير المائي Water Treeing .

(٣-١٧-٤) الانهيار الإلكترو ميكانيكي

عندما يتعرض العازل الصلب لمجالات كهربائية عالية يمكن أن يحدث الانهيار بسبب قوى الضغط الكهرو ستاتيكية والتي يمكن أن تزيد عن أقصى قيمة ضغط ميكانيكية يتحملها العازل. لو افترضنا أن سمك عينة الاختبار d_o وتم ضغطها لسمك d تحت جهد كهربائي V فإن إجهاد الضغط الميكانيكي يكون متعادلا إذا كان :

$$\varepsilon_o \varepsilon_r \frac{V^2}{2d^2} = Y \ln[\frac{d_o}{d}]$$

حيث إن Y هو معامل يونج وتصبح المعادلة:

$$V^2 = d^2[\frac{2Y}{\varepsilon_o \varepsilon_r}]\ln[\frac{d_o}{d}]$$

وغالبا يحدث الاتزان الميكانيكي عندما : $d/d_o=٠,٦$ or $d_o/d=١,٦٧$

لذلك تكون أكبر قيمة للمجال الكهربائي قبل الانهيار هي.

$$E_{max} = \frac{V}{d_o} = 0.6\sqrt{\frac{Y}{\varepsilon_o \varepsilon_r}}$$

الانهيار الحراري(٤-١٧-٤)

تزداد "قيمة جهد الانهيار للعازلات الصلبة مع زيادة سمك العازل حتى درجة معينة، بعده يتحدد التوصيل الكهربائي بالعازل بناءً على الحرارة المتولدة داخله. وعند تطبيق الجهد على العازل يمر تيار توصيل صغير جدا خلال المادة. يتسبب التيار في زيادة درجة حرارة العازل وتنتقل الحرارة المتولدة للوسط المحيط بالتوصيل خلال العازل وبالإشعاع من سطح العازل. ويحدث الاتزان عندما تتساوى قيمتا الحرارة المتولدة داخل العازل والحرارة المفقودة بالتوصيل والإشعاع.

الحرارة المتولدة تحت تأثير التيار المتردد هي:

$$W = \frac{E^2 f \varepsilon_r \tan\delta}{1.8x10^{12}} \qquad w/cm^٢$$

بحيث إن f هو التردد بالهيرتز و δ هي زاوية الفقد للعازل و E هي القيمة الفعالة للمجال الكهربائي.
الحرارة المفقودة هي:

$$W_T = C_v \frac{dT}{dt} + div(K.gradT)$$

حيث إن C_v هي الحرارة النوعية للعينة و T هي درجة حرارة العينة و K هي الموصلية الحرارية للعينة و t هو زمن الفقد الحراري. ويحدث الاتزان الحراري عندما تتساوى قيمة الحرارة المتولدة مع الحرارة المفقودة. ويحدث الانهيار عندما تكون كمية الحرارة المتولدة أكثر من كمية الحرارة المفقودة.

(٥-١٧-٤) التلف والانهيار الكيميائي والالكترو ميكانيكي

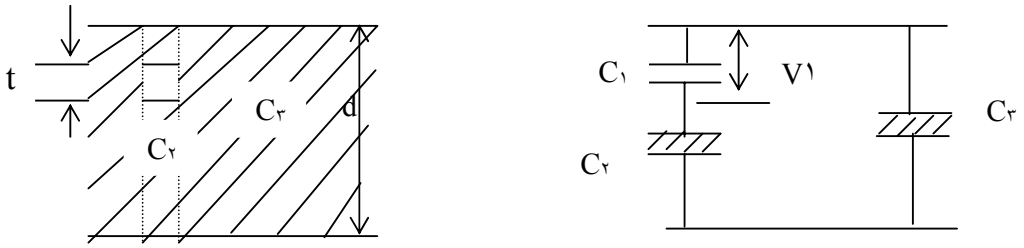
في وجود الهواء وبعض الغازات تحدث لبعض المواد العازلة تغيرات كيميائية عندما تتعرض هذه المواد لإجهاد كهربائي مستمر.بعض التفاعلات الكيميائية الهامة التي يمكن أن تحدث للعوازل الصلبة هي:

- **التأكسد:** في وجود الهواء أو الأكسجين تتأكسد بعض المواد مثل المطاط والبولي إيثيلين مما يؤدي إلى الزيادة في شروخ السطح.
- **التحلل المائي:** في وجود الرطوبة أو بخار الماء على سطح العازل الصلب يحدث التحلل المائي وتفقد المادة خصائصها الكهربائية والميكانيكية. الخصائص الكهربائية لمواد مثل الورق و القطن والمواد السليوليزية الأخرى تتضرر بصورة كبيرة من هذا التحلل المائي. المواد البلاستيكية مثل البولي إيثيلين ينخفض عمرها الافتراضي بصورة ملحوظة.
- **التفاعل الكيميائي :** حتى في غياب الإجهاد الكهربائي يمكن أن يحدث تأثير كيميائي كبير على المواد العازلة نتيجة العديد من العمليات مثل عدم الاتزان الكيميائي عند درجات الحرارة العالية، التأكسد والشروخ في وجود الهواء والأوزون، والتحلل المائي نتيجة وجود الرطوبة والتسخين.

الانهيار بسبب التفريغ الداخلي(٦-١٧-٤)

المواد العازلة الصلبة وبصورة أقل العوازل السائلة تحتوي على فقاعات هوائية داخل الوسط أو عند الحدود بين الموصلات والعازل. وتمتلئ هذه الفقاعات بوسط له ثابت عزل أقل من تلك التي للعازل. لذلك فإن شدة المجال الكهربائي داخل هذه الفقاعات أعلى منها خلال العازل لذلك فإنه حتى تحت الجهد العادي فإن المجال الكهربائي داخل هذه الفقاعات ربما يزيد عن قيمة الانهيار وربما يحدث الانهيار للعازل مبتدءاً بالفقاعات.

فرضاً أن هناك عازل صلب بين قطبيين كهربائيين كما في شكل (٤،١٠).



شكل (٤،١٠) التفريغ الكهربائي داخل الفقاعة والدائرة المكافئة

بتقسيم العازل لثلاثة أجزاء، يمكن تكوين الدائرة المكافئة من C_1 و C_2 و C_3 كما في شكل ١٤. حيث أن C_1 تمثل سعة الفراغ و C_2 تمثل سعة العازل على التوالي مع الفراغ و C_3 هي سعة الجزء المتبقي من العازل.

بوضع جهد مقداره V عبر الأقطاب الكهربائية فإن قيمة الجهد الواقع على الفراغ V_1 هو:

$$V_1 = \frac{Vd_1}{d_1 + (\frac{\varepsilon_o}{\varepsilon_1})d_2}$$

حيث إن d_1 و d_2 هما سمك الفقاعة والعازل على التوالي ولهما سماحية مقدارها ε_o و ε_r على التوالي. ودائما تكون d_1 أقل بكثير من d_2 لذلك فإن :

$$V_1 = V\varepsilon_r(\frac{d_1}{d_2})$$

حيث إن ε_r هي السماحية النسبية للعازل.

(١٨-٤) العوازل الصلبة المستخدمة عمليا

تتغير العوازل الصلبة تغيراً واسعاً من حيث المصدر والخصائص ويمكن أن تكون مواد طبيعية، عضوية مثل الورق والمطاط أو مواد صناعية غير عضوية مثل الميكا والزجاج والسيراميك واللدائن. نظرا لتعدد أنواع اللدائن واختلاف خصائصها وطرق تصنيعها فقد جرى تصنيفها إلى عدة أصناف لتمييزها عن العوازل الصلبة الأخرى. تصنف اللدائن في صناعة الكابلات إلى نوعين هما: البلاستك plastics والمطاط rubbers أو Elastomers. ويعرف البلاستك بأنه المادة التي تنشأ عن اللدائن الصناعية أو الطبيعية ويمكن في بعض مراحل التصنيع تشكيلها وهي في حالة السيولة باستخدام الضغط والحرارة كما يقسم البلاستك إلى تصنيفين، ثرموبلاستك Thermoplastic وثرموسيتينغ Thermosetting.

(١٩-٤) المواد العازلة الطبيعية

(١-١٩-٤) الورق (Paper)

الورق المستخدم عادة في عمليات العزل الكهربائي يكون دائما من نوعية خاصة وهو ورق رقيق جدا أو ورق لف اسم ر. سمك وكثافة الورق تعتمد على التطبيق فمثلا الورق ذو الكثافة القليلة (٠,٨ gms/cm^3) يفضل في مكثفات التردد العالي والكبلات بينما الورق ذو الكثافة المتوسطة يستخدم في مكثفات القوى والورق ذو الكثافة العالية يفضل في التيار المستمر ومكثفات تخزين الطاقة وكعازل في آلات التيار المستمر. وبالرغم من أن الورق يمتاز بخواص كهربائية جيدة وهو في الحالة الجافة إلا أن طبيعته المسامية تجعله شديد الامتصاص للرطوبة وللتغلب على هذه المشكلة يغمر الورق بعد تجفيفه تحت الحرارة والتفريغ في مركب خاص من مشتقات البترول. ثابت العزل النسبي للورق المشبع يعتمد على سماحية السليلوز المكون للورق وسماحية الزيت وكثافة الورق.

شرائح ورق البولي بروبلين

يرمز لشرائح ورق البولي بروبلين بالرموز PPL, PPLP, BICCLAM وهي مواد عازلة ذات فقد منخفض وتصنع على شكل شريط من الورق. وتتكون من طبقة من مادة البولي بروبلين المبثوق بحيث تلحم بين طبقتين من الورق. يكون الشكل الخارجي للشريط على شكل شريط من الورق بحيث يمكن استخدامه بنفس طريقة تقنية التشبيع المستخدمة في الورق المشبع وكذلك الطرق المستخدمة في اللف.

تتميز شرائح ورق البولي بروبلين بالمزايا الآتية:

- لها زاوية فقد منخفضة Tanδ
- لها سماحية permittivity منخفضة.
- تعمل عند درجة حرارة عالية.
- لها شدة ميكانيكية عالية.

سوائل ومركبات التشبيع

يكون للورق خواص كهربية جيدة عندما يجفف ويشبع ببعض السوائل والمركبات المناسبة والتي تساعد في تقليل امتصاصه للرطوبة. يتم التشبيع بالتسخين لدرجة ١٢٠^{o}C ويفرغ الهواء من الورق والرطوبة عند ضغط يتراوح بين ١٠ إلى ٢٠ نيوتن/م^2 حتى نضمن بأن كل المصفوفة قد تم ملؤها بالمادة المشبعة. وينخفض محتوى الرطوبة في الورق من ٢ إلى ٧٪ إلى ما يقارب ٠,٠١ إلى ٠,٥٪ حسب الجهد. كما يجب التأكد من ملء النتوءات والفراغات بين الورق بالمادة المشبعة حتى تقل التفريغات الجزئية عند الجهود العالية خاصة في الكابلات ند جهود أعلى من ٦,٦ kV. تتكون المادة المشبعة من الزيت المعدني المكرر المشتق من الزيت الخام ويستخدم هذا النوع في كابلات التوزيع الصلبة. بالنسبة للمشبع المكون من الزيت والغراء oil-resin يثقل الزيت بإضافة الغراء المستخرج من شجر الصنوبر لزيادة لزوجته لتتناسب مع درجة الحرارة

التي يعمل عندها الكابل. بإضافة الغراء تزداد الشدة الكهربية وتتحسن المقاومة لعمليات التأكسد. بالنسبة للكابلات المثبتة عموديا والمائلة عادة ما يحدث نزوح للزيت من منطقة لأخرى، لذلك عدلت خواص المادة المشبعة بإضافة بعض المواد الشمعية دقيقة التبلور والبولي إيثيلين والبولي إيزوبيتلين وقليل من غراء الصنوبر للزيت المعدني مما يساعد على جعل الورق في الكابل مشبع على الدوام، ويسمى هذا النوع بالتشبيع الكلي المقاوم للتسرب mass-impregnated non-drainage ويرمز له بالرمز MIND.

(٢-١٩-٤) الميكا ومشتقاتها (Mica)

الميكا اسم مشتق لنوع من بلورات السيليكون المعدنية للألو مينا والصودا الكاوية. ويمكن تقسيمها إلى شرائح رقيقة متساوية. وتجمع الميكا خصائص كهربائية عدة مثل شدة العزل العالية وفقد العزل المنخفض ومقاومة درجة الحرارة العالية وقوتها الميكانيكية الجيدة لذلك يتم استخدام الميكا في العديد من المعدات الكهربائية. وتستخدم الميكا النقية في تطبيقات التردد العالي. وتستخدم الميكا التجارية (التي تحتوي على شوائب) في عوازل الجهد المنخفض والمفاتيح الكهربائية وآلات التيار المستمر وملفات العضو الدوار ومعدات التبريد والتسخين الكهربائية.

(٣-١٩-٤) الزجاج (Glass)

ثابت العزل للزجاج يتراوح بين ٣,٧ إلى ١٠وكثافته تتراوح بين ٢,٢ إلى g/cm^3 ٦ وعند درجة حرارة الغرفة تتراوح المقاومة النوعية الحجمية ما بين 10^{12} إلى 10^{20} أوم.سم. ويتراوح فقد العازل للزجاج بين ٠,٠٠٤ إلى ٠,٠٢٠ معتمدا على التردد بحيث إن أكبر قيمة عند التردد الأقل. شدة العزل للزجاج تتراوح بين ٣٠٠٠ حتى ٥٠٠٠ كيلو فولت/سم وتقل مع زيادة درجة الحرارة وتصل لنصف قيمتها عند ١٠٠ درجة مئوية.

(٤-١٩-٤) السيراميك (Ceramics)

السيراميك هو مادة غير عضوية ويمكن تقسيمه إلى مجموعتين معتمدا على ثابت العزل. السيراميك ذو السماحية القليلة ($\varepsilon_r<١٢$) يستعمل كعازل بينما السيراميك ذو السماحية العالية ($\varepsilon_r>١٢$)يستخدم في المكثفات.

جدول (٥-٤) خصائص السيراميك ذو السماحية القليلة

الخاصية	بورسلين الجهد العالي	بورسلين الجهد المنخفض	الألو مينا
امتصاص الماء (جزء بالمليون)	٠	٠,٥-٢	٠
درجة الحرارة المنسبة (^oC)	١٠٠٠	٩٠٠	١٦٠٠
شدة العزل (kV/mm)	٢٥	٣	١٦
السماحية النسبية	٥-٧	٥-٧	٩
زاوية الفقد ($\tan\delta x١٠^{٤}$)	٥٠-١٠٠	١٠٠-٢٠٠	٥

جدول (٦-٤) خصائص السيراميك ذو السماحية العالية

السيراميك	السماحية النسبية	زاوية الفقد $Tan\delta x١٠^{٤}$
أكسيد التيتانيوم	٩٠	٥
تيتانيت الكالسيوم	١٥٠	٣
تيتانيت الباريوم	١٥٠٠	١٥٠

(٥-١٩-٤) الألياف (Fibers)

تتميز الألياف عندما تستخدم لأغراض العزل الكهربائي بجودة خواصها الميكانيكية كالمرونة العالية والنعومة وطول الاستخدام. وتكون الألياف المستخدمة إما طبيعية مثل القطن والجوت والكتان والصوف والحرير أو صناعية مثل النايلون والتفلون والألياف الزجاجية. تعتمد الخصائص الكهربائية للألياف على درجة الحرارة والرطوبة ومعظم الألياف الجافة تماما لها ثابت عزل يتراوح بين ٣ إلى ٨. وجود الشوائب الأيونية مثل الأملاح تقلل كثيرا من مقاومة الألياف الكهربائية.

جدول (٧-٤) الخصائص الكهربائية للألياف العازلة

الألياف	الكثافة	السماحية النسبية	زاوية الفقد (Tan δ)
ألياف نباتية طبيعية			
-القطن	١,٥٣	٤,٤-٧,٣	٠,١٢٠
-الكتان	١,٥٣	٤,٤-٧,٣	٠,١٢٠
-الجوت	١,٥٣	٤,٤-٧,٣	٠,١٢٠
(الخيش)	١,٣١	١,٥٢	٠,٠١٦
	١,٣٠	٣,٤- (٤,٤*)	٠,٠١٦
ألياف حيوانية طبيعية	١,١٤		٠,٠٥٣
-الصوف	١,٣٨	٢,٥١	٠,٠٣٠
-الحرير	٢,٣٠	١,٩٧	٠,٠٠١-٠,٠٠٣
	٢,٥٤	١,٩-٢,٢ ٥-٧	٠,٠٠١-٠,٠٠٢٥
ألياف صناعية			
-النايلون			
-تريلين			
-التفلون			
-ألياف زجاجية			

(٦-١٩-٤) المواد العازلة المصنوعة من اللدائن Polymeric insulation materials

تستخدم اللدائن على نطاق واسع في عمليات العزل الكهربائي نظرا لخصائصه الممتازة. بدأ في العديد من التطبيقات استبدال العوازل الطبيعية مثل الورق والزيوت المعدنية والمطاط الطبيعي بمواد اللدائن الصناعية polymers وخاصة في كابلات التوزيع والتسليك وكغلاف خارجي لجميع الكابلات والعوازل المستخدمة في القواطع الكهربية والمحولات كعوازل للملفات وجلب عازلة وعوازل خطوط النقل المعلقة والكثير من التطبيقات التي يصعب حصرها. يختلف الكم الهائل من العوازل المصنوعة من اللدائن باختلاف خواصها الميكانيكية والكهربية والحرارية. كما يمكن تعديل تلك الخواص بإضافة الملدنات plasticizers والحشوات fillers والملونات والمواد المضادة للأكسدة.

نظرا لتعدد أنواع اللدائن واختلاف خصائصها وطرق تصنيعها فقد جرى تصنيفها إلى عدة أصناف لتمييزها عن العوازل الصلبة الأخرى. تصنف اللدائن إلى ثلاثة أنواع، ثرموبلاستك Thermoplastic وتكون الروابط بين جزيئاته متوازية ويمكن إعادة تدويره وتصنيعه بالحرارة مثل البولي إيثيلين والبولي فينيل كلورايد، أما النوع الثاني فهو الثرموسيتينغ Thermosetting وتكون الروابط بين الجزيئات متشابكه Crosslinked وتتكون المادة بالتفاعل بين المركب الأساسي والمحفز للتفاعل بخلطهم بنسب معينة بحيث تبدأ الروابط في التشابك حتى تتصلد المادة ويكون التفاعل طارد للحرارة ومثال على ذلك مادة الإيبوكسي رزن Epoxy resin، حيث يمكن أن تأخذ المادة شكل القالب بعد انتهاء التفاعل. وعندما تسخن المادة فإن درجة الحرارة لا تكون كافية لتكسير الروابط وتسييلها كما في حالة االثرموبلاستك لذلك فهذا النوع غير قابل للذوبان أو الصهر. يمكن تحويل بعض المواد الثرموبلاستيكية إلى مواد ثيرمسيتينجية بإضافة بعض المواد الكيميائية أو الإشعاعات لتكوين روابط متشابكة، مثل البولي إيثيلين المتشعب Cross Linked PolyEithelen (XLPE) المستخدم في صناعة عوازل وأغلفة الكابلات وخاصة التي تعمل عند جهود عالية. والنوع الثالث هو مركبات المطاط Vulcanized Rubber Compounds.

- الثيرموبلاستك Thermoplastic:

ويوجد العديد من أنواع البلاستيك التي تخضع لهذا التصنيف ومن أشهرها استخداماً في أغراض العزل المواد التالية:

أ. البولي إيثيلين (Polyethylene)

هي مواد ثيرموبلاستيكية لها خصائص فريدة مثل المقاومة العالية للرطوبة والكيماويات وهي سهلة الإنتاج ومنخفضة التكاليف وكذلك لها مقاومة نوعية عالية وخصائص عزل ممتازة عند الترددات العالية. لذلك تستخدم بكثرة في كابلات القوى والاتصالات وكابلات التحكم وكابلات التليفزيون. وبتغيير طريقة التصنيع يمكن عمل أنواع مختلفة من البولي إيثيلين لها كثافة مختلفة وذلك لاستخدامها في مختلف التطبيقات. تتكون لدائن البولي إيثيلين من سلسلة متكررة من $-CH_2-CH_2-$. ويوجد منه البولي إيتيلين المنخفض الكثافة والبولي إيثلين عالٍ الكثافة والبولي إيثيلين ذو الكثافة المنخفضة جدا والبولي إيثيلين متوسط الكثافة والبولي إيثيلين الخطي المنخفض الكثافة. ويستخدم البولي إيثيلين المتوسط الكثافة والبولي إيثيلين المنخفض الكثافة في صناعة أغلفة الكابلات بينما يستخدم البولي إيثيلين منخفض الكثافة في عوازل الكابلات والغلاف الخارجي. وحيث إن درجة ذوبان البولي إيثيلين المنخفض الكثافة هي ما بين ١١٠ إلى ١١٥^{o}C وتطري المادة عند درجة حرارة ما بين ٨٠ إلى ٩٠^{o}C لذلك فإن درجة

الحرارة القصوى التي يجب أن يعمل عندها الكابل حددت بدرجة قدرها $70^{o}C$. ولزيادة درجة تحمل البولي إيثيلين للحرارة فقد طورت عملية البلمرة بإضافة مواد كيمائية أو أشعة لتكوين بولي إيثيلين ذو روابط متشابكة Cross linked polyethelyn (XLPE) والذي يمكنه أن يعمل عند درجة حرارة مستمرة قصوى قدرها $90^{o}C$.

جدول (٨□٤) الخصائص الكهربائية للبولي إيثيلين

الخاصية	بولي إيثيلين ذو كثافة منخفضة	بولي إيثيلين ذو كثافة متوسطة	بولي إيثيلين ذو كثافة عالية	بولي إيثيلين مشع
المقاومية الحجمية (أوم.سم) شدة العزل(كيلو فولت/سم) ثابت العزل (٥٠ Hz –١٠٦Hz) زاوية الفقد Tanδ مقاومة الشرارة	>١٠١٦ ١٧٠-٢٨٠ ٢,٣ ٠,٠٠٠٢ melts	>١٠١٦ ٢٠٠□٢٨٠ ٢,٣ ٠,٠٠٠٢ melts	>١٠١٦ ١٨٠-٢٤٠ ٢,٣٥ ٠,٠٠٠٢ melts	>١٠١٦ ٧٢٠-١٠٠٠ ٢,٣ ٠,٠٠٠٥ melts

ب. النايلون (Nylon)

النايلون عبارة عن ثيرموبلاستيك له قوة شد ومتانة ومرونة عالية عند نطاق درجات حرارة تتراوح بين ٠ حتى ٣٠٠ درجة مئوية ولها كذلك شدة عزل عالية و مقاومية نوعية حجمية وسطحية جيدة حتى بعد تعرضها لمدة طويلة من الرطوبة. وكذلك يقاوم التفاعلات الكيميائية ومن السهل تصنيعه. ويستخدم في التطبيقات التي تحتاج إلى مادة تقاوم الخدوش والتآكل وقوية، وعادة ما يستخدم كطبقة علوية لغلاف الكابل.

ج. البولي فينيل كلورايد Poly Vinyle Chloride (PVC)

يتميز البولي فينيل كلورايد بخواص كهربائية ممتازة عند الجهود المنخفضة وكذلك درجات الحرارة المنخفضة، وهو يستعمل كعازل جيد في الكابلات حتى جهد ٦ كيلو فولت إلا أنه يصبح غير مناسب للجهود الأكبر من ذلك حيث ترتفع مفقودات العزل بسبب ارتفاع قيمة ثابت العزل. ومن الملاحظ أيضا أن مقاومية البولي فنيل كلورايد تتغير تغيرا شديدا مع درجة الحرارة مما يجعله عند درجة حرارة مرتفعة غير مناسب بالمرة حيث تهبط مقاومية العزل عند ٧٠درجة مئوية إلى ألف مرة من قيمتها عند ٢٠ درجة مئوية. علاوة على ذلك فإنه يلين بالحرارة ويصلد بالبرودة ولهذا لا يجب أن يتعرض لدرجات حرارة مستمرة تزيد عن ٧٠درجة مئوية أو تقل عن ٠ درجة مئوية. وقد أمكن في السنوات الأخيرة إنتاج أنواع أخرى من البولي

فينيل كلوريد (كلوريد الفينيل المتعدد) بهدف تحسين خواصها الكهربائية والحرارية. وقد أمكن زيادة مقاومة هذه المادة للاحتراق بإضافة مادة هيدرات ثلاثي الألومونيوم Aluminum trihydrate والفوسفات والملدنات الهالوجينية. كما تم تقليل نسبة تركيز كلوريد الهيدروجين المنبعث أثناء الاحتراق بإضافة مسحوق كربونات الكالسيوم. أما كثافة الدخان المتولد فيمكن تقليلها باستخدام بعض الأملاح المعدنية.

البولي ستيرين (Polystyrene)

البولي ستيرين له شدة عزل مقارب للميكا وفقد أقل ولا يعتمد على التردد. المقاومية الحجمية حوالي 10^{19} أوم.سم وشدة عزل تتراوح بين ٢٠٠ إلى ٣٥٠كيلو فولت/سم. ثابت العزل عند ٢٠ درجة مئوية حوالي ٢,٥٥ وزاوية فقد ٠,٠٠٠٢ عند كل الترددات حتى MHz ١٠,٠٠٠. وتستخدم رقائق البولي ستيرين في تصنيع مكثفات الفقد القليل والتي لها سعة ثابتة ومقاومة عزل عالية جدا.

الأكريليك Acrylic (PMMA)

وهو عبارة عن مادة شفافة مقاومة للأشعة فوق البنفسجية UV وقوية ومقاومة للانشطار. تستخدم في اللوحات المضيئة بكثرة كلوحات الإعلانات.

البوليكاربونات Polycarbonate

ويتميز بقوته وهو عازل شفاف وله خواص كهربائية جيدة. يستخدم في أغطية لمبات الشوارع.

د. البولي بروبلين Polypropylene

ومن خواصه مقاومته للإجهادات واستخدامه عند درجات حرارة أعلى من البولي إيثيلين. ويستخدم في عزل المكثفات الكهربائية والكابلات.

ه. التفلون Polytetrafloraethylene (PTFE)

وهو من العوازل المتميزة والمقاومة للتآكل ولها معامل احتكاك منخفض كما تتميز بصلادتها كما يمكن أن تستخدم عند درجة حرارة ٢٥٠ درجة مئوية باستمرار. ولذلك لا يعتبر من ضمن مواد الثيرموبلاستيك الحقيقية نظرا لعدم إمكانية بثقه حيث يشكل على العازل بضغطه عند درجة حرارة منخفضة مما يجعل الجزيئات تلتحم ببعضها. قصر استخدام هذه المادة في الكابلات التي تتعرض لدرجات حرارة عالية وتردد عالي وذلك نظرا لتكلفة التصنيع العالية.

و. البولي يوريثين Polyyurethanes

يستخدم البولي يوريثين في تصنيع طبقة ما فوق غلاف الكابلات لحمايته وذلك لتميزه بمقاومة الاحتكاك.

الثيرموسيتينغ Thermosetting:

ويوجد العديد من أنواع البلاستيك التي تخضع لهذا التصنيف ومن أشهرها استخداماً في أغراض العزل المواد التالية:

أ. البوليستر (Polyester)

البوليستر له خصائص عزل ممتازة وصلابة سطح ومقاومة عالية لمعظم الكيماويات ويمكن تصنيف البوليستر إلى نوعين هما النوع المشبع والنوع غير المشبع. البوليستر المشبع يستخدم في الشرائح الزجاجية وألياف الزجاج المقوى. ألياف البوليستر تستخدم في عمل الورق وملابس التطبيقات الكهربائية ورقائق البوليستر تستخدم في عزل الأسلاك والكابلات في المحركات والمكثفات والمحولات. رقائق بوليستر مايلور يستخدم بكثرة لعمل العازل الورقي حيث إنه عند تردد القوى يكون عامل الفقد منخفض جدا يقل بزيادة درجة الحرارة. كذلك له شدة عزل حوالي ٢,٠٠٠كيلو فولت/سم ومقاومية حجمية أفضل من $١٠^{١٥}$أوم.سم عند ١٠٠درجة مئوية.

ب. الإيبوكسي Epoxides

وهو من العوازل الجيدة وله استخدامات عديدة كعوازل كهربائية بالإضافة إلى مقاومتها للقلويات وقوتها. وتستخدم في تخليق العناصر الإلكترونية وبعض الاستخدامات الأخرى في عوازل الجهد العالي.

ج. الفينولات

وهي من المواد العازلة القوية ولكنها قابلة للكسر. وتتميز بجودة عزلها الكهربائي حيث تستخدم حتى درجة حرارة قدرها ١٥٠ درجة مئوية. وتستخدم في عوازل الجهد العالي كرقائق من هذه المادة والورق، وكذلك تستخدم في الأفياش والمقابس الكهربائية.

(٧□١٩□٤) مركبات المطاط Vulcanized Rubber Compounds:

ويوجد العديد من أنواع المطاط التي تخضع لهذا التصنيف. يوجد نوعان من المطاط، طبيعي وصناعي. وتعتمد الخصائص الكهربائية للمطاط على درجة التصلد (Vulcanizing) ودرجة المزج (Compounding) . العوامل المؤثرة على الخصائص الكهربائية للمطاط هي الشوائب، والتغيرات الكيميائية والرطوبة والتغيرات في درجة الحرارة والتردد. يعتبر مطاط البتيل من أشهر أنواع المطاط الصناعي وقد استخدم على نطاق واسع في صناعة كابلات السفن نظرا لمقاومته للزيوت والشحوم التي تكون موجودة عادة داخل السفن. ومن أشهرها استخداماً في أغراض العزل المواد التالية: المطاط الطبيعي، الإستيرين بوتادين Styrene-butadiene Rubber ، النترايل Nitrile Rubber ، الإيثيلين بروبلين Ethylene-propylene rubber (EPM) ، والإيثيلين بروبلين دايين Ethylene-propylene diene rubber (EPDM) ، البتيل Butyl rubber ، البوتادين Butadiene rubber ، الثيرمو بلاستك Thermoplastic Rubber.

المملكة العربية السعودية
المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني
الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج

تقنية الجهد العالي

الصواعق الكهربائية

جميع الحقوق محفوظة للمؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني

(١-٥) مقدمة

إن ضمان استمرارية الخدمة لمصادر الطاقة الكهربائية ووثوقيتها يعتمد على تقليل عدد مرات الخروج الاضطراري للوحدات في الشبكات الكهربائية. لذلك فمن الضروري توجيه عناية خاصة لحماية الخطوط الكهربائية والمعدات الكهربائية بالشبكة من المسببات الرئيسية للزيادة الفجائية للجهد الكهربائي في نظم القوى الكهربائية مثل الصواعق والزيادة الناتجة من عمليات الوصل والفصل في دوائر الشبكة الكهربائية. فالصواعق الكهربائية هي ظاهرة طبيعية ولا تعتمد قيمة جهد الصاعقة (lightning voltage) التي تظهر على الخطوط الكهربائية على تصميم الخط بعكس الجهد الذي ينشأ عند فصل أو توصيل دائرة كهربائية، لذلك فإن أداء الصاعقة يميل إلى التحسن بزيادة مستوى العزل.

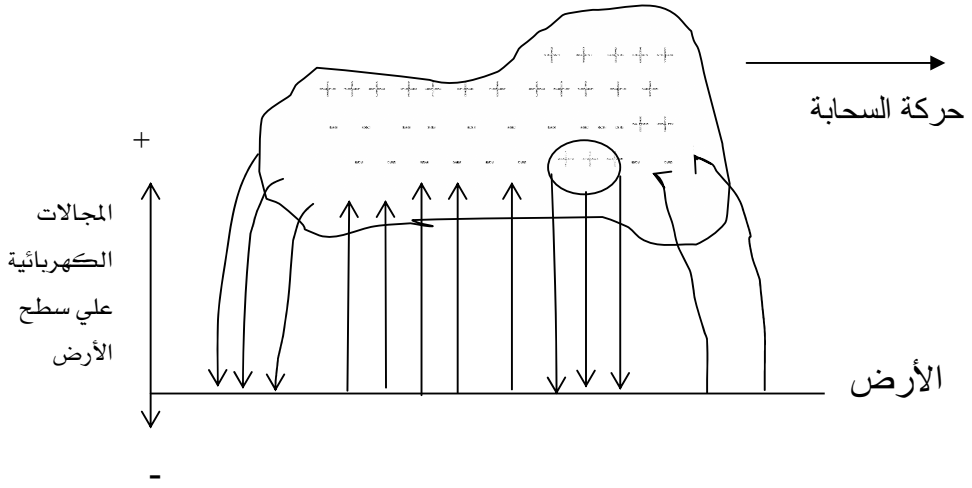
(٢-٥) المسببات الطبيعية لظاهرة الصواعق

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

(٣-٥) تكون الشحنات الكهربائية في السحب

العوامل التي تشترك في تكوين أو في تراكم الشحنات الكهربائية في السحب كثيرة وغير محددة، لكن أثناء العواصف الرعدية (thunderstorms) تنفصل الشحنات الكهربائية السالبة والموجبة بالتيارات الهوائية العنيفة التي تؤدي إلى دفع البلورات الثلجية للأجزاء العليا للسحابة والأمطار إلى الجزء السفلى للسحابة. هذا الفصل للشحنات يعتمد على ارتفاع السحب والذي يتراوح بين ٢٠٠ إلى ١٠,٠٠٠ متر مع احتمالية تركز الشحنات على مسافة تتراوح بين ٣٠٠ إلى ٢٠٠٠ متر. حجم السحب التي تشترك في تفريغ الصواعق الكهربائية للأرض غير محددة لكن الشحنات الكهربائية داخل السحابة يمكن أن تصل إلى ١٠٠ كولوم. لذلك فالسحب في هذه الحالة يمكن أن يكون جهدها الكهربائي يتراوح بين 10^7 إلى 10^8 فولت، مع مجال كهربائي يتراوح بين ١٠٠ فولت/متر داخل السحابة إلى ١٠٠٠٠ فولت/متر عند نقطة التفريغ الابتدائية. وتصل قيمة الطاقة الكهربائية المصاحبة لعمليات التفريغ إلى حوالي ٢٥٠ كيلو وات ساعة. وتكون المنطقة العليا من السحابة دائما موجبة الشحنة بينما المنطقة السفلى وقاعدة السحابة تهيمن عليها الشحنات السالبة ماعدا المنطقة الموضعية– بالقرب من القاعدة والرأس للسحابة - والتي تكون موجبة الشحنة. ويمكن أن تصل أقصى قيمة للمجال الكهربائي على الأرض الناتجة عن السحب

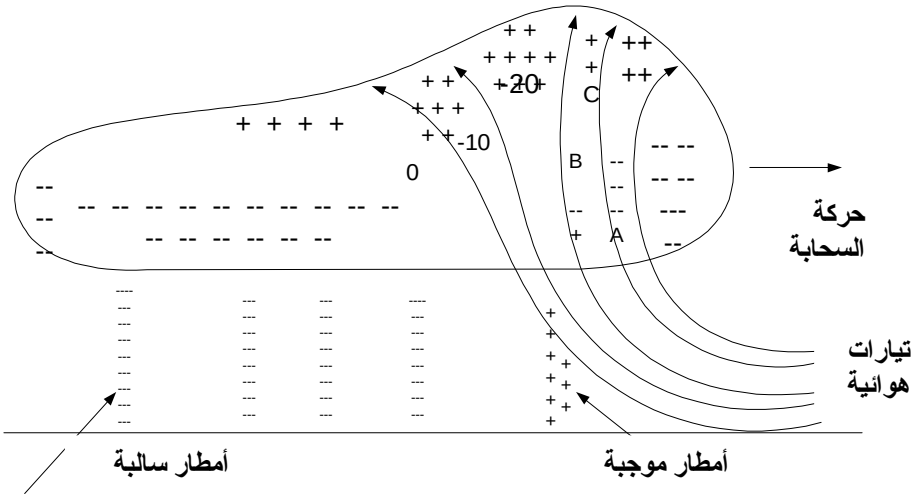
المشحونة إلى ٣٠٠ فولت/سم بينما هذه القيمة تكون حوالي ١ فولت/سم في الأجواء الصحوة. شكل (٥,١) يعطى نموذجاً محتملاً لتوزيع الشحنات مع المجالات الكهربائية المناظرة بالقرب من الأرض.



المجالات الكهربائية بالقرب من الأرض المناظرة(٥,١)شكل
للتوزيع المحتمل لتوزيع الشحنات في السحابة

طبقا لنظرية سمبسون فإن هناك ثلاث مناطق هامة في السحابة لابد من أخذها في الاعتبار عند تكوين الشحنات، شكل (٥,٢). أسفل المنطقة A تكون سرعة التيارات الهوائية حوالي ٨٠٠ سم/ثانية ولا يوجد تساقط للمطر خلالها. وفي المنطقة A تكون سرعة التيارات الهوائية كافية لتفتيت قطرات الماء المتساقطة، مسببة شحنات موجبة كثيفة في السحابة وشحنات سالبة في الهواء. فالشحنات الموجبة تسحب السحابة لأعلى والتي تقل بها سرعة الهواء، وتتحد القطرات المائية المشحونة بالشحنات الموجبة مرة أخرى مع القطرات الأكبر لتسقط مرة أخرى. لذلك فإن المنطقةA تصبح مليئة بالشحنات الموجبة بينما المنطقة B أعلى المنطقة A تصبح سالبة الشحنة بالتيارات الهوائية. وفي المنطقة العليا للسحابة تكون درجة الحرارة منخفضة (أقل من درجة التجمد) وتكون البلورات الثلجية هي المتواجدة فقط. وضغط الهواء على هذه البلورات الثلجية يجعلها سالبة الشحنة.

وقد قدم رينولد وماسون تعديلا لهذه النظرية طبقا للحقيقة القائلة بأن ارتفاع السحب الرعدية عن الأرض يمكن أن يتراوح بين ١٢ إلى ١٤ كيلومتر. التيارات الهوائية والرطوبة ودرجة الحرارة النوعية من العوامل الهامة لتكون السحب الرعدية وتكون الشحنات الكهربائية.



شكل (٥,٢) نموذج السحابة تبعا لنظرية سمبسون

تتحرك التيارات الهوائية - التي تتحكم بها التغيرات في درجة الحرارة - لأعلى محملة بالرطوبة وقطرات الماء. تكون درجة الحرارة صفر درجة مئوية عند ارتفاع ٤ كيلومتر من الأرض وربما تصل إلى ٥٠ درجة مئوية تحت الصفر عند ارتفاع حوالي ١٢ كيلومتر ولا تتجمد قطرات الماء حالا عندما تصل درجة الحرارة للصفر لكنها تتجمد عند درجة حرارة ٤٠ درجة مئوية تحت الصفر فقط كجزيئات صلبة وعلى هذه الجزيئات تتكون البلورات الثلجية وتنمو وتتضاعف. وكلما زاد عدد الأماكن الصلبة تزداد معها درجة الحرارة التي تتكون وتتضاعف عندها البلورات الثلجية ($>$ ٤٠^{o}C) لذلك ففي السحب تتراوح درجة حرارة التجمد الفعالة بين ٣٣ و ٤٠ درجة مئوية تحت الصفر. في السحب الرعدية تجذب التيارات الهوائية القطرات المائية لأعلى وتتعرض هذه القطرات لتبريد عالٍ جدا. وعندما يحدث هذا التجمد تنمو البلورات الثلجية وتتكاثر وتبدأ في الحركة لأسفل تحت تأثير وزنها وقوة الجذب. لذلك فالسحب الرعدية تتكون من قطرات مائية مبردة تبريد عالٍ تتحرك لأعلى كتل من البرد تتحرك لأسفل.

وعندما تؤثر القطرات المائية المبردة تبريدا عاليا على كتل البرد تتجمد تجمدا جزئيا أي أن الطبقات الخارجية لقطرات الماء تتجمد مكونة طبقة بداخلها ماء. وعندما تمتد خطوات التبريد للمنطقة الدافئة في قلب القطرات تتمدد ولهذا السبب تتحول إلى قطع صغيرة متناثرة من الثلج وتتحرك لأعلى بفعل التيارات الدوامية و تحمل شحنات موجبة للمنطقة العليا من السحابة. وتتحرك كتل البرد لأسفل محملة الشحنات السالبة المكافئة للمنطقة السفلى من السحابة ولذلك تتكون الشحنات السالبة في الجانب الأسفل للسحابة.

طبقا لماسون فإن قطرات الثلج لابد أن تحمل فقط الشحنات الموجبة لأعلى و لكون الماء أيوني بطبيعته وله تركيز من أيونات (H^{+}) الهيدروجين الموجبة وأيونات (OH^{-}) أكسيد الهيدروجين السالبة وتعتمد كثافة

الأيونات على درجة الحرارة لذلك فإن كتلة الثلج التي تكون درجة حرارة السطح العلوي لها T_1 ودرجة حرارة السطح السفلى لها T_2 بحيث إن $(T_1<T_2)$ يكون التركيز الأعلى للأيونات في المنطقة السفلى. وبما أن أيونات الهيدروجين الموجبة أخف وزنا فإنها تتسرب بسرعة إلى جميع الحجم. لذلك فإن المنطقة السفلى والتي تكون دافئة تتحمل بالأيونات السالبة والمنطقة العليا - المنطقة الباردة - تتحمل بالأيونات الموجبة. لذلك فإن الطبقات الخارجية لقطرات الماء المجمدة والتي تلمس كتل البرد تكون أبرد نسبيا (من قلب القطرات الداخلية والتي بها ماء أدفأ) ولذلك تكتسب شحنات موجبة وعندما تتشقق الطبقات الخارجية وتجزأ فإن الشحنات الموجبة تتجه لأعلى السحابة.

وطبقا لنظرية رينولد والتي تعتمد على النتائج العملية فإن جزيئات البرد تكتسب شحنات سالبة عندما تلمس بلورات الثلج الدافئة وعند انعكاس الحالات الحرارية تنعكس قطبية الشحنات. وبزيادة الشحنات أي بزيادة معدل تولد الشحنات وجد أنه لا يتفق مع الملاحظات العملية المتعلقة بالسحب الرعدية.

معدل شحن السحب الرعدية

اعتبر ماسون أن السحب الرعدية تتكون من خليط منتظم من الشحنات الموجبة والسالبة. ومن خلال كتل البرد والتيارات الدوامية تنفصل الشحنات رأسيا. بفرض أن λ هو العامل الذي يعتمد على موصلية الوسط، سيكون هناك طريق مقاومي متسرب للشحنات من المجال الكهربائي وهذا يجب أخذه في الاعتبار لشحن السحب.

بفرض أن E هي كثافة المجال الكهربائي و v سرعة فصل الشحنات و ρ كثافة الشحنات في السحابة لذلك فإن المجال الكهربائي E يعطى بـ:

$$\frac{dE}{dt} + \lambda E = \rho v \qquad (٥,١)$$

وقيمة تعطى بالمعادلة:

$$E = \frac{\rho v}{\lambda}[1 - \exp(-\lambda t)] \qquad (٥,٢)$$

وهذه المعادلة تفترض مبدئيا أن $E=٠$ عندما $t=٠$ أي عند بدء فصل الشحنات.

بفرض أن Q_s هي الشحنات المنفصلة و Q_g هي الشحنات المتولدة لذلك فإنه:

$$\rho = Q_g/Ah \qquad (٥,٣)$$

وكذلك فإن:

$$E = Q_s/A\varepsilon_o \qquad (٥,٤)$$

حيث إن ε_o هي سماحية الوسط و A مساحة السحابة و h ارتفاع المنطقة المشحونة

من المعادلة (٢) وبالتعويض نجد أن:

$$Q_g = \frac{Q_s h}{v[1-\exp(-\lambda t)]} = \frac{M}{v[1-\exp(-\lambda t)]} \qquad (٥,٥)$$

حيث إن $M=Q_s h$ وهو العزم الكهربائي للصاعقة الرعدية

القيم المتوسطة الملاحظة للسحب الرعدية هي:

الثابت الزمني = $(\lambda/١)$ = ٢٠ ثانية

العزم الكهربائي = M = ١١٠ كولوم.كيلومتر

زمن ظهور أول وميض= t = ٢٠ ثانية

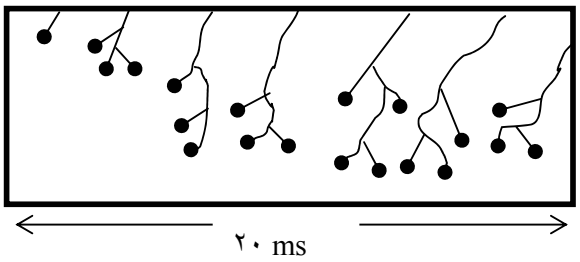
سرعة فصل الشحنات = v = ١٠ حتى ٢٠ متر/ثانية

بالتعويض بهذه القيم نجد أن:

$$Q_g = \frac{20,000}{v} = \frac{20,000}{20} = 1000 \text{ Coloumb} \quad \text{for } v=٢٠ \text{ m/s}$$

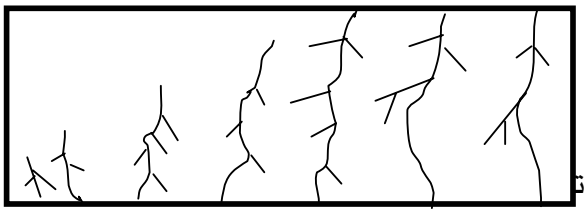
(٤-٥) آلية (ميكانيزم) الصاعقة الرعدية

عندما تتجاوز كثافة المجالات الكهربائية عند بعض النقاط في السحابة المحملة بالشحنات الكهربائية قيمة المجالات الكهربائية لانهيار الهواء المتأين الرطب (≈ ١٠ كيلو فولت/سم) فإن مجرى كهربائياً (electric streamer) مليئاً بالشحنات الكهربائية يبدأ متجها للأرض بسرعة حوالي ١٠/١ مرة سرعة الضوء لكن من الممكن أن يتقدم لمسافة حوالي ٥٠ متر قبل أن يتوقف مشعا وميض لامع من الضوء. هذا التوقف ربما يكون من خلال عدم كفاية تكون الشحنات الكهربائية عند رأس المجرى الكهربائي وغير كاف للحفاظ على المجال الكهربائي الضروري للتقدم الأكثر للمجرى الكهربائي. وبعد زمن صغير يقدر بحوالي ١٠٠ ميكرو ثانية يبدأ المجرى مرة أخرى مكررا إنجازه. الوقت الكامل المطلوب لهذه المجاري الكهربائية للوصول للأرض ربما يكون ٢٠ ميلي ثانية. .بريق المجرى الكهربائي يعتمد على حالة الهواء المحيط والمجالات الكهربائية وربما تتكون أفرع من المجرى الكهربائي الابتدائي. ويكون هذا التقدم للمجرى الكهربائي من خلال قفزات متتالية تسمى خطوات قيادية (stepped leader) .



تقدم الخطوات القيادية من السحابة(٥,٣)

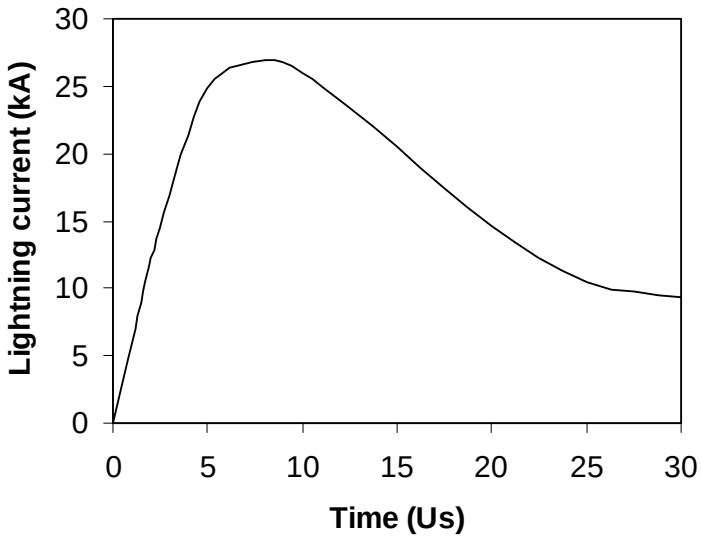
بعد وصول المجرى الكهربائي للأرض يتبع ذلك الصاعقة العائدة. عندما يتحرك المجرى الكهربائي للأرض تتراكم الشحنات الموجبة أسفل رأس الصاعقة أو المجرى و في نفس الوقت تصل الصاعقة للأرض أو تقترب كثيرا من الأرض فإن كثافة المجالات الكهربائية على الأرض تكون كبيرة بما فيه الكفاية لتكوين المجرى. عندئذ تعاد الشحنات الكهربائية الموجبة للسحابة لتعادل الشحنات الكهربائية السالبة وعندئذ يمر تيار عالي خلال هذا المجرى. سرعة الصاعقة المعادة أو الرئيسية تتراوح بين ٠,٠٥ إلى ٠,٥ مرة سرعة الضوء وقيمة التيارات تتراوح بين ١,٠٠٠ إلى ٢٥٠,٠٠٠ أمبير. وتنتهي الصاعقة المعادة قبل الوصول إلى السحابة. فترة الصاعقة الرئيسية أو المعادة حوالي ١٠٠ ميكرو ثانية أو أكبر. أقطار الصواعق المعادة تتراوح بين ١ إلى ٢ سم ولكن محتوى التفريغ الهالي ربما يصل إلى ٥٠ سم. الصواعق المعادة يمكن أيضا أن يتفرع منها ولكن هذه الأفرع تنتهي لأن الشحنات بها تتم معادلتها.



بعد إتمام الصاعقة المعادة يستمر تيار صغير يتراوح بين ١٠٠ إلى ١٠٠٠ أمبير في السريان لفترة تقترب من ٢٠ ميللي ثانية. وبسبب هذه التيارات تقل بصورة واضحة نقاط الانهيار الابتدائية في السحابة وتتركز التفريغات حول هذه النقطة ونتيجة لذلك تصبح هناك خزانات إضافية للشحنات متاحة بسبب اختراق كتلة السحابة والمعروفة بالطرق المفضلة والتي تقود إلى الصواعق المكررة. الصاعقة القيادية للصواعق المكررة تتقدم بسرعة أقل (تقريبا ١٪ من سرعة الضوء) ولا تتفرع. هذه الصاعقة تسمى القائد المستمر والصاعقة المعادة لهذه الصاعقة القيادية تتبع دائما بتيار أقل. الزمن بين الصواعق المكررة تتراوح بين ٠,٦ إلى ٥٠٠ ميللي ثانية بمتوسط ٣٠ ميللي ثانية. والزمن الكلي للصاعقة يمكن أن يزيد عن ١ ثانية. التيار من الأرض بواسطة الصاعقة المعادة الرئيسية يكون قيمته في حدود ٢٥٠,٠٠٠ أمبير ومعدل ارتفاعه يمكن أن يكون في حدود 10^{11} أمبير/ثانية.

(٥-٥) متغيرات وخصائص الصواعق الرعدية

متغيرات وخصائص الصواعق تتضمن قيمة التيار ومعدل ارتفاع التيار والتوزيع المحتمل لها وشكل الموجة لجهود وتيارات الصواعق الرعدية.



شكل (٥,٥) موجة التيار النبضية (الدفعية) للصاعقة

ويوضح شكل (٥,٥) موجة التيار للموجات الدفعية للصاعقة على خطوط النقل الكهربائي. ويوضح الشكل بأن التيار الدفعي يزداد في زمن قصير جدا إلى قيمته القصوى (حوالي ١٠ ميكرو ثانية) ثم يقل التيار تدريجيا إلى الصفر في زمن أطول نسبيا. وتسمى الموجة التي يرتفع فيها التيار حتى القيمة القصوى الموجة الأمامية (front wave) وتأخذ وقتاً قصيراً جدا لا يتعدى ١٠ ميكرو ثانية أما الموجة التي ينخفض فيها التيار تدريجيا إلى الصفر فتسمى موجة الذيل (tail wave) وتأخذ وقتاً أطول نسبيا أي عدة ميللي ثانية. وموجة الذيل هي المسؤولة عن انهيار المعدات الكهربائية (الانهيار الحراري). وعادة يقاس التيار الدفعي مباشرة من الأبراج أو المباني الشاهقة أو عند أرجل أبراج خطوط النقل.

الخصائص الهامة الأخرى هي زمن القيمة القصوى ومعدل ارتفاع التيار. وقد تم الاستنتاج من البيانات المجمعة من القياسات التي تمت أن ٥٠٪ من التيارات الدفعية للصواعق لها معدل ارتفاع أكبر من ٧,٥ كيلوأمبير/ميكروثانية و ١٠٪ أكبر من ٢٥ كيلوأمبير/ميكروثانية. زمن موجة الذيل وهو الزمن حتى نصف القيمة القصوى على موجة الذيل غالبا ما يكون أكبر من ٣٠ ميكرو ثانية.

قياسات الجهود الدفعية تشير إلى أن القيمة القصوى للجهد يمكن أن تصل إلى ٥,٠٠٠ كيلوفولت على خطوط النقل الكهربائية ولكن في المتوسط تكون الجهود الدفعية للصواعق أقل من ١,٠٠٠ كيلوفولت

على الخطوط. زمن الموجة الأمامية يتراوح بين ٢ إلى ١٠ ميكروثانية وزمن موجة الذيل يتراوح بين ٢٠ إلى ١٠٠ ميكروثانية ومعدل ارتفاع الجهد الدفعي يكون في حدود ١ميجافولت/ميكروثانية.

الصواعق الرعدية على خطوط النقل تنقسم إلى مجموعتين الصواعق المباشرة والصواعق التأثيرية. عندما تفرغ السحابة الرعدية مباشرة على أبراج خطوط النقل أو على موصلات الخط الكهربائي تسمى بالصواعق المباشرة .وهذه هي أخطر الصواعق على المعدات الكهربائية ولكنها نادرة الحدوث. ولكن في معظم الأحوال تحدث الصواعق التأثيرية

عندما تولد العواصف الرعدية الشحنات السالبة عند الطرف الأرضي تطور الأجهزة المؤرضة شحنات موجبة تأثيرية والأجهزة المؤرضة التي يهتم بها تقنيو الكهرباء هي خطوط النقل والأبراج. ومن المتوقع أن خطوط النقل لا تتأثر لأنها معزولة عن الأرض بعوازل التعليق بينما تتسرب الشحنات الموجبة من البرج خلال عوازل التعليق إلى موصلات خطوط النقل بسبب المجال الكهربائي العالي وهذه العملية تأخذ وقتاً أكبر يقدر بمئات الثواني. وعند تفريغ السحابة لبعض المعدات المؤرضة يترك خط النقل محملاً بكمية كبيرة جدا من الشحنات الموجبة والتي لا يمكن تسربها فجأة. وهكذا يمثل خط النقل والأرض مكثفاً ضخماً جدا مشحون بالشحنات الموجبة وعندئذ يحدث الجهد الزائد (overvoltage) من خلال هذه الشحنات التأثيرية وينتج عنها صاعقة كهربائية تسمى الصواعق الرعدية التأثيرية.

في بعض الأحيان عند حدوث الصواعق الرعدية المباشرة على البرج فإنه يحمل تيارا دفعيا عاليا جدا وهذا التيار الدفعي يبني جهدا دفعيا عاليا على البرج من خلال المقاومة الأرضية للبرج وبذلك يمكن حدوث الشرارة السطحية (flashover) على أسطح عوازل التعليق وهو ما يسمى "بالشرارة السطحية الخلفية" (back flashover).

(٦-٥) النموذج الرياضي للصاعقة

أثناء عملية تكون الشحنات تعتبر السحابة غير موصلة و لهذا يمكن افتراض وجود جهود مختلفة عند الأجزاء المختلفة بالسحابة. ولو استمرت عملية تكون الشحنات الكهربائية بالسحب فمن المحتمل أن تزيد قيمة المجال الكهربائي عند بعض النقاط للمناطق المشحونة عن شدة العزل للهواء أو الهواء الرطب في السحابة. هذا التفريغ الموضعي يمكن أن يؤدي إلى تكون خزان كبير للشحنات داخل كتلة كبيرة من السحابة فوق الأرض مع وجود الهواء كعازل بين السحابة والأرض. وعند التفريغ بين السحابة والأرض بأول صاعقة قيادية والتي تتبعها الصواعق الرئيسية بكمية تيارات عالية فمن الممكن اعتبار الصاعقة الرعدية كمصدر تيار قيمته I_o مع معاوقة مصدر قيمتها Z_o وتفرغ تجاه الأرض. وبفرض أن الصاعقة ضربت كياناً أو معدة كهربائية له مقاومة Z فإن الجهد الذي يبنى على هذا الكيان يكون مساويا :

$$V = I\,Z$$

$$= I_o \frac{ZZ_o}{Z + Z_o}$$

$$= I_o \frac{Z}{1 + \frac{Z}{Z_o}} \qquad (٦)$$

قيمة معاوقة المصدر لمجرى الصاعقة لا يعرف بالضبط ولكنه يتراوح بين ١٠٠٠ إلى ٣٠٠٠ أوم. الكيان أو المعدة الكهربائية الهامة بالنسبة لنظم القوى الكهربائية هو خط النقل الكهربائي وله معاوقة دفعة (characteristic impedance) أقل من ٥٠٠ أوم (معاوقة الدفعية لخط النقل الهوائي تتراوح بين ٣٠٠ إلى ٥٠٠ أوم وللأسلاك الأرضية تتراوح بين ١٠٠ إلى ١٥٠ أوم وللأبراج تتراوح بين ١٠ إلى ٥٠ أوم وهكذا) لذلك فالقيمة Z/Z_o غالباً ما تكون أقل من ٠,١ ولذلك يمكن إهمالها.

وفي هذه الحالة يكون ارتفاع جهد الخطوط بالتقريب يساوي:

$$V=I_o\,Z$$

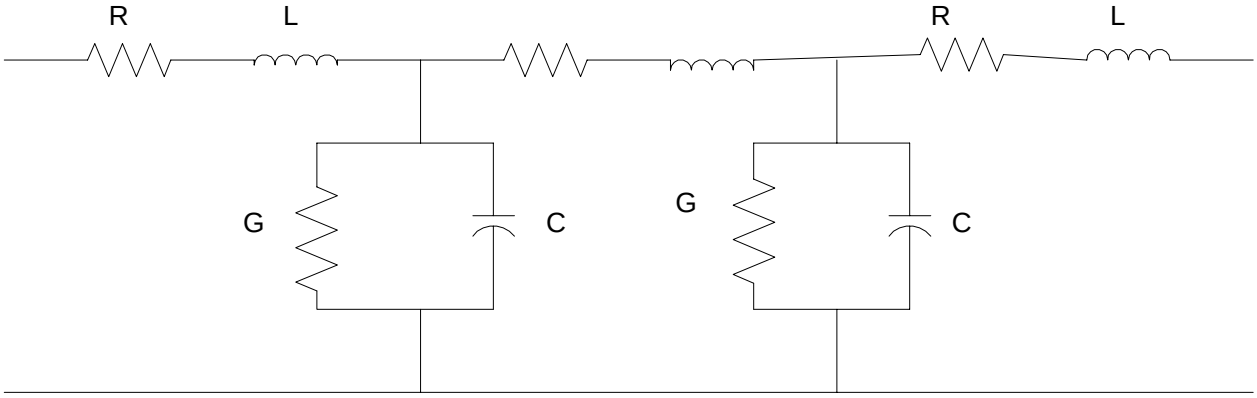
حيث إن I_o هو تيار الصاعقة الرعدية و Z هي معاوقة الدفعة للخط.

بفرض أن تيار الصاعقة الرعدية حوالي ١٠,٠٠٠ أمبير ضرب خطا هوائيا معاوقته الدفعية ٤٠٠ أوم فإنه يتسبب في جهد زائد لحظي مقداره ٤,٠٠٠ كيلو فولت. وهذا الجهد الكبير يتسبب مباشرة في حدوث شرارة على أسطح عوازل التعليق للخط (flashover).

في حالة الصاعقة المباشرة على الخط الكهربائي الهوائي فإن موجة الخط تنقسم لجزئين و تسير كل موجة في اتجاه معاكس للأخرى لذلك فالمعاوقة الدفعية الفعالة للخط الهوائي تبدو بالموجة الدفعية $Z_o/٢$ وبأخذ المثال السابق يصبح الجهد اللحظي مقداره (٤٠٠/٢)x١٠,٠٠٠ أي ٢,٠٠٠ كيلو فولت. لو أن هذا الخط الهوائي جهده ١٣٢ كيلو فولت وعدد عوازل التعليق ١١ عازل قطر كل منها ٢٥,٤ سم فإن الشرارة السطحية على عوازل التعليق ستحدث حيث إن جهد الشرارة للعوازل عند الجهد الدفعي حوالي ٩٥٠ كيلو فولت لجهد دفعي زمن مقدمة موجته ٢ ميكرو ثانية.

(٧-٥) انتشار موجات الجهد والتيار الدفعي على خطوط النقل

تعتبر خطوط النقل الطويلة شبكة كهربائية بعناصر كهربائية موزعة وباعتبار L, C, R, G هي الحث والسعة والمقاومة وموصلية التسريب لكل وحدة طول من الخط كما في شكل (٥,٦) يمكننا كتابة موجات الجهد والتيار عند أي نقطة على مسافة x من نقطة انطلاق الموجة كما يلي:



شكل (٥,٦) عناصر الخط الكهربائي الطويل الموزعة

$$\frac{\delta^2 e}{\delta x^2} = RG + (RC + GL)\frac{\delta e}{\delta t} + LG\frac{\delta^2 e}{\delta t^2} \qquad (٥,٦)$$

$$\frac{\delta^2 i}{\delta x^2} = RG + (RC + GL)\frac{\delta i}{\delta t} + LC\frac{\delta^2 i}{\delta t^2} \qquad (٥,٧)$$

يمكن كتابة حل المعادلتين (٥,٦) و (٥,٧) كما يلي:

$$e = [\exp(x\gamma)]f_1(t)+[\exp(-x\gamma)]f_2(t) \qquad (٥,٨)$$

وكذلك فإن:

$$i = -\sqrt{\frac{Y}{Z}}[\{\exp(x\gamma)\}f_1(t) - \{\exp(-x\gamma)\}f_2(t)] \qquad (٥,٩)$$

حيث أن:

$$\gamma = \sqrt{LC}[(p + \frac{R}{L})(p + \frac{G}{C})]^{1/2} \qquad (٥,١٠)$$

$$Y = G + C_p$$
$$Z = R + L_p$$
$$P = \delta/\delta t$$

وبإهمال الفقد في الخط أي اعتباره خطاً مثالياً بحيث R=٠ و G=∞ فإن معادلات موجات التيار والجهد يمكن تبسيطها إلي:

$$\frac{\delta^2 e}{\delta x^2} = LC\frac{\delta^2 e}{\delta t^2} \qquad (٥,١١)$$

$$\frac{\delta^2 i}{\delta x^2} = LC\frac{\delta^2 i}{\delta t^2} \qquad (٥,١٢)$$

وبحل هذه المعادلات نستنتج:

$$e = f_1(t + \frac{x}{v}) + f_2(t - \frac{x}{v}) \qquad (٥,١٣)$$

$$i = -\sqrt{\frac{C}{L}} f_1(t + \frac{x}{v}) + \sqrt{\frac{C}{L}} f_2(t - \frac{x}{v}) \qquad (٥,١٤)$$

حيث إن سرعة الموجة v هي:

$$v = 1/\sqrt{LC} \qquad (٥,١٥)$$

والمعاوقة الدفعية للخط هي:

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} \qquad (٥,١٦)$$

وهذا الحل يمثل موجتين دفعيتين تسيران في اتجاهين متضادين. السرعة v هي سرعة الضوء في وسط بدون فقد.

عند تطبيق الجهد e(t) عند أحد طرفي الخط الكهربائي غير الفاقد(lossless line) تشحن أول وحدة مكثف للجهد e وتفرغ بعد ذلك في المكثف الذي يليه من خلال الحث L وهذه العملية (الشحن/التفريغ) تستمر حتى الطرف الآخر من الخط وتنتقل الطاقة من الشكل الكهرو ستاتيكي في المكثف للشكل المغناطيسي في الملف لذلك فموجة الجهد تتقدم للطرف الآخر من الخط محملة بموجة التيار المكافئ. هذا الانتشار للجهد والتيار يسمى بالموجات المسافرة (traveling wave).

وعندما تصل الموجات المسافرة على الخط لنقاط تغيير بالخط أي التي يكون عندها تغيير مفاجئ لعناصر الخط الكهربائي يعبر جزء من الموجة هذه النقطة ويرتد الجزء الآخر من الموجة عائدا. وهذا التغيير المفاجئ لعناصر الخط مثل:

(أ) فتح دائرة الخط (ب) قصر في دائرة الخط

(ت) ربط بخط آخر أو كابل (ث) ملفات معدة كهربائية....وهكذا

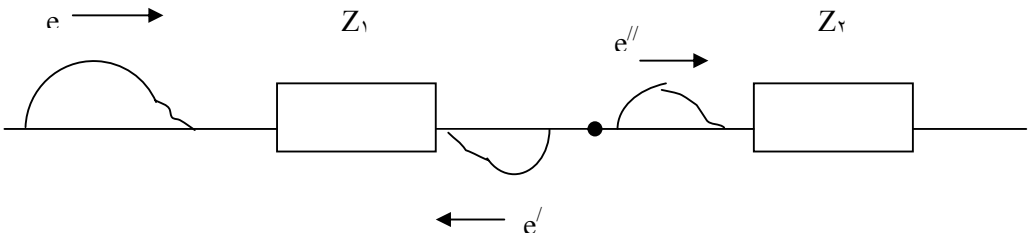
وعند نقطة التغيير المفاجئ تتراوح قيم التيارات والجهود بين الصفر وضعف القيمة معتمدة على خصائص طرف الخط. الموجة الساقطة على هذه النقطة تنقسم إلى موجة مرسلة وأخرى مرتدة وتتبع هذه الموجات قوانين كيرشوف والمعادلات التفاضلية للخط.

عندما تقابل الموجات الساقطة (e,i) تغييرا في المعاوقة للخط يرتد جزء من الموجة في الاتجاه المعاكس $(e^{/}, i^{/})$ فإذا كانت معاوقة الخط Z_1 ومعاوقة الطرف Z_2 عندئذ تكون:

$$e^{/} = \frac{(Z_2 - Z_1)}{(Z_2 + Z_1)} e = \Gamma e \qquad (٥,١٧)$$

$$i^{/} = \frac{(Z_2 - Z_1)}{(Z_2 + Z_1)} i = -\Gamma i \qquad (٥,١٨)$$

حيث Γ هو معامل الارتداد.



شكل (٥,٧) الموجة المرسلة والموجة المرتدة عند نقطة التغيير في الخط

والموجة المرسلة عبر المعاوقة Z_2 هي:

$$e^{//} = \frac{2Z_2}{(Z_2 + Z_1)} e = (1 + \Gamma)e \qquad (٥,١٩)$$

$$i^{//} = \frac{2Z_1}{(Z_2 + Z_1)} i = (1 - \Gamma)i \qquad (٥,٢٠)$$

ويمكن بسهولة إثبات أن:

$$\frac{e}{i} = Z_1, \qquad \frac{e^{/}}{i^{/}} = -Z_1, \qquad \frac{e^{//}}{i^{//}} = Z_2$$

(٨-٥) تطبيقات على دالة خطوة الوحدة (unit step)

(١-٨-٥) خط كهربائي مفتوح نهايته (open circuit)

بفرض أن الجهد للموجة الساقطة على الخط هو:

$$e = E\,U(t)$$

وقيم المعاوقات الدفعية للخط الكهربائي والدائرة المفتوحة هما:

$$Z_1 = Z, \qquad Z_2 = \infty$$

لذلك فإن معامل الارتداد هو:

$$\Gamma = \frac{(Z_2 - Z_1)}{(Z_2 + Z_1)} = \frac{(1 - Z_1 / Z_2)}{(1 + Z_1 / Z_2)}$$

$$\Gamma = \frac{1 - Z/\infty}{1 + Z/\infty} = 1$$

لذلك فإن الموجة المرتدة هو: $e' = \Gamma e = e = E\,U(t)$

وجهد الموجة المرسلة هو: $e'' = (1+\Gamma)\,e = 2e = 2EU(t)$

لذلك فإن الجهد عند الطرف المفتوح يرتفع لضعف قيمته.

(٢-٨-٥) خط كهربائي مقصور نهايته (short circuit)

بفرض أن الجهد للموجة الساقطة على الخط هي:

$$e = E\,U(t)$$

وقيم المعاوقات الدفعية للخط الكهربائي والقصر هما:

$$Z_1 = Z, \qquad Z_2 = 0$$

لذلك فإن معامل الارتداد هو:

$$\Gamma = \frac{(Z_2 - Z_1)}{(Z_2 + Z_1)} = \frac{(0 - Z)}{(0 + Z)} = -1$$

لذلك فإن الموجة المرتدة هي: $e' = \Gamma e = -e = -E\,U(t)$

وجهد الموجة المرسلة هي: $e'' = (1+\Gamma)\,e = 0$

قيمة التيار لموجة التيار المرتدة هي: $i' = \left| -\frac{e'}{Z} \right| = \frac{EU(t)}{Z}$

أي أن قيمة الموجة المرتدة تساوي قيمة الموجة الساقطة.

قيمة التيار الكلي عند نقطة التغيير: $i_o = (i+i') = ٢\ i$

لذلك فإن التيار عند نقطة التغيير يرتفع لضعف قيمة الموجة الساقطة.

أمثلة

مثال١ : خط هوائي ثلاثي الأوجه جهده ٢٢٠ كيلو فولت طوله ٤٠٠ كيلو متر وعناصره $R=٠,١\Omega/km$ و $L=١,٢٦mH/km$ و $C=٠,٠٠٩\mu F/km$ و $G=٠$ أوجد:

(أ) المعاوقة الدفعية للخط (ب) سرعة الانتشار للموجة بإهمال المقاومة

(ت) إذا ضربت موجة جهد دفعية قيمتها ١٥٠ كيلو فولت وموجة ذيل طويلة جدا طرف خط النقل، احسب الزمن التي تأخذه الموجة الدفعية للوصول إلى الطرف الآخر من الخط.

الحل: $R=٠,١\Omega/km,$ $L=١,٢٦x١٠^{-٣}$ H/km, $C=٠,٠٠٩x١٠^{-٦}$ F/km

(أ) سرعة الموجة v

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{1.26x10^{-3}\,x0.009x10^{-6}}} = 3x10^{5}\,km/s$$

(ب) المعاوقة الدفعية للخط Z

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{1.26x10^{-3}}{0.009x10^{-6}}} = 374.2\Omega$$

(ت) زمن وصول الموجة الدفعية للطرف الآخر من الخط t

$$t = \frac{line..length}{v} = \frac{400}{3x10^{5}} = 1.33x10^{-3}\,s$$

مثال ٢: خط نقل كهربائي له معاوقة دفعية مقدارها ٥٠٠Ω متصل بكابل أرضي معاوقته الدفعية ٦٠Ω في الطرف الآخر للخط. إذا تحركت موجة دفعية مقدارها ٥٠٠kV على طول الخط لنقطة الربط مع الكابل أوجد الجهد المبني عند نقطة الربط.

الحل: $e=٥٠٠\ U(t)\ kV,$ $Z_١=٥٠٠\Omega,$ $Z_٢=٦٠\Omega$

معامل الارتداد Γ

$$\Gamma = \frac{(Z_2 - Z_1)}{(Z_2 + Z_1)} = \frac{(500 - 60)}{(500 + 60)} = 0.786$$

قيمة الجهد المرسل $e^{//}$

$$e^{//} = (١+\Gamma)\ e = (١+٠,٧٨٦)\ x\ ٥٠٠ = ٨٩٣\ kV$$

(٩-٥) حماية خطوط النقل الكهربائية من الصواعق

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

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

(أ) حماية الخطوط الهوائية باستخدام خطوط أرضية على الأوجه لخطوط النقل.

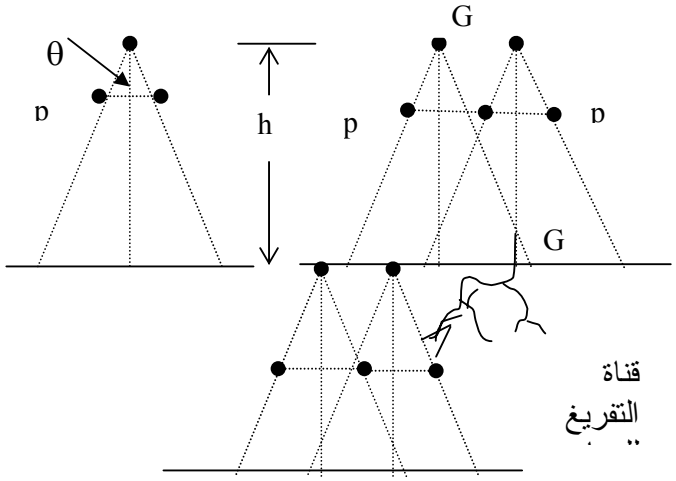
(ب) استخدام القضبان الأرضية

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

(١-٩-٥) 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 موجودا أعلى الخطوط لرئيسية لخط النقل الكهربائي. هذا الخط الأرضي يعمل على حماية خط النقل الكهربائي من الشحنات المتولدة من السحب وكذلك من تفريغ الصواعق الكهربائية. ويوضح شكل (٥,٨) الخط الأرضي بالنسبة لخطوط النقل.

ويمكن شرح كيفية حماية الخط الأرضي للخطوط الكهربائية كما يلي. بفرض أن السحابة الموجبة الشحنة موجودة أعلى الخط فإنها توجد شحنات كهربائية تأثيرية سالبة على الجزء من الخط الكهربائي والموجود أسفل منها. وبوجود الخط الأرضي مع الخط الكهربائي فإن كلا منهما سيكتسب شحنات تأثيرية ولكن الخط الأرضي يكون مؤرضا عند مسافات منتظمة لهذا فإن الشحنات التأثيرية المتولدة على الخط الأرضي تسرب للأرض عند نقاط التأريض ويكون فرق الجهد بين الخط الأرضي والسحابة وبين الخط الأرضي والخط الكهربائي متناسبا عكسيا مع السعة (capacitances) بينهما. وحيث إن الخط الأرضي أقرب للخط الكهربائي فإن الشحنات التأثيرية عليه تكون قليلة جدا ولذلك فإن الارتفاع في الجهد يكون بسيطاً جدا. وتعتمد الحماية الفعالة للخط الأرضي على ارتفاع الخط الأرضي عن سطح الأرض وزاوية الحماية (غالبا تكون 30^{o}).



=ارتفاع الخط الأرضي عن سطح الأرضh= الخط الأرضي G

P= خط النقل θ_s= زاوية الحماية = 30^o

شكل (٥,٨) ترتيب الحماية للخطوط الكهربائية من الصواعق

تكون زاوية الحماية تقريبا 30^o مناسبة جدا للأبراج ذات الارتفاع حتى ٣٠ متر. ويمكن استخدام خط حماية أرضي أو أكثر ويعتمد ذلك على نوع البرج.

(٢-٩-٥) 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 للأرض 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 تيار الصاعقة في ثلاث اتجاهات. الجهد اللحظي لأعلى البرج يكون:

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

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

القضبان الأرضية التي تستخدم يكون قطرها 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 وعمق الدفن على القيمة المطلوبة للمقاومة الأرضية.

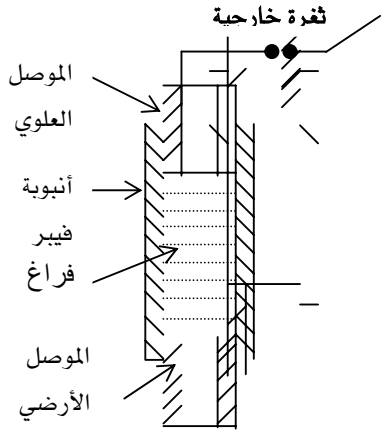
نفس التأثير السابق يمكن الحصول عليه باستخدام أسلاك الموازنة العكسية (counter poise wires) وتدفن هذه الأسلاك على عمق يتراوح بين ٠,٥ إلى ١,٠ متر وموازيا لموصلات خطوط النقل الكهربائي وتوصل بأرجل الأبراج. طول هذه الأسلاك يتراوح بين ٥٠ و ١٠٠ متر. وقد وجد أن هذه الأسلاك أكثر فعالية من القضبان الأرضية وتقلل قيمة معاوقة الصاعقة بفعالية والتي يمكن أن تصل إلى ٢٥ أوم. ولا يؤثر عمق الدفن على مقاومة الأسلاك ولكن فقط يجب أن تدفن لعمق كاف لمنع السرقة. ومن المطلوب استخدام أطوال أكبر أو عدد منها على التوازي بدلا من استخدام سلك واحد ولكن من الصعب أن نضع أكثر من سلك موازنة بالمقارنة بالقضبان الأرضية.

(٣□٩□٥) أجهزة الحماية

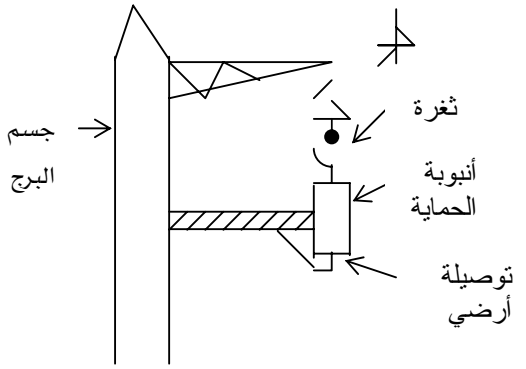
في المناطق كثيفة حدوث الصواعق الكهربائية لابد من وجود أجهزة حماية من الصواعق الكهربائية على التوازي مع الخطوط الكهربائية. وعلى الخطوط الكهربائية نستخدم نوعين من الأجهزة تعرف بثغرات الانفجار وأنابيب الحماية. وغالبا ما يثبت بأطراف الخطوط الكهربائية ونقاط التوصيل الكهربائية على الخطوط ومحطات التوزيع الكهربائية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

(١□٣□٩□٥) 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. شكل (٥,٩) يبين ثغرة الانفجار وتتكون من ثغرة قضيب هوائية بالتوالي مع ثغرة ثانية داخل أنبوبة فيبر. في حالة حدوث جهد فجائي تنهار كل من ثغرات الشرارة على التوالي. وتحد قيمة التيار الفجائي فقط بمقاومة تأريض الأبراج والمعاوقة الدفعية للأسلاك الأرضية. وتتسبب الشرارة الداخلية في أنبوبة الفيبر خلال التيار الدفعي في تبخر جزء صغير من مادة الفيبر وتنتج بعض الغازات. هذه الغازات الناتجة تكون خليطاً من بخار الماء ومنتجات تحلل مادة الفيبر وتعمل على طرد نواتج الشرارة والهواء المتأين. وعندما يصل التيار المار ذو التردد للصفر تنطفئ الشرارة ويصبح المسار مفتوحاً كهربائيا ويستعيد العازل شدته ويحتفظ مرة أخرى بحالته الطبيعية.



شكل (٥,٩a) ثغرة الانفجار



شكل (٥,٩b) تركيب أنبوبة الحماية

(٢-٣-٩-٥) 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 غير خطي (nonlinear element) والذي يوفر معاوقة عالية جدا عند التيارات المنخفضة وتقل المعاوقة بسرعة جدا عند التيارات العالية أو التيارات الدفعية. وعند حدوث الجهود الدفعية تنهار الثغرات الهوائية ويحد قيمة التيار بواسطة المقاومة و مقاومة الأرضي للأبراج. وتقل الجهود الدفعية على الخط حتى بتساوى مع الجهد الواقع على أنبوبة الحماية. بعد تفريغ الجهد الدفعي للأرض فإن التيار المتتابع ذو الترددسوف يحد بالمقاومة العالية وبعد قيمة الصفر الطبيعي لتيار الخط الكهربائي ذو الترددتستعيد 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.

(٣-٣-٩-٥) مانعات الصواعق

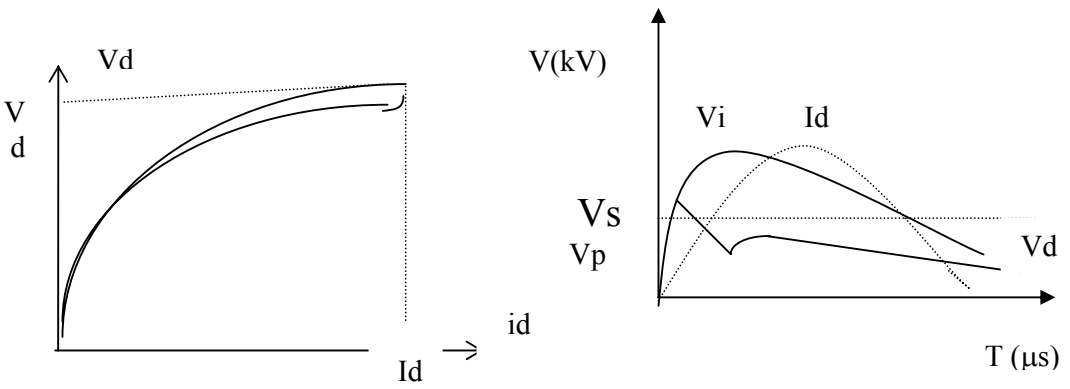
مانعات الصواعق هي أجهزة تستخدم في محطات المحولات الكهربائية وعند نهايات الخطوط الكهربائية وذلك لتفريغ الجهود الزائدة للصواعق الكهربائية والجهود الدفعية أثناء عمليات الفتح والغلق للقواطع الكهربائية. و مانعات الصواعق لها جهد انهيار سطحي أقل من أي عازل أو أجهزة بالمحطات الكهربائية ولها القدرة أيضا على تفريغ تيارات تتراوح بين ١٠ إلى ٢٠ كيلو أمبير لجهود دفعية ذات فترات زمنية طويلة (٨/٢٠ µs) وتيارات تتراوح بين ١٠٠ إلى ٢٥٠ كيلو أمبير لجهود دفعية ذات فترات زمنية قصيرة (١/٥ µs) 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 السيليكون (silicon carbide) مصفوفة واحدة على الأخرى لجزئين أو ثلاثة يفصل بينها ثغرات شرارة. ويوضع التركيب الداخلي في محتوى من البورسلين. وتكتب خاصية العلاقة بين الجهد والتيار لعناصر المقاومة كالتالي:

$$I = k\,V^{a}$$

حيث إن I هو تيار التفريغ و Vهو 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) لتعطي تيار تفريغ i_d ويكون الجهد عليها v_d لذلك فهي توفر الحماية للأجهزة أعلى من مستوى الحماية V_p .



شكل (٥,١٠b) عمل مانعات الصواعق شكل (٥,١٠a) خاصية الجهد/التيار للمقاومة غير الخطية

التصميم البسيط لمانعات الصواعق يعمل على التيارات ذات الفترات الزمنية الصغيرة ويعمل على تيارات تتراوح بين ١٠٠ إلى ٣٠٠ أمبير لتيارات ذات تردد القوي وحوالي ٥,٠٠٠ 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 ذو تردد القوى. وأثناء تفريغ الصاعقة الكهربائية يتولد جهد عالٍ في الملف بواسطة مقدمة الموجة الدفعية الطويلة وتحدث الشرارة في الثغرة المساعدة. عند التيارات ذات ترددتنطفئ القوى الشرارة في الثغرة المساعدة حيث يكون الجهد على الثغرة غير كاف لوجود الشرارة. وتحدث شرارة الثغرة الرئيسية في المجال المغناطيسي للملفات. ويتسبب المجال المغناطيسي و شكل البوق لألكترودات الثغرة الرئيسية في إطالة الشرارة وإطفائها بسرعة. و يحد التيار بالجهد الواقع على الشرارة وعنصر المقاومة أثناء تفريغ الجهد الدفعي ويصبح مستوى الحماية ضد الصواعق الكهربائية أقل.

في 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 لمانعات الصواعق بحيث يكون أكبر من الجهد الزائد ذو ترددالقوى المتوقع (الجهد بين الخط والأرض) عند نقطة التركيب تحت أي ظروف للأخطاء أو ظروف غير طبيعية. ويعطى جدول (١-٥) خصائص مانعات الصواعق لجهد يتراوح بين ١٠٠ إلى ٢٠٠ كيلو فولت و ١٠ كيلو أمبير (نوع ذا واجبات ثقيلة).

ك أ١٠ ك ف، ٢٠٠ -١٠٠ خصائص مانعات صواعق (١-٥)جدول

الخصائص	القيمة بالوحدة (نسبة إلى القيم المقننة لمانعات الصواعق)
١ -أقصى (١,٢/٥٠ µs) جهد دفعي لانهيار السطح	٢,٢ – ٢,٨
٢ -أكبر مقدمة موجة جهد دفعي لانهيار السطح	٢,٩ – ٣,١
٣ -أكبر قيمة جهد فتح دفعي لانهيار السطح	٢,٣ – ٣
٤ -أكبر جهد تفريغ (Vd) لموجة تيار (٨/٢٠µs)	
٥ كيلو أمبير	٢ –٢,٧
١٠ كيلو أمبير	٢,٢ – ٣
٢٠ كيلو أمبير	٢,٥ – ٣,٣

(١٠-٥) مستوى العزل للمعدات الكهربائية و تنسيق 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 تركب مانعات الصواعق بين المحول الكهربائي والقاطع الخاص به لحماية المحول من عملية تقطع التيار (current chopping) والتي تتسبب 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, BIL) بإعطاء سماحية تقدر بحوالي ٣٠٪ لمستوى الحماية لمانعات الصواعق واختيار مستوى الحماية الأساسية القياسي الأقرب التالي. وتوضح الجداول (٢-٥) و (٣-٥) القيم القياسية لمستوى الحماية الأساسي للجهود من ١٤٥ إلى ٧٦٥ كيلوفولت.

مستوي الحماية لعوازل محطات المحولات يعتمد على موقع المحطة ومستوي الحماية لمانعات الصواعق وخط التحجيب (line shielding) المستعمل. العوازل 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 ١٣٢ كيلو فولت وذلك لتوضيح مبادئ تنسيق العزل.

-جهد النظام الأسمى: ١٣٢ kV

-أعلى جهد للنظام: ١٤٥ kV

-أعلى جهد للوجه: $١٤٥x(\sqrt{٢}/\sqrt{٣})=١١٩\ kV_{peak}$

-الجهد الدفعي للفتح المتوقع

وقيمتها من الجدول ٣ بالوحدة: $٣x١١٩=٣٥٧\ kV_{peak}$

(أ) مانعات الصواعق

-الجهد المقنن: ١٢٣ kV

-مقدمة موجة جهد الانهيار: ٥١٠ kV_{peak}

-جهد التفريغ عند ١٠ كيلوأمبير

وموجة جهد دفعي ٨/٢٠ ميكروثانية: ٤٤٣ kV_{peak}

(ب) المحولات

-الجهد الدفعي الذي تتحمله المحولات: ٥٥٠ kV_{peak}

-مستوى الجهد التأثيري الذي تتحمله المحولات: ٢٣٠ kV_{rms}

-سماحية الحماية من الجهد الدفعي للصواعق: $[(٥٥٠-٤٤٣)/٤٤٣]x١٠٠=٢٤٪$

(ت) أجهزة الحماية من الأخطاء switchgear

-الجهد الدفعي المتحمل: ٦٥٠ kV_{peak}

-الجهد الدفعي للصاعقة الذي تتحمله

عوازل قضبان التوزيع : ٦٥٠ kV_{peak}

و عند استخدام قضبان ثغرات الشرارة لحماية المحولات من الجهود الدفعية، يمكن اختيار قضبان ثغرات الشرارة ذات جهد انهيار سالب قدره ٤٤٠kV (ثغرة طولها ٥٩ سم) لتعطي سماحية حماية قدرها ٢٥٪ وتعطي حماية جيدة للجهود الدفعية التي يكون زمن مقدمتها أكبر من ٢ ميكرو ثانية.

جدول (٢-٥) مستوى العزل الأساسي (BIL) لمختلف الجهود

أعلى جهد للمعدات الكهربائية بالنظام (kV_{rms})	الجهد الدفعي الذي تتحمله المعدات عند تطبيق موجة جهد دفعي قياسي		جهد الوجه ذو ترددالقوىالذي تتحمله المعدات بالنظام	
	عزل كامل (kV_{peak})	عزل مخفض (kV_{peak})	عزل كامل (kV_{rms})	عزل مخفض (kV_{rms})
١٤٥	٦٥٠	٥٥٠	٢٧٥	٢٣٠
		٤٥٠	------	١٨٥
٢٤٥	------	------	٤٦٠	
		٩٠٠	------	٣٩٥
		٨٢٥	------	٣٦٠
٣٦٢	------	٧٥٠	------	٣٢٥
		١٣٠٠	------	٥٧٠
٤٢٠	------	١١٧٥	------	٥١٠
		١٠٥٠	------	٤٦١
		١٦٧٥	------	٧٤٠
٥٢٥	------	١٥٥٠	------	٦٨٠
		١٤٢٥	------	٦٣٠
		١٣٠٠	------	٥٧٠
٧٦٥	------	١٨٠٠	------	٧٩٠
		١٦٧٥	------	٧٤٠
		١٥٥٠	------	٦٨٠
		١٤٢٥		٦٣٠
		٢٤٠٠		١١٠٠
		٢١٠٠		٩٨٠
		١٩٥٠		٩٢٠
		١٨٠٠		٨٧٠

جدول (٣-٥) مستوى العزل الكهربائي للمعدات الكهربائية أكبر من ٣٠٠ كيلو فولت

أقصى جهد	أساس قيم جهد	الجهد الدفعي المقنن الناتج عن فتح	النسبة بين الجهد	الجهد الدفعي

للمعدات V_m	الوحدة	القاطع		الدفعي للصاعقة والجهد الدفعي للفتح	للصاعقة الذي تتحمله المعدات (kV_{peak})
kV_{peak}	$V_m x(\sqrt{٢}/\sqrt{٣})$ kV	بالوحدة	kV_{peak}		kV_{peak}
٣٠٠	٢٤٥	٣,٠٦	٧٥٠	١,١٣	٨٥٠
		٣,٤٥	٨٥٠	١,٢٧	٩٥٠
٣٦٢	٢٩٦	٢,٨٦	٨٥٠	١,١٢	٩٥٠
				١,٢٤	١٠٥٠
		٣,٢٠	٩٥٠	١,١٢	١٠٥٠
٤٢٠	٣٤٣			١,٢٤	١١٧٥
		٢,٧٦	٩٥٠	١,١٢	١٠٥٠
		٣,٠٦	١٠٥٠	١,٢٤	١١٧٥
				١,١٢	١١٧٥
٥٢٥	٤٢٩			١,٢٤	١٣٠٠
		٢,٤٥	١٠٥٠	١,٣٦	١٤٢٥
				١,١٢	١١٧٥
		٢,٧٤	١١٧٥	١,٢٤	١٣٠٠
				١,٣٦	١٤٢٥
٧٦٥	٦٢٥			١,١٢	١٣٠٠
		٢,٠٨	١٣٠٠	١,٢١	١٤٢٥
				١,٣٢	١٥٥٠
		٢,٢٨	١٤٢٥	١,١٠	١٤٢٥
				١,١٩	١٥٥٠
				١,٣٨	١٨٠٠
		٢,٤٨	١٥٥٠	١,٠٩	١٥٥٠
				١,٢٨	١٨٠٠
				١,٤٧	٢١٠٠
				١,١٦	١٨٠٠
				١,٢٦	١٩٥٠
				١,٥٥	٢٤٠٠

أسئلة

(١) اشرح النظريات المختلفة لتكون الشحنات بالسحب.

(٢) اشرح ميكانيزم تطور الصاعقة الرعدية والجهود الزائدة المتولدة على خطوط النقل الكهربائي.

(٣) اشرح النموذج الرياضي لتفريغ الصواعق الرعدية.

(٤) اشرح الطرق المختلفة لحماية خطوط النقل الكهربائي من الصواعق الرعدية.

(٥) اشرح باستخدام الأشكال المبسطة مبادئ ووظيفة كل من:

(أ) ثغرات الانفجار. (ب) أنابيب الحماية.

(٦) اشرح مع استخدام الرسم المبسط وظيفة مانعات الصواعق كجهاز حماية.

(٧) اكتب نبذة مختصرة عن الآتي:

(أ) قضبان ثغرات الشرارة كجهاز حماية من الجهود الزائدة.

(ب) الخطوط الأرضية لحماية خطوط النقل.من الصواعق.

تقنية الجهد العالي

الخطر الناتج عن الكهرباء الساكنة

جميع الحقوق محفوظة للمؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني

(١-٦) مقدمة

تعتبر ظاهرة الكهرباء الساكنة من المبادئ الأساسية المعروفة والتي تم التعرض لها مراراً خلال المناهج، وخاصةً في مناهج الفيزياء في المرحلة الثانوية والكلية وكذلك في أساسيات الهندسة الكهربائية. فنعلم بأنه عندما يفرك قضيب من الزجاج بقطعة قماشية من الصوف، فإن بعض الشوائب تنجذب إليه بسبب وجود شحنات كهربائية ذات قطبية مختلفة. ولكن كمية الشحنات المتراكمة التي نتحدث عنها في هذا الفصل وأخطارها المترتبة، والتي قد تؤدي إلى صدمات كهربائية خطيرة بالإضافة إلى ما تحدثه من تلف للعمليات الصناعية، عنها تستدعي استعراض هذه الظاهرة ومعرفة أفضل الطرق للوقاية من مخاطرها.

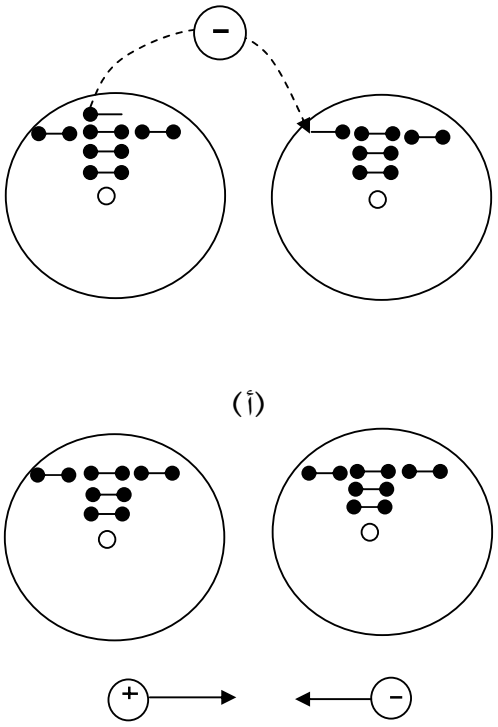
(٢-٦) نشوء الكهرباء الساكنة

تنشأ الكهرباء الساكنة، والتي هي عبارة عن شحنات ساكنة، من عدم توازن في التركيبة الجزيئية أو الذرية للعوازل الكهربائية. فكما نعلم بأن الذرات عندما تكون محايدة (في حالة توازن) فإن نواتها تحتوي على بروتونات موجبة ونيوترونات سالبة وتحاط بإلكترونات سالبة لها نفس عدد البروتونات. فعندما يفرك جسم بآخر (مثل قضيب زجاجي مع قطعة قماشية من الصوف) فإن الإلكترونات تنتقل من أحد الأجسام للآخر. فالجسم الذي اكتسب إلكترون إضافي سينتقل من الوضع المحايد إلى الوضع السالب (أيون سالب)، والجسم الذي فقد إلكترون سيصبح موجباً (أيون موجب)، وبالتالي فإنه يحدث تجاذب بين الجسمين (يحدث تنافر عندما تكون الشحنتان المتماثلتان).

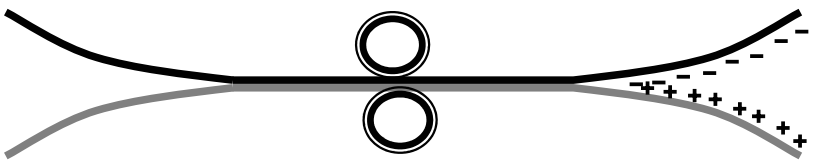
ويمكن أن يحدث انتقال الإلكترونات بين جسمين مختلفين عن طريق الاحتكاك والضغط و الانفصال كما في الشكل (٦,١). فالاحتكاك يولد حرارة ويثير جزيئات المادة. وعند انفصال الجسمين فإن الإلكترونات تنتقل من إحداهما للآخر، ولذلك فإنه يتولد مجال كهربائي عند نقص أو زيادة الإلكترونات، انظر الشكل (٦,٢).

كما أن الكهرباء الساكنة تنشأ عن طريق تكسير الروابط بين الجزيئات مما يؤدي إلى تغيير في البنية الجزيئية للمادة، ويحدث ذلك نتيجةً للقطع والقص والشق للمادة. ومن العوامل التي تجعل الكهرباء الساكنة تحدث هي التغيرات المفاجئة والسريعة في الحرارة والإشعاع النووي والتغيرات الكيميائية للمادة. وتؤدي هذه العمليات إلى عدم توازن بين الأيونات السالبة والموجبة. وتعتمد كمية الكهرباء الساكنة المتولدة عن العوامل السابقة على الظروف البيئية المحيطة، مثل الرطوبة مثلاً. فمن المعروف بأن زيادة الرطوبة تساعد على تسرب الإلكترونات وبالتالي التقليل من تجمعها ونشوء الكهرباء الساكنة بينما

يساعد الجو الجاف وخاصة عند زيادة الحرارة في نشوء الكهرباء الساكنة، نتيجةً لتجمع الشحنات. وقد صنفت بعض المواد حسب اكتسابها أو منحها للشحنات السالبة وبالتالي فإن قطبيتها إما أن تكون موجبة أو سالبة، ويسمى هذا التصنيف بالسلالة التريبوكهربائية Triboelectric. والجدول (١-٦) يبين لنا بعض المواد التي تم تصنيفها طبقاً لذلك.



الشكل (٦,١)(ا) انتقال الإلكترون من المدار الخارجي لأحد الذرات إلى الأخرى.
(ب)انجذاب الأيون الموجب مع السالب حسب قانون كولومب لتكوين رابطة أيونية.



الشكل (٦,٢) تأثير الاحتكاك والضغط والانفصال بين مادتين متلاصقتين على انتقال إلكترون من إحداهما للأخرى.

جدول ٦,١ السلالة التريبوكهربائية

النهاية الموجبة للسلسلة

- يد الإنسان
- الإسبستوس
- الزجاج
- المايكا
- شعر الإنسان
- النايلون
- الصوف
- الفرو
- الرصاص
- الحرير
- الألمنيوم
- الورق
- القطن
- الصلب
- الخشب
- الكهرمان
- المطاط الصلب
- النيكل والنحاس
- النحاس الأحمر والفضة
- الذهب والبلاتين
- المطاط الصناعي
- الأورلون Orlon
- الساران Saran
- البولي إيثيلين
- التفلون
- المطاط السليكوني

النهاية السالبة للسلسلة

(٦ -٣) القوانين الأساسية للكهرباء الساكنة

من أشهر ما بذل من جهود لبحث ظاهرة الكهرباء الساكنة والقوانين التي تحاكيها هو ما قدمه كولومب. حيث حدد القوة التي تبذل بين جسمين لهما شحنات كهربائية. حيث ذكر بأن القوة F الموجودة بين جسمين صغيرين لهما شحنات كهربائية q_1 و q_2 وبينهما مسافة من الفراغ قدرها r تتناسب عكسياً مع المسافة بينهما، أي أن $F = k\frac{q_1 q_2}{r^2}$ و k عبارة عن ثابت يساوي $1/4\pi\varepsilon_o$. حيث إن ε_o هي الماحية للفراغ وتساوي $8,854X10^{-12}$ فاراد/متر. وتعمل القوة على الخط الذي يربط بين الشحنتين، وتكون تجاذبية عند اختلافهما أو تنافرية عند تشابههما.

(٦ -٤) مخاطر الكهرباء الساكنة

ومن الظواهر التي تنشأ نتيجةً تراكم الشحنات، ظاهرة الصواعق، والتي تم شرحها في الفصل السابق. ففي هذه الظاهرة يرتفع الهواء ويهبط نتيجةً للعواصف الرعدية مما يجعلها تحتك مع السحب المطيرة وتشحن. وتحدث الصواعق عندما تقترب السحابة المشحونة من سحابة أخرى أو جزء من الأرض مشحونة بقطبية معاكسة.

ومن الأمثلة الكثيرة أيضاً على نشوء الكهرباء الساكنة هو ما يحدث عندما يتحرك شخص على السجاد في غرفة ذات رطوبة قليلة، فإن جسمه يكتسب شحنات كثيفة وقد يصل فرق الجهد بينه وبين أي جسم ذو قطبية مختلفة إلى ٦٥٠٠ فولت وبالتالي فإنه يحدث شرارة بين إصبعه وأي جسم معدني له موصل بالأرض (وهو ما يسمى بالتفريغات الكهروستاتيكية Electrostatic Discharges ESD)، تتفرغ من خلالها الشحنات المتراكمة على جسده.

كما يمكن أن تشحن الطائرة كهربائياً خلال طيرانها عند احتكاكها مع المطر أو الثلج المبلل، وتكون عند جهد قد يصل إلى ٢٥٠ كيلوفولت بطاقة مخزونة تتراوح بين ٤ إلى ٧ جول. كما أن طائرات الهليكوبتر تتعرض إلى تداخل في موجات الراديو عندما تهبط لتقل ركاب أو لتعبئة الوقود نتيجة للشحنات التي تتراكم عليها. وتتعرض المركبات الفضائية إلى تدمير تجهيزاتها الإلكترونية نتيجة لتراكم الشحنات على سطحها، بالإضافة إلى تداخلها مع أجهزة الاتصالات.

ومن أهم المخاطر التي تنتج عن الكهرباء الساكنة هو ما يحدث عند مناولة السوائل الهيدروكربونية. فالسوائل الهيدروكربونية لها مقاومية عالية وتشحن عندما تمر من خلال أنابيب معدنية. وإذا ما حدثت شرارة لتفريغ الشحنات لأقرب جسم مؤرض في وجود خليط من بخار السائل الهيدروكربوني والهواء، فإنه قد يحدث انفجار. ومن الحوادث التي ينشأ عنها فقد في الأرواح عندما يتم تنظيف خزان شاحنات الوقود (الوايتات). فالخرطوم الذي يستخدم للتنظيف بضخ ماء تحت ضغط عالٍ قد يشحن هو وقطرات

الماء منتجاً سحابة من الشحنات. وقد يحدث انفجار الخزان إذا ما حدث تفريغ في وجود خليط بخار السائل الهيدروكربوني (البنزين مثلاً) والهواء.

(٦ -٥) الوقاية من مخاطر الكهرباء الساكنة

بعد أن تم استعراض النظريات الأساسية للكهرباء الساكنة والمخاطر الناشئة عنها والتي تكلف الكثير من الخسائر في الأموال والأرواح. فإنه لابد من إيجاد طرق كفيلة بالحد من هذه الظاهرة، إذا لم يكن بالتخلص منها. وحيث إن الكهرباء الساكنة تنتج عن تجمع للشحنات على سطح المادة المشحونة، لذلك فإن الطرق التي سيتم استعراضها تعتمد على تفريغ الشحنات أو معادلتها. وفيما يلي سنستعرض الطريقتين المستخدمتين على شكل واسع في الحد من ظاهرة الكهرباء الساكنة، وهما التأريض Grounding ومعادلة الشحنات Charge Neutralization.

(١□٥□٦) التأريض (Grounding)

تنقسم المواد من حيث التركيب الذري لها إلى مواد لها الكترونات حرة في مدارها الأخير وتسمى موصلات Conductors، ومواد لا تستطيع التحرر من الإلكترونات بتطبيق مجال كهربائي ساكن (كهروستاتيكي) عبرها.وتسمى عوازل Insulators أو Dielectrics، ومواد لها خاصية وسطية وتسمى بالمواد الشبه موصلة Semiconductors.

فبالنسبة للموصلات نجد إنه من السهل انتقال إلكترون من ذرة إلى أخرى عند تطبيق مجال كهربائي ساكن عبرها. ومثال على الموصلات الجيدة معدني الفضة والألمنيوم. ويوجد في المدار الخارجي لبعض الموصلات الجيدة إلكترونان حران يسهل انتقالهما من ذرة إلى أخرى. وبالنسبة للألمنيوم فإنه يحتوي على ثلاثة إلكترونات في المدار الخارجي سهلة الحركة وتسمى بالإلكترونات الحرة. وعندما تشحن إحدى الموصلات بشحنة معينة فإن جميع أطراف الموصل يكون لها نفس الشحنة. ولمعادلة هذه الشحنات فإنه يمكن توصيل هذه الموصلات بالأرض.

وبالنسبة للعوازل فإنه بالرغم من أن الإلكترونات الحرة في مدارها الخارجي لا تنتقل من ذرة إلى أخرى، إلاّ أن تطبيق المجال الكهربائي الساكن (الكهروستاتيكي) يتسبب في استقطاب للمادة Polararization (أي يحدث إزاحة في الإلكترونات بالنسبة لوضعها في حالة التوازن). ولذلك فإنه من الممكن أن تحتفظ هذه المواد العازلة بشحنات لها قطبيات مختلفة على سطحها. مما يشرح لنا السبب في وجود مناطق من المادة متلاصقة ومناطق متنافرة. وتوصيل هذه المواد بالأرض لا يفرغ هذه الشحنات أو يؤثر في تبديلها لمواقعها كما يحدث بالنسبة للموصلات.

وبالنسبة للمواد شبه الموصلة Semiconductors فإن هذه المواد يمكن لها اكتساب خواص الموصلات عند تطبيق حرارة أو مجال كهربائي كافي.

ولذلك فإن اختيار المواد في التطبيقات المختلفة لابد أن يكون مبنياً على الخواص الكهربائية لها. حيث إن ذلك يعزز التحكم في منع تراكم الشحنات وبالتالي توليد الكهرباء الساكنة، مما يؤدي إلى منع المخاطر المترتبة عنها. وتشمل تلك الخواص المقاومية واضمحلال الشحنة.

وبالنسبة للوقاية من مخاطر الكهرباء الساكنة عن طريق التأريض، فإن ذلك ينطبق على الموصلات، وذلك لسهولة انتقال الشحنات التي يكون لها نفس القطبية على جميع نقاط سطح المادة وتكون حرة الحركة.

ويستخدم التأريض للوقاية من أخطار الكهرباء الساكنة بالنسبة للقطع الإلكترونية عند انتقال الشحنات من أطراف أصابع العامل أو من القطع المعدنية المستخدمة في الإصلاح أو الجميع. ويتم في هذه الحالة تأريض منصة العمل والتي لها سطح معدني موصل بالأرض وكذلك وجود أساور لليد مؤرضة وحصيرة للأرض. ويعتمد تسرب الشحنات إلى الأرض على مقاومة المسار وكذلك سعة الموصل.

(٢-٥-٦) معادلة الشحنات (Charge Neutralization)

توجد أربعة أنواع من المؤينات المستخدمة لمعادلة الشحنات بإنتاج شحنات مغايرة للسطح المشحون، وهي كالتالي:

(أ) معادلات لا فعالة Passive Neutralizers

يعتمد مبدأ عمل هذا النوع من المؤينات على استخدام الشحنات المطلوب معادلتها لتوليد مجال كهربائي بالقرب من الأجسام المؤرضة، وبالتالي يمكن تركيز هذا المجال الكهربائي على نقاط مدببة لتعمل على توليد انهيار موضعي للهواء ينتج تفريغ هالي Corona، دون حدوث شرارة تمتد بن تلك النقاط الموزعة على السطح. وحيث إن الانهيار الموضعي ينتج أيونات مختلفة تنتقل إلى المجال الكهربائي بين منطقة التفريغ الهالي والسطح. وستنتقل بذلك شحنات ذات قطبية مغايرة للشحنات الموجودة على السطح لتعادلها. وستستمر تلك العملية مادام المجال الكهربائي المتمركز على تلك النقاط المدببة أعلى من شدة انهيار الهواء (أو الوسط العازل الغازي). ولذلك فإن من نواقص هذه الطريقة هو عدم عملها عندما يكون تركيز الشحنات على السطح قليلاً. وتتكون المؤينات اللافعالة عادةً من مصفوفات من الأسلاك الرقيقة المثبتة على قضيب، كما تستخدم الفرش الكربونية المصنوعة من الألياف والتي لها رؤوس مدببة قطرها ١٠ ميكروميتر كبديل.

(ب) المعادلات الفعالة Active Neutralizers

يشبه هذه النوع من المؤينات النوع السابق، ولكن يختلف في كونه يعتمد على مصدر مستقل للمجال الكهربائي، وذلك عن طريق مصدر جهد عالٍ متردد يولد جهداً يتراوح مابين ٦ إلى ١٢ كيلوفولت ويعمل عند التردد الطبيعي للمصدر (٦٠ هيرتز مثلاً). حيث يمكن للتفريغ الهالي، الناتج عن تطبيق مجال كهربائي عند توصيل مصدر الجهد العالي، من توليد شحنات مغايرة تعمل على معادلة الشحنات على السطح. ويمكن تلافي الصدمة الكهربائية الناتجة عن مصدر الجهد العالي المتردد المنفصل، بتوصيله بكل نقطة مدببة عبر مكثف ذو سعة منخفضة. كما أن تأريض النقاط المدببة ووضع أقطاب مصدر الجهد العالي المتردد داخل إطار محكم يمكن أن يخفف من خطر الصدمات الكهربائية.

(ج) المؤينات الهوائية Air Ionizers

هذه المؤينات تشبه المؤينات الفعالة، ولكنها تستبدل شبكة النقاط المدببة على السطح بتيار هوائي مؤين ومتعادل بأيونات ذات قطبيتين (موجبة وسالبة). حيث يمكن استخلاص الأيونات ذات القطبية المغايرة لأيونات السطح لمعادلتها. وتستخدم هذه الطريقة في مصانع أشباه الموصلات. ومن مساوئها الخوف من إمكانية إنتاج أوزون داخل بيئة العمل وكذلك الخوف من إمكانية ترسيب شحنات على الأجسام المتعادلة.

(د) المعادلات المشعة Radioactive Neutralizers

وتعتمد هذه الطريقة على تأيين الهواء عن طريق مصدر لإشعاع جسيمات ألفا (يستخدم لذلك النظير P_o ٢١٠)، لتوليد هواء مؤين على سطح العازل. حيث يمكن للشحنات المترسبة على السطح استخلاص الشحنات المغايرة لقطبيتها من الهواء المؤين لتحقيق تعادل الشحنات. وهذه الطريقة موفرة من حيث عدم حاجتها إلى مصدر طاقة خارجي، بالإضافة إلى بساطتها. ولكنها لا تقارن من حيث الأداء بالمعادلات الفعالة وغير الفعالة، التي تنتج تيار معادل أعلى.

أسئلة

١. اشرح المقصود بظاهرة التأين؟
٢. اشرح كيفية نشوء الكهرباء الساكنة؟
٣. كيف يمكن أن يحدث حريق أو انفجار في خزانات الشاحنات التي تنقل الوقود؟
٤. لماذا تحدث شرارة بين إصبع يدك ومقبض الباب عند سيرك لمسافة فوق السجاد المصنوع من مادة البولي إيثيلين؟
٥. لماذا تتوقف الأحزمة الناقلة في خطوط الإنتاج؟ ولماذ تنفصل طبقاتها أو تتقطع أحياناً؟.
٦. اشرح تأثير التأريض على التخلص من الشحنات المتراكمة على أسطح المعادن وبالتالي من الكهرباء الساكنة؟ وهل تجدي هذه الطريقة مع المواد العازلة؟
٧. اذكر نوعين من أنواع المعادلات للشحنات المتراكمة على أسطح العازل؟ واشرح واحدة منهما؟

المراجع

[١] M. Khalifa, et al., High Voltage Engineering; *Theory and Practice*, Marcel Dekker, New York, ١٩٩٠.

[٢] M. S. Naidu and V. Kamaraju, High Voltage Engineering, TATA McGraw-Hill, New Delhi, ١٩٨٦.

[٣] P. as Begamudre, Extra High Voltage AC Transmission Engineering, John Wiley& Sons, New York, ١٩٨٦.

[٤] T.J. Gallagher and A.J. Pearmain, High Voltage *Measurement, Testing and Design*, John Wiley& Sons, ١٩٨٤.

[٥] M. Abdel-Salam, H. Anis, A. El-Morshedy and R. Radwan, High Voltage Engineering; *Theory and Practice*, ٢nd ed., Marcel Dekker, New York, ٢٠٠٠.

[٦] D. Kind, High-Voltage *Experimental Technique*, ١st ed., Frieder. Vieweg & Sohn, Braunschweig, ١٩٧٨.

[٧] E. Kuffel and M. Abdullah, High-Voltage Engineering, Pergamon Press, ١٩٧٠.

[٨] E. Kuffel and W.S. Zeangle, High-Voltage Engineering *Fundamentals*, Pergamon Press, ١٩٨٤.

[٩] L. H. Van Vlack, Elements of Materials Science and Engineering, Addison-Wesley Publishing Company, ١٩٧٥.

[١٠] أسعد عبدالمجيد الأوسي, معجم مصطلحات الهندسة الكهربائية الشامل, الدار العربية للعلوم, ١٩٨٨.

المحتويات

صفحة

تمهيد

المحتويات

الفصل الأول: توليد الجهد العالي

(١-١) مقدمة..... ١

(١-٢) توليد الجهود العالية المترددة..... ١

(١-٢-١) توليد الجهود العالية المترددة باستخدام محولات الجهد..... ١

(٢-٢-١) توليد الجهود العالية المترددة باستخدام دوائر الرنين..... ٥

(١-٣) توليد الجهود العالية المستمرة..... ٨

(١-٣-١) توليد الجهود العالية المستمرة باستخدام دوائر التوحيد..... ٨

(٢-٣-١) المولدات الكهروستاتيكية..... ١٩

(١-٤) توليد الجهود العالية النبضية (الدفعية)..... ٢١

(١-٤-١) تعريف توليد الجهود العالية النبضية وخواصها..... ٢١

(٢-٤-١) توليد الجهود العالية النبضية باستخدام مولد مفرد..... ٢١

(٣-٤-١) توليد الجهود العالية النبضية من عدة مراحل متوالية من نوع ماركس..... ٢٥

الفصل الثاني: طرق قياس الجهد العالي

(١-٢) مقدمة..... ٣٢

(٢-٢) قياس الجهد العالي المستمر..... ٣٢

(١-٢-٢) مقاومة عالية موصلة على التوالي مع أميتر..... ٣٣

(٢-٢-٢) مجزئات الجهد باستخدام المقاومات..... ٣٤

(٣-٢) قياس الجهد العالي المتردد والجهود النبضية (الدفعية)..... ٣٥

(١-٣-٢) فولتميتر معاوقة التوالي..... ٣٦

(٢-٣-٢) مجزئات الجهد باستخدام المكثفات ومحول الجهد السعوي..... ٣٩

(٣-٣-٢) محولات الجهد..... ٤٠

(٤-٣-٢) الفولتميتر الكهروستاتيكي..... ٤١

(٥□٣□٢) فولتميتر القيمة العظمي للجهد المتردد.....٤٣
(٦□٣□٢) ثغرات الشرارة.....٤٨
(٧□٣□٢) مجزئات الجهد لقياس الجهد الدفعي.....٥٤

الفصل الثالث: عوازل خطوط النقل الهوائية

(١□٣) مقدمة.....
(٢□٣) مواد العوازل الكهربائية.....٦٤
(٣□٣) العوازل المسمارية.....٦٤
(٤□٣) عوازل التعليق.....٦٦
(٥□٣) عوازل الإجهاد.....٦٩
(٦□٣) عوازل الدعم.....٧١
(٧□٣) عوازل البكرة أو القيد.....٧١
(٨□٣) انهيار عوازل خطوط النقل.....٧١
(٩□٣) توزيع الجهد على سلسلة العوازل المعلقة.....٧٢
(١٠□٣) كفاءة السلسلة.....٧٣
(١١□٣) طرق زيادة كفاءة السلسلة.....٧٦

الفصل الرابع: انهيار العوازل الكهربائية

أولا : انهيار العوازل الغازية.....٨٥
(١□٤) مقدمة.....٨٥
(٢□٤) عملية تأين الغازات العازلة.....٨٥
(٣□٤) ميكانيزم الانهيار عند تاونسند.....٨٧
(٤□٤) ازدياد التيار الكهربائي بوجود العمليات الثانوية.....٨٧
(٥□٤) تحديد قيم المعاملات α و γ عمليا.....٨٩
(٦□٤) جهد الشرارة – قانون باشن.....٩١
(٧□٤) انهيار الغازات سالبة الكهربائية.....٩٢
(٨□٤) الانهيار في المجالات غير المنتظمة والتفريغ الهالي.....٩٤

(٩-٤) غاز سادس فلوريد الكبريت.....٩٥
(١-٩-٤) خصائص غاز سادس فلوريد الكبريت.....٩٥
(١-١-٩-٤) الخصائص الفيزيقية.....٩٥
(٢-١-٩-٤) الخصائص الكيميائية.....٩٦
(٣-١-٩-٤) خصائص العزل الكهربائي.....٩٧
(٢-٩-٤) الاعتبارات العملية في استخدامات الغاز لأغراض العزل الكهربائي.....٩٨
ثانيا: انهيار العوازل السائلة.....١٠١
(١٠-٤) مقدمة.....١٠١
(١١-٤) العوازل السائلة النقية والتجارية.....١٠١
(١٢-٤) التنقية.....١٠١
(١٣-٤) اختبار انهيار العوازل السائلة.....١٠٢
(١٤-٤) التوصيل والانهيار في العوازل السائلة النقية.....١٠٣
(١٥-٤) انهيار العوازل السائلة التجارية.....١٠٤
ثالثا : انهيار العوازل الصلبة.....١٠٧
(١٦-٤) مقدمة.....١٠٧
(١٧-٤) الانهيار في العوازل الصلبة.....١٠٧
(١-١٧-٤) انهيار سطح العازل.....١٠٧
(٢-١٧-٤) انهيار لب العازل.....١٠٨
(٣-١٧-٤) الانهيار الألكترو ميكانيكي.....١٠٩
(٤-١٧-٤) الانهيار الحراري.....١٠٩
(٥-١٧-٤) التلف والانهيار الكيميائي والالكترو ميكانيكي.....١١٠
(٦-١٧-٤) الانهيار بسبب التفريغ الداخلي.....١١٠
(١٨-٤) العوازل الصلبة المستخدمة عمليا.....١١١
(١٩-٤) المواد العازلة الطبيعية.....١١٢
(١-١٩-٤) الورق.....١١٢
(٢-١٩-٤) الميكا ومشتقاتها.....١١٣
(٣-١٩-٤) الزجاج.....١١٣

(٤-١٩-٤) السيراميك.....١١٤
(٥-١٩-٤) الألياف.....١١٤
(٦-١٩-٤) المواد العازلة المصنوعة من اللدائن Polymeric insulation materials.....١١٥
(٧-١٩-٤) مركبات المطاط.....١١٩

الفصل الخامس: الصواعق الكهربائية

(١-٥) مقدمة.....١٢٠
(٢-٥) المسببات الطبيعية لظاهرة الصواعق.....١٢٠
(٣-٥) تكون الشحنات الكهربائية بالسحب.....١٢٠
(٤-٥) آلية (ميكانيزم) الصاعقة الرعدية.....١٢٤
(٥-٥) متغيرات وخصائص الصواعق الرعدية.....١٢٦
(٦-٥) النموذج الرياضي للصاعقة.....١٢٧
(٧-٥) انتشار موجات الجهد والتيار النبضي (الدفعي) على خطوط النقل.....١٢٩
(٨-٥) تطبيقات على دالة خطوة الوحدة.....١٣٢
(١-٨-٥) خط كهربائي مفتوحة نهايته.....١٣٢
(٢-٨-٥) خط كهربي مقصورة نهايته.....١٣٢
(٩-٥) حماية خطوط النقل الكهربائية من الصواعق.....١٣٥
(١-٩-٥) الحماية باستخدام خطوط الحماية أو الخطوط الأرضية.....١٣٥
(٢-٩-٥) الحماية باستخدام قضبان التأريض وأسلاك الموازنة العكسية.....١٣٦
(٣-٩-٥) أجهزة الحماية.....١٣٧
(١-٣-٩-٥) ثغرات الانفجار.....١٣٧
(٢-٣-٩-٥) أنابيب الحماية.....١٣٨
(٣-٣-٩-٥) مانعات الصواعق.....١٣٨
(١٠-٥) مستوى العزل للمعدات الكهربائية وتنسيق العزل للمحطات الكهربية.....١٤٠

الفصل السادس : الخطر الناتج عن الكهربـاء الساكنة

(١□٦) مقدمة.....١٤٥
(٢□٦) نشوء الكهرباء الساكنة.....١٤٥
(٣□٦) القوانين الأساسية للكهرباء الساكنة.....١٤٨
(٤□٦) مخاطر الكهرباء الساكنة.....١٤٨
(٥□٦) الوقاية من مخاطر الكهرباء الساكنة.....١٤٩
(١□٥□٦) التأريض.....١٤٩
(٢□٥□٦) معادلة الشحنات.....١٥٠

تقدر المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني الدعم

المالي المقدم من شركة بي آيه إي سيستمز (العمليات) المحدودة

GOTEVOT appreciates the financial support provided by BAE SYSTEMS