

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 24 (1933)
Heft: 5

Artikel: Messwandler. II. Referat
Autor: Keinath, G.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1057225>

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>

jedoch bedenkt, dass beispielsweise 60' Winkelfehler nur bei $\frac{1}{10}$ des Nennstromes zugelassen ist und dass die durchgehende Leistung in diesem Falle unter Ansatz eines Leistungsfaktors von 0,1 ca. 1 % der Nennleistung darstellt, ferner dass der genannte Fehlwinkel bei Leistungsfaktor 0,1 die Leistungsmessung um ca. 20 % fälscht, so erkennt man, dass die Falschmessung, bezogen auf die Nennleistung des Systems, unter diesen Verhältnissen nur etwa 2‰ beträgt. Bei $\frac{1}{5}$ des Nennstromes wird 40' Winkelfehler zugelassen; nimmt

man an, der betrachtete Betrieb arbeite in diesem Falle mit Leistungsfaktor 0,2, so errechnet man als Betrag der Falschmessung ca. 4‰ ; bei Nennleistung schliesslich und einem Leistungsfaktor von 0,8 wird er höchstens etwa 7‰ . Solche Beträge dürften gegenüber anderen Fehlerquellen kaum ins Gewicht fallen.

Es würde uns interessieren, die Ansicht der Herren von den Betrieben über diesen Punkt zu vernehmen.

II. Referat

gehalten von Prof. Dr. ing. Gg. Keinath, Direktor im Wernerwerk der

Siemens & Halske A.-G., Berlin.

Der Referent äussert sich im wesentlichen vom Standpunkt des Praktikers, des Herstellers und des Verbrauchers. Einleitend bespricht er kurz die dielektrische und die Kurzschlusssicherheit, die erreichten Genauigkeiten und das Problem der Trockenisolierung, erörtert dann die Möglichkeiten zur Erhöhung der Genauigkeit der Einstabwandler, und die Gründe, die den Schleifenwandler als ungünstige Lösung erscheinen lassen. Dann beschreibt er den Eisenstabwandler (eine neue Konstruktion mit offenem magnetischem Kreis) und die bemerkenswerten Eigenschaften des Kreuzringwandlers. Es wird auch auf die fabrikationstechnischen Schwierigkeiten des Kaskaden- und Trocken-Spannungswandlers eingegangen und der Standpunkt vertreten, dass der Oelspannungswandler heute den Vorzug verdient, insbesondere dann, wenn er einer strengen Prüfung standhält, z. B. der vom Referenten eingeführten 8-h-Typenprüfung oder der Verlustwinkelmessung.

L'auteur parle principalement du point de vue du praticien, du constructeur et du consommateur. Il traite tout d'abord brièvement de la rigidité diélectrique, de la résistance aux courts-circuits, de l'exactitude atteinte, du problème de l'isolement à sec, puis expose les possibilités d'augmenter l'exactitude des transformateurs à un conducteur et les raisons qui font apparaître le transformateur à boucle comme une solution défavorable. L'auteur décrit ensuite le transformateur à barre de fer (une nouvelle construction à circuit magnétique ouvert) ainsi que les propriétés remarquables du transformateur à anneaux croisés, puis s'arrête aux difficultés de fabrication du transformateur de potentiel en cascade et de celui à isolement sec pour se placer au point de vue que le transformateur de potentiel à huile doit avoir la préférence aujourd'hui, surtout lorsqu'il résiste à des essais sévères, par exemple à l'épreuve de type 8-h qu'il a introduite, ou à la mesure de l'angle de perte.

I. Allgemeines.

Bei den Messwandlern ist im wesentlichen nach drei Gesichtspunkten zu unterscheiden: nach *Sicherheit, Genauigkeit* und *Preis*.

Die *Sicherheit* habe ich absichtlich an die erste Stelle gesetzt; sie ist für einen Messwandler das wesentlichste. Ein Stromwandler kann überhaupt nicht vor Ueberstrom geschützt werden, über ihn gehen alle Ueberströme und alle Ueberspannungen hinweg. Wenn er explodiert, so kann daraus die schwerste Betriebsstörung entstehen. Beim Spannungswandler geht die neueste Tendenz dahin, ihn ungeschützt in die Leitung einzubauen, weil sich gezeigt hat, dass auf die Sicherung doch kein absoluter Verlass ist. Anstelle von Sicherungen verwendet man Konstruktionen mit grösserer Sprungwellenfestigkeit und grösserer Sicherheit gegen normalfrequente Ueberspannungen. Die Sicherheit kann im wesentlichen durch geschickte Konstruktion erhöht werden. Die *äusseren Schlagweiten* sind heute für Spannungen bis zu 100 kV teilweise vorgeschrieben, teilweise interne Werksnormen. Ich halte es nicht für zweckmässig, Vorschriften für Schlagweiten im *Innern* der Wandler zu machen, weil dadurch Fortschritte unterbunden werden können.

Die Minutenprüfung sagt gar nichts über die Betriebssicherheit der Wandler, sie soll nur grobe Fabrikations- oder Materialfehler aufdecken. Auf

Grund einer einmaligen sehr unangenehmen Erfahrung, die nunmehr acht Jahre zurückliegt, habe ich für die Wandler der Siemens-Werke als Typenprobe (nicht als Stückprobe!) eingeführt, dass sie die Prüfspannung nicht nur während 1 min halten müssen, sondern während 8 Stunden. Ich habe damit die Gewähr, dass der Wandler bei der Stückprobe während 1 oder 5 min nicht beschädigt wird. Eine längere Ausdehnung dieser Typenprobe halte ich für zwecklos, weil die dabei verwendete Spannung im allgemeinen etwa das dreifache der betriebsmässigen Beanspruchung ausmacht.

Was die *Kurzschlusssicherheit* anbelangt, so kommt man in vielen Fällen mit dem 60- bis 100-fachen des Normalstromes während 1 s aus. In anderen Fällen, insbesondere bei den Eigenversorgungsanlagen von grösseren Kraftwerken, wird der 1000- bis 3000fache Sekundenstrom verlangt. Den extremsten Forderungen auf Kurzschlusssicherheit der Stromwandler kann man eher entsprechen, wenn man die Genauigkeit solcher Wandler herabsetzt oder auch ihre Leistung vermindert. Insbesondere sollte man bei Stabwandlern mit 5 VA Sekundärleistung zufrieden sein und in besonderen Fällen auch zulassen, dass der Wandler für eine bestimmte Sekundärbürde abgeglichen wird, z. B. auf $5\text{ VA} \pm 1\text{ VA}$.

Die erreichte *Genauigkeit* hat bei den Messwandlern in den letzten fünf Jahren ausserordent-

liche Fortschritte gemacht. Wir sind heute bei der Klasse 0,2 angelangt für eine handelsübliche Ware, die insbesondere bei der Verrechnung grosser Energiemengen zur Anwendung kommt. Für Normalwandler macht es keine Schwierigkeiten, einen Stromfehler von 0,01 % und einen Fehlwinkel von nur 1' zu erreichen. Derartige Normalwandler sind bei hohen Stromstärken konstanter und genauer als Wechselstromwiderstände.

Ein Problem, das die Wandlerbauer in der letzten Zeit besonders interessierte, ist das der *Trockenisolierung*. Nach meinem Dafürhalten ist es nicht richtig, einen Messwandler, bei dem man, sofern man eine gute Konstruktion verwendet, mit keiner Störung zu rechnen hat, zu vergleichen mit einem Oelschalter, bei dem betriebsmässig in einer brennbaren Masse Lichtbogen gezogen werden. Sofern man nicht die unbedingt kurzschlußsicheren Stabwandler verwenden kann, scheint mir die Sicherheit am höchsten, wenn es möglich ist, Papierisolation unter Oel zu verwenden. Man hat dabei die kleinsten dielektrischen Verluste und die höchste Sicherheit. Sofern Trockenisolierung verwendet wird, lässt sie sich auch beim Stromwandler mit reiner Porzellanisolierung erreichen, beim Spannungswandler ist es aber nicht möglich, weil die Isolierung der einzelnen Windungen noch einen ganz erheblichen Aufwand an brennbarem Material enthält.

2. Stromwandler.

Wie bereits gesagt, ist der Stabwandler der idealste Stromwandler und es werden erhebliche Anstrengungen gemacht, die Genauigkeit der Stabwandler mit geringer Ampèrewindungszahl zu erhöhen.

Es gibt dazu verschiedene Wege: Ein erster besteht in der Verwendung eines Primärleiters mit besonders dünner Isolierung, z. B. in Form eines Kabelstückes. Schichtet man den Kern sehr hoch, so kann man auf diese Weise insbesondere bei Beschränkung der Sekundärleistung auf 5 VA bis zu etwa 70 A herabgehen und immer noch Zähler anschliessen.

Der zweite Weg ist der, die modernen hochmagnetischen Eisen-Nickel-Legierungen zu verwenden, die allerdings den Nachteil des sehr hohen Preises haben. Die von Herrn Prof. *Dünner* zitierte Veröffentlichung¹⁾, wonach die Sättigung zu früh eintritt, trifft nicht auf alle Nickel-Eisen-Legierungen zu. Die modernsten dieser Art haben einen Sättigungswert bis zu 16 000 Gauss²⁾. Für Wandler mit hoher Ueberstromziffer wird aber in der Regel ein Kern aus gewöhnlichem hochlegiertem Eisen der beste sein, um so mehr, als man bei normalem Strom in der Regel keine hohe Genauigkeit fordert.

Ein weiterer Weg zur Erreichung hoher Genauigkeit ist die Verwendung von Kunstschaltun-

gen, Spaltkern, Spaltwicklung, Doppelkern usw. Hierüber wurde vor kurzem im Bulletin des SEV berichtet³⁾. Auch Herr Dr. *Goldstein* wird im IV. Referat darüber weiteres sagen. Nach meinem Dafürhalten besteht kein zwingendes Bedürfnis, diese für den Hersteller komplizierten Anordnungen zu verwenden, um so mehr, als die Leistung nur auf etwa das Doppelte gesteigert werden kann und sich schliesslich doch die Ueberstromziffer beim gleichen Eisenaufwand ungünstiger ergeben muss.

Was die verschiedenen *Bauweisen der Stromwandler* anbelangt, so hat sich im Laufe der Zeit doch eine gewisse Typisierung herausgestellt.

Einer besonderen Betrachtung bedarf der *Schleifenwandler* für höhere Spannungen. Ich muss sagen, dass ich dieser Konstruktion heute, nachdem absolut sichere Topfwandler vorliegen, nicht mehr so das Wort reden kann wie früher, als der Schleifenwandler gewissermassen die Ergänzung des absolut betriebssicheren Stabwandlers war.

Der Schleifenwandler hat im Prinzip den Nachteil, dass seine Windungslänge sehr viel grösser ist als bei Topfwandlern und beispielsweise Querlochwandlern. Man kann natürlich durch Kunstschaltungen seine Windungszahl stark herabsetzen; dieselben Kunstschaltungen kann man aber, wenn man will, auch bei allen anderen Konstruktionen verwenden. Immer bleibt der Nachteil der grossen Windungslänge und damit die Notwendigkeit einer ausserordentlich guten Windungsisolierung. Bei einer Reihenspannung von 150 kV müssen wir mit einer Leiterlänge von 7 m pro Windung rechnen, bei einem Nennstrom von 20 A und nur 600 Ampèrewindungen kommen wir auf eine Wicklungslänge von über 200 m. In der Regel hat man aber 1000 bis 1500 Ampèrewindungen. Das gibt bei Sprungwellen ausserordentlich hohe Spannungen, denen man kaum begegnen kann. Ich halte von allen Schutzeinrichtungen nicht besonders viel, seien es Parallelwiderstände irgendwelcher Art, seien es Funkenstrecken oder schliesslich Widerstände mit Funkenstrecken kombiniert. Am besten scheint mir noch der Kathodenfallableiter zu sein, bei dem die Gefahr des Zusammenschweissens nicht mehr besteht und der doch grössere Ströme aufnehmen kann. Trotz aller Sorgfalt der Herstellung scheint es mir, dass es der Schleifenwandler an Betriebssicherheit nicht mit den besten Konstruktionen von Oelwandlern zu vergleichen ist, die heute auf dem Markte sind.

Fig. 1 zeigt einen eigenartigen neuen Wandler, den *Eisenstabwandler*, einen Wandler mit offenem magnetischen Kreis, der durch einen Kunstgriff von seinen ersten, sehr ungenauen Anfängen heraus so weit verbessert werden konnte, dass er 15 VA in der Klasse 1 % leistet. Begnügen wir uns mit noch kleinerer Leistung oder gar mit einer Kompensierung der Bürde, so können wir die Klasse 0,5, sogar die Klasse 0,2 erreichen, weil die beiden Fehlerkurven ausserordentlich flach verlaufen. Der Wandler ist absolut trockenisoliert, in einer Hart-

¹⁾ Reiche, ETZ 1932, S. 691.

²⁾ Vergl. ATM, Arch. techn. Messen, Z. 913—3 (Nov. 1932).

³⁾ Schwager, loc. cit.

papierklemme eingebaut, sprungwellensicher und dynamisch bis zum etwa 200fachen Strom fest.

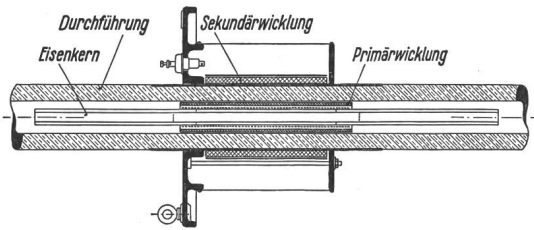


Fig. 1.
Eisenstabwandler. Schematischer Aufbau.

Der Kreuzringwandler, den ich vor etwa acht Jahren angegeben habe (Fig. 2), ist meines Erachtens für hohe Spannungen eine geradezu ideale Lösung, was Sicherheit und Genauigkeit betrifft. Bei einem 220-kV-Wandler wurde die Prüfspannung von 460 kV acht Stunden lang gehalten; es zeigten sich keinerlei Entladungserscheinungen. Der Wandler wurde dann mit über 600 kV durchgeschlagen, hielt aber noch die Prüfspannung, und erst nach dem Ausbrennen mit 600 kV erfolgte schliesslich bei der Prüfspannung der Durchschlag, der Wandler konnte aber noch Spannungen von über 300 kV aushalten, dabei war sogar noch eine Verlustwinkelmessung möglich. Dasselbe Modell leistet in der Klasse 0,5 nicht weniger als 1200 VA, das Gewicht dieses Modells ist 1500 kg.

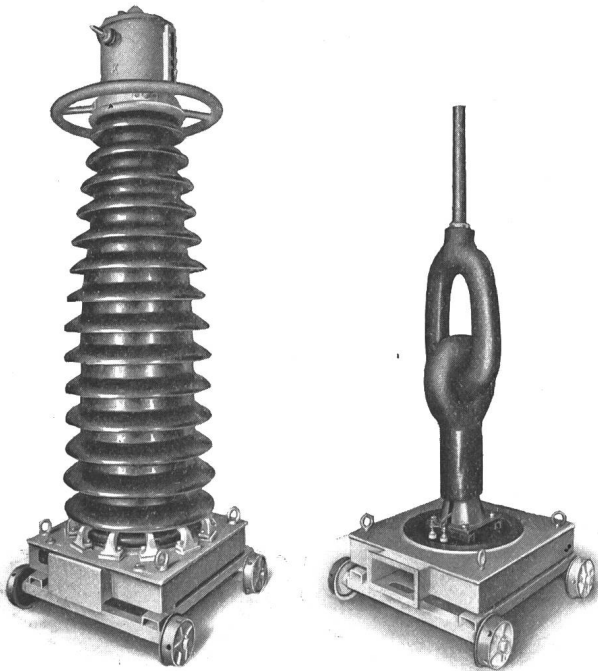


Fig. 2.
220-kV-Stützerstromwandler, geschlossen und offen.
Masstab etwa 1 : 40.

Wir sind im Messwandlerbau in wirtschaftlicher Hinsicht den Amerikanern weit voraus. Nach der letzten Veröffentlichung der Westinghouse Co.⁴⁾

⁴⁾ Electric J., Januar 1931.

hatte ein Satz von drei Strom- und drei Spannungswandlern für 220 kV Betriebsspannung, in drei Töpfen eingebaut, ein Gewicht von nicht weniger als 189 000 kg. Ich kann die gleiche Leistung mit einem Gewicht von nur 12 000 kg erreichen, ohne dass die Sicherheit oder Genauigkeit geringer wäre. Es ist uns sogar gelungen, 100-kV-Stromwandler zu bauen, bei denen der Aufwand an aktivem Material, Kupfer und Eisen, nur 20 kg beträgt.

Die modernste Anordnung ist die, dass diese Kreuzringwandler in den Stützisolator von Expansionsschaltern eingebaut werden.

Die Sicherheit des Kreuzringmodelles ist eine ausserordentlich hohe. Gegen dynamische Ueberlastung bietet die ringförmige Primärwicklung einen sehr guten Schutz; bei hohen Spannungen ist sie zwar oval, dafür treten auch bei den höchsten Spannungen keine hohen Ueberströme auf, so wie sie bei 6 bis 15 kV üblich sind.

Ich kann berichten, dass von allen seit dem Jahre 1925 gelieferten Kreuzringwandlern noch nicht ein einziger elektrisch defekt geworden ist, weder durch Windungsschluss infolge Sprungwellen, noch durch Durchschlag zwischen Hoch- und Niederspannungswicklung, und zwar bezieht sich diese Feststellung auch auf die Fabrikationsproben. Durchgeschlagen wurden lediglich die Versuchsexemplare, von denen wir die Grenze der Festigkeit kennen lernen wollen. Wir lassen jetzt, nachdem Wandlerschäden niemals vorgekommen sind, bis zu 100 kV die Parallelwiderstände weg, haben aber die Imprägnierung der Primärwicklung nochmals wesentlich verstärkt. Ich glaube, dass da-

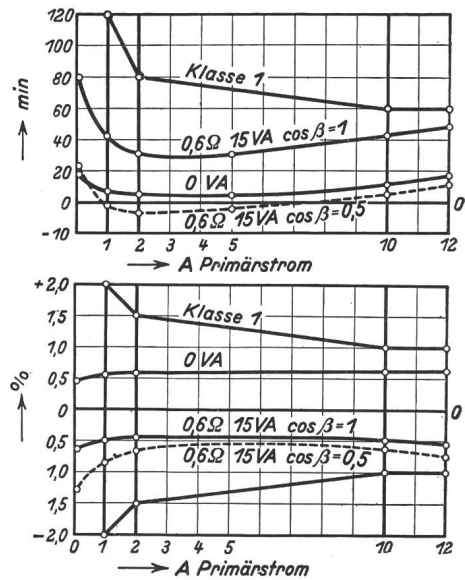


Fig. 3.
Fehlerkurve eines Spezialwandlers Reihe 10, 10/5 A.

durch auch den Interessen des Betriebes begegnet wird, weil diese Parallelwiderstände doch verschiedentlich Anlass zu Aerger geben.

In städtischen Netzen macht es häufig Schwierigkeiten, bei ganz geringen Anschlusswerten kurz-

schlußsichere Wandler zu erhalten. Hierfür kann man besondere Kunstsaltungen anwenden, die den Zweck haben, die Ueberstromfestigkeit zu steigern und gleichzeitig die Fehlerkurve sehr flach zu machen, so dass die Wandler bis herab zu etwa 1 % des Nennstromes ihre Genauigkeit halten⁵⁾. Fig. 3 zeigt die Fehlerkurve eines solchen Spezialwandlers für kleine Anschlusswerte.

3. Spannungswandler.

Auch auf dem Gebiete der Spannungswandler sind grosse Fortschritte gemacht worden. Noch vor etwa 8 Jahren war das Gewicht eines 100-kV-Spannungswandlers etwa 3000 kg; die damals übliche Prüfspannung war 165 kV. Man getraute sich damals kaum, mit der Prüfspannung auf 200 kV zu gehen, trotzdem die Wandler nach unseren heutigen Begriffen gewaltig überdimensioniert waren. Heute sind wir soweit, dass ein 100-kV-Spannungswandler nur noch 900 kg wiegt und dass wir ihn als Typenprobe 8 Stunden lang einer Spannung von

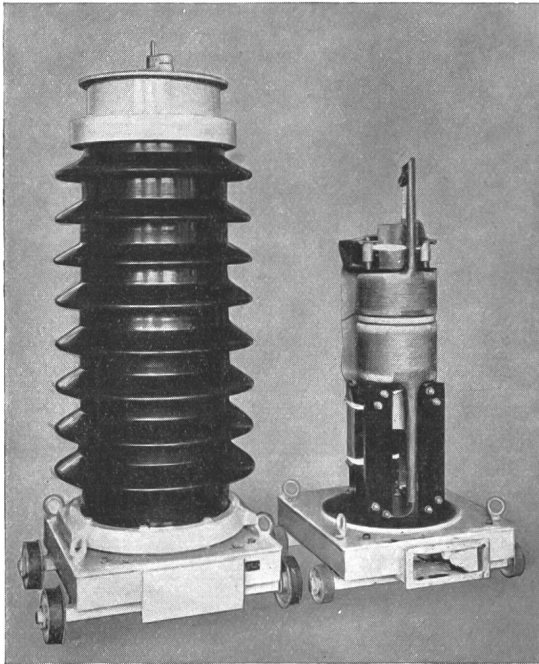


Fig. 4.

110-kV-Stützerspannungswandler, geschlossen und offen.
Masstab etwa 1 : 25.

240 kV bei 150 Per./s aussetzen konnten, und dass anschliessend dann der Durchschlag erst bei etwa 400 kV erfolgte. Das ist erreicht worden im wesentlichen durch eine vollkommene Aenderung des Wicklungsaufbaues und durch die Verwendung des Isoliermantelprinzips (Fig. 4). Wir haben vor einigen Jahren für die hohen Spannungen *Kaskaden-Spannungswandler* gebaut; wir sind aber wieder davon abgegangen, weil die Herstellungskosten zu hoch waren und die Materialersparnis mehr als kompensiert haben. Eine grosse Anzahl dieser

⁵⁾ Vergl. Keinath, ATM, Arch. techn. Messen, Z. 250—1, Jan. 1932.

Wandler ist im Betriebe; es haben sich Störungen gezeigt, die aber im wesentlichen einzig und allein auf Kittschwierigkeiten der Freiluftausführung zurückzuführen sind, Schwierigkeiten, mit denen leider jeder Hersteller auch heute noch immer rechnen muss, sofern er sich nicht entschliesst, von der Verwendung des Kittes in Freiluftanlagen ganz und gar abzusehen, so wie wir es neuerdings tun.

Die Kaskaden-Konstruktion erleichtert die Isolation nur für die normalfrequenten Spannungen; für die Stoßspannungen muss das oberste Glied imstande sein, den steilen Anstieg der Sprungwellenspannung, die einen Scheitelwert in der Grössenordnung von etwa einer halben Million Volt hat, aufzuschlucken. Es war deshalb notwendig, die Eingangswindung ausserordentlich dick zu isolieren, so dass von Leiter zu Leiter und insbesondere bei Eingangsleitern gegen den Kern sehr dicke Isolierschichten der Einwirkung der Sprungwellen widerstehen können. Diese Schwierigkeiten waren es aber nicht, die zum Verlassen der Kaskadenkonstruktion geführt haben, sondern einzig und allein fabrikationstechnische Verteuerungen und die Patentlage.

Eine ganz moderne Konstruktion ist auch der *Trockenspannungswandler* und um ihn geht auch heute noch der Kampf. Die Aufgabe, einen Span-

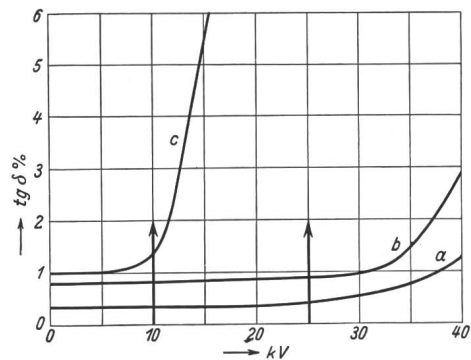


Fig. 5.

Verlustwinkel-Messung an drei normalen Spannungswandlern der Reihe 10 (Windungsprobe vorgeschrieben mit 25 kV, 5 min).

- a Oelwandler.
- b Trockenschaltung mit im Vakuum imprägnierter Wicklung.
- c Trockenwandler mit hohem Verlustwinkel.

nungswandler trocken zu isolieren, ist viel weniger leicht als bei einem Stromwandler. Man kann zwar einen explosions sicheren Trockenspannungswandler herstellen, nicht aber einen qualmsicheren Wandler, weil zwischen den einzelnen Windungen noch immer viel zu viel Isolierstoff untergebracht werden muss und dafür noch keine zufriedenstellende Lösung gefunden worden ist. Nach meinem Dafürhalten sollte man den Oelspannungswandler vorziehen und lieber höhere Spannungsreihen verwenden, um absolut sicher zu gehen. Wir sind beim VDE mit der Prüfspannung der Spannungswandler in den letzten Jahren ausserordentlich weit gegang-

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 ⁶⁾

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.

⁶⁾ Vorgelesen von cand. ing. E. Liechty, hier gekürzt wiedergegeben.