

Potential von VLF-TE-Messung zur Stator diagnose an Hydrogeneratoren

Potential of VLF PD measurements for diagnosis of stator insulation of large hydro generators

Dr. Thomas Brügger, bruegger@fkh.ch,
Fachkommission für Hochspannungsfragen, Zürich, Schweiz

Udo Ranninger, udo.ranninger@omicronenergy.com,
Fabian Öttl, fabian.oettl@omicronenergy.com,
Dr. Michael Krüger, michael.krueger@omicronenergy.com,
OMICRON electronics GmbH, Österreich

Kurzfassung

Schon in den 60er Jahren des letzten Jahrhunderts wurde die VLF-Prüfung (mit VLF, Very Low Frequency, wird gemeinhin eine Frequenz von 0.1 Hz bezeichnet) als Alternative zu den zuvor schon an Statoren angewandten DC-Prüfungen untersucht. Es war von Anfang an klar, dass die Spannungsverteilung im Generatorstab-Isoliersystem bei 0.1 Hz den Verhältnissen im Betrieb wesentlich näherkam als bei DC-Prüfungen. In der Einleitung werden Untersuchungen erwähnt, in denen Durchschlagsversuche an betriebsgealterten Stäben für 50/60-Hz und VLF ähnliche Durchschlagsmechanismen durch die Hauptisolierung verursachten, wohingegen bei DC wesentlich andere Durchschlagspfade beobachtet wurden. Der Fokus der vorliegenden Untersuchung liegt auf der Anwendbarkeit der Teilentladungs-(TE-)Diagnose an Statoren bei VLF-Prüffrequenz. Dazu werden typische Isolierungsfehler numerisch simuliert, um frequenzbedingte Unterschiede des TE-Verhaltens zu untersuchen. Die Implikationen dieser Simulationen decken sich gut mit TE-Messungen an einem kompletten Stator sowie Einzelstäben. Für die TE-Messungen konnte ein kommerzielles TE-Messsystem ohne weitere Anpassungen eingesetzt werden. Es wird gezeigt, dass die VLF-TE-Messung für praktisch bedeutsame Fehlerstellen (z.B. Schäden des Nutglimmschutzes oder des Endenglimmschutzes) aus prinzipiellen Gründen wesentlich weniger sensitiv als die Messung bei Betriebsfrequenz ist. Für die derzeit eingesetzten Glimmer/Kunstharz-Isoliersysteme wird deshalb die TE-Messung im Bereich der Betriebsfrequenz unverzichtbar bleiben.

Abstract

As early as in the 1960s, the VLF test (VLF, very low frequency, commonly meaning a frequency of 0.1 Hz) was studied as an alternative to the DC tests previously used on stators of large synchronous generators. It was clear from the beginning that the voltage stress distribution in the generator insulation system at 0.1 Hz was much closer to the operating conditions than with DC tests. The introduction mentions studies in which breakdown tests on 50/60-Hz and VLF service-aged bars caused similar breakdowns across the main insulation, whereas significantly different breakdown paths were observed at DC. The focus of the present study is on the applicability of the partial discharge (PD) diagnosis of stators at VLF test frequency. For this purpose, typical isolation faults are simulated numerically in order to investigate frequency-related differences in TE behaviour. The implications of these simulations match well with TE measurements on a complete stator as well as single rods. For the TE measurements, a commercial TE measuring system could be used without further adjustments. It is shown that the VLF-TE measurement is of substantially less sensitivity than the measurement at operating frequency for practically significant insulation failures (e.g., slot or end corona protection damages) for reasons of principle. For the currently used mica / synthetic resin insulation systems, the TE measurement in the range of the operating frequency will therefore remain indispensable.

1 Einleitung

Seit der Einführung grosser rotierender Hydrogeneratoren gab es das Bedürfnis, ungeplante Ausfälle möglichst zu vermeiden. Eine zentrale Rolle spielt dabei das Isoliersystem der Wicklung, welches einerseits beim Bau der Maschine fehlerfrei aufgebracht werden und im nachfolgenden oft jahrzehntelangen Betrieb den elektrischen und mechanischen Beanspruchungen widerstehen muss. Die Kernkomponente der Wicklungsisolierung hat sich in den letzten hundert Jahren nicht geändert, sie besteht immer noch aus einer anorganischen und teilentladungsresisten-

ten Glimmerbarriere. Geändert haben sich hingegen die Füll- bzw. Trägermaterialien (von Schellack über Asphalt hin zu Epoxidharz), die Fertigungstechnik (von reiner Handwicklung hin zu vollautomatischen Wickelmaschinen) und insbesondere die Feldstärken (von unter 1 kV/mm bis zu ca. 3 kV/mm bei heute eingesetzten Glimmer-/Epoxidharz-Systemen, siehe Abbildung 1 auf der Folgeseite). Durch die damit kleiner gewordenen Sicherheitsmargen ist die Bedeutung von Prüf- und Diagnosemethoden stetig gewachsen. Einfache DC-Prüfungen waren schon in der ersten Hälfte des letzten Jahrhunderts verfügbar, gleichzeitig war aber auch damals schon be-

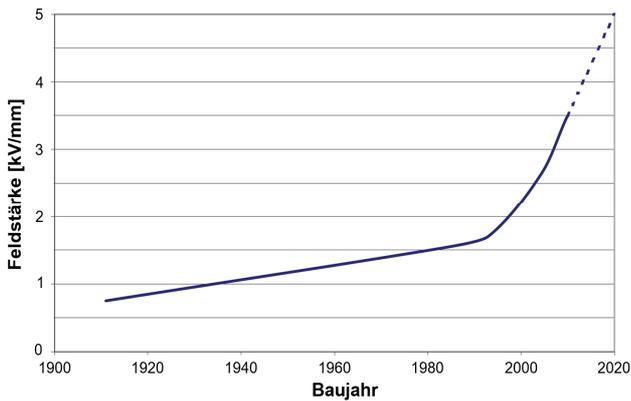


Abbildung 1: Historische Entwicklung der Feldstärke [1]

kannt, dass die Spannungsverhältnisse in den geschichteten Maschinenisolationen bei Betriebsfrequenz (50/60 Hz) überwiegend kapazitiv bestimmt wurden. Die DC-Prüfungen blieben deshalb auf grobe Aussagen zu Feuchtigkeitsgehalt und dem Grad von Oberflächenverschmutzung im Wickelkopf beschränkt. Der Forderung nach einer möglichst mobilen betriebsfrequenten AC-Prüfquelle für (periodische) Vorort-Prüfungen standen immer die hohen Kapazitäten von Statorwicklungen, der sich daraus ergebende hohe Blindleistungsbedarf und damit Gewicht und Volumen der Prüfquelle im Weg. Aus diesem Grund begann man um 1960 bei General Electric Co. in den USA die Möglichkeit von Prüfungen mit einer Frequenz zwischen Null (Gleichspannung) und der Betriebsfrequenz zu prüfen [2].

Besonders bemerkenswert im Hinblick auf die nachfolgende Untersuchung von VLF-TE-Messungen ist ein in [3] beschriebenes Experiment, bei dem die Anzahl von TE-Ereignissen in einem künstlich hergestellten Hohlraum in Polyethylen optisch bestimmt und mit der Prüfspannungsfrequenz korreliert wurde. Die Anzahl der TE pro Prüfspannungsperiode lag bei 0.1 Hz um ca. einen Faktor 10 tiefer als bei 60 Hz. Bei DC-Prüfspannung in Höhe des 0.1-Hz-Scheitelwertes war die Anzahl TE pro Zeiteinheit nochmals eine Größenordnung kleiner. In [3] wurden zudem Durchschlagsversuche mit betriebsgealterten Generatorstäben durchgeführt. Die Resultate sind in folgender Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Durchschlagsversuche an 11.5-kV Stäben [3]

	DC	0.1 Hz	60 Hz
Maximum kV_{rms}	225	120	93
Minimum kV_{rms}	50	35	48
Durchschnitt kV_{rms}	120	85	73
Anzahl Tests	29	33	33

Es ist ersichtlich, dass die durchschnittlichen Durchschlagsspannungen bei 60 Hz bzw. 0.1 Hz im Vergleich zu DC näher zusammen liegen. Zudem verliefen die Durchschlagspfade bei DC oft an Grenzflächen von Isolationsschichten, während bei 60 Hz bzw. 0.1 Hz ausschliesslich kurze Wege senkrecht zur Schichtung beobachtet wurden, was bestätigt, dass die Durchschlagsmechanismen bei 60 Hz bzw. 0.1 Hz im Vergleich zu DC prinzipiell anders sind.

Ein wichtiges Ergebnis dieses Versuches (und weiterer ähnlicher Versuche) ist das Verhältnis zwischen der durchschnittlichen Durchschlagsspannung bei 60 Hz resp. bei 0.1 Hz von ca. 1.2. Die 1974 veröffentlichte und 2009 revidierte Norm IEEE 433 [4] empfiehlt für Prüfungen mit 0.1 Hz eine um einen Faktor 1.15 höhere Prüfspannung als bei 60 Hz und stützt sich dabei wesentlich auf die Untersuchungen in [3].

In [5] wird das Verhalten von TE bei einer Variation der Prüfspannungsfrequenz von 1 mHz bis 400 Hz mit phasenauflösender TE-Messtechnik experimentell untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass die TE-Aktivität von Hohlräumen und Delaminationen in einem betriebsgealterten Generatorstab bei Prüffrequenzen unter 1 Hz abnahm. Dies wurde dem Einfluss der Oberflächenleitfähigkeit in den Hohlräumen zugeschrieben. Da die Oberflächenleitfähigkeit auch bei anderen Isolierungsfehlern (z.B. Abrieb des Nutglimmsschutzes) einen Einfluss auf die VLF-TE-Messung haben kann, soll dies ebenfalls näher untersucht werden.

Um TE durch einen übermässigen Potentialanstieg beim Nutaustritt zu verhindern, wird in diesem Bereich ein resistiver Endenglimmschutz (EGS) mit nicht-linearen (halbleitenden) Eigenschaften eingesetzt. In der unteren Hälfte von Abbildung 2 ist der Einfluss der Frequenz auf den Potentialverlauf qualitativ dargestellt. Bei tieferer Frequenz verringern sich die durch die Streukapazitäten verursachten Querströme, was zu einem flacheren Potentialanstieg führt [6].

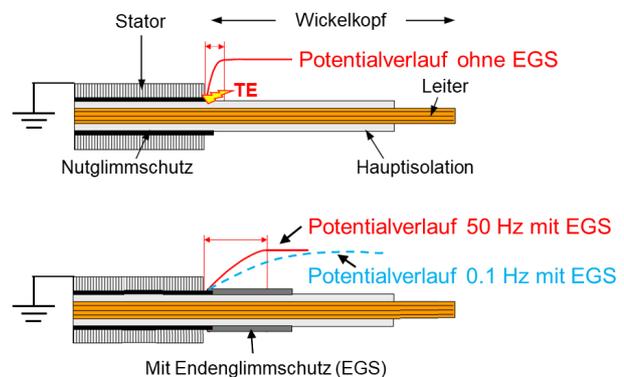


Abbildung 2: Funktion des Endenglimmschutzes (EGS), Potentialverlauf bei Betriebs- bzw. VLF-Frequenz

Der Übergang von Nut- zu EGS ist eine der kritischen Stellen der Maschinenisolation, weshalb der Einfluss der Prüffrequenz auf die TE-Diagnose von Fehlern in diesem Bereich nachfolgend eingehender untersucht wird.

2 Einfluss der Oberflächen-Leitfähigkeit auf VLF-TE-Messung

Der Einfluss der Oberflächen-Leitfähigkeit auf das Verhalten von TE wurde zunächst an einem künstlichen Nutglimmsschutz-(NGS-)Fehler untersucht. Im Gegensatz zu der unbekannt Anzahl von TE-Quellen in Form von Hohlräumen und Delaminationen im Innern der Isolierung, stellt ein künstlicher NGS-Fehler eine einzelne TE-

Quelle dar, die einerseits leicht zugänglich und andererseits auch von praktischer Bedeutung ist, da Beschädigungen des NGS infolge Abrasion am Blechpaket ein häufiges Problem im Betrieb sind. Auf einem Teststab (Abbildung 3) wurde ein quadratisches Stück NGS entfernt und die Glimmerisolierung darunter freigelegt.

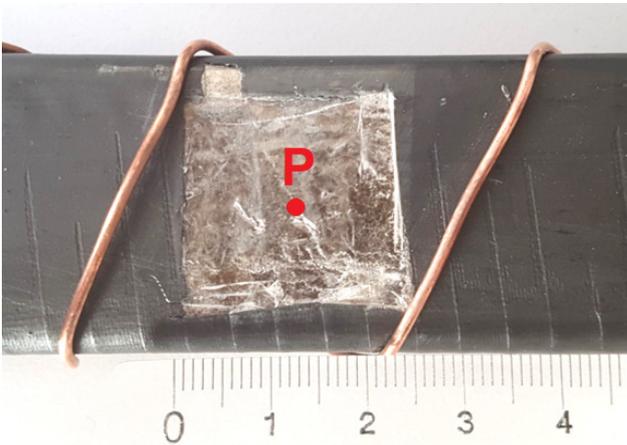


Abbildung 3: Teststab mit künstlichem Nutglimmschutz-Fehler

Anschließend wurden TE-Messungen mit Prüffrequenzen von 10 Hz, 1 Hz und 0.1 Hz durchgeführt. Um eine gleiche Anzahl von Spannungsperioden zu erhalten, wurde das TE-Muster bei 10 Hz über fünf Sekunden, bei 0.1 Hz dagegen über 500 Sekunden aufgenommen. Ebenfalls wurde bei der 0.1-Hz-Prüfung der in der IEEE-Norm [4] vorgeschlagene Spannungserhöhungsfaktor von 1.15 für VLF-Prüfungen angewandt. Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse. Bei 10 Hz und einer Prüfspannung von 4 kV ist der Fehler nach 5 s Messung im phasenaufgelösten TE-Muster bereits deutlich zu sehen (Abbildung 4 oben rechts). Bei 1 Hz (4.3 kV) wurden bei der gleichen Anzahl Spannungsperioden deutlich weniger TE-Ereignisse registriert. Bei 0.1 Hz (4.6 kV) wurden keine TE mehr gemessen.

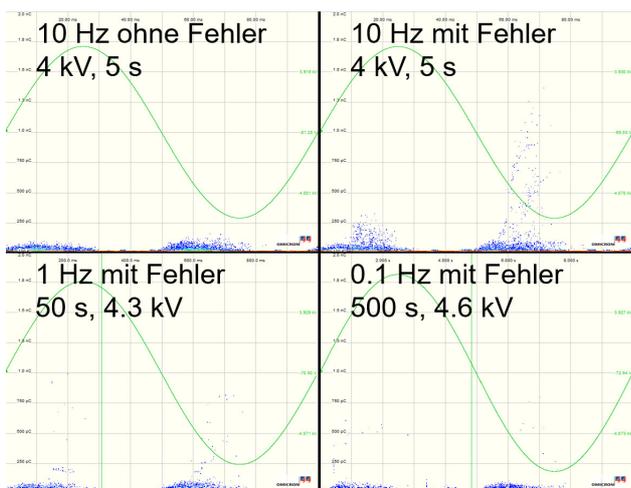


Abbildung 4: Phasenaufgelöste TE-Muster des NGS-Fehlers mit variabler Prüffrequenz

Das Ersatzschaltbild in Abbildung 5 zeigt ein elektrisches Modell des NGS-Fehlers. Der Punkt P in der Mitte der

freigelegten Isolierung weist die Kapazitäten C1 gegen den Leiter und C2 gegen den leitfähigen und geerdeten NGS auf. R1 ist der Widerstand der Hauptisolierung gegen den Leiter und R2 der Oberflächenwiderstand gegen den NGS. Die Werte wurden für den Teststab gemessen. Dabei ist der Wert des Oberflächenwiderstandes R2 stark von der Feuchte abhängig (30 GΩ bei trockener Oberfläche, 1 GΩ bei leicht feuchter Oberfläche). Zu bemerken ist, dass die C1 und C2 ähnlich sind, während R2 um mindestens eine Größenordnung unter R1 liegt.

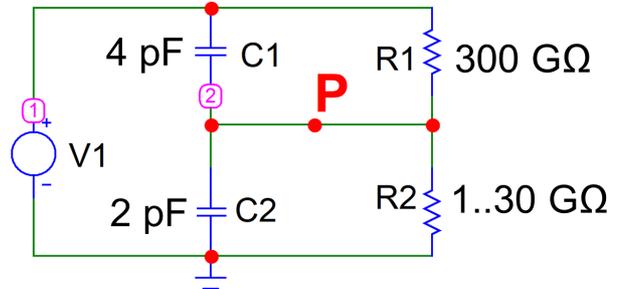


Abbildung 5: Ersatzschaltbild des NGS-Fehlers

In Abbildung 6 ist der berechnete Frequenzgang der Spannung des Punktes P gegen den geerdeten NGS dargestellt. Die Spannung nimmt unterhalb von 10 Hz, bedingt durch den Einfluss der Oberflächenleitfähigkeit stark ab und beträgt bei 0.1 Hz nur noch 10% der Spannung bei Betriebsfrequenz (50 Hz). Bei feuchter Oberfläche ist der Abfall noch weit stärker.

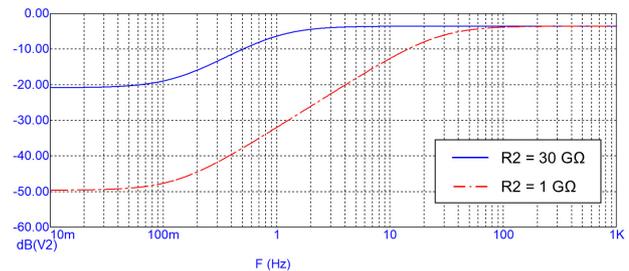


Abbildung 6: Frequenzabhängigkeit der Spannung P gegen NGS

Die Simulation deckt sich für die gemessenen Kapazitäts- bzw. Widerstandswerte mit der experimentellen Beobachtung abnehmender TE-Aktivität bei sinkender Prüffrequenz. Bei Frequenzen unter 1 Hz wird die Spannung auf der isolierenden Oberfläche (Punkt P) hauptsächlich resistiv bestimmt. Da der Oberflächenwiderstand gegenüber dem Widerstand der Hauptisolierung klein ist, fällt die Spannung bei tieferen Frequenzen unter die Zündspannung von TE.

Der quantitative Einfluss der Oberflächenleitfähigkeit in Hohlräumen und Delaminationen auf das TE-Verhalten bei VLF-Prüffrequenz wird an dieser Stelle nicht näher untersucht. Betrachtet man aber einen Hohlraum im Innern der Hauptisolierung, ist anzunehmen, dass die Oberflächenleitfähigkeit des Hohlraums im Vergleich zur Leitfähigkeit der umgebenden Isolierung (zwischen Leiter und NGS/Staboberfläche) ebenfalls wesentlich grösser ist. Dagegen ist die Kapazität des Hohlraums grösser als die Kapazitäten zwischen Hohlraum und Leiter bzw. NGS.

Bei sinkender Frequenz wird damit die Hohlraumspannung ebenfalls abnehmen und unter die TE-Zündspannung fallen. Diese Vermutung wird durch die Ergebnisse der in der Einleitung erwähnten Arbeit [6] erhärtet.

3 TE-Verhalten Endenglimmschutz bei VLF-Prüffrequenz

Der resistive resp. halbleitende Endenglimmschutz (EGS) steuert, wie eingangs erwähnt, den Potentialverlauf beim Nutaustritt. Er ist ein besonders stark beanspruchtes Element des Isoliersystems, da im Wickelkopf stärkere Vibrationen als im Nutteil auftreten. Eine mangelhafte Verbindung zum NGS oder vibrationsbedingter Abrieb an den Kanten des Blechpakets oder Stützelementen können Schäden verursachen, die TE nach sich ziehen.

In Abbildung 7 sind Ersatzschaltbilder des Wickelkopfteils mit und ohne EGS zu sehen. Der EGS ist mit nicht-linear abnehmenden Querwiderständen modelliert. Die übrigen Elemente sind die Erd-Streukapazitäten, sowie Kapazitäten und Widerstände der Hauptisolierung.

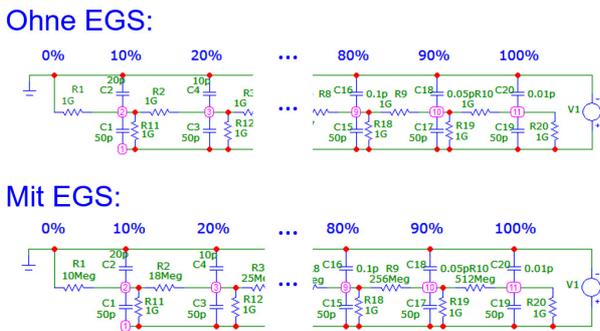


Abbildung 7: Ersatzschaltung für den Wickelkopf mit und ohne resistivem/halbleitenden Endenglimmschutz

In Abbildung 8 sind die simulierten Potentialverläufe beim Nutaustritt mit und ohne EGS, sowie mit EGS bei variabler Prüffrequenz dargestellt. Ohne EGS ergibt sich

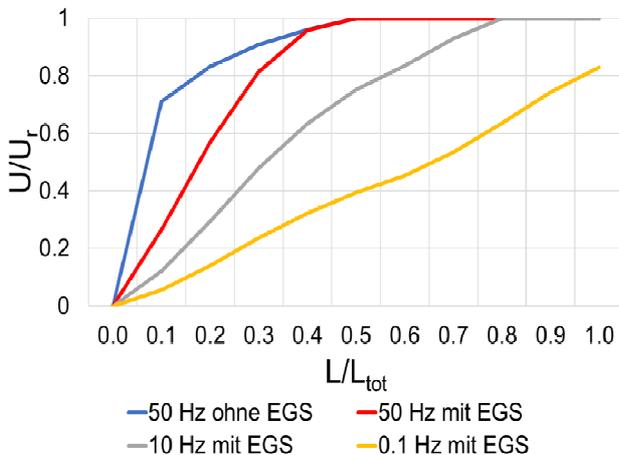


Abbildung 8: Potentialverlauf beim Nutaustritt in Abhängigkeit der Prüffrequenz

ein rascher Potentialanstieg, der bei Betriebsfrequenz zu TE führen würde. Mit EGS erfolgt der Anstieg langsamer.

Bei sinkender Frequenz wird der Verlauf zunehmend durch die resistiven Elemente bestimmt und flacht weiter ab. Dies führt dazu, dass die tangential Spannungskomponente im Bereich nach dem Nutaustritt kleiner wird.

Die Ergebnisse der Simulationen wurden bei Versuchen am Stator einer Synchronmaschine bestätigt. Dabei wurden bei Betriebs- resp. VLF-Prüffrequenz TE-Messungen durchgeführt. Gleichzeitig wurde der Nutaustrittsbereich mit einer UV-Kamera (Solar Blind) untersucht. Abbildung 9 zeigt die Ergebnisse der 50-Hz-Messung. Die Aufnahme der UV-Kamera zeigt starke TE-Aktivität im Bereich des Nutaustritts. Im phasenaufgelösten TE-Muster sind diese TE deutlich zu erkennen (blau markiert). Da die TE z.T. von den Kanten des Blechpakets ausgehen, ergibt sich eine Asymmetrie in der positiven und negativen Halbwellen.

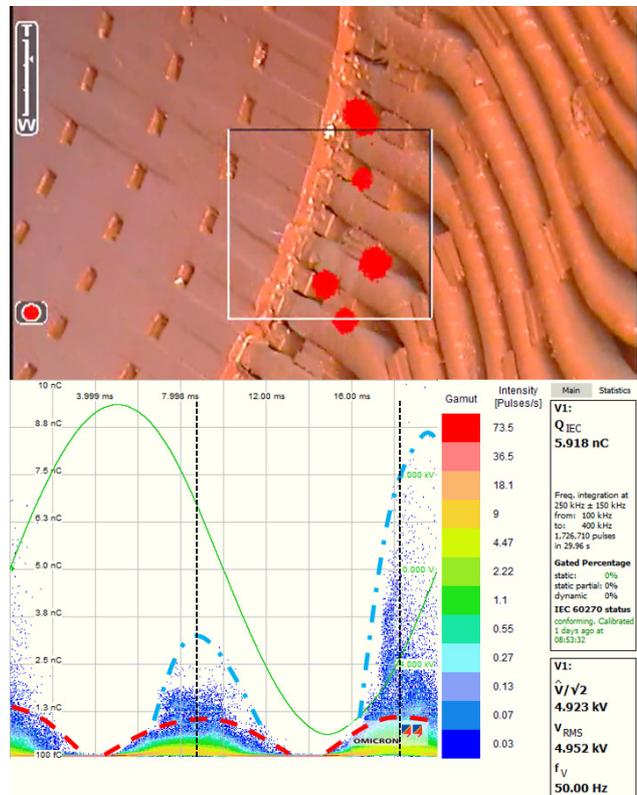


Abbildung 9: TE beim Nutaustritt bei 50-Hz-Prüfspannung: Aufnahme mit UV-Kamera (obere Hälfte) und zugehöriges PRPD (untere Hälfte), Messperiode 30 s

In Abbildung 10 sind die Ergebnisse der VLF-Messung bei gleicher Höhe der Prüfspannung zu sehen. Die Aufnahme der UV-Kamera zeigt, dass an der gleichen Stelle keine TE mehr auftreten. Auch im TE-Muster treten die entsprechenden Anteile nicht oder nur noch kaum erkennbar auf. Dabei ist zu bemerken, dass die Messperiode bei der VLF-Messung mit 2.5 min fünfmal so lang war wie die Messperiode von 30 s bei der 50-Hz-Messung. Durch den flacheren Potentialanstieg fällt die Spannung im fehleranfälligen Bereich des Nutaustritts unter die Zündspannung von TE.

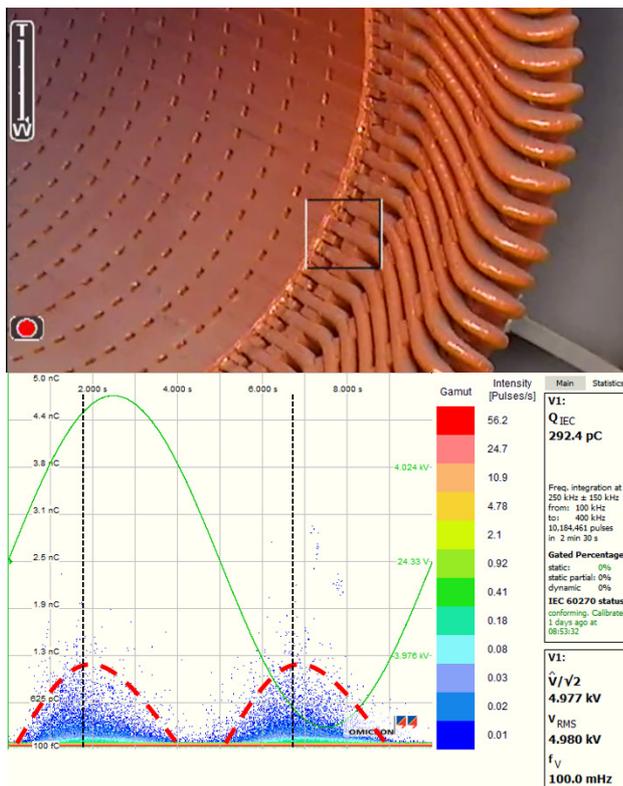


Abbildung 10: Nutaustritt bei VLF-Prüfspannung: Aufnahme mit UV-Kamera (obere Hälfte) und zugehöriges PRPD (untere Hälfte), Messperiode 2 min 30 s

4 Schlussfolgerung

Da TE-Messungen mit VLF-Prüffrequenz (0.1 Hz) im Vergleich zu Betriebsfrequenz-Prüfungen potentiell mit wesentlich kleineren Prüfquellen und damit effizienter durchgeführt werden können, wurde der Einfluss der Prüffrequenz auf die TE-Diagnose von Fehlern des Nutglimmschutzes (NGS) und des Endglimmschutzes (EGS) im Bereich des Nutaustrittes untersucht, da diese häufige Fehlerstellen im Stator-Isoliersystem darstellen und von bisherigen Untersuchungen nicht hinreichend behandelt wurden.

Dazu wurden NGS-Fehler und der resistive (halbleitende) EGS numerisch simuliert, um den vermuteten Einfluss der Oberflächenleitfähigkeit bzw. der Leitfähigkeit des EGS auf das TE-Verhalten bei sinkender Prüffrequenz zu ermitteln.

Für den mit typischen Widerstands- resp. Kapazitätswerten einer modernen Glimmer/Epoxidharz-Isolierung simulierten NGS-Fehler ergab sich, dass die Potentialverteilung bei Betriebsfrequenz hauptsächlich kapazitiv, bei VLF dagegen resistiv bestimmt wird. Dies führt bei VLF-Prüffrequenz zu wesentlich geringeren Potentialdifferenzen im Bereich des Fehlers, wodurch die auftretenden Spannungen unter die Zündspannung von TE fallen. Damit wird die TE-Aktivität nicht nur durch die im Vergleich zur Betriebsfrequenzprüfung um zwei Größenordnungen kleinere Anzahl Spannungsperioden verringert (bei gleich langen Messperioden), sondern zusätzlich

durch den zwischen 50 Hz und 0.1 Hz stattfindenden Übergang zu einer resistiven Potentialverteilung. Bei den experimentellen TE-Messungen an einem Teststab konnten die TE eines künstlichen NGS-Fehlers bei 0.1 Hz nicht mehr gemessen werden, was sich mit den Ergebnissen der Simulation deckt.

Ebenfalls wurde der fehleranfällige Endglimmschutz im Bereich des Nutaustritts (Wickelkopf) simuliert. Auch hier verändert sich die Potentialverteilung zwischen Betriebs- und VLF-Frequenz wesentlich. Der zunehmende Einfluss der resistiven Elemente bei tieferen Frequenzen bewirkt einen flacheren Potentialanstieg beim Nutaustritt. Damit wird die Spannungsbelastung auf Fehlerstellen in diesem Bereich bei VLF-Prüffrequenz so klein, dass die TE-Zündspannung nicht mehr erreicht wird, was die Diagnose dieser Fehlerklasse durch TE-Messung stark erschwert oder verunmöglicht.

Aus diesen Gründen bleibt die TE-Messung mit Prüffrequenzen im Bereich der Betriebsfrequenz (> ca. 10 Hz) für eine aussagekräftige Diagnose der derzeit eingesetzten Isoliersysteme unverzichtbar.

Für die VLF-TE-Messungen wurde ein kommerzielles TE-Messsystem ohne weitere Anpassungen eingesetzt. Zusätzlich wurde zur Detektion der TE eine UV-Kamera verwendet.

5 Literatur

- [1] Sumereder, C.: *Statistical Lifetime of Hydro Generators and Failure Analysis*, IEEE Trans. on Dielectrics and El. Insulation, Vol. 15, No. 3, Juni 2008.
- [2] Virsberg, L. G.: *Spannungsprüfung grosser elektrischer Maschinen mit 0.1 Hz*, Asea-Zeitschrift, Heft 3, Jahrgang 12, 1967.
- [3] Bhimani, B. V.: *Very-Low-Frequency High-Potential Testing*, AIEE Trans. Pt. III, Vol. 80, Juni 1961.
- [4] IEEE 433-2009: *IEEE Recommended Practice for Insulation Testing of Large AC Rotating Machinery with High Voltage at Very Low Frequency*, Revision of IEEE Std 433-1974.
- [5] Edin, H.: *Partial Discharges Studied with Variable Frequency of the Applied Voltage*, PhD dissertation, KTH, Stockholm, 2001.
- [6] Virsberg, L. G.; Kelen, A.: *Some Observations on the Very-Low-Frequency Testing of High-Voltage Machine Insulation*, Proceedings of the 20th Int. Conf. on Large Electric Systems (Cigré), Paper 108, June 1964.