

## ■ **Simulation and Experimental Validation of Forced Oil Flow in Power Transformers**

**Dipl.-Ing. Nicolas Schmidt**

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. S. Tenbohlen  
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. S. Riedelbauch  
Tag der mündlichen Prüfung: 24.01.2019

The evolving temperature distribution within the insulation system of power transformers has a defining impact on the life cycle of these key components applied in power stations and transmission and distribution systems. Since higher temperatures cause accelerated material degradation processes, the maximum temperature occurring inside the insulation system effectively limits the transformer performance at a specified product lifetime. In principle, a direct assessment of this maximum temperature occurring during operation of a transformer is possible. However, the application of suitable equipment for this task faces significant challenges and is afflicted with substantial costs. Moreover, such an approach only provides limited insight for an already released product. Consequently, thermal modelling concepts are pursued to benefit the entire development and application process.

This work first of all comprises the development of an experimental model for a disc-type transformer winding with four conductor turns per disc. Each conductor element can be heated individually and is equipped with a temperature sensor. Next to a thermal analysis, the implemented model design allows an optical investigation of the oil flow between discs. The design specifications of the modelled winding are chosen representatively for large power transformers cooled by a directed oil flow (OD cooling). In addition to the experimental approach, corresponding numerical winding models suitable for the investigation by means of computational fluid dynamics (CFD) are prepared during the course of this work. To evaluate potentially occurring impairments resulting from an axially symmetrical winding modelling, a two-dimensional and a three-dimensional domain are derived from the analysed geometry. Prior to their actual application, a mesh sensitivity analysis is carried out for all consulted models. A resolution of 6 cells/mm within the bulk flow region and a boundary layer discretisation with an initial cell height of  $h_{\text{init}} = 10 \mu\text{m}$  allow the determination of dependable results.

Concerning the impact of an axially symmetrical winding representation, the conducted thermal analysis reveals significant deviations between 2D CFD simulations and measurements at the majority of considered operating points. Since the 3D CFD calculations display an excellent agreement with the experimental results throughout all considered boundary conditions, the application of 2D models is found to be ill-

suitable for sufficiently capturing the heat transfer characteristics in OD cooled transformer windings. As the root cause for the occurring deviations, the impact of the dimensional reduction on the oil flow distribution is identified. In contrary to its 3D counterparts, a far less complex flow field at the entrance region of several horizontal cooling channels is suggested by 2D models, especially at conditions outside a strictly laminar flow regime. As a consequence from this misrepresentation, deviating results regarding the oil flow distribution are determined that also affect the respectively ascertained thermal characteristics.

Since the 3D simulations and measurements are in very good agreement with regard to temperatures and oil flow velocities, both modelling approaches are consulted to identify operating parameters defining the hydraulic and thermal characteristics inside power transformers. The conducted investigations establish that the Reynolds number connected to a certain operating state plays a dominating role for all considered characteristics. In contrary to the oil flow distribution, the temperature distribution is found to be also dependent on the Prandtl number characterising an operating point. With increasing Prandtl numbers, the average temperature differences and hot spot temperatures are decreasing by a comparable amount. An increase of the Reynolds number however results in a stronger decrease of the average temperature differences than of the hot spot temperatures. Consequently, the hot spot factor proposed in IEC 60076-7 is found to be depended on the oil flow rate and temperature level. With regard to the investigated power dissipation level, close to no dependencies on the oil flow distribution and deduced thermal resistances is found.

- **Simulation und experimentelle Validierung von erzwungener Ölströmung in Leistungstransformatoren**

**Dipl.-Ing. Nicolas Schmidt**

Die Temperaturverteilung innerhalb des Isolationssystems von Leistungstransformatoren hat einen entscheidenden Einfluss auf den Lebenszyklus dieser Komponenten, die Schlüsselfunktionen in Kraftwerken sowie in Übertragungs- und Verteilungssystemen übernehmen. Weil höhere Temperaturen zu beschleunigten Materialzersetzungprozessen führen, begrenzt die im Isolationssystem auftretende Maximaltemperatur effektiv die Transformatorleistung bei einer bestimmten Produktlebensdauer. Grundsätzlich ist eine direkte Bestimmung dieser im Betrieb eines Transformators auftretenden Maximaltemperatur möglich. Jedoch ist der Einsatz geeigneter Messgerätschaften für diesen Zweck sehr aufwändig und daher mit erheblichen Kosten verbunden. Zudem bietet ein solcher Ansatz nur einen begrenzten Einblick in ein bereits gefertigtes Produkt. Aus diesem Grund werden in Industrie und

Forschung für den gesamten Entwicklungs- und Anwendungsbereich von Leistungstransformatoren thermische Modellierungskonzepte entwickelt.

Diese Arbeit umfasst zunächst die Entwicklung eines experimentellen Versuchsmodells für die Scheibenwicklung eines Leistungstransformators mit vier Leiterwindungen pro Scheibe. Jedes Leiterelement kann individuell beheizt werden und ist mit einem Temperatursensor ausgestattet. Neben einer thermischen Analyse erlaubt das experimentelle Modell eine optische Untersuchung des Ölflusses zwischen den Scheiben. Das Design der modellierten Wicklung orientiert sich dabei an typischen Spezifikationen großer Leistungstransformatoren, die durch einen gerichteten Ölstrom gekühlt werden (OD-Kühlung). Zusätzlich zum experimentellen Ansatz wurden im Rahmen dieser Arbeit auch entsprechende numerische Wicklungsmodelle entwickelt, die für die Untersuchung mittels Computational Fluid Dynamics (CFD) geeignet sind. Um potentielle Unzulänglichkeiten einer achsensymmetrischen Wicklungsmodellierung untersuchen zu können, wurden aus der analysierten Geometrie ein zweidimensionaler und ein dreidimensionaler Bereich abgeleitet. Vor ihrer eigentlichen Verwendung wurden für alle in Betracht gezogenen Modelle Netzsensitivitätsanalysen durchgeführt. Für belastbare Ergebnisse war eine Auflösung von mindestens 6 Zellen/mm innerhalb der Hauptströmung und eine Grenzschichtdiskretisierung mit einer anfänglichen Zellenhöhe von höchstens  $h_{\text{init}} = 10 \mu\text{m}$  notwendig.

Hinsichtlich einer axialsymmetrischen Wicklungsmodellierung zeigen die durchgeführten thermischen Untersuchungen signifikante Abweichungen zwischen 2D-CFD-Simulationen und Messungen für praktisch alle betrachteten Betriebspunkte. Gleichwohl weisen die entsprechenden 3D-CFD-Berechnungen eine ausgezeichnete Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen über alle betrachteten Randbedingungen hinweg auf. Demzufolge kann der Einsatz von 2D-Modellen für eine hinreichend genaue thermische Auslegung von OD-gekühlten Transformatorwicklungen nicht empfohlen werden. Als Ursache für die auftretenden Abweichungen konnte der Einfluss der Ordnungsreduktion auf die Ölstromverteilung identifiziert werden. Im Gegensatz zu entsprechenden 3D-Modellierungsansätzen wird beim Einsatz von zweidimensionalen Wicklungsmodellen ein weit weniger komplexes Strömungsfeld im Eingangsbereich horizontaler Kühlkanäle prognostiziert. Dies gilt insbesondere bei Betriebspunkten außerhalb eines streng laminaren Strömungsregimes. Als Folge dieser Fehleinschätzung entstehen Abweichungen bei der Ölstromverteilung, die sich entsprechend auf thermischen Wicklungseigenschaften auswirken.

Weil die angestellten 3D-Simulationen in Bezug auf Temperaturen und Ölströmungsgeschwindigkeiten sehr gut mit den durchgeführten Messungen übereinstimmen, werden beide Modellierungsansätze für die Identifikation von Betriebsparameter herangezogen, die die hydraulischen und thermischen Eigenschaften von Leistungstransformatoren maßgeblich bestimmen. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass die mit einem bestimmten Betriebszustand verbundene Reynolds-Zahl für alle betrachteten thermischen Eigenschaften eine dominierende Rolle spielt. Im Gegensatz zur Ölflussverteilung ist die Temperaturverteilung auch von der zugehöri-

gen Prandtl-Zahl abhängig. Mit steigenden Prandtl-Zahlen sinken die durchschnittlichen Temperaturdifferenzen und Hot-Spot-Temperaturen im vergleichbaren Umfang. Eine Anhebung der Reynolds-Zahl führt dagegen zu einer verstärkten Abnahme der mittleren Temperaturdifferenzen im Vergleich zu den Hot-Spot-Temperaturen. Folglich hängt der in IEC 60076-7 vorgeschlagene Hot-Spot-Faktor von der Durchflussrate und dem Temperaturniveau ab. Hinsichtlich der untersuchten Verlustleistungsniveaus zeigen sich nahezu keine Abhängigkeiten der Ölstromverteilung und der abgeleiteten thermischen Widerständen von der individuell abgeführten Verlustleistung.