

Unkonventionelle Messmethoden an Generatoren

Christof Sumereeder, Technische Universität Graz, Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement

Einleitung

In der Regel wird für Betriebsmittel mit hohem Investitionswert, wie Generatoren oder Transformatoren eine zustands- oder risikoorientierte Instandhaltungsstrategie eingesetzt [1]. Für die Zustandsbewertung und Risikoanalyse von Betriebsmitteln in der Hochspannungstechnik stellt die technische Diagnostik ein wichtiges Instrument dar. Das Ziel der Diagnoseuntersuchungen ist die Feststellung von Abweichungen vom Normalzustand, speziell im elektrischen Isoliersystem. Die Grundlagen für die Durchführung der Diagnoseuntersuchungen finden sich in diversen Normen oder Prüfvorschriften, auch Empfehlungen des Herstellers werden herangezogen.

Im Rahmen dieses Artikels sollen ausgewählte konventionelle Diagnoseverfahren vorgestellt werden und mit unkonventionellen Methoden verglichen werden.

Routinemäßig wird die Diagnose an Statorwicklung von Generatoren mittels Messung von Isolationswiderstand, dielektrischem Verlustfaktor $\tan \delta$ und der Teilentladungen (TE) durchgeführt. Eine visuelle Inspektion sollte immer Umfang der Untersuchung sein. Gegebenenfalls wird auch eine Spannungsprüfung bei erhöhter Spannung angewendet. Für die Bewertung der Ergebnisse werden folgende Normen herangezogen: Der Isolationswiderstand wird mittels IEEE 43 [2], der $\tan \delta$ nach IEEE 286 [3] und die Teilentladungen nach IEEE 1434 [4] und IEC 60270 [5] bewertet. Die Höhe der anzuwendenden Prüfspannung ist in diesen Normen nicht spezifiziert, im Regelfall wird mit der Nennspannung getestet.

Prüfobjekt

Die Untersuchungen im Kraftwerk Vor-Ort wurden an Wasserkraftgeneratoren verschiedenen Typs und an Generatorstäben im Labor durchgeführt. Im speziellen werden folgend die Messergebnisse eines Generators erläutert: 20 MVA, 6,3 kV, Inbetriebnahme 1994, Speicherkraftwerk, VPI Isoliersystem (Vakuum Druckimprägnierung), kontinuierlicher Aufbau mit Innen- und Außenglimmschutz.

Die Diagnoseuntersuchungen stellen einen Teil der routinemäßigen Instandhaltung dar und wurden nach der Revision der Maschine durchgeführt. Im Weiteren werden die unterschiedlichen Messmethoden gegenüber gestellt.

Vergleich Isolationswiderstandsmessung mit dielektrischer Diagnostik

Der Ablauf der Isolationswiderstandsmessung ist in [2] beschrieben. Die Statorwicklung wird so lange mit einer Gleichspannung beaufschlagt, bis die Polarisierungsmechanismen abgeklungen sind. Im Regelfall wird die Wicklung 10 Minuten geladen und ebenso lange entladen. Der Verlauf des Isolationswiderstands mit der Zeit setzt sich aus folgenden vier Komponenten zusammen: Absorption, Leitfähigkeit, Kriechströme und kapazitiver Anteil. Der Absorptionsstrom wird durch die Polarisationsmechanismen des Isoliersystems beeinflusst. Der Kriechstrom wird vor allem durch den Zustand der Isolierstoffoberfläche (Reinheit, Trockenheit) bestimmt, während die Leitfähigkeitskomponente durch den Durchgangswiderstand gegeben ist. Da der Widerstand eine temperaturabhängige Größe ist, muss die Messtemperatur in der Bewertung Berücksichtigung finden.

Für die Auswertung wird der Polarisationsindex (PI) herangezogen, der sich aus dem Widerstandsverhältnis nach 10 und einer Minute ergibt. Für Hochspannungswicklungen soll der PI größer als 2,0 sein, saubere und trockene Wicklungen weisen einen PI von 4,0 und höher auf [6]. Die Trockenheit von Wicklungen wird gemäß den Empfehlungen nach [7] und [8] bewertet. Hiefür berechnet man die Isolationszeitkonstante τ_{10} als Produkt aus dem Widerstand nach 10 Minuten und der Wicklungskapazität bei 20% der Nennspannung.

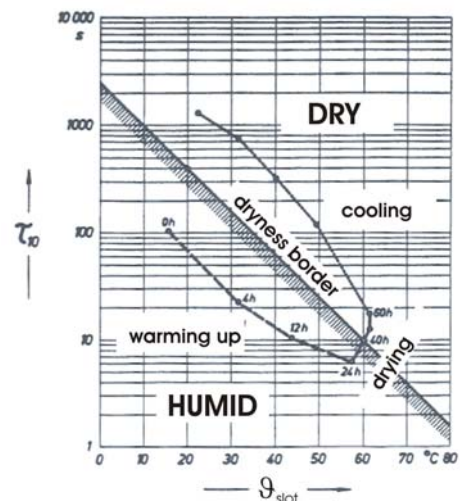


Bild 1: Isolationszeitkonstante als Funktion der Wicklungstemperatur zur Bestimmung der Trockenheit [8]

In Bild 1 ist das thermische Verhalten einer Wicklung dargestellt. Liegt der Messwert unterhalb der Trockenheitsgrenze, so ist die Wicklung als feucht zu bewerten und vor der Inbetriebnahme aber auch vor weiteren prüftechnischen Untersuchungen entsprechend zu trocknen.

Im Vergleich zur Isolationswiderstandsmessung wurden dielektrische Untersuchungen im Zeit- und Frequenzbereich durchgeführt. Die Frequency Domain Spectroscopy (FDS) und Polarization Depolarization Current (PDC) werden bei Transformatoren [9] und Kabeln [10] zur Bestimmung des Feuchtigkeitsgehalts vom Isoliersystem eingesetzt. Diese Methoden wurden in [11, 12] erläutert. Ein innovativer Algorithmus [13] ermöglicht die Kombination beider Methoden, wobei für hohe Frequenzen die FDS und für niedere die PDC Methode angewendet wird. Der Vorteil liegt in einer wesentlich kürzeren Prüfdauer.

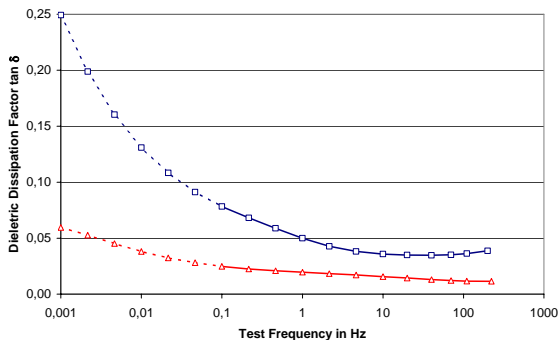


Bild 2: Frequenzabhängige Darstellung des Verlustfaktors eines harzreichen Systems (blaue Linie) und eines VPI Systems (rote Linie), durchgezogene Linie: FDS, gepunktete Linie: PDC

In Bild 2 ist das Ergebnis der dielektrischen Diagnostik dargestellt. Die rote Linie ist der Verlustfaktorverlauf des untersuchten VPI Generators und vergleichsweise ist ein anderer RR Generator eingezeichnet. Zur Bewertung dieser Ergebnisse wurden die Erkenntnisse aus [14 und 15] herangezogen. Der frequenzabhängige $\tan \delta$ kann sehr gut zur Bewertung der Trockenheit herangezogen werden, ebenso das Kapazitätsverhältnis zwischen Netzfrequenz und einer niedrigeren (z.B. 10 mHz). Ein Faktor von 10 und größer entspricht einer feuchten Wicklung.

Um den Einfluss der Feuchtigkeit auf das dielektrische Verhalten besser abschätzen zu können, wurde im Labor der Einfluss von Feuchtigkeit und Wärme auf die Stäbe untersucht. In Bild 3 ist das Ergebnis grafisch dargestellt: die unteren Linien wurden jeweils bei trockener Luft (ca. 27 %rF) aufgenommen und die oberen Linien bei feuchter Luft (54 %rF). Die blauen Linien sind die Werte bei Raumtemperatur (25 °C), die grünen bei 35 °C und die roten bei 45 °C.

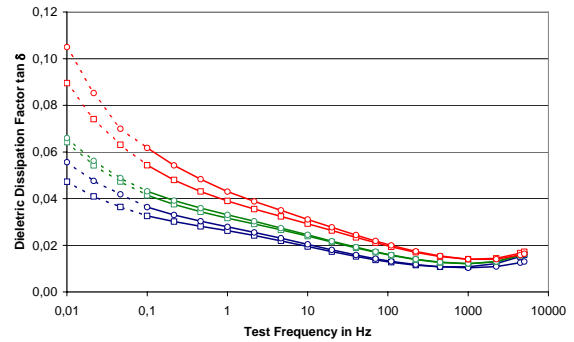


Bild 3: Temperatur und Feuchtigkeitseinfluss auf Generatorisierungen

Der thermische Verlauf wurde bereits in [16, 17] untersucht. Erhöht man die Feuchtigkeit noch weiter auf 90 %rF, so ist ein signifikanter Anstieg des Verlustfaktors bei kleinen Frequenzen in Bild 4 erkennbar. Diese Werte wurden bei 35 °C im Labor aufgenommen.

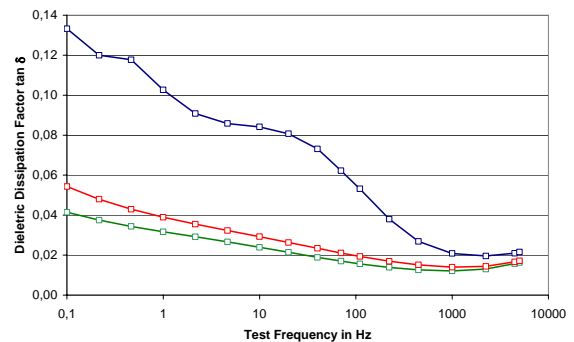


Bild 4: Trockenes (rot, grün) und feuchtes (blau) Isoliersystem

Die Ursache dieses Verhaltens ist hauptsächlich auf das stark feuchtigkeitsabhängige Verhalten der Kriechströme an der Staboberfläche zurückzuführen.

Vergleich von Prüfanlagen mit fixer und variabler Frequenz

Für die Spannungsbereitstellung bei Vor-Ort Prüfungen sind leistungsfähige Prüftransformatoren erforderlich. Kommerziell werden Anlagen mit fixer und Resonanzanlagen mit variabler Frequenz angeboten. In Bild 5 sind die Ersatzschaltbilder beider Anlagen dargestellt. In früheren Untersuchungen wurden die Vor-/Nachteile [19, 20] gegenübergestellt.

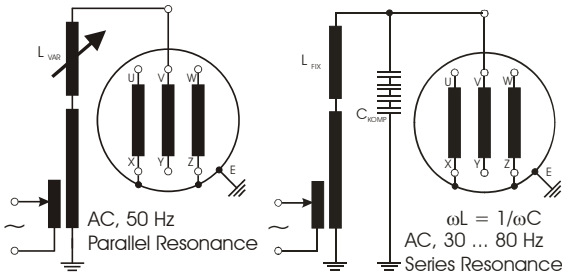


Bild 5: Parallel und Serienresonanzanlage

Bei dieser Untersuchung wurden beide Prüfsysteme am Generator Vor-Ort verglichen. Das Frequenzverhalten des Generators wurde mit der Resonanzanlage gemessen, siehe Bild 6. Ein ausgeprägtes Maximum ist bei etwa 60 Hz gegeben.

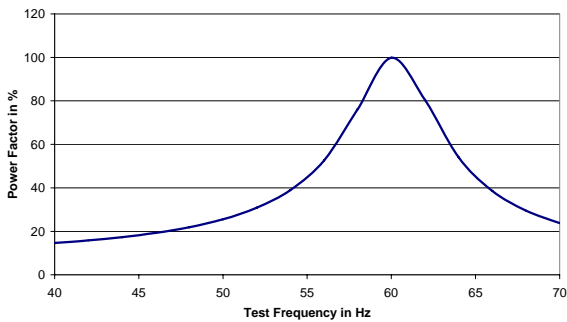


Bild 6: Resonanzverhalten von Wicklung und Spannungsquelle

Der Verlustfaktor wurde zuerst mit Netzfrequenz spannungsabhängig aufgenommen. Im Normalfall ist ein leichter kontinuierlicher Anstieg des $\tan \delta$ zu beobachten. Ist das Isoliermedium teilentladungsbehaftet, so ist ein stärkerer Anstieg des $\tan \delta$ oberhalb der TE-Einsatzspannung gegeben, siehe Bild 7. man spricht auch von einem ausgeprägten Isonisationsknick im Verlustfaktorverlauf. Es sind die Kurven der Einzelstränge (gelb, grün, violett) und der Gesamtwicklung (schwarz) dargestellt.

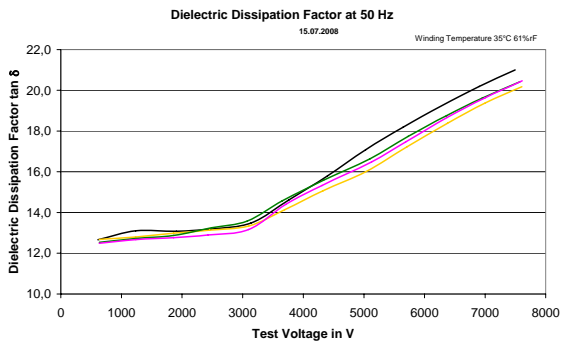


Bild 7: Spannungsabhängiger Verlauf des $\tan \delta$ bei 50 Hz

Wie aus den dielektrischen Untersuchungen zu erkennen war, ist der Verlustfaktor frequenzabhängig. Daher wurde die Messung bei 62 Hz nochmals durchgeführt. Die Abweichung zur Netzfrequenz war unterhalb von 1 %.

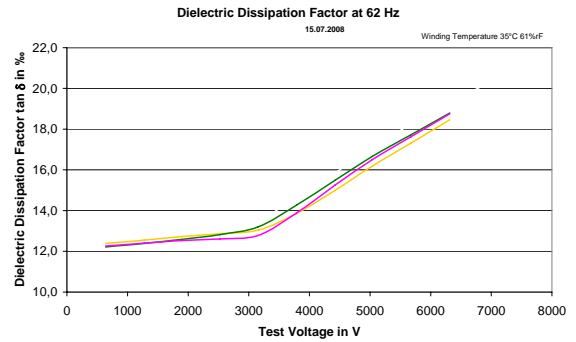


Bild 8: Spannungsabhängiger Verlauf des $\tan \delta$ bei 62 Hz

In einer weiteren Messung wurde das Verhalten zwischen 30 und 400 Hz untersucht, die Ergebnisse sind in Bild 9 dargestellt.

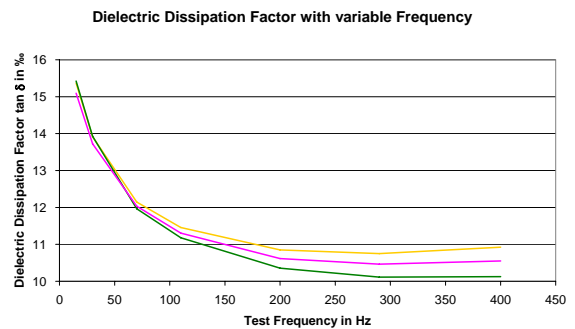


Bild 9: Spannungsabhängiger Verlauf des $\tan \delta$ zwischen 30 und 400 Hz

Es ist erkennbar, dass der Verlustfaktor ab ca. 200 Hz etwa konstant verläuft. Unterhalb 50 Hz ist ein starker Anstieg zu beobachten. Die zulässige Prüffrequenz nach [21] liegt zwischen 45 und 65 Hz. Dies bedeutet, dass sich beim Einsatz einer Resonanzanlage je nach Abstimmung der Prüffrequenz entsprechende abweichende Verlustfaktorwerte ergeben können.

Ein wichtiger Wert für die Bewertung der Qualität der Isolierung ist auch der Verlustfaktoranstieg ($\Delta \tan \delta$, bzw. Tip-Up). Im Bereich der TE-Einsatzspannung steigt der $\Delta \tan \delta$ zumeist merkbar an. In Bild 10 ist das Ergebnis bei unterschiedlicher Messfrequenz dargestellt, wobei kein wesentlicher Unterschied feststellbar ist.

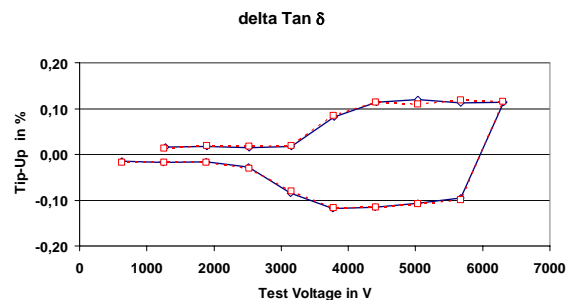


Bild 10: Verlustfaktoranstieg bei 50 (rot) und 62 (blau) Hz

Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden unterschiedliche Diagnoseverfahren an Generatoren gegenübergestellt. Es hat sich gezeigt, dass die konventionelle Isolationsstrommessung eine bewährte Methode ist, um den Verschmutzungsgrad und die Trockenheit von Wicklungen nachzuweisen. Mit Hilfe der dielektrischen Diagnostik im Zeit- und Frequenzbereich werden neben dem Isolationswiderstand auch der Verlustfaktor und die Kapazität der Wicklung bewertet.

Beim Vergleich unterschiedlicher Spannungsquellen konnte der Einfluss der Messfrequenz dargestellt werden. Verwendet man Serienresonanzanlagen, so ist auf die Frequenzabstimmung des Prüfkreises zu achten.

Literatur

- [1] M. Marketz, C. Rupp, H. Egger: Risk-based maintenance and replacement strategy for generators in storage power plants, Hydro 2008 Ljubljana
- [2] IEEE Std 43-2000: IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery
- [3] IEEE Std 286-2000: IEEE Recommended Practice for Measurement of Power Factor Tip-Up of Electric Machinery Stator Coil Insulation
- [4] IEEE Std 1434-2000: IEEE Trial-Use Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery
- [5] IEC 60270-2000: High-voltage test techniques - Partial discharge measurements
- [6] T. Klamt: Corona Protection of high-voltage stator windings of hydro generators, Hydro 2008, Ljubljana
- [7] W. Zwicknagl, Zur Frage der Bestimmung und Beurteilung des Feuchtigkeitsgehalts der Isolierung von Generator- Hochspannungswicklungen, Doctoral Thesis, Graz University of Technology, 1965
- [8] Empfehlungen für die Zustandserfassung der Aktivteile rotierender elektrischer Maschinen, ÖVE, 2nd Edition, 1990
- [9] T. Leibfried, A.J. Kachler: Insulation Diagnostics on Power Transformers using the Polarisation and Depolarisation Current (PDC) Analysis, ISEI 2002, Boston
- [10] W.S. Zaengl: Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain for HV Power Equipment (Transformers, Cables Etc.), ISH 2001, Bangalore
- [11] M. Koch, S. Tenbolen, M. Krueger, A. Kraetge: Improved Moisture Analysis of Power Transformers Using Dielectric Response Methods, MatPost07 - 3rd European Conference on HV & MV Substation Equipment, Lyon
- [12] A. Bouaicha et al., "Dielectric spectroscopy techniques as quality control tool: a feasibility study", IEEE Electr.Insul.Mag., vol. 25, no.1, pp. 6-14, Jan/Feb 2009
- [13] A. Akbari, A. Setayeshmehr, M. Farahani, H. Borsi, E. Gockenbach: A Software Technique for Transforming Dielectric Data from Time Domain to Frequency Domain for Insulation Diagnosis of Power Transformers, ISH 2007 Ljubljana
- [14] S.A. Bhumiwat: Application of Polarisation Depolarisation Current (PDC) technique on fault and trouble analysis of stator insulation, CIGRE SCA1&D1 Joint Colloquium, Gyongju 2007, Korea
- [15] S.A. Bhumiwat: Practical experiences on condition assessment of Stator insulation using Polarisation / Depolarisation Current techniques, CIGRE Session 2008, Paris
- [16] C. Sumereder, M. Muhr: Humidity Absorption of Generator Bars, ICPADM 2006, Bali
- [17] ELIN Test Report DM/14/90, Austria 1990
- [18] M. Muhr, R. Schwarz, C. Sumereder: Evaluation of the dissipation factor under different environmental conditions, ISH 2007 Ljubljana
- [19] W. Hauschild, P. Coors, J. Weidner, Gradinarov P.: Diagnostische Prüfungen an Ständerwicklungen großer rotierender Maschinen mit AC Resonanzprüfsystemen variabler Frequenz, ETG-Fachtagung Diagnostik elektrischer Betriebsmittel 2004, Köln
- [20] H. Michitsch, J. Spiegelberg: High Voltage Test of Large Rotating Machines for Commissioning and for Diagnosis on the Installation Side, ew - Elektrizitätswirtschaft vol. 104, 2005, Issue 17-18, pp. 62-70
- [21] IEC 60 Teil 1-1994: Hochspannungs-Prüftechnik