



Neuartiges Vorgehen für das umfassende Prüfen von Phasenschiebertransformatoren

Übersicht

Phasenschiebertransformatoren werden eingesetzt, um die Übertragungsleistung, die Zuverlässigkeit und die Betriebssicherheit von Übertragungsnetzen zu verbessern. In diesem Artikel wird ein neuer Ansatz zum Prüfen der Betriebsparameter während Werkabnahme- und Vor-Ort-Prüfungen behandelt.

Zusammenfassung

Phasenschiebertransformatoren werden eingesetzt, um den Wirkleistungsfluss in einem vermaschten Übertragungsnetz zu steuern und somit die Übertragungsleistung, die Zuverlässigkeit und die Betriebssicherheit im Netz zu verbessern. Wie für jedes andere Betriebsmittel im Netz sind Informationen über den technischen Zustand für einen zuverlässigen Betrieb essentiell. Dies gilt verstärkt für Phasenschieber, da sie oft an kritischen Verbindungen zwischen unterschiedlichen Regelzonen eingesetzt werden. Im Mittelpunkt dieses Artikels steht ein neuer Ansatz für die Durchführung von Diagnoseprüfungen an Phasenschiebertransformatoren. Anhand mehrerer Fallbeispiele werden die Funktionsweise und die charakteristischen Betriebszustände eines Phasenschiebers erläutert.

Keywords: Netzwerk, Leistungsflusssteuerung, Transformator, Phasenschieber, Phasenschiebertransformator-Prüfung.

1. Einleitung

Moderne Stromversorgungssysteme sind in der Regel nicht mehr auf ein Land oder eine Region beschränkt und bestehen häufig aus mehreren miteinander verbundenen Netzen aus verschiedenen Ländern. In diesen „grenzüberschreitenden“ Systemen können entweder mehrere Netzabschnitte über synchrone oder nicht-synchrone Verbindung miteinander verbunden sein. Derart miteinander verbundene Stromversorgungssysteme haben den Vorteil, dass sie auf gegenseitige Reserven zurückgreifen können, was im Zeitalter der dezentralen Energieerzeugung (Distributed Energy Resources – DER) eine zunehmend wichtigere Rolle spielt.

Gleichzeitig gibt es auch Nachteile von miteinander verbundenen Netzen, wie z. B. ungeplante Ringflüsse, die auftreten können, wenn der Wirkleistungsfluss zwischen Teilabschnitten nicht regulierbar ist. Diese Ringflüsse belegen einen Teil der Verbindung und reduzieren so die verfügbare Übertragungsleistung des Netzes, was zu erhöhten Verlusten führen kann. In kritischen Situationen kann dies einen Versorgungsengpass auf der Verbraucherseite zur Folge haben. Diesem Phänomen kann durch die Verwendung von Phasenschiebertransformatoren (PST), auch einfach Phasenschieber genannt, in Synchronverbindungen entgegengewirkt werden. Phasenschieber können den Leistungsfluss im installierten Zweig steuern und damit die Verteilung der Leistungsflüsse zwischen den Netzabschnitten beeinflussen. Dieser Artikel erläutert das Funktionsprinzip eines PST und beschreibt einige Herausforderungen, die typischerweise während Vor-Ort- und Werkabnahmeprüfungen an diesem speziellen Transformatortyp auftreten.

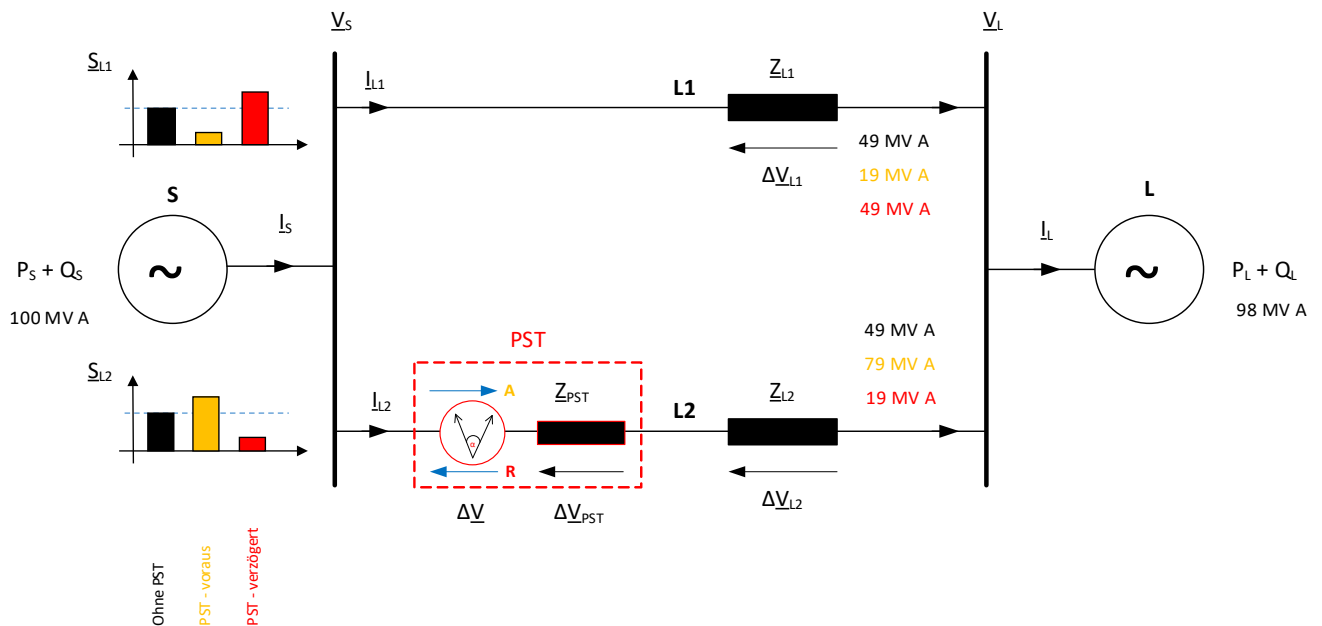


Abbildung 1. Einphasiges Ersatzschaltbild: doppelte Einspeisung mit Leistungssteuerung über PST

2. Prinzip der Leistungsregelung

Das Grundprinzip der Leistungsregulierung mit einem PST kann anhand eines vereinfachten Netzes erklärt werden. Wir betrachten eine Quelle (S) mit 100 MVA, die an eine Last (L) über zwei parallele Stromleitungen (L1 und L2) mit den jeweiligen Leitungsimpedanzen (Z_{L1} und Z_{L2}) verbunden ist. Die Verluste entlang der Leitung werden durch die Leitungsparameter bestimmt und verursachen eine Phasenverschiebung zwischen den quell- und lastseitigen Spannungen. Da Z_{L1} und Z_{L2} gleich sind, ergibt sich eine gleichmäßige Verteilung der übertragenen Leistung auf beide Leitungen. In einem solchen System verteilt sich die Leistung immer entsprechend der Leitungsparameter und kann nicht geregelt werden. PST führen zu einer zusätzlichen Phasenverschiebung zwischen Last und Quelle und steuern auf diese Weise den Leistungsfluss entlang beider Leitungen.

Grundsätzlich ist es je nach PST-Typ möglich, den Fluss der Wirk- und Blindleistung (abhängig vom Aufbau des PST) zu steuern:

$$S = \frac{|U_S| \cdot |U_L|}{X_L} \cdot \left[\sin(\alpha) + j \cos(\alpha) - \frac{|U_L|}{|U_S|} \right] \quad (1)$$

Abhängigkeit der übertragenen Wirk- und Blindleistung (1) unter Berücksichtigung des PST:

$$S_{PST} = \frac{|U_S| \cdot |U_L|}{X_L + X_{PST}} \cdot \left[\sin(\alpha + \varphi) + j \cos(\alpha + \varphi) - \frac{|U_L|}{|U_S|} \right] \quad (2)$$

Dabei ist: U_S – quellenseitige Spannung „S“; U_L – lastseitige Spannung „L“; X_L – Blindwiderstand der Leitung (Kreis), in der der PST installiert wurde; X_{PF} – interner PST-Blindwiderstand; α – Phasenwinkel zwischen Systemen.

In dem gezeigten Beispiel wird durch den Phasenschieber eine negative Verschiebung in einem Zweig eingeprägt. Dazu wird der PST in die Negativstellung gebracht, was die in diesem Zweig übertragene Leistung reduziert. Da die Summe der über beide Leitungen übertragenen Leistung gleich bleibt, steigt die Leistung im anderen Zweig an. Durch die Positionierung des PST in Positivstellung ist die Energieverteilung komplett entgegengesetzt zum vorherigen Fall. Diesmal steigt die Leistung, im Zweig des PST an, während die Leistung im Zweig ohne PST sich reduziert.

Bisher wurde im obigen Beispiel nur die Steuerung der Wirkleistung durch Anpassung des Phasenwinkels besprochen. Diese Art der Regelung wird auch symmetrische Regelung oder Querregelung genannt. Darüber hinaus ist auch eine Steuerung des Blindleistungsflusses durch eine Veränderung der Übersetzung zwischen der Quell- und Lastspannung (Längsregelung) möglich. PST, die sowohl die Wirk- als auch Blindleistung steuern, werden als asymmetrische Phasenschieber oder Schrägregler bezeichnet. In diesem Artikel beschränken wir uns auf symmetrische PST, bzw. Querregler.

3. Funktionsprinzip symmetrischer Phasenschieber

Das Grundkonzept der Querregelung basiert auf einer zusätzlichen Spannung, die zur im Hauptpfad vorhandenen Spannung mit einer Phasenverschiebung von 90° addiert wird (Querspannung $\Delta \underline{U}$). Abhängig von der Größe und Polarität der induzierten Spannung kann der Phasenwinkel eingestellt werden (Abbildung 3). Hierfür werden PST verwendet, die in der Regel aus zwei Transformatoren bestehen: Eine Serieneinheit und eine Erregereinheit, die so miteinander verbunden sind, dass eine Phasenanpassung zwischen der Quell- und Lastseite möglich ist. Das Konstruktionsbeispiel für eine symmetrische Ausführung mit Kessel wird in Abbildung 2 dargestellt.

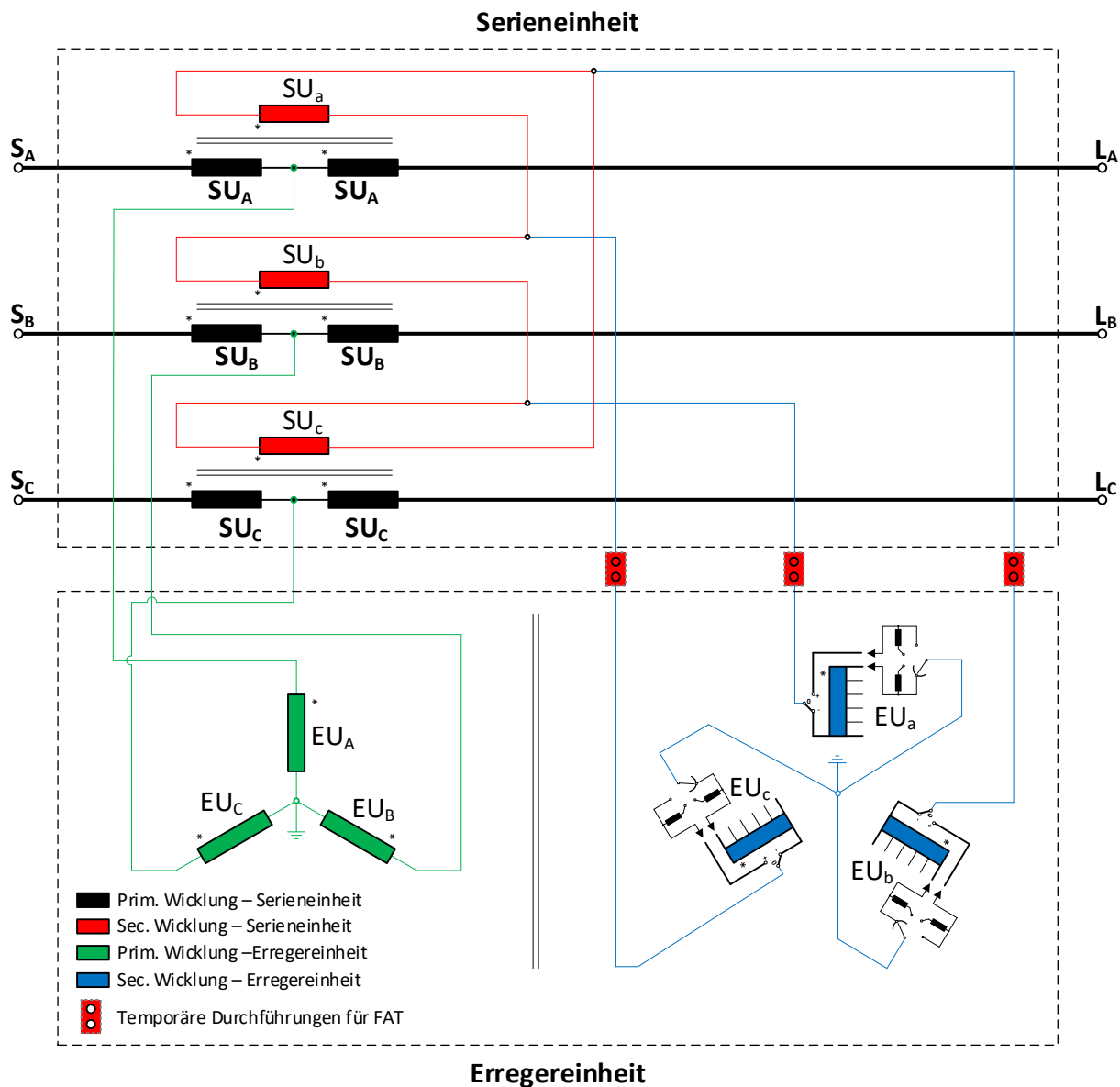


Abbildung 2. Schematischer Aufbau eines symmetrischen Phasenschiebers

3.1 Serieneinheit

Die Serieneinheit (Series Unit – SU) ist das Hauptelement des PST. Ihre Primärseite ist in Reihe mit der Leitung zwischen Quelle (Source – „S“) und Last (Load – „L“) geschaltet. In einem symmetrischen PST besteht die Primärwicklung SU aus zwei Teilen, die symmetrisch zwischen den „S“ und „L“ aufgeteilt sind. Zwischen den beiden Teilen der Primärwicklung ist die SU mit der Primärwicklung der Erregereinheit (Exciting Unit –EU) verbunden (Abbildung 2). Die im Dreieck verschaltete Sekundärwicklung der SU ist mit der Sekundärwicklung der EU verbunden. So kann eine zur Versorgungsspannung um 90° phasenverschobene Regelspannung induziert werden.

3.2 Erregereinheit

Zweck der Erregereinheit (EU) ist es, die von der Primärwicklung der SU abgeleitete Spannung in der Amplitude und dem Phasenwinkel so zu transformieren, dass sie durch die Sekundärwicklung der SU erneut induziert werden kann. Deshalb ist die Primärwicklung der EU zwischen den symmetrisch getrennten Spulen der SU-Primärwicklung geschaltet (Abbildung 2). Diese Verbindung ermöglicht die Phasenanpassung zwischen „S“ und „L“, ohne die Amplitude der lastseitigen Spannung U_L zu verändern. Um die Höhe der Querregelspannung und damit den Phasenwinkel zwischen der Quell- und Lastseite des PST einzustellen, ist die Sekundärwicklung mit einem Laststufenschalter (OLTC) ausgestattet.

Zur Veranschaulichung des Prinzips der Querregelung sind in Abbildung 4 mehrere Vektordiagramme für unterschiedliche Betriebszuständen dargestellt. Die angegebenen Spannungswerte beziehen sich auf einen symmetrischen PST mit einer Nennspannung von 400 kV und einem Einstellwinkel von $\pm 20^\circ$ [1]. Die Farben der Wicklungen in Abbildung 2 entsprechen den Farben der Vektoren in Abbildung 3.

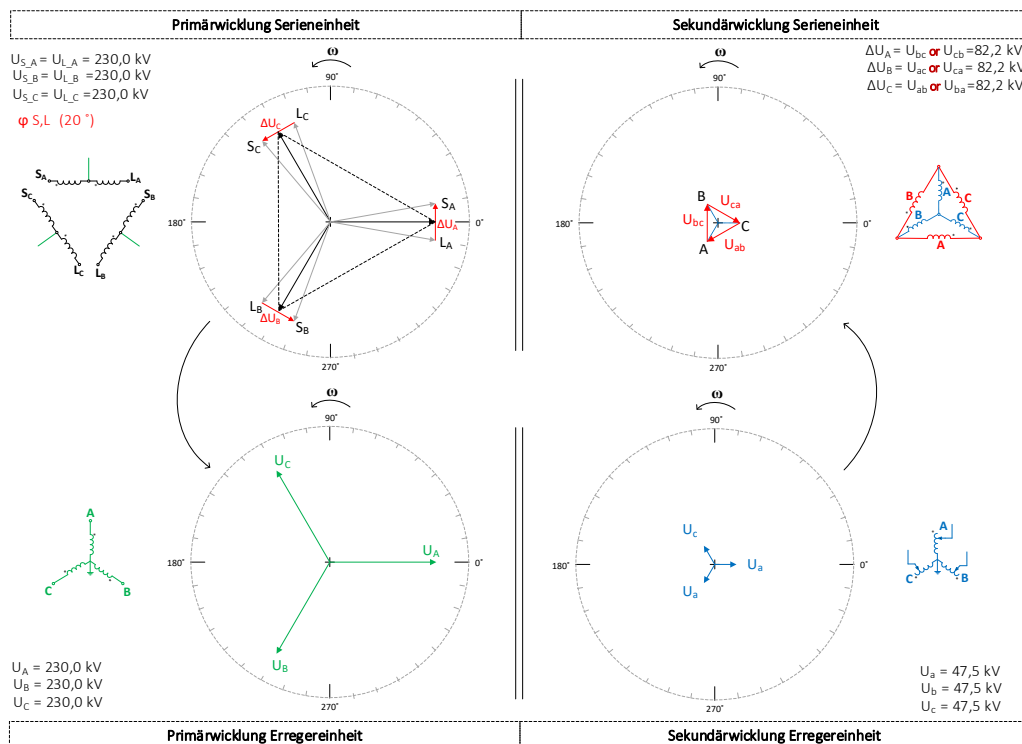


Abbildung 3. Vektordiagramm der Spannungen in verschiedenen Transformationsphasen für den PST-entladen-Zustand

4. Prüfen von Phasenschiebertransformatoren

Bei vor Ort installierten PSTs sind die Anschlüsse der Erregereinheit meist nicht zugänglich. Während der Werkabnahme werden üblicherweise temporäre Durchführungen für Prüfungszwecke installiert. Diese Möglichkeit gibt es bei Vor-Ort-Prüfungen nur selten. Deshalb sind bestimmte Prüfungen der Erregereinheit in der Regel nur im Werk möglich. Tabelle 1 führt eine Reihe elektrischer Prüfungen auf, die zu den Standardabnahmeprüfungen für die Serien- und die Erregereinheit gehören. Es muss allerdings darauf hingewiesen werden, dass Tabelle 1 nur Prüfungen enthält, die im Kontext dieses Artikels relevant sind. Relevant bedeutet an dieser Stelle, dass sie sich dafür eignen, das charakteristische Verhalten der PSTs zu demonstrieren, und auch üblicherweise Teil der Werkabnahme- oder Vor-Ort-Prüfungen sind. Es ist jedoch keine vollständige Liste aller möglichen Prüfungen. In unserem Fall ist der Prüfling ein symmetrischer IIIId-/YNyn0-Transformator mit 500 MVA, 230 kV und einem Regelbereich zwischen -10° und $+10^\circ$. Dies bedeutet, dass die Primärwicklung der Serieneinheit in Reihe (III) und die Sekundärwicklung im Dreieck ohne Phasenverschiebung geschaltet ist. Die Primär- und Sekundärseite der Erregereinheit sind in einer Stern-Stern-Schaltung mit Neutralleiter (YNyn) und ohne Phasenverschiebung miteinander geschaltet. Die Phasenverschiebung von -10° bis $+10^\circ$ zwischen den quell- und lastseitigen Klemmen wird nur durch die Einprägung der Querspannung erreicht.

Tabelle 1. Ausgewählte elektrische PST-Prüfungen für Werkabnahme- (FAT) und Vor-Ort-Prüfungen

Prüfung	Serieneinheit	Erregereinheit
Spannungsübersetzung	FAT / Vor-Ort	FAT
Magnetisierungsstrom	FAT / Vor-Ort	FAT
Phasenverschiebung	FAT / Vor-Ort	FAT
DC-Wicklungswiderstand	FAT / Vor-Ort	FAT
Dynamischer DC-Wicklungswiderstand (OLTC Scan)	FAT / Vor-Ort	FAT

4.1 Prüfen der Serieneinheit

Analog zu Übersetzungsmessung der verschiedenen Stufen eines üblichen Netztransformators ist es bei Phasenschiebern wichtig, die spezifizierte Phasenverschiebung zwischen der Quell- und Lastseite zu prüfen.



Abbildung 4. Einmaliges Anschließen des dreiphasigen Transformator-Prüfsystems zur Durchführung aller elektrischen Prüfungen aus Tabelle 1.

In diesem Fall wird ein tragbares dreiphasiges Transformator-Prüfsystem (Abbildung 4) verwendet, um für alle drei Phasen gleichzeitig die Phasenverschiebung (Abbildung 5), die Übersetzung (Abbildung 6) und den Erregerstrom zu messen. Die Ergebnisse bestätigen, dass der Betriebsbereich zwischen $+10^\circ$ und -10° mit einer Schrittweite von $0,87^\circ$ ohne Last liegt.

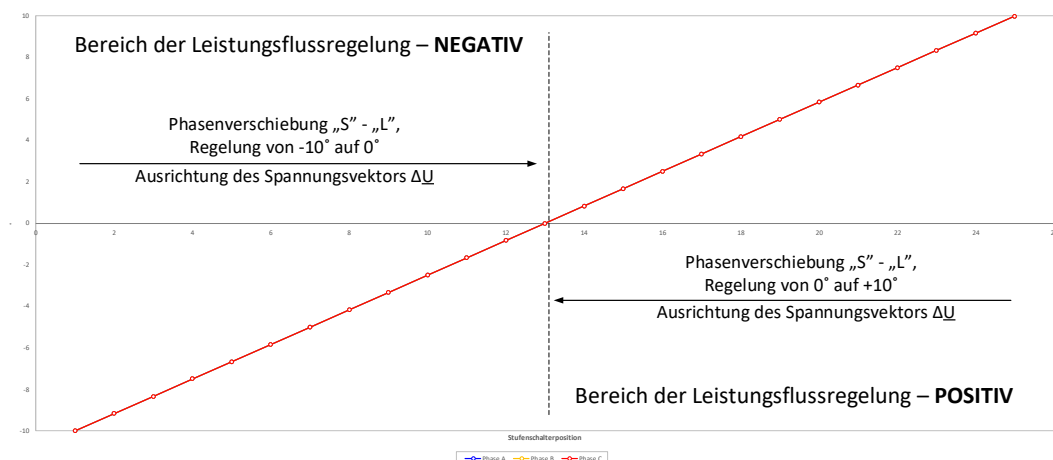


Abbildung 5. Die Ergebnisse der Phasenverschiebungsmessungen „S“ - „L“ als Funktion der OLTC-Position der Erregereinheit

Während der Inbetriebnahme besteht eine große Herausforderung für Prüfengeieure darin zu ermitteln, ob sich der PST im positiven oder negativen Regelbereich befindet – also ob der PST den Leistungsfluss im jeweiligen Zweig verstärkt oder blockiert (Abbildung 1). Dies ist Voraussetzung für die Definition der Quell- und Lastseite. Mithilfe einer dreiphasigen Prüfung lässt sich das Phasenverhältnis der Spannungen und Ströme auf Quell- und Lastseite bequem in einem Vektordiagramm darstellen, das dann als Grundlage für die Bestimmung des Betriebszustands dient. Tabelle 2 zeigt ein Beispiel für die Ergebnisse bei unterschiedlichen Stufen.

Tabelle 2. Die Ergebnisse der Phasenverschiebungsmessungen „S“ - „L“ für drei typische Positionen

Kanal	Phasenverschiebung 10°		Phasenverschiebung 0°		Phasenverschiebung -10°	
	Wert	Phase	Wert	Phase	Wert	Phase
UA „S“	250 V	30°	250 V	30°	250 V	30°
UB „S“	250 V	-90°	250 V	-90°	250 V	-90°
UC „S“	250 V	150°	250 V	150°	250 V	150°
UA „L“	250 V	20°	250 V	30°	250 V	40°
UB „L“	250 V	-100°	250 V	-190°	250 V	-80°
UC „L“	250 V	140	250 V	150°	250 V	160°

Die vektorielle Darstellung der Messergebnisse zeigt eindeutig an, welche Spannungsvektoren der „S“- oder „L“-Seite voraus- bzw. hinterherlaufen. Durch diese Visualisierung der dreiphasigen Messergebnisse wird die bisher notwendig Oszilloskop-Messung hinfällig, was die Gesamtprüfzeit zusätzlich erhöhen würde.

Durch die Übersetzungsmessung zwischen der „S“- und „L“-Seite der Serieneinheit kann der Typ des geprüften PST ermittelt werden. Ein konstantes Spannungsverhältnis über den gesamten Phasenverschiebungsbereich (Abbildung 6) deutet auf einen symmetrischen PST hin. Ursache hierfür ist die Tatsache, dass die Spannung ΔU (Abbildung 3) zwischen den symmetrisch aufgeteilten Spulen der Hauptwicklung eingeprägt wird (Abbildung 2). Eine Änderung des Phasenwinkels und des Verhältnisses würde auf eine asymmetrische Regelung hinweisen, d. h. eine Anpassung der Wirk- und Blindleistung.

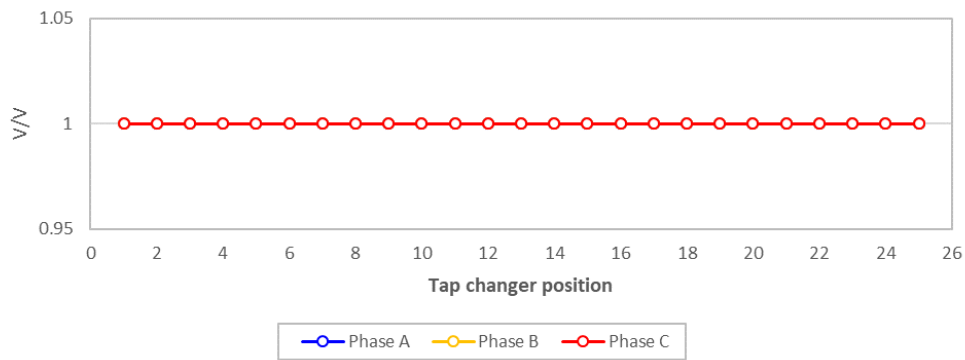


Abbildung 6. Messergebnisse des Übersetzungsverhältnisses „S“ - „L“ der Serieneinheit als Funktion der OLTC-Position der Erregereinheit

4.2 Prüfen der Erregereinheit

Bei der Erregereinheit wird zuerst die Übersetzung auf allen Stufenschalterpositionen gemessen. Durch Änderung des Spannungsverhältnisses der Erregereinheit kann die Höhe der Querspannung und damit die Phasenverschiebung zwischen der Quell- und Lastseite eingestellt werden. Abbildung 7 zeigt, dass die Übersetzung der Positionen 1 bis 12 zwischen 4,52 und 54,19 und für die Positionen 12 bis 25 im umgekehrten Maß schwankt. Zwischen den Positionen 13A bis 13B erfolgt die Umkehr der Polarität der Regelwicklung (Abbildung 8).

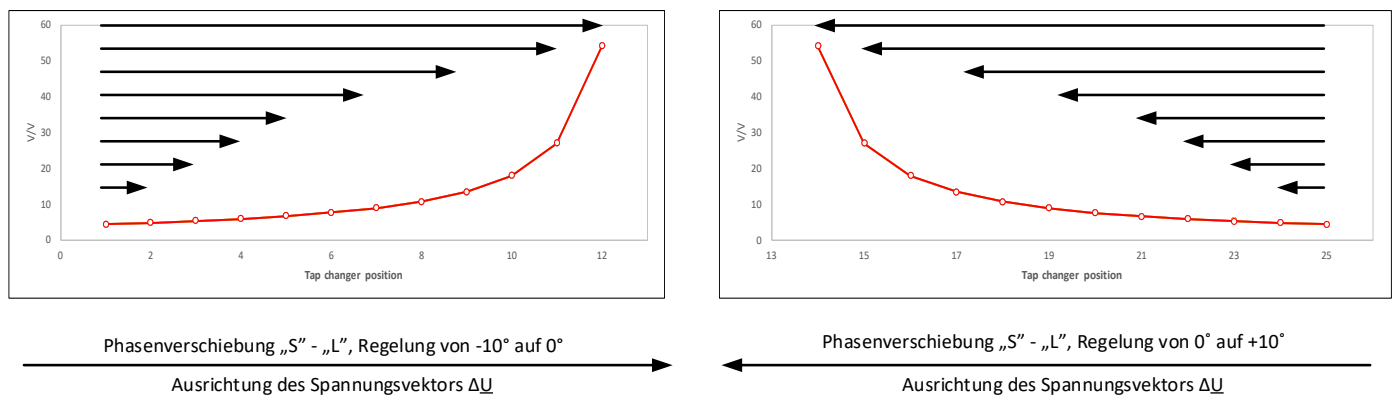


Abbildung 7. Messergebnisse des Spannungswandlers der Erregereinheit als Funktion der OLTC-Position

Auch wenn auf dem Typenschild die Phasenverschiebung der Erregereinheit mit 0 - 0 ° angegeben ist, ist die Änderung in der Polarität eindeutig erkennbar, wenn die Phasenverschiebung zwischen den beiden Wicklungen für die Vektorengruppe 6 - 180 ° gemessen wird (Abbildung 8). Diese Änderung in der Polarität ist notwendig, um den PST entweder im positiven oder negativen Bereich zu betreiben.

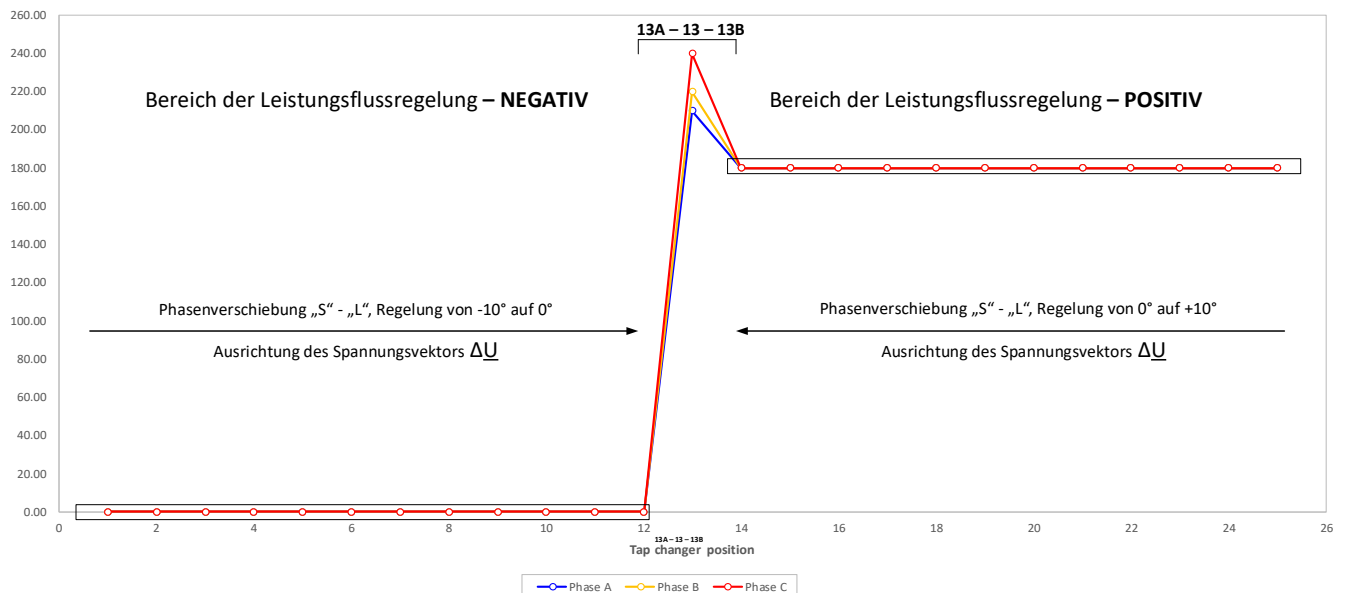


Abbildung 8. Messergebnisse der Phasenverschiebung der Erregereinheit als Funktion der OLTC-Position

Fazit

Phasenschiebertransformatoren (PSTs) sind ein wichtiger Bestandteil im synchronen Betrieb moderner Elektrizitätsversorgungssysteme. Angesichts der sich verändernden Erzeugungsstruktur werden sie wohl künftig eine noch größere Rolle bei der Gewährleistung der Zuverlässigkeit von Stromversorgungsnetzen spielen. Da PSTs in der Regel an kritischen Knoten im Netz installiert werden, ist die für Instandhaltungsmaßnahmen benötigte Zeit sehr kostbar. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass der Einsatz eines dreiphasigen Transformator-Prüfsystems eine sehr schnelle und effiziente Möglichkeit darstellt, die Betriebsparameter eines PST bei der Inbetriebnahme und Instandhaltung vor Ort zu untersuchen. Die Betrachtung eines Fallbeispiels für einen symmetrischen PST hat gezeigt, wie das Funktionsprinzip bestehend aus einer Serien- und Erregereinheit problemlos im Rahmen von Werkabnahmeprüfungen geprüft werden kann. Dasselbe Vorgehen kann auch auf einen asymmetrischen PST angewandt werden.

Literaturverzeichnis

- [1]. T.Bednarczyk, M.Szablicki, A.Halinka, P.Rzepka: Structure of the Automatic Protection of a 2-tank Symmetric Phase Shifting Transformer. Acta Energetica 32/2018
- [2]. IEC 60076-52-1202:2017. Leistungstransformatoren – Teil 57-1202: Ölgefüllte Phasenschieber
- [3]. M.A.Ibrahim, F.P.Stacom: Phase Angle Regulating Transformer Protection. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.9, No. 1, January 1994
- [4]. TESTRANO 600-Benutzerhandbuch. © OMICRON electronics GmbH 2018

Zitate

Das Grundkonzept der Querregelung basiert auf einer zusätzlichen Spannung, die zur im Hauptpfad vorhandenen Spannung mit einer Phasenverschiebung von 90° addiert wird (Querspannung ΔU). Abhängig von der Größe und Polarität der induzierten Spannung kann der Phasenwinkel eingestellt werden.

Während der Werkabnahme werden üblicherweise temporäre Durchführungen für Prüfungszwecke installiert. Diese Möglichkeit gibt es bei Vor-Ort-Prüfungen nur selten, weshalb bestimmte Prüfungen der Erregereinheit in der Regel nur im Werk möglich sind.

In diesem Fall wird ein tragbares dreiphasiges Transformator-Prüfsystem verwendet, um für alle drei Phasen gleichzeitig die Phasenverschiebung, die Übersetzung und den Erregerstrom zu messen.

Während der Inbetriebnahme besteht eine große Herausforderung für Prüfengeure darin zu ermitteln, ob sich der PST im positiven oder negativen Regelbereich befindet – also ob der PST den Leistungsfluss im jeweiligen Zweig verstärkt oder blockiert (Abbildung 1).

Eine Änderung des Phasenwinkels und des Verhältnisses würde auf eine asymmetrische Regelung hinweisen, d. h. eine Anpassung der Wirk- und Blindleistung.

Biografie



Cornelius Plath hat ein Diplom in Wirtschaftsingenieurwesen mit der Fachrichtung Elektrische Energietechnik von der RWTH Aachen in Deutschland. Während seines Studiums hat er an mehreren, von der Branche finanzierten Forschungsprojekten im Bereich der Zustandsbewertung von elektrischen Betriebsmitteln am Institut für Hochspannungstechnik gearbeitet. 2010 kam er als Applikationsingenieur zu OMICRON, 2016 kam der Wechsel ins Produktmanagement. Er hat international umfassende Erfahrung gesammelt und hat sich auf die elektrische Diagnose von Leistungsschaltern und Transformatoren spezialisiert.



Tomasz Bednarczyk hat ein Diplom in Elektrotechnik von der Schlesischen Technischen Universität (2015). Zurzeit arbeitet er an seiner Doktorarbeit am Institut für „Electrical Power Engineering and Systems Control“. Seine Forschungstätigkeiten fokussieren sich auf die Analyse des Betriebszustands von Phasenschiebern unter normalen und störbehafteten Betriebsbedingungen, um den richtigen Betrieb des Schutzsystems zu prüfen. Beruflich kümmert er sich um das Prüfen von primären und sekundären Anlagenbetriebsmitteln. Seit 2017 arbeitet er für OMICRON electronics GmbH als Applikationsingenieur.



Adam Jaros hat einen Abschluss in Elektrotechnik (Fakultät: Electrical Motors and Transformers) der Technischen Universität Łódź (2003). Zu Beginn seiner beruflichen Laufbahn (2002) arbeitete er als Ingenieur im Prüffeld im Bereich Leistungstransformatoren für ABB in Łódź. Seit 2009 ist er hauptverantwortlich für das Prüffeld im Bereich Leistungstransformatoren bei ABB.

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.