

Die Beurteilung des Isolationszustandes von Statorwicklungen

Autor(en): **Schuler, R.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins :
gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen
Elektrotechnischen Vereins (SEV) und des Verbandes
Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)**

Band (Jahr): **60 (1969)**

Heft 17

PDF erstellt am: **12.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-916173>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Die Beurteilung des Isolationszustandes von Statorwicklungen¹⁾

Von R. Schuler, Baden

12 - 25

621.3.043.2.045:621.317.333.6

Der Kenntnis des Isolationszustandes von rotierenden Hochspannungsmaschinen sowohl nach ihrer Herstellung als auch während des Betriebs kommt wesentliche Bedeutung zu, nur dadurch kann plötzlichen Betriebsausfällen solcher Maschinen infolge Isolationsschäden weitgehend vorgebeugt werden.

Nach einer Beschreibung der hauptsächlichsten Einflussgrößen, von denen die Lebensdauer eines Isolationssystems abhängt, sowie der wichtigsten heute angewandten Messmethoden wird anhand von Resultaten von Betriebsmessungen wie auch von Langzeit-Laborversuchen die Nützlichkeit und Aussagefähigkeit dieser Methoden beurteilt. Abschliessend werden Empfehlungen für das Messprogramm gemacht.

1. Einführung

Der Energieausfall als Folge von Fehlern an elektrischen Anlagen ist in starkem Mass durch Wicklungsschäden an den Kraftwerkgeneratoren bedingt. Als Beispiel seien die Resultate einer diesbezüglichen Untersuchung erwähnt, die von einem österreichischen Unternehmen während 10 Jahren durchgeführt wurden (Fig. 1). Daraus ist ersichtlich, dass nahezu die Hälfte des Energieausfalles auf Schäden an den Statorwicklungen der Generatoren zurückzuführen sind und dass somit die Verhinderung solcher Schäden ganz besonderes Anliegen der Elektrizitätswerke sein muss.

In der Schweiz erreichte die Energieerzeugung im Jahre 1966/1967 rund $32 \cdot 10^9$ kWh. Falls eine ähnlich hohe Energieausfallrate durch Schäden an Statorwicklungen wie nach [1]²⁾ angenommen wird, wäre der dadurch bedingte Energieausfall auf rund $83 \cdot 10^6$ kWh, entsprechend rund 25 Millionen Franken, zu schätzen. Hinzu kommen noch die Ausgaben für Reparaturarbeiten. Noch schwerwiegender sind die Folgen, wenn etwa bei einem plötzlichen Leistungsfall in der Belastungsspitze ein grosser Turbogenerator bei den heutigen Einheitsleistungen bis zu mehreren 100 MVA ausfällt und vielleicht ein Ersatz gar nicht zur Verfügung steht. (Es sei in diesem Zusammenhang an den vor rund zwei Jahren in den Vereinigten Staaten aufgetretenen «black-out» mit seinen Folgen erinnert.)

Da heute noch sehr viele ältere Maschinen aus den Anfangszeiten des Grossmaschinenbaues im Betrieb sind, für die natürlich eine erhöhte Störanfälligkeit anzunehmen sein wird, richten sich daher schon seit langem die Bestrebungen darauf, den Zustand der Statorwicklungsisolierungen durch geeignete Messungen bei gelegentlichen Stillstandsperioden festzustellen. So befasst sich denn auch eine Reihe von Energieunternehmungen, z. T. zusammen mit wissenschaftlichen Instituten, mit den Möglichkeiten der Isolationsbeurteilung ihrer Grossmaschinen und erhofft sich davon plötzliche Maschinenausfälle, dank genauen Kenntnissen des wahren Isolationszustandes, möglichst vermeiden zu können [2].

La connaissance de l'état des isolations des machines tournantes à haute tension, aussi bien après la construction qu'en service, a une grande importance; ce n'est que par ce moyen que l'on peut efficacement éviter la défaillance subite de telles machines, due aux endommagements de l'isolation.

Après la description des facteurs principaux dont dépend la durée de vie système d'isolation et des méthodes de mesure les méthodes décrites sont discutées à l'aide de résultats de mesures effectuées en exploitation et de résultats d'essais de longue durée faits en laboratoire. L'article se termine par des recommandations se rapportant au programme de mesure.

Aber auch der Hersteller von Maschinen ist an den Erfahrungen, die sich auf Grund solcher Untersuchungen ergeben, sehr interessiert. Bei der Entwicklung neuer und der Weiterentwicklung bestehender Isolationssysteme ist es ja äusserst wichtig, die vom Betrieb gestellten Anforderungen möglichst genau zu kennen. Zureichende Unterlagen darüber werden aber in erster Linie durch periodische Messungen an im Betrieb stehenden Maschinen erhalten. Hieraus und aus dem Vergleich mit Labormessungen bei forcierten Alterungsversuchen lassen sich dann wertvolle Aufschlüsse über die Bewährung der betrachteten Isolationssysteme oder erwünschte Verbesserungen gewinnen.

Die im weiteren dargestellten Untersuchungsmethoden verfolgen demnach den Zweck, auf Grund einmaliger oder

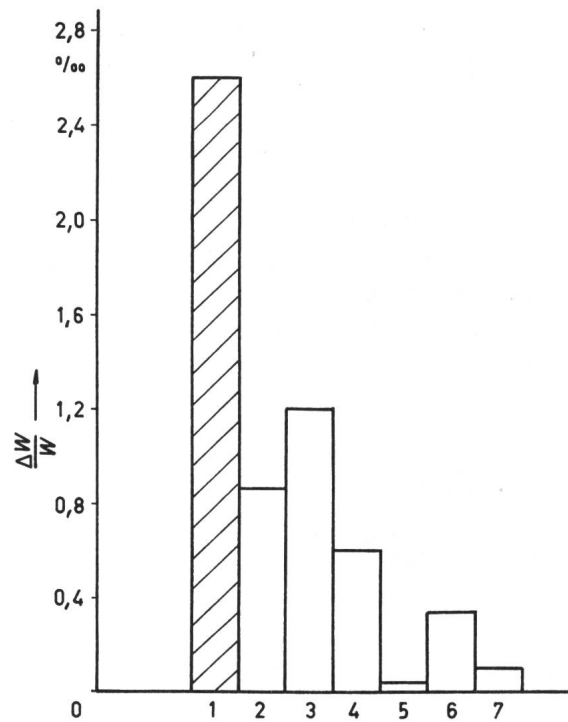


Fig. 1

Energieausfall $\Delta W/W$ durch Fehler an elektrischen Anlagen [1]

Beobachtungszeitraum 10 Jahre, total 124 Fehler

1 Generatoren: Statorwicklung; 2 Generatoren: Rotorwicklung; 3 Generatoren: sonstiges; 4 Motoren; 5 Transformatoren; 6 Schaltanlagen; 7 sonstige elektrische Anlagen

¹⁾ Nach einem Vortrag, gehalten an der ETH im Rahmen des Kolloquiums für Forschungsprobleme der Energietechnik vom 26. 11. 1968.

²⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

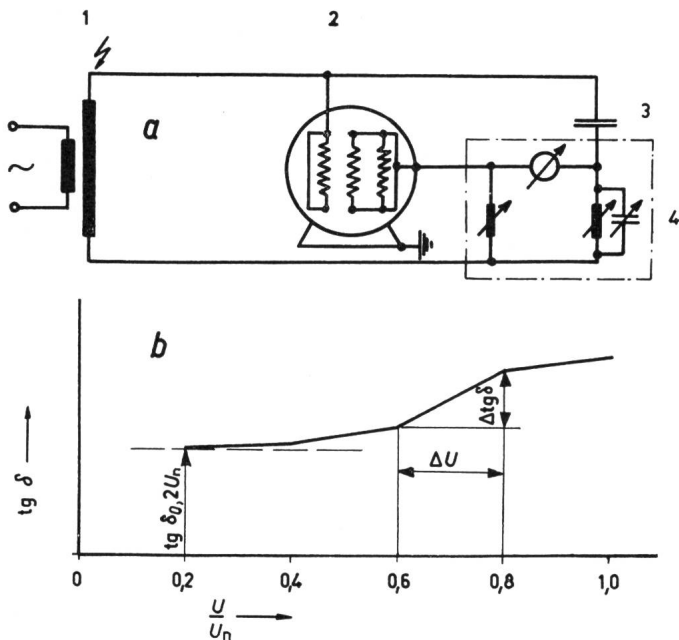


Fig. 2
tg δ-Messung an Maschinenwicklungen

a) prinzipielle Meßschaltung zur Messung der dielektrischen Verluste pro Wicklungsstrang; b) prinzipieller Verlustfaktorverlauf $\text{tg } \delta$ über der Meßspannung U

1 Hochspannungs-Prüftransformator; 2 Messobjekt (3phasige Statorwicklung); 3 Normalkondensator (verlustfrei); 4 Scheringbrücke; U_n Maschinen-Nennspannung

periodischer Kontrollen den Wicklungszustand einer Maschine zu beurteilen und damit das Alterungsverhalten des vorliegenden Isolationssystems während der Betriebszeit festzulegen und zu überwachen und einzelne Schwachstellen möglichst frühzeitig zu erkennen. Rechtzeitig erkannte Mängel lassen sich oft während einer Revisionsperiode ohne wesentliche Kosten beheben.

Der Zweck solcher Messungen ist somit wesentlich verschieden vom Zweck der Abnahmeprüfungen, wie sie nach der Fabrikation von Wicklungen an den einzelnen Wicklungselementen und der ganzen Wicklung verlangt werden. Meist bestehen diese aus einer Nachkontrolle der Spannungsfestigkeit und der Messung der dielektrischen Verluste [3]. Sie können damit lediglich eine Kontrolle der Fertigung darstellen [4] und erlauben in nur geringem Mass, auf das Betriebsverhalten oder gar die Lebensdauer einer Wicklung oder der Maschine zu schliessen.

2. Massgebende Alterungsfaktoren

Zur Beurteilung eines Isolationssystems und wie auch zur Aufstellung geeigneter Bewertungsmethoden müssen vorerst die Einflussgrößen bekannt sein, die für die Alterung, nämlich der Gesamtheit aller Eigenschaftverschlechterungen im Betrieb, verantwortlich sind.

Als wichtige Einflussgrößen haben zu gelten:

- Die Spannungsbeanspruchung, d. h. Höhe der Nennspannung oder genauer, der örtlichen Betriebsfeldstärke;
- Glimmentladungen in der Isolation in feinen Gasräumen sowie äussere Entladungen am Eisenaustritt und im Wicklungskopf;
- Höhe der Wicklungstemperatur sowie Art und Anzahl der Lastspiele;
- Chemische Reaktionen, wie etwa die Bildung nitroser Gase und von Säureanhydriden bei Glimmentladungen;
- Mechanische Beanspruchungen durch Vibrationen, Kurzschlüsse usw. Diese sind vor allem im modernen Grossmaschinenbau von grosser Wichtigkeit wegen den hohen Stabströmen von

mehreren tausend Ampère und den grossen Eisenlängen bis über 6 m.

f) Im weiteren können Feuchtigkeit und Verschmutzung, bei Motoren vielleicht auch die Einwirkung korrosiver Gase und Dämpfe, eine nicht unbedeutende Rolle im Zusammenhang mit Alterungsvorgängen spielen.

Neben den temperaturabhängigen sind die spannungsbedingten Alterungseinflüsse wohl am bedeutendsten. Da bei den hier betrachteten Maschinen hohe Spannungen jedoch nur im Stator vorkommen (die höchsten Maschinen-Nennspannungen erreichen heute nahezu 30 kV), werden sich nur für dessen Wicklung wesentliche isolationstechnische Probleme stellen, darum beziehen sich die weiteren Ausführungen lediglich auf die Beurteilung von Statorwicklungsisolationen.

3. Statorwicklungsisolationen

Als Statorwicklungsisolationen wurden ursprünglich ausschliesslich Schellack- und später Asphaltmicafolium, die sog. thermoplastischen Isolationen, verwendet. Dabei wurden die Kupferleiter mit breiten Papierbahnen umwickelt, auf die vorgängig mit Asphalt bzw. Schellack dünne Glimmerplättchen, sog. Splittings, aufgeklebt worden waren. In den letzten anderthalb Jahrzehnten setzte jedoch vor allem als Folge der steigenden Maschinengrößen und weiter gesteigerter Anforderungen eine tiefgreifende Entwicklung ein, und seit einigen Jahren erhalten Grossgeneratoren, und neu-

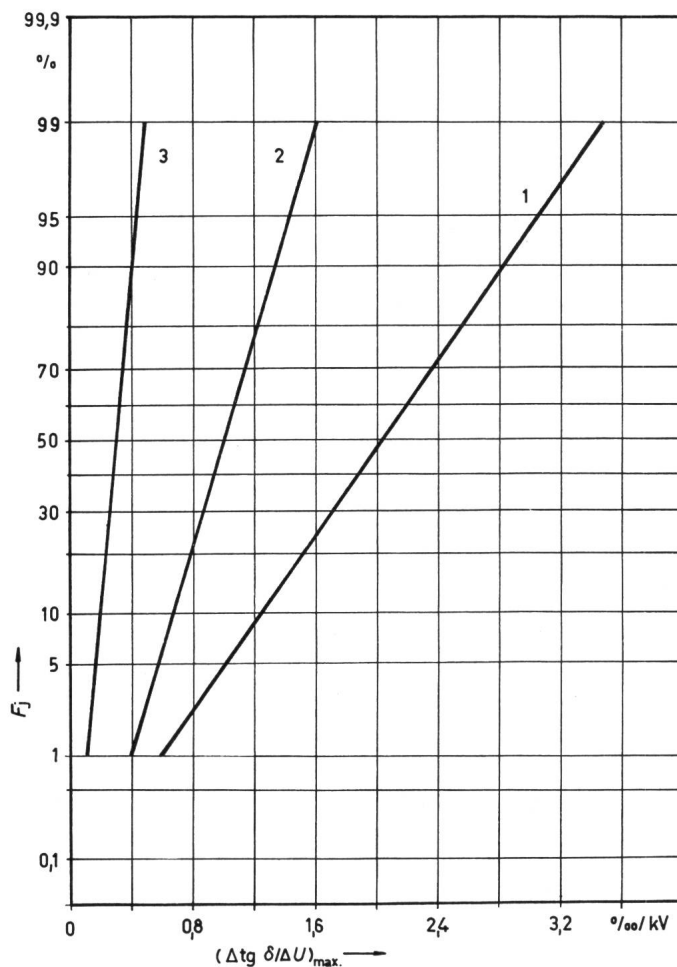


Fig. 3
Summenhäufigkeit F_j der maximalen Anstiegswerte $(\Delta \text{tg } \delta / \Delta U)_{\text{max}}$ einbaureifer Wicklungsstäbe

1 14,5-MVA-Generator, Schellackmicafolium; 2 33 MVA/10-kV-Generator, Asphaltmicafolium; 3 280 MVA/24-kV-Generator, Kunstharz-isolation

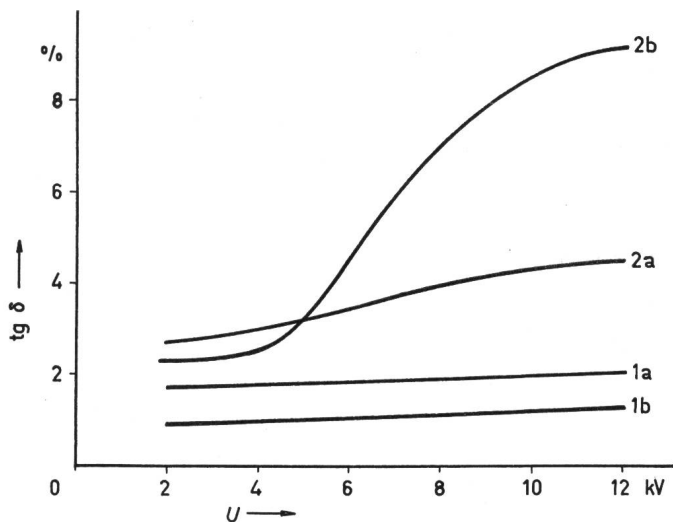


Fig. 4

tg δ in Funktion der Meßspannung U bei eingebauten Wicklungen im Neuzustand und nach jahrelangem Betrieb

1 220 MVA/10-kV-Generator, Kunstharzisolierung: a Neuzustand, b nach 39 710 Betriebsstunden; 2 80 MVA/12-kV-Generator, Asphaltmicafolium: a Neuzustand, b nach 15 Jahren Betrieb

erdings teils auch schon Motoren, praktisch nur noch duroplastische Kunstharzisolierungen. Hierbei werden die Leiter meist mit einem Isolierband aus Glasgewebe und Glimmervlies vielfach umwickelt, dann unter Vakuum in einem lösungsmittelfreien Kunstharz imprägniert und anschliessend in einem Ofen ausgehärtet. Diese unterschiedlichen Fabrikationsverfahren und der andere Isolationsaufbau sind im Zusammenhang mit vorliegendem Thema insofern von Wichtigkeit, als sich jedes dieser Systeme im Betrieb andersartig verhält.

4. Messmethoden

Da bis heute noch keine Grösse gefunden werden konnte, die sich im Laufe der Betriebszeit in eindeutiger Weise so verändert, dass jederzeit aus ihr auf den jeweiligen Isolationszustand geschlossen werden kann, werden heute bei einer Maschinenuntersuchung nebeneinander verschiedenartige Messungen vorgenommen. Auf Grund empirisch ermittelter Zusammenhänge an Hand langjähriger Beobachtungen und Messungen an in Betrieb stehenden Maschinen und an Wicklungselementen im Laboratorium ist es dann möglich, diese daraus gewonnenen Einzelaussagen so zu einem Gesamtbild zusammenzufügen, dass, gestützt auf grosse Erfahrung, eine Beurteilung des Wicklungssystems einer im Betrieb stehenden Maschine damit gut möglich ist.

Aus der Vielzahl der bekanntgewordenen Messungen wird hier nur auf jene etwas näher eingegangen, die sich als besonders geeignet erwiesen haben. Zudem beschränken sich die nachfolgenden Angaben auf einige besondere Beispiele, da es kaum möglich ist, auf die vielen Details einzugehen, auf die es jedoch bei der Auswertung der Messresultate manchmal entscheidend ankommt.

Bereits in den dreissiger Jahren wurden die ersten dielektrischen Untersuchungen an Statorwicklungen durchgeführt [5]. Sie beschränkten sich auf die Messungen des Isolationswiderstandes sowie auf die Bestimmung der dielektrischen Verluste. Beide werden auch heute noch erfasst, und es liegen darüber somit langjährige Erfahrungswerte vor.

Bei der Verlustfaktormessung wird der Verlustanteil des Verschiebungsstromes abhängig von der Spannung in der be-

kannten Scheringbrücke gemessen. (Prinzipielle Meßschaltung in Fig. 2a.) Damit lässt sich die Stärke der vorwiegend in der Isolierung des Nutteils auftretenden Glimmentladungen beurteilen. Der Messwert nimmt mit dem glimmenden Luftgehalt der Isolierung zu; beim Neuzustand wird die grösste Änderung pro Spannungsintervall als Mass für die Herstellungsqualität angesehen (Fig. 2b).

Heute ist es möglich, bei den vakuumgetränkten Kunstharzisolierungen die Hohlräume in der Isolierung nach Zahl und Grösse äusserst klein zu halten. Gänzlich können jedoch feine Glimmentladungen nicht verhindert werden. Diese schaden erfahrungsgemäss einer einwandfrei fabrizierten glimmerhaltigen Isolierung nicht. Als Beispiel der in den letzten Jahren erzielten Fortschritte bezüglich der Homogenität ist in Fig. 3 die Häufigkeitsverteilung der grössten tg δ -Anstiegswerte an neuen einbaubereiten Wicklungsstäben für die Isolationsysteme Schellack- und Asphaltmicafolium wie auch einer modernen Kunstharzisolierung angegeben.

Bei der Beurteilung von im Betrieb stehenden Wicklungen wird in erster Linie auf die Änderung der tg δ -Anstiegswerte gegenüber denen des Neuzustandes abgestellt. Bei den thermoplastischen Micafoliumisolierungen findet man im allgemeinen schon nach kurzer Betriebszeit eine deutliche Zunahme der Anstiegswerte, was hauptsächlich auf ein leichtes Aufgehen dieser Isolierungen in der Nut bei höheren Temperaturen je nach dem Einbauspiel zurückzuführen ist; bei den duroplastischen Kunstharzisolierungen tritt Gleiches auch nach langer Betriebszeit nicht ein (Fig. 4).

Eine Kunstharzisolierung ist daher — dies auch in Übereinstimmung mit den Resultaten aus Langzeitdauerversuchen im Labor — im Betrieb weit weniger durch inneres Glimmen gefährdet. Da andererseits heute noch zahlreiche bis zu 40 Jahre alte Maschinen im Betrieb sind mit recht hohen tg δ -Zunahmen, genügt es offensichtlich nicht, zur Beurteilung einfach einen «kritischen» Grenzwert anzunehmen. Vielmehr müssen die übrigen massgebenden Alterungseinflüsse zur Auswertung ebenfalls erfasst werden, wobei gerade bei den Foliumisolierungen der Wicklungstemperatur eine entscheidende Rolle zukommt. Ein Beispiel dafür zeigt Fig. 5.

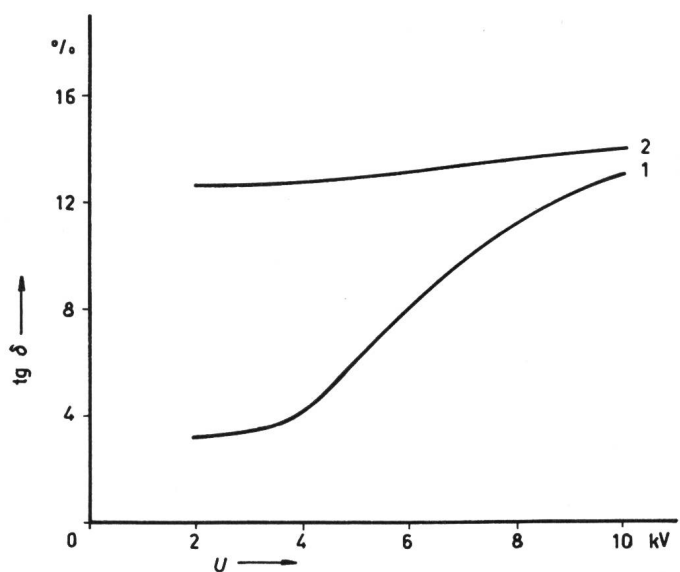


Fig. 5

tg δ in Funktion der Meßspannung U bei eingebauten Wicklungen

1 32,5 MVA/10,5-kV-Generator A, Schellackmicafolium, Messung nach 31 Jahren Betrieb; 2 32,5 MVA/10,5-kV-Generator B, Schellackmicafolium, Messung nach 33 Jahren Betrieb

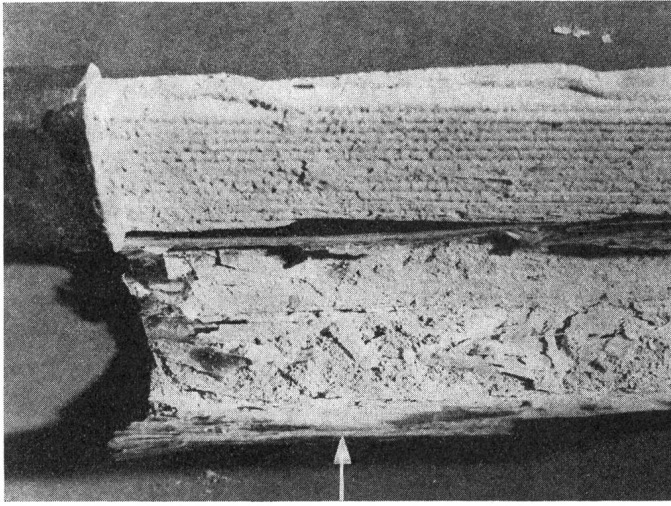


Fig. 6

Roebelstab eines 11-kV-Generators, isoliert mit Schellackmicafolium, nach 35jähriger Betriebszeit

Abgelöste Hauptisolation. Die durch Glimmentladungen verursachte Zerstörung der inneren Folienlagen sowie die Abbauprodukte auf den Kupferleitern sind deutlich sichtbar

Generator A, mit einer um ca. 30 °C höheren Wicklungstemperatur als Generator B, schlug nach 31 Jahren Betrieb anlässlich einer Wicklungsuntersuchung bei einer Spannung von 15 kV durch, während der praktisch gleiche Generator B mit 31 kV geprüft wurde, ohne dass Defekte auftraten.

Neben den eigentlichen Betriebsbedingungen spielt aber auch der Aufbau der Wicklung eine gewichtige Rolle, sog. Spulenwicklungen sind beispielsweise weit mehr als Stabwicklungen bei Auftreten von internen Glimmentladungen gefährdet, da an der durch Glimmen geschwächten Leiterisolation Windungsschlüsse entstehen können, die sich dann meist rasch zu Erdschlüssen ausweiten und somit zum Maschinenausfall führen.

Aus dem Beispiel in Fig. 5 ist auch ersichtlich, dass der Absolutwert des Verlustfaktors (gemessen bei kleiner Spannung) recht unterschiedlich sein kann. Er ist im wesentlichen vom Zustand und der Art des Bindemittels abhängig und mag im Zusammenhang mit der Entwicklung von neuen Systemen von einigem Interesse sein. Bei Alterungsmessungen im Betrieb lassen sich aber damit meist keine gewichtigen Informationen gewinnen, ausser etwa über die Beendigung von Nachhärtungsvorgängen oder äusseren Veränderungen im Isolationssystem, wie z. B. durch Feuchtigkeitseinwirkung.

Zwischen dem Verlustfaktor oder seinem Anstieg mit der Spannung und der elektrischen Durchschlagfestigkeit besteht im allgemeinen kein erkennbarer Zusammenhang. Allerdings wurde mehrfach beobachtet, dass bei Foliumisolationen, mit stark fortgeschrittenen Glimmzerstörungen in der Isolation (ein Beispiel dafür ist in Fig. 6 gegeben), die Durchschlagfestigkeit am Phaseingang oft am niedrigsten liegt und hier auch die ersten Defekte bevorzugt auftreten (Fig. 7).

Neben dem Glimmen in der Isolation des Nutteils können auch Entladungen zwischen Stab und Eisenpaket, am Eisenaustritt der Stäbe oder im Wickelkopf zwischen Stellen mit grossen Potentialdifferenzen auftreten. Ein Beispiel dafür ist in Fig. 8 gegeben. Die Figur zeigt die Teilansicht eines Wickelkopfes eines 11-kV-Wasserkraftgenerators, bei

dem es in den sehr kleinen Luftabständen zwischen Spulenköpfen verschiedener Phasen zu dauernden Glimmentladungen kam. Da solche Entladungen unter Umständen nach langer Betriebszeit auch zu Isolationsschäden führen können, sofern hier keine glimmerhaltigen Isolationen verwendet werden, muss ihnen einige Beachtung geschenkt werden. Während auf dem amerikanischen Kontinent Fälle bekannt wurden, wo Glimmentladungen zwischen Staboberflächen und der Nutwand zu Defekten geführt hatten [6], sind in Europa gleichartige Schwierigkeiten kaum aufgetreten, da hier die Stäbe generell vor dem Einbau auf der Oberfläche mit schwachleitenden Anstrichen versehen und dadurch die durch das Einbauspiel bedingten Luftspalte elektrisch überbrückt werden. Auch an den Austrittstellen aus dem Blechpaket ist es heute möglich, mit den zur Verfügung stehenden Mitteln zur Spannungssteuerung jegliche Entladungen an den Wicklungselementen im Bereich der Betriebsspannung zu unterdrücken.

Zur besseren Beurteilung der auftretenden Entladungen werden seit einigen Jahren zusätzlich zur Verlustfaktormessung noch die sog. Ionisationsmessungen durchgeführt. Man misst dabei als Mass der durch die impulsartigen Entladungen verursachten Ladungstransporte und Energieumsetzungen entweder die (fiktive) Ladung selbst oder den arithmetischen oder quadratischen Mittelwert des verursachten Stromes oder auch, bei oszillographischer Ausmessung, die Stromspitzen. Weit verbreitet ist die Erfassung der bewirk-

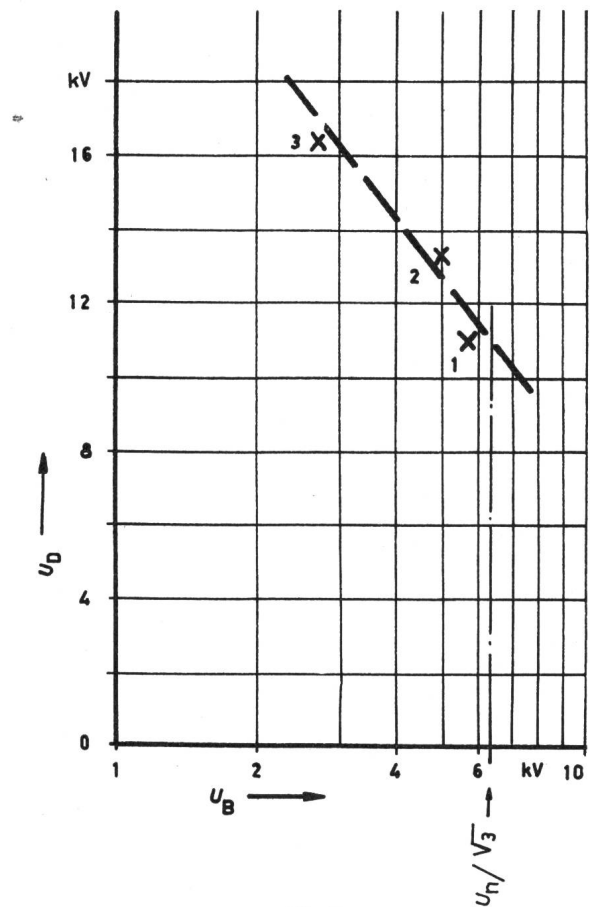


Fig. 7

Durchschlagprüfungen an 11-kV-Statorwicklung nach 35jähriger Betriebszeit
Durchschlagsspannung U_D abhängig von der örtlichen Betriebsspannung U_B der ersten durchgeschlagenen Stäbe
1 erster aufgetretener Durchschlag; 2 zweiter aufgetretener Durchschlag; 3 dritter aufgetretener Durchschlag

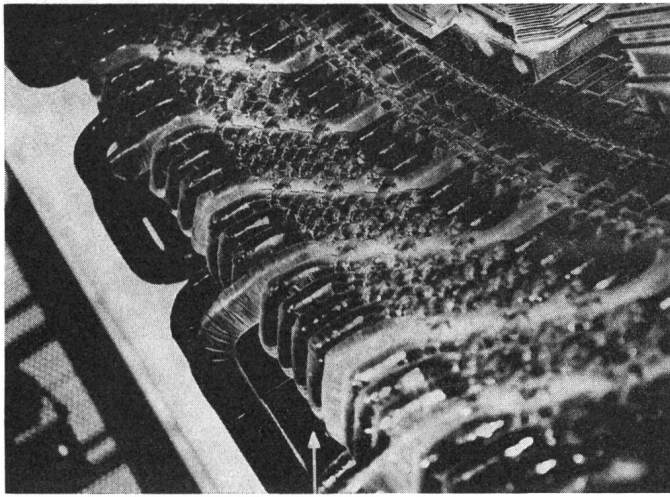


Fig. 8

Teilansicht des Wickelkopfes eines 11-kV-Wasserkraftgenerators mit sichtbaren Spuren der aufgetretenen Glimmladungen zwischen den Spulenschenkeln

ten Funkstörintensität mit einem Funkstörmessgerät nach den CISPR-Empfehlungen unter Angabe der erhaltenen μV -Werte. Bei der im Zusammenhang mit Maschinenuntersuchungen teils üblichen Art der Strommessungen gibt man die Werte zum besseren Vergleich unter Bezugnahme auf die Einheit der Kapazität oft in A/F an.

Die Messung wird meist bis zur Phasenspannung, getrennt für jede Phase, nach der Schaltung in Fig. 9a durchgeführt. Stets setzt das erste Glimmen bei einer Spannung gegen Erde von 3...4 kV ein. Da auch nach langer Betriebszeit die Glimmeinsatzspannungen sich nicht wesentlich ändern, kommt dieser Anfangsspannung offensichtlich keine wesentlichere Bedeutung zu. Immerhin ist daran zu erkennen, dass ein Teil der Wicklung im Betrieb dauernd feinen Glimmladungen ausgesetzt ist, was bekanntlich bei anderen Apparaten wie Transformatoren, Messwandler usw. kaum zulässig wäre.

In erster Linie interessiert die Zunahme der Messgröße mit der Spannung und ihre Veränderung während des Betriebes. Die Resultate einiger solcher Messungen sind in Figur 9b für drei verschiedenartig isolierte Generatoren zusammengestellt. Für neue Wicklungen mit guter Feldsteuerung am Eisenaustritt der Stäbe oder Spulen erhält man bei der Phasenspannung meist Werte unter 60 A/F. Bei schon längerer Zeit im Betriebe stehenden Maschinen nimmt die Störgröße im allgemeinen zu und kann bei sehr alten Wicklungen bis über 2000 A/F ansteigen; die starke Zunahme ist bei Foliumisolationen wohl immer auf ein Loslösen der Isolation vom Leiterbündel zurückzuführen. Äusserlich im Wickelkopf traten dagegen in diesem Zusammenhang nie wesentliche Veränderungen auf. Die Verlustfaktoranstiegs-werte erhöhten sich daher in ähnlicher Weise, wie aus Fig. 9b ersichtlich ist.

Falls die Ionisationsmessung bei im Leerlauf erregter Maschine durchgeführt wird, bietet sie ferner die Möglichkeit eines gewissen Vergleiches der Isolation am Phaseneingang mit der am Phaseneende. Während üblicherweise bei der Verlustfaktormessung die ganze Wicklung auf die Spannung des Prüftransformators angehoben wird und somit keine Spannungsdifferenz zwischen den einzelnen Wicklungsteilen der gleichen Phase besteht, ist es unter diesen Umständen mög-

lich, durch Vertauschen der Stranganschlüsse abwechselnd das eine oder das andere Phaseneende auf volles Potential zu bringen. Durch ein solches Vorgehen kann speziell bei älteren Maschinen besser abgeschätzt werden, ob und inwieweit Glimmzerstörungen am Phaseneingang vorhanden sind und ob eine Umschaltung der einzelnen Wicklungsstränge derart, dass die bisher im Sternpunkt zusammengeschlossenen Wicklungsenden nun an die Hochspannungsabgänge angeschlossen werden und umgekehrt, empfohlen werden kann. Die Resultate einer solchen Messung sind in Fig. 10 zusammengestellt. Bei der im Leerlauf erregten Maschine erhielt man wegen der stetig abnehmenden Spannung gegen Erde (Fig. 10a) etwas niedrigere Messwerte im Vergleich zur Prüfung mit Fremdspannung, wobei bei älteren Maschinen die Unterschiede recht deutlich sein können, wenn am Phaseneingang die Isolation durch inneres Glimmen bereits stärker angegriffen ist.

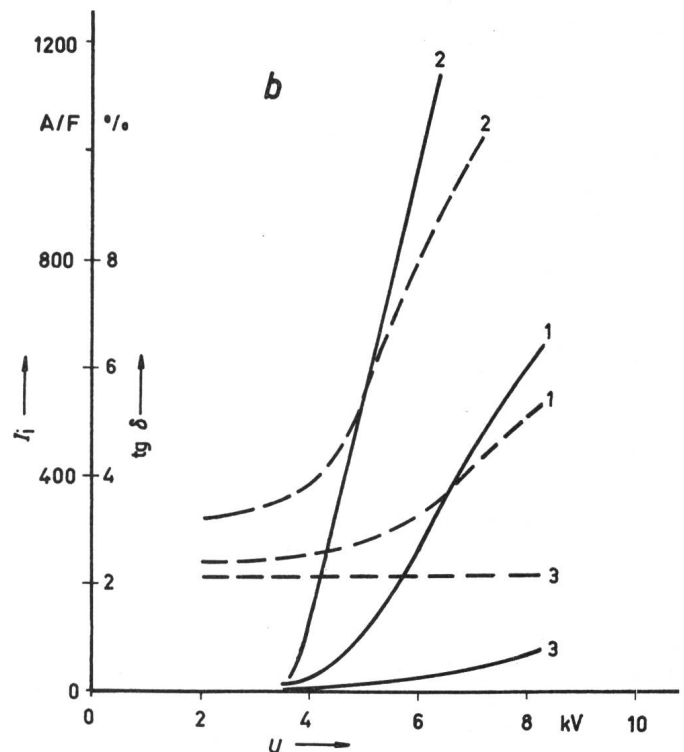
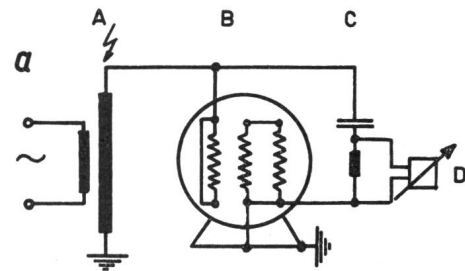


Fig. 9

tg δ - und Ionisationsmessungen in Abhängigkeit von der Spannung U an im Betrieb stehenden Maschinen

a prinzipielle Maßschaltung zur Ionisationsmessung;

b Zusammenstellung einiger Messwerte

A Hochspannungs-Prüftransformator; B Messobjekt (3-Phasen-Statorwicklung); C Ankopplungsglied; D Messgerät

1 32 MVA/11-kV-Generator, Asphaltmicafolium, Messung nach 11 Jahren Betrieb; 2 32,5 MVA/10,5-kV-Generator, Schellackmicafolium, Messung nach 34 Jahren Betrieb; 3 220 MVA/10-kV-Generator, Kunstharzisolierung

Messungen nach 6 Jahren Betrieb

— Ionisationsmessung; - - - tg δ -Verlauf

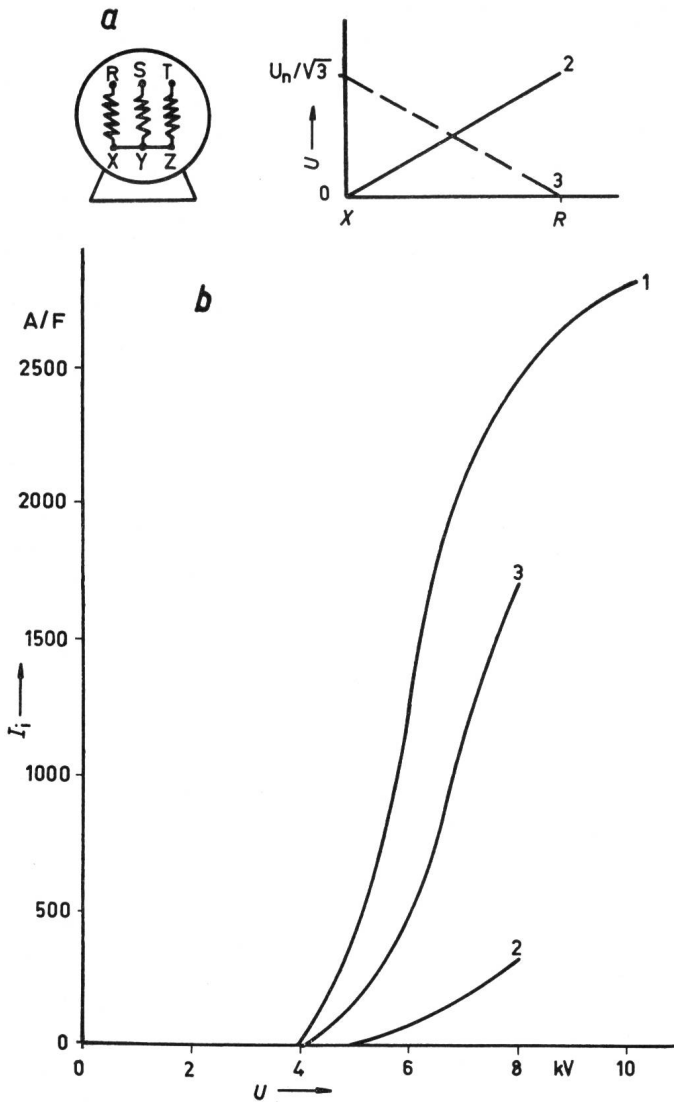


Fig. 10

Ionisationskurven einer Maschinenwicklung 32 MVA/12-kV-Generator, Asphaltmicafolium

a Spannungsverteilung über der Wicklung bei den verschiedenen Schaltungen;

b Messwerte

1 Fremdspannung; 2 Maschine erregt; 3 Maschine erregt, Wicklung umgepolt

Zu den ältesten und wohl bekanntesten Isolationsmessungen gehört die des Isolationswiderstandes. Während früher unter Verwendung eines Kurbelinduktors vielfach nur festgestellt wurde, dass kein Erdschluss bestand, wird heute fast immer der zeitabhängige Verlauf des Isolationswiderstandes ausgemessen. Dazu wird, bei konstanter Gleichspannung von z. B. 500 oder 1000 V, die Abnahme des Isolationsstromes mit einem hochempfindlichen Galvanometer verfolgt und neben dem eigentlichen Isolationswiderstand, abgelesen nach 1 min, auch seine zeitliche Änderung bewertet. Dem liegt die Tatsache zugrunde, dass bei Gleichspannung der zeitlich abnehmende Strom sich aus zwei Komponenten zusammensetzt (kapazitiver Ladestrom nicht berücksichtigt): dem Fehlerstrom, der durch die geringe Leitfähigkeit, die auch das beste Dielektrikum aufweist, bedingt ist und der praktisch zeitunabhängig ist, und dem sog. Nachlade- oder Absorptionsstrom, der auf inneren Ladungsverschiebungen beruht und zeitlich in logarithmischer Weise abnimmt (Figur 11).

Bei feuchter Isolation oder auch nur einer erhöhten Oberflächenleitfähigkeit wird vor allem der zeitlich konstante

Stromanteil erheblich grösser, so dass bei Messung des Gesamtstromes bzw. des Widerstandes der zeitabhängige Anteil nicht mehr ins Gewicht fällt. In diesem Fall erhält man für das Verhältnis 10 min zu 1 min Widerstandswert, auch Polarisationsindex genannt, Werte nur wenig grösser als 1, während bei trockenen Isolationssystemen oft Werte von 3...5 gefunden werden. Eigentliche Qualitätsmerkmale lassen sich aber weder aus dem Isolationswiderstand noch dem Polarisationsindex ableiten, sondern man erhält lediglich Auskunft über Feuchtigkeitseinflüsse oder den Grad oberflächlicher Verschmutzung.

Im Zusammenhang mit der Isolationsbeurteilung hat es sich oft als zweckmässiger erwiesen, den nach Wegnahme der Meßspannung und Kurzschluss der Elektroden fließenden Entladestrom zu messen, der den gleichen zeitlichen Verlauf wie der Absorptionsstrom hat, aber in umgekehrter Richtung fließt. Dabei ist es üblich, den nach 1 min gemessenen Entladestrom auf die Einheit von Wicklungskapazität und der Meßspannung zu beziehen. Je nach Maschinenalter kann dabei eine mehr oder weniger ausgeprägte Zunahme dieses spezifischen Entladestromes beobachtet werden, die in erster Linie durch Veränderungen der verwendeten Imprägnierlacke in der Isolation bedingt ist [7].

Sehr grosse Erwartungen im Zusammenhang mit der Isolationsbeurteilung werden vielerorts der Gleichhochspannungsmessung entgegengebracht [8]. Dabei wird der Isolationsstrom nach Anlegen einer hohen Gleichspannung an die Wicklung gemessen. Aus einer bei Steigerung der Spannung vielleicht plötzlich einsetzenden starken Stromvergrößerung erhofft man Hinweise vor allem auf örtliche Schwachstellen oder gar Risse in der Isolierung zu erhalten. Dies wäre äusserst wertvoll, weil ja gerade an solchen Stellen der plötzliche Durchschlag zu befürchten ist.

Während bei Messungen unter wohldefinierten Umständen vor allem im Labor, wo ja alle Verlustströme, z. B. die über die Wickelköpfe, durch entsprechende Schaltungsmass-

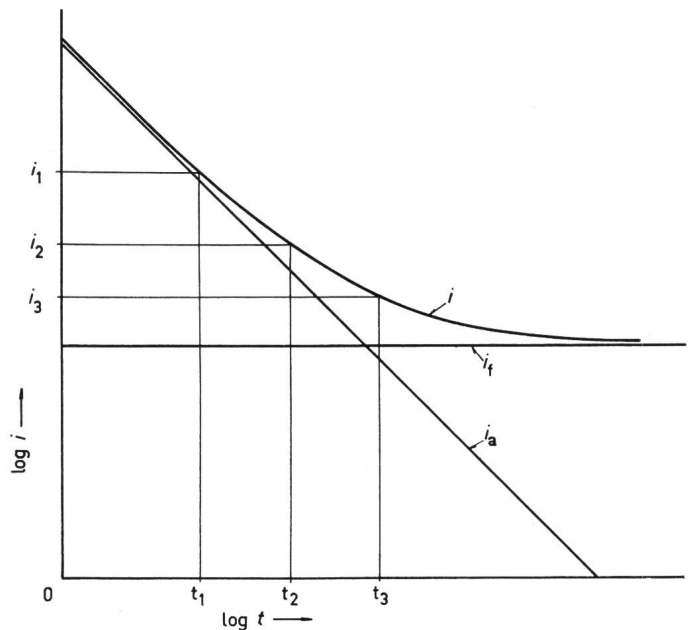


Fig. 11

Grundsätzlicher Verlauf des Isolationsstromes über der Zeit

i Isolationsstrom = $i_f + i_a$; i_a Nachladestrom = cUt^{-n} (c, n Konstanten);

$$i_f \text{ Isolationsfehlerstrom} = \frac{i_2 i_3 - i_2^2}{i_1 + i_3 - 2i_2} \cdot \frac{t_1}{t_2} = \frac{t_2}{t_3}$$

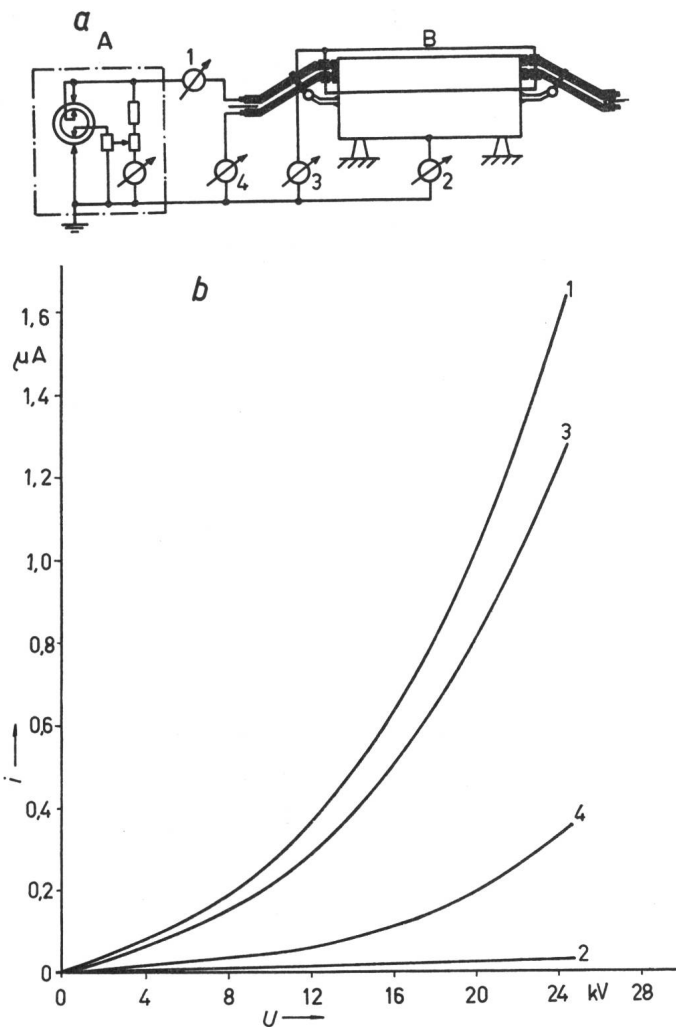


Fig. 12

Messung der Teilströme an einem Wicklungsmodell

- a) prinzipielle Meßschaltung; b) Messwerte
 1 Gesamtstrom
 2 Nutstrom
 3 Wickelkopfstrom
 4 Systembedingter Strom über Abstützelemente und geerdete Stäbe
 A Gleichspannungsquelle
 B Statorwicklungsmodell

nahmen eliminiert werden können, oft wertvolle Rückschlüsse aus dieser Messung gezogen werden können, ist die Bewertung bei einer eingebauten Wicklung nach ihrem Gleichstromverhalten wegen der recht unübersichtlichen und kaum günstiger zu gestaltenden Einbauverhältnisse äusserst schwierig. Der in jeder Spannungsstufe gemessene Stromwert setzt sich im wesentlichen wiederum aus dem zeitlich konstanten Fehlerstrom und dem abklingenden Nachladestrom zusammen. Da davon nur der Fehlerstromverlauf mit der Spannung interessiert, andererseits der Nachladestrom pro Spannungsstufe bei einem guten Dielektrikum auch noch nach mehreren Stunden nicht voll abgeklungen ist, muss die Spannung nach einem speziellen Zeitprogramm gesteigert werden, sofern man übersichtliche und gut ausdeutbare Resultate erhalten will. Heute hat sich vor allem das Messverfahren durchgesetzt, bei dem die Spannung in gleichbleibender Stufenhöhe (z. B. $\Delta U = 1 \text{ kV}$) erhöht wird [9] unter Verkürzung der Stufendauer, derart, dass zum Zeitpunkt der Strommessung, unmittelbar vor der Spannungserhöhung, die Summe der Nachladeströme auf einen Wert abgesunken ist, der zur angelegten Spannung gerade proportional ist. Da-

durch wird ein Abweichen des interessierenden Fehlerstroms vom linearen Verlauf in der Strom/Spannungskurve sofort sichtbar.

In Fig. 12b sind die Resultate einer solchen Gleichhochspannungsmessung zusammengestellt. Kurve 1 stellt den typischen Verlauf dar, wie er für eingebaute Wicklungen als normal anzusehen ist. Die vorliegenden Stromwerte wurden allerdings an einem Wicklungsmodell, bestehend aus 30 Statorstäben in nachgemachten Nuten, nach Bild 12a ausgemessen. Dadurch war es möglich, die Nut- und Wickelkopfströme jeden für sich zu bestimmen. Man ersieht, dass der Gesamtstrom (1) hauptsächlich durch den Verlauf des Wickelkopfstromes (3) gegeben ist, während der eigentlich interessierende Stromanteil quer zur Isolation im Nutteil (2) zwar spannungsproportional, aber demgegenüber unbedeutend ist. Es genügt im allgemeinen also nicht, bei der Bewertung einfach die Abweichung des Gesamtstromes vom linearen Verlauf zu beachten, wie das schon oft vorgeschlagen wurde, sondern es müssen die Eigenschaften des Systemaufbaues, der Verschmutzungsgrad und die spezielle Art der Meßschaltung mitberücksichtigt werden. Dass bei solch sorgfältigem Vorgehen die Methode wirklichen Nutzen bringen kann, ist aus dem Beispiel in Fig. 13 ersichtlich. Der stark abweichende Stromverlauf bei Phase V wies auf eine Schwachstelle hin, die bei der abschliessenden Wechselspannungsprüfung lokalisiert werden konnte und auf eine mechanische Beschädigung der an dieser Stelle stark verglimmten Hauptisolation zurückzuführen war.

Ausser der Gleichhochspannungs- und vielleicht der Ionisationsmessung sind die bis dahin erwähnten Messungen hauptsächlich darauf ausgerichtet, eine globale Information über den generellen Wicklungszustand zu erhalten. Die Chancen sind sehr klein, dass damit einzelne örtliche Schwachstellen im ganzen Wicklungssystem mit Sicherheit angezeigt

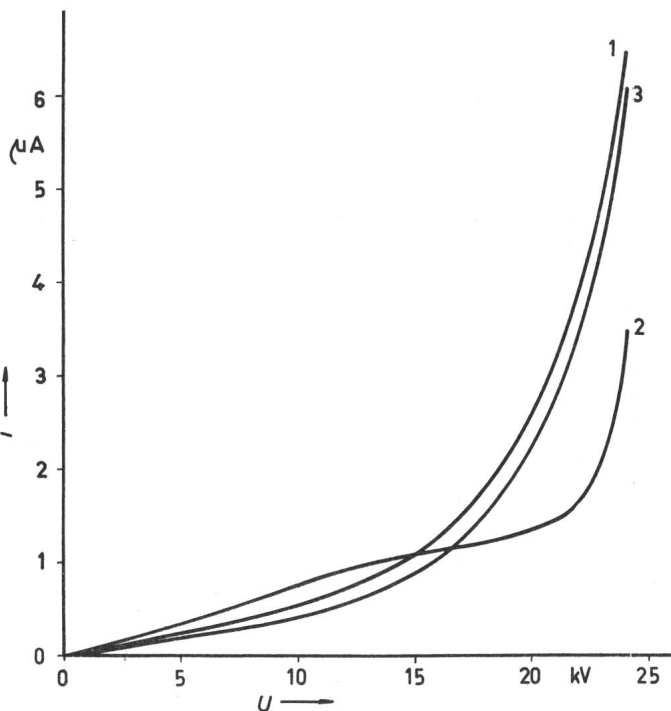


Fig. 13

Isolationsstromverlauf in Funktion der Gleichspannung 22 MVA/11-kV-Generator, Schellackmicafolium
 Messung nach 30 Jahren Betrieb
 1 Phase U; 2 Phase V (enthält Schwachstelle); 3 Phase W

werden. Es hat sich daher im Zusammenhang mit Wicklungsbeurteilungen als notwendig und sehr nützlich erwiesen, die bisher angeführten sog. zerstörungsfreien Prüfungen durch eine die Isolierung wirklich beanspruchende Spannungsprüfung zu ergänzen. Man kann dazu z. B. an die Wicklung phasenweise eine Spannung von ca. 65 % der Neuprüfspannung ($1,5 U_n$) während 1 min anlegen. Bei vielen auf diese Weise geprüften Maschinen traten auch nach jahrzehntelangem Betrieb keine Defekte auf, falls nicht gerade eine echte Schwachstelle vorlag (z. B. Isolationsbeschädigung bei Revisionsarbeiten, mechanisch geschwächte Isolation infolge vibrierender Einzelleiter usw.). Dieses selektive Auffinden ernster Schwächen, die eventuell zu einem plötzlichen Defekt im normalen Betrieb führen könnten, ist das Hauptverdienst der Spannungsprüfung. Die öfters geäußerte Ansicht, dass sie durch ihre Wiederholung eine für die Isolierung kaum noch zulässige Beanspruchung mit sich bringe, trifft nach den bisherigen Erfahrungen nicht zu. Die erwähnte Prüfspannung macht ja auch nur etwa ein Drittel der wirklichen 1-min-Haltespannung der Isolation im Neuzustand aus und liegt somit weit unterhalb der Festigkeit einer ordentlich fabrizierten Isolation.

Ein gewisser Nachteil der Wechselfspannungsprüfung ist, dass zur Deckung des erforderlichen Blindleistungsbedarfes, gerade bei grösseren Maschinen mit deren Wicklungskapazität bis zu ca. $1 \mu F$, recht aufwendige und schwere Prüfeinrichtungen mit Leistungen bis zu einigen Hundert kVA benötigt werden. Es bietet sich in Fällen, wo solche leistungsstarken Prüfgeräte nicht zur Verfügung stehen, die Möglichkeit einer Ersatzprüfung mit z. B. niederfrequenter Spannung oder Gleichhochspannung an [10]. Im ersteren Fall kommen vorwiegend Frequenzen um 0,1 Hz zur Anwendung, wofür heute auch die entsprechenden Prüfanlagen auf dem Markt erhältlich sind. Vor allem aber mit der Gleichhochspannungsprüfung liegen sehr viele Erfahrungen vor, so dass vor allem diese als Ersatzprüfung empfohlen werden kann. Dabei kommt meist eine äquivalente Gleichhochspannung vom 1,6fachen des Effektivwertes der entsprechenden Wechselprüfspannung zur Anwendung.

Einen wesentlichen Teil des Untersuchungsprogramms stellt die visuelle Kontrolle der Wicklung dar. Dabei werden vor allem die Wickelköpfe, die Abstützelemente, das Eisenpaket und die Nutverschlusskeile hinsichtlich Grad der Verschmutzung, Einwirken von Glimmentladungen, mechanischen Schäden wie Risse usw. untersucht. Eine solche Inspektion setzt sehr viel Erfahrung und spezielle Kenntnisse der Fabrikationseigentümlichkeiten voraus, kann aber zusätzliche wertvolle Informationen liefern und Fehler vor allem im Zusammenhang mit der mechanischen Wicklungsabstützung aufdecken, die nicht immer mit den beschriebenen elektrischen Messungen erkannt wurden. Als Beispiel für einen Fehler dieser Art sei hier der Schaden an einem direktgekühlten Turbogenerator erwähnt, wo ein Stab beim Austritt aus dem Eisen einen feinen Isolationsriss aufwies und wo die Untersuchung daraufhin ergab, dass dieser Stab infolge eines Montagefehlers nicht vom Kühlmittel durchflossen war und sich dadurch auf über $250^\circ C$ erhitzte (Fig. 14).

Ausser den erwähnten Methoden kommen gelegentlich noch andere zur Anwendung, von denen vielleicht die mit Sonden zur örtlichen Feststellung von Glimmstellen erwähnenswert ist [6] oder ein Verfahren zur Aufdeckung ge-

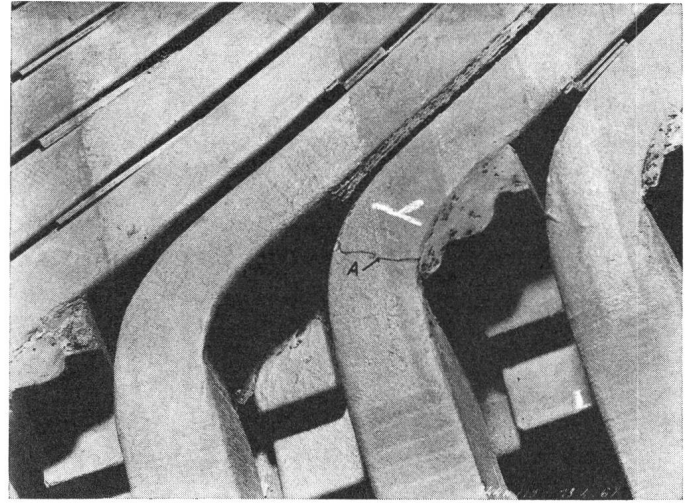


Fig. 14
Teilansicht des Wickelkopfes eines Turbogenerators
A festgestellter Riss

schwächer Windungsisolierungen mittels induzierter Spannungsschüsse [11]. Bis heute gelang es jedoch damit nicht, eindeutige Informationen über örtliche Schwachstellen zu erhalten.

Da heute Grossmaschinen vielfach direkt mit Flüssigkeit gekühlte Statorwicklungen besitzen und als Kühlmittel vorwiegend hochreines Wasser verwendet wird, das über Isolierschläuche den einzelnen Stäben zugeführt wird, ergeben sich bei diesen entsprechend viele Parallelstromwege für Ableitströme gegen Erde, die die Messwerte ungünstig beeinflussen. In solchen Fällen muss man den Kühlkreislauf völlig entleeren und die Schläuche auch austrocknen, am besten durch Evakuieren des ganzen Systems.

5. Empfohlenes Messprogramm

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass bis heute noch keine Grösse bekannt ist, die sich im Laufe der Betriebszeit in eindeutiger Weise so verändert, dass jederzeit von ihrer Messung auf die Spannungsfestigkeit aller Wicklungselemente als entscheidendes Qualitätsmerkmal einer Maschinenisolation geschlossen werden könnte. Auf Grund empirisch ermittelter Zusammenhänge ist es jedoch möglich, anhand der Gesamtheit der Resultate der beschriebenen Messungen und Beobachtungen, erhalten an gleichartigen Wicklungen und während langjähriger Dauerversuche an Wicklungselementen im Labor, eine Voraussage über die Betriebstüchtigkeit mindestens für eine gewisse weitere Betriebsperiode mit recht hohem Wahrscheinlichkeitsgrad zu machen. Dazu können neben der visuellen Inspektion in erster Linie empfohlen werden:

- a) Verlustfaktormessungen bis zur Maschinennennspannung;
- b) Ionisationsmessungen mittels Hochfrequenzmessmethoden bis zur Phasenspannung;
- c) Messungen mit niedriger (500 oder 1000 V) und hoher Gleichspannung (bis zur zweifachen Nennspannung);
- d) Durchführung einer Wechselfspannungsprüfung mit 1,5facher Nennspannung.

Die Durchführung der verschiedenen Messungen bereitet im allgemeinen keine grösseren Schwierigkeiten, jedoch erfordert die Auswertung beträchtliche Erfahrung. Die Prüfungen werden vorzugsweise in Abständen von 2...5 Jahren je nach dem Isolationszustand an allen Wicklungssträngen ge-

trennt durchgeführt, nach Möglichkeit kurz nach der Ausserbetriebsetzung der Maschine bei Wicklungstemperaturen unterhalb von 30 °C. Neue Maschinen werden zweckmässigerweise erstmals nach ca. 1000 Betriebsstunden durchgemessen, die so erhaltenen Resultate dienen als Basis für spätere Untersuchungen.

Mit den bei den Messungen erhaltenen Informationen können überraschend auftretende Maschinendefekte weitgehend vermieden werden, was zur Sicherheit des Betriebes und damit der ungestörten Leistungserzeugung und -übertragung viel beiträgt.

Literatur

- [1] K. W. Edwin: Die Bedeutung der Abnahmeprüfung an Generator-Hochspannungswicklungen. ETZ-A 84(1963)17, S. 549...560.
- [2] A. W. W. Cameron, B. L. McHenry, M. Kurtz et D. L. Killam: Economies réalisables grâce aux mesures d'isolation. CIGRE Rapport No 303, 1964.

- [3] Bestimmungen für elektrische Maschinen. Teil 1: Allgemeines. VDE-Vorschrift 0530 Teil 1/1.66. § 33. Qualität von Isolationen der Stator-Wicklungen rotierender Hochspannungsmaschinen. Bull. SEV 54(1963)8, S. 279...288.
- [4] M. Moravec, T. H. Sie und O. Wohlfahrt: Kontrolle der Fertigungsmaschinen. Bull. SEV 54(1963)8, S. 279...288.
- [5] F. Beldi: Gegenwärtiger Stand der Isoliertechnik im Grossmaschinenbau, insbesondere bei hohen Spannungen. E und M 50(1932)40, S. 541...550.
- [6] J. S. Johnson: Detection of slot surface discharges in high-voltage machine stator windings. Electr. Engng. 71(1952)2, p. 143...147.
- [7] H. Meyer: Die Isolierung grosser elektrischer Maschinen. Berlin, Göttingen, Heidelberg, Springer-Verlag, 1962.
- [8] K. Nylund und T. Mosmann: Alterungsuntersuchungen an Statorwicklungen elektrischer Maschinen. Bull. SEV 58(1967)17, S. 810...818.
- [9] U. Kull und R. Schuler: Messungen mit hoher Gleichspannung zur Beurteilung der Wicklungsisolierung von Hochspannungsmaschinen. Brown Boveri Mitt. 53(1966)9, S. 531...537.
- [10] R. Schuler: Isolationsprüfung von Wicklungen rotierender Maschinen mit Gleichspannung. Brown Boveri Mitt. 55(1968)4/5, S. 208...214.
- [11] J. A. Oliver, H. H. Woodson and J. S. Johnson: A turn insulation test for stator coils. Trans. IEEE Power Apparatus and Systems 87(1968)3, p. 669...678.

Adresse des Autors:

R. Schuler, Ingenieur, AG Brown, Boveri & Cie., 5400 Baden.

Commission Electrotechnique Internationale (CEI)

Sitzungen des CE 13, Appareils de mesure, und der SC 13A und 13B vom 9. bis 20. Juni 1969 in Wien

SC 13A, Compteurs

Unter dem Vorsitz von M. Whitehead versammelten sich über 50 Delegierte aus 18 Ländern. Das Hauptthema bildete die Behandlung des Dokumentes 13A(Secretariat)225 betreffend die Zusammenfassung der Empfehlungen der CEI über Zähler der Klassen 2,0, 1,0 und 0,5. Dieses Dokument konnte abschliessend behandelt werden und wird unter der 6-Monate-Regel zur Verteilung gelangen. Inhaltlich ist zu bemerken, dass die schweizerischen Anträge ausnahmslos angenommen worden sind, wenn z. T. auch in modifizierter Form. Der Begriff «essay de type» wurde näher präzisiert, indem darunter Approbationsprüfungen verstanden werden können, welche Apparate der Fabrikant der prüfenden Stelle vorlegt, oder die Typenprüfung an Zählern aus der Fabrikationsserie, welche Apparate willkürlich entnommen werden. Im übrigen hat die zusammengefasste Darstellung der Randbedingungen und Zählerfehlergrenzen in Tabellenform verschiedene Lücken und Ungereimtheiten sichtbar gemacht, welche noch bereinigt werden konnten. Sie fallen materiell bezüglich unserer Vollziehungsordnung jedoch nicht ins Gewicht.

Auch Dokument 13A(Secretariat)226 betr. graphische Symbole wurde abschliessend behandelt und gelangt gemäss 6-Monate-Regel zur Verteilung. Es erwies sich als ordentlich schwierig, für verschiedene Begriffe, die sich in den verschiedenen Ländern heute eingebürgert haben, einheitliche graphische Symbole zu finden. Nachdem die Anwendung bereits in der Einleitung als fakultativ erklärt worden ist, konnten viele Bedenken entkräftet werden.

Über die Arbeiten der GT 4, Philosophie über die Klassengenauigkeit, wurde der Rapport des Sekretärs verlesen und die Definition der Klassengenauigkeit diskutiert. Danach sollen die Zähler im Bereich von 0,1 I_n bis Grenzstrom und unter Referenzbedingungen die relevanten Spezifikationen erfüllen.

Die Arbeiten der GT 3 sowie das Dokument 13A(Secretariat)228 betr. Abnahmeprüfungen konnten aus Zeitgründen nicht mehr behandelt werden. A. Spälti

SC 13B, Appareils de mesure indicateurs

Das SC 13B, Appareils de mesure indicateurs, trat unter dem Vorsitz seines Präsidenten, I. Böhm (Ungarn), in Wien vom 16. bis 19. Juni 1969 zusammen. Das Sekretariat lag in den Händen von

I. Nagy und I. Szekely (Ungarn). Von 16 Ländern waren 34 Delegierte anwesend. Das CES war durch den Berichterstatter vertreten. Nach der üblichen Eröffnungszeremonie gab der Präsident einen Überblick über die Tätigkeit des Sekretariates und der Arbeitsgruppen während des vergangenen Jahres seit der letzten Zusammenkunft in London. Hiernach wurde sofort zum Haupttraktandum übergegangen, der Besprechung des Dokumentes 13B(Secretariat)226, Projet concernant les règles de sécurité pour les appareils de mesure indicateurs et enregistreurs et leurs accessoires. Die Diskussion erfolgte anhand einer vom Sekretariat sehr sorgfältig präparierten 29seitigen Zusammenstellung der eingetroffenen Länderstellungen. Neben einer Reihe Beschlüssen, die materiell von wenig grosser Bedeutung sind, jedoch eine wesentlich bessere Präsentation und Klarheit des Dokumentes ergeben, wurden folgende grundsätzliche Änderungen oder Ergänzungen beschlossen:

a) Da in der CEI noch keine für alle Comités d'Etudes gültige Grenze zwischen Kleinspannung und Niederspannung festgelegt worden ist, wurde beschlossen, hierfür einen provisorischen Grenzbereich von 42...50 V zu wählen, der dann später durch den allgemeingültigen Wert ersetzt werden kann.

b) Der schweizerische Vorschlag auf Festlegung eines einheitlichen Prüfprogrammes (genormte Reihenfolge der durchzuführenden Prüfungen) wurde durch Mehrheitsbeschluss abgelehnt (5 gegen 4 Stimmen bei 7 Enthaltungen). Als Gegenargument gegen unseren Vorschlag wurde erklärt, dass ein solches Prüfprogramm evtl. zu unnötiger Beschränkung der Handlungsfreiheit der Prüfstellen führen könnte. Überdies müsste der Entwurf wesentlich umgestaltet werden, um einen arbeitstechnisch logischen und zweckmässigen Prüfablauf zu gewährleisten, wodurch die Verabschiedung des Dokumentes mit Sicherheit wesentlich verzögert werde. Der Berichterstatter konnte sich insbesondere dem letzteren Gegenargument nicht verschliessen.

c) Der französische Vorschlag, in Zukunft solle auf der Skala des Messinstrumentes nicht mehr die Prüfspannung, sondern die maximal zulässige Arbeitsspannung (Nominal circuit voltage) angegeben werden, wurde abgelehnt. Es ist bereits zu spät, die heutige Regelung (Kennzeichnung der Prüfspannung in kV als Ziffer in einem Stern) abzuändern, ohne Gefahr zu laufen, grosse Verwirrung zu schaffen. Dagegen wurde nach ausgiebiger Diskussion beschlossen, in einer neu einzufügenden Tabelle das ge-