

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins  
**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke  
**Band:** 48 (1957)  
**Heft:** 20

**Artikel:** Utilisation des modèles réduits dans l'analyse de l'isolement interne des transformateurs  
**Autor:** Froidevaux, J.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1060624>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **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. [Voir Informations légales.](#)

### **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. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 03.04.2025

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

# BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

GEMEINSAMES PUBLIKATIONSORGAN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS (SEV) UND  
DES VERBANDES SCHWEIZERISCHER ELEKTRIZITÄTSWERKE (VSE)

## Utilisation des modèles réduits dans l'analyse de l'isolement interne des transformateurs

Conférence donnée à l'Assemblée de discussion organisée par l'ASE le 7 mars 1957 à Berne,  
par J. Froidevaux, Genève

621.314.21 : 621.3.012.8

*Il est tout d'abord rappelé, dans cet article, la relative difficulté rencontrée lorsqu'on désire calculer, de façon détaillée, la réponse d'un enroulement de transformateur à une surtension de forme quelconque comportant un front raide. Les modèles de transformateurs constituent un outil bien adapté à ce genre de détermination. Leurs principes constructifs sont brièvement exposés et il est fait état de quelques résultats expérimentaux, obtenus à l'aide de ces appareils. En guise de conclusion, il est donné un aperçu de leur précision et de la généralisation possible de la technique dont ils procèdent.*

*Der Autor erinnert vorerst an die Schwierigkeiten, die eine möglichst genaue Vorausberechnung der Einwirkung einer Überspannung von beliebiger Form mit hoher Frontsteilheit auf eine Transformatorwicklung bietet. Eine wertvolle Hilfe bei der Berechnung leisten Transformator-Modelle, auf deren konstruktive Grundlagen kurz eingetreten wird. Einige Ergebnisse von Modellversuchen werden dargestellt, und es wird ausgeführt, welche Genauigkeit sich erreichen und wie weit sich ihre Technik verallgemeinern lässt.*

### Introduction

Il n'est pas nécessaire d'insister ici sur l'importance de la détermination correcte de l'isolement interne des transformateurs, ceci tant du point de vue économique que de celui de leur sécurité de service.

S'il est facile de prédéterminer les contraintes à fréquence industrielle qui sollicitent cet isolement, il est en revanche plus malaisé d'effectuer le même travail en ce qui concerne les contraintes transitoires. En Europe, les transformateurs ne subissent qu'un essai de choc en onde pleine, en plus des essais diélectriques normaux. Les constructeurs doivent toutefois tenir compte, dans leurs calculs, des surtensions de toutes formes auxquelles peuvent être normalement soumis ces appareils: chocs de raideur et de durée diverses, chocs coupés, surtensions de coupure, etc...

La base du calcul de la répartition des contraintes transitoires dans un enroulement est la détermination de la réponse de ce dernier à un échelon unité de tension, appliqué à l'une de ses bornes. Cette détermination est classique et a fait l'objet de nombreuses publications. Nous citerons pour mémoire les travaux de *Blume* et *Boyajian* d'une part, et ceux de *Rüdenberg* de l'autre, ces auteurs ayant traité le problème à deux points de vue différents.

Bien que satisfaisants du point de vue théorique, ces travaux sont d'une application aux calculs pratiques souvent incertaine et en tous cas très

laborieuse, dès qu'on cesse de considérer un enroulement en hélice, à isolement homogène. L'incertitude mentionnée provient principalement du fait qu'il est difficile de calculer exactement les coefficients physiques caractérisant l'enroulement, spécialement en ce qui concerne les coefficients d'inductivité et d'inductivité mutuelle. Il faut, en outre, signaler que les travaux théoriques dont nous parlons font l'usage d'hypothèses simplificatrices indispensables à l'obtention d'équations maniabiles, ce qui a parfois comme effet de fausser les résultats.

Sans entrer dans plus de détails, on conçoit que la prédétermination correcte de l'isolement interne des transformateurs requiert souvent des moyens de calcul plus puissants que ne le sont la règle à calcul et les tables numériques. Les machines à calculer, digitales ou analogiques, permettent d'accélérer les calculs. Elles permettent, en outre, d'éviter l'emploi d'un certain nombre d'hypothèses simplificatrices puisqu'elles s'accommodent fort bien d'équations différentielles compliquées. Leur utilisation correcte est cependant subordonnée à un choix exact des coefficients physiques, caractérisant l'enroulement considéré. Et c'est là, pensons-nous, le principal avantage qu'offre le modèle de transformateur, de fixer exactement les données du problème en même temps qu'il fournit le moyen de le résoudre. Cet appareil est en quelque sorte une machine analogique à utilisation restreinte, pour laquelle l'affichage des coefficients est automatiquement réalisé lors de sa construction. Examinons-en quelques caractéristiques.

### Modèles géométriques et modèles électromagnétiques

Un modèle géométrique est obtenu par une réduction à l'échelle de la partie active d'un transformateur. Cette réduction est une similitude de l'original, au sens géométrique du terme. En général, les matériaux constituant le modèle sont les mêmes que ceux qu'on utilise pour la construction des transformateurs.

On peut définir un certain nombre d'échelles, chacune d'elles étant le rapport existant entre une grandeur attachée au modèle et la grandeur correspondante du transformateur. Par exemple, l'échelle des longueurs est précisément le rapport de similitude du transformateur et de son modèle. On définira de même une échelle de temps (inverse du rapport des fréquences propres), de capacité, de self-induction, etc. On peut montrer qu'une telle réduction constitue effectivement un modèle, c'est-à-dire que la réponse en tension et courant de ce dernier est semblable à celle de l'original. Ceci, il est vrai, à l'amortissement près, celui-ci étant plus grand pour le modèle que pour le transformateur. L'amortissement n'introduit toutefois qu'une faible erreur, aisément estimable.

On réalise ainsi sur le modèle une distribution de coefficients d'inductivité et d'inductivité mutuelle identique, à un facteur près (l'échelle d'inductivité), à celle qui existe pour l'original. La distribution des capacités du modèle est également, et de la même façon, l'image de celle du transformateur. Pour que la similitude soit bonne, on est souvent amené à adopter le même nombre de spires pour le modèle et son original. Il s'en suit, on le vérifie aisément, que les échelles de capacité et d'inductivité sont égales à celle des longueurs.

Il découle de ceci que l'échelle des fréquences propres est l'inverse de celle des longueurs. Pour un modèle au cinquième, par exemple, les phénomènes se déroulent cinq fois plus vite que pour l'original. Ceci est un inconvénient relativement aux mesures qui exigent des appareils à bandes passantes d'autant plus grandes que le modèle est petit. D'autre part, les capacités propres du modèle étant très faibles, il faudra prendre de grandes précautions, afin que les appareils de mesure (oscilloscope) n'introduisent pas des capacités parasites du même ordre de grandeur que celui des capacités propres. Sans quoi les mesures sont irrémédiablement faussées.

On peut remédier à ces défauts par un artifice. Si l'on ajoute au modèle précédent un réseau capacitif, connecté à une série de prises ménagées à cet effet dans les enroulements, et que ce réseau représente les capacités de l'enroulement multipliées par un coefficient voisin de l'inverse de l'échelle des longueurs, on obtient un modèle ayant une échelle de fréquences propres égale à l'unité. De plus, reprenant l'exemple du modèle au cinquième, les capacités de ce dernier sont alors cinq fois plus grandes que celles du transformateur, et vingt cinq fois plus grandes que celles du bobinage du modèle qui peuvent être alors pratiquement négligées. L'inconvénient de ce mode de faire est qu'il faut

calculer les capacités propres du transformateur et construire un réseau capacitif suffisamment subdivisé pour que la distribution discrète ainsi obtenue se comporte, compte tenu de l'échelle d'observation, à peu près comme une distribution continue. L'expérience montre que ce résultat peut être atteint assez aisément.

Nous appelons avec *Abetti*, auteur de travaux originaux dans ce domaine, modèle électromagnétique une telle réalisation (fig. 1). On peut montrer,

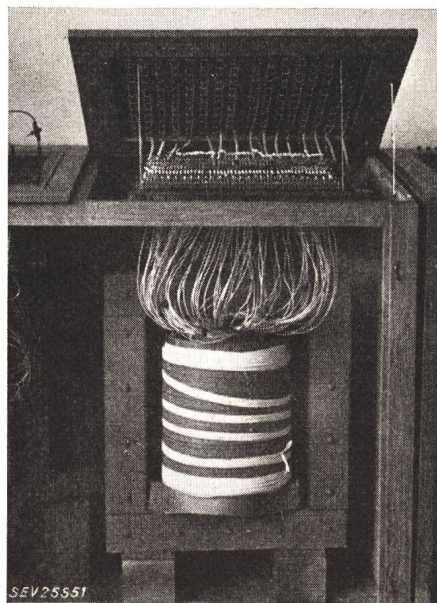


Fig. 1

Modèle électromagnétique d'un transformateur de 20 MVA, 150 kV

En haut, réseau capacitif destiné à l'ajustage de l'échelle des temps

qu'en plus de l'échelle de tension appliquée (échelle énergétique) on peut choisir arbitrairement trois échelles, et seulement trois, toutes les autres étant fixées par ce choix. Nous avons fait les meilleures expériences en choisissant une échelle de temps et de nombre de spires égales à l'unité, l'échelle de longueur ne devant guère être inférieure à un septième.

Nous ne pouvons, faute de place, discuter plus à fond les problèmes que pose la réalisation des modèles de transformateurs. Nous avons, pour nos essais, utilisé principalement des modèles électromagnétiques. Ils s'adaptent à l'étude de la plupart des types de transformateurs. Nous leur préférons cependant les modèles géométriques lorsque nous désirons étudier des dispositifs de répartition du champ électrique (écrans). Nous choisissons alors une échelle des longueurs aussi grande que possible. La limite en est donnée par le prix de revient de l'appareil!

### Mesures

Il convient de souligner que chaque point du bobinage d'un modèle est accessible aux mesures. Ceci permet une analyse aussi détaillée qu'on le désire des contraintes subies par un enroulement.

Les appareils utilisés lors des mesures sont: un générateur de choc à répétition, un générateur d'impulsions ou de trains d'impulsions de forme

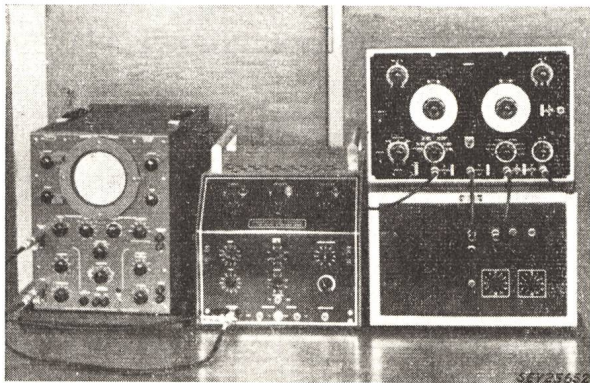


Fig. 2

Appareils utilisés pour les mesures effectuées sur modèles. De gauche à droite: oscilloscope HF, générateur à répétition 1000 V, générateur d'impulsions carrées avec mise en forme et génération de trains d'impulsions

La réponse transitoire d'un enroulement est complètement caractérisée par l'enregistrement des tensions, fonctions du temps, apparaissant entre chaque point du bobinage et la masse. On facilite cependant le dépouillement des résultats en relevant également des différences de tensions entre points voisins de l'enroulement (gradients longitudinaux). Cette mesure ne présente pas de difficultés lorsque l'échelle des capacités d'un modèle électromagnétique est assez grande.

**Exemples de mesures. Précision des modèles**

Nous donnons quelques exemples tirés de mesures effectuées sur des modèles électromagnétiques.

La figure 3 montre quelques mesures de tensions entre galettes d'entrée d'un enroulement, lors de l'application à ce dernier d'un choc plein et d'un choc coupé. La variation continue de l'instant de la coupure permet de rechercher la superposition des régimes, dus au front et à la coupure, donnant lieu aux contraintes maximums.

quelconque, et, bien entendu, un oscillographe haute fréquence muni d'un amplificateur différentiel et de sondes capacitives (fig. 2).

On peut admettre que l'amplitude de la tension transitoire appliquée à un enroulement n'a pas d'importance, le fer actif ne se saturant pas pour les fréquences moyennes mises en jeu par les phénomènes qui nous in-

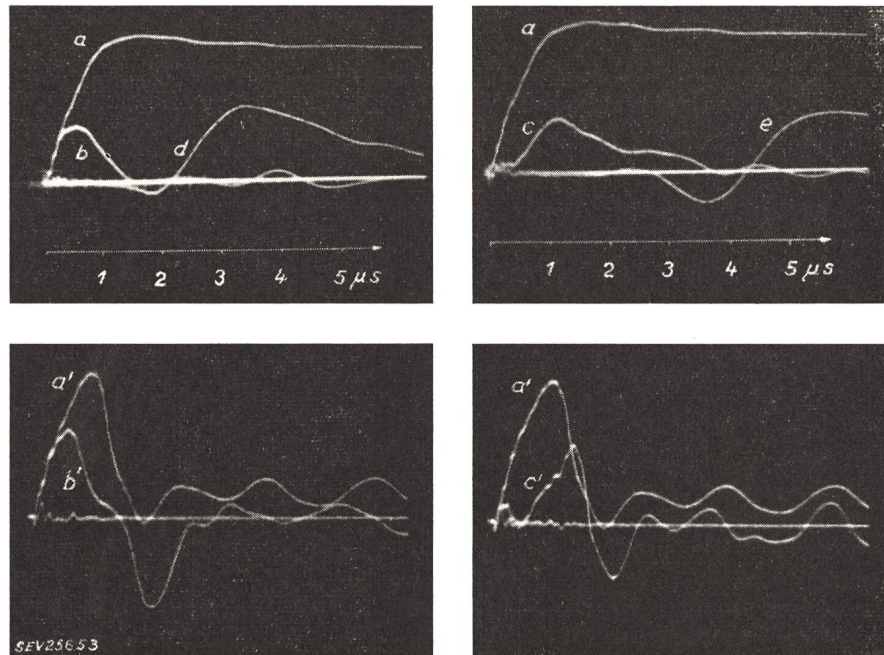


Fig. 3

Différences de tension, mesurées entre galettes doubles au voisinage de la borne. a, a' choc plein et coupé appliqué à la borne; b, b' et c, c' différence de tension correspondante

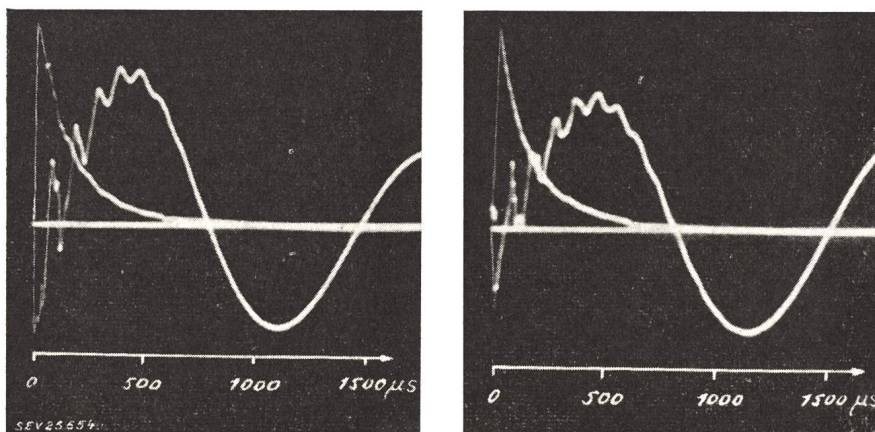


Fig. 4

Comparaison de l'oscillation du point neutre d'un transformateur, lors de l'application d'un choc à sa borne de phase, avec celle obtenue sur son modèle

A gauche: modèle  
A droite: transformateur

téressent. C'est ce qui permet de travailler à tension très réduite lors des essais sur modèles (quelques centaines de volts).

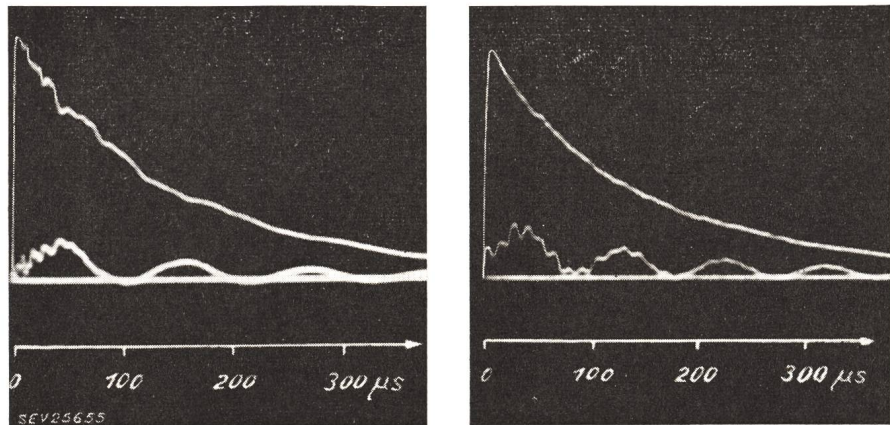
Les figures 4 et 5 donnent les réponses comparées de points de l'enroulement d'un transformateur monophasé de 20 MVA, 260 kV, et de points cor-

respondants du modèle. On voit que la concordance, tant en amplitudes qu'en fréquences, est bonne.

Les figures 6 et 7 donnent la même comparaison effectuée sur les prises d'un commutateur situé au milieu de l'enroulement HT d'un transformateur triphasé de 30 MVA, 150 kV. Le modèle a été construit grossièrement en ce qui concerne le réseau capacitif, sa destination étant uniquement la vérification des contraintes apparaissant sur ces prises.

En guise de conclusion à ce rapide aperçu de résultats expérimentaux, nous discuterons rapidement la précision que l'on peut obtenir avec des modèles électromagnétiques. Nous ne possédons, en

Fig. 5  
Comparaison de la transmission d'un choc à l'enroulement basse tension d'un transformateur (à droite) avec le même phénomène mesuré sur son modèle (à gauche)



C'est ce qui explique l'allure tourmentée de sa réponse. En lissant un peu les courbes, on voit cependant que la concordance est satisfaisante entre le

effet, une expérience suffisante que dans l'utilisation de ce type de modèles. La précision moyenne de ces modèles s'établit par comparaison avec leurs

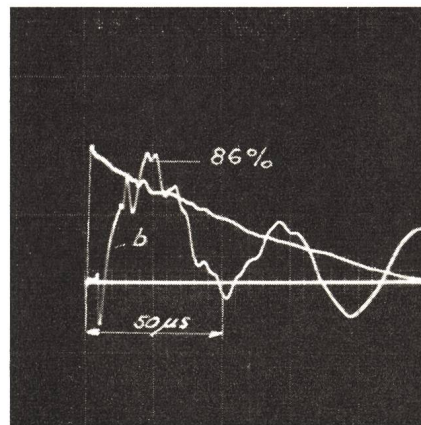
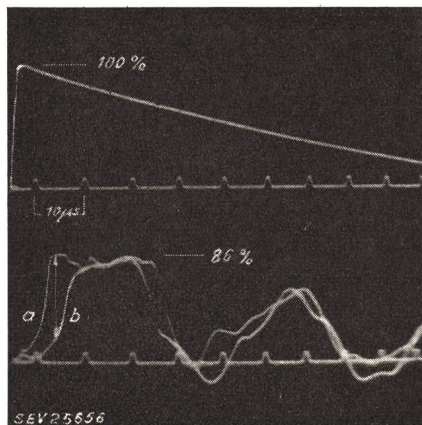


Fig. 6  
Comparaison de la réponse d'une prise au milieu de l'enroulement haute tension d'un transformateur 30 MVA, 150 kV (à gauche) avec celle du point correspondant de son modèle (à droite)

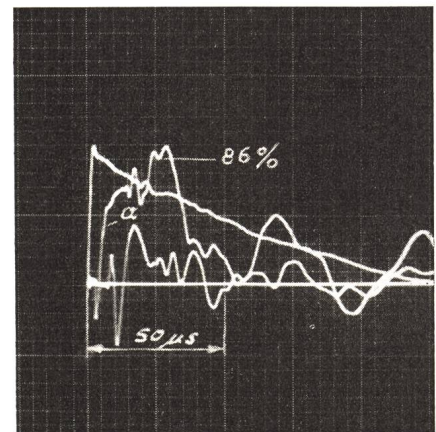
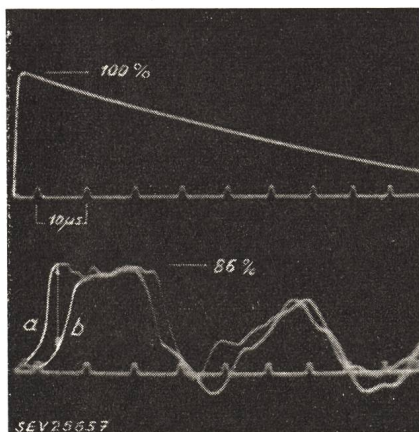
L'écart de fréquence entre les deux oscillogrammes (environ 30 %) provient de ce que les mesures ont été faites lorsque le transformateur était dans l'air

comportement du modèle et celui du transformateur.

La figure 8, enfin, montre la mise en résonance série d'un enroulement de transformateur par un train d'impulsion carrées. On remarquera le grand amortissement du phénomène, ce qui s'explique par le fait que la fréquence des impulsions est de l'ordre de 6 kHz. Des essais de ce genre peuvent être pris

transformateurs originaux. La vingtaine de modèles que nous avons construits jusqu'ici ne nous permet pas de donner une valeur statistique pour

Fig. 7  
Comparaison de la réponse d'une prise au milieu de l'enroulement haute tension d'un transformateur 30 MVA, 150 kV (à gauche) avec celle du point correspondant de son modèle (à droite)



comme base de l'étude de l'influence des surtensions de coupure sur le comportement des enroulements de transformateurs.

cette précision. Nous pouvons toutefois indiquer que, tant en fréquences qu'en amplitudes, les résultats fournis par des modèles ne différaient pas de

plus de 8% de ceux que donnaient les transformateurs correspondants. Ceci peut-être considéré comme un très bon résultat en regard des marges normales de dispersion qui affectent généralement la tenue diélectrique des dispositifs isolants industriels.

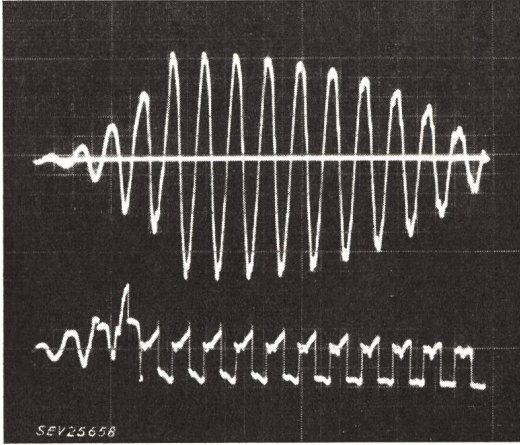


Fig. 8

Mise en résonance d'un enroulement par un train d'impulsions carrées appliquées à sa borne

En haut: impulsions carrées, fréquence 5,8 kHz

En bas: réponse d'une galette de l'enroulement ainsi excité

Signalons encore que cette précision n'est guère modifiée par certaines libertés qu'on peut prendre par rapport à la réalisation rigoureuse d'une similitude de transformateur. On peut par exemple utiliser un fil rond à la place d'un fil méplat et ne pas respecter la disposition exacte des galettes doubles constituant l'enroulement à représenter. Ceci n'est toutefois admissible que pour autant qu'on respecte la répartition des champs magnétiques transitoires.

### Application des modèles. Extensions

La principale application des modèles de transformateurs est l'étude détaillée des contraintes que subissent les enroulements de transformateurs soumis à n'importe quel type de surtension.

Parmi ces dernières figurent tout d'abord les tensions de choc appliquées à titre d'essai, con-

formément aux niveaux prévus par les règles de coordination. Mais en plus, on considère les surtensions transitoires de toutes formes pouvant prendre naissance dans le réseau auquel est incorporé l'appareil étudié.

Les modèles sont donc de précieux auxiliaires du calcul des transformateurs. Ils fournissent un moyen rapide et économique pour déterminer l'isolement de ces machines de façon homogène. Par ce dernier terme nous entendons que l'isolement comporte un coefficient de sécurité uniforme par rapport aux contraintes subies.

La technique des modèles est susceptible d'extensions diverses facilitant l'étude de la coordination des réseaux. On peut par exemple construire des modèles de lignes ayant une réponse correcte aux transitoires rapides. Couplés à des modèles de transformateurs, ils donnent la possibilité d'étudier, entre autres, la transmission des surtensions d'un réseau à un autre par l'intermédiaire des transformateurs de couplage, la protection de ces appareils, etc.

Si la justification principale de l'utilisation des modèles est la complexité des problèmes qu'ils permettent de résoudre, il convient cependant de souligner en outre l'aspect didactique de cette utilisation qui, par la façon imagée dont les résultats sont fournis, constitue un bon guide pour l'intuition, faculté indispensable à toute recherche.

### Bibliographie

- [1] Abetti, P. A.: La détermination des tensions transitoires au moyen de transformateurs expérimentaux de modèle réduit. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), Paris 1954, t. 2, rapp. 131, 24 p.
- [2] Wellauer, M.: Le comportement des autotransformateurs de réglage soumis aux tensions de choc. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), Paris 1954, t. 2, rapp. 123, 14 p.
- [3] Rossier, Cl. et J. Froidevaux: Liaisons entre réseaux à très haute tension: Transformateurs et autotransformateurs. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), Paris 1954, t. 2, rapp. 124, 16 p.
- [4] Froidevaux, J.: Les modèles, auxiliaires du calcul des transformateurs. Bull. Sécheron t. -(1956), n° 25, p. 41...46.

### Adresse de l'auteur:

J. Froidevaux, lic. ès sc., S. A. des Ateliers de Sécheron, Case postale Mt-Blanc, Genève.

## Elektrische Kontakte

Von E. Freudiger, Attleboro

621.316.5.066.6

*Die physikalischen Grundlagen elektrischer Kontakte werden unter Heranziehung neuester Forschungsergebnisse besprochen. Die sich daraus in der Praxis ergebenden Probleme werden diskutiert und Wege zur Lösung gezeigt. Der Aufsatz gibt auch einen Überblick über die verschiedenen Kontaktmaterialien. Auf Grund von Beispielen werden neuere Entwicklungstendenzen in der Kontaktherstellung erläutert und dem Konstrukteur elektrischer Apparate Anregung zu deren Verwendung gegeben.*

*La base physique fondamentale de contacts électriques est discutée en relation avec des résultats les plus nouveaux de recherches. Les problèmes qui se présentent dans la pratique sont étudiés ainsi que la façon de les résoudre. L'article donne un aperçu des différents matériaux de contact. Basées sur des exemples, des tendances récentes dans le développement de la fabrication des contacts sont expliquées et des suggestions sont faites au constructeur d'appareils électriques quant à l'usage de ces derniers.*

### A. Einleitung

Die Lebensdauer und die Leistungsfähigkeit elektrischer Geräte wird massgebend vom Verhalten der Kontakte beeinflusst. Es ist daher wichtig, dass der Kontakthersteller und der Verbraucher

über die Vorgänge an Kontakten genau informiert sind. Trotz der Arbeiten, die in den letzten Jahren geleistet wurden, bestehen noch viele Lücken in unserem Wissen, welche durch Grundlagenforschung und praktische Erfahrungen erweitert