

- **Dielektrische Festigkeit von alternativen Isolierflüssigkeiten im Vergleich zu Mineralöl in Abhängigkeit der Feldhomogenität**

M. Sc. Stephanie Hägele

Hauptberichter:

Prof. Dr.-Ing. S. Tenbohlen

Mitberichter:

Herr Prof. Dr.-Ing. Ronald Plath

TU Berlin

Tag der mündlichen Prüfung:

03.06.2022

Die vorliegende Arbeit untersucht die Unterschiede in der dielektrischen Festigkeit von Mineralöl und natürlichen Estern bei verschiedenen Spannungsbeanspruchungen und Feldhomogenitätsgraden. Sie arbeitet die chemischen und physikalischen Grundlagen, auf welchen diese Unterschiede beruhen, theoretisch heraus und stellt verschiedene Modelle zur Erklärung vor. Im Anschluss daran wird durch experimentelle Untersuchungen eine Datengrundlage zur Beurteilung geschaffen, ab welcher Feldinhomogenität Unterschiede in der dielektrischen Festigkeit der verschiedenen Isolierflüssigkeiten auftreten. Dies erfolgt über Elektroden mit verschiedenen Spitzenradien und der Verwendung verschiedener Elektrodenabstände. Hiermit kann eine große Anzahl von Feldhomogenitätsgraden im zu untersuchenden Bereich abgebildet und durch einen Feldhomogenitätsgrad quantifiziert werden. Die Untersuchungen erfolgen sowohl unter Wechselspannung, wie unter Blitzstoßbeanspruchung.

Unter Wechselspannungen können für die gesamte untersuchte Breite an Feldhomogenitätsgraden für trockene Isolierflüssigkeiten keine signifikanten Unterschiede in der dielektrischen Festigkeit festgestellt werden.

Die unter Blitzstoßbelastung experimentell ermittelten Ergebnisse zeigen eine deutlich reduzierte dielektrische Festigkeit natürlicher Ester. Diese wirkt sich bei zunehmender Inhomogenität und steigendem Elektrodenabstand stärker aus und beginnt bei Radien, die kleiner sind als jene, die im Design von Leistungstransformatoren verwendet werden. Die festgelegten Feldinhomogenitäten werden dazu verwendet einen Bereich an Feldhomogenitätsgraden zu bestimmen, bei welchem die Unterschiede in der dielektrischen Festigkeit zwischen den Flüssigkeiten beginnen. Diese liegen zwischen den Bereichen, welche klassischerweise für Entladungsuntersuchungen (sehr inhomogen) im Labor und im Transformator design (möglichst homogen) verwendet werden. Um die zu Beginn theoretisch beschriebenen Mechanismen, welche bei stark inhomogenen Feldern zu einer Verringerung der dielektrischen Festigkeit von natürlichen Esterflüssigkeiten führen, messbar zu machen, werden die im relevanten Inhomogenitätsgradsbereich liegenden Konfigurationen näher untersucht.

Hierzu werden Messsysteme entworfen, welche Lichtemissionen und Vorentladungsströme der Vorentladungen erfassen können. Vorentladungs-

einsatzspannung und Beschleunigungsspannung sind zwei Beispiele für Größen, welche ermittelt werden, um Entladungsentstehung und –ausbreitung in Mineralöl und natürlichem Ester näher zu untersuchen. Bei stark inhomogenen Feldern zeigt sich, dass insbesondere die Entladungsausbreitung und weniger der Entladungseinsatz für die verringerte dielektrische Festigkeit natürlicher Ester verantwortlich ist. Die Beschleunigungsspannung von Mineralöl liegt oberhalb jener von natürlichem Ester. Je inhomogener die Anordnung, desto weiter oberhalb der mittleren Durchschlagspannung liegt die Beschleunigungsspannung von Mineralöl. Bei natürlichem Ester zeigt sich dieser Zusammenhang in abgeschwächter Form. Nur bei den inhomogensten der untersuchten Anordnungen ist dort eine Beschleunigungsspannung oberhalb der mittleren Durchschlagspannung messbar.

Ein elektrohydrodynamisches Simulationsmodell für die untersuchten Feldinhomogenitätsgrade und Isolierflüssigkeiten dient zur simulativen Beschreibung. Simulierte Entladungseinsatzspannungen werden mit gemessenen Ergebnissen verglichen sowie Veränderungen der physikalischen Größen, welche für die Unterschiede der dielektrischen Eigenschaften in beiden Isolierflüssigkeiten verantwortlich sind, untersucht und dokumentiert. Die Auswirkungen von Molekülen mit niedrigen Ionisationspotenzialen und hohen Anzahldichten in Form erleichterter Entladungsausbreitung bei natürlichem Ester werden dokumentiert. Das entworfene numerische Simulationsmodell bestätigt die messtechnisch erfassten Zusammenhänge.

- **Dielectric strength of alternative insulating liquids in comparison to mineral oil depending on field homogeneity**

M. Sc. Stephanie Hägele

This work investigates differences in dielectric strength between mineral oil and natural ester liquid at different types of voltage stress and field homogeneity degrees. It points out the chemical and physical basics on which differences in dielectric strength between the insulating liquids are based on and provides models for explications. Experiments provide a database for assessment of the degree of inhomogeneity at which differences between the two liquids start appearing. Therefore, electrodes with different radii and gap distances are used to cover a large range of inhomogeneity and to quantify by degrees of inhomogeneity. Experiments are conducted under AC and lightning impulse stress.

AC results show comparable dielectric strength for both liquids in dry condition for all investigated degrees of inhomogeneity.

Results determined under lightning impulse stress show a considerable reduced dielectric strength of natural ester liquid. Reduced dielectric strength is reinforced by increasing degrees of inhomogeneity and increasing electrode gap distances and starts at radii smaller than the ones used in design of power transformers. Lightning impulse studies are used to define the degree of inhomogeneity where dielectric strength of natural ester liquids starts to decline compared to mineral oil. The further used sector of inhomogeneities lies between the sectors used for laboratory discharge studies (highly inhomogeneous) and in power transformer design (homogeneous as possible). Measurement setups for light emission and pre-breakdown phenomena are built up to determine discharge inception voltages. Discharge inception voltage and acceleration voltage are two examples of values that are determined to investigate initiation and propagation of discharge in mineral oil and natural ester liquid. Especially discharge propagation and less discharge initiation is responsible for reduced dielectric strength of natural ester liquid in highly inhomogeneous field arrangements.

Acceleration voltage of mineral oil is higher than the one of natural ester liquid at same electrode and gap arrangement. The more inhomogeneous the arrangement, the higher acceleration voltage of mineral oil increases over mean breakdown voltage. This correlation is observed in a far weaker way for natural ester liquid. Only at highest inhomogeneous field arrangements acceleration voltage higher than mean breakdown voltage can be observed.

An electrohydrodynamic simulation model using same electrodes and gap distances as for measurements is developed. Inception voltages of the model are compared to the measured inception voltages. Variation of values that influence differences of dielectric strength of both insulating liquids are investigated and recorded. Effects of molecules with low ionization potential and high number density on eased discharge

propagation in natural ester liquid are documented. The electrohydrodynamic model affirms the measured correlations between parameters.