



Doctoral Thesis

Einfluss starker Lastwechseldynamik auf das Alterungsverhalten der Isolierung grosser Hydrogeneratoren

Author(s):

Brügger, Thomas

Publication Date:

2011

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-006680028> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

DISS. ETH Nr. 19839

Einfluss starker Lastwechseldynamik auf das Alterungsverhalten der Isolierung grosser Hydrogeneratoren

ABHANDLUNG

zur Erlangung des Titels

DOKTOR DER WISSENSCHAFTEN

der

ETH ZÜRICH

vorgelegt von

THOMAS BRÜGGER

Dipl. El.-Ing. ETH

geboren am 4. Dezember 1975

von Oberkirch, LU

Angenommen auf Antrag von:

Prof. Dr. K. Fröhlich (Referent), ETH Zürich, Schweiz

Prof. Dr. M. Muhr (Korreferent), TU Graz, Österreich

Prof. Dr. Ch. Franck (Korreferent), ETH Zürich, Schweiz

2011

Kurzfassung

Die Erzeugung elektrischer Energie hat durch die Marktliberalisierung der letzten Jahren Änderungen erfahren, welche sich auch für die Hydrogeneratoren in Schweizerischen Wasserkraftwerken auswirken. Die vermehrte Produktion von Spitzen- und Regelenergie führt zu höheren Startfrequenzen und häufigeren Lastwechseln während des Betriebs. Die vorliegende Arbeit soll klären, ob die wachsende Anzahl von thermischen Zyklen einen signifikanten Einfluss auf das Alterungsverhalten der Statorisolierung hat.

Zunächst werden jene Alterungsprozesse bestimmt, die durch zyklischen Betrieb mit hoher Lastwechseldynamik beeinflusst werden. Es zeigt sich, dass die zyklische Alterung in erster Linie durch thermo-mechanische Wechselspannungen in den Generatorstäben verursacht wird. Verantwortlich dafür ist die unterschiedliche Wärmeausdehnung von Kupferleiter und Glimmer/Kunsthartz-Isolierung. Die Folge sind Ablösungen der Hauptisolierung von den Kupferleitern, was zu Hohlraumbildung und einer dadurch gesteigerten Teilentladungsaktivität führt.

Danach werden die hypothetischen Einflussgrößen der zyklischen Alterung identifiziert. Es sind dies die Geometrie der Generatorstäbe, die Anzahl Zyklen, sowie Maximaltemperaturen und Laständerungsraten der Zyklus-Temperaturprofile. Anhand von Betriebsdaten zyklisch betriebener Hydrogeneratoren werden charakteristische Werte für die Einflussgrößen abgeleitet.

Damit die Alterungswirkung einzelner Einflussgrößen der zyklischen Alterung experimentell quantifiziert werden kann, sind aussagekräftige Diagnosemethoden nötig, um den momentanen Alterungszustand einer Isolierung zu bestimmen. Durch Analyse von Langzeit-Diagnosedaten dreier Hydrogeneratoren wird geprüft, welche der gängigen, nicht-destruktiven Messungen dafür in Frage kommen. Es zeigt sich, dass die Messung des Verlustfaktor-Anstiegs (Verlustfaktor-Tipup) bei Überschreiten der Teilentladungs-

Einsatzspannung geeignet ist, um die als Folge von Ablösungen anwachsende TE-Aktivität integral zu erfassen. Die Verlustfaktormessungen sollten dabei mit direkter TE-Messung kombiniert werden, um das Gefahrenpotential einzelner TE-Quellen beurteilen zu können.

Da die ersten Diagnosemessungen erst drei Jahre nach Inbetriebnahme der Generatoren durchgeführt wurden, bleibt das frühe Alterungsverhalten unklar. Die Diagnosedaten lassen auch keine Aussagen über die Alterung bei Variation der Einflussgrößen zu. Aus diesem Grund werden hypothetische Auswirkungen der Einflussgrößen im Labor verifiziert. Dazu werden in neu entwickelten Zyklierungsversuchen die Einflussgrößen variiert und der Ablauf der Alterung mit den zuvor bestimmten Diagnosemessungen untersucht. Die Erkenntnisse aus den Laboruntersuchungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Geschwindigkeit des Ablösungsprozesses wird wesentlich vom Temperaturprofil der thermischen Zyklen beeinflusst. Maximaltemperaturen oberhalb von 100°C führten bei Leiterstäben der Temperaturklasse F innerhalb der ersten 200 Zyklen zu deutlichen Ablösungen und dem damit verbundenen Anstieg der Verlustfaktor- und TE-Messwerte. Nach ca. 1'000 Zyklen verändern sich die Diagnosewerte kaum noch, was mit dem Erreichen eines maximalen Ablösungsgrades erklärt wird.
- Infolge der Längenabhängigkeit der thermischen Ausdehnung treten bei längeren Stäben höhere Scherkräfte in der Grenzfläche zwischen Leiter und Hauptisolation auf. Im Experiment wurde bestätigt, dass die Ablösungen mit der Stablänge zunehmen. Allerdings wurden auch bei kurzen Stäben ($L = 1\text{m}$) deutliche Ablösungen infolge Zyklierung beobachtet.

Um die Auswirkung der zyklischen Alterung auf die Lebensdauer zu beurteilen, wurden im Labor elektrische Lebensdauerversuche bei dreifacher Nennspannung durchgeführt. Der Vergleich der Durchschlagszeiten von unzyklierten Stäben und Stäben mit maximalem Ablösungsgrad ergab keinen Hinweis auf eine Verkürzung der Restlebensdauer bei den zyklisch gealterten Stäben.

Für die Generatorstäbe in der Maschine lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Bei einer fehlerfreien Hauptisolation ist keine Lebenszeitverkürzung der Isolierung durch Ablösungen der Hauptisolierung von den Kupferleitern zu erwarten. Die Fehlerfreiheit lässt sich durch eine geeignete Kombination von Prüfungen und Diagnosemessungen vor und während des Betriebs nachweisen.
- Im Nutteil wird eine geringere Ablösungsbildung als bei Laborversuchen an freien Stäben erwartet, da die Pressung in der Nut einer Ablösung entgegenwirkt.
- Der Wickelkopf wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht betrachtet. Es bleibt deshalb zu untersuchen, ob die thermischen Zyklen eine Lockerung des Wickelkopfes verursachen und so zu einer verstärkten Alterung durch Vibrationen führen.

Abstract

The liberalization of the European electrical energy market has brought changes that are also affecting Swiss hydropower plants. The growing production of peak energy leads to higher start/stop-cycle frequencies of their hydrogenerators. The load change dynamics are further increased by fast start-ups. In consequence the high voltage insulation of the stator conductor bars is stressed by a higher number of thermal cycles and faster load changes. This thesis investigates the potentially life-shortening effects of increased load change dynamics during cyclic operation on modern mica/epoxy insulation.

The first step is the identification of thermo-mechanical fatigue as the dominant cyclic ageing process. The different thermal expansion of the copper conductors and the mica/epoxy groundwall causes shear stresses at the copper-insulation interface and tensile stresses inside the insulation volume. Thus, thermal cycles gradually weaken the bond between conductor and insulation. Subsequent separations of the insulation from the conductor produce voids and therefore an increased partial discharge (PD) activity in the interface.

In a second step, a list of hypothetical parameters of thermo-mechanical ageing is assembled. It includes the geometry of the stator bar, the number of thermal cycles, as well as maximum temperatures and heating rates of the cycles. On the basis of monitoring data of cyclic operated hydrogenerators, typical values for these parameters are derived.

In order to assess the influence of the individual parameters on the insulation ageing, meaningful diagnostics are needed. Based on theoretical considerations and the analysis of long-term diagnostic data from hydrogenerators, it is concluded that the measurement of the dissipation factor ($\tan\delta$) tipup is best suited for the integral detection of PD activity in the conductor/insulation interface. The dissipation factor tipup should be combined with phase-resolved PD measurement to enhance the diagnosis.

As the first available diagnostic data weren't collected until three years after commissioning of the generators, the early ageing behavior remains unclear. Furthermore the analysis of diagnostic data doesn't allow conclusions about the ageing with altered parameters. For these reasons the hypothetical parameters of thermo-mechanical ageing were varied in cyclic ageing tests under laboratory conditions on single stator bars. The ageing influence of the individual parameters was assessed with dissipation factor tipup and PD measurements and can be summarized as follows:

- The rate of groundwall insulation separation from the copper conductors due to thermo-mechanical stress is strongly influenced by the temperature of the cycles. Maximum temperatures above 100°C caused considerable separations in class F stator bars within the first 200 thermal cycles, which led to a significant rise of the dissipation factor tipup and the measured PD levels. After a 1'000 cycles the measurements remained almost stable, which can be explained by a maximal degree of insulation separation of from the conductors.
- Due to the length dependence of thermal expansion the shear stresses in the conductor/insulation-interface are higher in longer bars. The experiments verified a higher separation degree in longer bars after cyclic thermal stress. However, a significant separation degree was also found in short bars with a length of one meter.

To assess a potential influence of cyclic stress on the remaining lifetime of a insulation, destructive voltage endurance tests at $3 U_n$ were used. The times to insulation breakdown of uncycled bars showed no statistically significant difference to the breakdown times of cycled bars with a maximal degree of insulation separation from the groundwall.

For stator bars under operating conditions in a hydrogenerator, it can thus be concluded that:

- There is no reduction of lifetime in a flawless groundwall insulation due to the separation of the groundwall from the copper conductors of stator bars. The absence of flaws in the groundwall can be proven by a combination of tests and diagnostic measurements before and during the generator's operation.

- Bars in stator slots are expected to experience less separation than test bars under laboratory conditions because of the side-pressure in the slot.
- The investigation of ageing effects in the end-winding due to cyclic stress isn't in the scope of this thesis. To what extent cyclic stress might increase end-winding vibration amplitudes due to a thermo-mechanically caused loosening of the bracing must therefore be left for future investigation.