

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins  
**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke  
**Band:** 24 (1933)  
**Heft:** 5  
  
**Artikel:** III. Referat  
**Autor:** Grillet, M.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1059510>

### **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:** 10.01.2026

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

gen, und es sind die an sich schon sehr geringen Defekte dadurch sicherlich noch weiter heruntergedrückt worden. Es ist schon nicht möglich, einen absolut sicheren Leistungswandler zu bauen, wenn man aber auch bei einem Spannungswandler 100 % Sicherheit verlangen würde, so würde man dabei auf unwirtschaftliche Abmessungen kommen.

Die von mir eingeführte 8-Stundenprobe ist ein ganz brutales Mittel, um die Sicherheit einer Konstruktion zu prüfen; ich möchte aber daraus keine Abnahmeprüfung gemacht sehen, weil doch damit zu rechnen ist, dass der Wandler durch das lange

Einwirken der Spannung leidet. Eine elegantere Lösung, aber für den rohen Praktiker viel weniger überzeugend, ist die Aufnahme des *Verlustwinkels* als Funktion der Spannung oder als Funktion der Zeit. Sie gibt genau das gleiche, ohne den Wandler zu beschädigen. Ueber diese Prüfung, als Stückprüfung ausgeführt, lässt sich reden, insbesondere dann, wenn es erst einen Apparat gibt, mit dem man den Verlustwinkel als Funktion der Spannung direkt photographisch aufzeichnen kann. Fig. 5 zeigt das Ergebnis der Verlustwinkelmessungen an verschiedenen Spannungswandlern.

### III. Referat <sup>6)</sup>

schriftlich eingesandt von M. Grillet, Ingenieur des

#### Ateliers de Constructions Electriques de Delle, Lyon (ACED).

*L'auteur étudie qualitativement et quantitativement les sollicitations subies par un transformateur d'intensité lors d'un court-circuit, à savoir: les sollicitations thermique, mécanique et diélectrique, puis en déduit des conséquences au point de vue constructif.*

*Es werden die Beanspruchungen qualitativ und quantitativ untersucht, denen ein Stromwandler bei Kurzschluss ausgesetzt ist, nämlich die thermische, die mechanische und die dielektrische Beanspruchung, und die sich daraus ergebenden konstruktiven Konsequenzen erörtert.*

#### La destruction des transformateurs de courant.

Les transformateurs d'intensité ont constitué longtemps des points faibles dans les réseaux. On s'est attaché surtout à en obtenir toute la précision désirable, mais assez peu à en faire des appareils robustes. Depuis longtemps on a réglementé les valeurs des erreurs qu'ils pouvaient introduire dans la mesure d'une puissance ou d'une intensité. C'est récemment au contraire qu'on a imposé les valeurs des surintensités qu'ils devaient pouvoir supporter.

Alors que, dans un alternateur, le courant de court-circuit instantané varie suivant les types de machines entre 5 et 10 fois le courant normal, que dans un transformateur de puissance on a 10 à 30 fois  $I_n$ , dans un transformateur d'intensité la surcharge peut atteindre plusieurs centaines de fois le courant normal.

Il n'y aura pas seulement danger pour les appareils placés sur les lignes principales, car ils sont dimensionnés pour un courant normal important qu'un court-circuit ne peut beaucoup accroître, mais plus encore pour ceux, de faible calibre, branchés sur des lignes de dérivation à faible puissance et où, cependant, le courant de court-circuit peut être sensiblement le même que sur les lignes principales (il suffit pour cela que la dérivation soit courte).

De même, contrairement à ce qu'on pourrait croire, les destructions de transformateurs ne sont pas à craindre seulement sur les grands réseaux où des courants de court-circuit considérables peuvent prendre naissance. Le danger est souvent aussi grand sur des réseaux de faible importance où abondent des transformateurs de très faible calibre.

Les courants de court-circuit soumettaient les appareils à des contraintes que l'on peut classer en trois catégories:

- 1° les contraintes thermiques par suite de l'échauffement des isolants;
- 2° les contraintes mécaniques résultant des efforts sur les enroulements;
- 3° les contraintes électriques par suite de l'augmentation de tension par spire aux bornes des enroulements.

#### 1° Contraintes thermiques.

La contrainte thermique est la plus dangereuse. Ce sont les isolants qui y sont soumis et elle doit être limitée à une valeur telle qu'elle n'en provoque pas la destruction, car les plus graves accidents peuvent en résulter.

En effet, quand par suite de l'échauffement des conducteurs leur guipage isolant se carbonise, les enroulements sont en court-circuit; dans le cas d'alimentation d'une bobine de déclenchement ou d'un relais, toute protection est de ce fait supprimée. Si la température atteinte est encore plus élevée, il y aura diminution de la résistance mécanique du cuivre et rupture plus facile des spires par les efforts électrodynamiques, comme nous le verrons ensuite. Enfin dans le cas où le transformateur est immergé dans l'huile ou dans un mélange isolant, on peut craindre l'inflammation de l'huile et l'incendie.

Le seul moyen de réduire la contrainte thermique est d'augmenter la section de cuivre, autrement dit de diminuer la densité de courant. On est ainsi conduit pour le choix de celle-ci à des valeurs beaucoup plus faibles que celles que nous pourrions admettre si l'échauffement en service normal était seul à envisager.

<sup>6)</sup> Vorgelesen von cand. ing. E. Liechty, hier gekürzt wiedergegeben.

On peut adopter comme température maximum admissible du cuivre 250° si les enroulements sont imprégnés. Cette valeur peut sembler anormale puisque la température de carbonisation du coton et celle du papier sont voisines de 220°.

Cette anomalie s'explique cependant, car l'échauffement de l'isolant se fait avec un certain retard puisque la chaleur met du temps pour passer du cuivre à l'isolant. Dès la fin du court-circuit la température du cuivre baisse, tandis que celle de l'isolant monte; elles tendent à s'égaliser mais à une valeur bien inférieure à 250° qui est celle atteinte par le cuivre.

Nous avons dit tout à l'heure que le seul moyen de limiter la contrainte thermique était d'augmenter la section de cuivre. Il y en a un second, très intéressant puisqu'il est applicable aussi aux contraintes électro-dynamiques et électriques, qui consiste à court-circuiter partiellement le primaire du transformateur au moyen d'un contacteur extra rapide, qui ne laisse passer le courant que dans une ou quelques spires.

Comme il s'agit de conserver les ampères-tours nécessaires pour assurer le fonctionnement des relais, une seule spire dans bien des cas est suffisante. Il est alors possible de la dimensionner très largement, tout en faisant une économie notable de cuivre puisque ce renforcement ne porte que sur une ou quelques spires; on a réalisé des contacteurs qui fonctionnent en 1,5 ms environ et évitent aussi l'effort correspondant à l'amplitude du courant instantané de court-circuit.

Il semble qu'on diminuerait aussi la contrainte thermique en immergeant les bobinages dans l'huile ou une masse isolante.

Cependant, par l'immersion dans l'huile on diminue le temps pendant lequel l'isolant reste chaud. Ce temps, en effet, ne dépend pas de la durée du court-circuit, durée qui n'excède pas quelques secondes, mais plutôt de la vitesse de refroidissement du transformateur après le court-circuit. Or cette vitesse est plus grande avec un enroulement immergé dans l'huile qu'avec un enroulement dans l'air.

Par contre, l'immersion dans l'huile ou le compound diminue notablement la sécurité, car les corps sont très combustibles et, ce qui est plus grave, leurs produits de décomposition par la chaleur sont des gaz qui peuvent former avec l'air des mélanges explosifs.

Nous n'avons pas parlé jusqu'ici de l'échauffement du circuit magnétique. C'est que celui-ci est complètement négligeable bien que le fer soit fortement saturé. Un exemple va le montrer suffisamment: Dans un transformateur à enroulements concentriques 10/5 où  $B = 1100$  Gauss pour le courant normal, on atteint pour 80  $I_n$  22 500 Gauss. Les pertes sont alors de 532 W et l'augmentation de température des tôles au bout d'une seconde n'aura pas atteint un degré!

## 2° Contraintes mécaniques.

Examinons maintenant les contraintes mécaniques. Celles-ci intéressent les conducteurs eux-mêmes et sont produites par les efforts électrodynamiques qui s'exercent entre ces conducteurs. On sait, en effet, que deux courants parallèles et de même sens s'attirent, deux courants parallèles et de sens inverse se repoussent, qu'une spire circulaire parcourue par un courant tend à augmenter de diamètre et qu'entre un circuit induit et un circuit inducteur le coefficient d'induction mutuelle tend vers zéro, c'est-à-dire que ces deux circuits se repoussent ou se placent perpendiculairement l'un à l'autre.

Il y aura donc efforts entre les conducteurs d'entrée et de sortie qui, parcourus par des courants de sens inverse, vont se repousser;

efforts entre les spires d'un même enroulement qui, constituées par des éléments de courant parallèles, vont s'attirer;

efforts entre les spires primaires et secondaires qui, constituées par des éléments de courant de sens contraire, vont se repousser.

Les efforts sur les conducteurs d'entrée et de sortie, qui sont, comme nous venons de le dire, une répulsion entre ces conducteurs, sont surtout importants dans les transformateurs dans l'huile, car les conducteurs d'entrée et de sortie sont logés à l'intérieur d'un isolateur de traversée. Ils sont donc nécessairement rapprochés l'un de l'autre et d'autant plus longs que la tension nominale est plus grande, puisque c'est cette tension qui fixe la longueur de la traversée.

On arrive très vite à des chiffres assez impressionnants. Par exemple, dans un transformateur dans l'huile du rapport 400/5 où la longueur des conducteurs, fixée par les dimensions de l'isolateur d'entrée, était de 55 cm, l'effort atteignait 6,5 tonnes pour 240 fois le courant normal.

Aussi considérables qu'ils nous paraissent, ces efforts peuvent être encore augmentés si les conducteurs peuvent vibrer et si leur fréquence propre correspond avec celle des efforts. Le cas peut pratiquement se rencontrer. Dans l'exemple précédent, où les entrées étaient constituées par des barres de  $30 \times 8$  mm, on trouve que, si la distance entre appuis avait été de 46 cm (ce qui était possible puisque l'isolateur de traversée mesurait 50 cm), la fréquence propre de vibration aurait été 100 s, ce qui est exactement celle de l'effort avec du courant de 50 pér./s. Il y aurait donc eu résonnance mécanique.

Pour se protéger contre ces efforts on emploie le plus souvent un fretage constitué par un enroulement de ficelle, de fil d'acier ou même un tube acier. Le transformateur 400/5 cité plus haut avait ses conducteurs d'entrée placés à l'intérieur d'un tube d'acier de 2 mm d'épaisseur. Dans le cas des transformateurs à isolement par l'air, on peut employer une solution plus radicale, qui consiste à séparer complètement les conducteurs d'entrée et

de sortie et à les disposer dans le prolongement l'un de l'autre. Tout effort est ainsi supprimé.

Nous arrivons maintenant aux efforts entre spires. Comme nous l'avons dit, ces efforts se manifestent

- 1° entre spires de même enroulement,
- 2° entre spires primaires et secondaires.

Pour les distinguer plus facilement, supposons d'abord le primaire et le secondaire éloignés l'un de l'autre.

Dans chaque enroulement, nous avons affaire à des courants circulaires de même sens, il y aura alors attraction entre les spires — qui se serreront les unes contre les autres — de plus chaque spire tendra à augmenter de diamètre. Il y aura donc 2 efforts :

un effort de tassement qui tend à rendre minimum le contour d'une section de la bobine;

un effort radial d'extension qui tend à faire éclater l'enroulement.

Ce sont presque les seuls efforts qu'on rencontre dans les transformateurs à enroulements séparés, disposés par exemple sur des branches différentes du circuit magnétique. Si nous introduisons le secondaire dans le primaire, nous avons en présence des courants circulaires de sens contraire et des répulsions apparaissent entre le primaire et le secondaire. Tant que les enroulements sont bien centrés et de même longueur, il n'existe qu'une composante radiale qui tend à ouvrir le primaire et à écraser le secondaire.

Mais s'il existe une différence de longueur des enroulements ou un décentrage, la composante longitudinale des efforts de répulsion apparaît, et cette composante croît lorsque l'asymétrie qui lui a donné naissance augmente.

Les enroulements, lorsqu'ils sont bien semblables et bien symétriques, se trouvent dans un état d'équilibre instable, puisque dès qu'une asymétrie apparaît, l'effort qui se produit tend à augmenter l'asymétrie. On aura ainsi, correspondant aux différents cas d'asymétries possibles :

un effort de décentrement longitudinal qui tend à chasser le secondaire hors du primaire dès qu'ils ont un léger décalage, ou, dès qu'ils ont une différence de longueur, à étirer le plus long et à comprimer le plus court;

un effort de décentrement transversal si les axes des enroulements primaire et secondaire, bien que parallèles, ne coïncident pas;

un effort de décentrement angulaire si les axes ne sont pas parallèles.

Avant d'indiquer les moyens de réduire ces efforts, nous allons indiquer quelques chiffres pour préciser les grandeurs des efforts radiaux et longitudinaux les plus importants.

Supposons un transformateur du rapport 10/5 ayant les caractéristiques suivantes: primaire en fil de 2,2 mm  $\varnothing$ , soit 3,7 mm<sup>2</sup>,  $w_1 = 120$  spires. On trouve qu'un effort radial agissant sur le primaire pour  $240 \cdot I_n$  correspond à une pression intérieure de 30 kg/cm<sup>2</sup>. Le cuivre de l'enroule-

ment est soumis à ce moment à une contrainte de 2,8 kg/mm<sup>2</sup>. Pour atteindre la limite d'élasticité il faudrait aller à  $580 \cdot I_n$  et la rupture à  $630 \cdot I_n$ .

Si le primaire et le secondaire ne sont pas concentriques, le même transformateur supporterait  $955 \cdot I_n$  au lieu de 580, avant que la limite d'élasticité ne soit atteinte. La contrainte sur le cuivre ne serait plus que 1 kg/mm<sup>2</sup>, car elle varie comme le carré de l'intensité.

Cet effort radial ne peut pas être supprimé — il est difficile de le réduire — on ne peut qu'y résister. C'est le primaire surtout qui est menacé; dans le secondaire  $I$  croît beaucoup moins vite dès que la saturation est atteinte, et l'enroulement qui travaille à la compression est appuyé contre le circuit magnétique. Le primaire travaille comme une frette et il faut augmenter sa section de cuivre. Comme on peut assez exactement calculer les efforts, on peut dimensionner les conducteurs pour que la contrainte dans le cuivre ne dépasse pas la limite d'élasticité du métal, en tenant compte de la variation de cette limite d'élasticité avec la température. On adopte généralement 14 kg/mm<sup>2</sup> correspondant à 250°. Nous voyons donc là encore réapparaître l'influence importante de la section de cuivre comme facteur de sécurité dans les transformateurs d'intensité.

L'effort longitudinal peut être théoriquement annulé si les centres des enroulements coïncident. Quand on décale ces centres, il passe par un maximum qu'on atteint pour un décalage égal à la  $\frac{1}{2}$  longueur et il décroît ensuite si l'écart entre primaire et secondaire augmente encore. Pour le transformateur cité tout à l'heure, l'effort longitudinal serait de 317 kg pour un décentrage de 5 mm seulement.

Il y a deux remèdes aux efforts longitudinaux. Le premier consiste à écarter le plus possible le primaire et le secondaire de façon à supprimer tout couplage entre eux. C'est la solution adoptée dans les transformateurs à enroulements séparés, mais elle n'est pas toujours applicable, car la loi de croissance du courant secondaire en fonction du courant primaire est fortement modifiée, ce qui ne peut convenir dans certaines applications. Le second remède, qui paraît simple, consiste à centrer rigoureusement primaire et secondaire auxquels on donnera exactement la même longueur.

Malheureusement, il est presque impossible de centrer exactement deux bobinages par de simples procédés mécaniques, comme des mesures de longueur par exemple, car le centre électrique d'une bobine n'est pas toujours au milieu de sa longueur. Pour déterminer ce centre électrique, il faut avoir recours à des procédés spéciaux. On peut par exemple utiliser une petite bobine exploratrice mobile, parcourue par le courant d'un accumulateur, et que l'on déplace dans le champ de l'enroulement à étudier, parcouru lui-même par un courant continu. La bobine exploratrice se place perpendiculairement aux lignes de forces et, dans la zone de champ maximum, son plan passe donc par le centre

de symétrie de l'enroulement: il suffit alors de deux mesures pour déterminer ce centre; l'opération étant faite séparément sur le primaire et sur le secondaire, il est facile d'amener ces centres dans un même plan. La précision est suffisante pour qu'on arrive à centrer des bobinages à 1 mm près, ce qu'on ne ferait qu'à 4 ou 5 mm avec des mesures directes.

Dans aucun cas, cependant, on ne peut être assuré que le centrage est rigoureux. Il faut donc prévoir des dispositifs de calage robustes. Ces dispositifs sont munis d'un réglage, de façon à ne laisser aucun jeu longitudinal aux enroulements, ce qui produirait un choc au moment du c/c.

### 3° Contraintes électriques.

La troisième cause de destruction des transformateurs est l'augmentation de tension qui se produit aux bornes des enroulements en cas de court-circuit. Cette augmentation de tension peut causer un amorçage entre couches, plus rarement entre spires. Ces amorçages, qui réalisent la mise en court-circuit d'une fraction de l'enroulement, ne sont guère à craindre au secondaire. Comme l'intensité secondaire ne croît pas aussi vite que l'intensité primaire, les tensions mises en jeu arrivent rarement à être très importantes; d'autre part, la mise en court-circuit de l'enroulement secondaire ne peut être dangereuse que si elle réduit suffisamment le courant dans le circuit extérieur, pour que les relais qui s'y trouvent ne puissent plus fonctionner; or il faut pour cela que le défaut se produise entre entrées et sorties du secondaire. Au primaire, le même défaut produirait le même résultat par suite de la réduction des ampère-tours; mais c'est l'amorçage entre couches qui est beaucoup plus dangereux dans ce cas. Il en résulte une asymétrie dans l'enroulement qui peut être con-

sidérable, d'où un effort longitudinal qui amène infailliblement la destruction du transformateur. Ces accidents sont à craindre surtout pour les transformateurs de petit calibre, c'est-à-dire à grand nombre de spires primaires. La tension totale aux bornes de l'enroulement est en effet sensiblement égale pour de fortes surcharges au produit de la réactance de fuites par l'intensité traversante.

Comme ordre de grandeur des tensions mises en jeu, nous citerons les chiffres suivants: dans un transformateur 10/5 pour un réseau à 15 000 V, la tension primaire pour 240 fois le courant normal atteint 1800 V, soit 165 V/couche ou 4 V/spire. — Dans un transformateur 10/5 pour un réseau à 75 000 V, la tension primaire pour 240 fois le courant normal peut atteindre 8450 V soit 1000 V/couche et 26,5 V/spire. On conçoit que dans un tel transformateur la capacité de surcharge soit limitée par la contrainte électrique.

Pour s'en défendre, on cherche d'une part à diminuer la valeur de la surtension en shuntant le primaire par une résistance, d'autre part à renforcer l'isolement entre conducteurs d'entrée et entre couches.

On effectue le bobinage en commençant par le milieu de l'enroulement; on a ainsi deux galettes qu'on isole par un disque de presspan ou de bakélite. La tension par couches est divisée par deux et on évite toute possibilité d'amorçage entre le conducteur d'entrée et le reste du bobinage.

Nous venons de passer en revue les différentes contraintes auxquelles sont soumis les transformateurs d'intensité. Grâce aux expériences nombreuses qu'ont permises les Stations d'essais à grande puissance, les constructeurs ont pu étudier les effets de chacune de ces contraintes; on a même pu les chiffrer avec assez d'exactitude.

## IV. Referat

von Dr. J. Goldstein, Oberingenieur der

Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft, Berlin (AEG).

*Einleitend widmet der Referent der Frage der Trockenisolierung der Spannungs- und Stromwandler einige grundsätzliche Betrachtungen und beschreibt kurz zwei typische Konstruktionen von AEG-Oelwandlern. Dann erklärt er eingehend das von der AEG eingeführte Prinzip der Gegenmagnetisierung und weist auf dessen erfolgreiche Anwendungsmöglichkeiten hin, insbesondere beim Bau der Schleifenwandler, der Einleiterwandler und der als ideale Lösung des Stromwandlerproblems angesprochenen sogenannten Kombinationswandler.*

*L'auteur considère brièvement en principe le problème de l'isolement à sec des transformateurs de mesure et décrit deux constructions typiques de l'AEG avec huile. Il expose ensuite en détail le principe de la contre-magnétisation introduit par l'AEG et signale les cas où ce principe est susceptible d'être appliqué avec succès, en particulier dans la construction des transformateurs à boucle, à un conducteur, et des transformateurs combinés, solution idéale du problème des transformateurs de mesure.*

Den Ausführungen über gegenmagnetisierte Stromwandler möchte ich einige allgemeine Auseinandersetzungen, die den Standpunkt der AEG in den wichtigsten Messwandlerfragen präzisieren, vorausschicken.

Die Einführung des Trockenspannungswandlers, so aussichtsreich sie für Spannungen bis 30 kV er-

scheint, ist für höhere Spannungen insofern mit Schwierigkeiten verbunden, als es nicht gelungen ist, eine dem Oelspannungswandler gleichwertige betriebssichere Trockentype in einer Einheit zu schaffen, die auch wirtschaftlich in Wettbewerb mit dem Oelwandler treten könnte. Die AEG hat der Einstellung der Praxis durch Schaffung von Trok-