

- **Elektrische Leitfähigkeit von Öl-Papier-isolierten Barrierensystemen für HGÜ-Transformatoren**

**M. Sc. Farzaneh Vahidi**

Hauptberichter:

Prof. Dr.-Ing. S. Tenbohlen

Mitberichter:

Prof. Dr.-Ing. A. Küchler

HAW Würzburg-Schweinfurt

Tag der mündlichen Prüfung:

10.12.2019

Der weltweit steigende Energiebedarf führt zu einem wachsenden Interesse an neuen Technologien zur Energieübertragung vom Kraftwerk zu den lokalen Verteilnetzen. Dabei bietet die Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ) eine attraktive Alternative und Ergänzung zu konventionellen Energieübertragung und -verteilung. Der Grund hierfür ist, einerseits die effizientere Energieübertragung über lange Strecken und andererseits die mögliche Kupplung von AC-Netzen unterschiedlicher Frequenz. Eine der zentralen Fragestellungen der Hochspannungsgleichstromübertragung ist die Implementierung eines neuartigen Isolationssystems für Hochspannungsbetriebsmittel wie HGÜ-Transformatoren, Durchführungen und Kondensatoren. Um einen zuverlässigen und sicheren Betrieb sicherzustellen, muss eine detaillierte Berechnung der elektrischen Feldverteilung innerhalb der mehrschichtigen Isolierung bestehend aus Öl und ölprägnierten Pressspanplatten durchgeführt werden.

Eine AC-Spannungsbeanspruchung hat die Ausbildung eines dielektrischen Verschiebungsfeldes zur Folge, während durch eine DC-Spannungsbeanspruchung ein stationäres Strömungsfeld entsteht. Somit muss für das vollständige Verständnis der Vorgänge in einem HGÜ-Isoliersystem, das durch ein Mischfeld beansprucht ist, sowohl die Permittivität, als auch das Verhalten der Leitfähigkeit der Isolierstoffe bekannt sein. Hier stellt sich heraus, dass die elektrische Leitfähigkeit im Vergleich zur Permittivität häufig von vielen Parametern, wie z.B. der Temperatur, Zeit oder Feldstärke, abhängt und somit nur schwer bestimmt werden kann.

Ausgehend von dieser Problematik befasst sich die vorliegende Arbeit zum einen mit der Bestimmung der Abhängigkeiten der elektrischen Leitfähigkeit von Isolieröl und öl-imprägnierten Pressspanplatten, und zum anderen mit der Charakterisierung und Beschreibung der dahinterstehenden Leitungsmechanismen. Eine Analyse der Leitfähigkeit von Isoliermaterialien wird mittels einer Sprungantwortmessung im Zeitbereich und der Berechnung der Leitfähigkeit realisiert. Dabei werden die verschiedenen Einflussfaktoren berücksichtigt, nämlich die Temperatur, elektrische Feldstärke und der Feuchtegehalt der Proben. Zusätzlich wird die Rolle des Elektrodenmaterials und der Oberflächenrauheit bei der Ölleitfähigkeitsmessung diskutiert. Anschließend zeigt eine Vergleichsstudie die vorhandene Variationsbreite unterschiedlicher Isolieröle. Die Untersuchungsergebnisse zeigen eine starke Abhängigkeit der Ölleitfähigkeit von der Temperatur und elektrischen Beanspruchung, während ein niedriger Feuchtegehalt ( $RS < 20\%$ ) und Zellulosepartikelgehalt ( $zp < 0,001\%$ ) die Ölleitfähigkeit kaum verändern. Im Gegensatz dazu steigt die Leitfähigkeit des öl-imprägnierten Pressspans überproportional mit der Zunahme der Feuchte und Temperatur der Proben. Ein Temperaturanstieg von 30 auf 70 °C führt zu etwa 100-mal höheren Leitfähigkeitswerten.

Weiter stellt die Arbeit die Unterschiede zwischen elektrischer AC- und DC-Feldverteilung innerhalb eines mehrschichtigen Isolationssystems dar und beschäftigt sich mit der Simulation der Ladungsträgertransfers in der Isolierflüssigkeit. Die Modellierung in COMSOL Multiphysics® basiert auf ein Ionen-Drift-Diffusionsmodell und berücksichtigt zusätzlich den Einfluss von Ionen-injektion aus einer elektrischen Doppelschicht auf die elektrische Feldverzerrung.

Schließlich zeigen die Simulationsergebnisse die Einflüsse der unterschiedlichen Leitungsmechanismen auf die elektrische Feldverzerrung innerhalb einer Ölstrecke. Letztendlich kann ein Vergleich der von der Simulation gelieferten Ergebnisse, mit der gemessenen elektrischen Feldverteilung mehr über die Hauptquelle der Restladungsträger im Öl aussagen. Somit ist eine Quantifizierung der Ladungsträgerdiffusion und der Ioneninjektionsdichte der erste Schritt, um die Dynamik der Raumladung durch Anlegen einer Gleichspannung an das Isolationssystem zu verstehen. Dies führt zu einem besseren Verständnis des dielektrischen Verhaltens von HGÜ-Isolationssystem basierend auf Öl-Papier Dielektrika.

- **Electrical Conductivity of Oil-Impregnated Pressboard Barrier Systems for HVDC Transformer Insulation**

**M. Sc. Farzaneh Vahidi**

Increased demand on global electricity prompts increased interest in new technologies to transmit the electrical power from power plants to local distribution networks. High-voltage direct current (HVDC) power transmission is an attractive alternative and

complement to conventional alternating current (AC) power transmission. Furthermore, it is the only efficient solution for energy transmission over long distances and asynchronous coupling between two AC networks. One of the major concerns of HVDC transmission is the implementation of insulation systems for high-voltage equipment such as converter transformers, bushings and capacitors. In order to ensure the safe and reliable operation of an insulation system in these cases, the electric field distribution within the multi-layered insulation systems has to be determined. Insulation systems in power transformers normally consist of oil and oil-impregnated pressboards.

The insulation materials in HVDC insulation systems are exposed to composite AC, DC and mixed stresses. In contrast to the displacement electric field distribution, the steady-state conduction field distribution is affected by electrical conductivities of the insulation materials. The electrical conductivity of the aforementioned insulation materials is not a constant property and it alters depending on different factors, e.g. temperature, electrification time, electric field strength, etc. This thesis aims to investigate existing parameter dependencies of insulating oil and oil-impregnated pressboard. The related analysis is achieved by step response measurements in the time domain following a calculation of electrical conductivity. For this purpose, three main factors affecting the conductivity of insulating oil are discussed in detail, namely the temperature, electric field strength and moisture content of oil samples. Additionally, the influence of electrodes material and their surface roughness on oil conductivity are analyzed. Afterwards, a comparative conductivity measurement on different insulating liquids indicates the extent of electrical conductivity dependency on oil type.

The results illustrate a strong dependency of oil conductivity on measurement temperature and electrical stress applied to the insulating liquid. A low level of moisture (relative saturation (RS) < 20 %) and cellulose contamination in oil (particle in volume < 0.001 %) do not lead to wide variation of electrical oil conductivity. However, the electrical conductivity of oil-impregnated pressboard increases rapidly with a minor increase of the moisture content in the sample. The next critical dependency of the board conductivity is the temperature. A temperature increase from 30 to 70 °C causes a considerable increase of oil-immersed board conductivity up to more than two orders of magnitude.

The second part of this thesis focuses on the electric field distribution within a multi-layered insulation system applying AC and DC voltage stresses. Due to the non-linearity of insulating oil, it is essentially important to gain in-depth knowledge about charge carriers transport in oil. Accordingly, the conduction mechanisms and electrical field distribution in liquid are thoroughly investigated.

A simulation model is provided using finite element method (FEM) in COMSOL Multiphysics®. This FEM simulation demonstrates the charge carriers transport in insulating liquid. The simulation model describes the ion drift and diffusion, as well as the symmetrical and asymmetrical ion injection from the oil/electrode double layer. The simulation results indicate the impact of ions diffusion and injection on electric field

distortion. This can be directly compared with the results of the electric field measurements in the oil gap. The comparative analysis of simulated and experimentally achieved data reflects that the source of charge carriers in the oil gap is dependent on the applied electrical stress. Finally, a quantification of charge carriers diffusion and ion injection density comprehends the space charge dynamics, which leads to a better understanding of the dielectric behavior of HVDC insulation systems.