

Auswirkungen von Gleichströmen auf Leistungstransformatoren

Undesirable DC Effects Influencing Power Transformers

Dipl.-Ing. Michael Beltle, B. Sc. Michael Schühle, Dipl.-Ing. Martin Siegel, Prof. Dr.-Ing. Stefan Tenbohlen, Universität Stuttgart, Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik (IEH), Stuttgart, Deutschland, michael.beltle@ieh.uni-stuttgart.de

Kurzfassung

Im Rahmen des Netzausbaus der Übertragungsnetze in Deutschland gewinnt die Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) zunehmend an Bedeutung. Unter anderem das Repowering bestehender Trassen ist hier von Interesse, da keine zusätzlichen baulichen Maßnahmen und Eingriffe in das Landschaftsbild notwendig sind. Dabei werden ein oder mehrere AC-Systeme einer bereits vorhandenen Drehstromtrasse durch ein HGÜ-System ersetzt. Die räumliche Nähe zwischen 380 kV bzw. 110 kV Drehstromsystemen und einer HGÜ erfordert es, mögliche bisher unbekannt Wechselwirkungen beider Systeme zu betrachten. Freie Ladungsträger der HGÜ (Korona) können in die Leiterseile der AC Systeme einkoppeln. Die Folge ist ein Gleichstrom, der über den Netzkupplerttransformator am Ende der Trasse fließt. Für Transformatoren stellt dieser Fall eine neue, zusätzliche Belastung dar.

Um die Auswirkungen von DC-Belastungen auf Leistungstransformatoren in einem ersten Schritt zu erfassen, werden an einem repräsentativen Versuchsaufbau, bestehend aus zwei 110 / 10 kV, 30 MVA Transformatoren, verschiedene Szenarien mit DC Belastung experimentell untersucht. Aus den gemessenen Strom- und Spannungswerten werden der gesamte Scheinleistungshaushalt und das Hystereseverhalten inklusive (Halbwellen-) Sättigungen der Versuchsobjekte ermittelt und bewertet. Zusätzlich werden Körperschallsensoren eingesetzt, um die Effekte unsymmetrischer Hysterese-kurven auf die Magnetostraktion und die resultierenden mechanischen Schwingungen zu untersuchen.

Abstract

The enlargement of the German grid is essential for the energy transition. One aspect is the implementation of high voltage direct current (HVDC) systems into the grid. In practice, the repowering of existing lines is gaining interest because neither additional structural measures nor unfavourable changes of the landscape are necessary. Repowering replaces one or more AC-systems on a line with HVDC systems. The close distances between 380 kV, 110 kV AC and HVDC on the same rod can lead to interactions between the systems. Charge carriers originated by HVDC corona might couple into the conducting rope of AC systems causing a DC to ground through the star point of connected power transformers.

In this contribution the effects of additional DC-stress on power transformers are measured. Therefore, a setup consisting of two 110 / 10 kV, 30 MVA transformers connected on 110 kV is tested using different DC offsets on the 110 kV phases. The electric response of the transformers is determined by the resulting non-active power and the hysteresis loop including half-wave-saturation. Changes in the mechanical oscillation given by the DC dependent magnetostriction are determined by solid borne sound sensors on transformer tank walls.

1 Einleitung

Gleichströme sind ein Effekt, der meist nicht in Zusammenhang mit Transformatoren assoziiert wird. In der Energieübertragung hält jedoch die Gleichstromübertragung aufgrund der höheren Leistungsdichte bei gleichem oder sogar kleinerem Raumbedarf der Freileitungsübertragungstrassen (nicht der Konverterstationen) weltweit eine zunehmende Bedeutung. In Deutschland stellt die Kombination konventioneller 380 kV AC-Systeme und HGÜ-Systemen mit Übertragungsleistungen im Gigawatt-Bereich einen integralen Bestandteil der Energiewende dar: den Energietransport von zukünftigen Großzeugern (Windparks) im Norden zu Verbraucherzentren in Süddeutschland. Neben dem Trassenneubau dedizierter HGÜ Verbindungen wird auch die Realisierung von sogenannten Hybrid-Grids diskutiert. Dazu werden bestehende Trassen mit mehreren AC-Systemen umgerüstet, indem ein AC-System gegen ein HGÜ-System ausgetauscht wird

[1], [2], [3]. Dabei können beispielsweise durch Koronaeffekte Wechselwirkungen zwischen dem HGÜ System und den bestehenden AC-Systemen entstehen [3], [4]. Ladungsträger koppeln auf die AC-Leiter ein und können, abhängig vom Erdungskonzept der Sternpunkte über den Transformator gegen Erde abfließen. Daraus resultiert in den einzelnen Phasen eine Gleichstromkopplung abhängig von Mastgeometrie, Wetter, etc., die bis zu einigen mA pro km Trassenlänge betragen kann. Daher ist eine genauere Untersuchung der Auswirkungen von DC auf betroffene Transformatoren erforderlich. Typischer Weise können Netzkuppler der 380 kV-Ebene betroffen sein, aber auch Transformatoren für 110 kV, wenn die unterste Reihe der Trasse mit entsprechenden 110 kV-Systemen bespannt ist. Die möglichen Auswirkungen auf Leistungstransformatoren wurden bisher meist anhand kombinierter elektrisch- magnetischer Modelle betrachtet [5], [6]. Der in diesem Beitrag durchgeführte Feldversuch soll eine

empirische Grundlage bilden und die grundlegende Modellvorstellung verifizieren.

2 Physikalische Grundlagen

Überlagerte Gleichströme in den Wicklungen resultieren in einer Beaufschlagung des Kerns mit einem magnetischen Gleichfluss Φ_{DC} , welcher den ursprünglichen Arbeitspunkt des magnetischen Kreises verändert, siehe **Bild 1**. Im Extremfall steigt der Maximalwert des Gesamtflusses $\Phi(t)$ über den Knickpunkt der Magnetisierungskurve, siehe Betriebspunkt B. Der Kern kann in diesem Bereich nicht weiter aufmagnetisiert werden und die Permeabilität sinkt auf μ_0 , was zu einem plötzlichen Anstieg des Stroms $i(t)$ führt.

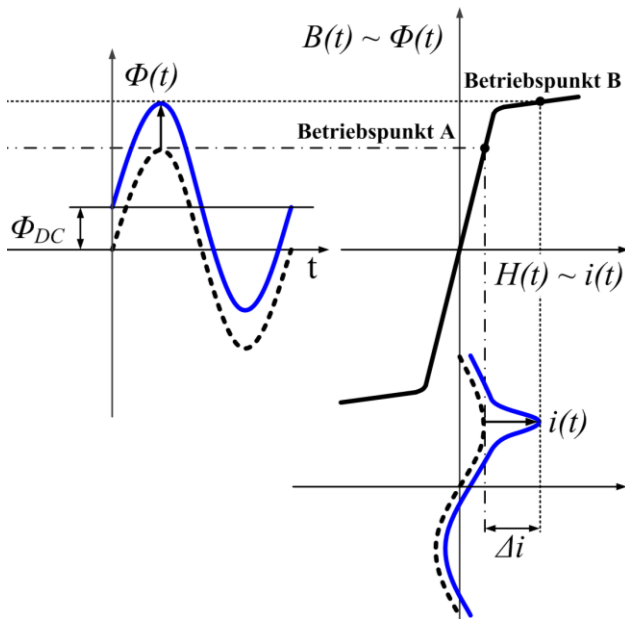


Bild 1 Verschiebung des Arbeitspunkts auf der B-H-Kurve von Elektroblechen durch einen Gleichanteil im magnetischen Fluss.

Die weiteren Effekte können steigende Leerlaufverluste [5], ein veränderter Bedarf an Verschiebungsblindleistung und Gesamtblindleistung sein, sowie eine Änderung im Verhalten der mechanischen Schwingungen (Vibrationen) [7]. Alle Effekte beruhen auf dem magnetischen Verhalten des geblechten Kerns bei überlagertem DC. Im betrachteten Fall wird das Verhalten von Transformatoren mit Dreischenkeln untersucht, die häufig als Netzkuppltransformatoren in der 110 kV Ebene eingesetzt werden.

3 Versuchsaufbau

Für die Messung von DC bedingten Einflüssen auf Leistungstransformatoren werden zwei baugleiche 30 MVA Leistungstransformatoren vom Typ Yy0 110/10 kV verwendet. Die Transformatoren werden in back-to-back Verbindung verschaltet, dafür werden sie auf der Ober-

spannung (OS) miteinander verbunden. Der erste Transformator in der Reihenschaltung wird auf der Unterspannung (US) mit einem mobilen Prüffeld bei 50 Hz und stufenlos verfahrbarer Versorgungsspannung angeregt. Der zweite Transformator wird über die OS-seitige Verbindung vom ersten Transformator versorgt (Magnetisierung) und auf 10 kV Ebene offen betrieben (Leerlauf), siehe **Bild 2**. Für alle Messung befinden sich die Stufenschalter beider Betriebsmittel in Mittelstellung (10M).

Der Sternpunkt des zweiten Transformators ist starr geerdet. Der Sternpunkt des ersten kann über eine Erdungsstange nach Bedarf gemasst werden (in **Bild 2** als Schalter dargestellt). Beide Sternpunkte sind miteinander über ein separates Kabel verbunden. In der Verbindung kann über ein Labornetzteil ein Gleichstrom eingepreßt werden, der über die Sternpunkte fließt und sich in den einzelnen Phasen der OS Wicklung abhängig von den jeweiligen ohmschen Widerständen aufteilt. Zum Schutz des Netzteils ist parallel zu dessen Klemmen eine Kapazität eingebaut, die einen niederimpedanten Pfad für Wechselströme bietet.

In der Hochspannungsverbindung beider Transformatoren können in jeder Phase beliebig Leistungswiderstände eingebaut werden, um die DC Verteilung entsprechend unsymmetrisch einstellen zu können. In Serie sind zusätzlich in jeder Phase 0,1 Ω Widerstände zur Shuntmessung der hochspannungsseitigen Ströme geschaltet. Der zeitliche Verlauf der Spannung kann über kapazitive Teiler gemessen werden. Um die Wechselwirkungen auf die Einspeisende 10 kV-Ebene betrachten zu können, werden auch die 3-phasigen Ströme und Spannungen des mobilen Prüffelds gemessen.

Bei unsymmetrischen Belastungen ist zu beachten, dass aufgrund der back-to-back Verschaltung die Testtransformatoren symmetrisch vertauscht verbunden werden. Phase R des ersten Transformators wird mit Phase T des zweiten verbunden und umgekehrt. Die mittlere Phase S ist bei beiden durchverbunden. Für eine einheitliche Nomenklatur gilt die Namenskonvention Phase 1-3, wie sie in **Bild 2** deklariert ist.

3.1 Messablauf

Für die Messungen werden abhängig vom untersuchten Fall (symmetrische oder unsymmetrische DC-Belastung) entsprechende Leistungswiderstände in den einzelnen Phasen eingesetzt. Im nächsten Schritt wird der Gesamtgleichstrom $I_{DC,ges}$ eingestellt. Die AC-Versorgung ist hierbei nicht aktiv. $I_{DC,ges}$ wird so lange nachgeregelt bis der eingepreßte Strom annähernd konstant bleibt. Erst dann wird die AC-Versorgung zugeschaltet und die Spannung schrittweise erhöht und gewartet, bis sich die Wechselströme nicht mehr ändern. Erst dann werden im quasi-stationären Zustand die Messungen von Strom- und Spannungsdaten im Zeitbereich aufgezeichnet und ausgewertet.

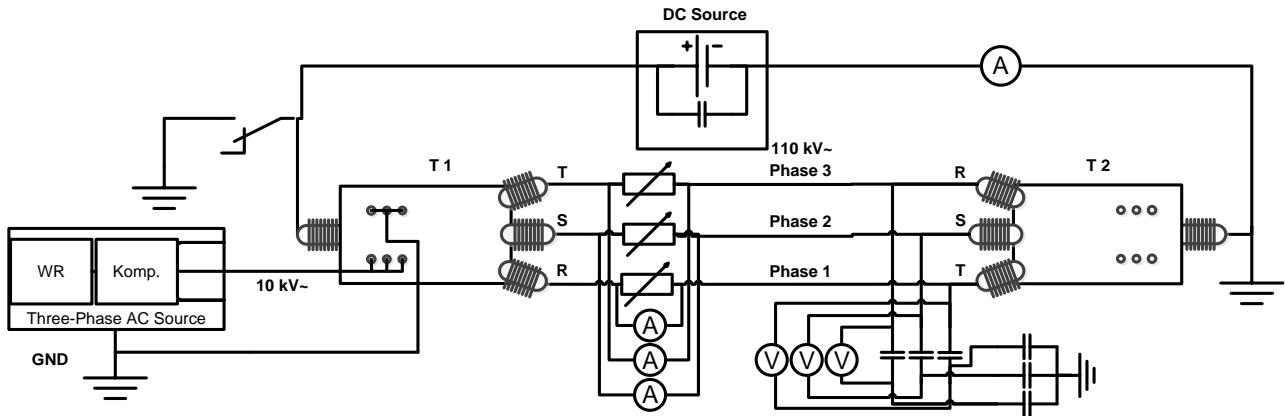


Bild 2 Schematische Darstellung des Messaufbaus bestehend aus zwei 30 MVA Transformatoren (110 / 10 kV) in back-to-back Verschaltung. Die AC-Versorgung ist vom mobilen Prüffeld mit Wechselrichter (WR) und kap. Kompensation (Komp.) bereit gestellt. Die DC-Einspeisung ist über die 110 kV Sternpunkte realisiert. Auf der OS findet die 3-phasige Spannungsmessung und Strommessung (über Shuntwiderstände) statt.

3.2 Betrachtete Szenarien

Prinzipiell werden zwei verschiedene Szenarien untersucht.

- Die symmetrische Belastung mit DC, bei der sich die Ströme im eingeschwungenen Zustand nur in Abhängigkeit der ohmschen Wicklungswiderstände aufteilen.

und

- Unsymmetrische Belastungsfälle, bei denen die Verteilung des I_{DC} durch zusätzliche Widerstände auf der OS-Seite einstellbar ist, was eine gezielte Verteilung des DC ermöglicht.

Bei bisher bekannten Phänomenen, die zu einer DC-Belastung von Transformatoren führen, ist eine symmetrische Belastung wahrscheinlicher. Dazu zählen Einkopplungen von Gleichströmen durch den Sternpunkt, erzeugt durch naheliegende Industrieanlagen, die beispielsweise über Inverter verfügen. Die DC-Quelle speist in diesem Fall nicht auf die OS-Seite ein sondern auf die Masseverbindung, was dem hier verwendeten Messaufbau prinzipiell entspricht.

Die Wechselwirkungen von HGÜ und AC-Systemen innerhalb eines Hybrid-Grids sind im Allgemeinen nicht für alle Phasen gleich [4], daher ist hier eher eine unsymmetrische DC Belastung zu erwarten.

Tabelle 1 zeigt für symmetrische Szenarien den Gesamtgleichstrom durch den Sternpunkt und die Gleichströme in den einzelnen Phasen sowie den Bezug auf den Magnetisierungsstrom $I_{mag,OS}$ des zweiten Transformators (Mittelwert über alle Phasen).

Tabelle 1 Betrachtete Szenarien mit symmetrischem Gleichstrom in allen Phasen.

DC _{ges} / mA	DC je Phase / mA	Bezogen auf $I_{mag,OS}$
630	210	90%
2400	800	343%

Tabelle 2 zeigt die verschiedenen unsymmetrischen Belastungsfälle. In den ersten beiden Fällen ist die relative Stromverteilung identisch, mit einem erhöhten Strom auf einer äußeren Phase. In Fall 3 ist die mittlere Phase stärker mit DC belastet und in Fall 4 und 5 sind die mittlere und eine äußere Phase höheren Gleichströmen ausgesetzt als die zweite äußere Phase.

Tabelle 2 Betrachtete Szenarien mit unterschiedlichen Gleichströmen in den einzelnen Phasen.

Nr.	DC _{ges} / mA	DC Phase 1	DC Phase 2	DC Phase 3 / mA
1	219	22	22	175
2	600	60	60	480
3	369	37	295	37
4	370	22	174	174
5	600	36	282	282

4 Magnetisches Verhalten unter DC

Die Untersuchungen von DC auf den magnetischen Kern werden anhand der Hysteresekurven von OS und US durchgeführt. Zu beachten ist, dass die gemessenen US Ströme aus der Summe beider Transformatoren (Magnetisierungsströme $I_{magUS,T1}$ und $I_{magUS,T2}$ bestehen. Die im Folgenden dargestellten Diagramme zeigen auf der x-Achse den Strom (in A, proportional der Durchflutung) und auf der y-Achse die Stammfunktion der zeitgleich gemessenen Spannung (in Vs, proportional zum induzierten Fluss Φ). Damit ergibt sich ein der tatsächlichen Hysterese proportionales Bild, da die Windungszahl nicht mit eingerechnet wird.

4.1 Symmetrische DC Belastung

Der DC Kreis wird ohne zusätzliche Widerstände auf der OS betrieben. **Bild 3** zeigt zwei Hysteresekurven bei sym. DC-Einspeisungen mit $I_{DC,ges} = 630$ mA (rechts) und

$I_{DC,ges} = 2,4 \text{ A}$ (links). Erkennbar ist die Parallelverschiebung der Hysteresekurven, die aufgrund der Verteilung des Gleichstroms je Phase $1/3$ von $I_{DC,ges}$ beträgt. Es treten keine Sättigungseffekte auf, obwohl die Ströme für $I_{DC,ges} = 2,4 \text{ A}$ wesentlich über $I_{mag,OS}$ liegen. Die Erklärung zu diesem Verhalten liefert das magnetische Ersatzschaltbild des Dreischenkeltransformators. Da in allen Phasen, die aus dem DC resultierenden Gleichflüsse $\phi_{gleich,U,V,W}$ auch die gleiche Orientierung in den Schenkeln aufweisen, können sie sich nicht über den geblechten Kern schließen sondern nur über Streupfade. Dadurch werden auch Wechselwirkungen mit dem Kern minimiert. Die Hysteresekurve der OS-Wicklungen wird daher nur aufgrund des DC parallel verschoben, jedoch nicht wesentlich verformt. Die Messung bestätigt damit qualitativ das in [5] und [6] entwickelte elektrisch-magnetische Modell eines Dreischenkeltransformators.

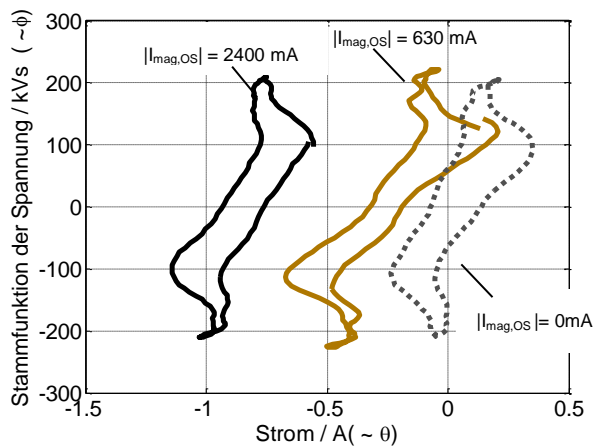


Bild 3 Vergleich der Hysteresekurven über eine Periode von Phase 2 ohne und mit symmetrischem DC. Gemessen auf der 110 kV-Ebene. Angegeben ist $I_{DC,ges}$ im Sternpunkt.

Die Hysteresekurven der 10 kV-Einspeisung sind in **Bild 4** dargestellt. Die Erhöhung von $I_{DC,ges}$ hat keinerlei Einfluss auf die Magnetisierungskennlinie der einzelnen Phasen, die Hysteresekurven beider Versuche sind deckungsgleich.

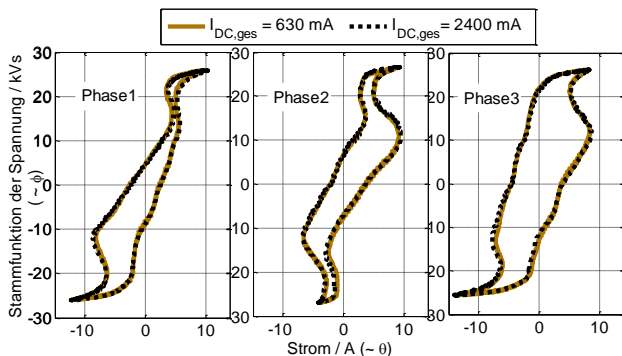


Bild 4 Vergleich der Hysteresekurven über eine Periode der US Seite (10 kV) mit symmetrischem DC, getrennt nach Phasen.

4.2 Unsymmetrische DC Belastung

Bei unsymmetrischer DC-Belastung hat der magnetische Gleichfluss die Möglichkeit, die Masche durch den Kern zu schließen und entsprechende Wechselwirkungen hervorzurufen. **Bild 5** zeigt die Hysteresekurven von OS und US für einen erhöhten I_{DC} in der äußeren Phase (3) gemäß Szenario 2 aus **Tabelle 2**. Deutlich ist auf der OS die Halbwellensättigung von Phase 3 erkennbar. Die nicht betroffenen Phasen zeigen keine Sättigungseffekte, jedoch entstehen auch hier im ersten Quadranten Verzerrungen. Grund hierfür ist die Wechselwirkung der Phasen der OS untereinander, die über die Kopplung durch den gemeinsamen Kern entsteht. Auf der US ist ein symmetrischer Sättigungseffekt der betroffenen Phase 3 erkennbar. Die anderen Phasen zeigen keine wesentliche Beeinflussung. Die verringerten Maximalwerte in der Stammfunktion der Spannungen (OS und US) lassen sich auf die erhöhten Ströme während der Sättigung zurückführen, die vom Prüffeld nur noch bei Spannungen kleiner der Nennspannung U_N bereitgestellt werden können.

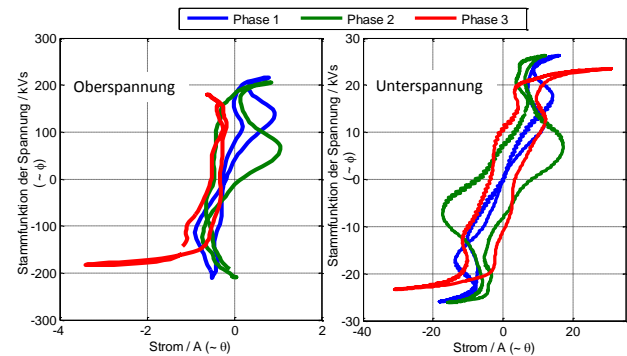


Bild 5 Vergleich der Hysteresekurve von OS und US bei unsymmetrischer Belastung der Phasen, vgl. Szenario 2 aus **Tabelle 2** (äußere Phase 3 belastet).

Bild 6 zeigt die Hysteresekurven für Szenario 3, bei dem der größte Anteil von $I_{DC,ges}$ durch die mittlere Phase fließt, was zu einem Halbwellensättigungseffekt in Phase 2 führt. In diesem Szenario treten auf der US keine erkennbaren Beeinflussungen auf. Die Wechselwirkungen auf die US hängen nicht nur von I_{DC} ab, sondern auch von der Geometrie der DC-Belastung (mittlere oder äußere Phase).

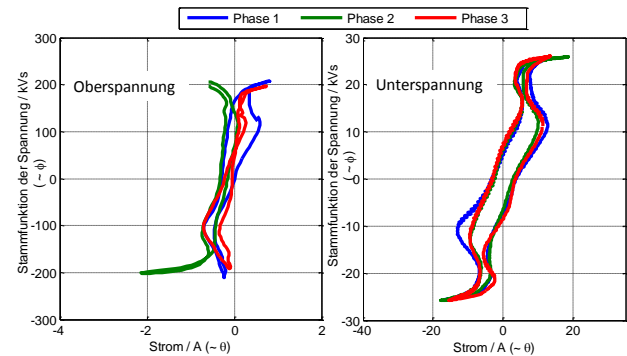


Bild 6 Vergleich der Hysteresekurve von OS und US bei unsymmetrischer Belastung der Phasen, vgl. Szenario 3 aus **Tabelle 2** (mittlere Phase belastet).

Für das dritte unsymmetrische Szenario in **Bild 7** sind eine mittlere und eine äußere Phase mit dem gleichen erhöhten DC beaufschlagt, die zweite äußere Phase (hier: Phase 1) sieht einen geringen DC. $I_{DC,ges}$ durch den Sternpunkt ist gleich groß wie in der Betrachtung von **Bild 5**.

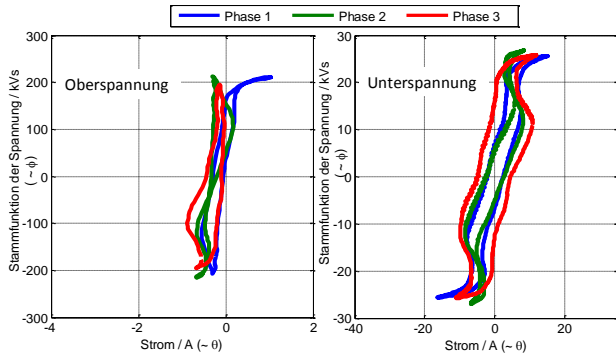


Bild 7 Vergleich der Hysteresekurve von OS und US bei unsymmetrischer Belastung der , vgl. Szenario 5 aus **Tabelle 2**.

Die Auswirkungen auf der OS und der US sind verglichen mit den vorangegangenen Unsymmetrien gering. In Phase 1 scheint der Kurvenverlauf nahe dem Knickpunkt der Hysterese zu kommen, da durch diesen Kernschkel der Hauptrückfluss der magnetischen Gleichflüsse von Phase 2 und 3 erfolgt. Auf die US hat dieses Szenario keine signifikanten Rückwirkungen.

5 Leistungsbedarf bei DC

Durch die nichtlinearen Effekte des Kerns treten Harmonische der Ströme und ggf. auch der Spannungen auf. Daher ist eine Betrachtung von Wirk- und Blindleistungen hier nicht ausreichend. Die gesamte Scheinleistung setzt sich gemäß [8] zusammen aus:

$$S^2 = (P_1^2 + Q_1^2) + P_H^2 + D_I^2 + D_U^2 + D_H^2 \quad (1)$$

- P_1 Grundschiwingungswirkleistung
- Q_1 Verschiebungsblindleistung
- P_H Wirkleistung der Harmonischen
- D_I Verzerrungsblindleistung des Stromes
- D_U Verzerrungsblindleistung der Spannung
- D_H Verzerrungsblindleistung der Harmonischen

P_1 und Q_1 sind die aus der Wechselstromlehre bekannten Größen für Wirk- und Blindleistung bei Nennfrequenz. Alle höherfrequenten Leistungsanteile werden durch die zusätzlichen Summanden abgebildet.

5.1 Symmetrische DC Belastung

Für die symmetrischen Szenarien aus **Tabelle 1** zeigt **Bild 8** die verschiedenen quadratischen Leistungsanteile und die gesamte quadrierte Scheinleistung der OS. Hauptsächlich ist eine Erhöhung von D_I zu erkennen, da gemäß [8] für die Berechnung auch der Gleichstromanteil einfließt. Q_1 und P_1 ändern sich unwesentlich.

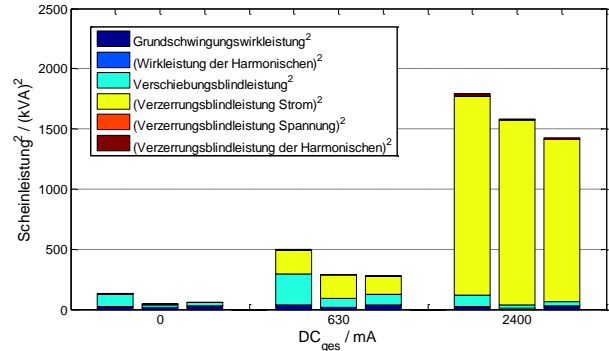


Bild 8 Quadratische Scheinleistung der einzelnen Phasen bei symmetrischer Belastung mit Gleichstrom (OS).

5.2 Unsymmetrische DC Belastung

Für die Szenarien aus **Tabelle 2** ist der Leistungshaushalt in **Bild 9** dargestellt. Wie im symmetrischen Fall sind in den Phasen mit hohem DC-Anteil die D_I -Komponenten stark erhöht. Mit steigendem I_{DC} in einer einzelnen Phase steigen auch die Leistungsbezüge für Q_1 und im Extremfall auch für D_U und D_H . P_1 zeigt eine geringe Abhängigkeit in den verschiedenen Szenarien. Verglichen mit dem Leerlauf mit $I_{DC,ges} = 0$ erhöht sich der Scheinleistungshaushalt in allen Szenarien teilweise signifikant.

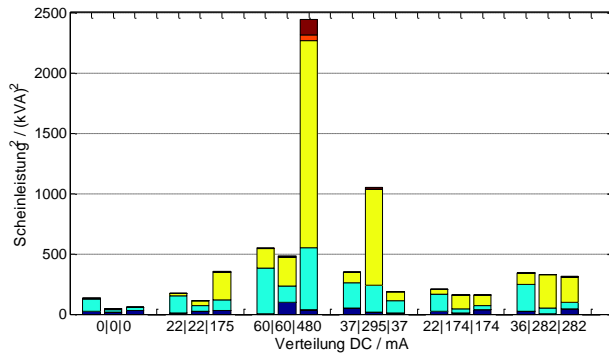


Bild 9 Quadratische Scheinleistung der einzelnen Phasen bei unsymmetrischer Belastung mit Gleichstrom (OS).

6 DC-Detektion mittels Schwingungsanalyse

Zusätzlich zu der in **Bild 2** gezeigten Messtechnik ist auf den Stirnseiten der Kessel unter den 110 kV-Durchführungen ein Körperschallsensor angebracht, der die Kesselschwingungen aufnimmt. Die Schwingungen werden im Zeitbereich gemessen und im Frequenzbereich ausgewertet.

Typischer Weise entstehen bei überlagerten magnetischen Gleichflüssen Wechselwirkungen im Kern, die auf die richtungsabhängige Deformation (Butterflykurve) der Magnetostriktion [9] einwirkt. Dadurch werden neben der mechanischen Grundfrequenz $f_{mech} = 100$ Hz (gerade Harmonische von 50 Hz) eine zusätzliche Subharmonische $f_{mech,sub} = 50$ Hz und entsprechende ungerade Harmonische erzeugt. Im Folgenden wird der Einfluss verschiedener DC Szenarien auf die Verteilung der Signalleistung von Körperschallschwingungen untersucht. Für die Unter-

suchung werden die Signalleistungen gerader Harmonischer von 50 Hz summiert, die unter normalen Betriebsbedingungen im Transformator auftreten (100 Hz, 200 Hz, ...). Separat werden alle ungeraden harmonischen Anteile, die durch die DC Überlagerung entstehen (50 Hz, 150 Hz, 250 Hz, ...) aufaddiert. Betrachtet werden Frequenzanteile bis 1 kHz, alle höher frequenten Signalleistungen sind als restliche Leistung zusammengefasst. Diese Anteile sind in den untersuchten Messungen gering (< 2 %), daher ist die Begrenzung auf 1 kHz zulässig.

6.1 Mechanische Schwingungen bei symmetrischer Belastung

Bild 10 zeigt die Aufteilung der Frequenzanteile der Leerlaufmessung ohne DC und zum Vergleich die bereits vorgestellten Szenarien für symmetrische Belastungen. Den wesentlichen Anteil (> 95 %) der gesamten Signalleistung stellen in allen Fällen die geraden Harmonischen dar. Wie bereits diskutiert, ist die Wechselwirkung aufgrund des hohen Streuflusses gering, wenn durch alle Wicklungen der gleiche DC-Anteil fließt. Dementsprechend gering ist auch die Auswirkung auf mechanische Schwingungen.

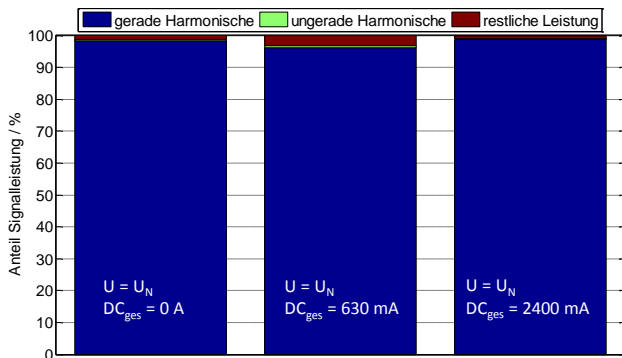


Bild 10 Aufteilung der Signalleistung bei Leerlauf ohne DC und bei symmetrischer DC Belastungen gemäß **Tabelle 1**. Leistungsanteile getrennt nach geraden und ungeraden Harmonischen von 50 Hz. Messung am speisenden Transformator T1.

6.2 Mechanische Schwingungen bei unsymmetrischer Belastung

Im Vergleich zum Leerlauf ohne DC ändert sich das relative Schwingungsverhalten signifikant, wenn unsymmetrische Szenarien betrachtet werden. **Bild 11** zeigt die Verteilung auf gerade und ungerade Harmonische mit deutlichem Anstieg der ungeraden Anteile. Allgemein kann festgestellt werden, dass ungerade Harmonische mit $I_{DC,ges}$ ansteigen, insbesondere wenn dabei der Strom hauptsächlich durch eine einzelne Phase fließt. In **Bild 11** zeigt der zweite Balken von links den hierbei entstehenden Extremfall. Die ungeraden Harmonischen tragen mit knapp 40% zu der gesamten Signalleistung bei. Der in [7] gezeigte Zusammenhang zwischen (unsymmetrischen) DC und Kesselschwingungen kann anhand der durchgeführten Messungen bestätigt werden.

Eine einfache Möglichkeit der DC-Detektion kann daher mit gewissen Einschränkungen durch die Körperschallmessung erfolgen. Da die Installation von Messequipment

normaler Weise im Betrieb erfolgen kann, ermöglicht die Schwingungsanalyse eine erste Abschätzung, ob eine DC Belastung des Betriebsmittel vorliegen könnte oder nicht.

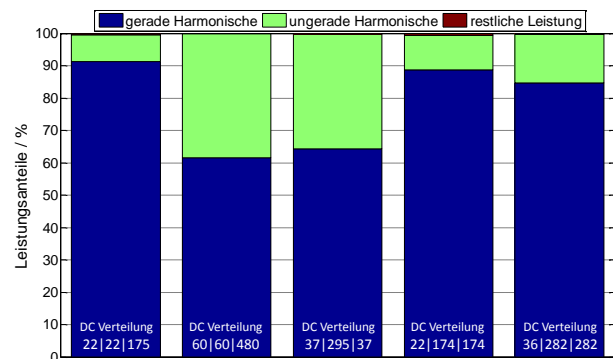


Bild 11 Aufteilung der Signalleistung bei Leerlauf und unsymmetrischer DC-Belastungen gemäß **Tabelle 2**. Leistungsanteile getrennt nach geraden und ungeraden Harmonischen von 50 Hz. Messung am speisenden Transformator T1.

7 Zusammenfassung & Ausblick

Der Einfluss von überlagerten Gleichströmen der OS auf Leistungstransformatoren mit Dreischenkelnkern kann in zwei Kategorien eingeteilt werden. Symmetrische Belastungen, bei denen alle Phasen den gleichen I_{DC} erfahren und unsymmetrische Fälle mit beliebiger Verteilung des DC. Der magnetische Fluss von symmetrischen Gleichströmen wird aufgrund der fehlenden Rückflussschenkel in den Streufluss gedrängt, so dass bei allen betrachteten symmetrischen Szenarien das Betriebsverhalten des Kerns nicht signifikant beeinflusst wird. Für unsymmetrische DC Szenarien kann sich der magnetische Gleichfluss zumindest teilweise über den Kern schließen. Die Folge sind Beeinflussungen der Hysterese Kurven der OS (Halbwel lensättigungseffekte) und der US (symmetrische Sättigungen), des Scheinleistungshaushaltes auf der OS und der mechanischen Schwingungen des Transformators. Die Ausprägung und Stärke der Beeinflussungen hängen vom Wert des gesamten Gleichstromes $I_{DC,ges}$ und von der Verteilung auf die einzelnen Phasen ab. Prinzipiell sind die entstehenden Effekte umso stärker, je größer der Strom durch eine einzelne Phase wird. Die Beeinflussung des Scheinleistungsbedarfs kann ggf. dazu führen, dass auch angrenzende Netzabschnitte, die nicht mit DC beaufschlagt sind trotzdem durch die AC-Wechselwirkungen mittelbar betroffen sein können. Um das Verhalten von Fünfschenkeltransformatoren unter DC beurteilen zu können, sind die durchgeführten Untersuchungen zu wiederholen. Mit Vorliegen beider Messreihen ist eine Verifizierung und Weiterentwicklung von Simulationsmodellen beider Kerngeometrien möglich. Eine Grundlagenuntersuchung unterschiedlicher Elektroblechen bei überlagertem magnetischem Gleichfluss erscheint sinnvoll. Mit diesen Erkenntnissen könnte ggf. das Betriebsverhalten unter DC mit ausreichender Genauigkeit vorhergesagt und mit einer geeigneten Betriebsmittelauslegung während des Designprozess gegengesteuert werden.

8 Literatur

- [1] Deutsche Energie Agentur, DENA Netzstudie II Integration erneuerbarer Energien in die deutsche Stromversorgung im Zeitraum 2015-2020 mit Ausblick 2025, Deutschland, 2011.
- [2] VDE-Studie, Stromübertragung für den Klimaschutz. Potentiale und Perspektiven einer Kombination von Infrastrukturen, VDE ETG, Juni 2011.
- [3] Cigré Working Group B 2.41, „Cigre Brochure 583 Guide to the Conversion of Existing AC Lines to DC Operation,“ May 2014.
- [4] B. Ruesk, J. Wulff, K.-H. Weck et al, „Ohmic coupling between AC and DC circuits on hybrid overhead lines,“ in *Cigré 2013*, Auckland, 2013.
- [5] M. Beltle, M. Siegel, M. Gnädig, S. Tenbohlen, U. Sundermann, F. Schatzl, „Beeinflussung von Leistungstransformatoren in Hybridnetzen,“ in *Internationaler VDE- ETG Kongress*, Berlin, 2013.
- [6] M. Heindl, M. Beltle, S. Tenbohlen, U. Sundermann, F. Schatzl, „Betriebsverhalten von Leistungstransformatoren in Hybridnetzen,“ in *VDE Smart-Grid Kongress*, Stuttgart, 2012.
- [7] M. Heindl, M. Beltle, M. Reuter, D. Schneider, S. Tenbohlen, D. Oyedokun, T. Gaunt, „Investigation of GIC related Effects on Power Transformers using Modern Diagnostic Methods,“ in *International Symposium on High Voltage Engineering*, Hannover, 2011.
- [8] IEEE Power & Energy Society - Power System Instrumentation and Measurements Committee, IEEE Standard 1459-2010: Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions, New York: IEEE, 2010.
- [9] International Electrotechnical Commission, IEC, „IEC 60076-10-1 Determination of Sound Levels Application Guide,“ IEC, 2005-10.