

**Dipl.-Ing. Jochen Christian**

***Erkennung mechanischer Wicklungsschäden in Transformatoren mit der Übertragungsfunktion***

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. K. Feser

Mitberichter: em. o. Prof. Dr.-Ing. H. J. Gutt

Tag der mündlichen Prüfung: 29. Mai 2002

Transformatorwicklungen sind bei Fehlern im elektrischen Versorgungsnetz sehr hohen mechanischen Beanspruchungen ausgesetzt. Nimmt im Laufe der Betriebsdauer die Festigkeit der Wicklungskonstruktion infolge Papieralterung oder mechanischer Vibration ab, kann die Kurzschlussfestigkeit beeinträchtigt werden. Bei großen Strombeanspruchungen können sich Schäden an den Wicklungen ergeben. Diese Schäden führen nicht immer zum unmittelbaren Ausfall des Betriebsmittels, so dass gelegentlich diese Wicklungsverformungen unerkant bleiben. Es entstehen dadurch zusätzliche Risiken für den weiteren Betrieb. Ein erneutes Fehlerereignis kann zum Ausfall des Betriebsmittels und zu Folgeschäden an anderen Betriebseinrichtungen führen. Zur Vermeidung solcher Risiken sind Diagnose-verfahren für eine Detektion mechanischer Vorschäden in Transformatorwicklungen notwendig. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Eignung der frequenzabhängigen Übertragungsfunktion zur Erkennung von Wicklungsveränderungen untersucht.

Die Anwendung der Übertragungsfunktion als Diagnoseverfahren erfolgt als vergleichende Betrachtung. Eine aktuelle Untersuchung muss mindestens einem Referenzergebnis gegenüber gestellt werden. Die Grundvoraussetzung dafür ist ein hohes Maß an Vergleichbarkeit von Mess- und Referenzergebnissen. Im Folgenden wird die Wirkung verschiedener Einflussgrößen auf die Ergebnisse der Übertragungsfunktion untersucht. Die Beeinflussung durch unterschiedliche Signalverarbeitungsmaßnahmen wird anhand eines Vergleichs unter den in der Praxis am häufigsten angewandten Fensterfunktionen geprüft.

Der Einfluss des Prüf- und Messkreises auf die Resultate von Übertragungsfunktionsmessungen ist möglichst klein zu halten. Hierzu werden verschiedene Konzepte der Kabel- und Erdleitungsführung vorgestellt und bewertet. Die Ergebnisse der Arbeit dokumentieren die Notwendigkeit von definierten, geschirmten Signalleitungen bei möglichst kleinen Verbindungslängen zum Bezugspotenzial.

Neben der angewandten Signalverarbeitung und dem Aufbau der Prüfschaltung beeinflussen auch die Zustandsgrößen des Transformators das frequenzabhängige

Übertragungsverhalten. Die Änderung der Frequenzkennlinien infolge unterschiedlicher Temperaturen wird anhand systematischer Messungen während des Abkühlvorgangs einer Wicklung untersucht. Hieraus zeigt sich, dass für die in der Praxis relevanten Temperaturschwankungen keine zusätzlichen Ergebniskorrekturen notwendig sind. Die Unterschiede infolge einer Temperaturdifferenz von 60 K liegen im Wertebereich der Messunsicherheit. Darüber hinaus bestimmt die Stellung des Stufenschalters maßgeblich das Übertragungsverhalten zwischen den Wicklungen. An einem Leistungstransformator wird der Effekt unterschiedlicher Stellungen und Schaltrichtungen gezeigt.

Für Übertragungsfunktionen existieren drei verschiedene, experimentelle und im Rahmen dieser Arbeit praktisch erprobte Vergleichsvarianten. Der Vergleich mit einer Fingerprint-Messung (zeitbasierter Vergleich) liefert die zuverlässigsten Aussagen. Voraussetzung hierfür ist ein hohes Maß an Vergleichbarkeit beider Messungen. Eine Gegenüberstellung von Übertragungsfunktionen separat geprüfter Wicklungsschenkel (konstruktionsbasierter Vergleich) ist nur für Transformatoren mit Stern- und Dreieckschaltungen sowie für zweischenklige Einphasentransformatoren geeignet. Der Vergleich von Ergebnissen einer Reihenuntersuchung an mehreren, identisch spezifizierten Transformatoren eines Herstellers (typenbasierter Vergleich) weist ausgeprägte Streuungen auf. Die Ursachen hierfür liegen in Fertigungstoleranzen, Fertigungsunterschieden und eventuellen nachträglichen Änderungsarbeiten am Aktivteil begründet. Als Entscheidungskriterium für eine signifikante Abweichung dient das 95 %-Vertrauensintervall einer hypothetischen, empirisch ermittelten Normalverteilung.

Zur Bewertung von signifikanten Unterschieden bei aktuellen Messungen müssen die Zusammenhänge von mechanischen Veränderungen in Wicklungen und den Charakteristika des frequenzabhängigen Übertragungsverhaltens bekannt sein. Die experimentelle Nachbildung von mechanischen Deformationen und axialen Verschiebungen an Versuchswicklungen im Labor erlaubt eine systematische Untersuchung dieser Korrelationen. Neben den geänderten Resonanzgüten bewirken mechanische Wicklungsschäden ebenfalls Werteverstärkungen bei den Frequenzen der auftretenden Übertragungsfunktionsmaxima und -minima. Anhand zahlreicher Prüfschaltungen mit verschiedenen Antwortsignalen werden Vergleiche hinsichtlich der zu erwartenden absoluten Empfindlichkeit gegenüber mechanischen Schäden erstellt. Während sich bei einer axialen Bewegung zweier Wicklungsröhren zueinander keine bevorzugte Prüfschaltung bzw. kein bevorzugtes Antwortsignal ergibt, wird für radiale Verformungen eine stark ausgeprägte Empfindlichkeit bei den Messsignalen der verformten Wicklung festgestellt. Abschließend erfolgt mit Hilfe der sensitivsten Messsignale eine Abschätzung der absoluten Messempfindlichkeit.