

<b>Zeitschrift:</b>	Bulletin de l'Association suisse des électriciens
<b>Herausgeber:</b>	Association suisse des électriciens
<b>Band:</b>	59 (1968)
<b>Heft:</b>	17
<b>Artikel:</b>	Erreurs additionnelles des compteurs d'énergie réactive en branchement artificiel dans les réseaux triphasés 4 fils
<b>Autor:</b>	Tschappu, F.
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-1057418">https://doi.org/10.5169/seals-1057418</a>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 22.02.2026

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

# Erreurs additionnelles des compteurs d'énergie réactive en branchement artificiel dans les réseaux triphasés 4 fils

Par F. Tschappu, Zoug

621.317.382.016.25:621.316.13

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  $\varphi$ . 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 quelle 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  $\varphi$ . 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  $\varphi$  et une autre composante dépendante de la cotangente de l'angle  $\varphi$ .

## 1. Introduction

La mesure effectuée par les systèmes normaux des compteurs à induction est égale à l'intégrale du produit scalaire:

$$\int U I \cos \varphi dt$$

ce qui correspond à la réalité physique de l'énergie active. S'il s'agit de mesurer l'énergie réactive avec ces mêmes systèmes, on doit corriger l'angle de déphasage interne compris entre les flux de tension et de courant. Il est possible de passer de 90° à 180° de déphasage interne en introduisant une résistance ohmique dans le circuit de tension et un shunt ohmique dans le circuit de courant. Ce genre de compteurs mesure l'énergie réactive correctement quelles que soient les dissymétries des systèmes polyphasés et des charges. La consommation propre et l'encombrement de ces appareils sont cependant plus élevés que pour les compteurs normaux d'énergie active. De plus, les compteurs d'énergie réactive de ce type ne peuvent pas être réalisés avec une capacité de charge aussi importante que celle des compteurs modernes d'énergie active, dont la plage de mesure s'étend aujourd'hui jusqu'à 600 % de la charge nominale.

Lorsque les charges du réseau sont essentiellement symétriques et lorsque les exigences au point de vue précision de la

Wird die vom Abonnenten konsumierte Blindenergie mit Drehstrom-4-Leiterzählern in Kunstschatzung gemessen, deren Messwerke an phasenfremde Spannung geschaltet ist, 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 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, das der Fehler bei beliebigen Unsymmetrien in der Netzspannung stets negativ und unabhängig vom Phasenwinkel  $\varphi$  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 Bezug 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  $\varphi$  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  $\varphi$  und aus einer Komponente, die abhängig vom ctg des Phasenwinkels  $\varphi$  der Belastungen ist.

(Traduction)

mesure de l'énergie réactive ne sont pas trop poussées, il est possible d'utiliser des compteurs en branchement artificiel. Ces derniers comprennent des systèmes de mesure normaux de compteurs d'énergie active. Le déphasage interne de 180°, nécessaire entre les flux de tension et de courant, est obtenu en branchant les circuits de tension à une tension voisine qui se trouve décalée de 90° par rapport à la tension aux bornes de la charge. Le schéma de branchement et le diagramme vectoriel

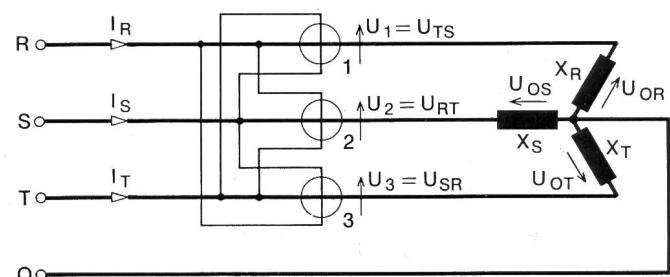


Fig. 1  
Schéma d'un compteur d'énergie réactive en branchement artificiel dans un réseau triphasé 4 fils

R, S, T, O Conducteurs du réseau triphasé 4 fils; IR, IS, IT Courants de phase; U1, U2, U3 Tensions appliquées aux systèmes de mesure 1, 2, 3; 1, 2, 3 Systèmes de mesure du compteur

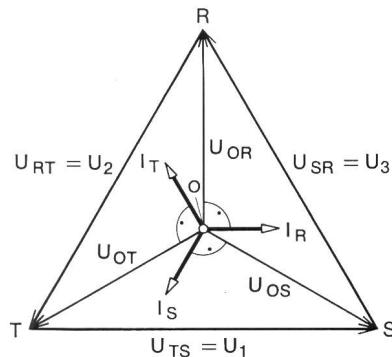


Fig. 2

Diagramme vectoriel des tensions et des courants

$R, S, T, O$  Conducteurs du réseau triphasé 4 fils;  $U_{RT}, U_{SR}, U_{TS}$  Tensions composées;  $U_{0R}, U_{0S}, U_{0T}$  Tensions de phase;  $U_1, U_2, U_3$  Tensions appliquées aux systèmes de mesure 1, 2, 3;  $I_R, I_S, I_T$  Courants de phase

correspondants sont représentés aux figures 1 et 2. Les trois réactances  $X_R, X_S$  et  $X_T$  sont branchées en étoile au réseau triphasé 4 fils R-S-T-0. Le courant de la phase R passe par le système de mesure 1 dont le circuit de tension est branché à la tension composée  $U_{TS} = U_1$ . Les autres systèmes sont branchés de façon analogue.

Pour mesurer avec exactitude l'énergie réactive du réseau, il faut que les tensions  $U_{TS}$ ,  $U_{RT}$  et  $U_{SR}$  soient perpendiculaires aux tensions de phase respectives  $U_{0R}$ ,  $U_{0S}$  et  $U_{0T}$ . Par ailleurs, il faut que les tensions composées soient égales aux tensions de phase multipliées par le facteur  $\sqrt{3}$ . Ces conditions ne sont remplies que si le triangle des tensions est symétrique et que si le neutre du réseau se trouve au centre de gravité du triangle. Ces conditions idéales ne se retrouvent guère en pratique, car, même si le triangle des tensions était symétrique au générateur, les chutes de tension inégales dans les lignes en provoqueraient la déformation au point de mesure. Il en découle que la mesure de l'énergie réactive à l'aide de compteurs en branchement artificiel ne peut se faire sans erreur. Le degré de dissymétrie d'un triangle de tension peut être défini clairement à l'aide des composantes symétriques.

## 2. Décomposition d'un triangle de tensions asymétriques en ses composantes symétriques

Avant d'attaquer le calcul à l'aide des composantes symétriques sur la base de l'exemple concret ci-dessus, il convient de relever quelques aspects importants de cette méthode:

Trois tensions déphasées, de valeur différente, peuvent toujours être représentées par leurs composantes directes, inverses et homopolaires.

Le système direct symbolisé par  $U_0'$  comprend les trois tensions égales  $U_{R'}$ ,  $U_{S'}$  et  $U_{T'}$  déphasées de  $120^\circ$  l'une par rapport à l'autre. L'ordre séquentiel de ce système est R-S-T.

Le système inverse symbolisé par  $U_0''$  comprend les trois tensions égales  $U_{R''}$ ,  $U_{S''}$  et  $U_{T''}$  déphasées de  $120^\circ$  l'une par rapport à l'autre. L'ordre séquentiel du système inverse est S-R-T.

Enfin le système homopolaire comprend les trois tensions égales  $U_{R''''}$ ,  $U_{S''''}$  et  $U_{T''''}$  qui sont en phase.

Les règles du calcul complexe permettent de poser les équations suivantes:

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

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

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

$R, S$  et  $T$  représentent ici les vecteurs du système asymétrique.  $R'$  correspond au système direct,  $R''$  au système inverse et  $R'''$  au système homopolaire. L'opérateur complexe  $-1/2 + j\sqrt{3}/2$  est remplacé par  $a$ .

Multiplier un vecteur par l'opérateur  $a$ , revient à déplacer ce vecteur de  $120^\circ$  dans le sens positif, c'est-à-dire, dans le sens contraire des aiguilles d'une montre, tout en conservant sa longueur au vecteur. Le multiplier par l'opérateur  $a^2$  revient à le déplacer de  $120^\circ$  dans le sens négatif (sens des aiguilles d'une montre).

En utilisant les équations ci-dessus, il est possible de représenter les systèmes directs, inverses et homopolaires du vecteur  $R$  en fonction des vecteurs  $S$  et  $T$ :

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

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

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

Les deux autres vecteurs  $S'$  et  $T'$  du système direct sont obtenus par rotation du vecteur  $R'$  de  $120^\circ$  resp.  $240^\circ$ . Il en va de même des vecteurs  $S''$  et  $T''$  du système inverse par rotation du vecteur  $R''$  de  $240^\circ$  resp.  $120^\circ$ .

Il ressort de l'équation (3) que trois tensions qui forment un triangle ne peuvent former de système homopolaire. C'est le cas pour les tensions composées.

Pour les tensions de phase, un système homopolaire ne prend naissance que lorsque le neutre ne se trouve pas au centre de gravité du triangle. Par ailleurs, les tensions de phase ne forment pas de système inverse, si les tensions composées ne forment pas, elles non plus, de système inverse. C'est le cas lorsque le triangle est symétrique.

Les systèmes directs et inverses des tensions composées sont perpendiculaires aux systèmes respectifs des tensions de phase. La différence de grandeur des vecteurs est égale à  $\sqrt{3}$ . Le système homopolaire correspond à la distance du point neutre au

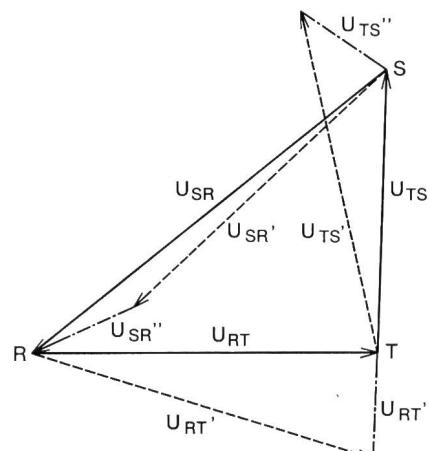


Fig. 3

Décomposition d'un triangle de tensions asymétriques en un système direct et un système inverse

$U_{RT}$  Tension composée;  $U_{RT}'$  Tension directe;  $U_{RT}''$  Tension inverse

Autres désignations voir dans le texte

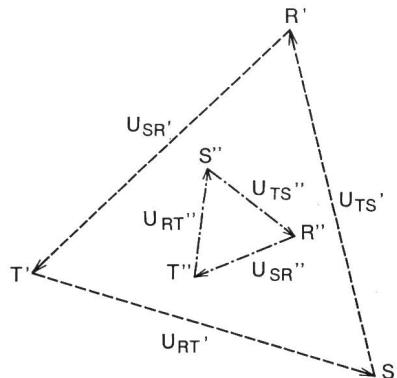


Fig. 4

Systèmes direct et inverse du triangle asymétrique de tensions de la figure 3  
Désignations voir dans le texte

centre de gravité du triangle et peut ainsi être représenté graphiquement d'une façon claire.

Le cas général d'un triangle de tensions asymétrique est représenté à la figure 3. Les tensions composées sont  $U_{SR}$ ,  $U_{TS}$  et  $U_{RT}$ . Le système direct est formé par  $U'_{SR}$ ,  $U'_{TS}$  et  $U'_{RT}$ , le système inverse par  $U''_{SR}$ ,  $U''_{TS}$  et  $U''_{RT}$ . Les composantes symétriques du triangle de tensions de la figure 3 sont représentées à la figure 4. Les tensions de phase du triangle figure 3 sont représentées à la figure 5 ( $U_{0R}$ ,  $U_{0S}$  et  $U_{0T}$ ). Le neutre 0 a été placé au hasard mais pas au centre de gravité. La décomposition des tensions de phase en systèmes directs, inverses et homopolaires, conduit aux tensions directes  $U'_{0R}$ ,  $U'_{0S}$  et  $U'_{0T}$ , aux tensions inverses  $U''_{0R}$ ,  $U''_{0S}$  et  $U''_{0T}$  et aux tensions homopolaires  $U'''_{0R} = U'''_{0S} = U'''_{0T}$ . Les composantes symétriques des tensions de phase de la figure 5 sont représentées graphiquement à la figure 6.

### 3. Calcul des erreurs sous charge symétrique

#### 3.1 Schéma de remplacement du circuit (fig. 7)

Le schéma de remplacement des tensions asymétriques se compose des systèmes directs, inverses et homopolaires. Les deux premiers forment chacun un système triphasé et le système homopolaire, un système monophasé. La charge est représentée par trois impédances  $Z$  de même valeur, branchées en étoile. La puissance réactive résultante par phase se calcule sur la base des apports de chaque système.

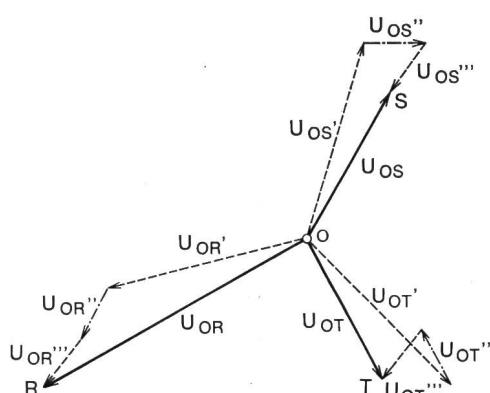


Fig. 5

Décomposition des tensions de phase asymétriques en un système direct, un système inverse et un système homopolaire  
Désignations voir dans le texte

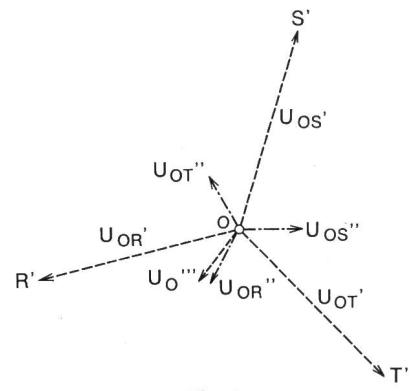


Fig. 6

Systèmes direct, inverse et homopolaire des tensions asymétriques de la figure 5  
Désignations voir dans le texte

#### 3.1.1 Charge monophasée dans la phase R.

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

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

La valeur réelle de la puissance réactive est:

$$P_{bSR} = I_R U_{0R} \sin \varphi \left( \frac{U_{0R}}{I_R} \right) =$$

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

La valeur mesurée par le compteur est:

$$P_{bZR} = I_R U_{TS} \frac{1}{\sqrt{3}} \cos \varphi \left( \frac{U_{TS}}{I_R} - 180^\circ \right) = ^1)$$

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

$$\cdot \cos \varphi \left( \frac{U_{TS}}{I_R} - 180^\circ \right) \quad (5)$$

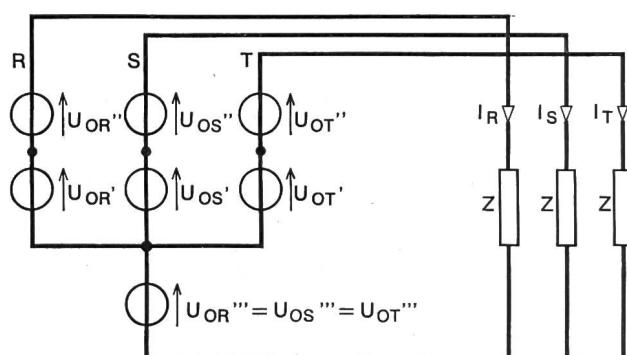


Fig. 7  
Décomposition d'un système triphasé de tensions asymétriques en ses composantes symétriques

$U'_{0R}$ ,  $U'_{0S}$ ,  $U'_{0T}$  Tensions du système direct  $U'_0$ ;

$U''_{0R}$ ,  $U''_{0S}$ ,  $U''_{0T}$  Tensions du système inverse  $U''_0$ ;

$U'''_{0R}$ ,  $U'''_{0S}$ ,  $U'''_{0T}$  Tensions du système homopolaire  $U'''_0$ ;

$I_R$ ,  $I_S$ ,  $I_T$  Courants de phase;

$R$ ,  $S$ ,  $T$  Sommets du triangle de tension

La charge est représentée par trois impédances  $Z$  de mêmes valeurs

<sup>1)</sup> La charge inductive réactive devient négative dans un diagramme vectoriel conventionnel parce que l'angle de déphasage se situe entre  $270^\circ$  et  $360^\circ$ . Afin que l'erreur puisse être déterminée correctement au sens physique, il faut que la charge active correspondante au compteur soit négative. La formule générale pour la puissance mesurée au compteur est la suivante:

$$P_{bZ} = I_U U_V \cdot \cos(\alpha - 180^\circ) \quad (\text{selon figure 10})$$

$U_V$  Tension composée;  $\alpha$  angle entre la tension composée et le courant.

3.1.2 Charge monophasée dans la phase S. La valeur réelle de la puissance réactive est:

$$P_{bSS} = \frac{1}{Z} [U_{0S} + U_{0S}'' + U_{0S}''']^2 \sin \varphi \left( \frac{U_{0S}}{I_S} \right) \quad (6)$$

La valeur mesurée par le compteur est:

$$P_{bZS} = \frac{1}{\sqrt{3} Z} [U_{0S} + U_{0S}'' + U_{0S}'''] \cdot [U_{0T} + U_{0T}'' - U_{0R} - U_{0R}''] \cdot \cos \varphi \left( \frac{U_{RT}}{I_S} - 180^\circ \right) \quad (7)$$

3.1.3 Charge monophasée dans la phase T. La valeur réelle de la puissance réactive est:

$$P_{bST} = \frac{1}{Z} [U_{0T} + U_{0T}'' + U_{0T}''']^2 \sin \varphi \left( \frac{U_{0T}}{I_T} \right) \quad (8)$$

La valeur mesurée par le compteur est:

$$P_{bZR} = \frac{1}{\sqrt{3} Z} [U_{0T} + U_{0T}'' + U_{0T}'''] \cdot [U_{0R} + U_{0R}'' - U_{0S} - U_{0S}''] \cdot \cos \varphi \left( \frac{U_{RT}}{I_T} - 180^\circ \right) \quad (9)$$

#### 3.1.4 Charge symétrique.

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

Les systèmes directs, inverses et homopolaires des tensions asymétriques du réseau sont représentés graphiquement à la figure 9. La tension de référence est celle du système direct  $U_{0R}'$ . Le déphasage de la tension inverse  $U_{0R}''$  par rapport à la tension de référence est égal à  $\gamma$ . La tension du système homopolaire  $U_{0R}'''$  est déphasée de l'angle  $\delta$  par rapport à  $U_{0R}'$ .

Les équations suivantes peuvent être posées:

$$\text{Système direct de la phase R} \quad U_{0R}' = U_0'$$

$$\text{Système direct de la phase S} \quad U_{0S} = U_0' e^{-j\frac{2\pi}{3}}$$

$$\text{Système direct de la phase T} \quad U_{0T}' = U_0' e^{j\frac{2\pi}{3}}$$

$$\text{Système inverse de la phase R} \quad U_{0R}'' = U_0' e^{j\gamma}$$

$$\text{Système inverse de la phase S} \quad U_{0S}'' = U_0' e^{j(\gamma + \frac{2\pi}{3})}$$

$$\text{Système inverse de la phase T} \quad U_{0T}'' = U_0' e^{j(\gamma - \frac{2\pi}{3})}$$

$$\text{Système homopolaire} \quad U_{0R}''' = U_{0S}''' = U_{0T}''' = U_0' e^{j\delta}$$

Par introduction de ces valeurs pour les tensions dans les équations (4) et (10), on obtient l'erreur sous charge symétrique:

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

Il est intéressant de constater que, dans cette formule les angles  $\varphi$  des impédances  $Z$  ainsi que les angles  $\gamma$  et  $\delta$  entre les tensions directes et inverses, resp. entre les tensions des systèmes homopolaires et directs n'apparaissent pas.

Il en découle que les erreurs sous charge symétrique peuvent être représentées, sous une forme valable en général, par une fonction simple liant entre elles les tensions des systèmes directs, inverses et homopolaires.

Si la charge symétrique branchée en étoile est raccordée au neutre selon la figure 8a, les tensions des systèmes directs

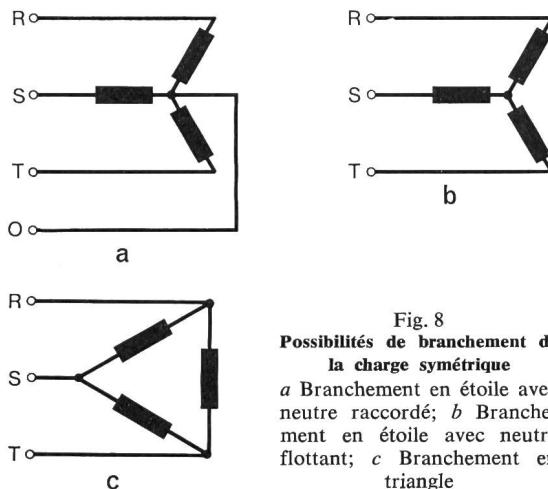


Fig. 8  
Possibilités de branchement de la charge symétrique  
a Branchement en étoile avec neutre raccordé; b Branchement en étoile avec neutre flottant; c Branchement en triangle

inverses et homopolaires sont présentes dans les tensions de phase, donc l'erreur peut être calculée à l'aide de la formule (11). Cependant, si la charge symétrique en étoile n'est pas raccordée au neutre (fig. 8b et 8c), seules les tensions des systèmes directs et inverses sont présentes dans les tensions de phase mais la tension du système homopolaire manque. En effet, les tensions de phase sont proportionnelles aux courants de la charge, mais le courant du neutre ne peut pas s'écouler par le neutre puisqu'il n'est pas raccordé.

La formule d'erreur se réduit alors à:

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

#### 4. Comparaison des formules d'erreur sous charge symétrique

Il ressort des formules (11) et (12) qu'on peut s'attendre à des erreurs plus faibles si le point étoile des charges n'est pas relié au neutre du réseau ou si les charges sont branchées en triangle. Il découle de la formule (11) que l'erreur sous charge symétrique est *toujours négative*. Si la charge est représentée par trois résistances ohmiques, c'est-à-dire si la consommation d'énergie réactive est nulle, le compteur reste à l'arrêt et ne provoque donc pas d'erreur de mesure, même si les tensions ne sont pas absolument symétriques. Une expérience très simple à réaliser le confirme en pratique.

#### 5. Calcul des erreurs sous charge asymétrique

On a démontré au chapitre 3, que les erreurs sous charge *symétrique* peuvent être calculées par décomposition des tensions en leurs composantes symétriques. On a constaté que l'erreur est indépendante de l'angle de déphasage entre le courant et la tension et des angles donnés entre les systèmes directs, inverses et homopolaires.

Ces constatations ne sont cependant plus valables dans le cas d'une charge asymétrique, par exemple dans le cas extrême d'une charge monophasée. On peut bien décomposer un courant monophasé en un système direct, inverse et homopolaire; les composantes vaudront chacune 1/3 du courant total. Mais les trois systèmes sont en phase avec le courant total et la fonction d'angles entre les composantes symétriques dans le courant et la tension n'est plus valable comme c'était le cas sous charge symétrique. L'erreur sous charge monophasée dépend donc du degré de dissymétrie ainsi que de la valeur et des

positions respectives des systèmes directs, inverses et homopoliars dans la tension de phase. Enfin, si la charge asymétrique est formée de composantes ohmiques et inductives, l'erreur comprendra un terme dépendant de la cotangente de l'angle de déphasage des impédances.

### 5.1 Construction d'un triangle de tensions asymétrique à partir de ses composantes symétriques; localisation des sommets et du centre de gravité dans un réseau de coordonnées rectilignes

La figure 9 représente la construction d'un triangle de tensions asymétrique, formé de ses composantes symétriques:

Système direct des tensions de phase

$U'_{0R}$ ,  $U'_{0S}$ ,  $U'_{0T}$

Système inverse des tensions de phase

$U''_{0R}$ ,  $U''_{0S}$ ,  $U''_{0T}$

Système homopolaire des tensions de phase

$U'''_{0R} = U'''_{0S} = U'''_{0T}$

Les grandeurs suivantes sont également données:

Angle entre les systèmes directs et inverses de la tension  $U_{0R}$ :

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

Angle entre les systèmes directs et homopolaires de la tension  $U_{0R}$ :

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

Il ressort de la figure 9 que les angles  $\gamma$  et  $\delta$  sont donnés à partir du système direct vers le système inverse, resp. le système homopolaire. Le sens contraire des aiguilles d'une montre est positif.

A l'aide de ces grandeurs, le triangle des tensions est exactement défini. Cependant, les données se prêtent mal, sous cette forme, au calcul de l'erreur d'un compteur d'énergie réactive.

Pour cette raison, on place le centre d'un réseau de coordonnées rectilignes au point  $T$  du triangle et le point  $S$  sur l'abscisse.

Les équations suivantes sont valables pour le calcul des coordonnées:

$$\operatorname{tg} \varepsilon = \frac{\sin \gamma}{\cos \gamma + \frac{U_0'}{U_0''}} \quad (13)$$

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

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

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

$$y_S = 0$$

$$x_T = 0$$

$$y_T = 0$$

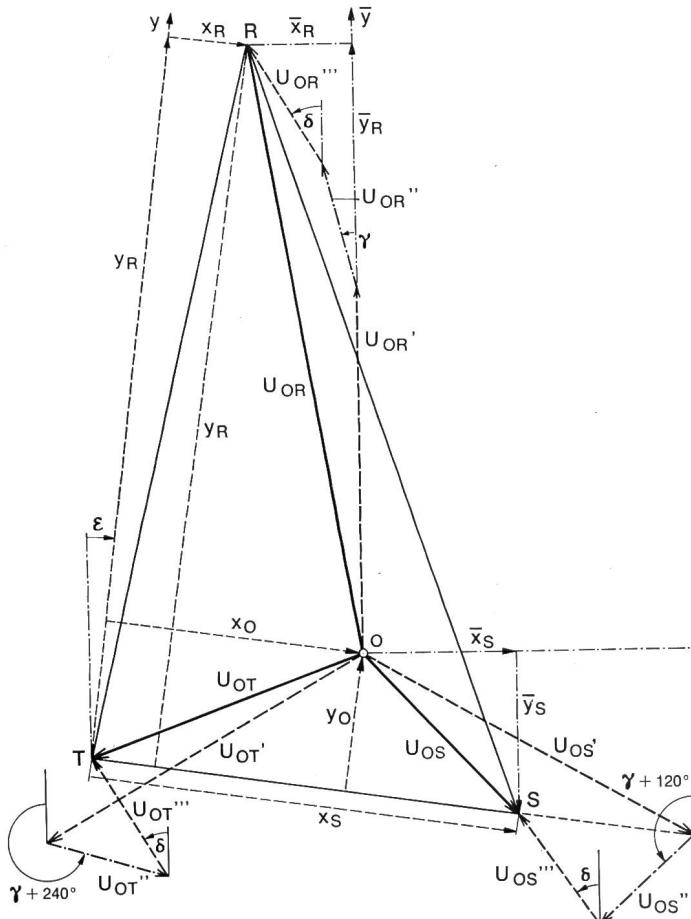


Fig. 9  
Construction d'un triangle de tensions asymétriques à partir de ses composantes symétriques

$R, S, T$  Sommets du triangle de tension;  $x, y$  Système de coordonnées où  $T$  est à l'origine et  $S$  sur l'axe des abscisses;  $\bar{x}, \bar{y}$  Système de coordonnées où  $0$  est à l'origine et  $U'_{0R}$  sur l'axe des ordonnées;  $x_0, y_0$  Coordonnées du point  $0$ ;  $U_0'$  Tension de phase;  $U_0'$  Tension directe;  $U_0''$  Tension inverse;  $U_0'''$  Tension homopolaire;  $\gamma$  angle entre  $U''_{0R}$  et  $U'_{0R}$ ;  $\delta$  angle entre  $U'''_{0R}$  et  $U'_{0R}$

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

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

### 5.2 Charge monophasée dans la phase $R$

Puisqu'une charge asymétrique se compose de trois charges monophasées inégales, examinons tout d'abord le cas de la charge monophasée.

Données: un triangle de tension asymétrique selon la figure 11 et l'impédance de charge:

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

$$\varphi_R = 360^\circ - \arctg \left( \frac{\omega L_R}{R_R} \right)$$

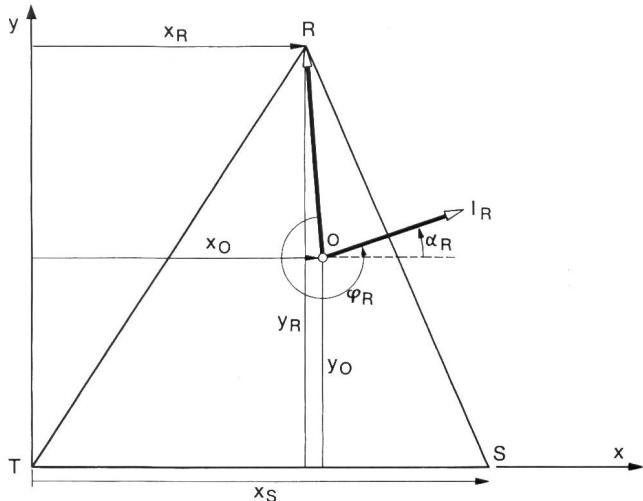


Fig. 10

Triangle de tension asymétrique avec charge dans la phase R  
 $\alpha$  angle entre  $U_{TS}$  et  $I_R$ ;  $I_R$  Courant dans la phase R;  $\phi_R$  Déphasage entre  $U_{0R}$  et  $I_R$

Autres désignations voir à la figure 9 et dans le texte

### Valeur réelle de la charge réactive:

$$P_{\text{bS}_R} = U_{0R} I_R \sin \varphi_R \quad I_R = \frac{U_{0R}}{Z_R} \\ P_{\text{bS}_R} = \frac{(x_R - x_0)^2 + (y_R - y_0)^2}{\sqrt{R_{\text{bS}}^2 + (\omega L_R)^2}} \sin \varphi_R \quad (19)$$

Valeur mesurée par le compteur:

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

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

Erreur:

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

Erreurs calculées de façon analogue pour les autres phases, à l'aide des coordonnées transformées d'après fig. 11 et 12:

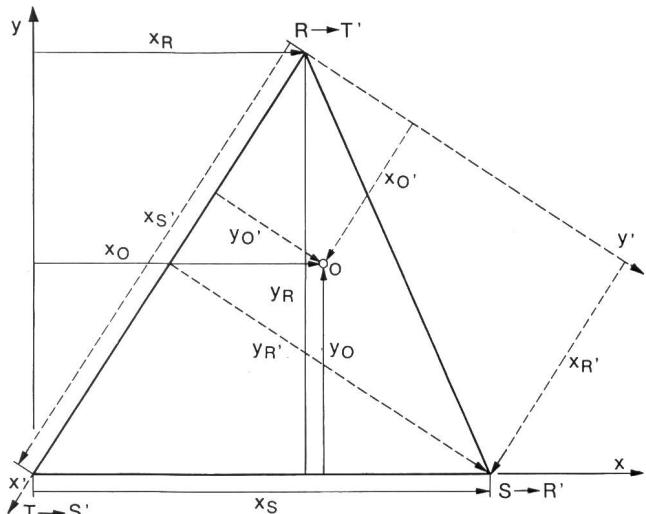


Fig. 11

Fig. 11

Erreur:

$$F_S = \left[ \frac{x_{S'}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{(y_{R'} - y_{0'}) - \operatorname{ctg} \varphi_S (x_{R'} - x_{0'})}{(y_{R'} - y_{0'})^2 + (x_{R'} - x_{0'})^2} - 1 \right] 100 \% \quad (22)$$

Erreur:

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

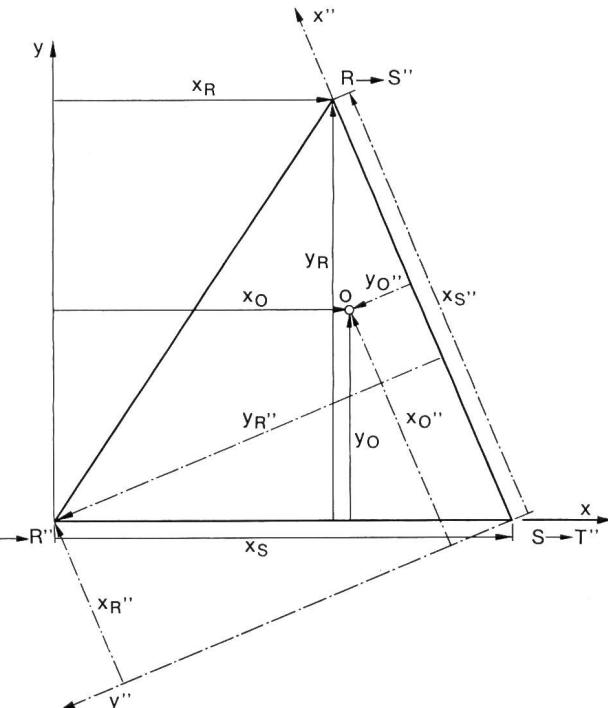


Fig. 12

### 5.3 Charge asymétrique

Si l'on forme une charge triphasée déséquilibrée à partir des trois charges monophasées  $Z_R$ ,  $Z_S$  et  $Z_T$ , l'erreur résultante peut être calculée d'après la formule suivante:

$$F_{\Delta} = \frac{P_{bSR} \frac{F_R \%}{100} + P_{bSS} \frac{F_S \%}{100} + P_{bST} \frac{F_T \%}{100}}{P_{bSR} + P_{bSS} + P_{bST}} 100 \% \quad (24)$$

Pour simplifier le volume de calcul qu'implique la méthode du chapitre 5, les équations (13) à (24) ont été programmées sur ordinateur.

## 6. Calcul des erreurs sous charge monophasée

Les formules d'erreur pour charge réactive monophasée ont déjà servi au chapitre 5 pour le calcul des erreurs sous charge asymétrique. La formule (21) est valable pour l'erreur sous charge monophasée dans la phase  $R$ . Le diagramme vectoriel correspondant est indiqué à la figure 13. Par transformations des équations (19), (20) et (21) on obtient:

### La valeur réelle de la puissance réactive:

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

et la valeur effectivement mesurée par le compteur

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

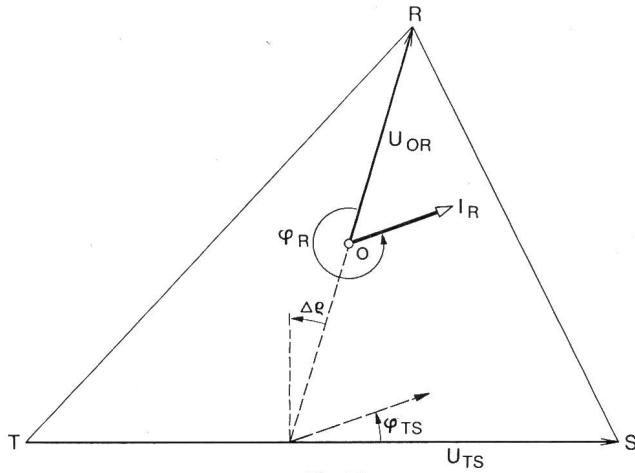


Fig. 13

**Charge monophasée, système de mesure 1**

$U_{0R}$  Tension de phase;  $I_R$  Courant de la phase R;  $\varphi_R$  Déphasage entre  $U_{0R}$  et  $I_R$ ;  $\Delta\varphi$  angle entre la perpendiculaire de  $U_{TS}$  et  $U_{0R}$

et enfin l'erreur:

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

L'erreur sous charge réactive monophasée peut être positive ou négative. Ceci n'était pas le cas pour l'erreur sous charge symétrique ou sous charge réactive relativement peu asymétrique. L'erreur  $F_R$  dépend non seulement de la différence de la tension composée  $U_{TS}/\sqrt{3}$  par rapport à la tension de phase  $U_{0R}$ , mais encore de l'écart d'angle  $\Delta\varphi$  de la tension  $U_{0R}$  par rapport à la perpendiculaire à la tension composée  $U_{TS}$ . Cet écart est proportionnel à la cotangente de l'angle de phase  $\varphi_R$  de la charge. Si la charge consiste en une résistance ohmique, c'est-à-dire si la charge réactive est nulle, le compteur d'énergie réactive en branchement artificiel présentera tout de même des erreurs soit positives, soit négatives, suivant le degré de dissymétrie du triangle des tensions. Ceci n'était pas le cas sous charge active symétrique, selon le chapitre 4.

## 7. Abaque des erreurs

### 7.1 Charge réactive symétrique

L'erreur  $F_\Delta$  en fonction des composantes symétriques de la tension du réseau est donnée par la formule (11). Cette équation peut être transformée en:

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

Si l'on porte en ordonnée dans un système de coordonnées rectilignes le rapport  $U_0'''/U_0'$  et en abscisse le rapport  $U_0''/U_0'$ , les points d'erreurs de même grandeur se trouveront sur des ellipses (fig. 14). Si les impédances symétriques de charge sont branchées en étoile et si le neutre est relié, les erreurs  $F_\Delta$  peuvent être relevées à la figure 14 au point d'intersection de la parallèle à l'axe des abscisses (distance de l'origine  $U_0''/U_0'$ ) et de la parallèle à l'axe des ordonnées (distance de l'origine  $U_0''/U_0'$ ). Si les impédances symétriques de charge sont branchées en étoile mais avec neutre flottant ou branchées en

triangle, l'erreur peut être relevée à la figure 14 au point d'intersection de la parallèle à l'axe des ordonnées (distance de l'origine  $U_0''/U_0'$ ) avec l'axe des abscisses.

### 7.2 Charge réactive asymétrique

Il ressort des formules (19) et (23) que l'erreur sous charge asymétrique, dépend entre autres de la cotangente de l'angle de déphasage  $\varphi$  et des angles  $\gamma$  et  $\delta$  entre les tensions inverses et homopolaires resp. directes. De ce fait, un abaque est plus compliqué à réaliser. Par contre, si l'on suppose une charge réactive relativement peu asymétrique, l'erreur calculée selon la formule (24), chapitre 5, n'est que peu influencée par les angles  $\gamma$  et  $\delta$  si l'on reste dans le domaine de la charge réactive pure à  $\sin \varphi = 1$ .

Les erreurs approximatives sous charge réactive asymétrique calculées à l'ordinateur sont reproduites sous forme d'abaque à la figure 15. Elle représente les différentes conditions des tensions directes, inverses et homopolaires en fonction du degré de dissymétrie des charges  $K_{us}$  pour  $\sin \varphi = 1$ . Le degré de dissymétrie  $K_{us}$ , porté en abscisse, est défini comme suit:

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

$X_0$  valeur maximale de la réactance de charge;  $X_m$  valeur moyenne arithmétique de la réactance de charge;  $X_u$  valeur minimale de la réactance de charge.

Puisque les deux termes  $(U_0''/U_0')^2$  et  $(U_0'''/U_0')^2$  s'additionnent dans la formule d'erreur (11), les influences des composantes symétriques peuvent être considérées séparément.

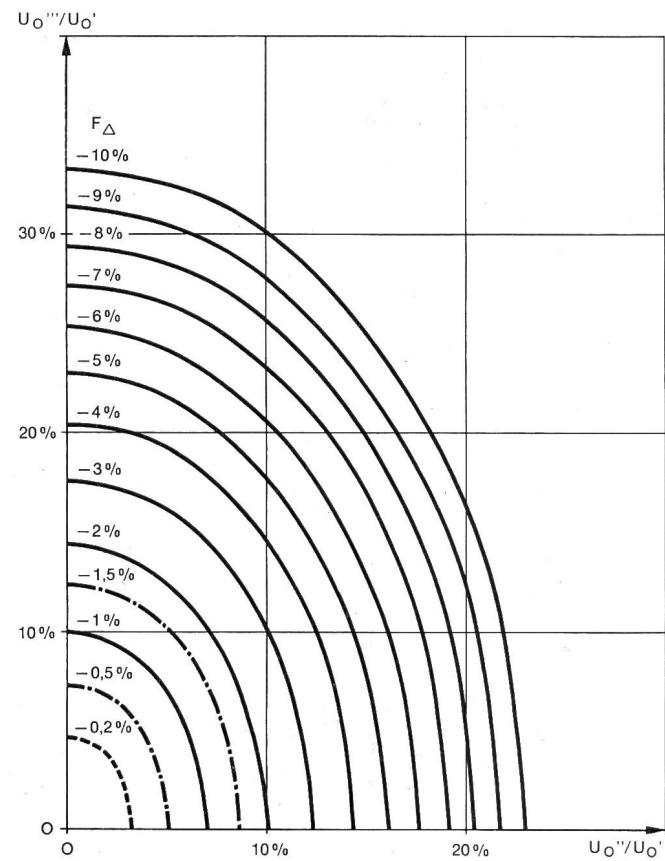


Fig. 14  
Abaque de l'erreur  $F_\Delta$ , sous charge symétrique, en fonction des rapports  $U_0''/U_0'$  et  $U_0'''/U_0'$

Les grandeurs  $(U_0''/U_0')$  et  $(U_0'''/U_0')$  sont portées toutes deux en ordonnées à la figure 15. L'erreur partielle due à la composante  $U_0''/U_0'$  est désignée par  $F_{II}$  et l'erreur partielle due à  $U_0'''/U_0'$  est désignée par  $F_{III}$ . Il est intéressant de constater que les courbes de la figure 15 sont valables tant pour la composante  $U_0''/U_0'$  que pour  $U_0'''/U_0'$  même si le rapport des erreurs partielles  $F_{II}$  et  $F_{III}$  est égal à 2. En effet, dans la formule (11) le terme  $U_0''^2$  est multiplié par le facteur 2 tandis que le terme  $U_0'''^2$  se présente à l'unité.

L'erreur totale se calcule à partir de la somme des erreurs partielles  $F_{II}$  et  $F_{III}$ .

Quelques exemples numériques faciliteront la compréhension :

*Exemple 1:*

$$\begin{aligned} U_0''/U_0' &= 9\% \\ U_0'''/U_0' &= 13\% \end{aligned}$$

a) *Degré de dissymétrie*  $K_{us} = 15\%$ . Selon la fig. 15, les erreurs partielles sont :

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

L'erreur totale est égale à :  $F_{\Delta} = -5,65\%$

b) *Degré de dissymétrie*  $K_{us} = 0$ . Selon la fig. 15, les erreurs partielles sont :

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

L'erreur totale est égale à :  $F_{\Delta} = -3,35\%$

Le cas b) peut également être considéré à l'aide de la fig. 14, car un degré de dissymétrie  $K_{us} = 0$  signifie une charge symétrique.

La figure 14 donne naturellement les mêmes résultats, ce qui peut être contrôlé aisément.

*Exemple 2:*

$$\begin{aligned} U_0''/U_0' &= 15\% \\ U_0'''/U_0' &= 0 \end{aligned}$$

a) *Degré de dissymétrie*  $K_{us} = 5\%$ . Selon la fig. 15, les erreurs partielles sont :

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

L'erreur totale est égale à :  $F_{\Delta} = -5,1\%$

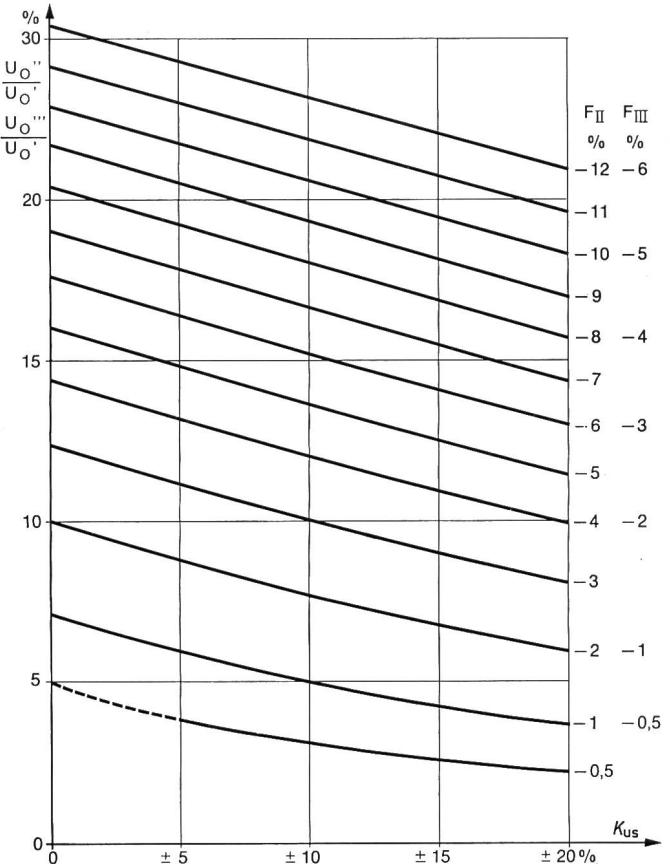


Fig. 15

Abaque des erreurs  $F_{II}$  et  $F_{III}$  sous charge asymétrique, en fonction des rapports  $U_0''/U_0'$  et  $U_0'''/U_0'$

b) *Degré de dissymétrie*  $K_{us} = 0$ . Selon la fig. 15, les erreurs partielles sont :

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

L'erreur totale est égale à :  $F_{\Delta} = -4,4\%$

ce qui peut également être contrôlé à l'aide de la figure 14.

**Adresse de l'auteur:**

F. Tschappu, Dr ès sciences, ingénieur en chef, Landis & Gyr S. A., 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(*Secrétaireat*)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(*Secrétaireat*)224 und 224A eingegangenen Bemerkungen sind im Dokument 12(*Secrétaireat*)227, und die Stellungnahme der WG 1 dazu im Dokument 12(*Secrétaireat*)228 niedergelegt. Die relativen Grössenverhältnisse der Symbole, deren absolute Grösse an sich nicht festgelegt wurde, ist aus dem Dokument 12(*Secrétaireat*)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