Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande

Band: 81 (1955)

Heft: 21-22: École polytechnique fédérale Zurich: centenaire 1855-1955, fasc. no 2

Artikel: L'isolation des machines électriques modernes

Autor: Sauvin, R.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-61377

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 16.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

La haute précision ne s'obtient qu'au prix de considérables précautions. Telle technique, mise au point au prix de gros efforts, ne s'abandonnera pas facilement pour une autre, peut-être plus économique, mais dont le résultat est incertain ou encore insuffisamment acquis. C'est pourquoi, dans les techniques de fabrication, les machines à pointer évoluent plus lentement que la machine-outil courante. Prenons l'exemple des glissières. Il peut sembler choquant qu'au début de l'ère atomique, on en soit encore à finir les glissières à la main, par grattage. Si l'on y regarde de plus près, cela n'a pourtant rien d'étonnant. Du seul point de vue de la forme géométrique, les exigences sont telles qu'aucune rectifieuse de glissière actuellement connue ne serait capable de les respecter. Il suffit en effet d'une courbure de deux secondes (angle des tangentes aux extrémités de la course), pour qu'existe une erreur métrologique de 5 microns sur un déplacement d'un mètre, à supposer que le plan de mesure soit celui de la glissière et que la surface à usiner se trouve 500 mm en dessus, conditions qui n'ont rien d'extravagant.

Il est évident qu'une courbure aussi faible s'obtient par seule déformation élastique. C'est par exemple celle que peut prendre un bâti quand on le charge de sa table. Il convient donc de le gratter avec une courbure inverse, de manière qu'il soit rectiligne en état de charge. C'est une difficulté additionnelle pour l'usinage par rectifiage. Le problème reste cependant entier, car d'ici une quinzaine d'années, le procédé du grattage, pour beaucoup de raisons, sera sans doute inapplicable.

Au point de vue de la précision, on peut estimer que si, actuellement, on travaille en moyenne avec une tolérance de 10 μ il faudra quinze ans pour que cette tolérance se réduise à 7,5 μ. L'avenir, sous ce rapport, se présente donc favorablement. Le système de projection d'une règle-étalon permet actuellement de tenir des tolérances déjà beaucoup plus serrées, et de toute manière, l'utilisation que l'on fait des règles de précision sur les machines à pointer ne représente qu'une grossière approximation, par rapport aux mesures scientifiques. Avec un microscope photo-électrique et une règle convenablement divisée, on obtient actuellement le centième de micron.

L'ISOLATION DES MACHINES ÉLECTRIQUES MODERNES

par R. SAUVIN, ingénieur E.P.F., Wettingen

Dans une machine ou un appareil électrique à haute tension, l'isolation prend une des places les plus importantes. On exige d'elle de très hautes qualités diélectriques, liées à une bonne tenue mécanique, ainsi qu'une bonne résistance à la température et au vieillissement. L'industrie électrique s'est donc efforcée, en collaboration avec les fabricants de matériaux isolants, de développer des produits réunissant ces qualités, et de les adapter constamment aux exigences toujours accrues imposées par l'augmentation de la puissance unitaire des machines.

Nous étudierons tout d'abord les critères qui permettent de juger un isolant.

A. Critères de qualité des matériaux isolants

1. *Rigidité diélectrique*

La tension de perforation de l'isolation des machines doit être très élevée, car c'est d'elle que dépend l'épaisseur de l'isolation et une diminution de cette épaisseur se traduit immédiatement par une augmentation sensible de la puissance de la machine. Cela exige donc une isolation parfaitement homogène et régulière, dans laquelle ne puissent se produire aucune rupture ni aucune déformation dues au vieillissement et aux contraintes thermiques ou mécaniques en service. La rigidité du micafolium, par exemple, satisfait à ces exigences et dépasse la valeur de 200 kV/cm.

2. *Pertes diélectriques*

La mesure des pertes diélectriques donne un excellent contrôle de la qualité d'un isolant. Bien que n'intervenant que pour une quantité négligeable dans les pertes totales, et par conséquent dans le rendement d'une machine, elles doivent être maintenues au-dessous d'une certaine valeur pour éviter tout claquage thermique. Celui-ci se produit au moment où la chaleur produite par les pertes diélectriques ne peut plus être évacuée par l'isolant, provoquant ainsi une augmentation progressive de la température jusqu'à carbonisation et perforation de l'isolation [1]. Cette tension de claquage thermique ou tension critique est donnée par la relation suivante :

$$U_c = 0{,}938 \sqrt{\frac{\lambda}{p_o \cdot \sigma \cdot e^{\sigma(\theta_a - \theta_o)}}} \qquad \text{kV}$$

où : λ = coefficient de transmission de chaleur en $\frac{W}{^oC \cdot \text{cm}}$

$p_o = \frac{\text{tg}\delta_o \cdot \varepsilon_o \cdot f}{1{,}8 \cdot 10^6}$ = pertes diélectriques par unité de volume (cm³) à la température θ_o.

θ_a = température de l'isolant pour le calcul de U_c.

$\sigma = \frac{ln \frac{\varepsilon_a \cdot \text{tg}\delta_a}{\varepsilon_o \cdot \text{tg}\delta_o}}{\theta_a - \theta_o}$ = coefficient de la variation des pertes diélectriques en fonction de la température.

ε = constante diélectrique.

$\text{tg}\delta$ = tangente de l'angle de pertes.

Pour la fréquence usuelle de 50 Hz, l'expression de la tension critique se simplifie et donne :

$$U_c = 177{,}5 \sqrt{\frac{\lambda}{(\varepsilon_o \,.\, \mathrm{tg}\delta_o) \,.\, \sigma \,.\, e^{\sigma(\theta_a - \theta_o)}}} \quad \mathrm{kV}$$

$$= 177{,}5 \sqrt{\frac{\lambda}{(\varepsilon_a \,.\, \mathrm{tg}\delta_a) \,.\, \sigma}} \quad \mathrm{kV}$$

On constate que le chiffre de pertes $\varepsilon . \mathrm{tg}\delta$, produit de la constante diélectrique de l'isolant par la tangente de l'angle de perte, et plus particulièrement son coefficient σ de variation en fonction de la température représentent des grandeurs caractéristiques d'un isolant, indépendamment de ses dimensions ou de sa forme. Le nomogramme de la figure 1 permet de calculer rapidement la tension critique d'une bobine d'alternateur (cylindre refroidi à l'extérieur seulement) en partant de ces deux valeurs. La partie de gauche du nomogramme donne, en ordonnée, la tension critique U_c à la température θ_o en partant du chiffre de pertes diélectriques $\varepsilon_o . \mathrm{tg}\delta_o$, reporté en abscisse, jusqu'à l'intersection avec la ligne oblique du coefficient σ. A droite en traçant, à partir de la tension critique obtenue pour la température de référence θ_o, une droite parallèle à celle correspondant au coefficient σ, on obtient la tension de claquage thermique pour une augmentation de température $\Delta\theta = \theta_a - \theta_o$. On constatera la rapide diminution de U_c quand la température s'accroît, principalement quand le coefficient σ est grand. Les deux exemples rapportés montrent que tout en ayant des pertes presque semblables à la température ambiante, un micafolium à la gomme laque présente une tension critique beaucoup plus basse (20 kV) qu'un micafolium à l'asphalte (73 kV) lorsque la température s'élève de 70° C. Grâce à la variation très faible de ses pertes diélectriques avec la température, le micafolium à l'asphalte sera sollicité en service par une contrainte bien inférieure à sa tension critique, ce qui n'était pas le cas pour son prédécesseur.

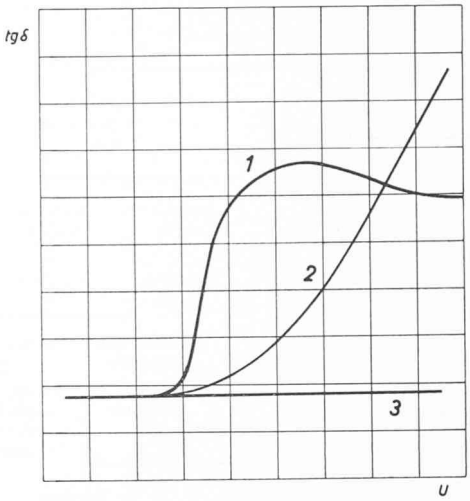


Fig. 2. — Représentation schématique de l'influence des couches d'air sur les pertes diélectriques d'un isolant. Variation de tgδ en fonction de la tension.

Courbe 1. Une couche d'air importante.
» 2. Nombreuses couches minces réparties dans l'isolant.
» 3. Isolation homogène sans couche d'air.

On remarquera par ailleurs que les relations ci-dessus ne tiennent pas compte de la variation des pertes diélectriques en fonction de la tension appliquée sur l'isolation. Cette variation ne peut que très difficilement être considérée dans le calcul parce que, nous le verrons ci-après, elle n'est régie par aucune loi mathématique. Toutefois, dans le cas d'une isolation bien exécutée, on peut admettre une variation du chiffre de pertes $\varepsilon . \mathrm{tg} . \delta$ proportionnelle à la tension, ce qui se traduit par la correction suivante :

$$(\varepsilon . \mathrm{tg}\delta)' = \varepsilon . \mathrm{tg}\delta \left[1 + \frac{\Delta(\varepsilon . \mathrm{tg}\delta)}{\Delta U} (U_c - U_o) \right]$$

où U_o = tension pour laquelle ont été mesurés ε et $\mathrm{tg}\delta$. Le calcul se fait très aisément par approximations successives.

L'étude de la variation de la tangente de l'angle de perte en fonction de la tension permet également d'apprécier la qualité d'un isolant. L'ionisation provoquée à l'intérieur de poches d'air occluses se traduit par une augmentation des pertes diélectriques plus ou moins sensible. Des essais sur échantillons ont montré que la valeur du champ électrique pour laquelle apparaissent les effluves dépend de l'importance de la couche d'air. La courbe 1 de la figure 2 montre le cas d'une seule couche d'air épaisse. Le seuil d'ionisation est très net et la tangente δ atteint rapidement une valeur élevée pour marquer par la suite une satu-

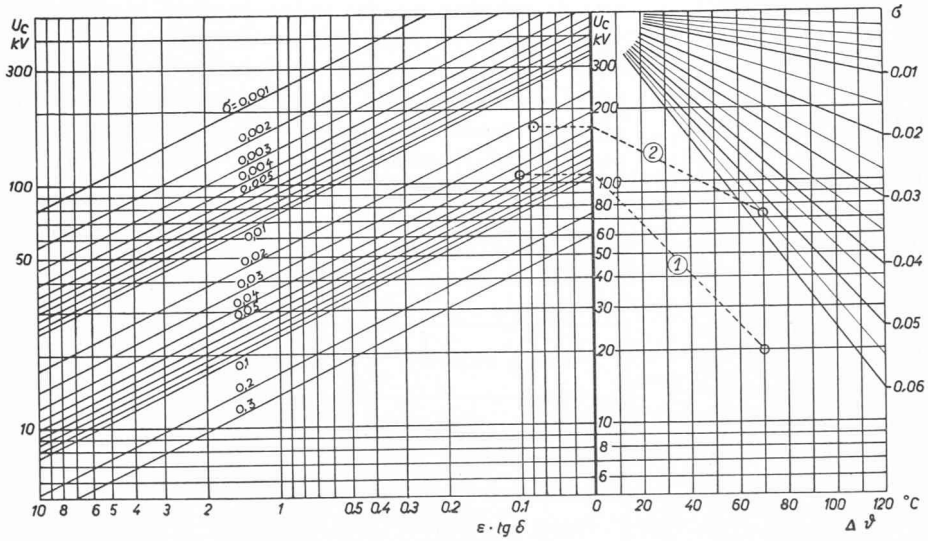


Fig. 1. — Nomogramme pour le calcul de la tension critique d'un cylindre refroidi à l'extérieur. Fréquence : 50 Hz. Coefficient de transmission de chaleur pour le micafolium : $\lambda = 1{,}8 . 10^{-3}$ W/°C.cm

Exemples : 1. Micafolium à la gomme laque
$\varepsilon . \mathrm{tg}\delta_{20^\circ C} = 0{,}1 \quad \sigma = 0{,}0485 \quad U_{c_{10^\circ}} = 20$ kV
2. Micafolium à l'asphalte
$\varepsilon . \mathrm{tg}\delta_{20^\circ C} = 0{,}087 \quad \sigma = 0{,}0234 \quad U_{c_{50^\circ}} = 73$ kV

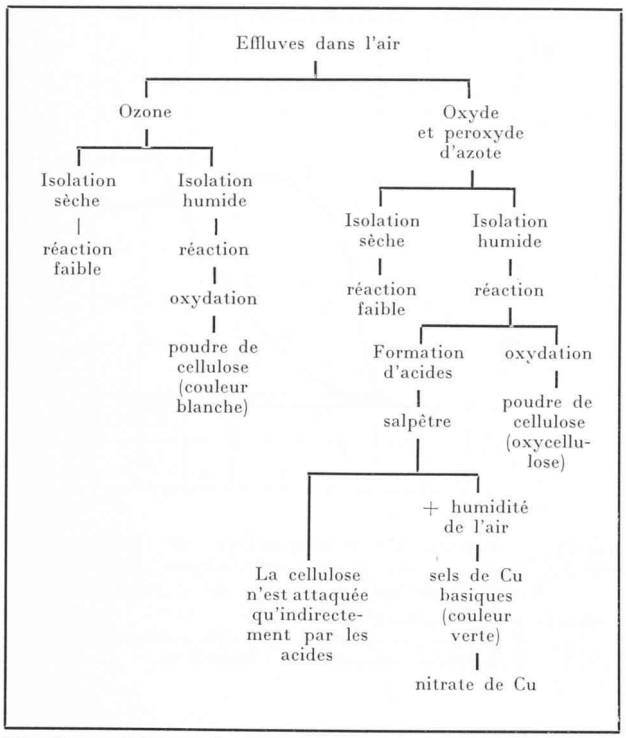


Fig. 3. — Schéma des réactions produites par les effluves sur un isolant à base de cellulose.

ration et même une diminution de sa valeur. La courbe 2 représente le cas de plusieurs couches d'air minces réparties dans l'isolant. On constate une augmentation régulière de tgδ, due à l'ionisation successive des différentes couches. Lorsque l'isolant est parfaitement homogène et ne donne lieu à aucune ionisation, la variation de tgδ est pratiquement nulle, comme le montre la courbe 3.

La détermination du seuil d'ionisation est donc très importante pour juger de la présence de couches d'air à l'intérieur de l'isolation. La nocivité de ces effluves ne doit cependant pas être surestimée et doit être déterminée dans chaque cas particulier, car elle dépend d'une part de l'emplacement et de l'importance des poches d'air et d'autre part de la résistance aux effluves des isolants utilisés, point qui est traité au chapitre suivant.

Mentionnons encore ici, qu'à côté de la mesure des pertes diélectriques, qui se fait généralement avec un pont de Schering, on a développé différentes méthodes pour la détection du seuil d'ionisation, méthodes basées sur l'émission d'oscillations à haute fréquence provoquées par les décharges dans les vacuoles. Tout en fournissant des résultats quantitativement différents, du fait de leur sensibilité plus ou moins grande ou de leur conception sur des principes divers, ces appareils mènent tous au même but, qui est de contrôler les isolations et de séparer qualitativement les bonnes des mauvaises.

3. *Résistance aux effluves*

La grande majorité des matériaux isolants, et plus particulièrement les produits organiques, sont attaqués et détruits progressivement par les effluves créés dans un champ électrique intense. Cette détérioration provient d'une part de l'effet mécanique dû au bombardement des ions gazeux et d'autre part des réactions

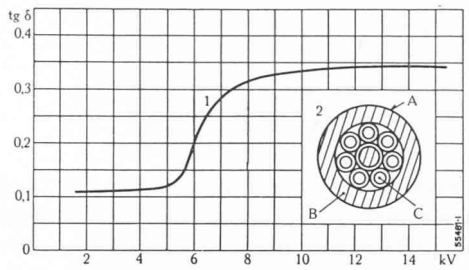


Fig. 4. — Dispositif d'essai pour l'étude de la résistance aux effluves de l'isolation des fils.

1. tgδ en fonction de la tension.
2. Eprouvette A = électrode métallisée à la terre.
   » B = tube de papier bakélisé, épaisseur 3 mm.
   » C = fil sous tension.

chimiques entre l'air — ou le gaz ambiant — et les différents matériaux — isolants et métaux — des machines. Le tableau de la figure 3 donne un schéma des réactions qui se produisent pour les isolants à base de cellulose. On notera l'influence plus particulièrement nocive de l'humimidité qui favorise la formation de salpêtre et de sels de cuivre, ou encore de rouille sur les parties ferreuses.

De nombreux essais ont été effectués pour étudier la résistance aux effluves de différents matériaux isolants. Les échantillons sont disposés soit à l'intérieur d'un tube de papier bakélisé, soit entre deux plaques de verre, dans un champ intense de l'ordre de 40 à 50 kV/cm comportant une couche d'air fortement ionisée (fig. 4). Le mica s'est montré très résistant aux effluves alors que le papier support du micafolium est plus ou moins attaqué suivant le vernis utilisé. Par contre, pour d'autres produits tels que le polythène, qui, à l'état neuf, présentent une rigidité diélectrique très élevée, on constate déjà au bout de quelques jours une série de trous d'épingles suivie d'une destruction généralisée de l'isolation. Dans d'autres cas encore, les détériorations dues aux réactions chimiques sont beaucoup plus fortes ; il en est ainsi pour le film de triacétate de cellulose qui fut utilisé pendant la guerre en remplacement du mica et qui donne lieu à un dégagement d'acide acétique. Indépendamment de la résistance aux effluves des matériaux proprement dits, il est aussi possible de diminuer très fortement l'effet destructif de l'ionisation par un vernissage ou une imprégnation appropriée. Le tableau de la figure 5 en

Matériaux et traitement	Durée au bout de laquelle on a constaté une détérioration due aux effluves sur les échantillons
Isolation au coton	6 jours
Papier et coton non imprégnés	11 jours
Papier et coton imprégnés	7 semaines
Papier spécial verni, conducteur traité	4 mois

Fig. 5. — Influence de l'imprégnation sur la résistance aux effluves d'une isolation au papier et coton.

montre un exemple pour une isolation au papier et au coton dont la tenue aux effluves a été plus que décuplée par un traitement adéquat.

L'introduction du refroidissement à l'hydrogène des turbo-alternateurs qui est aujourd'hui adopté pour les unités de grosse puissance posait un problème à ce sujet. Des essais ont montré que bien qu'apparaissant plus tôt, les effluves sont beaucoup moins violents dans l'hydrogène, car le bombardement par les ions d'hydrogène, plus légers que ceux d'oxygène ou d'azote, ne provoque que de très faibles détériorations, et, constatation très importante, on n'a aucune des réactions chimiques dues à l'ozone ou aux oxydes d'azote. On voit très nettement sur la figure 6 que les échantillons ayant séjourné dans l'hydrogène sont demeurés intacts, alors que ceux qui se trouvaient dans l'air sont fortement endommagés. La photographie en noir et blanc ne permet malheureusement pas de se rendre compte de la présence des sels de cuivre de couleurs bleue ou verte sur les éprouvettes *b* et *c* qui contrastent avec celles demeurées dans l'hydrogène qui ont gardé leur couleur originale. Le remplissage à l'hydrogène des turbo-alternateurs, qui a été adopté pour des raisons de ventilation, présente donc également un avantage pour les isolants.

4. *Résistance à l'humidité*

Il est de toute importance qu'une isolation résiste à la pénétration de l'humidité. Bien qu'une machine travaille généralement en service dans des conditions favorables et que la température normale de fonctionnement empêche toute condensation ou absorption d'humidité, il peut se produire certains cas très défavorables pour une isolation hygroscopique, tels le transport ou le montage en des lieux humides, ou encore des arrêts prolongés. Pour la plupart des isolants utilisés actuellement dans les machines, l'influence de l'humidité est très faible et seule une méthode de mesure très sensible permet de la déceler. Les pertes diélectriques des gaines des bobines sont peu influencées par un séjour à l'air humide, comme le montre le tableau de la figure 7, alors que la mesure de la résistance d'isolement en courant continu est très sensible à l'humidité et présente une forte variation avec le temps (fig. 8) [2]. Mais, à l'opposé du chiffre de pertes diélectriques $\varepsilon.\mathrm{tg}\delta$, qui est une valeur intrinsèque d'un isolant, la résistance d'isolement est une grandeur qui dépend essentiellement des dimensions de la machine, ce qui rend la qualification de l'isolation très difficile. En Amérique on utilise la relation suivante [3] :

$$R_i = k_t\, k_i \frac{(U + 3{,}6)\,(8 + \sqrt{n})}{\sqrt{N} - 16}$$

Etat de l'isolation	$\varepsilon.\mathrm{tg}\delta$
Etat initial à 20° C	0,18
Mesure à 100° C	1,07
Refroidi à 25° C	0,18
Après six mois d'exposition dans une atmosphère atteignant 97 % d'humidité relative	0,17
Mesure à 25° C	1,05
Idem, mesure à 100° C	1,05
Idem, refroidi à 25° C	0,16

Fig. 7. — Influence de l'humidité sur une gaine de micafolium. Variation du chiffre de perte $\varepsilon.\mathrm{tg}\delta$ pour diverses époques.

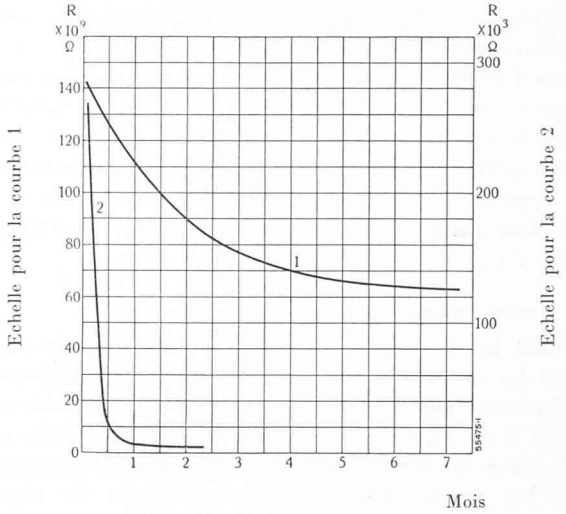
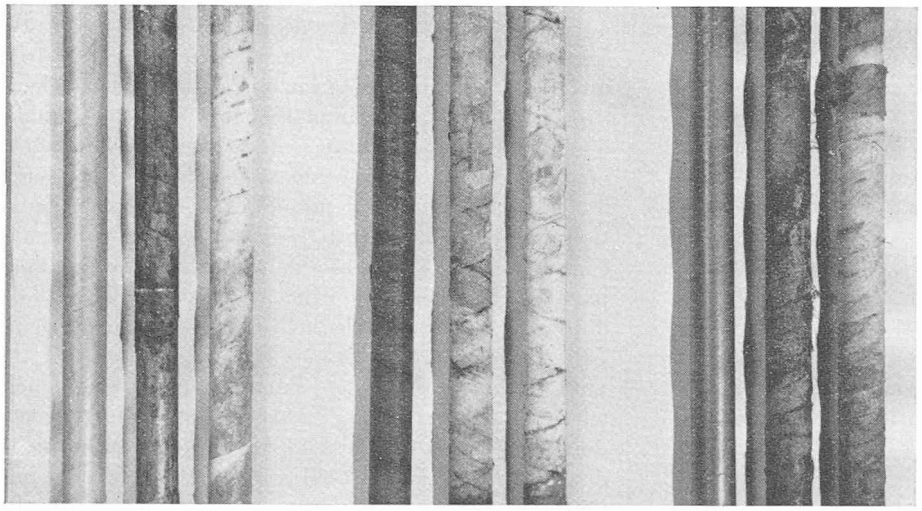


Fig. 8. — Influence de l'humidité sur l'isolation des machines. Variation de la résistance d'isolement R pendant l'exposition d'échantillons à une humidité relative atteignant 97 %.

1 = gaine en micafolium 2 = presspahn verni.



a *b* *c* *a* *b* *c* *a* *b* *c*
1 2 3

Fig. 6. — Echantillons d'isolation après quinze semaines d'effluvage dans un champ de 42 kV/cm.

1 = toile huilée. — 2 = coton imprégné. — 3 = ruban de verre huilé. — *a* = échantillons dans l'hydrogène. — *b* = échantillons dans l'air sec. — *c* = échantillons dans l'air humide.

R_i = résistance d'isolement en Megohm mesurée avec 500 V après 1 min.
k_t = coefficient de variation de la résistance en fonction de la température ($k_t = 1$ pour la température normale de 40° C).
k_i = coefficient tenant compte de l'isolant utilisé.
= 2,5 pour les isolants classe A.
= 7,0 pour les isolants classe B.
U = tension nominale de la machine en kV.
n = vitesse de rotation en tours/min.
N = puissance nominale de la machine en kVA.

Des travaux récents ont montré que la variation en fonction du temps du courant de charge sous une tension continue constante — par exemple 500 V — qui fait intervenir les phénomènes de conduction et d'absorption dans les diélectriques était essentiellement en relation avec l'humidité. L'*index de polarisation* donné par le rapport entre les résistances d'isolement mesurées après 1 et 10 minutes donne une bonne échelle pour la tenue en humidité d'une isolation, car il est indépendant des dimensions de la machine et semble peu varier avec la température. Des mesures faites sur des alternateurs de types très divers ont donné des valeurs allant de 0,8 pour une isolation humide à 5,0 pour une isolation sèche [4].

5. *Tenue mécanique*

Tant les parties droites des bobines, emprisonnées dans les encoches, que les développantes, solidement maintenues par de fortes plaques de serrage, sont soumises à de grandes contraintes mécaniques dues aux vibrations ou aux efforts électro-dynamiques provoqués par les courts-circuits ou les variations de charge brusques. A ces contraintes s'ajoutent les dilatations causées par les modifications de la température des enroulements lors des mises en marche, des arrêts ou des surcharges des machines. L'isolation doit donc être d'une part suffisamment rigide pour supporter les fortes pressions nécessaires au calage des bobines, tout en conservant une certaine flexibilité, et d'autre part elle doit s'adapter aux allongements dissemblables du cuivre et du fer, ainsi qu'aux grandes différences de température qui règnent en divers endroits d'une machine. En aucun cas, l'isolation ne doit se déformer ni se rompre, ce qui provoquerait immédiatement une perforation électrique et, par conséquent, des dommages entraînant une immobilisation plus ou moins prolongée.

Le contrôle de ces qualités se fait, soit sur des éprouvettes ou des échantillons de bobines qui permettent de déterminer la résistance à la traction ou à la flexion, soit sur des modèles où l'on reproduit le plus exactement possible les conditions de service, soit encore sur les machines elles-mêmes, à l'occasion de révisions ou de modifications éventuelles.

6. *Résistance à la température*

Les machines modernes fonctionnent à des températures qui peuvent atteindre 130° C pour certaines parties de l'enroulement. On exige donc de l'isolation qu'elle soit capable de supporter sans altération ces températures qui correspondent à celles de la classe d'isolation « B ». Le développement de nouveaux matériaux laisse même entrevoir une élévation de ces valeurs qui permettrait une utilisation encore plus poussée des machines.

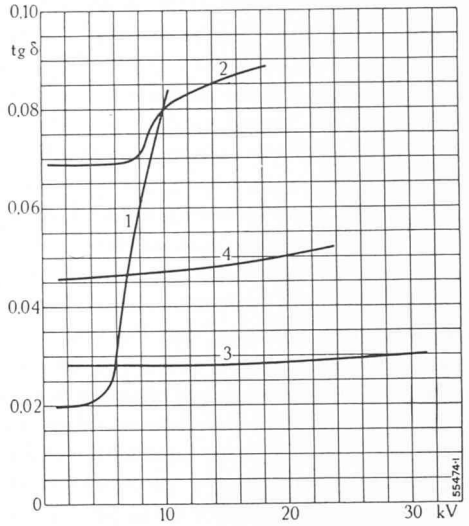


Fig. 9. — Tangente de l'angle de perte pour diverses isolations d'encoche en fonction de la tension.
1 = machine de 8,5 kV après 26 ans d'exploitation.
2 = machine de 15 kV après 24 ans d'exploitation.
3 = gaine neuve, micafolium avec 50 % de mica.
4 = gaine neuve, isolation sans mica.

7. *Vieillissement*

Sous l'influence des différents facteurs exposés ci-dessus, et principalement sous l'effet de la température, l'isolation d'une machine subit en service une transformation lente appelée vieillissement. Ce vieillissement porte préjudice à l'une ou l'autre, ou parfois à plusieurs des qualités des isolants et ce n'est que par le contrôle des différents critères de qualité qu'on pourra juger « l'âge électrique » d'une machine. Et même dans ce cas, certains défauts restent très difficiles à déceler, ce qui exige un examen très approfondi. On constatera, par exemple, que les pertes diélectriques d'une machine ont diminué ; mais cette amélioration est dans certains cas fictive, car elle s'est faite au détriment de la rigidité mécanique de l'isolation qui est devenue sèche et cassante, et doit être remplacée. Il se peut aussi qu'une machine, qui au vu d'une seule mesure paraît condamnée, ne nécessite aucune réparation. Nous avons relevé le cas de machines qui présentaient un seuil d'ionisation très prononcé (fig. 9, courbes 1 et 2) et qui n'en continuaient pas moins vaillamment leur service après plus de vingt-cinq ans. Un cas déjà cité [5] est celui d'un alternateur pour lequel on avait prévu un dispositif spécial pour supprimer tout effluve jusqu'à une tension de deux fois et demie la tension nominale. Quatre ans après la mise en service un claquage se produisit à cet endroit précis. Après avoir supprimé ce dispositif, et admis des effluves pour une tension inférieure (les règles VDE prévoient l'absence d'étincelles glissantes pour une tension de 1,25 U_n), l'alternateur a été remis en service et donne aujourd'hui encore, dix-neuf ans plus tard, entière satisfaction.

Ces quelques remarques montrent qu'il est nécessaire d'utiliser des matériaux de toute première qualité et d'adapter la construction des machines à leurs possibi-

lités d'emploi pour satisfaire aux différents critères exposés plus haut. C'est ce que nous allons voir par la suite.

B. L'évolution des matériaux isolants

Un des matériaux qui trouva très tôt une application pour l'isolation des enroulements des machines électriques fut le mica. Il est encore actuellement le produit qui présente les meilleures propriétés diélectriques (rigidité, pertes, résistance aux effluves) et thermiques. Malheureusement, sa présentation sous la forme de splittings de dimension limitée, provenant du clivage des blocs de mica, ne permet de l'employer qu'en corrélation avec un support tel que le papier, la soie ou un tissu de verre, le tout étant lié par un vernis approprié. Dans ce but on utilisa tout d'abord de la gomme laque. Le micafolium qui en résulta se laissait travailler très facilement. Il présente cependant l'inconvénient d'avoir des pertes diélectriques très élevées à haute température (voir fig. 10, courbe 1). De plus, il subit un vieillissement prononcé en service ; la gomme laque devient sèche et cassante, elle perd ses propriétés mécaniques, ce qui favorise la formation de poches d'air et provoque la destruction des matières organiques de l'isolation (papier, vernis) par les effluves. Dès 1930, le micafolium à la gomme laque fut remplacé par le micafolium à l'asphalte. Celui-ci représentait un progrès certain puisque, après avoir subi diverses améliorations, il est encore utilisé aujourd'hui de façon généralisée. Comparé à la gomme laque, le micafolium à l'asphalte est beaucoup plus souple, moins hygroscopique et ne subit qu'un vieillissement très faible. Ses pertes diélectriques sont basses et n'augmentent que peu avec la température (fig. 10, courbe 2). Lorsque la fabrication des gaines est très soignée, on obtient une isolation d'encoche parfaitement exempte de poches d'air. La figure 11 montre en exemple l'isolation d'un turbo-alternateur de 66 MVA, dans laquelle aucun seuil d'ionisation n'est visible.

Le micafolium à l'asphalte a été utilisé avec succès pour les machines les plus grosses dépassant 5 m de longueur de fer ou atteignant des tensions de service jusqu'à 36 kV. On lui a reproché parfois ses propriétés thermoplastiques qui peuvent, dans certains cas, être la cause de déplacements des couches d'isolants les unes

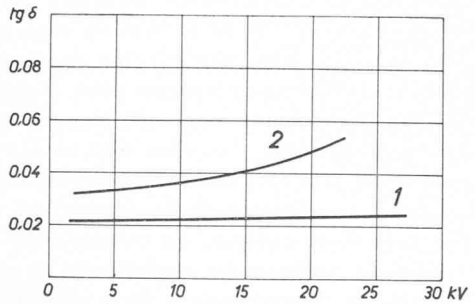


Fig. 11. — Tangente de l'angle de perte δ de l'isolation d'un turbo-alternateur de 66 MVA.

1 = gaine d'une bobine avant montage.
2 = isolation entière du stator. L'augmentation des pertes par rapport à la courbe 1 est due aux pertes supplémentaires dans les développantes.

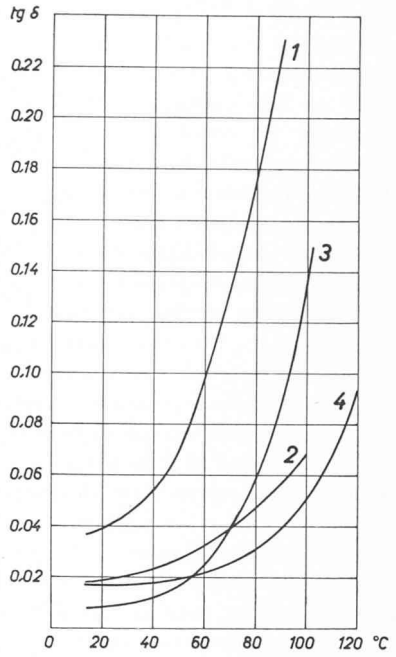


Fig. 10. — Comparaison entre différents isolants modernes tgδ en fonction de la température.

1 = micafolium à la gomme laque.
2 = » à l'asphalte.
3 = » à la résine aethoxyline.
4 = » au polyester.

par rapport aux autres (creeping, tape separation) ou de gonflement des gaines dans les canaux de ventilation. De tels déplacements se produisent lorsque l'isolation est faite par enrubannage continu, auquel cas les rubans glissent les uns sur les autres sous l'effet des efforts de dilatation des bobines dès que la température dépasse le point de fusion du vernis asphaltique. Ce phénomène non réversible devient cumulatif au cours des échauffements successifs de la machine et peut conduire à de graves défauts. Pour des gaines faites de feuilles de micafolium entières, l'isolation forme un tout beaucoup plus compact, sans solution de continuité, dans lequel le papier support du micafolium maintient les splittings de mica à leur place et empêche tout déplacement. Le danger de reptation des gaines devient donc négligeable. En utilisant des encoches parfaitement lisses, dans lesquelles les canaux de ventilation sont fermés par des entretoises de laiton, et en ne laissant que le jeu indispensable au montage des bobines, on peut éviter tout gonflement des gaines et, plus particulièrement, toute boursouflure qui risquerait de s'accrocher dans les aspérités de l'encoche et empêcherait la libre dilatation des bobines. Cette construction présente en outre l'avantage de permettre une meilleure transmission de la chaleur, puisque l'isolant est en contact direct avec le métal sur toute la longueur de l'encoche, sans interposition d'un intervalle gazeux, et que les bobines sont à l'abri des pollutions amenées par l'air de refroidissement.

Le développement considérable observé depuis la guerre dans le domaine des matières synthétiques, et plus particulièrement dans celui des hauts polymères, a, comme on peut le penser, beaucoup intéressé les spécialistes en isolation. De nombreux essais ont été

effectués pour étudier les possibilités d'adapter ces matériaux nouveaux à l'isolation des machines. On a, par exemple, cherché à remplacer le mica par des produits formant un film continu et régulier. Les essais avec le triacétate de cellulose n'ont pas donné les résultats espérés, par suite de la rigidité insuffisante de l'isolant et de sa destruction rapide par les effluves, accompagnée de dégagements d'acide acétique. Par contre, en agglomérant des paillettes de mica on a réussi à fabriquer un papier de mica qui se présente sous la forme d'une feuille homogène et très régulière et peut être employé, en liaison avec un vernis adéquat, pour l'isolation des gaines des bobines. Par ailleurs, les résines de polyesters et d'aethoxyline (araldite) présentent d'excellentes qualités, tant diélectriques que mécaniques ou thermiques. Les courbes 3 et 4 de la figure 10 montrent les pertes diélectriques relevées sur des bobines d'essai enrobées d'isolations au mica agglomérées, l'une avec une résine aethoxyline et l'autre avec des polyesters. Les valeurs de tgδ se rapprochent de celles du micafolium à l'asphalte et l'on peut en attendre encore une diminution par une amélioration des procédés de fabrication. Les gaines obtenues sont très dures et résistent bien à la température.

Mais il est évident qu'un nouveau produit nécessite une mise au point parfaite et qu'un isolant qui a fait ses preuves, comme le micafolium à l'asphalte, ne peut pas être supplanté du jour au lendemain par un autre isolant, si prometteur soit-il. Il s'agit d'étudier le comportement de ces matériaux vis-à-vis des différents critères de qualité que nous avons cités plus haut. Par exemple un isolant thermo-durcissant se déformera moins à haute température qu'un isolant thermoplastique, mais est-il suffisamment élastique et ne risque-t-il pas de devenir cassant et de ne plus pouvoir résister aux efforts électro-dynamiques ? Quel sera son comportement après vingt ans de service sous l'attaque combinée de la tension (effluves), de la température (vieillissement) et des contraintes mécaniques (déformations) ? A partir de quelle puissance ou de quelle tension l'isolation normale est-elle en défaut et doit-elle céder le pas aux produits nouveaux ? D'autre part, les frais considérables qu'entraîne une modification du procédé de fabrication sont-ils justifiés par une augmentation de la qualité et de la sécurité de l'isolation ? Ce sont autant de questions qui se posent pour le constructeur et qui prouvent que la technique de l'isolation doit être en constante évolution si elle veut se maintenir au niveau des améliorations continuelles apportées aux machines, améliorations déterminées par l'accroissement toujours plus grand de la puissance et de la tension.

BIBLIOGRAPHIE

1. K. Berger : *La rigidité diélectrique à chaud des isolants solides.* (Revue Brown Boveri 1926, nº 5, p. 115.)
— *Der Durchschlag fester Isolierstoffe als Folge ihrer Erwärmung.* (Bull. A.S.E. 1926, nº 2, p. 37.)
2. F. Beldi : *Le problème de l'isolement dans la construction des machines et des transformateurs modernes.* (Revue Brown Boveri 1943, nº 9/10, p. 224.)
3. *Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery.* (A.I.E.E. nº 43, April 1950.)
4. R. Langlois-Berthelot : *La fatigue diélectrique des isolants et la maintenance des appareils électriques.* (C.I.G.R.E. 1954, Rapport nº 105.)
5. F. Beldi : *Die Wicklungsisolation im Grossmaschinenbau.* (Bull. A.S.E. 1948, nº 10, p. 329.)

LE CONVERTISSEUR A CONTACTS ET SES APPLICATIONS DANS L'INDUSTRIE

par M. ROSSÉ, ingénieur E.P.F., Baden

Si nous considérons le développement des applications de l'énergie électrique dans les différentes industries, nous sommes frappés de l'évolution prise ces dernières années par les services d'électrochimie. Cette branche de l'industrie, dont les débuts remontent vers les années 1885, doit son essor non seulement aux rapides progrès réalisés dans le domaine électrochimique, mais également aux perfectionnements apportés aux générateurs d'énergie électrique sous forme courant continu.

Dans ce domaine, on a vu se succéder la dynamo entraînée par turbine, le groupe moteur-générateur, la commutatrice et enfin le mutateur qui devait, par ses propriétés remarquables, donner une solution au problème de la transformation à haut rendement du courant alternatif en courant continu. Le succès du mutateur fut d'autant plus grand que les électrochimistes se sont appliqués à modifier les caractéristiques de leurs installations, en élevant la tension de service, pour profiter des avantages de ce nouveau convertisseur.

Cependant, il existe certaines électrolyses et plus particulièrement les électrolyses aqueuses pour lesquelles on ne saurait élever la tension sans qu'il en résulte une augmentation inadmissible des frais d'implantation et aussi certains dangers pour le personnel. Ainsi les électrochimistes imposent depuis quelques années de basses tensions continues tout en demandant des intensités de plus en plus élevées correspondant au développement très intense de la fabrication de produits par voie électrolytique. Le constructeur a donc cherché, sous la poussée des exploitants, à présenter sur le marché un convertisseur à forte intensité, basse tension et très haut rendement.

Le problème à résoudre revêtait sans doute un caractère technique dont on ne saurait ignorer les sérieuses difficultés, mais également économique. En effet, la solution à donner au problème posé devait