

Zyklische Isolationsalterung bei grossen Hydrogeneratoren

Einfluss höherer Startfrequenzen auf die Lebensdauer moderner Statorisolationssysteme

Schweizer Wasserkraftwerke profitieren vom erhöhten Bedarf an ökonomisch interessanter Spitzen- und Regenergie. Die Konzentration auf den Verkauf von Spitzenenergie bringt aber veränderte Betriebsmuster der Hydrogeneratoren mit sich, die sich insbesondere durch eine höhere Startfrequenz der Maschinen auszeichnen – mit Auswirkungen auf die Lebensdauer der Statorisolation.

Thomas Brügger

Es stellt sich die Frage, ob die wachsende Anzahl von Betriebszyklen einen signifikanten Einfluss auf die Alterung der Statorisolation der Hydrogeneratoren hat. Eine beschleunigte Alterung würde die Lebenserwartung der Isolation senken und hätte somit Konsequenzen für den Betreiber. Konkret müssten Abschreib-Zeiträume der Maschinen, Preisgestaltung und Wartungsplanung angepasst werden.

Vor diesem Hintergrund wurde am Hochspannungsinstitut der ETH Zürich ein mehrjähriges Forschungsprojekt durchgeführt, welches die Auswirkungen eines vermehrt zyklischen Betriebs auf die Alterung moderner Glimmer-/Epoxidharz-Isolationssysteme untersuchte.

Im Rahmen der Arbeit [1] wurden folgende Fragen behandelt:

- Welche Prozesse und Wirkungsketten treten bei der Alterung der Isolation durch zyklischen Betrieb auf?
- Können schon bestehende Alterungsmodelle die zyklische Alterung beschreiben, oder muss ein neues Alterungsmodell formuliert werden?
- Welche der standardmässig eingesetzten Diagnosemethoden sind tauglich, um durch zyklischen Betrieb bedingte Veränderungen und Alterungserscheinungen zu diagnostizieren?
- Welche Auswirkung auf die Lebenszeit der Isolation hat die zyklische Alterung?

Da Schäden an der Isolation nach wie vor für einen Grossteil der Ausfälle von

Hydrogeneratoren verantwortlich sind, liefert die Beantwortung dieser Fragen einen wesentlichen Beitrag zur Optimierung von Lebenserwartung und Verfügbarkeit von Hydrogeneratoren.

Zyklus-sensitive Alterungsprozesse

Unter Alterung versteht man den nicht umkehrbaren Prozess der Abnahme der Restlebensdauer eines Systems unter der Einwirkung von Alterungsfaktoren.

Die wesentlichen Faktoren bei der Alterung eines Glimmer/Kunstharz-Isolationssystems lassen sich in vier Kategorien einteilen [2]:

- thermische,
- elektrische,
- mechanische, sowie
- umweltbedingte

Alterungsfaktoren (Bild 1).

In der englischen Literatur wird hierbei oft die Abkürzung TEAM-Stresses (thermal, electrical, ambient, mechanical) verwendet. Da sich die Faktoren auch kombinieren und gegenseitig beeinflussen können, ergeben sich komplexe Kombinationen, welche den Alterungsprozess verursachen.

Um den Einfluss zunehmender Lastwechseldynamik auf das Alterungsverhalten von Statorisolationen grosser Hydrogeneratoren zu bestimmen, wurde zunächst untersucht, ob sich die bereits bekannten thermischen, elektrischen und mechanischen Alterungsprozesse bei zyklischer Belastung verändern. Danach wurde geklärt, ob durch den zyklischen

Betrieb neue Alterungsprozesse verursacht werden.

Thermische Alterung

Die Geschwindigkeit der thermischen Alterung wird durch die Temperatur bestimmt. Da sich die Temperaturprofile durch den zyklischen Betrieb ändern können, könnte sich auch das thermische Alterungsverhalten der Isolation ändern.

Im Gegensatz zum Dauerbetrieb wird bei Betriebsmustern mit hoher Lastwechseldynamik kein thermisches Gleichgewicht erreicht, und es gibt somit keine konstante Betriebstemperatur. Deshalb muss bei der Beurteilung der thermischen Alterung im zyklischen Betrieb von einer zeitlich variablen Temperatur ausgegangen werden.

Elektrische Alterung

Elektrische Alterung ist die Folge von Teilentladungen und dem Wachstum von elektrischen Bäumchen («Treeing») in der Isolation. Da die Feldstärke in der Isolation durch ein zyklisches Betriebsmuster nicht beeinflusst wird, ändert sich an der Wachstumsgeschwindigkeit der elektrischen Bäumchen nichts.

Dagegen könnte der zyklische Betrieb zusätzliche Einsatzstellen für elektrische Bäumchen verursachen. Einsatzstellen für elektrische Bäumchen sind luftgefüllte Hohlräume, in denen Teilentladungen auftreten. Thermische Zyklen können infolge mechanischer Spannungen zu Ablösungen der Hauptisolation von den Kupferleitern führen. Da die Zahl dieser Hohlräume damit potenziell vom zyklischen Betrieb beeinflusst wird, könnte sich auch die Wahrscheinlichkeit eines Versagens der Isolation aufgrund von Treeing verändern.

Die potenziell stärkere elektrische Alterung aufgrund zusätzlicher Einsatzstellen für elektrische Bäumchen infolge zyklischer Belastung ist allerdings kein eigenständiger Alterungsprozess, sondern ein Symptom der thermomechanischen Alterung. Somit hat der zyklische Betrieb nur indirekten Einfluss auf die elektrische Alterung.

Mechanische Alterung

Unter rein mechanischer Alterung wird die Alterung aufgrund von Vibrationen und fehlerstrombedingter transien-ter Kräfte verstanden. Fehlerströme können durch Fehlsynchronisationen verursacht werden, deren Wahrscheinlichkeit bei einer höheren Startfrequenz des Generators potenziell ansteigt. Vibrationen können durch häufigere Fehlerstrom-Ereignisse ebenfalls beeinflusst werden, da sich durch die dabei auftretenden hohen Stromkräfte die mechanische Befestigung der Leiterstäbe lockern kann. Dies gilt insbesondere für die Versteifung des Wickelkopfs, deren Lockerung zu höheren Vibrationsamplituden führt.

Zyklisch thermo-mechanische Alterung

Die schwerwiegendsten Auswirkungen eines verstärkt zyklischen Betriebs sind für thermo-mechanische Alterungsprozesse zu erwarten.

Unter zyklisch thermomechanischer Alterung werden jene Alterungsprozesse verstanden, die aufgrund von Temperaturänderungen in den Leiterstäben auftreten. Temperaturänderungen werden von Lauf- und Stillstandszyklen des Generators und von Laständerungen verursacht.

Die zyklische Veränderung der Leiterstabtemperatur führt aufgrund der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungen des Kupferleiters und der ihn umgebenden Isolation zu temperaturabhängigen mechanischen Wechsellastungen im Kupferleiter und der Hauptisolation (T_{Ins} , T_{Cu} in Bild 2) sowie zu Scherspannungen in der Grenzschicht aus Bindeharz zwischen Kupferleiter und Hauptisolation (τ). Die Scherspannungen können zu Ablösungen zwischen Isolation und Kupferleiter führen. Untersuchungen haben gezeigt, dass die Abscherungen schon innerhalb der ersten 50 thermischen Zyklen auftreten können.

Somit kann zyklischer Betrieb zu folgenden Alterungserscheinungen im Isolationssystem führen:

- Hohlraumbildung durch Ablösung der Hauptisolation von den Kupferleitern, Delaminationen der Glimmerbandlagen und Rissbildung im Kunstharz (Bild 3);
- erhöhte Vibrationsamplituden des Wickelkopfes wegen zyklisch thermo-mechanischer Materialermüdung der Befestigungselemente und der dadurch verursachten Lockerung des Wickelkopfverbundes.

Die Folge der Hohlraumbildung ist eine potenziell erhöhte elektrische Alterung durch Teilentladungs-Korrosion. Erhöhte Vibrationsamplituden im Wickelkopf können zudem zu Abrieb des Endenglimmschutzes an den Stützelementen führen, was zu Oberflächenentladungen (Korona) führen kann.

Bestehende Modelle für zyklisch thermo-mechanische Alterung

Bei den Generatorbetreibern wird die zyklische Belastung bisher allenfalls durch Anwendung eines Äquivalenz-Betriebsstunden-Modells berücksichtigt. Dieses Modell addiert zur effektiven Betriebszeit pro Start eine fest definierte Zeitdauer [3], um den startspezifischen

Zusatzbelastungen, worunter die thermischen Zyklen fallen, Rechnung zu tragen:

$$T_E = T_O + n \cdot T_S$$

T_E : Äquivalente Betriebszeit

T_O : Effektive Betriebszeit

T_S : «Lebenszeitverbrauch» pro Start (üblich sind 10 h)

n: Anzahl Starts.

Tauglichkeit von Diagnosemethoden hinsichtlich zyklischer Alterung

In der Literatur werden die Messung des Verlustfaktor-Tipups und die direkte Teilentladungsmessung als aussagekräftigste Methoden zur Diagnose von zyklisch bedingter Alterung angesehen [4], weil gemäss theoretischen Überlegungen



Bild 1 Thermische, elektrische und mechanische Alterungs- und Schadensmechanismen. Schwarz markiert sind betriebs- und konstruktionsbedingte Einflussgrößen. Rot markiert sind Alterungs- und Schadensmechanismen. Die Pfeile verdeutlichen die Interaktionen.

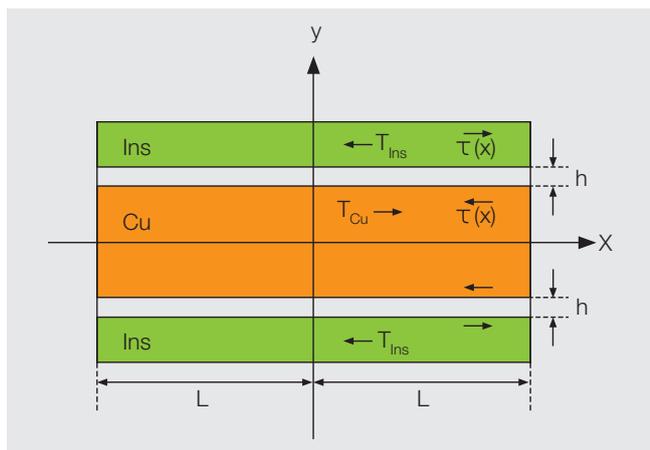


Bild 2 Mechanische Kräfte in Isolation und Kupferleiter des Statorstabs.

diese Methoden fähig sind, den Anstieg der Teilentladungsaktivität infolge von Hohlräumbildung durch Ablösungen der Hauptisolation von den Kupferleitern und Delaminationen der Glimmerbandlagen nachzuweisen. Die hypothetische Tauglichkeit der beiden Messmethoden wurde in zahlreichen Laborexperimenten verifiziert. Zudem gibt es auch vereinzelte Untersuchungen über die Anwendung im Betrieb.

Ablösungen können auch durch Abklopfen der Stäbe festgestellt werden, da sich die akustischen Eigenschaften durch die flächigen Hohlräume deutlich verändern. Diese Diagnosemethode ist allerdings nur bei ausgebauten Stäben möglich.

Einflussgrößen bei zyklischer Alterung

Die Geschwindigkeit des Ablösungsprozesses wird wesentlich vom Temperaturprofil der thermischen Zyklen beeinflusst. Maximaltemperaturen oberhalb einer spezifischen Schwellwert-Temperatur des Epoxidharzes führten im Experiment [1] innerhalb der ersten 200 Zyklen zu deutlichen Ablösungen und dem damit verbundenen Anstieg der Verlustfaktor bzw. TE-Messwerte. Der maximale Ablösungsgrad stellt sich bei Temperaturen oberhalb der Schwellwert-Temperatur nach ca. 1000 Zyklen ein, woraufhin sich die Diagnosewerte kaum noch verändern. Unterhalb der Schwellwert-Temperatur verlangsamt sich die Bildung von Ablösungen deutlich.

Auch die Leiterstablänge beeinflusst das Ablöseverhalten. Der Ablösungsgrad zwischen Hauptisolation und Kupferleiter nimmt mit der Stablänge zu. Dies wird durch die höheren Scherkräfte in der Kupfer/Isolation-Grenzschicht bei grösserer Stablänge erklärt.

Im Experiment mit 1500 Wärmezyklen (zwischen 30 und 135°C) wurden sowohl bei 1m- als auch bei 2m-Stäben deutliche Ablösungen infolge zyklischer Belastung festgestellt. Dies bedeutet, dass zyklisch bedingte Ablösungen der Hauptisolation vom Kupferleiter nicht nur in Leiterstäben von Turbogeneratoren, sondern auch in den kürzeren Leiterstäben von Hydrogeneratoren auftreten.

Diskussion eines zyklischen Alterungsmodells

Die gängigen Modelle für Isolationsalterung sind «Blackbox-Modelle», die empirisches Wissen über die Alterung in Abhängigkeit von thermischen, elektrischen und mechanischen Faktoren in einfacher mathematischer Form annähern.

Für die thermische Alterung bei zyklischen Betriebsmustern wurde im Rahmen der Arbeit eine Formel für den Lebensdauerverbrauch in Funktion der Isolationstemperatur hergeleitet [1]. Dies erlaubt eine verbesserte Beurteilung des

Lebenszeitverbrauchs der Isolierung aufgrund thermischer Alterung.

Die elektrische Alterung kann mit den bereits bekannten Lebensdauergesetzen beschrieben werden, da durch zyklischen Betrieb keine Beschleunigung der rein elektrischen Alterung verursacht wird.

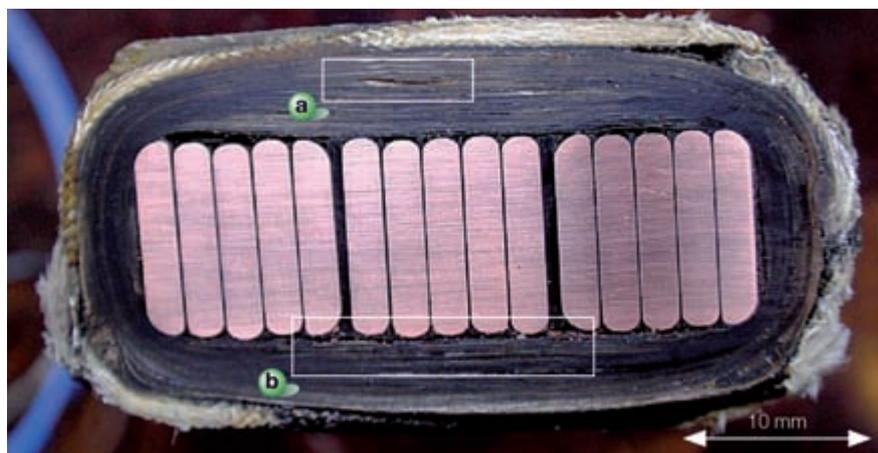
Die Komplexität der mechanischen Alterung scheint die Formulierung eines hinreichend genauen und allgemein anwendbaren Alterungsmodells schwierig zu machen.

Schlussfolgerungen

Aus der Untersuchung der Alterung von Stator-Isolationssystemen in Folge von zyklischem Betrieb ergeben sich folgende Schlussfolgerungen:

- Zyklischer Betrieb führt zu irreversiblen Veränderungen in Glimmer/Epoxid-Isolationssystemen von Hydrogeneratoren. Diese werden durch thermomechanische Wechselkräfte aufgrund unterschiedlicher Wärmeausdehnung der Isolationssystem-Komponenten verursacht. Die Folge ist eine erhöhte Teilentladungsaktivität, die durch Verlustfaktor- und TE-Messungen nachgewiesen werden kann.
- Elektrische Lebensdauerersuche an einzelnen, zyklisierten Generatorstäben mit maximalem Ablösungsgrad (nach 1500 Zyklen zwischen 30 und 135°C, Isolationsklasse F) ergaben keinen Hinweis auf eine Verkürzung der Restlebensdauer von Glimmer/Epoxid-Isolationssystemen infolge zyklischer Belastung.

Dies bedeutet für fehlerfrei hergestellte und eingebaute Statorstäbe, dass keine Lebenszeitverkürzung der Isolation aufgrund von zyklisch bedingten



Bilder: Thomas Brügger

Bild 3 a) Delaminationen zwischen Glimmerbandlagen, b) Ablösungen zwischen Kupferleiter und Hauptisolation.

Résumé

Vieillessement cyclique de l'isolation dans les grands générateurs hydroélectriques

Influence de l'augmentation de la fréquence des démarrages sur la durée de vie des systèmes modernes d'isolation de stator

Les centrales hydroélectriques suisses profitent des besoins accrus en énergie de pointe et de réglage, énergie particulièrement intéressante d'un point de vue économique. La concentration des activités sur la vente d'énergie de pointe entraîne toutefois la mise en place de schémas d'exploitation modifiés pour les générateurs hydroélectriques. Ces schémas se caractérisent notamment par des démarrages plus fréquents des machines, ce qui influence la durée de vie de l'isolation du stator.

L'étude du vieillissement des systèmes d'isolation de stator en exploitation cyclique a révélé d'une part que cette forme d'exploitation entraîne des modifications irréversibles dans les systèmes d'isolation mica/époxy des générateurs hydroélectriques dues aux interactions thermomécaniques produites par des coefficients de dilatation thermique différents. D'autre part, des essais de vieillissement électrique réalisés sur des barres individuelles de stator cyclées avec un décollement maximal (1500 cycles entre 30 et 135 °C, classe d'isolation F) n'ont indiqué aucune réduction de la durée de vie résiduelle des systèmes d'isolation mica/époxy suite à une charge cyclique. Le bon fonctionnement de l'isolation peut être vérifié en combinant essais et diagnostics adéquats avant et pendant l'exploitation.

No

Ablösungen der Hauptisolation von den Kupferleitern zu erwarten ist.

Die Fehlerfreiheit der Isolation lässt sich durch eine geeignete Kombination von Prüfungen und Diagnosemessungen vor und während des Betriebs nachweisen.

Da die Alterungsvorgänge im Stator-Isolationssystem komplex sind, trägt die Beurteilung von Diagnoseresultaten durch Experten wesentlich zur Betriebssicherheit und Lebenserwartung von zyklisch betriebenen Hydrogeneratoren bei.

Referenzen

- [1] Brügger, T., Einfluss starker Lastwechseldynamik auf das Alterungsverhalten der Isolation grosser Hydrogeneratoren, ETH DISS. NR. 19839. Die vollständige Arbeit ist unter <http://e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:4554/eth-4554-02.pdf> online verfügbar.
- [2] Brüttsch, R.; Fröhlich, K. et al., Insulation Failure Mechanisms of Power Generators, IEEE Electrical Insulation Magazine, 2008.
- [3] Sumereder, C.; Muhr et al.: Condition Evaluation of Hydro-Generators, International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, 2006.
- [4] Stone, G.C. et al.: Electrical Insulation for Rotating Machines, ISBN 0-471-44506-1, 2004.

Angaben zu den Autoren



Dr. **Thomas Brügger** arbeitete zwischen 2008 und 2011 unter der Leitung von Prof. Dr. Klaus Fröhlich am Institut für Elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnologie (EEH) der ETH Zürich. Seine Doktorarbeit schrieb er zum Thema

«Einfluss starker Lastwechseldynamik auf das Alterungsverhalten der Isolation grosser Hydrogeneratoren» [1].

Seit 2011 arbeitet Thomas Brügger als Prüffingenieur bei der Fachkommission für Hochspannungsfragen (FKH) in Zürich.

Fachkommission für Hochspannungsfragen, 8044 Zürich, bruegger@fkh.ch