

<b>Zeitschrift:</b>	Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
<b>Herausgeber:</b>	Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
<b>Band:</b>	28 (1937)
<b>Heft:</b>	16
<b>Artikel:</b>	Correction de la dissymétrie des tensions ou équilibrage de la charge dans un réseau triphasé à charge déséquilibrée
<b>Autor:</b>	Maret, A.
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-1059858">https://doi.org/10.5169/seals-1059858</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:** 17.02.2026

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

# BULLETIN

## REDAKTION:

Generalsekretariat des Schweiz. Elektrotechn. Vereins und des Verbandes Schweiz. Elektrizitätswerke, Zürich 8, Seefeldstr. 301

## ADMINISTRATION:

Zürich, Stauffacherquai 36 ♦ Telephon 51.742  
Postcheck-Konto VIII 8481

Nachdruck von Text oder Figuren ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit Quellenangabe gestattet

XXVIII. Jahrgang

Nº 16

Mittwoch, 4. August 1937

## Correction de la dissymétrie des tensions ou équilibrage de la charge dans un réseau triphasé à charge déséquilibrée.

Par A. Maret, Baden.

621.3.016.3.025.1 : 621.311.1.025.3

Les réseaux de distribution haute tension sont fréquemment déséquilibrés par des excès de charge monophasée sur certaines phases (four, moteurs de traction, éclairage, etc.).

On calcule pour un cas concret le déséquilibre des tensions. On constate qu'il est tel qu'il devient souvent nécessaire de le corriger.

Les diverses solutions sont passées en revue. La première, partielle, consiste à diminuer le déséquilibre en couplant convenablement le transformateur alimentant le consommateur monophasé, de façon à répartir plus ou moins la charge sur les trois phases. On calcule pour divers couplages courants le déséquilibre obtenu au primaire. Puis, on montre que les nombreuses variantes de couplage proposées se ramènent, au point de vue du déséquilibre primaire, à un ou deux couplages-types et que si l'on se contente de cette solution partielle, le couplage le plus simple et le plus économique, parce que le plus courant, est le couplage étoile-triangle.

Une deuxième solution, meilleure, consiste à corriger les tensions fournies à l'ensemble des consommateurs triphasés, en introduisant en un point convenable des tensions additionnelles dans certaines phases à l'aide de transformateurs de réglage.

Une troisième solution, la seule complète, consiste à équilibrer la charge elle-même, soit par self et condensateur, soit par machines synchrones triphasées. On explique à l'aide de diagrammes, le fonctionnement des deux systèmes; on détermine les puissances nécessaires des appareils en fonction de la charge monophasée à équilibrer; puis, on examine la question du réglage automatique en fonction de cette charge.

Enfin, on fait la critique d'un système compensateur analogue, mais comportant des machines biphasées.

On conclut en indiquant les solutions à choisir.

Tout déséquilibre de charge d'un réseau triphasé se ramenant à un excès de charge monophasée, il suffira de considérer le cas d'un réseau débitant sur un four ou un réseau de traction, en négligeant sa charge triphasée.

Une charge monophasée déforme le triangle des tensions fournies par les centrales, de sorte que même les tensions aux bornes des alternateurs seront déséquilibrées. Ce déséquilibre est transmis avec amplification par les transformateurs-élévateurs et il n'est pas rare de rencontrer des différences de 10 % entre la plus haute et la plus basse des trois tensions composées d'un réseau de distribution haute tension. Nous laisserons de côté la déformation encore plus accentuée que l'on obtient aux bornes de la charge monophasée, pour nous ar-

Die Hochspannungsnetze werden oft durch einen Ueberschuss an einphasiger Belastung einzelner Phasen (elektrische Ofen, Traktionsmotoren, Beleuchtung usw.) unsymmetrisch belastet.

Es wird im folgenden für ein bestimmtes Beispiel die Unsymmetrie der Spannungen berechnet und festgestellt, dass diese oft so gross wird, dass man sie korrigieren muss.

Die verschiedenen Mittel zur Korrektur werden betrachtet. Das erste, teilweise wirkend, besteht darin, dass die Unsymmetrie durch zweckmässige Schaltung des Transformators, welcher das einphasige Anschlussobjekt speist, vermindert wird; solche Schaltungen können die Belastung mehr oder weniger auf die drei Phasen verteilen. Für verschiedene gebräuchliche Schaltungen wird die Unsymmetrie berechnet. Es wird gezeigt, dass sich die zahlreichen Varianten solcher Schaltungen in bezug auf die primäre Unsymmetrie auf eine oder zwei typische Schaltungen zurückführen lassen und dass, wenn man sich mit dieser teilweisen Lösung begnügt, die einfachste und billigste die Stern-Dreieck-Schaltung ist.

Eine zweite, bessere Lösung besteht darin, dass man die Spannungen, welche der Gesamtheit der dreiphasigen Anschlussobjekte geliefert werden, korrigiert, indem man an einem zweckmässigen Netzpunkt in einzelne Phasen mit Hilfe von Reguliertransformatoren Zusatzspannungen induziert.

Eine dritte Lösung, die einzige vollständige, besteht darin, dass die einphasige Last selbst symmetrisch gestaltet wird, sei es durch Drosselspulen und Kondensatoren, sei es durch Dreiphasen-Synchron-Maschinen. Anhand von Diagrammen wird die Wirkungsweise der beiden Systeme erklärt. Es werden die nötigen Leistungen der Hilfsapparate in Funktion der auszugleichenden einphasigen Last bestimmt. Dann wird die Frage der automatischen Regulierung in Funktion dieser Last untersucht.

Schliesslich wird ein ähnliches Ausgleichssystem kritisch betrachtet, das mit Zweiphasenmaschinen arbeitet, und es wird eine kurze Wegleitung zur Wahl des Ausgleichssystems gegeben.

rèter dans la présente note à la dissymétrie provoquée dans le réseau de distribution haute tension, à cause de sa répercussion sur les autres consommateurs. Disons pour préciser, en nous reportant à la fig. 1, que nous considérons le déséquilibre produit ou bien sur les barres haute tension B d'un poste sur lequel débiteront deux centrales A et A' et qui alimente à la fois: 3 lignes de distribution en triphasé 1, 2 et 3; une ligne 4 allant à un poste abaisseur D et une ligne de traction 5; ou bien sur les barres haute tension D du poste abaisseur, lequel alimente à son tour un gros four monophasé d'une usine d'électrochimie et diverses lignes triphasées. Par contre, nous ne nous occuperons pas du déséquilibre obtenu en C ou en E sur le côté basse tension aux bornes de la charge monophasée elle-même, car celui-ci, quo-

qu'accentué encore par la chute de tension dans les transformateurs-abaisseurs, n'intéresse guère que des services triphasés locaux (services auxiliaires, etc.), mais non point l'ensemble des abonnés du réseau.

Considérons tout d'abord sous quelle forme se transmet au réseau une charge monophasée. On l'y rattache généralement par l'intermédiaire d'un transformateur triphasé afin de la répartir au mieux sur les 3 phases. On la branche de préférence entre deux phases du secondaire plutôt qu'entre une phase

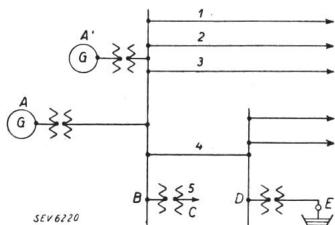


Fig. 1.

et le neutre, mais quel que soit le couplage du transformateur, on retrouve nécessairement au primaire la charge monophasée du secondaire, soit transformée en deux charges monophasées superposées réparties par exemple sur les phases  $RS$  et  $ST$  (cas des couplages triangle/étoile et étoile/zig-zag); soit simplement transmises telles quelles dans les phases correspondantes (cas des couplages étoile/étoile et triangle/zig-zag).

On sait en effet qu'aucun couplage de transformateur ne peut, par simple translation, changer le décalage réciproque de deux vecteurs (qui est, par définition, de  $180^\circ$ ); condition pourtant nécessaire pour créer une charge triphasée. Il faut pour cela une machine tournante ou un système additionnel de selfs et de capacité. Tout au plus, pourra-t-on décomposer ce système de deux vecteurs en deux systèmes de demi-amplitude chargeant l'un les phases  $RS$  par exemple, et l'autre les phases  $ST$  et se superposant dans l'une des 3 phases de façon à y donner un courant double (le rapport du nombre de spires primaires et secondaires dans chaque colonne étant admis égal à 1).

Non seulement d'ailleurs la grandeur des courants ainsi obtenus, mais leur décalage par rapport aux tensions correspondantes des alternateurs, est inégal dans les 3 phases, ce qui signifie qu'une phase débite sur le réseau de la puissance réactive, qui lui est restituée par les autres ou l'une d'elles. Il y a échange d'énergie interne. Cela tient au caractère même de l'énergie monophasée consommée, laquelle est pulsatoire, et de l'énergie triphasée à disposition, laquelle est constante. Pour faire de l'énergie pulsatoire avec de l'énergie constante, il faudrait que le transformateur fût un réservoir d'énergie, au moins magnétique, c'est-à-dire qu'il faudrait lui donner un très gros entrefer, en faire une self avec consommation de puissance réactive. Bref, on sait depuis longtemps que le problème de la transformation du monophasé en triphasé est insoluble en principe; seule une conversion par machine tournante est possible. La transformation n'est qu'un pis-aller.

Il circulera donc dans les alternateurs des courants monophasés qui provoqueront dans les 3 phases des chutes de tension décalées entre elles de  $180^\circ$ . Comme elles se retranchent d'un système triphasé de forces électromotrices induites décalées entre elles de  $120^\circ$ , il est clair que le triangle des tensions résultant aux bornes des alternateurs ne pourra plus être symétrique.

Pour préciser la valeur de la dissymétrie, considérons un exemple. Soit une centrale hydraulique  $A$  alimentant les barres  $B$  (voir fig. 2); en  $C$  est rattaché, entre les phases  $R'$  et  $S'$ , un four monophasé, par l'intermédiaire d'un transformateur couplé en triangle/étoile.

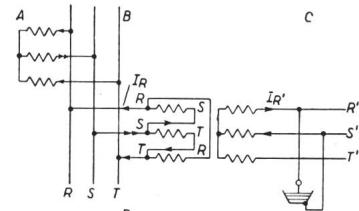
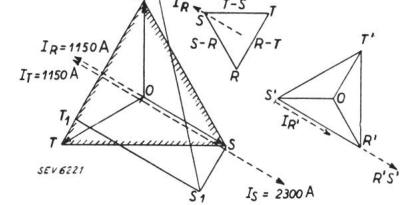


Fig. 2.



On veut connaître la dissymétrie en  $B$ . La centrale a une puissance de 1000 kVA; le four, de 500 kW sous  $\cos \varphi = 1$  et 250 V. Rapportons les calculs à la tension secondaire composée de 250 V. Le courant du four soit 2000 A, se retrouve dans les enroulements des phases correspondantes primaires, mais transformé dans le rapport inverse du nombre de spires, c'est-à-dire devient  $\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot 2000 = 1150$  A. Dans le fil d'amenée commun aux deux phases par suite du couplage triangle, soit  $S$ , les deux courants s'ajoutent. La phase  $S$  de l'alternateur débite donc un courant de 2300 A, qui fait retour par les phases  $S$  et  $T$  à raison de 1150 A par phase.

Les directions des courants ressortent des diagrammes de la fig. 2. Soient  $OR$ ,  $OS$ ,  $OT$ , les tensions induites dans l'alternateur, ou, ce qui revient au même, les tensions à vide aux bornes de l'alternateur ou aux barres  $B$ . Comme nous l'avons dit au début, nous pouvons négliger la charge triphasée, car elle n'aurait pour effet que de faire tourner et éventuellement de réduire le triangle des tensions aux bornes tout en le laissant symétrique; nous pouvons donc aussi admettre que le triangle des tensions  $RST$  est le triangle symétrique obtenu finalement en  $B$ , et qu'il importe de maintenir ou de rétablir. C'est donc la déformation de ce triangle que nous voulons déterminer.

Les tensions appliquées aux 3 colonnes de l'enroulement triangle sont  $SR$ ,  $TS$  et  $RT$ ; les tensions obtenues aux 3 colonnes de l'enroulement secondaire en étoile sont:  $OR'$ ,  $OS'$ ,  $OT'$ . La charge monophasée étant branchée entre les phases  $R'$  et  $S'$ , le courant dans la phase  $R'$ , soit  $I_{R'}$ , sera en phase avec la tension  $R'S'$  (car on a admis  $\cos \varphi = 1$ ). La direction est donc connue. Le courant dans la colonne primaire correspondante  $R$  aura une direction op-

posée soit  $I_R$ . La direction  $I_R$  étant connue, on en déduit immédiatement celle de  $I_S$  et de  $I_T$ .

On pouvait d'ailleurs prévoir que ce serait la tension de la phase ayant le courant double, soit la phase génératrice  $OS$ , qui imposerait la direction du courant.

Les chutes de tension provoquées dans chacune des phases de l'alternateur par ces courants peuvent être considérées pratiquement comme purement inductives, la résistance de l'enroulement du stator pouvant être négligée par rapport à sa réactance. Ces chutes de tension seront donc déphasées de  $90^\circ$  en arrière par rapport aux trois courants  $I_R$ ,  $I_S$ ,  $I_T$ .

La grandeur de ces chutes de tension, soit  $\Delta U$ , est égale à  $I \cdot x$ , où  $x$  = réactance de court-circuit d'une phase de l'alternateur. Celle-ci est approximativement égale à  $\frac{U^2}{k \cdot P}$ , où

$U$  = tension composée en kV,

$P$  = puissance de l'alternateur en MVA,

$k$  = facteur de court-circuit permanent,

$$x_{ph} = \frac{0,25^2}{3 \cdot 1} = 0,0208 \text{ ohm},$$

$$\Delta U_R = R R_1 = 1150 \cdot 0,0208 = 24 \text{ V},$$

$$\Delta U_S = S S_1 = 2300 \cdot 0,0208 = 48 \text{ V},$$

$$\Delta U_T = T T_1 = 24 \text{ V}.$$

On obtient donc le triangle déformé  $R_1 S_1 T_1$  que l'on cherchait. Les 3 tensions  $R_1 S_1$ ,  $S_1 T_1$ ,  $T_1 R_1$ , sont, rapportées à 250 V, de 293 V, 222 V et 250 V.

Le déséquilibre sera de  $\frac{293 - 222}{250} = 28,5\%$ .

On a choisi à dessein une centrale de faible puissance par rapport au four afin de rendre plus apparente la déformation du triangle. Si l'on répète ces calculs dans le cas d'une centrale hydraulique de 5000 kVA, d'un four de 500 kW, 250 V,  $\cos \varphi = 1$ , et pour divers couplages du transformateur, le rapport de transformation étant tel que l'on ait au primaire la même tension composée de 250 V, on obtient le tableau I.

taines colonnes l'enroulement sans courant), se ramènent, en ce qui concerne la répartition des courants sur l'alternateur ou en d'autres termes le déséquilibre des tensions primaires (abstraction faite soit de l'économie réalisée, soit d'un meilleur équilibre interne), à l'un des couplages du tableau ci-dessus. Nous citerons les quelques exemples suivants.

Si l'on construit le diagramme des courants et des tensions, on voit de suite que le couplage de la fig. 3 est équivalent au couplage triangle/étoile.

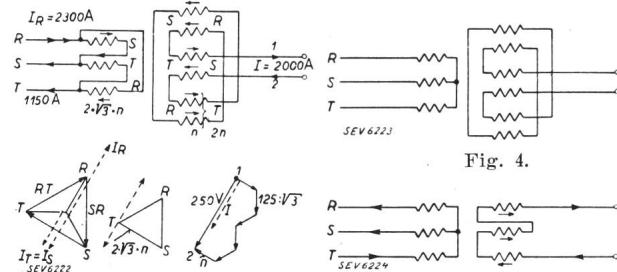


Fig. 4.

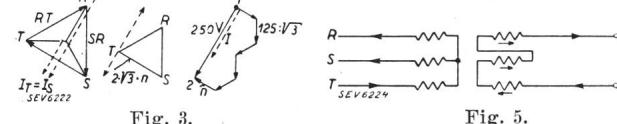


Fig. 3.

Fig. 5.

On peut se convaincre de même que le couplage de la fig. 4 est équivalent au couplage étoile/étoile.

Avec le couplage de la fig. 5, les deux conditions élémentaires, à savoir:

- la somme des courants des 3 phases au primaire doit être nulle,
  - les ampères-tours primaires et secondaires doivent se compenser,
- ne peuvent être remplies qu'aux dépens de l'équilibre des flux.

En effet, la condition a) demanderait que le cou-

Tableau I.

Coupelage du transformateur	Charge entre	Courant du four A	Courant de l'alternateur dans les phases						Tension aux bornes de l'alternateur entre les phases			Déséquilibre %
			I <sub>R</sub>		I <sub>S</sub>		I <sub>T</sub>		R	S	T	
			Grandeur A	φ degrés	Grandeur A	φ degrés	Grandeur A	φ degrés	V	V	V	
$\Delta/\Delta$ (A <sub>1</sub> )	2 ph. ph. et n.	2000	2000	-150°	2000	+30°	—	—	251	257	243	5,6
$\Delta/\Delta$ (A <sub>3</sub> )	2 ph. ph. et n.	3460	2300	-180°	1150	+120°	1150	-120°	258	250	243	6
$\Delta/\Delta$ (C <sub>1</sub> )	2 ph. ph. et n.	2000	1150	+60°	2300	0°	1150	-60°	258	243	250	6
$\Delta/\Delta$ (C <sub>3</sub> )	2 ph. ph. et n.	3460	2000	+30°	2000	-30°	—	—	250	242	258	6,4
			1150	+60°	2300	0°	1150	-60°	258	243	250	6
			2000	+30°	2000	-30°	—	—	250	242	258	6,4

On voit par ce tableau que la répartition du courant monophasé sur les 3 phases (triangle/étoile), quoiqu'apparemment plus favorable que la simple translation sur deux phases (étoile/étoile), ne donne pas un meilleur équilibre de tension dans le cas présent.

On peut démontrer facilement que tous les couplages spéciaux de transformateurs qui ont été proposés pour le rattachement d'une charge monophasée à un réseau triphasé, et qui ont pour but d'équilibrer la charge au primaire et de réduire les dimensions du transformateur (ou au moins de diminuer la quantité de cuivre en supprimant sur cer-

rant primaire de la phase  $T$  soit le double de celui des phases  $R$  et  $S$  et la condition b), qu'elle soit égale (au rapport de transformation près) au courant secondaire  $T$ , c'est-à-dire au courant des deux autres phases. Il y a donc contradiction. En réalité, une partie du flux des phases  $R$  et  $S$  va se fermer par le noyau  $T$ , et une partie se disperse dans l'air. La colonne  $T$  est fortement saturée. Les trois tensions sont inégales. Le transformateur représente pour le réseau une forte self et absorbe un courant magnétisant élevé dans la phase  $T$  de façon à réaliser l'équilibre des ampères-tours. Le diagramme des tensions sera fortement déformé.

Au point de vue répartition des courants de charge au primaire, ce couplage n'est pas supérieur au couplage étoile/triangle. Il n'est donc pas avantageux.

Si l'on couple au primaire en triangle (fig. 6), la condition *a*) est remplie sans contredire *b*) mais la dispersion subsiste, le noyau *T* reste fortement saturé, l'équilibre interne est mauvais. Quant à la répartition du courant, elle est identique à celle que donne le couplage étoile/étoile. En effet, si l'on rapporte comme précédemment les calculs à 250 V,

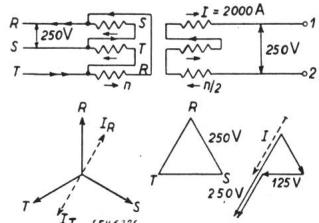


Fig. 6.

on voit dans le diagramme des tensions que le rapport des ampères-tours secondaires et primaires par colonne est de 2 à 1. Le courant primaire est donc de 1000 A par colonne pour une charge secondaire

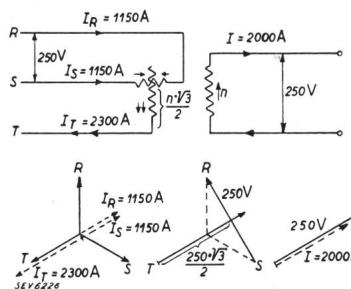


Fig. 7.

de 2000 A et les courants dans les phases *R* et *T* du réseau, de 2000 A.

Enfin, le couplage de la fig. 7 est équivalent au point de vue des courants au couplage triangle-étoile, comme on le voit par le schéma et le diagramme. Par contre, il permet, par rapport au couplage triangle/étoile, une notable économie de cuivre.

*En résumé, il ressort de ce qui précède que le couplage le plus commode et le plus courant, parce que normal, sera le couplage triangle/étoile ou étoile/triangle, si l'on ne considère que le déséquilibre des tensions au primaire obtenu par la répartition de la charge monophasée.* (Bien entendu si au secondaire on a d'autres consommateurs en parallèle avec la charge monophasée et que par conséquent le déséquilibre secondaire doive être minimum, on aura parfois avantage à choisir le couplage étoile/zigzag, qui permet d'ailleurs d'avoir le neutre à disposition. Le seul inconvénient en est la moins bonne utilisation du cuivre au secondaire. Le couplage triangle/zigzag, plus favorable au primaire s'il s'agit d'une haute tension, donne une moins bonne répartition des courants sur l'alternateur.)

Les conclusions que l'on peut tirer du tableau I peuvent donc être généralisées pour tout couplage du transformateur de rattachement et l'on voit que pour une charge monophasée de 10 % seulement

de la puissance du réseau sous un  $\cos \varphi$  optimum égal à l'unité, le déséquilibre des tensions atteint déjà une valeur considérable. Il croît encore pour des valeurs usuelles du  $\cos \varphi$  de 0,9 ou 0,8 et on peut tabler dans des cas analogues sur au moins 6 à 7 %. Il n'est pas rare de rencontrer des déséquilibres de 10 et même 15 %, surtout lorsque le réseau triphasé alimente un réseau de traction local présentant de forts à-coups dus au démarrage des automotrices. Si l'on tient compte en outre que la charge monophasée est variable en grandeur et qu'elle peut être commutée en régime sur n'importe quelles phases, on voit qu'il faut s'attendre dans les réseaux triphasés à charge monophasée à des déséquilibres de tension inadmissibles que l'on ne peut pas réduire à une valeur acceptable par simple choix du couplage du transformateur de rattachement. Il est nécessaire d'y remédier d'une autre façon.

On a le choix entre deux méthodes: ou bien on corrige la déformation du triangle à l'aide de tensions additionnelles de direction et de grandeur convenables, ou bien on équilibre la charge elle-même.

#### A. Correction de la déformation du triangle des tensions.

On insère, en tête du ou des départs à corriger, des transformateurs de réglage introduisant dans les phases convenables les tensions additionnelles nécessaires au rétablissement de la symétrie (voir fig. 8).

Il n'est pas nécessaire de ramener le triangle à coïncider en direction avec le triangle originel, il suffit aux consommateurs d'avoir à disposition 3 tensions composées égales et constantes.

Il est facile de régler séparément 3 tensions de phase, car la variation de l'une n'influe pas sur les autres. Il n'en est pas de même des tensions composées; toute modification de l'une d'elles entraîne la modification d'au moins une des autres, de sorte

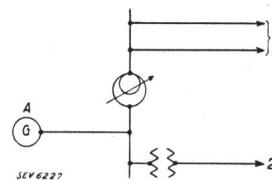


Fig. 8.

qu'il y a danger de pompage, c'est-à-dire d'influence réciproque fâcheuse lorsque trois organes règlent séparément les trois tensions. Il faut donc un système de réglage spécialement prévu pour éviter le pompage. Ce système a été exposé en détail dans la Revue BBC de juin 1936, pages 167—168, et résumé dans le Bulletin de l'ASE 1936, No. 21, p. 602, de sorte qu'il est superflu de s'y étendre. On se contentera d'en rappeler brièvement le principe:

Les trois tensions composées sont réglées séparément par trois transformateurs de réglage 1, 2 et 3 (voir fig. 9) commandés chacun automatiquement par un régulateur qui influence une des trois tensions composées  $R''S$ ,  $T''R'$ ,  $ST'$ . Ces transformateurs introduisent les tensions additionnelles  $RR'$ ,  $R'R''$  et  $TT'$  dans deux des trois phases de façon à ne déplacer que deux des trois sommets du triangle des tensions.

Le régulateur 2, en réglant  $T'R''$  par l'introduction de  $R'R''$ , ne touche pas à la grandeur de la tension  $R'S$  réglée par  $I_1$ , car pratiquement la perpendiculaire  $R'R''$  sur  $R'S$  se confond avec l'arc de cercle  $R'R''$  décrit du centre  $S$  avec  $SR'$  comme rayon, c'est-à-dire que le point  $R'$  peut se déplacer sur  $R'R''$  sous l'effet de 2 sans que la grandeur de la tension  $SR'$  réglée par  $I_1$  soit par là modifiée.

De même, le régulateur 2 ne touche pas à la tension réglée par 3.

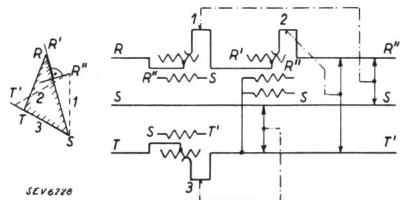


Fig. 9.

Ce réglage dans deux phases seulement empêche le pompage, c'est-à-dire l'intervention intempestive des régulateurs des phases à tension correcte (ce que n'éviterait pas le réglage dans 3 phases).

Cette solution permet non seulement de rétablir la symétrie des tensions, mais de les régler à une valeur constante. La puissance propre de chacun de ces transformateurs de réglage est donnée par la tension additionnelle qu'il fournit et le courant de la charge qui le traverse; elle est, pour un déséquilibre libre à compenser de 10 %, de 7 à 10 % de la charge transmise. Leur excitation peut être assurée soit par un enroulement simple alimenté par une tension composée (transformateurs 1 et 3), soit par un enroulement double alimenté par deux tensions composées (transformateur 2) donnant la direction résultante désirée ( $R'R''$ ); ce que l'on peut aussi réaliser, si l'on a le neutre à disposition, par un enroulement d'excitation simple alimenté par une tension de phase.

Cette solution n'est toutefois applicable que lorsqu'on peut rassembler toutes les lignes dont la tension est à corriger de façon à disposer le système de réglage en tête de celles-ci. La disposition générale de la centrale ou du poste est donc déterminante.

En outre, cette correction des lignes laisse subsister en entier le déséquilibre des alternateurs, il y a surcharge de certaines phases, moins bonne utilisation des machines, chute du rendement, apparition d'harmoniques, échauffement du rotor par les courants de fréquence double et du stator par les courants de fréquence triple, etc. Si le déséquilibre est important, par exemple s'il provient d'un réseau de traction, il devient nécessaire d'avoir recours à une autre solution. Elle consiste à équilibrer la charge elle-même. C'est là la seule solution complète du problème.

## B. Equilibrage d'une charge monophasée.

On peut le réaliser en raccordant au réseau, parallèlement à la charge, a) ou bien une bobine de self et une batterie de condensateurs, b) et c) ou bien des machines synchrones. On saisira aisément le principe de cette solution si l'on recourt au mode de décomposition, connu depuis longtemps, d'une charge monophasée, que nous rappelons brièvement ici:

Considérons le diagramme d'une charge monophasée purement ohmique (voir fig. 10); soient  $U_R$   $U_S$   $U_T$  les trois tensions du réseau (centrale) et  $I_R$   $I_S$  les courants de la charge monophasée. Ce système de courants  $I_R$   $I_S$  représente un système dissymétrique pour le réseau triphasé. Or, tout système de vecteurs dissymétrique par exemple  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  peut, comme on sait, être décomposé selon la méthode connue de Fortescue en trois systèmes triphasés: direct, inverse et homopolaire. Le système direct est un système sy-

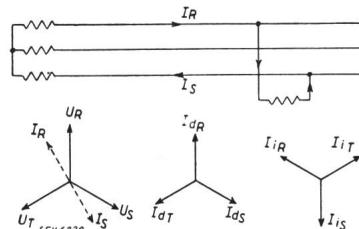


Fig. 10.

métrique étoilé tournant dans le même sens que les tensions étoilées aux bornes de l'alternateur (par ex.  $I_{dR}$   $I_{dS}$   $I_{dT}$ ). Son amplitude est donnée en fonction des vecteurs du système dissymétrique, par la somme géométrique  $\frac{1}{3} \cdot (A_1 + a \cdot A_2 + a^2 \cdot A_3)$  où  $a$  et  $a^2$  sont des opérateurs rationnels qui, mis devant un vecteur  $A_2$ ,  $A_3$ , signifient un nouveau vecteur décalé de  $120^\circ$  et de  $240^\circ$  dans le sens direct par rapport à  $A_2$  et  $A_3$ .

Le système inverse est également un système symétrique étoilé mais tournant dans le sens inverse du précédent (par ex.  $I_{iR}$   $I_{iS}$   $I_{iT}$ ), son amplitude est  $\frac{1}{3} \cdot (A_1 + a^2 \cdot A_2 + a \cdot A_3)$ .

Le système homopolaire est un système symétrique comme les précédents, mais dont les 3 vecteurs par contre sont en phase entre eux, c'est-à-dire atteignent simultanément leurs amplitudes maxima, d'où le nom de système homopolaire, par ex.  $I_{mR}$   $I_{mS}$   $I_{mT}$ . Leur amplitude est donnée par  $\frac{1}{3} \cdot (A_1 + A_2 + A_3)$ .

On peut se convaincre facilement, en partant d'un système de 3 vecteurs et en construisant les 3 systèmes symétriques définis ci-dessus, que la somme géométrique de ces

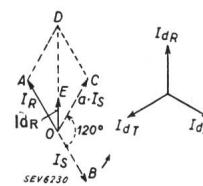


Fig. 11.

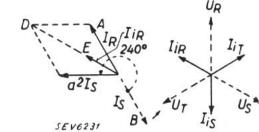


Fig. 12.

derniers donne effectivement les 3 vecteurs originels  $A_1$   $A_2$   $A_3$ .

Si l'on applique cette méthode de décomposition au cas particulier du système de vecteurs dissymétrique  $I_R$   $I_S$  représenté par la fig. 11, on trouve le système direct  $I_d$  donné par la fig. 11, et le système inverse  $I_i$  donné par la fig. 12. On a vu que  $I_{dR}$  est donné par:

$$I_{dR} = \frac{1}{3} (I_R + a \cdot I_S). \text{ Soit:}$$

$$OA = I_R$$

$$OB = I_S$$

$$OC = a \cdot I_S$$

$$OD = (I_R + a \cdot I_S) = \sqrt{3} \cdot I_R$$

$$OE = \frac{1}{3} (I_R + a \cdot I_S) = \frac{I_R}{\sqrt{3}} = I_{dR}$$

$I_{ds}$  et  $I_{dt}$  se déduisent immédiatement une fois la direction de  $I_{dR}$  connue. En procédant de même pour trouver le système inverse, on obtient la fig. 12.

Quant au système homopolaire, il est:

$$I_m = \frac{1}{3} (I_R + I_S) = 0.$$

$I_{iR}$  est décalé de  $60^\circ$  en avant par rapport à  $I_{dR}$ . On voit que le système des courants directs est en phase avec les tensions de l'alternateur. Il repré-

sente donc pour l'alternateur une charge ohmique symétrique. Quant aux courants inverses, ils sont décalés de telle sorte par rapport aux tensions du réseau correspondantes, qu'ils représentent seulement un échange d'énergie entre les diverses phases (voir fig. 12), les phases *R* et *S* travaillant en génératrices et la phase *T* en moteur. En outre, il y a échange de puissance réactive entre les phases *R* et *S*, la phase *R* débitant du courant capacitif absorbé par la phase *S*. L'ensemble du système inverse ne représente pas une consommation d'énergie pour le réseau. Les courants inverses peuvent donc être considérés pour le réseau comme des courants réactifs.

Tout le problème se ramène à produire dans un ou plusieurs appareils additionnels un système symétrique de courants inverses opposé à celui qui provient de la charge monophasée, pour que l'alternateur n'ait plus à fournir celui-ci et n'ait à débiter que la charge triphasée symétrique.

Ces courants inverses circuleront automatiquement dans un système d'appareils dont «l'impédance inverse» résultante triphasée, c'est-à-dire l'impédance inverse par rapport au réseau triphasé, sera nulle.

a) Considérons le cas de la bobine de self et de la batterie de condensateurs. L'impédance inverse d'une capacité ou d'une self est égale à son impédance directe. Or, l'impédance directe triphasée par rapport au réseau d'un ensemble constitué par une capacité branchée par exemple entre les phases *S* et *T* et une self entre les phases *T* et *R* sera nulle lorsque la capacitance de l'une est égale à l'inductance de l'autre, autrement dit lorsque leurs puissances sont égales. Cette puissance sera, en kVA, égale à  $1/\sqrt{3}$  fois la charge monophasée, puisque, comme on l'a vu, la valeur du courant inverse est de  $1/\sqrt{3}$  fois le courant monophasé.

On vérifie facilement en effet, en construisant les diagrammes des courants circulant dans une self et une batterie de cette puissance et en les comparant, que le diagramme résultant correspond pré-

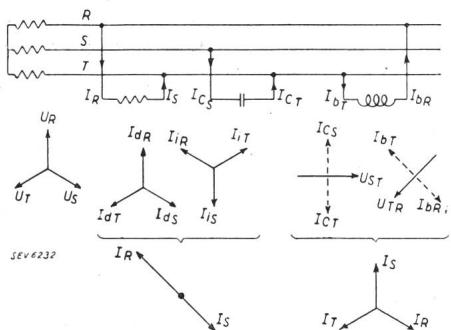


Fig. 13.

cisément à celui des courants inverses provenant d'une charge branchée entre *R* et *S* (voir fig. 13), et lui est opposé. Ce système de courants neutralise le système inverse de la charge  $I_{iR} \dots$  et l'alternateur ne fournit plus que le système symétrique direct  $I_{dR} \dots$ .

Si la charge monophasée varie en grandeur, il faudra, pour qu'un système de courants inverses

n'apparaisse pas dans l'alternateur, modifier en conséquence la puissance de la batterie et de la self, ce que l'on peut faire par exemple à l'aide de prises et d'un commutateur.

Si la charge, au lieu d'être purement ohmique, a un  $\cos \varphi$  de 0,9 par exemple, le système des courants inverses se décalera du même angle  $\varphi$ . Il faudra par conséquent modifier le rattachement du

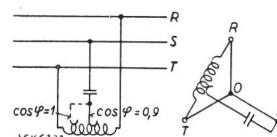


Fig. 14.

système, par exemple de la capacité. On munit la self de prises auxiliaires et on y rattache, également par commutateur, la capacité, selon le schéma de la fig. 14. A  $\cos \varphi = 1$ , la capacité reçoit la tension  $ST$ . A  $\cos \varphi = 0,9$  le point de raccordement est à peu près au milieu de la self, la capacité reçoit une tension  $ST \frac{\sqrt{3}}{2}$ .

On se convaincrait facilement, en construisant les diagrammes des courants comme ci-haut (fig. 13) que le système de courants obtenu dans l'ensemble ainsi rattaché correspond assez exactement au nouveau système de courants inverses. A toute valeur du  $\cos \varphi$  de la charge correspond un point de raccordement à choisir sur la self.

On peut, de cette manière, rétablir à tout instant, par simple manœuvre des commutateurs, la symétrie de la charge du générateur, lorsque la grandeur et le  $\cos \varphi$  de la charge monophasée varient en régime.

Toutefois un équilibrage automatique devient compliqué et coûteux.

D'ailleurs, l'équilibre n'est réalisé parfaitement que lorsque le  $\cos \varphi$  de la charge monophasée est peu différent de l'unité. Lorsqu'on déplace le point de raccordement de la batterie sur la self, la tension appliquée à la batterie décroît en effet et le système de courants absorbé par l'ensemble n'est plus exactement symétrique.

b) L'équilibrage *automatique* de la charge se fait de préférence à l'aide d'une machine synchrone entraînée par moteur et raccordée sur le réseau. C'est la solution adoptée en Amérique. L'équilibrage est parfait pour toutes les valeurs de la charge et de son  $\cos \varphi$ .

Le problème consiste à annuler l'impédance inverse de cette machine afin qu'elle absorbe un système de courants inverses opposé à celui de la charge.

Comme nous pouvons négliger la résistance, nous parlerons plutôt de réactance inverse. La réactance inverse d'une machine synchrone est la réactance que cette machine opposerait à la circulation de courants inverses venant du réseau. Elle est donnée par la réactance de dispersion. La machine n'est en effet pas un générateur pour ces courants (qui sont à considérer comme produits par la charge monophasée elle-même), mais bien plutôt une bobine

de self. (La réaction d'induit ne saurait intervenir puisqu'elle ne joue un rôle que pour les courants engendrés par la roue polaire elle-même.)

On pourrait annuler cette réactance inverse en couplant en série avec la machine une batterie de capacitance égale (voir fig. 15). Mais ce système conduit facilement, lors de l'enclenchement, à des oscillations à basse fréquence et par suite, à des phénomènes de ferro-résonance, se traduisant par une élévation de tension inadmissible aux bornes de la batterie.

c) On recourra donc de préférence à la solution suivante (fig. 16) : On branche sur le réseau un moteur synchrone qui entraîne une machine triphasée connectée en série avec lui et dont on intervertis deux phases. Cette machine tourne donc électriquement en sens inverse du réseau, et son système direct sera identique au système inverse du réseau. Elle est donc, de par le simple fait de son rattachement, parcourue par le système de courants inverses.

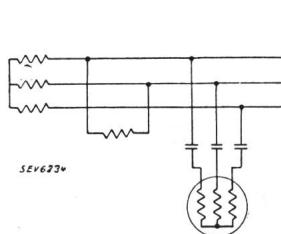


Fig. 15 (en haut).

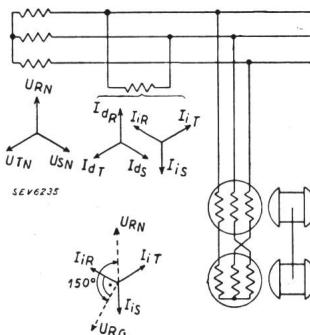


Fig. 16 (à droite).

La machine doit *absorber*, comme dans le cas de la combinaison self-batterie, un système de courants inverses  $-I_{iR}$ ,  $-I_{iS}$ ,  $-I_{iT}$  égal et opposé au système de courants inverses de la charge monophasée; ou si l'on veut, on peut considérer, pour simplifier, la machine comme une génératrice et dire qu'elle doit *fournir* au réseau le système  $+I_{iR}$ ,  $+I_{iS}$ ,  $+I_{iT}$ .

Au point de vue physique, on peut exprimer le fonctionnement du groupe en disant qu'une phase prend au réseau une certaine énergie (phase motrice *T*) que les deux autres lui restituent (phases génératrices *R* et *S*).

On a vu plus haut que les courants inverses sont à considérer comme des courants réactifs (abstraction faite naturellement des pertes  $I^2 \cdot r$  qu'ils causent). Ils sont donc fonction de l'excitation de la génératrice. Si cette excitation est telle qu'elle suffise tout juste à vaincre la chute de tension produite par le courant inverse dans le stator du moteur, qui est en série, il n'apparaîtra pas de tension inverse aux bornes du système et aucun courant inverse ne pourra circuler dans les alternateurs des centrales. Les tensions qui produisent ces courants dans la génératrice devront être décalées de  $90^\circ$  en avant par rapport à eux (abstraction faite des pertes). On voit par là, et si l'on se rapporte au cas de la fig. 16 où la charge est raccordée entre les phases *R* et *S* et où les phases *S* et *T* du générateur sont intervertis, que la tension induite dans la phase *R*, soit  $U_{RG}$  doit être décalée de  $150^\circ$  en avant par rapport à la tension du réseau  $U_{RN}$ . Autrement dit, il faudra décaler la roue polaire de la génératrice de  $150^\circ$  électriques en avant par rapport à celle du moteur. Ce décalage varie suivant les phases du réseau entre lesquelles la charge monophasée est rattachée et suivant les phases du générateur intervertis.

Les deux machines se dimensionnent de la façon suivante: le moteur est parcouru par le courant inverse de la charge monophasée  $= I_m / \sqrt{3}$  (où  $I_m$  désigne le courant de la charge monophasée); à ses bornes est appliquée la pleine tension du réseau; sa puissance est donc égale à  $I_m / \sqrt{3} \cdot U \cdot \sqrt{3} = I_m \cdot U$ . La puissance du moteur est donc égale à celle de la charge monophasée.

La génératrice est parcourue également par le courant inverse  $I_m / \sqrt{3}$  et doit fournir une tension égale à la chute de tension provoquée par le courant inverse à travers l'impédance inverse du moteur. Nous avons vu que cette impédance inverse est donnée par la réactance de dispersion du moteur. Celle-ci peut être estimée à env. 20 % de sa réactance totale, de sorte que la chute de tension sera d'environ 20 % de la tension nominale. Le générateur doit fournir en outre le courant direct des pertes. On peut donc évaluer la puissance de la génératrice à env. 25 % de celle de la charge monophasée.

Comme les stators sont parcourus par le courant inverse, des courants de fréquence double seront induits dans les rotors, et produiront à leur tour des courants de fréquence triple dans les stators, de sorte que théoriquement les stators auraient tous les harmoniques d'ordre impair et les rotors tous les harmoniques d'ordre pair. Pour remédier en partie à cet inconvénient, on munira d'une part les deux machines d'un enroulement amortisseur qui refoulera dans l'entrefer le champ inverse du stator et, d'autre part, on améliorera la ventilation. On sera néanmoins forcé de calculer ces machines un peu plus largement que des machines ordinaires.

La raison pour laquelle on met le stator du moteur en série avec celui de la génératrice est que l'on évite par là que la génératrice, qui tourne, électriquement, dans le sens inverse du réseau, ne soit en court-circuit avec lui. Une simple self ne convient pas.

Il est nécessaire en effet de produire, à l'aide d'une machine tournante, la force contre électro-motrice nécessaire pour empêcher que le système compensateur ne soit en court-circuit par rapport aux tensions normales du réseau.

Le moteur possède par rapport au réseau, une réactance totale égale à sa réactance de dispersion plus la réaction d'induit; c'est cette réactance totale qui s'oppose au court-circuit. Une self pourrait aussi produire la force contre électro-motrice nécessaire pour empêcher le court-circuit, mais comme la self ne possède, par rapport au réseau, que sa réactance de dispersion, celle-ci devrait avoir précisément la même valeur que la réactance totale du moteur. Il faudrait donc, pour vaincre la chute de tension produite par les courants inverses circulant dans cette self, induire dans la génératrice une tension égale à la tension normale du réseau. La génératrice devrait être dimensionnée pour la même puissance que la charge monophasée à équilibrer. Comme un moteur est nécessaire de toute façon pour l'entraînement de la génératrice, on préfère naturellement utiliser en même temps l'effet de self de son stator, ce qui permet de dimen-

sionner la génératrice pour une tension d'environ 20 % seulement de la tension nominale du réseau. On peut aussi résumer la chose en disant simplement:

Dans une machine tournante (ici le moteur), la réactance directe par rapport au réseau est environ 5 fois plus élevée que sa réactance inverse (par rapport aux courants inverses), tandis que dans une self la réactance directe et la réactance inverse ont la même valeur.

Comme il y a des variables dans le problème, il est nécessaire d'avoir un réglage automatique de la compensation. Ces variables sont au nombre de 3.

a) Un déséquilibre donné correspond l'interversion de phases données dans le système de compensation. Si, en cours de service, la charge monophasée ou le déséquilibre passe sur d'autres phases, il faut, pour que le système compensateur fonctionne correctement, intervertir en même temps deux autres phases sur la génératrice. Mais cela est trop malcommode. Il faut chercher une autre solution. On peut aussi rétablir les conditions de bon fonctionnement en faisant tourner le rotor de la génératrice et par là le système inverse qu'elle engendre, d'un angle égal à la rotation subie par le système inverse de la charge.

On obtient le même effet en faisant tourner le stator, ce qui est naturellement plus facile. Un relais spécial mesurant les courants inverses aux bornes des alternateurs, modifiera donc la position du stator, par l'intermédiaire d'un moteur et d'une vis sans fin, jusqu'à disparition de ces courants.

β) Une deuxième variable est le  $\cos \varphi$  de la charge. La direction des courants inverses, qui sont à fournir par le système compensateur, doit varier avec le  $\cos \varphi$  de la charge pour que l'équilibre soit rétabli. Si on ne le fait pas, de nouveau des courants inverses apparaîtront aux bornes de la centrale. On peut y remédier de la même manière, c'est-à-dire en décalant le stator. Un même système de réglage suffit donc pour compenser les variations  $\alpha$  et  $\beta$ .

γ) Une troisième variable est la grandeur de la charge. Il faudra faire varier en fonction de celle-ci la grandeur des courants inverses de la génératrice, c'est-à-dire des tensions qui y sont induites. On excitera donc la génératrice en fonction du courant de la charge monophasée.

En résumé, le réglage sera double:

1° Réglage de la position du stator en fonction des courants inverses du réseau pour parer au déséquilibre causé tant par le passage de la charge monophasée sur d'autres phases que par la variation du  $\cos \varphi$  de la charge. 2° Réglage de la grandeur de l'excitation en fonction du courant de la charge pour parer au déséquilibre causé par la variation de la grandeur de la charge.

Cette solution est théoriquement complète et permet de supprimer le 100 % du déséquilibre. Des essais effectués en atelier avec une charge purement ohmique ont permis de compenser jusqu'à 95 %. Les trois courants de phase venant de la centrale étaient les suivants: 40,7; 42; 40,8 A.

Cette solution est, au point de vue économique, supérieure à l'installation d'un groupe convertisseur, car il faudrait dimensionner ce dernier pour une puissance bien supérieure à celle du groupe compensateur, ceci pour deux raisons:

1° Si l'on suppose par exemple que l'on ait plusieurs fours monophasés rattachés à un système de barres, le groupe convertisseur devra pouvoir alimenter au moins 2 fours, car ce n'est que lorsqu'on a en service un nombre de fours égal à 3 ou à un

multiple de 3 que l'on peut constituer, par une répartition convenable, une charge symétrique pour le réseau. Or, en réalité, la dissymétrie résultante provenant de deux fours n'est égale qu'à la puissance du troisième four qui manque; le groupe compensateur, lui, n'est à dimensionner que pour la puissance de ce four. On s'en convainc aisément en construisant les diagrammes des courants inverses de 2 charges monophasées branchées p. ex. entre RS et ST et en les composant.

2° Les deux machines du groupe convertisseur sont à dimensionner pour la pleine puissance du groupe, tandis que la puissance de l'une des machines du groupe compensateur n'est que de 25 % de la charge.

d) On a préconisé un autre système équilibrer consistant en une machine triphasée dont une phase est couplée en série avec la charge monophasée selon fig. 17. Mais si le rotor n'est pas entraîné, on n'obtient qu'une amélioration

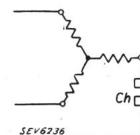


Fig. 17.

partielle résultant de la répartition du courant monophasé sur les trois phases; un simple transformateur étoile-triangle donnerait le même résultat. Si par contre le rotor est entraîné par un moteur auxiliaire, il devra l'être en sens inverse de son sens de rotation normal; il servira alors à induire dans le stator le système de courants inverses et l'on retombe en principe dans la solution b), avec cette différence toutefois que le stator du moteur d'entraînement ne sert plus à produire la force contre-électro-motrice nécessaire pour empêcher un court-circuit du système des tensions directes du réseau. Comme il est d'ailleurs indispensable d'empêcher ce court-circuit, il faudra produire la force contre-électro-motrice nécessaire à l'aide d'un deuxième rotor, tournant, lui, dans le sens direct. Cette solution est donc plus compliquée que la précédente.

e) On a aussi proposé d'équilibrer la charge à l'aide de machines biphasées, spécialement couplées. Pour bien exposer le fonctionnement de ce système, il est utile de passer par un système intermédiaire, d'où le premier se déduit:

La charge monophasée est raccordée au réseau par le transformateur 1 d'un groupe Scott, selon fig. 18. Le transformateur 2 du groupe alimente un

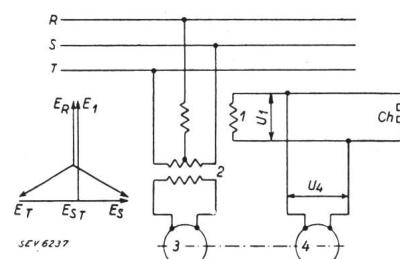


Fig. 18.

moteur synchrone monophasé 3 entraînant un alternateur 4 qui débite sur la charge monophasée Ch en parallèle avec le transformateur 1. On cale la roue polaire de l'alternateur 4 de telle façon que la tension fournie à pleine charge aux bornes de cette machine,  $U_4$ , soit en phase avec la tension  $U_1$  aux bornes du transformateur 1 également à pleine

charge (la coïncidence exacte des deux vecteurs peut d'ailleurs être obtenue en agissant sur l'excitation de 3).

Le moteur 3 et l'alternateur 4 ont chacun une puissance égale à la moitié de la charge monophasée  $Ch$ . De cette manière, la moitié de la charge  $Ch$  est débitée par le transformateur 1, l'autre moitié par le groupe 3-4, c'est-à-dire par le transformateur 2. L'ensemble représente une charge biphasée que le groupe Scott transforme en une charge triphasée symétrique pour le réseau.

Faisons d'abord la critique de ce système, comprenant deux machines monophasées, avant de passer au système réel constitué par une ou plusieurs machines biphasées.

Il est à remarquer que les forces électromotrices internes de 1 et de 4, soit  $E_1$  et  $E_4$ , ne coïncident pas (fig. 19), car les chutes de tension internes  $\Delta E_1$  et  $\Delta E_4$  ne sont pas les mêmes dans un transformateur ou un alternateur. Par suite, si l'on passe de la marche à pleine charge à la marche à vide, les tensions aux bornes  $U_1$  et  $U_4$ , qui deviennent alors identiques à  $E_1$  et  $E_4$  ne coïncident plus.  $U_4$  est décalé en avant d'un angle  $\alpha$  par rapport à  $U_1$  (fig. 20). En outre, lorsque la charge diminue, la roue polaire de 4 se décale en avant (le retard de la roue polaire de 3 par rapport au champ de son stator tendant à s'annuler). Si l'on passe de la marche à pleine charge à la marche à vide, ce décalage en avant

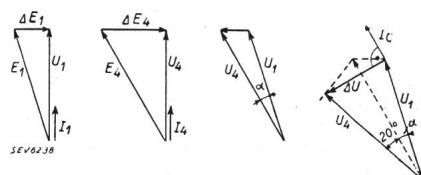


Fig. 19,

20.

21.

peut atteindre 20 à 25° pour des machines synchrones courantes.  $E_4$  tendrait donc à se décaler en avant par rapport à  $E_1$ , quand on passe de pleine charge à zéro, d'un angle de 20 à 25°. Par suite, le décalage total que tendrait à prendre  $U_4$  par rapport à  $U_1$  (soit  $\alpha + 20^\circ$ ), est représenté dans la fig. 21, où  $\Delta U$  représente une force électromotrice résultante pour le circuit 4-1 du réseau. Un courant de circulation watté élevé  $I_c$ , engendré par  $U$ , tendrait donc à prendre naissance dans le transformateur 1, autrement dit, 4 tendrait à débiter sur 1 ou à restituer au réseau par 1 le courant absorbé par 2. Ce courant  $I_c$  au primaire, se composerait avec les courants  $I_s$  et  $I_t$  absorbés par 2 (voir fig. 22), de façon à donner un système de courants inverses pour le réseau, par conséquent, une charge dissymétrique.

Bien entendu, dès que 4 se met à débiter sur 1 du courant watté, la roue polaire est de nouveau freinée, le décalage diminue. Un certain décalage et, par suite, un courant de circulation assez fort subsistent cependant (car la réactance qui limite ce courant est faible; elle n'est formée que par la réactance de 4 plus celle de 1, plus celle du réseau).

A cette cause de déséquilibre provenant de la variation de la grandeur de la charge s'ajoute que: a) la variation de l'excitation du moteur 3 peut aussi faire varier la position de la roue polaire, c'est-à-dire le décalage, b) la variation de l'excitation de 4 peut faire varier la grandeur de  $U_4$  et

par suite, provoquer une circulation de courants déwattés; c) la variation du  $\cos \varphi$  de la charge a un double effet: 1° elle correspond à une variation de la charge wattée et donc se traduit comme plus haut par une circulation de courants wattés dissymétriques, 2° elle tourne les vecteurs des chutes de tension  $\Delta U_1$  et  $\Delta U_4$ : à la limite, c'est-à-dire à  $\cos \varphi$  zéro,  $\Delta U_1$  et  $\Delta U_4$  ont pratiquement la direction de  $U_1$  et de  $U_4$  (fig. 23); mais comme  $\Delta U_1$  est  $< \Delta U_4$ , la différence  $U_4 - U_1$  en est influencée, d'où circulation de courants déwattés dissymétriques.

On voit donc qu'un tel système ne pourrait servir d'équilibrage de charge qu'à condition d'être complété par un dispositif additionnel qui compenserait les différences de tension longitudinales ou transversales entre  $U_4$  et  $U_1$ , créées par les variations de la charge ou de l'excitation. C'est ce qu'on a prétendu faire dans le système mentionné plus haut, sous e) et comportant des machines biphasées.

Ce système dérive du précédent si l'on remplace les deux machines monophasées 3 et 4 par une machine biphasée où l'une des phases est motrice et l'autre génératrice (fig. 24). Il est facile de voir que toutes les critiques émises plus haut s'appliquent également ici: la variation de la charge et de son  $\cos \varphi$  provoquent des différences de tension  $U_4 - U_1$ ; la variation de l'excitation provoque: a) de même des différences de tension  $U_4 - U_1$ ; b) des décalages  $E_4 - E_1$ , c'est-à-dire également des différences  $U_4 - U_1$ , c) enfin, une variation de  $E_3$ , se traduisant par des courants supplémentaires dans

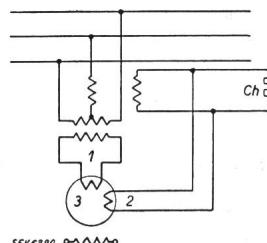


Fig. 24 (en haut).

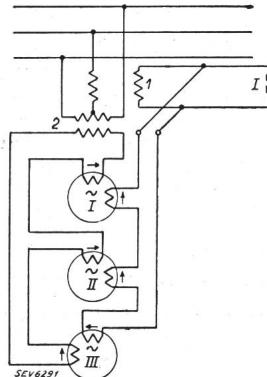


Fig. 25 (à droite).

les phases S et T. Il est donc nécessaire de compenser ces différences de tension en introduisant des tensions additionnelles, réglables en grandeur et en direction, dans les deux enroulements moteur et génératrice de la machine biphasée I. C'est ce que l'on a proposé de faire à l'aide de deux machines biphasées II et III en cascade, selon fig. 25. Ces machines fournissent une tension additionnelle à chacun des enroulements de la machine biphasée I, chaque tension additionnelle étant la résultante de deux composantes perpendiculaires l'une à l'autre; en faisant varier convenablement l'excitation des machines en cascade, on peut faire varier la valeur respective de ces deux composantes, c'est-à-dire en définitive, la grandeur et la direction des deux tensions additionnelles.

Toutefois, un tel système: 1° revient cher puisqu'il nécessite, outre la machine I avec son excita-

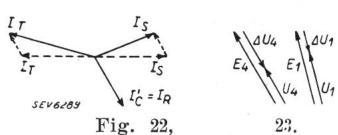


Fig. 22,

23.

trice, deux machines en cascade avec leurs excitatrices également, et un moteur d'entraînement; 2° demande un système de réglage très compliqué.

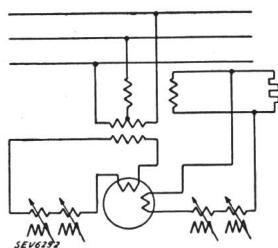


Fig. 26.

On pourrait obtenir aussi le même résultat en utilisant au lieu des machines en cascade, deux ré-

gulateurs d'induction par circuit, selon couplage de la fig. 26. Toutefois, le système de réglage serait également compliqué.

*En résumé, les solutions les plus économiques consistent soit à corriger la déformation du triangle des tensions à l'aide de transformateurs auxiliaires introduits dans les phases convenables, soit à équilibrer la charge elle-même, et ceci à l'aide d'une self et d'un condensateur (selon fig. 13) si les conditions de service n'exigent pas un réglage automatique, ou à l'aide de deux machines synchrones, dimensionnées l'une pour 100 % et l'autre pour 25 % de la dissymétrie (selon fig. 16), si les conditions de service exigent un réglage automatique.*

## Stromwandler mit gesteuerter Eigenvormagnetisierung.

Von J. Goldstein, Zürich.

921.314.224.08

*Die Fortschritte, die auf dem Gebiete der eigenvormagnetisierten Stromwandler erzielt worden sind, dürfen auch für die weiteren Fachkreise von Interesse sein. In folgenden Ausführungen sollen die wichtigsten Gesichtspunkte, von denen aus gesehen diese Neuerung auf dem Stromwandlergebiet beachtenswert ist, kurz zusammengefasst werden. Anschliessend wird über die praktischen Erfolge, die in der Schweiz und im Auslande auf dem Gebiete der eigenvormagnetisierten Einleiterstromwandler erreicht worden sind, berichtet.*

*Les progrès réalisés dans le domaine des transformateurs d'intensité à pré-magnétisation propre ne sont pas sans intérêt pour un cercle plus étendu d'électriciens. Dans ce qui suit, l'auteur expose brièvement à quels principaux points de vue cette novation mérite de retenir l'attention. Il décrit ensuite les succès pratiques obtenus en Suisse et à l'étranger avec cette nouvelle construction.*

### 1. Die Schaltung und der Magnetisierungsvorgang.

Der Zweck der Vormagnetisierung, die Permeabilität des Eisens zu erhöhen, sei hier als bekannt vorausgesetzt.

Eine wesentliche Verbesserung gegenüber den bekannten Schaltungen, an deren Entwicklung bei der AEG der Verfasser beteiligt war, besteht darin, dass die Vormagnetisierungsenergie bei der neuen Ausführung gesteuert wird. Die Steuerung bezieht sich nicht nur auf die Zufuhr eines möglichst im ganzen Strombereich konstanten Vormagnetisie-

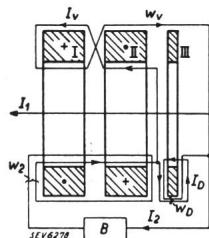


Fig. 1.

Schaltung eines Einleiter-Stromwandlers mit gesteuerter Eigenvormagnetisierung.

rungsstromes, sondern auch auf die Phasenregulierung dieses Stromes relativ zum Magnetisierungsstrom des Stromwandlers.

In Fig. 1 ist die Schaltung eines Einleiterstromwandlers mit gesteuerter Eigenvormagnetisierung dargestellt. Der zweiteilige Eisenkern wird wie jeder normale Stromwandler mit einer sekundären Wicklung versehen, die eine dem Uebersetzungsverhältnis des Stromwandlers entsprechende Windungszahl  $w_2$  erhält. In Serie mit der Hauptwicklung ist eine Hilfswicklung  $w_v$ , die in Kreuzschaltung die beiden Teilkerne umschlingt, geschaltet.

Diese Wicklung ist wegen der Kreuzschaltung ohne Einfluss auf die anderen Wicklungen des Wandlers und wird aus dem gleichen Grunde von diesen auch nicht beeinflusst.

Der Sekundärstrom  $I_2$  darf im oberen Stromgebiet nicht mit vollem Betrag für die Vormagnetisierung verwendet werden, da diese sonst über ein zu grosses Gebiet der Magnetisierungskurve sich erstrecken würde und eine Verschlechterung der Permeabilität des Eisens im oberen Stromgebiet zur Folge hätte. Die richtige Aussteuerung der Vormagnetisierung wird durch eine Drosselpule, die in der Fig. 1 als Kern III dargestellt ist, erreicht. Wie aus Fig. 1 ersichtlich, zweigt ein Teil des Sekundärstromes ( $I_2$ ) in die Drosselpule ab ( $I_D$ ); der restliche Teil wird als Vormagnetisierungsstrom ( $I_v$ ) verwendet. Die Bemessung der Windungszahl ( $w_v$ ) dieser Wicklung und die Bemessung des Drosselpulenkernes und seiner Windungszahl ( $w_D$ ) müssen derart erfolgen, dass eine Erfassung des steilsten Bereiches der Magnetisierungskurve gewährleistet wird, und dass diese Magnetisierung möglichst phasengleich mit der «Nutzmagnetisierung» bleibt.

Durch die Verkennung dieser Umstände ist es zu erklären, dass die in Frankreich in den Jahren 1920 bis 1922 von der Compagnie pour la Fabrication des Compteurs et Matériel d'Usines à Gaz ausgeführten Versuche mit compoundierten Stromwandlern nicht von durchgreifendem Erfolg begleitet gewesen sind. Auch entspricht die angestrebte Einregulierung der Vormagnetisierung auf den höchsten Wert der Permeabilitätskurve keines-