

اختبار مفرغات التوتر المركبة في شبكات التوتر المتوسط

د. محمد زهيرة *

د. علاء الدين حسام الدين **

تاريخ الإيداع 30 / 10 / 2011. قُبل للنشر في 24 / 11 / 2011

□ ملخص □

تتعرض الشبكة الكهربائية لتوترات زائدة داخلية، وخارجية، مما يعرضها للخطر لعدم إمكانية تصميم عازليتها من وجهة النظر الاقتصادية لتتحمل جميع هذه التوترات. لذلك لا بد من القيام بإجراءات إضافية لحماية التجهيزات عند تعرضها لتلك التوترات، ويتم ذلك باستخدام مفرغات التوتر في شبكات التوتر المتوسط، لعدم إمكانية الاعتماد على الخط الأرضي (خط مرس الحماية) المعلق في أعلى أبراج التوتر كحماية إضافية كما هو الحال في شبكات التوتر العالي، وذلك لصغر المسافة بين الخط الأرضي والأطوار، مما يؤدي إلى حدوث قفزة بينها عند إصابة الخط الأرضي إصابة مباشرة بصاعقة. فقد بينت إحصاءات الأعطال في مشتركين كهرباء اللاذقية وطرطوس أن 80% من الأعطال في هذه الشبكات تسببها التوترات الزائدة الناتجة عن الصواعق.

يهدف هذا البحث إلى تحديد آلية الاختيار الصحيح لنوع المفرغات، والاختبارات المطلوبة لها من قبل المصنع والمستثمر قبل وضعها في الخدمة، وكيفية تركيبها بشكل صحيح. كما يهدف إلى دراسة تأثير نوع البرج الحامل للشبكة الهوائية، وذلك للحد من أعطال محولات القدرة $20/0.4 \text{ kV}$ في شبكات التوتر المتوسط. استناداً إلى ما سبق تم في هذا البحث اقتراح طريقة بسيطة لاختبار مفرغات التوتر المركبة في شبكة التوتر المتوسط كل فترة زمنية، عن طريق قياس تيار التسرب في المقاومات الفحمية، ومقارنة ذلك مع القيم المسموحة.

الكلمات المفتاحية: مفرغات التوتر، عناصر التأريض، الخطوط الهوائية.

* أستاذ - قسم هندسة الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

** أستاذ مساعد - قسم هندسة الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

Testing Voltage Arrestors used in Medium Voltage Networks

Dr. Mohammad Zhirah*

Dr. Alaa Eldin Housam Eldin**

(Received 30 / 10 / 2011. Accepted 24 / 11 / 2011)

□ ABSTRACT □

The electric network is subject to internal and external excess voltage, which makes it prone to danger because there is no possibility of economically designing its insulation to undergo these voltages. Therefore, we must make additional arrangements to protect the equipment when subjected to these voltages; this can be done by using voltage arrestor in medium voltage networks, because we cannot use the earthing line hanging on top of the towers as additional protection, as is the case in high voltage networks; because of the short distance between the earthing line and phases, this triggers a stroke between them when the earthing line is directly subjected to a thunderbolt. The statistics of fault in customers of Lattakia and Tartous electricity company has shown that 80% of faults in these networks is caused by excess voltages resulting from thunderbolts.

This research aims to determine the correct selection of the type of arrestors and the necessary tests performed by the manufacture and customer before being used. This study also aims to examine the effect of the type of tower used in overhead networks on reducing the faults of power transformers (20/0.4 kV) in medium voltage networks.

In this research, a simple approach has been suggested for testing the voltage arrestor used in medium voltage networks for each period of time by measuring the leakage current in carbon resistors and comparing it with allowable values.

Keywords: voltage arrestors, earthing elements, overhead lines.

* Professor, Electrical Power Engineering Department, Faculty of Mechanical & Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

** Associate Professor, Electrical Power Engineering Department, Faculty of Mechanical & Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

مقدمة:

تتعرض الشبكة الكهربائية لتوترات زائدة ناتجة عن عمليات الفصل والوصل أو القصر، تسمى توترات زائدة داخلية، وتوترات زائدة خارجية ناتجة عن ضربات البرق، وهذا ما يعرضها للخطر لعدم إمكانية تصميم عازليتها من وجهة النظر الاقتصادية لتتحمل جميع هذه التوترات، لذلك يتطلب التشغيل الاقتصادي والموثوق للشبكة إجراءات إضافية لحماية التجهيزات عند تعرضها للتوترات الزائدة، ويتم ذلك باستخدام مفرغات التوتر في شبكات التوتر المتوسط، مع الأخذ بالحسبان أنه لا يمكن في هذه الشبكات الاعتماد على مرس الحماية المعلق في أعلى أبراج التوتر كحماية إضافية كما هو الحال في شبكات التوتر العالي، إذ إن صغر المسافة بين الخط الأرضي والأطوار يؤدي إلى حدوث قفزة بينها عند إصابة الخط الأرضي إصابة مباشرة بصاعقة. كذلك تكون التوترات المنحرفة في الأطوار كبيرة جداً حتى عند سقوط الصاعقة بالقرب من الشبكة [1]. وقد بينت إحصاءات الأعطال في مشترك كهرباء اللاذقية وطرطوس أن 80 % من الأعطال في هذه الشبكات تسببها التوترات الزائدة الناتجة عن الصواعق. من جهة ثانية، يجب الأخذ بالحسبان عند تركيب المفرغات جميع الإجراءات والمتطلبات اللازمة لعملها بشكل سليم، إذ يجب اختيار نوع المفرغ والقيم المميزة له بشكل صحيح، والتأكد من دقة تصنيعه ومطابقته للمواصفات العالمية، بالإضافة إلى تركيبه بشكل صحيح أيضاً. إلا أن المشكلة الأساسية في الشبكة السورية هي عدم إجراء أي اختبار أو صيانة لهذه المفرغات بعد تركيبها في الشبكة للتأكد من استمرارية عملها بشكل صحيح، وفي أحيان كثيرة يتعطل المفرغ المركب، وبالتالي تبقى المحولات بدون حماية، الأمر الذي يسبب انهيارها عند أول موجة توتر زائدة تصل إليها.

أهمية البحث وأهدافه:

تبين بعد الكشف على عدد كبير جداً من مفرغات التوتر المركبة في شبكة التوتر المتوسط 20 kV للمنطقة الساحلية (اللاذقية وطرطوس) وجود أخطاء كبيرة في الاختبار الصحيح لنوع المفرغ (من ناحية تحديد قيمة توتر الخرق المناسب) بالإضافة إلى عدم التركيب الصحيح. لذلك يهدف هذا البحث إلى تحديد آلية الاختيار الصحيح لنوع المفرغات، والاختبارات المطلوبة لها من قبل المصنع والمستثمر قبل وضعها في الخدمة، وكيفية تركيبها بشكل صحيح. كما يهدف إلى دراسة تأثير نوع البرج الحامل للشبكة الهوائية (معدني، خشبي، بيتوني)، وذلك للحد من أعطال محولات القدرة $20/0.4\text{ kV}$ في شبكات التوتر المتوسط. وسيتم في هذا البحث أيضاً اقتراح طريقة بسيطة لاختبار مفرغات التوتر المركبة في شبكة التوتر المتوسط كل فترة زمنية، عن طريق قياس تيار التسرب في المقاومات الفحمية، ومقارنة ذلك مع القيم المسموحة [2].

طرائق البحث ومواده:**1- التوترات الزائدة في الشبكة الكهربائية:**

تنشأ التوترات الزائدة في الشبكة الكهربائية نتيجة الانفراغات البرقية (توترات زائدة خارجية)، والتي تصل إلى قيمتها العظمى خلال زمن قصير لا يتجاوز $(2\ \mu\text{s})$ ، ثم تتناقص بسرعة كبيرة (توترات زائدة داخلية)، أو نتيجة القصر بين أحد الأطوار والأرض، أو فصل ووصل الأحمال.

تصنف التوترات الزائدة الداخلية إلى توترات زائدة لحظية، وتوصيلية، والتوترات اللحظية تنشأ نتيجة فصل ووصل الأحمال بشكل مفاجئ، أو قذف حمل من نهاية خط طويل، أو قصر أحد الأطوار مع الأرض. وتتراوح مدة

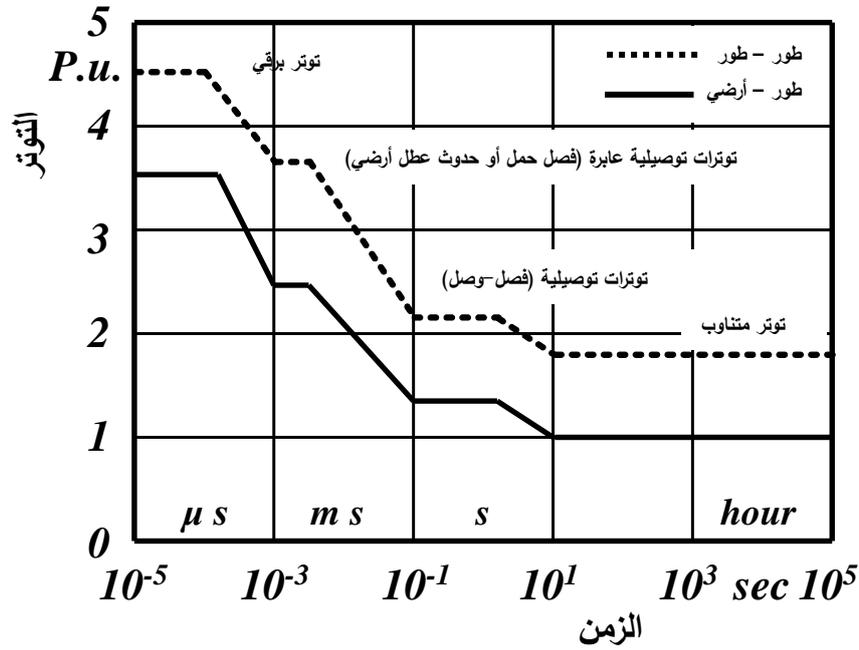
استمرار مثل هذه التوترات بين 0.1 sec وعدة ساعات. أما التوترات الزائدة التوصيلية فتتسبب نتيجة عمليات الفصل والوصل، وتتكوّن غالباً من اهتزازات شديدة التخامد. يُعبّر عن مقدار زيادة التوتر بالعامل k :

$$k = \frac{U_{\max}}{\frac{\sqrt{2} \cdot U_h}{\sqrt{3}}}$$

حيث: U_{\max} - قيمة التوترات الزائدة،

U_h - القيمة العظمى لتوتر العمل المسموح.

تتراوح قيمة k بين (3-10) بالنسبة للتوترات البرقية مقابل (1.8-2.2) بالنسبة للتوترات الزائدة الداخلية، [3]. ويلخص الشكل (1) الإجهادات الكهربائية التي تتعرض لها الشبكة بالنسبة للزمن



الشكل (1) الإجهادات الكهربائية التي تتعرض لها الشبكة بالنسبة للزمن

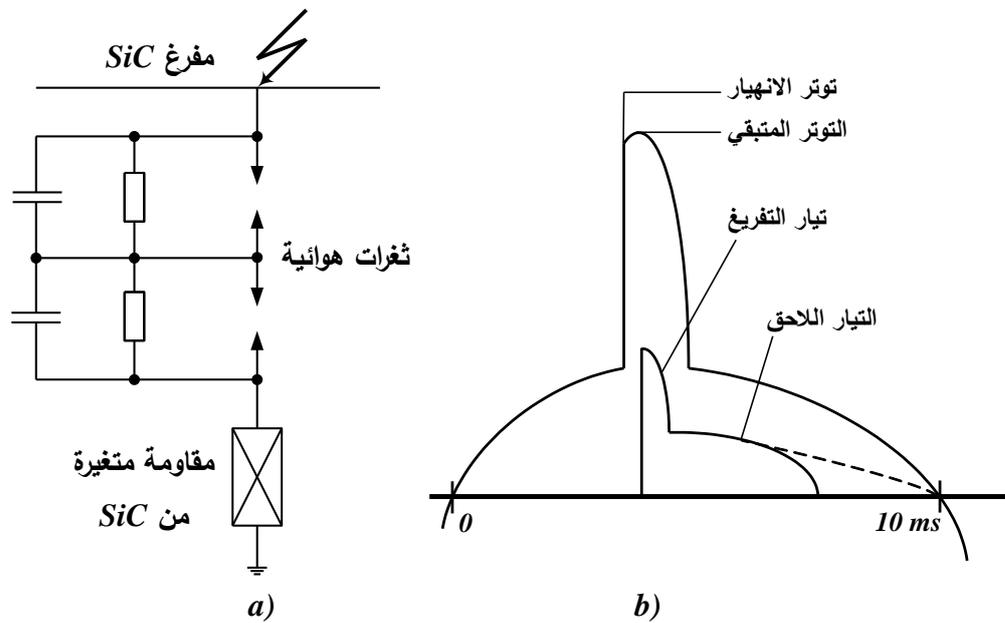
يظهر من الشكل أن التوترات الزائدة البرقية تمثل أكبر خطر تتعرض له شبكات التوتر المتوسط. لذلك تحدّد المواصفات القياسية العالمية $IEC 60071$, [4]، سويات العزل لتجهيزات التوتر المتوسط وفق التوترات الزائدة البرقية.

2- آلية عمل مفرّغات التوتر:

تستخدم مفرّغات التوتر للحد من قيمة التوترات الزائدة الواردة إلى المحولة إلى قيمة أقل من قيمة العزل البرقي للمحولة والمحدّدة بـ 95 kV أو 125 kV لمحولات القدرة $20/0.4 \text{ kV}$, [4]، وذلك حسب كثافة الصواعق البرقية في منطقة تركيب المحولة. ويجب أن تبلغ قيمة توتر الانهيار للمحولة 1.2 من توتر الانهيار للمفرّغ [5]. ويوجد أنموذجان لمفرّغات التوتر:

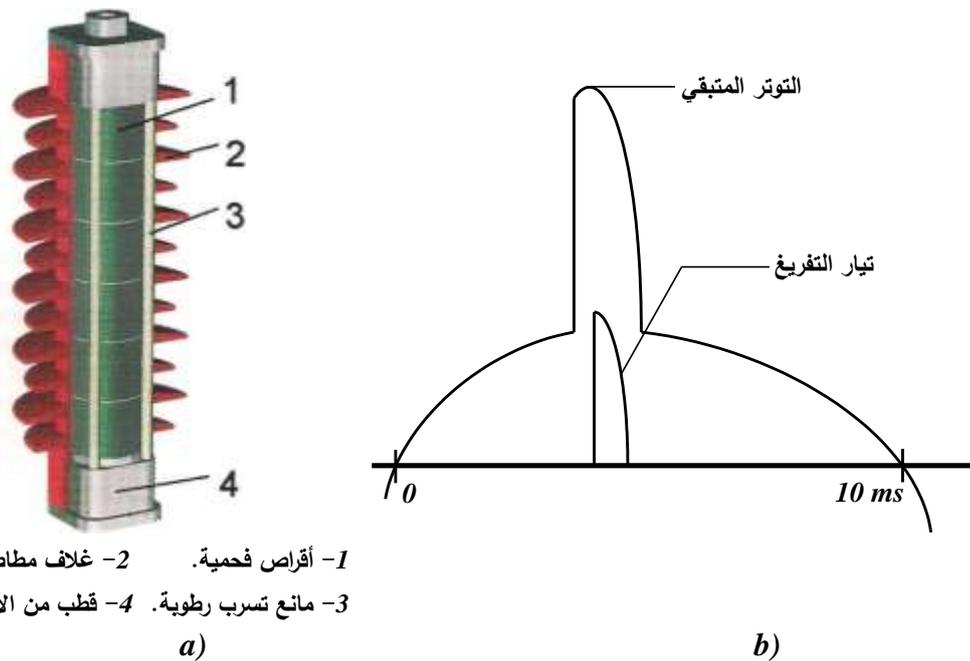
الأنموذج الأول: مفرّغ مكوّن من عدد من الثغرات الهوائية الدائرية على التسلسل مع مقاومة لا خطية عبارة

عن أقراص من فحمات السيليسيوم SiC ، الشكل (2).



الشكل (2) مفرغ مع ثغرات هوائية تسلسلية.

الأنموذج الثاني: عبارة عن مقاومة لا خطية على شكل أقراص مصنوعة من أكاسيد معدنية كأكسيد التوتياء ZnO بقطر 80 mm وسماكة 2-3 cm. في هذه المفرغات لا نحتاج إلى ثغرات هوائية، الشكل (3).



1- أقراص فحمية. 2- غلاف مطاطي.
3- مانع تسرب رطوبة. 4- قطب من الألمنيوم.

الشكل (3) مفرغ جهد توتر متوسط مصنوع من أكسيد التوتياء ZnO.

تبيّن الأشكال (2,b) و (3,b) آلية عمل كل أنموذج من نماذج المفرغات.

ويعود سبب عدم الحاجة لاستخدام ثغرات في مثل هذا النوع من المفرغات إلى أن المنحني المميز النبضي للمقاومة قليل الانحناء. وعند توتر يساوي توتر العمل يسري فيها تيار صغير جداً. أما المقاومات

المصنوعة من فحمت السيليسيوم SiC فيمر فيها تيار كبير عند توتر العمل. لذلك نستخدم الثغرات الهوائية لفصل طور عن الأرض، وبالتالي يصبح المنحني المميز النبضي لهذه المفرغات ذا انحناء شديد [6]. أما مقاومات التحجيب المبينة في الشكل (2,a) فتهدف إلى التخلص من التيارات التسريبية، وخاصة في ظروف الاتساخ. ويبين الجدول (I) مقارنة بين المفرغات المصنوعة من أكاسيد معدنية كأكسيد التوتياء ZnO ، ومفرغات مصنوعة من ثغرات هوائية على التسلسل مع مقاومة من فحمت السيليسيوم SiC .

الجدول (I) مقارنة بين مفرغات أكسيد التوتياء ZnO ومفرغات فحمت السيليسيوم SiC

مفرغات مصنوعة من فحمت السيليسيوم SiC . مقاومة من فحمت السيليسيوم SiC .	مفرغات مصنوعة من أكسيد التوتياء ZnO
عبارة عن عدد من الثغرات الهوائية مع مقاومة متغيرة من فحمت السيليسيوم SiC .	تتكون من مقاومة عبارة عن عدد من أقراص أكاسيد التوتياء فقط.
تيار التسريب في المقاومة في حالة العمل الطبيعي بدون ثغرات كبير جداً.	تيار التسريب في المقاومة في حالة العمل الطبيعي أقل من 1 mA .
يصنع الغلاف المعدني من البورسلان فقط. ومن مساوئ ذلك أن هذا الغلاف يصبح غير كتم في نقطة وصل الأقطاب مع البورسلان، كما أن دخول الهواء الخارجي إلى داخل المفرغ يسبب تغير منحنى (التوتر-التيار)، وبالتالي يصبح توتر الانهيار قريباً من توتر العمل، مما يؤدي إلى تحطم المفرغ.	يصنع الغلاف المعدني في الوقت الحالي من مواد سيليكونية فقط، حيث توجد مفرغات قديمة ذات غلاف مصنوع من البورسلان.
يحدث انهيار لثغرات المفرغ عند حدوث توترات زائدة، ويسري تيار في المقاومة المتغيرة تتحدد على أساسه قيمة التوتر المتبقي.	لا يحدث انهيار في هذا المفرغ، وإنما يسري تيار في المقاومة المتغيرة عند حدوث توترات زائدة، ويتلاشى عند زوال تلك التوترات.
يسري تيار الانفراغ اللاحق حتى مرور موجة التوتر في الصفر. (في الثغرات ذات النفخ المغناطيسي يمكن أن يتم إطفاء القوس الكهربائي بزمن أقل).	لا يسري فيه تيار لاحق.
يتحدد مستوى الحماية بالتوتر المتبقي (القيمة العظمى للتوتر أثناء مرور القيمة العظمى للتيار في المقاومة).	يتحدد مستوى الحماية بالتوتر المتبقي (القيمة العظمى للتوتر أثناء مرور القيمة العظمى للتيار في المقاومة).
يوجد انحناء في منحنى الاشتعال البرقي، وبالتالي احتمال الخطأ وارد في الموجات ذات الميل الجبهي الكبير.	منحنى الاشتعال البرقي ثابت تقريباً، وبالتالي لا يوجد احتمال للخطأ عند نشوء توترات زائدة ذات الميل الجبهي الكبير.
توزيع غير متجانس للتوتر على الثغرات في ظروف الاتساخ، لذلك نحتاج إلى مقاومات تحجيب.	مناسب لظروف الاتساخ.

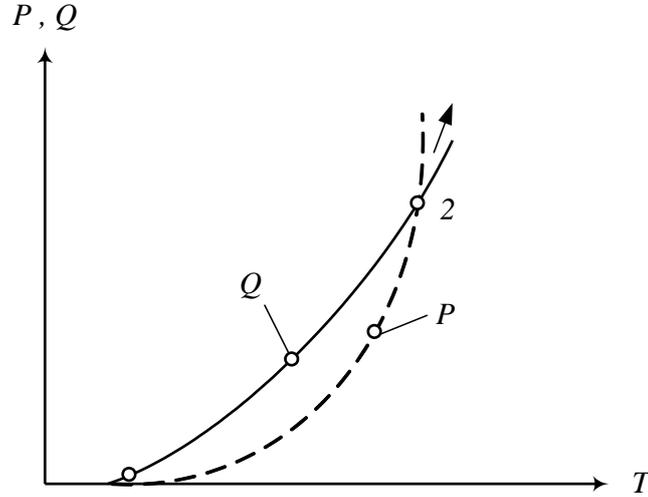
واستناداً لذلك يمكن فهم أسباب استخدام مفرغات الأكاسيد المعدنية فقط في شبكات التوتر المتوسط في الوقت

الحالي.

3- الاستقرار الحراري لمفرغات التوتر:

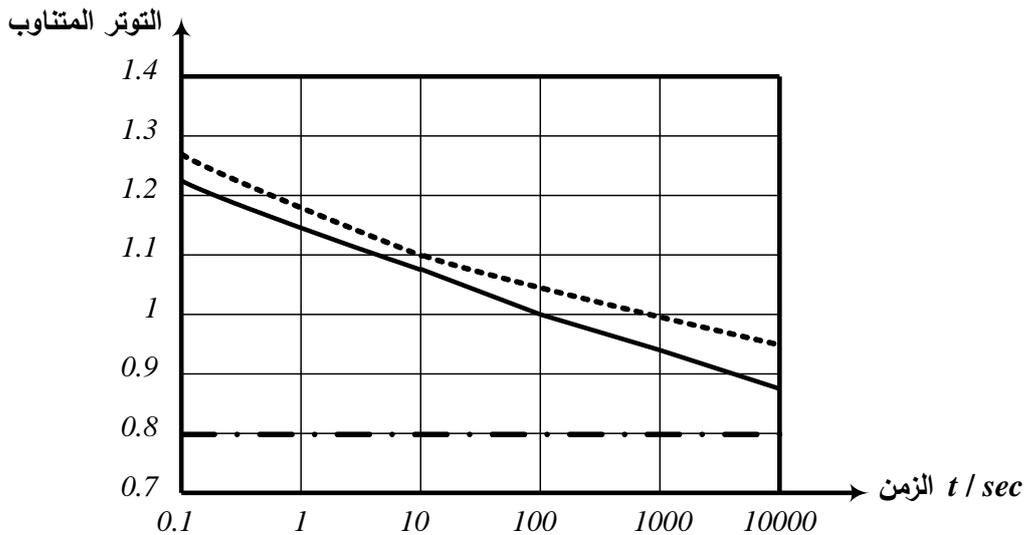
من المهم جداً دراسة الاستقرار الحراري لمفرغات التوتر المصنوعة من أكسيد التوتياء ZnO بحيث لا تتفجر تحت تأثير الطاقة المحولة بداخلها نتيجة مرور تيار فيها، وهذه الحالة من أهم الأعطال التي تحدث على هذه

المفرغات. يمثّل المنحني P في الشكل (4) العلاقة بين استطاعة الفقد الحراري في مفرغ التوتر (الحرارة المكتسبة) عند توتر العمل الدائم، والزمن T .



الشكل (4) العلاقة بين استطاعة الفقد الحراري في مفرغ التوتر (الحرارة المكتسبة) عند توتر العمل الدائم، والزمن T .

نلاحظ من الشكل أن الحرارة المكتسبة نتيجة مرور تيار التسريب تزداد بشكل أسي مع الزمن، ويمثّل المنحني θ الحرارة المطروحة من المفرغ إلى الخارج وعند نقاط أكبر من النقطة 2 تصبح $P > \theta$ ، أي أن الحرارة المكتسبة أكبر من الحرارة المطروحة. وبالتالي يحدث انهيار حراري للمفرغ، وهذه الحالة يجب ألا تحدث في المفرغ عن طريق رفع قيمة النقطة 2 إلى مستوى لا يمكن بلوغه عبر التصميم المناسب للمقاومات وتبريد المفرغ. ويبين الشكل (5) العلاقة بين توتر التشغيل الزائد الذي يمكن تطبيقه على المفرغ، والزمن من أجل تيار صاعقة من الشكل $4/10 \mu s$ بمطال $100 kA$.



الشكل (5) العلاقة بين التوتر المتناوب والزمن

واعتماداً على أهمية الاستقرار الحراري لمفرغات التوتر تتطلب المواصفة القياسية العالمية [2] اختبارات حرارية دقيقة للمفرغات للتأكد من جودة تصنيعها. لذلك لا بد من إجراء الاختبارات الحرارية على المفرغات المركبة في الشبكة كل فترة زمنية للتأكد من عدم تجاوز كمية الحرارة المكتسبة داخل المفرغ نتيجة تيار التسريب كمية الحرارة المطروحة للوسط الخارجي. ولذلك سوف نقوم في بحثنا هذا باقتراح الدارة المناسبة لهذه الاختبارات.

4- أسس تحديد قيمة توتر العمل الدائم لمفرغات التوتر:

يلعب الاختيار الصحيح لمواصفات مفرغ التوتر دوراً أساسياً في أداء وظيفته بشكل جيد، وفيما يلي سوف يتم تحديد أسس الاختيار الصحيح لهذه المفرغات. وحتى يعمل مفرغ التوتر بشكل صحيح لا بد عند اختيار توتر العمل الدائم U_c من تحقيق الشرطين التاليين:

• يجب أن يكون توتر العمل الدائم للمفرغ (التوتر التصميمي) U_c أكبر من التوتر الدائم المطبق عليه بمقدار 1.25 ، [5].

• يجب أن يتحمل المفرغ التوترات الزائدة المؤقتة خلال فترة تطبيقها، انظر الشكل (5)، أي يجب أن يكون $(T \cdot U_c)$ أكبر من القيمة المتوقعة للتوترات الزائدة المؤقتة، ويمثل الزمن T مدة استمرار التوترات الزائدة المؤقتة. وتكون قيم U_c مضمونه حتى قيمة لدرجة حرارة الوسط الخارجي تبلغ $45^\circ C$ ، وعند تجاوز درجة الحرارة للقيمة السابقة يجب زيادة U_c بمقدار 2% لكل 5 درجات زيادة في درجة حرارة الوسط الخارجي. ويجب الأخذ بالحسبان طريقة معالجة النقطة النجمية بالنسبة للشبكات ثلاثية الأطوار مع الأخذ بالحسبان أن قيمة التوترات الزائدة المؤقتة تتعلق بكيفية تأريض النقطة النجمية للشبكة [7]:

☒ النقطة النجمية معزولة:

عند حدوث قصر لأحد الأطوار تزداد قيمة التوتر في الطورين الآخرين:

$$U_c \geq U_n \cdot$$

حيث U_n - توتر العمل الأعظمي بين الأطوار.

ويصبح توتر النقطة النجمية مساوياً $U_n/\sqrt{3}$ ، أي أن توتر العمل الدائم للمفرغ في حال وجوده بين النقطة النجمية للمحول والأرض يعطى بالعلاقة:

$$U_c \geq \frac{U_n}{\sqrt{3}} \cdot$$

عند وجود إمكانية فصل العطل ألياً يسمح بإنقاص قيمة U_c بمقدار العامل T . فمثلاً، في حال ربط المفرغ بين الطور والأرض، وعند إمكانية فصل العطل بعد 20 sec نجد أن قيمة U_c تنخفض بالمقدار $T = 1.4$ ، أي:

$$U_c = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot T} \cdot$$

☒ النقطة النجمية مؤرضة عبر مقاومة منخفضة $C_f < 1.4$. في هذه الحالة لا يتجاوز عامل الخطأ الأرضي

1.4، أي:

$$U_{Tov} < \frac{1.4 \cdot U_n}{\sqrt{3}} \cdot$$

وبفرض أن زمن إزالة الخطأ الأرضي 3 sec فإن $T = 1.45$ ، وبالتالي تعطى قيمة U_c بالعلاقة:

$$U_c \geq \frac{1.4 \cdot U_n}{1.45 \cdot \sqrt{3}}$$

ويبين الجدول (2) القيم المقترحة لاختيار مفرّغات التوتّر بين طور والأرض حسب (VDE (0675-2).

الجدول (2) القيم المقترحة لاختيار التوتّر للمفرّغات بين طور والأرض حسب (VDE (0675-2).

التوتّر المتبقي من أجل تيار برقي اسمي	التوتّر التصميمي $U_c [kV]$	التوتّر الدائم $U_n [kV]$	التوتّر الاسمي $U_N [kV]$	تأريض النقطة النجمية
80	>30	>24	20	النقطة النجمية معزولة، أو مؤرضة عبر مقاومة.

من المهم جداً الانتباه إلى أن التوافقيات التي تحدث على الشبكة تسبب زيادة في توترها. فإذا كانت هذه الزيادة أقل من 5 % يتوجب رفع قيمة U_c للمفرّغ الموجود بين الطور والأرض، طالما كانت أصغر من $1.05 \cdot U_n / \sqrt{3}$ إلى قيمة أكبر [8]. وإذا كانت زيادة التوتّر أكبر يجب الاتفاق مع المصنّع على قيمة U_c .

5- اختيار مفرّغات التوتّر:

يجب أن يتم اختبار مفرّغات التوتّر المصنوعة من أكاسيد التوتياء وفق المواصفة القياسية العالمية IEC 60099-4، [2]، للتأكد من دقة تصنيعها ومطابقتها للمواصفات قبل تركيبها على الشبكة. وتقسّم هذه الاختبارات إلى اختبارات نوعية، واختبارات دورية اعتيادية، واختبارات القبول.

5-1 الاختبارات النوعية:

يتم إجراء هذه الاختبارات من قبل المصنّع للتأكد من مطابقة المفرّغات المصنّعة للشروط الواردة في المواصفات القياسية، وتشمل هذه الاختبارات:

- ❖ اختبار تحمّل الغلاف الخارجي لتوتّر الثبات، للتأكد من عدم حدوث خرق على السطح الخارجي.
- ❖ اختبار التوتّر المتبقي الذي يهدف إلى التأكد من سوية الحماية للمفرّغ، حيث يتم تطبيق تيار الاختبار من الشكل $4/10 \mu s$ وفق القيم التالية المبينة بالجدول (3):

الجدول (3)

أنموذج المفرّغ	قيمة تيار الاختبار
5 kA	65 kA
2.5 kA	25 kA
1.5 kA	10 A

- ❖ اختبار تحمّل التيار النبضي الطويل الذي يهدف إلى التأكد من أن مقاومات أكاسيد التوتياء ستحمّل إجهادات العزل دون حدوث انهيار سطحي أو خرق عليها.
- ❖ اختبار التقادم الزمني حيث يتم تحميل المقاومات عند درجة حرارة $115^\circ C$ لمدة 1000 h بتوتّر أكبر من U_c ، ويتم عندها مراقبة إمكانية ازدياد مفايد الاستطاعة للمقاومات مع العمر الزمني لها، ومقدار هذه الزيادة.
- ❖ قياس قيمة تيار التسريب عند تطبيق توتّر العمل، والتي يجب ألا تتجاوز 1 mA لمفرّغات التوتّر المستخدمة في شبكات 20 kV.

- ❖ اختبار التوتر التصميمي U_p ، والذي يمثل أكبر قيمة فعالة للتوتر المتناوب المسموح بتطبيقها على المفرغ.
- ❖ اختبار مميز العلاقة بين التوتر المتناوب مع الزمن، والذي يهدف للتحقق تجريبياً من المنحني المبين في الشكل (4)، وبالتالي التأكد من قدرة تحمل المفرغ للتوترات الزائدة المؤقتة.
- ❖ اختبارات التلوّث التي تهدف إلى التأكد من عدم تعرّض الأجزاء الداخلية للمفرغ للتلف عند تعرّض الجسم الخارجي للمفرغ لانفراغات نتيجةً للاتساح.

5-2 الاختبارات الدورية الاعتيادية:

- يتم إجراء هذه الاختبارات من قبل المصنع أيضاً، وذلك على كل مفرغ، وتشمل:
 - ❖ اختبار التوتر المتبقي، الذي يهدف للتأكد من عدم تجاوز مستوى الحماية المعطى للمفرغ.
 - ❖ اختبار الانفراغات الجزئية، الذي يهدف للتأكد من خلو المفرغ من الانفراغات الجزئية. يتم إجراء هذا الاختبار بتطبيق توتر $1.05 \cdot U_c$ على المفرغ. ويجب وفقاً للمواصفات القياسية العالمية أن تكون سوية الانفراغات الجزئية أقل من $5 PC$.
 - ❖ اختبارات الكتامة، التي يتم إجراؤها على المفراغات ذات الغلاف المصنوع من البورسلان فقط، ولا يتم إجراؤها على المفراغات ذات الغلاف المصنوع من مواد سيليكونية، لأنه يتم صب الأجزاء الفعالة مباشرة ضمن هذه اللدائن.

5-3 اختبارات القبول:

- يتم إجراء هذه الاختبارات من قبل المستثمر، ويتم تحديد عدد المفراغات المختبرة بأخذ الجذر التكعيبي للكمية المسلمة مقرباً إلى أقرب رقم صحيح. وتشمل هذه الاختبارات:
 - ❖ قياس التوتر المتبقي عند تفريغ تيار التسريب الاسمي من الشكل $8/20 \mu s$.
 - ❖ قياس سوية الانفراغات الجزئية.

6- سوية الحماية لمفرغات التوتر:

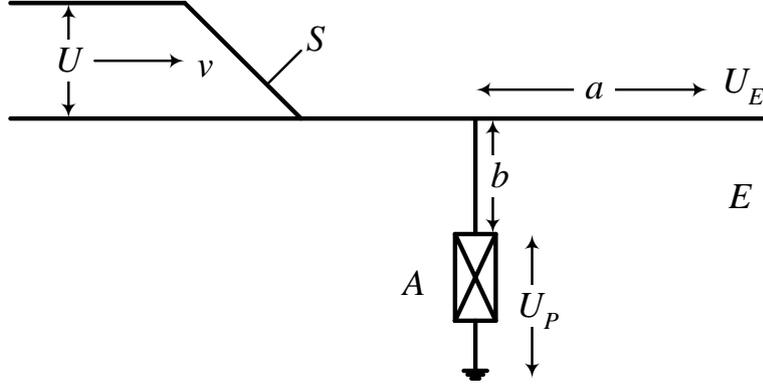
- تُعرف سوية الحماية بوصفها القيمة العظمى للتوتر المقيسة على طرفي المفرغ أثناء سريان تيار التفريغ الاسمي من الشكل $8/20 \mu s$ فيه، وعند تحديد سوية الحماية لا بد من أخذ الحالتين الخاصتين التاليتين بالحسبان:
 - اختبار المفرغ على نبضة تيار ذات ميل شديد (زمن جهتي صغير جداً) من الشكل $1 \mu s$ ، وتصل قيمة التوتر المتبقي في هذه الحالة إلى $1.13 \cdot U_p$.
 - اختبار المفرغ عند تطبيق تيارات مستطيلة تمثل حالة تفريغ خطوط النقل عند حدوث توترات زائدة داخلية عليها. ويُطبق في هذه الحالة على المفرغ موجة تيار $500 A$ من الشكل $30/60 \mu s$ ، وتتراوح قيمة التوتر المتبقي بين $(0.77 - 0.83)$ من قيمة التوتر المتبقي عند تطبيق نبضة تيار من الشكل $8/20 \mu s$.

7- تركيب مفرغات التوتر:

- يلعب اختيار المكان المناسب لتركيب المفرغ (المسافة بين المفرغ والمحولة، أطوال الوصلات، مكان التركيب)، وتأريضه بشكل جيد، دوراً أساسياً في فعالية نظام الحماية.

7-1 حساب مسافة الحماية بين المفرغ والمحولة [9]:

ينتقل على الخط الهوائي، الشكل (6) توتر زائد على شكل موجة مسافرة بالسرعة الموجية $v = 300m/\mu s$ باتجاه المحولة.



U : موجة التوتر الزائد القادمة
 v : سرعة انتقال الموجة
 S : ميل مقدمة الموجة
 U_P : سوية الحماية للمفرغ
 a, b : طول أسلاك الربط.
 E : نهاية الخط.

الشكل (6) التوترات الزائدة في نهاية خط E .

وبفرض أن ميل الزمن الجبهي للموجة S ثابت، فإن التوتر المطبق على المحولة U_E يساوي إلى توتر الانهيار للمفرغ بالإضافة إلى هبوط التوتر على أسلاك التوصيل، والتي تتعلّق بممانعة السلك والتي تؤخذ مساويةً I $\mu H/m$ ، وهو يعطى بالعلاقة:

$$U_E = U_P + \frac{2S \cdot (a + b)}{v}$$

حيث U_P - توتر الانهيار للمفرغ (مستوى الحماية).

تثبت الخبرة العملية، أن أخذ عامل أمان بقيمه 1.2 بين توتر الثبات البرقي للمحولة U_w ، وبين التوترات الزائدة الواصلة لها يعدّ كافياً.

$$\frac{U_w}{1.2} \geq U_E = U_P + \frac{2 \cdot S \cdot l}{v}$$

حيث $l = a + b$

$$l = \frac{U_w - U_P}{2 \cdot S} \cdot v \quad (1)$$

وبالتالي:

7-2 القيمة المتوقعة للميل الزمني لجبهة التوتر $[dU/dt]_S$:

بفرض حدوث إصابة مباشرة بصاعقة تيار في أحد الخطوط، فسوف يسري في الخط على جانبي منطقة الإصابة تياران قيمة كل منهما $(i/2)$.

فإذا كانت Z الممانعة الموجبة للخط سيتولد توتر زائد بين الخط والأرض مقداره $Z \cdot (i/2)$ ، وقيمة S لا تكون ثابتة زمنياً، وإنما تتعلّق بقيمة التغير الزمني لتيار الصاعقة. وتبلغ هذه القيمة:

$$\frac{di}{dt} > 32 \text{ kA}/\mu\text{s} \cdot$$

وهذه القيمة تتحقق في 10% من العدد الكلي للصواعق [6]، وهذا يعني أن إصابة واحدة في كل عشرة إصابات ستؤدي إلى ظهور موجات توتر بميل أعظمي $S \geq 7200 \text{ kV}$ ، ونتوقع مثل هذا الميل الكبير فقط في الإصابات القريبة من المحولة، ولكن في الإصابات البعيدة سوف تتخامد حدة الموجة بسبب انقراغات الكورونا والانهيارات المتتالية للأبراج [9]. وفعلياً تكون نسبة إصابة خطوط التوتر المتوسط 20 kV إصابة مباشرة بصاعقة قليلة جداً، وخاصةً في المدن، لأن هذه الخطوط تكون محمية بالأبنية العالية. وبشكل عام تكون الميول الجبهية للتوترات الزائدة المنقولة على شبكة ذات أعمدة معدنية مؤرّضة أقل منها لتوترات الزائدة المنقولة على شبكة ذات أعمدة خشبية، ويُفسّر ذلك بانخفاض توترات الانهيار للعوازل المركبة على الأعمدة المعدنية بالمقارنة مع العوازل المركبة على أعمدة خشبية.

ويؤخذ الميل الجبهي لنبضة التوتر في شبكات 20 kV وفق الجدول (4)، [5]، [7].

الجدول (4) قيمة الميل الجبهي لنبضة التوتر في شبكات 20 kV .

نوع الأعمدة	خط هوائي محمول على أعمدة خشبية	خط هوائي بعوارض مؤرّضة
$S [\text{kV}/\mu\text{s}]$	1550	800

ويتم تخطي هذه الميول خلال مدة 40 عاماً [9]، وإذا اعتبرنا أن العمر الفني للمحولة يبلغ حوالي 40 عاماً، فإن احتمال فشل المفرغ في عمله خلال هذه المدة يبلغ حوالي 10%. وفقاً لذلك تكون المسافة المسموحة بين المفرغ والمحولة في الشبكات ذات الأعمدة الخشبية أقل.

بتعويض القيم في المعادلة (1) نجد أن المسافة المسموحة بين المفرغ والمحولة هي $l = 2.3 \text{ m}$ للخطوط المحملة على أعمدة خشبية و $l = 4.5 \text{ m}$ للخطوط المحملة على عوارض معدنية مؤرّضة.

لتحسين فعالية الحماية للمحولات المربوطة مع خط هوائي محمول على أعمدة خشبية يجب إما تأريض العوارض المعدنية لآخر ثلاث أبراج قبل المحول (تشكيل منطقة حماية)، وفي هذه الحالة فإن التوترات الزائدة التي تصل إلى المحولة سيكون لها نفس الشكل كما لو أن الخط محمول على عوارض معدنية مؤرّضة، أو بتركيب مفرغ إضافي على العمود ما قبل الأخير من المحولة، وفي هذه الحالة تتحقق حماية أفضل للتجهيزات. وقد تم تطبيق هذه الحالة في شبكة التوتر المتوسط لحقول النفط في الرميلان منذ عدة سنوات، وأدى ذلك إلى انخفاض أعطال المحولات نتيجة التوترات الزائدة (الأمواج المسافرة) إلى قيم قليلة جداً.

ويعود سبب انخفاض الأعطال على المحولات في هذه الحالة إلى أنه نتيجة القصر بين الأطوار والأرض تنخفض الممانعة الموجية للنواقل بين مكان القصر والمحولة إلى الثلث (الممانعات الموجية للنواقل مربوطة على التفرع)، وبالتالي فإن حدة الموجة الممرّرة باتجاه المحولة تنخفض بشكل كبير [1].

3-7 تأريض مفرغ التوتر:

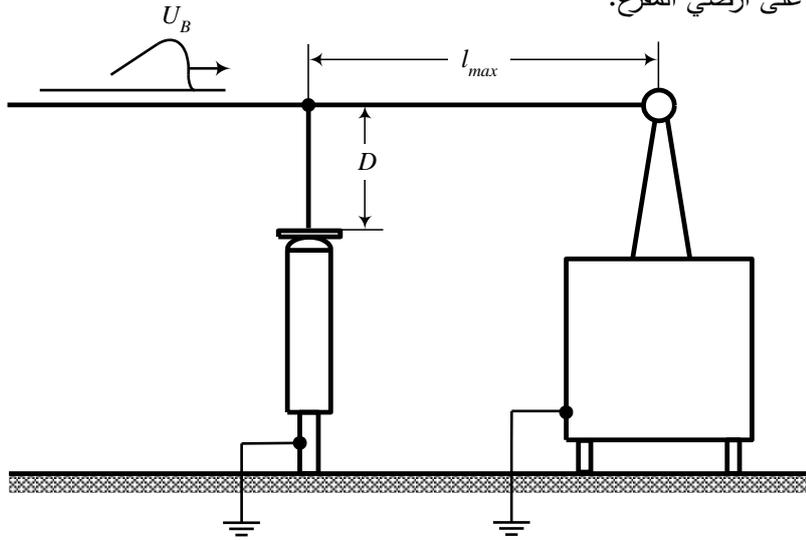
تعطى قيمة التوتر المطبق على المحولة وفق الشكل (7) بالعلاقة:

$$U_T = U_p + U_b + U_E \cdot$$

حيث: $-U_p$ - التوتر المتبقي للمفرغ في مفرغات ZnO، وتوتر الانهيار للمفرغات ذات الثغرات الهوائية،
 $-U_b$ - هبوط التوتر على الأسلاك الواصلة من الطور إلى المفرغ، ومن المفرغ إلى الأرض:

$$U = L \cdot \frac{di}{dt} \cdot$$

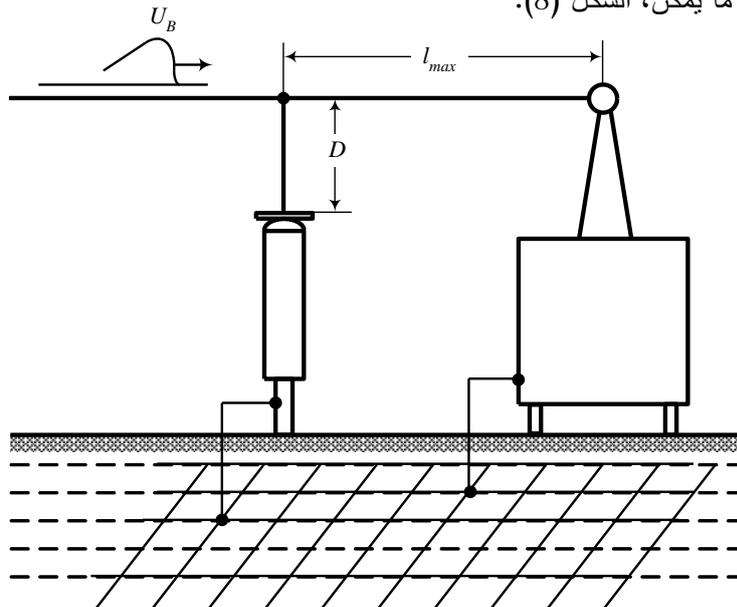
$-U_E$ - هبوط التوتر على أرضي المفرغ.



الشكل (7) قيم التوتر المطبقة على المفرغ.

للتخلص من هبوط التوتر على أرضي المفرغ يتم ربط أرضي المفرغ مع تأريض جسم المحولة، ويجب أن

تكون الوصلات أقصر ما يمكن، الشكل (8).



الشكل (8) تأريض مفرغ التوتر مع تأريض جسم المحولة.

4-7- ملاحظات عامة:

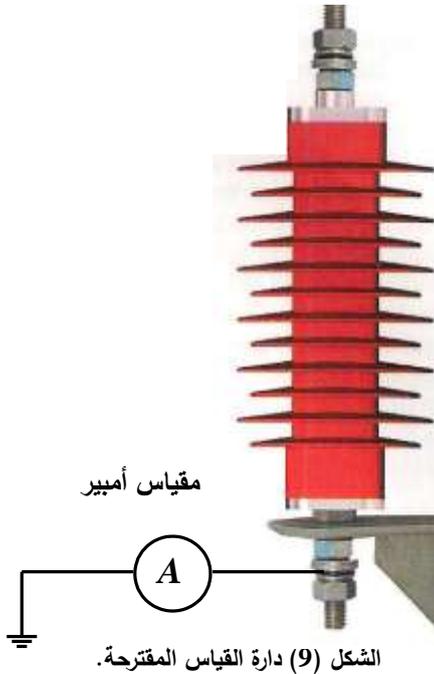
- ☒ عند تركيب قاطع يجب تركيب المفرغ بعده من جهة المحولة، وذلك لتجنب أثر التوترات التوصيلية التي تحدث في القاطع نتيجة عمليات الفصل والوصل.
- ☒ عند ربط المحولة مع الخط الهوائي بوساطة كابل فإن قيمة التوترات الزائدة المنقلة من الخط الهوائي إلى الكابل تقل بشكل كبير جداً (تنخفض إلى 20 % فقط)، إلا أن هذه الموجة تنعكس عند وصولها إلى نهاية الكابل حيث تتضاعف قيمتها تقريباً (نهاية مفتوحة)، ثم تعود إلى بداية الكابل، ... وهكذا عدة مرات حتى تصبح قيمة التوترات الزائدة كبيرة جداً. لذلك يجب تركيب مفرغ التوتر بجانب علب النهاية للكابلات مباشرة، وأن يتم ربط تأريض المفرغ مع تأريض غلاف الكابل.
- ☒ إذا كان طول الكابل أكبر من 50 m يجب تركيب مفرغ توتر على كل طرف من طرفي الكابل.
- ☒ هل يُنصح بتركيب مفرغات توتر على طرف التوتر المنخفض إذا كانت شبكة التوتر المنخفض هي المعرضة للصواعق (في المناطق ذات الكثافة البرقية العالية)؟. فقد بينت الدراسات أن أعطالاً كثيرة في المحولات نجمت عن توترات زائدة لصواعق على شبكة التوتر المنخفض. ويُعتقد أن التوترات الزائدة إذا لم تكن طويلة الأمد فسوف تنتقل بشكل تحريض (بحسب نسبة عدد اللغات) إلى طرف التوتر المتوسط. لذلك يُنصح بتركيب مفرغات توتر من جهة التوتر المنخفض في المناطق ذات الكثافة العالية للانفراغات البرقية.

8- المتانة الميكانيكية للمفرغ:

يُميّز النورم الألماني *DIN 48113*، [9]، بالنسبة لحمولة شد رأس المفرغ ما بين حمولة دائمة وحمولة لفترة زمنية قصيرة. وتحدد الحمولات المسموحة لأنواع المختلفة من المفرغات بارتفاعها، وبعزم الانحناء الأعظمي المسموح به.

9- النتائج والمناقشة:

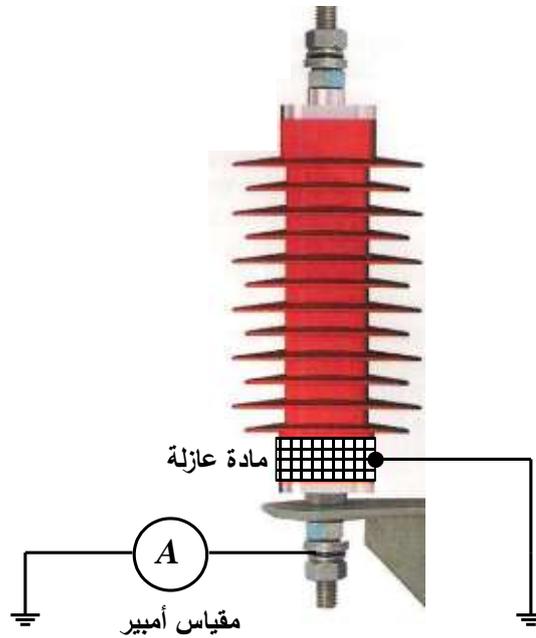
استناداً لما سبق، لا بد من قياس تيار التسريب في المفرغ بعد فترة من وضعه في الخدمة لمعرفة الطاقة المحولة بداخله، وضمان عدم تغيير منحنى (التوتر-التيار) للأقراص، أو عدم انفجار المفرغ نتيجة زيادة الحرارة المكتسبة عن الحرارة المطروحة. وعند قياس تيار التسريب على أرضي المفرغ لا بد من التمييز بين تيار التسرب المار في الأقراص، وهو التيار المراد معرفته، وبين تيار التسرب المار على السطح الخارجي للمفرغ نتيجة تراكم الأوساخ على هذا السطح، والذي تتعلّق قيمته بدرجة الاتساخ [10]. ونبين في الشكل (9) الدارة المقترحة لاختبار مفرغات التوتر في الشبكة تحت التوتر.



يتم التخلص من تيار التسريب السطحي باستخدام إحدى الطريقتين التاليتين:

الطريقة الأولى: تنظيف السطح الخارجي للمفزع بشكل جيد قبل القياس، وفي هذه الحالة يُفضل أن يتم فصل الشبكة قبل عملية التنظيف، مع اعتبار أنه لا توجد الخبرة الكافية عند عناصر الصيانة لدينا للعمل تحت التوتر. وبعد التنظيف وتركيب مقياس الأمبير على سلك التأريض يتم إعادة تطبيق التوتر على الشبكة، ويتم قياس تيار التسريب، وفي هذه الحالة يمكننا إهمال تيار التسريب الخارجي. وتعدّ هذه الطريقة سهلة جداً وذات كلفة منخفضة، وتم تطبيقها في اختبار عدة مفزعات توتر مركبة في الشبكة، وأعطت صورة دقيقة جداً عن حال المفزع.

الطريقة الثانية: تتم بطلاء أسفل المفزع لمسافة حوالي 5 cm بطبقة عازلة من مواد سيليكونية، وربط سلك تأريض خاص، انظر: الشكل (10). وبالتالي يتم التخلص من تيار التسريب الخارجي بتمريره إلى الأرض مباشرة. عند زيادة قيمة تيار التسريب عن 1 mA تحت توتر العمل للشبكة، لا بد من تبديله بمفزع آخر.



الشكل (10).

وتوجد آليات لقياس درجة الحرارة نتيجة تيار التسرب داخل المفزع، وبالتالي تقدير فيما إذا كانت الحرارة المكتسبة أكبر من الحرارة المطروحة (انظر: الشكل 4)، بوساطة مسبار. إلا أن هذه الطريقة غير مستخدمة في بلدنا أيضاً.

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

بيّنت الدراسة الإحصائية للأعطال على محولات القدرة $20/0.4\text{ kV}$ المركبة في شبكات التوتر المتوسط في محافظتي اللاذقية وطرطوس أن عدد المحولات التي تنهار نتيجة التوترات البرقية كبيرة جداً، وخاصةً في الشبكات ذات الأبراج الخشبية. وبعد الكشف عن وسائط الحماية المستخدمة في حماية هذه المحولات (مفزعات التوتر) تبين أن سوية

توتر الخرق لعدد كبير منها ليس صحيحاً، بالإضافة إلى عدم تركيبها بشكل صحيح وعدم اختبارها نهائياً بعد تركيبها، مما يزيد من احتمال فشلها في حماية المحولة. وقد تم في هذا البحث بيان كيفية الاختيار الصحيح للمفرغات، وكيفية التأكد من دقة تصنيعها. كذلك بين البحث كيفية الحد من الأعطال على الشبكات ذات الأبراج الخشبية بتأريض العوارض المعدنية. كما تم في هذا البحث اقتراح طريقة بسيطة وذات كلفة قليلة لاختبار المفرغات تحت التوتر خلال فترات زمنية محددة للتأكد من قيامها بدورها المطلوب في حماية المحولات.

التوصيات:

1. نتيجةً لكون سوية العزل البرقي لعدد من محولات القدرة $20/0.4 \text{ kV}$ المركبة في شبكات التوتر المتوسط في محافظتي اللاذقية وطرطوس تبلغ 95 kV فإنها تتعرض للانهايار قبل المفرغ ذي سوية العزل 100 kV المخصّص لحماية المحولات ذات توتر العزل 125 kV . لذلك فإنه من الضروري رفع سوية العزل لهذه المحولات إلى 125 kV .
2. من الضروري تأريض العوارض المعدنية لآخر ثلاثة أعمدة خشبية قبل المحولة من أجل تشكيل منطقة حماية، وفي هذه الحالة فإن التوترات الزائدة التي تصل إلى المحولة سيكون لها نفس الشكل كما لو أن الخط محمول على عوارض معدنية مؤرضة.
3. من الضروري اختبار المفرغات مرة واحدة في العام على الأقل لمعرفة الطاقة المحولة بداخله، وضمان عدم تغيير منحنى (التوتر-التيار) للأقراص، أو عدم انفجار المفرغ نتيجة زيادة الحرارة المكتسبة عن الحرارة المطروحة.
4. استخدام الدارة المقترحة في بحثنا هذا لقياس قيمة تيار التسرب في المفرغات، وتقدير حالتها الفنية بسهولة.

المراجع:

1. د. محمد زهيرة. هندسة التوتر العالي /1/، منشورات جامعة تشرين، 2010-2011، 444.
2. DIN EN (60099-4; VDE 0675-4:2007-04 Norm, 2007-4: Metalloxydableiter ohne Funkenstrecken für Wechselspannungsnetze (IEC 60099-4:2004).
3. SCHUFFT W. , Taschenbuch der Elektrischen Energietechnik-2009, 544.
4. DIN EN (60071-2; VDE 0111-2:1997-09 Norm,1997-09:Isolationskoordination-Teil2 (IEC 60071-2:1996).
5. Niemexer P., Grohs A. Freileitung, 2 Auflage VDE VERLAG-2008,432.
6. Hinrichsen V. Metalloxid, Ableitse (Grundlagen), SIEMEN-2000,104.
7. شركة ABB- تصميم واختبار واستخدام مفرغات الصواعق من أكاسيد المعادن في شبكات التوتر المتوسط، الطبعة العربية-2000، 56.
8. Küchler A. Hochspannung, Technik springer Verlag-2009,450.
9. Hilgarth G. Hochspannung, Technik, 3 Aufgag B-G, Tebner-1997,208.
10. DIN EN (60507-1993); IEC 60507-1991): Fremdschicht Prüfungen an Hochspannung, Isolatoren Zur Anwendung in Wechselspannung systemen.