



Warum Teilentladungsprüfungen bei Entwicklung und Betrieb von Leistungstransformatoren so wichtig sind

Ulrike Broniecki

OMICRON Energy Solutions GmbH, Berlin

Leistungstransformatoren sind während ihrer sehr langen Lebensdauer starken Beanspruchungen unterschiedlichen Ursprungs ausgesetzt. Zu diesen Beanspruchungen zählen hohe elektrische Feldstärken, aber auch Temperaturschwankungen und starke, kurzzeitig auftretende mechanische Kräfte. Dadurch kommt es unter anderem zur Beeinträchtigung der elektrischen Isolation, die für einen ordnungsgemäßen Betrieb unabdingbar ist.

Dielektrische Diagnosemethoden liefern einen maßgeblichen Beitrag zur Qualitätssicherung und Aufrechterhaltung der Betriebssicherheit von Leistungstransformatoren, da sie eine Aussage über die Veränderung des Zustands der Isolation erlauben. Zum Spektrum der Messungen für diese erweiterte Diagnose zählen die Messungen der dielektrischen Eigenschaften, des Frequenzgangs, des Isolationswiderstands, der Kapazität und des Verlustfaktors sowie der Teilentladungen (TE).

Geprüfte Qualität

Bevor ein neuer Transformator bestellt wird, müssen die Anforderungen an die Qualitätssicherung geklärt werden, denn der Kunde möchte sicher sein, dass er ein einwandfreies Produkt erwirbt. Zur Prüfung des Designs und zur Gewährleistung einer guten Qualität werden Leistungstransformatoren während der Entwicklung und Fertigung verschiedenen Standardprüfungen unterzogen. Diese reichen von Material-Eingangsprüfungen über Forschungs- und Entwicklungsprüfungen bis hin zu Typprüfungen.

Die besondere Komplexität der Hochspannungstechnik und ihrer Betriebsmittel erlaubt nur eine begrenzte Simulierbarkeit und fordert viele empirische Untersuchungen. Um Aussagen über Grenz- und Langzeitverhalten des Betriebsmittels und der verwendeten Materialien treffen zu können, werden die Untersuchungen und Prüfungen mit hoher Präzision unter Laborbedingungen durchgeführt.

Bei Geräten, die in großer Stückzahl hergestellt werden, wird zudem jedes einzelne Gerät einer Stückprüfung unterzogen. Dadurch wird sichergestellt, dass das finale Produkt allen Anforderungen hinsichtlich Fertigungs- und Montagequalität entspricht. Neben den Standardprüfungen, die in den relevanten Normen gefordert werden, können zwischen Kunde und Hersteller auch weitere Prüfungen festgesetzt werden, um spezielle Anforderungen nachzuweisen.



Teilentladungsdiagnose an einem Leistungstransformator



Der einwandfreie Zustand der Isolation sollte während der gesamten Lebensdauer des Betriebsmittels durch Messung und Analyse der TE-Aktivität bestätigt werden.

Kleinste Schäden – Große Folgen

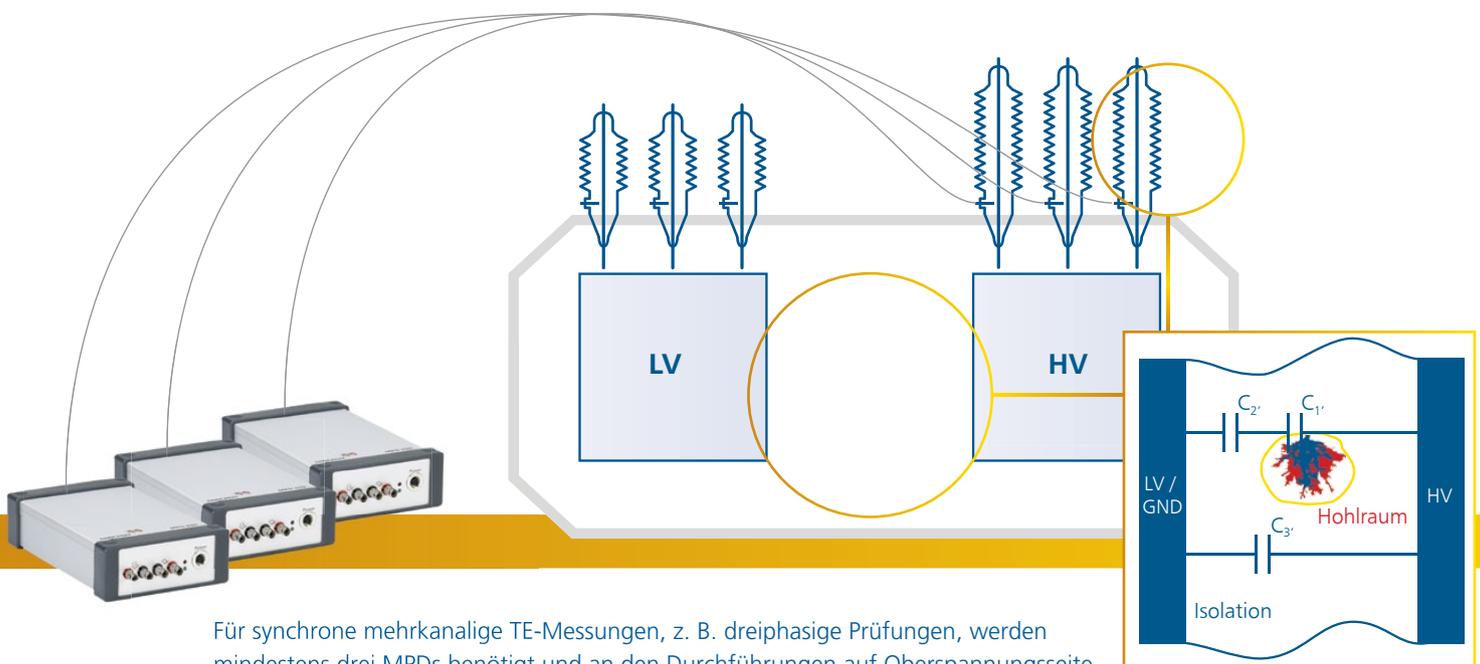
Im Vergleich zu anderen dielektrischen Diagnosemethoden erhalten Prüfengeure durch die Teilentladungsmessung sehr detaillierte Informationen, die ihnen helfen, auch die geringsten Schwachpunkte im Isolationssystem effektiv zu erkennen.

Nach der Norm IEC 60270 sind Teilentladungen „lokale elektrische Entladungen, die die Isolation zwischen Leitern nur teilweise überbrücken und die in der Nähe eines Leiters auftreten können oder nicht.“ Teilentladungen sind die Folge von lokalen Konzentrationen der elektrischen Beanspruchung innerhalb der Isolation oder auf der Oberfläche der Isolation.

Teilentladungen werden in Durchführungen und Wicklungen von Leistungstransformatoren beobachtet, wenn das Isolationmaterial zwischen unterschiedlichen Spannungspotentialen altert, verschmutzt oder fehlerhaft ist.

Sie werden durch Hohlräume, Risse oder Verunreinigungen verursacht, die in einem massiven Dielektrikum, an Übergängen in festen oder flüssigen Dielektrika, in Blasen innerhalb von flüssigen Dielektrika oder an den Grenzflächen zwischen verschiedenen Isolationsmaterialien auftreten können. Teilentladungen können das Isolationsmaterial in Durchführungen und Wicklungen von Leistungstransformatoren im Laufe der Zeit schädigen, was letztendlich zu deren Versagen und kostspieligen Ausfällen führt. Daher ist es wichtig, die TE-Quelle zu erkennen, zu finden und gegebenenfalls zu eliminieren.

Die TE-Messung ist ein zuverlässiges und zerstörungsfreies Verfahren, mit dem der Isolationszustand von Leistungstransformatoren jederzeit diagnostiziert werden kann. Sie kann offline durch Speisung der einzelnen Phasen nacheinander mit einer Hochspannungsquelle oder online während des normalen Betriebs erfolgen. Mit zusätzlichen TE-Erfassungsgeräten können Messungen dreiphasig



Für synchrone mehrkanalige TE-Messungen, z. B. dreiphasige Prüfungen, werden mindestens drei MPDs benötigt und an den Durchführungen auf Oberspannungsseite angeschlossen.



durchgeführt werden, was beim Erkennen von Aktivitäten zwischen den Phasen Zeit spart.

TE-Impulse sind sehr kurz und haben Anstiegszeiten im Bereich von Nanosekunden. Die wichtigsten Kriterien für die Beurteilung von Teilentladungen sind:

- > Ladungspegel in Picocoulomb (pC) oder Nanocoulomb (nC)
- > Phasenlage bezogen auf die angelegte Spannung
- > TE-Impulswiederholrate

Erhöht sich eines dieser Kriterien, deutet dies auf vorhandene örtliche Schwachstellen in der Isolation hin, was zu weiteren Schäden und letztendlich zum Ausfall führen kann. In Hochspannungslaboren und im praktischen Einsatz können moderne Störunterdrückungsverfahren eingesetzt werden, um die Erfassung irrelevanter Daten auf ein Minimum zu beschränken und die Analyse zu vereinfachen.

Letzte Prüfung bei der Inbetriebnahme

Besonders bei Großtransformatoren ist es nach dem Transport wichtig, die funktionale und dielektrische Unversehrtheit zu prüfen. Die gebräuchlichsten Methoden sind die Frequenzganganalyse (Info-Box, Seite 4) und die Teilent-

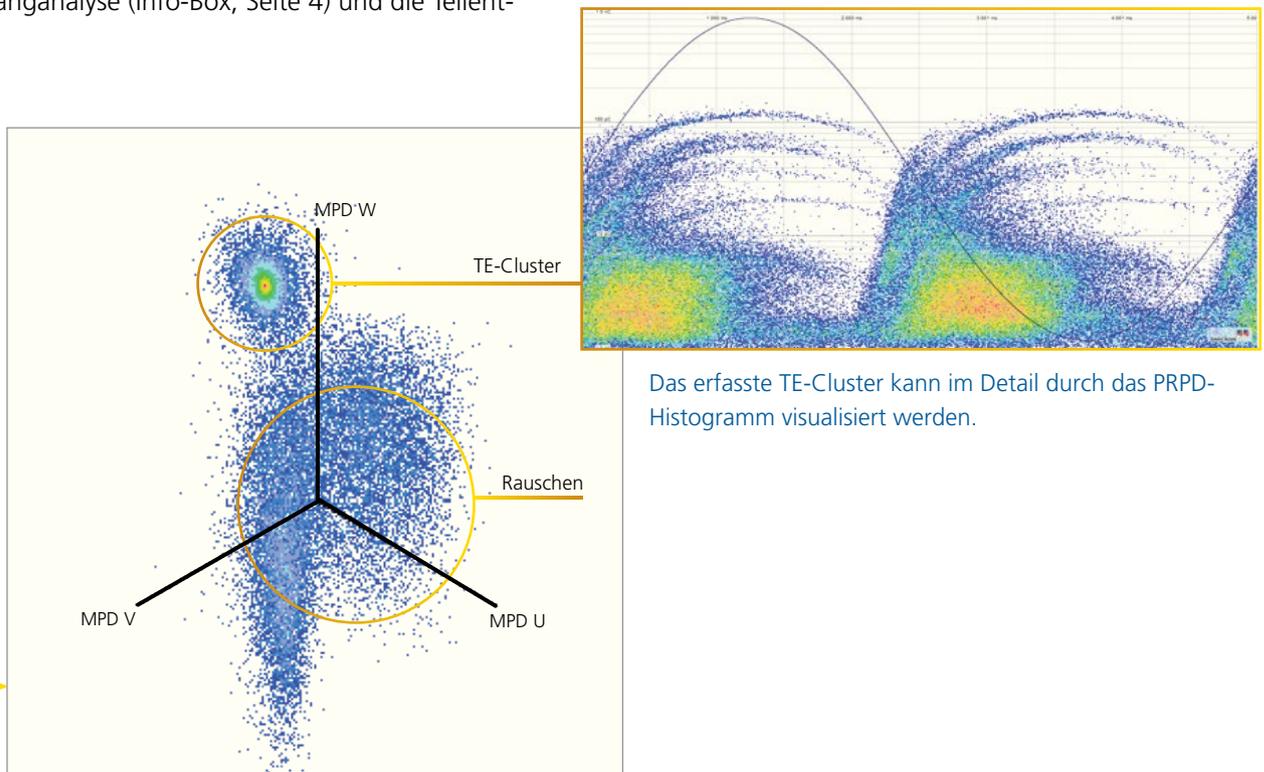
ladungsmessung. Unsachgemäßes Handling während des Transports und der Aufstellung kann zu inneren mechanischen Schädigungen führen, die sich durch den Vergleich mit der Referenzmessung aus der Fabrik erkennen lassen.

Wird während der Inbetriebnahme eine TE-Messung durchgeführt, können hierdurch nicht nur mögliche Transporteinflüsse auf das Dielektrikum erkannt werden, sondern sie ermöglicht auch eine Qualitätskontrolle aller vor Ort installierten Hochspannungsbauteile, wie zum Beispiel der Durchführungen.

Sicherer und zuverlässiger Betrieb

Hat das Betriebsmittel alle Prüfungen erfolgreich bestanden, kann es in Betrieb gehen und der zweite Teil der Qualitätssicherung beginnt. Mit fortschreitendem Alter müssen die Betriebsbedingungen von Leistungstransformatoren an ihrem Einsatzort regelmäßig geprüft werden. Für die Betriebsdauer müssen strategische Entscheidungen zur weiteren Wartung und Überwachung getroffen werden.

Im Rahmen eines Flottenmanagements, zur Erhöhung der Verfügbarkeit und Planungssicherheit, aber auch zur



Das erfasste TE-Cluster kann im Detail durch das PRPD-Histogramm visualisiert werden.

Ein 3PARD (engl. 3-Phase Amplitude Relation Diagram) trennt die TE-Quellen von Störeinflüssen.

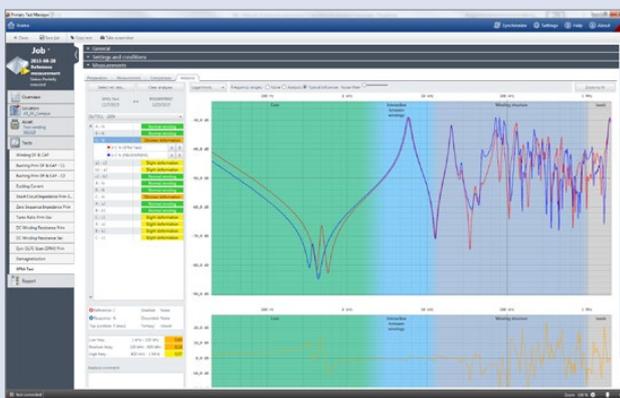
Frequenzganganalyse (FRA)

Die Frequenzganganalyse (FRA) wird durchgeführt, um die elektrische und mechanische Unversehrtheit des Aktivteils (Wicklungen, Kern, Verbindungen und Zuführungen) zu prüfen.

Die FRA ist die beste Messmethode zur Prüfung der mechanischen Unversehrtheit. Immer mehr Energieversorgungsunternehmen nutzen die FRA bei Routineprüfungen, weil damit zahlreiche Fehler komplett nichtinvasiv ermittelt werden können.

Mit FRANEO 800 von OMICRON wird eine Strommessung mit einer zuvor durchgeführten Referenzmessung (Fingerabdruck) verglichen. Ist kein Fingerabdruck verfügbar, kann für den Vergleich eine andere Phase oder ein baugleicher Transformator herangezogen werden.

www.omicronenergy.com/FRANEO800



Die Bedienung mit der Primary Test Manager™-Software bietet eine automatische Auswertung und Vergleich von Ergebnissen. Typische Einflüsse von Abweichungen können angezeigt werden.

Werterhaltung ist bei Großtransformatoren und anderen großen Hochspannungsbetriebsmitteln eine regelmäßige Wartung Stand der Technik. Die üblicherweise angewandten Diagnosemöglichkeiten beschränken sich allerdings auf einen kleinen Ausschnitt aus der Palette der Möglichkeiten der dielektrischen Diagnostik.

Mit der Analyse der dielektrischen Eigenschaften (Info-Box, Seite 5) kann der Wassergehalt in der Öl-Papier-Isolation bewertet werden, was eine Beurteilung der Zellulosealterung möglich macht. Die Gas-in-Öl-Analyse ist ein bewährtes Analyseverfahren, muss jedoch durch die Ortung der Fehler ergänzt werden, die durch einen überhöhten Anteil von gasförmigem Kohlenwasserstoff im Öl angezeigt werden. So können wichtige Wartungsarbeiten rechtzeitig durchgeführt und plötzliche Totalausfälle vermieden werden. Für eine erfolgreiche Fehlerortung können moderne Typprüfgeräte zur Messung des Widerstands, des Wicklungsverhältnis, der Kurzschlussimpedanz, des C- und des tan delta-Werts, des Frequenzgangs und der Teilentladung verwendet werden.

Bester Anhaltspunkt für eine Verschlechterung der Isolation

Da es oft bereits weit vor dem Ausfall einer Isolation zu TE-Aktivität kommt, ist diese der beste Anhaltspunkt für Defekte und eine Verschlechterung. Betriebsmittelverantwortliche können durch die Beobachtung der TE-Aktivität über einen längeren Zeitraum gut informiert strategische Entscheidungen bezüglich der rechtzeitigen Reparatur oder des Austauschs treffen, bevor es zu einem unerwarteten Ausfall eines Betriebsmittels kommt.

Bei der Messung und Analyse der TE-Aktivität in Leistungstransformatoren im praktischen Einsatz werden die spezifischen Prüfungen und Prüfanordnungen durch die Art des Transformators und die Norm bestimmt, nach der die Messungen durchgeführt werden. Je nach Art der eingesetzten Durchführungen wird die TE-Analyseanlage zur Standardmessung elektrischer Teilentladungen an Leistungstransformatoren entweder an die kapazitive Anzapfung der Durchführungen oder an einen externen Koppelkondensator angeschlossen.

Minimierung der Auswirkungen von Rauschen im praktischen Einsatz

Außerhalb abgeschirmter Laborumgebungen werden TE-Signale oft durch Störimpulse überlagert, was Experten und Softwaresysteme die TE-Datenanalyse zusätzlich erschwert. Eine angemessene Minimierung von Rauschen

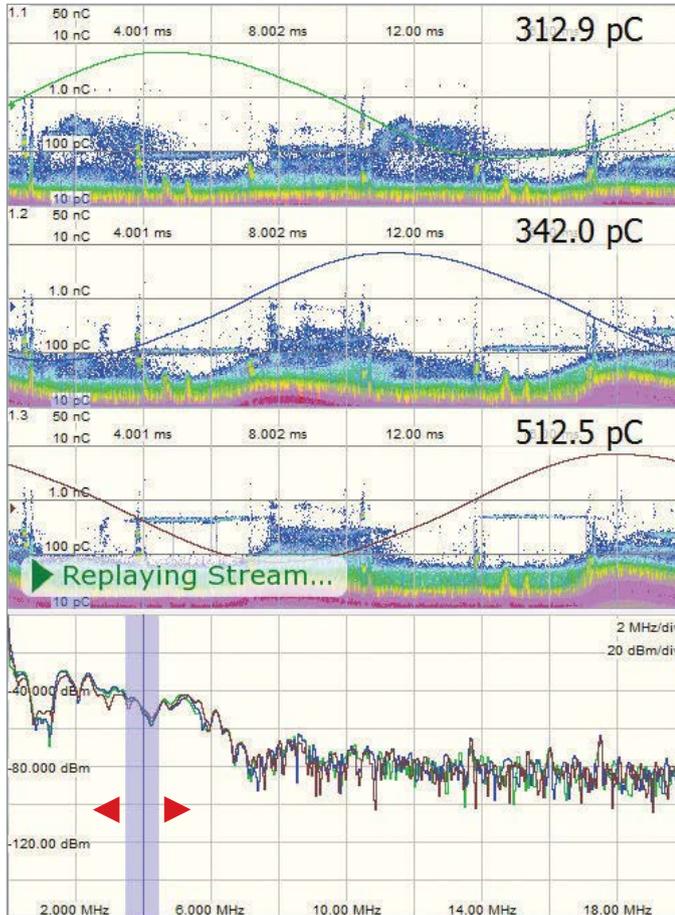


Abbildung 4: Einstellbare Mittenfrequenz und Bandbreite

gehört daher zu den vordringlichsten Aufgaben bei der TE-Messung vor Ort.

Das MPD 600-System für die Messung und Analyse von Teilentladungen von OMICRON erlaubt die Detektion und Messung mit einer sehr hohen Sensitivität, wobei unterschiedliche Methoden zum Einsatz kommen, um bei schwierigen örtlichen Bedingungen Rauschsignale zu unterdrücken. Dank frei auswählbarer Filteroptionen können die Mittenfrequenz und die Bandbreite angepasst werden, um ein niedriges Signal-Rausch-Verhältnis und einen geringen Hintergrundgeräuschpegel zu erreichen und damit eine zuverlässige TE-Messung und -Analyse zu ermöglichen.

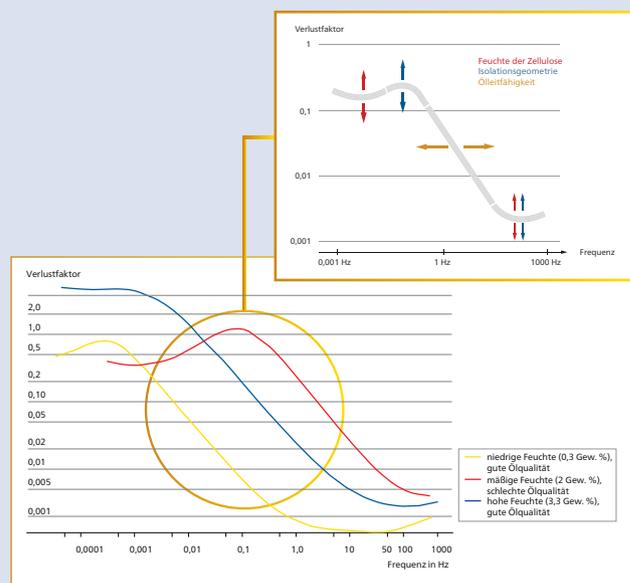
Wird das MPD 600-System mit mindestens drei Erfassungsgeräten verwendet, ist eine vollständig digitale, synchrone, mehrkanalige TE-Messung gewährleistet. Dadurch verkürzt

Messung der dielektrischen Eigenschaften

Wird der Verlustfaktor eines Transformators über einen breiten Frequenzbereich gemessen, lassen sich anhand der dielektrischen Eigenschaften Aussagen über den Isolationszustand treffen. Mit der Analyse der dielektrischen Eigenschaften kann der Wassergehalt in der festen Isolation (Zellulose) bewertet und ihr Zustand überwacht werden. Informationen zum Wassergehalt werden für die Bestimmung des Zustands der Durchführungen und des Aktivteils eines Transformators benötigt.

DIRANA von OMICRON misst die dielektrischen Eigenschaften über einen sehr breiten Frequenzbereich (10 μ Hz–5 kHz). Es reduziert Prüfzeiten durch die Kombination der dielektrischen Spektroskopie (FDS) für hohe Frequenzen mit dem Zeitbereichsverfahren (PDC) für niedrige Frequenzen. Die gemessenen Werte ermöglichen eine Isolationsdiagnose nicht nur bei Transformatoren, sondern auch bei Generatoren, Motoren, Wandlern und Kabeln.

www.omicronenergy.com/DIRANA



Der Kurvenverlauf der dielektrischen Antwort erlaubt Rückschlüsse auf unterschiedliche Faktoren, die das Messergebnis beeinflussen.

sich nicht nur die Zeit, für die während der Offline-Prüfungen Hochspannung angelegt werden muss, und die Messzeit als solche, sondern auf diese Weise wird auch der Einsatz unserer einzigartigen Separationstools, wie des 3PARD (3-Phase Amplitude Relation Diagram), ermöglicht. TE-Signale, die aus unterschiedlichen Quellen Typs oder Orten herrühren, erscheinen in unterschiedlichen Teilen des 3PARD und können separat analysiert werden. Dies ermöglicht sowohl eine wirkungsvolle Störungsreduzierung als auch eine einfache Trennung von sich überlappenden TE-Signalen im entsprechenden PRPD (Phase-Resolved Partial Discharge) Diagramm.

UHF- und akustische TE-Messungen

Bei flüssigkeitsisolierten Transformatoren können als effektives Gating-Verfahren zur Überprüfung von Ergebnissen der elektrischen TE-Messungen sowohl in Hochspannungslaboren als auch im praktischen Einsatz Ultrahochfrequenz(UHF)-TE-Messungen eingesetzt werden. Bei diesem Verfahren werden die TE mit UHF-Sensoren direkt im Transformatorkegel gemessen. TE-Impulse aus einer elektrischen Messung an den Durchführungen werden nur angenommen, wenn auch ein UHF-Impuls aus dem Transformatorkegel vorliegt. Sobald eine TE-Aktivität erkannt wird, können akustische TE-Messungen mit einem TE-Lokalisierungsgerät und mehreren, außen am Tank des Transformators befestigten UHF-Sensoren durchgeführt werden, um die Isolationsdefekte korrekt zu orten.

Längere Betriebsdauer

Wenn sich die Betriebsdauer eines Leistungstransformators dem Ende zuneigt, können die bei vorherigen TE- und anderen Diagnosemessungen erfassten Daten für ein effektives Flottenmanagement verwendet werden. Anhand der Informationen können Betriebsmittelverantwortliche prognostizieren, wie sich der Transformator bei gleichen Betriebsbedingungen weiter verhalten wird. Dank der zustandsabhängigen Daten ist eine kontinuierliche rechtzeitige Wartung und ein entsprechender Austausch von Komponenten möglich, was wiederum dazu führen kann, dass Leistungstransformatoren über ihre Auslebelebensdauer hinaus betrieben werden können.

Ulrike Broniecki studierte Elektrotechnik mit dem Schwerpunkt elektrische Energietechnik an der TU Berlin. Von 2008 bis 2014 war sie als Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fachgebiet Hochspannungstechnik der TU Berlin tätig. Ihr Interessenschwerpunkt lag bei der akustischen Teilentladungsortung in Transformatoren. Seit 2014 ist sie bei OMICRON als Applikationsingenieurin für Teilentladungsmessungen im Bereich Diagnose und Monitoring tätig. Ihr Aufgabengebiet reicht vom technischen Kundendienst bis zur Analyse von Messdaten.



MPD 600

- > IEC 60270 konforme Teilentladungsmessung
- > Datenübermittlung über Glasfaser für einen sicheren Betrieb und ein optimiertes Signal-Rausch-Verhältnis
- > Simultane und synchrone mehrkanalige TE-Messung für eine umfassendere Analyse
- > Aktive Störunterdrückung und Gating-Verfahren für eine optimale Genauigkeit trotz Störern
- > Leistungsstarke Verfahren (3PARD und 3FREQ) zur Separierung von Störern und mehreren TE-Quellen
- > Aufzeichnung und Wiedergabe von Messungen für eine bequeme und detaillierte Nachanalyse

Praktisches TE-Training ist bei OMICRON Academy erhältlich, wo Sie lernen können, wie man das MPD 600 TE-Mess- und -Analysesystem bei einer Vielzahl von elektrischen Anlagen einsetzt.

TE-Messungen und -Analysen vor Ort bieten wir Ihnen auch als Dienstleistung an, wenn Sie unsere Expertise und Erfahrung bei der TE-Diagnose benötigen.

www.omicronenergy.com/mpd600



OMICRON ist ein weltweit tätiges Unternehmen, das innovative Prüf- und Diagnoselösungen für die elektrische Energieversorgung entwickelt und vertreibt. Der Einsatz von OMICRON-Produkten bietet höchste Zuverlässigkeit bei der Zustandsbeurteilung von primär- und sekundärtechnischen Betriebsmitteln. Umfassende Dienstleistungen in den Bereichen Beratung, Inbetriebnahme, Prüfung, Diagnose und Schulung runden das Leistungsangebot ab.

Kunden in mehr als 150 Ländern profitieren von der Fähigkeit des Unternehmens, neueste Technologien in Produkte mit überragender Qualität umzusetzen. Servicezentren auf allen Kontinenten bieten zudem ein breites Anwendungswissen und erstklassigen Kundensupport. All dies, zusammen mit einem starken Netz von Vertriebspartnern, ließ OMICRON zu einem Marktführer der elektrischen Energiewirtschaft werden.