

Diss. ETH Nr. 17417

A model-based diagnosis system for the moisture content of power transformer insulations under varying loading conditions

Dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of
Doctor of Technical Sciences

Presented by

Wolfgang Hribernik

Dipl.-Ing. University of Technology Vienna

born April 22nd, 1975

Vorau, Austria

Accepted upon the recommendation of
Prof. Dipl.-Ing. Dr. Klaus Fröhlich, examiner
Prof. Dr. Stanislaw Gubanski, co-examiner

Zürich, 2007

Abstract

Motivated by economic pressure resulting from the liberalized electricity market, power utilities are increasingly working on a reduction of costs, especially in the field of maintenance. Moreover, power transformers are one of the most expensive investments in an electric power system. The tasks fault detection and diagnosis reduce both maintenance costs and the risk of a power transformer failure.

Existing diagnosis concepts for power transformers are traditionally categorized by the underlying measurement technique (*online* vs. *offline*). The division into physical subsystems (e.g. *mechanic subsystem*, *dielectric subsystem*, *thermal subsystem*) is a first step for a model-based approach. Interpretation methods for measurement results and the integration of the subsystems into a common diagnosis scheme are missing links on the way to a model-based diagnosis concept.

Model-based diagnosis methods utilize an explicit mathematical model of the monitored system. Physical and analytical redundancy methods provide the possibility to distinguish between systems faults, sensor faults, and modelling errors.

A process model for the thermal behavior of the power transformer is developed. It consists of a set of discrete heat reservoirs with non-linear heat exchange coefficients between them. Temperatures for windings, oil, tank and sensor box can be predicted from measured load current with a very satisfying quality compared to measured values.

The diffusion of water in *paper* – the cellulosic part of the transformer insulation system – and the exchange of water between paper and oil is simulated with a moisture diffusion model. It covers temperature dependent diffusion coefficients and acts as a non-linear control loop for

the water concentration in transformer oil. With the proposed model the estimation of water distribution in the transformer insulation system can be calculated from operation parameters without transformer shutdown.

An experimental setup consisting of a medium voltage distribution transformer equipped with a controllable loading setup provides the functionality for heat runs. Sensors for temperatures and relative water concentration in oil are installed at the transformer and connected with a data acquisition unit which stores measured data on a PC.

In order to evaluate fault scenarios, a structured residual approach is chosen. Fault patterns which are characteristic for a certain fault type are generated in order to identify faults.

Both process models and diagnosis structure are verified by comparing measured and simulated system variables.

The diagnosis system is proposed to be implemented either as a strictly online fault detection system for large power transformers or as an inexpensive offline evaluation method for medium voltage distribution transformers. Both methods have major economic advantages over conventional offline measurements thanks to the fact that no transformer shutdown is necessary. This avoids costs related to the loss of production or distribution capacity and saves availability of equipment which is even more important within liberalized electricity market schemes.

Kurzfassung (Deutsch)

Leistungstransformatoren gehören zu den grössten Investitionen in einem elektrischen Energieversorgungssystem. Die zunehmende Deregulierung des Elektrizitätsmarktes zwingt die Elektroversorgungsunternehmen zu einer Reduktion der Wartungskosten und damit auch zu einem Abbau an fachkundigem Wartungspersonal. Letzteres führt zu einem Mangel an Transformator-spezifischem Wissen in einem derartigen Unternehmen und führt daher zu einem erhöhten Risiko eines Transformatorschadens. Automatische Fehlererkennung und Diagnosesysteme führen einerseits zu einer Kostenreduktion und reduzieren andererseits das Risiko eines Transformatorausfalls.

Diagnosemethoden für Leistungstransformatoren wurden traditionell anhand der zugrunde liegenden Messmethode (*online* bzw. *offline*) kategorisiert. Ein anderer Ansatz geht von der Unterteilung in physikalische Subsysteme (z.B. *mechanisches Subsystem*, *dielektrisches Subsystem*, *thermisches Subsystem*) aus. Diese Unterteilung kann als erster Schritt in Richtung eines modellbasierten Diagnosekonzepts gesehen werden. Interpretation der Messdaten und Integration der Subsysteme in ein gemeinsames Diagnoseschema ergänzen den Ansatz zu einem modellbasierten Diagnosesystem.

Methoden der modellbasierten Diagnose verwenden explizite mathematische Modelle der zu überwachenden Systeme. Sowohl Methoden physikalischer, als auch analytischer Redundanz ermöglichen die Unterscheidung zwischen Systemfehlern, Sensorfehlern und Modellierungsfehlern.

Für die Simulation des thermischen Transformatorverhaltens wurde ein thermisches Modell basierend auf diskreten Wärmespeichern und

nichtlinearen Wärmeübergängen entwickelt. Damit können die Temperaturen von Transformatorkegel, Transformatorkegel, Wicklung, Öl und Sensorbox abhängig vom Laststrom errechnet werden. Die simulierten Werte zeigen sehr gute Übereinstimmung mit gemessenen Werten.

Die Diffusion von Wasser in *Papier* – dem zellulosehaltigen Anteil des Transformatorisolationssystems – und der Austausch von Wasser zwischen Papier und Öl wird mit einem Feuchtigkeitsdiffusionsmodell beschrieben. Dieses enthält temperaturabhängige Diffusionskoeffizienten und wirkt als nichtlinearer Regelkreis für die Feuchtigkeitskonzentration im Transformatoröl.

Ein experimenteller Versuchsaufbau bestehend aus einem Mittelspannungstransformator, der mit einer steuerbaren Stromversorgung ausgestattet ist, gestattet das Einstellen programmierbarer Temperaturprofile. Am Transformator sind Sensoren für Temperaturen und relative Ölfeuchtigkeit angebracht. Ein Datenlogger transferiert und speichert die Messdaten auf einem PC.

Zur Beurteilung der Fehlerszenarien wird ein Ansatz mit strukturierten Residuen gewählt. Zur Identifikation der Fehlertypen werden Fehlermuster erzeugt, die dann charakteristisch für einen jeweiligen Fehlertyp sind.

Sowohl Prozessmodelle, als auch das Diagnosesystem wurden einer Systemverifikation unterzogen. Dabei wurden gemessene Werte mit simulierten Größen verglichen.

Als praktische Anwendung für das vorgestellte Diagnosesystem ist einerseits ein Online-Einsatz, parallel zum Betrieb des Leistungstransformators denkbar. Andererseits kann das Diagnosesystem als preiswerte Offline-Methode zur Auswertung vorausgezeichneter Messdaten verwendet werden, was einen Einsatz in der Mittelspannungsebene wirtschaftlich ermöglicht.