

Leistungsschaltergleichlauf ist regelmäßig zu prüfen

Schaden an einem 110-kV-Transformator durch eine Gleichlaufstörung des Leistungsschalters

In starr geerdeten 110-kV-Netzen wird der zu erwartende einpolige Fehlerstrom so eingestellt, dass einerseits die Ansprechschwelle der im Netz eingesetzten Schutz-einrichtungen im Fehlerfall sicher überschritten wird, andererseits aber der einpolige Fehlerstrom nicht zu hoch wird. Dies wird dadurch erreicht, dass nur eine bestimmte Anzahl von Transformatorsternpunkten starr mit Erde verbunden wird. Die anderen Transformatoren werden mit freiem Sternpunkt betrieben. Ein nicht geerdeter Transformatorsternpunkt kann dann problematisch werden, wenn es zu einer Gleichlaufstörung des Leistungsschalters kommt. Durch Sättigungsvorgänge der Kernschenkel der ans Netz geschalteten Wicklungen kann es, abhängig von der Phasenlage der Leiterspannung zwischen den zugeschalteten Phasen, im Moment der Zuschaltung zur Induktion von erheblichen Überspannungen in der nicht ans Netz geschalteten Wicklung kommen. Die Verfasser beschreiben detailliert den Schadenshergang und die Ursachen eines Schadens an einem 110-kV-Transformator.

In einem Umspannwerk der Stadtwerke Karlsruhe wurde im Mai 2005 ein etwas über 30 Jahre alter Transformator (31,5 MVA, 110/20,8 kV) durch einen neu gefertigten Transformator mit gleichen Daten ersetzt. Der Transformator (Schaltung YNyn0d) dient der Koppelung des 110-kV-Netzes mit dem 20-kV-Netz (*Bild 1*). Die 110-kV-SF₆-Schaltanlage ist mit der Oberspannungsseite (OS) des Transformators über ein rd. 70 m langes Kabel verbunden. Auf der Unterspannungsseite (US) führen zwei parallele 20-kV-Kabel über den Leistungsschalter auf die 20-kV-Sammelschiene.

Von den insgesamt 16 110-kV-Transformatoren im Bereich der Stadtwerke Karlsruhe sind die OS-Sternpunkte von fünf Transformatoren niederohmig geerdet. Die anderen Transformatoren werden mit offenem OS-Sternpunkt betrieben.

Der im Jahr 2005 neu gefertigte Transformator wurde nach einer ersten Zuschaltung für eine Nacharbeit wieder außer Betrieb genommen. Bei der endgültigen Zuschaltung kam es zu einer Auslösung des Buchholz- und Differentialschutzes. Bei einer ersten Schadensklärung wurde äußerlich ein geringer Ölaustritt im Bereich der Kesseldeckeldichtung und am Luftentfeuchter festgestellt. Dies deutet auf einen Überdruck und damit auf einen Lichtbogen im Transformator hin, was durch eine Ölanalyse bestätigt wurde. Daher wurde der Transformator zur genauen Schadensfeststellung und Reparatur ins Herstellerwerk transportiert. Bei der Inspektion des Aktivteils zeigten sich Deformationen im Bereich der Leitungsführung zum Stufenschalter sowie elektrische Durchschläge an mehreren Stellen der Stufenwicklung des Wicklungsblocks der Phase V. Durch die Analyse der auf der 20-kV-Seite gemessenen Schaltspan-

nungen konnte der Schadenshergang geklärt werden.

Eine genaue Untersuchung des Schadenshergangs dürfte von allgemeinem Interesse sein, um solche Schäden zukünftig zu vermeiden.

Spezielle Anlagenkonfiguration

Bei der Schadensklärung wurde festgestellt, dass der 110-kV-Leistungsschalter eine Schaltverzögerung bis zu 20 ms in der Phase V aufwies. Gemäß DIN EN 62271-100 (VDE 0671, Teil 100) vom April 2004 [1] darf der größte zeitliche Unterschied zwischen den Kontaktberührungen während des Schließens eine Viertelperiode der Bemessungsfrequenz nicht überschreiten, falls keine besonderen Anforderungen an das gleichzeitige Schalten der Pole gestellt werden, im vorliegenden Fall also 5 ms. Da beim Betrieb der Anlage mit dem bisher eingesetzten Transformator keine Probleme auftraten, war diese Schaltverzögerung im bisherigen Betrieb nicht aufgefallen.

Einen wichtigen Hinweis zur Klärung der Schadensursache gab ein Schadensfall, der Ende der 1970er Jahre unter sehr ähnlichen Umständen auftrat [2]. In [2] wird ein Schaden durch innere Überspannungen an einem 110-kV-Transformator beschrieben, die durch Sättigungsercheinungen im Kern aufgrund der verzögerten Zuschaltung eines Schalterpols auftraten. Viele der in [2] genannten Voraussetzungen für das Auftreten von Sättigungsercheinungen im Kern und damit der inneren Überspannungen waren auch in dem vorliegenden Fall erfüllt. Dies sind vor allem:

- freier Sternpunkt der OS- und der US-Wicklung,
- eine Zeitverzögerung von mehr als 5 ms zwischen dem zweit-schaltenden und dem letzt-schaltenden Pol.

Bild 2 zeigt die Schaltung des neu gefertigten 40-MVA-Transformators mit den für die Analyse der Schaltvorgänge relevanten Spannungen. In der Schaltanlage wurden die zeitlichen Verläufe der Klemmenspannungen an der US-Wicklung gegen Erde digital mit genügend hoher Auflösung aufgezeichnet. Durch Differenzbildung der Spannungen an den Klemmen 2U, 2V und 2W und der Spannung an 2N können die zeitlichen Verläufe der Wicklungsspannungen u_{2U} , u_{2V} und u_{2W}

Prof. Dr.-Ing. **Thomas Leibfried**, Leiter des Instituts für Elektroenergiesysteme und Hochspannungstechnik der Universität Karlsruhe (TH); Ing. (grad.) **Dietger Schiel**, bis 31.3.2006 Leiter der Abteilung Anlagenbau Strom der Stadtwerke Karlsruhe GmbH, Dipl.-Ing. **Karl Reiter**, seit 1.4.2006 Leiter der Abteilung Anlagenbau Strom der Stadtwerke Karlsruhe GmbH, Dr.-Ing. **Karl Roth**, Technischer Geschäftsführer der Stadtwerke Karlsruhe GmbH; Dipl.-Ing. **Christian Schmied**, Technischer Leiter, Transformatorenbetrieb Dresden, Siemens AG Power Transmission and Distribution.

der US-Wicklung berechnet werden (Bild 3). Die Wicklungsspannungen an der US-Wicklung bilden die Basis der Untersuchungen, da sie einen Rückschluss auf die unbekanntenen Spannungen an den OS-Wicklungen ermöglichen.

Schaltvorgang ohne Überspannungen

Zunächst wird der Ablauf des Schaltvorgangs bei der Zuschaltung eines Transformators kurz beschrieben. Nach der Auslösung des Leistungsschalters bewegen sich die Schaltkontakte aufeinander zu. Ab einem bestimmten Abstand der sich nähernden Schalterpole ergeben sich Lichtbogenzündungen zwischen den Kontakten, die zunächst nicht stabil sind und wieder abreißen. Durch die weitere Näherung der Schaltkontakte ergibt sich ein stehender Lichtbogen bei dem Schalterpol, dessen Kontakte sich mechanisch am schnellsten aufeinander zu bewegen. Aus diesem Grund ist sehr häufig die erste Zuschaltung im Bereich des Scheitelpunkts der Sternspannung zu beobachten. Im weiteren Verlauf schließen sich die Kontakte auch mechanisch, wodurch der Lichtbogen zwischen den Schaltkontakten verschwindet.

Bild 3a zeigt die Wicklungsspannungen während der ersten Perioden nach der Zuschaltung des Transformators in hoher Auflösung.

Zum Zeitpunkt $t \approx -0,75$ ms tritt an Phase U ein Lichtbogen auf, der offensichtlich kurz nach dem Zündungsvorgang wieder abreißt. Dieser erste Schaltvorgang führt zu einer Aufladung der Wicklungskapazitäten der Phase U. Die Spannung von rd. -10 kV treibt einen magnetischen Fluss im Kern des Transformators, der sich hälftig auf die Schenkel V und W aufteilt. Deshalb ergibt sich dort im Zeitbereich zwischen $t \approx -0,75$ ms und $t = 0$ die halbe Spannung mit entgegengesetzter Polarität, also $+5$ kV (Bild 3a).

Zum Zeitpunkt $t = 0$ entsteht ein weiterer Zündungsvorgang, diesmal an Phase W. Danach zeigen die Spannungen u_{2U} und u_{2W} keine beachtenswerten Spannungssprünge mehr. Somit sind die Phasen U und W ab dem Zeitpunkt $t = 0$ endgültig mit dem Netz verbunden. Bei der Phase V ist dies offensichtlich nicht der Fall, wie an der Spannungsform für $t > 0$ erkennbar ist. Phase V wird

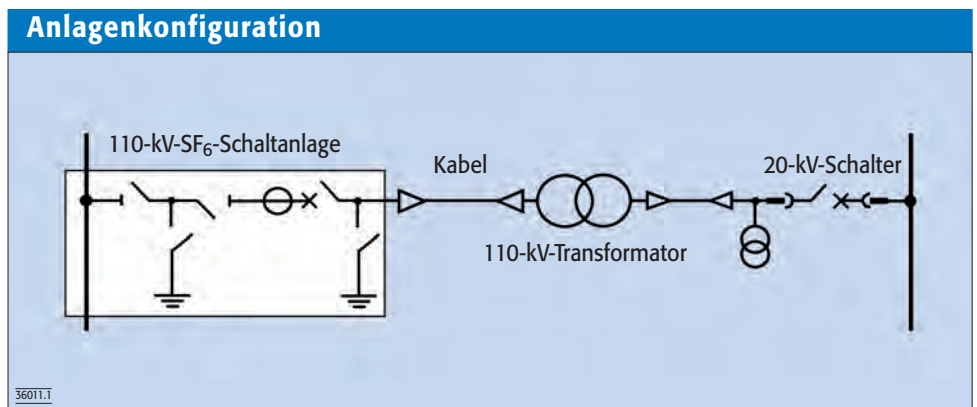


Bild 1. Anlagenkonfiguration bei der Zuschaltung des 110-kV-Transformators

erst nach rd. 17 ms endgültig zugeschaltet.

Ab dem Moment der 2-phasigen Zuschaltung der Phasen U und W sind die OS-Wicklungen dieser beiden Phasen über die Sternpunktverbindung in Serie geschaltet und werden von der Leiterspannung u_{1W1U} mit

$$u_{1W1U}(t) = u_{13}(t) - u_{11}(t) = u_{1W}(t) - u_{1U}(t) \quad (1)$$

gespeist (Bild 4a). Zunächst stellt sich eine betragsmäßig gleiche

Spannungsaufteilung der Leiterspannung u_{1W1U} auf die beiden Wicklungen U und W ein. Die wirksame Impedanz der Kernschkel muss also sehr ähnlich sein; folglich dürften auch die bei diesem Schaltvorgang wirksamen Remanenzinduktionen der beiden Schenkel U und W sehr ähnlich sein. Dadurch bildet sich im Eisenkreis – bestehend aus den Schenkeln U und W sowie dem oberen und unteren Joch – ein magnetischer Fluss ϕ_H aus. Aufgrund der zunächst betragsmäßig gleichen Spannungen über den Wicklungen U und W entsteht im

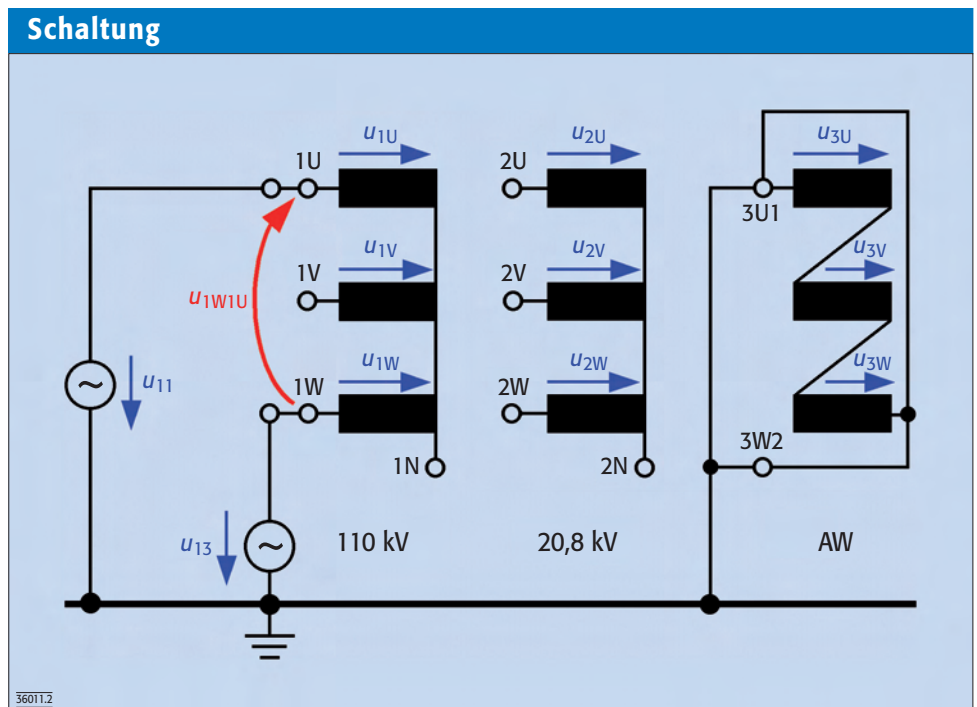


Bild 2. Schaltung des 40-MVA-Transformators (110/20,8 kV, YNyn0d) mit den relevanten Spannungen; AW ist die im Dreieck geschaltete Ausgleichswicklung

Zuschaltvorgang – Messung 1

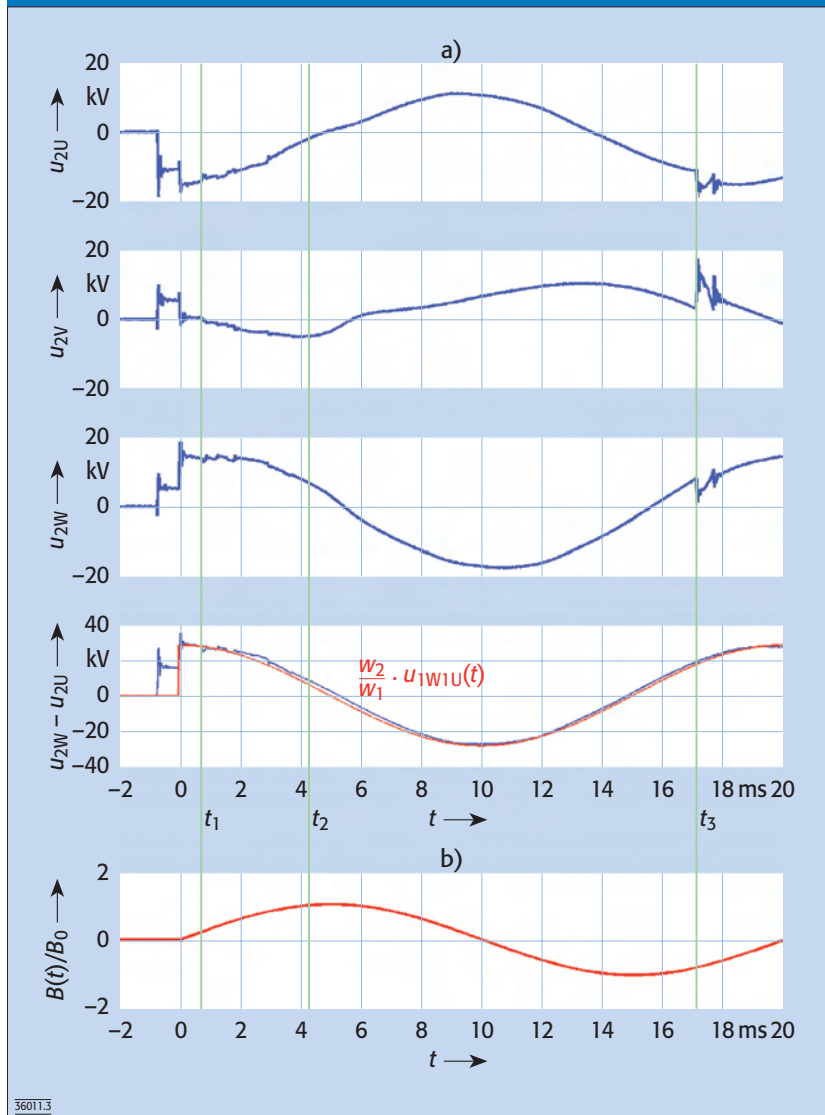


Bild 3. Gemessene (blau) und berechnete (rot) Zeitverläufe der relevanten Größen bei einem Zuschaltvorgang des 40-MVA-Transformators, Messung 1
 a) zeitliche Verläufe der Spannungen u_{2U} , u_{2V} und u_{2W}
 b) berechnete zeitliche Verläufe der Spannung u_{1W1U} und des zeitveränderlichen Anteils der magnetischen Induktion $B(t)$ (für $B_{rem} = 0$)

mittleren Schenkel kein magnetischer Fluss, und daher wird in der OS-Wicklung Phase 1V auch keine Spannung induziert. Dies wird durch die Messung der Spannung u_{2V} bestätigt, die für rd. 1 ms bis zum Zeitpunkt t_1 bei dem Wert 0 verharrt.

Die treibende Spannung u_{1W1U} kann mit guter Näherung aus den Wicklungsspannungen berechnet werden, da die Wicklungsspannungen des Systems 1 und des Systems 2 im Leerlaufbetrieb linear über das Windungszahlverhältnis w_1/w_2 gekoppelt sind. Somit ist:

$$u_{1W1U}(t) = u_{1W}(t) - u_{1U}(t) = \frac{w_1}{w_2} \cdot [u_{2W}(t) - u_{2U}(t)]. \quad (2)$$

Die berechnete Differenz der Wicklungsspannungen ($u_{2W} - u_{2U}$) lässt sich für $t > 0$ durch eine Cosinus-Funktion ($\alpha = 0$) approximieren (Bild 3b). Dies gilt wegen des linearen Zusammenhangs mit dem Faktor w_1/w_2 dann auch für die treibende Leiterspannung u_{1W1U}

$$u_{1W1U}(t) = \sqrt{2} \cdot U_{1L} \cdot \cos(\omega t - \alpha) \quad \text{mit } \alpha = 0^\circ. \quad (3)$$

Aus dem Induktionsgesetz können nun der magnetische Fluss ϕ_H und die magnetische Induktion $B(t)$ in dem äußeren Eisenkreis berechnet werden. Die Anfangswerte der magnetischen Induktion sind die möglicherweise leicht unterschiedlichen Remanenzinduktionen in den beiden Kernschenkeln der Phasen U und W mit

$$B_{U,rem} = B_U(t=0) \neq B_{W,rem} = B_W(t=0). \quad (4)$$

Für die Spannungen u_{1W} und u_{1U} an den OS-Wicklungen gilt mit der in Bild 4a dargestellten Zuordnung von magnetischem Fluss ϕ_H und den Spannungen u_{1W} und u_{1U} [3]:

$$u_{1W} = +w_1 \cdot \frac{d\phi_H}{dt} \quad \text{und} \quad u_{1U} = -w_1 \cdot \frac{d\phi_H}{dt}. \quad (5)$$

Aus den obigen Gl. lässt sich eine Differentialgleichung für die magnetische Induktion $B(t)$ im Kern aufstellen, deren Integration mit den Remanenzinduktionen als Anfangsbedingungen auf den zeitlichen Verlauf der Induktionen $B_U(t)$ und $B_W(t)$ führt. Es empfiehlt sich, den zeitlichen Verlauf der magnetischen Induktion in ihrem zeitlichen Bezug zu den gemessenen Klemmenspannungen und zur treibenden Spannung u_{1W1U} zu betrachten (Bild 3b). Deshalb ist es sinnvoll, die Beziehungen für die magnetischen Induktionen zu normieren:

$$\frac{B_U(t)}{B_0} = \frac{B_{U,rem}}{B_0} + \sin(\omega t) \quad \frac{B_W(t)}{B_0} = \frac{B_{W,rem}}{B_0} + \sin(\omega t) \quad \text{mit} \quad B_0 = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{1L}}{2 \cdot w_1 \cdot A_{Fe} \cdot \omega}. \quad (6)$$

Die Remanenzinduktionen $B_{U,rem}$ und $B_{W,rem}$ sind von den Vorgängen vor der Zuschaltung abhängig; ihre genaue Quantifizierung auf der Basis der gemessenen Daten ist jedoch nicht möglich. Der in Bild 3b dargestellte Verlauf für $B(t)$ kann also nach oben oder nach unten

Eisenkreis

um eine Remanenzinduktion verschoben sein.

Ab dem Zeitpunkt t_1 steigt die Spannung u_{2V} leicht in negativer Richtung (Bild 3a). Dies lässt darauf schließen, dass ein kleiner Teil des magnetischen Flusses seinen Weg über den Kernschenkeln der Phase V nimmt. Der magnetische Fluss ϕ_H ist in diesem Zeitbereich positiv und steigt weiter bis zum Scheitelpunkt. Daher kann auch für den Streufluss von einem Anstieg mit der Zeit ausgegangen werden. Da die Wicklungsspannung u_{2V} in der in Bild 4a eingetragenen Richtung negativ wird, muss aufgrund des Induktionsgesetzes

$$u_{2V} = -w_2 \cdot \frac{d\phi_{\sigma V}}{dt} \quad (7)$$

eine rechtswendige Zuordnung zwischen dem Streufluss $\phi_{\sigma V}$ und der Spannung u_{2V} [3] und damit auch der Spannung u_{1V} vorliegen, wenn die zeitliche Ableitung (Steigung) des magnetischen Flusses positiv sein soll. Damit ergibt sich die Richtung des magnetischen Streuflusses $\phi_{\sigma V}$ im Kernschenkeln der Phase V ab dem Zeitpunkt t_1 , wie in Bild 4a eingetragen.

Wie in Bild 3a dargestellt ist, beginnt die Spannung u_{2V} zum Zeitpunkt t_2 , ihren Anstieg zu verringern und schließlich sogar die Polarität zu wechseln. Daraus folgt, dass auch der magnetische Fluss $\phi_{\sigma V}$ im Kernschenkeln der Phase V ab $t = t_2$ seine Steigung verringert. Mit den in Bild 4a eingetragenen Richtungen der magnetischen Flüsse ϕ_H und $\phi_{\sigma V}$ für $t < t_2$ folgt, dass im Schenkel V ein Gegenfluss auftreten muss, damit sich die Steigung des Flusses $\phi_{\sigma V}$ und damit die Polarität der Spannung u_{2V} ändern kann. Da aber zu dem Zeitpunkt, zu dem u_{2V} die Polarität wechselt, die magnetische Induktion B (und damit der magnetische Fluss ϕ_H) noch positiv sind, ist von einer Sättigung des Schenkels W auszugehen, die bewirkt, dass der magnetische Fluss durch den Schenkel V übernommen wird. Auf diese Weise kommt ein Gegenfluss im Schenkel V zustande, und die Steigung des magnetischen Flusses im Schenkel V verringert sich. Damit verringert sich auch die Spannung u_{2V} und wechselt sogar ihre Polarität.

Im weiteren Zeitverlauf nimmt der Fluss im Kernschenkeln der Phase V betragsmäßig weiter zu, da der

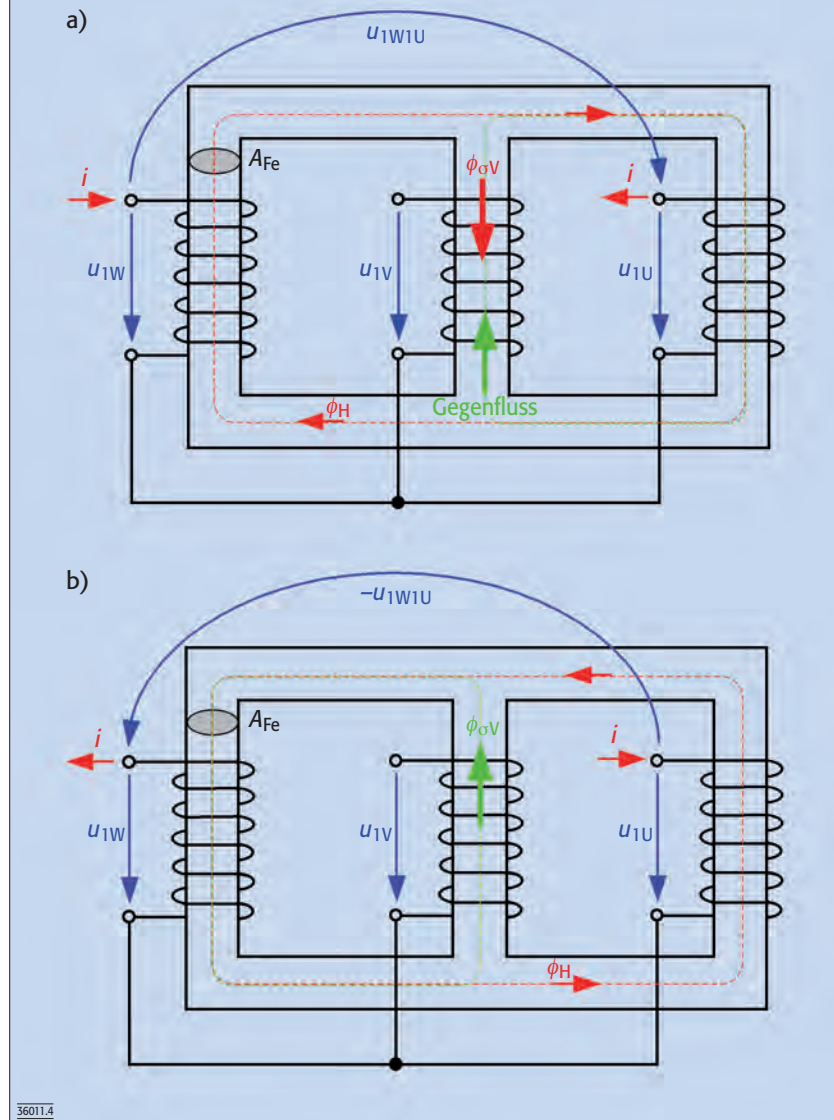


Bild 4. Eisenkreis zur Analyse der magnetischen Vorgänge bei der 2-phasigen Zuschaltung

- a) Messung 1
b) Messung 2

Abzweig über Schenkel V dem magnetischen Fluss einen Parallelweg mit kürzerer Eisenweglänge und damit geringerem magnetischem Widerstand bietet. Aus diesem Grund nehmen der magnetische Fluss im Schenkel V und damit auch die Spannung u_{2V} immer mehr sinusförmige Gestalt an, bis schließlich bei $t_3 \approx 17$ ms die Phase V zuschaltet und der Einschaltvorgang beendet ist.

Schaltvorgang mit Überspannungen und Transformatorschaden

Bild 5 zeigt die zeitlichen Verläufe der relevanten Größen für den Schaltvorgang, während dem es zu

inneren Überspannungen und damit zum Schaden an dem Transformator kam (Messung 2). Rund 1,5 ms vor $t_0 = 0$ kommt es bereits zu einer ersten Zündung an Phase U. Der Zeitpunkt $t_0 = 0$ ist der Beginn des eigentlichen Einschaltvorgangs, da ab diesem Zeitpunkt die Phasen U und W fest mit dem Netz verbunden sind. Demzufolge folgt die Leiterspannung bis rd. $t \approx 5$ ms sehr gut einem sinusförmigen Verlauf, wie dies auch theoretisch zu erwarten ist.

Die Differenz der Wicklungsspannungen $u_{2W} - u_{2U}$ lässt sich für $t > 0$ auch hier wieder durch eine Cosinus-Funktion approximieren,

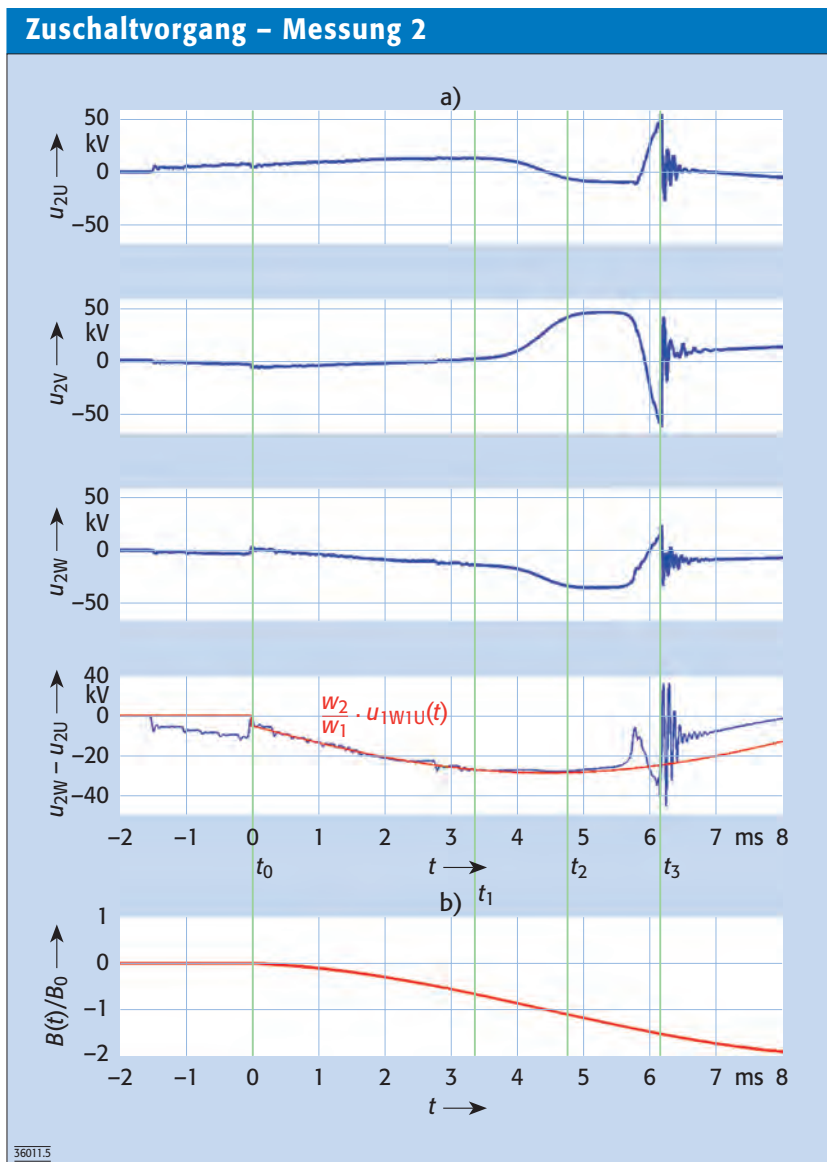


Bild 5. Gemessene (blau) und berechnete (rot) Zeitverläufe der relevanten Größen bei dem Zuschaltvorgang in dessen Folge der Transformatorschaden auftrat, Messung 2

- a) zeitliche Verläufe der Spannungen u_{2U} , u_{2V} und u_{2W}
 b) berechnete zeitliche Verläufe der Spannung u_{1W1U} und des zeitveränderlichen Anteils der magnetischen Induktion $B(t)$ (für $B_{rem} = 0$)

diesmal jedoch mit $\alpha = -100^\circ$. Für die Leiterspannung u_{1W1U} ergibt sich:

$$u_{1W1U}(t) = \sqrt{2} \cdot U_{1L} \cdot \cos(\omega t - \alpha)$$

mit $\alpha = -100^\circ$. (8)

Mit den jeweiligen Remanenzinduktionen führt dies auf die folgenden Induktionen in den Kernschenkeln:

$$\frac{B_U(t)}{B_0} = \frac{B_{U,rem}}{B_0} + \sin(\omega t - \alpha) - \sin(-\alpha)$$

$$\frac{B_W(t)}{B_0} = \frac{B_{W,rem}}{B_0} + \sin(\omega t - \alpha) - \sin(-\alpha)$$

mit

$$B_0 = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{1L}}{2 \cdot w_1 \cdot A_{Fe} \cdot \omega} \quad \text{und}$$

$$\alpha = -100^\circ. \quad (9)$$

Im Gegensatz zu der vorher betrachteten Zuschaltung befindet sich nun die treibende Spannung (Leiterspannung) u_{1W1U} im Moment der Zuschaltung nahezu im Nulldurchgang. Die magnetische Induktion $B(t)$ weist damit – abgesehen von den Remanenzinduktionen in den Kernschenkeln U und W – einen erheblichen Gleichanteil auf. Der kritischste Fall, d. h. die maximale Verschiebung von $B(t)$ um einen Gleichanteil, tritt auch hier – wie bei der 3-phasigen Zuschaltung – bei einer Zuschaltung im Nulldurchgang der treibenden Spannung u_{1W1U} auf, d. h. für $\alpha = \pm 90^\circ$.

Die Spannungsverteilung auf die beiden OS-Wicklungen Phase U und Phase W dürfte etwa ähnlich sein, da die beiden Spannungen u_{2U} und u_{2W} betragsmäßig ähnlich groß sind und auch ähnliche Verläufe aufweisen. Aus der Polarität der Spannungen u_{2U} und u_{2W} und dem Induktionsgesetz ergibt sich die Richtung des magnetischen Flusses ϕ_H im Kern direkt nach der Zuschaltung (Bild 4b), der in der eingepfeilten Richtung positiv ist und steigt.

Ab dem Zeitpunkt t_1 verringert sich der Anstieg der Spannung u_{2U} , bis diese sogar ihre Polarität wechselt. Der magnetische Fluss im Schenkel U kann sich offensichtlich nicht weiter erhöhen, was auf eine starke Eisensättigung des Kernschenkels der Phase U hindeutet. Der insgesamt weiter steigende magnetische Fluss muss dann vom Schenkel V übernommen werden. Aus dem Induktionsgesetz folgt wieder, dass der magnetische Fluss $\phi_{\sigma V}$ im Schenkel V in der in Bild 4b gezeichneten Richtung orientiert ist und schnell steigt. Dies führt zu einem starken Spannungsanstieg von u_{2V} in positiver Richtung.

Zum Zeitpunkt t_2 beginnen die an die US-Klemmen gegen Erde geschalteten Ableiter die Spannung u_{2V} zu begrenzen. Der schnelle Anstieg des magnetischen Flusses im Kernschenkel der Phase V erzeugt innere Überspannungen, die durch äußere Ableiter nicht wirksam unterdrückt werden können. In der Folge tritt zum Zeitpunkt t_3 eine transiente Spannungsschwingung auf, die darauf hindeutet, dass zu diesem Zeitpunkt der Durchschlag im Transformator stattgefunden hat.

Nach weiteren rd. 100 ms sprach der Transformatorschutz an und schaltete den Transformator ab.

Zusammenfassung und Interpretation

Durch die 2-phasige Zuschaltung eines Transformators an der im Stern geschalteten Wicklung ohne Erdung des Sternpunkts kommt es zur Ausbildung eines magnetischen Kreises aus den beiden zugeschalteten Wicklungen und dem Eisenkern. Der ungünstigste Einschalt Augenblick ist der Moment des Spannungsnulldurchgangs der treibenden Leiterspannung. In diesem Fall erreicht die magnetische Induktion ihren höchsten Gleichanteil und damit in einer Richtung ihre höchsten Werte. Dies kann zur Sättigung in einem der Kernschenkel führen. Der magnetische Fluss muss dann einen anderen Weg nehmen, der ihm durch den dritten Schenkel der nicht zugeschalteten Wicklung zur Verfügung steht. Dies bewirkt in den nicht mit dem Netz verbundenen Wicklungen dieses Schenkels eine Spannungsinduktion. Die so erzeugten inneren Überspannungen können so erheblich sein, dass sie einen elektrischen Durchschlag der Isolation bewirken.

Die Flussänderung und damit die Höhe der induzierten Spannung sind stark von der Art des Übergangs des Kernschenkels in die Sättigung abhängig (Bild 6). Ein abrupter Übergang der linearen Kennlinie $\phi_H(I_m)$ in die viel flachere Sättigungskennlinie bedeutet, dass der magnetische Fluss in kürzester Zeit von dem dritten Kernschenkel der nicht zugeschalteten Wicklung übernommen werden muss. Wird davon ausgegangen, dass der Magnetisierungsstrom in der Zeit Δt um ΔI_m steigt, so muss der magnetische Fluss $\Delta \phi$ in der Zeit Δt von dem dritten Kernschenkel übernommen werden. Die Flussänderung $\Delta \phi / \Delta t$ ist sehr groß, was zu extrem hohen induzierten Spannungen führt. Ein allmählicher Übergang des linearen Bereichs der Blechkennlinie $\phi_H(I_m)$ in die Sättigung bedeutet in der Zeit Δt einen viel geringeren magnetischen Fluss $\Delta \phi$, der von dem dritten Kernschenkel übernommen werden muss, wie aus Bild 6 hervorgeht. Damit ist auch die induzierte Spannung in der nicht zugeschalteten Wicklung geringer. Ursächlich

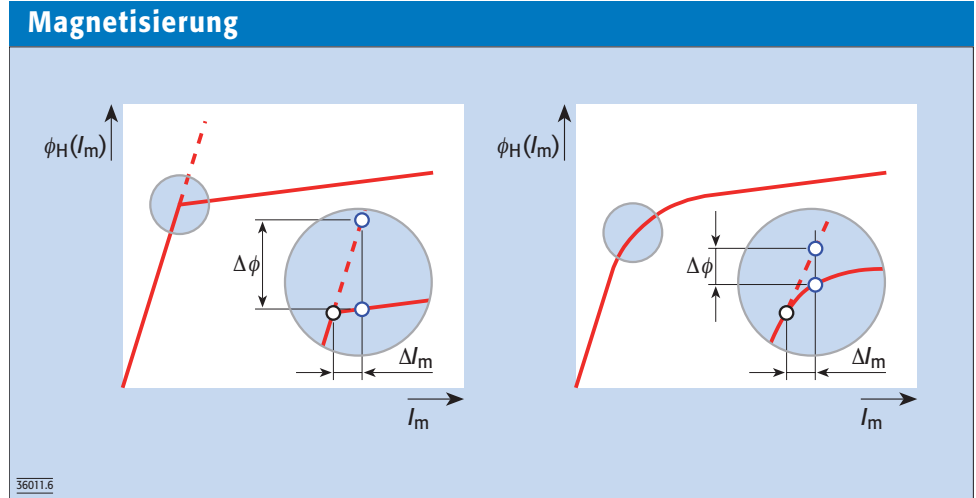


Bild 6. Auswirkung verschiedener Magnetisierungskennlinien $\phi_H(I_m)$ auf die während einer Zeit Δt auftretende Änderung des Magnetisierungsstroms ΔI_m und damit des magnetischen Flusses $\Delta \phi$

für den Transformator Schaden war also die Amplitude, die beim Aufschwingen der Spannung u_{2V} erreicht wird. Dies korreliert damit, dass Schäden auch nur am Wicklungsblock der Phase V gefunden wurden.

Das heute verwendete Kernblech ist im Vergleich zu dem in den 1970er Jahren verfügbaren Material qualitativ deutlich höherwertiger, vor allem lässt es höhere Bemesungsinduktionen zu. Der Übergang in die Sättigung ist jedoch schärfer ausgeprägt, da die Sättigungsinduktion auch bei modernem Elektromagnet unverändert bei rd. 2 T liegt. Dies erklärt, warum der bisher eingesetzte rd. 30 Jahre alte Transformator trotz der Schaltverzögerung der mittleren Phase von deutlich mehr als 5 ms während seiner gesamten Betriebsdauer keinen Schaden bei der Zuschaltung erlitten hat, während der neu gebaute Transformator bereits bei den ersten Zuschaltungen zu Schaden kam.

Schlussfolgerungen

Entgegen der in [2] gemachten Aussage, dass die bei 2-phasiger Zuschaltung eines Transformators entstehende Überspannung durch äußere Ableiter begrenzt werden kann, hat die Erfahrung gezeigt, dass äußere Ableiter nicht geeignet sind, um eine innere Spannungsinduktion wirksam zu begrenzen und eine Überbeanspruchung des Isolationssystems eines Transformators sicher zu verhindern.

Der beschriebene Schaden an dem neu gebauten Transformator muss insgesamt als Verkettung unglücklicher Umstände gesehen werden. Dies waren zum einen die Schaltverzögerung des Schalterpols der Phase V und zum anderen die für diesen Fall ungünstige Magnetisierungskennlinie des eigentlich hochwertigen Kernblechs. Hinzu kam der freie Sternpunkt des Transformators. Zur Vermeidung derartiger Schäden kann letztlich nur Einfluss auf den Gleichlauf des Leistungsschalters genommen werden. Daher ist generell zu empfehlen, dem Gleichlauf des Leistungsschalters mehr Aufmerksamkeit zu schenken und diese Eigenschaft im Zuge einer Wartung regelmäßig zu kontrollieren.

LITERATUR

- [1] DIN EN 62271-100: Hochspannungsschaltgeräte und -Schaltanlagen, Teil 100: Hochspannungs-Wechselstrom-Leistungsschalter. DIN, VDE, April 2004.
- [2] André, W.; Emberger, G.; Hartz, W.: Einfluss des Gleichlaufs von Leistungs-Schaltern beim Einschalten von Drehstromtransformatoren. Elektrizitätswirtschaft, Jg. 78 (1979), H. 10, S. 356 – 359.
- [3] Unbehauen, R.: Grundlagen der Elektrotechnik 1. 5. Aufl., Springer-Verlag, 1999, ISBN 3-540-66017-8.

(36011)

leibfried@ieh.uni-karlsruhe.de

www.ieh.uni-karlsruhe.de