

NEUE MÖGLICHKEITEN ZUR ÜBERWACHUNG DES ISOLATIONSZUSTANDES VON ELEKTRISCHEN HOCHSPANNUNGSMASCHINEN IN BETRIEB

Von

L. SCHNELL.

Lehrstuhl für Meßtechnik und Instrumentenkunde, Technische Universität, Budapest

(Eingegangen am 20. Mai 1969)

Ein verbreitetes Verfahren zur Prüfung des Isolationszustandes von Hochspannungsgeräten, wie z. B. Generatoren, Motoren, Transformatoren, besteht darin, daß Verlustfaktor und Kapazitätsänderung der Anlage als Kondensator, bestehend aus Leiter, Isolator und Eisenkern, in Abhängigkeit von der Spannung oder der Zeit gemessen werden [1]. Aus den Ergebnissen von spannungsabhängig durchgeführten $\operatorname{tg} \delta$ -Messungen bzw. aus einem Vergleich von mehreren, in verschiedenen Zeitpunkten bewerkstelligten derartigen Messungen wird auf die Güte des Isolierstoffes, auf dessen Zustand und die Wahrscheinlichkeit einer voraussichtlichen Beschädigung geschlossen.

Nach den z. Z. bekannten Verfahren lassen sich die Messungen lediglich außer Betrieb durchführen. Man bedient sich dazu meistens einer Scheringbrücke, neuerdings eines Stromkomparators [2, 3]. Die Stromkomparator-schaltung in Abb. 1 [3, 4] veranschaulicht das Reihenersatzschaltbild des Meßgegenstandes, im vorliegenden Falle der zu prüfenden Isolation. Von der Hochspannungsquelle G fließt Strom einerseits durch den zu messenden Kondensator C_x und die Wicklung N_1 des Stromkomparators, andererseits durch den Normalkondensator C_N , ferner durch die Wicklung N_2 mit veränderlicher Windungszahl. Sind die erdseitigen C_x' und $\operatorname{tg} \delta'$ Werte der Spannungsquelle G im Vergleich zu C_x und $\operatorname{tg} \delta$ vernachlässigbar klein, ergeben sich aus den Daten des mit N_2 bzw. R_2 ausgeglichenen Netzes folgende Beziehungen:

$$C_x = \frac{N_2}{N_1} C_N$$

und

$$\operatorname{tg} \delta = \omega R_2(C_2 + C_N).$$

Ist diese Vernachlässigung nicht zulässig, müssen zwei Messungen vorgenommen werden, u. zw. eine in der Anordnung in Abb. 1, die zweite, indem der Stromkreis von C_x auf der Hochspannungsseite unterbrochen wird. Aus den zwei Meßergebnissen lassen sich die Werte für die einzelnen Kapazitäts- und Verlustfaktoren ermitteln [5].

Diese Prüfverfahren haben folgende Nachteile:

— Um die Prüfungen vorzunehmen, muß die zu messende Anlage außer Betrieb gesetzt werden. Eine Beschädigung des Isolationsstoffes in einem späteren Zeitpunkt wird daher erst durch die nächste Messung erfaßt, falls in der Zwischenzeit kein Durchschlag erfolgte.

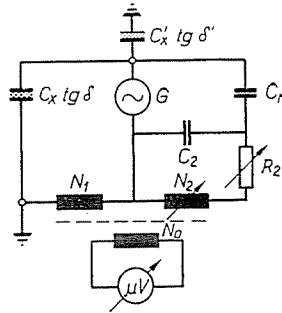


Abb. 1

— Die Spannungsbeanspruchung des Isolationsstoffes ist bei den Messungen nicht dieselbe, wie in Betrieb. In einem Generator oder Motor mit geerdetem Sternpunkt nimmt, zum Beispiel, die Spannungsbeanspruchung der Isolation in der Wicklung vom Sternpunkt in Richtung der Klemmen von Null bis zur Nennspannung zu. Bei der Kontrollmessung der Isolation unter Anwendung einer der genannten Methoden ist hingegen die Spannungsbeanspruchung die ganze Wicklung entlang konstant. Die Bewertung der Meß-

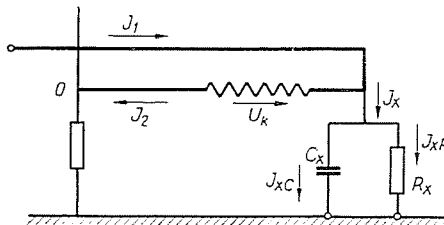


Abb. 2

ergebnisse, aus denen auf den allgemeinen Zustand der Isolation geschlossen werden könnte, z. B. einer Verschlechterung von $\text{tg } \delta$, ist daher problematisch, weil die Spannungsbeanspruchung in Betrieb an der schadhaft gewordenen Stelle der Wicklung nicht bekannt ist.

— Um die richtigen Werte von C_x und $\text{tg } \delta$ zu ermitteln, müssen u. U. zwei Messungen durchgeführt werden, wobei man das genaue Ergebnis durch Berechnung erhält.

Durch das in Vorschlag gebrachte, neue Meßverfahren sollen diese Nachteile behoben werden. Durch seine Anwendung wird eine fortlaufende Über-

wachung der erwähnten Einrichtungen in Betrieb und damit eine sofortige Wahrnehmung von Veränderungen im Isolationszustand über die Messung von Verlustfaktor und Kapazitätsänderung ermöglicht. Die erzielten Ergebnisse sind für den Zustand der Isolierung kennzeichnender als die der üblichen Methode, weil sich der Isolationsfehler im gemessenen $\text{tg } \delta$ -Wert mit der Spannung gewichtet abzeichnet.

Der Grundgedanke wird am Beispiel eines Generators dargelegt (Abb. 2). Es soll eine Phasenwicklung eines Dreiphasengenerators untersucht werden, wo der Sternpunkt 0 praktisch auf Erdpotenzial ist. Es seien C_x und R_x die auf Wicklungsende bezogenen Werte der Kapazität sowie des Verlustwiderstandes zwischen Wicklung und geerdetem Eisenkern, während die Summe des durchfließenden Kapazitiv- und Verluststromes durch I_x bezeichnet wird. Aus der Abbildung ist zu entnehmen, daß I_x die Differenz zwischen Eingangsstrom I_1 und Ausgangsstrom I_2 der Phasenwicklung darstellt:

$$I_x = \bar{I}_1 - I_2$$

I_{xR} , die Komponente von I_x in Phase mit U_k , stellt die durch R_x fließende Verlustkomponente dar, während I_{xC} die zu dieser senkrechte, durch C_x fließende, kapazitive Stromkomponente ist.

Das Wesentliche des vorgeschlagenen Meßverfahrens ist, daß durch eine Erzeugung mit hoher Genauigkeit des Differenzstromes \bar{I}_x ermöglicht wird, den Verlustfaktor $\text{tg } \delta$ und die Kapazität C_x der Isolierung bei normalem Betrieb der Anlage zu messen. Für die Erzeugung des Stromes \bar{I}_x sind außerordentlich hohe Genauigkeitsanforderungen zu stellen. Beispielshalber soll erwähnt werden, daß die Größenordnung des Stromes eines Generators von höherer Leistung 10^3 A ist, während jene von I_x 10^{-1} A beträgt. Es sei $\text{tg } \delta = 0.01$, dann ist $I_{xR} = 10^{-3}$ A, und soll dieser Wert mit einer Genauigkeit von 1% gemessen werden, so darf bei einigen Tausend Ampere der Fehler der Differenzbildung 10^{-5} A nicht überschreiten. Diese Forderung läßt sich erfüllen, wenn die Differenzerregung der Ströme I_1 und I_2 in einem einzigen Eisenkern erfolgt. Durch eine entsprechende Anordnung der Hochstromleiter und die erforderliche Abschirmung der Streuungsasymmetrie — ein in Verbindung mit der Entwicklung der Präzisionsstromkomparatoren bekanntes Verfahren [6] — wird die Erzeugung von I_x mit der erforderlichen Genauigkeit ermöglicht.

Eine mögliche Durchführung der Messung wird durch die Schaltung in Abb. 3 veranschaulicht. Die Eingangs- und Ausgangsleitungen einer Phasenwicklung des Generators werden — in entsprechend symmetrischer Anordnung — durch das Fenster des Eisenkerns eines Stromkomparators geführt. Die auf den Kern gewickelte Meßspule mit einer Windungszahl N_0 zeigt durch den angeschlossenen Selektivdetektor den flußfreien Zustand des Eisenkerns

an. Die Windungszahl N_2 und der Widerstand R_2 sind veränderbar, C_N ist ein verlustloser Hochspannungskondensator, während C_2 zur Einstellung der Meßgrenze $\operatorname{tg} \delta$ dient. Die Verluste des Isolationsstoffes sind in der Abbildung durch ein Reihenglied $C_x - R_x$ ersetzt, weil durch die Schaltung ein Reihen-ersatzschaltbild erfaßt wird.

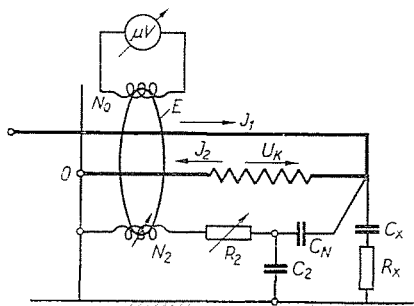


Abb. 3

In flußfreiem Zustand des Eisenkerns gilt die Beziehung

$$\bar{I}_x = \bar{I}_1 - I_2 = \frac{U_k}{\frac{1}{j\omega C_x} + R_x} = \frac{U_k}{\frac{1}{j\omega C_N} + \frac{R_2}{1 + j\omega C_2 R_2}} \cdot \frac{1}{\frac{1}{j\omega C_2} + R_2} \cdot N_2$$

$$C_x = N_2 C_N \quad (2)$$

$$\operatorname{tg} \delta = \omega R_2 (C_2 - C_N).$$

$\operatorname{tg} \delta$ kann also an einer R_2 -Skala, C_x an einer N_2 -Skala gemessen werden.

Durch diese Schaltung wird also die Messung von $\operatorname{tg} \delta$ und C_x bei Einrichtungen mit geerdetem Gehäuse und geerdetem Sternpunkt in Betrieb ermöglicht. Es ist nicht unbedingt notwendig, das Netz $C_N - R_2 - N_2$ in Abb. 3 auf die volle Spannung U_k zu schalten. U_k kann mit Hilfe eines Spannungswandlers auf aU_k ($a < 1$) herabgesetzt werden, durch den das entsprechend gewählte $C_N - R_2 - N_2$ Netz gespeist wird. In diesem Falle kann C_N ein Niederspannungskondensator sein und auch die Rolle eines Ausgleichsgliedes spielen. Die Ausgleichung läßt sich naturgemäß automatisieren, wobei $\operatorname{tg} \delta$ und C_x bzw. ΔC_x oder $\Delta C_x / C_x$ fortlaufend registriert werden.

Für die Realisierung stellt natürlich der Umstand eine bedeutende Schwierigkeit dar, daß die Eingangs- und Ausgangsströme der Phasenwicklung durch das Fenster eines gemeinsamen Eisenkerns zu führen sind, wobei auch eine geometrische Symmetrie (z. B. eine konzentrische Leiteranordnung)

angestrebt wird. Eine derartige Lösung stößt zwar auf keine grundsätzlichen Hindernisse, stellt jedoch eine so bedeutende konstruktionsmäßige Abweichung von den üblichen Lösungen dar, daß mit ihrer Anwendung nur gerechnet werden darf, wenn diese durch die Vorteile, die das Meßverfahren verspricht, gerechtfertigt ist.

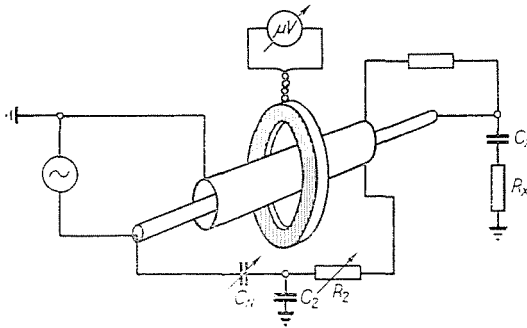


Abb. 4

Es wurden einige Modellversuche über die Anwendbarkeit des Meßverfahrens ausgeführt. Dabei wurde untersucht, wie hoch, einerseits, bei Hochströmen der niedrigste Differenzstrom ist, der bereits mit Sicherheit nachgewiesen werden kann; wie hoch, andererseits, die Meßgenauigkeit und Empfindlichkeit des Meßverfahrens ist.

Um den noch wahrnehmbaren niedrigsten Differenzstrom zu ermitteln, wurde durch das Fenster eines Ringkerns mit hoher Anfangspermeabilität eine konzentrische Schleife geführt. Durch die Schleife flossen 1000 A, unter deren Einwirkung die Spannung in der auf den Eisenkern gewickelten Indikatorwicklung $0,2 \cdot 10^{-6}$ V unterschritt. Nachdem zwischen den in der Schleife einander entgegen fließenden Strömen eine Differenz von 10^{-6} A erzeugt wurde, stieg die Ausgangsspannung in der Indikatorwicklung auf $2,5 \cdot 10^{-6}$ V an. Eine Erregung von $1 \mu\text{A}$ läßt sich also in der angegebenen Anordnung mit Sicherheit nachweisen.

Um die Genauigkeit und Empfindlichkeit des Meßverfahrens zu prüfen, wurde ein Widerstand vom 1 kW aus einem einseitig geerdeten 200 V Netz gespeist und der Eisenkern des Stromkomparators mit der Differenz zwischen Eingangs- und Ausgangsstrom erregt (Abb. 4). Die zu messende Kapazität und der Verlust wurden durch ein zwischen den 200-V Punkt des Belastungswiderstandes und die Erde geschaltetes $C_x - R_x$ Glied erzeugt. Wie aus der Abbildung ersichtlich, ist $N_2 = 1$, wobei der Gegenregungsstrom durch den äußeren Teil des konzentrischen Leiters zurückgeleitet wurde. Es wurde beobachtet, daß sich das Netz bei der Einstellung von beliebigen C_x -, R_x -Werten durch $C_N - R_2$ ausgleichen ließ; der Fehler verblieb in jedem Falle innerhalb der Grenzen der eigenen Fehler der Elemente. Bei $C_x = 0,1 \mu\text{F}$ ergaben

eine $\operatorname{tg} \delta$ -Änderung von $1,5 \cdot 10^{-4}$ bzw. eine Kapazitätsänderung von 16 pF auf der Indikatorwicklung eine Ausgangsspannung im Werte von $2 \cdot 10^{-6}$ V (was einer Erregungsänderung von etwa 10^{-6} A entspricht). Da die Kapazität einer Phasenwicklung eines Generators mittlerer Leistung ebenfalls einen Wert von etwa $0,1 \mu\text{F}$ darstellt, die Phasenspannung in der Wicklung hingegen 6 bis 10 kV erreicht, beträgt die auf diese Spannung umgerechnete Empfindlichkeit das 30 bis 50fache des bei 200 V gemessenen Wertes. Diese sehr hohe Empfindlichkeit sowie die Möglichkeit zur Automatisierung der Ausgleichung gestatten, bei einer Prüfung des Generators in Betrieb die feinsten Änderungen in der Isolierung, den Verlauf des Beschädigungsprozesses letzterer sowie den etwaigen Zusammenhang zwischen der Veränderungen von $\operatorname{tg} \delta$ und ΔC_x zu verfolgen. Nach der Ausführung solcher Versuche ist es erdenklich, daß es gelingen wird, Zusammenhänge zu finden, die es ermöglichen, eine gefährliche Beschädigung der Isolation noch vor dem Durchschlag aufzudecken und damit den Durchschlag in Betrieb zu verhindern.

Zusammenfassend weist das vorgeschlagene Meßverfahren folgende Vorteile auf:

— Es gestattet die $C_x - \operatorname{tg} \delta$ -Messung der Isolierung bei Hochspannungseinrichtungen, z. B. Generatoren, Motoren, auch in Betrieb, unter Belastung.

— Durch eine fortlaufende Überwachung der Isolierung wird die Betriebssicherheit der Einrichtungen bedeutend erhöht. Bei wassergekühlten Hochleistungs-Turbogeneratoren würde z. B. nach diesem Verfahren jede Undichtigkeit im Kühlersystem, die die Güte des Isolationsstoffes beeinträchtigt, nachweisbar sein. Auch bei Hochspannungsmotoren mit hoher Leistung läßt sich die Gefahr eines Durchschlags in Betrieb vermindern.

— Mit Hilfe des Differenzstromes I_x oder eines mit dem im Kreis von C_N fließenden Strom in Abb. 3 erregten Hochfrequenztransformators kann die Hochfrequenzkomponente, die im Isolationsstoff durch Ionisierung entsteht, ausgekuppelt werden; damit können ihr Spektrum bzw. ihre Höhe — und daher der Ionisierungsgrad — auch bei einer Anlage in Betrieb geprüft werden.

— Die nach diesem Verfahren erzielten $\operatorname{tg} \delta$ -Meßergebnisse sind für den tatsächlichen Zustand des Isolationsstoffes kennzeichnender, als die nach den bisherigen Verfahren in abgeschaltetem Zustand erhaltenen Meßergebnisse, da sich die Isolationsfehler im gemessenen $\operatorname{tg} \delta$ -Wert mit der Spannung gewichtet geltend machen.

— Die bei den Messungen erhaltenen $C_x - \operatorname{tg} \delta$ -Werte ergeben den richtigen Wert ohne Korrektion, während unter Anwendung der bisher üblichen Meßverfahren in gewissen Fällen das ermittelte Ergebnis mit den entsprechenden Daten des Speisetransformators korrigiert werden mußte.

Das Verfahren gestattet auch eine direkte Messung der Wirk-, und Blindkomponenten des die Isolation durchfließenden Stromes. Es läßt sich vor-

stellen, daß unter Anwendung des Verfahrens mehrere Probleme des Generatorschutzes einfacher als nach den bisher benutzten Methoden gelöst werden können.

Versuche über die Anwendbarkeit der Methode sind im Gange.

Zusammenfassung

Eine neue Anwendung des Stromkomparators wird beschrieben. Das Verfahren ermöglicht, Kapazität und Verlustfaktor der Isolierung von elektrischen Hochspannungsmaschinen auch in Betrieb zu messen.

Der Komparatorausgleich läßt sich automatisieren, was eine laufende Überwachung des Isolationszustandes gestattet, wobei sich eine Beschädigung der Isolation zweifellos noch vor dem Durchschlag nachweisen läßt. Versuche zur Anwendung an Hochleistungsmaschinen sind im Gange.

Literatur

1. HOLD, F.: Methoden und Bewährung von periodischen Isolationsuntersuchungen an Kraftwerksgeneratoren. E und M 230-240. (1967).
2. SCHERING, H.: Verlustmessung bei Hochspannung. Z. Instrum. Kde 40, 124; (1920) 41 139; 44 (1924).
3. BAKER, W. P.: Recent developments in 50 c/s bridge networks with inductively coupled ratio arms for capacitance and loss tangent measurements. Proc. IEE 243-247 June (1962).
4. BAKER, W. P.: Modern 50 c/s bridge networks for dielectric loss measurement. AEI Engineering 5 89-102. (1965).
5. LETICA, P.: Schering Bridge. Instr. and Control Systems 34 94-95. (1961).
6. KÜSTERS, N. L.: The precise measurement of current ratios. IEE Trans. on Instr. 197-209. (1964).

Prof. Dr. László SCHNELL, Budapest, XI., Műegyetem rkp. 9. Ungarn