Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 11 (1920)

Heft: 2

Artikel: Eine neue Schaltung zur Umformung von Zweiphasen- in Dreiphasen-Wechselstrom und umgekehrt

Autor: Sachs, K.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1061787

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: 13.12.2025

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

SCHWEIZ. ELEKTROTECHNISCHER VEREIN

BULLETIN

ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

Erscheint monatlich mit den Jahres-Beilagen „Statistik der Starkstromanlagen der Schweiz" sowie „Jahresheft" und wird unter Mitwirkung einer vom Vorstand des S. E. V. ernannten Redaktionskommission herausgegeben.

Alle den Inhalt des „Bulletin" betreffenden Zuschriften sind zu richten an das

Generalsekretariat
des Schweiz. Elektrotechnischen Vereins,
Neumühlequai 12, Zürich 1 - Telephon: Hottingen 37.08

Alle Zuschriften betreffend Abonnement, Expedition und Inserate sind zu richten an den Verlag:

Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei A.-G.,
Hirschengraben 80/82 Zürich 1 Telephon Hottingen 36.40

Publié sous la direction d'une Commission de Rédaction nommée par le Comité de l'A. S. E.

Ce bulletin paraît mensuellement et comporte comme annexes annuelles la „Statistique des installations électriques à fort courant de la Suisse", ainsi que l'„Annuaire".

Prière d'adresser toutes les communications concernant la matière du „Bulletin" au

Secrétariat général
de l'Association Suisse des Electriciens
Neumühlequai 12, Zurich 1 - Telephon: Hottingen 37.08

Toutes les correspondances concernant les abonnements, l'expédition et les annonces, doivent être adressées à l'éditeur:

Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei S. A.
Hirschengraben 80/82 Zurich 1 Téléphone Hottingen 36.40

Abonnementspreis
für Nichtmitglieder inklusive Jahresheft:
Schweiz Fr. 15.—, Ausland Fr. 25.—.
Einzelne Nummern vom Verlage Fr. 1.50 plus Porto.

Prix de l'abonnement annuel (gratuit pour les membres de l'A. S. E.), y compris l'Annuaire Fr. 15.—
pour la Suisse, Fr. 25.— pour l'étranger.
L'éditeur fournit des numéros isolés à Fr. 1.50, port en plus.

XI. Jahrgang
XIe Année

Bulletin No. 2

Februar
Février 1920

Eine neue Schaltung zur Umformung von Zweiphasen- in Dreiphasen-Wechselstrom und umgekehrt.

Von Dr. *K. Sachs*, Baden.

Zur Umformung von verketteten oder unverketteten Zweiphasenstrom in dreiphasigen Wechselstrom und umgekehrt bediente man sich bis vor kurzem der unter dem Namen der Scott-Schaltung bekannten Anordnung, wobei zwei Einphasen-Transformatoren beispielsweise mit ihrer Primärwicklung je an den Klemmen des Zweiphasennetzes liegen, während die Sekundärwicklungen im Windungszahlverhältnis $1 : \sqrt{\frac{3}{4}}$ so miteinander verbunden sind, dass an drei verbleibenden Enden symmetrische Dreiphasenspannungen abgenommen werden können. Der Scott-Schaltung haften nun eine Reihe von Mängeln an. Wohl sind im Leerlauf die Spannungen auf der Drehstromseite gleich und bilden ein symmetrisches Dreiphasensystem, bei Belastung aber sind die drei Phasen hinsichtlich Spannungsabfall nicht gleichwertig, sodass sich einseitige Belastungen in sehr unangenehmer Weise fühlbar machen können. Besonders aber ist es die Notwendigkeit *zwei* Transformatoren, also *zwei* Apparate zur Umformung verwenden zu müssen, deren Einzelleistungen zusammen grösser sind als die Leistungen der ganzen Gruppe, die die Anordnung zu einer recht komplizierten und vor allem unverhältnismässig teuren machen. Es lag daher das Bestreben nahe, die Umformung statt in zwei Einphasen-Transformatoren in *einem Dreiphasen-Transformator* vor sich gehen zu lassen. Diese Aufgabe löst der Zweiphasen-Dreiphasen-Transformator der Gesellschaft für Elektrische Industrie A.-G. in Weiz [1]) mittels eines passend bewickelten Eisengestelles, dessen mittlerer Säulenquerschnitt im Verhältnis $\sqrt{2} : 1$ grösser ist als der der beiden äusseren Säulen. Dieser Transformator ist also in seinem ganzen Aufbau ein Spezialtransformator, der sich mit seinen ungleichen Säulen, seinen auf verschiedenen Wicklungsdornen hergestellten Spulenzylindern nicht in die Normalfabrikation einfügen kann und sich

[1]) E. u. M. 1911, S. 487 f.

deshalb in der Herstellung kaum billiger stellen dürfte als die zwei Einphasen-Transformatoren der Scott-Gruppe. Er stellt für das vorliegende Problem wohl eine technisch wissenschaftlich nicht aber auch eine kommerziell und fabrikatorisch befriedigende Lösung dar. Die erste brauchbare Schaltung eines *normalen* Dreiphasen-Transformators zur Umformung von Dreiphasen- in Zweiphasenstrom haben wohl die *Bergmannwerke* in ihrem D. R. P. 231 443 angegeben. Gleichzeitig hat *F. Stern* einige Schaltungen veröffentlicht,[1]) die gleichfalls unter Verwendung eines normalen dreisäuligen Gestells denselben Zweck mit Hilfe von Kombinationen der Zickzackschaltung erreichen.

Im folgenden soll nun eine einfache Anordnung beschrieben werden, die Herr Obering. *J. Kübler* angegeben hat[2]) und die neben dem Vorteil grösserer Einfachheit namentlich hinsichtlich ihrer Umschaltmöglichkeiten von Interesse ist. Fig. 1 zeigt das prinzipielle Schema für die Umformung von Dreiphasenstrom in *verketteten* Zweiphasenstrom und umgekehrt und zwar in der üblichen Darstellungsweise, wobei die einzelnen Wicklungen in Richtung der in ihnen induzierten *EMK*fte aufgetragen erscheinen. Gezeichnet ist nur die sekundäre Wicklung, die bei Speisung der (in der Figur weggelassenen) dreiphasig in Stern oder Dreieck geschalteten Primärwicklung, an den Klemmen U, V, (XY) die Abnahme von verkettetem Zweiphasenstrom gestattet. Eine Säule des Transformators trägt die zwischen $U' - (XY)$,

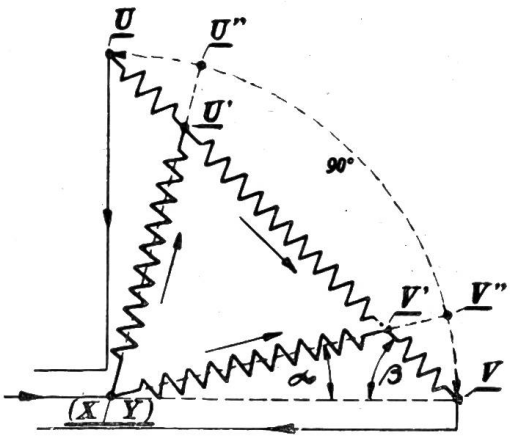

Fig. 1.

eine andere die zwischen $V' - (XY)$ und die dritte die zwischen $U - U'$, $U' - V'$ und $V' - V$ liegenden Windungen. Ist nun w_2 die Windungszahl zwischen $U' - V'$, $(XY) - V'$, $(XY) - U'$, so werden bei primär dreiphasiger Speisung in den Wicklungen $U' - V'$, $(XY) - V'$, $(XY) - U'$ gleiche und unter 120^0 phasenverschonene Spannungen induziert, deren Effektivwert E sein möge. Sollen nun an den Klemmen (XY), V bezw. (XY), U die Spannungen E_2 unter einer gegenseitigen Phasenverschiebung von 90^0 als Phasenspannungen im verketteten Zweiphasensystem auftreten, so muss offenbar die Wicklung $U' - V'$ auf der dritten Säule beidseitig über die Anschlusspunkte U' und V' hinaus, bis U bezw. V bewickelt werden, bis $\sphericalangle \beta = 45^0$. Dann ist aber $\sphericalangle \alpha = 15^0$ und die Windungszahl zwischen V' und V

$$w_2' = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} w_2 = \frac{\sin 15^0}{\sin 45^0} w_2$$

oder die Gesamtwindungszahl zwischen $U - V = w_2 \sqrt{3}$ und damit $w_2' = \frac{\sqrt{3} - 1}{2} w_2$

Analog ist offenbar $E_2 = E \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}}$. Es ist nun weiters festzustellen, von welchen Strömen die einzelnen Wicklungselemente durchflossen werden. Da, wie wir gesehen haben, (XY), U, V zu den Klemmen des Zweiphasensystems mit (XY) als Verkettungspunkt werden, fliesst bei (XY) der verkettete Zweiphasenstrom $I_2 \sqrt{2}$ zu, der bei den Klemmen U und V in der Stärke I_2 (Effektivwert) als abfliessend angenommen werden kann. Damit ist aber die Stromverteilung schon festgelegt. $U - U'$ und $V - V'$ werden gleichfalls vom Strom I durchflossen, während I_2' und I_2'' gegeneinander um 60^0 phasenverschoben und einander gleich sich geometrisch zum Strom $I_2 \sqrt{2}$ addieren. Es ist daher $I_2' = I_2'' = I_2 \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$

Man wäre auf den ersten Blick versucht, anzunehmen, die Wicklung $U' - V'$ sei stromlos und könnte daher ebensogut weggelassen werden. Dem ist aber nicht so. Soll die Drei-

[1]) Helios (Export-Zeitschrift f. Elektrotechnik) 1911, S. 2199 f.

[2]) Schweiz. Patent No. 82 681.

phasenleistung symmetrisch und balanziert auf die Zweiphasenseite und umgekehrt übertragen werden, so muss zur Aufrechterhaltung des magnetischen Gleichgewichtes die Grösse der effektiven Ampèrewindungen pro Säule unter allen Umständen gleich und identisch sein, selbstredend unter Voraussetzung des streuungs- und widerstandsfreien Transformators. Ist $i_3\, w_3$ die Ampèrewindungszahl pro Phase auf der Drehstromseite, so lautet die Bestimmungsgleichung für die Grösse von I_2''' unter Berücksichtigung, dass der Strom I_2 in $U - U'$ gegen I_2 in $V - V'$ um 90^0 phasenverschoben ist:

$$i_3\, w_3 + I'_2\, w_2 = i_3\, w_3 + I'''_2\, w_2 + \frac{2}{\sqrt{2}}\, I_2\, \frac{\sqrt{3}-1}{2}\, w_2 \tag{1}$$

$$I'''_2 = \frac{\sqrt{3}-1}{\sqrt{6}}\, I_2 = \sim 0{,}3\, I_2 \tag{2}$$

$U' - V'$ hat also die Rolle einer Ausgleichswicklung, deren Ampèrewindungen die symmetrische Umformung von Dreiphasen- in Zweiphasenstrom und umgekehrt erst ermöglichen.

Es bleibt nun noch die Frage zu beantworten, welches dreiphasige Normal-Modell (Eisengestell) in unserem Fall für eine bestimmte sekundäre Drehstromleistung in *kVA* zu wählen ist. Massgebend hierfür ist die Grösse der Verluste bei Bewicklung des dreisäuligen Gestells als Zweiphasen-Dreiphasen-Transformator. Im ersteren Falle sind die Kupferverluste, wenn r_2 den Ohmschen Widerstand der w_2 Windungen zwischen $(XY) - U'$ oder $(XY) - V'$, r_3 den der sekundären Drehstromwicklung pro Phase bedeutet, in den beiden gleichwertigen Schenkeln $(XY) - U'$ oder $(XY) - V'$ je

$$\frac{2}{3}\, I_2^2\, r_2 + i_3^2\, r_3^2 = \frac{4}{3}\, I_2^2\, r_2 \tag{3}$$

und in dem die Wicklungen $U - U'$, $U' - V'$ und $V' - V$ tragenden Schenkel mit den Ohmschen Widerständen r'_2, r_2''' und $r_2'' = r_2'$

$$W_{23} = I_2^2\, r_2' + I_2'''^2\, r_2''' + I_2^2\, r_2' + i_3^2\, r_3$$

Nun ist offenbar

$$r_2 : r_2' = \frac{w_2}{I_2}\, \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} : w_2\, \frac{\sqrt{3}-1}{2}\, \frac{1}{I_2}$$

und damit

$$r_2' = r_2'' = r_2\, \frac{\sqrt{3}-1}{2}\, \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = \frac{\sqrt{3}-1}{\sqrt{6}}\, r_2 \tag{4}$$

ferner ist

$$r_2''' : r_2 = I_2\, \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} : I_2\, \frac{\sqrt{3}-1}{\sqrt{6}}$$

und

$$r_2''' = r_2\, \frac{2}{\sqrt{3}-1} \tag{5}$$

Es sind daher die Kupferverluste im 3. Schenkel unter Berücksichtigung der Gleichungen (3) (4) und (5):

$$W_{23} = I_2^2\, r_2\, \frac{2 + (\sqrt{3}-1)(\sqrt{6}+1)}{3} \tag{6}$$

also im Verhältnis $\frac{2 + (\sqrt{3}-1)(\sqrt{6}+1)}{4} = 1{,}13$ grösser als in jedem der beiden anderen Schenkel. Die Kupferverluste in diesem dritten Schenkel entsprechen also gewissermassen einem $\sqrt{1{,}13} = 1{,}07$ fach grösseren Strom d. h. auch einer um 7% grösseren

Leistung. Soll also eine gegebene Leistung von A kVA in vorliegender Schaltung von Zweiphasenstrom in Dreiphasenstrom umgeformt werden, so ist aus der Liste der normalen Drehstromtransformatoren ein Modell von 1,07 A d. h. wohl im allgemeinen die nächst grössere Type zu wählen. Ist deren Listenleistung A_n, so kann sie als Umformertype bis zu einer Leistung von $\frac{1}{1{,}07} A_n = 0{,}935\ A_n$ verwendet werden, wobei die Kupferverluste der Leistung A_n entsprechen.

Die den Gleichungen (3), (4) und (5) zugrunde liegende Voraussetzung der Proportion zwischen den Ohmschen Widerständen primär und sekundär und den zugehörigen Windungszahlen, ist bei Scheibenwicklung mit gleicher mittlerer Windungslänge ohne weiteres, bei Röhrenspulen dann erfüllt, wenn die spezifische Strombelastung mit wachsender Windungslänge abnimmt.

Die beschriebene Anordnung gestattet noch eine interessante Umschaltmöglichkeit, die aus folgenden Gründen von Bedeutung ist.

Bei den in den neunziger Jahren des letzten, und den ersten Jahren dieses Jahrhunderts, namentlich in der Schweiz und in Oesterreich gebauten Zweiphasen-Zentralen mit zwei- oder dreiphasigem Sekundärnetz, denen häufig eine Frequenz von 40 zugrunde gelegt wurde, macht sich mit der Steigerung der angeschlossenen Leistung das Bedürfnis nach späterer Verbindung mit den staatlichen oder privaten 50 periodigen Dreiphasen-Ueberlandnetzen geltend. Die das dreiphasige Sekundärnetz speisenden Transformator-Gruppen in Scott-Schaltung können bei späterem primären Anschluss an das Dreiphasen-Ueberlandnetz erst nach vollständiger Umwicklung und unter Hinzufügen eines dritten Einphasentransformators wieder Verwendung finden. Bei dem Transformator nach der beschriebenen Schaltung ist nun der Uebergang von primär Zweiphasen-Anschluss zu Dreiphasen-Anschluss bei gleichzeitiger Erhöhung von 40 auf 50 Perioden und gleichbleibender Sekundärspannung durch eine einfache Umschaltung möglich, die durch jedermann an Ort und Stelle durchgeführt werden kann. Bewickelt man nämlich die die Wicklungen $U' - (XY)$ und $V' - (XY)$ tragenden Schenkel über U' und V' hinaus bis U'' bezw. V'' (Fig. 2) und schaltet weiter zwischen U'' und V'' die auf der dritten Säule zwischen $U - V$ liegenden Wicklungen (Fig. 1) unter Lösung der Verbindungen bei U' und V' so, dass das mit U bezeichnete Wicklungsende mit U'', das mit V bezeichnete Wicklungsende mit V'' zusammenfällt (Fig. 2) und zwischen die nun freien Enden die in zwei parallele Gruppen geschaltete Wicklung U' V' zu liegen kommt, so entsteht ein fast genau gleichseitiges Wicklungs- und damit Spannungsdreieck (Fig. 3), in dem jetzt

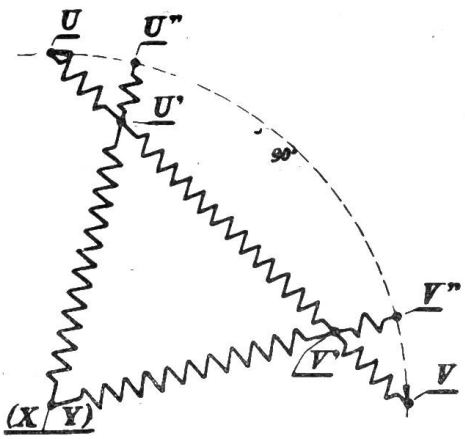

Fig. 2.

$$[(XY) - U''] = [(XY) - V''] = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}}\ w_2 = 1{,}225\ w_2 = \sim \frac{50}{40}\ w_2 = \sim E_3 \qquad (7)$$

$$[U'' - V''] = \frac{1}{2}\ w_2 + w_2(\sqrt{3} - 1) = w_2(\sqrt{3} - {}^1/_2) = 1{,}232\ w_2 = \sim \frac{50}{40}\ w_2 = \sim E_3 \qquad (8)$$

Der Transformator ist also bei Anschluss an ein 50 periodiges Dreiphasennetz, dessen Spannung im Verhältnis von $\frac{50}{40}$ grösser ist als die Phasenspannung des alten Zweiphasenprimärnetzes wieder gleich gesättigt. Die für konstante Sekundärspannung notwendig werdende Reduktion der Sekundärwindungszahl im Verhältnis $\frac{40}{50}$ wird man zweckmässigerweise folgendermassen vornehmen. Man wird die Sekundärwindungszahl w_3 von vornherein

zusammensetzten aus $\frac{4}{5}\,w_3$ Windungen mit dem vollen Leiterquerschnitt entsprechend i_3 Ampère und vier parallelen Gruppen bestehend aus je $\frac{1}{5}\,w_3$ Windungen mit einem Leiterquerschnitt entsprechend einem Strom von $\frac{i_3}{4}$. Beim Uebergang auf 50 periodigen Betrieb werden die vier Gruppen mit je $\frac{1}{5}\,w_3$ in Serie und mit den $\frac{4}{5}\,w_3$ Windungen parallel geschaltet. War r_3 der Ohmsche Widerstand pro Phase für die Wicklungskombination für 40 Perioden, so ist nach Umschaltung in der angegebenen Weise bei 50 Perioden der Ohmsche Widerstand r_3' offenbar gleich $\frac{16}{25}\,r_3$.

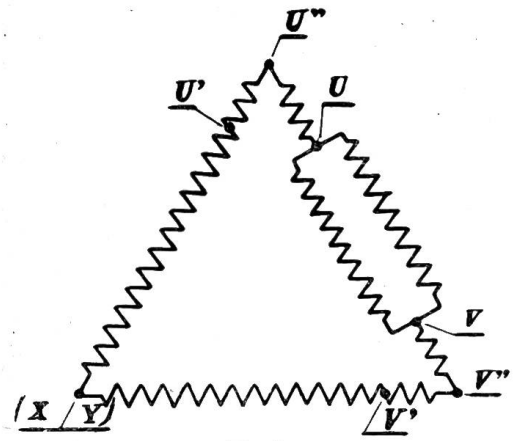

Fig. 3.

Wie verhalten sich nun die Kupferverluste beim Zweiphasenbetrieb und späteren Anschluss an das Dreiphasennetz? Beim Zweiphasenbetrieb mit der Spannung E_2 pro Phase waren die Kupferverluste nach den Gleichungen (3) und (6):

$$\Sigma W_2 = \frac{8}{3}\,I_2^2\,r_2 + I_2^2\,r_2\,\frac{2+(\sqrt{3}-1)(\sqrt{6}+1)}{3}$$

Nach erfolgter Umschaltung entsprechend Fig. 3 werde derselbe Transformator an ein Dreiphasennetz mit der Spannung E_3 angeschlossen, wobei $E_3 = \frac{50}{40}\,E_2$.

Ferner sei angenommen, dass die Wicklungen $U' - U''$ und $V' - V''$ mit demselben Leiterquerschnitt ausgeführt seien, wie die Wicklungen $(XY) - U'$ und $(XY) - V'$. Bei gleichmässiger Belastung der drei Phasen werden diese nunmehr vom Strom I_3 durchflossen, der in der Wicklung $(XY) - U''$ und $(XY) - V''$ je folgende Verluste erzeugt:

$$W_{3_1} = W_{3_2} = I_3^2\,r_2 + I_3^2\,r_2\left(\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} - 1\right) + i'^2_3\,r_3' \tag{9}$$

Dabei ist I_3 der Primärstrom pro Phase, i_3' der Sekundärstrom pro Phase. i_3' ergibt sich aus der Gleichheit der Ampèrewindungen primär und sekundär. Es ist

$$I_3\left[w_2 + w_2\left(\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} - 1\right)\right] = i_3'\,\frac{40}{50}\,w_3$$

und daraus

$$i_3' = \frac{5}{4}\,\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}}\,\frac{w_2}{w_3}\,I_3 = \sim 1\cdot 53\,I_3\,\frac{w_2}{w_3} \tag{10}$$

Nur war aber bei primärem Zweiphasenanschluss nach Gleichung (3)

$$i_3^2\,r_3 = \frac{2}{3}\,I_2^2\,r_2 \tag{11}$$

und ferner nach dem Prinzip der Gleichheit der Ampèrewindungen

$$i_3\,w_3 = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}\,I_2\,w_2 \tag{12}$$

Damit schreibt sich Gleichung (10)

$$i_3' = \frac{5}{4}\,\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}}\,\frac{I_3}{I_2}\,\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}}\,i_3 = \frac{15}{8}\,\frac{I_3}{I_2}\,i_3 \tag{13}$$

und Gleichung (13) in (9) eingesetzt ergibt

$$W_{31} = W_{32} = I_3^2 r_2 \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} + \frac{9}{4} \frac{I_3^2}{I_2^2} i_3^2 r_3$$

oder mit Benützung von Gleichung (11)

$$W_{31} = W_{32} = I_3^2 r_2 \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} + \frac{3}{2} I_3^2 r_2 = I_3^2 r_2 \frac{\sqrt{6}+3}{2} = \sim 2{,}72\, I_3^2 r_2 \qquad (14)$$

Sollen also die Kupferverluste der Säule $(XY) - U'$ oder $(XY) - V'$ beim Zweiphasenbetrieb (Fig. 1) gleich sein den Kupferverlusten der Säule $(XY) - U''$ oder $(XY) - V''$ beim Dreiphasenbetrieb (Fig. 3), dann kann

$$\frac{4}{3} I_2^2 r_2 = \frac{\sqrt{6}+3}{2} I_3^2 r_2$$

und damit

$$I_3 = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{3(\sqrt{6}+3)}} I_2 = \sim 0{,}699\, I_2 \qquad (15)$$

sein. Die Kupferverluste in der dritten Säule (Wicklung $U'' - V''$) sind bei Dreiphasenbetrieb (Fig. 3) unter Benützung der früheren Bezeichnungen:

$$W_{33} = 2 I_3^2 r'_2 + I_3^2 \frac{r_2'''}{4} + i_3'^2 r_3' = 2 I_3^2 r_2 \frac{\sqrt{3}-1}{\sqrt{6}} + I_3^2 r_2 \frac{1}{2(\sqrt{3}-1)} + \frac{3}{2} I_3^2 r_2$$

$$= 2{,}78\, I_3^2 r_2 \qquad (16)$$

Gleichheit der Verluste beim Zweiphasen- und Dreiphasenbetrieb ergibt für die dritte Säule ($U'' - V''$ in Fig. 3) nach den Gleichungen (6) und (16)

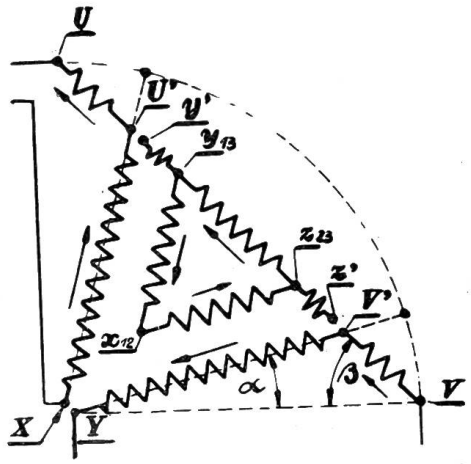

Fig. 4.

$$I_2^2 r_2 \frac{2 + (\sqrt{3}-1)(\sqrt{6}+1)}{3} = 2{,}78\, I_3^2 r_2$$

$$I_3 = I_2 \sqrt{\frac{1{,}5}{2{,}78}} = \sim 0{,}728\, I_2 \qquad (17)$$

Die beiden anderen Säulen mit dem maximal zulässigen Dreiphasenstrom nach Gleichung (15 sind also für die maximale Drehstromleistung bei 50 Perioden, wobei $E_3 = \frac{50}{40} E_2$, massgebend. Diese ergibt sich demnach zu:

$$3\, E_3 I_3 = 3 \frac{50}{40} E_2 \cdot 0{,}699\, I_2 = 1{,}3\,(2\, E_2 I_2) \qquad (18)$$

also zu 30 % grösser als bei 40 periodigem Zweiphasenbetrieb.

In einer etwas abweichenden Weise erfolgt die Umformung von *unverketteten Zweiphasenstrom* in Dreiphasenstrom und umgekehrt (Fig. 4). Der Verkettungspunkt bei XY wird aufgeschnitten und die eine Phase des Zweiphasensystems bei $U - X$, die andere bei $Y - V$ angeschlossen. Ist E_2 die Spannung pro Phase, dann werden bei der Uebertragungsleistung A in kVA die Wicklungsteile $U - U'$, $U' - X$, $Y - V'$, und $V' - V$ vom gleichen Strom $I_2 = \frac{1000\, A}{2\, E_2}$ durchflossen, dessen Richtung für einen gegebenen Zeitmoment in Fig. 4 eingetragen erscheint.

Ist wieder w_2 die Windungszahl zwischen $U' - X$ bezw. $V' - Y$, dann muss wieder analog den früheren Darlegungen in Uebereinstimmung mit Fig. 1 w_2' die Windungszahl zwischen $U - U'$ bezw. $V' - V$ gleich sein:

$$w_2' = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \; ; \; w_2 = \frac{\sqrt{3} - 1}{2} \, w_2$$

Die vom zugeführten Zweiphasenstrom auf den einzelnen Schenkeln erzeugten effektiven Ampèrewindungen sind dann zwischen $U' - X$ bezw. $V' - Y$ je $I_2 \, w_2$ und auf dem dritten Schenkel unter Berücksichtigung, dass die die Wicklungen $U - U'$ und $V' - V$ durchfliessenden Ströme um 90^0 phasenverschoben sind, $I_2 \, w_2 \frac{\sqrt{3} - 1}{\sqrt{2}}$. Die Ampèrewindungszahl ist also auf diesem dritten Schenkel wesentlich kleiner als auf jedem der beiden andern Schenkel, eine symmetrische Leistungsübertragung von der Zweiphasen- auf die Dreiphasenseite (die dreiphasige Sekundärwicklung ist auch in Fig. 4 weggelassen) ist in dieser Form noch unmöglich. Zur Erzielung des magnetischen Gleichgewichtes muss also auf dem Transformator eine in Dreieck geschaltete, in sich kurzgeschlossene Ausgleichswicklung $x_{12} - y_{13} - z_{23}$ aufgebracht werden, deren Ampèrewindungszahl pro Schenkel $= I_a \, w_a$ sich unmittelbar unter Berücksichtigung der in Fig. 4 eingezeichneten Stromrichtung aus folgender Bestimmungsgleichung ergibt. Es ist offenbar

$$I_2 \, w_2 - I_a \, w_a = I_2 \, w_2 \frac{\sqrt{3} - 1}{\sqrt{2}} + I_a \, w_a \tag{19}$$

und damit

$$I_a \, w_a = I_2 \, w_2 \frac{1 + \sqrt{2} - \sqrt{3}}{2 \sqrt{2}} = \sim 0{,}241 \, I_2 \, w_2 \tag{20}$$

Man wird im allgemeinen die Windungszahl w_a nicht zu hoch wählen, um nicht zu hohe Spannungen in die Ausgleichswicklung zu bekommen. Für den früher bereits erwähnten Fall, dass der Transformator später für primären 50 periodigen Dreiphasenanschluss unter gleichzeitiger Erhöhung der Spannung im Verhältnis $\frac{50}{40}$ vorzusehen ist, wird man zweckmässigerweise die Windungszahl w_a der Ausgleichswicklung so wählen, dass sie bei dreiphasigem Anschluss zur Ergänzung der Wicklungen $X - U'$ und $Y - V'$ auf den $1{,}25 = \sim \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}}$ fachen Betrag der Windungszahl dieser Wicklungen gerade ausreicht, d. h. man wird w_a gleich machen der Windungszahl der Wicklung $U' - U''$ bezw. $V' - V''$

$$w_a = \frac{\sqrt{3} - \sqrt{2}}{\sqrt{2}} \, w_2 = \sim 0{,}225 \, w_2 \tag{21}$$

damit wird nach (20) der Strom in der Ausgleichswicklung

$$I_a = \frac{0{,}241}{0{,}225} \, I_2 = 1{,}07 \, I_2 \tag{22}$$

Die Wahl der Windungszahl w_a der Ausgleichwicklung nach Gleichung (23) hat also überdies den Vorteil, sie wegen der geringen Verschiedenheit von I_a und I_2 mit gleichem Kupferquerschnitt wie die primäre Zweiphasenwicklung w_2 auszuführen, was fabrikationstechnisch von Wert ist. Der Schenkel $U - V$ muss bei Dreiphasenanschluss nun gleichfalls die totale Windungszahl $w_2 \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}}$ erhalten. Diese setzt sich zusammen aus den Windungszahlen der

Wicklungen $U - U'$ und $V - V'$ mit je $w_2 \cdot \frac{\sqrt{3}-1}{2}$ Windungen, aus der Wicklungszahl w_a der Ausgleichswicklung, die wir nach Gleichung (21) zu $\frac{\sqrt{3}-\sqrt{2}}{\sqrt{2}} \cdot w_2$ ermittelt haben und einer beim Zweiphasenbetrieb unbenützten Ergänzungswindungszahl w_x (in Fig. 4 ist $y' - y_{13}$ und $z' - z_{23}$ je $\frac{w_x}{2}$) deren Grösse sich wie folgt ergibt:

$$w_2 \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} - w_2(\sqrt{3}-1) - w_2 \frac{\sqrt{3}-\sqrt{2}}{\sqrt{2}} = w_x \tag{23}$$

$$w_x = w_2(2-\sqrt{3}) = 0{,}268\ w_2 \tag{24}$$

w_x erhält selbstredend den gleichen Leiterquerschnitt wie w_a, sodass auch $r_x = r_a \frac{w_x}{w_a}$ oder wenn w_a mit gleichem Leiterquerschnitt wie w_2 ausgeführt wird, ist

$$r_x = r_2(2-\sqrt{3}) \tag{24a}$$

Auch hier ist zu untersuchen, welches dreiphasige Normalmodell gewählt werden muss, um eine gegebene Leistung von A kVA in Form von Zweiphasenstrom in der neuen Schaltung nach Fig. 4 in Dreiphasenstrom umzuformen. Ist r_2 der Ohmsche Widerstand der w_2 Windungen zwischen $X - U'$ bezw. $Y - V'$, so ist r_2' der Ohmsche Widerstand der Wicklung $U - U'$ oder $V - V'$ mit w_2' Windungen, wobei $w_2' = w_2 \frac{\sqrt{3}-1}{2}$, offenbar auch $r_2' = r_2 \frac{\sqrt{3}-1}{2}$ und analog r_a der Ohmsche Widerstand von w_a Windungen der Ausgleichswicklung mit gleichem Leiterquerschnitt nach Gleichung (21) $r_a = \left(\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} - 1\right) r_2$.

Damit werden, wenn I_2 der Strom in den Wicklungen $U - U'$, $U' - X$ bezw. $V - V'$, $V' - Y$, i_3 den Strom in der dreiphasigen Sekundärwicklung vom Ohmschen Widerstand r_3 pro Phase bedeutet, die Kupferverluste in den beiden gleichwertigen Schenkeln unter Berücksichtigung der Gleichungen (22), (23) und (24) je:

$$W_{2\,1} = W_{2\,2} = I_2^2 r_2 + I_a^2 r_a + i_3^2 r_3 = 2\, I_2^2 r_2 + \frac{(1+\sqrt{2}-\sqrt{3})^2}{4\sqrt{2}(\sqrt{3}-\sqrt{2})} I_2^2 r_2 = \sim 2{,}24\, I_2^2 r_2 \tag{25}$$

Im Schenkel $U - V$ sind die Kupferverluste:

$$W_{2\,3} = 2\, I_2^2 r_2' + I_a^2 r_a + i_3^2 r_3 = I_2^2 r_2(\sqrt{3}-1) + \frac{(1+\sqrt{2}-\sqrt{3})^2}{4\sqrt{2}(\sqrt{3}-\sqrt{2})} I_2^2 r_2 + I_2^2 r_2$$

$$= I_2^2 r_2 \frac{7\sqrt{2} - 5\sqrt{3} - \sqrt{6} + 3}{2\sqrt{2}(\sqrt{3}-\sqrt{2})} = \sim 2{\cdot}03\, I_2^2 r_2 \tag{26}$$

Bei der Schaltung nach Fig. 4 für unverketteten Zweiphasenstrom sind es also im Gegensatz zur Schaltung nach Fig. 2 für verketteten Zweiphasenstrom die Schenkel $U' - X$ und $V' - Y$ die mit ihren rund 13% betragenden Mehrverlusten den Ausschlag geben und die Wahl der Type bedingen. Aus der Liste der normalen Drehstromtransformatoren ist also wieder ein Modell von $\sqrt{1{,}13} = 1{,}07$ facher Leistung zu wählen.

Wie bereits erwähnt, wird mit Rücksicht auf die später notwendig werdende Umschaltung für 50 periodigen Dreiphasenbetrieb und im Verhältnis $\frac{50}{40}$ erhöhter Klemmen-

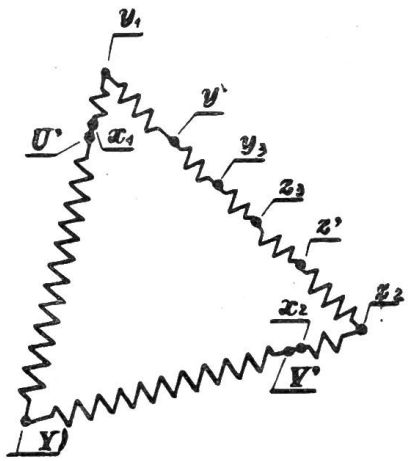

Fig. 5.

spannung die Windungszahl w_a gleich gewählt der Windungszahl der Wicklung $U' - U''$ bezw. $V' - V''$ (Fig. 2). Die Umschaltung der Anordnung nach Fig. 4 für Dreiphasenanschluss erfolgt dann in der Weise, dass die Verkettungspunkte der Ausgleichswicklung x_{12}, y_{13}, z_{23} (Fig. 4) in die Anfangs- bezw. Endpunkte $x_1 x_2$, $y_1 y_3$, $z_2 z_3$ aufgelöst werden und $x_1 - y_1$ an U', $x_2 - z_2$ an V' angeschlossen wird (Fig. 5). Die dritte Säule besteht aus den Wicklungen $y_1 - y'$ und $z_2 - z'$ (Fig. 5) je gleich $U - U'$ bezw. $V - V'$ in Fig. 4, aus $y_3 - z_3$ (Fig. 5) $= y_{13} - z_{23}$ (Fig. 4) und aus der Ergänzungswicklung $y' - y_3$ und $z' - z_3$ gleich $y' - y_{13}$ bezw. $z' - z_{23}$.

Bei einem Vollaststrom von I_3 und i_3' primär bezw. sekundär pro Phase sind die Kupferverluste in den Wicklungen $X - U'$, $x_1 - y_1$ oder $Y - V'$, $x_2 - z_2$ je

$$W_{3\,1} = W_{3\,2} = I_3^2\, r_2 + I_3^2\, r_a + i_3'^{\,2}\, r_3' = I_3^2\, r_2 \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} + i_3'^{\,2}\, r_3' \tag{27}$$

r_3' ist wegen der Reduktion der Sekundärwindungszahl im Verhältnis $\frac{40}{50}$ in der angegebenen Weise wieder gleich $\frac{16}{25}\, r_3$. Ferner ist analog Gleichung (10)

$$i_3' = \frac{5}{4} \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \frac{w_2}{w_3} I_3$$

Beim Zweiphasenbetrieb (Fig. 4) war aber jetzt nach den Gleichungen (25) und (19)

$$i_3^2\, r_3 = I_2^2\, r_2$$

und

$$I_2\, w_2 - I_a\, w_a = i_3\, w_3 = I_2\, w_2 \left(1 - \frac{1 + \sqrt{2} - \sqrt{3}}{2\sqrt{2}}\right)$$

oder

$$\frac{w_2}{w_3} = \frac{i_3}{I_2} \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{2} - 1 + \sqrt{3}} \tag{28}$$

Damit aber wird

$$i_3' = \frac{5}{4} \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \frac{I_3}{I_2} \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{2} - 1 + \sqrt{3}}\, i_3$$

und

$$i_3^2\, r_3' = \frac{I_3^2}{I_2^2} \frac{12}{(\sqrt{2} - 1 + \sqrt{3})^2} \cdot i_3^2\, r_3 = I_3^2\, r_2 \frac{12}{(\sqrt{2} - 1 + \sqrt{3})^2} \tag{29}$$

so dass

$$W_{3\,1} = W_{3\,2} = I_3^2\, r_2 \left[\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} + \frac{12}{(\sqrt{2} - 1 + \sqrt{3})^2}\right] = \sim 3{,}83\, I_3^2\, r_2 \tag{30}$$

In diesem Falle sind die Kupferverluste in der dritten Säule bei Dreiphasenbetrieb natürlich gleich jenen der beiden anderen Säulen und ergeben sich nach Gleichung (30) wieder zu $3{,}83\, I_3^2\, r_2$.

Bei Gleichheit der Stromwärmeverluste in 40 periodigem Zweiphasenbetrieb und späterem 50 periodigem Dreiphasenbetrieb mit im Verhältnis von $\frac{50}{40}$ erhöhter Spannung können also die beiden gleichwertigen Schenkel belastet werden mit einem Strom

$$I_3 = \sqrt{\frac{2,24}{3,83}}\, I_2 = \sim 0,76\, I_2 \tag{31}$$

und der dritte Schenkel mit einem Strom

$$I_3 = \sqrt{\frac{2,03}{3,83}}\, I_2 = \sim 0,721\, I_2 \tag{31a}$$

Massgebend ist der kleinere Wert, sodass unter den obigen Voraussetzungen die maximal übertragbare Drehstromleitung

$$3\, E_3\, I_3 = 3\, \frac{50}{40}\, E_2\, 0,721\, I_2 = 1,35\, (2\, E_2\, I_2) \tag{32}$$

um 35% grösser sein kann. Vernachlässigt wurden ebenso wie bei Betrachtung der Schaltung für verketteten Zweiphasenstrom die Eisenverluste, die bei 50 periodigem Betrieb natürlich höher sind als bei 40 periodigem und die es unter Umständen nicht möglich machen werden, nach erfolgter Umschaltung bei Dreiphasenbetrieb ganz bis zu den durch die Gleichungen (18) und (32) gegebenen Werte zu gehen.

Zusammenfassung.

Es wird eine Schaltung beschrieben, die verketteten oder unverketteten Zweiphasenstrom in Dreiphasenstrom und umgekehrt umzuformen gestattet und zwar zum Unterschied gegenüber der Scott-Schaltung, die in der Verkettung zweier Einphasentransformatoren besteht, vermittels eines normalen Dreiphasentransformators mit passender Bewicklung. Die neue Anordnung ist nicht nur billiger, als die Scott'sche Schaltung, sondern auch wesentlich einfacher als die bisher bekannten Schaltungen nach Stern und der Gesellschaft für elektrische Industrie. Seines normalen Aufbaues wegen kann der Transformator beim Uebergang vom Zweiphasen- auf den Dreiphasenbetrieb nach einer einfachen Umschaltung, die am Aufstellungsort vorgenommen werden kann, wieder Verwendung finden.

Die Erhöhung der Energietarife der schweizer. Elektrizitätswerke.

Bericht des Generalsekretariates des V. S. E. an die Tarifkommission und Anträge der letzteren.

I. Einleitung.

Die Behandlung der Frage der Energietarife wurde, einem in Werkekreisen immer allgemeiner empfundenen Bedürfnis entsprechend, vom V. S. E. an die Hand genommen. Auf die Initiative seines Vorstandes und seiner Tarifkommission hin wurde sie auf die Traktandenliste der Generalversammlung des V. S. E. vom 11. Oktober 1919 in Montreux gesetzt und dort in einem einleitenden Referate des Generalsekretariates behandelt (Siehe Bulletin 1919, No. 10, Seite 303 u. ff.). Auf Grund der in Montreux gewonnenen Orientierung und der dort gefassten Beschlüsse ging die Tarifkommission [1]) unverzüglich an die Untersuchung

[1]) Mitglieder der Tarifkommission sind z. Zt.: Präsident: Dr. Moll-Bern, Baumann-Bern, Bertschinger-Zürich, de Montmollin-Lausanne, Nicole-Lausanne, Müller-Freiburg, Wachter-Schaffhausen.