

## ■ **Thermal Monitoring of Power Transformers**

**M. Sc. Mohammad Djamali**

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. S. Tenbohlen

Mitberichterin: Prof. Zhongdong Wang, Manchester

Tag der mündlichen Prüfung: 29.01.2018

With the integration of the renewable energy-based power plants into power systems and due to their volatile nature, the overloading of transformers is inevitable because of economical reasons. Therefore, an accurate method should be used to determine the maximum loading capability of transformers under a specified ambient temperature. Loading capability of transformers depends strongly on their thermal conditions which can be investigated by means of a dynamic thermal model. During the overloading of transformers, it should be ensured that the transformer does not experience an accelerated thermal aging and that the whole cooling capacity of the transformer is available. Therefore, every effort toward monitoring of the cooling system and determining the loading capability is worthwhile.

In this dissertation, firstly, the state-of-the-art in the thermal modeling of transformers, their applications, and factors affecting their accuracy are provided. Afterwards, a thermal model for calculation of the top-oil temperature using an online monitoring system is proposed which uses different heat transfer phenomena, namely the natural and forced convection, the thermal radiation, the heat conduction, and the natural ventilation. Using thermal-electric analogy, these phenomena are connected to each other with consideration of their mutual impacts. Two variations of the model are proposed for indoor transformers.

Due to the simple structure of the model, it can be easily implemented and integrated into online monitoring systems. The developed top-oil temperature model is implemented into a monitoring system. Among the tasks of the proposed monitoring system are online parametrization of the embedded top-oil temperature model, after acquiring a specified number of measurements; the calculation of the top-oil and hot-spot temperatures, after parametrization; monitoring of cooling system; and determining the loading capability. The proposed model and developed system are validated using the data measured during normal operation of transformers with different cooling systems and different ratings. The results of validation show that the proposed model represents a good performance to calculate the characteristic temperatures of transformers.

Due to the reliability and the accuracy of the model, it can be used for monitoring of the cooling system and determining the loading capability. It is a matter of fact that during the overloading of transformers, the temperatures of the oil and windings are

near their maximum values. The cooling systems of transformers play vital roles to transfer the heat generated in the active parts of the transformer to the surrounding ambient. In this context, the monitoring of the cooling system is a crucial task. Two algorithms are proposed for this purpose which use a top-oil temperature model as their cores. The proposed algorithms are validated using the data measured during the normal and faulty operations of two transformers with ODAF and OFAF cooling systems. The results show that both algorithms are able to detect failures in the cooling system as soon as possible even if the failures are not severe. Provided that an accurate thermal model for calculation of the hot-spot temperature as well as a reliable online algorithm for monitoring of the cooling system are available, the maximum loading capability of transformers can be determined under specified environmental conditions. In this dissertation, a method for determination of the loading capability of transformers is provided which is a reverse procedure of the calculation of the hot-spot temperature. This procedure is an optimization problem which should be solved using the online monitoring system. This task takes, in some cases, one minute which should be performed parallel with other tasks. The time for completion of this task varies with the complexity of the top-oil temperature model and the micro-processor of the monitoring system.

However, the computational capability of monitoring systems is limited; hence, an alternative way should be provided for determination of the loading capability. Afterwards, the dependency of the loading capability on the ambient temperature is investigated. This dependency is an equation in form of a quadratic or linear equation for accurate determination of the loading capability and contains every information needed for this purpose. It is shown in this thesis that these equations can be used in an online monitoring system instead of forcing the monitoring system to solve an optimization problem under dynamic conditions. Both procedures have been applied on different types of transformers with different cooling systems in order to show the performance of the quadratic and linear equations.

- **Thermisches Monitoring von Leistungstransformatoren**

**M. Sc. Mohammad Djamali**

Durch die Integration erneuerbarer Energien in die bestehenden Energienetze und deren volatilen Erzeugungsprofil gewinnt eine möglichst hohe Ausnutzung der Leistungstransformatoren an Bedeutung. Eine genaue Methode ist notwendig, um die maximale Belastbarkeit eines Transformators angesichts der aktuellen Umgebungsbedingungen zu ermitteln. Die Belastbarkeit von Transformatoren hängt stark von deren thermischem Zustand ab, welcher mittels eines dynamischen thermischen Modells beurteilt werden kann. Während der Überlastung von Transformatoren muss gewährleistet werden, dass sowohl der Transformator keine vorzeitige

thermische Alterung erfährt als auch die gesamte Kühlkapazität des Transformators zur Verfügung steht. Deswegen sind Beiträge zur Überwachung der Kühleinrichtung und zur Ermittlung der maximalen Belastbarkeit von Transformatoren von großer Bedeutung.

In dieser Arbeit wird zunächst der Stand der Technik vorgestellt. Dies enthält die thermische Modellierung, ihre Anwendungen und Einflussfaktoren. Anschließend wird ein thermisches Modell zur Berechnung der oberen Öltemperatur mittels eines Monitoringsystems vorgeschlagen. Das Modell zieht unterschiedliche Wärmeübertragungsphänomene in Betracht, nämlich die natürliche und erzwungene Konvektion, die thermische Strahlung, die Wärmeleitung und die natürliche Belüftung. Die bereits vorgestellten Phänomene werden mittels einer thermisch-elektrischen Analogie verbunden. Gleichzeitig werden ihre gegenseitigen Einflüsse berücksichtigt. Es werden zusätzlich zwei Variationen des vorgestellten Modells für Transformatoren in Gebäuden vorgeschlagen. Aufgrund der relativ einfachen Struktur der vorgeschlagenen Modelle können sie ohne großen Aufwand in Monitoringsysteme integriert werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wird das Modell zur Berechnung der oberen Öltemperatur hardware- und softwaremäßig implementiert und ein Monitoringsystem entwickelt. Das Monitoringsystem dient dazu, die obere Öltemperatur und die Heißpunkttemperatur möglichst genau zu berechnen und auf deren Basis den Zustand der Kühlanlagen zu überwachen und die maximale Belastbarkeit zu ermitteln. Anhand der während des normalen Transformatorbetriebs aufgenommenen Messdaten werden das entwickelte thermische Modell und das Monitoringsystem validiert. Die Ergebnisse der Validierung zeigen, dass das entwickelte Modell eine hohe Genauigkeit bei der Berechnung der Temperaturen besitzt. Aufgrund der Zuverlässigkeit und Genauigkeit des Modells ist es für das Monitoring geeignet.

Während der Überlastung eines Transformators kommen die Öl- und Wicklungstemperaturen an ihre Grenzen. Um die im Aktivteil des Transformators erzeugte Wärme an die Umgebung abzuführen, ist die Kühleinrichtung des Transformators von großer Bedeutung. In diesem Zusammenhang bietet die Überwachung der Kühleinrichtung die Möglichkeit, aufgetretene Fehler frühzeitig zu erkennen. In dieser Arbeit werden zwei Algorithmen zur Überwachung der Kühleinrichtung vorgeschlagen. Die beiden Algorithmen verwenden das thermische Modell als ihren Kern. Mittels der Messdaten werden die vorgeschlagenen Algorithmen validiert. Die Ergebnisse zeigen, dass die beiden Algorithmen eine frühzeitige Erkennung von Fehlern der Kühleinrichtung ermöglichen.

Angenommen, dass sowohl ein genaues thermisches Modell zur Berechnung der Heißpunkttemperatur als auch ein Algorithmus zur Überwachung der Kühleinrichtung zur Verfügung stehen, lässt sich die maximale Belastbarkeit eines Transformators angesichts der aktuellen Umgebungsbedingungen ermitteln. So stellt diese Arbeit eine Methode zur Ermittlung der maximalen Belastbarkeit vor, welche der umgekehrte Prozess der Berechnung der Heißpunkttemperatur ist. Dieses Verfahren versteht sich als ein Optimierungsproblem, das in das Monitoringsystem implementiert

werden muss. Es werden auch im Rahmen dieser Arbeit der Zusammenhang zwischen der maximalen Belastbarkeit und der Umgebungstemperatur in Form einer linearen oder quadratischen Gleichung untersucht. Es wird gezeigt, dass diese Gleichungen das zeitaufwändige Optimierungsverfahren gut annähern.