

▪ **Thermische Modellierung von Leistungs- transformatoren mittels CFD**

Saeed Khandan Siar, M. Sc.

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Stefan Tenbohlen
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Stefan Riedelbauch

Tag der mündlichen Prüfung: 10.04.2024

Aufgrund der zunehmenden Anzahl dezentraler Energieerzeugungsanlagen, die auf erneuerbaren Energiequellen basieren, ist ein Ausbau der Stromnetze erforderlich. Leistungstransformatoren sind im Stromnetz Schlüsselkomponenten und haben einen maßgeblichen Einfluss auf die Zuverlässigkeit der Übertragungs- und Verteilnetze. In diesem Zusammenhang ist es von entscheidender Bedeutung, die schädlichen Auswirkung von thermischen Belastungen in Leistungstransformatoren während ihrer Lebensdauer zu minimieren. Zur Erhöhung der Lebensdauer und der zulässigen Belastbarkeit von Leistungstransformatoren gilt es die Kühlsysteme zu optimieren.

Thermische Belastungen in den Wicklungen sowie höhere Temperaturen innerhalb des Transformators führen zu einer beschleunigten thermischen Alterung und begünstigen daher eine schnellere Materialalterung. Zur Sicherstellung der notwendigen Zuverlässigkeit eines Leistungstransformators ist die Minimierung der thermischen Belastung in den Windungen entscheidend. Darüber hinaus wird die Motivation der wissenschaftlichen Ausarbeitung dargelegt und eine Einführung in die Grundprinzipien der Leistungstransformatoren mit den wichtigsten Konzepten der Kühlmethoden gegeben.

In dieser Dissertation wird das thermische Verhalten von Leistungstransformatoren mittels numerische Strömungssimulation (CFD) behandelt. Die Untersuchung wird zunächst basierend auf Messdaten realer Leistungstransformatoren und Wicklungsmodellen aus dem Labor durchgeführt. Anschließend werden entsprechende numerische CFD-Wicklungsmodelle erstellt und eine Netzempfindlichkeitsanalyse durchgeführt. Dies soll die Genauigkeit der numerischen Berechnungen der Simulationen sicherstellen.

Darüber hinaus werden die Auswirkungen der Variation der Öltemperatur auf die thermische Antriebskraft und die Dichteänderung des Öls berücksichtigt, da Ölmaterialien temperaturabhängige Eigenschaften aufweisen. Insgesamt zielt diese Forschung darauf ab, Einblicke in das thermische Verhalten von Leistungstransformatoren zu gewinnen, um ihre Lebensdauer und Zuverlässigkeit in Energieübertragungs- und Verteilungssystemen zu optimieren.

Diese Arbeit bietet einen Überblick über den aktuellen Stand der Technik in der thermischen Modellierung von Leistungstransformatoren. Anschließend werden die grundlegenden Gleichungen und Prinzipien der Fluidströmung und der

Wärmeübertragung erläutert. Die Quellen der Leistungsverluste in Transformatoren werden während den numerischen Untersuchungen als Anfangsrandbedingungen der mehrdimensionalen Differentialgleichungen eingesetzt. Außerdem wird der Einfluss der erzeugten Wärme auf das thermische Verhalten der Transformatoren dargestellt.

In diesem Zusammenhang ergibt sich aus den Untersuchungen die Erkenntnis, dass eine geringere Höhe der horizontalen Kanäle zu einer besseren Kühlleistung des Wicklungsmodells führt. Darüber hinaus wird dieses Design nicht nur die Strömungswirbel beim Eintritt in die horizontalen Kanäle reduziert, sondern ermöglicht auch eine gleichmäßigere Ölverteilung innerhalb der Kühlkanäle.

Diese Studie untersucht ebenfalls die thermische Leistungsfähigkeit von biologisch abbaubarem Ölmaterial im OD-Kühlmodus in Verbindung mit dem geometrischen Design der Wicklungen. Die Ölflussverteilungen sind bei Anwendung verschiedener Ölmaterialien unterschiedlich. Natürliches Esteröl erreicht eine ähnliche durchschnittliche Wicklungstemperatur wie Mineralöl, vorausgesetzt, dass das Konzept der forcierten Kühlungssysteme mit ölgeleiteter Struktur angewendet wird. Darüber hinaus ist bei gleichen Betriebsbedingungen die Ölverteilung des natürlichen Esteröls durch die Kühlkanäle homogener.

Dies sorgt für eine gleichmäßigere Ölverteilung in den horizontalen Kühlkanälen. Die Position der Heißpunkttemperatur wird zwar nicht signifikant beeinflusst, jedoch führt die Anwendung von natürlichem Esteröl zu einer Senkung der Heißpunkttemperatur.

Die Einflüsse ungleichmäßiger Wärmeverlustverteilungen, die unter den Betriebsbedingungen von Leistungstransformatoren sehr häufig vorkommen, werden ebenfalls in dieser Arbeit untersucht. Höhere Wärmeverluste führen zu höherem Durchschnitt und Heißpunkttemperaturen bei verschiedenen Öleinlauftemperaturen in den Wicklungen. Bei einer gleichmäßigen Wärmeverlustverteilung hängt die Position der Heißpunkttemperatur direkt von der Ölflussverteilung ab. Bei einer ungleichmäßigen Wärmeverlustverteilung kann sich die Position der Heißpunkttemperatur jedoch ändern.

Daher wird durch die Verwendung eines Noppenbands die Degradierung der thermischen Leistung von Scheibenwicklungen wirksam reduziert. Zusätzlich zur stationären Analyse des thermischen Verhaltens von Leistungstransformatoren wird das instationäre thermische Verhalten im natürlichen Abkühlungsmodus numerisch und experimentell geprüft. Die Auswirkung der thermischen Antriebskräfte, der sogenannte Auftriebseffekt, wird transient simuliert. Die Berechnung der Heißpunktfaktoren wird für verschiedene Wicklungskonstruktionen dargestellt.

- **Thermal Modelling of Power Transformers Using Computational Fluid Dynamics**

Saeed Khandan Siar, M. Sc.

Power grids have improved rapidly due to the latest developments in energy transmission and the rapid expansion of renewable energy uses. Power transformers have become vital equipment in providing a sustainable power network in energy transmission and distribution systems. In this regard, it is essential to minimize the harmful effects of thermal stresses in power transformers during the lifetime of the power transformer. Therefore, identifying the source of heat losses within the transformer is the primary step, followed by determining the optimized cooling systems that can increase the lifetime of the power transmission systems and allowable loading capacity. This is because thermal stresses in the windings of a power transformer can increase the failure rate during operations, leading to accelerated thermal ageing and shortened lifetime. As higher temperatures within the power transformers can result in faster material degradation, it is crucial to address the thermal stresses to ensure the reliability of the power transformer.

This study examines the thermal behavior of power transformers using the Computational Fluid Dynamics (CFD) numerical method. First, the investigation is performed based on measured data from real power transformers and winding models in the laboratory and the corresponding numerical CFD winding models suitable for the investigations are created and a mesh sensitivity analysis is carried out to ensure their accuracy before using the numerical models. Furthermore, the effects of changing oil temperature on the thermal driving force are considered since oil materials have temperature dependent characteristics. Overall, this research aims to gain insights into the thermal behavior of power transformers to improve their lifetime and reliability in energy transmission and distribution systems.

Furthermore, the state-of-the-art of transformers is reviewed first, discussing the motivation behind the study and introducing the basic principles of power transformers and the main concepts of cooling methods. Then, the governing equations and the fundamental principles of fluid flow and heat transfer are explained. The sources of power losses within transformers are introduced as initial boundary conditions during investigations. Furthermore, this work highlighted the impact of generated heat on the thermal behavior of the transformers.

It examines operational parameters like fluid flow rate and inlet temperature to determine the significant influence of the Reynolds and Prandtl numbers. Based on the result, we can conclude that the Reynolds number dominates in forced cooling mode. In the meantime, this study employs a geometrical study to identify the effects of different dimensions on the vertical and horizontal cooling channels to determine the reliability and accuracy of the numerical CFD calculations.

In this light, this study establishes that the lower height of the horizontal channels leads to a better cooling performance of the winding model. Furthermore, reducing eddies at the inlet of the horizontal channels leads to a more uniform oil distribution within the cooling channels.

This study also examines the thermal performance of using biodegradable oil material in OD cooling mode. Along with the geometrical design of the windings, the winding temperature and oil flow distributions of different oil materials are investigated. It is determined that natural ester oil has a lower average winding temperature than mineral oil under force cooling conditions with an OD structure.

Moreover, the study observes that the oil distribution of natural ester through the cooling channels is more evenly under identical operational condition. It also provided a more uniform share of oil for horizontal cooling channels. In this light, while the position of the hot spot temperature remains unchanged, the use of natural ester oil results in a significant reduction of hot spot temperature in OD cooling mode.

This study analyses the effects of non-uniform heat loss distributions, which are very common in the operating conditions of power transformers. Higher heat losses lead to higher average and hot spot temperatures at different oil inlet temperatures of the windings. For a uniform heat loss distribution, the location of the hot spot temperature depends directly on oil flow distribution. However, considering the non-uniform heat loss distribution, the location of hot spot temperature might change. The study also examines the impact of a winding design equipped with additional vertical cooling channel, including an extra vertical cooling channel in the middle of the pass.

The results show that using additional vertical cooling channel reduces the average winding temperature and keeps the hot spot temperature lower, effectively reducing the degradation in disc type windings. In addition to conducting steady-state analyses, this study analyses the transient thermal behavior of power transformers in natural cooling mode. The research also considers the buoyancy effect over time and calculates hot spot factors for various winding designs. During the transient thermal behaviour, it is observed that the rate of the temperature rise at the initial time is more pronounced. As the temperature increases, the viscosity of the oil decreases and the cooling oil flows throughout all the channels.