

EINFACHES BERECHNUNGSVERFAHREN ZUR BESTIMMUNG DER BEI STOBSPANNUNGEN AUFTRETENDEN BEANSPRUCHUNGEN IN TRANSFORMATOREN AUS UNGLEICHARTIGEN SPULEN

Von

G. KARÁDY

Lehrstuhl für elektrische Kraftwerke der Technischen Universität Budapest

(Eingegangen am 20. Oktober 1957)

I. Einleitung

Eine häufige Ursache des Schadhafwerdens von Transformatoren ist ein Blitzschlag oder eine andre Überspannungswelle, die mit steiler Stirn in die Wicklung des Transformators eindringt und die Windungsisolation infolge der entstandenen Spannungsdifferenz zwischen den einzelnen Windungen durchgeschlagen wird.

Die Beanspruchungen durch die Überspannungswellen bzw. durch die sie ersetzenden Stoßspannungswellen muß der Konstrukteur in vorausgehenden Berechnungen feststellen. In folgendem wird eine einfache Berechnungsmethode zur Bestimmung der Beanspruchungen sowie zur Bemessung der Isolation erörtert.

II. Der Höchstwert der in den Transformator eindringenden Überspannungswelle

Es ist unzweifelhaft, daß kein elektrisches Gerät wirtschaftlich auf die volle, durch einen Blitzschlag verursachte Spannung bemessen werden kann. Aus diesem Grunde sind im Laufe der Entwicklung die verschiedenen Arten des Überspannungsschutzes entstanden, welche die auftretenden Überspannungen begrenzen sollten. Es ist klar, daß die Apparate auf eine höhere Durchschlags- oder Überschlagsspannung zu bemessen sind als die zugelassene höchste Spannung. Diese Spannungswerte werden durch die Koordination der Isolierniveaus angegeben.

Aus dem Prinzip der Koordination folgt, daß wegen des Ansprechens der Überspannungsableiter und der koordinierenden Funkenstrecken eine dem oberen Niveau entsprechende Spannung den Transformator im allgemeinen nicht erreichen kann, wegen der Ungenauigkeiten der Berechnung, der Ungleichmäßigkeit der Herstellung und nicht zuletzt wegen der Überinanspruchnahme infolge der abgeschnittenen Wellen, soll jedoch der Transformator zur Erreichung der nötigen Sicherheit nach dem in der Norm MNOSZ 9250-54 »Koordination

der Isolierungen« angegebenen oberen Niveau auf die entsprechende Stoßspannung bemessen werden.

Die als Grundlage der Bemessung dienenden genormten Werte der Spannungen sind in Tabl. I wiedergegeben.

Tabelle I

Nennspannung kV	10	20	30	35	60	66*	120*	220*
Spannung des oberen Niveaus kV	100	155	215	240	375	375	600	980

* Nur für Netze mit geerdetem Sternpunkt gültig.

III. Berechnung der in den Spulen auftretenden Inanspruchnahmen

A) *Das Ersatzschaltbild des Transformators.* Das Verhalten der Transformatoren gegenüber Stoßwellen wurde zuerst von K. WAGNER [1] und später von BEWLEY [2] untersucht, nach ihnen ist jeder Transformator als eine aus Elementarinduktivitäten, Windungs- und Erdkapazitäten zusammengesetzte Kette nach Abb. 1 aufzufassen.

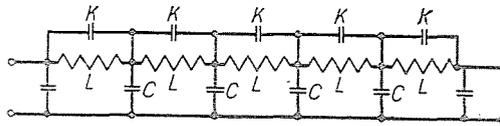


Abb. 1

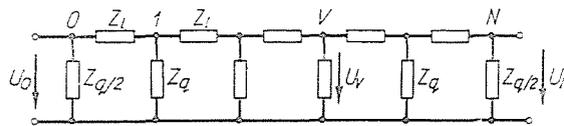


Abb. 2

In der Abbildung ist C die Erdkapazität, K die Windungskapazität und L die Induktivität eines Elementes.

Bei der Aufstellung des Ersatzschaltbildes wurde der Ohmsche Widerstand der Wicklung vernachlässigt und vorausgesetzt, daß der Wellenwiderstand der Sekundärwicklung klein sei, so daß dieser als auf Erdpotential liegend aufzufassen ist.

Im folgenden ist die Zahl der Elemente zu bestimmen. Die genannten Verfasser haben ihre Berechnungen für einfache zylindrische Wicklungen

durchgeführt und die Zahl der Elemente als unendlich angenommen. Die Wicklung der tatsächlichen Transformatoren besteht aus einer endlichen Zahl von mehr oder weniger gleichen Halbspulen oder Spulen.

Aus diesem Grunde nehmen wir die Zahl der Elemente gleich der Zahl der Halbspulen oder Spulen an. Die Wicklung wird als ein aus Vierpolen bestehender Kettenleiter mit einer Anzahl von Gliedern gleich der Zahl der Halbspulen oder Spulen aufgefaßt (Abb. 2).

In der Abbildung sind Z_l und Z_q die Längs- bzw. Querimpedanzen des Kettenleiters. Z_l besteht in unserem Fall aus der parallelgeschalteten Spuleninduktivität L und Spulenkapazität K und Z_q aus der Erdkapazität. Dementsprechend gilt für Z_l Gleichung (1) und für Z_q Gleichung (2).

$$Z_l = \frac{pL}{1 + p^2LK} \quad (1)$$

$$Z_q = \frac{1}{pC} \quad (2)$$

wobei p der bekannte Differentialoperator ist.

B) Die allgemeinen Gleichungen der Spannungsverteilung. Auf die mit aus N Gliedern bestehenden Vierpol ersetzte Wicklung ist die allgemeine Gleichung der Kettenleiter anzuwenden [8].

$$U_v = U_0 \operatorname{ch} v g - I_0 Z \operatorname{sh} v g \quad (3)$$

$$I_v = I_0 \operatorname{ch} v g - \frac{U_0}{Z} \operatorname{sh} v g \quad (4)$$

wobei v die von dem Anfangspunkt gerechnete Ordnungsnummer eines beliebigen Gliedes ist,

U_0 ist die an die Kette angelegte Spannung,

I_0 ist der in die Kette fließende Strom,

U_v ist die Spannung des vom Anfang an gerechneten v -ten Gliedes,

I_v ist der Strom im vom Anfang an gerechneten v -ten Glied,

Z ist der Wellenwiderstand des Kettenleiters, dessen Zusammenhang mit den übrigen Größen in Gleichung (5) angegeben ist.

$$Z = \sqrt{Z_l Z_q} \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{Z_l}{4Z_q}}} \quad (5)$$

g ist der Übertragungsfaktor des Kettenleiters, dessen Zusammenhang mit den übrigen Größen in Gleichung (6) angegeben ist.

$$ch g = 1 + \frac{Z_l}{2 Z_q}. \quad (6)$$

Mit Hilfe der Gleichungen (3) und (4) kann die Spannungsverteilung längs der Wicklung (die Spannung zwischen der Wicklung und der Erde) bestimmt werden.

C) Für die Spannungsverteilung in einem Transformator mit geerdetem Sternpunkt folgt aus den Gleichungen (3) und (4) nach Anwendung der Grenzbedingungen $v = N$; $U_N = 0$ die Gleichung (7).

$$U_v = U_0 \frac{sh(N-v)g}{sh Ng}. \quad (7)$$

D) Für die Spannungsverteilung in einem Transformator mit isoliertem Sternpunkt folgt aus den Gleichungen (3) und (4) nach Anwendung der Grenzbedingungen $v = N$; $I_N = 0$ die Gleichung (8).

$$U_v = U_0 \frac{ch(N-v)g}{ch Ng}. \quad (8)$$

E) Bestimmung der Größen g und Z . Zur Bestimmung des Wellenwiderstandes Z setzen wir die Werte von Z_l und Z_q (Gleichungen 1 und 2) in Gleichung (5) ein. Nach Durchführung der Substitution wird für den Wellenwiderstand die Gleichung (9) erhalten.

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} \frac{1}{\sqrt{1 + p^2 L \left(K + \frac{C}{4} \right)}}. \quad (9)$$

Zur Bestimmung des Übertragungsfaktors g setzen wir die Werte von Z_l und Z_q in Gleichung (6) ein. Als Resultat ergibt sich für g die Gleichung (10)

$$g = ar ch \left[1 + \frac{1}{2} \frac{p^2 L C}{1 + p^2 L K} \right]. \quad (10)$$

F) *Der Rechnungsvorgang und die Form der angewandten Stoßwelle.* In den theoretischen Berechnungen benützen wir Rechteckstöße. Die Anwendung der Rechteckwelle erhöht daher die Sicherheit der Bemessung.

Der Rechnungsvorgang ist dementsprechend folgender: Der Wert von g und der Laplace-transformierte des Einheitsstoßes $1/p$ wird in die Gleichungen (7) und (8) eingesetzt. Nach Durchführung dieser Substitution wird die Laplace-transformierte der Gleichung, die auf Wirkung des Einheitsstoßes auftretende Spannungsverteilung erhalten.

Das Umkehren dieser Gleichung ist wegen des komplizierten Ausdruckes für g schwerfällig und zur Lösung der sich zum Ziel gesetzten Aufgabe nicht nötig. Zur Vereinfachung der Berechnungen sollen die sich in den Transformatoren abspielenden Übergangserscheinungen physisch untersucht werden.

G) *Physische Untersuchung der auf Einwirkung von Stoßspannungen auftretenden Erscheinungen,* Wegen der schnellen Veränderung der Wellenstirn der in den Transformator eindringenden Überspannung fließt im ersten Moment kein Strom durch die Induktivitäten. Das bedeutet, daß in der Anfangszeit der Trans-

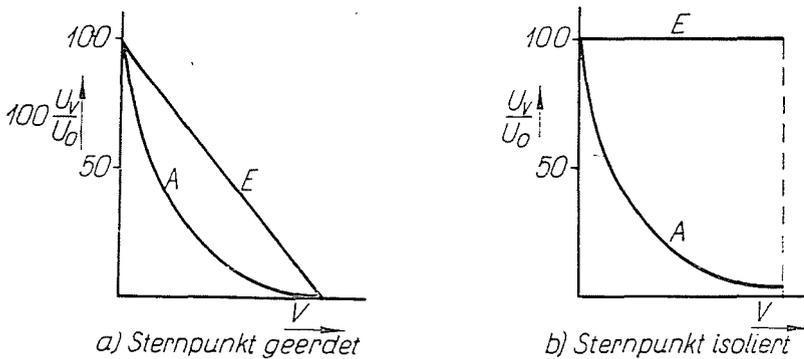


Abb. 3

formator als eine rein aus Kapazitäten bestehende Kette zu betrachten ist. Auf dieser aus Kapazitäten bestehenden Kette tritt eine aus der Theorie der Isolatorketten bekannte sh oder ch Spannungsverteilung auf. Diese außerordentlich ungleichmäßige Spannungsverteilung nimmt hauptsächlich die ersten Spulen und Windungen des Transformators in Anspruch. Die Kurve der anfänglichen kapazitiven Spannungsverteilung ist in den Abb. 3a (Kurve A) und 3b (Kurve A) veranschaulicht.

Nach Ablauf der steilen Wellenstirn wird die zeitliche Veränderung der Welle gering, dadurch erhöht sich der Strom durch die Induktivitäten, während sich der Strom durch die Kapazitäten vermindert. Die Spannungsverteilung längs der Spule wird durch den induktiven und Ohmschen Widerstand der

Spule bestimmt. Diese sogenannte »Endspannungsverteilung« ist bei geerdetem Sternpunkt eine schräge Gerade (Abb. 3a, Kurve E) und im Falle eines isolierten Sternpunktes eine waagrechte Gerade (Abb. 3b, Kurve E).

Die anfängliche Spannungsverteilung wird durch transiente Schwingungen in die endgültige Spannungsverteilung übertragen. Diese Schwingungen verursachen zwischen den Windungen der Spule gewöhnlich eine wesentlich kleinere Beanspruchung als die anfängliche ungleichmäßige Spannungsverteilung. Die transienten Schwingungen gefährden vielmehr die Hauptisolation der Wicklung.

Aus dem Vorhergesagten geht hervor, daß es genügt, wenn man die Windungs- und Lagenisolation der Wicklung bemessen will, die größten Inanspruchnahmen im Anfangszeitpunkt zu berechnen. Für diese Berechnungen wird der Transformator als eine aus Kapazitäten bestehende Kette betrachtet.

H) *Berechnung der höchsten Inanspruchnahme.* Auf Grund physikalischer Überlegungen kann der ganze Transformator durch den aus in Abb. 4 sichtbaren Kapazitäten aufgebauten Kettenleiter ersetzt werden. Der Übertragungsfaktor und der Wellenwiderstand dieser Kette kann aus den Gleichungen (9) und (10) berechnet werden, wenn in diesen Gleichungen $L \rightarrow \infty$ gesetzt wird. Nach Durchführung dieser Substitution wird für den Übertragungsfaktor die Gleichung (11a) erhalten.

$$g = \operatorname{ar ch} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{C}{K} \right). \quad (11a)$$

Zur weiteren Vereinfachung kann bei der Bestimmung des Übertragungsfaktors $ch g$ in Reihe entwickelt und die Glieder mit höheren Exponenten vernachlässigt werden. Diese Vernachlässigung ist bei den praktisch vorkommenden C/K Werten begründet, obwohl die Richtigkeit derselben von Fall zu Fall zu überprüfen ist. Nach Durchführung der Rechnung wird die Gleichung (11b) erhalten.

$$g = \sqrt{\frac{C}{K}}. \quad (11b)$$

Bei der Bestimmung des Wellenwiderstandes wird $C/4K \ll 1$ vorausgesetzt. Mit dieser Vernachlässigung ergibt sich für den Wellenwiderstand die Gleichung (12).

$$Z = \frac{1}{p \sqrt{CK}}. \quad (12)$$

Diesen Wert in die Gleichungen (7) und (8) eingesetzt, kommt man zu den Gleichungen (13) und (14), welche die anfängliche kapazitive Spannungsverteilung darstellen.

a) Für Wicklungen mit geerdetem Ende

$$U = U_0 \frac{\operatorname{sh}(N-v) \sqrt{\frac{C}{K}}}{\operatorname{sh} N \sqrt{\frac{C}{K}}}, \quad (13)$$

b) für Wicklungen mit isoliertem Ende

$$U_v = U_0 \frac{\operatorname{ch}(N-v) \sqrt{\frac{C}{K}}}{\operatorname{ch} N \sqrt{\frac{C}{K}}}. \quad (14)$$

Mit diesen Formeln können die Spannungen zwischen den einzelnen Punkten der Wicklung und der Erde berechnet werden. Die Differenz der aufeinanderfolgenden Spannungswerte ergibt die Beanspruchungen an den einzelnen Spulen, auf welche die Spulen zu bemessen sind.

Damit wurde die kapazitive Spannungsverteilung entlang der aus N gleichen Spulen bestehenden Wicklung berechnet. Diese Formeln sind für einen beliebigen Wert von N gültig, sie sind also z. B. auch auf einen aus 2—3 Spulen bestehenden Transformator anwendbar. Die Transformatoren bestehen aber in Wirklichkeit im allgemeinen nicht aus gleichen Spulen, vielmehr werden z. B. die ersten Spulen mit verstärkter Isolierung hergestellt, die Spulen in der Nähe des Sternpunktes können schwächer isoliert werden usw. Die Berechnungen müssen deshalb für aus verschiedenartigen Spulen aufgebaute Wicklungen verallgemeinert werden.

J) Berechnung der Spannungsverteilung in Wicklung aus verschiedenen Spulen.

Der Rechnungsgang wird an einem Beispiel erörtert. Die zu untersuchende Wicklung sei nach Abb. 4 aus dreierlei Spulen zusammengesetzt. Die Gruppe I bestehe aus einigen (2—5) Spulen mit der Erdkapazität C_1 und der Windungskapazität K_1 . Die Gruppe II bestehe aus einer größeren Anzahl (5—20) von gleichen Spulen mit den Kapazitäten C_2 und K_2 . Die Gesamtzahl dieser Gruppe bezeichnen wir mit N' . Die Spulen sind am Anfang begonnen mit $1', 2', 3' \dots \mu'$ beziffert. Die Gruppe III bestehe aus einer großen Anzahl am Ende geerdeter oder ungeerdeter Elemente mit der Erdkapazität C_3 und der Spulenkapazität K_3 . Die Anzahl der Spulen dieser Gruppe sei N'' . Für die Berechnung werden diese Spulen wiederum am Anfang begonnen mit $1'', 2'', 3'', \dots v''$ beziffert.

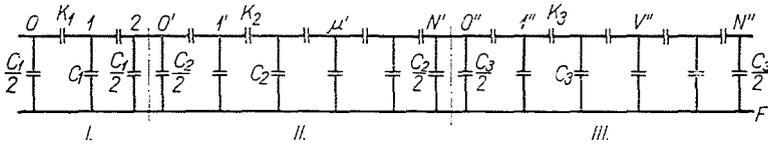


Abb. 4

Der Rechnungsgang ist folgender :

1. Die Spulengruppe III wird nach Abb. 5 mit einer einzigen Kapazität C_{e3} ersetzt.
2. Die mit der Kapazität C_{e3} abgeschlossene Spulengruppe II wird nach Abb. 6a mit der resultierenden Kapazität C_{e2} ersetzt.

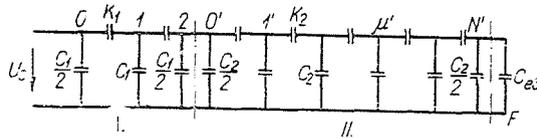


Abb. 5

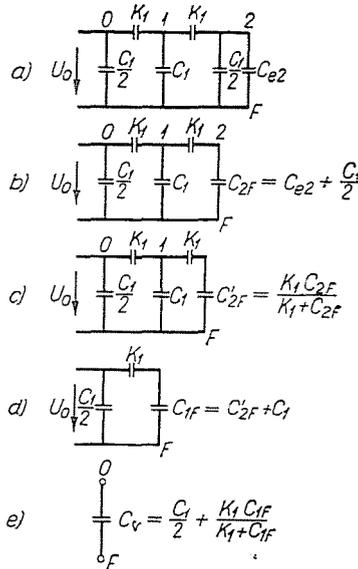


Abb. 6

3. Die so erhaltene, nunmehr lediglich aus einigen Gliedern bestehende Kette wird schrittweise zusammengefaßt, bis die Kette die Form der Abb. 6d annimmt.

4. Hiernach ist die auf die erste Spule (K_1) und auf die übrigen Spulen (C_{1F}) fallende Spannung leicht zu bestimmen. Die Berechnung ähnlichweise fortgesetzt, kann die auf jedes Glied der aus einer kleinen Anzahl bestehenden Gruppe I entfallende Spannung und mit den später abzuleitenden Formeln der Gruppen II und III sowie die Spannungsverteilung innerhalb dieser Gruppen bestimmt werden.

1. Die resultierende Kapazität der Gruppe III

Die resultierende Kapazität wird aus der Eingangsimpedanz (Z_e) der Kette berechnet. Mit einer einfachen Rechnung kann die Ersatzkapazität nach Gleichung (15) bestimmt werden.

$$C_e = \frac{1}{p Z_e} = \frac{1}{p \frac{U_{0v}}{I_{0v}}} \quad (15)$$

Der Quotient U_{0v}/I_{0v} kann aus den Gleichungen (3) und (4) mit Anwendung der Grenzbedingungen berechnet werden.

a) Im Falle eines isolierten Sternpunktes ist $v'' = N'' \cdot I_{N''} = 0$ und bekommen wir für die Ersatzkapazität die Gleichung (16).

$$C_{e3} = \sqrt{C_3 K_3} \operatorname{tgh} N'' g \quad (16)$$

b) Im Falle geerdeten Sternpunktes ist $v'' = N'' \cdot U_{N''} = 0$, und bekommen wir für die Ersatzkapazität die Gleichung (17).

$$C_{e3} = \sqrt{C_3 K_3} \operatorname{ctgh} N'' g \quad (17)$$

Ist $N'' g > 3$, dann ist $\operatorname{tgh} N'' g \approx \operatorname{ctgh} N'' g \approx 1$, somit ist die Erdkapazität in beiden Fällen aus (18) zu ermitteln.

$$C_{e3} = \sqrt{C_3 K_3} \quad (18)$$

Nach Berechnung der resultierenden Kapazität der Gruppe III kann der Transformator mit der auf Abb. 5 sichtbaren Kapazitätskette ersetzt werden.

2. Die resultierende Kapazität der mit C_{e3} abgeschlossenen Gruppe II

Die Gleichungen (3) und (4) dienen auch jetzt als Ausgangspunkte. Ein Unterschied besteht lediglich in den Grenzbedingungen. In diesem Falle bestehen

zwischen der am Ende der Wicklung herrschenden Spannung und Strom die Zusammenhänge :

$$U'_N = I'_N \frac{1}{p C_{e3}}; \mu' = N',$$

welche in die Gleichungen (3) und (4) eingesetzt werden und von der Gleichung (15) Gebrauch gemacht, erhält man für die Ersatzkapazität der Gruppe II die Gleichung (19) :

$$C_{e2} = \sqrt{C_2 K_2} \frac{1 + \frac{C_{e3}}{\sqrt{C_2 K_2}} \operatorname{ctgh} N' g}{\frac{C_{e3}}{\sqrt{C_2 K_2}} + \operatorname{ctgh} N' g}. \quad (19)$$

Es ist klar, daß wenn die Gliederzahl groß ist, dann $N'g > 3$ und dem Vorigen ähnlich ist

$$\operatorname{ctgh} N' g \approx 1; C_{e2} = \sqrt{C_2 K_2}.$$

Es lohnt sich, diese Formel bei mittlerer Gliederzahl (5—10) zu verwenden.

Nach der Berechnung der resultierenden Kapazität der Gruppe II kann der Transformator mit der auf Abb. 6a sichtbaren Kapazitätskette ersetzt werden.

3. Berechnung der resultierenden Kapazität der Gruppe I

Nachdem die Gruppe I nur aus einigen Gliedern besteht, wird die Rechnung Schritt für Schritt durchgeführt. Nehmen wir in unserem Falle an, daß die Gruppe I nach Abb. 6a und 4 aus zwei Gliedern bestehe. Die Rechnungen haben wir aus Abb. 6a—6e ausgeführt. In Kenntnis des C_{er} Wertes kann im vorhinein bestimmt werden, in welchem Maße bei der Stoßprüfung des Transformators der Stoßgenerator belastet wird.

4. Berechnung der Spannungsverteilung

a) Berechnung der bei Gruppe I auftretenden Spannungsverteilung.

Als Ausgangspunkt dient Abb. 6d, nach welcher sich die an den Transformator geschaltete Spannung auf die Kapazitäten K_1 und C_{1F} verteilt.

Die bei der der ersten Halbspule entsprechenden Kapazität auftretende Spannung

$$U_{01} = \frac{C_{1F}}{C_{1F} + K_1} U_0.$$

Die nach der ersten Spule (zwischen Punkt 1 und der Erde) auftretende Spannung ist

$$U_{1F} = U_0 - U_{01} = \frac{K_1}{C_{1F} + K_1} U_0.$$

Im folgenden wird die Spannung U_{1F} aufgeteilt (Abb. 6b).

Ähnlich den vorhergehenden ist die auf die zweite Spule kommende Spannung

$$U_{12} = \frac{C_{2F}}{C_{2F} + K_1} U_{1F}.$$

Die nach der zweiten Spule auftretende Spannung ist

$$U_{2F} = U_{1F} - U_{12} = \frac{K_1}{C_{2F} + K_1} U_{1F}.$$

Die Spannung U_{2F} entspricht gleichzeitig der der Gruppe zukommenden Spannung $U_{0\mu'}$.

b) Berechnung der Spannungsverteilung bei Gruppe II

Nach unserer Voraussetzung besteht die Gruppe II aus mehreren Gliedern, demzufolge wäre die Schritt-für-Schritt-Methode mühsam.

Zur Ableitung der Formel für die Bestimmung der Spannungsverteilung wird aus den Gleichungen (3) und (4) ausgegangen, und aus den angegebenen Grenzbedingungen Gebrauch gemacht. Nach Ordnung der Gleichung und Ersetzen der Veränderlichen v mit μ' erhält man für die Spannungsverteilung die Gleichung (20) :

$$U_{\mu'} = U_{0\mu'} \frac{ch(N' - \mu')g + \frac{C_{e3}}{\sqrt{C_2 K_2}} sh(N' - \mu')g}{ch N'g + \frac{C_{e3}}{\sqrt{C_2 K_2}} sh N'g} \quad (20)$$

wobei

$$g \cong \sqrt{\frac{C_2}{K_2}}.$$

Diese Gleichung gibt die zwischen dem vom Anfang der Gruppe II gerechneten μ' -ten Glied und der Erde auftretende Spannung an, also die Kurve der Spannungsverteilung.

Die auf Gruppe III entfallende Spannung ist gleich der am Ende der Spule auftretenden Spannung, diese kann aus Gleichung (20) mit der Sub-

stitution $\mu' = N'$ berechnet werden. Nach Durchführung dieser Substitution wird für die Spannung der Gruppe III die Gleichung (21) erhalten :

$$U_{N'} = U_{0N'} \frac{1}{ch N' g + \frac{C_{e3}}{\sqrt{C_2 K_2}} sh N' g} = U_{0v'} \quad (21)$$

c) *Berechnung der Spannungsverteilung auf Gruppe III*

Die Gruppe III bildet eine Kette aus gleichen Spulen, deshalb können zur Bestimmung der Spannungsverteilung die Formeln (13) und (14) benutzt werden, wobei zu berücksichtigen ist, daß die auf Gruppe III entfallende Spannung $U_{0v'} = U_{N'}$ ist.

K) *Bestimmung der bei der Berechnung der Spannungsverteilung verwendeten Kapazitäten*

Im vorhergehenden Kapitel wurden die für die Berechnung der Spannungsverteilung verwendbaren Vorgänge erörtert, die Bestimmung der einzelnen Kapazitätswerte aus den geometrischen Abmessungen des Transformators wurde jedoch nicht behandelt.

Diese Berechnung wird teilweise nach BULGAKOW [9], teils auf Grund der polnischen Dokumentation [7] durchgeführt.

a) *Berechnung der Erdkapazität*

Der Transformator wird nach Abb. 7 in Teilen von der Höhe H aufgeteilt. Die Erdkapazität eines solchen Zylinders der Höhe H wird durch die

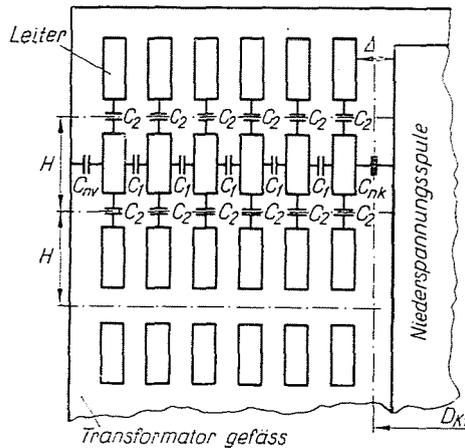


Abb. 7

Formel (22) angegeben :

$$C = k_1 k_2 C_{nk} + C_{nv} \quad (22)$$

wobei C_{nk} die gegenseitige Kapazität der Hoch- und Niederspannungsspule,
 C_{nv} die Kapazität der Hochspannungsspule gegen Erde,
 k_1 ein Faktor für die Berücksichtigung der Ungleichmäßigkeiten zwischen den zwei Spulensystemen, vom Wert

$$= \frac{\frac{H-h}{H} \cdot \frac{H-h}{\Delta}}{5 + \frac{H-h}{\Delta}} \text{ ist.} \quad (23)$$

h_2 ist die Höhe des Spulenleiters

k_2 berücksichtigt, daß die Niederspannungsspule ungeerdet ist. Der Wert $k_2 \cong 1$, wenn die Niederspannungsspule eine kleine Impedanz hat, also aus wenigen Windungen besteht.

Besteht die Niederspannungsspule aus vielen Windungen mit großer Impedanz, dann ist

$$k_2 = \frac{C_{kF}}{C_{nk} + C_{kF}},$$

wo

C_{kF} die Kapazität zwischen der Spule und der Erde,

C_{nk} die Kapazität zwischen der Hoch- und Niederspannungsspule ist.

Der Wert von C_{nk} kann nach der Formel für Plattenkondensatoren berechnet werden.

Der Wert von C_{kF} wird nach BULGAKOW aus Formel (24) berechnet.

$$C_{kF} = \frac{10}{9 \cdot 4 \pi} \cdot \frac{L_k^{\text{cm}} \cdot H^{\text{cm}}}{l_k^{\text{cm}}} p F. \quad (24)$$

In dieser Formel ist L_k die Länge der Mittellinie zwischen der Wicklung und der Gefäßwand, bezogen auf eine der drei Phasen.

l_k ist die mittlere Entfernung zwischen Wicklung und Gefäßwand. Erfahrungsgemäß ist die Gefäßkapazität für gewöhnlich vernachlässigbar.

b) Berechnung der Windungskapazitäten

BULGAKOW gibt für die Berechnung der resultierenden Ersatzkapazität der aus s Windungen bestehenden Spule die Formel (25) an.

$$K_1 = s C_2 \left[1 + \frac{1}{s} \sqrt{\frac{C_1}{C_2}} \right] \quad (25)$$

wo s die Windungszahl der Spule,

C_1 die Kapazität der nebeneinander liegenden und

C_2 die Kapazität der übereinander liegenden Windungen ist (Abb. 10).

Ist der Wert von C_2 an beiden Seiten der Spule verschieden, dann ist es zweckmäßig, den arithmetischen Mittelwert der von beiden Seiten berechneten C_2 Werte zu nehmen.

Die Werte von C_1 und C_2 können übrigens nach der Formel für Plattenkondensatoren berechnet werden, indem in die Formel die mittlere Spulenlänge und die reduzierte Dielektrizitätskonstante eingesetzt wird.

IV. Bemessung auf Stoßspannungen

Die Stoßspannungsfestigkeit der Isolierstoffe ist von sehr vielen Faktoren abhängig. Bei der Bemessung sind wir deshalb auf Meßergebnisse angewiesen. Solche Meßergebnisse sind nach BULGAKOW [9] in Tab. II und III angegeben. Die Bemessung wird mit Hilfe dieser Werte solcherart durchgeführt, daß der Höchstwert der in den Transformator eindringenden Stoßspannungswelle nach Tab. I bestimmt wird. Nach den Kapiteln III/H werden die auf die einzelnen Spulen kommenden Spannungen und die Inanspruchnahme der zwischen den Spulen liegenden Isolierungen bestimmt. Hiernach wird mit Hilfe der Tab. II und III ermittelt, ob die Lagenisolation der Spulen die auftretenden Spannungen aushält.

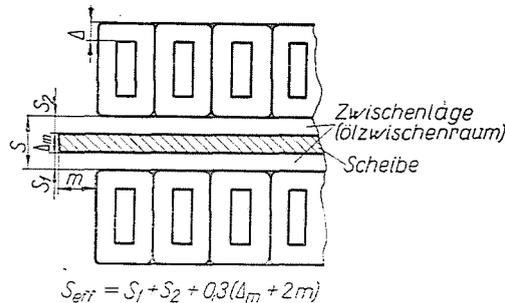


Abb. 8

Tabelle II

S_{eff} mm	Die mit voller Welle gemessene Durchschlagsspannung (kV)					
	Δ mm					
	0,6	1	2	4	6	10
5	90	100	122	167	220	332
10	141	154	167	208	270	380
15	180	192	205	244	305	410
20	219	230	244	276	333	435
25	252	265	274	302	358	452
30	277	284	296	323	375	474

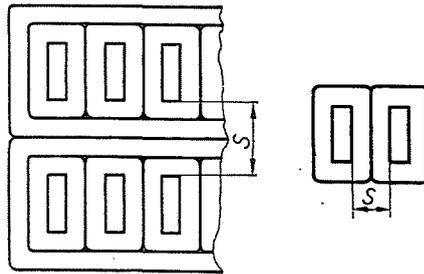


Abb. 9

Tabelle III

Smm	0,5	1	1,5	2	3	4	5	6	8	10	12	14	16	18	20
UkV	13	29	46	65	103	132	157	180	218	251	281	311	341	366	389

Die Spannungsverteilung innerhalb der Spule ist nach WELLAUER [5] bei größeren, aus viereckigem Material gewickelten Transformatoren linear. Auf diese Weise erhält man die zwischen den Windungen auftretende Beanspruchung als den Quotienten aus der auf die Spule entfallenden Spannung und der Windungszahl. Ist diese Beanspruchung bekannt, so kann mit Hilfe der Tab. II und III die Güte der Windungsisolation beurteilt werden.

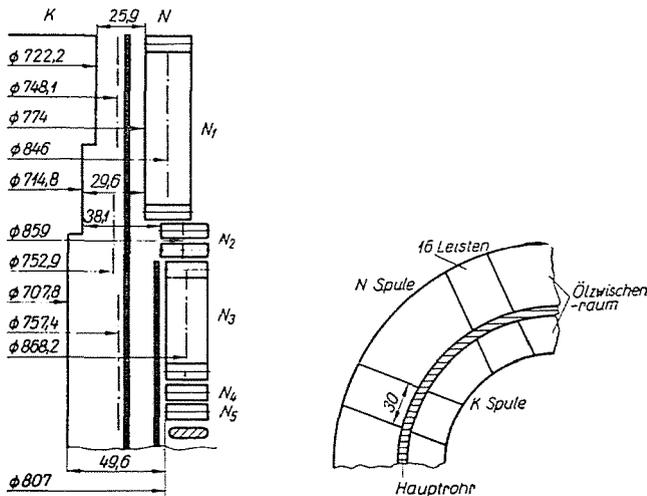


Abb. 10

V. Zahlenbeispiel*

Für die praktische Vorführung des hier beschriebenen Rechnungsganges haben wir die Berechnung der Spannungsverteilung an einem 120 kV, 24 MVA Transformator durchgeführt.

Bei der Berechnung haben wir vorausgesetzt, daß die Niederspannungswicklung des Transformators auf Erdpotential liegt. Das Schema der Wicklung ist aus Abb. 10 ersichtlich. Der Transformator ist diabolartig angeordnet, es genügt daher, die Berechnung nur auf eine

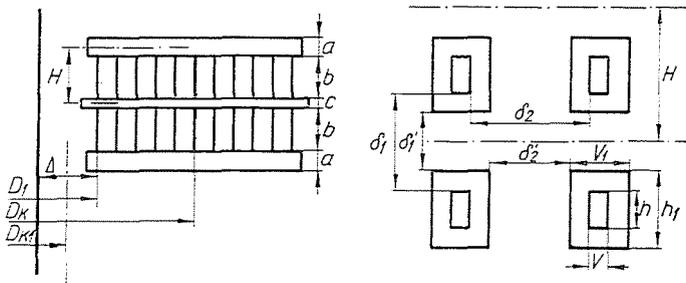


Abb. 11

Hälfte der Wicklung durchzuführen. Die Wicklung dieses Transformators ist aus fünf verschiedenen Spulen aufgebaut. Die Skizze einer Spule ist aus Abb. 11 ersichtlich. Die Angaben der einzelnen Spulen sind in Tab. IV enthalten.

Tabelle IV

Spule		D _K	D ₁	a	b	c	Wicklungs-zahl	Leiterabmessungen		H	δ ₁	δ ₂	Δ	Δ ₁	D _{K1}	d
Zeichen	Nr							h × V	h ₁ × V ₁							
N ₁	13	846	774	6	8,1	2	2 × 20	6,7 × 2,2	8,1 × 3,6	12,1	2,4	1,4	25,9	6	748,1	3
N ₂	2	859	791	7	9,1	2	2 × 20	7,7 × 2	9,1 × 3,4	13,6	3,4	1,4	38,1	6	752,9	3
N ₃	10	868,2	807	7	9,1	2	2 × 18	7,7 × 2	9,1 × 3,4	13,1	3,4	1,4	49,6	11	757,4	7
N ₄	1	866,2	807	7	9,4	2	2 × 16	7,7 × 2	9,4 × 3,7	13,4	3,7	1,7	49,6	11	757,4	7
N ₅	1	867	807	7 8	9,7	2,5	2 × 15	7,7 × 2	9,7 × 4	14,45	4,5	2	49,6	11	757,4	7

Die Wicklung beginnt mit der Spule N₅, vor die ein Potentialsteuerring angebracht ist, somit ist die Dicke der Isolation an den zwei Seiten der Spule verschieden.

Die Dielektrizitätskonstanten der verwendeten Materialien sind in Tab. V enthalten.

Tabelle V

Material	ε
Öl.....	2,2
Ölpapir.....	4,3
Preßspan.....	4,3
Pabit.....	3,5

*Bei der Ausarbeitung des Zahlenbeispiels wirkte Ing. L. Kiss mit.

1. Berechnung der Erdkapazitäten

Bei der Berechnung der Erdkapazitäten wurde angenommen, daß die Niederspannungswicklung auf Erdpotential liege, also $k_2 = 1$ ist. Die Kapazität zwischen der Hochspannungswicklung und dem Transformatorgefäß wurde vernachlässigt, $C_{nv} = 0$.

Berechnung der Erdkapazität der Spule N_1

Im Raum zwischen der Hoch- und Niederspannungswicklung sind außer dem Hauptrohr 16 Preßspanleisten angeordnet. Die Wirkung dieser wird mit der Veränderung der Dielektrizitätskonstante des Öls (durch Verminderung) in Rechnung genommen.

Zahl der Leisten: 16

Abmessungen der Leisten nach Abb. 10: $b = 30$ mm, mittlerer Durchmesser des Kanals bei Spule N_1 $D_{k1} = 748,1$ mm

Der prozentuale Wert des durch die Leisten bedeckten Umfanges

$$\beta = \frac{n \cdot b}{\pi D_{k1}} = \frac{16 \cdot 30}{\pi \cdot 748,1} = 20,4\%$$

Dielektrizitätskonstante der Leisten: 4,3

Dielektrizitätskonstante des Öles: 2,2

Die durchschnittliche Dielektrizitätskonstante ist demnach [1, 10]

$$\varepsilon_k = \frac{20,4}{100} 4,3 + \frac{100 - 20,4}{100} 2,2 = 2,63.$$

Die Ölzwischenräume werden wegen der Leisten mit der Dielektrizitätskonstante 2,63 in Rechnung genommen. Bei der Berechnung der Veränderung der Dielektrizitätskonstante muß wegen des Hauptrohres berücksichtigt werden, daß das Hauptrohr eine reihenweise Schichtung verursacht.

Die volle Dicke des Ölkanals ist $\Delta = 2,59$ cm. Im Kanal sind $\Delta_1 = 0,6$ cm dicker Pabit mit einer Dielektrizitätskonstante $\varepsilon_p = 3,5$ und $d = 0,3$ cm dickes Ölpapier mit einer Dielektrizitätskonstante von $\varepsilon'_p = 4,3$. Die Dicke des in dem Kanal befindlichen Öles ist $\Delta_0 = 2,59 - 0,6 - 0,3 = 1,69$ mit der Dielektrizitätskonstante $\varepsilon_k = 2,63$.

Mit Verwendung dieser Werte

$$\frac{1}{\varepsilon_{red}} 2,59 = \frac{1,69}{2,63} + \frac{0,3}{4,3} + \frac{0,6}{3,5}$$

$$\varepsilon_{red} = 2,94.$$

Das ist die bei der Berechnung der Erdkapazität zu verwendende reduzierte Dielektrizitätskonstante.

Die Kapazität zwischen der Hoch- und Niederspannungsspule ist nach Formel des Plattenkondensators

$$C_{nk} = \frac{10}{4 \pi \cdot 9} \cdot \frac{D_{kl} \pi}{\Delta} H \varepsilon_{red} \cong 0,28 \frac{D_{kl}}{\Delta} H \varepsilon_{red} = 0,28 \frac{74,81}{2,59} 1,21 \cdot 2,94$$

$$C_{nk} \cong 29 \text{ pF.}$$

Zur Bestimmung der vollen Kapazität ist das Korrektionsglied k_1 notwendig, der Wert desselben ist

$$k_1 = 1 - \frac{\frac{H-h}{H} \cdot \frac{H-h}{\Delta}}{5 + \frac{H-h}{\Delta}} = 1 - \frac{\frac{1,21 - 0,67}{1,21} \cdot \frac{1,21 - 0,67}{2,59}}{5 + \frac{1,21 - 0,67}{2,59}}$$

$$k_1 = 0,868.$$

Damit ist die Erdkapazität der Spule N_1

$$C_{N_1} = 29 \cdot 0,868 = 25 \text{ pF.}$$

Mit den Angaben der Tab. IV sind die Erdkapazitäten der übrigen Spulen in gleicher Weise zu berechnen. Die Ergebnisse der Berechnung sind in der Tab. VI zusammengestellt.

2. Berechnung der Spulenkapazitäten K

Als Beispiel wurden die Kapazitäten der Spule N_1 berechnet. Für die Berechnung von K ist die Bestimmung der Kapazitäten C_1 und C_2 notwendig.

C_1 ist die Kapazität der nebeneinander liegenden Windungen, diese wird mit den Werten der Tab. IV folgendermaßen berechnet:

$$C_1 = 0,28 \frac{D_k h \varepsilon_r}{\delta_2} = 0,28 \frac{84,6 \cdot 4,3}{0,14} \cdot 0,67 = 488 \text{ pF.}$$

C_2 ist die Kapazität der übereinander liegenden Windungen. Nachdem die Berechnung für Halbspulen erfolgt, wird die Kapazität der über und unter der Halbspule vorhandenen Kanals verschieden.

Oberhalb der Halbspule (gegen die andere Spule) ist ein Ölkanal, in welchem 16, $b = 55$ Versteifungsleisten angebracht sind, unter der Halbspule (zwischen den zwei Halbspulen) ist eine 2 mm breite Einlageplatte vorhanden.

Bei der Berechnung der Kapazität (C_2) des oberen Kanals muß die gemeinsame Dielektrizitätskonstante auf dieselbe Art berechnet werden wie bei der Berechnung der Erdkapazitäten.

Der durch die Leisten bedeckte Umfang

$$\beta = \frac{b \cdot n}{D_k \pi} = \frac{55 \cdot 16}{846 \pi} = 33\%.$$

Die Dielektrizitätskonstante der Leisten $\varepsilon_l = 4,3$. Die gemeinsame Dielektrizitätskonstante ist

$$\varepsilon_k = \frac{33}{100} 4,3 + \frac{100 - 33}{100} 2,2 = 2,9.$$

Diese Dielektrizitätskonstante ist nur für den $a_1 = 6$ mm dicken Ölzwischenraum gültig. Mit diesem ist die $Sz = 2 \times 0,7$ mm breite Papierisolation der Spule in Reihe geschaltet.

Der resultierende Dielektrizitätskonstante dieser beiden Isolationen

$$\frac{1}{\varepsilon_r} 7,4 = \frac{1,4}{4,3} + \frac{6}{2,9}; \quad \varepsilon_r = 3,10.$$

Mit dieser gemeinsamen Dielektrizitätskonstante gerechnet, ist die Kapazität des oberen Kanals

$$C_2' = 0,28 \frac{D_k V_1}{a + Sz} \varepsilon_p = 0,28 \frac{84,6 \cdot 0,36}{0,6 + 0,14} \cdot 3,10 = 35,6 \text{ pF.}$$

Die Kapazität des unteren Ölkanals kann, nachdem die Dielektrizitätskonstante des Ölpapiers (Spulenisolation) und des Preßpans (Einlageplatte) die gleiche ist, ohne Reduzierung der Dielektrizitätskonstante unmittelbar berechnet werden:

$$C_2'' = 0,28 \frac{D_k V_1}{c + Sz} \varepsilon = 0,28 \frac{84,6 \cdot 0,36}{0,34} \cdot 4,3 = 108 \text{ pF.}$$

Die ermittelte Kapazität der beiden Kanäle ist

$$C_2 = \frac{C_2' + C_2''}{2} = \frac{108 + 35,6}{2} = 71,8 \text{ pF.}$$

Die volle Spulenkapazität der Spule ist, wenn ihre Windungszahl $s = 20$ beträgt

$$K_{N_1} = sC_2 \left[1 + \frac{1}{s} \sqrt{\frac{C_1}{C_2}} \right] = 20 \cdot 71,8 \left[1 + \frac{1}{20} \sqrt{\frac{488}{71,8}} \right] = 1625 \text{ pF}.$$

Mit Hilfe der Werte in Tab. IV können die Erdkapazitäten der übrigen Spulen auf ähnliche Art berechnet werden. Die Ergebnisse der Berechnung sind in Tab. VI zusammengefaßt.

Tabelle VI

Spule	Anzahl der Spulen	K^{pF}	C^{pF}
N_1	28	1625	25,0
N_2	4	1513	22,4
N_3	20	1450	17,4
N_4	2	1290	17,8
N_5	2	975	19,2

Die Kapazität der beiden Halbspulen der Spule N_5 ist wegen des Potentialsteuerringes verschieden.

3. Das Ersatzschaltbild der Spule und die Reduktion desselben

Das Ersatzschaltbild der Wicklung ist in Abb. 12 aufgezeichnet. Der Transformator ist der Zahl der Spulen entsprechend auf fünf Teile aufgeteilt.

$2 \times N_5$ $2 \times N_4$ $20 \times N_3$ $4 \times N_2$ $28 \times N_1$
 $C_5 = 19,2 \text{ pF}$ $C_4 = 17,8 \text{ pF}$ $C_3 = 17,4 \text{ pF}$ $C_2 = 22,4 \text{ pF}$ $C_1 = 25 \text{ pF}$
 $K_5 = 975 \text{ pF}$ $K_4 = 1290 \text{ pF}$ $K_3 = 1450 \text{ pF}$ $K_2 = 1513 \text{ pF}$ $K_1 = 1625 \text{ pF}$

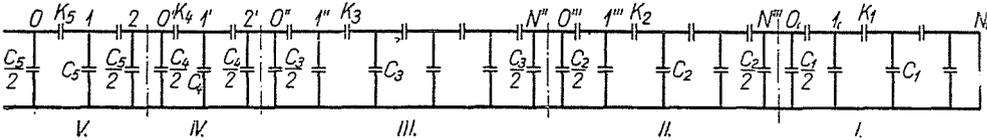


Abb. 12

1. Danach wird die resultierende Kapazität des am Ende geerdeten I. Teiles mit Hilfe der Formel (18) berechnet :

$$N_g = N \sqrt{\frac{C_1}{K_1}} = 28 \sqrt{\frac{25}{1625}} = 3,48 > 3,$$

also ist $\text{tgh } N_g = 1,$

$$C_{e1} = \sqrt{C_1 K_1} = \sqrt{25 \cdot 1625} = 202 \text{ pF}.$$

2. Es wird die resultierende Kapazität des mit der Kapazität $C_{e1} = 202 \text{ pF}$ abgeschlossenen Teiles II mit Hilfe der Formel (19) berechnet :

$$C_{e2} = \sqrt{1513 \cdot 22,4} \frac{1 + \frac{202}{\sqrt{1513 \cdot 22,4}} \text{ctgh } 0,482}{\frac{202}{\sqrt{1513 \cdot 22,4}} + \text{ctgh } 0,482} = 172,3 \text{ pF}.$$

3. Es wird die resultierende Kapazität des mit der resultierenden $C_2 = 172,3$ pF abgeschlossenen Teiles III mit Hilfe der Formel (19) bestimmt :

$$C_{c3} = \sqrt{17,4 \cdot 1450} \frac{1 + \frac{172,3}{\sqrt{17,4 \cdot 1450}} \operatorname{ctgh} 2,19}{\frac{172,3}{\sqrt{17,4 \cdot 1450}} + \operatorname{ctgh} 2,19}} = 150,6 \text{ pF.}$$

4. Die resultierenden Kapazitäten von V und IV werden nach der Schritt-für-Schritt-Methode nach Abb. 13 berechnet.

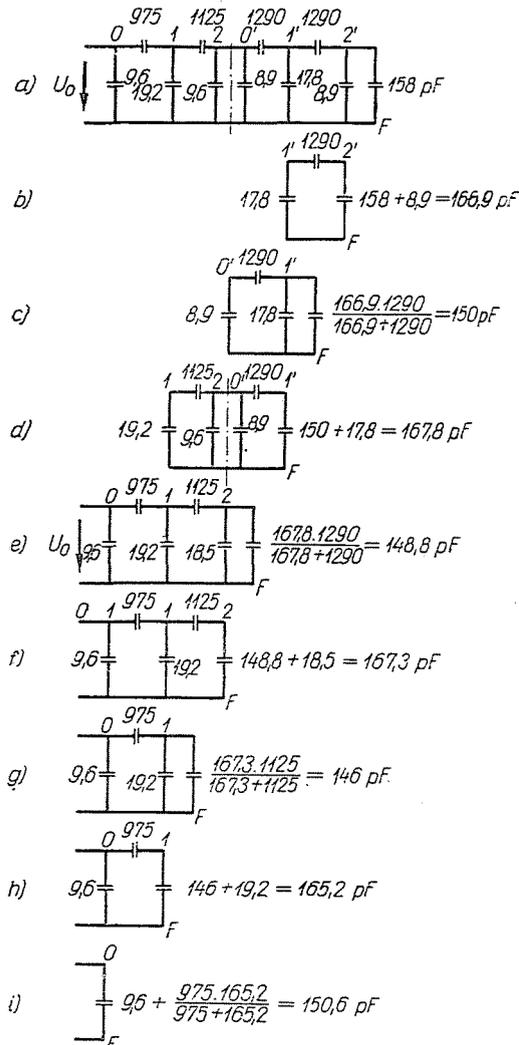


Abb. 13

Nachdem die Hochspannungswicklung des Transformators aus zwei parallelgeschalteten Wicklungen besteht, ist die resultierende Kapazität

$$C_{cr} = 2 \cdot 150,6 = 301,2 \text{ pF.}$$

Zu diesen Werten muß noch die Kapazität des Durchführungsisolators addiert werden, diese beträgt ca. 500 pF, somit ist der Wert der den Stoßspannungsgenerator belastenden Kapazität

$$C_{cr} = 800 \text{ pF.}$$

4. Berechnung der Spannungsverteilung

Die eindringende Stoßwelle werde als 100% angenommen, dann ist die auf die erste Halbspule kommende Spannung U_{01} nach Abb. 13h

$$U_{01} = \frac{165,2}{975 + 165,2} 100 = 14,5\%.$$

Die zwischen Punkt 1 und der Erde auftretende Spannung

$$U_{1F} = U_0 - U_{01} = 100 - 14,5 = 85,5\%.$$

Die auf die zweite Halbspule kommende Spannung (U_{12}) ist nach Abb. 13f

$$U_{12} = 85,5 \frac{167,3}{1125 + 167,3} = 11,06\%.$$

Die zwischen Punkt 2 und der Erde auftretende Spannung ist

$$U_{2F} = 85,5 - 11,06 = 74,44\%.$$

Auf die erste Spule der Wicklung fällt demnach die Spannung

$$U_{02} = 25,56\%.$$

Die auf die dritte Halbspule kommende Spannung (U_{01}) ist nach Abb. 13d

$$U_{01} = 74,44 \frac{167,8}{1290 + 167,8} = 8,56\%.$$

Die zwischen Punkt 1 und der Erde auftretende Spannung ist

$$U_{1F} = 74,44 - 8,56 = 65,88\%.$$

Die auf die vierte Halbspule kommende Spannung (Abb. 13b) ist

$$U_{12} = 65,88 \frac{166,9}{166,9 + 1290} = 7,53\%.$$

Die zwischen Punkt 2' und der Erde auftretende Spannung ist

$$U'_{2F} = 65,88 - 7,53 = 58,35\%.$$

Die auf die zweite Spule kommende Spannung ist also

$$U_{02}'' = 7,53 + 8,56 = 16,09\%$$

Die Spannung $U_{2F} = 58,35\%$ ist gleichzeitig auch die auf den Teil III kommende Spannung. Die Spannungsverteilung des aus 20 Gliedern bestehenden dritten Teiles wird nach der Formel (20) berechnet :

$$U_v = 58,35 \frac{\operatorname{ch}(20 - v) \sqrt{\frac{17,4}{1450}} + \frac{172,3}{\sqrt{1450 \cdot 17,4}} \operatorname{sh}(20 - v) \sqrt{\frac{17,4}{1450}}}{\operatorname{ch} 20 \sqrt{\frac{17,4}{1450}} + \frac{172,3}{\sqrt{1450 \cdot 17,4}} \operatorname{sh} 20 \sqrt{\frac{17,4}{1450}}} =$$

$$= 6,20 [\operatorname{ch} 0,11(20 - v) + 1,086 \operatorname{sh} 0,11(20 - v)].$$

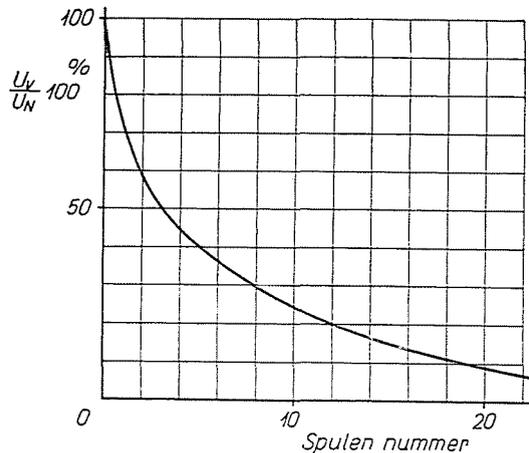


Abb. 14

Die berechnete Spannungsverteilung ist in Abb. 14 veranschaulicht.

Aus Abb. 14 geht hervor, daß es sich nicht mehr lohnt die Spannungsverteilung der Gruppen IV und V wegen der kleinen Spannung zu berechnen.

5. Die Überprüfung der Isolation des Transformators

a) Spulenisolation

Für die 120 kV Transformatoren schreibt die Norm der Koordinierung der Isolationsniveaus für das entsprechende obere Niveau 600 kV, und mittlere Niveau 480 kV vor.

Nach den erhaltenen Ergebnissen wird die Isolierung zwischen den ersten zwei Halbspulen mit 25,56% der vollen Spannung in Anspruch genommen.

Dem entspricht bei einer 600 kV vollen Spannung 153 kV und bei einer 480 kV vollen Spannung 123 kV.

Die Isolierung zwischen den Halbspulen besteht aus 2,5 mm Preßpan und 2 mm Ölpapier. Nach Tab. III hält diese Isolierung 144,5 kV Stoßspannung aus.

Auf die Isolierung zwischen der ersten und zweiten Spule entfallen $11,06 + 8,56 = 19,62\%$ der Spannung, 600 kV volle Spannung vorausgesetzt 118 kV, und 480 kV volle Spannung vorausgesetzt 94 kV entsprechen.

Die Isolierung zwischen den Spulen besteht aus 7 mm Ölkanal und aus 2 mm Papier, welche nach Tab. II 140 kV Stoßspannung aushalten.

Es kann festgestellt werden, daß die Isolierung den 480-kV-Stoß aushält, jedoch durchgeschlagen wird, wenn der Transformator einen 600-kV-Stoß erhält. Die Ergebnisse der Berechnung werden durch die Resultate der seitens des Lehrstuhls für Elektrische Kraftwerke an einem ähnlichen Transformator durchgeführten Stoßüberschlagsversuche unterstützt. Dieser Transformator hielt die 480-kV-Stöße ohne Schaden aus, auf die Wirkung der 600 kV vollen und unterbrochenen Stoßwellen ist aber ein Durchschlag eingetreten.

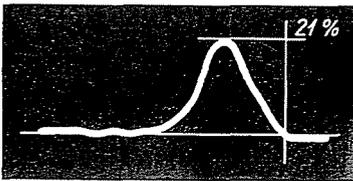
b) Windungsisololation

14,5% der auf die erste Halbspule entfallenden Spannung verteilen sich gleichmäßig auf die 15 Windungen, somit ist die Windungsspannung 0,98%, dem bei einem vollen Stoß von 600 kV eine Spannung von 5,9 kV und bei 480 kV eine Spannung von 4,6 kV entspricht.

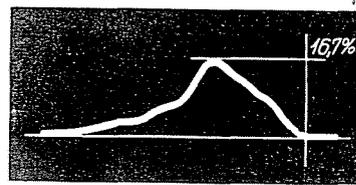
Die Windungsisololation besteht aus 2 mm Ölpapier, das nach Tab. III und Abb. 11 eine Spannung von 65 kV aushält. Daraus ist also ersichtlich, daß die Stoßprüfung die Windungsisololation nicht gefährdet.

VI. Vergleich der Meß- und Rechenergebnisse

Zur Überprüfung der durch Berechnung erhaltenen Ergebnisse wurden die auf den ersten zwei Spulen des berechneten 120 kV, 24 MVA Transformators auftretenden Spannungen mit einem Niederspannungsstoßgenerator gemessen.



Nr. 1



Nr. 2

Die Meßergebnisse sind aus den Oscillogrammen Nr. 1 und 2 ersichtlich.

Die Aufnahme Nr. 1 zeigt die auf der ersten, die Aufnahme Nr. 2 die auf der zweiten Spule auftretende Spannung. Aus den Aufnahmen geht hervor, daß die auf der ersten Spule auftretende Spannung 21%, die auf der zweiten Spule auftretende Spannung 16,7% der eindringenden Stoßwelle beträgt.

Bei den Berechnungen wurde auf der ersten Spule 25,56%, auf der zweiten Spule 16,90% gefunden.

Die Ergebnisse der Berechnung und der Messung stimmen befriedigend überein. Die Berechnungen ergeben eine um einige Prozente höhere Beanspruchung, die ihren Grund außer in der Ungenauigkeit der Berechnung auch darin hat, daß die Messung mit einer Stoßwelle $1/50$, die Berechnung hingegen mit Rechteckwellen erfolgte.

VII. Zusammenfassung

Bei Transformatoren neuen Typs ist es zweckmäßig, nach Beendigung der Berechnung und der Konstruktion die Berechnung der Kapazitäten und der Stoßspannungsverteilungen durchzuführen. Falls der Transformator den gestellten Anforderungen nicht entspricht, kann der Konstrukteur durch Anwendung von Abschirmungen, Schutzkapazitäten, verstärkter Isolation usw. die auftretenden Beanspruchungen beeinflussen. Ihre Wirkung ist mit der erörterten Methode ebenfalls zu verfolgen. Zweckmäßig wird auch die Berechnung vor der Stoßspannungsprüfung durchgeführt, teils zur Bestimmung der zu erwartenden Beanspruchungen, teils zur Bestimmung der resultierenden Kapazität des Transformators. Diese ist zur Bestimmung der zufolge des Transformators auftretenden Spannungsänderung des Stoßgenerators nötig.

Die Brauchbarkeit der angegebenen Berechnungsmethode und die Tabellen werden durch die erörterten Versuchsergebnisse bewiesen, bei denen von besonderem Interesse die Tatsache ist, daß der Transformator der Berechnung gemäß den 480-kV-Stoß aushalten muß, den 600-kV-Stoß jedoch nicht mehr. Bei dem mit der Berechnung überprüften Transformator erfolgte der Durchschlag bei über 480 kV, jedoch unterhalb 600 kV.

Zum Abschluß möchte ich Prof. Dr. I. EISLER, der meine Arbeit lenkte, und Dr. Gy. TÉGLÁS, der mir sowohl bei der Übersetzung half als mich auch sonst mit Rat versah, meinen aufrichtigen Dank aussprechen.

Schrifttum

1. VEREBÉLY, L.: Villamos erőtvitel I (Elektrische Kraftübertragung I). Budapest 1953.
2. LISKA, J.: Transzformátorok (Transformatoren). Budapest 1950.
3. SIMONYI, K.: Elméleti Villamosságtan (Theoretische Elektrotechnik). Budapest 1952.
4. HELLER, B.—VEVERKA, A.: Stoßerscheinungen in elektrischen Maschinen. Berlin 1957.
5. WELLAUER: Einführung in die Hochspannungstechnik. Basel 1954.
6. BEWLEY: Travelling Waves in Transmission Systems. New York 1951.
7. LUKÁCS—GÁBOR: Beszámoló a lengyelországi tanulmányútról (Bericht über die Studienreise nach Polen).
8. KÜPFMÜLLER: Einführung in die theoretische Elektrotechnik. Berlin 1951.
9. Булгаков: Расчет трансформаторов (Transformatoren-Berechnung). Moskau 1950.
10. EISLER, J.: Szigetelőanyagok (Isoliermaterialien). Budapest 1957.
11. WALDVOGEL, P.: Berechnung der kapazitiven Anfangs-Spannungsverteilung im Innern einer Transformatorwicklung beim Ankommen einer rechteckigen Stoßwelle. SEV. Bulletin 3, 57. (1942).
12. WALDVOGEL, P.—RUXEL, R.: Eine neue Methode zur Berechnung der Stoßspannungsverteilung. Brown-Boveri Mitt. 6, 206. (1956).
13. HALLE: Wanderwellen in Wicklungen. Archiv für Elektrotechnik. 1938. 3515.
14. HELLER: Die Eingangskapazität geschildeter Transformatoren. Acta Technica. ČSAV. I, (1957).

G. KARÁDY Budapest, Budafoki út 8.