

EINIGE FRAGEN DES STOSSPANNUNGSSCHUTZES VON TRANSFORMATOREN MIT SCHEIBENWICKLUNGEN

Von

K. KARSAL, D. KERÉNYI und G. UJHÁZY

(Eingegangen am 11. April 1970)

Vorgelegt von PROF. D. I. RETTER

1. Einführung

Bekanntlich ist gleichzeitig mit dem Erscheinen der sich an Hochspannungsleitungen anschließenden Transformatoren die die Transformatorenkonstruktöre bislang interessierende Frage aufgetaucht: der Stoßspannungsschutz der Transformatorenwicklungen. Das Problem ergibt sich aus jener Erscheinung, daß sich die in die Transformatorenwicklung eindringenden Spannungswellen mit steiler Stirn — im Gegensatz zu den Spannungen mit Netzfrequenz — in den Wicklungen zu Beginn der Erscheinung ungleichmäßig verteilen, worauf sich Spannungsschwingungen entwickeln, die sich später asymptotisch einer pseudofinalen (induktiven) Spannungsverteilung annähern und endlich eine von dem Isolationswiderstand der Wicklungsteile und von dem Widerstand der Wicklungsleiterteile bestimmte Spannungsverteilung hervorrufen. Die pseudofinale und endgültige Spannungsverteilung unterscheidet sich nicht wesentlich von der gleichmäßigen. Die Größe der Spannungsschwingungen hängt davon ab, wie sehr die anfängliche Spannungsverteilung von der endgültigen Spannungsverteilung abweicht. Die gleichmäßige anfängliche Spannungsverteilung kann umso besser angenähert werden, je größer die resultierende Reihenkapazität (K) verglichen mit der resultierenden Parallel- oder Erdkapazität (C) ist, bzw. je kleiner der Faktor

$$z = \sqrt{\frac{C}{K}} \text{ ist.}$$

In dieser Hinsicht können die Lagenwicklungen mit entsprechend bemessener Windungs- und Lagenisolation, wenn nötig mit Schirmarmaturen, eine gute Lösung bieten. Die Scheibenwicklungen weisen neben anderen günstigen Eigenschaften jene ungünstige Eigenheit auf, daß ihre Anfangs-Stoßspannungsverteilung von der gleichmäßigen weit abweicht. Der Faktor z variiert zwischen 5 und 25, doch können noch ungünstigere Werte als letztgenannter auftreten. Die Scheibenwicklungen selbst sind nicht stoßspannungsfest, weswegen die

Anfangs-Spannungsverteilung nur mit Hilfe anderer Elemente — mittels eines Schirmzylinders oder mittels Ringarmaturen — günstiger gestattet werden, womit eine annehmbare Stoßspannungsverteilung erzielt werden kann. Viele Arten der Schirmarmaturen sind bekannt, doch weisen diese Lösungen eine gemeinsame nachteilige Eigenschaft auf: sie erhöhen den Anteil der in den Transformator eingebauten inaktiven Metallmaterialien, verschlechtern die Raumausnutzung und sind mit einem Wort nicht transformatorengerecht.

In der Mitte der 40-er Jahre gelang es den Ingenieuren der English Electric eine geistreiche Lösung [1] zu finden, die erwähnten, mit der Anwendung der Schirmarmaturen verbundenen Schwierigkeiten zu eliminieren. Diese Lösung besteht aus der Verschachtelung der Windungen, was mit den nachstehenden physikalischen Folgen verbunden ist: die nebeneinander liegenden Windungen der Scheiben einer solchen Wicklung sind elektrisch voneinander weit entfernt (der Spannungsunterschied zwischen zwei Nachbarwindungen ist groß), die Energie des sich zwischen zwei Nachbarwindungen befindlichen elektrischen Feldes wächst mit dem Ansteigen der Windungsspannung quadratisch an, was eine Erhöhung der Reihenkapazität bedeutet. Mit diesem Verfahren ist es gelungen, die Reihenkapazität der Wicklungen und damit den Wert des Faktors α unter 3—4 zu senken und die Anfangsspannungsverteilung in den Wicklungen der Gleichmäßigkeit anzunähern.

2. Das Anwendungsbereich der verschachtelten Wicklungen

Der Anwendung von verschachtelten Wicklungen stellen sich gewisse Schwierigkeiten entgegen, sie beansprucht im Verlaufe der Fertigung mehrere Schweißstellen, ist daher arbeitsaufwendiger, und wird deswegen nur dort eingesetzt, wo in der herkömmlichen Scheibenwicklung die entstehenden Beanspruchungen von der Innenisolation der Wicklung nicht mehr ertragen werden können. Wenn man die herkömmliche Scheibenwicklung mit ihrer verschachtelten Variante vergleicht, so ergibt sich, daß die verschachtelte Variante die Beanspruchungen nicht verschwinden läßt, sondern sie quasi umlagert: in den herkömmlichen Scheiben tritt der Ort der großen Beanspruchungen zwischen den Scheiben auf, während zwischen den Windungen keine bedeutende Beanspruchung entsteht, und endlich treten die großen Beanspruchungen in erster Linie in dem ersten Teil der Wicklung auf. Demgegenüber vermindern sich im Falle der verschachtelten Wicklungen die Beanspruchungen zwischen den Scheiben, erhöhen sich aber zwischen den Windungen, doch verteilen sich diese erhöhten Beanspruchungen gleichmäßiger der Wicklung entlang.

Über das Anwendungsbereich der herkömmlichen und der verschachtelten Ausführung gibt folgende vereinfachte Überlegung ein übersichtliches, quali-

tativ richtiges Bild. Die auf das erste Scheibenpaar fallende Beanspruchung einer aus N Scheiben bestehenden herkömmlichen Scheibenwicklung beträgt, wenn $\alpha \geq 2$ und u_0 die Amplitude der Rechteckwelle ist,

$$\Delta u = \frac{2u_0}{N} \cdot \sqrt{\frac{C}{K}} = u_0 \cdot \sqrt{4 \frac{C}{N} \frac{1}{KN}}$$

wobei in der obigen Beziehung $\frac{C}{N}$ die Erdkapazität einer Scheibe, KN die Reihenkapazität einer Scheibe, der unter der Wurzel stehende letzte Ausdruck den Faktor α' eines Scheibenpaares bedeutet, der sich aus der Division des Faktors α durch $N/2$ ergibt. Wird in Betracht gezogen, daß $\alpha = 5-25$ und $N = 50-100$ beträgt, so variieren die auf das erste Scheibenpaar fallenden Beanspruchungen Δu zwischen $0,1 u_0$ und $0,5 u_0$. Die aus den von IEC zugrundegelegten Prüfwerten berechneten Beanspruchungen ändern sich bei den verschiedenen Spannungspegeln, wie das aus Abb. 1 ersichtlich ist. Auf der Abbildung ist auch die Durchschlagsfestigkeit einiger Scheibenisolationen (Eine Preßspanscheibe von 1 mm Dicke mit verschiedenen Ölkanal-Preßspanzwischenlagen von 3—4—5—6 mm Stärke) zu sehen. In dem Bereich, das von den Beanspruchungen von $0,1 u_0$ bis $0,5 u_0$, die zwischen den Scheiben entstehen, begrenzt wird, sind die in den herkömmlichen Wicklungen

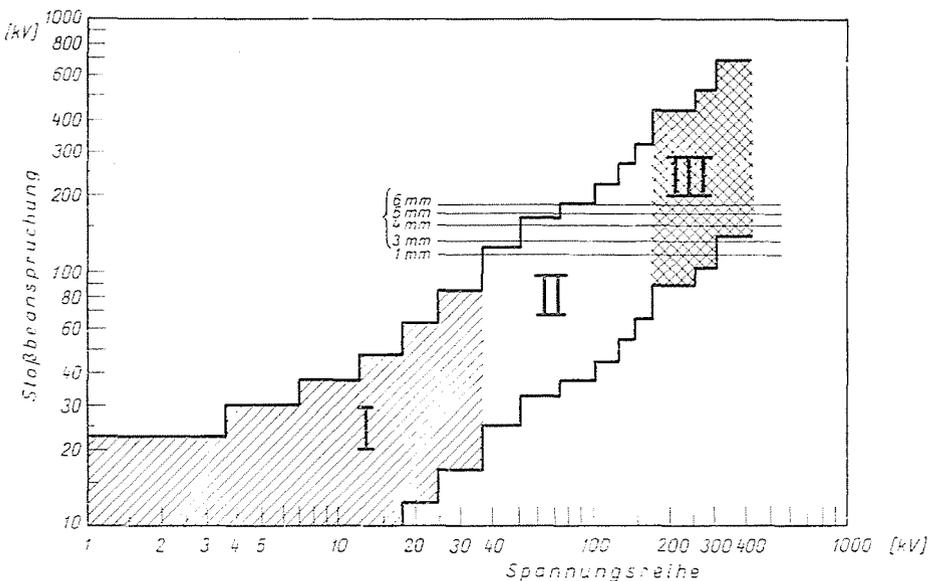


Abb. 1. Annähernde Werte der Stoßspannungsbeanspruchungen in Hochspannungswicklungen von Transformatoren verschiedener Spannungsreihe. Die Bereiche I, II und III wurden unter Berücksichtigung der Sicherheit eingezeichnet

entstehenden Beanspruchungen zu finden und dieser Streifen kann in Bereich I, II und III aufgeteilt werden. Im Bereich I — bis zu etwa 36 kV — ist der Stoßspannungsschutz mit Hilfe der herkömmlichen Wicklung lösbar. Im Bereich II — von 52 kV bis 170 kV — kann, abhängig von der Geometrie der Wicklung, entweder die herkömmliche Wicklung, oder die Verschachtelung oder irgend ein anderer Schutz verwendet werden. Im Bereich III, bei 245 kV oder darüber ist die Verschachtelung oder irgendein anderer wirksamer Schutz in jedem Fall notwendig.

3. Die Anwendung der Verschachtelung im Anfangsteil der Wicklung

In solchen Fällen, wenn die in den herkömmlichen Scheibenwicklungen zustande kommenden Beanspruchungen die Grenze der Anwendbarkeit

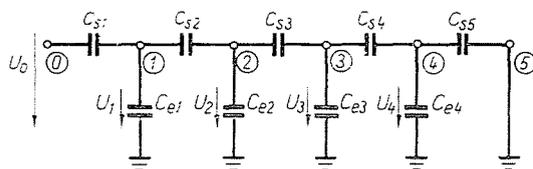


Abb. 2. Kapazitives Ersatzschaltbild einer in 5 Elemente unterteilten inhomogenen Wicklung

nur um wenig überschreiten — in dem Bereich der größten Systemspannungen von 52 kV bis 170 kV — kann der Stoßspannungsschutz der Wicklung auch so gelöst werden, daß das erste Viertel oder Fünftel der Wicklung von den Eingangsklemmen her, unter Anwendung der Verschachtelung, der Rest dagegen in herkömmlicher Art gefertigt wird. In solchen Fällen ist die Wicklung inhomogen, das heißt, sie kann nicht auf eine beliebige Anzahl solcher Abschnitte geteilt werden, deren Reihen- und Erdkapazitäten und Selbst- und gegenseitige Induktivitätsfaktoren des Ersatzschaltbildes mit verteilten Parametern untereinander identisch sind. Im Anfangsteil der Wicklung erhöhter Reihenkapazität gestattet sich die Anfangsspannungsverteilung auf folgende Weise: Im inhomogenen Teil wird der Spannungsabfall kleiner, im weiteren Wicklungsteil bleibt die Spannungsverteilung hinsichtlich ihres Charakters so, als ob sie vom Anfang bis zum Ende aus den Elementen des homogenen Teiles aufgebaut wäre, nur daß sich die Spannungsordinaten der einzelnen Teile linear verlängern [2]. Abb. 2 zeigt das Ersatzschaltbild einer Anfangsspannungsverteilung einer auf fünf Teile geteilten ($n = 5$) Wicklung, Abb. 3 die Spannungsverteilung derselben Wicklung. Die mit unterbrochener Linie ausgezogene Linie zeigt die Verteilung der aus den Elementen des homogenen Teiles aufgebauten ganzen Wicklung, die kontinuierliche Kennlinie jedoch

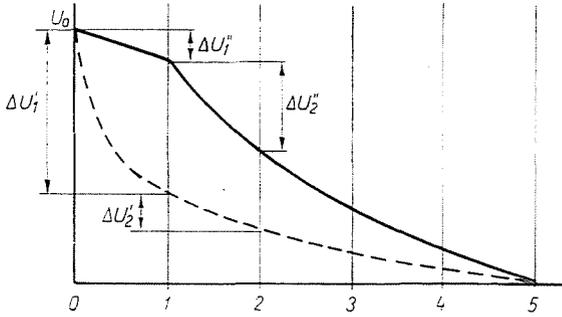


Abb. 3. Spannungsverteilung in einer in 5 Elemente unterteilten inhomogenen und in einer homogenen Wicklung. In der homogenen Wicklung tritt die maximale Beanspruchung Δu_1 am ersten Element auf, in der inhomogenen Wicklung entsteht sie aber am zweiten Element (Δu_2^i)

die Spannungsverteilung der inhomogenen Wicklung. Aus einem Vergleich der beiden Kennlinien kann festgestellt werden, daß die Erhöhung der Reihenkapazität des Anfangsteiles an sich an den Stoßspannungsverhältnissen einer Wicklung mit ungünstiger Spannungsverteilung nicht viel ändert, höchstens die Stelle der größten Beanspruchung verschiebt. Die Vorbedingung einer wirksamen Lösung ist, daß auf das erste — eine erhöhte Reihenkapazität aufweisende — Glied eine ebenso große Spannung entfällt wie auf den ersten Teil des homogenen Gliedes. Die Voraussetzung davon ist

$$u_0(1 + \xi r_1) = u_0 \xi (r_1 - r_2).$$

d. h.

$$\xi r_1 = \frac{1}{2(r_1 - r_2)}.$$

In der Formel ist

$$\xi r_1 = \frac{C_{S1}}{C_{S2}} \cdot \left(1 - \frac{X r_1}{1 + X r_1} \right)$$

und

$$X = \frac{C_{S1}}{C_{S2}} \cdot \left(1 + \frac{C_{e1}}{C_{S1}} \right) - \left(1 - \frac{C_{e2}}{C_{S2}} \right), \quad r_1 = \frac{\operatorname{sh}(n-1) \sqrt{\frac{C_{e2}}{C_{S2}}}}{\operatorname{sh} n \sqrt{\frac{C_{e2}}{C_{S2}}}}$$

$$r_2 = \frac{\operatorname{sh}(n-2) \sqrt{\frac{C_{e2}}{C_{S2}}}}{\operatorname{sh} n \sqrt{\frac{C_{e2}}{C_{S2}}}}$$

r_1 und r_2 sind die Ordinatenwerte der bei dem Eindringen der Rechteckwelle entstehenden Anfangsverteilungen in den Teilungspunkten 1 und 2, wenn die Wicklungselemente durchgängig mit den Elementen des homogenen Gliedes identisch sind.

4. Wicklungen mit Reihenkapazität verschiedener Größe

Aus der Darlegung geht hervor, daß eine Zusammenkopplung von Wicklungen mit verschiedenen Stoßspannungseigenschaften nur dann günstigere Stoßspannungsbeanspruchungen ergeben kann, wenn bestimmte

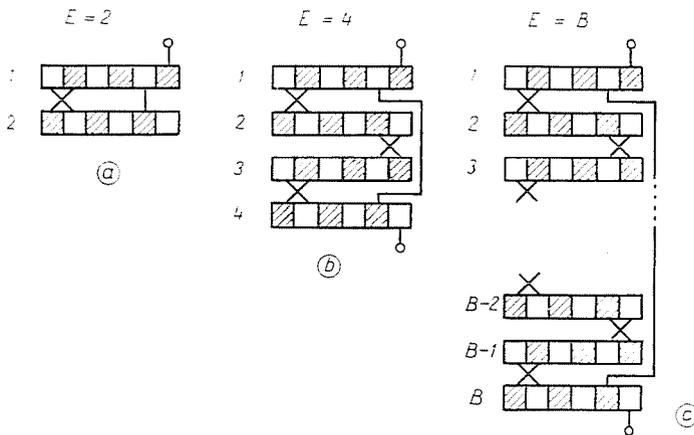


Abb. 4. Wicklungselemente von verschachtelten Wicklungen. a) Zwei in Reihe geschaltete Scheiben ($E = 2$); b) vier in Reihe geschaltete Scheiben ($E = 4$); c) B in Reihe geschaltete Scheiben ($E = B$)

Voraussetzungen erfüllt werden. Im wesentlichen ergeben sich ähnliche Verhältnisse, wenn in Spar- oder Stelltransformatoren verschiedene Wicklungen in Reihe geschaltet werden müssen, nur mit dem Unterschied, daß in solchen Fällen noch mit den die Unversehrtheit der Hauptisolation gefährdenden Spannungsschwankungen an dem Treffpunkt der verschiedenen Wicklungen zu rechnen ist. Um die Schwierigkeiten des Transformatorenrechners zu vermindern, sind solche verschachtelte Wicklungen entwickelt worden, in denen das Maß des Anwachsens der Windungsspannung noch größer ist als in den Wicklungen der als klassisch bekannten English-Electric-Lösung ohne die Geometrie der Wicklungen zu verändern. Die Wicklungsskizzen der Abb. 4 zeigen aus $E = 2$ und $E = 4$ und im allgemeinen aus B in Reihe geschalteten Scheiben ausgestaltete verschachtelte Wicklungselemente. Eine weitere Erhöhung der Windungsspannung steigert die Netzfrequenzbeanspruchungen, die Stoßspannungsbeanspruchungen werden gegenüber der Variante $E = 2$ (English Electric) gesteigert, wenn $\alpha \leq 2$ ist. Es ist nämlich

nachweisbar, daß sich mit einer Erhöhung der Windungsspannung die Beanspruchungen im Falle $\alpha > 2$ in den verschachtelten Wicklungen nicht ändern [3]: die Beanspruchung, die auf die erste E Scheibe entfällt, ist

$$\Delta u = u_0 \left| \frac{4C_e}{C_w(n-1)} \right|$$

wobei in der Formel C_e die Erdkapazität einer Scheibe und C_w die Kapazität zwischen zwei Windungen, n die Windungszahl in einer Scheibe bedeuten. In Tabelle 1 sind für den Fall $E = 2, 4, 6$ und 8 für die Scheibenwicklungen Daten ersichtlich, die zwischen den benachbarten Windungen der ersten Scheibe der Wicklung gemessenen Beanspruchungswerte und die Werte der Netzfrequenzbeanspruchungen darstellen.

Die in der Tabelle 1 ersichtlichen Werte wurden nach Wicklungsabänderungen gleicher Geometrie gemessen. Die Stoßspannungsbeanspruchungen wachsen — wenn ein und dieselbe Wicklung mit einer Verschachtelung verschiedenen Maßes abgeändert wird — langsamer, als die Netzfrequenzbeanspruchungen, weiterhin ist auch — als ungünstiger Umstand — in Betracht zu ziehen, daß wegen des Anwachsens der Netzfrequenzbeanspruchungen ein beträchtlicher Leitungsisolation-Mehraufwand in das Material der Wick-

Tabelle 1

Die Nummer der Scheiben in einem Wicklungselement (E)	Die Beanspruchung zwischen den Anfangswindungen bezüglich auf $E = 2$	Die Vergrößerung der Netzfrequenzbeanspruchungen bezüglich auf $E = 2$
2	1	1
4	1,24	2
6	1,6	3
8	2,5	4

lungen eingebaut werden muß. Bei der Erwägung der Wirtschaftlichkeit der Vor- und Nachteile müssen natürlich die eliminierbaren Mehrkosten in Betracht gezogen werden, die die Verstärkung der Stoßspannungsfestigkeit des verwendeten Stufenschalters, oder die Anwendung eines eventuell zum Einsatz gelangenden, den Stufenschalter schützenden Überspannungsableiters zur Folge haben.

Die Reihenkapazität der verschachtelten Wicklungen ist um ein bis zwei Größenordnungen höher als die Reihenkapazität der gewöhnlichen Scheibenwicklungen. Ihr Faktor α ist demzufolge im Falle von $E = 2$ praktisch

immer unter vier, im allgemeinen aber $\alpha = \left| \frac{C}{K} \right| < 2$ Messungen zufolge ist in solchen Fällen der Ungleichheitsfaktor, d. h. der Quotient der auf die einzelnen Wicklungsglieder fallenden tatsächlichen Spannung und des bei gleich-

mäßiger Verteilung eben dort zu erwartenden Wertes auch auf den Stellen der größten Beanspruchung kleiner als 1.5. Zur Bemessung der Wicklungs-isolation ist es vom Standpunkt der Praxis nicht notwendig, die Spannungsverteilung innerhalb der Wicklung zu bestimmen, es genügt, die auf die ganze Wicklung entfallende, d. h. die Spannung, die zwischen den Wicklungs-Endpunkten und der Erde besteht, zu kennen und die Wicklungs-isolation der gleichmäßigen Spannungsverteilung sowie dem obigen Ungleichheitsfaktor entsprechend zu bemessen. Will man ein genaueres Ergebnis erzielen, so steht dem nichts im Wege, daß man sowohl für die Anfangsverteilung als auch für die Schwingungserscheinungen eine eingehende Spannungsverteilungsberechnung durchführt [4].

5. Die Berechnung der in Wicklungssystemen auftretenden Beanspruchungen

Der Umstand, daß innerhalb einer Wicklung die Spannungsverteilung gleichmäßig ist, erleichtert die Berechnung der Stoßspannungsverteilung. Die Wicklungen großer Reihenkapazität können in dem als Berechnungsgrundlage dienenden Ersatzschaltbild mit einer einzigen Induktivität und Reihenkapazität substituiert werden. So kann z. B. der häufig gebaute Stelltransformator mit einer Stellwicklung (d. h. ohne Grobstufe) in den den charakteristischen Schaltstellungen — das Spannungsmaximum (Max), die zur Nennspannung gehörenden Positionen ($+0$ oder -0) und das Spannungsminimum (Min) — mit einem zwei Elemente enthaltenden Modell (siehe das Schalt-schema in Abb. 8) abgebildet werden. Das eine Element entspricht der Hauptwicklung (H), das andere der Stellwicklung (R), die Unterspannungswicklung bzw. Wicklungen können auf gewöhnliche Art und Weise als auf dem Erdpotential befindlich betrachtet werden. Das so gewonnene, aus zwei Elementen bestehende Netz hat abhängig von der Stelle der Erdung zwei Varianten (Abb. 5). Das Vorzeichen des gegenseitigen Induktivitätsfaktors der induktiven Kopplung zwischen den Elementen kann in beiden Varianten sowohl positiv als auch negativ sein, damit kann die spannungserhöhende der spannungsvermindernde Schaltung berücksichtigt werden. L_1 und L_2 , die im Netz figurierenden Induktivitätswerte, sind die Selbstinduktivitätsfaktoren der Haupt- und Stellwicklung. Die Kapazitäten C_1 und C_2 können in Kenntnis der geometrischen Verhältnisse der Wicklungen aus den Reihen- und Parallelkapazitäten des Wicklungssystems errechnet werden.

Stelltransformatoren mit Sparschaltung, in welchen die Oberspannungswicklung (H), die Stellwicklung (R) und die Niederspannungswicklung (N) miteinander galvanisch geschaltet sind, müssen mit einem Dreielementennetz abgebildet werden. Dieses Netz kann abhängig von der gegenseitigen Lage der Elemente und von der Stelle des Stoßes oder der Erdung neun Varianten aufweisen. Davon ist eine in Abb. 6 ersichtlich. Hier sind die drei Wicklungen

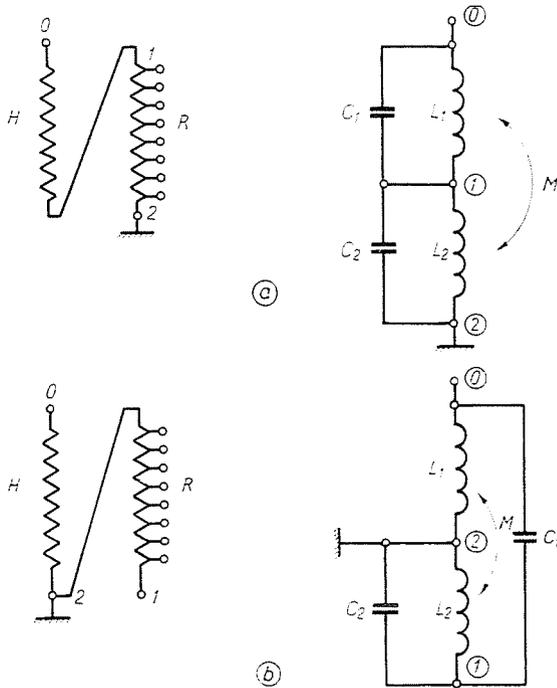


Abb. 5. Schaltbild und mathematisches Modell eines Regeltransformators in Schaltstellungen der maximalen Spannung (a) und der Nennspannung (b)

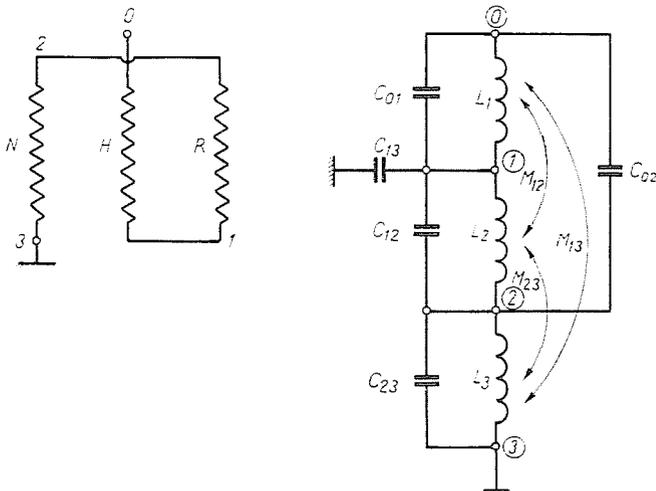


Abb. 6. Schaltbild und mathematisches Modell eines Stellpartransformators in der Schaltstellung der maximalen Spannung

in Reihe geschaltet, auf den Anfangspunkt (0) des so gewonnenen Systems wird die Stoßspannung geschaltet, der Endpunkt (3) ist geerdet. In den Netzen figurieren fünf Kapazitäten (C_{01} , C_{02} , C_{12} , C_{13} und C_{23}) und sechs Induktivitäten (L_1 , L_2 , L_3 , M_{12} , M_{13} und M_{23}). Das Vorzeichen der die Gegeninduktivität ausdrückenden Faktoren (M_{12} , M_{13} und M_{23}) kann auch negativ sein, was sich hinsichtlich der Transformatorenwicklungen spannungserhöhend oder spannungsvermindernd auswirkt. Die Kapazitäten der Ersatzschaltung enthalten auch in diesem Falle Reihen- und Parallelkapazitäten.

Es sind auch solche Wicklungssysteme möglich, für deren Abbildung Ersatzschaltungen, die mehr als drei Elemente enthalten, notwendig sind. In solchen Fällen muß eine Ersatzschaltung von noch mehr Elementen verwendet werden. Im allgemeinen handelt es sich um eine aus „ m “ miteinander beliebig verbundenen, eventuell nur induktiv gekoppelten Elementen bestehende, Induktivitäten und Kapazitäten enthaltende Ersatzschaltung. Die Berechnung solcher, unterschiedliche und miteinander gegenseitig induktiv gekoppelte Elemente enthaltender Ersatzschaltungen kann am zweckmäßigsten mit Hilfe der Matrizenrechnung durchgeführt werden. Das für die Ersatzschaltung unter Zuhilfenahme der Kirchhoffschen Gesetze aufgeschriebene Differentialgleichungssystem kann in jedem Fall zu einer inhomogenen Matrizen-Differentialgleichung zusammengezogen werden, die mittels einer bekannten Formel einfach zu lösen ist. Wenn das System aus mehr als drei Elementen besteht, so gelangt man durch Anwendung der verallgemeinerten Eigenwertaufgabe [5] zum Ziel. Die Knotenpunktspannungen können für eine beliebige Wellenform bestimmt werden. Von praktischer Bedeutung ist in erster Linie die Spannungsfunktion der Form $u(t) = u_0 e^{-pt}$, weil man mit dieser Funktion in der Form

$$u(t) = [u_{01}(e^{-p_1 t} \dots e^{-p_2 t})]_{t \geq 0} - [u_{02}(e^{-p_3(t-\tau)} \dots e^{-p_4(t-\tau)})]_{t \geq \tau}$$

Wellen beliebiger Stirn- und Halbwertzeit und in beliebiger Zeit abgeschnitten herstellen kann (im Falle einer vollen Welle $u_{02} = 0$). Enthält das System n Knotenpunkte und schaltet man die Spannungsfunktion $u(t) = u_0 e^{-pt}$ im Zeitpunkt $t = 0$ auf die Ersatzschaltung, dann ist im Knotenpunkt v der Ersatzschaltung die Spannung aus dem Zusammenhang

$$u_v(t) = \sum_{k=1}^n v_{vk} k \cdot y_k \quad (v = 1, 2, \dots, n)$$

erhältlich, wobei v_{vk} das v -te Elemente des k -ten verallgemeinerten Eigenvektors ist und

$$y_k = u_0 \left[s_k e^{-pt} + (s_k - c_k) \left(\frac{p}{\omega} \sin \omega_k \cdot t - \cos \omega_k \cdot t \right) \right] \\ (k = 1, 2, \dots, n)$$

Die hier figurierenden Konstanten s_k , c_k und ω_k können aus expliziten Formeln berechnet werden. Die Konstante s_k hängt von den Selbst- und Gegeninduktivitäten des Systems ab und bestimmt die quasistationäre Spannung, c_k ist eine von den Kapazitäten abhängende Konstante, die die sogenannte Anfangsspannungsverteilung bestimmt. Endlich ist ω_k die Kreisfrequenz der in der Schwingung des Knotenpunktes figurierenden k -ten Oberwelle.

Aus den obigen Formeln ist die Spannungsverteilung am zweckmäßigsten mit einem Digitalrechner zu bestimmen. In gleicher Weise können die in den Formeln vorkommenden konstanten v_k , s_k , c_k und ω_k ebenfalls mittels einer Rechenmaschine berechnet werden.

Die geschachtelten Wicklungen ermöglichen es, daß man die Knotenpunktspannungen der aus mehreren Wicklungen bestehenden Wicklungssysteme auf Grund eines aus wenigen Elementen bestehenden mathematischen Modells mit Hilfe einer verhältnismäßig einfachen Berechnung bestimmen. In Kenntnis der Knotenpunktspannungen sind die Beanspruchungen innerhalb der Wicklungen bei Aufnahme des schon erwähnten Ungleichmäßigkeitsfaktors zu berechnen.

6. Bemessung der Stelltransformatoren auf Stoßspannungsbeanspruchung

In Kenntnis der Transformatoren-Stoßspannungskennwerte (der Kapazitäten und Induktivitäten) und mittels der im Abschnitt 5 in großen Zügen umrissenen Berechnungsmethode kann die Spannungsverteilung innerhalb eines gegebenen Wicklungssystems mit einer den praktischen Ansprüchen Genüge leistenden Genauigkeit berechnet werden. Die Stoßspannungskennwerte können auf Grund der Konstruktionsdaten des Transformators (geometrische Abmessungen, Materialkonstanten) bestimmt werden.

Nun muß aber der Konstrukteur des Transformators außer der Kontrollrechnungsmethode unbedingt auch noch die allgemeinen Grundsätze kennen, die sich auf die Stoßspannungssicherheit der einzelnen Transformarentypen beziehen. Schon vor dem Projektieren muß er wissen, nach welchen Grundsätzen er die Konstruktion auslegen soll, um die Stoßspannungssicherheit der Wicklung zu gewährleisten. Es muß ihm bekannt sein, wie sich die einzelnen Wicklungslösungen (z. B. die Sternschaltungs-, die Dreieckschaltungs-, oder Spartransformatoren mit Spannungsregelung) beim Auftreten der Stoßspannungswellen verhalten und welche Auswirkung eine gewisse Abänderung der Konstruktionsdaten auf die Ausgestaltung der Beanspruchungen hat. Zur allgemeinen Klärung dieser Fragen sind die Berechnungsverfahren noch nicht ausreichend.

Deswegen ist eine detaillierte Analyse des Zusammenhanges zwischen den Stoßspannungsbeanspruchungen und den einzelnen Parametern der

Wicklungen unbedingt notwendig. Diese Aufgabe kann nur mittels einer Versuchsreihe gelöst werden. Da bekannt ist, daß die Beanspruchungen hauptsächlich von den Kapazitätsverhältnissen des Wicklungssystems bestimmt werden, muß die Versuchsreihe auf den gesamten Bereich der praktisch verwirklichtbaren Kapazitätsverhältnisse ausgedehnt werden.

Die verschiedenen Verschachtelungsverfahren [6] ermöglichen es, daß man ohne Abänderung der Windungszahl und der Abmessungen der Wicklungen sowie ohne Anwendung von äußeren Ergänzungskapazitäten die

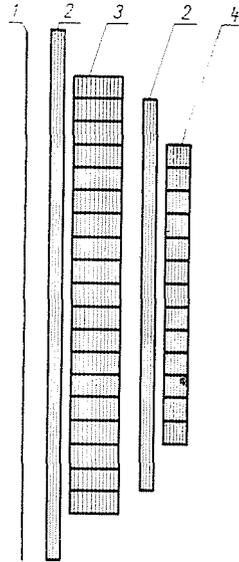


Abb. 7. Querschnitt der Versuchswicklung. 1. Geerdeter Metallzylinder. 2. Isolierhüllen: 3. Hauptwicklung: 4. Regelwicklung

resultierende Reihenkapazität in weiten Grenzen abändern kann. Die in Betracht kommende verschachtelte Wicklungsform — ergänzt mit entsprechenden Anzapfungspunkten — eignet sich auch zur Anwendung als Stellwicklung. All das hat es ermöglicht, daß man bei an einer einzigen Versuchswicklung durchgeführten Messungsreihe den Zusammenhang zwischen den Kapazitätsverhältnissen und den Beanspruchungen bestimmen kann. Die Versuchswicklung besteht aus einer Hauptwicklung kleineren Durchmessers und aus einer Stellwicklung größeren Durchmessers (Abb. 7). Sie sind konzentrisch angeordnet. Mittels der Stellwicklung kann eine Regelung von $\pm 17\%$ durchgeführt werden.

Die als geerdet betrachtete Niederspannungswicklung ist durch einen geerdeten Metallzylinder entsprechenden Durchmessers ersetzt.

Die Versuchswicklung ist dadurch gekennzeichnet, daß die aus zwei parallelen Leitern gefertigten Endungen der Doppelscheiben im Verlauf der Versuchsarbeit zu Wicklungselementen verschiedener Scheibenzahl zusammengeschaltet werden können (siehe z. B. Abb. 4). Dadurch wird der elektrische Abstand zwischen zwei benachbarten Windungen und der Wert der resultierenden Reihenkapazität veränderlich, ohne daß, darüber hinausgehend, äußere Kondensatoren extra angewendet werden müssen. Natürlich kann auch eine Wicklung ohne Verschachtelung verwirklicht werden.

Da die Reihenkapazität sowohl der Haupt- als auch der Stellwicklung verändert werden kann, kann eine ganze Reihe von Kombinationen verwirklicht werden.

Um die verschiedenen Schaltkombinationen zu erreichen, ist die Reihenkapazität der Hauptwicklung im Verhältnis 1 : 100 in drei Stufen, die Reihenkapazität der Stellwicklung ebenfalls im Verhältnis 1 : 100 in vier Stufen veränderlich.

Die obigen Schaltarten der Haupt- und Stellwicklung ermöglichen die Verwirklichung von zwölf Kapazitätskombinationen. Die Stellwicklung konnte in übereinstimmendem und gegensätzlichem Sinn an die Hauptwicklung geschaltet werden. Im Verlauf der Messungen untersuchten wir vier charakteristische Schaltpositionen, deren vereinfachte Schemen auf der linken Seite der Abb. 8 zu sehen sind.

Oszilloskopische Aufnahmen wurden für die zwölf dargelegten Kapazitätskombinationen durchgeführt, worin die Spannungsschwingungen in den vier Schaltpositionen am Netzende der Versuchswicklung (0), im Mittelpunkt der Hauptwicklung (M) und an dem nicht geerdeten Ende der Stellwicklung (1) gemessen wurden.

Auf Grund der an der Versuchswicklung mit verschiedenen Reihenkapazitäten durchgeführten Messungen kann man, über den experimentellen Richtigkeitsbeweis der im 5. Teil dargelegten Rechnungsmethode hinausgehend, hinsichtlich der günstigen Kapazitätsverhältnisse des Wicklungssystems bezüglich der Beanspruchungen nützliche Folgerungen ziehen.

Abb. 8 stellt im Falle einer Sternpunktregelung die mit der größten mit dem Modell verwirklichbaren Reihenkapazität der Stellwicklung aufgenommenen Spannungsschwingungen bei verschiedenen Hauptwicklungs-Reihenkapazitäten ($x = 5$, $x = 1$, $x = 0,5$) und in unterschiedlichen Schaltpositionen dar.

Auf Grund der Studien der durch die Versuchsreihe gewonnenen Oszillogrammaufnahmen konnte folgendes festgestellt werden:

a) Bei einem aus Haupt- und Stellwicklungen bestehenden Wicklungssystem kann kein solches Kapazitätsverhältnis gefunden werden, welches in allen Schalt-Positionen mittels einer schwingungsfreien Spannungsverteilung eine minimale Beanspruchung gewährleisten würde. Bei der Projektierung

eines Wicklungssystems müssen daher solche Kapazitätsverhältnisse gewählt werden, bei denen bei jeder Schaltung die möglichst günstigsten Beanspruchungen auftreten.

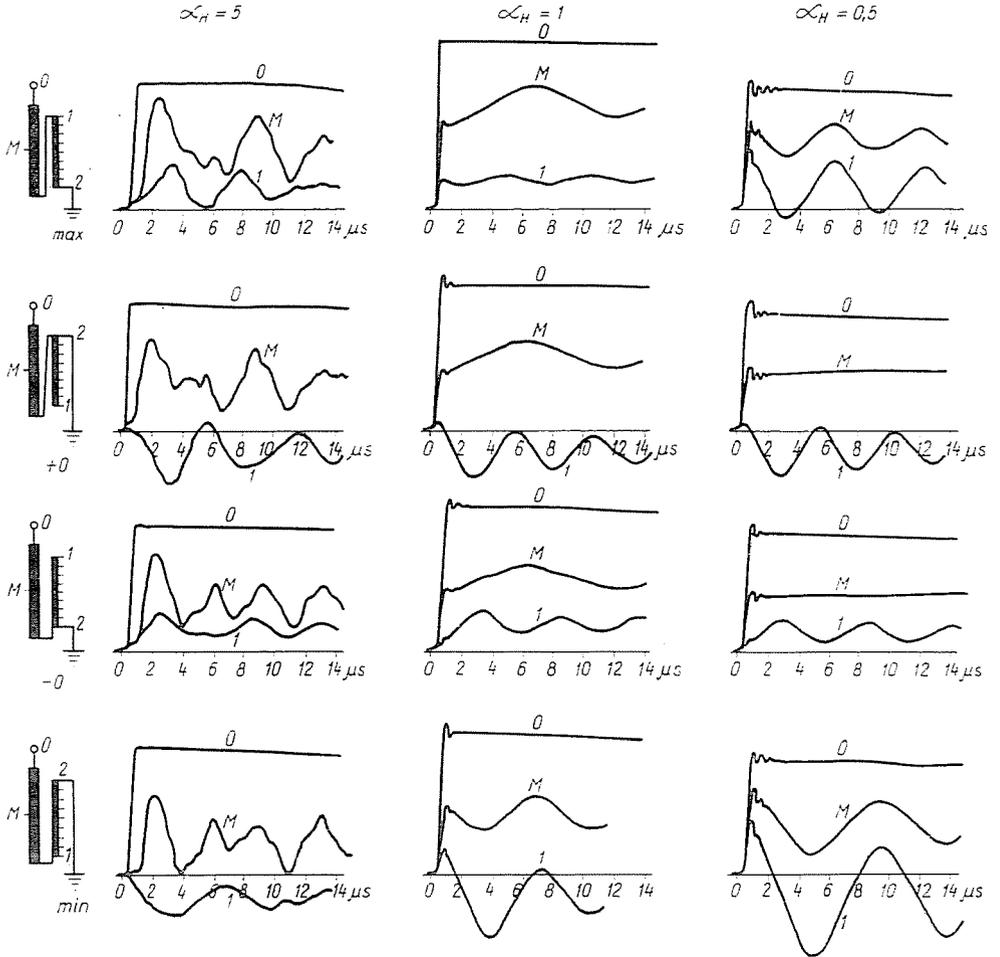


Abb. 8. Oszillographische Aufnahmen

b) Da sich im allgemeinen bei einer Erhöhung der Hauptwicklungs-Reihenkapazität die auf die Hauptwicklung entfallende elektrische Beanspruchung vermindert, die auf die Stellwicklung entfallende dagegen erhöht, muß mittels sorgfältiger Erwägung bei der Berechnung entschieden werden, wie groß die Hauptwicklungs-Reihenkapazität sein soll.

c) Die größten Schwingungen und Beanspruchungen treten bei Schaltung minimaler Spannungen auf. In dieser Schaltung ist eine Schwin-

gunglosigkeit auf keine Weise realisierbar, weil nämlich die Stellwicklung in ihrem Anschlußpunkte an die Hauptwicklung in der pseudofinalen Spannungsverteilung eine negative Spannung aufweist, jedoch ist derselbe Punkt anfänglich, wie jede Anfangsspannung, positiver Spannung. Die kleinsten Schwingungen und Beanspruchungen können jedoch dann erreicht werden, wenn — bei mäßiger Steigerung der Hauptwicklungs-Reihenkapazität — die Stellwicklungs-Reihenkapazität auf den größten erzielbaren Wert eingestellt wird.

Die Versuchsergebnisse können zur Bestimmung der Spannungsverteilung eines mit der Versuchswicklung identisch aufgebauten — aus Haupt- und einer Stellwicklung bestehenden — Wicklungssystems eines Transformators verwendet werden.

Die auf die Stellwicklung entfallende anfängliche Spannungsverteilung wurde in Abb. 9 als Funktion folgender Kapazitätsparameter dargestellt. Der erste Parameter:

$$\alpha_H = \sqrt{\frac{C_H}{K_H}}$$

ist der sich auf die Hauptwicklung beziehende Faktor, wobei C_H die Erdkapazität der Hauptwicklung bzw. die gegenseitige Kapazität der Hauptwicklung und der sich innerhalb derselben befindlichen (Niederspannungs-) Wicklung ist, K_H ist die resultierende Reihenkapazität der Hauptwicklung.

Der zweite Parameter ist

$$\beta = \sqrt{\frac{K_H}{K_R}}$$

wobei K_R die Reihenkapazität der Stellwicklung bedeutet.

Als Funktion der obigen Parameter gibt Abb. 9 in übersichtlicher Form die Anfangsspannung der Stellwicklung. In Kenntnis der Anfangsspannung und der durch die Windungszahlen bestimmten stationären Spannung kann man sich ein annäherndes Bild über die zu erwartenden Schwingungen des Wicklungssystems und die zu erwartenden Beanspruchungen der Stellwicklung machen.

Ähnliche Untersuchungen können auch im Falle der Stellwicklungssysteme mit Dreieckschaltung durchgeführt werden. Im Falle der Dreieckschaltung besteht die übliche Lösung daraus, daß die Hauptwicklung in der Mitte geöffnet ist und sich die Stellwicklung hier anschließt. Bei der Versuchswicklung kann auch diese Schaltungsart verwirklicht werden. Die vier Haupt-

schaltungen und einige Schwingungsbilder sind auf Abb. 10 ersichtlich. Aus der Auswertung der Oszillogramme geht hervor, daß die kleinsten Beanspruchungen bei ähnlichen Kapazitätsverhältnissen zu finden sind wie bei der Sternschaltung, der zahlenmäßige Wert der Beanspruchungen aber ein anderer ist.

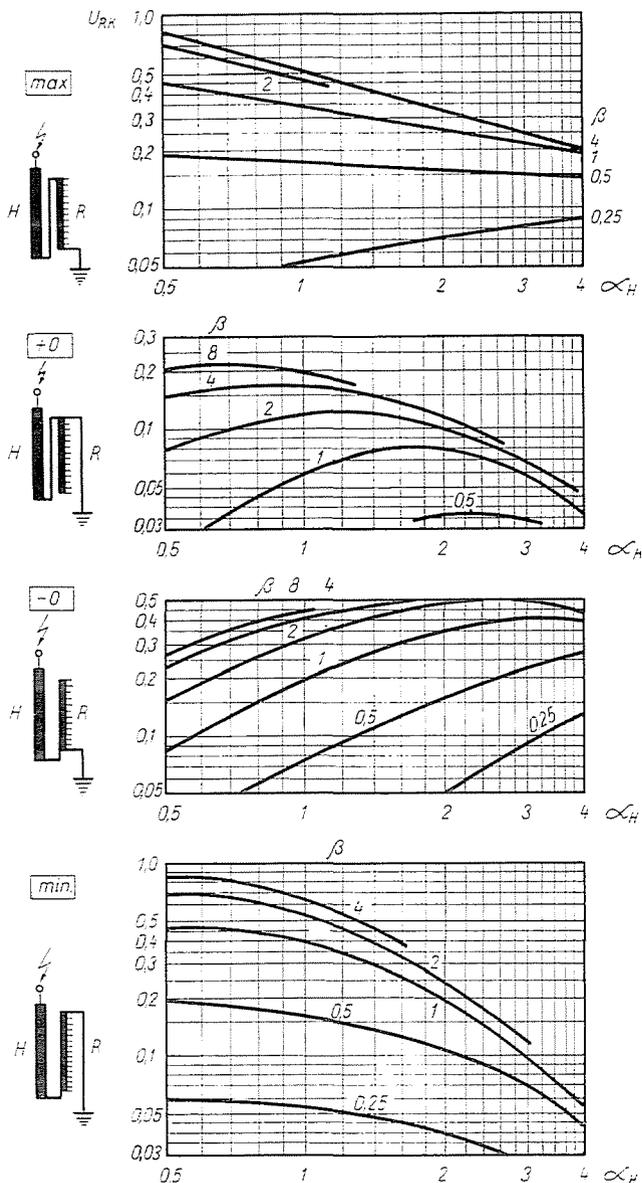


Abb. 9. Anfangsspannung der Stellwicklung in einem Wicklungssystem, das aus einer Hauptwicklung und einer Stellwicklung besteht, bei verschiedenen Werten von α_H und β

Abb. 11, 12 und 13 zeigen den Vergleich der bei Stern- und Dreieckschaltung auftretenden Maximalbeanspruchungen, als Funktion der bekannten Parameter N und β , wobei das Ausmaß der Regelung in beiden Fällen $\pm 15\%$ beträgt. Abb. 11 stellt die maximale Beanspruchung zwischen der Haupt- und Stellwicklung, Abb. 13 zwischen der Stellwicklung und Erde dar.

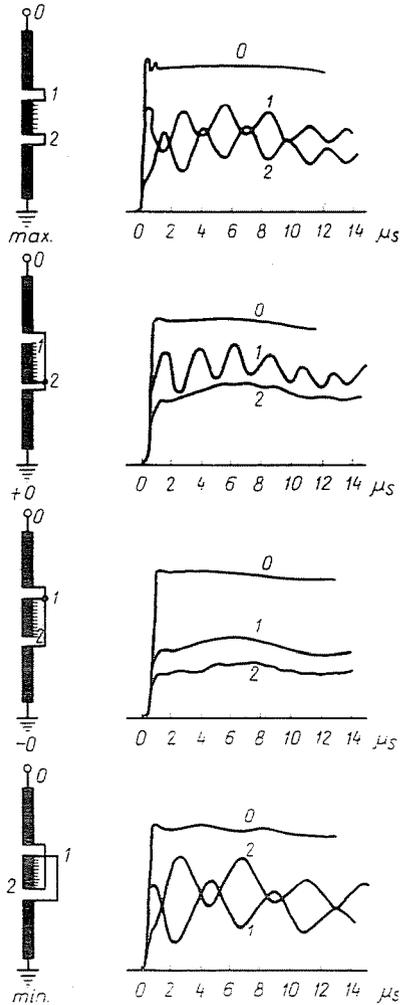


Abb. 10. Oszillographische Aufnahmen eines in Dreieck geschalteten Wicklungssystems in den vier Hauptstellungen

Auch die Stoßspannungsbeanspruchungen von Stellwicklungssystemen mit Sparschaltung lassen sich an der Versuchswicklung studieren — natürlich mit einer dritten Wicklung ergänzt —, aber in diesem Fall eignen sich

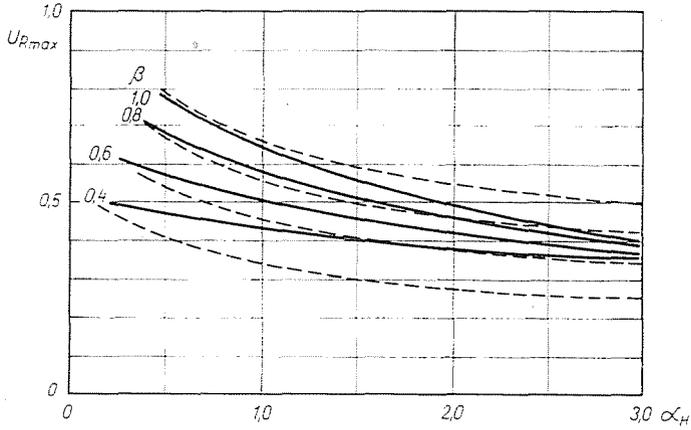


Abb. 11. Vergleich der maximalen Spannungsbeanspruchungen in der Stellwicklung eines Transformators in Sternschaltung mit einem Dreieckstransformator, für einen Einstellbereich von $\pm 15\%$. Sternschaltung: - - - - Dreieckschaltung

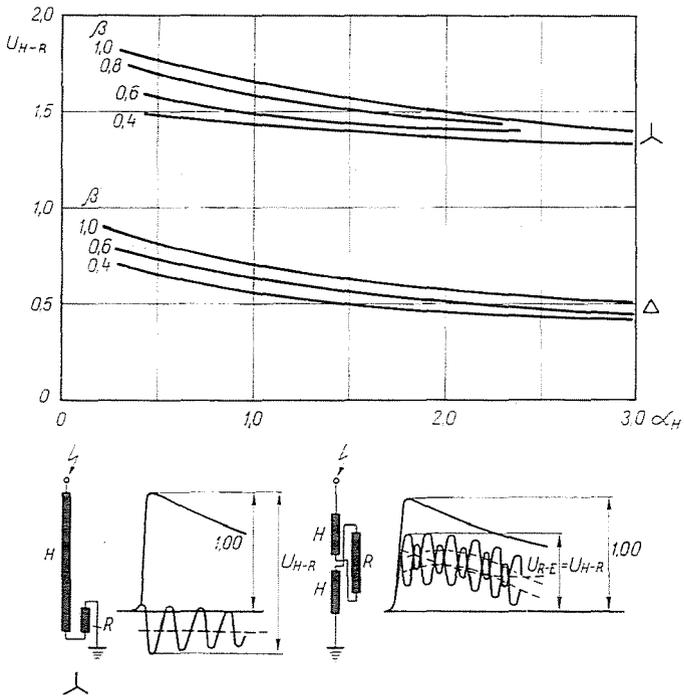


Abb. 12. Vergleich der maximalen Spannungsbeanspruchungen zwischen der Haupt- und der Stellwicklung eines Transformators in Sternschaltung mit einem Dreieckstransformator, für einen Einstellbereich von $\pm 15\%$.

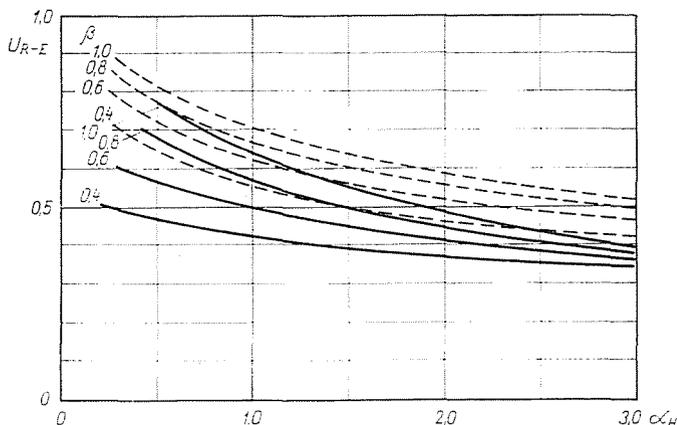


Abb. 13. Vergleich der maximalen Spannungsbeanspruchungen zwischen der Stellwicklung und der Erde eines Transformators in Sternwicklung mit einem Dreieckstransformator, für einen Einstellbereich von $\pm 15\%$. ————— Sternschaltung, - - - - Dreieckschaltung

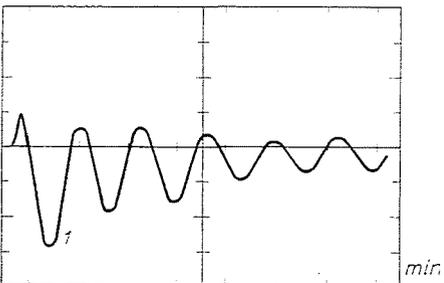
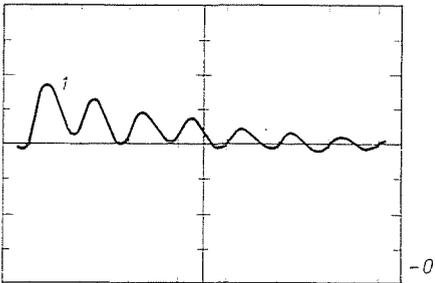
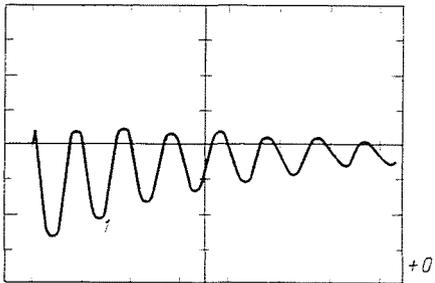
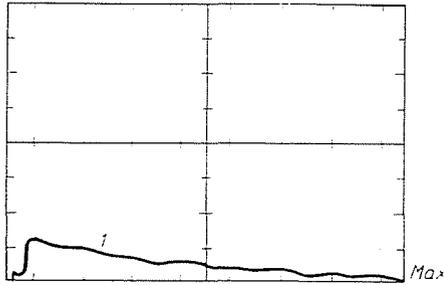
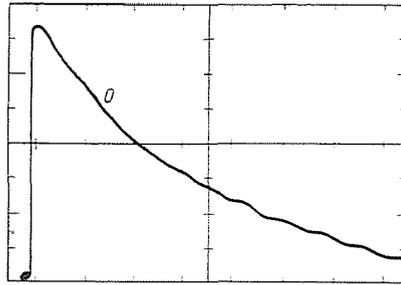
die Meßergebnisse nicht dazu, Folgerungen allgemeiner Geltung zu ziehen. Deswegen sind in diesem Falle Berechnungen mit Hilfe eines Digitalrechners unerlässlich.

7. Anwendungsbeispiele

Im Besitze der mitgeteilten theoretischen und praktischen Kenntnisse gelang es in den letzten Jahren, zahlreiche stoßspannungssichere Transformatorreihen zu verwirklichen.

Unter diesen sei die 120 kV Verteiler-Stelltransformatorserie mit Sternschaltung zwischen den Leistungsgrenzen von 10 bis 63 kV erwähnt. Die in den vier Hauptschaltstellungen aufgenommenen Oszillogramme eines Transformators von 63 MVA dieser Serie sind in Abb. 14 veranschaulicht. Die Oszillogramme stellen die Schwingungen der Stellwicklung dar; der Charakter der Schwingungen stimmt mit den Schwingungen der Versuchswicklungen überein, und man kann sehen, daß durch die richtige Wahl der Reihkapazitäten in allen Schaltpositionen günstige Beanspruchungen erreicht werden konnten. Bei diesem Typ und auch bei einer anderen Serie konnte eine günstige Stoßspannungsverteilung auch durch eine entsprechende Anpassung der Reihkapazitäten verwirklicht werden.

Es wurde auch noch ein Dreiphasen-Stell-Spartransformator von $220 \pm 12\%/126$ kV und einer Leistung 160 MVA entwickelt, sowie ein Einphasen-Spartransformator der Übersetzungsverhältnisses $\frac{400}{\sqrt{3}} / \frac{126}{\sqrt{3}}$ kV, einer Phasenleistung von 120 MVA (mit getrennt gebauter Sternpunktregelung). Alle aufgezählten Typen sind ohne Anwendung von eingebauten Spannungs-



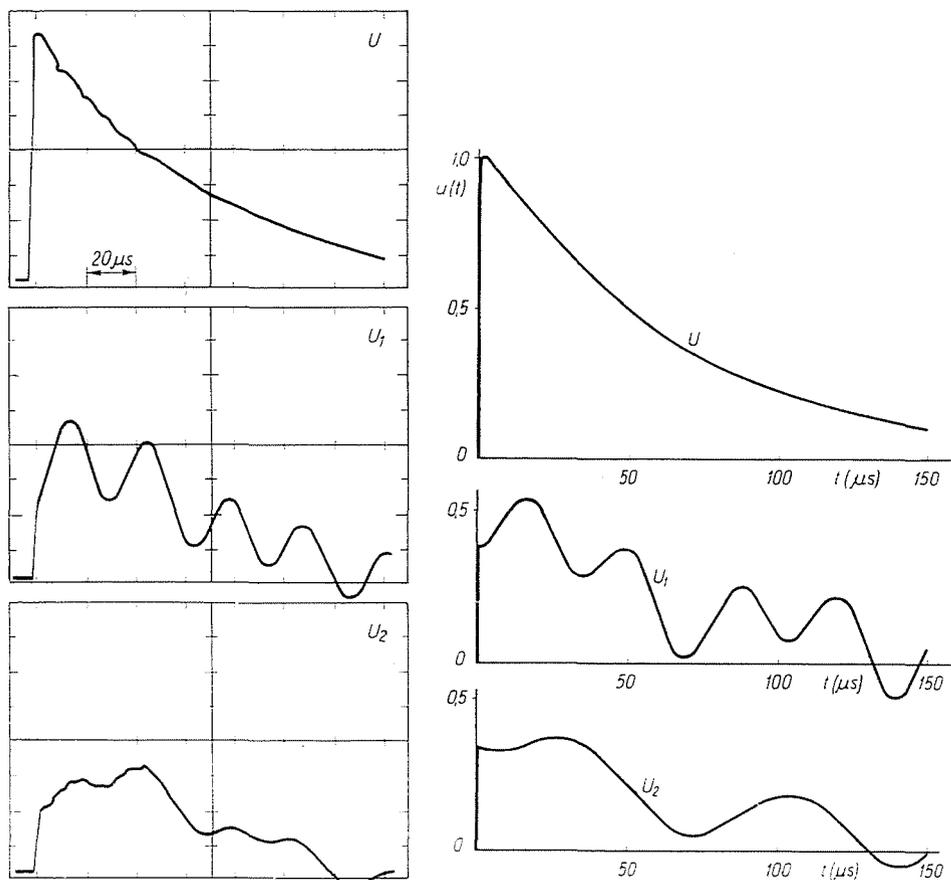


Abb. 15. Berechnete (b) und gemessene (a) Spannungsschwingungen an einem 160 MVA Spartransformator in der Schaltstellung der maximalen Spannung

ableitern stoßspannungssicher. Die Spannungsschwingungen zur Erde in den Endpunkten der Wicklungen den vorher erwähnten Transformators sind in der Schaltung nach Abb. 6 in den Oszillogrammen der Abb. 15 ersichtlich. Aus der Abbildung sind auch die auf Grund des Modells der Abb. 6 berechneten Schwingungen ersichtlich. Die errechneten und gemessenen Schwingungsbilder zeigen voneinander nur geringfügige Abweichungen.

8. Folgerungen

Die einzige zeitgemäße Methode der Fertigung von stoßspannungssicheren Hochspannungs-Stelltransformatoren besteht in der Anwendung

Abb. 14. Gemessene Spannungsschwingungen an einem 63 MVA Stelltransformator in den vier Haupt-Schaltstellungen

von Wicklungen hoher Reihenkapazität. In der vorliegenden Arbeit wird eine Sondervariante verwendet, die gestattet, die Reihenkapazität innerhalb weiter Grenzen zu wählen. Dadurch wird die entsprechende Abstimmung der Reihenkapazität der Haupt- und Stellwicklungen ermöglicht.

Zur Bestimmung der in den Stellwicklungssystemen entstehenden Stoßspannungsbeanspruchungen ist es gelungen, eine solche Berechnungsmethode auszuarbeiten, die jede der Wicklungen, die ein Wicklungssystem darstellen, durch je ein Element ersetzt und mittels Anwendung einer Rechenanlage das Schwingungsbild mit ausreichender Genauigkeit bestimmt.

Die zur Kontrolle der Genauigkeit der Berechnungsmethode durchgeführte Versuchsmeßreihe gestattete, darüber hinausgehend, daß sie die Richtigkeit der Berechnungen erwies, auch auf dem Gebiete der günstigsten Kapazitätsverhältnisse weitgehende Folgerungen zu ziehen.

Literatur

1. CHADWICK, A. T.—FERGUSON, J. M.—RYDER, D. H.—STEARNS, G. F.: Nouveau type d'enroulement pour transformateurs, améliorant la répartition de tension de choc. Cigré No. 107 (1950).
2. KARSAI, K.—LOVASS—NAGY, V.: Verteilung von Spannungen in inhomogenen Transformatorwicklungen beim Auftreten von Stoßwellen. ÉTZ. A. 84, 262 (1963).
3. KARSAI, K.: Növelt soroskapacitású tárcsás tekercsek. Elektrotechnika 55, 146 (1962).
4. LOVASS—NAGY, V.: A matrix method of calculating the distributions of transient voltages in transformer windings. Proceedings IEE 190 C. 534 (1962).
5. ZURMÜHL, R.: Matrizen und ihre technischen Anwendungen. Vierte, neubearbeitete Auflage. Springer-Verlag, Berlin (Göttingen) — Heidelberg, 1964.
6. KERÉNYI, D.—ÚJHÁZI, G.: Über die Wahl der Reihenkapazitäten von Stelltransformatorenwicklungen aus dem Gesichtspunkt der Stoßspannungsbeanspruchungen. Acta Technica Acad. Sci. Hung. 54, 423 (1966).

Zusammenfassung

Eine Scheibenspulentransformatorenwicklung mit günstigen Stoßeigenschaften wird vorgeführt. Die Lösung hat den Vorteil, daß die Reihenkapazität der einzelnen Wicklungen zwischen weiten Grenzen verändert werden kann. Mit Hilfe der im Aufsatz betrachteten Berechnungsmethode können die optimalen Stoßeigenschaften von aus mehreren Wicklungen aufgebauten Systemen bestimmt werden.

Weiterhin werden auch auf Grund der Berechnungen realisierte praktische Ausführungen angegeben.

Dr. Károly KARSAI, Budapest II., Árpád fejedelem u. 47, Ungarn

Dr. Dénes KERÉNYI, Budapest, II., Modori u. 12, Ungarn

Dr. Géza ÚJHÁZI, Budapest, XI., Somlói u. 35, Ungarn