

- **Risikoorientierte Instandhaltung von Leistungstransformatoren basierend auf einem regel- und fallorientierten Inspektionsverfahren**

Dipl.-Ing. Markus Fischer

Hauptberichter:

Prof. Dr.-Ing. S. Tenbohlen

Mitberichter:

Prof. Dr.-Ing. M. Weyrich

Tag der mündlichen Prüfung:

31.01.2018

Im regulierten Markt besteht das Geschäftsmodell des Netzbetreibers darin, Dritten die zur Übertragung von elektrischem Strom notwendige Übertragungskapazität bereitzustellen. Die daraus erzielbaren Gewinne werden maßgeblich durch die Kosten aus Beschaffung und Betrieb der notwendigen Netzinfrastruktur beeinflusst. Insbesondere große Leistungstransformatoren mit Oberspannungen von mindestens 220 kV, wie sie in Transportnetzen eingesetzt werden, gelten als sehr kostenintensive Betriebsmittel, für die eine risikoorientierte Instandhaltungsstrategie lohnt.

In der vorliegenden Arbeit wird daher zunächst eine Größe hergeleitet, die Leistungstransformatoren hinsichtlich ihres Ausfallrisikos bewertet. Je höher das Ausfallrisiko eines Leistungstransformators, desto vordringlicher dessen Wartung oder gegebenenfalls auch dessen Instandsetzung. Die Risikogröße basiert auf der Wichtigkeit des Leistungstransformators einerseits und dem technischen Zustand des Leistungstransformators andererseits, wobei die Wichtigkeit den Schaden quantifiziert, der eintritt, wenn der Leistungstransformator ausfällt, und mit dem technischen Zustand die Wahrscheinlichkeit geschätzt wird, mit der der Leistungstransformator ausfällt. Die Wichtigkeit ihrerseits beinhaltet monetäre wie technische Schadensaspekte.

Im weiteren Verlauf der Arbeit wird eine neue Interpretationsvorschrift erarbeitet, mit der der Zustand eines Leistungstransformators anhand charakteristischer Muster im Isolieröl erkannt werden kann. Die neue Interpretationsvorschrift basiert auf Klassifikatoren, die durch hybride Expertensysteme modelliert werden. Als führendes System eines hybriden Expertensystems kommt ein Fuzzy-Inferenz-System vom Typ Takagi-Sugeno-Kang nullter Ordnung zur Anwendung, welches eine strukturelle Äquivalenz zu radialen Basisfunktionen-Netzen aufweist, wodurch das von den künstlichen neuronalen Netzen bekannte Trainingsprinzip auf das Takagi-Sugeno

Kang Fuzzy-Inferenz-System nullter Ordnung übertragen werden kann. Hierdurch können die zur Erkennung ablaufender Alterungs- und Verschleißprozesse notwendigen Wissensbasen zunächst durch Erfahrungswissen (regelbasiertes Wissen) modelliert und schließlich durch das in Einzelfällen steckende Wissen (fallbasiertes Wissen) im Rahmen eines Trainings weiter optimiert werden.

Das Training eines Takagi-Sugeno-Kang Fuzzy-Inferenz-Systems nullter Ordnung verlangt eine standardisierte Produktionsregelbasis. Eine Standardisierung aber bewirkt, dass die zur Beschreibung eines Klassifikators notwendigen Produktionsregeln stark anwachsen, insbesondere im Falle von höherdimensionalen Klassifikatoreingangsräumen. In diesem Zusammenhang kann gezeigt werden, dass der Approximationsfehler bei Verwendung kosinusbasierter Zugehörigkeitsfunktionen besonders klein ausfällt, so dass die Zahl der Produktionsregeln minimiert werden kann.

Das regelbasierte Wissen zur Erkennung der Verschleißprozesse wird aus klassischen Gas-in-Öl Analysemethoden und das regelbasierte Wissen zur Erkennung von Alterungsprozessen aus der „Richtlinie zur Überwachung und Wartung von Isolierölen auf Mineralölbasis in elektrischen Betriebsmitteln“ [DIN EN 60422, 2007] gewonnen. Als Trainingsdaten dienen gesicherte Fälle, das heißt Fälle, in denen der zu einer Gas-in-Öl Analyse gehörende Leistungstransformatorzustand im Vorfeld verifiziert werden konnte.

Die daraus hervorgegangenen Wissensbasen (bei der Gas-in-Öl Analyse eine pro klassischer Interpretationsmethode) werden anschließend zu einer Gesamtwissensbasis zusammengeführt. Hierdurch können Vorteile gegenüber einzelnen Wissensbasen sowohl im Hinblick auf die Anzahl erkennbarer Alterungs- und Verschleißprozesse als auch hinsichtlich der Zuverlässigkeit der Vorhersage der Ausfallwahrscheinlichkeiten erreicht werden.

In einer abschließend durchgeführten Fallstudie werden sowohl die Interpretationsvorschriften für Alterungs- und Verschleißprozesse als auch die risikoorientierte Instandhaltung erprobt. In diesem Zusammenhang ist festzustellen, dass die neue Interpretationsvorschrift ein großes Spektrum an Alterungs- und Verschleißprozessen zuverlässig zu erkennen vermag, dabei aber – im Gegensatz zu den klassischen Interpretationsvorschriften – keine binäre Eindeutigkeit vorgibt, wo tatsächlich auch keine existiert. Nicht zuletzt erweist sich die Visualisierung des Ausfallrisikos einer Leistungstransformatorpopulation in einem Risikodiagramm als vorteilhaft, um rasch die Risikoverteilung einer Leistungstransformatorpopulation zu erkennen und die Individuen in der richtigen Reihenfolge einer Instandhaltung zuzuführen.

- **Risk-oriented Maintenance of Power Transformers Based on a Rule- and Case-oriented Inspection Method**

Dipl.-Ing. Markus Fischer

In a regulated market grid operators follow their business model by providing power carriage capacities to third parties. Earnings resulting from that business are decisively influenced by procurement and maintenance of the necessary power grid infrastructure. This applies in particular to large power transformers with a primary voltage of 220 kV and above, which are normally used in transmission power grids. They are known to be very expensive and thus worth to be maintained in a risk based manner.

Thus, this thesis develops at first a variable that assesses power transformer's risk of an outage. The higher the risk of an outage, the more urgent a power transformer needs to be maintained or repaired, respectively. The risk variable depends on power transformer's importance on the one hand and on the other on its technical condition, whereby the importance reflects the impact of an outage and the technical condition the probability of an outage. The impact itself can be of monetary or technical kind.

During further work, a new interpretation regulation will be developed that aims to determine the technical condition of a power transformer by recognizing characteristic patterns in isolation oil. The new interpretation regulation is based on classifiers which are modelled by hybrid expert systems. The leading part of the expert system is a type zero Takagi-Sugeno-Kang fuzzy-inference-system which is structural equivalent to radial basis function networks and therefore it is possible to adopt the training principle known from artificial neural networks to the type zero Takagi-Sugeno-Kang fuzzy-inference-system. Hereby, knowledge bases that detect aging and wearout processes are modelled first by rule-based knowledge and then they are further optimized by case-based knowledge through the appliance of an adequate training.

The training of a Takagi-Sugeno-Kang fuzzy-inference-system of type zero requires a standardized rule base. But the standardization process strongly increases the number of production rules that are needed for the description of a classifier – especially in case of a classifier with multidimensional input space. In such a case the usage of cosine-based membership functions can minimize the approximation error and therefore the number of required production rules.

The rule-based knowledge to detect wearout processes is obtained from classical interpretation regulations that belong to the dissolved gas analysis, while the rule-based knowledge to detect aging processes is derived from a directive called „Directive for supervision and maintenance of insulating mineral oil used in electrical equipment“ [DIN EN 60422, 2007]. Knowledge base optimizations are then achieved

by training with verified cases. That means cases in which the technical condition that belongs to a certain dissolved gas analysis has been confirmed in advance.

Subsequently, all resulting knowledge bases (in case of dissolved gas analysis one per classical interpretation regulation) are then aggregated into one comprehensive knowledge base. This leads to advantages over the single knowledge bases with regards to the amount of detectable aging and fault processes and also with regards to the reliability of the prognosis of outage probabilities.

Finally, in order to test the new interpretation regulations for aging and fault processes as well as in order to test the risk-based maintenance, a case study with meaningful examples is carried out. In this context one can observe that the new interpretation regulations detect a huge amount of aging and wearout processes. Thereby, the interpretation regulations do not pretend binary clarity (as classical interpretation regulations sometimes do) when there is actually none. Furthermore, it shows up to be advantageous to visualize power transformers' outage risk within a risk diagram. That is because the outage risk of individuals of such a population can thus be seen with ease and that is essential in order to maintain power transformers in the right order.