

Drei Tipps zur Vermeidung von Zeitvergeudung bei Transformatorprüfungen

Brandon Dupuis

OMICRON electronics Corp. USA

brandon.dupuis@omicronenergy.com

Elektrische Offline-Prüfungen an Transformatoren können zeitaufwendig sein, vor allem wenn es beim ersten Versuch Schwierigkeiten mit der korrekten Erfassung der Messwerte gab. In diesem Artikel wird aufgezeigt, bei welchen elektrischen Prüfungen von Transformatoren es häufig zu Problemen mit der Effizienz und Korrektheit der Prüfungen kommt. Er enthält drei Tipps für diejenigen Transformatorprüfungen im Feld, bei denen häufig Zeit vergeudet wird. Das Wissen um diese Probleme kann den Anwendern der Prüfgeräte dabei helfen, Situationen vorzubeugen, die zu viel Zeitverlust führen, weil Prüfungen wiederholt, Probleme behoben oder die Prüfgerätehersteller einbezogen werden müssen.

1 Sehen Sie sich vor der Prüfung die „Verlustfaktor-Checkliste“ an

Die Transformatorprüfung, mit der Kunden am meisten zu kämpfen haben, ist ohne Zweifel die Verlustfaktormessung (bestehend aus der Prüfung der Wicklungen und Durchführungen). Leider können Faktoren wie die Umgebungsbedingungen, die Prüfkabelanschlüsse, der Masseanschluss des Prüfobjekts, etc. das Ergebnis von Verlustfaktormessungen sehr leicht beeinflussen. Diese hohe Empfindlichkeit macht es schwierig, im Feld korrekte (valide) Messwerte für den Verlustfaktor zu gewinnen.

Dass die Verlustfaktormessung so empfindlich ist, ist eine zweischneidige Sache: Diese hohe Empfindlichkeit trägt einerseits dazu bei, dass diese Prüfung so gut geeignet ist, Schäden an der Isolation (beispielsweise Feuchtigkeit, verschmutztes Öl, „schlechte“ Durchführungen, etc.) zu ermitteln. Andererseits wird die Verlustfaktormessung dadurch sehr fehleranfällig.

Um den Zeitverlust zu vermeiden, der entsteht, weil Prüfungen noch einmal durchgeführt, Probleme gefunden und behoben und die Hersteller der Prüfgerät einbezogen werden müssen, sollte vor jeder Verlustfaktormessung die folgende „Verlustfaktor-Checkliste“ abgearbeitet werden.

- **Sind der Transformatorkegel und das Prüfgerät fest mit dem Erdpotenzial verbunden?**
Der häufigste Fehler, den Anwender von Prüfgeräten im Feld machen, besteht darin, dass Prüfobjekt und Prüfgerät nicht fest mit einem Erdpotenzial verbunden werden.
- **Sind die Verbindungen von jeglichen Kabelendverschlüssen, Sammelschienen, Stützisolatoren, Überspannungsableitern, etc. zu den Durchführungen vollständig getrennt und isoliert?**
Beim Anlegen einer Prüfspannung von 10 kV sollte zwischen dem bzw. den zu speisenden Anschluss/Anschlüssen und allen anderen Oberflächen ein Mindestabstand von 8 cm eingehalten werden. Von der Verwendung von Gummimatten, Isolierhandschuhen usw. zum Isolieren der Durchführungsanschlüsse von externen Oberflächen ist abzuraten – bei Verlustfaktormessungen ist und bleibt die Luft der beste Isolator!
- **Sind die Oberflächen der Durchführungen trocken (und hinreichend sauber)?**
Feuchtigkeit auf den Oberflächen der Durchführungen kann Verlustfaktormessungen erheblich beeinflussen. Meist reicht es aus, die Oberflächen der Durchführungen mit einem sauberen, trockenen Tuch zu trocknen. Stark verschmutzte Durchführungsflächen können mit einem Glasreiniger oder Reinigungswachs gereinigt werden, um die Messgenauigkeit zu verbessern.

- **Sind die Anschlüsse einer Wicklung miteinander kurzgeschlossen? Alle Anschlüsse der Primärseite (H) sowie alle Anschlüsse der Sekundärseite (X) müssen untereinander kurzgeschlossen werden.**
Zum Kurzschließen der Anschlüsse für Verlustfaktormessungen ist stets ein NICHT isolierter Leiter zu verwenden– isolierte Kurzschlusskabel dürfen NICHT verwendet werden. Wenn isolierte Leiter zum Einsatz kommen, kann es leicht passieren, dass bei der Verlustfaktormessung auch die Isolation der Leiter berücksichtigt wird. Außerdem sollten die Kurzschlussbrücken zwischen den Durchführungsanschlüssen möglichst fest angeschlossen werden, sodass die Kurzschlussbrücken sich nicht absenken und/oder nichts anderes berühren als den Anschluss, an den der Prüfstrom angelegt wird.
- **Wurde die Erdung von allen im Betrieb geerdeten Sternpunkten entfernt?**
Wo erforderlich, sollte eine im Betrieb bestehende Erdung vom Durchführungsanschluss X0 (N) entfernt werden.
- **Befindet sich der Laststufenschalter (LTC) in einer anderen als der nominalen Position?**
Einige Laststufenschalter (LTCs) mit Wender besitzen einen Polungswiderstand, von dem bekannt ist, dass er die Verlustfaktormessungen beeinflusst. Da der Polungswiderstand nur in der nominalen Position mit der Wicklung verbunden ist, sollte der Schalter während der Prüfung in eine andere Position gebracht werden. Dieses Verhalten ist insbesondere bei Transformatoren mit LTCs von Federal Pioneer Electric und Federal Pacific Electric bekannt.
- **Ist gewährleistet, dass das Hochspannungskabel des Prüfgeräts, in der Nähe des Anschlusses weder den Transformator noch die Durchführung irgendwo berührt?**
Bei einer konservativen Herangehensweise sollten die letzten 60 cm des Hochspannungskabels nirgendwo die Oberfläche des Kessels, der Durchführungen, etc. berühren.
- **Die Prüfumgebung hat bei Verlustfaktormessungen großen Einfluss auf das Messergebnis. Sind alle Anforderungen an die Umgebungsbedingungen erfüllt?**
 - Verlustfaktormessungen dürfen nicht bei Regen stattfinden.
 - Vermeiden Sie Prüfungen bei hoher Luftfeuchtigkeit (zu viel Feuchtigkeit verfälscht das Prüfergebnis).
 - Vermeiden Sie Verlustfaktormessungen, wenn die Temperatur des Transformatoröls unter 0°C liegt.
 - Verlustfaktormessungen sollten, wenn möglich, am frühen Nachmittag durchgeführt werden (wenn die Luftfeuchtigkeit in der Regel am geringsten ist).

Die Verlustfaktor-Checkliste soll Anwendern von Prüfgeräten helfen, gleich beim ersten Mal korrekte Messergebnisse zu erzielen – dies ist das wirksamste Mittel, um unnötigen Zeitverlust beim Prüfen von Transformatoren zu vermeiden. Zur schnellen *Kontrolle*, ob die Ergebnisse der Verlustfaktormessung in der vorliegenden Form korrekt sind, kann eine Verlustfaktormessung mit variabler Frequenz durchgeführt werden.

2 Überprüfen Sie die Plausibilität der Verlustfaktormesswerte, bevor Sie den Prüfobjekt verlassen

Es kommt sehr häufig vor, dass sich Kunden an uns (den Hersteller der Prüfgeräte) wenden und darum bitten, dass wir uns die Ergebnisse ihrer Transformatorprüfungen einmal ansehen. Häufig werden uns die Daten vorgelegt, *nachdem* der Anwender das Prüfobjekt verlassen hat und wieder im Büro ist. Beim Durchsehen der Daten stellen wir (OMICRON) oft fehlerhafte Verlustfaktormesswerte fest, was zu der Empfehlung führt, dass der Kunde die Prüfung wiederholt, um korrekte Ergebnisse zu erhalten.

Unabhängig davon, ob der Transformator noch freigeschaltet oder bereits wieder am Netz ist, bedeutet so etwas einen erheblichen Zeit- und Ressourcenaufwand. Der Aufwand, der betrieben werden muss, um zum Prüfobjekt zurückzukehren und die Prüfung zu wiederholen, ist eine vermeidbare Vergeudung von Zeit und Ressourcen. Wenn der Transformator bereits wieder zugeschaltet wurde, hat das Unternehmen Zeit und Ressourcen in ungültige Messergebnisse investiert, die für die Bewertung des Zustands des Transformators nicht herangezogen werden können.

Um *noch vor dem Verlassen des Prüfobjekts* schnell herauszufinden, ob die Messergebnisse valide sind, kann eine Verlustfaktormessung mit variabler Frequenz durchgeführt werden. Bei einer Verlustfaktormessung mit nur einer Prüfspannung und nur einer Prüffrequenz (also mit nur einem Verlustfaktor-Prozentwert) ist es für den Anwender schwierig zu verifizieren, ob die Messung überhaupt gültig ist. Wird aber eine Verlustfaktormessung mit variabler Frequenz durchgeführt und analysiert, lassen sich ungültige Messungen oft klar identifizieren.

Bei der Verlustfaktormessung mit variabler Frequenz wird der Verlustfaktor bei verschiedenen Prüffrequenzen gemessen (z. B. 15 Hz, 30 Hz, 45 Hz, 60 Hz, 150 Hz, 200 Hz, 300 Hz und 400 Hz). Allgemeine Empfehlungen für die Auswertung der Verlustfaktormessung mit variabler Frequenz (sowie verschiedene Fallstudien) sind in [1] zu finden.

Abbildung 1 zeigt die C1-Verlustfaktorwerte, die an drei POC-138-kV-Durchführungen von Lapp gemessen wurden. Wenn wir nur die Verlustfaktorwerte bei 10 kV/60 Hz betrachten, ist nicht ersichtlich, dass die Messwerte fehlerhaft sind. Ein Blick auf die Verlustfaktorkurven für die drei Durchführungen aus der Messung mit variabler Frequenz zeigt jedoch einen ungleichmäßigen Kurvenverlauf und einige Ausreißer. Ausreißer im Kurvenverlauf von Messungen mit variabler Frequenz sind im Allgemeinen ein Hinweis auf ungültige Verlustfaktormessung. In diesem Fall hatte der Kunde vergessen, die Durchführungen der Primärseite (H) des Transformators kurzzuschließen, bevor die C1-Verlustfaktormessung gestartet wurden.

Fallstudie: Lapp-POC-138-kV-Durchführungen (1998), Gemessener Verlustfaktor (10 kV/60 Hz), Typenschild-Verlustfaktor (10 kV/60 Hz), Verlustfaktorkurven bei variabler Frequenz, Verlustfaktor, Frequenz

Fallstudie: Lapp-POC-138-kV-Durchführungen (1998)		
	Gemessener Verlustfaktor (10 kV/60 Hz)	Typenschild-Verlustfaktor (10 kV/60Hz)
H1	0,36 %	0,29 %
H2	0,24 %	0,23 %
H3	0,35 %	0,23 %

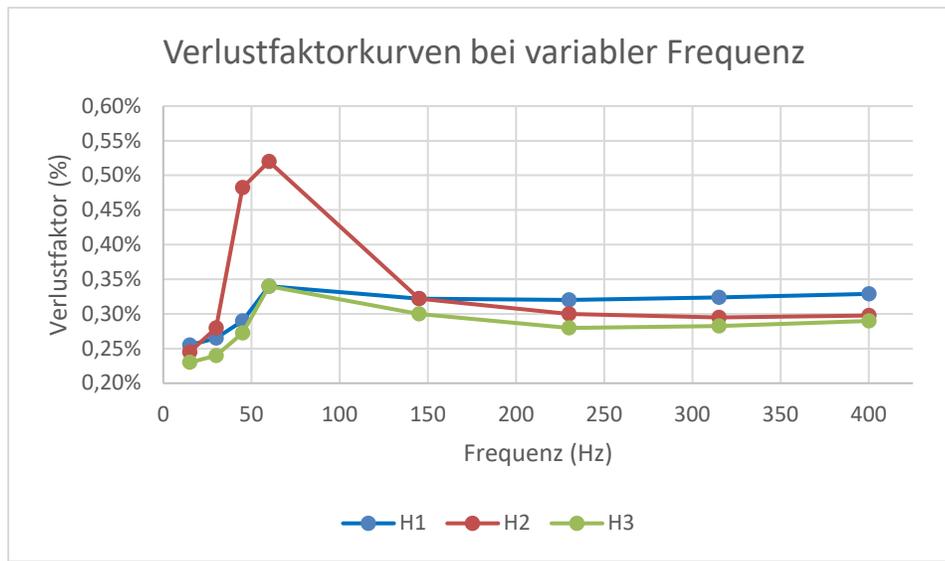


Abbildung 1: Ergebnisse der Verlustfaktormessung bei variabler Frequenz an drei POC-138-kV-Durchführungen von Lapp

Abbildung 2 zeigt die Ergebnisse einer Verlustfaktormessung an den Wicklungen eines ölgefüllten 118-kV-Transformator von Kuhlman. Die Verlustfaktormesswerte bei 10 kV/60 Hz sehen für einen ölgefüllten Transformator „normal“ aus; bei der Betrachtung der Messwerte über einen breiteren Frequenzbereich ergaben sich jedoch Auffälligkeiten: Wie zu sehen ist, nähert sich die CH-Kurve bei steigender Prüffrequenz einem Verlustfaktor von 0 % und fällt dann sogar ins Negative. Negative Verlustfaktormesswerte sind ein typisches Anzeichen für eine ungültige Messung.

Hätte der Anwender lediglich die Verlustfaktormesswerte bei 10 kV/60Hz zur Hand gehabt, hätte die Gefahr bestanden, die fehlerhafte Messung nicht zu bemerken. Durch diese Ergebnisse alarmiert, konnte der Kunde feststellen, dass der Kessel und die Prüfgerät nicht fest mit dem Erdpotenzial verbunden waren.

Verlustfaktor-Messwerte – Kuhlman-118-kV-Transformator, Gemessener Verlustfaktor(10 kV/60 Hz)

Gesamtverlustfaktor-Messwerte – Kuhlman-118-kV-Transformator	
	Gemessener Verlustfaktor(10 kV/60 Hz)
CH	0,16 %
CHL	0,22 %

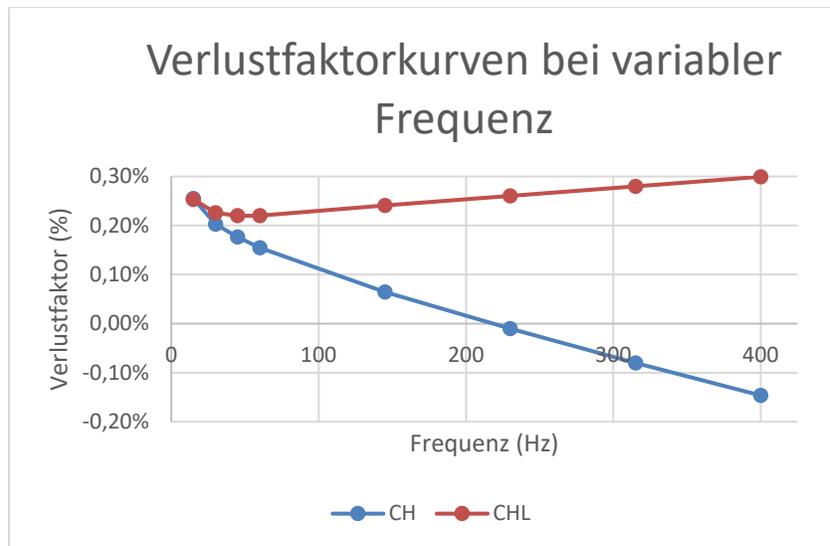


Abbildung 2: Verlustfaktorergebnisse für einen 118-kV-Transformator von Kuhlman

Anhand der Ergebniskurven der Verlustfaktormessungen mit variabler Frequenz lassen sich schnell ungültige Messungen identifizieren, sodass die Prüfung wiederholt werden kann, *bevor die Anwender das Prüfobjekt mit fehlerhaften Prüfergebnissen verlassen.*

3 Wählen Sie einen geeigneten Prüfstrom für die Messung des DC-Wicklungswiderstands aus

Die Messung des Wicklungswiderstands im Feld, ist die Messung, die Anwendern von Prüfgeräten (abgesehen von der Verlustfaktormessung) die meisten Schwierigkeiten bereitet. Die Wicklungswiderstandsmessung ist eine Offline-Messung, die die Identifizierung von hochohmigen oder offenen Verbindungen entlang des stromführenden Pfads einer Transformatorwicklung [2] ermöglicht. Sie ist besonders dann äußerst wertvoll, wenn es darum geht, hochohmige Verbindungen im Zusammenhang mit Laststufenschaltern (LTC) und Umstellern (DETC) zu identifizieren.

In der Theorie ist die Messung des Wicklungswiderstands ein recht einfaches Konzept, das auf der Anwendung des Ohmschen Gesetzes ($U = R \times I$) beruht [2]. In der Praxis ist es jedoch schwierig, die korrekten Widerstandswerte zu messen, da der Kern des Transformators dafür zunächst gesättigt werden muss. Der häufigste Fehler, den Anwender von Prüfgeräten bei der Messung des Wicklungswiderstands machen, besteht darin, nicht bis zur völligen Sättigung des Kerns zu warten und somit die Widerstandswerte zu früh zu erfassen. In diesem Fall sind die gemessenen Widerstandswerte in der Regel höher als erwartet, was zu dem irrtümlichen Schluss führt, dass eine fehlerhafte Verbindung vorliegt.

Für eine schnelle Sättigung des Transformator Kerns und die Beschleunigung korrekter Widerstandsmessungen ist es am besten, wenn der höchstmögliche DC-Strom in die zu prüfende Wicklung eingespeist wird. Je höher der eingespeiste Prüfstrom, desto schneller wird der Transformator Kern gesättigt und desto schneller können die Messwerte erfasst werden. Die folgenden Empfehlungen sollen Anwendern von Prüfgeräten helfen, den geeigneten Prüfstrom für die jeweilige Wicklungswiderstandsmessung auszuwählen.

- Je niedriger der Widerstand der zu prüfenden Wicklung ist, desto höher sollte der Prüfstrom sein.
- Beim Prüfen von Wicklungswiderständen über 100 mΩ reicht in der Regel ein Prüfstrom im Bereich von 5 bis 10 A aus – gemessene Widerstandswerte von über 100 mΩ sind typisch für Wicklungen an der Primärseite (H) eines Transformators.
- Beim Prüfen von Wicklungswiderständen unter 100 mΩ sollte sich der Prüfstromwert in der Regel idealerweise im Bereich von 20 bis 30 A befinden – gemessene Widerstandswerte von unter 100 mΩ sind typisch für Wicklungen an der Sekundärseite (X) eines Transformators.
- In Nordamerika sind Laststufenschalter (LTCs) meistens an der Sekundärwicklung (X) des Transformators zu finden. Wenn sich der LTC auf der Sekundärseite befindet, gilt es für die jeweiligen Anzapfungen in der Regel insgesamt 57 bis 99 Widerstandswerte zu messen (wobei die Messwerte häufig deutlich unter 100 mΩ liegen). In diesen Fällen ist es wichtig, dass dem Anwender ein größerer Prüfstrom (beispielsweise 20 bis 30 A) zur Verfügung steht, damit er die langwierige Prüfsequenz so schnell und genau wie möglich durchführen kann.
- Der Prüfstromwert sollte 10 % des Nennstroms der zu prüfenden Wicklung nicht überschreiten.
- Das Produkt aus Prüfstrom und Widerstand (der zu prüfenden Wicklung) darf die maximale Quellenspannung des Prüfgeräts nicht überschreiten. Im Allgemeinen gilt: Je höher die Nennleistung (VA) der Gleichstromquelle, desto höher kann der Prüfstrom sein, der in die Wicklung eingespeist wird und desto kürzer dauert die Messung des Wicklungswiderstands.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Anwender von Prüfgeräten bei der Messung des Wicklungswiderstands häufig versuchen, sowohl auf der Primärseite (H) als auch auf der Sekundärseite (X) denselben Prüfstrom anzulegen. Aus der Tatsache, dass die Größenordnung des Wicklungswiderstands auf Primär- und auf Sekundärseite häufig deutlich unterschiedlich ausfällt, ergibt sich, dass der Prüfstrom für beide Messungen individuell festgelegt werden sollte. Der häufigste Fehler, der bei Messungen begangen wird, besteht darin, bei der sekundärseitigen Widerstandsmessung NICHT ausreichenden Strom einzuspeisen, was oft dazu führt, dass es lange dauert, bis der Kern gesättigt ist, sodass die Messergebnisse ungenau ausfallen (vor allem, wenn ein LTC im Spiel ist).

Daher gilt: Zeitvergeudung bei Transformatorprüfungen lässt sich am besten vermeiden, indem man die Messung von vornherein korrekt durchführt.

4 Quellen

[1] B. Dupuis, „The Value of Performing Power Factor Sweep Measurements on Bushings“

- Transformer Technology Magazine - The Value of Power Factor Sweep Measurements - April 2019
- NETA World Magazine Spring 2019 - The Value of Performing Power Factor Sweep Measurements

[2] C. L. Sweetser, „Obstacles Associated with Winding Resistance Measurements of Power Transformers“
NETA Powertest Conference 2013

5 Zum Autor

Brandon Dupuis hat einen Abschluss als B.Sc. im Fach Elektrotechnik der University of Maine. Er arbeitet seit 2013 bei OMICRON electronics Corp. und ist derzeit als Regional Application Specialist für Transformatorprüfungen tätig. Sein Arbeitsschwerpunkt liegt aktuell auf der elektrischen Diagnose von Leistungstransformatoren und Leistungsschaltern in Nordamerika. Er ist ein gefragter OMICRON-Trainer, der Vorträge und praktische Schulungen zu den theoretischen Grundlagen elektrischer Diagnoseprüfungen von Transformatoren, zu deren Anwendung und deren Auswertung abhält. Brandon Dupuis ist aktives Mitglied des IEEE/PES-Transformatorausschusses.



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 160 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.

Mehr Informationen, eine Übersicht der verfügbaren Literatur und detaillierte Kontaktinformationen unserer weltweiten Niederlassungen finden Sie auf unserer Website.