Statordiagnose bei Hydrogeneratoren

Autor(en): **Brügger, Thomas**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin.ch : Fachzeitschrift und Verbandsinformationen von Electrosuisse, VSE = revue spécialisée et informations des associations Electrosuisse, AES**

Band (Jahr): **106 (2015)**

Heft 11

PDF erstellt am: **24.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-856740

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.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Statordiagnose bei Hydrogeneratoren

Entwicklungspotenzial elektrischer Methoden

Schäden der Statorisolation sind ein häufiger Grund für ungeplante Ausfälle von Hydrogeneratoren. Für den Betreiber sind solche Ausfälle aufgrund der damit verbundenen Produktionsausfälle immer kostspielig. Eine aussagekräftige und effiziente Diagnose ist deshalb speziell bei zustandsbasierter Instandhaltung wichtig. Drei elektrische Diagnosemethoden – die Teilentladungsmessung, die Verlustfaktormessung sowie die Polarisationsstrommessung – werden hier mit ihrem jeweiligen Entwicklungspotenzial vorgestellt.

Thomas Brügger

Eine Umfrage der Cigré bei Betreibern von insgesamt 1199 Hydrogeneratoren ergab, dass Fehler der Statorisolation über die Hälfte der Maschinenschäden ausmachen (Bild 1).[1] Grund genug, sich einen Überblick über die wichtigsten elektrischen Diagnosemethoden und deren Potenzial im Hinblick auf Erweiterungen zu verschaffen.

Teilentladungsmessung

Mit der Teilentladungsmessung [2] ist es im Gegensatz zu den in den folgenden Abschnitten beschriebenen Methoden der dielektrischen Spektroskopie möglich, einzelne Schwachstellen in der Statorwicklung zu detektieren und deren Gefahrenpotenzial zu beurteilen.

Im Isoliersystem einer Statorwicklung können an verschiedenen Stellen Teilentladungen (TE) auftreten. Die häufigsten TE-Quellen sind Gaseinschlüsse in der Isolation, flächige Ablösungen an der Grenzfläche Leiter/Isolation oder zwischen einzelnen Lagen der Isolation, Nutentladungen, Oberflächenentladungen im Wickelkopfbereich und bei Phasentrennungen.[3]

Die Ladungsverschiebungen dieser TE-Ereignisse werden mit einem Kopplungskondensator und einer Messimpedanz erfasst und vom TE-Messsystem phasenkorreliert aufgezeichnet.

Das TE-Messsystem zeichnet das Signal der Messimpedanz auf und stellt aussagekräftige Kennwerte für Auswertung und Beurteilung bereit. Diese umfassen:

- Scheinbare Ladung der TE-Impulse,
- Phasenlage und Polarität,
- Impulshäufigkeit und Impulsanzahl,
- TE-Ein- und Aussetzspannung.

Potenzial

Bei der Fachkommission für Hochspannungsfragen (FKH) läuft derzeit ein vom Projekt- und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft unterstütztes Forschungsprojekt, das sich mit dem Entwicklungspotenzial der Teilentladungsmessung beschäftigt. Dieses Projekt untersucht das Potenzial von TE-Messung bei tieferen Prüffrequenzen bis in den VLF-Bereich (Very Low Frequency, 0,1 Hz). Die VLF-Prüfspannung kann von sehr kompakten Quellen erzeugt werden. Die Tabelle fasst die nötigen Prüfleistungen und das ungefähre Gewicht von Prüfquellen in Abhängigkeit der Prüffrequenz zusammen.

Im Laufe der Untersuchung wurden bis anhin an drei Hydrogenerator-Statoren VLF-TE-Messungen durchgeführt und mit 50-Hz-Messungen verglichen. In Bild 2 sind die TE-Muster eines Isolationsfehlers zu sehen, der im Bereich der Spannungsnulldurchgänge zu charakteristischen Entladungen führt. Erwartungsgemäss traten bei der VLF-Prüfung weniger TE auf, was zum einen an der im Vergleich zur 50-Hz-Messung wesentlich kleineren Anzahl Spannungsperioden in den verglichenen Messintervallen liegt, zum anderen aber auch durch ein anderes Verhältnis der kapazitiven und ohmschen Leitung erklärt werden kann. Durch die Frequenzabhängigkeit von Phasenlage und TE-Impulshäufigkeit könnte mit der Variation der Prüffrequenz zudem eine höhere Fehlerselektivität erreicht werden.

Verlustfaktormessung

Der Verlustfaktor ($\tan\delta$) quantifiziert die dielektrischen Verluste in der Wicklungsisolation. Im Ersatzschaltbild der Isolation können diese Verluste als ohmscher Widerstand modelliert werden und der $\tan\delta$ ergibt sich als das Verhältnis zwischen ohmschem und kapazitivem Strom (Bild 3).

Die dielektrischen Verluste setzen sich aus Absorptions- ($\tan\delta_A$) und Leckstromverlusten ($\tan\delta_L$) sowie, oberhalb der Teilentladungs-Einsatzspannung, zusätzlichen Ionisationsverlusten ($\tan\delta_{TE}$) zusammen: $\tan\delta = \tan\delta_L + \tan\delta_A + \tan\delta_{TE}$

In einer fehlerfreien Epoxid/Glimmer-Isolation können Leckströme bei Nennspannung vernachlässigt werden. Demnach werden die dielektrischen Verluste unterhalb der TE-Einsatzspannung bei einer Messspannung von 0,1–0,2 U_n durch Absorptionsverluste infolge von Reorientierungsprozessen polarer Moleküle im elektrischen Wechselfeld dominiert. Während der Alterung der Isolation steigt die Anzahl polarer Moleküle, da durch die Oxidation der langen Epoxidketten neue polare Fragmente entstehen. Dies führt zu zusätzlichen Absorptionsverlusten und damit zu einem Anstieg des Beitrages $\tan\delta_A$.

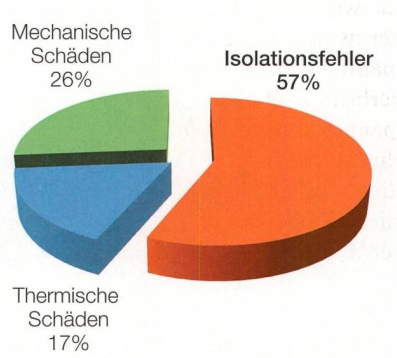

Bild 1 Verteilung von Schadensursachen bei Hydrogeneratoren. [1]

Prüffrequenz	Scheinleistung	Gewicht Prüfquelle
0,1 Hz	30 VA	ca. 10 kg
1 Hz	300 VA	ca. 100 kg
50 Hz	15 kVA	ca. 1 t

Nötige Prüfleistung und ungefähres Gewicht der Prüfquelle für eine 0,5-µF-Wicklung mit U_P = 10 kV.

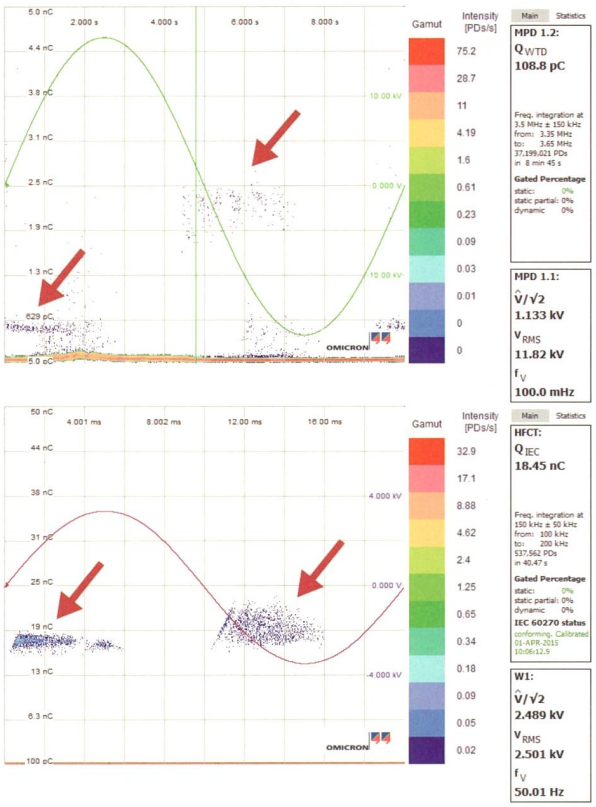

Bild 2 Vergleich einer VLF-TE-Messung mit 100 mHz (oben) mit einer betriebsfrequenten Messung mit 50 Hz (unten).

Oberhalb der TE-Einsatzspannung beinhaltet der Verlustfaktor auch den Beitrag der Ionisationsverluste durch Teilentladungen innerhalb der Hauptisolation. Die zusätzlichen Ionisationsverluste führen zu einem schnelleren Anstieg des Verlustfaktors. Um die Intensität von Teilentladungen zu beurteilen, wird deshalb auch die Steigung des Verlustfaktors in Funktion der Prüfspannung betrachtet. Je schneller der Verlustfaktor oberhalb der TE-Einsatzspannung ansteigt, desto höher ist das Niveau der Teilentladungen. Dieser Anstieg wird auch als Delta-tan δ (tan δ) oder Tipup des Verlustfaktors bezeichnet.[4]

Potenzial

Mit einer Online-Messung könnte die Entwicklung des Verlustfaktors und damit des Isolationszustands auch zwischen Wartungsstillständen gemessen werden. Für die Online-Messung wird zudem keine zusätzliche Prüfspannungsquelle benötigt. In [5] wird eine Methode vorgeschlagen und im Rahmen eines beschleunigten Alterungsversuchs an einem 2,3-kV-Motor untersucht. Die Methode basiert auf der Messung des Differenzstromes zwischen Netz- und Sternpunktleiter jeder Phase. Dazu wird im einfachsten Fall ein geeigneter Stromwandler um Netz- und Sternpunktleiter gelegt, wodurch sich die Lastströme kompensieren und nur der durch die Isolation fliessende Differenzstrom gemessen wird (Bild 4).

Mit dem Winkel zwischen der Phasenspannung und dem Differenzstrom (Isolationsstrom) berechnet sich der Verlustfaktor für die Phase U zu

$$\tan\delta = \tan(90° - \angle(V_U, I_{D,U}))$$

mit der Phasenspannung V_U und dem Differenzstrom $I_{D,U}$. Zu beachten ist, dass die so gewonnenen Werte nicht direkt mit den Offline-Werten, und insbesondere auch nicht mit den empfohlenen Grenzwerten, verglichen werden können, weil die Spannungsverteilung anders ist: Bei der Offline-Messung liegt die gesamte Phasenwicklung auf Prüfspannungspotenzial, während bei der Online-Messung der Sternpunkt auf Erdpotenzial liegt und die Spannung entlang der Wicklung bis zum Klemmenpotenzial ansteigt.

Polarisationsstrommessung

Für die Polarisationsstrommessung (PDC-Messung) wird an den parallel geschalteten Phasenwicklungen eine Gleichspannung angelegt und die zeitliche Entwicklung des Polarisationsstromes I_{Pol} nach dem Spannungssprung aufgezeichnet. Nach einer vordefinierten Zeitspanne werden die Wicklungen geerdet und der Depolarisationsstrom gemessen. Die für die Messung benötigte Gleichspannung (500–5000 V) kann dabei von einer tragbaren Quelle erzeugt werden, wodurch sich der Aufwand für die Messung in Grenzen hält.

Der gemessene Polarisationsstrom I_{Pol} besteht aus der Summe dreier Komponenten: einem kapazitiven Ladestrom I_C, einem Absorptionsstrom I_A sowie einem Leckstrom I_L.

- Der kapazitive Ladestrom I_C klingt nach Anlegen der Spannung mit einer Zeitkonstante von ca. 100 ms exponentiell ab und ist somit schon nach 1 s vernachlässigbar.
- Der Absorptionsstrom I_A ist die Folge der Polarisation des Dielektrikums unter Einfluss des elektrischen Feldes. Unter Polarisation werden verschiedene Effekte subsumiert, die zu einer Verschiebung von positiven und negativen Ladungen im Dielektrikum führen. Hauptursache für die Ladungsverschiebungen ist die Ausrichtung von molekularen Dipolen im elektrischen Feld.[6] Der Absorptionsstrom I_A klingt ebenfalls ab und erreicht bei einer typischen Glimmer/Kunstharz-Isolation nach rund 10 Minuten vernachlässigbar kleine Werte.
- Die dritte Komponente, der Leckstrom I_L, ist die Summe des durch die Hauptisolation fliessenden Leitungs-

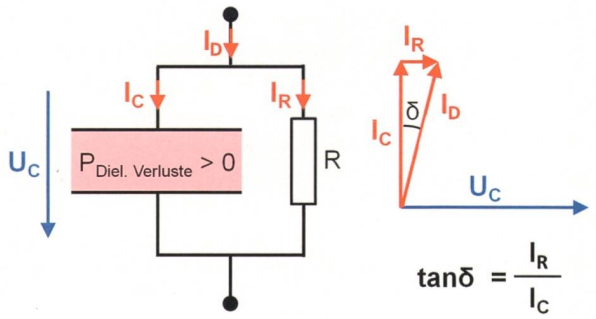

Bild 3 Ersatzschaltbild der Isolation und Definition des Verlustfaktors (tan δ).

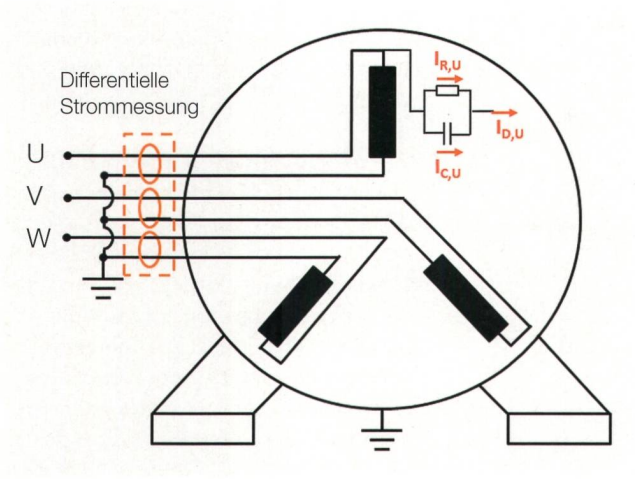

Bild 4 Online-Verlustfaktormessung mittels Differenzstrommessung.

Bilder: FKH

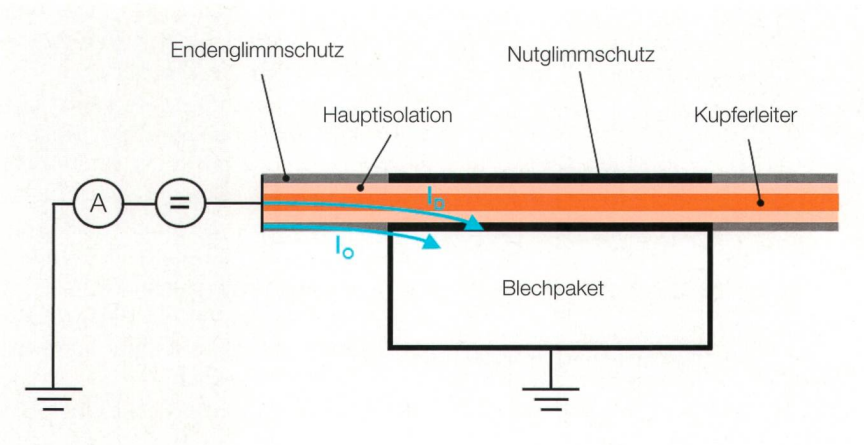

Bild 5 Der Leckstrom in der Isolation ist die Summe des Oberflächenstroms I_O und des Leitungsstroms I_D.

stroms I_D sowie eines über die Oberfläche des Endenglimmschutz fliessenden Teils I_O **(Bild 5)**. Der Leckstrom klingt im Gegensatz zum kapazitiven Ladestrom und dem Absorptionsstrom nicht ab.

Da eine Glimmer/Kunstharz-Isolation (im Gegensatz zu den früheren Glimmer/Asphalt-Systemen) keine nennenswerte Feuchtigkeitsaufnahme hat, nimmt der Leitungsstrom I_D nur bei groben Fehlern in der Hauptisolation bedeutend zu. Dagegen können Feuchtigkeit oder eine oberflächliche Verschmutzung des Endenglimmschutzes mit leitfähigen Partikeln zu signifikanten Oberflächenströmen führen. Ein einfacher Kennwert der Polarisationsstrommessung ist der Polarisationsindex (PI). Der Polarisationsindex ist als das Verhältnis der gemessenen Polarisationsströme eine Minute bzw. zehn Minuten nach Anlegen der Spannung definiert. Eine Minute nach dem Spannungssprung ist der kapazitive Ladestrom bereits abgeklungen, der Absorptionsstrom hingegen noch vergleichsweise hoch, während nach zehn Minuten auch der Absorptionsstrom weitgehend abgeklungen ist und praktisch nur noch der Leckstrom gemessen wird.

Falls der Absorptionsstrom eine Minute nach Anlegen der Spannung grösser als der Leckstrom ist, beträgt der Polarisationsindex mehr als 2, was in der Praxis als unterer Grenzwert für einen ausreichenden Isolationszustand angesehen wird.[7]

Potenzial

In der Vergangenheit beschränkten sich die dielektrischen Messungen bei der Statordiagnose in der Regel auf die Bestimmung des Isolationswiderstands und des Polarisationsindex mit verhältnismässig einfachen Messgeräten. Die «echte» PDC-Messtechnik mit hochgenauer zeitlicher Aufzeichnung der Polarisations- und Depolarisationsströme wurde in erster Linie für die Diagnose von Leistungstransformatoren entwickelt und eingesetzt. [8] kommt zum Schluss, dass insbesondere der zeitliche Verlauf des Depolarisationsstromes eine differenziertere Aussage über die Art der Isolationsalterung zulässt.

Referenzen

[1] Cigré Working Group A1.10: Survey of Hydrogenerator Failures, Technical Brochure no. 392, October 2009.
[2] R. Bartnikas, «Partial Discharges – Their Mechanism, Detection and Measurement», IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 9, no. 5, October 2002.
[3] C. Hudon, M. Bélec, «Partial Discharge Signal Interpretation for Generator Diagnostics», IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 12, no. 2, April 2005.
[4] F.T. Emery, «Basics of Power Factor Measurements on High Voltage Stator Bars and Stator Windings», IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 20, no. 3, pp. 40–45, May/June 2004.
[5] K. Younsi et al., «On-line Capacitance and Dissipation Factor Monitoring of AC Stator Insulation», IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 17, no. 5, October 2010.
[6] W.S. Zaengl, «Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain for HV Power Equipment, Part I. Theoretical Considerations», IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 19, no. 5, pp. 5–19, September/October 2003.
[7] G.C. Stone, E.A. Boulter, I. Culbert, H. Dhirani, «Electrical Insulation for Rotating Machines», IEEE Press, Piscataway, John Wiley & Sons, ISBN 0-471-44506-1, 2004.
[8] S.A. Bhumiwat, «On-site Non-destructive Dielectric Response Diagnosis of Rotating Machines», IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 17, no. 5, October 2010.

Autor

Dr. sc. ETH **Thomas Brügger** hat an der ETH Zürich Elektrotechnik studiert und am Institut für Elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnologie (EEH) promoviert. Seit 2011 arbeitet er als Prüfingenieur bei der Fachkommission für Hochspannungsfragen (FKH) in Zürich.
FKH, www.fkh.ch, 8044 Zürich, bruegger@fkh.ch

Résumé

Diagnostic des stators des hydrogénérateurs

Potentiel de développement des méthodes électriques

L'endommagement de l'isolation des stators est souvent la source de pannes imprévues des hydrogénérateurs. Pour l'exploitant, ces pannes sont toujours coûteuses du fait des pertes de production qui en découlent. Un diagnostic efficace et probant est donc important, surtout en ce qui concerne l'entretien basé sur l'état. Cet article met en évidence trois méthodes de diagnostic électrique – la mesure des décharges partielles, la mesure des facteurs de pertes, ainsi que la mesure du courant de polarisation – chacune avec son potentiel de développement.

No

SIEMENS

Totally Integrated Power

HB3-80 Generatorschaltanlage

Richtungsweisend mit Vakuum-Technologie

Die einphasig gekapselte HB3-80 Generatorschaltanlage sorgt für eine nachhaltige und zuverlässige Energieversorgung in der Kraftwerkstechnologie.
Die HB3-80 ist die weltweit erste Generatorschaltanlage mit Vakuum-Generatorschaltern für einen Leistungsbereich bis zu 10.000 A bei natürlicher Kühlung und einem nach Standard IEEE C37.013 typgeprüften Schaltvermögen von 80 kA. Sie bietet aufgrund ihrer einphasigen Kapselung eine maximale Betriebs- und Personensicherheit, da Kurzschlüsse zwischen den Phasen ausgeschlossen sind.

Anwendungsbereiche:
- Kraftwerksblöcke bis zu 160 MW bzw. 250 MW, je nach Kraftwerkstyp und Betriebsspannung
- Innenraum- und Freiluftaufstellung

Vorteile:
- optimale Betriebs- und Personensicherheit
- nachhaltige und umweltfreundliche Vakuum-Technologie
- minimale Installations-, Wartungs- und Instandhaltungskosten
- hohe Wirtschaftlichkeit und Betriebsverfügbarkeit

Siemens Schweiz AG, Energy Management, Freilagerstrasse 40, 8047 Zürich, Schweiz, Tel. +41 585 583 580, power.info.ch@siemens.com

www.siemens.ch/energy