

Kapitel 1

Einleitung

Die Diagnostik zur Ermittlung des Zustandes eines Leistungstransformators hat in den letzten Jahren aus technischen und wirtschaftlichen Gründen eine enorme Bedeutung erlangt. Für die elektrische Energieversorgung liegt ein Schwerpunkt in der wirtschaftlichen Ausnutzung der Leistungstransformatoren. Hierbei ist es wichtig, dass das Ausfallrisiko minimal ist und rechtzeitig erkannt wird, wann der Transformator repariert oder ausgetauscht werden muss.

Dabei hängt der sichere Betriebszustand und somit die restliche Einsatzdauer eines ölgefüllten Leistungstransformators überwiegend vom Zustand des Isolationssystems zwischen Oberspannungs- und Unterspannungswicklung, dem so genannten Streukanal, ab. Kurzzeitige Überlastungen und Alterungsmechanismen, die durch Sauerstoff, Wasser und erhöhte Temperatur erzeugt, verstärkt und beschleunigt werden, verschlechtern die dielektrische und mechanische Isolationseigenschaft. Somit ist der Materialzustand des Isolationssystems ein Kriterium für die Restlaufzeit und für die Ausfallwahrscheinlichkeit des Transformators.

Die dielektrische Diagnostik am Leistungstransformator hat das Ziel, den Zustand der Feststoffisolation, insbesondere im Bereich des Streukanals, zu ermitteln und zu beurteilen. Um dieses durchführen zu können, werden verschiedene Informationen, wie Online- und Offline-Messdaten, Konstruktionsaufbau, Umgebungsbedingungen, Art und Eigenschaft der Isoliermaterialien und deren Auswirkungen auf das Systemverhalten benötigt. Welche Informationen notwendig sind, um eine ausreichende Diagnose durchzuführen, ist aus heutiger Sicht noch nicht vollständig geklärt. Des Weiteren sind dem Anwender diagnostischer Verfahren die Informationen über die Betriebslaufzeit und den Wicklungsaufbau von den meisten Transformatoren nur unzureichend oder gar nicht bekannt, was die Diagnose erschwert.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der FDS-Diagnosemessung (Frequency Domain Spectroscopy), die zu den Offline-Verfahren gehört, da der Transformator zur Messung vom Netz genommen werden muss. Ein besonderes Augenmerk liegt zunächst in der mathematisch-physikalischen Modellierung, um herauszufinden, welche Informationen in der FDS-Messung an öl-papierisolierten Leistungstransformatoren tatsächlich vorhanden sind und welchen Einfluss die Parameter auf die Messergebnisse haben. Durch Modelle werden die komplexen Zusammenhänge der einzelnen Einflussparameter verdeutlicht. Auf diese Weise kann die Aussage bezüglich des Isolationszustandes besser beurteilt werden. Zusätzlich wird auf Messfehler, mögliche Interpretationsfehler und Interpretationsgrenzen hingewiesen.

Die Voraussetzung für die Zustandsdiagnose sind experimentelle Untersuchungen im Labor. Der Messaufbau für hochohmige Isoliermaterialien muss so konzipiert sein, dass die Reproduzierbarkeit und Wiederholbarkeit der Messungen mit einer geringen Messabweichung möglich ist. Durch die geringen Leitfähigkeiten der Isoliermaterialien muss besonders auf den Stromfluss im Messaufbau sowie in und auf den Proben geachtet werden. Hierzu müssen der Materialzustand, die Messtechnik und der Messaufbau über den jeweiligen Messzeitraum stabil sein. Da der entwickelte Messaufbau diese Anforderungen erfüllt, konnten die Materialeigenschaften, der Einfluss der Temperatur bei unterschiedlichem Materialzustand und Geometrieordnung näher untersucht werden und das experimentelle Ergebnis in das entwickelte Modell einfließen.

Unter wohldefinierten Bedingungen durchgeführte Labormessungen im Frequenzbereich ermöglichten, dass das dielektrische Verhalten der untersuchten Materialien mit der empirischen Relaxationsfunktion von Havriliak und Negami auf das Cole-Cole-Modell reduziert und überprüft werden kann. Mit Hilfe der Messungen an Leistungstransformatoren wurde das bisher zur dielektrischen Modellierung des Isolationssystems verwendete RC-Modell verbessert und ergänzt. Die mathematische Darstellung durch das Cole-Cole-Modell zeigt, wie die einzelnen Materialeigenschaften und die Geometriefaktoren die komplexe Kapazitätsmessung verändern, aber auch welche Materialeigenschaften und Geometriefaktoren notwendig sind, um einen Messverlauf nachzubilden. Hierzu wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Verfahren entwickelt, das anhand der komplexen Kapazitätsmessung im Frequenzbereich mit standardisierten nichtlinearen Lösungsverfahren die Modellparameter mit den jeweiligen Nebenbedingungen bestimmt.

Da die thermische Überbelastung von Leistungstransformatoren die Lebensdauer des Isolationssystems verkürzt, wurde auch der thermische Alterungsprozess von Öl-Papier-Isolationssystemen im Labor näher untersucht. Hierzu wurden die dielektrischen Eigenschaften im Frequenzbereich bei erhöhter Temperatur über einen längeren Zeitraum gemessen. Auf diese Weise konnten die Veränderung durch die künstliche Alterung visualisiert und Rückschlüsse auf die Veränderung des Isolationssystems durch thermische Isolationsalterung im Leistungstransformator gemacht werden.

1.1 Stand der Technik

An der ETH Zürich wurden die Grundlagen zur Bestimmung des Zustandes von Öl-Papier-Isolationssystemen im Zeit- und Frequenzbereich entwickelt [30], [69]. Vor Ort wird am Leistungstransformator eine Offline-Messung im Frequenz- oder Zeitbereich durchgeführt. Im Zeitbereich wird der Polarisationsstrom nach dem Anlegen einer konstanten Gleichspannung gemessen. Direkt nach dem Abschalten der Gleichspannung wird der Depolarisationsstrom erfasst (PDC-Messung). Im Frequenzbereich wird die komplexe Kapazität von wenigen mHz bis in den Bereich von 1 kHz bestimmt (FDS-Messung). Prinzipiell liefern die PDC- und FDS-Messung zur Zustandsdiagnose die gleichen Ergebnisse, sofern ein lineares dielektrisches Systemverhalten angenommen wird [19].

Bei der Transformatoridiagnose wird ausgehend von den bekannten Geometriedaten der Hauptisolation ein gesamtes RC-Netzwerk für den jeweiligen Streukanal erstellt. Das resultierende Streukanal-Netzwerkmodell betrachtet die US- und OS-Wicklung als Mantelabwicklung, die zur Darstellung als zwei gleich großen Platten idealisiert wird. Zwischen den

Platten existiert ein homogenes elektrisches Feld, und die Randfelder werden vernachlässigt. Mit der weiteren Annahme, dass die Materialien ein lineares, isotropes dielektrisches Verhalten haben, können die einzelnen Leisten, Ölkanäle und Transformerboardschichten, wie in der Abbildung 1.1 gezeigt, zusammengefasst werden. Die einzelnen RC-Schaltungsmodelle für die Isolierstoffe, wie Öl, Leisten und Transformerboard, werden aus einer Materialdatenbank entnommen, und das theoretische berechnete Systemverhalten mit der zu untersuchenden Messung am Transformator verglichen. Die beste Übereinstimmung zwischen berechnetem Systemverhalten und der Messung am Objekt sowie die Kenntnis über den Zustand der Referenzprobe liefert eine Abschätzung über den Zustand des Transformators [30].

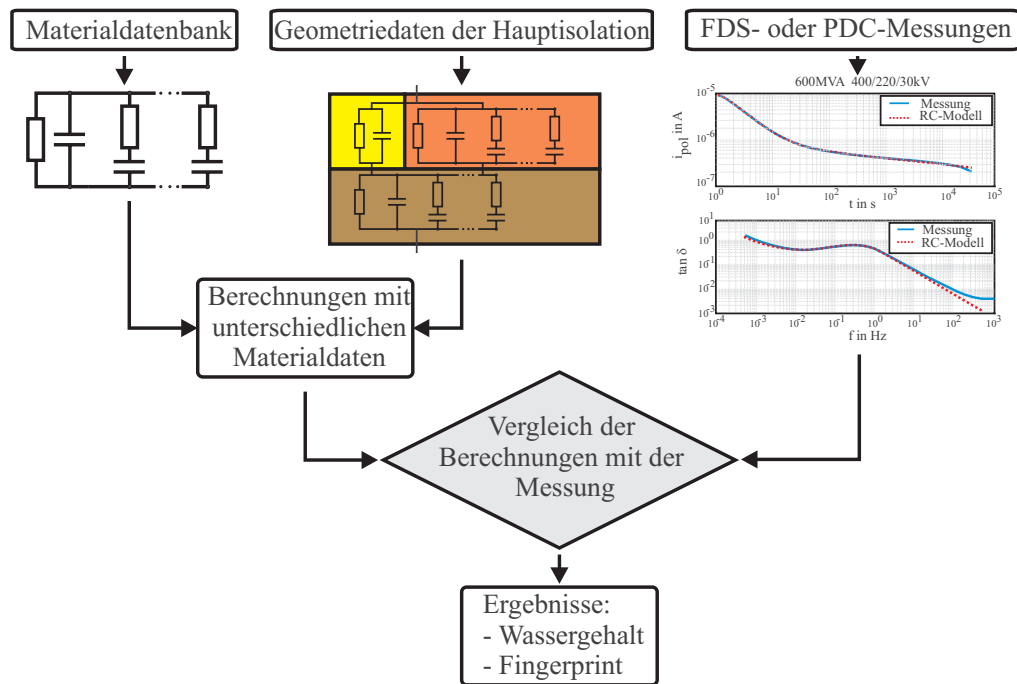


Abb. 1.1: Schematischer Ablauf der dielektrischen Zustandsdiagnose von Leistungstransformatoren.

Die Parameter der Referenzprobe in Form eines dielektrischen RC-Schaltungsmodells werden durch gezielte Messungen an einer einfachen Platten-Kondensatoranordnung mit definierten konditionierten Isoliermaterialien gewonnen. Die erzielten Messdaten im Zeitbereich oder im Frequenzbereich und die Information des Materialzustandes, wie z. B. Materialproben mit unterschiedlichem Wassergehalt, werden in einer Materialdatenbank zur späteren Analyse abgelegt.

Außerdem erhält man bei jeder Messung am Leistungstransformator einen so genannten „Fingerprint“, der bei späteren Messungen am gleichen Leistungstransformator zum Vergleich dient, um deutliche Veränderungen zu erkennen.

1.2 Motivation und Ziele

Die Kenntnis über den geometrischen Aufbau der Hauptisolation des Leistungstransformators ist bisher für die FDS- und PDC-Diagnoseverfahren notwendig, um einigermaßen

verlässliche Ergebnisse zu erhalten. In der Praxis zeigte sich, dass in vielen Fällen der notwendige Isolationsaufbau nicht zur Verfügung steht und nur bedingt mittels Kenndaten abgeschätzt werden kann. Dies wurde durch eine statistische Auswertung von bekannten Leistungstransformatoren bestätigt. Zum einen liegt das daran, dass die unterschiedlichen Hersteller von Transformatoren über den Bauzeitraum von ca. 40 Jahren den Aufbau kontinuierlich verändert haben, und zum anderen beeinflussen die Materialkosten im jeweiligen Baujahr den inneren Aufbau eines Transformators. Erschwerend kommt hinzu, dass spezifische Kundenwünsche beim Bau eines Transformators ebenfalls eine wesentliche Rolle bei der Auslegung des Transformators spielten.

Die Modellierung und Analyse mit RC-Netzwerken und Referenzproben kann nur bekannte Materialzustände bewerten. Durch die vielfältigen Einflüsse auf das Isolationssystem, wie z. B. Geometrieaufbau, Materialarten, Messtemperatur, Wassergehalt und Säuregehalt, müssen in der Materialdatenbank alle möglichen Parameter und die zugehörigen Referenzmessungen enthalten sein, um eine ausreichend genaue Diagnose durchzuführen. Sind nicht umfangreiche Materialdaten in der Datenbank enthalten, so kann dies die Zustandsdiagnose erschweren oder sogar zur Fehlinterpretationen führen.

Zunächst ist für den Diagnostiker grundsätzlich wichtig zu wissen, welche Informationen in der Messung stecken oder welche Referenzproben in der Materialdatenbank vorliegen müssen, um eine gezielte Beurteilung des Isolationssystems im Transformator durchzuführen. Hier stellt sich die Frage, welche Materialeigenschaften und -zustände tatsächlich gemessen werden können und welchen Einfluss Transformatorgeometrie und Messtemperatur auf die Messergebnisse haben. Eine weitere Schwierigkeit liegt im rechtzeitigen Erkennen von Messfehlern und die Beurteilung der Messgenauigkeiten. Um die Messung zu kontrollieren, ist ein geeignetes Modell notwendig, welches das dielektrische Systemverhalten ausreichend genau nachbildet.

Als Resümee kann gesagt werden, dass die FDS- und PDC-Diagnoseverfahren zunächst geeignete und leicht anwendbare Methoden sind, um die Veränderungen im Isolationssystem zu erfassen. Die Grundlage beider Verfahren basiert auf dem dielektrischen Systemverhalten. Das Problem liegt bisher in der Interpretation der Messergebnisse. Hier stößt das RC-Netzwerkmodell mit Referenzproben an seine Grenzen.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, ein alternatives Modell zu entwickeln, das die Grenzen der bisherigen RC-Netzwerke überwinden kann. Das neue Material- und Transformatormodell soll die physikalische Interpretation beinhalten, eine mathematische Darstellung und Verarbeitung ermöglichen. Insbesondere ist die Unterteilung der in den dielektrischen Messungen enthaltenen Information in Geometrieaufbau und Materialeigenschaften von Bedeutung, damit die Ursache für die Veränderung besser zugeordnet werden kann. Um die Ursache für die Veränderung in Messungen bestimmen zu können, sind Messungen an definierten Isoliermaterialien und die Identifikation der einzelnen Materialparameter erforderlich. Außerdem sind noch keine standardisierten dielektrische Messverfahren vorhanden, die die Reproduzierbarkeit und Wiederholbarkeit sicherstellen.