Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 59 (1968)

Heft: 17

Artikel: Zusatzfehler beim Messen des Blindverbrauchs in Drehstrom-4-Leiternetzen bei Verwendung von Blindverbrauchszählern in Kunstschaltung

Autor: Tschappu, F.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-916070

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: 02.07.2025

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

Zusatzfehler beim Messen des Blindverbrauchs in Drehstrom-4-Leiternetzen bei Verwendung von Blindverbrauchszählern in Kunstschaltung

Von *F. Tschappu*, Zug

621.317.382.016.25:621.316.13

Wird die vom Abonnenten konsumierte Blindenergie mit Drehstrom-4-Leiterzählern in Kunstschaltung gemessen, deren Messwerke an phasenfremde Spannung geschaltet sind, so treten nur bei symmetrischem Spannungsdreieck keine Messfehler auf. Ist das Spannungsdreieck verzerrt, was in der Praxis mehr oder weniger der Fall ist, so ist mit Fehlern zu rechnen, die von der Grösse der Unsymmetrie der Netzspannungen abhängen. Mit den symmetrischen Komponenten kann die Unsymmetrie der Netzspannungen übersichtlich dargestellt werden; sie ergeben bei symmetrischer Belastung einfache Zusammenhänge mit dem Fehler. Daraus ist u.a. zu entnehmen, dass der Fehler bei beliebigen Unsymmetrien in der Netzspannung stets negativ und unabhängig vom Phasenwinkel φ der Belastungen ist. Es kann abgeleitet werden, dass bei symmetrischer Wirkbelastung, d.h. wenn der Abonnent keine Blindbelastung konsumiert, der Zähler bei beliebig verzerrtem Spannungsdreieck in keinem Falle Fehler anzeigt, und dass keiner der Partner durch eine Fehlanzeige wirtschaftlichen Nutzen oder Schaden nimmt. Diese Feststellung ist sowohl für den Lieferanten als auch für den Bezüger von elektrischer Energie von einiger Bedeutung und dürfte das Anwendungsgebiet für diese Art von Zählern eher erweitern.

Bei unsymmetrischer Belastung sind die Fehler ausser von der Grösse der symmetrischen Komponenten der Netzspannung auch noch von ihrer gegenseitigen Phasenlage, sowie vom Phasenwinkel φ der Belastung abhängig. Falls aber der Unsymmetriegrad der Belastung relativ klein, d. h. kleiner als 5 % ist, so kann der Fehler bei reiner Blindbelastung angenähert durch die Grösse der symmetrischen Komponenten dargestellt werden. Er ist auch in diesen Fällen stets negativ. Bei gegebenen symmetrischen Komponenten ist mit steigendem Unsymmetriegrad der Belastungen mit grösseren Fehlern zu rechnen.

Bei 1-phasiger Belastung kann das Vorzeichen des Fehlers positiv oder negativ sein, und der Fehler selber besteht aus einer Komponente, die unabhängig vom Phasenwinkel φ und aus einer Komponente, die abhängig vom ctg des Phasenwinkels φ der Belastungen ist.

Les compteurs d'énergie réactive en branchement artificiel ne mesurent correctement l'énergie réactive que lorsque le triangle des tensions est symétrique. En effet, les systèmes de mesure sont connectés à la tension de phases voisines. Si le triangle des tensions est déformé — ce qui est plus ou moins le cas en pratique — il faut s'attendre à des erreurs additionnelles qui dépendent du degré de dissymétrie des tensions du réseau. La dissymétrie des tensions peut être représentée de façon claire à l'aide des composantes symétriques. Ces dernières permettent d'établir des relations simples entre la dissymétrie et l'erreur additionnelle lorsque la charge est symétrique. Il ressort entre autres de ces relations que l'erreur est toujours négative pour toutes les dissymétries de tension pouvant se présenter et qu'elle reste indépendante de la valeur de l'angle φ. Cependant, sous charge active symétrique, c'est-à-dire lorsque l'abonné ne présente aucune charge réactive, l'indication du compteur est correcte quel que soit le triangle de tension. Par conséquent, les partenaires en présence ne tirent aucun bénéfice ou ne subissent aucun préjudice du fait de l'utilisation d'un compteur en branchement artificiel. Cet état de choses est de quelque importance, aussi bien pour le fournisseur que pour le consommateur, et devrait contribuer à élargir le champ d'application de ces compteurs d'énergie réactive.

Sous charge asymétrique, les erreurs dépendent de la valeur des composantes symétriques de la tension, de la position réciproque de ces dernières et de l'angle φ. Pour autant que le degré de dissymétrie de la charge reste faible, c'est-à-dire jusqu'à 5 % environ, on peut représenter l'erreur approximativement par la grandeur des composantes symétriques sous charge réactive pure. Dans ce cas également, l'erreur additionnelle est négative. Plus le degré de dissymétrie augmente, plus l'erreur devient importante pour des composantes symétriques données.

Sous charge monophasée, l'erreur peut être positive ou négative; cette erreur comprend une composante indépendante de l'angle φ et une autre composante dépendante de la cotangente de l'angle φ.

1. Einleitung

Mit den normalen Messwerken der Induktionszähler wird das Zeitintegral des skalaren Produktes aus Spannung und Strom, d.h. der Ausdruck:

$$\int U\, I \cos \varphi \, \mathrm{d}t$$

gemessen, welcher physikalisch der Wirkenergie entspricht. Soll mit den gleichen Messwerken auch die Blindenergie gemessen werden, so muss die innere Phasenverschiebung zwischen dem Spannungs- und Stromtriebfluss von 90° auf 180° korrigiert werden, was mit einem Ohmschen Vorwiderstand im Spannungskreis und einem Ohmschen Shunt im Stromkreis erreicht wird. Diese Art von Blindverbrauchszählern in natürlicher Schaltung messen den wahren Wert der Blindbelastung im Netz unabhängig von Unsymmetrien von Mehrphasensystemen und Belastung. Der Eigenverbrauch dieser Apparate, sowie ihr Platzbedarf ist aber gegenüber den normalen Wirkverbrauchszählern grösser. Ausserdem sind die Blindverbrauchszähler in natürlicher Schaltung nur für eine relativ kleine Überlastbarkeit ausgelegt, im Gegensatz zu den modernen Wirkverbrauchszählern, deren Belastbarkeit heute bis zu 600 % der Nennlast beträgt.

In gewissen Fällen, wo hauptsächlich symmetrische Belastungen im Netz vorkommen und ausserdem keine allzugrosse Anforderungen an die Messgenauigkeit der Blindverbrauchszähler gestellt werden, wird eine andere Art von Blindverbrauchszählern in Kunstschaltung verwendet, bei welchen die normalen Messwerke eines Wirkverbrauchszählers benützt werden. Die zur Messung des Blindverbrauchs notwendige zusätzliche Phasendrehung von 90° zwischen dem Spannungs- und Stromtriebfluss der einzelnen Messwerke wird durch Anschluss ihrer Spannungskreise an phasenfremde Spannungen, die gegenüber der Spannung am Verbraucher um 90° in der Phase verschoben sind, erzielt. Das Schaltschema ist in Fig. 1 und das entsprechende Vektordiagramm der Spannungen und

2179 - 2193

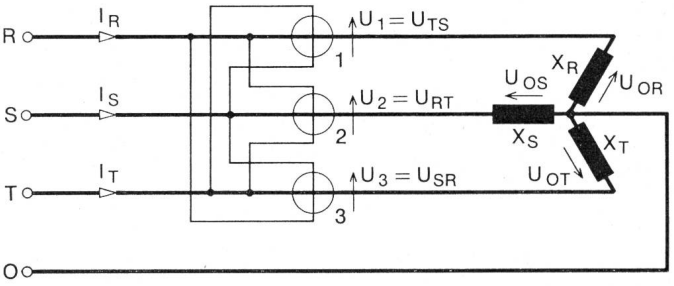

Fig. 1
Schaltung eines Drehstrom-4-Leiter-Blindverbrauchszählers in Kunstschaltung
R, S, T, O Leiter eines Drehstrom-4-Leiternetzes; I_R, I_S, I_T Phasenströme; U_1, U_2, U_3 Spannungen an den Messwerken 1, 2, 3; *1, 2, 3* Messwerke des Zählers

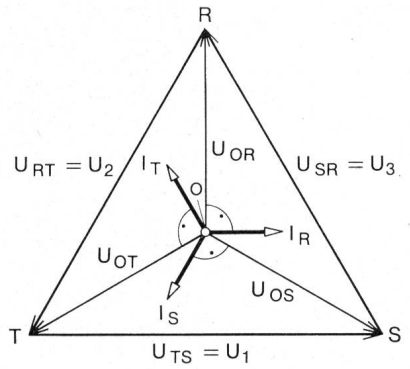

Fig. 2
Vektordiagramm der Spannungen und Ströme
R, S, T, 0 Leiter eines Drehstrom-4-Leiternetzes; U_{RT}, U_{SR}, U_{TS} Verkettete Spannungen; U_{0R}, U_{0S}, U_{0T} Phasenspannungen; U_1, U_2, U_3 Spannungen an den Messwerken 1, 2, 3; I_R, I_S, I_T Phasenströme

Ströme in Fig. 2 dargestellt. Die drei Reaktanzen X_R, X_S und X_T sind in Stern an ein Drehstrom-4-Leiternetz R-S-T-0 angeschaltet. Der Strom der Phase R fliesst durch das Messwerk 1, dessen Spannungskreis an die verkettete Spannung $U_{TS} = U_1$ angeschlossen ist. Sinngemäss sind die beiden anderen Messwerke 2 und 3 geschaltet.

Zur genauen Messung der Blindbelastung im Netz ist deshalb Voraussetzung, dass die Dreieckspannungen U_{TS}, U_{RT} bzw. U_{SR} genau senkrecht auf den entsprechenden Sternspannungen U_{0R}, U_{0S} bzw. U_{0T} stehen. Ferner müssen sich die Dreieck- zu den Sternspannungen um den Faktor $\sqrt{3}$ voneinander unterscheiden. Diese Bedingungen sind aber nur dann erfüllt, wenn das Spannungsdreieck symmetrisch ist und sich der Sternpunkt im Schwerpunkt des Dreiecks befindet. Diese idealen Verhältnisse sind im Netz wohl kaum vorhanden, da auch bei einem symmetrischen Spannungsdreieck am Generator infolge der ungleichen Spannungsabfälle in der Übertragungsleitung das Spannungsdreieck an der Meßstelle unsymmetrisch sein kann. Deshalb wird die Blindenergie von Drehstrom-4-Leiterzählern in Kunstschaltung im allgemeinen nicht fehlerfrei gemessen.

Die Grösse der Unsymmetrie eines Spannungdreieckes wird mit dem Begriff der symmetrischen Komponenten eindeutig definiert.

2. Die Zerlegung eines unsymmetrischen Spannungdreieckes in seine symmetrischen Komponenten

Bevor die symmetrische Komponentenrechnung auf obigen konkreten Fall angewendet wird, sei zuerst auf einige grundlegende Gesetzmässigkeiten dieser Rechenmethode hingewiesen:

Drei phasenverschobene Spannungen ungleicher Grösse können stets in ein Mit-, Gegen- und Nullsystem zerlegt werden.

Das Mitsystem mit Symbol U_0' besteht aus drei betragsmässig gleichen Spannungen U_R' U_S' und U_T', die in der Phase um je 120° gegeneinander verschoben sind. Die zeitliche Reihenfolge der Mitspannungen ist R-S-T.

Das Gegensystem mit Symbol U_0'' besteht ebenfalls aus drei betragsmässig gleichen Spannungen U_R'', U_S'' und U_T'', die in der Phase um je 120° gegeneinander verschoben sind. Im Gegensatz zum Mitsystem ist die zeitliche Reihenfolge der Gegenspannungen S-R-T.

Schliesslich besteht noch das Nullsystem aus drei betragsmässig gleichen Spannungen U_R''', U_S''' und U_T''', die im Gegensatz zum Mit- und Gegensystem gleichphasig sind.

Nach den Gesetzmässigkeiten der komplexen Zahlenrechnung kann folgender Ansatz formuliert werden:

$$R = R' + R'' + R'''$$

$$S = a^2 R' + a R'' + R'''$$

$$T = a R' + a^2 R'' + R'''$$

R, S und T bedeuten hier die Vektoren des unsymmetritchen Systems; R' entspricht dem Mitsystem, R'' dem Gegensystem und R''' dem Nullsystem. a entspricht dem komplexen Operator $-1/2 + j\sqrt{3}/2$

Die Multiplikation eines Vektors mit dem Operator a bewirkt eine Drehung des Vektors bei konstantem Betrag um 120° in positiver Drehrichtung, d.h. im Gegenuhrzeigersinn und mit dem Operator a^2 um 120° in negativer Drehrichtung, d.h. im Uhrzeigersinn.

Mit Benützung des obigen Ansatzes kann das Mit-, Gegen- und Nullsystem des Vektors R in Abhängigkeit von den Vektoren S und T ausgedrückt werden:

$$R' = 1/3\,(R + a\,S + a^2\,T) \qquad (1)$$

$$R'' = 1/3\,(R + a^2\,S + a\,T) \qquad (2)$$

$$R''' = 1/3\,(R + S + T) \qquad (3)$$

Die beiden andern Vektoren S' und T' des Mitsystems erhält man durch Drehung des Vektors R' um 120° bzw. 240° und sinngemäss die beiden andern Verktoren S'' und T'' des Gegensystems durch Drehung des Vektors R'' um 240° bzw. 120°.

Aus Gl. (3) kann abgeleitet werden, dass drei Spannungen, die zusammen ein geschlossenes Dreieck ergeben, kein Nullsystem bilden können. Dies ist der Fall bei den Dreieckspannungen.

Bei den Sternspannungen tritt nur dann ein Nullsystem auf, wenn der Sternpunkt nicht im Schwerpunkt des Dreiecks liegt. Ferner tritt bei den Sternspannungen dann kein Gegensystem auf, wenn in den Dreieckspannungen ebenfalls kein Gegensystem vorhanden ist, d. h. wenn das Dreieck symmetrisch ist.

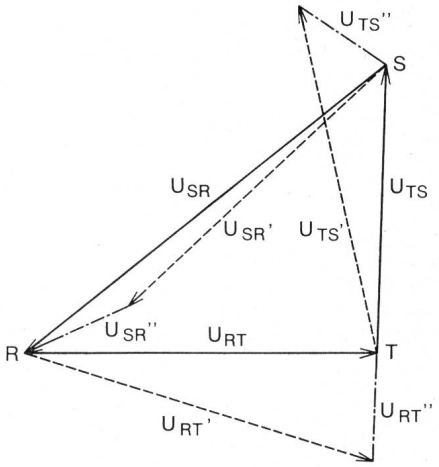

Fig. 3
Unsymmetrisches Spannungsdreieck Zerlegung in Mit- und Gegensystem
U_{RT} verkettete Spannung; U_{RT} Mitspannung; U_{RT}'' Gegenspannung
Weitere Bezeichnungen siehe im Text

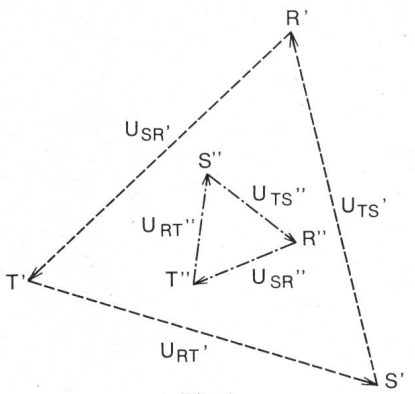

Fig. 4
Mit- und Gegensystem des unsymmetrischen Spannungsdreieckes nach Fig. 3
Bezeichnungen siehe im Text

Die Mit- bzw. Gegensysteme der Dreieckspannungen stehen senkrecht auf den entsprechenden Mit- und Gegensystemen der Sternspannungen. Betragsmässig unterscheiden sie sich um den Faktor $\sqrt{3}$. Das Nullsystem entspricht dem Abstand vom Sternpunkt zum Schwerpunkt des Dreieckes und kann deshalb graphisch sehr einfach ermittelt werden.

Der allgemeine Fall eines unsymmetrischen Spannungsdreieckes ist in Fig. 3 graphisch dargestellt. Mit U_{SR}, U_{TS} und U_{RT} sind die Dreieckspannungen bezeichnet. Das Mitsystem wird gebildet durch U'_{SR}, U'_{TS} und U'_{RT} und das Gegensystem durch U''_{SR}, U''_{TS} und U''_{RT}. In Fig. 4 sind die symmetrischen Komponenten des Spannungsdreiecks nach Fig. 3 graphisch dargestellt. Fig. 5 zeigt die zum Dreieck in Fig. 3 passenden Sternspannungen U_{0R}, U_{0S} und U_{0T}, wobei der Sternpunkt 0 willkürlich und nicht im Schwerpunkt des Dreieckes angenommen wurde. Die Zerlegung der Sternspannungen in Mit-, Gegen- und Nullsystem führt auf die Mitspannungen U'_{0R}, U'_{0S} und U'_{0T}, auf die Gegenspannungen U''_{0R}, U''_{0S} und U''_{0T} und auf die Nullspannungen $U'''_{0R} = U'''_{0S} = U'''_{0T}$. In Fig. 6 sind die symmetrischen Komponenten der Sternspannungen nach Fig. 5 graphisch dargestellt.

3. Berechnung der Fehler bei symmetrischer Belastung

3.1 Ersatzschema der Schaltung (Fig. 7)

Das Ersatzschema der unsymmetrischen Spannungen setzt sich zusammen aus den Mit-, Gegen- und Nullsystemen, wobei die Mit- und Gegensysteme je ein dreiphasiges System und das Nullsystem ein einphasiges System bilden. Die Belastung wird durch drei gleiche Impedanzen Z in Stern geschaltet dargestellt. Die resultierende Blindlast pro Phase berechnet sich aus den Anteilen der einzelnen Systeme.

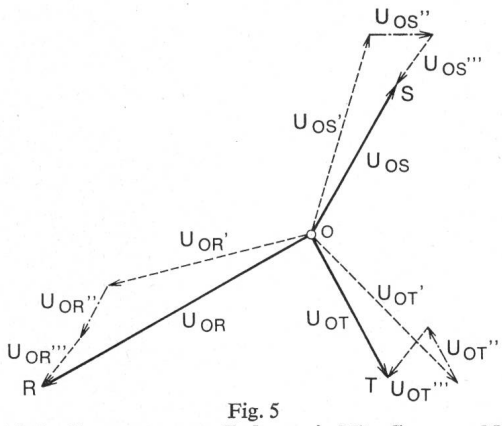

Fig. 5
Unsymmetrische Sternspannungen, Zerlegung in Mit-, Gegen- und Nullsystem
Bezeichnungen siehe im Text

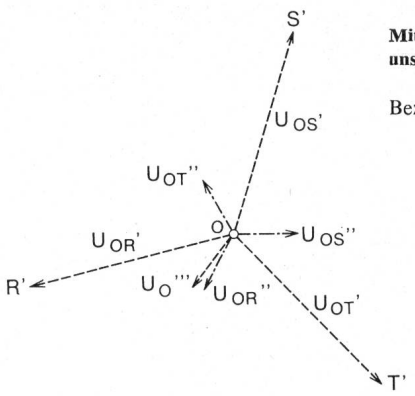

Fig. 6
Mit-, Gegen- und Nullsystem der unsymmetrischen Sternspannungen nach Fig. 5
Bezeichnungen siehe im Text

3.1.1 1-phasige Belastung in Phase R.

$$U_{0R} = U'_{0R} + U''_{0R} + U'''_{0R}$$

$$I_R = \frac{U_{0R}}{Z} = (U'_{0R} + U''_{0R} + U'''_{0R})\frac{1}{Z}$$

Der Sollwert der Blindlast ist:

$$P_{bS_R} = I_R\, U_{0R} \sin \sphericalangle \left(\frac{U_{0R}}{I_R}\right) =$$

$$= \frac{1}{Z}\,[U'_{0R} + U''_{0R} + U'''_{0R}]^2 \sin \sphericalangle\left(\frac{U_{0R}}{I_R}\right) \qquad (4)$$

Der vom Zähler gemessene Wert ist:

$$P_{bz_R} = I_R\, U_{TS} \frac{1}{\sqrt{3}} \cos \sphericalangle \left(\frac{U_{TS}}{I_R} - 180^0\right) = {}^{1)}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{3}\,Z}\,[U'_{0R} + U''_{0R} + U'''_{0R}] \cdot [U'_{0S} + U''_{0S} - U'_{0T} - U''_{0T}] \cdot$$

$$\cdot \cos \sphericalangle \left(\frac{U_{TS}}{I_R} - 180^0\right) \qquad (5)$$

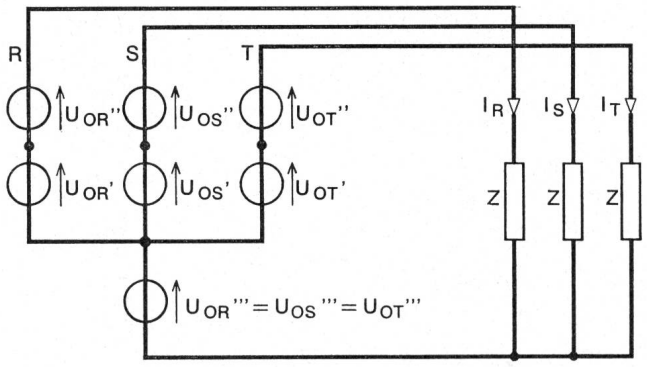

Fig. 7
Zerlegung eines unsymmetrischen 3-phasigen Spannungssystems in die symmetrischen Komponenten

U'_{0R}, U'_{0S}, U'_{0T} Spannung des Mitsystems U_0';
U''_{0R}, U''_{0S}, U''_{0T} Spannung des Gegensystems U_0'';
U'''_{0R}, U'''_{0S}, U'''_{0T} Spannung des Nullsystems U_0''';
I_R, I_S, I_T Phasenströme;
R, S, T Eckpunkte des Spannungsdreiecks
Die Belastung besteht aus drei gleichen Impedanzen Z

[1]) Mit der üblichen Darstellung der Vektoren in der Gausschen Tafelebene wird die induktive Blindlast negativ, da der Phasenwinkel φ zwischen 270° und 360° liegt. Damit nun der Fehler physikalisch richtig ermittelt werden kann, muss auch die der Blindlast im Netz entsprechende Wirklast am Zähler negativ sein, d. h., die Gleichung für die vom Zähler angezeigte Belastung lautet allgemein:
$P_{bZ} = I\, U_v \cos(\alpha - 180^0)$ (nach Fig. 10)
U_v verkettete Spannung; α Phasenwinkel zwischen verketteter Spannung und Strom

3.1.2 Einphasige Belastung in Phase S. Der Sollwert der Blindlast ist:

$$P_{bSs} = \frac{1}{Z}\,[U'_{0S} + U_{0S} + U'''_{0S}]^2 \sin \sphericalangle \left(\frac{U_{0S}}{I_S}\right) \qquad (6)$$

Der vom Zähler gemessene Wert ist:

$$P_{bZs} = \frac{1}{\sqrt{3}\,Z}\,[U'_{0S} + U_{0S} + U'''_{0S}]\cdot[U'_{0T} + U''_{0T} - U'_{0R} - U''_{0R}]\cdot$$

$$\cdot \cos \sphericalangle \left(\frac{U_{RT}}{I_S} - 180^0\right) \qquad (7)$$

3.1.3 Einphasige Belastung in Phase T. Der Sollwert der Blindlast ist:

$$P_{bST} = \frac{1}{Z}\,[U'_{0T} + U''_{0T} + U'''_{0T}]^2 \sin \sphericalangle \left(\frac{U_{0T}}{I_T}\right) \qquad (8)$$

Der vom Zähler gemessene Wert ist:

$$P_{bZT} = \frac{1}{\sqrt{3}\,Z}\,[U'_{0T} + U''_{0T} + U'''_{0T}]\cdot[U'_{0R} + U''_{0R} - U'_{0S} - U''_{0S}]\cdot$$

$$\cdot \cos \sphericalangle \left(\frac{U_{RT}}{I_T} - 180^0\right) \qquad (9)$$

3.1.4 Symmetrische Belastung.

$$F_\Delta = \left[\frac{P_{bZR} + P_{bZS} + P_{bZT}}{P_{bSR} + P_{bSS} + P_{bST}} - 1\right] 100\ \% \qquad (10)$$

Das Mit-, Gegen- und Nullsystem der unsymmetrischen Netzspannungen ist in Fig. 9 graphisch dargestellt. Bezugswert ist die Mitspannung U'_{0R}. Die Gegenspannung U''_{0R} ist um den Winkel γ und die Nullspannung U'''_{0R} um den Winkel δ gegenüber der Mitspannung U'_{0R} in der Phase verschoben.

Für die verschiedenen Spannungen kann folgender Ansatz formuliert werden:

Mitsystem Phase R $\quad U'_{0R} = U_0'$

Mitsystem Phase S $\quad U'_{0S} = U_0'\, e^{-j\frac{2\pi}{3}}$

Mitsystem Phase T $\quad U'_{0T} = U_0'\, e^{j\frac{2\pi}{3}}$

Gegensystem Phase R $\quad U''_{0R} = U_0'\, e^{j\gamma}$

Gegensystem Phase S $\quad U''_{0S} = U_0'\, e^{j\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right)}$

Gegensystem Phase T $\quad U''_{0T} = U_0'\, e^{j\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right)}$

Nullsystem $\quad U'''_{0R} = U'''_{0S} = U'''_{0T} = U_0'\, e^{j\delta}$

Werden die obigen Ansätze für die Spannungen in die Gl. (4) bis (10) eingesetzt, so ergibt sich für symmetrische Belastung als Fehler die folgende Gleichung:

$$F_\Delta = -\frac{2\,U_0''^2 + U_0'''^2}{U_0'^2 + U_0''^2 + U_0'''^2}\,100\ \% \qquad (11)$$

Bemerkenswert dabei ist, dass die Phasenwinkel φ der Impedanzen Z sowie die Winkel γ und δ zwischen Gegen- und Mitspannung, bzw. Null- und Mitspannung in obiger Fehlerformel nicht vorkommen.

Bei symmetrischer Belastung können deshalb die Fehler durch einfache Beziehung zwischen den Beträgen der Mit-, Gegen- und Nullspannung allgemein gültig dargestellt werden.

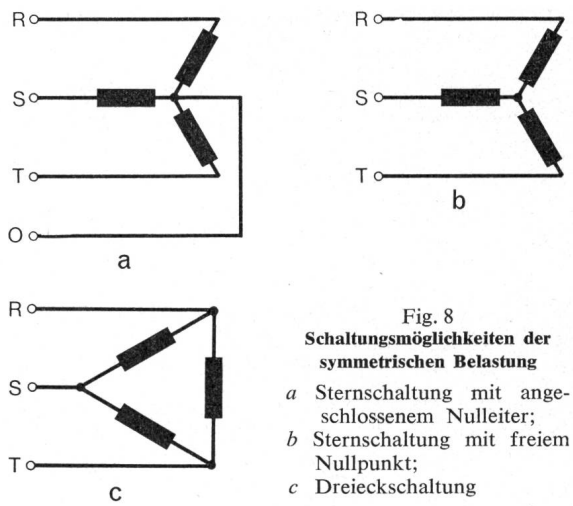

Fig. 8
Schaltungsmöglichkeiten der symmetrischen Belastung

a Sternschaltung mit angeschlossenem Nulleiter;
b Sternschaltung mit freiem Nullpunkt;
c Dreieckschaltung

Falls die symmetrische Belastung in Stern mit angeschlossenem Nulleiter gemäss Fig. 8a geschaltet ist, so sind in den Sternspannungen die Mit-, Gegen- und Nullspannung vorhanden, so dass sich der Fehler gemäss Gl. (11) berechnet. Falls aber die symmetrische Belastung in Stern mit freiem Nullpunkt nach Fig. 8b oder in Dreieck nach Fig. 8c geschaltet ist, so sind in den Sternspannungen nur die Mit- und Gegenspannungen, nicht aber die Nullspannung vorhanden, da die Sternspannungen proportional den Belastungsströmen sind und im Stromsystem infolge Fehlens des Nulleiters kein Nullstrom fliessen kann.

Die Fehlerformel nach Gl. (11) reduziert sich deshalb zu:

$$F_\Delta = \frac{-2\,U_0''^2}{U_0'^2 + U_0''^2}\,100\ \% \qquad (12)$$

4. Beurteilung des Fehlers bei symmetrischer Belastung nach Abschnitt 3

Beim Vergleich der beiden Fehlerformeln (11) und (12) ist ersichtlich, dass im allgemeinen kleinere Fehler zu erwarten sind, wenn der Sternpunkt der Belastung nicht mit dem Netznulleiter verbunden wird, oder wenn die Belastung in Dreieck geschaltet wird. Ferner ist der Gl. (11) zu entnehmen, dass die Fehler bei symmetrischer Belastung *stets negatives Vorzeichen* aufweisen. Wenn die Belastung aus drei Ohmschen Widerständen besteht, d.h. wenn vom Verbraucher keine Blindlast konsumiert wird, so zeigt der Blindverbrauchszähler in Kunstschaltung auch bei beliebig verzerrten Netzspannungen keinen Fehler an. Der Zähler steht in diesem Falle still, was durch einfaches Experiment selbst unter extremen Unsymmetriebedingungen in den Spannungen praktisch bestätigt wurde.

5. Berechnung der Fehler bei unsymmetrischer Belastung

Wie in Abschnitt 3 gezeigt wurde, können die Fehler bei *symmetrischer* Belastung durch Zerlegung der unsymmetrischen Netzspannungen in ihre symmetrischen Komponenten berechnet werden, wobei die Fehler unabhängig vom Phasenwinkel zwischen Spannung und Strom sowie unabhängig von den Winkeln zwischen Gegen- bzw. Nullsystem und dem Mitsystem der Sternspannungen sind.

Werden die Verhältnisse bei unsymmetrischer (im Grenzfall bei einphasiger) Belastung untersucht, so gelten nicht mehr die gleichen Zusammenhänge. Wohl kann ein einphasiger Strom ebenfalls in ein Mit-, Gegen- und Nullsystem zerlegt

werden, die betragsmässig je ein Drittel des gesamten Stromes ausmachen. Alle drei Systeme sind jedoch in Phase mit dem gesamten Strom, so dass die Winkelbeziehung zwischen den symmetrischen Komponenten in Spannung und Strom nicht mehr erhalten bleibt, wie das der Fall ist bei symmetrischer Belastung. Die Fehler bei einphasiger Belastung hängen deshalb in komplizierter Weise von der Unsymmetrie der Belastung sowie von der Grösse und gegenseitigen Lage von Mit-, Gegen- und Nullsystem in der Sternspannung ab. Bestehen die unsymmetrischen Belastungen aus Ohmisch-induktiven Komponenten, so tritt im Fehler insbesondere eine Komponente auf, die vom ctg des Phasenwinkels der Impedanzen abhängt.

5.1 Aufbau eines unsymmetrischen Spannungsdreiecks aus seinen symmetrischen Komponenten und Fixierung der Eckpunkte und des Sternpunktes des Dreiecks durch rechtwinklige Koordinaten

In Fig. 9 ist ein unsymmetrisches Spannungsdreieck aus seinen symmetrischen Komponenten zusammengesetzt:

Mitsystem der Sternspannungen	U'_{0R}, U'_{0S}, U'_{0T}
Gegensystem der Sternspannungen	$U''_{0R}, U''_{0S}, U''_{0T}$
Nullsystem der Sternspannungen	$U'''_{0R} = U'''_{0S} = U'''_{0T}$

Abgesehen von obigen Grössen sind ebenfalls gegeben:
Winkel zwischen Mit- und Gegensystem der Spannung U_{0R}:

$$\gamma = \sphericalangle \left(\frac{U''_{0R}}{U'_{0R}}\right)$$

Winkel zwischen Mit- und Nullsystem der Spannung U_{0R}:

$$\delta = \sphericalangle \left(\frac{U'''_{0R}}{U'_{0R}}\right)$$

Gemäss Fig. 9 sind die Winkel γ und δ stets vom Mitsystem zum Gegen- bzw. Nullsystem gerichtet. Positiver Drehsinn ist der Gegenuhrzeigersinn.

Mit diesen Grössen ist das Spannungsdreieck eindeutig bestimmt. In dieser Form eignen sich die gegebenen Grössen jedoch schlecht zur Berechnung der Fehler beim Messen der Blindlast. Es wird deshalb ein rechtwinkliges Koordinatensystem mit Zentrum in den Eckpunkt T des Dreiecks gelegt. Der Eckpunkt S liegt auf der Abszisse.

Die entsprechenden Gleichungen für die Berechnung der Koordinaten lauten:

$$\operatorname{tg} \varepsilon = \frac{\sin \gamma}{\cos \gamma + \dfrac{U_0'}{U_0''}} \tag{13}$$

$$x_R = \left[\frac{\sqrt{3}}{2} U_0' - U_0'' \cdot \left(\frac{3}{2} \sin\gamma + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos\gamma\right)\right] \cos \varepsilon + \left[\frac{3}{2} U_0' + U_0'' \left(\frac{3}{2} \cdot \cos\gamma - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin\gamma\right)\right] \sin \varepsilon \tag{14}$$

$$y_R = \left[\frac{3}{2} U_0' + U_0'' \left(\frac{3}{2} \cos\gamma - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin\gamma\right)\right] \cos \varepsilon - \left[\frac{\sqrt{3}}{2} U_0' - U_0'' \left(\frac{3}{2} \sin\gamma + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \cos\gamma\right)\right] \sin \varepsilon \tag{15}$$

$$x_S = \sqrt{3\,(U_0'^2 + U_0''^2 - 2\, U_0'\, U_0'' \cos\gamma)} \tag{16}$$

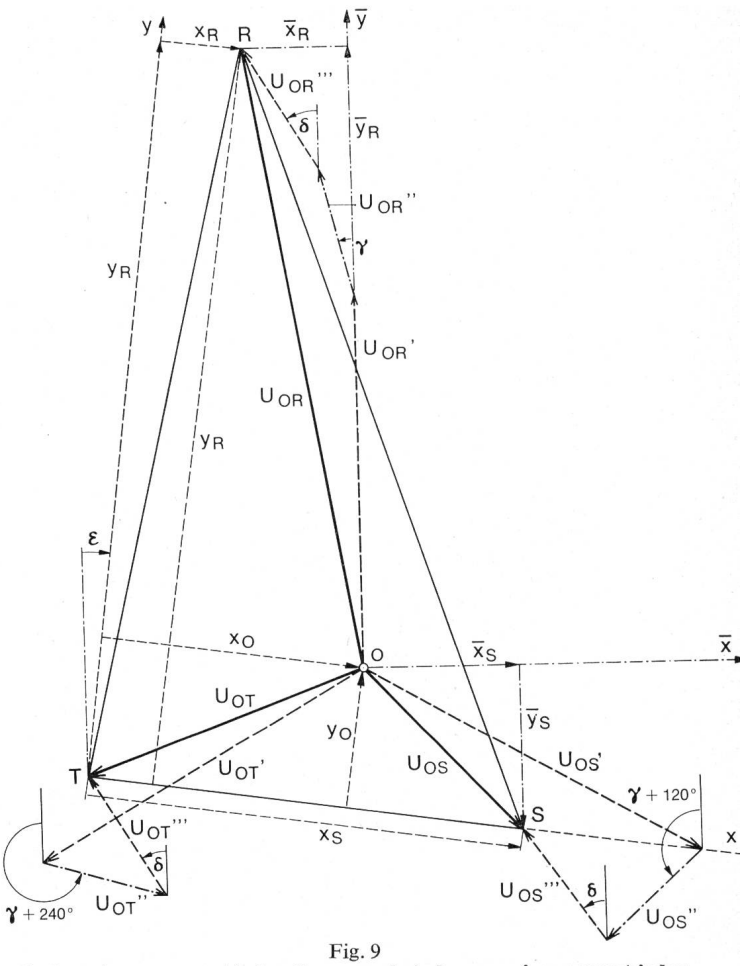

Fig. 9
Aufbau eines unsymmetrischen Spannungsdreieckes aus seinen symmetrischen Komponenten

R, S, T, Eckpunkte des Spannungsdreiecks; x, y Koordinatensystem mit T im Zentrum und S auf Abszisse; $\bar{x}, \bar{y}$ Koordinatensystem mit 0 im Zentrum und U'_{0R} auf Ordinate; x_0, y_0 Nullpunktkoordinaten; U_0 Sternspannung: U_0' Mitspannung: U_0'' Gegenspannung; U_0''' Nullspannung; $\gamma \sphericalangle$ zwischen U''_{0R} und U'_{0R}; $\delta \sphericalangle$ zwischen U'''_{0R} und U'_{0R}

$$y_S = 0$$

$$x_T = 0$$

$$y_T = 0$$

$$x_0 = \left[\frac{\sqrt{3}}{2} U_0' - U_0'' \left(\frac{1}{2} \sin\gamma + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos\gamma\right) + U_0''' \sin\delta\right] \cos \varepsilon + \left[\frac{1}{2} U_0' + U_0'' \left(\frac{1}{2} \cos\gamma - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin\gamma\right) - U_0''' \cos\delta\right] \sin \varepsilon \tag{17}$$

$$y_0 = \left[\frac{1}{2} U_0' + U_0'' \left(\frac{1}{2} \cos\gamma - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin\gamma\right) - U_0''' \cos\delta\right] \cos \varepsilon + \left[\frac{\sqrt{3}}{2} U_0' - U_0''' \left(\frac{1}{2} \sin\gamma + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos\gamma\right) + U_0''' \sin\delta\right] \sin \varepsilon \tag{18}$$

5.2 Einphhasige Belastung in Phase R, S bzw. T

Da sich eine unsymmetrische Belastung aus drei 1-phasigen Belastungen ungleicher Grösse zusammensetzt, werden zuerst die Verhältnisse bei 1-phasiger Belastung untersucht.

Gegeben sei ein unsymmetrisches Spannungsdreieck nach Fig. 10 sowie die Belastungsimpedanz:

$$Z_R = R_R + j\,\omega\, L_R$$

$$\varphi_R = 360^0 - \operatorname{arc\,tg}\left(\frac{\omega L_R}{R_R}\right)$$

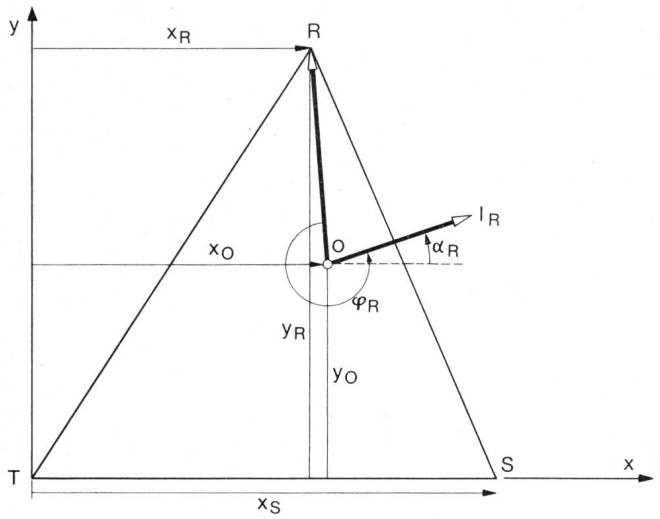

Fig. 10
Unsymmetrisches Spannungsdreieck mit Belastung in Phase R
α Winkel zwischen U_{TS} und I_R; I_R Strom in Phase R; φ_R Phasenwinkel zwischen U_{0R} und I_R
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 9 und im Text

Sollwert der Blindlast

$$P_{bS_R} = U_{0R}\, I_R \sin \varphi_R \qquad I_R = \frac{U_{0R}}{Z_R}$$

$$P_{bS_R} = \frac{(x_R - x_0)^2 + (y_R - y_0)^2}{\sqrt{R_R^2 + (\omega L_R)^2}} \sin \varphi_R \tag{19}$$

Vom Zähler gemessener Wert:

$$P_{bZ_R} = \frac{U_{ST}}{\sqrt{3}} I_R \cos (\alpha_R - 180^0)$$

$$P_{bZ_R} = \frac{x_S}{\sqrt{3}} \frac{\sin \varphi_R (y_R - y_0) - \cos \varphi_R (x_R - x_0)}{\sqrt{R_R^2 + (\omega L_R)^2}} \tag{20}$$

Fehler:

$$F_R = \left[\frac{x_S}{\sqrt{3}} \cdot \frac{(y_R - y_0) - \operatorname{ctg} \varphi_R (x_R - x_0)}{(y_R - y_0)^2 + (x_R - x_0)^2} - 1 \right] 100\ \% \tag{21}$$

Sinngemäss folgt für die andern Phasen anhand der Koordinaten-Transformation nach Fig. 11 und 12:

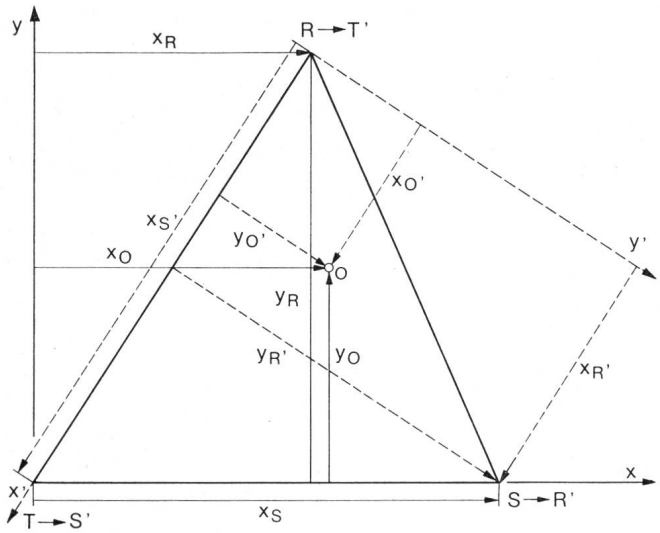

Fig. 11
Koordinaten-Transformation, Belastung von Phase R nach Phase S
Bezeichnungen siehe Fig. 9

Fehler:

$$F_S = \left[\frac{x_S'}{\sqrt{3}} \cdot \frac{(y_R' - y_0') - \operatorname{ctg} \varphi_S (x_R' - x_0')}{(y_R' - y_0')^2 + (x_R' - x_0')^2} - 1 \right] 100\ \% \tag{22}$$

Fehler:

$$F_T = \left[\frac{x_S''}{\sqrt{3}} \cdot \frac{(y_R'' - y_0'') - \operatorname{ctg} \varphi_T \cdot (x_R'' - x_0'')}{(y_R'' - y_0'')^2 + (x_R'' - x_0'')^2} - 1 \right] 100\ \% \tag{23}$$

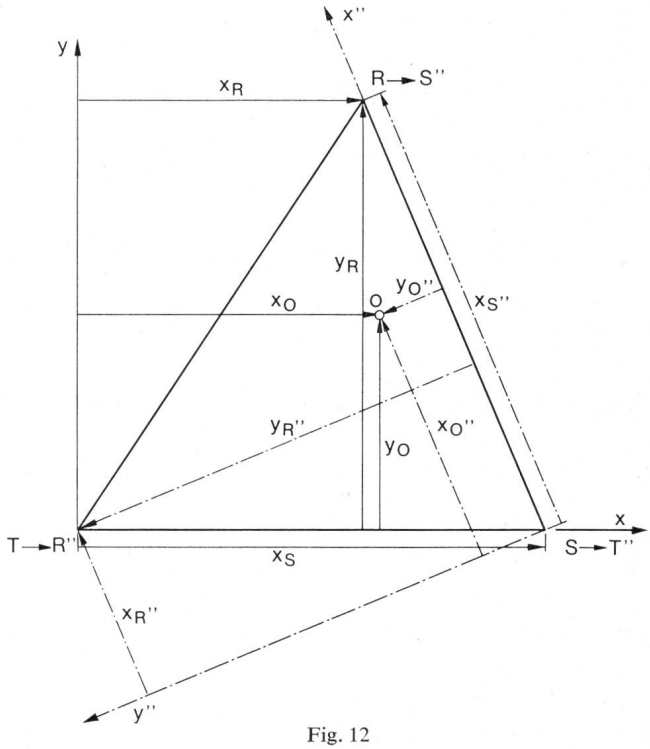

Fig. 12
Koordinaten-Transformation, Belastung von Phase R nach Phase T
Bezeichnungen siehe Fig. 9

5.3 Unsymmetrische Belastung

Werden die drei 1-phasigen Belastungen Z_R, Z_S und Z_T zu einer 3-phasigen unsymmetrischen Belastung zusammengesetzt, so berechnet sich der resultierende Fehler nach folgender Formel:

$$F_\Delta = \frac{P_{bS_R} \frac{F_R\ \%}{100} + P_{bS_S} \frac{F_S\ \%}{100} + P_{bS_T} \frac{F_T\ \%}{100}}{P_{bS_R} + P_{bS_S} + P_{bS_T}} 100\ \% \tag{24}$$

Um die Rechenarbeit der Methode nach Abschnitt 5 zu vereinfachen, wurden Gl. (13) bis (24) im Computer programmiert.

6. Berechnung der Fehler bei 1-phasiger Belastung

Die Fehlergleichungen für 1-phasige Blindlast wurden bereits in Abschnitt 5 für die Berechnung der Fehler bei unsymmetrischer Blindlast benötigt. Bei 1-phasiger Blindlast in Phase R wird der Fehler durch die Gl. (21) ausgedrückt. Das entsprechende Vektordiagramm ist in Fig. 13 dargestellt. Durch Umformung der Gl. (19), (20) und (21) erhält man für den Sollwert der Blindlast:

$$P_{bS_R} = U_{0R}\, I_R \sin \varphi_R$$

den vom Zähler gemessenen Wert:

$$P_{bZ_R} = \frac{U_{TS}}{\sqrt{3}} I_R \cos \varphi_{TS}$$

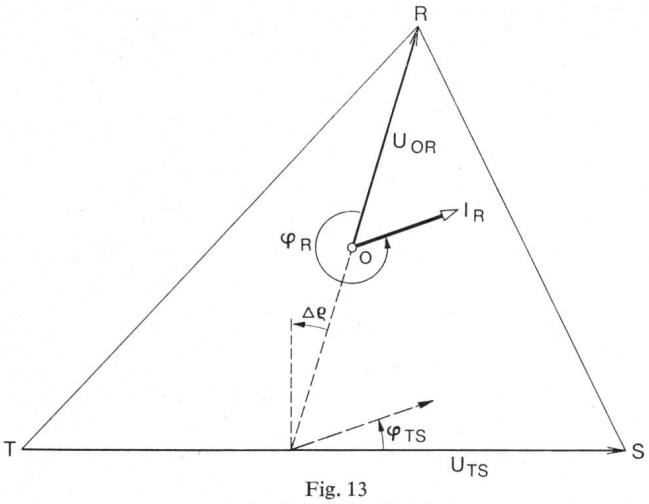

Fig. 13
1-phasige Belastung, Messwerk 1
U_{0R} Phasenspannung; I_R Strom in Phase R; φ_R Phasenwinkel zu U_{0R} und I_R; $\Delta\varrho$ Winkel zwischen der Senkrechten auf U_{TS} und U_{0R}

und den Fehler:

$$F_R = \frac{\left(\frac{U_{TS}}{\sqrt{3}} - U_{0R}\right)}{U_{0R}} - \operatorname{ctg}\varphi_R \cdot \Delta\varrho \qquad (25)$$

Im Gegensatz zum Fehler bei symmetrischer Blindlast sowie bei Blindlast mit relativ geringem Unsymmetriegrad kann der Fehler bei 1-phasiger Blindlast positives als auch negatives Vorzeichen aufweisen. Der Fehler F_R ist ausser vom Verhältnis der verketteten Spannung $U_{TS}/\sqrt{3}$ zur Sternspannung U_{0R} auch noch von der Winkelabweichung $\Delta\varrho$ der Sternspannung U_{0R} zur Senkrechten auf die verkettete Spannung U_{TS} abhängig, dessen Anteil proportional dem ctg des Phasenwinkels φ_R der Belastung ist. Wenn die Belastung aus einem Ohmschen Widerstand besteht, d.h., wenn vom Verbraucher keine Blindlast konsumiert wird, so zeigt der Blindverbrauchszähler in Kunstschaltung je nach der Unsymmetrie des Spannungsdreiecks trotzdem positive oder negative Fehler an, was bei symmetrischer Wirklast gemäss den Ausführungen in Abschnitt 4 nicht der Fall ist.

7. Graphische Darstellung der Fehler

7.1 Symmetrische Blindlast

Die Beziehung zwischen den symmetrischen Komponenten der Netzspannung und dem Fehler F_Δ ist durch Gl. (11) gegeben. Diese Gleichung kann wie folgt umgeformt werden:

$$\frac{U_0''^2}{U_0'^2}\cdot\left(2 + \frac{F_\Delta\%}{100}\right) + \frac{U_0'''^2}{U_0'^2}\cdot\left(1 + \frac{F_\Delta\%}{100}\right) = -\frac{F_\Delta\%}{100} \qquad (26)$$

Trägt man auf der Ordinate eines rechtwinkligen Koordinatensystems das Verhältnis U_0'''/U_0' und auf der Abszisse das Verhältnis U_0''/U_0' auf, so liegen die Punkte gleicher Fehler auf Ellipsenabschnitten, was aus Gl. (26) hervorgeht (Fig. 14). Werden die symmetrischen Belastungsimpedanzen in Stern mit angeschlossenem Sternpunkt geschaltet, so ermittelt sich der Fehler F_Δ in der graphischen Darstellung nach Fig. 14 aus dem Schnittpunkt der Abszissenparallelen im Abstand U_0'''/U_0' mit der Ordinatenparallelen im Abstand U_0''/U_0'. Werden die symmetrischen Belastungsimpedanzen in Stern mit freiem Sternpunkt oder in Dreieck geschaltet, so ermittelt sich der Fehler F_Δ in der graphischen Darstellung nach Fig. 14 aus dem Schnittpunkt der Ordinatenparallelen im Abstand U_0''/U_0' mit der Abszisse.

7.2 Unsymmetrische Blindlast

Aus den Fehlerformeln (19) bis (23) geht hervor, dass der Fehler bei unsymmetrischer Belastung u.a. vom ctg des Phasenwinkels φ der Belastungen sowie von den Winkeln γ und δ zwischen Gegen- bzw. Nullspannung zur Mitspannung abhängt. Dadurch werden die Verhältnisse weniger übersichtlich allgemein graphisch darstellbar. Wird hingegen eine unsymmetrische Blindlast mit relativ geringem Unsymmetriegrad angenommen, so wird der nach Abschnitt 5 berechnete Fehler nach Gl. (24) nicht wesentlich beeinflusst durch die Winkel γ und δ, wenn man sich auf reine Blindlast bei $\sin\varphi = 1$ beschränkt.

In Fig. 15 sind die vom Computer gerechneten angenäherten Fehler bei unsymmetrischer Blindlast für verschiedene Verhältnisse von Gegen- bzw. Nullspannung zur Mitspannung in Abhängigkeit des Unsymmetriegrades der Belastungen [K_{us}] gültig für $\sin\varphi = 1$, graphisch dargestellt. Der auf der Abszisse der graphischen Darstellung nach Fig. 15 aufgetragene Unsymmetriegrad der Belastungen K_{us} wird wie folgt definiert:

$$K_{us} = \frac{X_0 - X_u}{X_0 + X_u} \quad \text{oder} \quad K_{us} = \frac{X_0 - X_u}{2\,X_m}$$

X_0 grösster Wert der Belastungsreaktanz; X_m mittlerer Wert der Belastungsreaktanz; X_u kleinster Wert der Belastungsreaktanz, wobei angenommen wird, dass $X_m = \frac{X_0 + X_u}{2}$.

Da sich die Fehlergleichung (11) additiv aus den beiden Komponenten $(U_0''/U_0')^2$ und $(U_0'''/U_0')^2$ zusammensetzt, können die Einflüsse der symmetrischen Komponenten separat ermittelt werden.

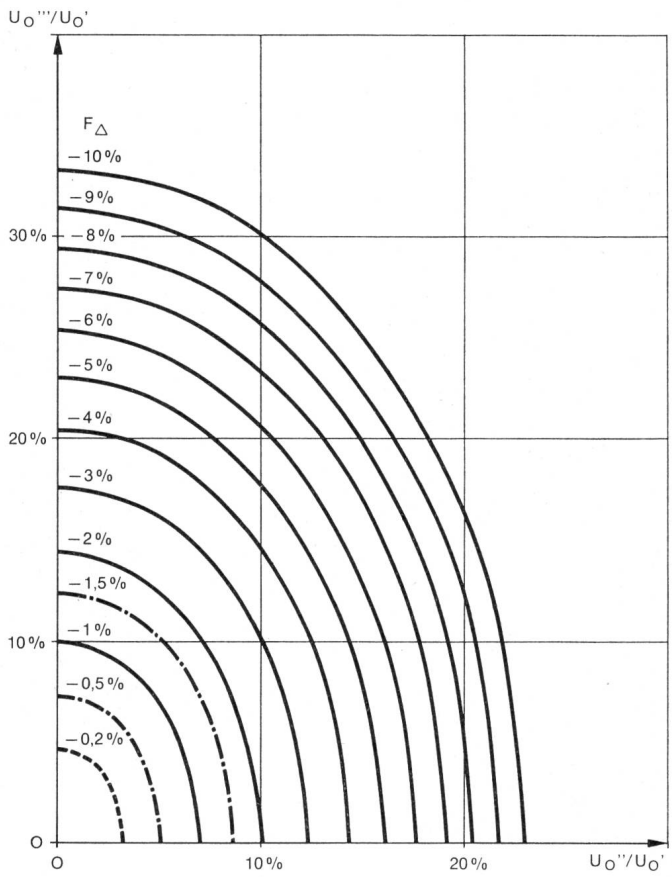

Fig. 14
Graphische Darstellung des Fehlers F_Δ bei symmetrischer Belastung in Abhängigkeit von U_0''/U_0' und U_0'''/U_0'

Auf der Ordinate von Fig. 15 sind deshalb die Grössen (U_0''/U_0') und (U_0'''/U_0') gemeinsam aufgetragen. Derjenige Fehleranteil, der von der Komponente (U_0''/U_0') herrührt, wird mit F_{II} und derjenige Fehleranteil, der von der Komponente (U_0'''/U_0') herrührt, mit F_{III} bezeichnet. Bemerkenswert ist, dass die aufgetragenen Kurven in Fig. 15 sowohl für die Komponente (U_0''/U_0') als auch für die Komponente (U_0'''/U_0') Gültigkeit haben, wenn auch mit dem Verhältnis $F_{II}/F_{III} = 2$. Diese Beziehung ist aus der Fehlergleichung (11) ableitbar, bei der im Zähler die Grösse $U_0''^2$ mit dem Faktor 2 und die Grösse $U_0'''^2$ nur mit dem Faktor 1 behaftet ist.

Der resultierende Fehler ermittelt sich aus der Summe der beiden Teilfehler F_{II} und F_{III}.

Zum besseren Verständnis der Zusammenhänge sei der Fehler für einige numerische Annahmen berechnet:

1. Annahme:

$U_0''/U_0' = 9\,\%$

$U_0'''/U_0' = 13\,\%$

a) *Unsymmetriegrad der Belastungen* $K_{us} = 15\,\%$. Gemäss Fig. 15 sind:

$F_{II} = -3{,}0\,\%$ und $F_{III} = -2{,}65\,\%$

Der resultierende Fehler beträgt $F_\Delta = -5{,}65\,\%$

b) *Unsymmetriegrad der Belastungen* $K_{us} = 0$. Gemäss Fig. 15 sind:

$F_{II} = -1{,}65\,\%$ und $F_{III} = -1{,}7\,\%$

Der resultierende Fehler beträgt $F_\Delta = -3{,}35\,\%$
Fall b) kann ebenfalls mit Hilfe der Fig. 14 untersucht werden, da $K_{us} = 0$ symmetrische Belastung bedeutet.
Man erhält mit Fig. 14 in diesem Falle natürlich dasselbe Resultat, was leicht nachkontrolliert werden kann.

2. Annahme:

$U_0''/U_0' = 15\,\%$

$U_0'''/U_0' = 0$

a) *Unsymmetriegrad der Belastungen* $K_{us} = 5\,\%$. Gemäss Fig. 15 sind:

$F_{II} = -5{,}1\,\%$ und $F_{III} = 0$

Der resultierende Fehler beträgt $F_\Delta = -5{,}1\,\%$

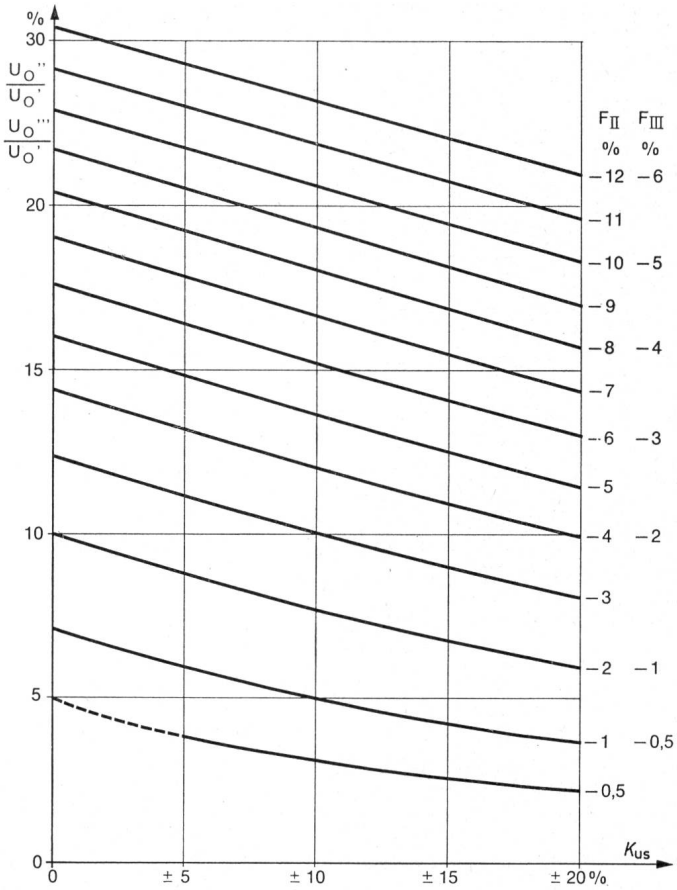

Fig. 15
Graphische Darstellung des Fehlers F_{II} bzw. F_{III} bei unsymmetrischer Belastung in Abhängigkeit von U_0''/U_0' bzw. U_0'''/U_0'
K_{us} Unsymmetrie der Belastung

b) *Unsymmetriegrad der Belastungen* $K_{us} = 0$. Gemäss Fig. 15 sind:

$F_{II} = -4{,}4\,\%$ und $F_{III} = 0$

Der resultierende Fehler beträgt $F_\Delta = -4{,}4\,\%$, was ebenfalls mit Fig. 14 nachkontrolliert werden kann.

Adresse des Autors:
Dr. *F. Tschappu*, Oberingenieur, Landis & Gyr AG, 6301 Zug.

Commission Electrotechnique Internationale (CEI)

Sitzungen des CE 12 und seiner Sous-Comités 12A, 12B und 12C und des SC 32C vom 10. bis 18 Mai 1968 in Baden-Baden

CE 12, Radiocommunication

Der neue Präsident, F. Dumat (Frankreich), begrüsste 24 Delegierte aus 10 Ländern, sowie H. Pouliquen, Beobachter des CCIR. Ausser dem Protokoll der Prager Sitzung RM 1057/TC12, welches genehmigt wurde, waren alle auf der Traktandenliste aufgeführten Dokumente verspätet, so dass sie erst in Baden-Baden verteilt werden konnten. Es war deshalb nicht möglich, nationale Stellungnahmen dazu auszuarbeiten. Das erste Dokument *12(Secretariat)226,* Information symbols on equipment, Part 1, Equipment symbols for general use, stellt das Ergebnis der Arbeit der GT 1 dar, welche im letzten Oktober in München tagte. Die zu den Vorläufer-Dokumenten *12(Secrétariat)224* und *224A* eingegangenen Bemerkungen sind im Dokument *12(Secrétariat)227,* und die Stellungnahme der WG 1 dazu im Dokument *12(Secrétariat)228* niedergelegt. Die relativen Grössenverhältnisse der Symbole, deren absolute Grösse an sich nicht festgelegt wurde, ist aus dem Dokument *12(Secrétariat)229* ersichtlich. Dieses und das Hauptdokument werden unter der 6-Monate-Regel verteilt werden. Die Rapporte der Sous-Comités 12A, B und C wurden genehmigt. S. A. C. Pedersen, Präsident des SC 12A, trat zurück. Zum Nachfolger wurde R. H. Mills gewählt. Die Probleme der «Radio-relay-receiver», mit welchen sich bis jetzt die beiden Sous-Comités 12A und 12B getrennt befasst haben, sollen in einer neuen Arbeitsgruppe bearbeitet werden. Für die Mitarbeit haben sich das CCIR zur Verfügung gestellt und (vorausgesetzt der Genehmigung durch die entsprechenden Nationalkomitees) Amerika, England, Italien und die Niederlande. Da die Frage der Zuständigkeit des SC 12B, Sicherheit, zur Erarbeitung von Sicherheitsanforderungen für «Photoflash equipments» in diesem Unterkomitee nicht abgeklärt wurde, ist im CE 12 mittels Abstimmung ein Entscheid gesucht worden. Dieser fiel jedoch unentschieden aus, so dass die Frage an das Comité d'Action weitergetragen werden muss. Das neugebildete SC 12D, Aerials, konnte die Arbeit noch nicht aufnehmen, weil noch kein Präsident