

Beitrag des Monats

Diagnoseprüfung von Gießharztransformatoren

Autoren

Michael Krüger, OMICRON, Österreich | michael.krueger@omiconenergy.com

Christoph Engelen, OMICRON, Österreich | christoph.engelen@omiconenergy.com

Publikationsdatum

Mai 2018

Anwendungsbereich

Diagnoseprüfung an Trockentransformatoren

Suchwörter

Gießharztransformator, induzierte Spannungsprüfung, Teilentladungsmessung

Zusammenfassung

In diesem Artikel wird der Ablauf der Diagnoseprüfung an Trockentransformatoren beschrieben. Gießharztransformatoren sind in Bereichen mit hohen Standards für den Brand- und Umweltschutz weitverbreitet. Der häufigste Grund für Ausfälle von Gießharztransformatoren ist der elektrische Durchschlag der Gießharzisolierung zwischen Windungen und Teilen der Wicklungen. In vielen Fällen treten Teilentladungen (TE) noch vor dem Durchschlag auf. Durch die induzierte Spannungsprüfung von Wicklungen in Kombination mit einer empfindlichen TE-Messung kann das Risiko ungeplanter Ausfälle auf ein Minimum reduziert werden. Auf der Basis von Fallstudien werden die Verfahren für die Durchführung einer induzierten Spannungsprüfung vor Ort mit tragbarer Ausrüstung und digitalen TE-Messgeräten zur Reduzierung von Störungen behandelt.



Diagnoseprüfung von Gießharztransformatoren

Einführung

Gießharztransformatoren wurden vor vielen Jahrzehnten aufgrund der brennbaren Eigenschaften von Mineralöl und des Risikos von ausgeflossenem Öl und der damit verbundenen Kontamination des Bodens entwickelt. Seitdem ist die Entwicklung der Technologien für Gießharztransformatoren erheblich fortgeschritten. Sie werden mittlerweile in Anwendungen, bei denen die Sicherheit eine vorrangige Rolle spielt, großflächig eingesetzt. Dies ist zum Beispiel bei Gebäuden, industriellen Anwendungen oder ökologisch sensiblen Bereichen, wie Gewässerschutzzonen, der Fall. Die Leistung und Nennspannung von Gießharztransformatoren wurden in den letzten Jahren erhöht. Mittlerweile werden Gießharztransformatoren für bis zu 72,5 kV und mehr als 60 MVA gebaut. Sie können auch mit „Laststufenschaltern“ (On-Load Tap Changers, OLTC) ausgerüstet sein.

Auch wenn Gießharztransformatoren „wartungsfrei“ sind, werden immer häufiger regelmäßige Diagnosemessungen gefordert, insbesondere, wenn Ausfälle zu hohen Folgekosten führen würden. Einige Versicherungsträger bieten günstigere Tarife an, wenn das Risiko von Ausfällen durch regelmäßige Diagnosemessungen auf ein Minimum reduziert wird. Das Angebot an

Diagnosewerkzeugen für Gießharztransformatoren ist begrenzt. Während der Herstellung werden die folgenden Stückprüfungen gemäß IEC 60076-11 [1] durchgeführt:

- Messung des Windungszahlenverhältnisses
- DC-Wicklungswiderstandsmessung
- Messung von Spannungsverhältnis und Phasenverschiebung
- Messung der Kurzschlussimpedanz
- Last- und Leerlaufmessung
- Prüfung mit angelegter Spannung
- Induzierte AC-Stehspannungsprüfung
- Teilentladungsmessung ($U_m > 3,6 \text{ kV}$, Grenzwert 10 pC)

Für die unmittelbare Bestimmung des Transformatorzustands vor Ort kann nur eine begrenzte Anzahl an Prüfverfahren angewendet werden. Vor allem bei der Bewertung des Zustands der Isolierung eignen sich nicht die gängigen Prüfverfahren, die normalerweise an Öltransformatoren durchgeführt werden. Zum Beispiel kann eine Analyse der gelösten Gase im Öl (DGA) an Gießharztransformatoren nicht durchgeführt werden. Umgekehrt wird die Messung des Verlustfaktors an Gießharztransformatoren stark durch die Umgebungsbedingungen beeinflusst. Deshalb erzielen Messungen von Teilentladungen (TE) die wertvollsten Informationen über den Zustand der Isolierung. Im folgenden Abschnitt wird die induzierte Spannungsprüfung an Gießharztransformatoren in Kombination mit TE-Messungen beschrieben.

Teilentladungsmessung

Bei der Messung von Teilentladungen (TE) sollte die Frequenz der Prüfspannung höher als die Nennfrequenz sein, um einen zu hohen Magnetisierungsstrom während der Prüfung zu vermeiden.

Der häufigste Grund für Ausfälle von Gießharztransformatoren ist der elektrische Durchschlag der Gießharzisolierung zwischen Windungen und Teilen der Wicklungen. In vielen Fällen treten Teilentladungen noch vor dem Durchschlag auf. Durch die induzierte Spannungsprüfung von Wicklungen in Kombination mit einer empfindlichen TE-Messung kann das Risiko ungeplanter Durchschläge auf ein Minimum reduziert werden.

Für Vor-Ort-TE-Prüfungen an Gießharztransformatoren braucht man eine Spannungsquelle mit geeigneter Leistung. Die Frequenz der Ausgangsspannung sollte höher als die Nennfrequenz des Transformators sein, um zu hohe Magnetisierungsströme zu vermeiden. Für die Minimierung der notwendigen Leistung sollte die Quelle eine Ausgangsspannung mit variabler Frequenz liefern. Die Hauptinduktivität des magnetischen Kerns, die Kapazität der Oberspannungswicklung und der Koppelkondensator bilden einen Parallelresonanzkreis. Die Frequenz der Prüfspannung sollte auf die Resonanzfrequenz dieses Parallelresonanzkreises eingestellt werden, um die notwendige

Leistung auf den kleinsten Wert zu reduzieren. Wenn die Resonanzfrequenz zu hoch ist, kann ein zusätzlicher Kondensator an die Unterspannungswicklung angeschlossen werden, um die Frequenz auf die Obergrenze von 500 Hz gemäß IEC 60060-3 [2] zu reduzieren. In Abbildung 1 sieht man die Prüfanordnung mit einem CPC 100, einer kompakten Spannungsquelle mit einem Gewicht von 30 kg.

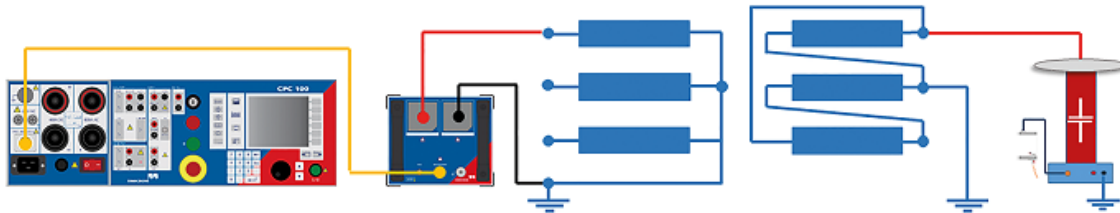


Abbildung 1. CPC 100 mit Anpasstransformatoren

Der integrierte Verstärker kann bis zu 5 kVA bei Frequenzen zwischen 15 und 400 Hz liefern. Die durch den Verstärker verursachten Störimpulse werden durch ein angepasstes Design minimiert. Mit einem zusätzlichen Anpasstransformator kann die Ausgangsspannung des Verstärkers an die erforderliche Erregerspannung der Transformator-Unterspannungsseite angepasst werden. Dieser universelle Anpasstransformator kann Spannungen von 50 V bis 400 V in 50-V-Schritten (bei Frequenzen von 100 Hz oder mehr) und bis 800 V (bei Frequenzen von 200 Hz oder mehr) liefern. Während der Werkabnahmeprüfung (FAT) werden Dreiphasengeneratoren als Spannungsquelle verwendet. Für die Vor-Ort-Prüfung der Integrität der Spulen reicht es aus, jede Phase einzeln mit einer einphasigen Erregung zu prüfen. Im schlimmsten Fall könnte ein Anstieg der Spannung über die Bemessungsspannung hinaus zu TE-Aktivität führen, die auch nach der Rückkehr zur Nennbetriebsspannung bleibt. Eine Überschreitung der Nennspannung während der Prüfung hilft bei der Identifizierung dieser TE-Aktivität und Klassifizierung ihres Gefährdungspotenzials. Gemäß [1] wird während der FAT eine Vorbelastungsspannung für 30 s angelegt. Anschließend wird die Prüfspannung für weitere 3 Minuten angelegt. Vor Ort kann entweder die Prüfzyklusdauer oder ein vereinbarter angepasster Zyklus angewendet werden. Um ungewollte Ausfälle älterer Transformatoren zu vermeiden, sollten Hochspannungsprüfungen nur mit Spannungen durchgeführt werden, die unter den Spannungen für neue Transformatoren im Werk liegen. Praktische Erfahrungen haben gezeigt, dass Spannungen bis 130 % der Bemessungsspannung ein guter Kompromiss für die Erkennung von TE-Fehlern sind, ohne die Spule zu sehr zu belasten.

Leistungstransformatoren bis 3 MVA können mit einer Prüfleistung bis 5 kVA geprüft werden. Mit dem CPC 100 kann die Impedanz des gesamten Prüfkreises in der Amplitude und im Phasenwinkel gemessen werden (Abbildung 2). Die notwendige Prüfleistung wird minimiert, wenn die Frequenz auf die maximale Impedanz eingestellt wird (rote Kurve).

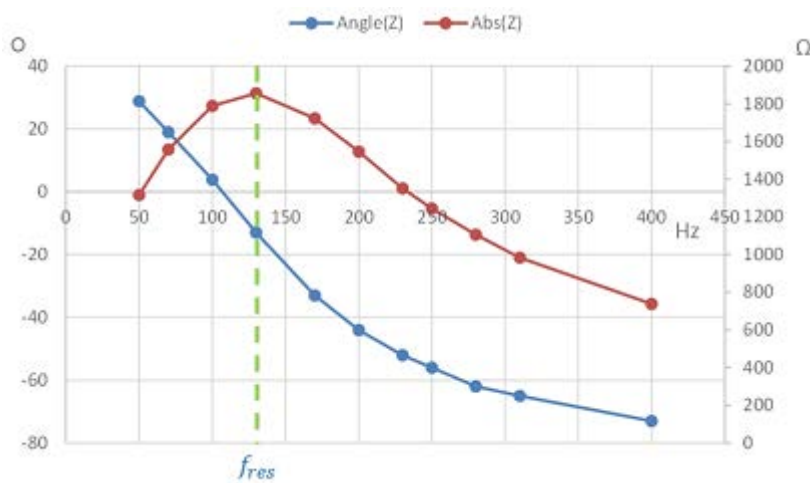


Abbildung 2. Impedanz des Prüfkreises vs. Frequenz

Ist die notwendige Leistung für die Erregung des Transformators höher als die Leistungsabgabe eines CPC 100s, können bis zu drei Geräte parallel betrieben werden (Abbildung 3). Ein CPC 100 funktioniert als Master und die anderen beiden Geräte als Slaves im Synchronmodus. Zusammen können sie 15 kVA an drei 230-V-/16-A-Steckern liefern. Mit diesem tragbaren Prüfgerät können Gießharztransformatoren bis 25 MVA direkt vor Ort geprüft werden.

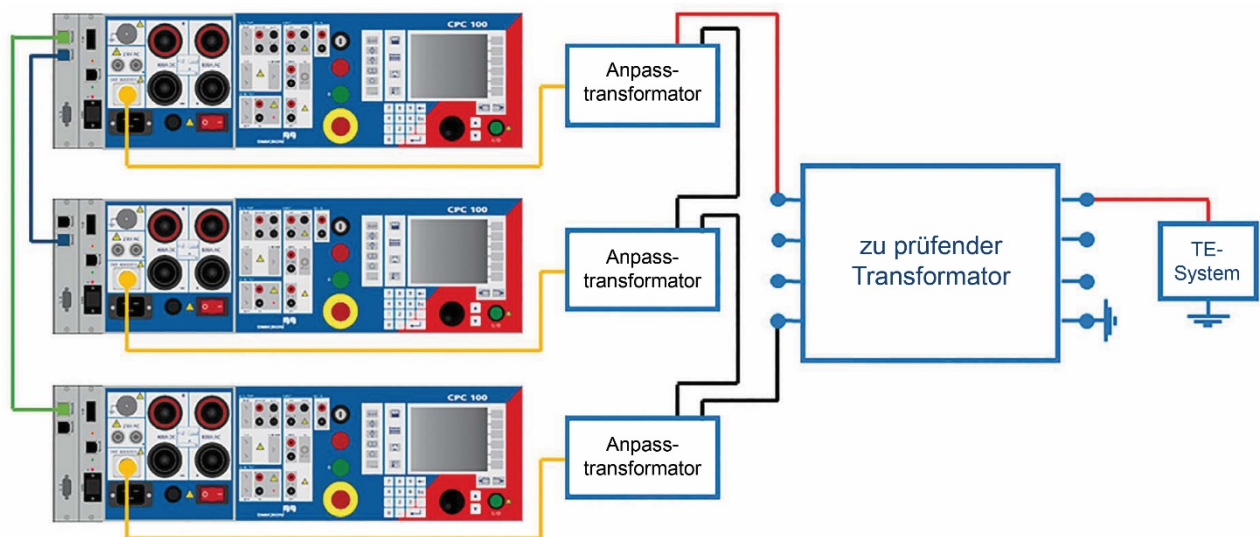


Abbildung 3. Prüfgerät für 15 kVA mit drei CPC 100s

Elektromagnetischer Einfluss aus der Umgebung

TE-Messungen außerhalb von Faraday'schen Käfigen bereiten Probleme aufgrund elektromagnetischer Einflüsse aus der Umgebung. Moderne digitale TE-Messgeräte bieten spezielle Filter, mit denen dieses Rauschen reduziert oder sogar komplett beseitigt werden kann.

Eine Möglichkeit der Trennung von TE-Signalen und Störquellen aus der Umgebung ist die 3PARD- oder 3CFRD-Methode [3]. Beide Methoden nutzen ein sogenanntes Sterndiagramm, das die Beziehungen zwischen den drei gemessenen Signalen darstellt. Die 3PARD-Methode nutzt drei Einheiten, um TE-Signale gleichzeitig aufzunehmen. Bei der 3CFRD-Methode kann das digitale TE-Messgerät dagegen TE-Impulse gleichzeitig mit drei unterschiedlichen Frequenzen messen. Für jede Frequenz wird ein TE-Impuls ausgewertet. Anschließend wird die Höhe der Entladung, die bei den drei Frequenzen mit einem Gerät erhalten wurde, genutzt, um einen entsprechenden Punkt im Sterndiagramm zu markieren (Abbildung 4).

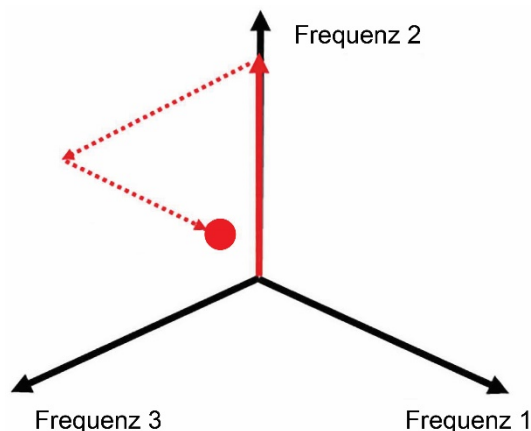


Abbildung 4. Einzelner, im 3CFRD-Diagramm eingegebener TE-Impuls

Unter der Annahme, dass sich unterschiedliche TE- und Störquellen in ihrem Frequenzspektrum unterscheiden, zeigt jede Quelle ein unterschiedliches Cluster im Sterndiagramm. Durch die Abstimmung der drei Frequenzeinstellungen kann eine optimale Separierung der einzelnen Cluster erreicht werden. In einem letzten Schritt wird jedes Cluster einzeln ohne Störungen von den anderen Quellen ausgewertet. Auf diese Weise ist eine zuverlässige Bewertung aller TE-Quellen vor Ort möglich, auch wenn starke Störgrößen vorliegen (Abbildung 5).

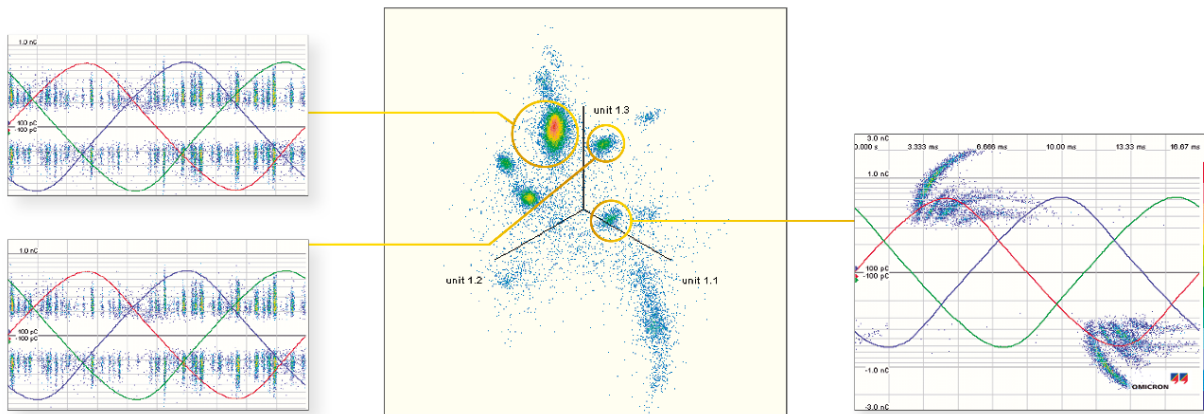


Abbildung 5. Separierung über 3PARD- oder 3CFRD-Darstellung

Fallstudien

Fall 1

Es wurde eine TE-Messung an einem 3,5-MVA-Gießharztransformator mit einer Bemessungsspannung von 30 kV durchgeführt. Abbildung 6.1 zeigt die nach Phasen aufgelöste TE-Darstellung (Phase-Resolved PD, PRPD) bei 40 kV. Das Rauschen liegt bei circa 8 pC. Die Analyse mit 3CFRD sieht man in Abbildung 6.2. Das gefilterte Signal (Abbildung 6.3) zeigt ein eindeutiges Muster der internen Hohlraumentladungen [4] mit 6 pC, obwohl die Teilentladungen unter dem Störpegel liegen. Die Aussetzspannung lag über 36 kV, d. h. 20 % höher als die Bemessungsspannung. Die Schlussfolgerung lautet somit, dass es im Transformator während des Normalbetriebs keine aktiven TE-Quellen gibt.

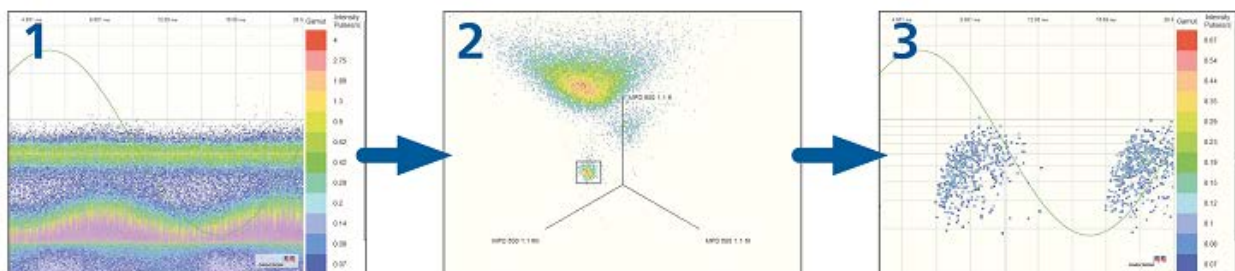


Abbildung 6. (1) PRPD ohne 3CFRD-Filterung mit Störungen, (2) Sterndiagramm mit Rauschen (oberes Cluster) und TE-Cluster (markiert), (3) TE-Muster von Hohlräumen mit 3CFRD-Filterung

Fall 2

Nach einem einphasigen Ausfall eines 2,5-MVA-Gießharztransformators (Abbildung 7) wurde untersucht, ob die übrigen zwei Wicklungen auch beschädigt worden waren. Es wurde eine Teilentladungsmessung an beiden Außenwicklungen mit 130 % der Bemessungsspannung durchgeführt, um nachzuweisen, dass diese Wicklungen TE-frei waren. Es konnten keine Teilentladungen über dem Störpegel von 15 pC ermittelt werden. Anschließend wurde entschieden, die fehlerhafte Wicklung zu ersetzen und den Transformator wieder in Betrieb zu nehmen.



Abbildung 7. Fehler für Durchschlag an Gießharztransformator

Abbildung 8 zeigt die Ergebnisse der TE-Messung von Phase B nach der Installation der neuen Wicklung im Transformator. Während der TE-Messung vor Ort wurden Störsignale von 17 pC gemessen. Das einzige sichtbare Cluster bezog sich auf die Störquellen aus der Umgebung. In vorliegenden Fall wurde die sogenannte umgekehrte 3CFRD verwendet. Das einzige sichtbare Cluster wurde ausgewählt und herausgefiltert (Abbildung 8.2). Anstatt die Impulse in Bezug auf dieses Cluster zu zeigen, werden alle übrigen Impulse außerhalb dieses Clusters dargestellt. Abbildung 8.3 zeigt das umgekehrte Prinzip der 3CFRD-Filterung mit ausgewähltem Stör-Cluster. Es wird deutlich, dass keine anderen Impulse sichtbar sind. Daraus kann man schlussfolgern, dass die neu installierte Spule keine messbaren Teilentladungen aufweist. Die umgekehrte 3CFRD-Filterung sollte mit Vorsicht durchgeführt werden, um eine Filterung von TE-Signalen zu vermeiden.

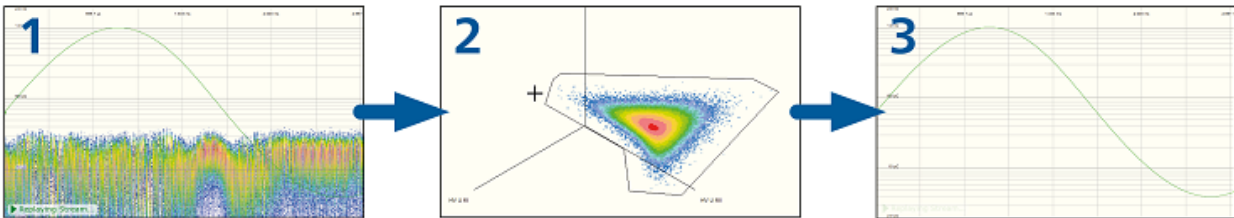


Abbildung 8. (1) Ungefilterte TE-Messung, (2) 3CFRD-Cluster-Wahl, (3) PRPD mit umgekehrter 3CFRD-Filterung

Fall 3

In einem industriellen Netz mit 20 kV sind alle Kabel mit HF-TE-Kopplern an den Abschlüssen ausgestattet, um alle zwei Jahre routinemäßige Überwachungsmessungen des gesamten Netzes, einschließlich Kabeln und Transformatoren, durchzuführen. Während einer routinemäßigen Überwachungsprüfung wurden Teilentladungen auf einer Kabelstrecke entdeckt. Es wurde eine Offline-TE-Messung durchgeführt, um herauszufinden, ob die Teilentladungen im Kabel oder im angeschlossenen Transformator vorlagen. Das Kabel zeigte keine TE, der Transformator schon. Abbildung 9 zeigt die Prüfanordnung einer TE-Messung am geprüften Transformator. Es wurden Teilentladungen an allen Phasen ermittelt. Die Teilentladungen zeigten typische Muster mit Hohlräumen und Entladungshöhen bis 101 pC (Abbildung 10). Die ermittelte Einsetzspannung lag bei $1,0 \times U_n$ und die Aussetzspannung lag unter der Nennspannung ($0,6 \times U_n$) an allen drei Phasen. Dies bedeutet, dass im Transformator während des Betriebs kontinuierlich Teilentladungen vorliegen und der Transformator ausgetauscht werden sollte. Aus diesem Grund entschied der Netzbetreiber, den Transformator komplett auszutauschen.



Abbildung 9. Prüfanordnung der TE-Messung an einem 20-kV-/2-MVA-Gießharztransformator

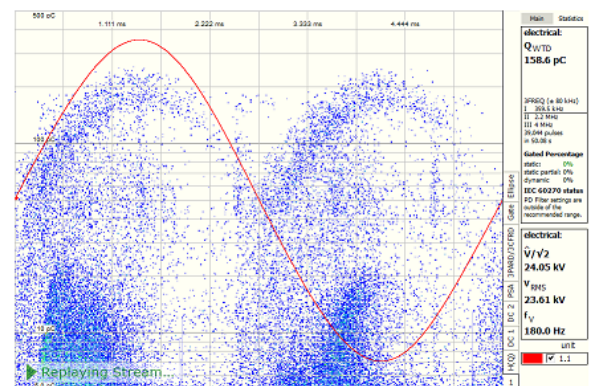


Abbildung 10. TE-Messergebnisse

Fall 4

Es wurden TE-Messungen an einem 30-kV-/6-kV-/17-MVA-Gießharztransformator durchgeführt. Abbildung 11 zeigt die angewendete Prüfanordnung. Für die Erregung der 6-kV-Seite des Transformators war ein zusätzlicher Aufspanntransformator notwendig. Die erforderliche Leistung von 10 kW für die Erregung einer Phase beider Transformatoren wurde von drei synchronisierten CPC 100 geliefert. Die Prüfspannung von $1,3 \times U_n$ wurde, wie vor Ort vereinbart, für 60 Sekunden angelegt. Abbildung 12 zeigt das Ergebnis der TE-Messung von Phase B: keine TE-Impulse über dem Störpegel von 8 pC.



Abbildung 11. TE-Messung an einem 17-MVA-Gießharztransformator mit drei CPC 100s

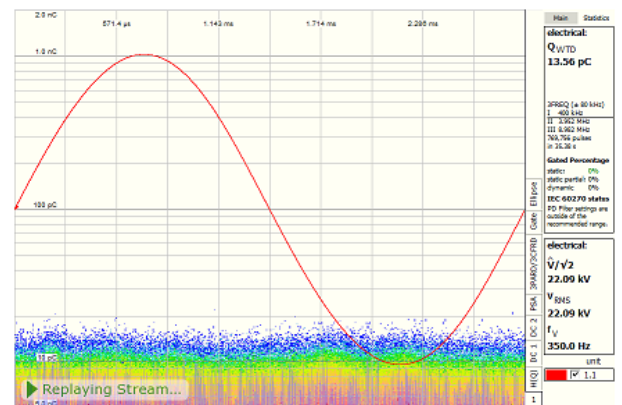


Abbildung 12. TE-Messergebnisse an Phase B

Fazit

Die induzierte Spannungsprüfung vor Ort in Kombination mit Teilentladungsmessungen ist ein leistungsstarkes Werkzeug für die Bewertung des Zustands der Isolierung von Gießharztransformatoren.

Für die Durchführung der Messung braucht man eine Spannungsquelle mit variabler Frequenz. Je nach Stromverbrauch können bis zu drei CPC 100s synchronisiert werden. Auf diese Weise kann man die Ausgangsleistung auf einen Wert bis 15 KVA erhöhen. Je nach Design des Transformators und erforderlicher Prüfspannung können mit dieser Synchronisierungsfunktion Leistungstransformatoren bis 25 MVA gemessen werden. Dennoch ist es weiterhin eine flexible und tragbare Lösung für die Vor-Ort-Prüfung, weil alle notwendigen Komponenten jeweils weniger als 30 kg wiegen.

Im Regelfall gibt es während Vor-Ort-Messungen unterschiedliche Störquellen. Dementsprechend bietet das digitale TE-Messgerät mehrere Wege, um hohe Störgrößen zu bewältigen. Ein nachgewiesenes Werkzeug für die Filterung von Störquellen und die Separierung unterschiedlicher TE-Quellen ist die sogenannte 3CFRD-Methode. Durch die Bewertung der Entladungshöhe, die mit drei unterschiedlichen Frequenzeinstellungen ermittelt wurde, kann der Einfluss von Störquellen minimiert und jede TE-Quelle einzeln ausgewertet werden.

Literaturverzeichnis

- [1] IEC 60076-11 „Leistungstransformatoren – Teil 11: Trockentransformatoren“, Internationale Elektrotechnische Kommission, Genf 2004
- [2] IEC 60060-3 „Hochspannungs-Prüftechnik – Teil 3: Begriffe und Anforderungen für Vor-Ort-Prüfungen“, Internationale Elektrotechnische Kommission, Genf 2006
- [3] K. Rethmeier, A. Obralic, A. Kraetge, M. Krüger, W. Kalkner, R. Plath, „Improved Noise Suppression by real-time pulse-waveform analysis of PD pulses and pulse-shaped disturbances“, International Symposium on high voltage engineering (ISH), Cape Town 2009
- [4] Cigré 676 „Partial Discharges in Transformers“, Working Group D1.29, Cigré 2017

Leads

„Je nach Design des Transformators und erforderlicher Prüfspannung können mit dieser Synchronisierungsfunktion Leistungstransformatoren bis 25 MVA gemessen werden.“

„Eine Möglichkeit der Trennung von TE-Signalen und Störquellen aus der Umgebung ist die 3CFRD-Methode.“

„Ist die Leistung für die Erregung des Transformators höher als die Leistungsabgabe eines CPC 100s, können bis zu drei Geräte parallel betrieben werden.“

„Ein CPC 100 funktioniert als Master und die anderen beiden Geräte als Slaves im Synchronmodus.“

„Durch die induzierte Spannungsprüfung von Wicklungen in Kombination mit einer empfindlichen TE-Messung kann das Risiko ungeplanter Ausfälle auf ein Minimum reduziert werden.“

Autoren



Michael Krüger ist leitender Ingenieur bei OMICRON. Er studierte Elektrotechnik an der Technischen Universität Aachen (RWTH) und der Universität Kaiserslautern und machte 1976 seinen Abschluss als Dipl.-Ing. 1990 erhielt er den Dokortitel (PhD) von der Technischen Universität Wien. Michael Krüger hat mehr als 35 Jahre Erfahrung in der Hochspannungstechnik und der Diagnose von Isolierungen an GIS, Messwandlern, Kabeln, Leistungstransformatoren und rotierenden Maschinen.

Er hat zahlreiche Artikel über elektrische Messungen an unterschiedlichen Betriebsmitteln veröffentlicht und ist Inhaber von 15 Patenten. Er ist Mitglied bei VDE, Cigré und IEEE und mehreren Arbeitsgruppen für OEVE, IEC und Cigré.



Christoph Engelen machte seinen Master of Science in Elektrotechnik an der RWTH in Aachen, Deutschland. Nach seinem Abschluss 2013 begann er seine berufliche Laufbahn als Anwendungstechniker bei OMICRON und spezialisierte sich auf die Diagnose von Transformatoren. Seit 2017 ist er Produktmanager und spezialisiert auf die Entwicklung der Prüfung von Trockentransformatoren.

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 140 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, hat OMICRON zu einem Marktführer der elektrischen Energiewirtschaft werden lassen.