

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins  
**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke  
**Band:** 64 (1973)  
**Heft:** 2

**Artikel:** Messverfahren zur Kontrolle des Isolierungszustandes von Hochspannungsgeneratoren während des Betriebs  
**Autor:** Schnell, L.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-915507>

### **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:** 03.04.2026

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

# Messverfahren zur Kontrolle des Isolierungszustandes von Hochspannungsgeneratoren während des Betriebs

Von L. Schnell

621.317.333 : 621.313.12.027.3

*Unter den Ursachen der Betriebsstörungen von Kraftwerksgeneratoren kommt der Fehler der Statorwicklung mit grosser Häufigkeit vor. Infolge des Fehlers kann ein bedeutender Ausfall in der Energieherstellung auftreten und dabei können auch die Reparationskosten der beschädigten Maschine beträchtlich sein. Deshalb sind diejenigen Untersuchungsmethoden unbedingt beachtenswert, die sich mit der Kontrolle des Isolierungszustandes des Stators befassen und die Möglichkeit suchen, wie man das Schadhafwerden seiner Isolation frühzeitig erkennen und dadurch einer unerwarteten Betriebsstörung vorbeugen kann.*

*Die folgende Arbeit behandelt ein Verfahren, das sich zur Kontrolle des Isolierungszustandes von Generatoren während des Betriebs eignet. Das Verfahren wurde an einem Kleingenerator von 2 MVA mit gutem Ergebnis erprobt.*

*L'une des fréquentes causes de pannes d'alternateurs d'usines génératrices est due à des défauts dans l'enroulement statorique, ce qui peut donner lieu à un manque considérable dans la production d'énergie électrique, ainsi qu'à de coûteuses réparations de la machine. Il importe donc d'appliquer des méthodes permettant de contrôler l'état d'isolement du stator et de reconnaître à temps un endommagement, de façon à pouvoir éviter une panne subite.*

*L'auteur traite d'un procédé qui convient pour contrôler l'état de l'isolement d'alternateurs durant le service. Ce procédé a été essayé avec un bon succès à un petit alternateur de 2 MVA.*

## 1. Einleitung

Die Kontrolle des Isolierungszustandes der Statorwicklung eines Generators kann bei der ausser Betrieb gesetzten Anlage mit den bekannten Methoden erfolgen, z. B. durch Messung des Verlustfaktors, durch Ionisationsmessung, durch Kontrolle mit Gleichspannung usw. [1]<sup>1)</sup>. Obwohl man keinen solchen — mit einer zerstörungsfreien Methode — messbaren Parameter kennt, der über die augenblickliche Durchschlagfestigkeit der schwächsten Stelle der Isolation eindeutig Aufschluss geben würde, ist es doch möglich, aus den Ergebnissen der mit verschiedenen Methoden und zu verschiedenen Zeitpunkten durchgeführten Messungen auf das zu erwartende Verhalten der Isolation gewisse Folgerungen zu ziehen.

Natürlich haben die periodischen Kontrolluntersuchungen den Nachteil, dass die nach der Untersuchung auftretenden Fehler erst bei der nächsten Kontrolle entdeckt werden — angenommen, dass in der Zwischenzeit kein Durchschlag der Isolation erfolgt. Der Zustand der Statorisolation eines in Betrieb stehenden Generators wird von dem Körperschlusschutz kontrolliert und dieser spricht an, wenn die Leitfähigkeit zwischen Leiter und Eisenkörper wesentlich ansteigt, d. h. wenn ein Schluss erfolgt.

Der Körperschluss-Schutz gibt aber keine Information über den Vorgang des Schadhafwerdens der Isolation, sondern signalisiert nur das Ende des Vorganges, d. h. den Körperschluss. Es wäre interessant und lehrreich zu verfolgen, welche Vorgänge zwischen dem Anfang des Schadhafwerdens einer gesunden Isolation und dem Kurzschluss abklingen. Bei einer solchen Untersuchung könnte man die Abhängigkeit des Isolierungszustandes von den Betriebsverhältnissen und von der Betriebszeit beobachten, ferner würde sich eine Möglichkeit bieten, einen anfänglichen Isolationschaden schon vor dem Ansprechen der Schutzeinrichtung zu entdecken.

Die vorliegende Arbeit behandelt ein Verfahren, das die obige Aufgabe so löst, dass der durch die Isolation fließende Strom bzw. dessen Wirk- und Blindkomponente während des

Betriebes gemessen werden. Die ständige Messung und Registrierung dieser Komponenten ermöglicht, den Isolierungszustand laufend zu beobachten und den Isolationsfehler schon im Anfangsstadium zu erkennen [2].

Das Messverfahren wurde an einem kleinen Generator von 2 MVA mit guten Ergebnissen erprobt.

## 2. Messprinzip

Es soll die in Fig. 1a dargestellte, in Eisen eingebettete Wicklung A—B (eine Phasenwicklung eines Dreiphasengenerators) betrachtet werden. Punkt A der Wicklung sei der Sternpunkt des Systems, der bei einem ungestörten Betrieb mit guter Annäherung am Erdpotential ist:  $U_A \approx 0$ . Der Eingangs- bzw. Ausgangsstrom der Phasenwicklung soll mit  $i^*$  bzw.  $i$  bezeichnet werden. Dann fließt der Differenzstrom

$$\Delta i = i^* - i$$

durch die Isolation zwischen Wicklung und Eisen. Die in der Wirklichkeit verteilt auftretende Isolieradmittanz soll durch die im Punkt B konzentrierte Admittanz  $Y = G + j\omega C$  ersetzt werden.  $Y_0$  ist die Admittanz zwischen Sternpunkt und Erde; es sei angenommen, dass sie wesentlich grösser ist als  $Y$ .

Wenn der Differenzstrom  $\Delta i$  mit hoher Genauigkeit gemessen und seine auf Spannung  $U$  bezogene reelle und imaginäre Komponente bestimmt werden, lassen sich Leitfähigkeit und Kapazität der Wicklungsisolation gegen den geerdeten Eisenkörper (und, wie später nachgewiesen wird, gegen die benachbarten Phasenwicklungen) mit guter Annäherung während des Betriebes messen.

Fig. 1b zeigt die Spannungsverteilung  $U(l)$  längs der Phasenwicklung der Länge  $L$ , wobei ausser acht gelassen wird, dass diese Verteilung wegen der Verschiedenheit der Phasen der in den einzelnen Stäben der Wicklungen induzierten Spannungen nicht vollkommen linear ist.

Anhand von Fig. 1 können der reelle und der imaginäre Teil des Differenzstroms  $\Delta i$  bestimmt werden. Als reell wird weiterhin die mit  $U$  gleichphasige Komponente betrachtet. Die auf

<sup>1)</sup> Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

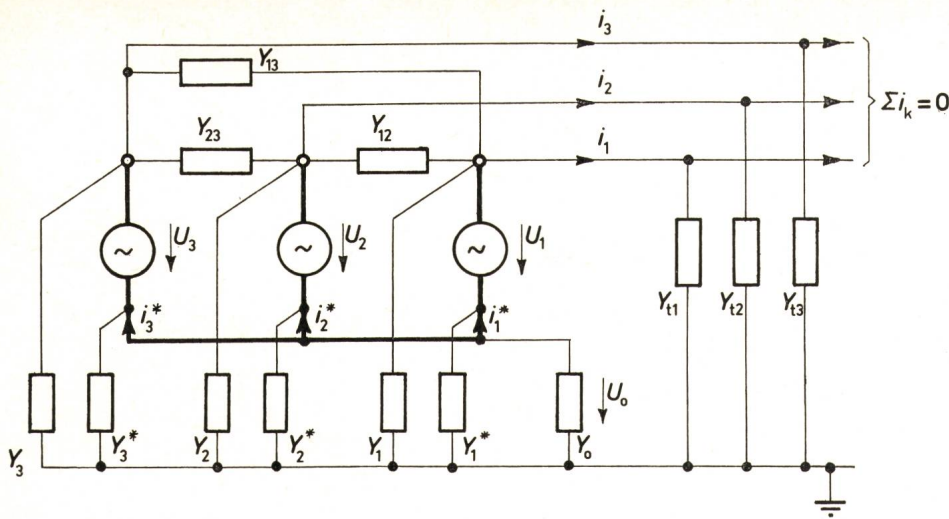


Fig. 2  
Blockschema der Isolierung eines  
Dreiphasengenerators

$Y_1, Y_2, Y_3$  bzw.  $Y_1^*, Y_2^*, Y_3^*$   
in die Wicklungsenden reduzierte  
Admittanzen gegen Erde  
 $Y_0$  Admittanz zwischen Sternpunkt  
und Erde  
 $Y_{t1}, Y_{t2}, Y_{t3}$  Admittanzen zwischen  
dem zum Generator geschalteten Netz  
und der Erde  
 $U_1, U_2, U_3$  Phasenspannungen;  
 $U_0$  Sternpunktspannung  
 $i_1^*, i_2^*, i_3^*$  bzw.  $i_1, i_2, i_3$  Eingangs- bzw.  
Ausgangsströme der Wicklungen

die Längeneinheit der Wicklung entfallende Leitfähigkeit bzw. Kapazität soll entlang der Länge konstant sein und ihr Wert mit  $G'$  bzw.  $C'$  bezeichnet werden. Somit wird

$$\operatorname{Re}(\Delta i) = \int_0^L U G' \frac{l}{L} dl = U \frac{G' L}{2} = U \frac{G}{2} \quad (1)$$

und

$$\operatorname{Im}(\Delta i) = \int_0^L U \omega C' \frac{l}{L} dl = U \omega \frac{C' L}{2} = U \omega \frac{C}{2} \quad (2)$$

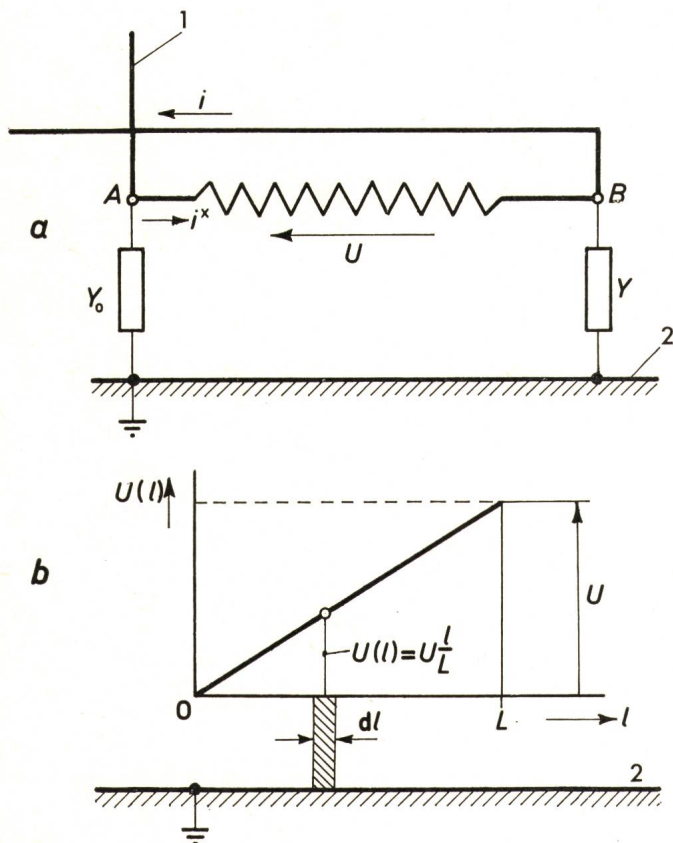


Fig. 1  
Spannungsverteilung einer Generatorwicklung

- 1 Sternpunkt
  - 2 Eisenkörper
  - $U$  Phasenspannung
  - $i^*, i$  Eingangs- und Ausgangsströme
  - $l, L$  Wicklungslänge
  - $Y, Y_0$  Admittanzen gegen Erde
- Weitere Bezeichnungen siehe im Text

$G$  und  $C$  bedeuten diejenige Leitfähigkeit bzw. Kapazität, die zwischen Wicklung und Eisenkörper vorhanden sind, wenn die Messung ausser Betrieb, in herkömmlicher Weise, mit der in Fig. 1b gestrichelt gezeichneten Spannungsbeanspruchung durchgeführt wird.

Der Verlustfaktor der Isolation ist:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\operatorname{Re}(\Delta i)}{\operatorname{Im}(\Delta i)} = \frac{G}{\omega C} \quad (3)$$

Die bei der Messung des Differenzstroms  $\Delta i$  bzw. der Werte  $\operatorname{Re}(\Delta i)$  und  $\operatorname{Im}(\Delta i)$  auftretenden Genauigkeitsanforderungen sind sehr gross. Das wird durch folgende Angaben gut veranschaulicht: Die Grössenordnung des Stromes in der Phasenwicklung eines Grossgenerators ist  $10^3$  A, während die Grössenordnung von  $\Delta i$  bei einem nicht wassergekühlten Generator zwischen 1 und  $10^{-2}$  A liegt. Wenn die Grössenordnung von  $\operatorname{tg} \delta = 10^{-2}$  ist, so wird sich für  $\operatorname{Re}(\Delta i)$  ein Wert von der Grössenordnung  $10^{-2}$  und  $10^{-3}$  A ergeben. In einem extremen Fall hat man also bei  $10^3$  A eine Differenz von  $10^{-3}$  A zu messen, mit einer Unsicherheit von einigen Prozenten.

Im weiteren wird die Anwendung des oben geschilderten Messprinzips bei einem Dreiphasengenerator beschrieben und ein Messverfahren behandelt, das ermöglicht, die Werte von  $\operatorname{Re}(\Delta i)$  und  $\operatorname{Im}(\Delta i)$  mit ausreichender Genauigkeit zu messen und dadurch den Isolierungszustand der Statorwicklung während des Betriebes zu kontrollieren.

### 3. Der Dreiphasengenerator als Messobjekt

Fig. 2 stellt das Ersatzschema der Isolation eines Dreiphasengenerators dar.  $Y_k$  und  $Y_k^*$  ( $k = \text{mod. } 3$ , d. h. die auf die einzelnen Phasen bezogenen Indexe) sind die auf die Enden der einzelnen Phasenwicklungen,  $Y_{k(k-1)}$  die zwischen die Ausgangsklemmen reduzierte Isolationsadmittanz und  $Y_{tk}$  die Streuadmittanz gegen Erde des dem Generator angeschlossenen Kreises.

Beim Prüfen der Generatorisolationen wird irgendwelche Resultante dieser Admittanzen gemessen.

Als Beispiel soll der Fall betrachtet werden, wo der Isolierungszustand der Phasenwicklung 1 des ausser Betrieb gesetzten Generators gemessen wird, z. B. mit einer Scheringbrücke. In diesem Fall wird die Sternpunktverbindung der Phasenwicklung, sowie die Admittanz  $Y_0$  zwischen Erde und Phasenwicklung aufgehoben, während die Phasenwicklungen 2 und 3 geerdet werden. Das Messen wird mittels der zwischen dem geerdeten Eisenkörper und der Phasenwicklung 1 gelegten

Spannung vorgenommen. Das Messergebnis liefert die Resultante der Isolationsadmittanzen zwischen Wicklung  $l$  und den geerdeten Teilen.

Es soll nun untersucht werden, welche Information über die Isolierung in dem Differenzstrom

$$\Delta i_k = i_k^* - i_k$$

der Phasenwicklung  $k$  bzw. in dessen reellen und imaginären Teilen bei einem erregten, laufenden Generator enthalten sind.

Aufgrund von Fig. 2 kann folgender Zusammenhang geschrieben werden:

$$\begin{aligned} \Delta i_k &= U_0 Y_k^* + (U_0 + U_k) Y_k + \\ &+ (U_k - U_{k+1}) Y_{k(k+1)} + (U_k - U_{k-1}) Y_{k(k-1)} = \quad (4) \\ &= U_0 (Y_k^* + Y_k) + U_k (Y_k + Y_{k(k+1)} + Y_{k(k-1)}) - \\ &\quad - U_{k+1} Y_{k(k+1)} - U_{k-1} Y_{k(k-1)} \end{aligned}$$

ferner

$$U_0 = \frac{\sum U_k (Y_k + Y_{tk})}{Y_0 + \sum (Y_k^* + Y_k + Y_{tk})} \quad (5)$$

Das Ziel der gegenwärtigen Arbeit ist, eine geeignete Methode zum Erkennen des anfänglichen Isolationsschadens zu finden. Am Anfang handelt es sich um keinen Körperschluss und die Symmetrie der Isolationsadmittanzen, die man in einem normalen, fehlerlosen Zustande als vollkommen annimmt, sei im Anfangsstadium des Fehlers als geringfügig deformiert betrachtet.

In diesem Fall kann mit Recht angenommen werden, dass  $U_0 \ll U_k$  und, nachdem  $Y_k$  und  $Y_k^*$  annähernd gleich sind, das erste Glied der Gl. (4) im Vergleich mit den anderen Gliedern vernachlässigt werden kann. Demzufolge wird im weiteren der Zusammenhang

$$\begin{aligned} \Delta i_k &= U_k (Y_k + Y_{k(k+1)} + Y_{k(k-1)}) - \\ &\quad - U_{k+1} Y_{k(k+1)} - U_{k-1} Y_{k(k-1)} \quad (6) \end{aligned}$$

untersucht. Es soll ein symmetrischer Spannungsstern angenommen werden:

$$\begin{aligned} U_1 &= U \\ U_2 &= U e^{j120^\circ} \\ U_3 &= U e^{-j120^\circ} \end{aligned}$$

Mit diesen lässt sich der Differenzstrom  $\Delta i_k$  pro Phase schreiben:

$$\Delta i_1 = U_1 \left[ Y_1 + 1,5 (Y_{12} + Y_{13}) + j \frac{\sqrt{3}}{2} (Y_{13} - Y_{12}) \right] = U_1 Y_{10} \quad (7a)$$

$$\Delta i_2 = U_2 \left[ Y_2 + 1,5 (Y_{23} + Y_{21}) + j \frac{\sqrt{3}}{2} (Y_{21} - Y_{23}) \right] = U_2 Y_{20} \quad (7b)$$

$$\Delta i_3 = U_3 \left[ Y_3 + 1,5 (Y_{31} + Y_{32}) + j \frac{\sqrt{3}}{2} (Y_{32} - Y_{31}) \right] = U_3 Y_{30} \quad (7c)$$

Die Werte  $Y_{k0}$  werden im weiteren Phasenadmittanzen genannt.

Man kann Gl. (7) in Real- und Imaginärkomponente zerlegen. Die Richtung der Realkomponente von  $\Delta i_1$ ,  $\Delta i_2$  und  $\Delta i_3$  stimmt mit der Richtung von  $U_1$ ,  $U_2$  und  $U_3$  überein. Somit kann man die Substitution  $U_k = U$  anwenden:

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}(\Delta i_1) &= U \left[ G_1 + 1,5 (G_{12} + G_{13}) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{\sqrt{3}}{2} \omega (C_{12} - C_{13}) \right] = U G_{10} \quad (8a) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}(\Delta i_2) &= U \left[ G_2 + 1,5 (G_{23} + G_{12}) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{\sqrt{3}}{2} \omega (C_{23} - C_{12}) \right] = U G_{20} \quad (8b) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}(\Delta i_3) &= U \left[ G_3 + 1,5 (G_{13} + G_{23}) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{\sqrt{3}}{2} \omega (C_{13} - C_{23}) \right] = U G_{30} \quad (8c) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \operatorname{Im}(\Delta i_1) &= U \left[ C_1 + 1,5 (C_{12} + C_{13}) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{\sqrt{3}}{2\omega} (G_{13} - G_{12}) \right] = U \omega C_{10} \quad (9a) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \operatorname{Im}(\Delta i_2) &= U \left[ C_2 + 1,5 (C_{23} + C_{12}) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{\sqrt{3}}{2\omega} (G_{12} - G_{23}) \right] = U \omega C_{20} \quad (9b) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \operatorname{Im}(\Delta i_3) &= U \left[ C_3 + 1,5 (C_{13} + C_{23}) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{\sqrt{3}}{2\omega} (G_{23} - G_{13}) \right] = U \omega C_{30} \quad (9c) \end{aligned}$$

Ein interessantes Ergebnis erhält man durch die Summierung der Gleichungen (7), wie folgt:

$$\begin{aligned} \sum \Delta i_k &= \Delta i_1 + \Delta i_2 e^{-j120^\circ} + \Delta i_3 e^{j120^\circ} = \\ &= U \sum Y_{k0} = U [Y_1 + Y_2 + Y_3 + 3 (Y_{12} + \\ &\quad + Y_{13} + Y_{23})] = U Y_s \quad (10) \end{aligned}$$

Aus dieser ergibt sich:

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}(\Delta i_k) &= U \sum G_{k0} = U [G_1 + G_2 + \\ &\quad + G_3 + 3 (G_{12} + G_{13} + G_{23})] = U G_s \quad (11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \operatorname{Im}(\Delta i_k) &= U \omega \sum C_{k0} = U \omega [C_1 + C_2 + \\ &\quad + C_3 + 3 (C_{12} + C_{13} + C_{23})] = U \omega C_s \quad (12) \end{aligned}$$

Die Isolationsadmittanz  $Y_s$ , bzw. ihre Komponenten  $G_s$  und  $C_s$  sind charakteristisch für den Isolierungszustand, da sie die für die Maschine «gefährlichen» Isolationskennwerte enthalten.

Wie aus Zusammenhängen (8) und (9) hervorgeht, hat man zur Messung der Komponenten der Isolierungsadmittanz, d. h. der «Leitfähigkeit» und der «Kapazität» der Isolation über die Phasenspannungen  $U_k$  und die Differenzströme  $\Delta i_k = i_k^* - i_k$  Information einzuholen. Über die Phasenspannungen liefert ein Spannungswandler oder ein Messkondensator Informationen. Ein wesentlich schwereres Problem bildet aber die Messung der Ströme  $\Delta i_k$ .

#### 4. Messung des durch die Phasenwicklungsisolierung fließenden Stromes

Wie schon erwähnt, ist die zu lösende Aufgabe die Messung des Unterschiedes der Grössenordnung von  $10^{-2}$  A zwischen Eingangs- und Ausgangsstrom einer Phasenwicklung mit einer Unsicherheit von einigen Prozenten, während in der Phasenwicklung ein Strom in der Grössenordnung von  $10^3$  A fließt.

Den Eingangs- und Ausgangsstrom abgeondert zu messen und aus den Messergebnissen eine Differenz zu bilden ist aussichtslos, da der Fehler der so erhaltenen Messergebnisse wegen der Fehler der einzelnen Messungen unzulässig gross wäre.

Die Messaufgabe lässt sich aber durch die Anwendung eines induktiven Stromkomparators lösen. Das Messprinzip zeigt Fig. 3. Der ringförmige Eisenkern  $T$  wird durch die Ströme  $i_k^*$ ,  $i_k$  und  $i_{Tk}$  erregt. Die in dem Eisenkern auftretende Induktion ist

$$B_k = \mu \frac{1}{l_m} (i_k^* - i_k - i_{Tk} N_T)$$

wo  $\mu$  die Permeabilität des Eisenkerns,  $l_m$  die Durchschnittslänge der Kraftlinien,  $N_T$  die Windungszahl der Wicklung und  $i_{Tk}$  den Strom bedeuten.

Die zwischen den Klemmen der Detektorwicklung von  $N_d$  Windungszahl entstehende Leerlaufspannung ist:

$$U_{dk} = - \frac{d\Psi_k}{dt} = \omega N_d A B_k = \omega N_d \frac{\mu A}{l_m} (i_k^* - i_k - i_{Tk} N_T)$$

wo  $\Psi$  der Wicklungsfluss des Eisenkerns und  $A$  der Querschnitt des Eisens sind. Wird die Bedingung  $U_{dk} = 0$  erfüllt, so gilt die Gleichung:

$$\Delta i_k = N_T i_{Tk} \quad (13)$$

Der Zustand  $U_{dk} = 0$ , der als Ausgleichzustand des Komparators bezeichnet wird, kann durch die Durchleitung des in Gl. (13) bestimmten Stromes  $i_{Tk}$  durch die Wicklung der Windungszahl  $N_T$  erreicht werden. Wenn die Ströme  $i_{Tk}$  bzw. ihre reellen und imaginären Teile, ferner die Phasenspannungen  $U_k$  bekannt sind, werden aufgrund der Zusammenhänge (11) und (12) auch die Komponenten der Isolierungsadmittanz des Generators bekannt.

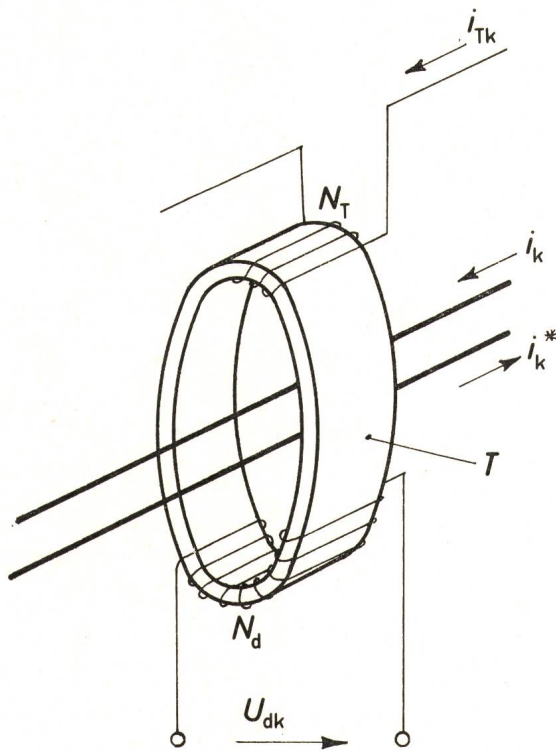


Fig. 3

Blockschema des Stromkomparators zur Messung des Differenzstromes  $\Delta i_k = i_k^* - i_k$

- $T$  ringförmiger Eisenkern
- $i_{Tk}$  Strom der Wicklung der Windungszahl  $N_T$
- $U_{dk}$  Spannung der Detektorwicklung der Windungszahl  $N_d$
- $i_k^*$ ,  $i_k$  Erregerströme

Natürlich enthält auch eine mit dem Stromkomparator durchgeführte Messung einen Fehler, dieser kann aber durch die entsprechende Konstruktion des Komparators gering gemacht werden. Durch die konzentrische Anordnung der Leitungen der Ströme  $i_k^*$  und  $i_k$ , durch die Anwendung eines homogenen Eisenkerns grosser Permeabilität und durch die genau symmetrische Lage der Wicklungen  $N_T$  und  $N_d$  kann der auf Strom  $i_k$  bezogene relative Messfehler beim Messen von  $\Delta i_k$  in der Grössenordnung von  $10^{-7}$  gehalten werden, was die Genauigkeitsanforderungen vollkommen erfüllt [3].

Die praktische Anwendung des beschriebenen Messprinzips wirft natürlich zahlreiche Probleme auf. Im weiteren seien eine Versuchsausführung des Messverfahrens und die bisher gewonnenen Erfahrungen erörtert.

### 5. Praktische Ausführung des Messverfahrens

Eine aufgrund des behandelten Prinzips ausgeführte Messeinrichtung wurde an dem Kleingenerator eines Kraftwerks angeschlossen. Im folgenden seien die Konstruktion der Einrichtung und die Versuchsergebnisse behandelt.

#### 5.1 Ausführung des Stromkomparators zur Messung von $\Delta i_k$

Fig. 4 zeigt das Schema des Stromkomparators. Allen drei Phasenwicklungen des Generators ist je ein Komparator angeschlossen.

Die Ausgangsklemme der Phasenwicklung 7 ist an den Kupferstab 1 angeschlossen, der in der Achse des Toroid-Eisenkerns 4, mit grosser Anfangspermeabilität, liegt. Die Phasenwicklungsklemme an der Sternpunktseite ist an das zum Kupferstab 1 konzentrisch gelegte Kupferrohr 2 angeschlossen und der Sternpunkt wird an der Klemme 6 gebildet. Die erwähnten Leitungen werden voneinander und von der geerdeten Abschirmung 5 des Komparators durch Isolationen 3 getrennt.

#### 5.2 Ständiger automatischer Ausgleich des Stromkomparators

Zur Erfüllung der Bedingung  $U_{dk} = 0$  sind die Ströme  $i_{Tk}$  durch solche Generatoren zu erzeugen, deren Ausgangsstromgrösse und -phase geregelt werden können. Die Regelung muss selbsttätig sein, da sonst die erwünschte kontinuierliche Kontrolle nicht verwirklicht werden kann.

Der kontinuierliche automatische Ausgleich kann am besten mit einer integrierenden Regelung gelöst werden, da der konstante Fehler derselben prinzipiell gleich Null ist. Für den betrachteten Fall würde dies die automatische Regelung von 6 Komponenten bedeuten und dementsprechend die Anwendung von 6 Servo-Systemen erfordern.

Eine weniger genaue, aber dem Ziel entsprechende Lösung kann man erreichen, wenn die Ströme  $i_{Tk}$  unmittelbar aus den Spannungen  $U_{dk}$  der Detektorwicklungen erzeugt werden. In der Versuchseinrichtung wurde diese Lösung angewendet.

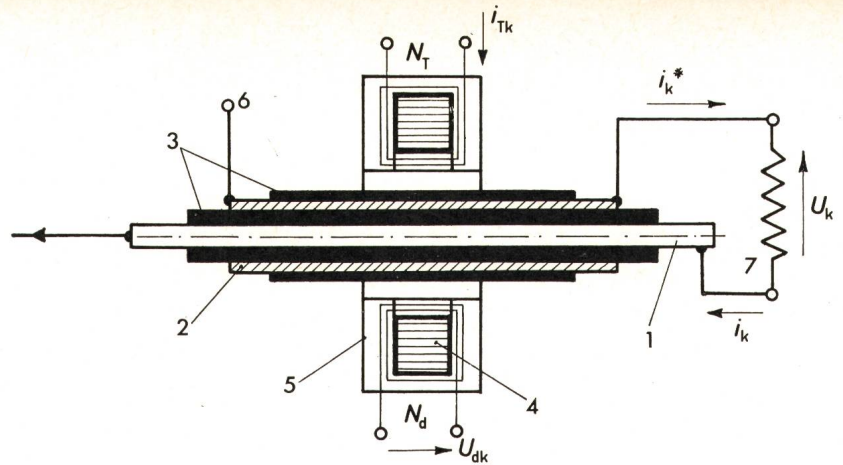
Das Schema wird in Fig. 5 dargestellt. Der Eingang der elektronischen Einheit EE mit der Eingangsimpedanz  $Z_a$  ist an die Wicklung des Stromkomparators (mit der Windungszahl  $N_d$ ) angeschlossen und leitet einen der Spannung  $U_{dk}$  verhältnismässigen Strom  $i_{Tk}$  durch die Wicklung der Windungszahl  $N_T$ , die den Komparator erregt. Bei entsprechender Schaltung wird  $i_{Tk}$  den Komparator der  $\Delta i_k$  entgegengesetzt erregen, d. h. sie will ihn ausgleichen. In idealem Falle wird die Bedingung des Ausgleichzustandes durch den Zusammenhang gegeben:

$$i_{Tk} = \frac{N_k}{N_T} \Delta i_k$$

Fig. 4  
**Schema des Stromkomparators in der Versuchseinrichtung**

- 1, 2 Kupferstab bzw. -rohr
- 3 Isolation
- 4 Eisenkern des Stromkomparators
- 5 Schirmung
- 6 Sternpunkt
- 7 Phasenwicklung

Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 2 und 3



Infolge der begrenzten Schleifenverstärkung des Kreises wird der wirkliche Zusammenhang zwischen  $i_{Tk}$  und  $\Delta i_k$  durch die Gleichung ausgedrückt:

$$i_{Tk} = \frac{N_k}{N_T} \Delta i_k (1 + \varepsilon) \quad (14)$$

Zwischen dem Fehlervektor  $\varepsilon$  und der Schleifenverstärkung des Kreises besteht eine Reziprozität; durch die Steigerung der Schleifenverstärkung kann also der Fehler vermindert werden. Zur Messung der Real- und Imaginärkomponenten des Stromes  $i_{Tk}$  wurde der Widerstand  $R_k$  in den Kreis des  $i_{Tk}$  eingeschaltet (Fig. 5). Die an den Klemmen von  $R_k$  auftretende Spannung  $U_{Tk} = i_{Tk} R_k$  wird auf die bekannte Weise durch einen phasempfindlichen Gleichrichter auf die dem  $U_k$  phasengleiche und dazu senkrechte Komponenten zerlegt. Am Ausgang des Phasendetektors erhält man den gesuchten Komponenten verhältnismäßige Gleichspannungen, die registriert werden. Die Steuerspannung des Phasendetektors liefert der durch den Spannungswandler reduzierte Anteil der Phasenspannungen  $U_k$ .

In Fig. 6 wird das Blockscheema der gesamten Messeinrichtung dargestellt. Die Anpassungseinheiten  $A_1$ ,  $A_2$  und  $A_3$  erzeugen das Steuersignal der Phasendetektoren FD aus den Spannungen der Spannungswandler S. An den Ausgängen der Phasendetektoren werden die Filter F angeschlossen, an deren Klemmen die den Real- und Imaginärkomponenten der Ströme  $\Delta i_k$  verhältnismäßige Signale erscheinen. Die Summierer  $\Sigma G$  und  $\Sigma C$  bilden die Summen

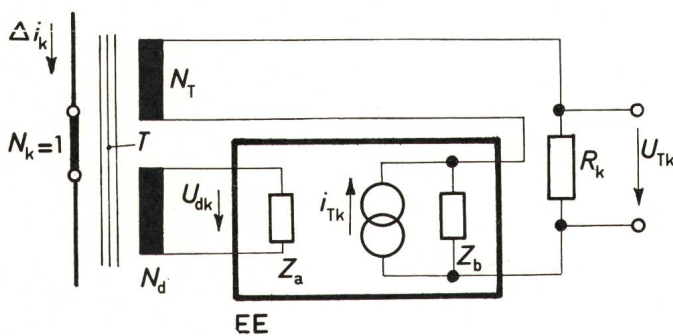


Fig. 5  
**Elektronische Einheit für den automatischen Ausgleich des Stromkomparators**

- EE elektronische Einheit
- $Z_a, Z_b$  Eingangs- und Ausgangsimpedanzen
- $R_k$  Arbeitswiderstand
- $\Delta i_k$  Differenzstrom
- $N_T$  Erregerwindungszahl des Stromkomparators
- $U_{Tk}$  Spannung an den Klemmen des Widerstandes  $R_k$

Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 3

$$\frac{\sum \operatorname{Re}(\Delta i_k)}{U} = G_s \quad \text{und} \quad \frac{\sum \operatorname{Im}(\Delta i_k)}{U} = C_s$$

Die Ausgangssignale der Phasendetektoren sowie die Summen  $\Sigma G$  und  $\Sigma C$  wurden mit 8 einkanäligen Schreibwerken in Abhängigkeit zur Zeit registriert.

Aufgrund der Gl. (8) und (9) sind die registrierten Komponenten von  $\Delta i_k$  den Komponenten der Phasenadmittanz, die Ausgangssignale der Summierer  $\Sigma G$  und  $\Sigma C$  aber gemäss Gl. (10) und (11) den Komponenten der Isolieradmittanz des Generators verhältnismäßig.

Die Phasendetektierung bildet natürlich eine neue Fehlerquelle. Im Rahmen dieser Arbeit wird auf die ausführliche Analyse der Fehler verzichtet. Es ist nur zu erwähnen, dass die — mit den vorliegenden Einrichtungen verbundene — Fehleranalyse beweist, dass die relative Unsicherheit den gemessenen  $G_{k0}$  und  $C_{k0}$  kleiner als 10% sein soll. Als eine zusätzliche Fehlerquelle ist noch die Unsicherheit der Registrierinstrumente in Betracht zu nehmen, welche man besonders bei kleinen Ausschlägen nicht ausser acht lassen darf.

Die in Fig. 7 dargestellten Messergebnisse unterstützen die theoretischen Überlegungen bezüglich der zu erwartenden Messunsicherheiten.

## 6. Messergebnisse

Die beschriebene Versuchseinrichtung wurde an einem Generator installiert, der folgende Angaben hatte: Leistung: 2,15 MVA,  $\cos \varphi = 0,7$ , Spannung  $U = 3150$  V,  $f = 50$  Hz,  $n = 3000$  U./min. Ziel des Versuchs war vor allem aufgrund der Arbeit der Einrichtung ein Bild von der Brauchbarkeit des Verfahrens zu gewinnen.

Vorerst hatte man zu klären:

- a) Ob die ausreichend genaue Messung der Ströme  $\Delta i_k$  unter Betriebsverhältnissen verwirklicht werden kann;
- b) Ob der gemessene  $\Delta i_k$  von dem durch die Wicklungen fließenden Belastungsstrom  $i_k$  unabhängig ist;
- c) Ob die Registrate der Real- und Imaginärkomponenten von  $\Delta i_k$  wirklich die in Gleichungen (11) und (12) enthaltenen Isolieradmittanz-Komponenten liefern;
- d) Ob die registrierten Daten sich wirklich eignen, über den Isolierzustand der Maschine praktisch brauchbare Information zu liefern.

Zur Klärung dieser Fragen wurden zahlreiche Untersuchungen durchgeführt. Fig. 7 enthält eine Serie von registrierten Daten, die von der Arbeit der Einrichtung ein Bild geben können. Fig. 7a zeigt

$$\frac{\operatorname{Re}(\Delta i_k)}{U} = G_{k0} \quad \text{und} \quad \sum \frac{\operatorname{Re}(\Delta i_k)}{U} = G_s$$

und Fig. 7b  $\frac{\operatorname{Im}(\Delta i_k)}{\omega U} = C_{k0} \quad \text{und} \quad \sum \frac{\operatorname{Im}(\Delta i_k)}{\omega U} = C_s$

Wie in den Gl. (8), (9), (11) und (12) nachgewiesen wurde, sind diese Werte den gegebenen Kombinationen der Leitfähigkeiten bzw. Kapazitäten der Wicklung verhältnismäßig.

Der Wert von  $U$  wurde der Nennspannung entsprechend stabilisiert und konnte deshalb als konstant betrachtet werden. Die Kurven a4 und b4 stellen die Summenströme dar, ihr Maßstab ist dreifach kleiner.

Dazu sei noch folgendes zu bemerken:

Bei der Einschaltung der Einrichtung (19 h) war die Maschine betriebswarm. In dem Zeitraum von 19 bis 20 h wurde die Belastung der Maschine zwischen 20 und 90 % des Nennwertes öfters geändert. Aus dem Diagramm geht eindeutig hervor, dass der Belastungsstrom  $i_k$  die gemessenen Werte  $\Delta i_k$  nicht beeinflusst hat.

Um die Richtigkeit der Messung auch quantitativ auswerten zu können, wurden  $G$  und  $C$  auf die in Fig. 8 dargestellte Weise durch Einschaltung von Elementen bekannten Wertes künstlich vergrößert. Durch die Einschaltung des Schalters  $S_1$  zwischen der Phase 1 des Generators und der Erde konnte eine aus den Komponenten  $G_1 = 0,11 \mu\text{S}$  und  $C_1 = 0,4 \text{ nF}$  bestehende Admittanz und mit dem Schalter  $S_2$  zwischen den Phasen 1 und 2 des Generators eine Konduktion von  $0,07 \mu\text{S}$

eingeschaltet werden. In Fig. 8 sind die Stromkomparatoren  $T_1$  und  $T_2$  eingezeichnet, welche die Differenzströme  $i_1^* - i_1 = \Delta i_1$  und  $i_2^* - i_2 = \Delta i_2$  bzw. ihre beim Einschalten entweder des Schalters  $S_1$  oder des Schalters  $S_2$  auftretende Änderung messen.

Die Stelle  $t_1$  im Registrierstreifen bedeutet die Einschaltung des Schalters  $S_1$  und  $t_1'$  seine Ausschaltung. Gemäss Diagramm a1 verursacht die Einschaltung einen Anstieg von  $0,1 \mu\text{S}$ , die Erhöhung der Leitfähigkeit wird also quantitative richtig gefühlt. In den Phasen 2 und 3 (Kurven a2 und a3) konnte keine Änderung beobachtet werden. Die Summierung weist ebenfalls eine Leitwertzunahme von etwa  $0,1 \mu\text{S}$  auf (Kurve a4).

An  $G_1'$  wurde auch ein Kondensator von  $C_1' = 0,4 \text{ nF}$  angeschlossen (Kurve b1 der Fig. 7b). Der registrierte Kapazitätsprung in der Phase 1 beträgt etwa  $0,35 \text{ nF}$ , die Phasen 2 und 3 sind unverändert, während die Kurve b4 der Summe ebenfalls einen Zuwachs von  $0,35 \text{ nF}$  aufweist.

Dieser Teil des Experiments weist darauf hin, dass die Einrichtung die Einschaltung von  $G_1'$  und  $C_1'$  bekannten Wertes zwischen Phase 1 und Erde richtig registriert.

Als folgender Schritt wurde der Schalter  $S_2$  eingeschaltet.  $t_2$  im Diagramm zeigt die Einschaltung und  $t_2'$  die Ausschaltung. Durch Einschaltung des Schalters wurde zwischen den Phasen 1 und 2 eine Konduktion  $G_{12}' = 0,07 \mu\text{S}$  eingefügt. Gemäss Zusammenhänge (8a) und (8b) muss sich diese Änderung sowohl in Phase 1 wie auch in Phase 2 manifestieren, und zwar mit einem 1,5-fachen Gewicht. In den Kurven a1 und

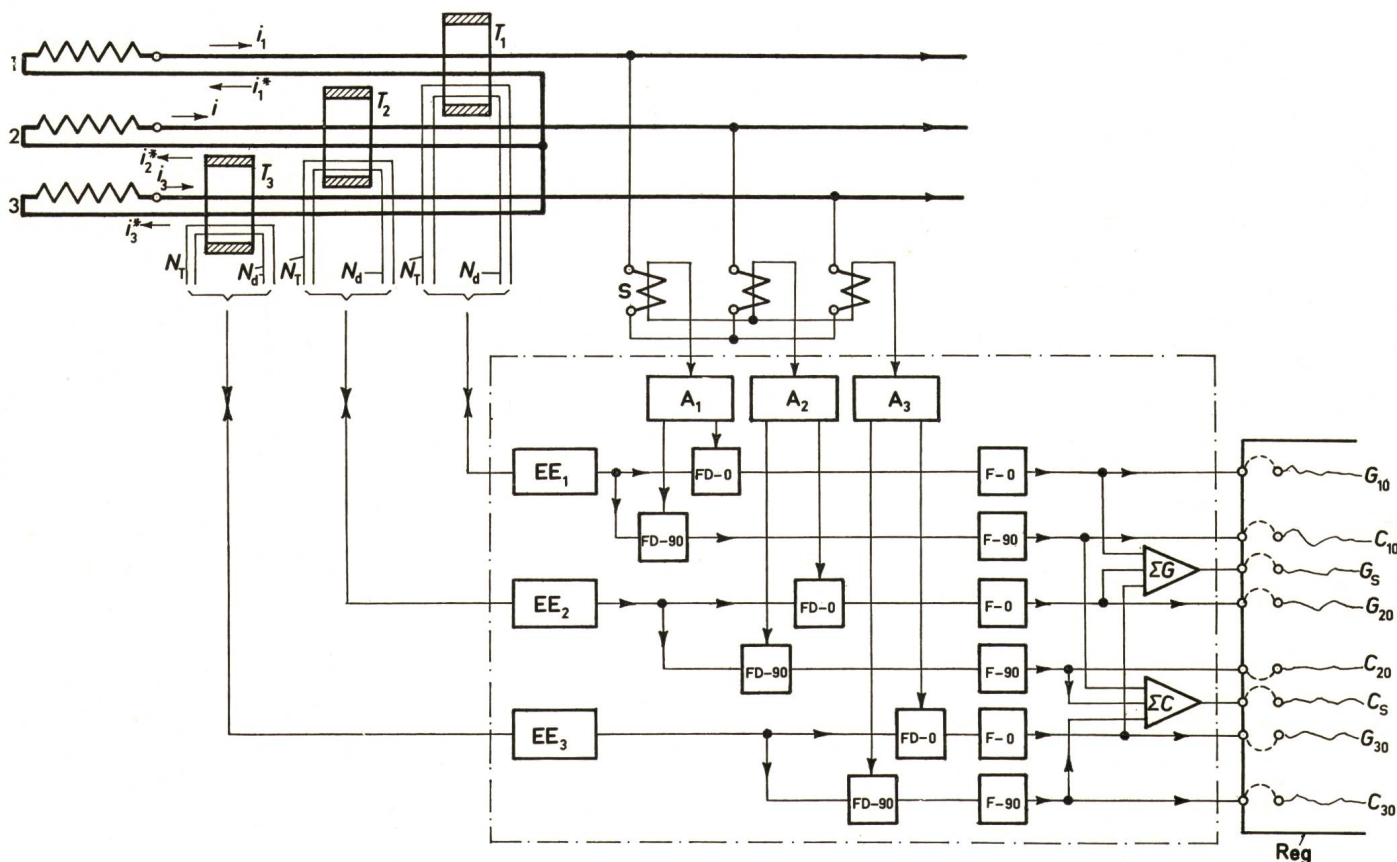


Fig. 6

**Blockschema der Versuchseinrichtung mit automatischem Ausgleich**

<i>A</i>	Anpassungseinheiten	<i>F-0, F-90</i>	Filter
<i>EE</i>	elektronische Einheiten	<i>Reg</i>	Registrierstreifen
<i>FD-0, FD-90</i>	Phasendetektoren zur Herstellung der Komponenten von $0^\circ$ bzw. $90^\circ$	<i>S</i>	Spannungswandler
		<i>1, 2, 3</i>	Phasenwicklungen

Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 2 und 3

a2 lassen sich Änderungen von 0,11 bzw. 0,12  $\mu\text{S}$  beobachten, während die Kurve a4 einen Zuwachs von 0,22  $\mu\text{S}$  aufweist, der dem Zusammenhang in Gl. (11) entspricht. Nach diesem erscheint die Leitwertänderung zwischen den Phasen mit einem dreifachen Gewicht.

In Fig. 7b beeinflusst die Einfügung von  $G'_{12}$  auch die kapazitiven Komponenten der Phasen 1 und 2. Im Sinne der Gl. (9a) und (9b) soll die Einfügung von  $G'_{12}$  in der Phase 1 eine Kapazitätsabnahme von  $\frac{\sqrt{3}}{2\omega} G'_{12} \approx 0,2 \text{ nF}$ , in der Phase 2 aber eine gleich grosse Kapazitätserhöhung verursachen. Kurven b1 und b2 beweisen, dass es wirklich so geschehen ist. In b4 erscheint dieser Einfluss natürlich nicht.

Nach Unterbrechung des Schalters  $S_2$  (Stelle  $t_2'$ ) wurde die Kühlung des Generators gesteigert und die Belastung ver-

mindert, wodurch eine geringfügige Abnahme der Komponenten der Isolierungsadmittanzen erfolgte.

Die Ergebnisse der Versuche beweisen, dass die Komponenten des durch die Isolation fließenden Stromes auch während der Belastung zuverlässig gemessen werden können und die Messergebnisse von dem Belastungsstrom der Wicklung nicht abhängen. Die Steigerung der Leitfähigkeit und der Kapazität der Wicklung um einen bekannten Wert wurde durch die Einrichtung richtig angezeigt; aus dem Vergleich der Registrierstreifen der einzelnen Phasen konnte sogar entschieden werden, ob der Isolationsfehler auf einen beginnenden Körperchluss oder Phasenschluss hinweist.

Nach der beschriebenen Untersuchung wurde die Maschine stillgelegt und die Kapazität und der Verlustfaktor der Phasenwicklungen bei Betriebsspannung auf die herkömmliche Weise gemessen. Die zwischen den einzelnen Phasen sowie zwischen den beiden anderen geerdeten Phasen und dem Eisenkörper gemessenen Admittanzwerte  $Y_k'' = G_k'' + j\omega C_k''$  ergaben im wesentlichen die gemäss Fig. 2 bezeichnete Admittanzsumme  $Y_k + Y_k^*$ , da die Admittanzen  $Y_{k(k-1)}$  und  $Y_{k(k+1)}$  zwischen den Phasen im Vergleich mit  $Y_k + Y_k^*$  vernachlässigt werden können. Ist die Leitfähigkeit und Kapazität längs der Wicklung gleichmässig, so ist  $Y_k = Y_k^*$ , und in diesem Fall muss die aus der Messung gewonnene Admittanz  $Y_{k0}$  — den bisherigen Erörterungen entsprechend — einen Wert von

$$Y_{k0} \approx \frac{Y_k''}{2} \approx Y_k$$

aufweisen.

Die Ergebnisse der beiden Messungen sind in Tabelle I verglichen.

In Tabelle I entsprechen die während des Betriebs gemessenen Werte von  $G_{k0}$  und  $C_{k0}$  den in Fig. 7a und 7b zu 20<sup>h</sup> gehörigen Grössen, die Werte von  $\text{tg } \delta$  wurden aber aus den zusammengehörigen Werten aufgrund von Gl.(3) errechnet. Im Laufe der Messungen ausser Betrieb wurden  $C_k''$  und  $\text{tg } \delta''$  durch eine mit Stromkomparator ausgerüstete, das seriengeschaltete Ersatzschema registrierende Einrichtung gemessen,  $G_k''$  dagegen berechnet. Im Sinne der vorherigen Betrachtungen ist

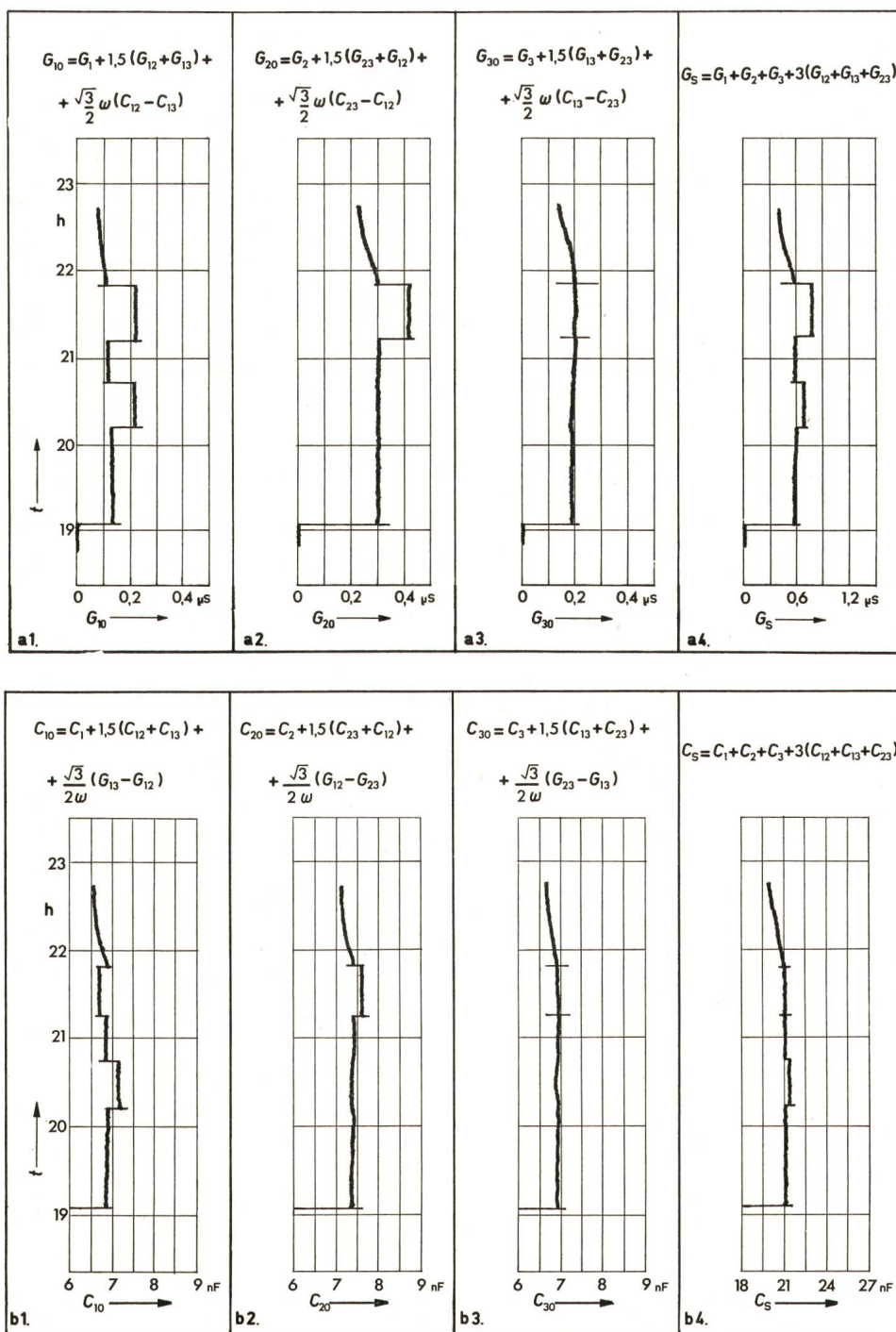


Fig. 7  
Registrierstreifen der Real- und Imaginärkomponenten der Phasenadmittanz  $Y_{k0}$  und Isolierungsadmittanz  $Y_S$  in Abhängigkeit von der Zeit

Siehe auch die Gl. (8) bis (12)

und

$$G_k'' \approx G_k + G_k^*$$

$$C_k'' \approx C_k + C_k^*$$

Vorläufig soll angenommen werden, dass die zweiten und dritten Glieder in der Klammer der Gl. (8) und (9) neben  $G_k$  bzw.  $C_k$  vernachlässigt werden können, nachdem die Leitfähigkeit und Kapazität zwischen Phasen im Vergleich mit den Werten gegen Erde wesentlich kleiner sind. In diesem Sinne gelten also:

$$G_{k0} \approx G_k$$

und

$$C_{k0} \approx C_k$$

Mit dieser Annahme, ferner mit Rücksicht auf die Konstanz der längs der Wicklung auf die Längeneinheit entfallenden Leitfähigkeit und Kapazität, müssen die Zusammenhänge

$$G_{k0} \approx \frac{G_k''}{2}$$

$$C_{k0} \approx \frac{C_k''}{2}$$

$$\operatorname{tg} \delta \approx \operatorname{tg} \delta''$$

gelten. Die Werte von  $G_k''/2$  und  $C_k''/2$  sind in Tabelle I in Klammern angegeben.

Aus dem Vergleich der beiden Teile von Tabelle I geht hervor, dass die Kapazitäten im wesentlichen übereinstimmen. Die während des Betriebes gemessene Leitfähigkeit ist in Phase 1 kleiner, in Phase 2 aber wesentlich grösser, als die aus den ausser Betrieb durchgeführten Messungen erhaltenen Werte. In Phase 3 gibt es praktisch keine Abweichung zwischen den beiden Messergebnissen. Die Abweichungen widerspiegeln sich auch aus dem Vergleich der errechneten und der im Stillstand gemessenen Verlustfaktoren. Die durchschnittliche Abweichung zwischen dem aus Kurven a4 und b4 der Fig. 7 ermittelten Durchschnittswert

$$\frac{G_s}{\omega C_s} = \operatorname{tg} \delta = 930 \cdot 10^{-4}$$

des Verlustfaktors und dem durchschnittlichen Ergebnis

$$\frac{\sum G_k''}{\omega \sum C_k''} = \operatorname{tg} \delta'' = 845 \cdot 10^{-4}$$

der Messungen beträgt 10 %.

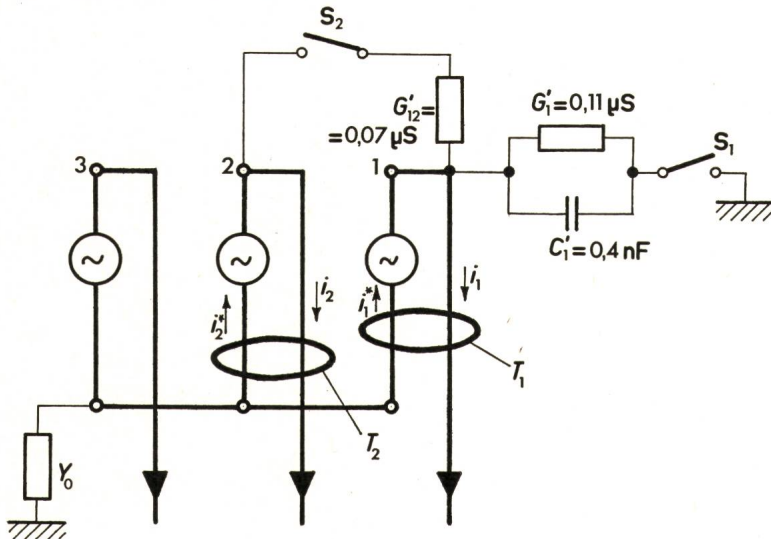


Fig. 8

Schema der Herstellung eines künstlichen «Fehlers»

$S_1, S_2$  Schalter  
 $G'_{12}, G'_{12}$  und  $C'_1$  Komponenten der Admittanz, die den künstlichen Fehler herstellt.

Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 2 und 3

k	Messungen bei Betrieb			Messungen ausser Betrieb		
	$G_{k0}$ $\mu S$	$C_{k0}$ nF	$\operatorname{tg} \delta \cdot 10^4$	$G_k''$ $\mu S$	$C_k''$ nF	$\operatorname{tg} \delta'' \cdot 10^4$
1	0,13	6,8	610	0,36 (0,18)	13,8 (6,9)	835
2	0,30	7,4	1300	0,37 (0,19)	13,6 (6,8)	855
3	0,19	6,9	880	0,36 (0,18)	13,6 (6,8)	830

$$\frac{\sum G_{k0}}{\omega \sum C_{k0}} = \frac{G_s}{\omega C_s} = \operatorname{tg} \delta = 930 \cdot 10^{-4}$$

$$\frac{\sum C_k''}{\omega \sum C_k''} = \operatorname{tg} \delta'' = 845 \cdot 10^{-4}$$

Die Abweichung zwischen den beiden Messergebnissen ist teilweise auf die Messunsicherheit zurückzuführen, teilweise aber darauf, dass die Gleichungen  $Y_k = Y_k^*$  (siehe Fig. 2) bzw.  $G_k = G_k^*$  in der Wirklichkeit nicht gültig sind, wie das bisher angenommen wurde. Dies bedeutet, dass die auf die Längeneinheit entfallende Leitfähigkeit längs der Wicklung verschieden ist. Die Abweichung kann dabei auch dadurch entstehen, dass die letzten Glieder der Gl. (8) wegen der Kapazitätsasymmetrie der Phasenwicklungen neben den anderen Gliedern der Gleichung nicht vernachlässigt werden dürfen.

Die Ergebnisse dieser vergleichenden Untersuchung sowie des Versuches im Zusammenhang mit Fig. 8 weisen darauf hin, dass die Einrichtung sich dafür eignet, den Isolierungszustand ständig zu kontrollieren.

An der Versuchsmaschine wurden kontinuierliche Messungen in Abständen von 1 bis 2 Wochen durchgeführt. Praktisch waren die registrierten Kurven gerade, die nur durch die wegen der Temperaturunterschiede der Maschine auftretende Änderung der Leitfähigkeit bzw. Kapazität geringfügig modifiziert wurden. Während der Versuchsperiode konnte man kein tatsächliches Schadhafwerden der Isolierung beobachten.

Bezüglich der Brauchbarkeit des oben geschilderten Messverfahrens kann man zwei wesentliche Fragen aufwerfen.

Die erste Frage betrifft die Erzeugung des Differenzstroms  $\Delta i_k$ . In dem beschriebenen Versuch wurde dies mit Hilfe eines speziellen Stromkomparators konzentrischer Anordnung gelöst. In der angewendeten Schaltung könnte der Stromkomparator als ein elektronisch kompensierter Differential-Stromwandler bezeichnet werden. Bei Generatoren kleinerer Leistung lässt sich diese Lösung ohne Schwierigkeit verwirklichen. Die Gefahr eines Phasenklammenschlusses kann man durch die Einbettung einer auf Erdpotential liegenden Leiterschicht in die Isolation zwischen den konzentrischen Leitern beseitigen. Im Falle

eines Stromes von mehreren Tausend A wäre aber eine Lösung dieser Art mit zahlreichen Problemen verbunden.

Es ist beachtenswert in diesem Zusammenhang, dass das erörterte Verfahren einen Differentialschutz von äusserst hoher Genauigkeit bildet. Ein Differentialschutz ist bei jedem Generator vorhanden, und indem man die Genauigkeit und das Gleichlaufen der Stromwandler, die den Eingangs- und Ausgangsstrom der Phasenwicklung messen, innerhalb eines relativen Wertes von  $10^{-6}$ ... $10^{-7}$  sichern könnte, würde dieser Differentialschutz auch die oben geschilderte Aufgabe versehen. Innerhalb bestimmter Übersetzungs- und Stromgrenzen gelang es mit dem kompensierten Präzisions-Stromwandler unter Laboratoriums-Verhältnissen einen Fehler von einigemal  $10^{-6}$  — als Minimalwert — zu erreichen [4]. Darum erscheint die Lösung der oben geschilderten Aufgabe mit zwei gesonderten Stromwandlern unter Betriebsverhältnissen und innerhalb der erforderlichen Stromgrenzen derzeit hoffnungslos.

Die zweite Frage ist, ob man das Kontrollverfahren bei wassergekühlten Statorwicklungen, wo die Entdeckung der anfänglichen Fehler besonders wichtig ist, anwenden kann. Bei Wasserkühlung kann nämlich die Leitfähigkeit des Kühlwassers eine beträchtliche Rolle spielen. Diesbezüglich sind noch keine Experimente durchgeführt worden, es ist aber anzunehmen, dass obige Methode auch für diesen Fall zur ständigen Kontrolle des Isolierungszustandes brauchbar ist.

### 7. Zusammenfassung

Das behandelte Verfahren ist geeignet, den Isolationszustand der Statorwicklungen von Generatoren während des Betriebes kontinuierlich zu messen. Das Prinzip des Verfahrens stimmt mit jenem des Differentialschutzes überein, aber durch die höchst genaue Messung des Differenzstromes und seine Zerlegung in Komponenten ermöglicht es die Leitfähigkeit und Kapazität der Wicklungsisolation während des Betriebes zu messen. Dadurch wird es möglich, das anfängliche Schadhafwerden wesentlich früher als mit den üblichen Schutzmethoden zu erkennen. Das Messverfahren wurde an einem Generator kleiner Leistung erprobt. Die Messergebnisse unterstützen die theoretischen Betrachtungen.

Der Verfasser möchte Oberassistent *Peter Osváth* und Assistent *László Steiner*, die bei der Herstellung der Einrichtung und der Durchführung der Versuche behilflich waren, seinen Dank aussprechen.

### Literatur

- [1] *K. Nylund* und *T. Mosimann*: Alterungsuntersuchungen an Statorwicklungen elektrischer Maschinen. Bull. SEV 58(1967)17, S. 810...818.
- [2] *L. Schnell*: Neue Möglichkeiten zur Überwachung des Isolationszustandes von elektrischen Hochspannungsmaschinen im Betrieb. Periodica Polytechnica, Electr. Engng. 14(1970)1, S. 15...21.
- [3] *P. N. Miljanic*, *N. L. Kusters* und *W. J. M. Moore*: The development of the current comparator, a high-accuracy A-C ratio measuring device. Trans. AIEE Communication and Electronics -(1962)63, p. 359...368.
- [4] *N. L. Kusters* und *W. J. M. Moore*: The compensated current comparator; a new reference standard for current-transformer calibrations in industry. Trans. IEEE IM-13(1964)2/3, p. 107...114.

### Adresse des Autors:

Prof. Dr. *L. Schnell*, Technische Universität, Műgyetem rakpart 9, Budapest.

### Diskussion

**A. Christen, dipl. Ing., Oberingenieur der Materialprüfanstalt und Eichstätte des SEV, Zürich:** Die Messverfahren zur Überwachung des Isolierungszustandes von rotierenden elektrischen Maschinen sind mannigfaltig und die Aussagekraft der mit verschiedenen Methoden erzielten Messergebnisse gleichzeitig auch umstritten. Wenn die Güte einer Isolierung durch eine einzige Kennziffer festgelegt werden könnte, wäre die Unsicherheit bei der Voraussage allfälliger Wicklungsdefekte kleiner; die Anstrengungen der interessierten Fachleute könnten in diesem Falle auf die Entwicklung einer allgemein gültigen Messmethode konzentriert werden. Die rasche Entwicklung der Isolationssysteme für Hochspannungswicklungen und die Vielfalt der verwendeten Materialien und Fertigungsmethoden lassen es aber heute nicht zu, sich mit einer Einheits-Messmethode zu begnügen. Vielmehr wird versucht, an den von verschiedenen Messverfahren gelieferten Informationen ein Bild vom Zustand der Hochspannungswicklungen zu gewinnen. *L. Schnell* vergleicht die mit einem Messverfahren erzielten Ergebnisse lediglich mit den Resultaten der konventionellen Verlustfaktormessung und trägt damit der Vielfalt der Beurteilungskriterien zu wenig Rechnung. Wicklungsdefekte kündigen sich leider nicht nur und nicht immer durch ein Anwachsen des Verlustfaktors an. Zudem ist der Absolutwert des Verlustfaktors bei Nennspannung stark vom verwendeten Isolationsmaterial und vom Fertigungsverfahren der Wicklung abhängig, was bedingen würde, dass eine sog. «Gefahrschwelle» praktisch für jede zu überwachende Maschine individuell festgelegt werden müsste. Wenn die Verlustfaktormessung, wie dies auch heute noch üblich ist, zur Beurteilung des Isolationszustandes herangezogen wird, so interessiert nicht so sehr der Absolutwert des  $\text{tg}\delta$  bei einer definierten Spannung, sondern der  $\text{tg}\delta$ -Anstieg in Funktion der angelegten Spannung. Ausserdem beeinflusst die Wicklungstemperatur die Verlustfaktorwerte unter Umständen beträchtlich, was bei der Überwachung des Isolationszustandes von in Betrieb stehenden und bei verschiedenen Belastungen arbeitenden Maschinen zu zusätzlichen Schwierigkeiten führen kann. Die Temperaturabhängigkeit des Verlustfaktors variiert stark mit dem verwendeten Isolationssystem und könnte deshalb auch nicht durch ein einfaches Kompensationsverfahren ausgeschaltet werden.

Schliesslich ist die grundsätzliche Frage zu stellen, ob die dauernde Überwachung von in Betrieb stehenden elektrischen Maschinen zweckmässig und wirtschaftlich ist. Das Ziel der dauernden Überwachung müsste eigentlich darin bestehen, die Mehrzahl der Wicklungsdefekte und damit unerwünschte Betriebsunterbrüche zu verhindern, oder deren Zahl wesentlich zu reduzieren. Um zu beurteilen, ob mit dem vorgeschlagenen Messverfahren dieses Ziel erreicht werden kann, müssten vorerst die möglichen Schadenursachen analysiert und mit den Möglichkeiten der neuen Messmethode verglichen werden. Ohne auf exakte Statistiken zurückzugreifen, darf doch gesagt werden, dass sich eine Vielzahl von Wicklungsdefekten nicht durch eine kontinuierliche Vergrösserung des Verlustfaktors oder Verkleinerung des Isolationswiderstandes ankündigen, sondern, dass sie die mehr oder weniger plötzliche Folge von momentanen mechanischen oder elektrischen Überbeanspruchungen sind. In diesen Fällen müsste die vorgeschlagene Messmethode versagen. Zudem wäre ihre Anwendung nur dann sinnvoll, wenn praktisch alle grösseren rotierenden Maschinen mit dieser Überwachungseinrichtung versehen wären. Damit kommt der wirtschaftliche Aspekt des Vorschlages ins Spiel: Es ist fraglich, ob sich bei der reduzierten Anzahl der möglichen Diagnostizierungserfolge die beträchtlichen Investitionen für die dauernde Überwachung der Maschinen lohnen würde. Durch visuelle Kontrollen und periodische messtechnische Überprüfung des Isolationszustandes der Wicklungen während dieser Betriebspausen mit verschiedenen Methoden hat heute die Betriebssicherheit der Maschinen einen derart hohen Standard erreicht, dass die dauernde Überwachung nach der vorgeschlagenen Methode keine wirtschaftlich tragbare wesentliche Verbesserung bringen könnte.