Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 56 (1965)

Heft: 25

Artikel: Auswirkungen der modernen Transformatorbauweise auf die Transformator-Schaltüberspannungen

Autor: Thaler, R.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-916434

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 10.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

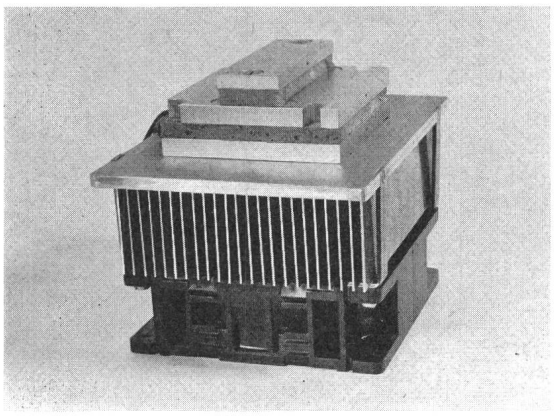

Fig. 10

Zweistufiges Peltieraggregat ($A_2/A_1 = 1:3$) für den Einbau in einen Sekundärelektronenvervielfacher

Wärmeabfuhr auf der Warmseite mittels Rippen-Wärmetauscher und Lüfter

Realisierung dieser Forderungen wird eine Kaskade 1 : 3 benötigt, wobei der Wärmetauscher die Warmstellentemperatur auf maximal 35 °C begrenzen muss. Da praktisch keine Kälteleistung gefordert wird, genügt ein Aufbau mit insgesamt vier Blöcken, wovon ein Block die zweite Stufe bildet. Der Aufbau der Kaskade mit Wärmetauscher und Lüfter ist in Fig. 10 wiedergegeben. Die Kaskade liefert bei einer Warmstellentemperatur von 35 °C eine Kaltstellentemperatur von −42 °C und stimmt damit gut mit den aus dem Diagramm in Fig. 9 wiedergegebenen Werten überein.

b) Bei der Temperaturkonstanthaltung auf −43 °C in einer Kühlbox wird eine Kälteleistung von ca. 12 W gefordert. Für die Wärmeabfuhr steht eine Wasserkühlung mit Frischwasser von etwa 12 °C zur Verfügung. Zur Realisierung dieser Forderung wird eine Kaskade 1 : 4 benötigt, wobei die Warmstellen-Temperatur auf + 15 °C begrenzt werden muss. Die notwendigen 10 Peltierblöcke teilen sich in 2 Blöcke für die zweite Stufe und 8 Blöcke für die erste Stufe auf. Das Aggregat mit angebauter Wasserkühlung ist in Fig. 11 wiedergegeben.

Literatur

[1] *W. Schirp:* Thermoelektrische Kühlung. Internat. Z. Elektrowärme 22(1964)6, S. 205...214.

[2] *H. Müller:* Bemessung und Aufbau von Peltieraggregaten. Kältetechnik 15(1963)5, S. 137...143.

[3] *W. Hänlein:* Halbleiter-Kühlelemente. Bull. SEV 55(1964)4, S. 142...149.

[4] *J. Rupprecht* und *R. G. Maier:* Neuere Untersuchungen an halbleitenden Mischkristallen unter besonderer Berücksichtigung von Zustandsdiagrammen. Physica Status solidi 8(1965)1, S. 3...39.

[5] *R. R. Heiker* and *R. W. Ure:* Thermoelectricity, Science and Engineering. Interscience, New York / London 1961.

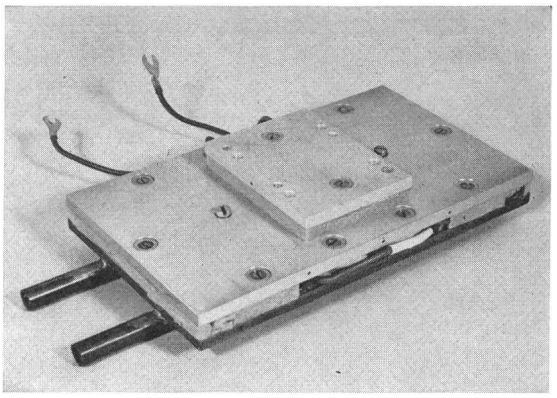

Fig. 11

Zweistufiges Peltieraggregat mit Wasserkühlung auf der warmen Seite

($A_2/A_1 = 2:8$)

Adresse der Autoren:

Dr. *H. Müller* und *Dr. J. Rupprecht*, Entwicklungslaboratorium der Siemens-Schuckertwerke AG., Postfach 325, D-8520 Erlangen 2.

Auswirkungen der modernen Transformatorbauweise auf die Transformator-Schaltüberspannungen

Von *R. Thaler*, Aarau

621.314.254

Im Verlaufe der vergangenen 10 Jahre haben verschiedene Eigenschaften der Grosstransformatoren Änderungen erfahren, die sich beim unbelasteten Ausschalten derselben günstig auf die Höhe der auftretenden Überspannungen auswirken. So konnten die Leerlaufströme durch Anwendung von Magnetkernen aus kornorientiertem Blech und durch eine Bauweise mit kleinst möglichen Luftspalten auf Werte bis 0,4 % und weniger gesenkt werden. Ebenfalls gesunken ist das Volumen pro MVA. Diese Verbesserungen ergeben eine Verkleinerung der beim Ausschalten von leerlaufenden Transformatoren maximal möglichen Überspannungen um ungefähr den Faktor 3. Damit bleibt der Überspannungsfaktor bei Transformatoren mit Nennspannungen von 110 kV und mehr auch dann unterhalb gefährlicher Grössen, wenn der volle Scheitelwert des symmetrischen Magnetisierungsstromes abgerissen wird. Es erübrigt sich also, beim Schalter Widerstände vorzusehen, um die Transformatorschaltüberspannungen weiter zu dämpfen. Vereinfachung und Vereinheitlichung der Leistungsschalter sind die Vorteile einer solchen Lösung.

Au cours des 10 dernières années écoulées, certaines caractéristiques des grands transformateurs ont subi des modifications ayant eu une heureuse répercussion sur la grandeur des surtensions engendrées par le déclenchement de ces transformateurs en marche à vide. Par l'utilisation de noyaux magnétiques faits de tôles à grains orientés et par la réalisation d'entrefers aussi petits que possibles, les valeurs des courants à vide sont tombées à 0,4 % et moins. Le volume par MVA a lui aussi diminué. Ces améliorations réduisent d'un facteur voisin de 3 les surtensions maximales possibles produites par le déclenchement de transformateurs en marche à vide. Ainsi, donc, pour les transformateurs à tensions nominales de 110 kV et plus, le facteur de surtension reste inférieur à une valeur dangereuse, ceci même lorsque le courant magnétisant symétrique est arraché à sa pleine valeur de crête. Ces résultats permettent de supprimer les résistances équipant les disjoncteurs et destinées à amortir les surtensions des transformateurs. Une telle solution a l'avantage de simplifier les disjoncteurs et en favorise leur standardisation.

1. Veranlassung zur Untersuchung

Die Grösse der beim Ausschalten von leerlaufenden Transformatoren auftretenden maximalen Überspannungen hängt von drei Haupteinflüssen ab: dem Transformator, dem Schalter und der Netzdisposition. Im Verlaufe der letzten Jahre haben sich vor allem die massgebenden Eigenschaften von Transformatoren geändert. Dies führte zu einer erneuten Prüfung der Fragen des Schutzes von Anlageteilen gegen Transformator-Schaltüberspannungen.

2. Zusammenhänge der massgebenden Einflussgrössen

In einer früheren Arbeit [1][1]) ist theoretisch und praktisch untersucht worden, welche Einflüsse für die Grösse der Über-

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

spannung beim Ausschalten leerlaufender Transformatoren massgebend sind. Im Verlaufe der Anwendung der damaligen Erkenntnisse wurde die Methode der Vorausbestimmung von Transformator-Schaltüberspannungen verfeinert [2]. So gelang es, durch Analyse von Netzversuchen und durch Modellstudien den Einfluss einer wichtigen Transformatorschaltgruppe auf die Höhe der Überspannung beim leerlaufenden Ausschalten eines dreiphasigen Transformators zahlenmässig zu ermitteln. Insbesondere gelang es auch, den erlaubten Anwendungsbereich experimentell festzulegen. Innerhalb dieses Anwendungsbereiches errechnet sich der maximale Überspannungsfaktor k_{max} zu:

$$k_{max} = \sqrt{\eta_m}\ \frac{f_0}{f} = \sqrt{\eta_m}\ \sqrt{\frac{\sqrt{3}\cdot I_m}{2\pi f C\, U_n}} \qquad (1)$$

worin

k_{max} Verhältnis des Scheitelwertes der höchsten gegen Erde auftretenden Spannung während der Ausschaltung, zum Scheitelwert der Spannung Phase gegen Erde vor der Ausschaltung.

η_m Magnetischer Wirkungsgrad, d. h. das Verhältnis der in elektrostatische Energie umgewandelten Energie zu der totalen aufgenommenen, magnetischen Energie [1].

f_0 Eigenfrequenz des ausschwingenden Transformators.

f Netzfrequenz.

I_m Oberspannseitiger Magnetisierungsstrom [A] (Scheitelwert $/\sqrt{2}$).

C Wirksame Kapazität des frei ausschwingenden Transformators [F] (oberspannungsseitig) inkl. fest mit dem Transformator verbundene weitere Kapazitäten.

U_n Obere, verkettete Nennspannung des Transformators [V].

Gl. (1) hat nur Gültigkeit sofern der volle Scheitelwert des Magnetisierungsstromes I_m abgerissen wird und keine Wiederzündungen im Schalter auftreten.

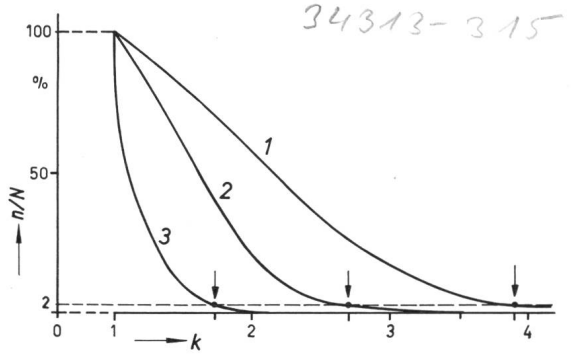

Fig. 1

Statistische Verteilung des Überspannungsfaktors für drei verschiedene Nennspannungsbereiche

d. h. Anzahl n der Überspannungsfaktoren die höher waren als der entsprechende Abszissenwert k in Prozenten aller Messwerte N in Abhängigkeit des Überspannungsfaktors k

Kurve	Nennspannungsbereich (obere Nennspannung des geprüften Transformators) kV	Anzahl geprüfte Transformatoren	Totale Anzahl ausgewertete Überspannungsfaktoren N	Überspannungsfaktor, der in 98 % aller Fälle nicht überschritten wurde k_{98}	Maximal gemessener Überspannungsfaktor k_{max}
1	3...50	4	600	3,9	4,0
2	110...170	7	738	2,7	3,5
3	220...250	2	353	1,8	2,1

Die gemachten Voraussetzungen treffen insbesondere bei modernen Transformatoren mit höheren Nennspannungen (110 kV und darüber) oft zu, sofern es sich gleichzeitig um Schalter handelt, die kapazitive Ströme rückzündungsfrei ausschalten.

Aus Gl. (1) lassen sich folgende wichtige Schlüsse ziehen:

a) Der Überspannungsfaktor k_{max} wird umso kleiner sein, je kleiner der Magnetisierungsstrom I_m und je kleiner der magnetische Wirkungsgrad η_m sind.

b) Er wird weiter umso kleiner sein, je grösser die wirksame Kapazität des frei ausschwingenden Transformators und je grösser die obere Nennspannung unter sonst gleichen Verhältnissen (C, I_m, η_m) sind.

Der starke Einfluss der Nennspannung auf die Überspannungen ist auch experimentell erwiesen. Fig. 1 zeigt die Ergebnisse aller Netzversuche die mit klassischen Ölstrahlschaltern (Einfachunterbrechung) an Transformatoren älterer Bauart durchgeführt worden sind. Im Nennspannungsbereich 220...250 kV traten nur noch ca. halb so grosse Überspannungen auf wie im Nennspannungsbereich 3...50 kV. Ebenso ist der Einfluss der Kapazität C experimentell eindeutig bewiesen worden [1]. Gestützt darauf sollen im folgenden Abschnitt die Auswirkungen der modernen, gegenüber früher wesentlich veränderten Transformatorbauweise auf die Transformator-Schaltüberspannungen diskutiert werden.

3. Verkleinerung der Transformatorschaltüberspannungen durch moderne Transformatorbauweise

Beim Bau moderner Grosstransformatoren werden seit wenigen Jahren kornorientierte Bleche verwendet. Magnetkerne aus solchen Blechen weisen einen wesentlich kleineren magnetischen Wirkungsgrad η_m auf als die früher verwendeten Bleche. Dies geht einerseits aus Messungen an Modellkernen [3] hervor. Anderseits haben durch die genannte Arbeit angeregte, unveröffentlichte Messungen an neuen Grosstransformatorkernen und eigene Auswertungen gezeigt, dass heute magnetische Wirkungsgrade η_m von 0,4 und weniger auftreten. Noch vor 10 Jahren musste man dagegen mit Werten von ca. $\eta_m = 0{,}7$ [1] rechnen. Durch die Änderung des magnetischen Wirkungsgrades η_m hat sich damit der maximal mögliche Überspannungsfaktor k_{max} um den Faktor $\sqrt{0{,}7/0{,}4} = 1{,}32$ verringert (Anwendung von Gl. (1).

Zu einem ähnlichen Schluss qualitativer Art ist eine amerikanische Studiengruppe gelangt [4].

Noch bedeutender ist die wesentliche Verkleinerung der Magnetisierungsströme durch die moderne geschachtelte Bauweise der Grosstransformatoren. Vor 10 Jahren wurden noch Transformatoren mit einem Magnetisierungsstrom bis zu 1,8 % und darüber in Betrieb gesetzt. Heute betragen die Magnetisierungsströme der Produkte zweier Transformatorfirmen noch 0,4 % und weniger. Damit ergibt sich auch durch die Verkleinerung der Magnetisierungsströme eine Verkleinerung der maximal möglichen Überspannung um den Faktor $\sqrt{1{,}8/0{,}5} = 2{,}12$.

Im Sinne einer weiteren Verkleinerung der Überspannungen wirkt sich ebenfalls die gedrängtere Bauweise als Folge der besseren Ausnützung der Isoliermaterialien aus. Die Isolierdistanzen sind kleiner, und damit die wirksamen Kapazitäten grösser geworden. Genauere zahlenmässige Angaben hierüber fehlen. Es darf aber mit Bestimmtheit angenommen werden, dass die wirksamen Kapazitäten während der letzten 10 Jahre um mindestens den Faktor 1,2 grösser geworden sind. Diese

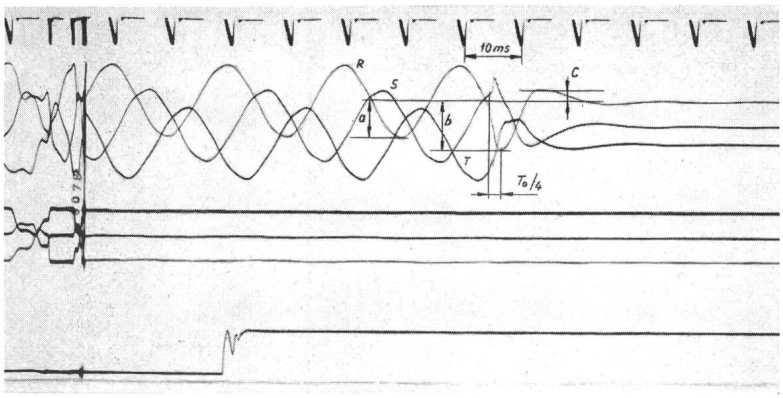

Fig. 2

Ausschalten eines leerlaufenden 420/250-kV-Transformators von 600 MVA in der Schaltstation «Breite» der NOK mit einem Mehrfachunterbrechungs-Ölstrahlschalter

R, S, T Spannung an den Transformatorklemmen; *a* Scheitelwert der Phasenspannung $\frac{427 \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 350$ kV; *b* höchste gemessene Überspannung 480 kV; Überspannungsfaktor $k = b/a = 1{,}37$

Aus den Versuchen ausgewertete Rechnungsgrössen nach den in [1] und [2] gegebenen Definitionen:
Für Berechnung der Überspannung massgebende Eigenfrequenz $f_0 = 1/T_0 = 150$ Hz; Kapazität des frei ausschwingenden Transformators inkl. fest mit dem Transformator verbundene Kapazitäten von Leitungen, Messwandlern und Spannungsteilern $C = 6{,}8 \cdot 10^{-9}$ F; Kapazität des frei ausschwingenden Transformators allein (die bei Kurzschlussversuchen mit niedriger Spannung ermittelte Kapazität des gleichen Transformators betrug vergleichsweise $5{,}2 \cdot 10^{-9}$ F) $C_{Tr} = 4{,}3 \cdot 10^{-9}$ F; magnetischer Wirkungsgrad $\eta_m \approx c/b = 0{,}23$; Leerlaufstrom (Scheitelwert/$\sqrt{2}$) 4,5 A

Vergrösserung der wirksamen Eigenkapazität der Transformatoren ergibt damit eine weitere Verringerung des maximal möglichen Überspannungsfaktors um $\sqrt{1{,}2} = 1{,}1$.

Zusammen bewirken die im Laufe der letzten zehn Jahre im Transformatorbau durchgeführten Verbesserungen, sozusagen als Nebenerscheinung, eine Verringerung der maximal möglichen Transformator-Schaltüberspannung um den Faktor 3. ($1{,}32 \cdot 2{,}12 \cdot 1{,}1 = 3{,}06$). Dieser wesentliche Fortschritt verdient beachtet und wirtschaftlich ausgewertet zu werden.

4. Konsequenzen der erreichten Verbesserung durch Verwendung moderner Transformatoren

Einzelne der oben dargelegten Erkenntnisse wurden unter Zuhilfenahme von Untersuchungen im Laboratorium nach der Kombinationsmethode in [2] bei der Einführung der Mehrfachunterbrechungs-Ölstrahlschalter vor 5 Jahren angewendet. Schalter für Nennspannungen von 220 kV und darüber wurden nicht mehr mit Dämpfungswiderständen ausgerüstet. Die inzwischen durchgeführten Inbetriebsetzungen und Betriebserfahrungen haben gezeigt, dass keine gefährlichen Transformator-Schaltüberspannungen auftreten. So betrug beispielsweise der maximale Überspannungsfaktor einer 420/250-kV-Transformatorgruppe von 600 MVA $k_{max} = 1{,}4$ beim Ausschalten aus dem eingeschwungenen Zustand (Fig. 2) und $k_{max} = 2{,}0$ aus dem nicht eingeschwungenen Zustand.

Aus anderen Versuchen an neuen 130- und 150-kV-Transformatoren geht hervor, dass auch bei diesen tieferen Nennspannungen allgemein kleinere, für alle Anlageteile ungefährliche Transformator-Schaltüberspannungen zu erwarten sind. Es erscheint deshalb logisch, auch bei den Transformatoren-Schaltern mit Nennspannungen von 110...170 kV auf die Anwendung von Dämpfungswiderständen zu verzichten. Dies insbesondere dort wo die Transformatoren ohnehin durch Überspannungsableiter geschützt sind. Es mag interessieren, dass diese Schutztechnik in schwedischen Netzen seit einigen Jahren mit Erfolg angewendet wird [5].

Bei Netzspannungen von 72 kV und tiefer hat sich wenigstens bei Ölstrahlschaltern das Problem der Dämpfung von Transformatorschaltüberspannungen nicht gestellt. Jahrzehntelange vorzügliche Betriebserfahrungen bestätigen dies.

5. Schlussfolgerungen

Moderne, gedrängt gebaute Transformatoren für Nennspannungen von 110 kV und darüber, mit Eisenkernen aus kornorientiertem Blech und mit sehr kleinem Luftspaltanteil erzeugen beim Ausschalten des Leerlaufstromes, praktisch unabhängig vom Schalter, nur geringe Überspannungen.

Man ist versucht, von «überspannungsfreien Transformatoren» zu sprechen. Anlageteile und die Transformatoren selbst sind durch diese Überspannungen nicht gefährdet. Zum Schutze der Transformatoren eingebaute Überspannungsableiter werden selten wegen Ausschaltüberspannungen ansprechen. Der Anbau von Widerständen an die Schalter zur zusätzlichen Dämpfung der Transformatorschaltüberspannungen ist nicht mehr notwendig. Da moderne Schalter leerlaufende Freileitungen rückzündungsfrei ausschalten, sind auch für diesen Schaltfall keine Dämpfungswiderstände mehr erforderlich. Durch deren Wegfall (mit den ihnen zugehörenden Unterbrechern) werden die Schalter und damit die Anlagen betriebssicherer. Deshalb wird man, ausgenommen in Spezialfällen (wie bei Schaltern für Reaktoren) auf Dämpfungswiderstände mit Vorteil verzichten.

Bei Nennspannungen unterhalb 110 kV ist es nach wie vor wichtig, dass die Schalter möglichst kleine Momentanwerte des Magnetisierungsstromes abreissen und Transformatorschaltüberspannungen dielektrisch auf ungefährliche Werte begrenzen. Schalter mit diesen Eingeschaften, wie z. B. Ölstrahlschalter, brauchen ebenfalls nicht mit Dämpfungswiderständen ausgerüstet zu werden. Jahrzehntelange gute Betriebserfahrungen bestätigen dies.

Literatur

[1] *A. W. Roth* et *H. R. Strickler:* Etude de la réduction des surtensions résultant du déclenchement de transformateurs marchant a vide. CIGRE-Rapport 129, 1954.

[2] *R. Thaler, Th. Heinemann* et *J. Marty:* Surtensions dues à la coupure de petits courants inductifs en laboratoire et en réseau. CIGRE-Rapport 117, 1964.

[3] *B. Staub:* Modellversuche zur Ermittlung der maximal möglichen Überspannung beim Ausschalten leerlaufender Transformatoren. Bull. SEV 55(1964)2, S. 43...51.

[4] Switching Surges. I-Phase-to-Ground Voltages. AIEE Committee-Report. Trans. AIEE Power Apparatus and Systems 80(1961)54, S. 240...261.

[5] *G. Jancke:* Schalterfragen in den schwedischen Hochspannungsnetzen. Bull. SEV 53(1962)8, S. 391...398.

Adresse des Autors:

R. Thaler, dipl. Elektrotechniker, Sprecher & Schuh AG, 5000 Aarau.