

des régions facilement accessibles et que, dans certains vallons des montagnes, à grande altitude, où la désagrégation est très active, mais totalement déserts pendant 9 à 10 mois de l'année, il se produit des avalanches énormes que l'on n'observe pas, ayant, par suite, une puissance d'érosion considérable, on peut conclure que les avalanches fournissent aux cours d'eau alpestres une quantité de matériaux de charriage qui n'est pas négligeable.

Cela n'a rien qui doive étonner, car certains cônes d'avalanche atteignent de fortes dimensions. Ainsi, à Beaufort, l'avalanche de la Gevrotière a couvert 60 ares et atteignait 10 000 mètres cubes ; à Cevins, l'avalanche du pont du Dard s'étalait sur 90 ares et avait 24 000 mètres cubes de neige tassée ; à Saint-Julien-de-Maurienne, le 9 avril 1904, une énorme avalanche s'abattait dans la combe des Essarts sur 1 hectare 92 et avait une épaisseur de 15 mètres ; 12 jours après, dans la même commune, 1 hectare 72 du ravin de l'Aiguille disparaissait sous une couche de neige de 8 à 10 mètres. Le 20 mars 1907, à Chamonix, l'avalanche des Chosalets occupait une surface de 2 hectares 70 avec près de 100 000 mètres cubes de neige ; à Sixt, à la même époque, l'avalanche des Follys avait 5 hectares de superficie et un volume de 66 000 mètres cubes !

(à suivre).

## PROCÉDÉ POUR L'AMÉLIORATION DU FACTEUR DE PUISSANCE

**CAUSES D'UN MAUVAIS FACTEUR DE PUISSANCE DANS LES INSTALLATIONS TRIPHASÉES.** — Le mauvais facteur de puissance que l'on constate souvent dans les installations triphasées tient en général au branchement au réseau de moteurs d'induction et principalement de gros moteurs à marche lente. Mais les moteurs à grande vitesse peuvent exercer également une influence défavorable s'ils tournent à faible charge ou à vide. Pour mettre ce point en évidence, rappelons d'abord en quoi consiste le facteur de puissance :

Tout moteur a besoin d'excitation ; mais tandis que pour les moteurs synchrones (comme pour les moteurs à courant continu) l'excitation est fournie par une source de courant continu, les moteurs asynchrones doivent emprunter au réseau le courant nécessaire à leur excitation ; ils prennent donc au réseau deux sortes de courant : un courant qui sert à la production du travail et l'autre qui sert à l'excitation ou à la magnétisation. La représentation graphique de ces

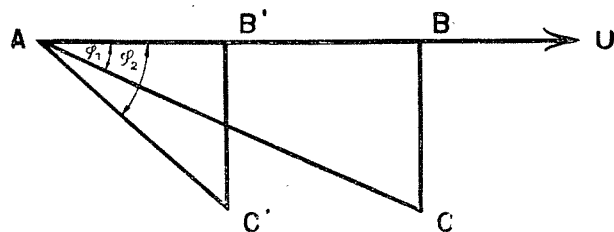


FIG 1.

courants est donnée par la figure 1 ;  $AB$  est le courant de travail,  $BC$  le courant de magnétisation. Celui-ci qui ne produit pas de puissance et est appelé en conséquence déwatté, est en arrière de  $90^\circ$  par rapport à la tension du réseau, c'est-à-dire que dans le diagramme vectoriel, il est perpendiculaire au vecteur du courant de travail qui est un courant watté.  $AC$ , résultante des deux courants composants, représente le courant total emprunté au réseau.

L'angle  $BAC$  mesure le décalage de phase entre la tension et le courant ; son cosinus est désigné sous le nom de facteur de puissance. Le courant d'excitation a une valeur à peu près indépendante de la charge de sorte qu'une diminution de celle-ci, c'est-à-dire du courant de travail, fait croître l'angle de décalage ; à vide, la composante wattée atteint son minimum ; le facteur de puissance descend à 0,10–0,15 et le moteur prend au réseau environ 40 % du courant de pleine charge. Moins un moteur d'induction est chargé, plus est faible son facteur de puissance, comme il ressort clairement de la figure 1. En outre cette figure 1 montre que le facteur de puissance du moteur d'induction ne peut jamais atteindre l'unité par suite de la présence du courant d'excitation.

Des essais rigoureux ont montré que les installations industrielles qui sont équipées avec des moteurs triphasés ont en général un facteur de puissance compris entre 0,6 et 0,85 ; la limite supérieure n'est atteinte que rarement.

**INCONVÉNIENTS D'UN MAUVAIS FACTEUR DE PUISSANCE.** — Le courant d'excitation nécessaire aux moteurs asynchrones doit être fourni en même temps que le courant de travail par les génératrices de la centrale. L'échauffement admissible pour ces dernières limite le courant qu'on peut leur faire débiter quelle qu'en soit d'ailleurs la répartition en watté et déwatté ; les génératrices ne seront complètement utilisées que pour  $\cos \varphi = 1$ . Si les moteurs asynchrones connectés au réseau, par suite de leur mauvais facteur de puissance prennent aux génératrices une forte proportion de courant magnétisant, il ne restera que peu de courant disponible pour le travail. Par exemple un facteur de puissance égal à 0,5 ne permettra d'utiliser que la moitié du courant total pour produire du travail.

Ce raisonnement s'applique également aux transformateurs et aux lignes de distribution dont l'utilisation en ce cas ne sera que partielle.

Il faut encore tenir compte de ce que les pertes dues au courant déwatté, assez réduites pour les génératrices et les transformateurs, peuvent, pour les lignes de distribution, atteindre dans certains cas une grande valeur. Ces pertes croissent comme le carré de l'intensité du courant de sorte que si l'énergie électrique doit être transportée à grande distance, l'amélioration du facteur de puissance réduira les pertes d'énergie d'une façon très sensible. Il est donc de grande importance de trouver un moyen approprié d'améliorer le facteur de puissance, c'est-à-dire de compenser le décalage de phase.

De plus, lorsque les réseaux s'étendent, il arrive que, par suite de l'accroissement du débit des lignes, la chute de tension augmente de telle sorte que le réglage de l'excitation des générateurs ne suffit plus à tenir la tension normale du réseau. Dans ce cas on peut, par un léger déphasage en avant, réduire la chute de tension à une valeur acceptable.

S'il s'agit de créer une nouvelle installation de puissance donnée, l'amélioration du facteur de puissance correspond à une diminution des frais d'installation et d'exploitation.

Pour une centrale existante qui travaille avec un mauvais facteur de puissance, l'amélioration de celui-ci donne également des avantages sensibles, spécialement si la centrale est déjà arrivée aux limites de sa capacité. Par des moyens relativement peu coûteux, l'amélioration du facteur de puissance permet d'augmenter la puissance de la centrale sans installer de nouvelles unités ; le matériel, machines et canalisations est mieux utilisé et le rendement de l'ensemble se trouve accru.

**AVANTAGES DE L'AMÉLIORATION DU FACTEUR DE PUISSANCE POUR LE CONSOMMATEUR DE COURANT.** — Si le consommateur de courant produit lui-même l'énergie dont il a besoin, ce qui précède montre qu'il y a pour lui un intérêt immédiat, afin que sa centrale soit utilisée le mieux possible à ce que le facteur de puissance soit maintenu à une valeur élevée.

S'il achète son courant à une centrale, l'amélioration du facteur de puissance présentera pour lui de l'intérêt dans tous les cas où la centrale, pour tenir compte des désavantages pécuniaires que représente pour son exploitation un mauvais facteur de puissance, fait dépendre le prix de l'énergie de la valeur de ce dernier. Divers cas peuvent se présenter : il existe par exemple des centrales qui, au lieu de compter l'énergie en kilowatts-heures utilisés, la comptent en KVA-heures ; dans d'autres cas on fixe une redevance à payer au-delà d'un certain nombre d'ampères consommés ou une prime si le facteur de puissance est élevé.

S'il s'agit de l'installation de nouveaux moteurs, l'amélioration du facteur de puissance par un dispositif de compensation spécial permet de réduire leurs dimensions et leur poids. Par suite de cette diminution du poids il arrive généralement, surtout pour les moteurs à marche lente, que le prix du moteur, avec dispositif compensateur ne dépasse pas celui du moteur normal sans compensation.

Pour des moteurs existants, la compensation du décalage est d'un grand intérêt si les moteurs travaillent à la limite de leur puissance et si l'on doit chercher à augmenter cette dernière. Cette augmentation de la puissance est rendue possible par l'emploi d'un compensateur de phase approprié, car le stator, n'empruntant plus alors au réseau son courant magnétisant, peut recevoir un supplément correspondant de courant de travail ; quant au rotor, comme la pratique le montre, on peut en général le surcharger sans inconvénient, grâce à sa meilleure ventilation, son enroulement possédant une isolation plus mince que le stator souvent à haute tension.

**PROCÉDÉS POUR L'AMÉLIORATION DU FACTEUR DE PUISSANCE.** — Les procédés employés pour l'amélioration du facteur de puissance des moteurs d'induction se divisent en deux classes ; on peut à l'aide d'une machine unique produire le courant d'excitation nécessaire à l'ensemble des moteurs connectés au réseau, ou bien chaque moteur peut être muni d'un système de compensation qui lui est propre.

La première catégorie de ces machines supplémentaires comprend les moteurs synchrones surexcités, les moteurs-générateurs synchrones et les commutatrices. Toutes ces machines peuvent être surcompensées quand on les excite suffisamment et qu'on leur donne des dimensions suffisantes, de telle sorte qu'elles envoient au réseau un courant magnétisant qui compense le décalage de phase de ce dernier. Si cette disposition ne peut être envisagée, on prévoit encore un moteur synchrone tournant à vide et servant unique-

ment à compenser le décalage ; cette solution, surtout employée en Amérique, conduit toutefois à des frais d'établissement et d'entretien importants et n'est pas complètement satisfaisante ; ces machines apportent en effet avec elles les inconvénients qui leur sont propres, comme difficultés du démarrage, danger des oscillations pendulaires et du décrochage. De plus, les machines synchrones donnent, pour une excitation donnée, un courant magnétisant constant ; or, il n'est pas dit que la même valeur soit constamment nécessaire au réseau : si l'on branche par exemple, à un moment donné, plus de moteurs d'induction, on a besoin d'un plus grand courant magnétisant et l'excitation des machines synchrones doit être modifiée pour que l'on obtienne la compensation du décalage de phase au nouveau régime. Enfin il est à remarquer que si avec les machines de cette première catégorie la compensation du décalage peut être réalisée sur le réseau, les moteurs d'induction qui y sont reliés ne sont eux-mêmes nullement influencés. Il n'est par suite pas possible de réduire les dimensions des nouveaux moteurs à installer par cette façon de compenser le décalage ni de pousser la puissance des moteurs existants.

La seconde catégorie de moyens dont on dispose pour améliorer un mauvais facteur de puissance comprend tous les dispositifs de compensations individuels des moteurs.

Toutefois ces dispositifs demandent, pour être applicables, que l'on dispose d'un ou de plusieurs gros moteurs d'induction tournant constamment. La maison Brown & Boveri vient de construire un compensateur de phase basé sur ces principes. Nous décrivons ci-dessous cet appareil en détail.

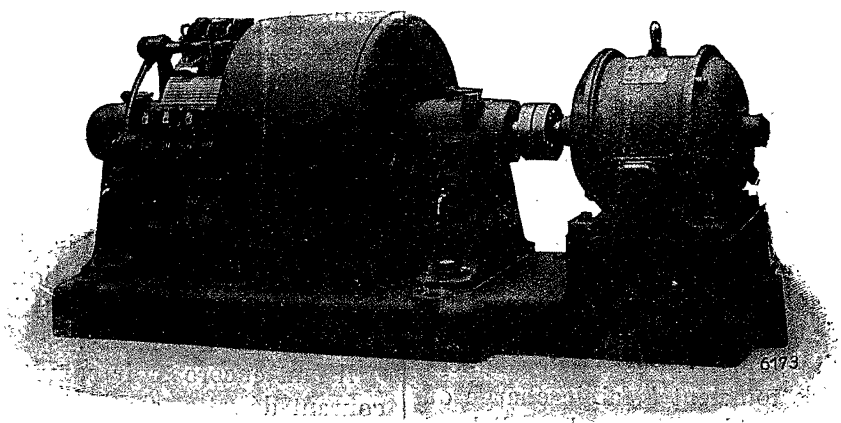


FIG. 2. — COMPENSATEUR DE PHASE DE 12 KVA POUR UN MOTEUR DE 600 HP, 50 PÉRIODES. (Moteur de commande : 1 HP, 1 000 tours par minute.)

## COMPENSATEUR BROWN-BOVERI

**PRINCIPE.** — Dans la revue *L'Industrie Electrique*, M. P. NOËL démontre de façon assez simple que l'excitation des machines asynchrones peut être faite en fournissant la puissance magnétisante au rotor et alors celle-ci devient beaucoup plus faible que celle qu'il serait nécessaire de développer dans le stator. Voici cette démonstration dont nous utiliserons les résultats dans un instant :

Considérons un moteur asynchrone à deux pôles, diphasé au stator et au rotor, et soient  $n_1$  et  $n_2$  respectivement les nombres de spires par phase des enroulements primaire et secondaire. Pour produire le même flux maximum  $F_m$  par pôle, il faut évidemment le même nombre d'ampères-tours, que le champ magnétique soit produit par l'un ou l'autre enroulement.

On a donc :

$$n_1 I_{1m} = n_2 I_{2m} \quad (1)$$

$I_{1m}$  étant le courant magnétisant nécessaire dans le stator pour développer le flux  $\mathcal{F}_m$ .

$I_{2m}$  le courant qui, circulant dans le rotor, produit le même flux.

La force électromotrice efficace induite par le flux  $\mathcal{F}_m$  dans le stator a pour valeur :

$$E_1 = n_1 \frac{\omega \mathcal{F}_m}{\sqrt{2}}$$

et la puissance réactive empruntée au réseau par le stator :

$$\Pi_1 = E_1 I_{1m} = \frac{\omega \mathcal{F}_m}{\sqrt{2}} n_1 I_{1m}. \quad (2)$$

Le même flux  $\mathcal{F}_m$  tournant par rapport au rotor avec la vitesse angulaire  $\omega - \Omega$  ( $\Omega$  étant la vitesse angulaire de rotation du rotor) induit dans l'enroulement secondaire une f. é. m. :

$$E_2 = n_2 \frac{(\omega - \Omega) \mathcal{F}_m}{\sqrt{2}}$$

Le même flux  $\mathcal{F}_m$  sera obtenu en fournissant au rotor une puissance magnétisante :

$$\Pi_2 = E_2 I_{2m} = \frac{(\omega - \Omega) \mathcal{F}_m}{\sqrt{2}} n_2 I_{2m}. \quad (3)$$

$L_1$ , la self-inductance de chaque phase du primaire (stator).

$L_2$ , la self-inductance de chaque phase du secondaire (rotor).

$M$ , la mutuelle inductance maxima entre une phase du stator et une phase du rotor ; la mutuelle inductance instantanée variant suivant une loi sinusoïdale du temps avec la pulsation  $\omega - \Omega$ ,  $\omega$  étant la pulsation du courant primaire et aussi la vitesse angulaire du champ tournant,  $\Omega$  la vitesse angulaire du rotor.

$R_2$ , la résistance d'une phase du rotor (nous négligerons la résistance du primaire).

$C$ , la capacité intercalée dans chaque phase du secondaire.

Des courants diphasés d'intensité efficace  $I_1$  circulant dans le stator produisent un flux de mutuelle induction de valeur maxima  $\sqrt{2} M I_1$  tournant par rapport au rotor avec

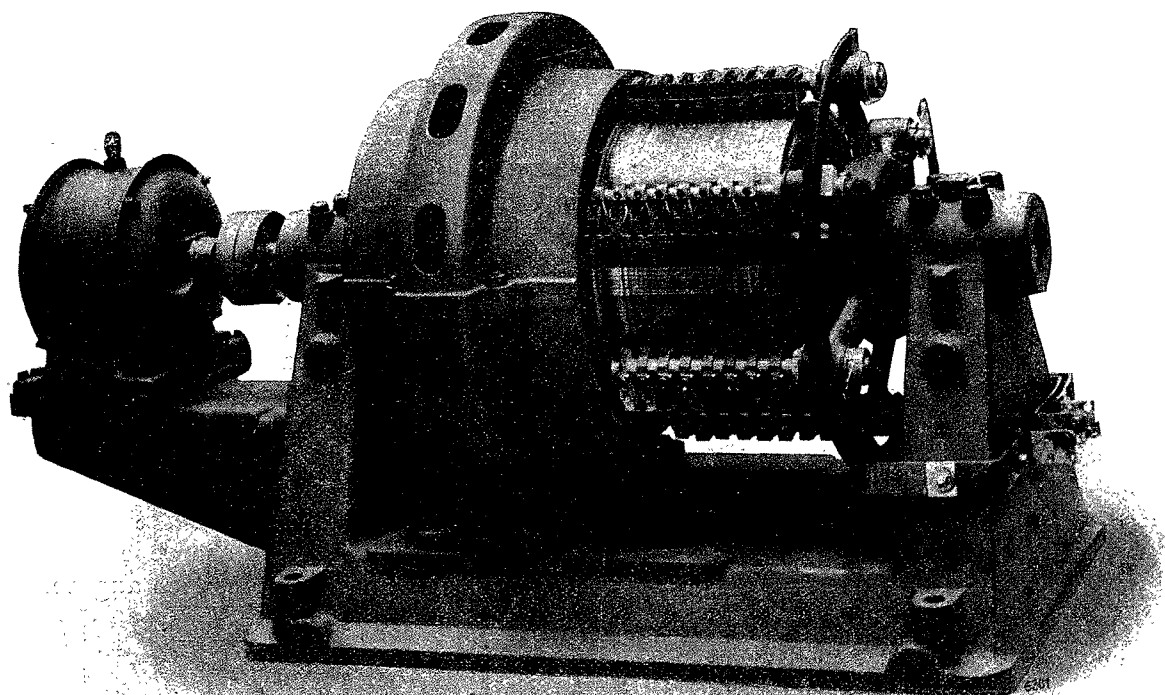


FIG 3. — COMPENSATEUR DE PHASE DE 30 KVA POUR UN MOTEUR DE 1 200 HP, 200 TOURS PAR MINUTE, 50 PÉRIODES.

En divisant les équations (3) et (2) membre à membre en tenant compte de (1), on obtient :

$$\frac{\Pi_2}{\Pi_1} = \frac{\omega - \Omega}{\omega}$$

Les puissances  $\Pi_1$  et  $\Pi_2$  sont donc entre elles comme les fréquences des courants dans le stator et dans le rotor ; en charge  $\Pi_1$  sera donc compris entre 10 et 50 fois  $\Pi_2$ .

La puissance réactive  $\Pi_2$  peut être fournie par des condensateurs intercalés dans chacune des phases du rotor. Les courants rotoriques étant de fréquence basse (1, 2, 3 périodes par seconde), il y a avantage à employer des condensateurs électrolytiques qui présentent une grande capacité par unité de surface d'armature.

Cherchons maintenant comment la présence de ces condensateurs modifie le diagramme de la machine d'induction dans le rotor de laquelle ils sont introduits.

Considérons donc une machine d'induction bipolaire, diphasée au stator et au rotor. Appelons :

la vitesse angulaire  $\omega - \Omega$  et induisant dans chaque circuit secondaire une force électromotrice de pulsation  $\omega - \Omega$  et de valeur efficace  $(\omega - \Omega) M I_1$ . Ces f. é. m. diphasées agissant dans des circuits de résistance  $R_2$  de self-induction  $L_2$  et de capacité  $C$  y produisent des courants diphasés d'intensité efficace :

$$\frac{(\omega - \Omega) M I_1}{\sqrt{R_2^2 + \left[ (\omega - \Omega) L_2 - \frac{1}{(\omega - \Omega) C} \right]^2}} \quad (4)$$

Ces courants produisent un flux magnétique de valeur maxima :

$$\frac{\sqrt{2} (\omega - \Omega) M^2 I_1}{\sqrt{R_2^2 + \left[ (\omega - \Omega) L_2 - \frac{1}{(\omega - \Omega) C} \right]^2}} \quad (5)$$

qui tourne dans le même sens que le rotor et par rapport à lui avec la vitesse angulaire  $\omega - \Omega$  et, par suite, par rapport au stator avec la vitesse angulaire  $\omega$ . Dans chaque phase

du primaire, ce flux induit une force électromotrice efficace :

$$\frac{\omega (\omega - \Omega) M^2 I_1}{\sqrt{R_2^2 + \left[ (\omega - \Omega) L_2 - \frac{1}{(\omega - \Omega) C} \right]^2}} \quad (6)$$

dont une composante :

$$\frac{\omega (\omega - \Omega) M^2 R_2 I_1}{R_2^2 + \left[ (\omega - \Omega) L_2 - \frac{1}{(\omega - \Omega) C} \right]^2} \quad (7)$$

est en phase avec le courant primaire, et l'autre :

$$\frac{\omega (\omega - \Omega) M^2 I_1 \left[ (\omega - \Omega) L_2 - \frac{1}{(\omega - \Omega) C} \right]}{R_2^2 + \left[ (\omega - \Omega) L_2 - \frac{1}{(\omega - \Omega) C} \right]^2} \quad (8)$$

est en quadrature avec le courant  $I_1$  et se retranche de la f. é. m. de self-induction du primaire  $\omega L_1 I_1$ .

Finalement, la résistance apparente du primaire est :

$$R = \frac{\omega (\omega - \Omega) M^2 R_2}{R_2^2 + \left[ (\omega - \Omega) L_2 - \frac{1}{(\omega - \Omega) C} \right]^2} = \omega (\omega - \Omega) M^2 \frac{R_2}{\Delta^2} \quad (9)$$

$$\text{avec } \Delta^2 = R_2^2 + \rho^2 \quad \text{et} \quad \rho = (\omega - \Omega) L_2 - \frac{1}{(\omega - \Omega) C}$$

et la réactance apparente :

$$S = \omega \left[ L_1 - (\omega - \Omega) M^2 \frac{\rho}{\Delta^2} \right] \quad (10)$$

Posons :

$$X = \omega L_1 - S = \omega (\omega - \Omega) M^2 \frac{\rho}{\Delta^2} \quad (11)$$

De (9) et (11) on tire :

$$R^2 + X^2 = \omega^2 (\omega - \Omega)^2 M^4 \frac{R_2^2 + \rho^2}{\Delta^4} = \frac{\omega^2 (\omega - \Omega)^2 M^4}{\Delta^2} \quad (12)$$

et

$$\frac{R}{X} = \frac{R_2}{\rho} \quad \text{d'où} \quad \rho = \frac{R_2}{R} X \quad (13)$$

En divisant (12) par (9) membre à membre il vient :

$$\frac{R^2 + X^2}{R} = \frac{\omega (\omega - \Omega) M^2}{R_2}$$

d'où :

$$-\Omega = \frac{R_2}{R} \cdot \frac{R^2 + X^2}{\omega M^2} \quad (14)$$

Substituons dans  $\rho$ . L'équation (13) devient :

$$X \frac{R^2}{R} = \frac{R_2}{R} \cdot \frac{R^2 + X^2}{\omega M^2} L_2 - \frac{R \omega M^2}{R_2 (R^2 + X^2) C}$$

ou

$$(R^2 + X^2)^2 \frac{L_2}{\omega M^2} - X (R^2 + X^2) - R^2 \frac{\omega M^2}{C R_2^2} = 0. \quad (15)$$

Transformons cette expression, en utilisant des coordonnées polaires. Posons :

$$R = A \cos \theta \quad X = A \sin \theta$$

et substituons, nous obtenons :

$$A^2 \frac{L_2}{\omega M^2} - A \sin \theta - \frac{\omega M^2}{C R_2^2} \cos^2 \theta = 0. \quad (16)$$

D'où :

$$A = \frac{\omega M^2}{2 L_2} \left[ \sin \theta + \sqrt{\sin^2 \theta + \frac{4 L_2}{R_2^2 C} \cos^2 \theta} \right] \quad (17)$$

Cette équation représente une courbe ayant l'allure générale KCMQ indiquée par la figure 4 dans laquelle :

$$ROM = \theta \quad \text{et} \quad OM = A.$$

Pour  $\theta = -\frac{\pi}{2}$   $A = 0$  et la courbe est tangente à la droite OY.

$$\text{Pour } \theta = 0, A = \frac{\omega M^2}{R_2 \sqrt{L_2 C}} = OQ.$$

Pour  $\theta = \frac{\pi}{2}$   $A = \frac{\omega M^2}{L_2} = OK$  et la courbe est normale en K à la droite de YOK :

Quand il n'y a pas de capacité en circuit ( $C = \infty$ ) l'équation (17) se réduit à :

$$A = \frac{\omega M^2}{2 L_2} [\sqrt{\sin^2 \theta} + \sin \theta]$$

qui représente un cercle décrit sur OK comme diamètre.

Comme nous avons posé  $X = \omega L_1 - S$ , pour obtenir le diagramme des impédances, il faut déplacer l'origine O et l'amener en  $O_1$  tel que  $OO_1 = \omega L_1$ .

Au synchronisme, l'impédance est représentée par  $OO_1$ ; quand la vitesse diminue, l'impédance commence par augmenter, puis diminue et est mesurée par  $O_1C$  par exemple quand le rotor est arrêté.

Le diagramme des courants s'obtient en transformant la figure précédente par rayons vecteurs réciproques en prenant pour pôle le point  $O_1$ , on obtient ainsi, en prenant une échelle convenable, une courbe KNBPO qui se réduit au cercle KO quand le rotor est en court-circuit. Le courant de marche à vide est proportionnel à  $O_1K$ , il est le même que lorsqu'il n'y a pas de capacité, ce qui est évident *a priori*, et le  $\cos \varphi$  est nul; quand on charge le moteur, le courant diminue et le facteur de puissance augmente plus rapide-

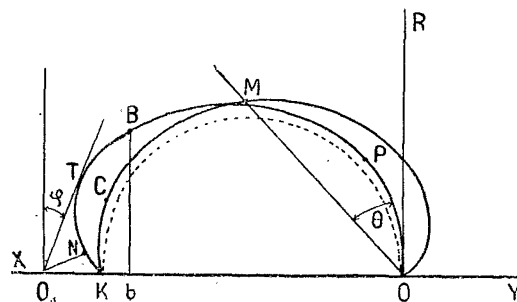


FIG 4.

ment qu'en l'absence de condensateurs; pour une certaine charge, le courant primaire passe par un minimum ON; le facteur de puissance est maximum quand le vecteur  $O_1T$  représentant le courant est tangent à la courbe; lorsque cette charge est dépassée le courant augmente, tandis que le facteur de puissance décroît.

Comme dans le diagramme ordinaire, le couple est mesuré par la longueur Bb de la perpendiculaire abaissée du point B du diagramme des courants sur la droite OX.

Nous ne poursuivrons pas plus loin l'étude des propriétés de ces courbes; ce qui précède suffit pour montrer l'influence de l'introduction de condensateurs dans les circuits induits des moteurs asynchrones (1).

Malgré quelques essais satisfaisants, l'emploi des conden-

(1) Voyez aussi Guilbert. Du rôle des condensateurs dans les induits des moteurs asynchrones. *Eclairage électrique*, t. X. 1897, p. 193.

sateurs pour l'amélioration du facteur de puissance n'a d'ailleurs pas reçu d'applications industrielles, moins à cause du prix des condensateurs qu'en raison de la défiance plus ou moins justifiée dont ils sont l'objet.

Aussi, depuis longtemps déjà, les électriciens cherchent-ils à remplacer les capacités électrostatiques par des appareils électromagnétiques produisant une force électromotrice en avance d'un quart de période sur le courant.

C'est sur le même principe que celui de l'excitatrice Leblanc que repose le fonctionnement du compensateur de phase que nous étudions. Il diffère cependant de celle-ci par l'absence de stator. Rappelons le principe de l'excitatrice Leblanc.

*Excitatrice Leblanc* <sup>(1)</sup>. — Son fonctionnement repose sur les propriétés des machines à courants alternatifs à collecteurs découvertes par M. Latour. Elle est constituée par un induit à collecteur portant un enroulement à un certain nombre de pôles  $2p$ ; le nombre des lignes de balais est  $p.n$  réunis en  $n$  groupes ( $n$  étant le nombre de phases du rotor du moteur asynchrone à exciter). L'induit est placé à l'intérieur d'un stator ordinaire de moteur d'induction, mais non bobiné. Il n'a pour but que de diminuer la réactance du circuit magnétique.

Si l'on injecte par les balais dans le rotor ci-dessus, des courants  $n$ -phasés, de pulsation  $\omega$ , il y a production d'un champ tournant avec la vitesse angulaire  $\frac{\omega}{p}$ , quelle que soit la vitesse de rotation du rotor.

Si le rotor est immobile, le passage de ces courants produit entre les groupes de balais des forces électromotrices de self-induction qui diminuent lorsqu'on fait tourner l'induit dans le même sens que le champ tournant; pour une vitesse de rotation du rotor voisine du synchronisme (et généralement un peu supérieure), la réactance apparente s'annule et si l'on fait encore croître la vitesse de l'induit, celui-ci se comporte alors comme un condensateur et fournit de la puissance réactive au réseau auquel il est relié <sup>(2)</sup>.

Ici encore, si l'on suppose la vitesse constante et supérieure à celle du synchronisme, la force électromotrice produite, décalée en avance d'un quart de période sur le courant correspondant, est proportionnelle à l'intensité de ce courant et indépendante de sa fréquence, de sorte que la réactance apparente d'une phase du rotor du moteur asynchrone muni de l'excitatrice Leblanc, est de la forme :

$$(\omega - \Omega) L_2 - a$$

où  $a$  désigne une constante, les autres notations étant les mêmes que dans le calcul précédent.

Pour obtenir l'expression du diagramme des impédances il suffit de remplacer dans les expressions (4) à (10) :

$$(\omega - \Omega) L_2 - \frac{1}{(\omega - \Omega) C} \quad \text{par} \quad (\omega - \Omega) L_2 - a$$

La résistance apparente du primaire devient ainsi :

$$R = \frac{\omega (\omega - \Omega) M^2 R_2}{R_2^2 + [(\omega - \Omega) L_2 - a]^2} \quad (19)$$

et la réactance apparente :

$$S = \omega \left[ L_1 - \frac{\omega (\omega - \Omega) M^2 [(\omega - \Omega) L_2 - a]}{R_2^2 + [(\omega - \Omega) L_2 - a]^2} \right] \quad (20)$$

Posons encore  $X = \omega L_1 - S$ ; l'élimination de  $(\omega - \Omega)$  entre les expressions de  $R$  et de  $X$  conduit à :

$$(R^2 + X^2) \frac{L_2}{\omega M^2} - a \frac{R}{R_2} - X = 0 \quad (21)$$

équation d'un cercle passant par les extrémités du dia-

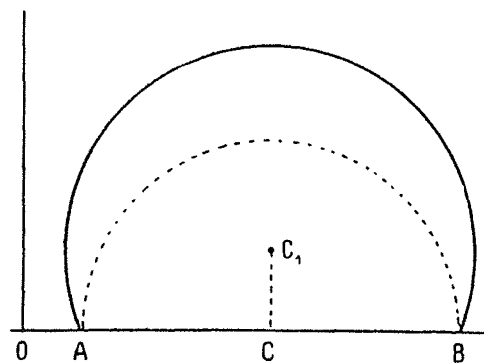


FIG. 5

mètre AB du diagramme circulaire d'impédance du moteur ordinaire ( $a=0$ ), et ayant son centre en  $C_1$  sur la perpendiculaire élevée au milieu C de AB et tel que :

$$CC_1 = \frac{a}{2 R_2} \frac{\omega M^2}{L_2} = \frac{a}{2 R_2} \omega (L_1 - N_1). \quad (\text{fig. 5})$$

Le diagramme d'intensité se déduit du précédent par inversion en prenant pour pôle le point O ( $OB = \omega L_1$ ) ; en choisissant convenablement l'échelle des courants, le même cercle  $C_1$  sera le diagramme cherché ; l'interprétation en est facile.

On emploie comme compensateur de phase une machine à collecteur polyphasée, de construction spéciale, qui est connectée aux bagues du moteur d'induction. Le rotor du compensateur comporte un enroulement en tambour relié à un collecteur ; les barres de cet enroulement sont logées dans les encoches des tôles. Si l'on envoie un courant polyphasé à travers les balais frottant sur le collecteur, par exemple le courant du rotor du moteur principal, le dispositif se comporte à l'arrêt comme une bobine de self et produit ainsi une chute de réactance et un décalage en arrière du courant. Pour un courant donné, cette chute de réactance ne dépend que de la fréquence, c'est-à-dire de la vitesse avec laquelle le champ tournant qui se produit dans le compensateur coupe l'enroulement. Si l'on réduit la vitesse relative du champ et de l'enroulement en faisant tourner ce dernier dans le même sens que le champ, la réactance et par suite le décalage décroissent pour atteindre enfin, au synchronisme, la valeur zéro. Si la vitesse dépasse celle du synchronisme, la réactance prend une valeur négative, et le compensateur se comportant dès lors comme une capacité décale le courant en avant. Si l'on considère que le courant amené au compensateur a une fréquence correspondant au glissement du moteur principal, soit 1 à 3 périodes, tandis que le nombre de tours du compensateur est choisi de telle façon que sa fréquence de rotation atteigne 30 à 50 périodes, il est clair qu'il se produira un courant fortement décalé en avant. Celui-ci servira de courant magnétisant pour le moteur d'induction qui n'empruntera donc au réseau que du courant watté. Par un dimensionnement convenable du compensateur, le moteur d'induction peut même fournir au réseau du courant décalé en avant.

CONSTRUCTION. — Le compensateur de phase présente en général la particularité qu'il ne possède pas de stator. Cependant, pour que les lignes de force puissent se fermer, un anneau de fer entoure l'enroulement du rotor. Ce que nous avons dit du principe de l'appareil permet de voir

<sup>(1)</sup> P. HERMANN. Fonctionnement et applications de l'excitatrice Leblanc *La Lumière électrique*, t. XXII. 1913, nos 23 et 25.

<sup>(2)</sup> Marius LATOUR. *Eclairage électrique*, 23 novembre 1901.



pourquoi le stator et son enroulement sont superflus pour le but à atteindre ; on peut d'ailleurs le préciser encore de la façon suivante :

Le problème à résoudre est de fournir à un moteur d'induction le courant magnétisant nécessaire à son excitation. Ce dernier, comme on l'a déjà dit, est dévatté, c'est-à-dire que sa production ne nécessite aucun travail. Il n'y a donc pas à transmettre d'énergie au rotor, c'est-à-dire à développer un couple et le stator servant à créer ce couple est inutile.

### COMMANDE DU COMPENSATEUR

La commande du compensateur de phase peut être réalisée de différentes façons. Si le moteur à compenser tourne suffisamment vite, on peut acoupler directement le moteur d'induction et le compensateur. Pour les moteurs d'induc-

démarrage effectué, le rotor du moteur principal est relié au compensateur par la manœuvre de la poignée du démarreur. Pour les intensités de courant élevées, ou si le compensateur est appliqué à un moteur d'induction existant, il est nécessaire de prévoir un commutateur spécial. Un verrouillage électrique empêche le démarrage du moteur principal tant que le groupe de compensation ne tourne pas et tant que le démarreur n'est pas dans la position de démarrage ; toute fausse manœuvre est rendue de ce fait absolument impossible.

**AVANTAGES.** — Le principal avantage du compensateur de phase, qui vient d'être décrit, réside dans sa grande simplicité et sa grande sécurité de marche. La construction simple et robuste de l'appareil, sa ventilation énergique permettant de le charger très fortement de sorte que ses dimensions restent faibles eu égard aux intensités en jeu (V. fig. 2).

Il est à remarquer encore qu'un moteur d'induction compensé au moyen de cet appareil conserve intégralement les propriétés du moteur asynchrone ; c'est ainsi que le glissement croît avec la charge, ce qui empêche les oscillations pendulaires et les décrochages.

Le facteur de puissance reste pratiquement égal à l'unité pour toutes les charges, sans aucun réglage. Le compensateur ne diminue pratiquement pas le rendement du moteur et même, dans certains cas, il l'améliore.

Le système est spécialement intéressant pour la construction des moteurs d'induction à marche lente. Si ceux-ci ne sont pas compensés, on doit, pour obtenir un facteur de puissance relativement élevé, les dimensionner plus largement que ne l'exige l'échauffement admissible. Aussi n'était-il pas possible jusqu'à présent de construire des moteurs d'induction pour de très basses vitesses, au-delà d'une certaine limite. L'emploi des compensateurs de phase du système décrit ci-dessus

permet de construire d'une façon économique des moteurs tournant dans les limites de vitesses les plus étendues. Il faut toutefois remarquer qu'un tel moteur construit pour fonctionner avec compensateur séparé ne pourra donner sa pleine puissance qu'en marchant avec le compensateur.

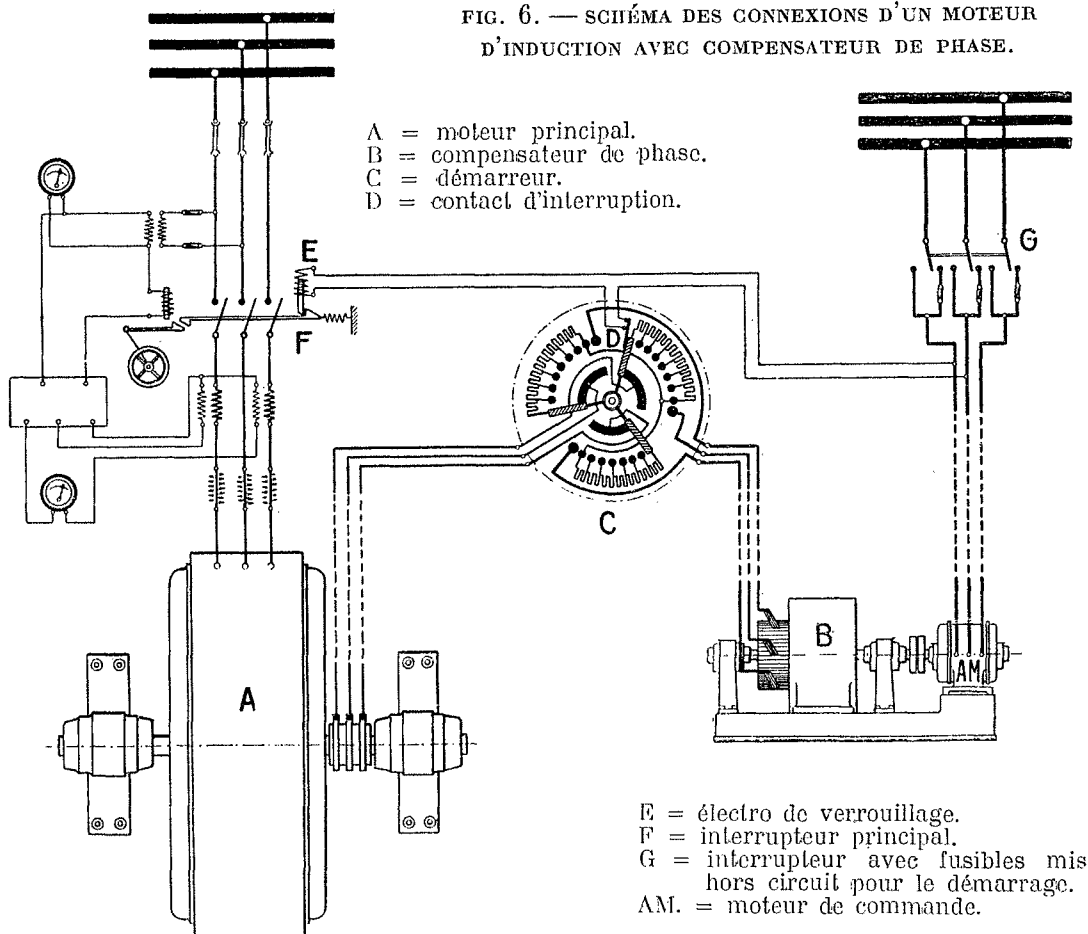
Le compensateur de phase, système Brown-Boveri, ne s'emploie pas seulement avec succès dans les installations nouvelles, mais il est encore très indiqué pour compenser le décalage de phase dans les installations existantes, dont les moteurs travaillent avec un mauvais facteur de puissance. Il faut remarquer toutefois que les bagues du moteur principal, laissant passer constamment le courant total du rotor, doivent, dans certains cas, être renforcées.

**CONNEXIONS.** — La figure 6 représente le schéma des connexions d'un moteur d'induction compensé.

Le moteur principal est relié au réseau au moyen de l'appareillage habituel. Le compensateur de phase est raccordé aux derniers contacts du démarreur, de sorte qu'une fois le

S'il s'agit de très gros moteurs ou si l'on désire obtenir un glissement supplémentaire, par exemple pour la commande de trains de laminoirs (pour faire entrer en action les masses des volants) il est bon, pour des considérations

FIG. 6. — SCHÉMA DES CONNEXIONS D'UN MOTEUR D'INDUCTION AVEC COMPENSATEUR DE PHASE.



d'ordre constructif, de munir le compensateur d'un enroulement de stator : dans ce cas, le compensateur comporte souvent deux collecteurs, en raison des grandes intensités en jeu.

Cette construction s'emploie également avec avantage dans les cas où l'on désire se servir du compensateur d'un moteur donné pour compenser le facteur de puissance de tout un réseau ; dans ce cas, le compensateur n'a pas seulement à fournir le courant magnétisant du moteur d'induction principal, mais il doit encore débiter le courant magnétisant nécessaire aux autres moteurs raccordés au réseau.

Le compensateur de phase ne peut être appliqué lorsque la vitesse du moteur d'induction doit pouvoir varier dans de grandes limites. Il est alors intéressant de prévoir le réglage de la vitesse par le système Brown-Boveri-Scherbius, dans lequel la compensation de phase s'effectue directement par le moteur triphasé à collecteur faisant partie du système.

**QUELQUES APPLICATIONS DU COMPENSATEUR DE PHASE.** — Ce compensateur de phase a déjà reçu des applications pratiques très variées.

Il convient particulièrement à la compensation de gros moteurs d'induction à marche lente, par exemple pour la commande des pompes à piston, des compresseurs, des débileuses dans les fabriques de papier et de cellulose, de trains de laminoirs, etc.

La figure 2 représente un moteur d'induction de 600 HP à 160 tours. Son facteur de puissance est ramené à l'unité par le compensateur représenté à droite sur la figure.

Dans la commande des trains de laminoirs, on doit compter avec un très mauvais facteur de puissance ; souvent celui-ci ne dépasse pas la valeur de 0,5 à cause des nombreux petits moteurs démarrant fréquemment ou faiblement chargés que comporte l'installation pour la commande des appareils de levage, des cylindres des chemins de roulement, etc. Les moteurs actionnant les trains de laminoirs eux-mêmes contribuent d'ailleurs à abaisser le facteur de puissance car ils ont en général une vitesse réduite et doivent être prévus, pour des raisons de construction, avec un grand entrefer, ce qui augmente encore le courant magnétisant. De plus, on est obligé, en considération des à-coups qui se produisent dans le service du laminage, de dimensionner très largement les moteurs qui, par suite, ne travaillent souvent qu'à une charge réduite. Il est avantageux de compenser ces moteurs et d'élever ainsi le facteur de puissance total de l'installation. Pour cette application, il est en général nécessaire, par suite des grandes intensités en jeu et de la chute de vitesse à obtenir au moteur principal, d'employer le type de compensateur à stator.

Le compensateur de phase se recommande également dans les glacières pour la commande des machines à doucir et à polir qui tournent à très basses vitesses et nécessitent des puissances de 300 HP environ pour la commande individuelle, et de 1 000 à 2 000 HP pour la commande par groupe.

Enfin le compensateur de phase est intéressant d'une manière générale dans les installations comportant un grand nombre de moteurs de faible puissance travaillant en même temps qu'un petit nombre de gros moteurs. Dans ce cas on peut surcompenser les gros moteurs pour fournir aux petits leur courant magnétisant et élever ainsi le facteur de puissance de la centrale. Il faut alors employer pour la compensation ceux des gros moteurs dont la charge varie le moins.

Les groupes convertisseurs avec moteurs synchrones des sous-stations peuvent être avantageusement remplacés par

des groupes avec moteurs asynchrones et compensateurs de phase ; cette dernière disposition, tout en conservant au facteur de puissance sa valeur « un », ce qui est le principal avantage des groupes à moteur synchrone, facilite le démarrage du groupe et supprime le danger des oscillations pendulaires et des décrochages.

Le groupe compensateur représenté par la figure 3 est particulièrement intéressant. Il fait partie d'une installation dans laquelle on s'est proposé de réduire la charge des génératrices et des canalisations par l'élévation de la tension à la centrale (de 2 700 à 3 300 volts). Comme toutefois l'élévation de la tension augmentait la consommation de courant magnétisant, le courant total n'aurait guère varié malgré la diminution du courant de travail si l'on n'avait muni quelques gros moteurs d'induction de compensateurs de phase destinés à fournir le courant magnétisant.

Le nouveau procédé de « balayage » des moteurs à gaz, qui permet d'augmenter sensiblement la puissance des moteurs existants donne lieu à une autre application intéressante du compensateur de phase. Cet accroissement de puissance des moteurs serait en effet sans utilité si on ne pouvait en même temps augmenter la capacité des génératrices correspondantes, ce qui est rendu possible par l'emploi de compensateurs de phase ; ceux-ci adjoints à de gros moteurs d'induction affranchissent les génératrices de la fourniture du courant magnétisant. Si l'on suppose par exemple que les génératrices aient été calculées lors de leur installation pour un  $\cos \varphi = 0,8$ , leur puissance peut être augmentée de 25 pour 100 par une compensation totale de l'installation, c'est-à-dire à  $\cos \varphi = 1$ .

Nous n'avons mentionné que quelques-unes des principales applications du compensateur de phase et celles qui ont déjà été sanctionnées par la pratique, mais il existe encore un très grand nombre d'autres problèmes pour lesquels le compensateur de phase constitue une solution simple, sûre et peu coûteuse (1).

## ELECTROTECHNIQUE

### LA COMMUTATION DANS LES MACHINES A COLLECTEURS (2)

(Suite)

#### IV. — Étude de la Composante Transversale de l'Induction Résultante $\mathcal{B}_r$

Sur le diagramme de la figure 8, l'amplitude  $I''$ , c'est-à-dire le coefficient de cette composante en  $\sin \Omega t$ , est :

$$\Omega \sin p\alpha \cos \varphi + p\omega' \cos p\alpha \sin \varphi$$

Ladite composante est en retard par rapport à  $\mathcal{B}_0 \cos \Omega t$  ; elle produit donc une f. é. m. d'induction qui sera en opposition avec  $\mathcal{B}_0 \cos \Omega t$ , c'est-à-dire avec le courant du stator.

Menons à chaque instant une droite TT' faisant l'angle  $\varphi$  avec yy' (fig. 8). Projurons-y les longueurs OA =  $\Omega \sin p\alpha$  et OB =  $(p\omega' \cos p\alpha)$  (OB étant, pour simplifier, porté en opposition de OB' =  $p\omega' \cos p\alpha$ ). Si, ayant construit  $\varphi_0$  et

(1) Il est à rappeler que l'idée première en est déjà ancienne, et est due à Maurice Leblanc et Marius Latour, ce qui le fait désigner aujourd'hui dans les revues, mêmes étrangères (E.T.Z.) sous le nom de Leblanc-Scherbius.

(2) Voir *La Houille Blanche*, nos de Décembre 1913 et Janvier et Mars 1914.