

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins :
gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen
Elektrotechnischen Vereins (SEV) und des Verbandes Schweizerischer
Elektrizitätswerke (VSE)

Band: 60 (1969)

Heft: 7

Artikel: Ermittlung der Zusatzfehler beim Messen des Blindverbrauchs mit
Blindverbrauchszählern in Kunstschaltung auf Grund von Messungen
der Unsymmetrie im Niederspannungsnetz 220/380 V

Autor: Angst, M. / Tschappu, F.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-916135>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 15.10.2024

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

Ermittlung der Zusatzfehler beim Messen des Blindverbrauchs mit Blindverbrauchszählern in Kunstschaltung auf Grund von Messungen der Unsymmetrie im Niederspannungsnetz 220/380 V

Von M. Angst und F. Tschappu, Zug
2695 - 2703

621.317.785.016.25

Die an 10 verschiedenen Meßstellen gemessenen Unsymmetrien der Netzspannung wurden der Berechnung der Zusatzfehler zugrunde gelegt, die beim Messen von Blindenergie mit Blindverbrauchszählern in Kunstschaltung auftreten. Die Untersuchungen zeigen, dass bei symmetrischer Blindbelastung in keinem Fall messbare Zusatzfehler vorkommen. Bei unsymmetrischer Blindbelastung ist kurzzeitig wohl hin und wieder mit Zusatzfehlern bis zu einigen % zu rechnen, die sich jedoch über längere Zeit zum grössten Teil kompensieren. Diese Zusatzfehler beeinflussen die Messgenauigkeit dieser Apparate nicht wesentlich. Da die Messgenauigkeit der Blindverbrauchszähler in Kunstschaltung bei symmetrischem Spannungsdreieck sowie seine max. Belastbarkeit gegenüber der Ausführung in natürlicher Schaltung besser ist, wird empfohlen, für Messungen der Blindenergie in vermehrtem Masse Blindverbrauchszähler in Kunstschaltung einzusetzen.

1. Einleitung

Die theoretischen Zusammenhänge zwischen der Unsymmetrie der Netzspannung und den Zusatzfehlern beim Messen der Blindenergie mit Blindverbrauchszählern in Kunstschaltung wurden im Bulletin des SEV Nr. 17/1968, S. 800...807, eingehend behandelt. Darin wird die Unsymmetrie der Netzspannung ausgedrückt durch die Grösse der symmetrischen Komponenten, welche aus dem Mitsystem U_0' , dem Gegensystem U_0'' und dem Nullsystem U_0''' bestehen. Die Zusammenhänge zwischen der Spannungsunsymmetrie und den dadurch verursachten Zusatzfehlern können so in allgemeiner Form dargestellt werden.

Um die im Niederspannungsnetz 220/380 V vorkommenden Spannungs-Unsymmetrien an Orten, wo Blindverbrauchszähler eingesetzt sind, zahlenmässig bestimmen zu können, wurde ein spezielles Messgerät gebaut, welches die Sternspannungen in ihre symmetrischen Komponenten zerlegt. Das Gegen- und Nullsystem wird separat gemessen und gleichzeitig mit einem 2-Kanal-Schreiber aufgezeichnet. Die Messungen an den verschiedenen Meßstellen wurden während mehrerer Tage kontinuierlich registriert und so die Häufigkeitsverteilung der symmetrischen Komponenten bestimmt.

2. Kurze Zusammenfassung der theoretischen Untersuchungen

2.1 Symmetrische Belastung

Besteht die Belastung aus drei gleichgrossen Impedanzen $Z_R = Z_S = Z_T$, so ist der Fehler unabhängig vom Phasenwinkel φ zwischen Spannung und Strom, ferner ebenfalls unabhängig von der Phasenlage des Gegen- bzw. Nullsystems zum Mitsystem der Sternspannung. Die allgemeine Fehlerformel lautet:

$$F_{\Delta} = \left[-2 \left(\frac{U_0''}{U_0'} \right)^2 - \left(\frac{U_0'''}{U_0'} \right)^2 \right] 10^3 \quad \% \quad (1)$$

Les dissymétries de la tension du réseau, mesurées à 10 emplacements dans les environs de Zoug et en Suisse centrale, ont servi à calculer les erreurs additionnelles qui en résultent lors de la mesure de l'énergie réactive à l'aide de compteurs en branchement artificiel.

Ces investigations montrent qu'il ne se produit jamais d'erreurs additionnelles mesurables quand la charge réactive est symétrique.

Dans le cas d'une charge réactive asymétrique, il peut arriver que des erreurs additionnelles de quelques pourcents se produisent passagèrement, mais elles se compensent en majeure partie sur une longue période, telle que celle qui s'écoule entre deux relevés. Ces erreurs additionnelles n'ont guère d'influence sur la précision de mesure des compteurs d'énergie réactive, car elles sont du même ordre de grandeur que les autres valeurs d'influence. On peut donc les tolérer sans inconvénient.

Etant donné que la précision de mesure des compteurs d'énergie réactive en branchement artificiel dans le cas d'un triangle de tensions symétrique et leur capacité de charge maximale est meilleure que celle des compteurs en branchement naturel, les auteurs recommandent l'emploi plus fréquent de compteurs en branchement artificiel pour les mesures de l'énergie réactive.

worin

U_0' Mitsystem der Sternspannung;

U_0'' Gegensystem der Sternspannung;

U_0''' Nullsystem der Sternspannung.

Sind die drei Belastungsimpedanzen in Stern mit geschlossenem Sternpunkt geschaltet, so besteht die unsymmetrische Sternspannung aus Mit-, Gegen- und Nullsystem. Sind die drei Belastungsimpedanzen in Stern mit freiem Sternpunkt oder in Dreieck geschaltet, so tritt in der unsymmetrischen Sternspannung kein Nullsystem auf, und die Gl. (1) reduziert sich zu:

$$F_{\Delta} = -2 \left(\frac{U_0''}{U_0'} \right)^2 10^3 \quad \% \quad (2)$$

2.2 Unsymmetrische — im Grenzfall einphasige — Belastung

Die Zusammenhänge zwischen den symmetrischen Komponenten der Sternspannung und den Fehlern bei gegebenen Werten von U_0''/U_0' und U_0'''/U_0' sind hier wesentlich komplizierter. Der Fehler hängt ab von der Grösse der Belastungsunsymmetrie sowie vom Phasenwinkel φ zwischen Spannung und Strom und den Phasenwinkeln γ und δ des Gegen- bzw. Nullsystems zum Mitsystem der Spannung.

Zur Berechnung der Fehler bei gegebenen symmetrischen Komponenten ist deshalb ein Computer unerlässlich.

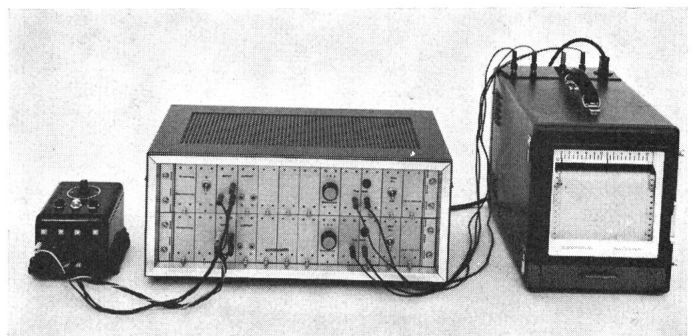


Fig. 1

Gerät zur Bestimmung der symmetrischen Komponenten der Sternspannung

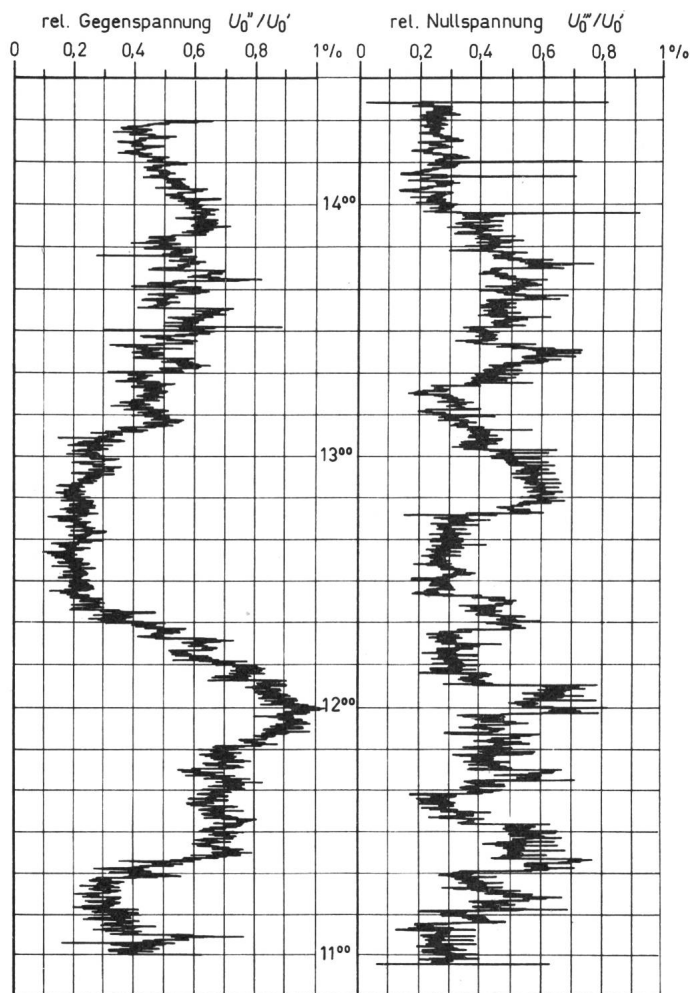


Fig. 2
Diagrammstreifen des Apparates in Fig. 1

3. Beschreibung des Geräts zur Bestimmung der symmetrischen Komponenten der Sternspannungen

3.1 Technische Daten

Gemäss den theoretisch ermittelten Zusammenhängen zwischen der Spannungsunsymmetrie und dem Zusatzfehler ist die Kenntnis des Mitsystems U_0' , des Gegensystems U_0'' und des Nullsystems U_0''' der Sternspannungen notwendig.

Da im Niederspannungsnetz nur kleine Unsymmetrien zu erwarten waren, konnte auf die Messung des Mitsystems U_0' verzichtet werden. Das Messgerät wurde deshalb nur für die Bestimmung des Gegensystems U_0'' und des Nullsystems U_0''' ausgelegt.

Die komplette Einrichtung besteht aus je einer Schaltung zur Erzeugung des Gegen- und Nullsystems mit Verstärker

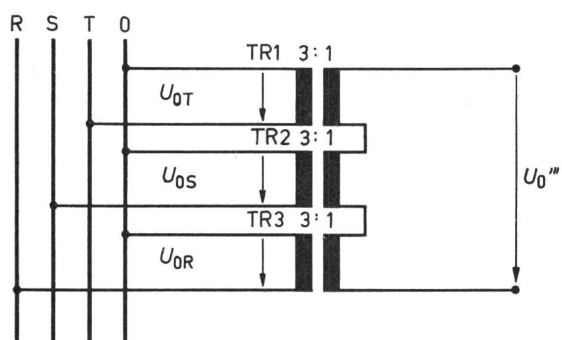


Fig. 3

Schaltung zur Messung der relativen Nullspannung

U_{0T} , U_{0S} , U_{0R} Sternspannungen; U_0''' Nullsystem der Sternspannungen

sowie einem 2-Kanal-Schreiber, mit dem beide Grössen gleichzeitig aufgezeichnet werden können. Sie ist in Fig. 1 und ein aufgezeichneter Diagrammstreifen in Fig. 2 ersichtlich. Die Empfindlichkeit der Anzeige kann in Stufen 1 - 2 - 5 % den Netzverhältnissen angepasst werden.

3.2 Schaltung zur Ermittlung der symmetrischen Komponenten

U_0'' und U_0'''

3.2.1 Nullsystem U_0'''

Aus Gl. (3) des Bulletins des SEV, Nr. 17, S. 801, kann folgende Beziehung abgeleitet werden:

$$U_{0R}''' = U_{0S}''' = U_{0T}''' = \frac{1}{3} (U_{0R} + U_{0S} + U_{0T}) \quad (3)$$

Zur Bestimmung von U_{0R}''' müssen die Sternspannungen der drei Phasen R, S und T voneinander galvanisch getrennt und addiert werden. Die entsprechende Schaltung ist in Fig. 3 ersichtlich.

3.2.2 Gegensystem U_0''

Aus Gl. (2) des Bulletins des SEV, Nr. 17, S. 801, kann folgende Beziehung abgeleitet werden:

$$U_{0R}'' = \frac{1}{3} \left(U_{0R} + U_{0S} e^{-j\frac{2\pi}{3}} + U_{0T} e^{j\frac{2\pi}{3}} \right) \quad (4)$$

gemäss Fig. 4 bestehen folgende Zusammenhänge:

$$U_{0S} = U_{0R} - U_{SR}$$

$$U_{0T} = U_{0R} - U_{SR} - U_{TS}$$

eingesetzt in Gl. (4) ergibt:

$$U_{0R}'' = \frac{1}{3} \left(\underbrace{U_{0R} + U_{0R} e^{-j\frac{2\pi}{3}} + U_{0R} e^{j\frac{2\pi}{3}}}_0 - \frac{1}{3} \left(\underbrace{U_{SR} e^{-j\frac{2\pi}{3}} + U_{SR} e^{+j\frac{2\pi}{3}} + U_{TS} e^{+j\frac{2\pi}{3}}}_{-U_{SR}} \right) \right)$$

oder umgeformt:

$$U_{0R}'' = \frac{1}{3} \left(U_{SR} + U_{TS} e^{-j\frac{\pi}{3}} \right) \quad (5)$$

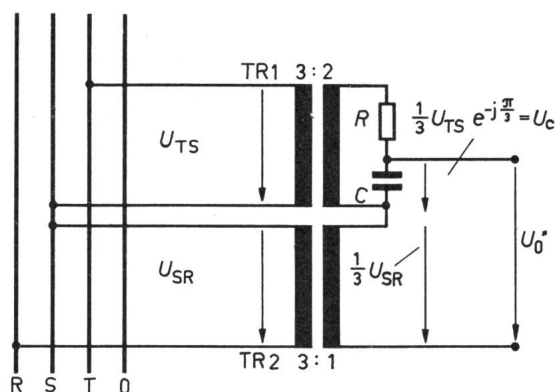


Fig. 4

Schaltung zur Messung der relativen Gegenspannung

U_{SR} , U_{TS} Dreieckspannungen; U_0'' Gegensystem der Sternspannungen

Die entsprechende Schaltung ist in Fig. 4 dargestellt. Das RC-Glied ist so dimensioniert, dass die Spannung U_c am Kondensator C um $\pi/3$ oder 60° gegenüber der Spannung U_{TS} nacheilt.

3.3 Ausfilterung der Oberwellen

Bei sinusförmiger Netzspannung werden am Ausgang der Verstärker die richtigen Werte für U_0'' und U_0''' gemessen. Bei oberwellenbehafteter Netzspannung sind selbst bei vollkommen symmetrischem Spannungsdreieck Restspannungen messbar, die die Anzeige von U_0'' und U_0''' verfälschen. Beim Gegensystem U_0'' tritt hauptsächlich eine 5. Oberwelle und beim Nullsystem U_0''' eine 3. Oberwelle auf, die durch geeignete Filter ausgeblendet werden müssen. Die Restspannungen bei symmetrischem Spannungsdreieck werden so auf Werte $< 0,1\%$ reduziert.

3.4 Beeinflussung der Messgenauigkeit des relativen Gegensystems U_0''/U_0' durch die Schwankungen der Netzfrequenz f

In der Schaltung zur Bestimmung des relativen Gegensystems U_0''/U_0' nach Fig. 4 erzeugt das RC-Glied eine frequenzabhängige Betrags- und Phasenänderung der Spannung U_c . Es war deshalb speziell zu untersuchen, inwieweit die im Netz auftretenden Frequenzänderungen die Messgenauigkeit des relativen Gegensystems U_0''/U_0' beeinflussen.

Die Meßschaltung nach Fig. 4 ist im Vektordiagramm Fig. 5 ersichtlich.

$$U_z = \frac{2}{3} U_{TS}$$

$$Z = R + \frac{1}{j\omega C}$$

$$i_z = \frac{U_z}{Z} = \frac{2}{3} \cdot \frac{U_{TS}}{R + \frac{1}{j\omega C}}$$

$$U_c = i_z \frac{1}{j\omega C} = \frac{2}{3} \cdot \frac{U_{TS}}{1 + jR\omega C}$$

$$|U_c| = \frac{2}{3} \cdot \frac{U_{TS}}{\sqrt{1 + (R\omega C)^2}} \quad (6)$$

Das RC-Glied ist so bemessen, dass die Phasendrehung β der Spannung U_c gegenüber der Spannung U_z bei 50 Hz genau 60° beträgt. Dies führt auf folgende Beziehung:

$$R\omega C = \sqrt{3}$$

Die Ableitung von U_c nach ω führt auf folgende Gl.1:

$$\frac{\Delta U_c}{U_c} = -\frac{1}{3} \cdot \frac{U_{TS} R C}{[1 + (R\omega C)^2]^{3/2}}$$

$$\frac{\Delta U_c}{U_c} = -\frac{1}{3} \cdot \frac{\sqrt{3} \omega R C}{[1 + (R\omega C)^2]^{3/2}} \cdot \frac{\Delta \omega}{\omega} \quad (7)$$

$$\frac{\Delta \omega}{\omega} = \frac{\Delta f}{f} \quad \text{da} \quad \omega = 2\pi f$$

Eine relative Frequenzänderung $\Delta f/f$ führt auf eine Falschmessung der Grösse U_c um den Betrag ΔU_c , was zur Folge hat, dass ein unsymmetrisches Spannungsdreieck R-S'-T von der Meßschaltung als symmetrisches Dreieck R-S-T angesehen wird. Die Fehlspannung ΔU_c hat die Richtung S-0. Gemäss Theorie tritt dabei ausser einem Nullsystem, das in diesem Zusammenhang nicht von Interesse ist, ein Gegensystem auf, das $1/3$ der relativen Änderung der Spannung U_{0S} beträgt.

$$\frac{U_0''}{U_0'} = \frac{1}{3} \cdot \frac{\Delta U_{0S}}{U_{0S}} = \frac{1}{3} \cdot \frac{\Delta U_c}{U_{0S}} = -\frac{1}{9} \cdot \frac{\sqrt{3} \omega R C}{[1 + (R\omega C)^2]^{3/2}} \cdot \frac{\Delta f}{f}$$

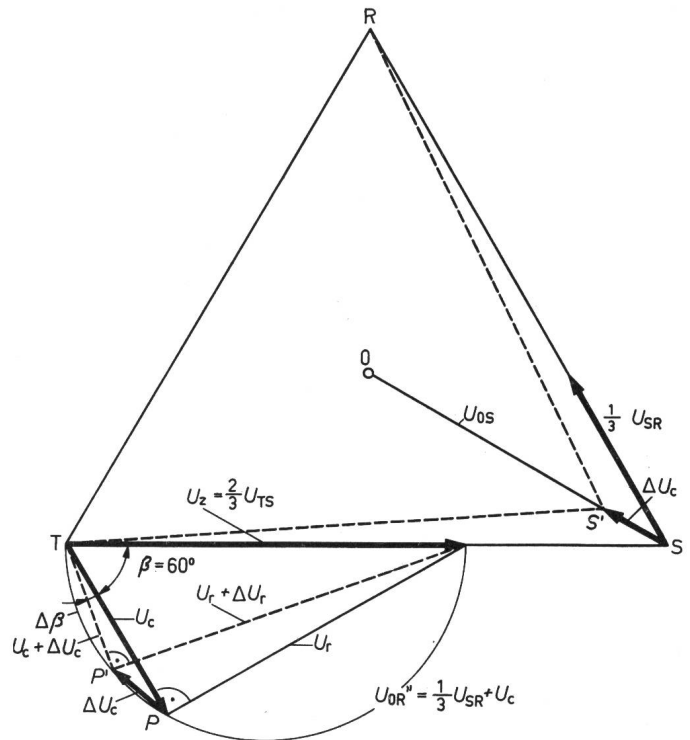


Fig. 5

Einfluss der Frequenzschwankungen des Netzes auf die Messgenauigkeit des relativen Gegensystems U_0''/U_0' der Sternspannung

U_c Spannung am Kondensator; U_z Sekundärspannung am Übertrager TR1; U_{0R}'' Gegensystem der Sternspannung; P Lage des Vektors U_c für $f = 50$ Hz; P' Lage des Vektors U_c für $50 + \frac{df}{f}$ Hz; β Phasenwinkel zwischen U_z und $U_c = 60^\circ$

Unter Berücksichtigung der 60° -Verschiebung bei 50 Hz ergibt sich:

$$\frac{U_0''}{U_0'} = -0,042 \frac{\Delta f}{f} \quad (8)$$

Um diesen Betrag wird das relative Gegensystem U_0''/U_0' falsch gemessen, wenn die Netzfrequenz um $\Delta f/f$ vom Sollwert abweicht.

Um die statistische Verteilung der Netzfrequenz im Niederspannungs-Verbundnetz zu ermitteln, wurde die Netzfrequenz f während ca. 1 Monat genau gemessen und registriert. Die Auswertung ergab eine angenäherte Normalverteilung um einen Mittelwert von genau 50 Hz. Die in diesem Zusammenhang besonders interessierende mittlere quadratische Abweichung (Streuung) beträgt:

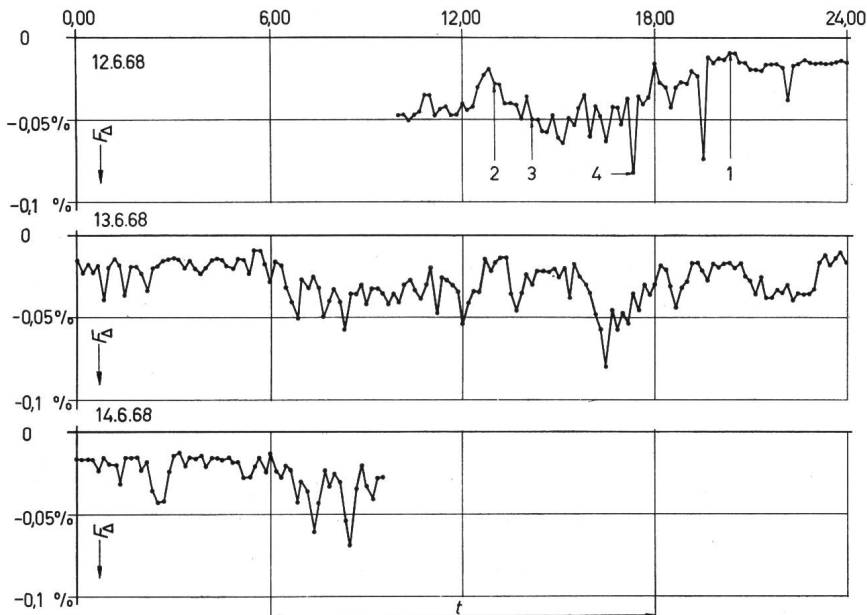
$$\sigma_f = 0,06\% \text{ des Nennwertes von } 50 \text{ Hz}$$

Die grösste Abweichung betrug $\pm 0,27\%$ des Nennwertes von 50 Hz. Setzt man obigen maximalen Wert von $\pm 0,27\%$ in Gl. (8) ein, so ist:

$$\frac{U_0''}{U_0'} \approx -0,01\% \approx 0$$

Die Untersuchungen haben ergeben, dass die im Netz auftretenden maximalen Frequenzschwankungen die Messgenauigkeit des relativen Gegensystems U_0''/U_0' praktisch nicht beeinflussen.

Auf die Messgenauigkeit des relativen Nullsystems U_0'''/U_0' haben die Frequenzschwankungen keinen Einfluss, da gemäss Gl. (3) keine frequenzabhängige Phasendrehung der Teilspannungen erzeugt werden muss.



3.5 Eichung der Anzeige

Ausgehend von einem vollkommen symmetrischen Spannungsdreieck, wurde der Betrag der Sternspannung U_{0R} um 3 % reduziert. Gemäss Theorie tritt dabei eine Gegenspannung U_0''/U_0' und eine Nullspannung U_0'''/U_0' von je 1 % auf. Damit können beide Ausgänge des Messgerätes in der Stellung 1-%-Empfindlichkeit auf Vollausschlag abgeglichen werden.

4. Auswertung der registrierten symmetrischen Komponenten der Netzspannung an den verschiedenen Meßstellen

4.1 Berechnung der Fehler bei symmetrischer Belastung

Der Fehler F_Δ berechnet sich im allgemeinen Fall nach Gl. (1) und, wenn kein Nullsystem U_0''' auftritt, nach Gl. (2).

Die an allen Meßstellen registrierten Werte des Gegen- und Nullsystems gemäss Tabelle I ergaben durchweg nur sehr kleine Fehler F_Δ . Es wurden deshalb nur an den beiden ungünstigsten Meßstellen, wo die grössten Werte der Gegen- und Nullspannung gemessen wurden, die aus den symmetrischen Komponenten der Netzspannung nach Gl. (1) berechneten Fehler statistisch ausgewertet. Es betraf dies die beiden Meßstellen 1 und 2. Bei den übrigen Meßstellen wurden jeweils nur die Fehler ermittelt, die z. Z. der grössten Netzunsymmetrie auftraten.

4.1.1 Meßstelle 1 in Ebikon

Die Messungen wurden während der Zeit vom 12. 6. 1968, 10.00 Uhr, bis zum 14. 6. 1968, 09.30 Uhr, registriert, die Werte der Gegenspannung U_0'' und der Nullspannung U_0''' gleichzeitig in Stufen von je 10 min aus dem Diagrammstreifen abgelesen und daraus die Fehler F_Δ nach Gl. (1) berechnet. Der chronologische Verlauf von F_Δ während der Messzeit ist in Fig. 6 und seine Summenhäufigkeit in Fig. 7 dargestellt.

Aus Fig. 6 ist ersichtlich, dass die Fehler F_Δ während der Arbeitszeit gegenüber der Nacht etwas grösser sind, was auf die grössere Netzbelastung und die dadurch verursachten grösseren Spannungsunsymmetrien zurückzuführen ist. Der Mittelwert von F_Δ , auf die ganze Messzeit bezogen, beträgt $-0,028\%$.

Die grösste Spannungsunsymmetrie wurde am 12. 6. 1968 um 17.20 Uhr gemessen und ergibt einen Fehler von $F_\Delta = -0,082\%$. Gemäss Fig. 7 sind die Fehler F_Δ angenähert logarithmisch normal verteilt.

Fig. 6

Meßstelle 1 in Ebikon

Zeitlicher Verlauf des Messfehlers F_Δ bei symmetrischer Belastung
1 absolut kleinster Fehler; 2 mittlerer Fehler während der Messzeit; 3 mittlerer Fehler während der Arbeitszeit; 4 absolut grösster Fehler
 t Arbeitszeit

4.1.2 Meßstelle in Unterägeri

Die Messungen wurden während der Zeit vom 15. 5. 1968, 11.00 Uhr, bis zum 17. 5. 1968, 15.50 Uhr, registriert. Die Auswertung erfolgte nach dem gleichen Schema wie in 4.1.1. Der chronologische Verlauf der Fehler F_Δ während der Messzeit ist in Fig. 8 und seine Summenhäufigkeit in Fig. 9 dargestellt. Auch hier sind die Fehler F_Δ während der Arbeitszeit etwas grösser als zur Nachtzeit. Der Mittelwert des Fehlers F_Δ auf die ganze Messzeit bezogen, beträgt $-0,009\%$.

Die grösste Spannungsunsymmetrie wurde am 17. 5. 1968 um 14.50 Uhr gemessen und ergibt einen Fehler von $F_\Delta = -0,053\%$.

4.1.3 Meßstellen 3 bis 10

Die Fehler F_Δ zurzeit der grössten Spannungsunsymmetrie an den Meßstellen 3 bis 10 sind in Tabelle I zusammengestellt.

4.2 Berechnung der Fehler bei unsymmetrischer Belastung

Wie in Abschnitt 2 erwähnt, sind die Fehler bei unsymmetrischer Belastung und gegebener Spannungs- und Belastungs-

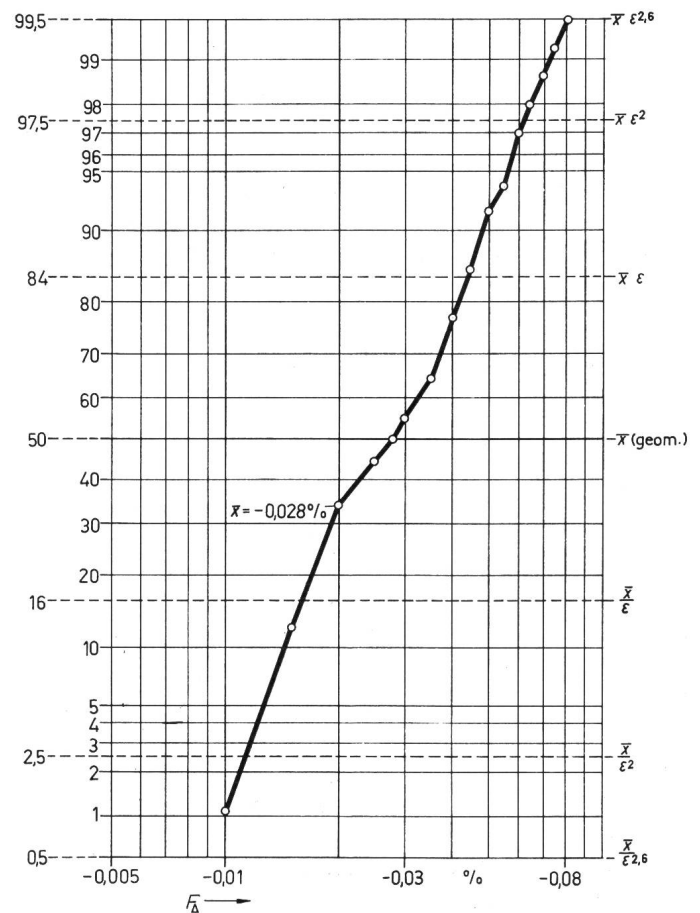


Fig. 7

Summenhäufigkeit des Fehlers F_Δ bei symmetrischer Belastung
 \bar{x} Mittelwert von F_Δ

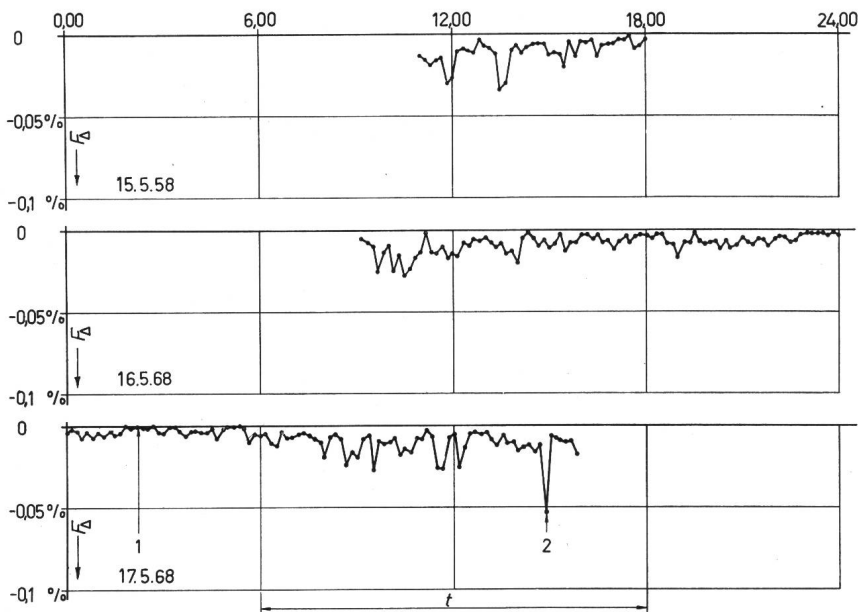


Fig. 8
Meßstelle 2 in Unterägeri
 Zeitlicher Verlauf des Messfehlers F_{Δ} bei symmetrischer Belastung
 1 absolut kleinster Fehler; 2 absolut grösster Fehler
 t Arbeitszeit

unsymmetrie u. a. abhängig vom Phasenwinkel γ bzw. δ des Gegen- bzw. Nullsystems zum Mitsystem der Sternspannung. Beschränkt man sich auf reine Blindbelastung ($\sin \varphi = 1$), so erhält man den oberen Grenzwert des Fehlerbandes in Abhängigkeit vom Grad der Belastungsunsymmetrie K_{us} für γ und $\delta = 180^\circ$ und seinen unteren Grenzwert für γ und $\delta = 0^\circ$. Dabei wird $X_R < X_S < X_T$ vorausgesetzt.

Messergebnisse

Tabelle I

Nummern der Meßstelle	Relative Gegenspannung U_o'/U_o' %	Relative Nullspannung U_o''/U_o' %	Fehler bei symmetrischer Belastung F_{Δ} %
3	1,2	0,2	-0,030
4	0,6	1,0	-0,017
5	0,2	0,5	-0,006
6	1,0	0,2	-0,020
7	0,8	0,1	-0,013
8	1,4	1,2	-0,053
9	1,2	0,1	-0,030
10	0,5	0,1	-0,005

Bei Ohmisch-induktiver Belastung treten die oberen und unteren Grenzwerte des Fehlerbandes in Abhängigkeit vom Grad der Belastungsunsymmetrie K_{us} bei anderen Phasenwinkeln γ und δ auf. Die grösstmöglichen Fehler bei Ohmisch-induktiver Belastung sind gegenüber den Fehlern bei rein induktiver Belastung durchschnittlich etwas grösser.

Der Einfachheit halber wurden die Grenzwerte der Fehler in Abhängigkeit vom Grad der Belastungsunsymmetrie K_{us} nur für reine Blindbelastung ermittelt.

Der Unsymmetriegrad K_{us} der Belastung wird folgendermassen definiert:

Reaktanz der Phase R: $X_R = X_u$ = kleinster Wert
 Reaktanz der Phase S: $X_S = X_m$ = mittlerer Wert
 Reaktanz der Phase T: $X_T = X_0$ = grösster Wert

Dabei wird die Annahme getroffen, dass $X_m = \frac{1}{2}(X_u + X_0)$

sei.

$$K_{us} = \frac{X_0 - X_u}{X_0 + X_u} \quad (9)$$

Mit Fig. 10 kann der Unsymmetriegrad K_{us} der Belastung bei gegebenen Belastungsreaktanzen X_0 , X_m und X_u graphisch

ermittelt werden. Der Wert der mittleren Belastungsreaktanz X_m ist dabei zu 100 % angenommen.

Gleichzeitig sind in Fig. 10 die den Belastungsreaktanzen zugehörigen Blindbelastungen P_u , P_m und P_0 ersichtlich, die umgekehrt proportional den Belastungsreaktanzen sind. Der mittlere Wert P_m der Blindbelastung der Reaktanz X_m ist wiederum zu 100 % angenommen.

Bei einem Unsymmetriegrad K_{us} der Belastung von beispielsweise 60 % beträgt die Reaktanz $X_0 = 1,6 X_m$ und die zugehörige

Blindbelastung $P_u = 0,63 P_m$ sowie die Reaktanz $X_u = 0,4 X_m$ und die zugehörige Blindbelastung $P_0 = 2,5 P_m$. Die grösste und kleinste Blindbelastung P_0 und P_u unterscheiden sich um 187 % des Wertes P_m der mittleren Belastungsreaktanz X_m .

Wie die Fig. 11...13 zeigen, werden die Grenzwerte der Fehler mit steigendem Unsymmetriegrad K_{us} grösser. Die grösstmöglichen Werte treten bei einphasiger Belastung auf. Das Fehlerband liegt symmetrisch um eine Gerade, die gegenüber der Abszisse um den Fehler F_{Δ} bei symmetrischer Belastung ($K_{us} = 0$) parallel nach unten verschoben ist.

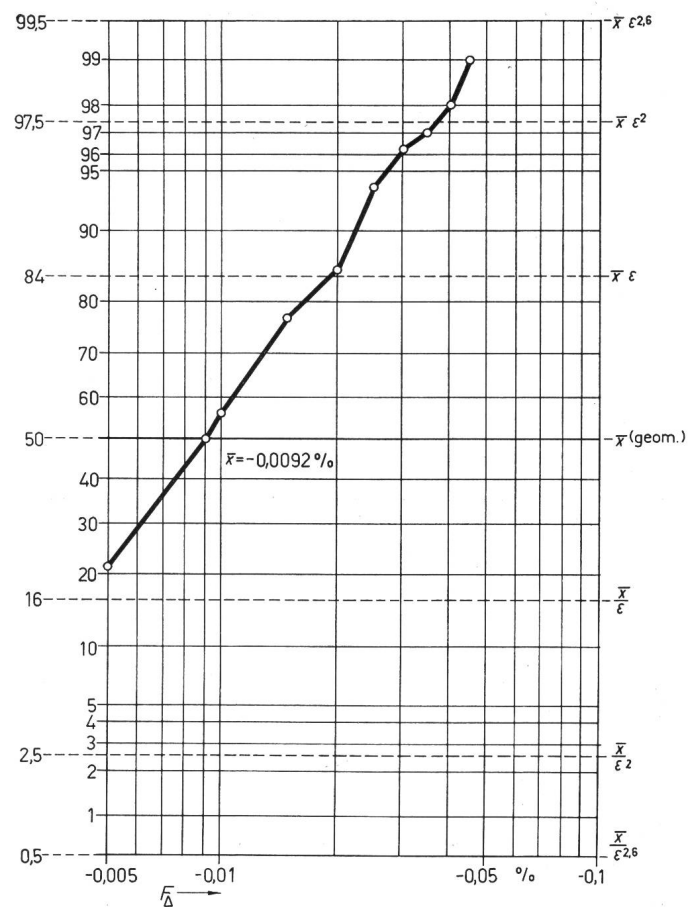


Fig. 9
 Summenhäufigkeit des Fehlers F_{Δ} bei symmetrischer Belastung
 \bar{x} Mittelwert von F_{Δ}

Bei einem Unsymmetriegrad der Belastung K_{us} von ca. 5 % und weniger sind die Zusatzfehler stets negativ und in allen untersuchten Fällen praktisch vernachlässigbar. Bei grösseren Unsymmetriegraden der Belastung K_{us} wechselt der obere Grenzwert des Fehlerbandes sein Vorzeichen und wird positiv. Da die Fehler F_{Δ} bei symmetrischer Belastung gegenüber den Fehlern bei unsymmetrischen Belastungen vernachlässigt werden können, liegt das Fehlerband in Abhängigkeit von K_{us} angenähert symmetrisch zur Abszisse.

In Tabelle II ist die Zugehörigkeit der gerechneten Grenzwerte der Fehler nach Fig. 11...13 in Abhängigkeit vom Un-

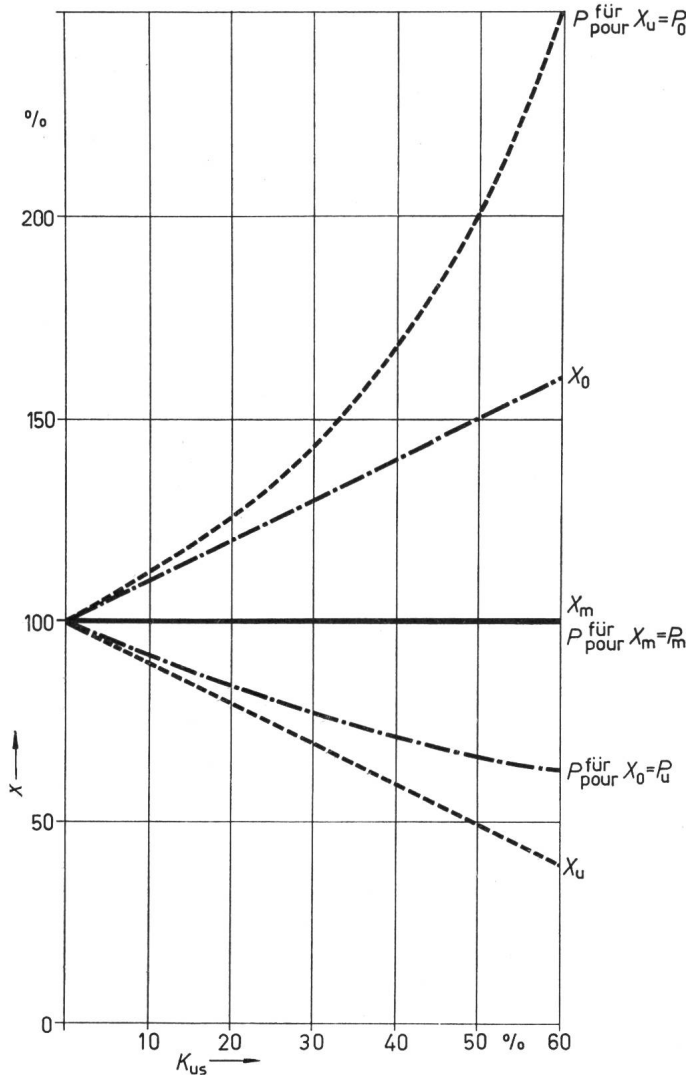


Fig. 10

Zusammenhang zwischen dem Unsymmetriegrad der Belastung K_{us} und den Belastungsreaktanzen X_u , X_m und X_0 mit den zugehörigen Belastungen P_0 , P_m und P_u

X_0 grösster Wert, X_m mittlerer Wert, X_u kleinster Wert der Reaktanzen

P_0 grösster Wert, P_m mittlerer Wert, P_u kleinster Wert der Belastungen

symmetriegrad K_{us} der Belastung zu den einzelnen Messstellen zusammengestellt.

5. Kommentar und Schlussfolgerungen

Die 10 untersuchten Messstellen im 220/380-V-Niederspannungsnetz in der näheren und weiteren Umgebung von Zug repräsentieren die Verhältnisse, wie sie sich bei der Messung der Blindenergie mit Blindverbrauchsählern in Kunstschaltung ergeben. Ist die Belastung symmetrisch oder nur in geringem Masse unsymmetrisch (<5 %), so liegen die

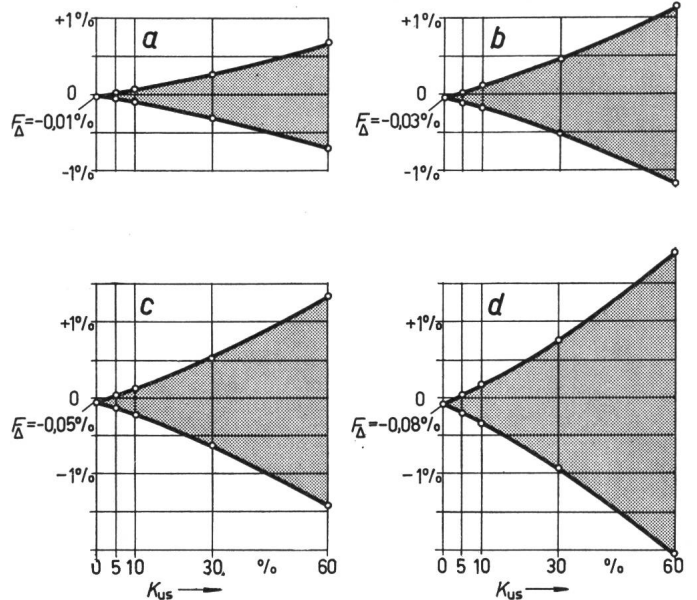


Fig. 11

Fehler in Abhängigkeit von K_{us} an der Meßstelle 1

a zur Zeit der absolut kleinsten Spannungsunsymmetrie; b zur Zeit einer mittleren Spannungsunsymmetrie während der gesamten Messzeit; c zur Zeit einer mittleren Spannungsunsymmetrie während der Arbeitszeit; d zur Zeit der absolut grössten Spannungsunsymmetrie
 F_{Δ} Fehler bei symmetrischer Belastung; K_{us} Unsymmetriegrad der Belastung

Zusatzfehler an allen untersuchten Meßstellen im ungünstigsten Fall innerhalb der Promille-Grenze und können vernachlässigt werden.

Bei unsymmetrischer Belastung hängt der Zusatzfehler u. a. stark von der Grösse des Unsymmetriegrades K_{us} der Belastung ab. Bei der Beurteilung dieser Fehler ist deshalb zu überlegen, mit welchen Belastungsunsymmetrien im Netz zu rechnen ist. Dabei ist zu berücksichtigen, dass in den meisten Fällen die Blindenergie, die gemessen werden soll, von Induktionsmotoren und Transformatoren konsumiert wird, die mehrheitlich dreiphasig ausgeführt sind. Aber auch bei einphasigen Blindbelastungen, die gegenüber der gleichzeitig konsumierten Wirklast ins Gewicht fallen, hat der Konsument selber ein Interesse, dass sie zyklisch vertauscht angeschlossen werden, um die Leistungsfähigkeit des Netzes möglichst gut ausnützen zu können. Es ist deshalb zu erwarten, dass der für die Berechnung des Zusatzfehlers angenommene maximale Wert K_{us} der Belastungsunsymmetrie von 60 % überdurchschnittlich ungünstige Verhältnisse darstellt.

Des weiteren ist zu berücksichtigen, dass die in den Fig. 11...13 dargestellten Zusatzfehler nur z. Z. der grössten Spannungsunsymmetrie auftreten, die, wie die Messungen im Netz zeigten, jeweils nur sehr kurzzeitig wirksam ist (s. Fig. 6 und 8). Bezogen auf eine während einer Ableseperiode mittlere zu

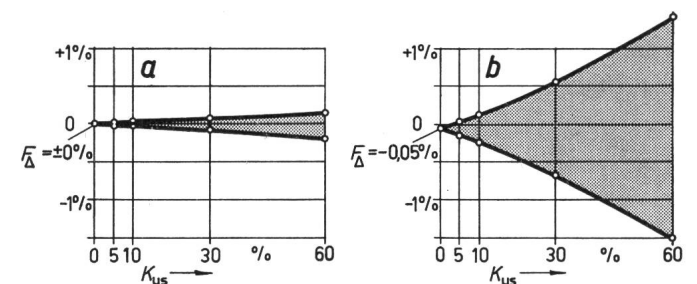


Fig. 12

Fehler in Abhängigkeit von K_{us} an der Meßstelle 2

a zur Zeit der absolut kleinsten Spannungsunsymmetrie; b zur Zeit der absolut grössten Spannungsunsymmetrie

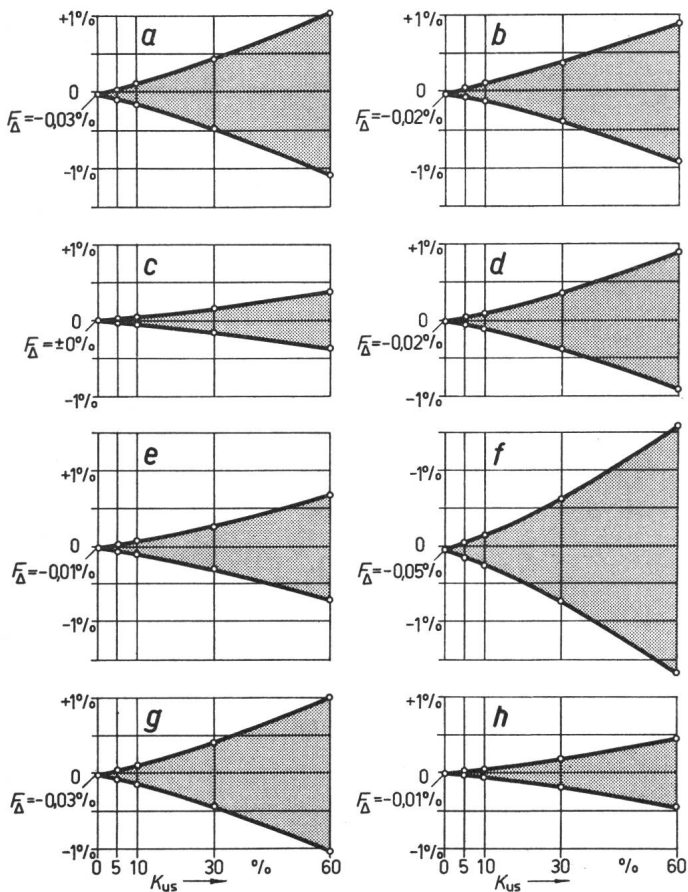


Fig. 13
Fehler in Abhängigkeit von K_{us} an den Messstellen 3 bis 10
zur Zeit der absolut grössten Spannungsunsymmetrie
Erläuterungen siehe im Text

erwartende Spannungsunsymmetrie ist deshalb mit einem Fehlerband zu rechnen, das bei der ungünstigsten Phasenlage des Gegen- und Nullsystems zum Mitsystem der Sternspannung gegenüber den in Fig. 11...13 dargestellten Fehlerwerten nur ungefähr halb so grosse Grenzwerte ergibt.

Die in den Fig. 11...13 dargestellten Fehlerbänder beziehen sich auf die Höchstwerte bei gegebener Spannungsunsymmetrie, die bei der ungünstigsten Phasenlage der Gegen- und Nullsysteme zum Mitsystem der Sternspannung auftreten können. In Wirklichkeit besteht aber kein systematischer Zusammenhang zwischen der Phasenlage der Gegen- und Nullspannungen zum Mitsystem der Sternspannungen einerseits und der Unsymmetrie der Belastungsimpedanzen andererseits. Über längere

Zugehörigkeit der gerechneten Grenzwerte der Fehler

Tabelle II

Messstelle	Spannungsunsymmetrie	Fig.	Bemerkung
1	kleinster Wert während der Messzeit	11a	in Fig. 6 mit 1...4 bezeichnet in Fig. 8 mit 1...2 bezeichnet
1	mittlerer Wert während der Messzeit	11b	
1	mittlerer Wert während der Arbeitszeit	11c	
1	grösster Wert während der Messzeit	11d	
2	kleinster Wert während der Messzeit	12a)	
2	grösster Wert während der Messzeit	12b)	
3		13	
4		13	
5		13	
6		13	
7	grösster Wert während der Messzeit	13	
8		13	
9		13	
10		13	

Zeit betrachtet, werden sich die Zusatzfehler bei unsymmetrischer Belastung deshalb zum grössten Teil kompensieren, da die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines positiven oder negativen Fehlers annähernd gleich gross ist.

Betrachtet man zusammengefasst die Situation beim Messen von unsymmetrischer Blindbelastung mit Blindverbrauchszählern in Kunstschtaltung, so ist Bedingung für das Auftreten der in den Fig. 11...13 dargestellten Fehler in Abhängigkeit der Belastungsunsymmetrie K_{us} das gleichzeitige Zusammentreffen der folgenden ungünstigsten Fälle:

- a) Zeit der grössten Spannungsunsymmetrie im Netz;
- b) Ungünstigste Phasenlagen zwischen Gegen- und Mitsystem der Sternspannung;
- c) Ungünstigste Phasenlage zwischen Null- und Mitsystem der Sternspannung.

Die Wahrscheinlichkeit für das gleichzeitige Auftreten dieser drei erwähnten ungünstigsten Fälle ist sehr klein. Es können wohl kurzzeitig Zusatzfehler bis zu einigen Prozenten auftreten. Über längere Zeit hingegen ist aber im allgemeinen mit wesentlich kleineren Zusatzfehlern zu rechnen, die — verglichen mit anderen Einflussfaktoren auf die Messgenauigkeit der Zähler — in derselben Grössenordnung liegen und deshalb toleriert werden können.

Abgesehen von den hier behandelten Zusatzfehlern bei unsymmetrischer Netzspannung, ist bei der Beurteilung der Argumente, die für oder gegen die Verwendung von Blindverbrauchszählern in Kunstschtaltung gegenüber solchen in natürlicher Schaltung sprechen, auch noch die Messgenauigkeit bei symmetrischer Netzspannung massgebend.

Der Blindverbrauchszähler in Kunstschtaltung hat dieselben Messeigenschaften wie der entsprechende Wirkverbrauchszähler, da ja die zusätzliche 90°-Verschiebung durch Anschluss der Messwerke an phasenfremde Spannungen erzeugt wird. Beim heutigen Stand der Technik können Drehstromzähler bei relativ kleinem Eigenverbrauch in Spannungs- und Strompfad für eine max. Belastung bis zu 600 % des Nennwertes ausgeführt werden. Beim Blindverbrauchszähler in natürlicher Schaltung wird die zusätzliche Phasenverschiebung zwischen den magnetischen Triebflüssen um 90° durch Vorschalten eines Ohmschen Widerstandes zum Spannungspfad und Parallelschalten eines Ohmschen Widerstandes zum Strompfad im Zähler selber erzeugt. Deshalb sind seine Messeigenschaften nicht abhängig von der Unsymmetrie der Netzspannung. Diese Massnahme hat aber einen erhöhten Eigenverbrauch in Spannungs- und Strompfad zur Folge und begrenzt u. a. die maximale Belastbarkeit. Beim heutigen Stand der Technik können Blindverbrauchszähler in natürlicher Schaltung nur für eine max. Belastbarkeit von 200 % des Nennwertes ausgeführt werden.

In dieser Hinsicht ist der Blindverbrauchszähler in Kunstschtaltung der Ausführung in natürlicher Schaltung eindeutig überlegen. Die vorliegenden Untersuchungen haben ausserdem ergeben, dass die durch die Unsymmetrie der Netzspannung verursachten Zusatzfehler relativ klein sind und in Kauf genommen werden können. Es ist deshalb empfehlenswert, in Zukunft für die Messung der Blindenergie im Netz in vermehrtem Masse Blindverbrauchszähler in Kunstschtaltung zu verwenden.

Adresse der Autoren:
M. Angst, dipl. Elektroingenieur und Dr. F. Tschappu, Oberingenieur, Landis & Gyr AG, 6300 Zug.