

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 30 (1939)
Heft: 5

Artikel: Die Übertragung von Überspannungen von der Oberspannungs- auf die Unterspannungswicklung von Transformatoren : experimentelle und theoretische Untersuchung
Autor: Wellauer, M.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1058341>

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: 14.01.2026

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

environ, dans le bâtiment d'administration, par une ligne louée à l'Administration des Téléphones.

Enfin, cette nouvelle installation est équipée d'un dispositif de signalisation à distance qui transmet

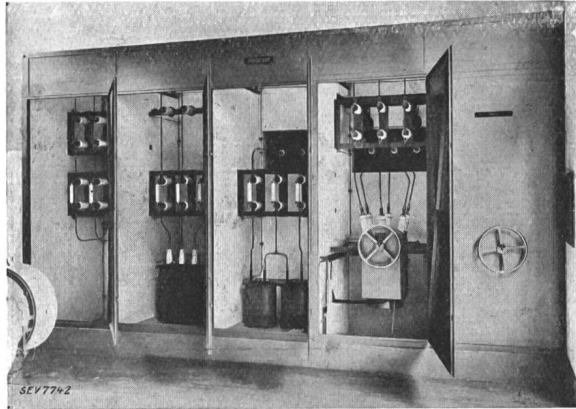


Fig. 7.

Installation de couplage à 8 kV.

le niveau de l'eau à un instrument enregistreur monté sur le tableau de la salle des machines.

La commande manuelle consiste uniquement en un contrôle général entrepris chaque matin par

un mécanicien qui règle au besoin le limiteur de puissance et le conjoncteur-disjoncteur horaire et reporte quelques inscriptions dans le livre d'exploitation.

Cette installation, qui est également prévue pour service manuel, a été mise en exploitation à la fin du mois de mai 1938 et fonctionne parfaitement. Elle a permis d'atteindre le but proposé, c'est-à-dire l'utilisation aussi parfaite que possible des forces hydrauliques de l'Aabach et l'amélioration du budget du Service de l'électricité en réduisant les achats d'énergie et en coupant les pointes.

Les frais de construction se sont élevés à frs. 119 009.20. La production annuelle pouvant atteindre 1 million de kWh, le prix de l'énergie est de 1,4 cts/kWh, les frais annuels étant estimés à frs. 14 000.—. Le 35 à 40 % de cette énergie peut être produit pendant le semestre d'hiver.

La partie hydraulique a été fournie par Escher-Wyss et l'alternateur, ainsi que tout l'équipement électrique, par les Ateliers de Construction Oerlikon. Le dispositif de signalisation à distance du niveau de l'eau a été livré par Rittmeyer, à Zoug. La transformation de la conduite à Käpfnach a été exécutée par la Chaudronnerie de Richterswil.

Die Uebertragung von Ueberspannungen von der Oberspannungs- auf die Unterspannungswicklung von Transformatoren.

Experimentelle und theoretische Untersuchung.

Von M. Wellauer, Zürich-Oerlikon.

621.314.21.015.34

Die Arbeit beschreibt experimentell und rechnerisch die Uebertragung von Ueberspannungen atmosphärischer Natur von der Oberspannungs- auf die Unterspannungswicklung von Transformatoren. Es wird gezeigt, dass je nach Art der Schaltung des Transformators und der Art des Auftretens der Wanderwellen die sekundär auftretende Ueberspannung harmlos bis — für die angeschlossenen Maschinenwicklungen — gefährliche Werte annehmen kann. Die Wirkung von Ueberspannungsschutzapparaten wird ebenfalls diskutiert.

L'auteur étudie expérimentalement et par le calcul comment les surtensions d'origine atmosphérique passent de l'enroulement haute tension à l'enroulement basse tension des transformateurs. Il montre que, suivant le couplage du transformateur et suivant la manière dont se produisent les ondes de surtension, la surtension secondaire peut être inoffensive ou devenir dangereuse pour les enroulements des machines raccordées. Finalement il étudie l'effet d'appareils de protection contre les surtensions.

Einleitung.

1. Bis vor wenigen Jahren war man noch der Meinung, Apparate und Maschinen seien durch den Anschluss an eine von der Freileitung isolierte Wicklung eines Transformators weitgehend gegen Ueberspannungen geschützt. Die neueren Untersuchungen mit dem Kathodenstrahloszillographen über die Uebertragung von Wanderwellen in den Wicklungen von Transformatoren zeigten jedoch, dass diese Auffassung falsch war. Die vorliegende Untersuchung beschreibt im ersten Teil Messungen der an der Sekundärseite auftretenden Spannungen, wenn die Primärseite von einer Stoßspannung getroffen wird, wie sie durch atmosphärische Störungen entstehen. Im zweiten Teil wird die Entstehungsart der sekundär auftretenden Spannungen erläutert und die Form und Grösse aus den Kon-

struktionsangaben des Transformators berechnet. Rechnung und Versuch werden miteinander verglichen. Der Gang der Rechnung ist in einem Anhang besonders dargestellt.

I. Teil.

Experimentelle Untersuchung.

2. Die Wicklungen von Drehstromtransformatoren, die an eine Freileitung angeschlossen sind, können auf zweierlei Weise von atmosphärischen Störungen angefallen werden. Der erste Fall besteht darin, dass die Ueberspannungswelle auf allen drei Phasen gleichzeitig und in gleicher Höhe ankommt. Dies wird als dreiphasiger Stoss bezeichnet. Beim zweiten, häufiger vorkommenden Fall läuft nur auf einer Phase eine Wanderwelle zum Transformator, durchdringt die angeschlossene Wicklung und ver-

lässt den Transformator über die zwei anderen Phasen der Freileitung. Dies ist der einphasige Stoss ¹⁾. Hat die getroffene Wicklung einen geerdeten Sternpunkt, so wird in beiden Fällen die Stossweite nach Durchlaufen einer oder mehrerer Phasenwicklungen in die Erde abgeleitet. In Fig. 1 ist das Verhalten

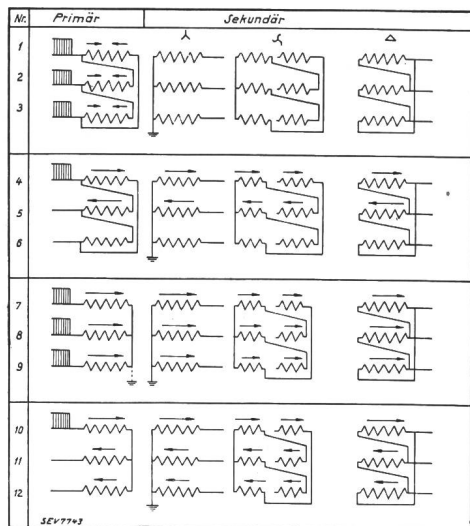


Fig. 1.

Verhalten einiger Transformatorenschaltungen gegen Stoßspannungen.

einiger der wichtigsten Transformatorenschaltungen gegenüber solchen Stoßspannungen dargestellt. Die in den einzelnen Wicklungen auftretenden Spannungen sind in ihrer Richtung und ungefähren Grösse durch Pfeile angegeben. Aus dieser Zusammenstellung lassen sich folgende allgemeine Erkenntnisse entnehmen:

a) Nr. 1, 2, 3: Dreiphasiger Stoss auf die primäre Dreieckschaltung:

Unter diesen Verhältnissen ist die übertragene Spannung auf der sekundären Seite vollständig harmlos. In jeder primären Phase laufen sich die Wanderwellen beidseitig entgegen und heben sich auf. An den sekundären Klemmen erscheint unabhängig von der Schaltung der Wicklungen nur eine kleine Spannung.

b) Nr. 4, 5, 6: Einphasiger Stoss bei primärer Dreieckschaltung:

Bei sekundärer Stern- und Dreieckschaltung wird die Stossweite auf zwei Phasen mit gleicher Grösse übertragen. Bei Zickzack-Schaltung der sekundären Wicklung erhält eine resultierende Phase eine doppelt so hohe Überspannung wie die zwei anderen resultierenden Phasen. Wie im folgenden gezeigt wird, werden die Stoßspannungen zur Hauptsache entsprechend dem Übersetzungsverhältnis auf die sekundäre Wicklung übertragen.

c) Nr. 7, 8, 9: Dreiphasiger Stoss auf die primär in Stern geschaltete Wicklung mit oder ohne geerdetem Sternpunkt:

Auf sämtliche sekundären Phasen werden entsprechend dem Übersetzungsverhältnis die gleichen Spannungen übertragen. Bei sekundärer Dreieckschaltung sind diese Spannungen in Reihe geschaltet und kurzgeschlossen, so dass an den sekundären Klemmen der Dreieckswicklung nur eine kleine Überspannung erscheint.

d) Nr. 10, 11, 12: Einphasiger Stoss auf primäre Sternwicklung mit isoliertem Sternpunkt:

¹⁾ Drei- und einphasige Gewitterüberspannungen treten im folgenden Verhältnis auf: Bei Eisenmasten sind etwa $\frac{3}{4}$ der gefährlichen Wanderwellen einphasig; bei Holzmasten sind die meisten Wanderwellen dreiphasig. Ich verdanke diese Angaben Herrn Dr. Berger von der FKH.

Bei sämtlichen sekundären Schaltungen erhalten diejenigen Wicklungsteile, die auf demselben Kern liegen wie die angestossene Phase, zwei Drittel, die anderen Wicklungsteile ein Drittel der dem Übersetzungsverhältnis entsprechenden Stoßspannung. Bei geerdetem primärem Sternpunkt findet eine Spannungsübertragung nur auf die Wicklungen des angestossenen Kernes statt.

Die in Fig. 1 gegebene Übersicht über das Verhalten der wichtigsten Transformatorenschaltungen gegenüber Stoßspannungen gilt natürlich nur in rohen Zügen. In Wirklichkeit treten Reflexionen und Schwingungen auf. Die genauere Untersuchung wird im zweiten Teil dieser Arbeit durchgeführt.

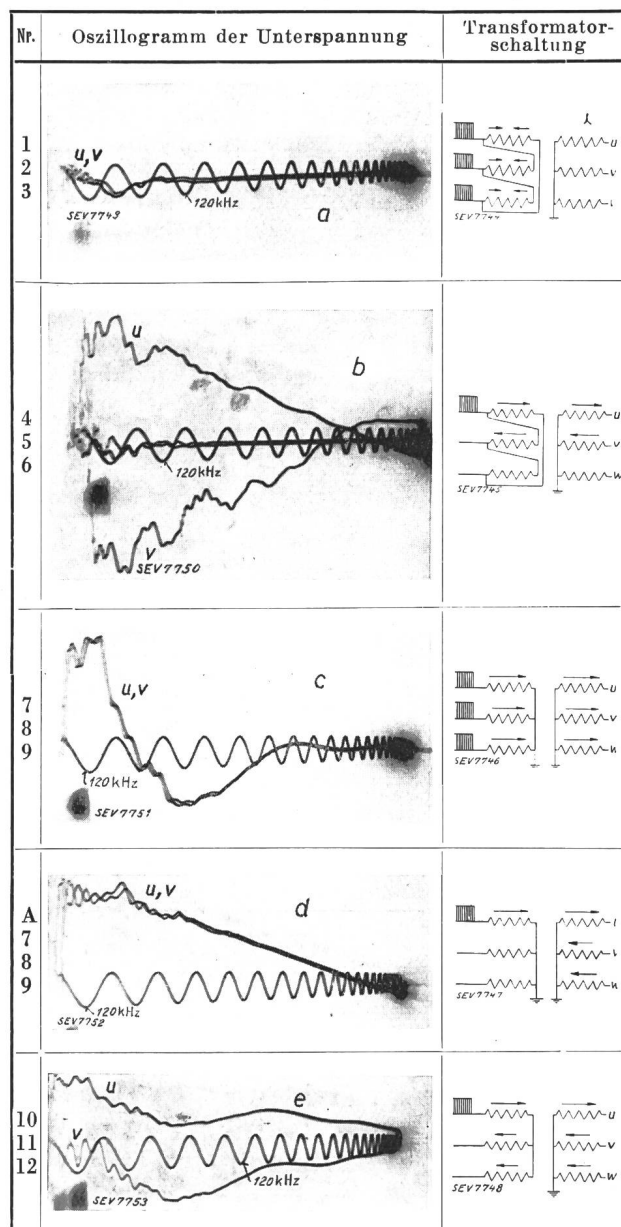


Fig. 2.

Gemessene Stoßspannungen auf der Unterspannungsseite für einige Transformatorenschaltungen.

3. Fig. 2 enthält in derselben Gruppierung wie Fig. 1 die mit dem Kathodenstrahloszillographen gemessenen sekundären Spannungen für die wichtigsten Transformatorenschaltungen. Bei den Versuchen wurde in bekannter Weise die Stoßspan-

nung eines Stoßspannungsgenerators auf einen normalen Drehstromtransformator in Oel von 200 kVA Scheinleistung, 6000 V Oberspannung, 392 V Unterspannung geschaltet. Die Stoßspannung hatte eine Stirndauer von $T_s = 0,5 \mu s$ und eine Halbwertdauer von $T_h = 60 \mu s$. Der Maximalwert der Stoßspannung war bei allen Versuchen 42 kV. Versuchsschaltung und Form der Stoßspannung sind in Fig. 3 gezeigt. In Fig. 2, Nr. 1, 2, 3 (entspricht Fig. 1, Nr. 1, 2, 3), zeigt das Oszillogramm der Unterspannungen u und v bei sekundär in Stern geschalteter Wicklung und geerdetem Sternpunkt. Diese Spannungen sind erwartungsgemäss ganz unbedeutend. Auch bei anderen sekundären Schaltungen werden keine höheren Spannungen übertragen. Ganz anders werden die Verhältnisse, wenn die primäre Dreieckschaltung einphasig angestossen wird (Fig. 2, Nr. 4, 5, 6). In beiden Sekundärphasen treten hohe Stoßspannungen auf, die gleich der Gewitterwelle eine sehr steile Front und einen langsamer abfallenden Rücken besitzen. Darüber lagert sich noch eine hochfrequente Wechsellspannung. Die Scheitelwerte der Stosswellen sind 3,4 kV bzw. 3,3 kV. Würde die Stoßspannung gemäss dem Uebersetzungsverhältnis auf die Unterspannung übertragen, so müsste an den Klemmen u und v je eine Spannungsamplitude von 6,2 % von 42 kV, also 2,5 kV erscheinen. Die

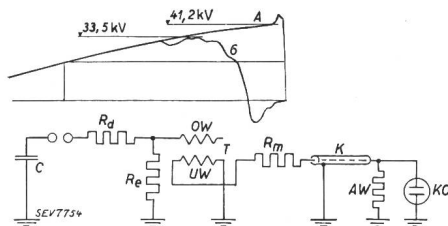


Fig. 3.

Versuchsspannung und erzeugte Stoßspannung.

A ankommende Stoßspannung. 6 Spannung am Sternpunkt gegen Erde. OW Überspannungswicklung. UW Unterspannungswicklung. T Transformator. KO Kathodenstrahloszillograph. C Entladekapazität 0,05 μF . R_d Dämpfungswiderstand 990 Ohm. R_e Entladewiderstand 1235 Ohm. R_m Messwiderstand 1235 Ohm. K Verzögerungskabel. AW Abgleichwiderstand. Eichfrequenz bei allen Versuchen 120 kHz.

wirklich übertragenen Spannungen sind jedoch infolge der überlagerten Schwingung höher, nämlich 8,1 % und 7,9 % der primären Stoßspannung. Die übertragenen Spannungen sind also recht beträchtlich und besonders wegen des raschen Spannungsanstieges für angeschlossene Maschinenwicklungen unter Umständen gefährlich.

Noch ungünstiger liegen die Verhältnisse bei dreiphasigem Stoss auf eine Sternwicklung mit isoliertem Sternpunkt, wie das Oszillogramm Fig. 2, Nr. 7, 8, 9, zeigt. Die sekundäre Ueberspannung hat eine sehr steile Front und anschliessend eine relativ langsame Schwingung mit überlagerter hochfrequenter Schwingung. Der Scheitelwert ist ebenfalls bedeutend (3,2 kV = 7,7 %). Diese Spannung ist wegen der langsamen Schwingung besonders gefährlich. Zwischen dem ersten und dem zweiten Maximum besteht eine Spannungsdifferenz von 4,6 kV oder 11 % der primären Stoßspannung. Eine solche Spannung kann in Wicklungen angeschlossener Maschinen an benachbarten Eingangswindungen hohe

Spannungsunterschiede hervorrufen, die für Isolationen in Luft oft schwer zu halten sind. Glücklicherweise sind dreiphasige Stöße bei Gewittern relativ selten und daher solche gefährliche sekundäre Spannungen nicht oft zu erwarten.

Fig. 2, Nr. A 7, 8, 9, zeigt die sekundäre Spannung bei geerdetem primärem Sternpunkt und bei drei- oder einphasigen Stößen. Die Unterspannung ist ein unipolarer Stoss wie die ankommende Stossspannung mit einer überlagerten Hochfrequenzschwingung. Die Amplitude hat einen Wert von 3,0 kV gleich 7,2 % der ankommenden Amplitude.

Bei primärer Sternschaltung und einphasigem Stoss erhält man eine sekundäre Spannung nach Fig. 2, Nr. 10, 11, 12. Die Amplitude der Phase u , die auf dem angestossenen Kern liegt, ist 2,2 kV gleich 5,3 % der primären Amplitude, also weniger hoch als in den früheren Fällen. Die Spannungen u und v enthalten eine sehr hochfrequente und eine etwa zehnmal langsamere Schwingung. Die Ausschläge der Schwingung sind aber nicht so hoch wie beim dreiphasigen Stoss.

4. Zusammengefasst zeigen die Messungen, dass, ausgenommen bei primärer Dreieckschaltung und dreiphasigem Stoss, bei allen anderen Fällen auf die Unterspannungswicklungen und auf das sekundäre Netz beträchtliche Spannungsschüsse und Spannungsschwingungen übertragen werden. Alle Schaltungen der Unterspannungsseite lassen diese Spannungen ins Netz fließen, mit einziger Ausnahme der Dreieckswicklung bei primären dreiphasigen Stößen. Bei einem 1:1-Transformator entstehen also an den Sekundärklemmen Stoßspannungen, die noch höhere Werte erreichen als die ankommenden Gewitterwellen. Ein solcher Transformator wirkt also nur in seltenen Fällen als Ueberspannungsschutz. Bei den meisten auftretenden Spannungsschüssen ist der Transformator also unwirksam; unter ungünstigen Bedingungen kann er sogar ein Ueberspannungserzeuger sein, wenn nämlich die in ihm erzeugten Schwingungen mit den Induktivitäten und Kapazitäten des Netzes Resonanzerscheinungen hervorrufen. Die sekundär auftretenden Ueberspannungen sind für den Oeltransformator selbst nicht gefährlich, da die Isolationen in Oel sehr überspannungsfest sind. Hingegen stellt sich die Frage nach dem Schutz der über kurze Leitungen angeschlossenen Maschinen. Im II. Teil wird näher gezeigt, dass die der unipolaren Stosswelle überlagerten hochfrequenten Schwingungen durch kleine Kapazitäten, wie kurze Kabel, die Kapazität der Sammelschiene oder angeschlossene Kondensatoren, absorbiert und unwirksam gemacht werden. Diese Mittel sind bei der unipolaren Stosswelle oder der langsameren Schwingung unwirksam. Die Amplituden dieser Spannungen werden durch Kondensatoren überhaupt nicht beeinflusst, und die steile Front kann nur durch sehr grosse Kapazitäten beeinflusst werden, wie die berechnete Tabelle I im Anhang I zeigt. Solche grosse Kapazitäten kommen aber aus Preisgründen nicht in Frage. Die Scheitelwerte dieser Spannungsschüsse können nur durch wirksame Ueberspannungsableiter begrenzt werden.

II. Teil.

5. Die exakte Behandlung des vorliegenden Problems, bei dem die verteilte Induktivität und Kapazität der Transformatorenwicklungen in die Differentialgleichungen eingesetzt würden, führt zu sehr umfangreichen Rechnungen. Bewley²⁾ weist deshalb darauf hin, dass es vorteilhafter ist, die Uebertragungsvorgänge mit Hilfe eines Ersatzschemas zu untersuchen, bei dem die verteilten Induktivitäten und Kapazitäten durch entsprechende konzentrierte Grössen ersetzt werden. Natürlich kann die Berechnung des Ersatzschemas nicht dasselbe leisten wie die genaue Rechnung; sie gibt aber mit viel weniger Zahlenarbeit doch einen guten Einblick in diese komplizierten Vorgänge. Palueff und Hagenguth²⁾ unterschieden in der übertragenen Spannung vier Teilspannungen, nämlich: 1. Die kapazitiv übertragene Teilspannung, 2. die Eigenschwingung der Unterspannungswicklung, 3. die induktiv auf die Unterspannungswicklung übertragene Eigenschwingung der Oberspannungswicklung und 4. die induktiv übertragene quasistationäre Spannung. Die genannten Autoren haben die kapazitiv übertragene und die quasistationäre Sekundärspannung an Hand je eines Ersatzschemas berechnet. Im folgenden soll mittels eines Ersatzschemas, das noch weitgehender den tatsächlichen Verhältnissen angepasst ist, die kapazitiv und induktiv übertragene Teilspannung erfasst werden. Es zeigt sich dabei, dass die erste und zweite Teilspannung nach Palueff tatsächlich eine einzige Spannung ist, worauf schon Neuhaus und Striegel²⁾ aufmerksam gemacht haben. Es können also nur drei Teilspannungen unterschieden werden (siehe Fig. 14). Der vierte, quasistationäre Uebertragungsvorgang wird ähnlich der Rechnung von Bewley behandelt.

Die totale übertragene Stoßspannung ergibt sich dann als die Summe der quasistationär übertragenen Teilspannung u_2' und der kapazitiv und induktiv übertragenen Teilspannung u_2'' (raschere oder hochfrequente Teilspannung genannt). Es ist also

$$u_2 = u_2' + u_2'' \quad (1)$$

Es wird nun untersucht, wie weit aus den Konstruktionsangaben eines Transformators berechenbare Grössen in das Ersatzschema eingehen und ob die damit erhaltenen Spannungen mit dem Versuchsergebnis übereinstimmen.

6. Ueber die Berechnung oder Messung der in das Ersatzschema einzusetzenden Grössen: Kapazität, Induktivität und Widerstand, lässt sich folgendes sagen:

Die Messung oder Berechnung der Wicklungskapazitäten gegeneinander oder gegen Erde ist einfach durchzuführen. Schwieriger ist die Berechnung oder Messung der Windungskapazität, der Induktivitäten und der Verluste. Die Rolle des Eisenkörpers ist bei diesen hochfrequenten Schwingungen nicht abgeklärt. Die Auffassung, dass das Eisen bei Frequenzen von einigen zehntausend Hertz an der Fluxführung unbeteiligt ist, scheint, wie man

aus den Versuchen schliessen muss, nicht ganz richtig zu sein. Trotzdem kommt man mit der Rechnung dem Experiment am nächsten, wenn man nach dem Vorgang von Blume und Boyajian²⁾ den Eisenkern bei der Berechnung der gegenseitigen Induktivität nicht berücksichtigt und ähnliche Annahmen macht, wie sie bei der Berechnung der Streuinduktivität bei normaler Frequenz in Ge-

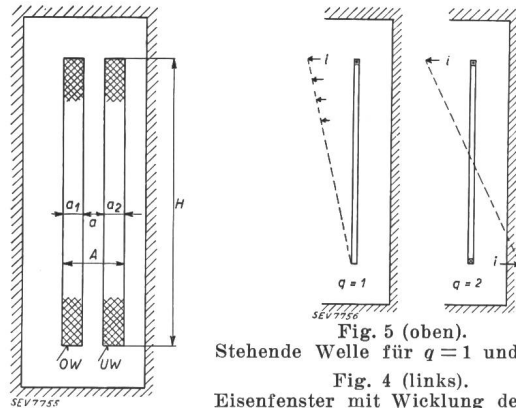


Fig. 5 (oben).
Stehende Welle für $q=1$ und $q=2$.

Fig. 4 (links).
Eisenfenster mit Wicklung des Versuchstransformators.

brauch sind³⁾. Danach berechnen sich, unter Verwendung der in Fig. 4 angegebenen Bezeichnungen, die elektromagnetischen Grössen gemäss folgenden Ausdrücken:

Die gegenseitige Induktivität

$$M = \frac{0,4 \pi \cdot N_1 N_2 \cdot l_{m2} \cdot H \cdot 10^{-8}}{A \cdot q^3 \cdot 3} \text{ H} \quad (2)$$

Die primäre und sekundäre Streuinduktivität

$$S_1 = \frac{0,4 \pi \cdot N_1^2 \cdot l_{m1} \cdot 10^{-8}}{H \cdot q} \left(\frac{a_1}{3} + \frac{a}{2} \right) \text{ H} \quad (3)$$

$$S_2 = \frac{0,4 \pi \cdot N_2^2 \cdot l_{m2} \cdot 10^{-8}}{H \cdot q} \left(\frac{a_2}{3} + \frac{a}{2} \right) \text{ H} \quad (4)$$

Darin bedeutet:

Index 1: Primär (Oberspannung)

Index 2: Sekundär (Unterspannung)

N Windungszahlen

$A = a_1 + a_2 + a$

l_m = mittlere Länge einer Windung

q^3)

Für den Versuchstransformator DON 24, 200 kVA, 6300/392 V, wurden nach den Ausdrücken (2), (3), (4) folgende Werte erhalten:

Für $q=1$: $M=0,106$ H; $S_1=0,013$ H; $S_2=0,086$ mH; $L_1=M \cdot N_1/N_2 + S_1=1,72$ H, $L_2=M \cdot N_2/N_1 + S_2=6,7$ mH; $L_k^2=L_1 L_2 - M^2=2 \cdot 10^{-4}$; Kopplungsfaktor $K=M/\sqrt{L_1 L_2}$; Uebersetzungsverhältnis $\frac{M}{L_1} = \ddot{u} \approx 16$.

³⁾ Für stehende Wellen mit einer Wellenlänge von $\frac{2}{4}, \frac{3}{4}, \dots$ der Windungslänge ($q \geq 2$) führt diese Auffassung zu keinen Schwierigkeiten, da unter diesen Bedingungen das Eisen sowieso eine nebensächliche Rolle spielt (s. Fig. 5). Nur bei der stehenden Welle von $\frac{1}{4}$ der Wicklungslänge ist es erheblich, ob das Eisen die magnetischen Kraftlinien bei diesen hohen Frequenzen leitet oder nicht.

²⁾ Siehe Literaturverzeichnis am Schluss.

Für $q=2$: $M=0,0132$ H; $S_1=0,0065$ H; $S_2=0,043$ mH; $L_1=0,217$ H; $L_2=0,868$ mH; $L_k^2=0,2 \cdot 10^{-4}$.

Sehr unbestimmt sind die Unterlagen, die zur Berechnung der Verluste, die die Dämpfung der auftretenden Schwingungen besorgen, zur Verfügung stehen. Ohne Zweifel kann man die Verluste auf die ohmschen beschränken. Für die Berechnung der ohmschen Widerstände habe ich amerikanische Angaben [Austin²⁾] benutzt. Für die Hochspannungswicklung des Transformators mit 690 Windungen und einem Kupferquerschnitt von $5,5 \times 1,5$ mm² errechnet sich ein Widerstand, bezogen auf 50 kHz, von

$$R_1 = R_g \cdot 506 = 570 \text{ Ohm}$$

(R_g = Gleichstromwiderstand)

und für die Niederspannungswicklung $N_2=43$, Cu 3×10 mm², ist

$$R_2 = R_g \cdot 32 = 0,48 \text{ Ohm.}$$

Wegen der hohen Windungszahl ist die Dämpfung in der Oberspannungswicklung relativ grösser als in der Unterspannungswicklung.

Die Rechnung und Messung der Kapazitäten ergab folgende Werte:

Kapazität der Oberspannungswicklung gegen Erde, gemessen (Unterspannungswicklung isoliert) $C_{10} = 2600$ pF
dasselbe, ohne C_{12} und ohne Klemmen, geschätzt $C'_{10} = 1900$ pF

Windungskapazität der Oberspannungswicklung, geschätzt $C_w = 12$ pF

Wirksame Anfangskapazität der Oberspannungswicklung $K = \sqrt{C'_{10} \cdot C_w} = 150$ pF

Kapazität der Oberspannung gegen die Unterspannungswicklung, gerechnet $C_{12} = 600$ pF

Kapazität der Unterspannungswicklung gegen Erde (Oberspannungswicklung isoliert), gemessen $C_{20} = 3600$ pF

Die Grössen des Ersatzschemas wurden wie folgt festgelegt:

$$C' = C_{12} = 600 \text{ pF}; \quad C'' = C_{20} = 3600 \text{ pF};$$

$$C_0 = K = 150 \text{ pF}; \quad C = C' + C'' = 4200 \text{ pF}.$$

Der quasistationäre Uebertragungsvorgang.

7. Dieser ist dadurch gekennzeichnet, dass bei seinem Wirken sämtliche Kapazitäten des Transformators bereits vollständig aufgeladen und damit ohne Einfluss auf die weiteren Vorgänge sind. Die

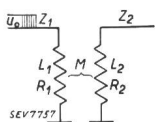


Fig. 6.

Ersatzschema für die quasistationär übertragene Stoßspannung.

folgende Anpassung der Ladungen und Spannungen der Kapazitäten an die Spannungsverhältnisse des quasistationären Vorganges erfolgt relativ langsam und ist dadurch ohne merklichen Einfluss auf die quasistationären Spannungen und Ströme. Fig. 6 zeigt das Schaltschema für den quasistatio-

nären Uebertragungsvorgang. Darin bedeuten, unter Weglassung der bereits bekannten Grössen, Z_1 und Z_2 die primär bzw. sekundär angeschlossenen Wellenwiderstände.

Aus der Rechnung ergibt sich die quasistationär übertragene Spannung u'_2 in Operatorenschreibweise ($d/dt = p$) (siehe Anhang I) zu:

$$u'_2 = u_0 \cdot \frac{Y(p)}{Z(p)} \quad (5)$$

für $R_1=R_2=0$ wird, unter Berücksichtigung, dass zahlenmässig $Z_2 L_1 \gg Z_1 L_2$

$$p_{1,2} = \frac{-Z_2 L_1 \pm \sqrt{(Z_2 L_1)^2 - 4 Z_1 Z_2 L_K^2}}{2 L_K^2} \quad (6)$$

Damit keine Schwingungen auftreten, muss

$$Z_2 > 4 \cdot Z_1 L_K^2 / L_1^2 \quad (7)$$

sein. Die Zahlenwerte eingesetzt, erhält man $Z_2 = 0,13$ Ohm, d. h. eine Schwingung tritt nur bei einer praktisch kurzgeschlossenen Wicklung ein.

Aus Gleichung (5) berechnet sich u'_2 zu

$$u'_2 = u_0 \cdot \frac{M}{L_1} \cdot (-e^{p_1 t} + e^{p_2 t}) = \frac{u_0}{\ddot{u}} (-e^{p_1 t} + e^{p_2 t}) \quad (8)$$

mit den Wurzeln

$$p_1 = -Z_2 L_1 / L_K^2 = -Z_2 / L_2 (1 - K^2) \quad (9)$$

$$p_2 = -Z_1 / L_1 \quad (10)$$

und in Zahlenwerten mit $Z_2=500$ Ohm ist

$$M/L_1 = 1/\ddot{u} = 0,062;$$

$$p_1 = -4,3 \cdot 10^6 \text{ 1/s} \quad p_2 = -390 \text{ 1/s}$$

Die Halbwertzeiten sind

$$T_{h1} = 1,6 \cdot 10^{-7} \text{ s}; \quad T_{h2} = 2,3 \cdot 10^{-3} \text{ s}.$$

Die quasistationär übertragene Spannung u'_2 besteht aus zwei Exponentialfunktionen, wovon diejenige mit negativem Vorzeichen sehr rasch, diejenige mit positivem Vorzeichen sehr viel langsa-

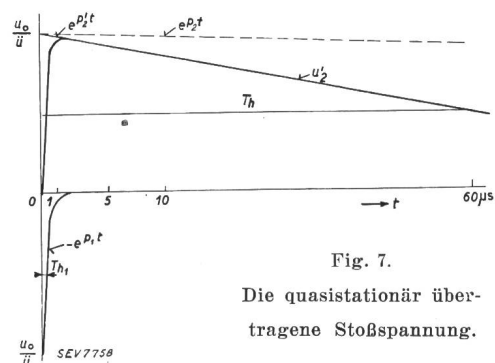


Fig. 7.

Die quasistationär übertragene Stoßspannung.

mer abklingt (Fig. 7). Die Spannung u'_2 hat die Form einer Stosswelle, deren Frontdauer entsprechend Gleichung (9) von Z_2 und der sekundären Streuinduktivität $L_2(1 - K^2)$ abhängt, während die Halbwertzeit nach Gleichung (10) von Z_1 und L_1 beeinflusst wird. Der Anfangswert von u'_2 ist gleich

u_0/\ddot{u} , d. h. die Spannung u_0 wird auf die sekundäre Seite entsprechend dem Uebersetzungsverhältnis herabgesetzt. Der Verlauf des Wellenrückens wird jedoch nicht durch p_2 bestimmt, sondern durch den viel rascher abfallenden Rücken der primär auffallenden Stoßspannung. Hat diese eine Halbwertzeit $T_h = 60 \mu s$, so wird $p_2' = -\ln 2/T_h = -1,4 \cdot 10^4$ und die sekundäre quasistationäre Spannung u_2' ist nun

$$u_2' = \frac{u_0}{\ddot{u}} (-e^{-4,3 t} + e^{-0,014 t}) \quad (11)$$

t in μs .

Die Frontdauer erhält man aus p_1 zu $T_s = 0,46 \mu s$.

*Das allgemeine Ersatzschema
für die Uebertragung der hochfrequenten
Spannungen in Transformatorenwicklungen.*

8. Für die Untersuchung der hochfrequenten Teilspannungen zweiter und dritter Art wird das Ersatzschema nach Fig. 8 angewendet. Die Schaltelemente haben darin folgende Bedeutung:

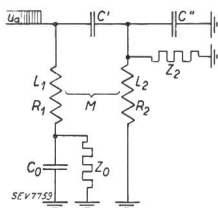


Fig. 8.
Allgemeines Ersatzschema für die Berechnung der auf die Unterspannungswicklung übertragenen Stoßspannung.

$L_1 L_2$ sind die Hochfrequenzinduktivitäten.

M die gegenseitige Induktivität beider Wicklungen.

C' entspricht der Kapazität der Oberspannungs- gegen die Unterspannungswicklung.

C'' entspricht der Kapazität der Unterspannungswicklung gegen Erde.

C_0 entspricht einer Art Sternpunktskapazität gegen Erde.

Z_0 Wellenwiderstand zwischen Sternpunkt und Erde.

Z_2 Wellenwiderstand der sekundär angeschlossenen Leitungen und Apparate.

$R_1 R_2$ Ohmsche Widerstände der Wicklungen bei Hochfrequenz.

Die Brauchbarkeit dieses Ersatzschemas soll nun für einige Transformatorenschaltungen durch den Vergleich der berechneten Stoßspannung mit den gemessenen Stoßspannungen untersucht werden. Es wird angenommen, dass eine Stoßspannung mit unendlich steiler Front und unendlich langem Rücken und der Höhe u_0 ⁵⁾ eine Anordnung entsprechend dem allgemeinen Ersatzschema trifft. Eine solche Stoßspannung entspricht der Einheitsfunktion von Heaviside, und die sekundär auftretende Spannung u_2' lässt sich berechnen. Die wirklich auftretende Stoßspannung hat demgegenüber eine endlich ansteigende Spannungsfront und einen abfallenden Spannungsrücken. Der Einfluss der Frontdauer auf die kapazitiv übertragene Teilspannung haben Neuhäus und Striegel ²⁾ gemessen. Der unendlich rasche Spannungsanstieg der Einheitsfunktion ergibt den maximal möglichen Anfangswert der kapazitiv übertragenen Teilspannung. Der Einfluss des ab-

fallenden Spannungsrückens kann bei nicht zu kleiner Halbwertzeit vernachlässigt werden, da die hier zu untersuchenden Teilspannungen bereits infolge der grossen Dämpfung der Widerstände abgeklungen sind, wenn der Spannungsrücken noch kaum abgesunken ist. Der Einfluss des abfallenden Spannungsrückens kam jedoch bei der quasistationären Teilspannung voll zur Geltung.

Es wird in Operatorenschreibweise

$$u_2'' = u_0 e^{-\frac{t}{Z_2 C}} \left(\frac{C'}{C} - \frac{1}{C} \frac{Y(p)}{Z(p)} \right) \quad (12)$$

$$Y(p) = C' [(R_1 + p L_1) (R_2 + p Z_0 C_0) + Z_0] - M \left(\frac{1}{Z_2} + p C \right) (1 + p Z_0 C_0) \quad (13)$$

$$Z(p) = \left[1 + (R_2 + p L_2) \left(\frac{1}{Z_2} + p C \right) \right] \cdot [(R_1 + p L_1) (1 + p Z_0 C_0) + Z_0] - p^2 M^2 \left(\frac{1}{Z_2} + p C \right) (1 + p Z_0 C_0) \quad (14)$$

Die zahlenmässige Auswertung dieser Gleichungen führt immer noch zu langwierigen Rechnungen, wobei der Einfluss der eingeführten Grössen L , M , C und R kaum mehr zu überblicken ist. Es wird daher die Aufgabe sein, bei der Besprechung der einzelnen Transformatorenschaltungen (Spezialfälle) derartige Vereinfachungen einzuführen, dass das Ergebnis zu übersichtlichen Gleichungen führt, deren Auswertung wenig Rechenarbeit erfordert. Die folgenden Beispiele beweisen, dass die möglich ist.

Es erwies sich als notwendig, die Gleichung (12) auf höhere Werte des Wellenwiderstandes Z_2 zu beschränken. Dies ist jedoch kein Nachteil, da der Einfluss niedrigerer Wellenwiderstände im quasistationären Uebertragungsvorgang Berücksichtigung fand.

Erster Spezialfall.

Dreiphasig gestossener Transformator mit isoliertem Sternpunkt (s. Fig. 2, Nr. 7).

9 a. Berechnung des hochfrequenten Ausgleichsvorganges mit Hilfe des Ersatzschemas nach Fig. 9:

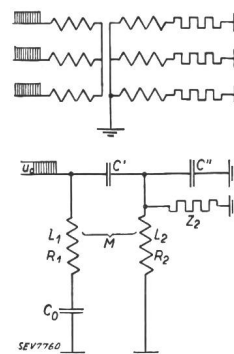


Fig. 9.

Wicklungs- und Ersatzschema für die dreiphasig angestossene Sternwicklung.

Dieser Fall ist gekennzeichnet durch die Feststellung

$$q = 1, Z_0 = \infty$$

⁴⁾ $T_h = 2/p$, definiert nach VDE (s. ETZ 1934, S. 522).

⁵⁾ Ist vor die Transformatorwicklung eine Leitung mit dem Wellenwiderstand Z_1 angeschlossen, so stellt u_0 die auf den doppelten Wert erhöhte Spannung dar.

Zur Vereinfachung seien folgende Annahmen eingeführt:

keine Dämpfung: $R_1 = R_2 = 0$

$Z_2 = \text{gross bis } \infty$, d. h. offene Sekundärwicklung oder Anschluss einer rotierenden Maschine.

Es wird dann, unter Berücksichtigung, dass zahlenmässig $L_1 C_0 \gg L_2 C$ ist,

$$Z(p) = 1 + p^2(L_1 C_0 + L_2 C) + p^4 C C_0 L_k^2 \quad (15)$$

$$Y(p) = C' + p^2 C_0 (L_1 C' - M C) \quad (16)$$

Durch Nullsetzung erhält man aus der Gleichung (15) für die in der Spannung u_2' auftretenden Schwingungen die folgenden Frequenzgleichungen

$$f_1 = \frac{1}{2\pi \sqrt{C \left(\frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1} \right)}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{(C' + C'') L_2 (1 - K^2)}} \quad (17)$$

$$f_2 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_1 C_0}} \quad (18)$$

und nach Einsetzen der Zahlenwerte wird

$$f_1 = 310 \text{ kHz, und } f_2 = 10 \text{ kHz.}$$

Die auftretende Stoßspannung erzeugt demnach zwei Schwingungen verschiedener Frequenz, wovon diejenige mit höherer Frequenz [Gl. (17)] in einem Kreis mit der Kapazität $(C' + C'')$ und der Induktivität $L_2(1 - K^2)$ und diejenige mit niedrigerer Frequenz [Gl. (18)] mit den Elementen L_1 und C_0 schwingt. Der Schwingungskreis höherer Frequenz besteht demnach aus der ganzen Kapazität und der Streuinduktivität der Sekundärwicklung, derjenige der niederen Frequenz aus der totalen Induktivität und der Nullpunktskapazität der primären Wicklung.

Es ist nun noch nötig, die Schwingungsausschläge zu berechnen. Die ausgeführte Rechnung ergibt folgende Gleichung für u_2'

$$u_2' = u_0 \left(\frac{C'}{C} \cos \omega_1 t + \frac{M}{L_1} \cos \omega_2 t \right) \quad (19)$$

und in Zahlen erhält man

$$u_2' = u_0 (0,14 \cdot \cos 2\pi 310000 t + 0,062 \cdot \cos \pi 10000 t).$$

Berücksichtigt man, dass die schnellere Schwingung viel mehr gedämpft sein muss als die langsamere und bringt man die Korrektur an für einer nicht unendlich rasch ansteigende Stoßspannung, d. h. — $p_1 = +4,3 \cdot 10^6$ nach Gl. (11), so entsteht ein Schwin-

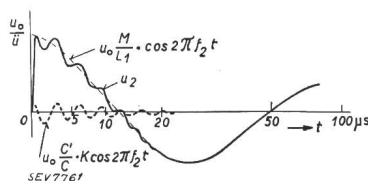


Fig. 10.
Berechnete, auf der Unterspannungsseite auftretende Stoßspannung bei dreiphasig gestossener Sternschaltung.

gungsbild nach Fig. 10. Der Vergleich mit dem Oszillogramm Fig. 2, Nr. 7, zeigt vollständige Uebereinstimmung mit dem Versuch. Da die gemessenen Frequenzen 400 kHz und 20 kHz sind, kann auch

die zahlenmässige Uebereinstimmung als gut bezeichnet werden.

Die Gl. (19) lässt die Entstehung der beiden Schwingungen in der Unterspannungswicklung ohne weiteres erkennen. Die raschere Schwingung wird

kapazitiv entsprechend $\frac{C'}{C}$ übertragen; es handelt sich also um die Teilspannung zweiter Art nach Palueff und Hagenguth. Die langsamere Schwingung entsteht induktiv entsprechend der Kopplung M/L_1 . Dieses Verhältnis M/L_1 ist gleich dem Uebersetzungsverhältnis, so dass also die dritte Teilspannung gemäss dem Uebersetzungsverhältnis auf die Unterspannungswicklung übertragen wird.

Der Einfluss sekundär angeschlossener Kapazitäten lässt sich leicht abschätzen. Die raschere Schwingung kann durch solche in der Grössenordnung von C' , also von einigen 100 pF, stark reduziert werden. Die langsamere Schwingung kann durch solche Mittel nicht wirksam beeinflusst werden, wie in Anhang I nachgewiesen wird. Diese Schwingung ist für angeschlossene Maschinen gefährlicher, nicht nur wegen ihrer Höhe, sondern noch mehr durch den hohen Gradienten, der durch die Schwingung entsteht. Der Scheitelwert dieser Schwingung kann nur durch Ueberspannungsableiter begrenzt werden.

Die bisherige Rechnung wurde unter vereinfachenden Annahmen durchgeführt. Eine genauere Ausrechnung der Gl. (12) bis (14) müsste den dämpfenden Einfluss der Widerstände und der angeschlossenen (kleinen) Wellenwiderstände ergeben. Da aber die Diskussion der unter den vereinfachenden Annahmen erhaltenen Ergebnisse alle praktisch nötigen Erkenntnisse ergeben hat, kann darauf verzichtet werden.

Der quasistationäre Ausgleichsvorgang:

9 b. Da die primäre Wicklung isoliert ist, wird keine quasistationäre Spannung übertragen, und die Gl. (19 a) stellt somit die totale übertragene Stossspannung dar:

$$u_2 = u_2' = u_0 \left(\frac{C'}{C} \cos \omega_1 t + \frac{M}{L_1} \cos \omega_2 t \right) \quad (19a)$$

Zweiter Spezialfall.

Drei- oder einphasig gestossener Transformator mit primär geerdetem Sternpunkt (s. Fig. 2, Nr. A 7).

10 a. Berechnung des hochfrequenten Ausgleichsvorganges mit Hilfe des Ersatzschemas nach Fig. 11:

Die Einsetzung der speziellen Werte für diese Schaltung in die Gl. (12) bis (14) ergibt für:

$$Z_0 = 0, q = 2, R_1 = R_2 = 0$$

$$Z(p) = p \left(L_1 + \frac{p}{Z_2} L_k^2 + p^2 C L_k^2 \right) \quad (20)$$

$$Y(p) = -M \frac{1}{Z_2} + p (L_1 C' + M C) \quad (21)$$

Aus (20) erhält man die Bedingung für das Auftreten von Schwingungen in der Unterspannungswicklung zu

$$p_{1,2} = -\frac{1}{2Z_2C} \pm \sqrt{\frac{1}{4Z_2^2C^2} - \frac{L_1}{CL_k^2}} \quad (22)$$

Eine Schwingung tritt auf, wenn

$$Z_2 > \sqrt{L_k^2 : 2L_1C} \quad (23)$$

in Zahlenwerten, wenn $Z_2 > 105$ Ohm ist. Bei Anschluss einer Freileitung mit $Z_2 = 500$ Ohm erhält man eine Schwingungsfrequenz von 225 kHz. Es

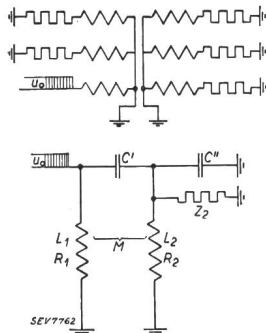


Fig. 11.

Wicklungs- und Ersatzschema für die drei- oder einphasig angestossene Sternwicklung mit geerdetem primären Sternpunkt.

handelt sich also um eine rasche und deshalb stark gedämpfte und rasch abklingende Schwingung. Für $Z_2 = 500$ Ohm wird die Dämpfungskonstante $= 1 : 2Z_2C = 2,5 \cdot 10^5$, d. h. die Schwingung ist nach 13 μs auf den halben Wert gesunken, ohne Berücksichtigung der ohmschen Wicklungswiderstände. Für grosses Z_2 wird die 2. und 3. Teilspannung u_2''

$$u_2'' = u_0 \cdot C'/C \cdot \cos 2\pi f \cdot t \quad (24)$$

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_1}{CL_k^2}} \quad (25)$$

d. h. die kapazitiv übertragene Schwingung ist dieselbe wie beim isolierten Sternpunkt.

10 b. Der quasistationäre Ausgleichsvorgang: Die quasistationär übertragene Spannung u_2' wurde für diesen Fall bereits gefunden (Gl. 12); man erhält also die totale sekundäre Spannung u_2 mit Berücksichtigung des Faktors K (Anhang II) gemäss Gl. (1) zu

$$u_2 = u_0 \left[\frac{1}{\ddot{u}} (-e^{p_1 t} + e^{-p_2 t}) + \frac{C'}{C} K \cdot \cos(2\pi f \cdot t) \right] \quad (26)$$

Fig. 12 gibt diesen Schwingungsvorgang wieder. Der Vergleich mit dem Oszillogramm (Fig. 2, Nr. A 7)

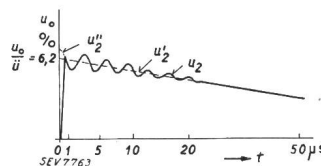


Fig. 12.

Berechnete, auf der Unterspannungsseite auftretende Stoßspannung bei drei- oder einphasig angestossener Sternwicklung mit geerdetem primären Sternpunkt.

zeigt vollständige Uebereinstimmung mit dem Versuch.

Dritter Spezialfall.

Einphasig gestossene Sternwicklung mit isoliertem Sternpunkt (s. Fig. 2, Nr. 10).

11 a. Berechnung des hochfrequenten Uebertragungsvorganges mit Hilfe des Ersatzschemas Fig. 13:

Diese Schaltung des Transformators wird im Ersatzschema durch die Parallelschaltung eines Wel-

lenwiderstandes zu C_0 wiedergegeben. Die Grösse dieses Wellenwiderstandes entspricht den zwei parallelgeschalteten, nicht angestossenen Phasen der Hochspannungswicklung. Der Zahlenwert dieses

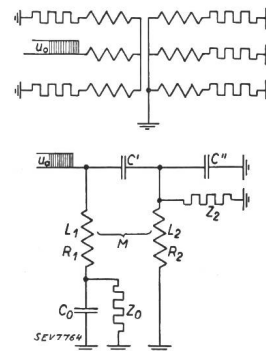


Fig. 13.

Wicklungs- und Ersatzschema für die einphasig angestossene Sternwicklung mit isoliertem primären Sternpunkt.

Wellenwiderstandes ist in der Grössenordnung von 10 000 Ohm.

Die Induktivitäten entsprechen dem Wert $q=2$. Für $R_1=R_2=0$ und $Z_2=\text{gross bis } \infty$ erhält man aus den Gl. (13) und (14)

$$Z(p) = Z_0 + pL_1 + p^2Z_0(L_1C_0 + L_2C) + p^3CL_k^2 + p^4Z_0CC_0L_k^2 \quad (27)$$

$$Y(p) = C'Z_0 + p(L_1C' - MC) + p^2Z_0C_0(L_1C' - MC) \quad (28)$$

Eine weitere Vereinfachung erhält man für $L_k^2 \sim 0$. Aus den früheren Rechnungen weiss man, dass dadurch die Gleichung für die kapazitiv übertragene Teilspannung erster und zweiter Art herausfällt. Aus Gl. (27) erhält man dann, unter Berücksichtigung, dass zahlenmässig $L_1C_0 \gg L_2C$ ist, das Dekrement

$$p_{1,2} = -\frac{1}{2Z_0C_0} \pm j \sqrt{\frac{1}{L_1C_0} - \frac{1}{4Z_0^2C_0^2}} \quad (29)$$

damit eine Schwingung in der Teilspannung dritter Art auftritt, muss

$$Z_0 > \sqrt{L_1/4C_0} \quad (30)$$

sein. Für unsere Zahlenwerte müsste $Z_0 > 19\,000$ Ohm sein. Dieser Wert ist etwas hoch, in der Grössenordnung jedoch richtig. Wie der Versuch zeigt, tritt eine langsame Schwingung von 20 kHz auf. Setzt man für $Z_0 = 25\,000$ Ohm, so erhält man rechnerisch eine Schwingung von 18 kHz. Die Berechnung der Teilspannung u_2'' aus Gl. (12) ergibt

$$u_2'' = u_0 \cdot A \cdot e^{-\alpha t} \cdot \sin(\omega_2 t - \varphi) \quad (31)$$

Ausgerechnet wird $A=0,084$ und $\varphi=8^\circ$, $\alpha=1,33 \cdot 10^5$, $\omega_2=1,14 \cdot 10^5$ und $f_2=18$ kHz. Diese Gleichung stellt eine gedämpfte Sinusschwingung dar. Die Uebertragung ist induktiv.

11 b. Der quasistationäre Uebertragungsvorgang:

Bei dieser Schaltung ist in Gl. (11) für $1/\ddot{u}$ der Wert $2/3 \cdot M/L_1 = 0,04$ zu setzen. Für die Dekremente erhält man

$$p_1 = -\frac{3Z_2L_1}{2L_k^2} \quad (32)$$

und

$$p_2 = -Z_1/L_1 \quad (33),$$

da Z_1 infolge der abgehenden Leitungen der beiden nicht angestossenen Phasen ebenfalls um $3/2$ grösser geworden ist. Die totale übertragene Spannung u_2 wird somit

$$u_2 = u_0 \left[\frac{2}{3\ddot{u}} (-e^{p_1 t} + e^{-p_2 t}) + \frac{C'}{C} K \cos 2\pi f_1 t + A \cdot e^{-\alpha t} \cdot \sin(\omega_2 t - \varphi) \right] \quad (34)$$

Diese Welle ist in Fig. 14 wiedergegeben. Der Vergleich mit Oszillogramm Fig. 2, Nr. 10, zeigt die

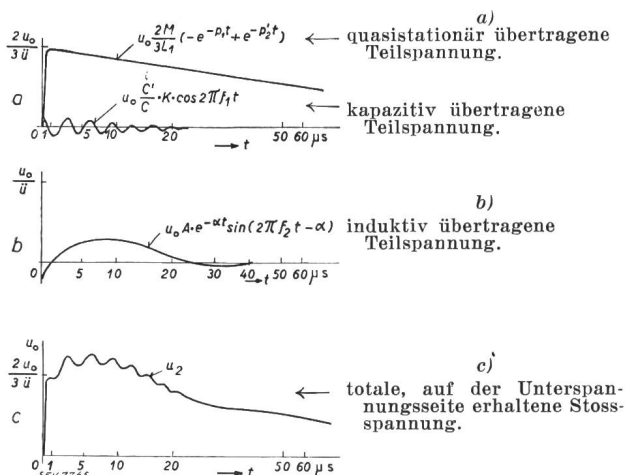


Fig. 14.

Berechnete, auf der Unterspannungsseite auftretende Stoss-spannung bei einphasig angestossener Sternwicklung mit isoliertem, primären Sternpunkt.

gute Uebereinstimmung der Rechnung mit dem Versuch.

Zusammenfassung.

12. Die Uebertragung einer Stoßspannung durch die Wicklungen von Transformatoren wird rechnerisch behandelt, indem das komplizierte Netzwerk der Wicklungen durch ein einfacheres Schaltungs-schema ersetzt wird. Die Kapazitäten, Induktivitäten und Widerstände dieses Schemas werden zuerst aus den konstruktiven Daten des Versuchstransformators berechnet. Das Verhalten dieses Ersatz-schemas gegenüber einer Stoßspannung wird alsdann mittels der Operatorenrechnung untersucht. Es zeigt sich, dass die sekundär auftretende Spannung aus der Summe dreier Teilspannungen entsteht. Die erste Teilspannung wird kapazitiv übertragen und besteht aus einer Schwingung sehr hoher Frequenz, die als Elemente die totale Kapazität der Unterspannungswicklung und die Streu-induktivität dieser Wicklung enthält. Die zweite Teilspannung wird induktiv übertragen. Falls sie eine Schwingung enthält, so ist diese etwa 10 mal langsamer als die der ersten Teilspannung und enthält als schwingende Elemente die totale Induktivität und die Nullpunktskapazität der primären Wicklung. Die dritte Teilspannung besteht aus einem Spannungsschoss von der Form und dem Verlauf der angewandten Stoßspannung. Die sekundär auftretende Spannung wird für drei Transformatorschaltungen, dreiphasig angestossene Primär-

wicklung in Sternschaltung mit isoliertem Sternpunkt, einphasig angestossene Sternschaltung mit geerdetem und isoliertem Sternpunkt, vollständig berechnet. Die gerechneten Spannungen werden mit den durch Versuch erhaltenen verglichen. Die Unterspannung ist in Stern geschaltet und der Sternpunkt geerdet. Der Einfluss sekundär angeschlossener Leitungen und Maschinen wird ebenfalls diskutiert.

Anhang I.

Berechnung der quasistationär übertragenen Spannung.

Für die Anordnung nach Fig. 15 wird

$$u_0 = i_1 (R_1 + Z_1 + pL_1) + i_2 pM \quad (35)$$

$$0 = i_1 pM + i_2 (R_2 + Z_2 + pL_2) \quad (36)$$

$$u'_2 = u_0 \cdot \frac{p M Z_2}{(R_1 + Z_1 + pL_1)(R_2 + Z_2 + pL_2) - p^2 M^2} = \frac{Y(p)}{Z(p)} \quad (37)$$

Die Wurzeln p_1 und p_2 von $Z(p)$ sind, unter Berücksichtigung, dass zahlenmässig

$$(Z_2 L_1)^2 \gg 4 Z_1 Z_2 L_2^2 \text{ und } Z_2 L_1 \gg Z_1 L_2$$

$$p_1 = -Z_2 L_1 / L_2^2 \text{ und } p_2 = -Z_1 / L_1$$

Mit Hilfe des Entwicklungssatzes erhält man nun u'_2 zu

$$u'_2 = u_0 \cdot \frac{M}{L_1} \cdot (-e^{-p_1 t} + e^{-p_2 t}) \quad (38)$$

p_1 ist für die sehr rasch abfallende, p_2 für die langsam absinkende Exponentialfunktion massgebend.

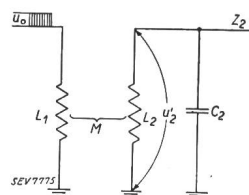


Fig. 15.

Ersatzschema für die Berechnung der quasistationär übertragenen Teilspannung.

Ist an der sekundären Klemme des Transformators eine grosse Kapazität angeschlossen, wie in Fig. 15 angedeutet ist, so lässt sich der Einfluss dieser Kapazität auf die Wellenfront ähnlich berechnen: Man erhält in diesem Falle für $Z(p)$ bei den obigen Vernachlässigungen

$$-Z(p) = Z_1 Z_2 + p Z_2 L_1 + p^2 (L_2^2 + Z_1 Z_2 L_2 C_2) + p^3 Z_2 C_2 L_2^2 \quad (39)$$

und für

$$Y(p) = p Z_2 M \quad (40)$$

Zur Vereinfachung wird $L_k^2 = 0$ gesetzt, d. h. nur die Kopplung 1 berücksichtigt. Dann erhält man die Wurzeln von $Z(p)$ zu

$$p_{1,2} = \frac{-Z_2 L_1 \pm \sqrt{Z_2^2 L_1^2 - 4 Z_1^2 Z_2^2 L_2 C_2}}{2 Z_1 Z_2 L_2 C_2} \quad (41)$$

Es tritt keine Schwingung auf, solange

$$C_2 < L_1^2 / 4 Z_1^2 L_2$$

Setzt man die bisherigen Zahlenwerte ein, so ist $C_2 < 0,45 \cdot 10^{-3}$ F, d. h. eine Schwingung würde nur für eine sehr grosse Kapazität C_2 eintreten. Für relativ grosse Kapazitäten von einigen 10 000 pF ist das zweite Wurzelglied in Gl. (41) viel kleiner als das erste und man erhält für die Wurzel p_1 , die die Wellenfront bestimmt

$$p_1 = -L_1 / Z_1 L_2 C_2$$

Für die Spannung u'_2 erhält man nun den Wert

$$u'_2 = u_0 \cdot \frac{M}{L_1} \cdot e^{-p_1 t} = \frac{u_0}{\ddot{u}} \cdot e^{-p_1 t} \quad (42)$$

Tabelle I gibt die Abhängigkeit der Stirndauer T_s von der Kapazität C_2 für die bisherigen Werte von L_1 und L_2 und

für $Z_1 = 500$. Man sieht, dass nur grosse Werte C_2 die Wellenfront der sekundären Spannung abzuflachen vermögen.

Tabelle I.

C_2 μF	T_s μs
0,01	0,04
0,02	0,08
0,05	0,2
0,1	0,4
0,5	2,0
1,0	4,0

Anhang II.

Einfluss der Wellenfront auf die kapazitive Spannungsteilung.

Nach Fig. 16 erhält man in Operatorschreibweise

$$u = \frac{i}{pC'} + \frac{iZ_2}{1 + pZ_2C''} \quad (43)$$

Damit wird die Spannung am Kondensator C''

$$u_2 = u \frac{C'}{C} \frac{p}{\frac{1}{Z_2C} + p} \quad (44)$$

wobei $C = C' + C''$.

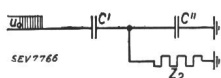


Fig. 16.

Ersatzschema für die Berechnung des Einflusses der Wellenfront auf die kapazitiv übertragene Teilspannung.

Ist nun u eine rasch ansteigende Stossweite mit unendlich langem Rücken

$$u = u_0 (1 - e^{-p_1 t})^6 \quad (45)$$

so wird

$$u_2 = u_0 \frac{C'}{C} \left\{ \frac{p}{\frac{1}{Z_2C} + p} - e^{-p_1 t} \frac{p}{\frac{1}{Z_2C} + p} \right\} \quad (46)$$

und nach Umformung, wobei $\frac{1}{Z_2C''} = \alpha$ gesetzt wird

$$u_2 = u_0 \frac{C'}{C} \left\{ e^{-\alpha t} - \frac{\alpha e^{-\alpha t} - p_1 e^{-p_1 t}}{\alpha - p_1} \right\} = u_0 \frac{C'}{C} \frac{p_1}{\alpha - p_1} (-e^{-\alpha t} + e^{-p_1 t}) = u_0 \frac{C'}{C} \cdot K \quad (47)$$

In Fig. 17 ist der Wert von K in Abhängigkeit von p_1 und der Frontdauer $T_s = 2/p_1$ und für die Werte $C' = 0,6 \text{ pF}$,

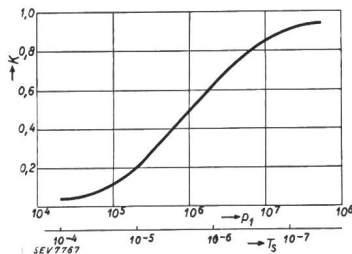


Fig. 17.

Berechnete Abhängigkeit der kapazitiv übertragenen Teilspannung von der Steilheit der ankommenden Stossspannung.

$C'' = 3,6 \text{ pF}$ und $Z_2 = 500 \Omega$ aufgetragen. Das Verhältnis C'/C muss also mit zunehmender Frontdauer mit einem immer kleiner werdenden Faktor K multipliziert werden.

⁶) Siehe Gl. (10).

Anhang III.

Verhalten des allgemeinen Ersatzkreises gegenüber einer Stoßspannung.

Die Berechnung erfolgt nach den folgenden Gleichungen (Fig. 18):

$$u_0 = \frac{i'}{pC'} + u_2'' \quad (48)$$

$$u_2'' = \frac{i'' Z_0}{1 + pZ_2C''} \quad (49)$$

$$u_0 = \frac{i'}{pC'} + i_2(R_2 + pL_2) + i_1 pM \quad (50)$$

$$u_0 = i_1(R_1 + pL_1) + i_2 pM + i_1 \frac{Z_0}{1 + pZ_0C_0} \quad (51)$$

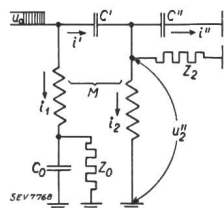


Fig. 18.

Allgemeines Ersatzschema für die Berechnung der auf der Unterspannungsseite auftretenden Stoss-spannungen.

Aus diesen Gleichungen erhält man die sekundäre Spannung u_2'' .

$$u_2'' = u_0 \cdot \left\{ \frac{\frac{C'}{C} \cdot p}{\frac{1}{Z_2C} + p} - \frac{p}{\frac{1}{Z_2C} + p} \cdot \frac{Y(p)}{C \cdot Z(p)} \right\} \quad (52)$$

darin bedeutet

$$C = C' + C'' \quad (53)$$

$$Y(p) = [(R + pL_1)(L + Z_0C_0) + Z_0] Z_2C' - M(1 + pZ_2C)(1 + pZ_0C_0) \quad (54)$$

$$Z(p) = [(R_1 + pL_1)(1 + pZ_0C_0) + Z_1][(R_2 + pL_2)(1 + pZ_2C) + Z_2] - p^2 M^2(1 + pZ_2C)(1 + pZ_0C) \quad (55)$$

Aus Gl. (52) erhält man durch Umformung die endgültige Form für u_2''

$$u_2'' = u_0 \cdot e^{-\frac{t}{Z_2C}} \cdot \left(\frac{C'}{C} - \frac{Y(p)}{C \cdot Z(p)} \right) \quad (56)$$

Literatur.

1. L. V. Bewley. Transient oscillations in distributed circuits. Trans. Amer. Inst. Electr. Engr. Bd. 50 (1931), S. 1215.
2. K. K. Palueff und I. K. Hagenguth. Trans. Amer. Inst. Electr. Engr. Bd. 51 (1932), S. 601.
3. Blume und Boyajian. Abnormal voltages within transformers. Trans. Amer. Inst. Electr. Engr. Bd. 38 (1918), S. 577. S. a. T. E. Allibone, D. B. McKenzie und F. R. Perry. J. Inst. Electr. Engr. Bd. 80 (1937), S. 117. The effect of impulse voltages on transformer windings.
4. B. B. Austin. The effective resistance of inductance coils at radio frequencies. Wireless Eng. Bd. 11 (1934), S. 12.
5. H. Neuhaus und R. Striegel. Modellversuch zur Wanderwellenübertragung auf die Unterspannungswicklung von Transformatoren. Wiss. Veröff. Siemens-Konz. Bd. 15 (1936), S. 51 (s. bes. Literaturverzeichnis).
6. H. Neuhaus und R. Striegel. Archiv Elektrotechn. Bd. 29 (1935), S. 702.
7. R. Elsner. Zur Frage der Uebertragung von Stoßspannungen auf die Unterspannungsseite von Drehstromtransformatoren. Wiss. Veröff. Siemens-Konz. Bd. 16 (1937), S. 1.
8. R. Elsner. Neuere Untersuchungen zur Frage der Stossbeanspruchung von Transformatoren. Archiv Elektrotechn. Bd. 30 (1936), S. 369.