

Dynamische Analyse und Prüfung von Laststufenschaltern mit dynamischer Widerstandsmessung

Cornelius Plath, OMICRON electronics GmbH, Österreich

Markus Pütter, OMICRON electronics GmbH, Österreich

Einführung

Leistungstransformatoren sind die kostspieligsten Glieder zwischen der Erzeugung und dem Verbrauch elektrischer Energie. Einer der wichtigsten Bestandteile eines Leistungstransformators ist der Laststufenschalter (On-Load Tap Changer, OLTC). Wie sein Name verrät, ermöglicht ein Laststufenschalter die Stufenumstellung und damit die Spannungsregelung ohne Unterbrechung des Laststroms. Dies wird auf unterschiedliche Arten erreicht, weshalb es auch deutliche Unterschiede bei den Modellen von Stufenschaltern gibt. Die beiden gängigsten Modelle sind die so genannten induktiven und resistiven Stufenschalter.

Untersuchungen wie in Abbildung 1 haben ergeben, dass ungefähr 30 % aller gemeldeten Ausfälle bei Leistungstransformatoren in Anlagen auf die Alterung von Laststufenschaltern zurückzuführen sind. Aufgrund dieser hohen Ausfallrate ist es sehr wichtig, den Zustand des Leistungstransformator-Laststufenschalters genau zu überwachen. Im Gegensatz zu statischeren Bauteilen in einem Transformator besteht der Laststufenschalter aus einer Reihe beweglicher Teile. Hersteller empfehlen normalerweise einen Wartungszyklus, der sich hauptsächlich an der Gesamtanzahl der Schaltvorgänge orientiert.

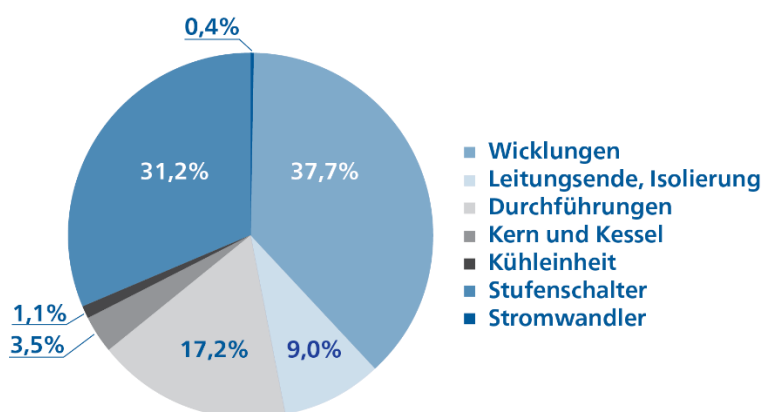


Abbildung 1. Ausfallstelle von Anlagen-Transformatoren auf der Grundlage von 536 Ausfällen [1]

1. Laststufenschalter-Typen

Um die dynamische Widerstandsmessung ordnungsgemäß analysieren und bewerten zu können, muss man das Modell und den Aufbau des Laststufenschalters kennen. Auf dem Markt gibt es zwei gängige Technologien für Laststufenschalter. Induktive Laststufenschalter werden typischerweise in Nordamerika auf der Unterspannungsseite eingesetzt und resistive Laststufenschalter oftmals auf dem Rest der Welt auf der Oberspannungsseite.

In diesem Artikel werden resistive Stufenschalter behandelt. Grundsätzlich gibt es zwei Arten resistiver Stufenschalter: Lastumschalter und Lastwähler gemäß den Abbildungen 2 und 3.

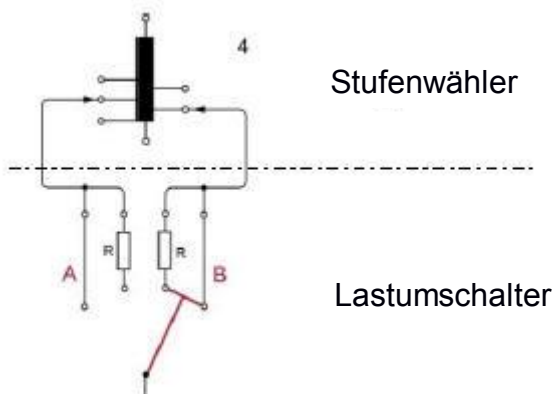


Abbildung 2. Lastumschalter mit zwei Widerstandskontakten [2]

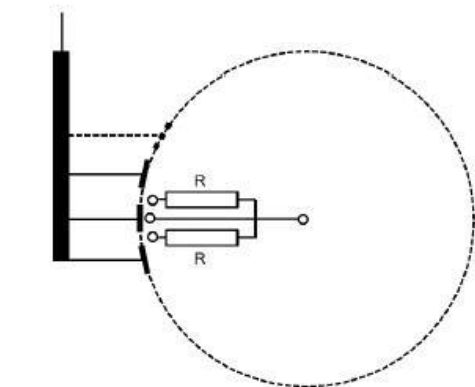


Abbildung 3. Lastwähler mit zwei Widerstandskontakten [2]

Die Lastumschalter bestehen aus zwei Teilen: einem Stufenwähler auf der Oberseite, mit dem die nächste Stufe innerhalb des Haupttransformatorbuchs gewählt wird, und einem Lastumschalter auf der Unterseite, um den Laststrom mit seinem eigenen Ölvolumen zu schalten. Dieser Typ, bei dem der Stufenwähler vor dem Lastumschalter geschaltet wird, wird vorwiegend für höhere Nennleistungen eingesetzt.

Der Lastwähler kombiniert die Funktion des Lastumschalters und Stufenwählers innerhalb seines eigenen Ölvolumens, getrennt vom Öl des Haupttransformatorbuchs.

2. Gängige Verfahren für die Laststufenschalter-Prüfung

Der Zustand von Laststufenschaltern von Leistungstransformatoren muss aufgrund der hohen Ausfallrate genau überwacht werden. Die folgenden Diagnoseverfahren können als Grundlage für die Analyse herangezogen werden:

- **Statische Wicklungswiderstandsmessung der einzelnen Stufen (offline)**

Die statische Wicklungswiderstandsmessung ist ein sehr wichtiges Diagnosewerkzeug und die gängigste Prüfmethode. Eine konventionelle statische Widerstandsmessung kann eingesetzt werden, um die Wicklung und alle internen Verbindungen zu prüfen, wie z. B. die Verbindung von den Durchführungen und den beweglichen Kontakten des Stufenschalters zur Wicklung, die Kontakte des Stufenwählers und die Hauptkontakte des Lastumschalters. Eine Bewertung kann über einen Vergleich der Ergebnisse mit dem Werksbericht oder über eine Berechnung der Abweichung vom Durchschnitt der drei Phasen erfolgen.

- **Vibroakustische Messungen mit Beschleunigungssensoren (offline/online)**

Die vibroakustische Messung wird für die Erfassung akustischer Signale eingesetzt, die durch mechanische Bewegungen verursacht werden. Die aufgezeichneten Profile von bis zu 10 Sekunden mit 10 Hz - 100 kHz im Zeit- und Frequenzbereich werden mit vorhandenen Referenzprofilen verglichen, um bestimmte Ausfallarten zu identifizieren. [3]

- **Messung der Position und des Drehmoments auf der Antriebsachse (offline/online)**

Der Antriebsmechanismus des Laststufenschalters, bestehend aus einem Motor, einer Schaltwelle und einem Getriebe, betätigt den Lastwähler und spannt gleichzeitig eine Feder, um jeweils den Lastumschalter oder Lastwähler zu betätigen. Die Messung der Position und des Drehmoments nutzt die Motorparameter (Strom und Spannung), um mechanische Probleme und eine Alterung des Antriebsmechanismus zu erfassen. Die Ergebnisse können mit einem Referenzprofil oder zwischen den Stufen verglichen werden.

- **Analyse gelöster Gase (DGA) des Öls im Stufenschaltergehäuse (offline/online)**

Die DGA des Laststufenschaltergehäuses wird immer häufiger eingesetzt. Während des Schaltvorgangs eines Laststufenschalters kommt es zur Entladung und Erhitzung, was normalerweise dazu führt, dass die Gaskonzentration im Stufenschaltergehäuse im Vergleich zum Hauptkessel während des Normalbetriebs höher ist. Aus diesem Grund hängt die Auswertung der Gaskonzentration wesentlich von der Auswertung der Gaskonzentration für den Hauptkessel des Leistungstransformators ab. [4]

Jedes Messverfahren ist für die Analyse des Zustands von Laststufenschaltern wichtig.

Tabelle 1. Gängige Verfahren für die Laststufenschalter-Prüfung [5]

| Messmethode | Anwendung/Zweck | Probleme |
|-----------------------------------|--|--|
| Statischer Wicklungswiderstand | Prüfung der Wicklungen und Innenverbindungen | Ausrichtung der Kontakte, Abnutzung der Kontakte |
| Vibroakustisch | Ermittlung akustischer, durch mechanische Bewegung verursachter Signale | Gestänge/Zahnräder, Zeitverhalten/Ablauf, Ausrichtung der Kontakte, Lichtbogenbildung, Überhitzung/Verkokung, Abnutzung der Kontakte, Übergang |
| Position und Drehmoment | Ermittlung mechanischer Probleme und der Alterung des Antriebsmechanismus | Gestänge/Zahnräder, Steuerung/Relais, Motor, Bremsen, Schmierung, Ausrichtung der Kontakte |
| Analyse gelöster Gase | Ermittlung einer höheren Gaskonzentration im Stufenschaltergehäuse | Lichtbogenbildung, Überhitzung/Verkokung |
| Dynamischer Widerstand | Messung des schnellen Lastumschalter- Schaltvorgangs | Zeitverhalten/Ablauf, Abnutzung der Kontakte, Übergang |

3. Dynamische Widerstandsmessung (DRM)

Typische Schaltzeiten des Lastumschalters oder Lastwählers zwischen 40 und 60 ms erschweren eine Ermittlung von Auswirkungen während des Schaltvorgangs mit traditionellen Messungen des statischen Wicklungswiderstands, die einige Minuten in Anspruch nehmen können. Aus diesem Grund wurde das Prinzip der DRM als ergänzendes Diagnoseverfahren für diesen spezifischen Zweck entwickelt.

Mit derselben Anordnung (Abbildung 4a) misst die dynamische Widerstandsmessung den schnellen Schaltvorgang des Lastumschalters. Mit der DRM können Abbrandkontakte, Schaltzeiten des Lastumschalters, Schaltunterbrechungen z. B. aufgrund gebrochener Kommutierungswiderstände oder gebrochener Leitungen und ein vollständiger Kontaktabbrand der Kontakte ermittelt werden. Somit bietet die Messung einen tieferen Einblick in den dynamischen Zustand des Laststufenschalters.

Mit der Analyse der Aufzeichnungen kann eine Reihe von Schlussfolgerungen über den Zustand des Laststufenschalters gezogen werden. Es gibt drei verschiedene Wege, das dynamische Verhalten des Lastumschalters darzustellen. In der weiteren Betrachtung werden wir uns nur auf die Stromkurve beziehen.

- (1) Stromkurve
- (2) Spannungskurve
- (3) Widerstandskurve

Stromkurve

Die Stromkurve (siehe Abbildung 4b) ist die am häufigsten genutzte Darstellungsform von DRM-Messungen da sie einen einfachen Nachweis von Stromunterbrechungen während des Schaltprozesses ermöglicht.

Durch Anlegen eines Kurzschlusses auf der gegenüberliegenden Seite des Transformators wird das Signal empfindlicher, da der Stromabfall (Welligkeit), wie in Abbildung 7 und 8 gezeigt, ansteigt. Dies ist das Ergebnis einer niedrigeren Zeitkonstante aufgrund der kurzgeschlossenen Hauptinduktivität. Ein direkter Vergleich des Stromsignals bei einer Messung mit unterschiedlichen Prüfgeräten ist schwierig, da die Welligkeit von den dynamischen Eigenschaften der Stromquelle abhängt. Doch das Prinzip und die unterschiedlichen Phasen des Schaltvorgangs sind immer sichtbar und zwar unabhängig von den Parametern der Quelle.

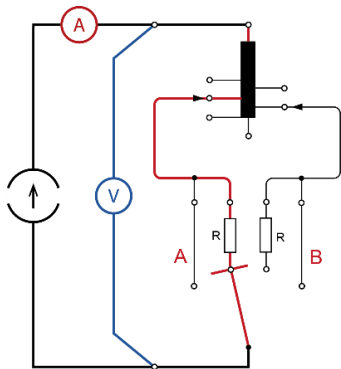


Abbildung 4a: typische Messanordnung für die DRM – Stromkurve

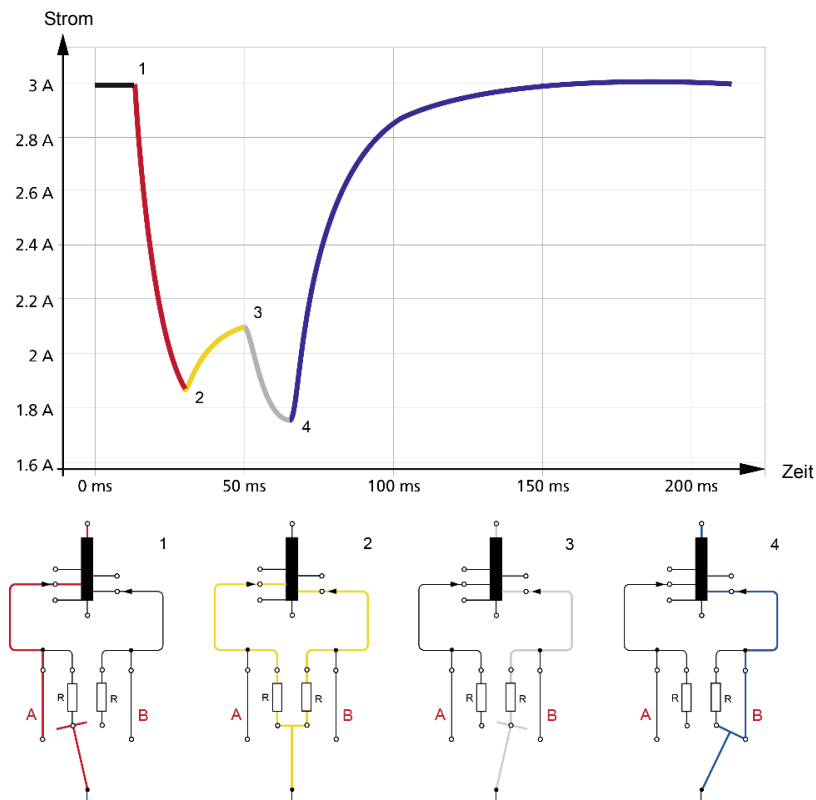


Abbildung 4b: typisches dynamisches Verhalten des Lastumschalters bei laufendem Betrieb – Stromkurve

Spannungskurve

Als Alternative zum Stromsignal kann das dynamische Verhalten auch mit der Spannungs- oder Widerstandskurve ausgewertet werden. Durch Einspeisen eines Gleichstroms gemäß Abbildung 5 erhält man das aufgezeichnete Spannungssignal von Abbildung 6A. Allerdings muss sichergestellt werden, dass das Spannungssignal nicht aufgrund eines Spannungsbegrenzers der Quelle unterbrochen wird, wenn man die Spannungskurve verwendet, da eine Analyse des Signals hierdurch erschwert würde. Zusätzlich zur Abschaltspannung wären Transienten wie z. B. in Abbildung 6A zwischen Phase 1 und 2 nicht so eindeutig sichtbar, wenn die Spannungsbegrenzung erreicht ist. Analog zur Stromkurve ist ein direkter Vergleich der gemessenen Kurven nicht möglich, wenn für die Messungen unterschiedliche Prüfgeräte eingesetzt werden.

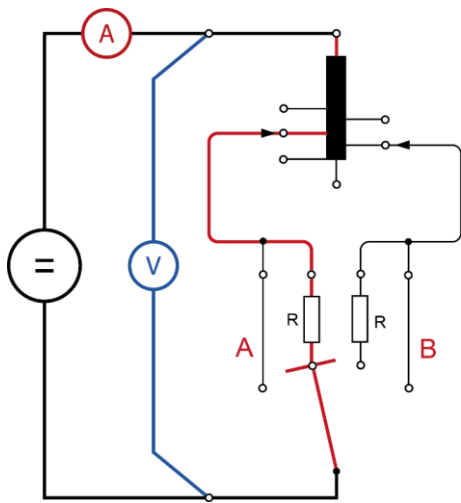


Abbildung 5. Typische Messanordnung für die DRM – Spannungs- und Widerstandskurve

Abbildung 6A 6A

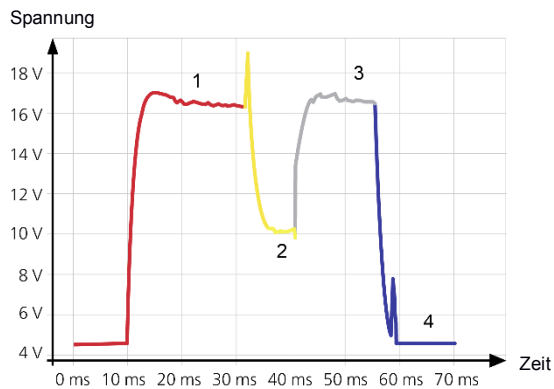


Abbildung 6B 6B

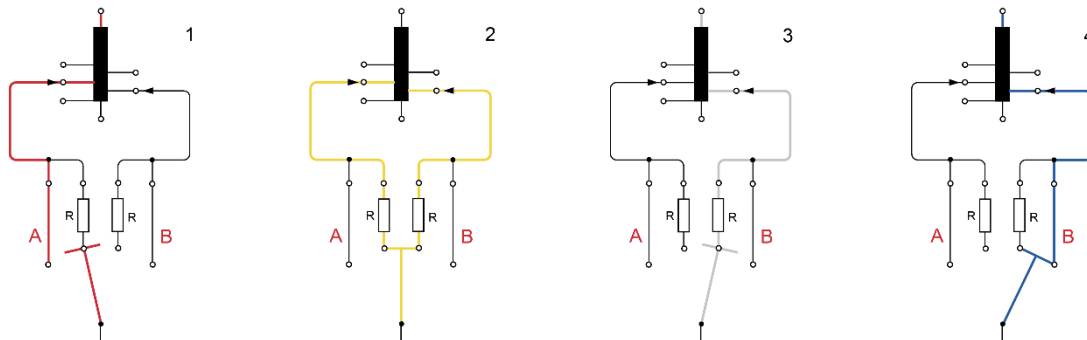
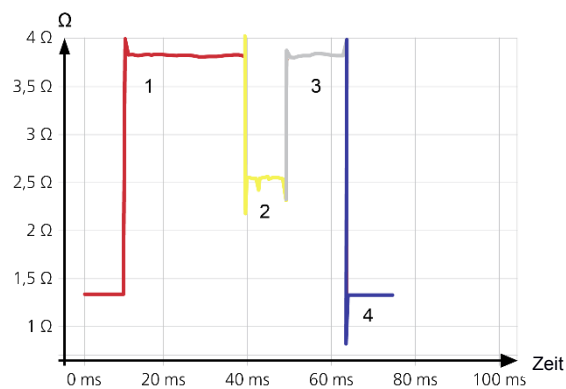


Abbildung 6. Typisches dynamisches Verhalten des Lastumschalters bei laufendem Betrieb – Spannungs- und Widerstandskurve

Widerstandskurve

Die Widerstandskurve gemäß Abbildung 6B kann nicht unmittelbar gemessen werden: Sie ist eine Berechnung, die von der gemessenen Spannung und dem gemessenen Strom auf der Grundlage der Anordnung in Abbildung 5 abgeleitet wird. Ein Kurzschluss an den gegenüberliegenden Transformatorklemmen kann angelegt werden, um die Zeitkonstante des Systems zu verringern. Darüber hinaus kann eine hohe Streuinduktivität eine hohe Induktionsspannung verursachen, die nicht vom Wirkanteil der Kurzschlussspannung getrennt werden kann, wenn die Anordnung von Abbildung 5 verwendet wird. Um diesen Effekt zu kompensieren, wurde vor mehreren Jahren ein Verfahren für die Bestimmung des induktiven Teils der Spannung eingeführt, indem gleichzeitig die Spannung an der gegenüberliegenden Wicklung gemessen wird [6].

Die resistive Kurve hat den großen Vorteil, dass sie von der eingesetzten Stromquelle unabhängig ist. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Werte der Kommutierungswiderstände unmittelbar bestimmt werden können. Da die induzierte Spannung auf der Sekundärseite sehr hoch sein könnte, braucht man besondere Schutzmechanismen für das Prüfgerät.

Da die Stromkurve zurzeit am häufigsten eingesetzt wird, um dynamische Widerstandsmessungen durchzuführen, wird dieses Verfahren in den folgenden Abschnitten näher beschrieben.

4. Analyse der Messergebnisse

Durch dieses nichtinvasive Prüfverfahren können Störungen erkannt werden, ohne das OLTC-Gehäuse öffnen zu müssen. Für eine optimale und genaue Analyse und Bewertung der dynamischen Widerstandsmessung müssen das Modell und der Aufbau des Laststufenschalters bekannt sein. Eine Referenzmessung des „Fingerabdrucks“, der nach der Inbetriebnahme oder zu einem Zeitpunkt genommen wird, in dem sich der Lastumschalter bekannterweise in einem gutem Zustand befindetet, ermöglicht eine effiziente Analyse.

Mit dem aktuellen Profil können grundsätzlich zwei Informationsarten ausgewertet werden:

- **Amplitude:**

Überschaltwiderstände verursachen die Stromänderung während des Schaltvorgangs. Darüber hinaus können der Kontaktwiderstand, die Kontaktbewegung, Unterbrechungen, die Wicklungsinduktivität, Lichtbogenbildung und Kontaktprellen die Amplitude beeinflussen.

- **Zeitverhalten:**

Unterschiede im Zeitverhalten können auf mechanische Probleme, einen hohen Verschleiß der Kontakte und/oder Kontaktprellen hinweisen. Ein bestimmter Unterschied kann toleriert werden und hängt hauptsächlich von der Konstruktion und dem Modell des Laststufenschalters ab.

5. Schwankungen der Ergebnisse des dynamischen Widerstands

5.1 Wahl des richtigen Prüfstroms

Bei der Messung des statischen Widerstands werden niedrigere Prüfströme im Bereich mehrerer Ampere bevorzugt, insbesondere für HS-Wicklungen [7]. Auch wenn für die Prüfung von US-Wicklungen mit niedriger Impedanz Prüfströme im Bereich von 10 - 20 A notwendig sein könnten, wird empfohlen, dass die Ströme 15 % des Bemessungsstroms der Wicklung nicht überschreiten sollten. Höhere Ströme könnten die Wicklungen erhitzen. Da die Widerstandsmessung temperaturabhängig ist, könnte dies zu ungenauen Ergebnissen des gemessenen Widerstands führen [8]. Grundsätzlich gelten u. a. die folgenden Überlegungen auch für dynamische Widerstandsmessungen:

Prüfströme unter 3 A oder 1 A haben sich als empfindlicher gegenüber Kontaktprellen erwiesen, was zu einer falschen Auswertung der Ergebnisse führen kann. Eine häufige Auswirkung, die beobachtet werden kann, ist, dass ein Restölbelag auf den Kontakten zu einer mehrfachen Stromunterbrechung während der Prüfung führt. Diese Ölrückstände sind normalerweise nicht als problematisch einzustufen, wenn der Laststufenschalter unter normalen Lastbedingungen funktioniert. Im Gegenzug können Prüfströme in diesem Bereich auf langfristige Auswirkungen der Alterung, wie Verkokung in einem frühen Stadium, hinweisen. Allerdings müssen diese Vorteile noch durch weitere Fallstudien näher untersucht werden.

Höhere Prüfströme im Bereich von 3 - 5 A reichen in den meisten Fällen aus, um eine stabile Messung des Schaltvorgangs zu erzielen. In solchen Fällen beeinflussten kleinere Unterbrechungen, wie z. B. aufgrund eines Ölbelags auf den Kontakten, die Ergebnisse nicht. Feldtests haben keine Unterschiede gezeigt, wenn der Strom weiter auf 10 A oder 15 A erhöht wurde.

5.2 Kurzschluss auf der Sekundärseite

Eine kurzgeschlossene Sekundärseite des Transformators kann zwei positive Effekte mit sich bringen. Zum einen könnte die im magnetischen Kern gespeicherte Energie nicht freigegeben werden, wenn der Strom während des Schaltvorgangs unterbrochen wird, und die schnelle Stromänderung würde nicht eine solch hohe Spannung an der gegenüberliegenden Wicklung erzeugen. Zum anderen war der beobachtete Stromabfall (Welligkeit) während des Schaltvorgangs in den meisten Fällen doppelt so hoch, weil die Hauptinduktivität kurzgeschlossen wurde. Dadurch wird die dynamische Widerstandsmessung empfindlicher und beeinflusst die Kurven stark, wodurch die Kurven deutlicher ausfallen.

5.3 Schaltvorgang von Stufe zu Stufe

Für die Analyse und den Vergleich der unterschiedlichen Stufen untereinander sollte beachtet werden, ob sich die Kurven beim Hoch- und Runterschalten unterscheiden. Grund dafür ist, dass in einem Fall Wicklungen zum Stromkreis hinzugefügt und im anderen Fall Wicklungen auf der Grundlage der Transformator-Stufenwicklung und der Laststufenschalter-Wicklung abgezogen werden und damit der Schaltplan je nach Transformator unterschiedlich ausfallen könnte. Werden Wicklungen hinzugefügt, muss die zusätzliche Induktivität mit Energie geladen werden. Wenn Wicklungen abgezogen werden, wird die geladene Energie in der Induktivität freigesetzt. Dieser Effekt ist wahrscheinlicher, wenn die Sekundärseite nicht kurzgeschlossen ist, siehe Abbildung 7.

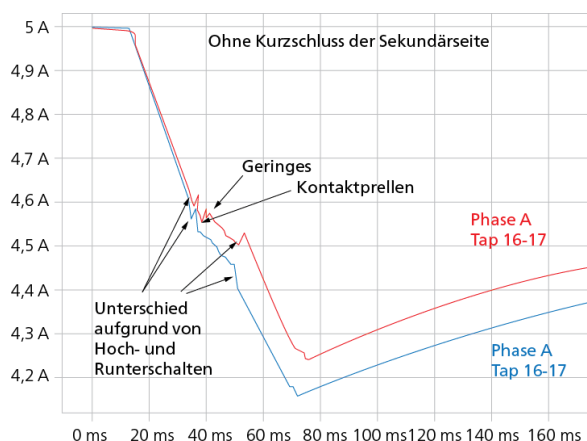


Abbildung 7. Unterschied in der dynamischen Widerstandsmessung zwischen Hoch- und Runterschalten¹

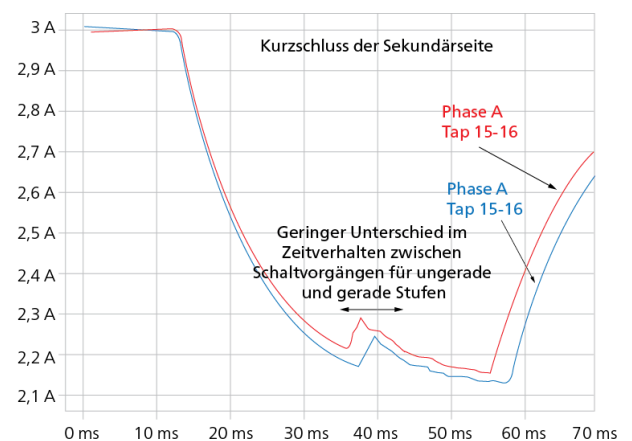


Abbildung 8. Unterschied in der dynamischen Widerstandsmessung beim Schalten des Lastschalters in abwechselnder Richtung¹

Die gemessenen Kurven unterscheiden sich auch, wenn von einer ungeraden auf eine gerade Stufe geschaltet wird, wenn der Lastumschalter sich abwechselnd in beide Richtungen dreht (Abbildung 8). Dies wird normalerweise als unterschiedliche Schaltzeiten der einzelnen Phasen erkannt. Darüber hinaus kann ein Kontaktprellen manchmal nur in eine Richtung erkannt werden.

Aus diesem Grund bietet OMICRON die Primary Test Manager Software (PTM) an, mit der eine Analyse und ein Vergleich der statischen und dynamischen Widerstandsmessungen möglich sind. PTM zeigt den Schaltvorgang der einzelnen Stufen in einem einzigen Diagramm, damit alle Stufen einfach miteinander verglichen werden können. Da die Stromsignaturen vieler Laststufenschaltermodelle je nach Phasen- und Schaltrichtung variieren können, bietet die PTM-Software einzigartige Filterkriterien für einen Vergleich von Schaltspielen nach oben und unten für gerade und ungerade Positionen und alle drei Phasen. Auf diese Weise kann der Anwender Messergebnisse für eine umfassende Fehlerdiagnose analysieren.

Fazit

Eine konventionelle statische Widerstandsmessung kann eingesetzt werden, um die Wicklung und alle festen Innenverbindungen zu prüfen. Allerdings konnten in bestimmten Fällen Mängel mit der traditionellen Wicklungswiderstandsmessung nicht ermittelt werden [9]. Aus diesem Grund hat sich die dynamische Widerstandsmessung als ergänzende Messung für die Analyse des Schaltvorgangs und der beweglichen Kontakte von Laststufenschaltern in Leistungstransformatoren als vorteilhaft erwiesen. Mit derselben Prüfanordnung wie für den statischen Widerstand ermöglicht die DRM-Funktion einen Einblick in den schnellen Schaltvorgang des Lastumschalters, um mechanische Abnutzungen und den Verschleiß von Kontakten, Leitungen und Kommutierungswiderständen ohne zusätzliches Umstecken zu ermitteln. Das erhöht die Zuverlässigkeit der Bewertung des Laststufenschalters, reduziert die Wartungskosten und trägt vor allem dazu bei, unerwartete und teure Ausfälle zu vermeiden.

Literaturverzeichnis

- [1] Cigré Working Group A2.3, 2015, TB 642 - Transformer Reliability Survey
- [2] Rudolf Klaus, 50 Jahre VDE Bezirksverein Nordbayern, Die Entwicklung von Stufenschaltern für Hochspannungstransformatoren
- [3] K. Viereck, A. Saveliev, 2015, Acoustic Tap-Changer Monitoring using Wavelet Analyses, ISH 2015, Pilsen
- [4] IEEE Guide for Dissolved Gas Analysis in Transformer Load Tap Changers, IEEE C57.139-2010
- [5] Jur Erbrink, Edward Gulski, Johan Smit, Rory Leich, 20th International Conference on Electricity Distribution 2009, Experimental Model for diagnosing on-load tap changer contact aging with dynamic resistance measurements
- [6] E. Woschnagg und H. Koglek, 1977, Zum Problem der Widerstandsmessung von niederohmigen Transformatorwicklungen
- [7] OMICRON, Elektrische Standardprüfungen für Leistungstransformatoren, www.omicron.at
- [8] IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power and Regulating Transformers and IEEE Guide for Short-Circuit Testing of Distribution and Power Transformers, IEEE C57.12.90 – 2006
- [9] Raka Levi, Budo Milovic, TechCon 2011, OLTC Dynamic testing

Autoren



Cornelius Plath hat einen Master in Elektrotechnik und Betriebswirtschaft von der RWTH in Aachen, Deutschland. Während seines Studiums war er an mehreren, von der Branche finanzierten Forschungsprojekten zur Bewertung des Zustands von Stromgeräten am Institut für Hochspannungstechnik beteiligt. 2010 kam er zu OMICRON als Anwendungstechniker und arbeitet zurzeit als Produktmanager. Im Bereich Anwendungstechnik hat er international sehr viel Erfahrung gesammelt. Er spezialisiert sich auf die elektrische Diagnose von Leistungsschaltern und Leistungstransformatoren.



Markus Pütter hat Elektrotechnik an der Universität von Paderborn studiert und 1997 seinen Abschluss gemacht. Von 1999 an arbeitete er für OMICRON electronics, zuerst als Ingenieur der Elektrotechnik im Bereich Diagnose von Transformatoren und ab 2008 als Produktmanager für Prüf- und Diagnoselösungen für große Anlagen. In seiner Rolle als Produktmanager konzentrierte er sich auf die Entwicklung innovativer Lösungen für die Prüfung von Leistungstransformatoren. Markus Pütter war Mitglied des IEC TC14 Transformer Committee und der Cigré-Arbeitsgruppe A1.39. Darüber hinaus war er aktiv an einer AM Forum-Arbeitsgruppe beteiligt, die sich mit der dynamischen Widerstandsmessung von Laststufenschaltern (DRM an OLTCs) befasste. Markus verstarb im Juni 2015 an den Folgen eines tragischen Unfalls.

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 und ein starkes Netz von Vertriebspartnern haben OMICRON zum Marktführer in der Energietechnik gemacht.

Weitere Informationen und Literatur sowie detaillierte Kontaktinformationen finden Sie auf unserer Internet-Website.

www.omicronenergy.com