

Erfahrungen bei der Inbetriebnahme und Prüfung von Differenzialschutzeinrichtungen für Phasenschiebertransformatoren

T. Hensler, F. Fink*, H. Mitter†

*OMICRON electronics GmbH, Österreich, thomas.hensler@omicronenergy.com, †Vorarlberger Energienetze GmbH, Österreich

Suchwörter: Phasenschiebertransformatoren, Transformator-Differenzialschutz, Schutzprüfung

Zusammenfassung

Aufgrund des steigenden Bedarfs zur Steuerung des Wirkleistungsflusses in den Energienetzen werden heutzutage immer häufiger Phasenschiebertransformatoren (Querregler) installiert. Der wichtigste Schutz für Transformatoren ist der Differenzialschutz. Um die Anforderungen an die Selektivität zu erfüllen, muss ein Differenzialschutz für Phasenschiebertransformatoren eine zusätzliche Phasenverschiebung berücksichtigen, da diese insbesondere bei zweipoligen Fehlern außerhalb des Transformators einen Differenzialstrom in der fehlerfreien Phase erzeugt. Dass ein Schutzrelais mit solchen Situationen umgehen kann, muss bei der Inbetriebnahme verifiziert werden. Wie die Relais für einen Betrieb mit Phasenschiebertransformatoren die Stabilität gewährleisten, ist von Hersteller zu Hersteller unterschiedlich gelöst. In jedem Fall muss sich jedoch der Differenzialschutz abhängig von der jeweiligen tatsächlichen Phasenverschiebung, welche dem Relais über Binäreingänge signalisiert wird, anpassen. In diesem Dokument werden verschiedene Ansätze für unterschiedliche Typen von Phasenschiebertransformatoren (z.B. Einkern- und Zweikernausführung) erörtert und evaluiert. Das korrekte Schutzverhalten muss bei der Inbetriebnahme von Relais für Phasenschiebertransformatoren verifiziert werden. Mit Hilfe einer simulationsbasierten Prüfsoftware, welche in der Lage ist, die Phasenverschiebungen für die einzelnen Stufenschalterstellungen des Transformators im Detail nachzubilden, können solche Prüfungen komfortabel und mit dem notwendigen Detailgrad durchgeführt werden.

1 Einführung

Die Energiewende hat in den letzten Jahren zu umfangreichen Veränderungen im elektrischen Netz geführt. Durch die Integration einer Vielzahl von erneuerbaren Energiequellen hat sich der Wirkleistungsfluss im Netz erheblich verändert. Erfolgte früher der Wirkleistungsfluss meist von der höheren Spannungsebene zur niedrigeren Spannungsebene hin, ist es heute so, dass Verteilnetze auch in die Übertragungsnetze einspeisen können. Außerdem hat sich in vielen Ländern, beispielsweise in allen Ländern der EU, auch das Marktumfeld für den Energiehandel geändert, was zu einer noch größeren Dynamik beim elektrischen Wirkleistungsfluss führt.

Sowohl die Betreiber von Übertragungsnetzen als auch die Verteilnetzbetreiber möchten den Wirkleistungsfluss soweit wie irgend möglich steuern können. Dies kann durch Ändern des Stromphasenwinkels mit Hilfe von Phasenschiebertransformatoren erfolgen. Obwohl ein solcher Phasenschiebertransformator für ein Versorgungsunternehmen eine große Investition darstellt, zahlt sich dies aufgrund der herrschenden Dynamik im Strommarkt innerhalb weniger Jahre aus.

Zur Erläuterung der Arbeitsweise von Phasenschiebertransformatoren möchten wir zunächst noch einmal die Grundlagen der Übertragung von Wirkleistung über Übertragungsleitungen anreißen. Bei einem vereinfachten Leitungsmodell, bei dem die ohmschen Verluste vernachlässigt sind, wird der Wirkleistungsfluss P über eine Stromleitung durch den Blindwiderstand X der Leitung und die Phasenwinkeldifferenz $\varphi_1 - \varphi_2$ zwischen den beiden Leitungsenden entsprechend der nachfolgenden Gleichung (1) bestimmt:

$$P = \frac{V_1 V_2}{X} \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (1)$$

Durch Einführen einer zusätzlichen Phasenverschiebung δ kann der Wert wie folgt (2) verändert werden:

$$P = \frac{V_1 V_2}{X} \sin(\varphi_1 - \varphi_2 + \delta) \quad (2)$$

Das wichtigste Schutzprinzip für Leistungstransformatoren ist der Differenzialschutz. Der Differenzialschutz basiert auf einer Auswertung der Differenz der Ströme auf beiden Seiten des Transformators. Durch Einführen einer variablen Phasenverschiebung für den Strom kann der Differenzwert beeinflusst werden. Um die Anforderungen bezüglich Selektivität und Stabilität einzuhalten, muss dies durch den Schutz berücksichtigt werden. Die größte Herausforderung für das Schutzrelais tritt bei einem außenliegenden zweipoligen Fehler auf. Die Phasenverschiebung des Transformators verursacht hierbei nämlich auch einen Differenzialstrom in der fehlerfreien Phase. Da der Stabilisierungsstrom für diese Phase ziemlich gering ist, kann eine solche Situation zu einer Auslösung des Relais führen, obwohl der Differenzialschutz in einem solchen Fall eigentlich stabil sein sollte.

Für die Lösung dieses Problems und die Gewährleistung der Stabilität des Schutzes verwenden die einzelnen Relaishersteller unterschiedliche Ansätze. Das Differenzialschutzelement muss in der Lage sein, sich entsprechend der variablen Phasenverschiebung des

Transformators anzupassen. Die Signalisierung der aktuellen Phasenverschiebung zum Schutzrelais erfolgt mit Hilfe von Binärkontakten des Stufenschalters.

2 Arbeitsweise von Phasenschiebertransformatoren

Das Prinzip des Phasenschiebertransformators basiert auf der Einführung einer variablen Phasenverschiebung zur Steuerung des Wirkleistungsflusses in einem bestimmten Pfad des Netzes. In den USA werden Phasenschiebertransformatoren meist als "Phase Angle Regulating Transformers" (PAR) bezeichnet, wogegen Sie im Vereinigten Königreich "Quadrature Boosters" (Querregler) genannt werden. In diesem Dokument verwenden wir den Begriff "Phasenschieber".

Die variable Phasenverschiebung erreicht man normalerweise durch Einbringen von um 90° phasenverschobenen Spannungskomponenten aus einer Dreieckwicklung. Die Variation des Betrags erreicht man durch verschiedene Anzapfungen. Das Prinzip eines einfachen Phasenschiebers im dreiphasigen Netz ist in Abbildung 1 dargestellt.

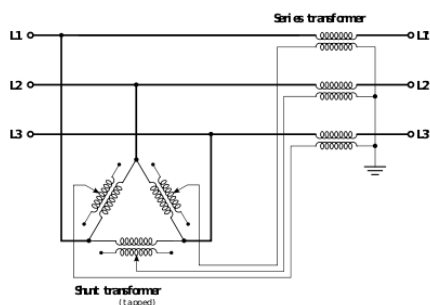


Abbildung 1: Prinzipdarstellung eines Phasenschiebertransformators

Mit Hilfe des im Dreieck verschalteten Erregertransformators erhält man jeweils um 90° gegenüber jeder Phase verschobene Spannungskomponenten. Die Ausgangsspannungen des Erregertransformators werden dann mit Hilfe eines Serientransformators den Spannungen der einzelnen Phasen überlagert. Dieser erzeugt aus der Phasenspannung und den kleineren 90° -Komponenten die vektorielle Summe. Mit Hilfe der Stufen am Erregertransformator lassen sich die Beträge der 90° -Komponenten und somit der Betrag der Phasenverschiebung steuern. Phasenverschiebungen sind sowohl in positiver als auch in negativer Richtung möglich. Die beiden Transformatoreinheiten sind üblicherweise als separate Einheiten in getrennten Kesseln ausgeführt. Jedoch gibt es auch andere Bauarten, bei denen alle Wicklungen auf demselben Kern sitzen (Einkernaussführung), sodass ein einzelner Kessel wirtschaftlicher ist.

Eine weitere gebräuchliche technische Lösung ist die Integration eines Phasenschiebertransformators in einen Leistungstransformator für die Transformation von einer Spannungsebene auf eine andere. Leistungstransformatoren zwischen unterschiedlichen Spannungsebenen besitzen

üblicherweise bereits mehrere Stufen mit geringfügig unterschiedlichen Windungszahlenverhältnissen zur Regulierung der Spannung. In diesem Fall enthält der Transformator dann zusätzlich Stufen für die Phasenverschiebung. Da Stufen für die Spannungsregelung sowohl auf der Oberspannungsseite als auch auf der Unterspannungsseite vorhanden sein können, sitzen die Anzapfungen für die Phasenverschiebung meist auf der entgegengesetzten Seite wie die Stufen für die Spannungsregelung.

Abbildung 2 zeigt als Beispiel einen 410 kV:230 kV YNy0 Transformator mit einer Leistung von 450 MVA. Der Transformator hat auf der Oberspannungsseite einen herkömmlichen Stufenschalter mit 17 Stufen zur Spannungsregelung. Auf der Unterspannungsseite sind 35 Stufen mit Phasenverschiebungen von $-17,22^\circ$ bis $+17,22^\circ$ vorhanden. Die Umschaltung der Polarität der Phasenverschiebung erfolgt bevor die Anzapfungen auf den Stufenschalter (OLTC – On-Load-Tap-Changer) geführt werden durch einen separaten Umschalter (Advance/Retard).

Der gezeigte Transformator ist entsprechend den gestrichelten Linien um die einzelnen Einheiten in zwei separaten Kesseln verbaut. Der Anschluss des Regeltransformators erfolgt am unteren Ende der unterspannungsseitigen Sternwicklung. Die Erzeugung der um 90° phasenverschobenen Spannungen erfolgt durch die Dreieckwicklung des Haupttransformators. Dies ermöglicht eine kostengünstigere Bauweise der Regeleinheit.

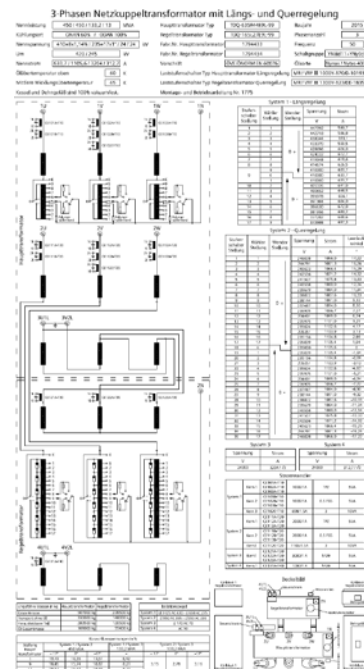


Abbildung 2: 3-phasiger 410 kV:230 kV Leistungstransformator mit Stufen zur Spannungssteuerung auf der Oberspannungsseite und Stufen für die Phasenverschiebung auf der Unterspannungsseite

Das Prinzip der Erzeugung einer Phasenverschiebung ist in Abbildung 3 dargestellt. Der Hauptspannung jeder einzelnen

Phase wird aus den beiden anderen Phasen ein geringer betragsgleicher Teil der Spannung hinzugefügt, sodass letztendlich eine Komponente mit 90° hinzugefügt wird.

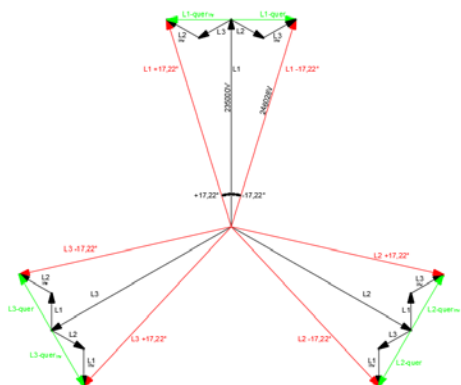


Abbildung 3: Prinzip der Erzeugung einer Phasenverschiebung mittels Spannungskomponenten aus den beiden anderen Phasen

Abbildung 4 zeigt ein zweites Beispiel für einen Phasenschiebertransformator, einen 300 MVA, 220 kV:110 kV Transformator in Einkern/Einzelkessel-Ausführung. Auch dieser Transformator besitzt auf der Oberspannungsseite Anzapfungen zur Spannungsregelung (29 Stufen mit OLTC). Auf der Unterspannungsseite sind 17 Stufen für die Phasenverschiebung vorhanden. Die mögliche Phasenverschiebung reicht von $-15,2^\circ$ bis $+15,2^\circ$.

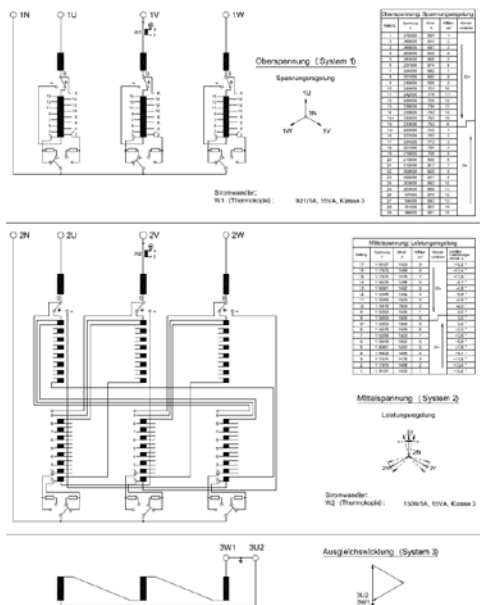


Abbildung 4: 3-phasiger Phasenschiebertransformator 220 kV:110 kV

Bei dieser Wicklungsanordnung wird die Blindspannung mittels Summenbildung aus zwei Komponenten gebildet. Eine Komponente stammt dabei von der eigenen Phase, die andere Komponente hat den doppeltem Betrag und stammt von einer der beiden anderen Phasen. Dies ist im Zeigerdiagramm in Abbildung 5 gezeigt (rechtes Dreieck mit 60°).

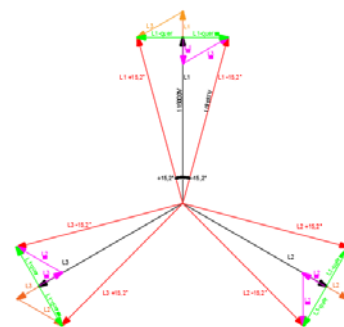


Abbildung 5: Prinzip der Erzeugung einer Phasenverschiebung mittels einer Spannungskomponente aus einer der beiden anderen Phasen

3 Herausforderungen für den Differenzialschutz

Das hauptsächlich verwendete Schutzprinzip für Leistungstransformatoren ist der Differenzialschutz (ANSI 87T). Dabei überwachen Differenzialschutzelemente den Differenzialstrom zwischen der Oberspannungsseite und der Unterspannungsseite und lösen aus, sobald der Wert einen bestimmten Schwellwert überschreitet. Die Stabilisierung des Schutzes erfolgt normalerweise mit Hilfe einer Stabilisierungskennlinie, bei der üblicherweise die Stabilisierungsgröße (Stabilisierungsstrom) den Betrag der Ströme durch den Transformator widerspiegelt. Durch die Stabilisierungskennlinie kann der Schwellwert für den Differenzialstrom in Abhängigkeit des Stabilisierungsstroms gesteuert werden. Höhere Stabilisierungsströme erfordern höhere Schwellwerte.

Die Stabilisierung des Differenzialschutzelementes mittels eines Stabilisierungsstroms sorgt bei vielen während des Transformatorbetriebs eintretenden Situationen für Stabilität, beispielsweise bei einem Messfehler eines Stromwandlers oder im Fall von Stromwandlersättigung. Außerdem kann die Stabilisierungskennlinie durch die Stufen zur Spannungsregelung des Transformators verursachte geringe Unterschiede der berechneten Differenzialströme kompensieren. Es gibt jedoch auch Schutzrelais, welche die aktuelle Stufenschalterstellung bereits berücksichtigen und das Windungszahlenverhältnis entsprechend anpassen.

Für die Berechnung der Stabilisierungsgröße (Stabilisierungsstrom) verwenden die verschiedenen Hersteller ziemlich unterschiedliche Ansätze und Formeln. Manche Schutzrelais ermitteln den Stabilisierungsstrom individuell für jede einzelne Phase, bei anderen Schutzrelais wird hingegen für alle Phasen ein Maximalwert verwendet, um eine gute Stabilität für alle möglichen Schaltgruppen zu erhalten.

Für Transformatoren mit einstellbarer Phasenverschiebung kann der Einfluss der Phasenverschiebung auf Winkel und Betrag nicht mehr durch eine höhere Stabilisierungskennlinie kompensiert werden, da bei Phasenverschiebungen von 20° und mehr das Stromübertragungsverhalten schon fast gleich ist

wie bei einer anderen Schaltgruppe. Um für alle möglichen Betriebszustände des Transformators eine konsistente Stabilität zu erhalten, müssen folglich für den Schutz von Phasenschiebertransformatoren verwendete Differenzialschutzrelais ihr Verhalten entsprechend der aktuellen Stufenschalterstellung anpassen.

Eine besondere Herausforderung für den Differenzialschutz stellen außerhalb des geschützten Transformators liegende zweipolige Fehler dar. Die Auswirkungen der im Transformator erzeugten Phasenverschiebung auf die Mitsystemkomponenten sind wie beschrieben. Auf die Gegensystemströme wird der Phasenwinkel jedoch in der entgegengesetzten Richtung angewendet. Bei zweipoligen Fehlern, wo Gegensystemströme vorhanden sind, verursacht dies eine unsymmetrische Verteilung der Ströme durch den Transformator und sorgt für einen beträchtlichen Differenzialstrom in der fehlerfreien Phase.

Die Stromverteilung im Phasenschiebertransformator bei einem außenliegenden zweipoligen Fehler ist in Abbildung 6 für einen Einkern-Phasenschieber gezeigt.

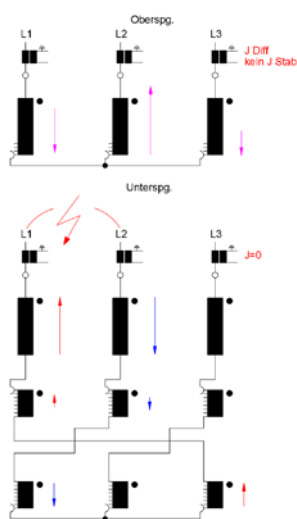


Abbildung 6: Stromverteilung in einem Phasenschiebertransformator bei einem außenliegenden zweipoligen Fehler

Auf der Unterspannungsseite besteht ein außenliegender L1-L2-Fehler, welcher einen Fehlerstrom mit einem Phasenwinkel von 180° in den Phasen L1 und L2 verursacht. Aufgrund der für die Erzeugung der 90° -Komponente für die Phasenverschiebung verwendeten Windungsteile der anderen Phasen, wird jedoch auch in der fehlerfreien Phase auf der Oberspannungsseite ein Strom erzeugt. In den vom Fehler betroffenen Phasen L1 und L2 sind somit die Ströme auf der Oberspannungsseite nicht mehr symmetrisch.

Derselbe Effekt ist auch für andere Wicklungsanordnungen zu beobachten (siehe [2]). Beim Differenzialschutz kann dieser zusätzliche Strom in der fehlerfreien Phase zu einer Differenzialauslösung führen, da in der fehlerfreien Phase kein zusätzlicher Stabilisierungsstrom vorhanden ist. Ein Differenzialschutz für Phasenschiebertransformatoren muss

also mit einer solchen Situation umgehen können und für alle im Betrieb auftretenden Situationen sowie alle Stellungen des Stufenschalters für die Phasenverschiebung ein stabiles Verhalten bei außenliegenden Fehlern gewährleisten. Hierfür verwenden die verschiedenen Relaishersteller unterschiedliche Ansätze. Diese werden im nächsten Kapitel diskutiert.

4 Differenzialschutz für Phasenschiebertransformatoren

Für eine korrekte und exakte Berechnung der Differenzialströme muss ein Differenzialschutz für Phasenschiebertransformatoren die Phasenverschiebungen der Ströme mitberücksichtigen. Ältere Standard-Transformator-Differenzialschutzrelais sind für solche Anforderungen nicht ausgelegt. Trotzdem können auch für den herkömmlichen Transformatorschutz konzipierte Schutzgeräte für den Schutz von Phasenschiebertransformatoren verwendet werden, wenn mit Hilfe einer künstlichen dritten Wicklung die phasenverschobenen Ströme nachgebildet werden. Dieser Ansatz wird recht häufig verwendet und wurde von den diversen Herstellern in Anwendungshinweisen für deren Relais dokumentiert. Die neueste Generation von Transformator-Differenzialschutzrelais ist jedoch bereits für die Verwendung mit Phasenschiebertransformatoren konzipiert. Diese Geräte sind in der Lage, in der Firmware das jeweilige Transformatorverhalten im Relais-Algorithmus zu modellieren.

Als Beispiel für den Ansatz mit einer dritten Wicklung wird nachfolgend eine Lösung für den Schutz eines Phasenschiebertransformators bei einem Versorger in Österreich vorgestellt. Dort wurde ein Differenzialschutzrelais für Dreiwickler-Transformatoren von Schneider Electric verwendet. Die Ströme der Oberspannungsseite sind wie gewohnt auf die Eingänge A geführt. Auf der Unterspannungsseite werden die Sekundärströme der Stromwandler zuerst auf die Eingänge B und dann in Serie durch die Eingänge C für die dritte Wicklung des Dreiwickler-Relais geführt.

Innerhalb des Relais werden andere Parametersätze verwendet, welche die dritte Wicklung so parametrieren, dass das Differenzialschutzelement die phasenverschobenen Komponenten entsprechend der aktuellen Phasenverschiebung des geschützten Transformators berücksichtigt. Für positive Phasenverschiebungen wird die Schaltgruppe Yy0y8 verwendet, für negative Phasenverschiebungen Yy0y4. Außerdem wird im Relais für die dritte Wicklung die Einstellung für das Windungszahlenverhältnis des Stromwandlers so vorgenommen, dass der resultierende Betrag in etwa gleich ist wie die durch den Phasenschiebertransformator eingebrachte 90° -Komponente.

Mit Hilfe von Binäreingangskontakten des Stufenschalters, welcher die Stufen für die Phasenverschiebung auf der Unterspannungsseite steuert, wird das Relais zwischen den verschiedenen Parametersätzen umgeschaltet. Wichtig ist, dass das Relais den Wechsel des Parametersatzes während des

normalen Betriebs des Schutzes unterstützt, für den Wechsel des Parametersatzes keinen Neustart der Firmware erfordert und keine sonstigen Verzögerungen von Schutzfunktionen durch den Parameterwechsel einbringt. Für den beschriebenen Fall reichte die Verwendung von 3 Parametersätzen aus. Für den Abgriff in Neutralstellung +/- wurde Parametersatz 1 benutzt. Dieser Parametersatz verwendet die virtuelle dritte Wicklung überhaupt nicht. Für die Stufenschalterstellungen 1 bis 7 für positive Phasenverschiebungen wurde Parametersatz 2 verwendet, für die Schalterstellungen 11 bis 17 für negative Phasenverschiebungen der Parametersatz 3. Dies genügt, um die Stabilitätsanforderungen für alle Schaltkombinationen der Stufen zur Spannungsregelung auf der Oberspannungsseite und der Anzapfungen für die Phasenverschiebung auf der Unterspannungsseite zu erfüllen. Die Umschaltung der Parametersätze erfolgte durch binäre Signale der Stufenschalterstellungen.

Das Verhalten des Schutzes im Fall eines außenliegenden zweipoligen Fehlers kann wie in Abbildung 7 gezeigt durch die Stromverteilung mit der virtuellen dritten Wicklung veranschaulicht werden.

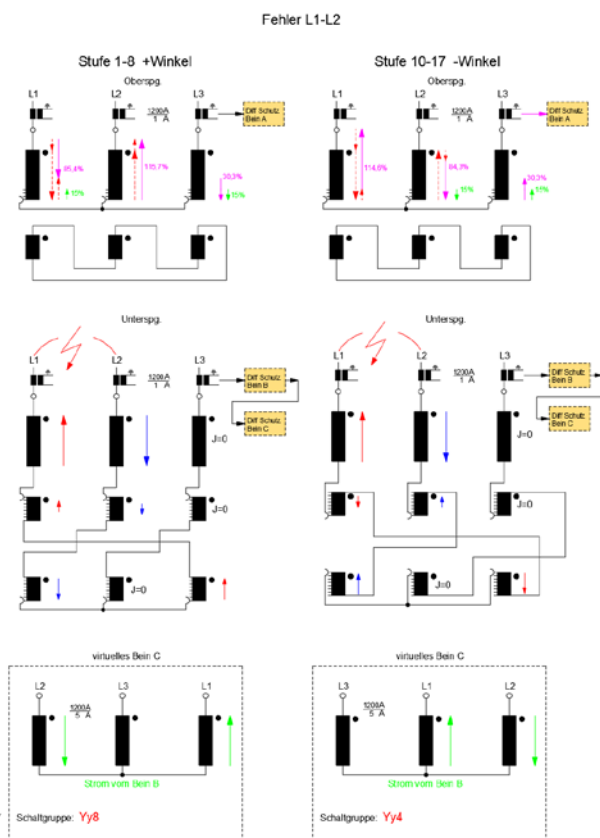


Abbildung 7: Stromverteilung für einen außenliegenden zweipoligen Fehler mit der virtuellen dritten Wicklung

Auf der linken Seite der Abbildung verursacht ein außenliegender zweipoliger Fehler auf der Unterspannungsseite einen Fehlerstrom mit einem Phasenwinkel von 180° in den Phasen L1 und L2. Der Phasenschiebertransformator sollte in einer Schalterstellung für einen negativen Phasenwinkel sein. Hierdurch fließt in

Phase L3 auf der Oberspannungsseite ein Fehlerstrom. Durch Verwendung der virtuellen dritten Wicklung in Schaltgruppe y8 wird dieser Strom in Phase L3 mit einer gegenläufigen Komponente kompensiert. Die rechte Seite in Abbildung 7 zeigt die Situation für die Schalterstellungen für positive Phasenverschiebungen, bei denen die virtuelle dritte Wicklung in Schaltgruppe y4 verschaltet ist.

Das Verhalten des Schutzrelais konnte durch die Stabilisierungskennlinie verifiziert werden. Nun liegen alle Differenzialstromwerte unterhalb der Stabilisierungskennlinie und verursachen auch für Phase L3 keine Auslösung.

In dem anschließenden Beispiel ist der Differenzialschutz für einen 300 MVA, 400 kV:110 kV Phasenschiebertransformator durch ein Transformator-Differenzialschutzrelais von ABB realisiert. Dieser Transformator besitzt auf der Oberspannungsseite 27 Stufen für die Spannungsregelung mit einer Schrittweite von ca. 1,25 %. Auf der Unterspannungsseite sind 21 Stufen mit Phasenverschiebungen von 0° bis $27,34^\circ$ vorhanden. Die Erzeugung der 90° -Komponente für diesen Transformator erfolgt anhand von Wicklungen aus den beiden anderen Phasen. Das Transformator-Differenzialschutzrelais ist wie in Abbildung 8 gezeigt an die Stromwandler angeschlossen.

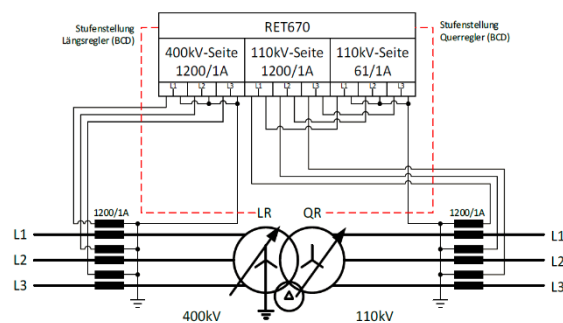


Abbildung 8: Anschlusschema für Transformator-Differenzialschutz bei Verwendung einer virtuellen dritten Wicklung

Auf der 110 kV-Seite sind die Ströme von den 1200 A:1 A-Stromwandlern wieder hintereinander an die Eingänge für Wicklung B und Wicklung C des Relais angeschlossen. Das ABB-Relais unterstützt die Modellierung der Stufen für die Spannungsregelung auf der Oberspannungsseite und passt seine Differenzialelemente entsprechend dem geänderten Windungszahlenverhältnis des Transformators an.

Für die virtuelle dritte Wicklung wird die Stromwandlerübersetzung im Relais auf 61 A:1 A eingestellt. Innerhalb der Logik des Schutzrelais werden diese Eingangsgrößen für die Berechnung der 90° -Stromkomponenten aus den Stromeingängen der virtuellen dritten Wicklung verwendet. Die Berechnung erfolgt mittels logischer Elemente für die Bildung von dreiphasigen Summen (3PH SUM) und als Summe aus zwei Elementen mit vertauschten Phasen, siehe Abbildung 9.

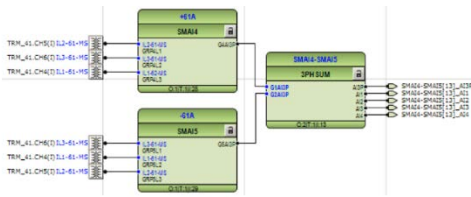


Abbildung 9: Berechnung der 90°-Komponenten für Phasenverschiebungen von 5° mittels logischer Elemente im Relais

Für ein einzelnes Summenelement beträgt die berechnete Größe $\sqrt{3} 61A e^{j90^\circ} = 105A e^{j90^\circ}$. Dies entspricht der 90°-Komponente für eine Phasenverschiebung von 5°. Diese 90°-Komponenten werden dann zu den Stromkomponenten von den Eingängen der Unterspannungswicklung hinzu addiert. Abhängig von der Schalterstellung für die Phasenverschiebung werden hierbei ein oder mehrere 5°-Schritte verwendet werden, siehe Abbildung 10.

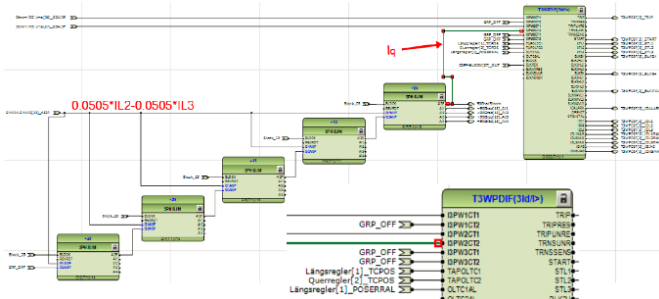


Abbildung 10: Logik für die Aktivierung der logischen 3PH SUM-Elemente in Abhängigkeit der Schalterstellung für die Phasenverschiebung

Die Kommunikation der Schalterstellungen für die Spannungsabgriffe auf der Oberspannungsseite und die Stufen für die Phasenverschiebung auf der Unterspannungsseite gegenüber dem Relais erfolgt mit Hilfe von Binäreingängen der Stufenschaltersteuerung. Im Relais ist mittels binärer logischer Elemente eine zusätzliche Logik zur Verifizierung der korrekten Schalterstellungen implementiert. Diese Logik verifiziert, dass nach einer Umschaltung der Stufe die Schalterstellungen plausibel sind, und überwacht das Zeitverhalten von weiteren Binärkontakten während der Umschaltung. Im Fall eines auffälligen Verhaltens gibt das Relais Alarmmeldungen an die Leitwarte aus und zwingt die Differenzialschutzelemente in die nominalen Schalterstellungen.

Im Transformator-Differenzialschutz von ABB wird als maximaler Strom von allen Wicklungen und allen Phasen der Stabilisierungsstrom verwendet, sodass die Stabilität für außenliegende zweipolige Fehler nicht so kritisch ist, wie bei Schutzrelais anderer Hersteller. Andererseits kann aber für diesen Phasenschiebertransformator mit seinen möglichen Phasenverschiebungen von bis zu 27° auch unter stabilen symmetrischen Betriebsbedingungen eine Fehlauflösung auftreten, weil die eingebrachte Blindstromkomponente einen Differenzialstrom verursachen kann, der oberhalb des Stabilisierungsschwellwertes liegt. Daher ist eine Korrektur

der Schalterstellungen für die Differenzialschutzelemente erforderlich.

Als letztes Beispiel für ein Transformator-Differenzialschutzrelais der neuesten Generation wird nachfolgend die Implementierung im Siemens 7UT86 betrachtet. Der Relais-Algorithmus erlaubt eine Modellierung der Stufen für die Phasenverschiebung, die exakt gleich ist wie bei einem realen Transformator. Im Relais können sowohl die Stufen für die Spannungsregelung als auch die Stufen für zusätzliche Phasenverschiebungen parametrisiert werden. Außerdem kann sowohl für die Oberspannungsseite als auch für die Unterspannungsseite ein Stufenschalter modelliert werden. Daher müssen in der Relais-Einstellsoftware alle Stufeneinstellungen mit den Nennspannungswerten und den Phasenverschiebungen in Grad detailliert eingegeben werden.

Das Siemens-Relais bietet unterschiedliche Möglichkeiten, um mittels Binäreingängen die aktuellen Schalterstellungen vom Stufenschalter zu erhalten. Beispielsweise kann es so konfiguriert werden, dass für mehrere Binäreingänge die aktuelle Stufenschalterstellung als binär codierter Wert (BCD) zur Verfügung steht. Die Stufenstellungen für die Spannungsregulierung, z.B. auf der Oberspannungsseite, und die Stufenstellungen für die Phasenverschiebung können unabhängig voneinander erfasst werden. Nähere Einzelheiten siehe [3].

5 Inbetriebnahme und Prüfung von Schutzrelais für Phasenschiebertransformatoren

Da alle Lösungen für den Schutz von Phasenschiebertransformatoren entweder eine entsprechend angepasste komplexe Logik in den Relais oder bis ins Detail ausgefeilte Einstellungen erfordern, ist vor einem Betrieb eines solchen Schutzes eine umfassende Inbetriebnahme und Prüfung erforderlich. Es muss verifiziert werden, dass das Relais für alle Stufenschalterstellungen das gewünschte Verhalten aufweist und dass die Anforderungen bezüglich Stabilität und Selektivität erfüllt werden.

Ein Versorger in Österreich führte die Inbetriebnahmeprüfung eines Phasenschiebertransformators mit Hilfe einer primärseitigen Kurzschlussprüfung am Transformator durch. Hierfür wurde mit Hilfe eines mobilen Dieselgenerators und eines 20 kV:400 kV Verteiltransformators eine primärseitige Einspeisung vorgenommen. Die Einspeisung erfolgte auf der 200 kV-Seite des Transformators. Auf der 110 kV-Sekundärseite wurde der Transformator kurzgeschlossen. Eingespeist wurde ein Kurzschlussstrom von 100 A. Die resultierende Spannung betrug 3,3 kV. Es wurden Prüfungen mit außenliegenden dreipoligen, zweipoligen und einpoligen Fehlern durchgeführt. Die jeweils resultierenden Ströme wurden in das Schutzrelais eingespeist. Die Idiff- und Istab-Werte wurden aus dem angeschlossenen Schutzgerät ausgelesen. In der Stabilisierungskennlinie wurden die Werte entsprechend der Nenn-Kurzschlussspannung des Transformators hochskaliert und entsprachen so realistischen Einspeisebedingungen im normalen Betrieb. Für alle

durchgeführten Prüfungen konnte gezeigt werden, dass der Schutz bei Verwendung der virtuellen dritten Wicklung außenliegende Fehler stabil beherrscht.

Für die Sekundärprüfung wurde zur Berechnung der Stromverteilung im Transformator in einem Excel-Arbeitsblatt ein Transformatormodell auf Basis eines mathematischen Modells (siehe [1]) erstellt. Anhand dieser Werte konnte eine Schutzprüfung mit Einspeisung von stationären Werten gemäß den Berechnungen vorgenommen werden. Diese Prüfung lieferte dieselben Ergebnisse wie die Primärprüfungen.

Neue Schutzprüfsoftware ist in der Lage, das transiente Verhalten von Phasenschiebertransformatoren zu simulieren und ermöglicht so sehr komfortable Prüfungen. Die Software enthält dazu ein komplettes Modell des Transformators mit allen überspannungs- und unterspannungsseitigen Anschlüssen und Abgriffen. So können auf einfache Weise unterschiedliche Szenarien mit stationären und dynamischen Fehlern simuliert und die Simulationsergebnisse mit herkömmlichen Schutzprüfgeräten in das Schutzrelais eingespeist werden. Abbildung 11 zeigt die Benutzeroberfläche dieser Software.

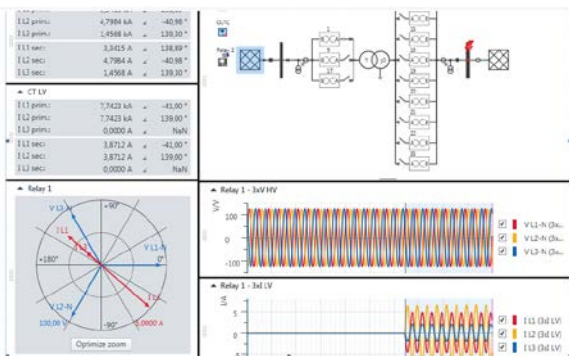


Abbildung 11: Schutzprüfsoftware zur Simulation von Phasenschiebertransformatoren

Auch hier lieferten sämtliche Prüfungen für alle möglichen Schalterstellungen korrekte Ergebnisse und bestätigten, dass das Schutzkonzept die Anforderungen bezüglich Stabilität und Selektivität erfüllt.

6 Zusammenfassung

Um korrekte Idiff- und Istab-Werte berechnen zu können, müssen Transformator-Differenzialschutzrelais für Phasenschiebertransformatoren die Stellungen der Stufenschalter für die Spannungsregelung und die Phasenverschiebung berücksichtigen. Das Konzept einer virtuellen dritten Wicklung, bei dem Ströme aus den Stromwandlern in Reihe zur Unterspannungswicklung eingebracht werden, ist bei herkömmlichen Transformator-Differenzialschutzrelais gängige Praxis. Dieser Ansatz ermöglicht die Simulation der 90°-Stromkomponente mittels logischer Elemente des Relais oder einer entsprechenden Schaltgruppe innerhalb des Schutzgerätes. Binärsignale vom Stufenschalter erlauben eine Anpassung der Logik bzw.

Umschaltung zwischen unterschiedlichen Parametersätzen im Relais. Die neueste Generation der Transformator-Differenzialschutzrelais ist bereits in der Lage, die detaillierte Modellierung für das Verhalten bei den einzelnen Schalterstellungen für die Spannungsregelung und die Phasenverschiebung in der Firmware des Relais durchzuführen.

Bei der Inbetriebnahme von Differenzialschutzrelais für Phasenschiebertransformatoren muss das korrekte Verhalten des Schutzes für alle möglichen Schalterstellungen für die Phasenverschiebung verifiziert werden. Der außenliegende zweipolige Fehler, bei dem ein zusätzlicher Differenzialstrom in der fehlerfreien Phase verursacht wird, ist ein kritischer Fall, der nicht zu Fehlauslösungen führen darf.

Simulationsbasierte Schutzprüfsoftware, die in der Lage ist, Phasenschiebertransformatoren mit allen möglichen Schalterstellungen für die Spannungsregelung und die Phasenverschiebung zu simulieren, ermöglicht eine komfortable Prüfung und Inbetriebnahme solcher Schutzrelais. Eine komplizierte und fehleranfällige manuelle Berechnung der Prüfgrößen ist somit nicht mehr erforderlich.

Verweise

- [1] P. Baumgartner, W. Lickinger, „Differentialschutz am Querreglertransformator“ (Englisch: „Differential Protection for Phase-Shifting Transformers“), Bachelorarbeit, Technische Universität Graz, Österreich, (2016)
- [2] L. Fickert, „Netzbetrieb mit Quer-/Schragreglertransformatoren und schutztechnische Herausforderungen“ (Englisch: „Operating Power System using Phase-Shifting Transformers and Challenges for Protection“), OMICRON User Meeting, Darmstadt, Deutschland, (2016)
- [3] H-J. Hermann, S. Schneider, „Optimaler Differentialschutz für Phasenschieber- und Spezialtransformatoren“ (Englisch: „Optimized Differential Protection for Phase-Shifting and Special Transformers“), Netzpraxis, Jg. 55, Heft 5, S. 12-18, (2016)

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.