

| | |
|---------------------|---|
| Zeitschrift: | Bulletin de l'Association suisse des électriciens |
| Herausgeber: | Association suisse des électriciens |
| Band: | 35 (1944) |
| Heft: | 12 |
| Artikel: | Die einphasige Belastung des Drehstromnetzes und ihr statischer Ausgleich |
| Autor: | Hafner, H. |
| DOI: | https://doi.org/10.5169/seals-1056969 |

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: 02.01.2026

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

BULLETIN

RÉDACTION:

Secrétariat de l'Association Suisse des Electriciens
Zurich 8, Seefeldstrasse 301

ADMINISTRATION:

Zurich, Stauffacherquai 36 • Téléphone 51742
Chèques postaux VIII 8481

Reproduction interdite sans l'assentiment de la rédaction et sans indication des sources

XXXV^e Année

N° 12

Mercredi, 14 Juin 1944

Die einphasige Belastung des Drehstromnetzes und ihr statischer Ausgleich

Von H. Hafner, Zürich-Oerlikon

621.3.016.313

Die Rückwirkungen einer einphasigen Belastung auf das Drehstromnetz und die Aufgabe und Wirkungsweise von Phasenausgleichseinrichtungen lassen sich nur mit der Methode der symmetrischen Komponenten auf eine verhältnismässig einfache und übersichtliche Art behandeln. Der vorliegende Aufsatz setzt die Kenntnis dieser Methode voraus. Für den beliebigen einphasigen Anschluss ohne Verwendung des Nulleiters werden einfache Beziehungen abgeleitet, mit welchen sich Grösse und Phasenlage des durch die einphasige Belastung im Netz bedingten Gegenstromes ermitteln lassen. Diese einfachen Gesetze werden zur Dimensionierung von statischen Ausgleichseinrichtungen angewendet. Zur Beurteilung des durch Belastungsschwankungen und Änderung der Phasenverschiebung des Verbrauchers bedingten unvollständigen Ausgleiches wird eine Kurvenschar angegeben. Die Vorteile und Nachteile des statischen Ausgleiches gegenüber der Phasenausgleichsgruppe werden besprochen.

Les effets exercés par une charge monophasé sur un réseau triphasé, ainsi que le but et le genre de fonctionnement des dispositifs d'équilibrage des phases ne peuvent être traités d'une manière relativement simple et claire qu'en appliquant la méthode des composantes symétriques, que l'auteur suppose être connue du lecteur. Il établit quelques relations simples pour un raccordement monophasé quelconque, sans emploi du neutre et qui permettent de déterminer la grandeur et le déphasage du courant inverse résultant de la charge monophasée du réseau. Ces simples relations sont appliquées au dimensionnement de dispositifs de compensation statiques. Un tableau sert à déterminer la dissymétrie qui résulte des variations de la charge et de la modification du déphasage du consommateur. L'auteur expose ensuite les avantages et les inconvénients de la compensation statique, par rapport aux groupes compensateurs de phase.

1. Einleitung

Das Drehstromnetz hat sich zur Erzeugung, Uebertragung und Verteilung der elektrischen Energie seiner grossen wirtschaftlichen und technischen Vorteile wegen durchgesetzt. Die Vorteile sind so gross, dass einige ihm anhaftende Mängel in ihrer Bedeutung zurücktreten. Unangenehm ist es z. B., dass grosse einphasige Verbraucher nicht ohne besondere Massnahmen angeschlossen werden können.

Eine im Verhältnis zur Netzeistung sehr grosse Einphasenlast erhöht die Verluste im Generator und kann die Symmetrie der Netzspannung so stark stören, dass auch in parallel laufenden Maschinen zusätzliche Verluste auftreten und die Betriebs-eigenschaften der Maschinen beeinflusst werden.

In den letzten 20 Jahren hat infolge vermehrter Anwendung der Elektrowärme in Gewerbe und Industrie der einphasige Verbraucher an Bedeutung zugenommen; man denke nur an die verschiedenartigen einphasigen Elektroöfen, z. B. Graphitstaböfen, Sinteröfen, ferner an Punktschweissapparate, Bandagewärmer usw.

Die Fälle, bei denen die Verwendung von Phasenausgleichseinrichtungen verlangt werden, mehren sich infolge des ständigen Anwachsens der Nennleistung der einphasigen Verbraucher.

Als Ausgleichseinrichtungen kommen verschiedene Anordnungen in Frage, die sich verschieden-

artig verhalten; sehr verschieden im Preis sind, jedoch stets die Kosten einer einphasigen Verbraucheranlage unliebsam erhöhen.

Der Zusammenschluss kräftiger Netze und eine nicht zu knappe Dimensionierung der lokalen Netzteile würde heute im allgemeinen eine weniger grosse Zurückhaltung der Elektrizitätswerke gegenüber dem direkten einphasigen Anschluss ohne Ausgleich rechtfertigen.

Es ist die Aufgabe des projektierenden und beratenden Ingenieurs, aber auch des einsichtigen Energielieferanten, von Fall zu Fall zu untersuchen, ob wirklich ein Phasenausgleich nötig ist, und wenn ja, welche Auswahl vom wirtschaftlichen und technischen Standpunkt aus zu treffen ist.

2. Die Rückwirkungen eines unsymmetrischen Verbrauchers auf das Netz

(Untersuchung mit der Methode der Auflösung in symmetrische Komponenten).

Die einphasige Belastung eines Drehstromnetzes ist ein Spezialfall der unsymmetrischen Belastung. Die Auswirkung einer unsymmetrischen Belastung auf das Netz und die Aufgabe und Wirkungsweise einer Phasenausgleichseinrichtung lassen sich nur auf eine verhältnismässig einfache und anschauliche Weise erfassen, wenn man sich der Methode der

symmetrischen Komponenten bedient¹⁾. Darunter versteht man die Zerlegung der durch den unsymmetrischen Verbraucher hervorgerufenen Netzströme in den symmetrischen Mitstrom gleicher Phasenfolge wie die Phasenspannungen der Generatoren, in den symmetrischen Gegenstrom entgegengesetzter Phasenfolge und in den Nullstrom. Der Nullstrom fällt bei unserer Betrachtung weg, weil wir uns auf den für grosse Einphasenlasten ausschliesslich in Frage kommenden Anschluss ohne Verwendung des Nulleiters beschränken wollen.

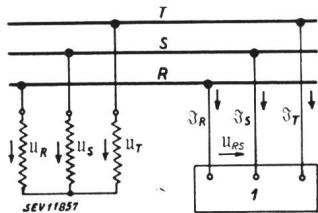


Fig. 1 a.

Prinzipielles Schema. Netz mit unsymmetrischem Verbraucher.
1 Unsymmetrischer Verbraucher.

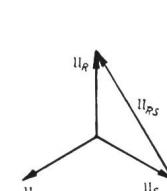


Fig. 1 b.

Diagramm der Sternspannungen des Netzes.

$$\begin{aligned} \text{Phase R: } & U_R = U \\ \text{Phase S: } & U_S = U \cdot e^{-j120^\circ} = U \cdot \alpha \\ \text{Phase T: } & U_T = U \cdot e^{-j240^\circ} = U \cdot \alpha^2 \\ & (\text{worin } \alpha \text{ als Symbol} \\ & \text{für } e^{-j120^\circ} \text{ gesetzt ist}) \end{aligned}$$

grosser Gegenstrom erzeugt einen grossen gegenlaufenden Spannungsabfall im Netz, welcher die Netzspannungen unsymmetrisch macht. Nach den REM²⁾ gilt eine Spannung oder ein Strom noch als symmetrisch, wenn die gegenlaufende Komponente kleiner oder höchstens gleich 5 % der mitlaufenden ist ($D \leq 0,05$). Der durch einen unsymmetrischen Verbraucher an einer bestimmten Netzstelle bedingte Gegenstrom verteilt sich in das ganze übrige Netz hinein; er muss nicht wie der Mitstrom den Generatoren des Netzes entspringen. Für den Gegen-

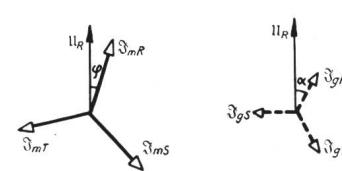


Fig. 1 c.

Diagramm der symmetrischen Mitstrom-Komponenten. (Mitstrom \mathfrak{I}_m)

$$\begin{aligned} \mathfrak{I}_{mR} &= \mathfrak{I}_m \\ \mathfrak{I}_{mS} &= \mathfrak{I}_m \cdot e^{-j120^\circ} = \mathfrak{I}_m \cdot \alpha \\ \mathfrak{I}_{mT} &= \mathfrak{I}_m \cdot e^{-j240^\circ} = \mathfrak{I}_m \cdot \alpha^2 \end{aligned}$$

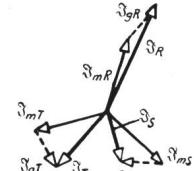


Fig. 1 e.

Diagramm der Netzströme als Summe der symmetrischen Komponenten.

$$\begin{aligned} \mathfrak{I}_R &= \mathfrak{I}_m + \mathfrak{I}_g \\ \mathfrak{I}_S &= \mathfrak{I}_m \cdot \alpha + \mathfrak{I}_g \cdot \alpha^2 \\ \mathfrak{I}_T &= \mathfrak{I}_m \cdot \alpha^2 + \mathfrak{I}_g \cdot \alpha \end{aligned}$$

Fig. 1.

Darstellung der symmetrischen Komponenten \mathfrak{I}_m und \mathfrak{I}_g der Netzströme $\mathfrak{I}_R, \mathfrak{I}_S, \mathfrak{I}_T$, hervorgerufen durch einen unsymmetrischen Verbraucher 1

Die Rückwirkungen eines einphasigen Verbrauchers auf ein Netz, welches rotierende Maschinen enthält (Generatoren und Motoren), lassen sich ohne die Methode der symmetrischen Komponenten nur mit sehr langwierigen und unübersichtlichen Rechnungen untersuchen. Der Vorteil der Zerlegung in symmetrische Komponenten liegt darin, dass auch für das gegenlaufende System mit denselben einphasigen Ersatzstromkreisen und ihren Ortskurven gerechnet werden kann wie für das Mitstromsystem.

In Fig. 1a bis 1e wird die Zusammensetzung der unsymmetrischen Netzströme $\mathfrak{I}_R, \mathfrak{I}_S, \mathfrak{I}_T$ aus ihren symmetrischen Komponenten durch Vektor-Diagramme und auch in der symbolischen Schreibweise kurz dargestellt.

Das Verhältnis der Beträge von Gegenstrom I_g zum Mitstrom I_m ist ein Mass für die *Unsymmetrie D* einer Netzelast:

$$D = \frac{I_g}{I_m} \quad (1)$$

Eine vollständige symmetrische Belastung erzeugt im Netz keinen Gegenstrom, ihr Netzstrom ist ein reiner Mitstrom. Die *Unsymmetrie D* ist Null. Das ist der vom Energielieferanten angestrebte Idealfall.

Eine grosse Stromunsymmetrie bedeutet einen im Verhältnis zum Mitstrom grossen Gegenstrom. Ein

¹⁾ Literatur über «Symmetrische Komponenten», z. B.: F. Wagner und R. D. Evans, Mc. Graw Hill, 1933; W. V. Lyon, Mc. Graw Hill, 1937; G. Oberdorfer, Verlag Teubner, Leipzig, 1929; Jliovici, Baillière et Fils, Paris, 1934.

Bull. SEV 1933, Nr. 1, S. 7.

strom sind die Generatoren keine Energiequellen, weil sie keine gegenlaufende EMK produzieren. Alle am Netz angeschlossenen Synchron- und Asynchronmaschinen setzen als sogenannte Gegenimpedanz \mathfrak{Z}_g dem Gegenstrom ihre, der Schlüpfung 2 bzw. fast 2 entsprechende Kurzschlussimpedanz entgegen, die aus dem Kreisdiagramm der betreffenden Maschine abgelesen werden kann. Ueberall im Netz, wo der Gegenstrom hingelangt, im eigentlichen Netz und in den Drehstrommaschinen, erzeugt er seine ohmschen Verluste P_{vg} , welche zu den Verlusten P_{vm} des Mitstromes als zusätzliche Verluste hinzukommen. In Drehstromleitungen betragen sie:

$$P_{vg} = 3 I_g^2 \cdot R \quad (2)$$

R Wirkwiderstand pro Phase des betrachteten Netzteiles.

Die Gegenstromverluste sind unabhängig vom Mitstrom; sie sind so, wie wenn der Mitstrom nicht vorhanden wäre oder eine andere Frequenz hätte. Die totalen ohmschen Verluste sind

$$P_v = 3 R (I_m^2 + I_g^2) = P_{vm} (1 + D^2) \quad (3)$$

Man erkennt, dass die Verluste im Netz auf kleine Stromunsymmetrien nicht sehr empfindlich sind. Eine *Unsymmetrie D* von 20 % würde beispielsweise die ohmschen Verluste nur um 4 % erhöhen.

Im induzierten Teil der rotierenden Maschinen hat der Gegenstrom doppelte Netzfrequenz; dort kann der Wirkwiderstand für den Gegenstrom

²⁾ REM: Regeln für die Bewertung und Prüfung von elektrischen Maschinen des Verbandes Deutscher Elektrotechniker.

grösser sein als für den Mitstrom. Die gegenlaufenden Ströme erzeugen in den Maschinen ein bremsendes Drehmoment, das durch eine entsprechende Mehraufnahme an Wirkleistung aus dem Mitsystem überwunden wird. Doch selbst bei grosser Stromunsymmetrie in der Maschine ist diese Bremswirkung so schwach, dass sie die Betriebseigenschaften der Maschine nicht beeinflusst. Sogar wenn die Maschinenströme die Unsymmetrie 1 hätten, wäre an einer normalen Maschine das bremsende Moment höchstens einige Prozent des Nennmomentes.

sen. Den Transformator denke man sich als idealen, 2poligen Drehtransformator ohne induktive und ohmsche Spannungsabfälle. Seine in Stern geschaltete Statorwicklung ist als Primärwicklung mit dem Netz verbunden. Der Rotor trägt als Sekundärwicklung eine einphasige Wicklung. Sie ist aus ihrer Hauptlage gegenüber der Statorwicklung der Phase R um den räumlichen Winkel β im Drehsinn des vom Stator aus erregten Leerlauf-Drehfeldes verdreht. Das Uebersetzungsverhältnis zwischen einer Statorphasenwicklung und der Sekundärwicklung

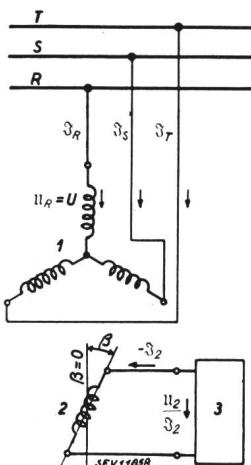


Fig. 2a.
Anschluss eines einphasigen Verbrauchers über einen Drehtransformator an das Netz. Beliebig einstellbare Phasenverschiebung β zwischen der Sternspannung U der Netzphase R und der Anschlussspannung U_2 .

- 1 Statorwicklung (in Sternschaltung) des Drehtransformators.
- 2 Einphasige Rotorwicklung des Drehtransformators.
- 3 Einphasiger Verbraucher.

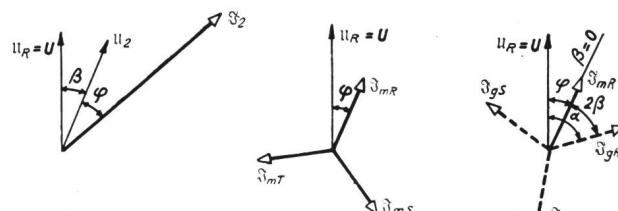


Fig. 2b.
Diagramm der Sternspannung U , der Anschlussspannung U_2 und des Stromes I_2 des Verbrauchers.

Fig. 2c.
Diagramm des Mitstromes I_m .
 $I_m = \frac{P_s}{3U}$

Fig. 2d.
Diagramm des Gegenstromes I_g .
 $I_g = \frac{P_s}{3U}$

Fig. 2.

Prinzipschema und Diagramme des Anschlusses eines einphasigen Verbrauchers an ein Drehstromnetz

Allgemeiner Fall: Die Anschlussspannung U_2 ist gegenüber der Sternspannung U des Netzes um den Phasenwinkel β nacheilend verschoben.

3. Mitstrom und Gegenstrom des einphasigen Verbrauchers mit beliebiger Phasenlage β seiner Anschlussspannung

Wie gross sind Mit- und Gegenstrom des einphasigen Verbrauchers, welches ist ihre Phasenlage und welche Bedeutung haben sie? Die Antwort lässt sich für konkrete Fälle, z. B. für den normalen einphasigen Anschluss an zwei Netzpolen R und S , leicht geben; sie folgt dort aus der Bedingung, dass der dritte Pol T keinen Strom führt und die Netzströme I_R und I_S entgegengesetzt gleich gross sind in Grösse und Phase.

Die Antwort ist aber in einer allgemeineren Form auf schlussreicher und für die Anwendung auf Phasenausgleichseinrichtungen nützlicher.

Der einphasige Verbraucher ist nach Fig. 2a über einen Drehtransformator an das Netz angeschlossen.

ist der Einfachheit halber 1. Die Sekundärspannung U_2 ist die Anschlussspannung des einphasigen Verbrauchers: sie eilt der Sternspannung U des Netzpoles R um den einstellbaren Phasenwinkel β nach. Die Spannung U wird als Ausgangsspannung mit dem Phasenwinkel 0 aufgefasst und darum mit dem Buchstaben U (im Gegensatz zu gotisch U) bezeichnet.

$$U_2 = U \cdot e^{-j\beta} \quad (4)$$

Die Beträge von U und U_2 sind gleich und werden ebenfalls mit U bezeichnet (Fig. 2b).

Der einphasige Verbraucher verbraucht die Scheinleistung vom Betrag P_s mit dem Leistungsfaktor $\cos \varphi$, symbolisch mit P_s ; $\cos \varphi$ bezeichnet. Er nimmt die Wirkleistung $P_s \cdot \cos \varphi$ und die Blindleistung $P_s \cdot \sin \varphi$ auf, hat einen Scheinwiderstand

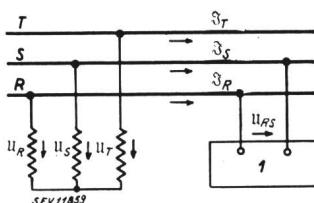


Fig. 3a.
Prinzipschema. Direkter Anschluss des einphasigen Verbrauchers an die Netzpole R und S .
1 Einphasiger Verbraucher.
 $P_s; \cos \varphi$

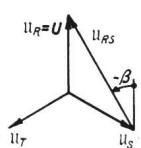


Fig. 3b.
Diagramm der Sternspannungen des Netzes.
 U_{RS} ist Anschlussspannung
 $\beta = -30^\circ$

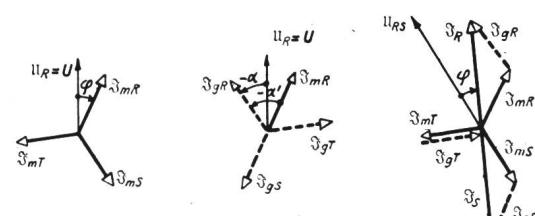


Fig. 3c.
Diagramm des Mitstromes I_m .
 $I_m = \frac{P_s}{3U}$

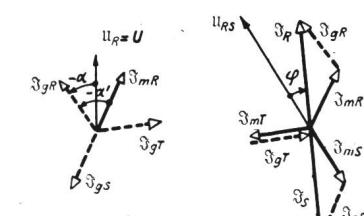


Fig. 3d.
Diagramm des Gegenstromes I_g .
 $I_g = \frac{P_s}{3U}$
 $\alpha' = 2\beta = -60^\circ$

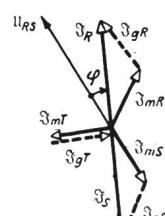


Fig. 3e.
Diagramm des Netzstromes. Netzstrom als Summe von Mitstrom und Gegenstrom.
 $I_R = -I_S; I_R = \frac{P_s}{\sqrt{3}U}$

Fig. 3.

Prinzipschema und Diagramme des direkten Anschlusses eines einphasigen Verbrauchers an die Netzpole R und S ; $\beta = -30^\circ$

$$\Im = Z \cdot e^{j\varphi} = \frac{U^2}{P_s} \cdot e^{j\varphi}$$

und führt den Strom \Im_2 (s. Fig. 2b):

$$\Im_2 = \frac{\mathfrak{U}_2}{Z} = \frac{U}{Z} \cdot e^{-j(\varphi + \beta)} \quad (5)$$

In die Sekundärwicklung fliest der Strom $-\Im_2$ und erzeugt ein pulsierendes Wechselfeld, welches durch ein gleich grosses, aber entgegengesetzt gerichtetes, durch die Belastungsströme des Stators erregtes, ebenfalls pulsierendes Statorfeld kompensiert wird. Dieses Statorfeld kann man sich bekanntlich in zwei je halb so grosse Drehfelder zerlegt denken, von welchen das eine, das mitlaufende Statorfeld (Mitfeld), synchron mit dem Leerlaufdrehfeld rotiert, während das gegenlaufende Statorfeld (Gegenfeld) mit derselben Winkelgeschwindigkeit im umgekehrten Sinn läuft. Das Mitfeld wird durch den Mitstrom des Stators und das Gegenfeld durch den Gegenstrom des Stators erzeugt. Im Moment, da die Rotorpule den Maximalwert des Stromes führt, fallen Mitfeld und Gegenfeld in die magnetische Achse der Rotorpule. Erinnert man sich, dass das von einem Drehstrom erzeugte Drehfeld immer in demjenigen Moment in die magnetische Achse einer Phasenwicklung zu liegen kommt, wenn die betreffende Wicklung den Maximalwert ihres Stromes führt, und dass der Verdrehwinkel β für das Gegenfeld mit negativem Vorzeichen zu rechnen ist, so ergibt sich für den Stator in der R-Phase ein Mitstrom \Im_m und ein Gegenstrom \Im_g :

$$\text{Mitstrom: } \frac{3}{2} \Im_m \cdot e^{-j\beta} = \frac{1}{2} \Im_2 \quad (6)$$

$$\text{Gegenstrom: } \frac{3}{2} \Im_g \cdot e^{+j\beta} = \frac{1}{2} \Im_2 \quad (7)$$

und, indem man den Strom \Im_2 mit Gl. 5 durch U ausdrückt, erhält man die gesuchten, durch den einphasigen Verbraucher im Netz hervorgerufenen symmetrischen Komponenten,

den *Mitstrom* (Fig. 3c):

$$\Im_m = \frac{U \cdot e^{-j\varphi}}{3Z} = \frac{P_s}{3U} \cdot e^{-j\varphi} \quad (8)$$

und den *Gegenstrom* (Fig. 3d):

$$\Im_g = \frac{U}{3Z} \cdot e^{-j(\varphi + 2\beta)} = \frac{P_s}{3U} \cdot e^{-j(\varphi + 2\beta)} \quad (9)$$

worin der Winkel $\alpha = \varphi + 2\beta$ die Phasenverschiebung zwischen U und \Im_g und der Winkel $\alpha' = 2\beta$ die Phasenverschiebung zwischen \Im_m und \Im_g bedeuten. Das Ergebnis ist einfach. Der Mitstrom und der Gegenstrom sind dem Betrage nach gleich gross.

$$I_g = I_m = \frac{U}{3Z} = \frac{1}{3} \frac{P_s}{U} \quad (10)$$

Die durch die Einphasenlast erzeugte Stromunsymmetrie ist stets 100 %, ganz unabhängig von der gewählten Phasenlage β der Spannung, an welcher

die Einphasenlast liegt. Das Wesen des Mitstromes ist leicht festzuhalten. In allen drei Polen ist seine Phasenverschiebung gegenüber der Sternspannung gleich φ , also gleich wie die Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom des einphasigen Verbrauchers. Er überträgt die Wirk- und Blindleistung des einphasigen Verbrauchers. Gl. 8 enthält den Phasenwinkel β nicht; für den Mitstrom spielt es also keine Rolle, wie die Anschlußspannung \mathfrak{U}_2 relativ zur Netzspannung U liegt. Der Mitstrom ist derjenige Strom, welcher fliessen würde, wenn die Einphasenlast ($P_s; \cos \varphi$) eine symmetrische Drehstromlast ($P_s; \cos \varphi$) wäre wie z. B. ein Drehstrommotor oder drei gleiche, in Stern oder Dreieck geschaltete Scheinwiderstände.

Nach Gl. 9 ist im Pol R die Phasenverschiebung α zwischen der Sternspannung U des Netzes und dem Gegenstrom \Im_g gleich der Phasenverschiebung φ im einphasigen Verbraucher, vermehrt um den doppelten Phasenwinkel β der Anschlußspannung. Der Winkel α wird für nacheilenden Strom positiv gerechnet. Wegen der Gegenläufigkeit des Gegenstromes ist der Phasenwinkel α in den drei Polen ungleich, beträgt er im R-Pol $\alpha = \varphi + 2\beta$, so ist er im S-Pol $\alpha + 120^\circ$ und im Pol T $\alpha + 240^\circ$. Die Wirkleistung und ebenso die Blindleistung des Gegenstromes, summiert über alle drei Pole, sind Null. Der Gegenstrom verschiebt lediglich Wirk- und Blindleistung innerhalb der drei Pole. Aenderst sich die Phasenverschiebung φ der Einphasenlast, so ändert sich die Phasenlage von Gegenstrom und Mitstrom um denselben Winkelbetrag wie φ ; wird die Anschlußspannung durch Drehen der Sekundärspannung aus ihrer Hauptlage $\beta = 0$ allmählich um 180° im Uhrzeigersinn verdreht, so dreht sich der Vektorstern des Gegenstromes (Fig. 2d) allmählich um 360° , während der Vektorstern des Mitstromes (Fig. 2c) unverändert bleibt. Die durch die Gl. 8 und 9 ausgedrückten einfachen Beziehungen zwischen Netzspannung U Scheinleistung P_s , Phasenverschiebung φ , Spannungsphasenwinkel β des einphasigen Verbrauchers einerseits und der Grösse und Phasenlage von Mit- und Gegenstrom anderseits, setzen eine symmetrische Netzspannung voraus. Sie sind zur Bezeichnung von Massnahmen, die den Ausgleich und damit die Erhaltung der Netzspannungssymmetrie zum Ziel haben, ohne Bedenken verwendbar.

Zwei Phasenlagen der Anschlußspannung sind zu beachten:

a) Der einphasige Verbraucher ($P_s; \cos \varphi$) ist direkt oder über einen Einphasentransformator an die Netzepole R und S angeschlossen (s. Fig. 3a bis 3e). Die verkettete Netzspannung \mathfrak{U}_{RS} ist die Anschlußspannung; sie eilt der Sternspannung U um $\beta = -30^\circ$ vor. Nach Gl. 9 eilt der Gegenstrom \Im_g der Sternspannung U um $-\alpha = (60 - \varphi)^\circ$ und dem Mitstrom \Im_m um $-\alpha' = 60^\circ$ vor. Der Vektorstern des Mitstromes (Fig. 3c) und der des Gegenstromes (Fig. 3d) sind in ihrer richtigen Phasenlage aufgezeichnet und in Fig. 3e zur Bildung der Netzströme zusammengesetzt. Im stromlosen Pol T heben sich Mit- und Gegenstrom auf.

b) Die Anschlußspannung des einphasigen Verbrauchers ist in Phase mit der Netzspannung ($\beta = 0$). Im Netzpol R sind Mitstrom und Gegenstrom phasengleich, also $\alpha' = 0$. Dieser Fall ist identisch mit der bekannten Spannungsteilerschaltung nach Fig. 4a. Die Zusammensetzung von Mit- und Gegenstrom zum Netzstrom führt zu dem bekannten Ergebnis, dass der Strom im Pol R den Betrag $\frac{2P_s}{3U}$ hat, während er in den Polen S

und T nur je halb so gross ist. Erst die Zerlegung der Netzströme in den Mit- und Gegenstrom lässt

gung der Aufgabe. Als Ausgleichseinrichtungen gibt es zwei ganz verschiedenartige Hilfsmittel, die sogenannten *statischen Ausgleichseinrichtungen* und die sogenannten *Phasenausgleichsgruppen*, von denen jedes sein gesondertes Anwendungsgebiet hat. Im folgenden werden Aufbau und Wirkungsweise der *statischen Ausgleichseinrichtungen* behandelt.

5. Der statische Ausgleich des einphasigen Verbrauchers

Eine statische Ausgleichseinrichtung ist in ihrer einfachsten Form ein einphasiger Scheinwiderstand

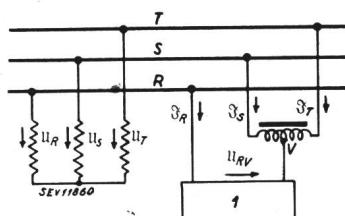


Fig. 4a.

Prinzipschema für den Anschluss eines einphasigen Verbrauchers mittels eines Spannungsteilers.
1 Einphasiger Verbraucher
 $P_s; \cos \varphi$

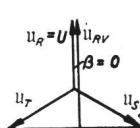


Fig. 4b.

Diagramm der Sternspannungen des Netzes. U_{RV} ist Anschlußspannung ($\beta = 0$).

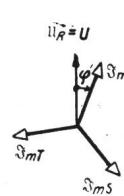


Fig. 4c.

Diagramm des Mitstromes I_m .
 $I_m = \frac{P_s}{3U}$

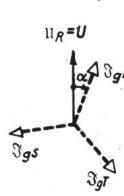


Fig. 4d.

Diagramm des Gegenstromes I_g .
 $I_g = \frac{P_s}{3U}$

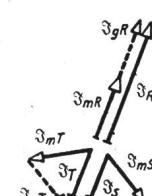


Fig. 4e.

Diagramm des Netzstromes. Netzstrom als Summe von Mitstrom und Gegenstrom.
 $I_R = \frac{2P_s}{3U}$
 $I_R = \frac{\Im_s}{2}$

Fig. 4.

Prinzipschema und Diagramme für den Anschluss eines einphasigen Verbrauchers mittels eines Spannungsteilers. $\beta = 0$.
Bei dieser Anwendungsart ist der Spannungsteiler absolut unnütz.

den Einfluss des Spannungsteilers im richtigen Lichte erscheinen. Was hat die Spannungsteilerschaltung bewirkt? Der Gegenstrom ist gegenüber dem gewöhnlichen einphasigen Anschluss (Fall a) um 60° nacheilend verschoben, und damit wurde gar nichts gewonnen. Die Unsymmetrie des Netzstromes $D = \frac{I_g}{I_m}$ ist natürlich unverändert gleich eins geblieben, der Gegenstrom erzeugt gleich grosse gegenlaufende Spannungsabfälle im Netz wie in Fall a), nur sind sie gegenüber Fall a) um 60° nacheilend verschoben. Die ohmschen Verluste P_v im Netz sind ebenfalls für Fall a) und Fall b) gleich gross, sie betragen nach Gl. 3 für $D = 1$, das Doppelte des symmetrischen Verbrauchers gleicher Leistung, nämlich $P_v = 6R I_m^2$ für beliebige Phasenlage β der Anschlußspannung.

Trotz mancher Hinweise in der Fachliteratur auf die Nutzlosigkeit der Spannungsteilerschaltung, taucht sie immer wieder auf.

4. Der Ausgleich der einphasigen Belastung

Eine einphasige Belastung vollständig ausgeleichen heisst, dafür Vorsorge treffen, dass der durch den einphasigen Verbraucher bedingte Gegenstrom gar nicht in das Netz dringen kann. Der unvollständige Ausgleich dagegen nimmt es in Kauf, dass noch ein gewisser Prozentsatz des Gegenstromes der Einphasenlast ins Netz gelangt. Der unvollständige Ausgleich genügt bei sorgfältiger Ueberprüfung wohl auch in extremen Fällen. Seine Zulassung bedeutet eine wesentliche Erleichterung und Verbilligung

(Impedanz) \Im_a mit einer Phasenverschiebung φ_a zwischen Spannung und Strom. Seine Scheinleistung P_{sa} und der Nacheilwinkel β_a seiner Anschlußspannung gegenüber der Sternspannung U des Netzes sind so gewählt, dass der durch die Ausgleichsbelastung P_{sa} im Netz hervorgerufene Gegenstrom \Im_{ga} entgegengesetzt gleich dem Gegenstrom \Im_g des einphasigen Verbrauchers wird:

$$\Im_{ga} + \Im_g = 0 \quad (11)$$

Im Netz fliessen dann nur noch die Mitströme des Verbrauchers und der Ausgleichseinrichtung. Verbraucher und Ausgleichseinrichtung zusammen bilden den ausgeglichenen Verbraucher; sie sind gemeinsam ein- und auszuschalten. Nach Gl. 9 erzeugt der auszugleichende Verbraucher im Netz den Gegenstrom:

$$\Im_g = \frac{P_s}{3U} \cdot \varepsilon^{-j(\varphi + 2\beta)} \quad (9)$$

welcher um den Winkel $\alpha = \varphi + 2\beta$ der Sternspannung U nacheilt; und die Ausgleichsbelastung erzeugt den Gegenstrom:

$$\Im_{ga} = \frac{P_{sa}}{3U} \cdot \varepsilon^{-j(\varphi_a + 2\beta_a)} \quad (9a)$$

mit dem Nacheilwinkel $\alpha_a = \varphi_a + 2\beta_a$ bezogen auf die Sternspannung U (siehe Fig. 2a bis 2d).

Der Gegenstrom des einphasigen Verbrauchers ist proportional der Scheinleistung P_s des Verbrauchers und der Gegenstrom der Ausgleichsbelastung ist proportional der Scheinleistung P_{sa} der Aus-

gleichsbelastung. Beide heben sich auf, wenn erstmals ihre Beträge gleich sind, d.h. Verbraucher und Ausgleichsimpedanz gleiche Scheinleistungsbeträge haben:

$$P_{sa} = P_s \quad (12)$$

und zweitens die Nacheilwinkel α und α_a der beiden Gegenströme um π verschieden sind:

$$\alpha_a = \alpha + \pi = \varphi_a + 2\beta_a = \varphi + 2\beta + \pi \quad (13)$$

Die Gl. 13 liefert den gesuchten Phasenwinkel β_a um welchen die Anschlußspannung der Ausgleichsimpedanz der Sternspannung U nacheilen muss, damit der verlangte Ausgleich des Verbrauchers zustande kommt. Gl. 13 nach β_a aufgelöst ergibt:

$$\beta_a = \beta + \frac{1}{2}(\varphi - \varphi_a + \pi) \quad (13a)$$

Bequemer ist die Kenntnis des Anschlusswinkels $\psi_a = \beta_a - \beta$, welcher angibt, um welchen Phasenwinkel die Anschlußspannung der Ausgleichsbelastung gegenüber der Anschlußspannung des einphasigen Verbrauchers nacheilen muss:

$$\psi_a = \frac{1}{2}(\varphi - \varphi_a + \pi) \quad (13b)$$

Praktisch kommen als Ausgleichsbelastungen nur Blindlasten in Frage, also Drosselpulen mit $\varphi_a \approx +\frac{\pi}{2}$ und Kondensatoren mit $\varphi_a \approx -\frac{\pi}{2}$ weil sie mit ihren geringen Verlusten den Wirkungsgrad des Verbrauchers nur unwesentlich verschlechtern.

Setzt man in der Gl. 13a bzw. 13b für φ_a den Wert $+\frac{\pi}{2}$ ein, so findet man den richtigen Anschlusswinkel ψ_L einer Drosselpule, die zum Ausgleich des einphasigen Verbrauchers $P_s; \cos \varphi$ dienen soll.

$$\psi_L = \frac{\varphi}{2} + \frac{\pi}{4} \quad (13c)$$

So angeschlossen erzeugt die Drosselpule einen Gegenstrom, der den Gegenstrom des einphasigen Verbrauchers vollständig kompensiert, sofern die Gl. 12 befriedigt ist, d.h. der Betrag P_{bL} ihrer Blindleistung gleich der Scheinleistung P_s des einphasigen Verbrauchers ist.

$$P_{bL} = P_s \quad (12a)$$

Verwendet man dagegen an Stelle der Drosselpule einen Kondensator, so ist in Gl. 13a bzw. 13b für φ_a der Wert $-\frac{\pi}{2}$ einzusetzen und es ergibt sich für ihn der Anschlusswinkel

$$\psi_c = \frac{\varphi}{2} + \frac{3\pi}{4} \quad (13d)$$

Auch der Kondensator bringt den vollständigen Ausgleich, wenn der Betrag P_{bC} seiner Scheinleistung gleich der Scheinleistung P_s des auszugleichenden Verbrauchers ist.

$$P_{bC} = P_s \quad (12b)$$

Die Anschlusswinkel ψ_L und ψ_C sind um 90° verschieden; Drosselpule und Kondensator erzeugen also im Netz phasengleiche Gegenströme, wenn ihre Anschlußspannungen senkrecht aufeinanderstehen. Gleichzeitig angeschlossen, addieren sich ihre Gegenströme algebraisch und der Ausgleich bzw. die Kompensation des Verbrauchergegenstromes ist vollständig, wenn die Summe der Blindleistungsbeträge von Drosselpule und Kondensator gleich der Scheinleistung des Verbrauchers gemacht wird.

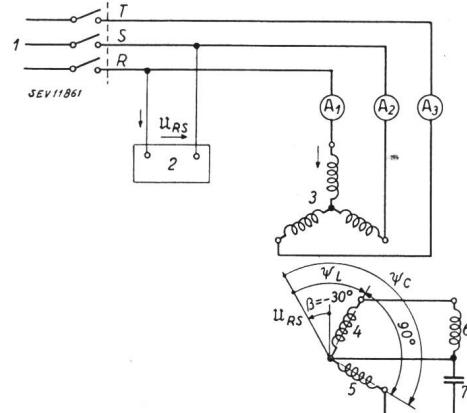


Fig. 5a.
Statische Ausgleichseinrichtung für beliebige Phasenverschiebung des einphasigen Verbrauchers

- 1 Netz $P_{sn}; \cos \varphi_n$
- 2 Einphasiger Verbraucher $P_s; \cos \varphi$
Die Ausgleichsblindlasten P_{bL} der Drosselpule 6 und P_{bC} des Kondensators 7 sind an die zweiphasige Sekundärwicklung 4 und 5 eines Drehtransformators angeschlossen. Der Ausgleich ist vollständig, wenn: $P_{bL} + P_{bC} = P_s$ und Anschlusswinkel $\psi_L = \frac{\varphi}{2} + \frac{\pi}{4}$ (siehe Diagramme 5b und 5c)
- 3 Spezialfall: $P_{bL} = P_{bC} = \frac{1}{2} P_s$; es wird: $P_{sn} = P_s; \cos \varphi_n = \cos \varphi$.

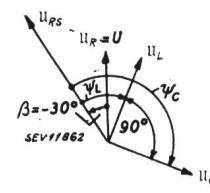


Fig. 5b.

Diagramm der Spannungen

- U Sternspannung R
- U_{RS} Anschlußspannung des einphasigen Verbrauchers $\beta = -30^\circ$
- U_L Anschlußspannung der Drosselpule
- $\psi_L = \frac{\varphi}{2} + \frac{\pi}{4} = \frac{20^\circ}{2} + 45^\circ = 55^\circ$
Annahme: φ des Verbrauchers 20°
- U_C Anschlußspannung des Kondensators
- $\psi_C = \frac{\varphi}{2} + \frac{3\pi}{4} = \frac{20^\circ}{2} + 135^\circ = 145^\circ$

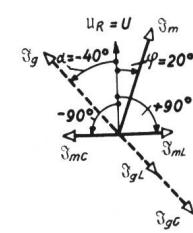


Fig. 5c.

Diagramm der Netzströme im Pol R

- Spezialfall $P_{bL} = P_{bC} = \frac{1}{2} P_s$
- Mitströme: Index m
Gegenströme: Index g
Verbraucher: P_s Betrag der Scheinleistung $\varphi = 20^\circ$
- $\Im_m; \Im_g$: Beträge $\frac{P_s}{3U}$
- α Nacheilwinkel von \Im_g
 $\alpha = 2\beta + \varphi = 2 \cdot 30 + 20 = -40^\circ$
- Ausgleichseinrichtung:
Drosselpule $\Im_{mL}; \Im_{gL}$
Beträge $\frac{P_{bL}}{3U}$
- Blindleistung P_{bL}
Kondensator $\Im_{mC}; \Im_{gC}$
Beträge $\frac{P_{bC}}{3U}$
- Blindleistung P_{bC}

$$P_{bL} + P_{bC} = P_s \quad (12c)$$

Der Verbraucher und die Ausgleichseinrichtung entnehmen zusammen dem Netz eine bestimmte Scheinleistung P_{sn} mit einem Leistungsfaktor $\cos \varphi_n$,

welche für die Energiekosten massgebend sind. Wie im ersten Teil im Zusammenhang mit Gl. 8 festgestellt wurde, ist die Berechnung der aus Verbraucher und Ausgleichseinrichtung resultierenden Scheinleistung, welche durch den resultierenden Mitstrom übertragen wird, sehr einfach; man rechnet mit den einzelnen einphasigen Belastungen durch Verbraucher und durch die Ausgleichsblindwiderstände, wie wenn sie symmetrische Belastungen wären.

Einige Spezialfälle verdienen besondere Beachtung:

a) In der Ausgleichseinrichtung nach Fig. 5a sind eine Drosselpule und ein Kondensator an die zweiphasige Sekundärwicklung eines Drehtransformators angeschlossen. Der auszugleichende Verbraucher P_s ; $\cos \varphi$ liegt an der verketteten Netzzspannung U_{RS} , welche der Sternspannung U um $\beta = -30^\circ$ voreilt. Siehe Vektordiagramme Fig. 5b und 5c. Der Drehtransformator ist zur Vereinfachung wie in Fig. 2a, Abschnitt 3, als idealer Transformator mit vernachlässigbarem Magnetisierungsstrom und ohne magnetische Streuung gedacht. Sein Rotor ist in diejenige Lage gedreht, für welche die Anschlußspannungen von Drosselpule und Kondensator die durch Gl. 13c und 13d vorgeschriebenen Anschlusswinkel erhalten. Die Blindleistungsbeträge von Drosselpule und Kondensator sind für den in Fig. 5c angedeuteten Spezialfall gleich gross und je halb so gross wie die Scheinleistung des Verbrauchers.

$$P_{bL} = P_{bc} = \frac{P_s}{2} \quad (12d)$$

Die von Drosselpule und Kondensator im Netz erzeugten Mitströme $\Im_{mL} = -j \frac{P_{bL}}{3U}$ bzw. $\Im_{mc} = j \cdot \frac{P_{bc}}{3U}$ (siehe Gl. 8) heben sich gegenseitig auf.

Die Primärseite des Drehtransformators entnimmt dem Netz nur den zum Ausgleich des Verbrauchers nötigen Gegenstrom. Die gleichen Ausschläge aller drei Ampèremeter A_1, A_2, A_3 täuschen eine harmlose symmetrische Belastung vor und doch bedeutet diese Ausgleichsbelastung für sich allein die extremste Form der Unsymmetrie ($D = \infty$). Hier wird es sichtbar, dass der Gegenstrom auch ein symmetrischer Strom ist. Da die Ausgleichseinrichtung selber keinen Mitstrom führt, haben Scheinleistung P_{sn} und Leistungsfaktor $\cos \varphi_n$ der ausgeglichenen Belastung dieselben Werte wie der einphasige Verbraucher.

$$\begin{aligned} P_{sn} &= P_s \\ \cos \varphi_n &= \cos \varphi \end{aligned} \quad (14)$$

In Wirklichkeit haben der Transformator und die Ausgleichsbelastungen Verluste. Ihre Wirkleistungen sind auf bekannte Weise bei einer ganz genauen Berechnung von P_{sn} und $\cos \varphi_n$ zu berücksichtigen.

Der Leistungsfaktor der ausgeglichenen Belastung kann auf einfache Weise verbessert oder verschlechtert werden, indem die Blindleistungen von Drosselpule und Kondensator ungleich gemacht

werden, aber so, dass die Summe ihrer Beträge (Gl. 12c) gleich bleibt. Je nachdem der Kondensator oder die Drosselpule überwiegen, wird der $\cos \varphi_n$ besser oder schlechter als im Verbraucher. Die Ausgleichseinrichtung führt dann neben dem ausgleichenden Gegenstrom noch den Mitstrom (Blindstrom) \Im_{ma}

$$\Im_{ma} = -j \frac{P_{bL} - P_{bc}}{3U} \quad (15)$$

und die resultierende Scheinleistung wird

$$P_{sn} = P_s \sqrt{\cos^2 \varphi + \left(\sin \varphi + \frac{P_{bL} - P_{bc}}{P_s} \right)^2} \quad (16)$$

mit dem Leistungsfaktor $\cos \varphi_n$

$$\cos \varphi_n = \frac{\cos \varphi}{\sqrt{\cos^2 \varphi + \left(\sin \varphi + \frac{P_{bL} - P_{bc}}{P_s} \right)^2}}$$

Die beschriebene Anordnung nach Fig. 5 ist vom theoretischen Standpunkt aus die ideale Form der statischen Ausgleichseinrichtung; sie ist anwendbar für jede beliebige Phasenverschiebung des Verbrauchers. Aenderst dieser z. B. die Phasenverschiebung des Stromes um $\Delta \varphi$, so ist der Rotor des Transformators entsprechend den Gleichungen 13 um den Winkel $\frac{\Delta \varphi}{2}$ zu verdrehen. Sie funktioniert auch, wenn der Winkel φ zwischen 90° und 270° liegt, die Energie also vom generatorisch arbeitenden «Verbraucher» ins Netz fliesst.

Eine kontinuierliche Anpassungsfähigkeit des Ausgleiches an einen veränderlichen Leistungsfaktor mit Hilfe eines verhältnismässig teuren Drehtransformators, dessen Typenleistung gleich der Verbraucherscheinleistung sein müsste, ist selten nötig. Meistens ist der Leistungsfaktor wenig veränderlich und es gelingt oft auf ganz einfache Weise durch einen oder zwei mit Anzapfungen versehene gewöhnliche Transformatoren, die richtigen Anschlusswinkel ψ der Ausgleichsblindlasten herzustellen.

b) Besonders bequem liegen die Verhältnisse, wenn die Anschlußspannung der Drosselpule mit der verketteten Netzzspannung zusammenfällt, dann sind gar keine Hilfstransformatoren notwendig. In Fig. 6a bis 6c ist dieser Fall veranschaulicht. Der Verbraucher liegt an der verketteten Netzzspannung U_{RS} und die Ausgleichsdrosselpule an der verketteten Netzzspannung U_{RT} , welche um $\beta_L = 30^\circ$ der Netzsternspannung U und um $\psi_L = 60^\circ$ der Anschlußspannung des Verbrauchers nacheilt. Der Ausgleich stimmt, wenn nach Gl. 12a die Blindleistung der Drosselpule gleich der Verbraucherscheinleistung ist, und im Verbraucher eine ganz bestimmte Phasenverschiebung des Stromes besteht. Nach Gl. 13c muss sie 30° sein; denn Gl. 13c nach φ aufgelöst gibt:

$$\varphi = 2\psi_L - \frac{\pi}{2} = 2 \cdot 60^\circ - 90^\circ = 30^\circ; \cos \varphi = 0,87$$

was nun gerade bei gewissen Einphasenöfen, deren

$\cos \varphi$ ca. 0,9 beträgt, praktisch genügend genau zu trifft.

Der Ausgleich mit nur einer Drosselpule ist die billigste Lösung; sie hat aber den Schönheitsfeh-

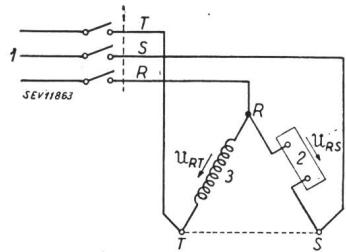


Fig. 6a.

Statischer Ausgleich durch eine Drosselpule

- 1 Netz P_{sn} ; $\cos \varphi_n$
 - 2 Einphasiger Verbraucher: Scheinleistung P_s ; $\cos \varphi$
 - 3 Ausgleichsdrosselpule mit Blindleistung P_{bl}
- Für die Schaltung Fig. 6a ist der Ausgleich vollständig, wenn im Verbraucher $\varphi = 30^\circ$ ($\cos \varphi = 0,87$) und $P_{bl} = P_s$; es wird $P_{sn} = \sqrt{3} \cdot P_s$ und $\cos \varphi_n = 0,5$.

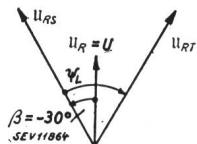


Fig. 6b.

Diagramm der Spannungen

- U Sternspannung R
- U_{RS} Anschlußspannung des einphasigen Verbrauchers
- U_{RT} Anschlußspannung der Drosselpule
- $\psi_L = 60^\circ$

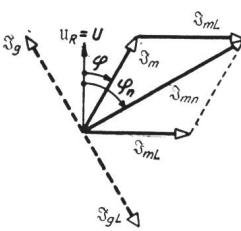


Fig. 6c.

Diagramm der Netzströme im Pol R

- Mitströme: Index m
- Gegenströme: Index g
- Verbraucher \Im_m ; \Im_g : $\varphi = 2\psi_L - \frac{\pi}{2} = 30^\circ$ (Gl. 13c)
- Drosselpule \Im_{ml} ; \Im_{gl} : $\alpha = 2\beta + \varphi = -60^\circ + 30^\circ = -30^\circ$
- Netz: $\Im_{mn} = \Im_m + \Im_{ml}$; $\varphi = 60^\circ$

ler, dass das Netz die Blindleistung der Drosselpule liefern muss. Nach Gl. 16 wird für $P_{bc} = 0$ (Ausgleich nur mit Drosselpule) und $\varphi = 30^\circ$ die Scheinleistung des ausgeglichenen Verbrauchers das $\sqrt{3}$ fache des unausgeglichenen, und der Leistungsfaktor $\cos \varphi_n$ wird 0,5 gegenüber 0,87 im Verbraucher.

c) Die Schaltung nach Fig. 7 stimmt wie die vorangehende nach Fig. 6a für $\varphi = 30^\circ$ im Verbraucher. Sie arbeitet im Prinzip wie die Schaltung nach Fig. 5a. Der Drehstromtransformator ist unnötig, weil sich auch die zur Drosselpulenspannung senkrecht stehende Anschlußspannung des Kondensators zwischen der Mittelanzapfung V der Drosselpule und dem Pol S von selbst ergibt. Die Drosselpule arbeitet gleichzeitig als Spannungssteiler. Unter P_{bl} ist die Blindleistung zu verstehen, die sie hätte, wenn der Kondensator abgetrennt wäre. Abgesehen von der kontinuierlich einstellbaren Anpassung an den Leistungsfaktor des Verbrauchers, die wegfällt, verhält sich diese Ausgleichseinrichtung wie die Schaltung nach Fig. 5. Bei gleichen Blindleistungsbeträgen von Drosselpule und Kondensator (Gl. 12d) entnimmt sie ebenfalls dem Netz nur den zum Ausgleich verlangten Gegenstrom, welcher im Pol R der Netzsternspannung U nach Gl. 9a um

$$\alpha_L = \frac{\pi}{2} + 2 \cdot 30^\circ = 150^\circ$$

nachelt; denn für die einphasige Belastung durch eine Drosselpule ist $\varphi_L = \frac{\pi}{2}$ und in der Schaltung

Fig. 7 ist der Nacheilwinkel β_L der Drosselpulenspannung bezogen auf U gleich 30° .

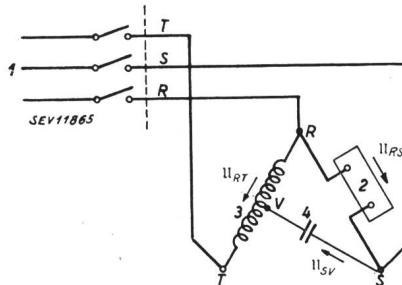


Fig. 7.

Statischer Ausgleich durch Drosselpule und Kondensator

- 1 Netz P_{sn} ; $\cos \varphi_n$
 - 2 Einphasiger Verbraucher: Scheinleistung P_s ; $\cos \varphi$
 - 3 Ausgleichsdrosselpule: Blindleistung P_{bl}
 - 4 Ausgleichskondensator: Blindleistung P_{bc}
- Die Kondensatorspannung $U_c = U_{sv}$ steht senkrecht auf der Drosselpulenspannung $U_L = U_{RT}$. Der Ausgleich ist vollständig, wenn im Verbraucher $\varphi = 30^\circ$; $\cos \varphi = 0,87$ und wenn $P_{bl} + P_{bc} = P_s$. Spezialfall: $P_{bl} = P_{bc} = \frac{1}{2} P_s$; dann ist $P_{sn} = P_s$. $\cos \varphi_n = \cos \varphi = 0,87$, es gilt das Stromdiagramm 5c, jedoch für $\varphi = 30^\circ$

d) Durch eine kleine Abänderung kann die einfache Schaltung nach Fig. 7 auch für eine von 30° abweichende Phasenverschiebung φ im Verbraucher den exakten Ausgleich bringen. Wenn φ um $\Delta\varphi$ gegenüber 30° verändert ist, hat sich auch der Gegenstrom \Im_g des Verbrauchers um $\Delta\varphi$ verdreht gegenüber der Ausgangslage für $\varphi = 30^\circ$. Der Gegenstrom \Im_{ga} der Ausgleichseinrichtung muss sich also um den Betrag $\Delta\varphi$ nacheilend verschieben. Dies wird in der Tat erreicht, indem z. B. nach Fig. 8a die Anschlußspannung U_{sv} des Kondensators durch Versetzen des Anzapfpunktes der Drosselpule aus der Mittellage um den Winkel $2\Delta\varphi$ verdreht wird. Gleiche Blindleistungen von Drosselpule und Kondensator vorausgesetzt, sind die Gegenströme \Im_{gL} der Drosselpule und \Im_{gC} des Kondensators gleich gross. Wie die Fig. 8b veranschaulicht, hat sich der Gegenstrom \Im_{gC} um den Winkel $2\Delta\varphi$ und der resultierende Gegenstrom \Im_{ga} um $\Delta\varphi$ gedreht. Da die Anschlußspannungen von Drosselpule und Kondensator nicht mehr senkrecht aufeinander stehen und die Gegenströme von Drosselpule und Kondensator sich deshalb nicht mehr algebraisch, sondern unter dem Winkel $2\Delta\varphi$ addieren, ist gegenüber den Schaltungen Fig. 5 und Fig. 7 der Blindleistungsaufwand für vollständigen Ausgleich im Verhältnis $\frac{1}{\cos 2\Delta\varphi}$ grösser geworden.

Das folgt aus der Proportionalität zwischen einer einphasigen Belastung und ihrem Gegenstrom. Der Ausgleich ist richtig, wenn:

$$P_{bl} = P_{bc} = \frac{P_s}{2} \cdot \frac{1}{\cos 2\Delta\varphi} \text{ wo } \Delta\varphi = \varphi - 30^\circ \quad (12e)$$

Für $\cos \varphi = 1$ ist $\Delta\varphi = -30^\circ$; der Kondensator kommt an die verkettete Spannung U_{ST} zu liegen; es entsteht die altbekannte Schaltung, für welche der Ausgleich stimmt, wenn nach Gl. 12e für

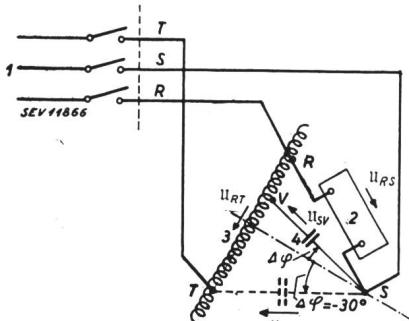


Fig. 8a.

Statischer Ausgleich durch Drosselpule und Kondensator für einphasige Verbraucher mit $\varphi \neq 30^\circ$

- 1 Netz P_{sn} ; $\cos \varphi_n$
 - 2 Einphasiger Verbraucher; Scheinleistung P_s ; $\cos \varphi$
 - 3 Ausgleichsdrosselpule; Blindleistung P_{bl}
 - 4 Ausgleichskondensator; Blindleistung P_{bc}
- Der Ausgleich ist vollständig, wenn im Verbraucher $\varphi = 30^\circ + \Delta\varphi$ und wenn $P_{bl} = P_{bc}$ ist: $P_{sn} = P_s$, $\cos \varphi_n = \cos \varphi$

Die Kondensatorspannung $U_C = U_{RT}$ den Winkel $90^\circ + \Delta\varphi$. Spezialfall: $\cos \varphi = 1$, also $\Delta\varphi = -30^\circ$

$$\text{P}_{sn} \text{ fällt mit } U_{ST} \text{ zusammen; es ist } P_{bl} = P_{bc} = \frac{P_s}{\sqrt{3}}$$

Fig. 8b.

Diagramm der im Pol R durch die Schaltung Fig. 8a erzeugten Gegenströme

- U : Sternspannung R
 \Im_{gl} : Gegenstrom der Drosselpule mit Phasenlage $\alpha_L = 150^\circ$
 \Im_{gc} : Gegenstrom des Kondensators
 $\Im_{ga} = \Im_{gl} + \Im_{gc}$: Gegenstrom der Ausgleichseinrichtung.

$\Delta\varphi = -30^\circ$ die Blindleistungsbeträge von Drosselpule und Kondensator:

$$P_{bl} = P_{bc} = \frac{P_s}{\sqrt{3}} \quad (12f)$$

gemacht werden.

e) Mit der Schaltung nach Fig. 9 ist ebenfalls für eine von 30° abweichende Phasenverschiebung φ im Verbraucher der exakte Ausgleich auf verhältnismässig einfache Weise mit Hilfe einer Drosselpule

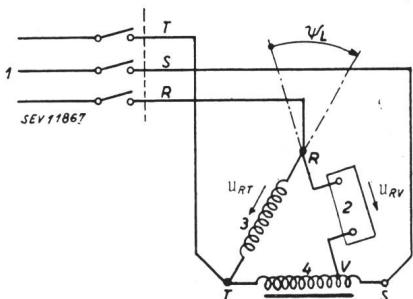


Fig. 9.

Statischer Ausgleich durch eine Drosselpule für einphasige Verbraucher mit φ kleiner als 30°

- 1 Netz P_{sn} ; $\cos \varphi_n$
 - 2 Einphasiger Verbraucher; Scheinleistung P_s ; $\cos \varphi$
 - 3 Ausgleichsdrosselpule; Blindleistung P_{bl}
 - 4 Spannungsteiler
- Der Anzapfpunkt V im Spannungsteiler wird so gelegt, dass die Anschlussspannung U_{RV} der Drosselpule der Verbraucherspannung U_{RV} um $\psi_L = \frac{\varphi}{2} + \frac{\pi}{4}$ nacheilt (Gl. 13c)
- Vollständiger Ausgleich wenn: $P_{bl} = P_s$; es wird $P_{sn} > P_s$, $\cos \varphi_n < \cos \varphi$

spule und eines Spannungsteilers möglich. Der einphasige Verbraucher liegt zwischen dem Netzpol R und einem Anzapfpunkt V des Spannungsteilers. Wie der Anzapfpunkt V gegenüber dem Punkt S zu verschieben ist, damit der durch Gl. 13c gegebene Anschlusswinkel der Drosselpule

$\psi_L = \frac{\varphi}{2} + \frac{\pi}{4}$ zustande kommt, ist in Fig. 9 ange deutet.

Für $\varphi = 30^\circ$ kommt der Punkt V direkt an den Netzpol S zu liegen. Der Spannungsteiler wird unnötig und die Ausgleichseinrichtung geht in die unter b behandelte (siehe Fig. 6a) über: Sie hat auch dieselben Mängel: Entnahme der Blindleistung der Drosselpule $P_{bl} = P_s$ aus dem Netz und dadurch Verschlechterung des Leistungsfaktors der ausgeglichenen Belastung nach Gl. 16 für $P_{bc} = 0$.

6. Der unvollständige Ausgleich

Es wurde gezeigt, wie die Ausgleichseinrichtung zu dimensionieren und ans Netz anzuschliessen ist, damit eine ganz bestimmte Belastung P_{so} ; $\cos \varphi_o$ des Verbrauchers ausgeglichen wird. Praktisch werden Scheinleistung und Leistungsfaktor des Verbrauchers gewissen Schwankungen unterworfen sein und es frägt sich, was für eine Unsymmetrie entsteht im Netz, wenn Scheinleistung P_s und Phasenverschiebung φ des Verbrauchers von P_{so} und φ_o abweichen. Für den Ausgleich mit Kondensator und Drosselpule gleicher Blindleistungsbeträge (z.B. Schaltungen Fig. 5a; 7 oder 8a) liegen die Verhältnisse besonders einfach, weil der Mitstrom der Ausgleichseinrichtung wegfällt. Wir wollen einen solchen Fall voraussetzen und annehmen, die Scheinleistung sei von P_{so} auf P_s gestiegen, und die Phasenverschiebung habe sich von φ_o auf φ geändert. Vor der Änderung hat der Gegenstrom \Im_{ga} der Ausgleichseinrichtung in Fig. 10a den Gegenstrom \Im_{go} des Verbrauchers vollständig kompensiert; jetzt ist aber \Im_{go} im Verhältnis $\frac{P_s}{P_{so}}$ auf \Im_g gestiegen, und hat sich um den Winkel ($\varphi - \varphi_o$) nacheilend verdreht. Es resultiert im Netz der Gegenstrom $\Im_{gn} = \Im_{ga} + \Im_g$ mit dem Betrag I_{gn} . Der Mitstrom ist ebenfalls proportional dem Verhältnis der Beträge

$\frac{P_s}{P_{so}}$ gestiegen und es ist eine Unsymmetrie $D = \frac{I_{gn}}{I_m}$ entstanden. Das Dreieck Fig. 10b ist demjenigen der Fig. 10a ähnlich. Die Strecke d ist ein Mass für I_{gn} und der Betrag P_s ein Mass für den Mitstrom I_m . Die resultierende Unsymmetrie ist durch

$$D = \frac{d}{P_s} \text{ gegeben}$$

und lässt sich auf bekannte Weise aus P_{so} , P_s und $\varphi - \varphi_o$ berechnen. Das Ergebnis lautet:

$$D = \sqrt{\left(1 - \frac{P_{so}}{P_s}\right)^2 + 4 \frac{P_{so}}{P_s} \cdot \sin^2 \left(\frac{\varphi - \varphi_o}{2}\right)} \quad (17)$$

Gl. 17 ist in Fig. 11 graphisch dargestellt, indem für eine bestimmte Winkeländerung $\varphi - \varphi_o$ von

$\pm 6^\circ$, $\pm 12^\circ$, $\pm 18^\circ$ usw. die Unsymmetrie in Abhängigkeit von $\frac{P_{so}}{P_s}$ aufgetragen ist.

Wir wollen z. B. annehmen, ein Graphitstabofen sei durch die einfache Schaltung der Fig. 7 ausgeglichen worden für $\varphi = 30^\circ$, also $\cos \varphi = 0,87$. Der Stab ist dünner geworden und der $\cos \varphi$ hat sich auf 0,91 verbessert, gleichzeitig wurde die

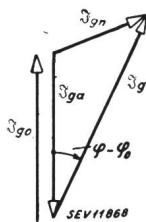


Fig. 10a.

Hilfsfigur zu Gl. 17

- 3_g Gegenstrom der Scheinleistung P_s
- 3_{go} Gegenstrom der Scheinleistung P_{so} , für welche der Ausgleich vollständig ist
- 3_{ga} Gegenstrom der Ausgleichseinrichtung
- 3_{gn} Resultierender Gegenstrom im Netz

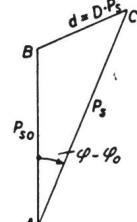


Fig. 10b.

Hilfsfigur zu Gl. 17

- Dreieck ABC ist ähnlich dem Vektortriangle $3_g; 3_{ga}; 3_{gn}$ (Fig. 10a)
- Der Ausgleich für die Verbraucherscheinleistung vom Betrag P_{so} und $\cos \varphi_0$ ist vollständig.
- P_s wirkliche Scheinleistung des Verbrauchers
- φ wirkliche Phasenverschiebung des Verbrauchers

Scheinleistung, um rascher zu heizen, durch Erhöhen der Spannung am Stab um 11 % gehoben. Dem $\cos \varphi = 0,91$ entspricht ein Winkel φ von rund 24° ; φ hat sich also um -6° verändert und $\frac{P_{so}}{P_s}$ ist $\frac{1}{1,1} = 0,9$. Die Vertikale durch den Abszissenpunkt 0,9 schneidet die 6° -Kurve im Punkt A. Die gesuchte Unsymmetrie ist nur 14 %. Der Ausgleich ist immer noch sehr gut, nicht schlechter als mit der rotierenden Phasenausgleichsgruppe, die stets eine Stromunsymmetrie von 10 bis 15 % ins Netz lässt. Auf die an Oefen vorkommenden geringen Änderungen von φ ist die statische Phasenausgleichseinrichtung praktisch unempfindlich; es genügt für Oefen nur die Unsymmetrie durch Änderung der Scheinleistung zu beachten, diese ist

$$D = \frac{P_s - P_{so}}{P_s} \quad (18)$$

Wie weit darf man mit der Unsymmetrie gehen? Sind die Schwankungen so gross, dass ein statischer Ausgleich nicht mehr verwendbar ist; oder wird die Scheinleistung des Verbrauchers innerhalb eines so weiten Bereiches geregelt, dass auch der Ausgleich regelbar sein muss, mindestens in einigen wenigen Stufen? Diese Fragen lassen sich nur für konkrete Netzverhältnisse beantworten und es überrascht gewöhnlich, wie wenig es braucht, um gesunde Verhältnisse zu haben. Ein Beispiel mag das illustrieren: An einem kräftigen Netz mit grosser Kurzschlussleistung ist ein Nebenzweig mit geringer Kurzschlussleistung angeschlossen, welcher am Ende mit $P_{sm} = 1000$ kVA; $\cos \varphi = 0,8$ symmetrisch und mit P_s ; $\cos \varphi = 0,8$ einphasig belastet wird. Bei Vollast hat der einphasige Verbrau-

cher eine Scheinleistung $P_s = P_{sv}$ von 1000 kVA. Der schwache Nebenzweig erträgt 2000 kVA symmetrisch und hat dabei einen mitlaufenden Spannungsabfall von 20 %, der ausgeregelt wird. Der Energielieferant lässt den Anschluss der einphasigen 1000 kVA nicht zu, da sonst ein gegenlaufender Spannungsabfall von ca. $0,2 \frac{1000}{2000} = 10\%$ entstehen würde. Es wird ein Phasenausgleich kategorisch verlangt. Der Verbraucher ist ein Ofen, dessen Scheinleistung zeitweise vom Vollastwert P_{sv} bis auf den Wert $k \cdot P_{sv}$ hinunter geregelt wird; für das Beispiel soll $k = 0,5$ sein. Man entschliesst sich für einen statischen Ausgleich durch Drosselpule und Kondensator gleicher Blindleistung, weil er einfach, und im Vergleich zu rotierenden Phasenumformern billig ist, und einen sehr hohen Wirkungsgrad hat. Für welche Scheinleistung ist der Ausgleich zu dimensionieren: Sinngemäß so, dass für die extremen Werte der Verbraucherscheinleistung P_{sv} und $k \cdot P_{sv}$ der resultierende Gegenstrom und damit auch der gegenlaufende Spannungsabfall im Netz gleich gross wird; das trifft zu, wenn Gl. 19 erfüllt wird

$$P_{sv} - P_{so} = P_{so} - k P_{sv} \quad (19)$$

daraus ergibt sich die durch die Ausgleichseinrichtung auszugleichende Scheinleistung (19a)

$$P_{so} = \frac{1+k}{2} P_{sv} \quad (19a)$$

also für das Beispiel ist $P_{so} = 0,75 \cdot P_{sv}$. Die Stromunsymmetrie des ausgeglichenen Verbrauchers wird bei Vollast ($P_s = P_{sv}$), indem man in Gl. 18 für P_s den Vollastwert P_{sv} und für P_{so} den Betrag nach Gl. 19a einsetzt

$$D_v = \frac{1-k}{2} \quad (20)$$

Im Netz dagegen ist sie bei Vollast nach Gl. 21 im Verhältnis der Beträge von Einphasen-Verbraucherscheinleistung P_{sv} zur resultierenden Scheinleistung der beiden Verbraucher kleiner geworden. (Proportionalität zwischen den Beträgen von Scheinleistung und entsprechendem Mitstrom, Gl. 8. Die resultierende Netzscheinleistung hat den Betrag $P_{sv} + P_{sm}$, da beide Verbraucher im Beispiel gleiche Leistungsfaktoren haben; andernfalls wäre sie auf bekannte Weise aus den Wirk- und Blindleistungskomponenten zu bilden. Daher ist die Unsymmetrie der Ströme bei Vollast am Netzende:

$$D_v = \frac{1-k}{2} \cdot \frac{P_{sv}}{P_{sv} + P_{sm}} \quad (21)$$

Für $k = 0,5$ wird die Stromunsymmetrie im ausgeglichenen Verbraucher nach Gl. 20 $D_v = 25\%$ und im Netz ist sie nach Gl. 21 nur 12,5 %. Der unerwünschte gegenlaufende Spannungsabfall erreicht bei Vollast und kleinster Belastung seinen grössten Wert, nämlich das D_v -fache des mitlaufenden Vollastspannungsabfalls, am Netzende also nur $0,20 \cdot 0,125 = 2,5\%$.

Der statische Ausgleich im Zahlenbeispiel genügt vollauf ohne jede Regelung und ist für 75 % der Vollastscheinleistung zu dimensionieren. In der Schaltung mit minimalem Blindleistungsaufwand (Drosselspannung und Kondensatorspannung stehen senkrecht aufeinander) würden die Blindleistungen von Drosselpule und Kondensator je nur 37,5 % der Verbraucherscheinleistung ausmachen.

7. Statischer Ausgleich oder Ausgleichsgruppe (rotierender Phasenumformer)?

Der statische Ausgleich ist ideal für Verbraucher, die selbst statischen Charakter haben, also für Widerstände, Scheinwiderstände, Ofen und ähnliche Verbraucher. Der Ausgleich bleibt stets vollständig, auch wenn die Leistung des Verbrauchers durch Ändern der speisenden Spannung geregelt wird;

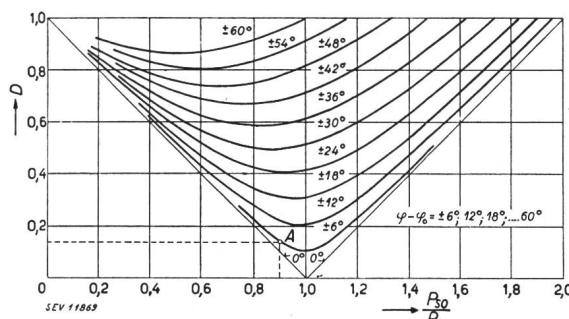


Fig. 11.

Unvollständiger Ausgleich durch eine Ausgleichseinrichtung ohne Mitstromaufnahme ($P_{BL} = P_{BC}$)
Stromunsymmetrie $D = \frac{I_{gn}}{I_m}$ des unvollständig ausgeglichenen

Verbrauchers in Abhängigkeit von $\frac{P_{eo}}{P_s}$ und $\varphi - \varphi_0$.

P_{eo} Scheinleistungsbetrag des einphasigen Verbrauchers und
 φ_0 Phasenverschiebung des einphasigen Verbrauchers, für welche der Ausgleich vollständig ist

P_s wirklicher Scheinleistungsbetrag und
wirkliche Phasenverschiebung des einphasigen Verbrauchers

I_{gn} Betrag des wegen unvollständigem Ausgleich im Netz resultierenden Gegenstromes

I_m Mitstrom des einphasigen Verbrauchers

nur ist dafür zu sorgen, dass auch die Anschlussspannungen der Ausgleichseinrichtung zwangsläufig gleichartig geändert werden. Das ist leicht zu verwirklichen, z. B. nach Fig. 12.

Der statische Ausgleich lässt sich aber auch, wie gezeigt wurde, auf Verbraucher mit nicht allzu grossen Belastungsschwankungen anwenden. Auf Änderungen der Phasenverschiebung innerhalb ca. $\pm 12^\circ$ ist er wenig empfindlich. An Hand der

Kurvenschär Fig. 11 lassen sich für bekannte Netzverhältnisse seine Auswirkungen im Betrieb bei schwankender Belastung leicht diskutieren.

Für programmässige Belastungsschwankungen kann er regelbar gemacht werden, verliert aber damit seine bestechende Einfachheit.

Die statische Ausgleichseinrichtung ist für Belastungen, die sich in weiten Grenzen willkürlich ändern, nicht geeignet, weil zeitweise zu grosse Stromunsymmetrien auftreten würden. Für solche Fälle ist eine Ausgleichsgruppe zu verwenden, die von selbst den Gegenstrom jeder beliebigen einphasigen Belastung mit beliebigem Leistungsfaktor bis auf einen Rest von 10...15 % vom speisenden Netz fernhält. Leider erzeugt die Ausgleichsgruppe zwischen Netz und Verbraucher einen belastungsabhängigen Spannungsabfall, der für niedrige Lei-

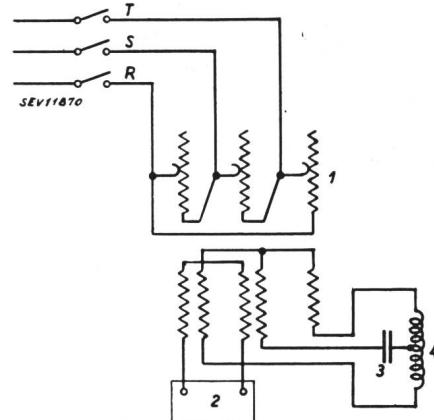


Fig. 12.

Ausgeglichener Einphasenofen, dessen Leistung durch Ändern seiner Spannung geregelt wird

1 Ofentransformator mit Primärregulierung

2 Einphasiger Ofen: Scheinleistung P_s ; $\cos \varphi \approx 0,9$

3 Ausgleichsdrosselpule: Blindleistung P_{BL}

4 Ausgleichskondensator: Blindleistung P_{BC}

$$P_{BL} = P_{BC} = \frac{1}{2} P_s$$

3 und 4 werden durch Tertiärwicklung des Transformators gespeist. Bei konstantem Ofen-Scheinwiderstand bleibt der Ausgleich in allen Regelstellungen richtig.

stungsfaktoren des Verbrauchers unangenehm gross wird.

Wenn immer möglich, ist die statische Ausgleichseinrichtung rotierenden Maschinen vorzuziehen, denn sie hat einen sehr hohen Wirkungsgrad, braucht in der einfachsten, nicht regelbaren Form gar keine Wartung, erzeugt keinen belastungsabhängigen Spannungsabfall im Verbraucherstromkreis, und ist die billigste Ausgleichsmethode.

Die Entwicklung gekapselter Niederspannungs-Verteilanlagen in der Schweiz

Von Th. Siegfried, Zürich

621.316.364

Es wird am Beispiel der Konstruktionen einer Firma gezeigt, welchen Verlauf die Entwicklung gekapselter Verteilanlagen für Niederspannung in der Schweiz allgemein genommen hat.

Aus der im Juni 1941 vom SEV veröffentlichten Statistik über Betriebsunfälle in elektrischen Anlagen während der letzten 30 Jahre¹⁾ ist ersichtlich,

¹⁾ Bull SEV 1941, Nr. 11, S. 237.

dass die Zahl der Unfälle in Niederspannungsanlagen gegen das Ende der Berichtsperiode etwa im Verhältnis 1 : 4 zugenommen hat. Dabei entfallen auf das eigentliche Betriebspersonal der Werke etwa