Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens

Herausgeber: Association suisse des électriciens

Band: 29 (1938)

Heft: 23

Artikel: Beitrag zur Frage der Kupferverlustmessung bei Mutator-Transformatoren speziell mit Gabelschaltung

Autor: Waldvogel, P.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1059013

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: 22.08.2025

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

Il est possible qu'il soit difficile, pour une autorité concédante, de réduire le taux de la redevance et qu'elle préfère adopter un mode de calcul de la puissance qui détermine une redevance plus faible. Ce mode de calcul devrait toutefois être parfaitement clair et précis dans tous les cas.

Il serait préférable de faire figurer dans l'acte de concession non seulement le taux de la redevance par unité de puissance, mais bien encore son montant même. La construction de l'usine ne devrait toutefois pas être entravée par ces discussions.

2° Si, après l'octroi d'une concession, des contestations s'élèvent au sujet de la redevance, par exemple pour savoir si une usine doit être considérée comme usine à accumulation ou non, le conflit sera porté devant l'autorité judiciaire, selon l'art. 71 de la Loi fédérale.

IV.

1° Le Règlement prescrit également de subdiviser en deux parties le calcul de la puissance des usines à accumulation, même lorsque le taux de la redevance par unité de puissance n'est pas réduit. Ainsi qu'il ressort des explications précédentes, *le mode de calcul de la puissance donne également matière à contestation même si l'on a pu s'entendre sur le fait qu'il s'agit d'une usine à accumulation. Il semble donc indiqué d'arrêter un nouveau règlement concernant le calcul des redevances en matière de droits d'eau, qui prescrive exactement le mode de calcul.*

2° Au cas où il ne serait pas recommandable de procéder à l'élaboration d'un règlement entièrement nouveau, basé sur la Loi fédérale, il semble néanmoins indiqué de remanier le Règlement actuel en tenant compte des expériences faites jusqu'à ce jour. Le règlement devrait être ordonné d'une autre façon, son texte remanié, le mode de calcul simplifié et les prescriptions d'application rendues plus concrètes.

3° Les prescriptions juridiques en vigueur doivent être modifiées le moins possible.

Beitrag zur Frage der Kupferverlustmessung bei Mutator-Transformatoren, speziell mit Gabelschaltung.

Von *P. Waldvogel*, Baden.

621.317.384 : 621.314.21

Um den von Herrn Kübler zur Aufnahme in die CEI-Regeln empfohlenen Vorschlag (siehe Bull. SEV 1938, Nr. 11) anzuwenden, muss man alle sekundären Wicklungen so kurzschliessen, dass die sekundären Ströme möglichst genau die Sollwerte annehmen, die man unter der Voraussetzung einer vollkommenen Symmetrie rechnerisch bekommt. Dies wird bei allen Transformatorenschaltungen am besten verwirklicht, wenn man jeweils die im Spannungsdiagramm entgegengesetzten Klemmen zusammen verbindet: dabei sind die verschiedenen Kurzschlussverbindungen voneinander zu isolieren.

Bei sechsphasiger Gabelschaltung sind mit dieser Kurzschlussart alle symmetrischen Bedingungen noch nicht streng erfüllt, da die Summe der 3 Kurzschlußströme noch einen gewissen Reststrom enthält. Eine Verbesserung ist aber leicht zu verwirklichen, wenn man einen geschlossenen Eisenring aus Dynamoblech um die 3 Kurzschlusskabel anordnet. Mit einem Stabstromwandler lässt sich jedenfalls dieser Reststrom immer erfassen und messen. Eine einfache Korrekturformel ergibt dann die richtigen ohmschen Verluste.

La méthode que M. Kübler a proposée pour les prescriptions internationales exige que le court-circuit sur tous les enroulements secondaires soit fait de telle façon que les courants secondaires prennent aussi exactement que possible les valeurs théoriques que l'on obtient par le calcul en supposant une symétrie parfaite. C'est en réunissant les bornes qui sont diamétralement opposées dans le diagramme des tensions que l'on réalisera le mieux cette condition pour toutes les sortes de couplage des transformateurs, étant entendu que les différentes connexions de court-circuit doivent être isolées les unes des autres.

Pour le couplage hexaphasé en fourche, cette méthode ne remplit pas encore rigoureusement toutes les conditions de symétrie, car la somme des 3 courants de court-circuit contient encore un certain terme résiduel. Cependant, il est aisé d'apporter une amélioration sensible en disposant autour des 3 câbles de court-circuit un anneau fermé en tôles dynamo. D'ailleurs, ce courant résiduel peut toujours être mesuré au moyen d'un transformateur d'intensité. Une formule de correction très simple donne ensuite les pertes ohmiques exactes.

I. Einleitung.

Es wurden schon verschiedene Methoden vorgeschlagen, um bei Mutatorbetrieb die im Mutatortransformator erzeugten Kupferverluste aus einfachen Messungen zu ermitteln. Durch einen im Bull. SEV 1938, Nr. 11, erschienenen Aufsatz hat Herr Kübler diese verschiedenen Methoden ausführlich erklärt. Er weist darauf hin, dass der vierte Vorschlag ganz besonders zur Aufnahme in die CEI-Regeln geeignet sei.

Dieser Vorschlag 4 kann folgendermassen zusammengefasst werden: Man schliesst alle Transformatorklemmen auf der Mutatorseite kurz, speist drehstromseitig die 3 Phasen mit dem Nennstrom und misst gleichzeitig die Kupferverluste. An Hand der gemessenen Wicklungswiderstände kann man die ohmschen Verluste, die während dieses Versuches entstehen, bestimmen. Die Differenz zwischen den mit den Wattmetern gemessenen Verlusten und den berechneten ohmschen Verlusten ergibt die zusätzlichen Verluste. Hernach wird die vereinfachende Annahme getroffen, dass beim Mutatorbetrieb die zusätzlichen Verluste unverändert bleiben, während die ohmschen Verluste einfach aus der Widerstandsmessung zu berechnen sind.

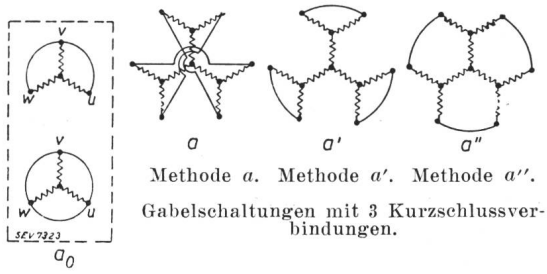
Die Anwendung dieses Verfahrens setzt also voraus, dass alle durch die kurzgeschlossenen Wicklungen fliessenden Ströme bekannt sind. Erst dann können die ohmschen Verluste berechnet werden. Ausserdem muss man berücksichtigen, dass die getroffene Annahme über die zusätzlichen Verluste nur dann begründet ist, wenn die Kurzschlußströme sich unter sich genau wie die Grundwellen der Ströme beim Mutatorbetrieb verhalten. Man muss also immer darauf achtgeben, dass die verschiedenen Sekundärströme unter sich gleich werden und eine gegenseitige Phasenverschiebung gleich $\frac{2\pi}{m}$

aufweisen, wenn m die Anzahl Anoden bedeutet, die nicht die gleiche Spannungsphase erhalten.

Es muss also noch die Frage beantwortet werden, welche unter den mannigfaltigen Kurzschlussarten, die sich bei sechs- oder zwölfphasigen Mutatortransformatoren ergeben können, zu wählen ist, um die obige Bedingung erfüllen zu können. (Alle Sekundärströme sind einander gleich und unter sich um $\frac{2\pi}{m}$ verschoben.) Bekanntlich ist das Problem vor allem für die oft verwendete sechsphasige Gabelschaltung wichtig. Es soll deshalb zunächst dieser Fall behandelt werden.

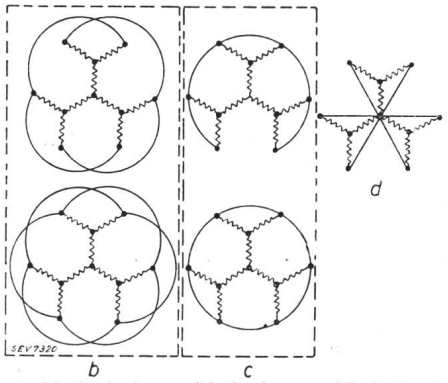
II. Allgemeine Betrachtungen über die Stromverhältnisse im Kurzschluss bei Transformatoren mit Gabelschaltung.

Bei der Kurzschlussmessung eines gewöhnlichen Drehstromtransformators mit Stern/Dreieck- oder Zickzack-Schaltung bekommt man immer einen voll-



Methode a. Methode a'. Methode a''.
Gabelschaltungen mit 3 Kurzschlussverbindungen.

Sternschaltung mit 2 Kurzschlussverbindungen.



Methode b. Methode c. Methode d.
Gabelschaltungen mit 4, 5 und 6 Kurzschlussverbindungen.

Fig. 1.
Die verschiedenen Kurzschlussmöglichkeiten bei sechsphasiger Gabelschaltung im Vergleich mit dem Kurzschluss bei Sternschaltung.

ständigen Kurzschluss, indem man 2 Klemmenpaare kurzschliesst, z. B. U mit V einerseits, V mit W anderseits (siehe Fig. 1). Es ist klar, dass die dritte Verbindung durchaus überflüssig ist und dass sich die Stromverhältnisse im Transformator überhaupt nicht ändern können. Die Stromverhältnisse sind allein nur durch die Windungszahlen bestimmt.

Bei Transformatoren mit Gabelschaltung gibt es viele Möglichkeiten, alle 6 Klemmen kurzzuschliessen. Fig. 1 zeigt alle diese Möglichkeiten.

Mit nur 2 Kurzschlussverbindungen kann man überhaupt nicht alle Wicklungen erfassen.

Mit 3 Kurzschlussverbindungen gibt es 3 Möglichkeiten: a, a', a''.

Mit 4 Kurzschlussverbindungen gibt es 1 Möglichkeit: b.

Mit 5 Kurzschlussverbindungen gibt es 1 Möglichkeit: c.

Mit 6 Kurzschlussverbindungen gibt es 1 Möglichkeit: d.

Es ist also zu vermuten, dass bei Gabelschaltung infolge der grösseren Anzahl Kurzschlussverbindungen sich die Kurzschlußströme nie zwangsläufig nach den Windungszahlen erzwungen einstellen werden. Die Kurzschlußströme werden sich vielmehr je nach den Streu- und Widerstandsverhältnissen einstellen. Ausserdem wird diese Erscheinung bei Methode d viel ausgeprägter sein als bei Methode a.

Diese Feststellung ist *ein ganz ausgesprochener Gegensatz zu den üblichen Dreiphasenschaltungen.*

Ohne tiefer in diese Verhältnisse einzugehen, sollte man schon die Methode a bevorzugen, weil sie automatisch die Bedingung erfüllt, dass entgegengesetzte Phasen entgegengesetzte Ströme aufnehmen.

Es sei noch erwähnt, dass die Kurzschlussarten nach a' und a'' offenbar keine praktische Bedeutung besitzen, weil sie erfordern, dass die Ströme zweier benachbarten Phasen um 180° statt 60° verschoben werden.

III. Mathematische Formulierung des Problems der Kurzschlußströme bei sechsphasiger Gabelschaltung.

Fig. 2 ergibt das Schema eines Mutatortransformators mit Stern-Gabelschaltung. Der Einfachheit

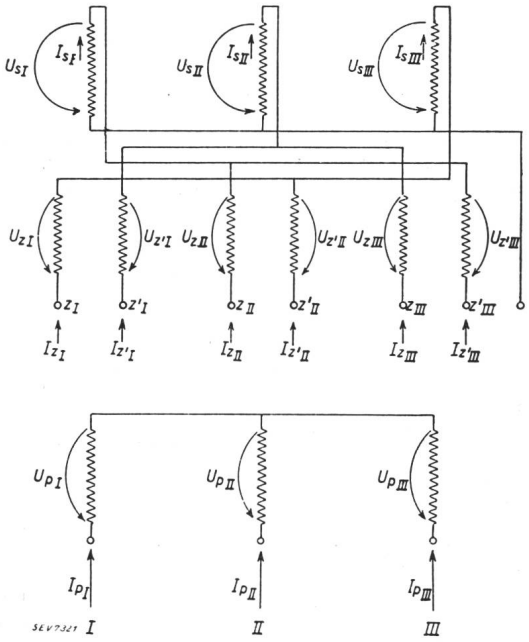


Fig. 2.
Schema eines 3/6-Phasen-Mutatortransformators mit Stern-/Gabelschaltung.

halber sei vorausgesetzt, dass alle Spulen, die den gleichen Wickelsinn aufweisen, ebenfalls gleich viel Windungen besitzen. Die Indices I, II, III beziehen sich auf die 3 Säulen, die Indices p, s, z und z′ auf

Primär-, «Stiel»-, erste «Zinken»- und zweite «Zinkenwicklung».

Die Klemmenspannungen der verschiedenen Wicklungen werden mit U bezeichnet (Effektiv-Werte) und die Ströme mit I.

Es sei angenommen, der Transformator sei sekundärseitig nach einer bestimmten Art kurzgeschlossen und es sollen alle Sekundärströme berechnet werden, wenn die Primärströme gegeben sind.

Bekannt ist also das Primärdrehstromsystem

$$I_{p\,I} = I \qquad I_{p\,II} = I \cdot \alpha \qquad I_{p\,III} = I \cdot \alpha^2$$

wo α das Symbol $e^{j \cdot \frac{2\pi}{3}}$ darstellt.

Als unbekannte Grössen sind die folgenden einzuführen:

$$I_{z\,I} \; I_{z'\,I} \; I_{z\,II} \; I_{z'\,II} \; I_{z\,III} \; I_{z'\,III}$$

oder besser ihre 6 symmetrischen Komponenten, nämlich:

$\xi \; \eta \; \varrho$ als mitlaufende, gegenlaufende und Nullkomponente für das System $I_{z\,I} \; I_{z\,II} \; I_{z\,III}$

und $\xi' \; \eta' \; \varrho'$ respektive für $I_{z'\,I} \; I_{z'\,II} \; I_{z'\,III}$

Die «Stiel»-Ströme können unmittelbar mit Hilfe der Unbekannten ausgedrückt werden:

$$I_{s\,I} = -I_{z\,II} - I_{z'\,III} \qquad I_{s\,II} = -I_{z\,III} - I_{z'\,I}$$
$$I_{s\,III} = -I_{z\,I} - I_{z'\,II}$$

so dass im ganzen 6 Gleichungen für die 6 Unbekannten nötig sind.

Erste Bedingung. Aufheben der Ampèrewindungen auf jeder Säule.

Es ist ein Grundgesetz des Transformators mit geschlossenem magnetischem Kreis, dass die Summe sämtlicher Ampèrewindungen auf einer Säule verschwinden muss. Dies ergibt also für die Säule I

$$I_{z\,I} + I_{z'\,I} + I_{s\,I} + I_{p\,I} = 0$$

oder

$$I_{p\,I} = -I_{z\,I} - I_{z'\,I} - I_{s\,I} = -I_{z\,I} - I_{z'\,I} + I_{z\,II} + I_{z'\,III}$$

und 2 ähnliche Gleichungen durch zyklische Vertauschung.

Diese 3 Bedingungen lassen sich für die symmetrischen Komponenten umschreiben.

a) mitlaufende Komponente:

$$-\xi - \xi' + \alpha\,\xi + \alpha^2\,\xi' = I$$

oder (1)

$$\xi - \alpha^2\,\xi' = \frac{I}{\alpha - 1}$$

b) gegenlaufende Komponente:

$$-\eta - \eta' + \alpha^2\,\eta + \alpha\,\eta' = 0$$

oder (2)

$$\eta - \alpha\,\eta' = 0$$

c) Nullkomponente:

$$-\varrho - \varrho' + \varrho + \varrho' = 0.$$

Diese Gleichung wird eine Identität.

Die erste Bedingung ergibt nur die 2 Gl. (1) und (2). Diese sind allerdings unabhängig von der Art des Kurzschlusses.

Zweite Bedingung. Kirchhoffsches Gesetz zwischen den Kurzschlussverbindungen.

Je nach der Kurzschlussart ergeben sich andere Gleichungen:

a) Kurzschluss nach 3 Durchmessern [1]: |\/

Verbunden werden folgende Klemmen:

$$z_I \; z'_{III} / z_{II} \; z'_I / z_{III} \; z'_{II}$$

Das Kirchhoffsche Gesetz lautet hiefür:

$$I_{z\,I} + I_{z'\,III} = 0.$$

Es ergeben sich ferner 2 ähnliche Gleichungen durch zyklische Vertauschung.

Dies ergibt für die symmetrischen Komponenten

$$\xi + \alpha^2\xi' = 0 \qquad (3a)$$
$$\eta + \alpha\eta' = 0 \qquad (4a)$$
$$\varrho + \varrho' = 0 \qquad (5a)$$

Diese zweite Bedingung ergibt in diesem Fall 3 Gleichungen.

b) Kurzschluss nach 2 Dreiecken: △ ▽

Verbunden sind folgende Klemmen:

einerseits $z_I \; z_{II} \; z_{III}$, anderseits $z'_I \; z'_{II} \; z'_{III}$

Das Kirchhoffsche Gesetz erfordert

$$I_{z\,I} + I_{z\,II} + I_{z\,III} = 0 \quad \text{und} \quad I_{z'\,I} + I_{z'\,II} + I_{z'\,III} = 0$$

oder für die symmetrische Komponente

$$\varrho = 0 \qquad (3b)$$
$$\varrho' = 0 \qquad (4b)$$

Die zweite Bedingung ergibt in diesem Fall nur 2 Gleichungen.

c) Kurzschluss nach einem Kreis: ○

Zusammen werden die 6 Klemmen $z_I \; z'_I \; z_{II} \; z'_{II} \; z_{III} \; z'_{III}$ verbunden.

Das Kirchhoffsche Gesetz lautet hiefür:

$$I_{z\,I} + I_{z'\,I} + I_{z\,II} + I_{z'\,II} + I_{z\,III} + I_{z'\,III} = 0$$

oder für die symmetrische Komponente

$$\varrho + \varrho' = 0 \qquad (3c)$$

Die zweite Bedingung ergibt in diesem Fall nur noch eine Gleichung.

d) Kurzschluss nach 6 Radien:

Das Kirchhoffsche Gesetz ergibt in diesem Fall überhaupt keine Gleichung mehr.

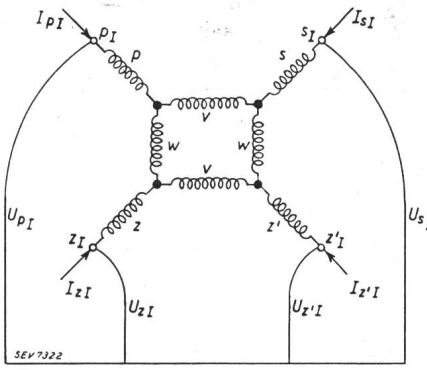
Die einfachen Ueberlegungen, die üblich sind, um solche Probleme zu lösen (nämlich die Bedingung für das Aufheben der Ampèrewindungen und das Kirchhoffsche Gesetz) ergeben somit, je nach der Kurzschlussart $2 + 3 = 5$, $2 + 2 = 4$, $2 + 1 = 3$, $2 + 0 = 2$ Gleichungen für die Bestimmung der 6 Unbekannten. Das Problem ist also noch unbestimmt. Offenbar ist aber die Unbestimmtheit bei der vierten Kurzschlussmethode viel grösser als bei der ersten. Sie lässt sich aber nur dadurch beheben,

[1] Diese Kurzschlussart wurde u. W. zum erstenmal von H. Cerretelli vorgeschlagen und empfohlen.

dass man die von den ohmschen Widerständen und Streureaktanzen herrührenden Spannungsabfälle berücksichtigt [2]).

Dritte Bedingung: Berücksichtigung der Spannungsabfälle.

Auf jeder Säule sind 4 Wicklungen aufgesetzt, die mit p, s, z und z′ bezeichnet sind. Zwischen den verschiedenen Strömen I_p I_s I_z $I_{z'}$ und Klemmenspannungen U_p U_s U_z $U_{z'}$ bestehen aber gewisse Beziehungen, die man an Hand eines Ersatzschemas leicht aufstellen kann [3]). Fig. 3 zeigt dieses Schema.



$$k_1 = X_{pz'} + X_{sz} - X_{zz'} - X_{ps} \qquad v = \sqrt{k_1 k_2} + k_2$$
$$k_2 = X_{pz'} + X_{sz} - X_{pz} - X_{sz'} \qquad w = \sqrt{k_1 k_2} + k_1$$
$$p = \frac{1}{2}(X_{ps} + X_{pz} - X_{sz}) - \frac{v \cdot w}{2(v+w)}$$
$$s = \frac{1}{2}(X_{ps} + X_{sz'} - X_{pz'}) - \frac{v \cdot w}{2(v+w)}$$
$$z = \frac{1}{2}(X_{sz'} + X_{zz'} - X_{sz}) - \frac{v \cdot w}{2(v+w)}$$
$$z' = \frac{1}{2}(X_{zz'} + X_{pz} - X_{pz'}) - \frac{v \cdot w}{2(v+w)}$$

Fig. 3.
Ersatzschema für die 4 Wicklungen der Säule I, z. B. mit zugehörigen Bestimmungsgleichungen für die Impedanzen nach F. M. Starr. Gen. Electr. Rev., März 1933.

Die 6 Reaktanzen p, s, z, z′, v, w können mit Hilfe der 6 Streureaktanzen X_{ps} X_{sz} $X_{zz'}$ $X_{z'p}$ X_{pz} $X_{sz'}$ ermittelt werden, die man aus den 6 Kurzschlussmessungen mit je zwei Wicklungen erhält. (Die ohmschen Widerstände kann man sich zu p, s, z, z′ hinzugefügt denken, und dann einfach mit Impedanzen statt Reaktanzen rechnen.) Fig. 3 zeigt auch die Bestimmungsgleichungen für die Reaktanzen.

Nun sollen die verschiedenen Beziehungen aufgestellt werden, die die Berücksichtigung der Spannungsabfälle liefert.

a) Kurzschluss nach 3 Durchmessern | \ /.

Die drei Kurzschlusskreise ergeben

$$0 = -U_{zI} + U_{sIII} - U_{sI} + U_{z'III} =$$
$$-U_{zII} + U_{sI} - U_{sII} + U_{z'I} = -U_{zIII} + U_{sII} - U_{sIII} + U_{z'II}$$

Addiert man diese 3 Gleichungen zusammen, so bekommt man

$$-U_{zI} + U_{z'III} - U_{zII} + U_{z'I} - U_{zIII} + U_{z'II} = 0$$

oder wenn man mit $U_{zI\,z'I}$ den Spannungsabfall $U_{zI} - U_{z'I}$ bezeichnet, wird

$$U_{zI\,z'I} + U_{zII\,z'II} + U_{zIII\,z'III} = 0 \qquad \text{(6a)}$$

Drückt man diese Spannungsabfälle mit Hilfe unserer 6 Unbekannten aus, so ergibt nun die Gleichung (6a) die sechste Beziehung, die wir benötigen, um das Problem vollständig zu lösen.

b) Kurzschluss nach 2 Dreiecken △ ▽.

Das erste Kurzschlussdreieck erfordert

$$-U_{zI} + U_{sIII} = -U_{zII} + U_{sI} = -U_{zIII} + U_{sII}$$

und das zweite

$$-U_{z'III} + U_{sI} = -U_{z'I} + U_{sII} = -U_{z'II} + U_{sIII}$$

oder wenn diese Gleichungen zusammen addiert werden, wird

$$-U_{zI} + U_{sI} - U_{z'III} + U_{sIII} = -U_{zII} + U_{sII} - U_{z'I} + U_{sI}$$
$$= -U_{zIII} + U_{sIII} - U_{z'II} + U_{sII}$$
$$U_{sI\,zI} + U_{sIII\,z'III} = U_{sII\,zII} + U_{sI\,z'I} = U_{sIII\,zIII} + U_{sII\,z'II}$$
$$\text{(5b) (6b)}$$

Fügt man diese beiden Gleichungen (5b) und (6b) zu den 4 vorigen (1) (2) (3b) (4b), so kann man das Problem vollständig lösen.

c) Kurzschluss nach einem Kreis ○.

Man schreibt einfach, dass die 6 Phasenspannungen unter sich gleich werden

$$-U_{zI} + U_{sIII} = -U_{zII} + U_{sI} = -U_{zIII} + U_{sII} =$$
$$-U_{z'III} + U_{sI} = -U_{z'I} + U_{sII} = -U_{z'II} + U_{sIII}$$

Man erkennt sofort, dass diese Beziehungen gleichzeitig die Bedingungen a und b enthalten, so dass die Gleichungen (6a) (5b) (6b) auch in diesem Fall gelten

$$U_{zI\,z'I} + U_{zII\,z'II} + U_{zIII\,z'III} = 0 \qquad \text{(4c)}$$
$$U_{sI\,zI} + U_{sIII\,z'III} = U_{sII\,zII} + U_{sI\,z'I} = U_{sIII\,zIII} + U_{sII\,z'II}$$
$$\text{(5c) (6c)}$$

Diese 3 Gleichungen mit den 3 früheren (1) (2) (3c) lösen vollständig das Problem.

d) Kurzschluss nach 6 Radien:

Man schreibt genau wie vorher, dass die 6 Phasenspannungen unter sich gleich sind und ausserdem, dass sie null sind. Dann bekommt man selbstverständlich genau die gleichen Beziehungen wie im vorigen Fall und noch die zusätzliche Bedingung, dass die Summen $(U_{sI\,zI} + U_{sIII\,zIII})$ usw. gleich null sind

$$U_{zI\,z'I} + U_{zII\,z'I} + U_{zIII\,z'III} = 0 \qquad \text{(3d)}$$
$$U_{sI\,zI} + U_{sIII\,z'III} = U_{sII\,zII} + U_{sI\,z'I} = U_{sIII\,zIII} + U_{sII\,z'II}$$
$$= 0. \qquad \text{(4d) (5d) (6d)}$$

[2]) Die Mechanik kennt in der Statiklehre einen ganz ähnlichen Fall. Die Reaktionskräfte der Auflageflächen auf einen ruhenden Körper können im allgemeinen aus den einfachen Gleichgewichtsbedingungen ermittelt werden. Erst in den komplizierteren Fällen (statisch unbestimmten Problemen) muss man die Elastizität und die Deformation des Körpers berücksichtigen, um das Problem vollständig zu lösen.

[3]) Siehe General Electric Review, Vol. 36, No. 3, March 1933, «An Equivalent Circuit for the Four-Winding Transformer», by F. M. Starr.

Diese 4 Gleichungen und die zwei ersten (1) (2) bestimmen eindeutig die 6 Unbekannten.

Für jede Kurzschlussart stehen also 6 lineare Gleichungen für die 6 Unbekannten zur Verfügung, so dass das Problem eindeutige Lösungen erhält.

IV. Die Berechnung der Kurzschlußströme bei sechsphasiger Gabelschaltung.

Die Berechnung der Ströme ist jetzt eine rein mathematische Aufgabe, die keine Schwierigkeit mehr bietet. Deshalb soll der Weg, der zum Ziele führt, nur angedeutet, d. h. die langen Zwischenrechnungen weggelassen werden.

Es sei zunächst bemerkt, dass die 4 Ströme, die durch das innere Viereck des Ersatzschemas (Fig. 3) fliessen, sich durch lineare Funktionen von $I_{p\,I}$ $I_{s\,I}$ $I_{z\,I}$ $I_{z'I}$ ausdrücken lassen, so dass man auch für die Spannungsabfälle $U_{s_I z_I}$ $U_{s_I z'_I}$ $U_{z_I z'_I}$ lineare Ausdrücke von den 4 Strömen bekommt. Bekanntlich darf aber eingesetzt werden:

$$I_{s_I} = -I_{z\,II} - I_{z'III} \quad \text{und} \quad I_{p\,I} = -I_{z\,I} - I_{z'I} + I_{z\,II} + I_{z'III}$$

Es folgen also für die Spannungsabfälle 3 lineare Funktionen von

$$I_{z\,I}\ I_{z'I}\ I_{z\,II}\ I_{z'II}\ I_{z\,III}\ I_{z'III} \quad \text{oder von} \quad \xi\ \xi'\ \eta\ \eta'\ \varrho\ \varrho'$$

$$U_{s_I z\,I} = a\,\xi + a'\,\xi' + b\,\eta + b'\,\eta' + c\,\varrho + c'\,\varrho'$$
$$U_{s_I z'_I} = d\,\xi + d'\,\xi' + e\,\eta + e'\,\eta' + f\,\varrho + f'\,\varrho'$$
$$U_{z_I z'_I} = g\,\xi + g'\,\xi' + h\,\eta + h'\,\eta' + l\,\varrho + l'\,\varrho'$$

Dabei sind natürlich die verschiedenen Konstanten $a, a', b, b', c, c', d, d', e, e', f, f', g, g', h, h', l, l'$ durch die konstruktiven Daten des Transformators bestimmt.

Die eigentliche Lösung der verschiedenen Gleichungssysteme kann nun folgendermassen geschehen:

Fall a).

Die Gleichungen (1) und (3a) bestimmen unmittelbar ξ und ξ'

$$\xi = -\frac{I}{2\sqrt{3}} \cdot e^{+j\cdot 30} \qquad \xi' = -\frac{I}{2\sqrt{3}} \cdot e^{-j\cdot 30}$$

und die Gleichungen (2) und (4a) ergeben

$$\eta = 0 \qquad \eta' = 0$$

Die Gleichung (6a) drückt einfach aus, dass die Nullkomponente des Spannungsabfalls $U_{z_I z'_I}$ verschwindet; also

$$l\varrho + l'\varrho' = 0 \qquad (6a)$$

wird. Wenn man noch gleichzeitig die Gleichung (5a) berücksichtigt, bekommt man endlich

$$\varrho = 0 \qquad \varrho' = 0$$

Zusammenfassend kann man somit schreiben

$$\xi = -\frac{I}{2\sqrt{3}} \cdot e^{+j\cdot 30} \qquad \eta = 0 \qquad \varrho = 0$$

$$\xi = -\frac{I}{2\sqrt{3}} \cdot e^{-j\cdot 30} \qquad \eta' = 0 \qquad \varrho' = 0$$

Die 6 Zinkenströme bilden ein vollkommen symmetrisches Sechsphasensystem. Die 3 Stielströme sind $\sqrt{3}$mal grösser als die Zinkenströme.

Fall b).

Aus den Gleichungen (3b) und (4b) ist $\varrho = 0$ und $\varrho' = 0$. Die Gleichungen (5b) und (6b) verlangen einfach, dass im Ausdruck von $U_{s_I z_I} + U_{s_{III} z'_{III}}$ sowohl die mitlaufende als auch die gegenlaufende Komponente verschwindet. Dies ergibt also

$$(a + d\,\alpha^2)\,\xi + (a' + d'\,\alpha^2)\,\xi' = 0 \qquad (5b)$$

$$(b + e\,\alpha)\,\eta + (b' + e'\,\alpha)\,\eta' = 0 \qquad (6b)$$

Die Gleichungen (2) und (6b) zusammen erfordern

$$\eta = 0 \qquad \eta' = 0$$

und die Gleichungen (1) und (5b) bestimmen die zwei letzten Unbekannten ξ und ξ'

$$\xi = I \cdot \frac{a' + d'\,\alpha^2}{(\alpha - 1)\,(a\,\alpha^2 + a' + d\,\alpha + d'\,\alpha^2)}$$

$$\xi' = I \cdot \frac{a + d\,\alpha^2}{(\alpha - 1)\,(a\,\alpha^2 + a' + d\,\alpha + d'\,\alpha^2)}$$

Die 3 Zinkenströme I_{z_I} $I_{z\,II}$ $I_{z\,III}$ bilden ein erstes, vollkommen symmetrisches Drehstromsystem und die 3 Ströme $I_{z'I}$ $I_{z'II}$ $I_{z'III}$ ebenfalls ein zweites. Die 6 Zinkenströme zusammen bilden kein symmetrisches Sechsphasensystem. Insbesondere sind die Stielströme nicht $\sqrt{3}$mal grösser als die Zinkenströme.

Fall c).

Die Gleichungen (5c) und (6c) sind identisch mit den früheren Gleichungen (5b) und (6b). Also

$$(a + d\,\alpha^2)\,\xi + (a' + d'\,\alpha^2)\,\xi' = 0 \qquad (5c)$$

$$(b + e\,\alpha)\,\eta + (b' + e'\,\alpha)\,\eta' = 0 \qquad (6c)$$

und die Gleichung (4c) identisch mit (6a).

$$l\varrho + l'\varrho' = 0 \qquad (4c)$$

Die Gleichungen (2) und (6c) erfordern, dass

$$\eta = 0 \qquad \eta' = 0$$

wird, und die Gleichungen (3c) und (4c), dass

$$\varrho = 0 \qquad \varrho' = 0$$

wird. Endlich werden die zwei Unbekannten ξ und ξ' genau wie im Fall b) durch Gleichungen (1) und (5c) bestimmt.

Zusammenfassend ist das Resultat genau das gleiche wie im Fall b).

Fall d).

Genau wie in den vorigen Fällen gelten die Gleichungen:

$$(a + d\,\alpha^2)\,\xi + (a' + d'\,\alpha^2)\,\xi' = 0 \qquad (4d)$$

$$(b + e\,\alpha)\,\eta + (b' + e'\,\alpha)\,\eta' = 0 \qquad (5d)$$

$$l\varrho + l'\varrho' = 0 \qquad (3d)$$

Es gilt aber noch die weitere Beziehung (6d), nach welcher $U_{s_{I}z_{I}} + U_{s_{III}z'_{III}}$ gleich Null ist: dies verlangt, dass die Nullkomponente dieses Ausdrucks verschwindet.

$$(c + l)\,\varrho + (c' + l')\,\varrho' = 0 \qquad (6d)$$

Nun erfordern Gleichungen (2) und (5d), dass

$$\eta = 0 \qquad \eta' = 0$$

wird und Gleichungen (3d) und (6d)

$$\varrho = 0 \qquad \varrho' = 0$$

während die Gleichungen (1) und (4d) die zwei Unbekannten ξ und ξ' in gleicher Weise wie vorhin bestimmen.

Das Resultat ist immer noch genau das gleiche wie in den Fällen b) und c).

Der Vollständigkeit halber sollen noch die Ausdrücke von ξ und ξ' resp. I_{z_I} und $I_{z'_I}$ angeben, die in den Fällen b, c, d gelten. Um jedoch relativ einfache Formeln zu erhalten, sei vorausgesetzt, dass die beiden Zinkenwicklungen einerseits symmetrisch gegenüber der Primärwicklung, anderseits symmetrisch gegenüber der Stielwicklung angeordnet sind. Ein richtiger Mutatortransformator wird allerdings diese Bedingungen immer erfüllen. Dann wird

$$\left.\begin{aligned} I_{z_I} = \xi = \frac{\alpha I}{\alpha - 1} \cdot \frac{z\,\alpha^2 - s - \frac{w}{2}\,\alpha}{2\,z + s + \frac{w}{2}} \\ I_{z'_I} = \xi' = \frac{\alpha I}{\alpha - 1} \cdot \frac{-z + s\alpha^2 + \frac{w}{2}\,\alpha}{2\,z + s + \frac{w}{2}} \end{aligned}\right\} \qquad (7)$$

Man kann aber die 4 Streureaktanzen X_{ps} X_{pz} X_{sz} X_{zz} einführen, welche der Berechnung im allgemeinen zugänglich sind und deren physikalische Bedeutung anschaulicher ist. X_{pz} entspricht z. B. dem erzeugten Streufluss, wenn man auf einer Säule die primäre Wicklung p speist und *eine* Zinkenwicklung z *oder* z' kurzschliesst.

X_{zz} entspricht dem erzeugten Streufluss, wenn man auf einer Säule *eine* Zinkenwicklung speist und *die andere* kurzschliesst.

Man bekommt also schliesslich:

$$\begin{aligned} I_{z_I} &= \frac{\alpha I}{\alpha - 1} \cdot \frac{-X_{zz} + \alpha^2 X_{sz} + (\alpha - 1)\,(X_{ps} - X_{pz})}{2\,X_{sz} + X_{zz}} \\ I_{z'_I} &= \frac{\alpha I}{\alpha - 1} \cdot \frac{\alpha^2 X_{zz} - X_{sz} + \alpha\,(\alpha - 1)\,(X_{ps} - X_{pz})}{2\,X_{sz} + X_{zz}} \end{aligned} \qquad (8)$$

V. Erörterung der auf theoretischem Weg festgestellten Resultate.

Es ist zunächst wichtig zu erwähnen, dass bei allen Kurzschlussarten die Stromverhältnisse nie zwangsläufig durch die Windungszahlen bestimmt sind. Dabei sind auch die ohmschen und induktiven Spannungsabfälle massgebend. Hieraus kann man schliessen, dass der kurzgeschlossene Transformator mit Gabelschaltung mehr oder weniger im «labilen» Zustand ist. Es kann z. B. vorkommen, dass der Einbau einer oder mehrerer Strommesser im Kurzschlusskreis die Verhältnisse ganz wesentlich ändert. Man muss also zwischen den verschiedenen Bestimmungsgleichungen diejenigen unterscheiden, die die sogenannte erste oder zweite Bedingung und diejenigen, die die dritte Bedingung ausdrücken. Die ersten darf man als streng richtig ansehen, weil sie bloss voraussetzen, dass die Windungszahlen aller Wicklungen stimmen und dass der magnetische Widerstand des Eisenkreises vernachlässigbar klein ist. Dagegen ist immer darauf zu achten, dass die anderen nur mit einer gewissen Annäherung gelten. Es wurde nämlich stillschweigend angenommen, um die Bestimmungsgleichungen aufstellen zu können, dass der Aufbau der 3 Säulen (Distanzierung und Länge der verschiedenen Wicklungen) genau gleich sei. Dies wird aber praktisch nie der Fall sein.

Fall a). Sollen z. B. die theoretischen Ergebnisse des Falles a) erörtert werden, so muss man berücksichtigen, dass die Beziehung (6a) nur annähernd richtig ist. Es ist also $l\varrho + l'\varrho$ nicht streng gleich 0, so dass $\varrho = -\varrho'$ nicht unbedingt verschwindet, aber jedenfalls klein bleibt. Dieser «Reststrom» soll mit τ bezeichnet werden. Die 6 Zinkenströme schreiben sich dann wie folgt:

$$I_{z_I} = -\frac{I}{2\sqrt{3}} \cdot e^{+j \cdot 30} + \tau \qquad I_{z'_I} = -\frac{I}{2\sqrt{3}} \cdot e^{+j \cdot 330} - \tau$$

$$I_{z_{II}} = -\frac{I}{2\sqrt{3}} \cdot e^{+j \cdot 150} + \tau \qquad I_{z'_{II}} = -\frac{I}{2\sqrt{3}} \cdot e^{+j \cdot 90} - \tau$$

$$I_{z_{III}} = -\frac{I}{2\sqrt{3}} \cdot e^{+j \cdot 270} + \tau \qquad I_{z'_{III}} = -\frac{I}{2\sqrt{3}} \cdot e^{+j \cdot 210} - \tau$$

Alle 6 Zinkenströme sind nicht genau gleich und um 60° unter sich verschoben. Die Stielströme sind auch nicht genau $\sqrt{3}$mal grösser. Die Summe der 3 Ströme, die durch die 3 Kurzschlussverbindungen fliessen, ist nicht null, sondern gleich dem 3fachen Reststrom. Es ist ein relativ einfaches Mittel denkbar, um diese Erscheinung zum Verschwinden zu bringen. Wird ein geschlossener Ring aus Dynamoblechen um die 3 Kurzschlussverbindungen angebracht, so wird er, wenn sein Querschnitt ausreicht, zur Folge haben, dass drei EMK in den drei Kurzschlusskreisen so induziert werden, dass die magnetisierenden Ampèrewindungen, d. h. der Strom 3τ verschwindet.

Endlich sei noch erwähnt, dass die Messung des Reststromes τ sehr einfach geschehen kann, indem man mit einem Stabstromwandler die Summe der 3 Kurzschlußströme misst.

Fall b). Für den Fall b) ergibt die Theorie, dass je nach der Wicklungsanordnung alle Stromverhältnisse eintreten können. Dies gilt auch noch, wenn die beiden Zinkenwicklungen symmetrisch gegenüber der primären und der Stielwicklung an-

geordnet sind, was am deutlichsten aus dem Ausdruck des Verhältnisses $\frac{I_{z1}}{I_{z'1}}$ hervorgeht:

$$\frac{I_{z1}}{I_{z'1}} = \frac{-X_{zz} + \alpha^2 X_{sz} + (\alpha - 1)(X_{ps} - X_{pz})}{\alpha^2 X_{zz} - X_{sz} + \alpha(\alpha - 1)(X_{ps} - X_{pz})}$$

Daraus erkennt man, dass nicht nur der Phasenwinkel zwischen I_{z1} und $I_{z'1}$ sehr viel vom Sollwert $\frac{2\pi}{6}$ abweicken kann, sondern dass die Ströme selbst ungleich sein können. Spezialfälle kann man an Hand der obigen Formel erörtern:

Liegen nicht nur die beiden Zinkenwicklungen, sondern auch die Stielwicklung symmetrisch gegenüber der Primärwicklung ($X_{ps} = X_{pz}$), so werden wohl die Ströme I_{z1} und $I_{z'1}$ unter sich gleich aber ihre Phasenverschiebung ist noch beliebig: sie würde nur dann $\frac{2\pi}{6}$ erreichen, wenn die beiden Zinkenwicklungen sehr eng geschachtelt wären.

Sind alle sekundären Wicklungen unter sich sehr eng geschachtelt ($X_{zz} = 0$, $X_{sz} = 0$), so bekommt man gleiche Ströme, aber eine Phasenverschiebung von $\frac{2\pi}{3}$: die Stielströme wären also gleich den Zinkenströmen, statt $\sqrt{3}$mal grösser. Ist aber ausserdem Symmetrie vorhanden, einerseits zwischen primären und Stielwicklung, anderseits zwischen primären und Zinkenwicklungen ($X_{ps} = X_{pz}$), so wird der obige Ausdruck unbestimmt $\left(\frac{0}{0}\right)$. Dies bedeutet praktisch, dass der Betrieb äusserst labil ist. Dieser Fall wird oft bei Mutatortransformatoren mit geringer Gleichstromspannung eintreten.

Endlich ist noch zu bemerken, dass genau wie im Fall a) die beiden Gleichungen (5b) und (6b) nicht streng richtig sind. Dies hat namentlich zur Folge, dass die gegenläufigen Komponenten η und η' praktisch nicht vollständig verschwinden.

Fall c). Die Theorie liefert für den Fall c) genau die gleiche Lösung wie für den Fall b). Berücksichtigt man aber die Tatsache, dass alle die Spannungsabfälle erfassenden Gleichungen im Gegensatz zur anderen keine absolute Genauigkeit besitzen, so darf man gewisse Abweichungen zwischen den beiden Methoden erwarten, denn die Methode b) bedingt nur zwei solche Gelichungen, die Methode c) dagegen drei.

Im Falle c) wird z. B. nicht nur die gegenläufige Komponente, sondern auch die Nullkomponente nicht vollständig verschwinden. Deshalb sollte man jedenfalls die Methode b) der Methode c) bevorzugen.

Fall d). Der Vergleich zwischen den Methoden c) und d) ergibt genau das gleiche Resultat wie der Vergleich zwischen b) und c).

Aus allen diesen Betrachtungen geht hervor, dass die Kurzschlussart nach den 3 Durchmessern zweifellos die beste ist, insofern sie fast ein symmetrisches Sechsphasensystem für die Zinkenströme ergibt. Eine einzige Messung mit Hilfe eines Stabstromwandlers gestattet, diesen Reststrom zu bestimmen. Allerdings können diese Verhältnisse noch dadurch verbessert werden, dass man einen geschlossenen Eisenring um die 3 Kurzschlussverbindungen anbringt.

Alle andern Kurzschlussarten haben den Nachteil, das Verhältnis zweier benachbarten Zinkenströme und ihre gegenseitige Phasenverschiebung je nach den konstruktiven Daten des Transformators festzusetzen.

VI. Die Kupferverluste bei der Kurzschlussmessung.

Da die sekundären Ströme im Kurzschluss sich in einem mehr oder weniger labilen Gleichgewichtszustande befinden, muss man, wenn möglich, davon absehen, Strommesser auf der kurzgeschlossenen Seite einzubauen.

Die Kurzschlussmethode a) braucht diese Strommessung nicht, weil man ohne weiteres annehmen darf, dass die Zinkenströme 2 $\sqrt{3}$mal kleiner und die Stielströme zweimal kleiner als die primären Ströme sind.

Ist eine grössere Genauigkeit erwünscht, so genügt es, nach der angegebenen Methode, den Reststrom τ zu messen, denn man kann mit Hilfe von I und τ alle ohmschen Verluste ausdrücken. Es wird nämlich:

Primäre Verluste $= 3\, R_p\, I^2$

Stielverluste =

$$R_s \cdot (I_{s\,I}^2 + I_{s\,II}^2 + I_{s\,III}^2) = R_s \cdot 3 \cdot \left(\frac{I}{2}\right)^2$$

Zinkenverluste =

$$R_z \cdot (I_{z\,I}^2 + I_{z\,II}^2 + I_{z\,III}^2 + I_{z'\,I}^2 + I_{z'\,II}^2 + I_{z'\,III}^2) =$$

$$R_z \cdot \left[6 \cdot \left(\frac{I}{2\sqrt{3}}\right)^2 + 6 \cdot \tau^2\right] = R_z \cdot 6 \left[\left(\frac{I}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \tau^2\right]$$

Endlich kann man noch durch den früher erwähnten Eisenring den Reststrom τ beträchtlich herabsetzen.

Ueber die zusätzlichen Verluste lässt sich kaum etwas allgemeines sagen. Es besteht aber kein Zweifel, dass die Methode a) mit einem möglichst kleinen Reststrom τ den Verhältnissen am besten angepasst ist, denn die 50periodigen Streufelder, die sich dabei ausbilden, entsprechen am besten denjenigen, die beim Mutatorbetrieb entstehen.

VII. Messergebnisse an Mutatortransformatoren mit Gabelschaltung [4]).

Bei den verschiedenen Arten des Kurzschliessens wurden gleichzeitig alle 6 Zinkenströme und alle 3 Stielströme gemessen. Die Messresultate sind in Tabelle I zusammengefasst, wobei I gleich 100 A

[4]) Um die Unterschiede in den Strömen und die Zusatzverluste im Verhältnis der ohmschen Verluste möglichst drastisch hervortreten zu lassen, sind alle Messungen mit 100 Per./s statt mit den nominalen 50 Per./s, für die die Transformatoren gebaut wurden, ausgeführt. Die Zusatzverluste sind also *ca. 4mal so hoch als bei 50periodiger Messung.*

eingesetzt wurde. Die Sollwerte der verschiedenen Ströme wären also:

$$\frac{100}{2\sqrt{3}} = 28{,}9 \text{ A} \quad \text{für die 6 Zinken}$$

und

$$\frac{100}{2} = 50 \text{ A} \quad \text{für die 3 Stiele.}$$

Im Kurzschluss gemessene Stromwerte.

Transformator I: Gleichstromseite: 550 V, 1100 A.
Transformator II: Gleichstromseite: 20 000 V, 31 A.

Tabelle I.

	Kurzschlussart	Zinkenströme						Stielströme		
		$I_{z\,I}$	$I_{z\,II}$	$I_{z\,III}$	$I_{z'I}$	$I_{z'II}$	$I_{z'III}$	$I_{s\,I}$	$I_{s\,II}$	$I_{s\,III}$
Transformator I	a	29,3	26,5	30,1	26,2	30,1	29,6	49,5	49,9	49,2
	a m. Eisenring	28,8	27,6	28,6	27,6	29,0	29,0	50,1	50,4	49,5
	b	20,0	22,4	20,7	36,2	36,5	39,6	46,3	43,7	42,7
	c	20,6	20,4	22,2	35,3	38,0	40,0	46,5	44,5	42,6
	d	20,0	21,3	20,8	35,4	37,3	41,9	49,0	44,5	41,7
Transformator II	a	30,8	29,9	31,1	30,1	30,7	30,6	52,4	52,7	52,7
	b	34,3	34,8	34,6	32,0	32,5	31,8	36,8	37,8	38,4
	c	34,5	34,8	34,5	32,2	32,4	31,9	36,7	37,7	38,3
	d	38,5	35,0	34,0	31,8	37,2	31,8	36,8	37,6	38,0

Hieraus geht zunächst deutlich hervor, in welchem Masse die Kurzschlussmethode a) allen anderen überlegen ist. Die Zinkenströme schwanken nämlich bei allen Messungen nach a) zwischen 26,5 A und 31,1 A, bei allen andern Messungen aber zwischen 20,0 A und 38,5 A. (Sollwert = 28,9 A.) Für die Stielströme betragen die obern und untern Grenzen ebenfalls 49,2 A und 52,7 A bei der Methode a), dagegen 36,7 A und 49 A bei allen andern Methoden (Sollwert = 50 A). Auch der günstige Einfluss des Eisenringes ist auffallend, insofern, als er die grösste Differenz zwischen den verschiedenen Zinkenströmen von 3,9 auf 1,4 herabgesetzt hat. Dabei ist zu bemerken, dass es sich um einen Transformator mit relativ tiefer sekundärer Spannung handelte (Gleichstromseite 550 V, 1100 A), bei welchem der Gleichgewichtszustand der Ströme ganz besonders labil war. Der Querschnitt des Eisenringes betrug nur 40 cm². Endlich ist zu bemerken, dass für ein und denselben Transformator die 3 Methoden b) c) d) keinen nennenswerten Unterschied ergeben, dass sie aber je nach dem Transformator und dessen Wicklungsanordnung zu ganz verschiedenen Stromverhältnissen führen. Diese Feststellungen sind ganz in Uebereinstimmung mit der Theorie.

Es kann noch von Interesse sein, die berechneten Stromwerte mit den gemessenen zu vergleichen.

Beim Transformator II ergibt die Rechnung folgende Werte für die Streureaktanzen

$$X_{ps} = 15\,\%, X_{pz} = 18\,\%, X_{sz} = 23{,}9\,\%, X_{zz} = 34{,}4\,\%$$

wobei die beiden Zinkenwicklungen symmetrisch gegenüber der primären und der Stielwicklung liegen.

Die Formeln (8) ergeben, wenn man obige Werte für die Reaktanzen und $I = 100$ einsetzt:

$$I_{z_I} = -35{,}6 \cdot e^{-j \cdot 50} \qquad I_{z'_I} = -35{,}6 \cdot e^{+j \cdot 50}$$

Die Berechnung von I_{s_I} geschieht auch unmittelbar

$$I_{s_I} = -I_{z_{II}} - I_{z'_{III}} = -\alpha I_{z_I} - \alpha^2 I_{z'_I} = -29{,}0 \cdot e^{j \cdot 0}$$

Man bekommt also eine gute Uebereinstimmung mit den Messwerten.

Die Kupferverluste wurden bei diesen Versuchen [5]) gemessen. Gleichzeitig wurden auch an Hand der Strom- und Widerstandsmessungen die ohmschen Verluste bestimmt. Nach Abzug der ohmschen Verluste bekam man die zusätzlichen Verluste. Diese Messresultate sind in Tabelle II zusammengestellt, wobei die sich aus den Stromsollwerten ergebenden ohmschen Verluste mit 100 bezeichnet sind.

Im Kurzschluss gemessene Kupferverluste.

Tabelle II.

	Kurzschlussart	Ohmsche Verluste	Zusätzliche Verluste
Transformator I	a	97,0	33,8
	a mit Eisenring	97,0	30,6
	b	96,2	34,6
	c	96,3	35,2
	d	97,0	36,7
Transformator II	a	97,8	7,85
	b	91,2	5,55
	c	91,2	4,19
	d	91,0	3,70

Beim Transformator I, der relativ grosse zusätzliche Verluste aufweist, sind die ohmschen und die zusätzlichen Verluste ziemlich unabhängig von der Kurzschlussart.

Beim Transformator II, dessen zusätzliche Verluste fast vernachlässigbar klein sind, sind dagegen die ohmschen Verluste je nach der Kurzschlussart verschieden. Man sieht sofort die Fehler, welche man begehen würde, wenn man nicht die richtige Kurzschlussmethode wählte: z. B. im Fall d) würde man für die gesamten Verluste einen kleineren Wert (91,0 + 3,7 = 94,7) bekommen als der Sollwert der ohmschen Verluste (100)!

VIII. Die Kurzschlussmessungen an Mutatorentransformatoren im allgemeinen.

Die Betrachtung der Kurzschlussmessungen an Mutatortransformatoren mit sechsphasiger Gabelschaltung führte zum Schlusse, dass die Kurzschlussmethode, nach welcher man die im Spannungsdiagramm entgegengesetzten Klemmen zusammen verbindet, zweifellos die beste ist. Der Grund liegt offenbar darin, dass sie nicht unnötig viele Kurzschlussverbindungen erfordert und dass sie gleichzeitig gewisse symmetrische Bedingungen erfüllt. Diese Eigenschaften gelten aber natürlich nicht nur

[5]) Siehe Fussnote 4.

für die sechsphasige Gabelschaltung, sondern sind ganz allgemein.

Zum Beispiel bekommt man zwangsläufig bei sechsphasiger Doppel-Sternschaltung genau gleiche Ströme und genau gleiche Phasenverschiebungen, wenn man nach 3 Durchmessern kurzschliesst. Schliesst man dagegen beide Sterne für sich kurz, so ist man noch von den Streuungsverhältnissen abhängig. Erst dann, wenn die beiden Drehstromwicklungen ganz symmetrisch angeordnet sind, wird eine vollkommene Symmetrie verwirklicht.

Bei zwölfphasiger Gabelschaltung kann man beim Kurzschliessen nach 6 Durchmessern keine zwangsläufige vollständige Symmetrie erreichen. Dabei spielen die Streuungsverhältnisse auch eine massgebende Rolle. Aber es ist auch in diesem Fall leicht einzusehen, dass die obige Kurzschlussmethode immerhin die besten Resultate ergibt.

Ueber den beschränkten Wert von Reservestufen an Stufentransformatoren von Einphasen-Triebfahrzeugen zur Kompensierung des Spannungsabfalles der Fahrleitung.

Von *W. Duerler*, Agno.

621.314.214 : 621.335

Der Verfasser zeigt zunächst am Beispiel einer einseitig gespeisten Bahnstrecke, betrieben mit 15 000 V Einphasenwechselstrom, mit etwas knapp bemessener Fahrleitung, an Hand des aufgestellten Vektordiagramms, wie trotz der Möglichkeit der Stufenregulierung der Triebfahrzeuge der Spannungsabfall in der Fahrleitung die Fahrgeschwindigkeit nicht unerheblich beeinflusst. Sodann werden die Verhältnisse analytisch untersucht, wobei nachgewiesen wird, dass es eine Höchstgeschwindigkeit gibt, die bei einem bestimmten Zugsgewicht nicht überschritten werden kann, wie weit auch der Führer seinen Regulierhebel am Kontroller auslegt. Aus der Untersuchung wird der Schluss gezogen, dass, wo ähnliche Verhältnisse vorliegen, es für den projektierenden Elektroingenieur wie auch für das technische Betriebspersonal einer Bahn von Wert sein dürfte, sich mit den erläuterten Beziehungen vertraut zu machen. Speziell wird empfohlen, die Führer von Triebfahrzeugen dahin zu instruieren, dass bei allzustarkem Eingriff in die selbsttätige Regulierung des Einphasenseriemotors durch Stufenzuschalten bei starkem Spannungsabfall an der Fahrleitung die Verhältnisse an der Leitung nur noch verschlimmert und zudem die Belastungsspitzen des Netzes erhöht werden. Bei Neuanschaffungen wird empfohlen, von Fall zu Fall zu untersuchen, ob und wie weit Reservestufen, die die Gewichte von Triebfahrzeugen erhöhen und darum auch den Preis ungünstig beeinflussen, überhaupt von Wert sind. Zum Schluss wird noch auf einen Fall hingewiesen, wo Reservestufen am Platze sein dürften.

Partant de l'exemple d'un tronçon monophasé à 15 000 V, à alimentation simple, dont la section du fil de contact est un peu juste, l'auteur démontre à l'aide du diagramme vectoriel que, malgré le réglage par touche utilisé sur les locomotives, la chute de tension dans la ligne de contact exerce une influence sensible sur la vitesse. Il examine ensuite les conditions analytiquement et prouve l'existence d'une vitesse maximum qui ne peut être dépassée pour un tonnage donné, quelle que soit la position de la manette de commande. Il en conclut que, dans des conditions semblables, tant l'ingénieur chargé de dresser un projet que le personnel technique d'exploitation ont intérêt à se familiariser avec les relations établies. Il recommande spécialement d'inculquer aux mécaniciens de locomotives qu'une immixtion intempestive dans le règlage automatique du moteur série monophasé par l'adjonction de nouvelles touches, ne fait qu'empirer les conditions dans la ligne lorsque la chute de tension dans celle-ci est déjà forte, et augmente en outre les pointes de charge du réseau d'alimentation. Lors de l'achat de nouvelles locomotives il sera indiqué d'étudier dans chaque cas si et jusqu'à quel point l'adjonction de touches de réserve, qui augmentent le poids des véhicules et en influencent défavorablement le prix, est justifiée. Finalement, l'auteur signale encore un cas où des touches de réserve semblent indiquées.

Beim Bau von Einphasentriebfahrzeugen war es bei uns von den ersten Anfängen an üblich geworden, am Haupttransformator neben den nötigen Regulierstufen für das Anfahren und normale Fahren noch einige Reservestufen vorzusehen, um bei etwaigem starkem Spannungsabfall an der Fahrleitung den Motoren doch ihre normale Spannung zuführen zu können, wodurch die Einhaltung der Fahrzeiten des Fahrplanes erleichtert werden sollte.

Dass das gesteckte Ziel dabei aber nur in beschränktem Masse erreicht werden kann und dass besonders dort, wo es sich nicht um grössere Netze handelt, also der einzelne Zug selbst den Spannungsabfall bedingt, dieser Eingriff in die selbsttätige Regulierung des Seriemotors infolge der Vergrösserung des Spannungsabfalles sehr oft den gegenteiligen Effekt zur Folge hat, soll hier an einem Beispiel, das in der Praxis bei Nebenbahnen vorkommen kann, erläutert werden:

Es handle sich um eine bergwärtsführende eingleisige Bahnlinie mit folgenden Daten:

Spurweite: Normalspur.
Schienengewicht: 46 kg/m.
Fahrleitung (ohne eine parallel geführte Speiseleitung): Gesamtquerschnitt 112 mm².
Grösste Steigung: 50 ‰ auf lange Strecken.
Stromart: Einphasenwechselstrom 15 000 V, 16⅔ Hertz.
Speisung der Strecke: einseitig am untern Endpunkt.
Grösstes vorkommendes Zugsgewicht: 2 Lokomotiven von je 128 t mit 420 t Anhängelast, also *insgesamt 676 t.*

Die ungünstigste Zugslage für die genannte Strecke soll sich ergeben, wenn der schwere Zug in einer Entfernung von 30 km vom Speisepunkt sich auf der Steigung von 50 ‰ befindet.

Unter der vorläufigen Schätzung, dass bei dieser Belastung der Spannungsabfall an den Stromabnehmern etwa 17 % betrage, was nachher noch an Hand eines Diagrammes zu kontrollieren sein wird, sei zunächst als *Fall A)* angenommen, dass die beiden Lokomotivführer sich noch *keiner Reservestufen* bedienen, also beide etwa auf der 10. Stufe fahren und dass zufolge des Spannungsabfalles an den Stromabnehmern die Fahrgeschwindigkeit, die bei normaler Spannung auf dieser Steigung 40 km/h betrage, auf 34 km/h falle.