Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 74 (1983)

Heft: 23

Artikel: Die Flussverteilung im Kessel von Dreiphasen-Transformatoren bei starker Übererregung

Autor: Kozlowska, A. / Stasiak, K.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-904898

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: 10.12.2025

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

Die Flussverteilung im Kessel von Dreiphasen-Transformatoren bei starker Übererregung

A. Kozlowska und K. Stasiak

Kurzzeitige, starke Übererregung von Transformatoren grosser Leistung bringt die Gefahr einer örtlichen Überhitzung verschiedener Bauteile. Die Resultate der vorliegenden Arbeit erlauben die Bestimmung derjenigen Bereiche im Kessel, wo bei Übererregung grosse Verluste zu erwarten sind. Leerlaufversuche wurden an Modelltransformatoren mit drei und fünf Schenkeln durchgeführt bei gegenüber Nenninduktion 30% Übererregung.

Une forte surexcitation même brève de transformateurs de grande puissance risque de surchauffer localement certaines parties de leur construction. Les résultats de l'étude présentée permettent de déterminer les emplacements dans la cuve où une surexcitation peut provoquer de fortes pertes. Des essais à vide ont été exécutés à des transformateurs à trois et à cinq noyaux avec une surexcitation de 30 % par rapport à l'induction nominale.

Der Aufsatz ist das Manuskript eines Vortrages des Rapperswiler Herbst-Symposiums 1982, das von H. Weidmann AG am 30. September und 1. Oktober 1982 am ITR durchgeführt wurde.

Adresse der Autoren

Dr. Ing. *Alicja Kozlowska* und
Ing. *Kazimierz Stasiak*, Technical University of Lodz, Institute of Transformers, el. Machines and Apparatus, Gdanska 155, P-90924 Lodz.

1. Einleitung

Übererregung bedeutet eine Belastung des magnetischen Kreises von Transformatoren bis in die hohe Sättigung. Die ideell auf den Eisenquerschnitt bezogenen Induktionen übersteigen die etwa 2 T betragende Sättigungsinduktion der zurzeit verwendeten Elektrobleche erheblich. Als Übererregungsgrad k_p wird das Verhältnis der unverdrängt-ideell auf den Schenkelquerschnitt berechneten Induktion B_s zur Induktion B_n bei Nennbetrieb gebildet:

$$k_p = \frac{B_s}{B_n} = \frac{U \cdot f_n}{U_n \cdot f} \qquad (1)$$

U_n, f_n Nennspannung und Nennfrequenz
U, f Spannung und Frequenz bei Übererregung

Grosse Transformatoren arbeiten mit Nenninduktionen zwischen 1,65 und 1,77 T.

Abhängig von Übererregungsgrad und Einwirkungsdauer kann ein Transformator thermisch beschädigt oder zumindest der Zustand von dessen Isolation verschlechtert werden. Häufen sich, eventuell kaum bemerkt, die Fälle von Übererregung, so können Teile der Isolation schliesslich bis zum Versagen geschädigt werden.

Nach allgemeiner Ansicht ist eine Übersättigung von Transformatoren im Netzbetrieb wenig wahrscheinlich. Die bei Abweichung der Spannung und der Frequenz von den Nennwerten auftretenden Induktionen erreichen die Sättigungsinduktion der Bleche kaum, schon weil eine relativ geringe Unterfrequenz und grössere Überspannungen einen geordneten Netzbetrieb verunmöglichen.

Anders Blocktransformatoren, welche mit Generatoren gleicher Leistung in Blockschaltung zur Einheit fest verbunden sind. Lastabwürfe sowie die beim Anfahren und Stillsetzen zu kleine Frequenz verursachen Übererregungen, in deren Folge eine ganze Reihe von Transformatorbeschädigungen auftraten [1]. Die Generatoren mit ihren grossen Luftspalten erwiesen sich als unempfindlich. Auch für Trafos an Wasserkraftgeneratoren ist die Gefahr von Beschädigungen geringer dank den kürzeren Anfahr- und Abstellzeiten.

Wird ein Transformator über den Sättigungsfluss des Eisens hinaus belastet, so nimmt der von den grossen Magnetisierungsströmen erregte zusätzliche Fluss grossenteils Wege ausserhalb der Kerne und Joche, so zwischen dem Kern und der erregenden Wicklung, auch durch diese und die anderen Wicklungen, durch metallische Konstruktionsteile wie Jochpressbalken, Spannschrauben und Zugstangen sowie über den Kessel. Wirbelströme führen dann zur Erwärmung und zur Überhitzung dieser Teile und damit zur Gefährdung anliegender Isolationsmaterialien.

Bezüglich dem zulässigen Übererregungsgrad und der zeitlichen Einwirkung zeigt Figur 1 die Anforderungen nach VDE und nach IEEE; maximal

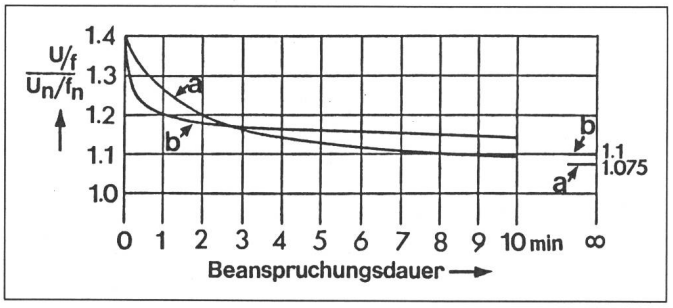

Fig. 1
Zulässiger Übererregungsgrad
a nach VDE-Vorschriften
b nach IEEE

1,4fache Übererregung darf einige Sekunden, eine 1,2fache 1 bis 2 min anhalten. Modelltransformatoren mit fünf und mit drei Schenkeln wurden im Leerlauf 1,3fach übererregt und ausgemessen, und anhand der Resultate die Bereiche des Kessels mit erhöhten Verlusten bestimmt.

2. Modelltransformatoren

Ausführliche Prüfungen wurden am Fünfschenkelmodell nach Figur 2 und etwas vereinfachte an einem Dreischenkelmodell durchgeführt. Die Figur zeigt auch die Anordnung der Messspulen mit je fünf Windungen zur Erfassung der vertikalen und der horizontalen Komponenten der Induktion in den je 3 mm starken Wänden von Kessel und Deckel. Beide Modelltransformatoren haben stählerne Jochpressbalken.

Fünfschenkeltransformator

- Blechtyp ET5 (entspricht M5) von 0,3 mm Dicke
- Hauptschenkel zweirahmig, Querschnitt $S_k = 44{,}8\ \text{cm}^2$
- alle Joche mit dem Querschnitt $S_j = 22{,}4\ \text{cm}^2$, somit $S_j/S_k = 0{,}5$
- Erregerwicklung mit 187 Windungen pro Phase in Dreieck
- Messwicklungen oben, in Mitte und unten an allen Säulen

Dreischenkeltransformator

- Blechtyp M6 von 0,35 mm Dicke
- gleiche Kern- und Jochquerschnitte $S_k = S_j = 88{,}14\ \text{cm}^2$; $S_j/S_k = 1$
- Erregerwicklung mit 112 Windungen pro Phase in Dreieck

3. Messung der Induktionsverteilung

Zur Messung des magnetischen Flusses wurde ein AEG-Vektormesser an die einzelnen Messsonden angeschlossen. Der auf halbe Periodendauer $T/2 \triangleq 180°$ el. eingestellte Kontakt des Vektormessers führt dessen Drehspulmesswerk bei maximalem Ausschlag gerade die positive Halbwelle der in den N_M Windungen der Messwicklung induzierten Spannung $U_{M\max}$ zu, linear gemittelt und der Flussänderung von $-\Phi_{\max}$ bis $+\Phi_{\max}$, also $2|\Phi_{\max}|$ proportional:

$$U_{M\max} = \frac{2}{T}\int_{t_0}^{t_0+T/2}\left(N_M\frac{d\Phi}{dt}\right)dt = 2fN_M\cdot 2\Phi_{\max} \qquad (2)$$

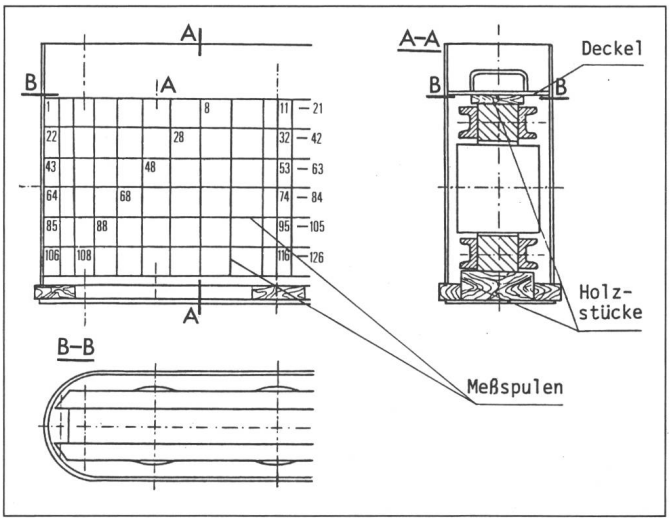

Fig.2
Fünfschenkelmodell

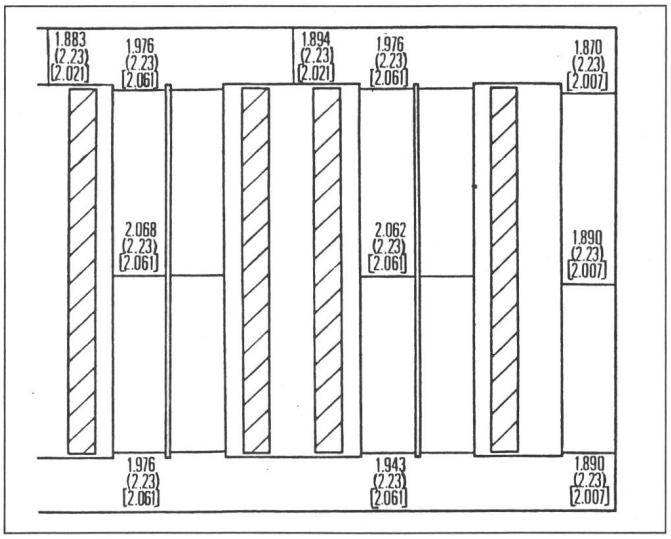

Fig. 3
Maximale Induktionswerte in verschiedenen Teilen des Kernes des Fünfschenkeltransformators

.... gemessene Induktionswerte
(....) berechnete Induktionswerte ohne Berücksichtigung der Verdrängung des Flusses aus dem Kern
[....] berechnete Induktionswerte mit Berücksichtigung der Verdrängung des Flusses aus dem Kern

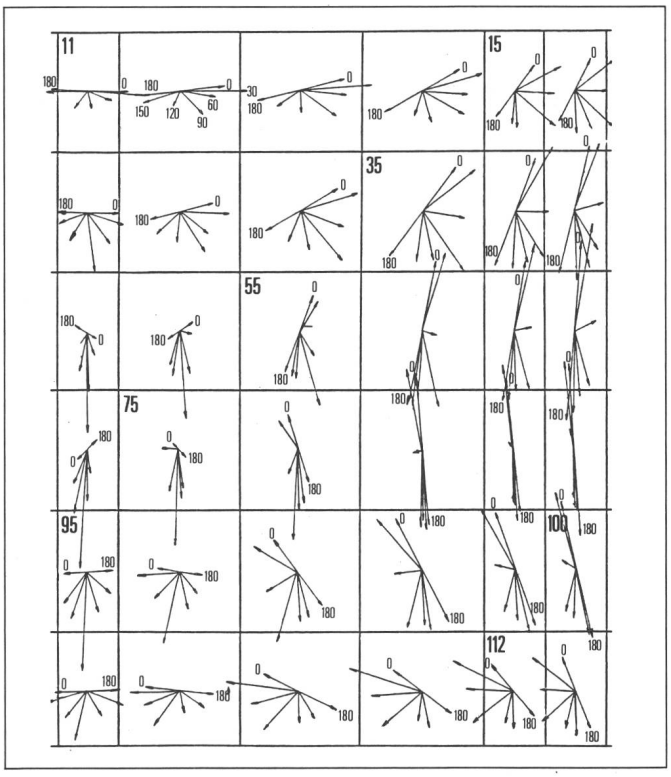

Fig. 4
Momentane Induktionsverteilung in einem Ausschnitt der Wand des Kessels des Fünfschenkeltransformators
Für $\omega t = 0{,}30, 60, 90, 120, 150, 180°$

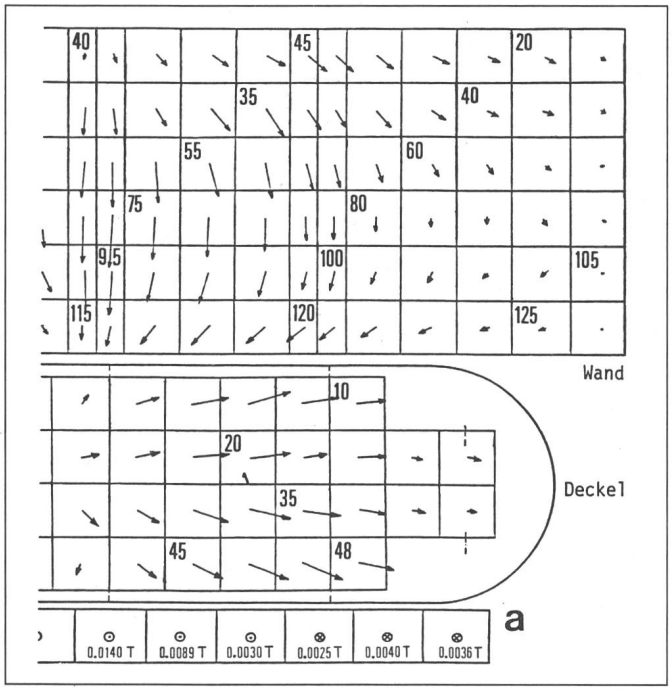

Fig. 5
Induktionsverteilung des Fünfschenkeltransformators bei $\omega t = 90°$
a Vertikale Komponente zwischen dem Deckel und dem Joch des Kernes

Durch Veränderung der Startzeit t gegenüber t_0 für Φ_{max} (bei $f = 50$ Hz entspricht die Periodendauer $T = 20$ ms dem elektrischen Winkel $\omega T = 360°$ el.) lassen sich auch die Momentanwerte der Flüsse Φ zur Zeit t bzw. im Zeitwinkel ωt messen. Die Induktion B_t ergibt spezifisch gemittelt für den von der Messwicklung umfassten Querschnitt S_M

$$B_t = \frac{U_{Mt}}{4 f N_M S_M} \qquad (3)$$

Die zur Zeit t bzw. Phase ωt in den Mitten der quadratisch eingeteilten Wandelemente von Kessel und Deckel nach Betrag und Richtung resultierenden Induktionen ergeben sich durch vektorielle Addition der aus den Messwerten von je zwei gegenüberliegenden Messspulen gemittelten horizontalen und vertikalen Induktionskomponenten.

4. Messergebnisse und Folgerungen

In den beschriebenen Modelltransformatoren wurden symmetrische, um 120° el. zeitlich phasenverschobene Wechselflüsse erregt. Der Induktion in der mittleren Säule wurde dabei der Nulldurchgang zur Zeit $t = 0$ mit dem Phasenwinkel $\omega t = 0°$ zugeordnet.

Der *Fünfschenkeltransformator* wurde auf die ideell auf die Schenkel- und Jochquerschnitte berechnete Induktion $B_s = 2{,}23$ T erregt, was bei einer Nenninduktion von 1,7 T den Übererregungsgrad $k_p = 1{,}31$ ergibt. Figur 3 zeigt die im Magnetgestell an verschiedenen Stellen auftretenden Induktionsmaxima.

Figur 4 stellt die Induktionen in der Kesselwand dar für die Phasenwinkel von 0...180° in 30°-Schritten. Bedingt durch die partielle Sättigung des Magnetgestells lassen sich die nichtlinear und stark oberwellenbehafteten Verläufe der Induktionen in Wand und Deckel erkennen. In Figur 5 ist die Induktionsverteilung für $\omega t = 90°$ allein dargestellt. Aus dieser Art der Darstellung der Induktionsvektoren der Wand- und Deckel-Felder ergeben sich anschauliche Bilder der jeweiligen Feldzustände. Die Figur enthält auch die vertikalen Komponenten der Induktion zwischen oberem Joch und Deckel.

Der *Dreischenkeltransformator* wurde bei $B_s = 2{,}2$ T mit dem Übererregungsgrad $k_p = 1{,}30$ gemessen. Analog zu Figur 4 zeigt Figur 6 die Induktionen in den Kesselwandfeldern in 30°-Schritten.

Ergänzend zeigt Figur 7 für den Fünfschenkeltyp die ideellen Flusswerte im Magnetgestell für die Phasenwinkel 0...150° el. Aus den Figuren 3...5 und 7 lässt sich schliessen, dass sich im Bereiche hoher Sättigung der Hauptschenkel $(0{,}87...1...0{,}87)B_s$ der magnetische Fluss weitgehend im axialen Kanal zwischen Kern und Erregerwicklung längs dem ganzen Hauptschenkel bildet [2] und sich zwischen den Knotenbereichen der Schenkelenden grossenteils über die Kesselwände schliesst, da die anstossenden Jochabschnitte gleichzeitig ebenfalls übersättigt werden. Dabei bilden sich zu den vertikalen Aussenjochen parallele Flüsse in den Kesselwänden und zum oberen und unteren Joch parallele Flüsse in den Jochbalken und im Deckel bzw. Boden.

Wesentlich anders verteilt sich der vom Dreischenkeltyp austretende Fluss, da die mittlere Säule auch im übersättigten Zustand den Fluss durch die den Schenkeln entsprechenden Jochquerschnitte den schwach belasteten Aussensäulen zuleiten kann. Im Bereich der Flussmaxima der Aussensäulen samt anstossenden Jochab-

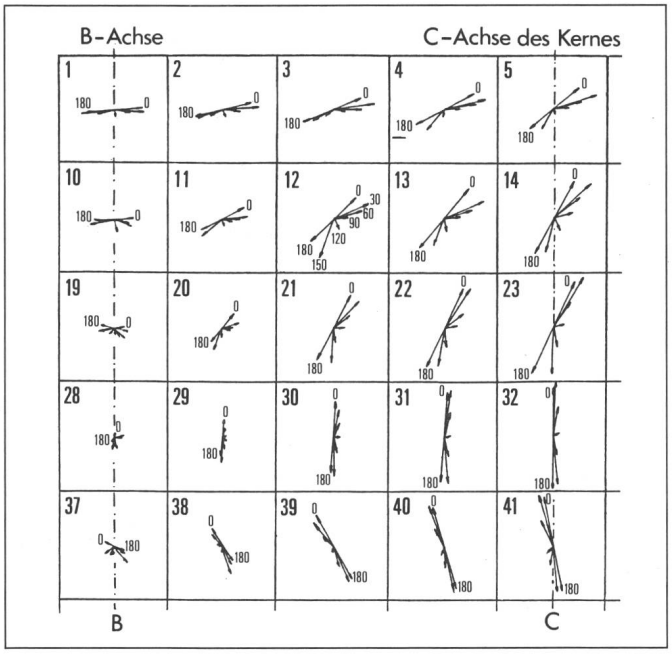

Fig. 6
Momentane Induktionsverteilung in der Wand des Kessels des Dreischenkeltransformators (Ausschnitt)

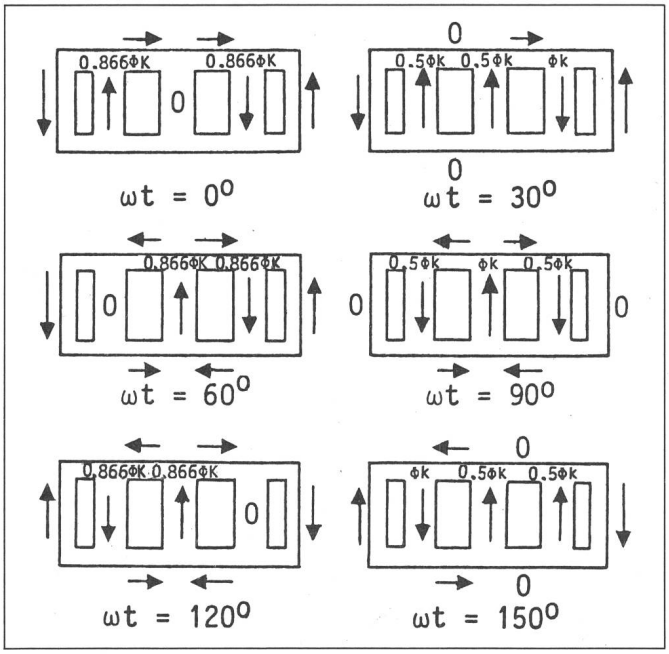

Fig. 7
Richtung und Betrag des magnetischen Flusses im Fünfschenkeltransformator

schnitten ergeben sich jedoch ebenfalls starke Belastungen der benachbarten Kesselwände (vgl. Fig. 4 und 6).

Die Figuren 8 und 9 stellen die Maximalwerte der Induktionen in den Kesselwandfeldern der Fünfschenkel- bzw. Dreischenkeltype grafisch dar. Als grösste Induktionen wurden beim Übererregungsgrad 1,3 in der Kesselwand ermittelt:

- am Fünfschenkeltyp: $B_{max} = 0{,}3$ T
- am Dreischenkeltyp: $B_{max} = 0{,}53$ T

Die in Figur 3 für den Fünfschenkeltyp eingetragenen Induktionen wurden nach [2; 3] errechnet. Tabelle I enthält einige prozentuale Werte von bei Übererregung parallel zum Magnetgestell entstehenden Flüssen.

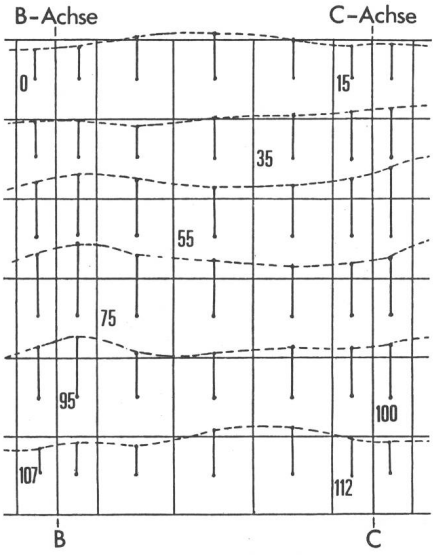

Fig. 8 Verteilung der maximalen Induktion in der Wand des Kessels beim Fünfschenkeltransformator

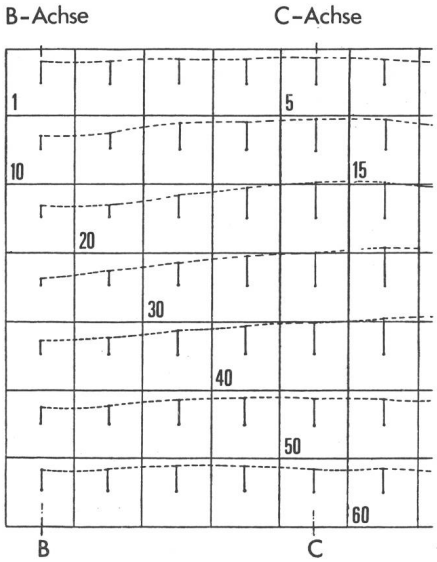

Fig. 9 Verteilung der maximalen Induktion in der Wand des Kessels beim Dreischenkeltransformator

5. Schlussfolgerungen

Aus den Induktionsverteilungen in den Kesseln von im Leerlauf übererregten Drehstromtransformatoren können folgende Schlüsse gezogen werden:

1. Die Ummagnetisierung des Kessels durch bei Übersättigung des Kernes ausstreuende magnetische Flüsse hat elliptischen Charakter.

2. Die Induktionsverteilung im Kessel ist von der Bauweise des Kernes abhängig:

- Beim Dreischenkelkern sind die im Mittel erreichten maximalen Induktionen im Kessel grösser als beim Fünfschenkelkern; die grössten Werte treten in den die Aussenschenkel umfassenden abgerundeten Kesselteilen auf, die kleinsten in den Bereichen des Kessels gegenüber dem mittleren Schenkel.
- Beim Fünfschenkelkern ist die Verteilung der im Kessel maximal erreichten Induktionen gleichmässiger als beim Dreischenkelkern; die grössten Werte treten in den Bereichen des Kessels gegenüber den Hauptschenkeln auf.

3. Die in Deckel- und Bodennähe des Kessels beobachteten Induktionen sind kleiner als diejenigen im Bereiche der Kesselwände gegenüber den Wicklungen.

Literatur

[1] *J. Gantner* et *F. H. Birch:* Protection contre la sursaturation des transformateurs. Electra -(1973)31, p. 65...73.

[2] *A. Kozlowska* i *H. Pabis:* Rozklad strumienia magnetycznego w transformatorach duzych mocy przy ich krotkotrwalych przewzbudzeniach. Rozprawy Elektrotechniczne 23(1977)1, s. 131...146.

[3] *A. Kozlowska:* Rozklad strumienia w trójfazowych wieloramowych rdzeniach pieciokolumnowych. Rozprawy Elektrotechniczne 16(1970)1, s. 127...146.

[4] *P. L. Bellaschi:* Overexcitation of large generator transformers. Transmission and Distribution 20(1968)8, p. 72...73.

[5] *W. C. Sealey:* Overexcitation of power transformers. Allis-Chalmers Engineering Review 30(1965)4, p. 18...19.

Prozentuale Werte des aus den 5-Schenkel-Kernen bzw. 3-Schenkel-Kernen verdrängten Flusses. Übererregungsgrad $k_p = 1{,}30$ (vgl. Fig. 3)

Tabelle I

	5-Schenkel-Kern $S_j/S_k = 0{,}5$	5-Schenkel-Kern nach [2] $S_j/S_k = 0{,}578$ geprüft ohne Kessel	3-Schenkel-Kern $S_j/S_k = 1{,}0$
Hauptschenkel – Mitte	7,4	5,2	2,7
Hauptschenkel – oben und unten	11,4	–	6,8
Joche – Mitte zwischen den Hauptschenkeln	15,3	1,2	7,7
Rückschlussjoche – Mitte	14,6	9,0	–
Rückschlussjoche – oben und unten	17,0	–	–