



TRANSFORMER-LIFE-MANAGEMENT CONFERENCE

Interpretation der FRA (Frequency response analysis) für die Ersatzschaltbildelemente von Transformatoren

Prof. Dr.-Ing. Michael Hartje FH Bremen



Professor Dr. Michael Hartje hat an der heutigen Leibniz Universität Hannover Elektrotechnik studiert und wurde am Schering Institut für Hochspannungstechnik, Leibniz Universität Hannover, über Teilentladungsmessungen an Transformatoren 1989 promoviert. Von dort wechselte er zu RWE Energie, Essen, wo er als innerbetrieblicher Berater für die Regionalversorgungen in verschiedenen Funktionen tätig war.

Er wurde 1997 an die Hochschule Bremen auf die Professur Hochspannungstechnik berufen. Neben einer mehrjährigen Dekanstätigkeit lehrte er sowohl Hochspannungstechnik als auch elektrischen Energietransport sowie Messtechnik und Grundlagen der Elektrotechnik an mehreren umgebenden Hochschulen.

Er arbeitet auf dem Gebiet von Hochspannungsmesstechnik und elektrischem Energietransport. Dazu veröffentlichte er in den letzten Jahren regelmäßig Konferenzbeiträge. Er ist Mitglied im Vorstand des VDE Nordwest.





Interpretation der FRA (Frequency response analysis) für die Ersatzschaltbildelemente von Transformatoren

Interpretation der FRA (Frequency response analysis) für die Ersatzschaltbildelemente von Transformatoren

Prof. Dr.-Ing. Michael Hartje

1 Einführung und Ziele der FRA

Eine räumlich ausgedehnte Transformatorwicklung kann in kleinste Abschnitte, z.B. einzelne Windungen, zerlegt werden. Diese Abschnitte haben Eigen- und Gegeninduktivitäten, sowie Teilkapazitäten zueinander. Durch mechanische Einflüsse können sich die Windungen in ihrer Lage zueinander verschieben. Dann ändern sich die Teilkapazitäten und Gegeninduktivitäten der Windungen zueinander. Diese Änderungen lassen sich bei höheren Frequenzen deutlich feststellen.

Die Frequency-Response-Analysis (FRA) beruht darauf, dass Eigen- und Gegeninduktivitäten, sowie die Kapazitäten der Windungen einer Wicklung miteinander Resonanzeigenschaften entwickeln, deren Kennwerte sich nach mechanischen Veränderungen in diesen Kennwerten und durch Vergleich mit vorher ermittelten Werten nachweisen lassen.

Die FRA-Messung und deren Interpretation wurde in den vergangenen Jahren in vielen Arbeiten untersucht. [1, 2, 3, 4, 5] Die Messung der FRA ist auf diesen Grundlagen inzwischen in Standards [6, 7, 8, 9] festgelegt. Hier wird eine Ende-zu-Ende-Messung über die Anschlüsse der Wicklungen vorgeschlagen. Die Spannungen an beiden Anschlüssen werden als Quotient in einem logarithmischen Verhältnis dargestellt. Dieses Messergebnis wird auch als Übertragungsfunktion bezeichnet

Für die Auswertung der gemessenen Übertragungsfunktion der Spannungsverhältnisse wird der Amplitudengang herangezogen. Für bestimmte Frequenzbereiche bis in das Gebiet von etwa 1 MHz existieren Vorschläge, welchen mechanischen und elektrischen Bereichen der Transformatorwicklung die beobachteten Abweichungen zugeordnet werden sollen [8]. Die Interpretation in diesen Frequenzbereichen wird durch Vergleich von Bildern von FRA-Experten vorgenommen.

An die heutigen Messungen, deren Verarbeitung und Interpretation muss bei der hohen Lebensdauer der untersuchten Primärtechnik für 50 bis 100 Jahre die Anforderung gestellt werden, dass ein Vergleich auch innerhalb dieser Zeitspanne jederzeit möglich ist. Dafür ist die Standardisierung der Messmethode ein erster, wichtiger Schritt.

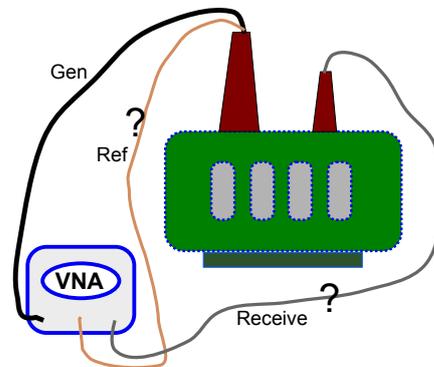


Bild 1: Messaufbau mit VNA und Transformator

Verbesserungsansätze ergeben sich, um der FRA als Prozess eine so langlebige Verfügbarkeit der Messdaten und der Interpretation zu ermöglichen.

2 weitergehende Ansätze zur Messung und Interpretation

2.1 Ansätze in der Messung

Die Empfehlungen der Standards schlagen eine Ende-zu-Ende-Messung der Spannungsübertragungsfunktion vor. Das Bild 1 zeigt einen vollständigen Messaufbau mit Transformator und den dafür erforderlichen Zuleitungen gemäß den Empfehlungen. Der Vektornetzwerkanalysator (VNA) und die Anschlüsse am Transformator werden wegen der räumlichen Abmessungen und des Aufbaus über Zuleitungen verbunden. Kabellängen bis zu 30 m sind üblich. Der Anschluss kann erheblichen Einfluss auf das Messergebnis haben. Um die Beeinflussung des Aufbaus bei der Messung zu eliminieren, wird der VNA im interessierenden Frequenzbereich kalibriert nach der Methode "TOSM" mit 4 einzelnen Messungen bei Open, Short, Match, Through. Um die Zuleitung zum Transformator zu erfassen wird zusätzlich eine Referenzmessleitung verwendet.

Der Messaufbau mit einer Leitung kann als Ersatzschaltbild (ESB) im Bild 2 vereinfacht werden. Die



Interpretation der FRA (Frequency response analysis) für die Ersatzschaltbildelemente von Transformatoren

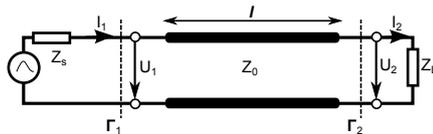


Bild 2: Ausbreitung auf Leitung

eingespeiste Spannung U_1 wird beim Durchlaufen der Leitung mit der Gleichung (Gl.)

$$U_2 = U_1 e^{-\gamma l} \quad (1)$$

mit

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (2)$$

verändert. Für den interessierenden Frequenzbereich bis mehrere 10 MHz sind übliche Messkabel mit guter Genauigkeit durch die Herstellerdaten beschreibbar. Damit wird es möglich, den VNA einmalig und ohne das verwendete Messkabel zu kalibrieren. Es reicht dann aus, unter der Angabe des Kabeltyps und der Länge eine vollständige Korrekturrechnung der Messergebnisse am Anfang des Kabels auf das Ende des Kabels vorzunehmen. Die Größen α und β sind von der Frequenz abhängig.

Für die gebräuchlichen Koaxkabel vom Typ RG58-CU ist es nach [10]

$$\alpha = 6,379 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{f}{\text{Hz}}^{0,5625} \cdot \frac{\text{NP}}{\text{m}} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{2\pi}{c v_k} \frac{f}{\text{Hz}} = \frac{2\pi}{3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,67} \frac{f}{\text{Hz}} \cdot \frac{\text{rad}}{\text{m}} \quad (4)$$

Bei der Reflexionsfaktormessung ist die Korrektur mit der 2-fachen Ausbreitungslänge (hin und zurück) vorzunehmen. Damit wird der Reflexionsfaktor am Ende des Messkabels aus dem Reflexionsfaktor am Anfang des Kabels bestimmt zu

$$\Gamma_2 = \Gamma_1 \cdot e^{2\alpha l} \cdot e^{j2\beta l} \quad (5)$$

Leitungslängen bis 30 m Länge lassen sich bei Messungen bis zu mehreren MHz mit guter Genauigkeit kompensieren. Damit lässt sich der Messaufbau etwas vereinfachen. - Eine Kalibrierung nach der TOSM-Methode beinhaltet diese Korrektur und ist daher immer einer kalkulatorischen Korrektur vorzuziehen.

Aus dem Reflexionsfaktor Γ_2 kann die Impedanz Z_L bestimmt werden mit Gl. 6

$$Z_L = Z_0 \frac{1 + \Gamma_2}{1 - \Gamma_2} \quad (6)$$

Mit einer Messung des Reflexionsfaktors Γ_1 am Kabelanfang ist somit die komplexe Eingangsimpedanz des Transformators am Ende des Kabels bestimmbar.

2.2 Messung und Kompression der Messwerte

In [11] wird das Verfahren des Vektorfitting erläutert. Viele Autoren verwenden ein Programm des Autors für MATLAB, was dieser dankenswerterweise kostenlos zu Verfügung stellt. Nach mehrjähriger Nutzung der MATLAB-Routinen wurde inzwischen eine modernere Programmierung in Python mit vielen Erweiterungen realisiert.

Das Vektorfitting erlaubt es, aus einem komplexen Frequenzgang die das passive Netzwerk beschreibenden Pole und Nullstellen zu schätzen. Dafür sind verschiedene Bedingungen für eine erwartungstreue Schätzung zu beachten:

- Eine feine Auflösung des Frequenzganges muss vorliegen. Hier sind mehrere 1000 Messpunkte zwischen niedrigster und höchster Frequenz anzustreben.
- Die Unterschiede zwischen größter und kleinster zu schätzender Amplitude des Frequenzganges sollte höchstens 1000:1 umfassen. Da die Schätzung als Kriterium den mittleren quadratischen Fehler verwendet, kommt es bei kleineren Magnituden zu größeren Abweichungen im Schätzergebnis.
- Eine große Zahl von Messpunkten erlaubt eine Glättung / Filterung der in der Realität häufig von Störungen und Messunsicherheit überlagerten Messpunkte. Dies kann sowohl in der zeitlichen Wiederholung, als auch durch Erhöhung der Messpunktzahl erreicht werden.

Das Vektorfitting-Verfahren ist grundsätzlich für alle frequenzabhängigen Verläufe (Spannung, Strom, Admittanz, Impedanz, Übertragungsfunktionen) geeignet. Die Beschreibung der gemessenen Verläufe mit einer Gleichung mit einigen 10 Polen und Nullstellen bei Anwendung dieses Verfahrens auf die FRA-Messdaten ist möglich.

Heute wird im Wesentlichen die Interpretation der FRA-Messdaten optisch durch Vergleich der Amplitudengänge durchgeführt. Mit dem nun hier geschilderten Ansatz werden nun nicht mehr die Amplitudenverläufe der FRA-Messergebnisse miteinander verglichen, sondern wenige komplexe Zahlen (die Werte für Pole und Nullstellen oder die Residuen). Die Interpretation von FRA-Messungen auf der Basis eines Vergleiches von wenigen Polen und Nullstellen erscheint für den Vergleich zwischen einer Referenzmessung und dem momentanen Zustand des Transformators wesentlich einfacher.

2.3 Impedanzmessung

Die Standards [8, 9, 7] empfehlen eine Ende-zu-Ende-Messung der Transformatorwicklungen. Das Messergebnis wird als Übertragungsfunktion bezeichnet. Die Messungen der Übertragungsfunktion



Interpretation der FRA (Frequency response analysis) für die Ersatzschaltbildelemente von Transformatoren

beziehen sich typischerweise auf mehrere Signallore des Transformators. Sie wird aus einem Quotienten der Spannungen oder Ströme von zwei Toren zueinander gebildet. Wird jedoch nur eine Wicklung beurteilt, ist eine einfachere Messung möglich. Die Systemfunktion des Netzwerkes "Wicklung" ist in einer Impedanzmessung von der einen oder der anderen Anschlussseite bestimmbar. Impedanz- und Admittanzfunktion sind keine Übertragungsfunktionen. Mit einem Netzwerkanalysator können Impedanzfunktionen mittels der Messung von Streuparametern, zB. des Streuparameters S_{11} , ermittelt werden.

Das Ergebnis der Impedanzmessung kann in ein elektrisches Ersatzschaltbild überführt und damit das Netzwerk „Wicklung“ vollständig rückgerechnet werden.

Der Messaufbau in Bild 1 vereinfacht sich bei Impedanzmessung, da die Leitung "Receive" entfallen kann. Der Aufwand für den Messaufbau kann mit Anwendung der vorgenannten Umrechnung der Messdaten vom Anfang der Leitung auf das Ende der Leitung somit auf eine einzige Leitung reduziert werden.

2.4 Phasenmessung

In der bisherigen Empfehlungen zur Interpretation der FRA-Messung wird die Phaseninformation praktisch nicht verwendet; es gibt keine Beschreibungen zu beobachtbaren Änderungen der Phase in den Empfehlungen und Standards.

Berichte aus der FRA-Anwendungspraxis zeigen aber, dass bedeutende Fehler in der Amplitude kaum erkannt, in der abweichenden Phasenlage jedoch deutlich wahrgenommen werden.

2.5 Auflösung der Messung

Eine FRA-Messung wird entweder mit linearer oder mit logarithmischer Frequenzeinteilung durchgeführt. Um die Auflösung von Minima und Maxima möglichst gut zu messen, ist es erforderlich mit vielen Messpunkten den Frequenzbereich aufzulösen. Gebräuchlich sind jedoch mehrere 1000 Punkte zwischen minimaler und maximaler Frequenzgrenze bei einer Dokumentationsmessung. Eine Verbesserung der Messdaten kann auch über die Mittlung mehrerer Messungen oder eine erhöhte Messpunkteanzahl erfolgen.

2.6 dauerhafte Dokumentation der FRA

In den Standards wird empfohlen, davon auszugehen, dass die zu speichernden Messdaten 15-20 Jahre nach der ersten Messung wieder herangezogen werden müssen. Da Leistungstransformatoren aber auch eine Lebensdauer von 80-100 Jahren erreichen können, sollten die Messdaten für diesen langen Zeitraum zugänglich sein.

Daraus entsteht die Aufgabe, nicht nur die Daten in einem möglichst einfach verständlichen Format zu speichern, sondern auch vorherzusehen, was in der kommenden Ingenieurgeneration für Wissen vorhanden sein muss, um diese Messdaten zu interpretieren. Die Standards empfehlen, eine Speicherung im XML Format.

In der Praxis beim Umgang mit Netzwerkanalysatoren haben sich das Touchstone-Format [12] und weitere einfache und sehr verbreitete Formate etabliert.

Es ist sinnvoll, die zu speichernde Anzahl von Daten möglichst einfach und verständlich zu halten. Weil die Speicherung von umfangreichen Messdatensätzen möglich, aber vielleicht in der Zukunft nicht mehr ausreichend interpretierbar ist, wird hiermit vorgeschlagen, eine Beschreibung in Form der geschätzten Pole und Nullstellen oder Residuen zusätzlich zu ergänzen - eine zunehmende Anzahl von Schaltungsanalyseprogrammen (z.B. auch SPICE) erlaubt die Eingabe von Gleichungen. Dies kann die Nutzbarkeit der Messdaten für die zukünftige Auswertung verbessern.

3 Interpretation der FRA als Ersatzschaltbild

Die Eingangsimpedanz eines aus passiven Netzwerkelementen bestehenden Zweipols wird mit der Gl. 7 mit Randbedingungen möglich, wenn für $s = j\omega$ angesetzt wird.

$$Z(s) = \frac{U(s)}{I(s)} = k \cdot \frac{(s - a_n)(s - a_{n-1}) \cdots (s - a_1)}{(s - b_m)(s - b_{m-1}) \cdots (s - b_1)} \quad (7)$$

Für die Gl. 7 muss gelten: $m \geq n$. $\{a, b\} = \mathbb{C}$ und alle $\Re\{b\} \leq 0$. Damit liegen alle Pole in der linken s-Halbebene.

Die Gl. 7 kann auch in eine Pol- und Residuendarstellung überführt werden

$$Z(s) = \sum_{i=1}^N \frac{r_i}{(s - b_i)} + h \cdot s + d \quad (8)$$

mit r_i als das jeweilige Residuum, h als slope und d als konstantem Rest. Diese Form kann nach [11] aus dem gemessenen Frequenzverlauf geschätzt werden.

Der Amplituden- und Phasengang eines Bodeplots ist mit dieser Pol- und Nullstellenbeschreibung vollständig bestimmbar. Das gilt sowohl für das Impedanzdiagramm als auch für die Übertragungsfunktion bei einer Messung von Primär- zur Sekundärwicklung.

3.1 Dekomposition des elektrischen Ersatzschaltbildes

Aus einer vollständigen Beschreibung eines passiven Netzwerkes mit der Gl. 7 kann man durch Dekomposition ein nicht eindeutiges Ersatzschaltbild

Interpretation der FRA (Frequency response analysis) für die Ersatzschaltbildelemente von Transformatoren

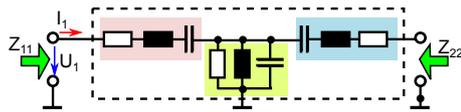


Bild 3: ESB-Strukturbild eines 2-Tor mit Eingangsimpedanzen des Tores 1 und 2 (links und rechts) Z_{11} und Z_{22}

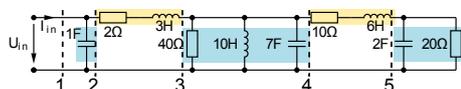


Bild 4: ESB eines Transformatormodells mit einfachen Elementen und einem Abschlusswiderstand

gewinnen. Für die Dekomposition muss die Struktur des ESB ausgewählt werden.

Das Bild 3 zeigt die Struktur und die Elemente des ausgewählten ESB. Bei der Dekomposition können bis zu 3 Elemente in einem Zweig liegen, die als Reihen- oder als Parallelschaltung gefunden werden können.

3.2 Beispiel mit ausgewähltem ESB

Für die Analyse eines einfachen Ersatzschaltbildes, ähnlich einem Transformator, wird das Bild 4 verwendet.

Daraus kann man eine Gl. 9 für die komplexe Eingangsimpedanz formen - hier als Ebene 1 im Bild 4, bezeichnet mit der Impedanz Z_1 . Die farblich unterlegten Bereiche im Bild 4 zeigen jeweils die zu gewinnenden (Quer-)Admittanzen (blau) und die Reihen-Impedanzen (gelb) an.

Die einzelnen Teilimpedanzen und -admittanzen werden ggf. mit Hilfe der Foster-Preamble [13] gewonnen.

Durch Zusammenfassung der Gl. 9 auf einem Bruchstrich ergibt sich die Gl. 10. Der Grad des Zählers ist kleiner als der Grad des Nenners.

Mit einer Partialbruchzerlegung der Admittanz Y_1 - der Inversen der Impedanz Z_1 - erhalten wir das erste parallel geschaltete Element.

$$Y_1(s) = \frac{33600 s^4 + 23360 s^3}{100800 s^5 + 137280 s^4 + 65689 s^3 \dots} \dots \frac{+4723 s^2 + 364 s + 48}{+13858 s^2 + 1352 s + 96} + s \quad (11)$$

Das am Eingang parallel liegende Element ist 1 s groß - das letzte Element in Gl. 11. Das entspricht der Admittanz eines Kondensators mit 1 F, da wir einsetzen können $s = j\omega$. Dieser Kondensator mit 1 F wird nun von der Partialbruchzerlegung $Y_1(s)$ abgezogen. Es verbleibt eine parallele Admittanz $Y_2(s)$ - die Ebene 2 im Bild 4.

Mit dem Kehrwert von $Y_2(s)$ wird die erste Reihenschaltung (Impedanzen) mit einer erneuten Partialbruchzerlegung untersucht.

$$Z_2(s) = \frac{4800 s^3 + 3320 s^2}{33600 s^4 + 23360 s^3 + 4723 s^2 \dots} \dots \frac{+480 s}{+364 s + 48} + 3 s + 2 \quad (12)$$

Es finden sich die beiden Reihenelemente $3 s + 2$. Das ist als Impedanz eine Induktivität von 3 H in Reihe mit einem Widerstand von 2 Ω. Mit dem Kehrwert des großen Bruches (1. Summand in Gl. 12) wird die weitere Partialbruchzerlegung des verbleibenden Netzwerkes (Ebene 3) vorgenommen:

$$Y_3(s) = \frac{40 s + 1}{2(120 s^2 + 83 s + 12)} + 7 s + \frac{1}{40} + \frac{1}{10 s} \quad (13)$$

$Y_4(s)$

die 3 hinteren Summanden sind als Admittanzen $7 s = 7 F$, $1/40 = 40 \Omega$ und $1/10 s = 10 H$.

Eine weitere Partialbruchzerlegung des Kehrwertes von $Y_4(s)$ (nun als Impedanz) ergibt die Reihenelemente

$$Z_4(s) = \frac{20}{40 s + 1} + 6 s + 4 \quad (14)$$

$Z_5(s)$

Induktivität 6 H, Widerstand 4 Ω. Nach Abziehen der letzten beiden Elemente bleiben in Ebene 5 als

$$Y_5(s) = 2 s + \frac{1}{20} \quad (15)$$

Diese Admittanzen entsprechen einer Parallelschaltung von einer Kapazität von 2 F und einem Widerstand von 20 Ω.

Es zeigt sich also, dass mit der Zerlegung der Impedanzfunktion alle Elemente rückgewonnen werden können.

Dieses Vorgehensweise ist auch auf eine Differenz zwischen 2 Toren, nicht jedoch auf den bei der FRA-Messung heute üblicherweise ermittelten Quotienten - die Übertragungsfunktion - anwendbar. Erst eine „modifizierte FRA-Messung“ erlaubt die beschriebene Interpretation.

4 Messung an einem mittleren Kraftwerkstransformator

Ein dreiphasiger Versorgungstransformator mit 1.6 MVA, 6/0.4 kV, $u_k = 5.8 \%$ wurde in den Jahren 2006 und 2007 gemessen. In [14] ist dargelegt, wie aus den Messdaten manuell ein Modell für die Übertragungseigenschaften des Transformators gewonnen worden ist. Bei den umfangreichen Messungen wurden zumeist 1500 Messwerte im Bereich von 10 Hz bis 10 MHz mit logarithmischer Teilung aufgenommen. Bei der hier ausgesuchten Messung für die folgenden Bilder wurde die Sekundärwicklung mit 50 Ω belastet und geerdet.



TRANSFORMER-LIFE-MANAGEMENT
CONFERENCE

Interpretation der FRA (Frequency response analysis) für die Ersatzschaltbildelemente von Transformatoren

Algorithmus 1 Eingangsimpedanz Z_1 des Modells aus Bild 4 als Funktion der komplexen Frequenzvariablen s in Ebene 1

$$Z_1(s) = \frac{400 \left(6s + \frac{10}{\left(\frac{1}{2s} + 20\right)s} + 4 \right)}{7(10s + 40) \left(\frac{400s}{10s + 40} + \frac{1}{7s} \right) \left(\frac{400}{7(10s + 40) \left(\frac{400s}{10s + 40} + \frac{1}{7s} \right)} + 6s + \frac{10}{\left(\frac{1}{2s} + 20\right)s} + 4 \right)} + 3s + 2 \quad (9)$$

$$s \left(\frac{400 \left(6s + \frac{10}{\left(\frac{1}{2s} + 20\right)s} + 4 \right)}{7(10s + 40) \left(\frac{400s}{10s + 40} + \frac{1}{7s} \right) \left(\frac{400}{7(10s + 40) \left(\frac{400s}{10s + 40} + \frac{1}{7s} \right)} + 6s + \frac{10}{\left(\frac{1}{2s} + 20\right)s} + 4 \right)} + 3s + \frac{1}{s} + 2 \right)$$

$$Z_1(s) = \frac{100800 s^5 + 137280 s^4 + 65689 s^3 + 13858 s^2 + 1352 s + 96}{100800 s^6 + 137280 s^5 + 99289 s^4 + 37218 s^3 + 6075 s^2 + 460 s + 48} \quad (10)$$

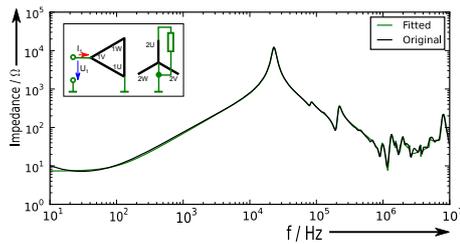


Bild 5: Amplitudengang gemessen und gefittet eines Trafo 1.6 MVA 6/0.4 kV

Die Messung und eine gleichfalls eingezeichnete Pol-Residuen-Schätzung ergibt den Amplitudengang in Bild 5. Es zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit sehr kleinen Abweichungen oberhalb 3 MHz im dargestellten Amplitudengang. Gemäß den Empfehlungen in den Standards ist ab 1 MHz mit großen Abweichungen durch die Anschlusstechnik zu rechnen, so dass für eine Untersuchung der Transformatorwicklung diese Abweichungen vernachlässigt werden könnten. In Bild 6 wird der gemessene und der aus der Pol- und Residuenschätzung gewonnene, gefittete Phasengang dargestellt. Abweichungen sind im Bereich oberhalb 3 MHz und unter 100 Hz zu beobachten. Die Schätzung hier wurde mit (gewählt) 12 Polen vorgenommen.

Bei der Dekomposition mit 12 Polen entsteht ein Ersatzschaltbild aus 40 Elementen. Damit wurde eine Simulation in SPICE vorgenommen und der Amplitudengang der Impedanz errechnet. Der Vergleich mit der Messung ist in Bild 7 dargestellt. Der Verlauf zeigt eine große Ähnlichkeit, jedoch auch einzelnen Abweichungen. Diese Abweichungen können mit mehr Polen vermindert werden. Bei der Dekomposition hat sich am Anfang des ESB eine parasitäre Längsinduktivität von etwa 1,3 µH ergeben. Dies entspricht einer Zuleitungslänge von etwa 1,3 m, diese sich aus Anschlussleitung und Durchführung zusammensetzt.

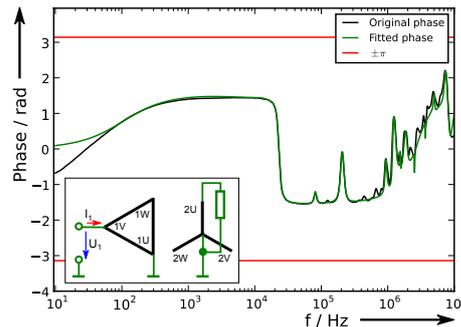


Bild 6: Phasengang gemessen und gefittet des 1,6 MVA-Trafos aus Bild 5

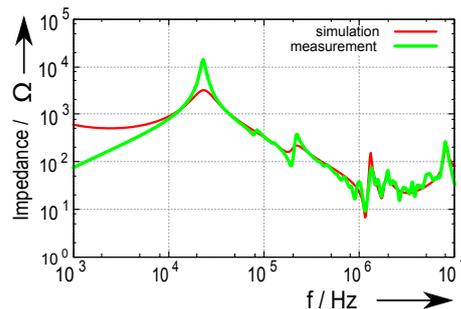


Bild 7: Vergleich Amplitudengang Messung und Dekomposition mit Simulation des 1.6 MVA-Transformators

5 Zusammenfassung

Es wurde eine Verfahrensweise für die FRA und deren Interpretation erläutert. Die folgenden Ergebnisse wurden erzielt:

- FRA-Messungen können mit wenigen Polen und Nullstellen vollständig beschrieben werden. Ei-



TRANSFORMER-LIFE-MANAGEMENT CONFERENCE

Interpretation der FRA (Frequency response analysis) für die Ersatzschaltbildelemente von Transformatoren

- ne höhere Anzahl verringert die mittlere Abweichung.
- Messung sollten mit einer hohen Anzahl von Messpunkten durchgeführt werden um eine Glättung und Filterung zu ermöglichen.
- Bei einer Ende-zu-Ende Messung sollte zusätzlich zum Quotienten auch die absoluten Spannungswerte (Impedanzwerte) aufgezeichnet werden.
- Die Messung des Reflexionsfaktors oder des Eingangswiderstandes von beiden Seiten der Wicklung erlaubt eine Dekomposition in einer Ersatzschaltbild. Die Zuleitung kann vollständig korrigiert werden.
- Der FRA-Messaufbau kann ggf. deutlich vereinfacht werden.
- Das aus der Dekomposition mit wenigen Polen gewonnene Ersatzschaltbild zeigt bei Simulation kleine Abweichungen.
- Die Identifikation von parasitären Zuleitungsinduktivitäten ist ein erstes Ergebnis der hier beschriebenen Dekomposition.

Danksagung

Der Autor dankt den Studierenden Jan Kuhlmann und Jan Petznik, die im Rahmen ihrer Bachelorthesis wichtige Beiträge zur Diskussion geleistet haben. Herrn Kuhlmann danke ich für die Entwicklung der Pythonroutinen zum Vektorfitting. Prof. Dr. Thomas Leibfried danke ich für die Gestattung zur Verwendung der Transformormessdaten und meinem Kollegen Prof. Dr. Sören Peik möchte ich für seine wichtigen Diskussionbeiträge bei der Entwicklung des Vektorfittings danken.

Literatur

- [1] J. Christian, *Erkennung mechanischer Wicklungsschäden in Transformatoren mit der Übertragungsfunktion*. Dissertation, Stuttgart, 2002.
- [2] E. Rahimpour and D. Gorzin, "A new method for comparing the transfer function of transformers in order to detect the location and amount of winding faults," *Electrical Engineering*, vol. 88, pp. 411–416, 5 2005.
- [3] E. Bjerkan, *High Frequency Modeling of Power Transformers - Stresses and Diagnostics*. PhD thesis, Trondheim, N, 5 2005.
- [4] D. M. Soflan, *Transformer FRA interpretation for Detection of Winding Movment*. PhD thesis, Manchester, GB, 2007.
- [5] H. Tavakoli, *An FRA Transformer Model with Application on Time Domain Reflectometry*. PhD thesis, Stockholm, S, 10 2011.
- [6] ICS27.100, F24, DL/T911-2004, "Frequency response analysis on winding deformation of power transformers," 6 2005.
- [7] CIGRE WG A2.26, "Mechanical Condition Assessment of Transformer Windings using Frequency Response Analysis (FRA)," Br. 342, Cigre, 2008.
- [8] IEEE Std. C57.149, "IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers," 2012.
- [9] IEC 60076-18, "Measurement of frequency response," 2012.
- [10] M. Hartje, "Korrektur von verlustbehafteten Zuleitungen bei Messungen mit dem VNWA," 7 2014.
- [11] B. Gustavsen and A. Semlyen, "Rational approximation of frequency domain responses by vector fitting," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, no. 3, pp. 1052–1061, 1999.
- [12] "Touchstone file format specification," 4 2009.
- [13] O. Wing, *Classical Circuit Theory*. Springer, 2008.
- [14] J. Behrens, M. Hartje, C. Homagk, T. Leibfried, R. Laur, and D. Westphal, "Messung und Modellierung von Blitzstoßübertragungseigenschaften kleiner und großer Transformatoren in einem Kraftwerk," in *ETG-Fachbericht*, vol. 119, pp. 403–409, 2009.

Anschrift

Hochschule Bremen
Hochspannungslabor
Prof. Dr.-Ing. Michael Hartje
Neustadtswall 30, 28199 Bremen
Tel.: +49 421 5905 3444
Fax: +49 421 5905 3476
E-mail: hartje@etech.hs-bremen.de

