

**Zeitschrift:** Bulletin de l'Association suisse des électriciens  
**Herausgeber:** Association suisse des électriciens  
**Band:** 47 (1956)  
**Heft:** 25

**Artikel:** Transformateurs de tension à noyau en forme de barreau pour très hautes tensions  
**Autor:** Erhart, L.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1058241>

### **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:** 25.12.2024

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

Federungseigenschaften von Silber keine Ermüdungserscheinungen. Das ganze mechanische System war somit der hohen Schaltzahl gewachsen. Die an den Kontaktflächen aufgetretenen Erscheinungen, welche die Betriebszeit der Patronen zunächst auf etwa 6 Wochen beschränkten, konnten später aufgeklärt und unterdrückt werden.

Literatur

[1] Baer, W. J.: Elektromagnetische Steuerung von Gleichrichterkontakten. Bull. SEV Bd. 47(1956), Nr. 16, S. 710...720.  
 [2] Kesselring, F.: Erfahrungen mit elektromagnetisch gesteuerten Grossgleichrichtern. Sci. electr. Bd. 2(1956), Nr. 2, S. 140...159.

Adresse des Autors:  
 R. Stulz, Rebbergstrasse 11, Oberengstringen (ZH).

## Transformateurs de tension à noyau en forme de barreau pour très hautes tensions

Par L. Erhart, Aarau

621.314.222.8.027.8

Les problèmes techniques soulevés par la construction de transformateurs de tension à noyau en forme de barreau sont traités en prenant comme exemple un transformateur pour 220 kV.

Die technischen Probleme, die sich beim Bau von Spannungswandlern mit Stabkern ergeben, werden als Beispiel an einem 220-kV-Wandler behandelt.

### Introduction

Pour la mesure de la tension et pour des buts de protection, on utilise maintenant dans les réseaux à haute tension des transformateurs de tension magnétiques et capacitifs. Un type spécial de transformateur de tension magnétique est le transformateur à circuit magnétique non fermé, selon Biermanns [1]<sup>1)</sup>. Dans des publications ultérieures [2 et 3], diverses constructions ont été décrites pour ce genre de transformateurs de tension. Nous nous proposons, dans cet article, de compléter les relations qui doivent permettre de calculer la précision de mesure d'un transformateur de tension à noyau en forme de barreau. Nous nous occuperons, à titre d'exemple, de la précision de mesure, de la construction et de la résistance

d'isolement d'un transformateur de tension pour 220 kV.

### Principe

Les transformateurs de tension pour hautes tensions supérieures à 60 kV sont maintenant tous unipolaires. Le principe de la construction d'un transformateur de ce genre ressort de la fig. 1. Sur le noyau en forme de barreau feuilleté en tôles de

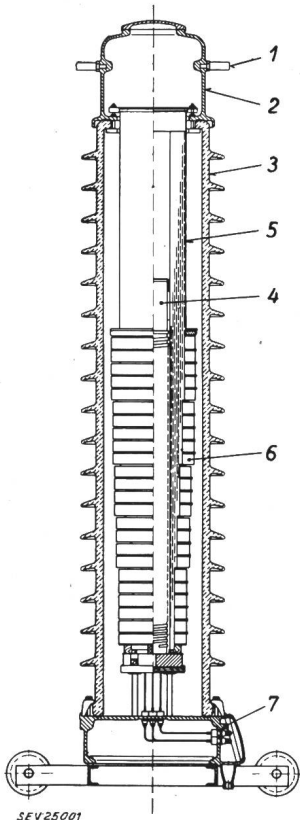


Fig. 1  
 Vue en coupe d'un transformateur de tension pour 220 kV à noyau en forme de barreau  
 1 Bornes primaires; 2 Conservateur d'huile; 3 Isolateur; 4 Noyau en forme de barreau, avec enroulement secondaire; 5 Isolation contre la haute tension, avec armatures de condensateurs; 6 Bobines primaires; 7 Plaque de base, avec bornes secondaires

transformateur, dont le pôle inférieur est très saillant, sont disposés les enroulements secondaires.

<sup>1)</sup> Voir bibliographie à la fin de l'article.

Concentriquement à ceux-ci se trouve l'isolation à haute tension portant les bobines primaires.

La partie active est fixée à une plaque de base qui porte les bornes de connexion du secondaire. L'ensemble est logé dans une enveloppe en porcelaine, avec un boîtier constituant la tête de l'appareil.

Le contrôle du champ électrique entre le noyau mis à la terre et l'enroulement primaire est assuré par des armatures jouant le rôle de condensateurs et logées dans l'isolation en papier; ces armatures servent également à con-

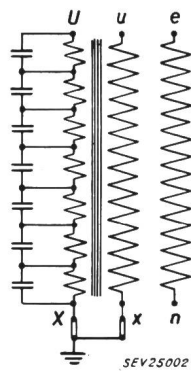


Fig. 2  
 Schéma de principe du transformateur de tension  
 U...X Enroulement primaire  
 u...x Enroulement secondaire de mesure  
 e...n Enroulement secondaire pour relais

trôler les bobines primaires lors de tensions de choc. Le schéma de principe est indiqué par la fig. 2. La première bobine du haut est reliée à l'armature la plus extérieure, tandis que la dernière bobine du bas l'est à l'armature la plus intérieure, qui est mise à la terre. Cette disposition permet une construction claire et simple de l'isolation et de l'enroulement.

Afin d'obtenir la résistance d'isolement requise, le transformateur de tension est vidé, puis imprégné d'huile pour transformateurs sèche et dégazée et fermé hermétiquement, pour éviter toute rentrée d'air atmosphérique.

### Précision de mesure

Le calcul préalable de la précision du rapport de transformation d'un transformateur de tension à circuit magnétique fermé est bien connu. Pour le transformateur de tension à noyau en forme de barreau, nous indiquerons le calcul de la précision en nous servant du diagramme de Mölling et montrerons que la précision du rapport de transformation et la ligne de mesure peuvent atteindre la même qualité que dans le cas d'un circuit magnétique fermé.

Lors du fonctionnement à vide, les vecteurs  $I_0R_1$  et  $I_0X_1$  donnent lieu aux erreurs  $F_{U_0}$  et  $\delta_{U_0}$

(fig. 3a). Lorsque le transformateur est chargé au secondaire avec un  $\cos \beta$  donné, le triangle de charge s'additionne avec les vecteurs  $(R_1 + R_2') I_2'$  et  $(X_1 + X_2') I_2'$  pour donner le triangle à vide, qui fournit les erreurs absolues  $F_U$  et  $\delta_U$ .

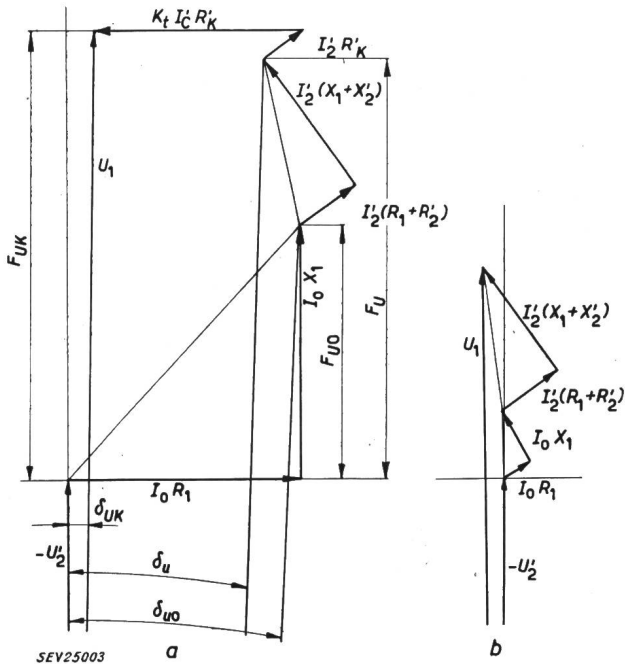


Fig. 3

Diagrammes vectoriels de transformateurs de tension  
 a Avec noyau en forme de barre et compensation du déphasage  
 b Avec noyau de fer fermé  
 (Même échelle pour a et b)

- $F_U$  Erreur de rapport sous charge
- $F_{U0}$  Erreur de rapport à vide
- $F_{UK}$  Erreur de rapport sous charge et avec compensation du déphasage
- $\delta_u$  Déphasage sous charge
- $\delta_{u0}$  Déphasage à vide
- $I_2'$  Courant secondaire
- $I_c'$  Courant de compensation capacitif
- $I_0$  Courant à vide
- $R_1, R_2'$  Résistances ohmiques des enroulement primaire et secondaire
- $R_K$  Résistance de compensation
- $X_1, X_2'$  Réactances primaire et secondaire
- $U_1, U_2'$  Tensions primaire et secondaire

A titre de comparaison, nous avons représenté sur la fig. 3b, à la même échelle, le diagramme vectoriel d'un transformateur de tension à circuit magnétique fermé. Du fait que le noyau de fer est fermé, les pertes à vide sont plus faibles, tandis que le triangle de charge est le même que celui du transformateur de tension à noyau en forme de barre.

Les composantes du triangle à vide de la fig. 3a pour le transformateur de tension à noyau en forme de barre ne peuvent atteindre qu'une valeur minimum déterminée, qui dépend de considérations d'ordre économique et technique. Alors que les résistances  $R_1$  et  $X_1$  ne peuvent pas être inférieures à une certaine valeur, le courant à vide  $I_0$  est déterminant pour les pertes à vide.

Conformément aux Prescriptions et Règles pour les transformateurs de mesure (par exemple les prescriptions allemandes VDE 0414), il y a lieu de maintenir à 80...120 % de la tension nominale l'erreur de rapport et le déphasage pour la puissance

nominale et pour le quart de cette puissance. Selon le diagramme, la valeur  $F_U - F_{U0}$  est donc déterminante pour la classe de précision de l'erreur de rapport. L'erreur de rapport  $F_U - F_{U0}$  peut être

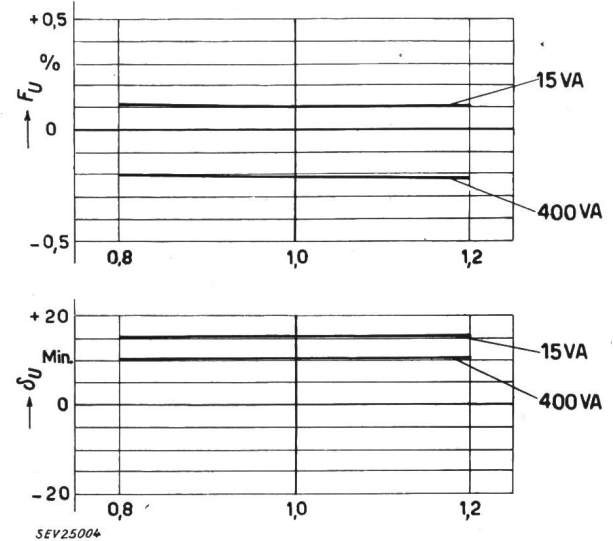


Fig. 4

Erreur de rapport  $F_U$  et déphasage  $\delta_U$  d'un transformateur de tension pour 220 kV à noyau en forme de barre, sans compensation, dans les limites de la classe 0,5,  $\cos \beta = 0,8$  (VDE)

maintenue dans les limites de la classe par décalage du zéro, tandis que le déphasage est donné par le vecteur  $I_0 R_1$ .

Pour un transformateur de tension pour 220 kV, la fig. 4 indique à titre d'exemple les courbes d'erreurs mesurées selon le diagramme de la fig. 3a. Les conditions exigées pour la classe 0,5 (VDE) peuvent être bien observées.

Afin d'atteindre une précision plus élevée, par exemple de la classe 0,2 (VDE), le déphasage doit être compensé. On dispose pour cela, en principe, de deux méthodes:

a) charge préalable capacitive pour compenser le courant à vide;

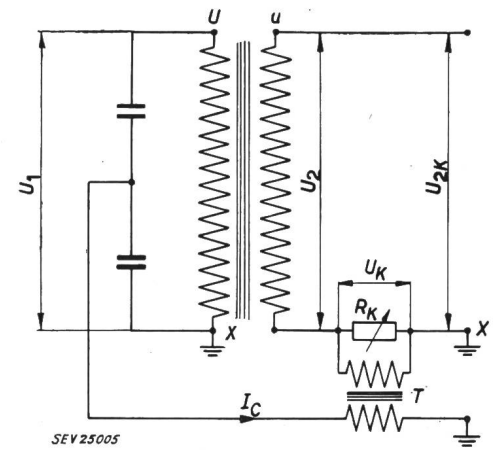


Fig. 5

Schéma d'un transformateur de tension avec compensation du déphasage

- $I_0$  Courant de compensation capacitif
- $R_K$  Résistance
- $T$  Transformateur auxiliaire
- $U...X$  Enroulement primaire
- $U_1$  Tension primaire
- $U_2$  Tension secondaire
- $U_K$  Tension de compensation
- $U_{2K}$  Tension secondaire corrigée
- $u...x$  Enroulement secondaire

b) compensation de la tension secondaire à l'aide d'une tension auxiliaire.

La méthode a) est passablement coûteuse. Nous avons donc mis au point une compensation selon la méthode b), que nous allons expliquer à l'aide du schéma de la fig. 5.

Une tension de correction  $U_K$  opposée au vecteur  $I_0 R_1$ , d'une grandeur déterminée, est superposée à la tension secondaire  $U_2$  et provoque une correction du déphasage vers zéro. Cette tension de correction est produite, comme le montre le schéma de la fig. 5, en excitant le transformateur auxiliaire  $T$ , dont l'enroulement secondaire est chargé par une résistance  $R_k$ , au moyen d'un potentiomètre capacitif, le courant secondaire  $I_C$  provoquant, à la résistance  $R_k$ , une chute de tension  $U_k$  opposée à la tension  $I_0 R_1$ , en maintenant à une faible valeur appropriée l'erreur de rapport du transformateur auxiliaire  $T$ . Le potentiomètre capacitif est constitué par les capacités naturelles de l'isolation à haute tension. Pour la tension de compensation  $U_k$ , on a  $U_k = K_t I_C R_k$ , où  $I_C$  est le courant capacitif efficace dans l'enroulement primaire de  $T$ .

Pour le transformateur de tension sans compensation, on a à vide, la tension secondaire étant rapportée au primaire:

$$\vec{U}_1 = \vec{U}_2' + \vec{X}_1 I_0 + \vec{R}_1 I_0$$

Avec la compensation, la relation à vide est la suivante, selon le diagramme de la fig. 3a:

$$\vec{U}_1 = \vec{U}_{2k}' + \vec{R}_1 I_0 + \vec{X}_1 I_0 + K_t I_C' R_k'$$

Si, dans le cas considéré, le déphasage  $\delta_{U_k}$  doit devenir nul, la relation

$$R_1 I_0 = K_t I_C' R_k'$$

doit être satisfaite.

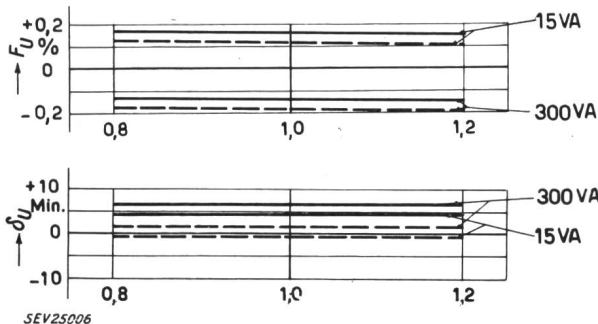


Fig. 6

Erreur de rapport  $F_U$  et déphasage  $\delta_U$  d'un transformateur de tension pour 220 kV à noyau en forme de barreau, avec compensation, dans les limites de la classe 0,2,  $\cos \beta = 0,8$  (VDE)  
 ——— 50 Hz      - - - - - 60 Hz

En série avec l'enroulement secondaire se trouve la résistance  $R_k$ , de sorte que le vecteur  $I_2' (R_1 + R_2')$  devient  $I_2' (R_1 + R_2' + R_k')$ , ce qui augmente l'erreur de rapport. On peut ainsi ajuster finement le déphasage et, entre d'étroites limites, également l'erreur de rapport.

La fig. 6 montre, à titre d'exemple, la précision de mesure du même transformateur de tension pour 220 kV, que celui représenté par la fig. 4. Le déphasage est toutefois compensé selon la méthode que nous venons de décrire. Ce transformateur satisfait bien aux conditions de la classe 0,2 (VDE).

Le courant capacitif  $I_C$  et, dans le cas de transformateurs de tension à grand entrefer, également le courant à vide  $I_0$ , sont proportionnels à la tension primaire  $U_1$ . Il s'ensuit que la compensation du déphasage est indépendante de la tension primaire.

L'influence de la fréquence sur la précision de mesure est indiquée par la fig. 6 pour le transformateur de tension à noyau en forme de barreau. Le même transformateur de tension a été mesuré pour 50 et 60 Hz; les erreurs demeurent, pour ces deux fréquences, dans les limites de la classe.

Il est possible de calculer d'avance, avec de simples moyens mathématiques, en partant du diagramme de la fig. 3a, la précision de mesure d'un transformateur de tension compensé à noyau en forme de barreau. La difficulté réside dans la détermination du courant à vide.

### Détermination du courant à vide

Le courant à vide servant à l'aimantation d'un noyau en forme de barreau est déterminé principalement par le champ dans l'air, c'est-à-dire par son entrefer relatif. La fig. 7 représente clairement l'aspect du champ magnétique d'un tel noyau. Les endroits où les lignes magnétiques sortent du noyau

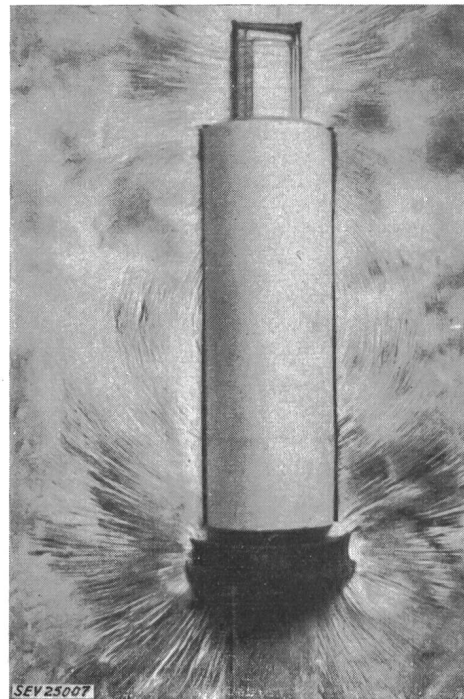


Fig. 7

Image du champ magnétique d'un noyau en forme de barreau

de fer sont ceux où l'induction dans l'air atteint sa valeur maximum; il s'agit de l'entrefer proprement dit. En partant des dimensions du noyau et de la bobine, *Küchler* [4] a indiqué pour les bobines d'inductance un mode de calcul de l'inductance qui est également applicable avec une précision suffisante aux transformateurs de tension à noyau en forme de barreau.

En négligeant la perméabilité dans le fer, on peut écrire pour l'entrefer, rapporté à l'induction moyenne dans le fer:

$$\delta = 0,44 \frac{d_e^2}{d K_1 K_2} [\text{cm}] \text{ valable pour } \frac{l}{d_e} \geq 5$$

où, selon Küchler,

$$K_1 = 1 + 0,1 \frac{l}{d} + 0,6 \frac{l_e - l}{d_e} \text{ pour } l_e > l$$

$K_2$  peut être tiré de la fig. 8. L'explication des symboles ressort de la fig. 9.

Pour le courant à vide, on a donc:

$$I_0 = \frac{\delta B_m}{N \cdot 0,4 \pi \cdot \sqrt{2}}$$

( $B_m$  induction moyenne dans le fer;  $N$  nombre de spires)

Comme le montrent ces relations, l'entrefer diminue au fur et à mesure que la sveltesse  $l/d_e$  augmente. L'importance technique et économique du noyau en forme de barreau pour les transformateurs de tension grandit à partir de tensions nominales de 110 kV. La partie active d'un tel transformateur peut alors être aisément logée dans un isolateur svelte de hauteur normale. Le volume d'huile ainsi que le poids total du transformateur peuvent être maintenus à une valeur relativement faible avec ce mode de construction.

### Influences extérieures

Du fait de la présence d'un champ magnétique dans l'air qui entoure le transformateur de tension, on peut se demander jusqu'à quel point la précision de mesure est influencée par son montage dans

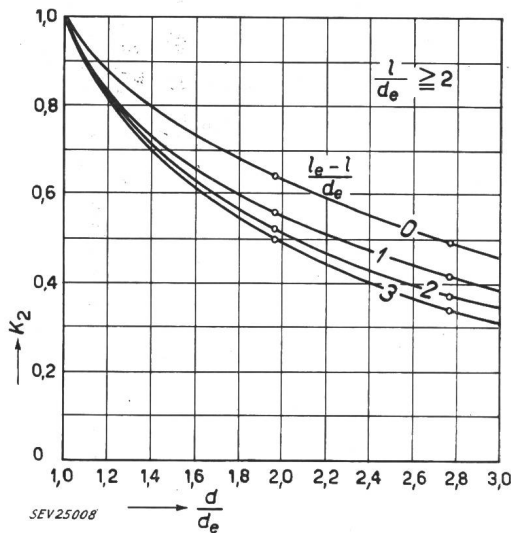


Fig. 8  
Facteur de correction  $K_2$   
pour  $\frac{l_e - l}{d_e} = 0 \dots 3$   
Pour les autres désignations, voir fig. 9

un bâti en fer ou par la proximité immédiate d'autres transformateurs de tension ou de courant.

Ces questions ont fait l'objet de recherches durant la mise au point du transformateur. Le montage dans un bâti en fer peut avoir une influence sur le courant à vide, par suite d'une déviation des lignes de force. Pour y parer, l'écartement entre le noyau et la plaque de base a été ramené à la dimension minimum nécessaire et la plaque de base est en matière non magnétique. L'influence exercée

sur la précision du rapport de transformation demeure alors de l'ordre de grandeur de la précision de mesure du dispositif d'essai, même dans le cas d'un montage défavorable, c'est-à-dire avec un bâti fermé en acier. En cas de montage tripolaire, le transformateur de tension adjacent peut donner lieu à un fort champ étranger. En adoptant une faible induction nominale, il a toutefois été possible de ramener l'influence exercée sur la précision du rapport de transformation à l'ordre de grandeur de la précision de mesure de 0,02 % et 2 min. Grâce au fait que les erreurs n'atteignent pas les limites de la classe de précision, celle-ci

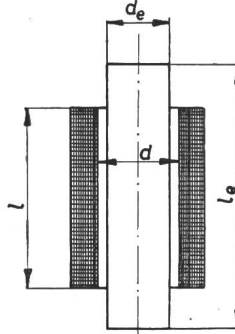


Fig. 9  
Bobine à noyau en forme de barreau

est maintenue même lorsque les légères influences extérieures décrites se présentent.

Une influence sur la précision de mesure d'un transformateur de courant par le flux de dispersion du transformateur de tension voisin n'a pas pu être mesurée. Dans ce cas également, la faible induction nominale dans le transformateur de tension est déterminante.

### Résistance d'isolement

Les sollicitations exercées en exploitation normale par la tension sont en relation avec les tensions d'essai spécifiées par les prescriptions et règles en vigueur. C'est ainsi que les Recommandations de la CEI pour les transformateurs de tension spécifient un essai entre spires sous haute tension durant une minute, ainsi que l'essai sous tension de choc.

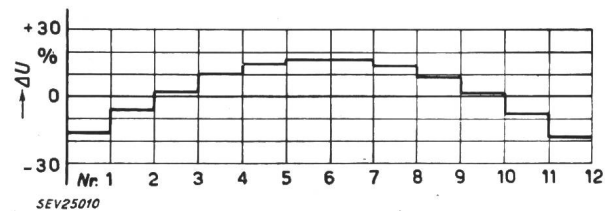


Fig. 10  
Ecart de la tension de la bobine  $\Delta U$  par rapport à la valeur moyenne, en fonction du numéro de la bobine, dans un transformateur de tension à noyau en forme de barreau, pour 50 Hz

L'inductance des bobines primaires est déterminante pour la répartition de la tension à la fréquence d'exploitation et pour l'essai à haute tension d'une minute à une fréquence plus élevée. Du fait de la construction avec noyau en forme de barreau, la répartition de la tension le long de l'enroulement primaire n'est pas linéaire, mais incurvée, comme l'indique la fig. 10. L'écart par rapport à la répartition linéaire doit être considéré lors du dimensionnement de la traversée à condensateur, car les différentes bobines sont reliées aux armatures correspondantes. Pour la tension nominale de 220 kV et une tension maximum de service de 245 kV, les Recommandations de la CEI spécifient

un essai entre spires sous 395 kV pour l'isolement réduit et 460 kV pour l'isolement normal, durant une minute. Le transformateur de tension décrit a été essayé durant une minute sous 504 kV, tension qui a été supportée à plusieurs reprises sans difficulté par ce même transformateur.

Le transformateur de tension doit être en outre soumis, selon les prescriptions en vigueur, à un essai de choc. On distingue entre un essai à onde pleine, dont l'allure est fixée par les Recommandations de la CEI à une raideur de 1  $\mu$ s et à une durée de mi-amplitude de 50  $\mu$ s, et un essai avec tension de choc coupée selon les Prescriptions américaines ASA-Standards C 57011 — 1948.

Les sollicitations de tension ont été aisément supportées par l'isolation en papier imprégné d'huile, dont les propriétés diélectriques sont remarquables. Le problème le plus important est celui de la résistance d'isolement de l'enroulement primaire aux tensions de choc. L'enroulement primaire du transformateur de tension, dont les spires sont réparties entre différentes bobines, oppose une

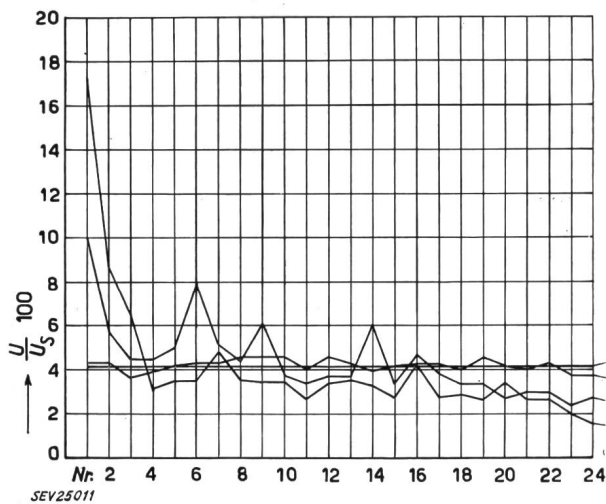


Fig. 11

Sollicitation électrique des bobines primaires d'un transformateur de tension pour 220 kV à noyau en forme de barreau, par un choc normal 1|50, en fonction du numéro de la bobine

$\frac{U}{U_s} 100$  Tension de bobine  $U_s$  en pour cent de la tension appliquée  $U$

1 sans contrôle capacitif; 2 bobines 1...5 contrôlées par capacités échelonnées; 3 toutes les bobines contrôlées capacitivement; 4 valeur moyenne théorique

grande impédance caractéristique à l'onde de choc incidente. La répartition initiale de la tension qui en résulte, ainsi que le processus d'équilibrage qui suit, sollicitent très fortement l'isolement entre spires et l'isolement des bobines, ce qui ne pourrait pas être facilement supporté sans précautions spéciales. Les résultats obtenus à la suite de nombreux essais pour élucider le problème compliqué de la répartition de la tension dans un enroulement ont pu être appliqués avec succès aux transformateurs de tension.

La fig. 11 montre un résultat essentiel concernant l'efficacité d'un contrôle capacitif de la tension des bobines primaires. Elle indique la sollicitation électrique des bobines sous un choc de 1|50 le long d'un enroulement primaire, avec et sans contrôle capacitif. Pour la construction du trans-

formateur de tension, on a appliqué le contrôle de toutes les bobines, selon la courbe 3; toutes les bobines sont sollicitées par une tension de choc pratiquement identique. A l'intérieur des bobines, la sollicitation électrique peut être facilement contrôlée avec les moyens d'isolement habituels.

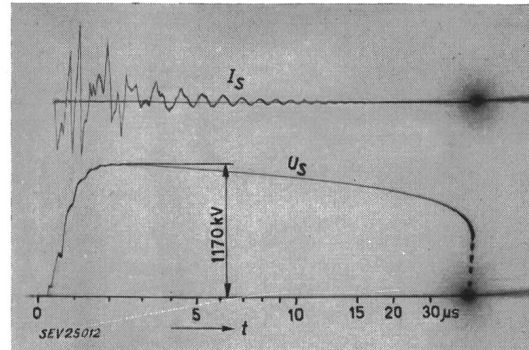


Fig. 12

Oscillogramme relevé au cours de l'essai d'un transformateur de tension pour 220 kV

$I_s$  Choc de courant;  $U_s$  Tension de choc appliquée au potentiomètre;  $t$  Temps

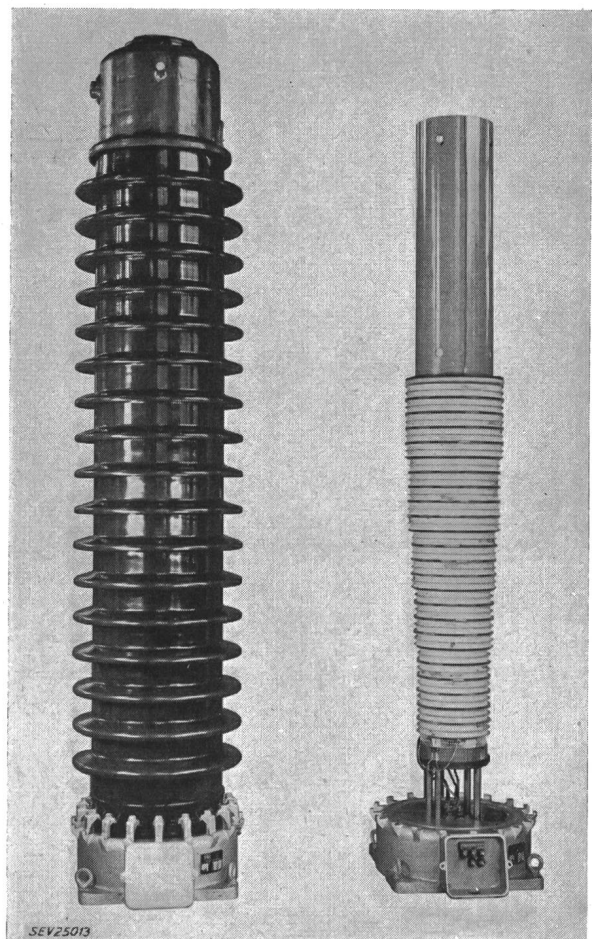


Fig. 13

Transformateur de tension pour 220 kV, à droite la partie active

Les Recommandations de la CEI spécifient pour les transformateurs à 220 kV une tension de tenue au choc, onde 1|50, de 1050 kV avec isolation complète et de 900 kV avec isolation réduite. Le transformateur de tension pour 220 kV considéré

a été soumis à 40 chocs avec une valeur de crête de 1170 kV et onde 1|50, ainsi qu'à des tensions de choc coupées d'une valeur de crête de 1200 kV. La fig. 12 reproduit un oscillogramme d'un choc avec onde pleine sur un transformateur de tension pour 220 kV. Pour l'indication des défauts, la tension et le courant à l'extrémité mise à la terre de l'enroulement primaire ont été relevés oscillographiquement à chaque choc. Aucune irrégularité par rapport aux oscillogrammes avec tension réduite n'a été constatée. Après un démontage soigneux des parties soumises à ces fortes sollicitations, aucune trace de perforation ou de contournement n'était visible.

La résistance d'isolement extérieure que présente la porcelaine est très grande, du fait de l'excellent contrôle de la tension des bobines primaires. Aucune des tensions d'essai accrues qui ont été appliquées n'a conduit à des claquages à la terre.

**Résumé**

Pour un transformateur de tension avec noyau en forme de barreau, nous avons indiqué le calcul préalable de la précision du rapport de transformation et montré que cette précision, ainsi que la ligne de mesure atteignent la même qualité que dans le cas d'un circuit magnétique fermé. A titre

d'exemple, nous avons indiqué quelle est la précision de mesure avec et sans compensation du déphasage, pour un transformateur de tension pour 220 kV. Grâce à des précautions spéciales, les influences extérieures affectant la précision de mesure sont limitées à un minimum acceptable. La fig. 13 montre le transformateur de tension pour 220 kV décrit et, à côté, sa partie active. Il y a lieu de noter sa construction simple et robuste, son faible poids et sa faible quantité d'huile.

Grâce à la simple isolation en papier imprégné d'huile et au contrôle capacitif des bobines primaires, on atteint une grande résistance d'isolement, comme cela a été prouvé par des essais détaillés avec la tension d'essai entre spires, la tension de tenue au choc et la tension de choc coupée.

**Bibliographie**

- [1] *Biermanns, J.*: Fortschritte im Transformatorenbau. ETZ t. 58(1937), n° 24, p. 659...662.
- [2] *Goldstein, J.*: Die Messwandler, ihre Theorie und Praxis. 2° éd. Basel: Birkhäuser 1952.
- [3] *Bauer, R.*: Die Messwandler. Grundlagen, Anwendung und Prüfung. Berlin: Springer 1953.
- [4] *Küchler, R.*: Induktivität und Stromkraft einer Zylinder-spule mit Stabkern. Jahrbuch der AEG-Forschung t. 6(1939), n° 2, p. 118...123.

Adresse de l'auteur:

L. Erhart, Sprecher & Schuh S. A., Aarau.

**Technische Mitteilungen — Communications de nature technique**

**Germanium Leistungsgleichrichter**

621.314.632 : 546.289

[Nach T. H. Kinman, G. A. Carrick, R. G. Hibberd und A. J. Blundell: Germanium and Silicon Power Rectifiers. Proc. Instr. Electr. Engrs. Bd. 103 (1956), Part A, Nr. 8, S. 89...107]

Die grundlegenden physikalischen Eigenschaften der Halbleiter und p-n-Übergangflächen sind durch Forschungen von Shockley und anderen in der USA ausgeführten Arbeiten weitgehend geklärt worden. Die technische Auswertung in der Starkstromtechnik erfolgte hauptsächlich in England, wo heute schon Gleichrichteranlagen mit einer Gesamtleistung von rund 25 MW vorhanden sind.

Im Germanium unterscheidet man zwei verschiedene Gebiete: 1. Im n-Germanium wurde durch Zuführung von Donoren (5wertigen Elementen) die Elektronenkonzentra-

tion und dadurch die Anzahl negativer Ladungsträger erhöht; 2. im p-Germanium ist durch Zuführung von Akzeptoren (3wertigen Elementen) die Lochkonzentration und dadurch die Anzahl positiver Ladungsträger erhöht. Im p-n-Übergangsbereich entstehen gewisse Raumladungen infolge der verschiedenen Konzentrationen, welche spannungsabhängig sind. Durch Zusammenspiel mit Generations- und Rekombinationsprozessen entsteht eine Gleichrichterwirkung. In Fig. 1 sind Charakteristiken von Ge-Gleichrichter-Dioden für kleine und grosse Leistungen aufgestellt. Man erkennt, dass auch im Sperrgebiet ein kleiner Strom fließt, welcher temperaturabhängig ist. Wächst die Sperrspannung über eine gewisse Grenze, so bemerkt man einen lawinenartigen Zuwachs des Stromes und die Gleichrichtwirkung geht verloren (Zener-Effekt). Die zulässige Sperrspannung ist nach

*Vergleich einiger Ge-Gleichrichtertypen*

Tabelle I

Typ	Leistung	Übergangs- flächen- querschnitt mm <sup>2</sup>	Sperrspannung (Scheitelwert) V	Mittlerer Strom A bei		Spannungsabfall im Durchlassbereich V
				35 °C	55 °C	
GJ4D	niedrig	1	100	0,25 0,5	0,1 0,2	0,5 bei 0,2 A
GJ3D	niedrig	1	200	0,25 0,5	0,1 0,2	0,5 bei 0,2 A
GJ5D	niedrig	1	300	0,25 0,5	0,1 0,2	0,5 bei 0,2 A
GJ1F	mittel	10	50	5	2,5	0,5 bei 3,5 A
GJ2F	mittel	10	100	5	2,5	0,5 bei 3,5 A
GJ3F	mittel	10	150	5	2,5	0,5 bei 3,5 A
GJ4F	mittel	10	200	5	2,5	0,5 bei 3,5 A
GP1B	hoch	20	100	20	—	0,5 bei 60 A
GP2B	hoch	20	200	20	—	0,5 bei 60 A
GP1C	hoch	64	25	60	—	0,5 bei 100 A
GP2C	hoch	64	50	55	—	0,5 bei 100 A
GP3C	hoch	64	100	50	—	0,5 bei 100 A