ÉLECTRICITÉ

Télérégage de la puissance et de la fréquence dans les grands réseaux à haute tension ⁽¹⁾

par L. BARBILLION, Professeur à la Faculté des Sciences de Grenoble

Introduction

Les dispositifs de réglage de groupes électrogènes que nous décrirons ci-dessous conviennent, en réalité, non seulement au télérégage, mais également à la réalisation d'un programme ou à de certaines conditions de fonctionnement prévues d'avance. Les problèmes qui se posent dans l'exploitation des réseaux interconnectés sont très variés ; les systèmes de commande et de réglage adoptés devront pouvoir s'adapter aux conditions les plus diverses. Le réglage électrique semble bien répondre à cette exigence.

Nature des problèmes de réglage

Les problèmes les plus caractéristiques sont les suivants :

a) Imposer à une machine ou une centrale donnée les fortes variations de la charge, afin de supprimer leurs répercussions sur le reste du réseau. Nous rappelons à cet effet que plus la caractéristique $C(\omega)$, (fig. 1) d'un groupe électrogène est inclinée, plus celui-ci participe aux variations de la charge. C'est ce que montre la fig. 1, sur laquelle nous avons supposé qu'il y a une diminution de la charge.

Fig. 1. — Groupes régleurs et groupes réglés.

b) Certaines conditions peuvent être imposées par la tarification : on fixe souvent une prime fixe, fonction de l'énergie maximum absorbée pendant 15 minutes dans un mois. On a intérêt à ne pas dépasser un échelon de tarif donné. Un consommateur qui possède lui-même une centrale fournissant une partie de la consommation pourra contrôler sa consommation de « 1/4 d'heure » et agencer sa centrale de façon que la valeur maximum de cette consommation ne soit pas dépassée.

c) Un des problèmes les plus difficiles, mais des plus intéressants, est le réglage de la puissance d'échange entre deux réseaux interconnectés. Ce réglage est intimement lié à celui de la fréquence :

(1) D'après l'article de M. NIERENBERGER dans le Bulletin de la Société Française des Electriciens d'octobre 1934, et l'ouvrage « La Technique des Installations de Télécommande dans l'exploitation des réseaux électriques », par STAEBLEIN, édité par Oldenbourg, Munich, 1934.

quence : la répartition de la puissance dans un réseau est d'autant plus facile à définir que la fréquence est constante, car ainsi l'échange de puissance entre machines est faible. On confie, en général, le maintien de la fréquence à plusieurs centrales. D'autres centrales sont, par contre, chargées d'assurer la fourniture dans la ligne d'interconnexion d'une puissance fixée d'avance suivant un horaire donné (1).

Lorsqu'il s'agit de réseaux bouclés ou de deux réseaux interconnectés par plusieurs lignes, il n'est, en général, pas possible de définir complètement les échanges d'énergie, en agissant uniquement sur les centrales. La répartition de la puissance s'effectue, en général, suivant les deux lois de KIRCHOFF.

Quand il s'agit, par exemple, de deux réseaux interconnectés par plusieurs lignes, l'écoulement d'énergie s'effectue de telle façon que la chute de tension soit la même dans les différentes lignes.

A un ensemble de n réseaux interconnectés, on peut, en général, imposer n conditions de réglage. Comme l'une des conditions est le maintien de la fréquence, il reste $n - 1$ possi-

Fig. 2. — Interconnexion de réseaux. Réglage des puissances.

bilités de réglage des puissances d'échange à leur valeur contractuelle, suivant un horaire donné. Ainsi, dans le cas de deux réseaux, il n'y a qu'une seule possibilité de réglage de la puissance d'échange. Dans le cas de trois réseaux bouclés (fig. 2) A, B, C, par trois postes 1, 2 et 3, on pourra réaliser le réglage de la puissance à deux endroits. Si le réseau A est, par exemple, chargé du maintien de la fréquence, les réseaux B et C pourraient régler chacun une puissance d'échange dans les postes 1 et 2. La puissance dans le poste 3 ne peut plus être prescrite. Lorsque la puissance fournie de A vers B augmente dans le poste 1, celle fournie de A vers C augmente également dans le poste 3.

Nous avons supposé, dans ce qui précède, que l'impédance des lignes restait constante. En agissant sur cette impédance, on réalise une répartition des puissances quelconque. Pour réaliser cette variation de l'impédance d'une ligne, on insère, par exemple, sur cette ligne, une tension inductive réglable.

(1) Du moment que l'on suppose la fréquence maintenue par ailleurs constante, il revient au même de raisonner sur la puissance ou sur le couple.

PREMIÈRE PARTIE

Etude générale du réglage électrique

A. — Réglage d'une puissance d'échange

PRINCIPE

Nous supposons d'abord qu'il s'agisse d'assurer la fourniture d'une certaine puissance d'échange P_e dont la valeur est prescrite d'avance par un programme. Le maintien de cette puissance à sa valeur prescrite sera confié à un groupe électrogène, dont l'alternateur fournit une puissance P_a . Le schéma de principe du réglage électrique est celui de la fig. 3.

L'appareil E est en liaison avec le système de télémessure et établi de façon qu'il émette un courant continu i_e proportionnel à la valeur actuelle existante P_e de la puissance d'échange

$$i_e = c_e P_e$$

D'autre part, le potentiomètre Z émet un courant continu i_z , constant, mais réglable, qui représente à l'échelle précédente une puissance P_z , telle que :

$$i_z = -c_z P_z$$

Fig. 3. — Réglage électrique d'une puissance d'échange. Schéma des dispositions possibles.

Enfin, un second potentiomètre A , en liaison avec l'admission de la turbine, émet un courant sensiblement proportionnel à la puissance P_a fournie par le groupe réglé

$$i_a = c_a P_a$$

Ces trois courants aboutissent dans un relais R qui sera en équilibre lorsque la somme des trois courants sera nulle :

$$\begin{aligned} i_e + i_z + i_a &= 0 && \text{ou} \\ c_e P_e - c_z P_z + c_a P_a &= 0 && \text{d'où} \\ P_e &= P_z - \frac{c_a}{c_e} P_a = P_z - c' P_a \end{aligned}$$

En conséquence, on a établi entre la puissance d'échange P_e et la puissance P_a , fournie par l'alternateur du groupe réglé,

une relation linéaire représentée par la droite Δ (fig. 4), dont l'ordonnée P_z , à l'origine, est définie par la position du potentiomètre Z (fig. 3). La puissance d'échange prescrite, P_{es} , sera réalisée (fig. 4) avec une puissance P_{a1} ou P_{a2} de l'alternateur suivant que la position du potentiomètre Z correspondra à la puissance initiale P_{z1} ou P_{z2} .

Fig. 4. — Réglage électrique d'une puissance d'échange. Représentation graphique.

LE PROCESSUS DU RÉGLAGE STATIQUE

Le processus du réglage est le suivant :

Supposons, pour fixer les idées, que pour une cause quelconque, la puissance d'échange dans la ligne d'interconnexion, primitivement égale à sa valeur prescrite P_{es} , vienne à augmenter d'une quantité p . Le point de fonctionnement passe (fig. 5) de M_1 en M_1' . Le relais R (fig. 3) n'est plus en équilibre et ferme le circuit d'alimentation du servomoteur de vannage M du groupe réglé, dans le sens d'une diminution de puissance. Le point de fonctionnement se déplace le long de la droite $M_1' M_2$ inclinée de 45° par rapport aux axes, car la

quantité dont diminue la puissance P_a fournie par l'alternateur se retranche de la puissance d'échange, toutes choses étant égales par ailleurs. L'équilibre s'établit au point M_2 , donc à une puissance supérieure de δp à la valeur prescrite. Cet écart est dû à l'inclinaison de la caractéristique Δ , c'est-à-dire au *statisme* du régulateur.

Le cas est analogue à celui d'un régulateur d'admission indirect mécanique asservi (fig. 6).

Une variation de puissance ΔP s'accompagne d'une variation de vitesse

$\delta\omega$ (fig. 7).

LE RÉGLAGE ASTATIQUE

Dans certains cas, on peut trouver fâcheux cet écart δp par rapport à la puissance prescrite. La première solution qui vient à l'esprit, apparemment la plus simple, serait la suppression de l'asservissement, c'est-à-dire du potentiomètre A (fig. 3.) La condition d'équilibre du relais R et de tout le système serait alors $i_e = i_z$, c'est-à-dire $P_e = P_z$. La caractéristique Δ (fig. 4, 5) devrait être une droite parallèle à l'axe des abscisses.

On sait qu'une telle solution (suppression de l'asservissement) est impraticable dans le cas du régulateur mécanique de vitesse (fig. 8), en raison des oscillations inévitables d'une

part, et de l'impossibilité du couplage en parallèle d'autre part. Pour des raisons analogues, l'emploi d'un régulateur électrique astatique (fig. 3 sans A) n'est possible que dans les cas simples. Tout d'abord, il est facile de voir que le couplage en parallèle de deux tels régulateurs est instable, en ce sens

Fig. 5. — Réglage statique d'une puissance d'échange. Représentation graphique.

que la répartition de la puissance n'est pas définie entre les deux machines réglées. La charge pourrait se déplacer d'une machine à l'autre. D'autre part, si le danger des oscillations non amorties n'est pas aussi imminent que dans le cas des régulateurs de vitesse mécaniques indirects non asservis, ces oscillations deviennent fatales lorsque, pour une cause quelconque, la puissance d'échange P_e ne suit qu'avec un certain retard λT la variation de la puissance P_a fournie par l'alternateur du groupe réglé, en désignant par T le temps nécessaire au réglage sans oscillation et par λ un facteur supérieur à un chiffre λ_0 , dont la valeur dépend de la nature du réglage (à vitesse constante, ou à vitesse proportionnelle à l'écart à corriger, etc.). Pour $\lambda < \lambda_0$, les oscillations sont amorties. Pour $\lambda > \lambda_0$, elles sont amplifiées avec le temps.

Bref, l'emploi d'un réglage électrique astatique ne convient que pour le réglage d'un seul groupe, et seulement lorsqu'on est assuré que la puissance d'échange suit sans retard notable les variations de puissance de l'alternateur du groupe réglé.

Fig. 6. — Analogie d'une régulation d'admission mécanique indirecte et asservie avec le réglage statique de la puissance d'échange.

LE RÉGLAGE STATIQUE AVEC CORRECTION ASTATIQUE

Dans le cas du régulateur indirect mécanique, lorsque l'on veut éviter l'écart $\delta\omega$ (fig. 7), dû à l'asservissement, la vraie solution consiste dans la compensation. Celle-ci revient, comme on le sait, à déplacer la caractéristique parallèlement à elle-même, comme l'indique la flèche f , de façon à ramener le nou-

veau point de fonctionnement de M_2 en M_2' sur la vitesse normale. La solution est, en principe, analogue dans le cas du réglage électrique (fig. 5) (1).

La figure 9 représente le schéma d'une réalisation de la compensation ou de la « correction astatique » dans le cas d'un régulateur indirect, c'est le régulateur « Isodrom ». Ses particularités essentielles consistent dans l'asservissement souple A constitué par un frein d'huile (dash-pot) et dans la suspension « du point fixe » F par les deux ressorts r_1, r_2 . Au début du réglage, le régulateur se comporte comme un régulateur purement statique, mais finalement le point F revient toujours dans sa position moyenne, ce qui signifie que le régulateur n'est en équilibre que pour une vitesse donnée. Le résultat final est donc le même que celui qu'on aurait obtenu avec un régulateur astatique.

Nous allons décrire maintenant la réalisation d'une compensation analogue du réglage statique de la figure 10. La figure 5 montre que la compensation consistera à modifier la valeur P_z , c'est-à-dire la position du potentiomètre Z, de façon à ramener la caractéristique Δ en Δ' , et le point de fonctionnement de M_2 en M_2' . C'est cette opération qui est effectuée automati-

Fig. 7. — Réglage statique avec correction astatique d'une puissance d'échange. Analogie mécanique avec la régulation compensée. Représentation graphique.

quement par le dispositif de compensation, au moyen du servomoteur M_z (fig. 10). Le relai R a le même rôle que dans le réglage statique ordinaire. Ici, il comporte deux enroulements, comme l'indique le schéma, mais sa condition d'équilibre est toujours

$$i_a + i_e + i_z = 0$$

autrement dit, il compare le courant i_e à la somme $i_a + i_z$, ou, ce qui revient au même, il contrôle, si le point de fonctionnement M (fig. 5) représentant la valeur existante P_e de la puissance d'échange est bien situé sur la caractéristique Δ correspondant à la valeur actuelle de P_z , c'est-à-dire à la position actuelle du potentiomètre Z (fig. 10).

Lorsqu'il survient une variation, par exemple $M_1 M_1'$ sur la figure 5, le relai R entre en action et effectue le réglage suivant la droite $M_1' M_2$, comme le régulateur statique ordinaire.

C'est alors qu'entre en action le relai de compensation R Z, identique au relai R, mais qui compare la somme $i_a + i_z$, non pas au courant i_e représentant la puissance d'échange existante,

(1) Remarquons que cette analogie est assez superficielle. En particulier, tandis que dans le cas du régulateur de vitesse le point M_2 se déplace le long de $M_2 M_2'$ (fig. 7) parallèlement à l'axe des vitesses (à puissance constante), dans le cas du réglage électrique de la puissance d'échange, la droite $M_2 M_2'$ est inclinée de 45° sur les axes, comme nous l'avons déjà expliqué.

mais à un courant i_s représentant la valeur *prescrite* P_s de cette puissance, courant émis par l'appareil S. Comme il existe un écart δp entre les deux puissances, ou encore entre les courants i_s d'une part, et $i_a + i_z$ d'autre part, le relais R Z ferme l'alimentation du moteur M Z qui agit sur Z, dans le sens convenable (diminution de i_z). Le courant i_z diminuant, le relais R entre de nouveau en action pour diminuer P_a . Finalement, lorsque les deux relais retrouvent leur équilibre, on a simultanément :

$$\begin{aligned} (R) \quad & i_e + i_s + i_z = 0 \\ (RZ) \quad & i_s + i_s + i_z' = 0 \end{aligned} \quad \text{d'où } i_e = i_s$$

On aurait pu comparer dans le relais R Z directement la valeur existante i_e à la valeur prescrite i_s , mais l'artifice de cette comparaison indirecte a fourni de meilleurs résultats dans la pratique.

PROCESSUS DE L'ÉCHANGE DE PUISSANCE ENTRE DEUX RÉSEAUX

Soit deux réseaux interconnectés A et B (fig. 11) et supposons que le réseau B fournisse au réseau A une puissance d'échange prescrite P_s . En général, la puissance P_R , produite par les centrales du réseau B, est supérieure à la consommation C_B de ce réseau et le supplément.

$$P_b = P_B - C_B$$

Fig. 8. — Impossibilité d'une solution astatique pure pour un réglage de la puissance d'échange. Analogie avec le régulateur mécanique d'admission.

s'écoule par la ligne d'interconnexion. On confie alors à un groupe (ou centrale) G la fourniture d'une puissance P_a , telle que l'on ait :

$$P_e = P_b + P_a = P_s$$

En supposant P_b constant, cette équation ($P_e = P_b + P_a$) représente une droite D (fig. 12), appelée « caractéristique du réseau », inclinée de 45° sur les axes. Le groupe G étant pourvu d'un réglage électrique du type que nous venons de décrire, le point de fonctionnement M_1 sera défini par l'intersection de la droite précédente D, avec la caractéristique Δ également rectiligne du réglage électrique, ayant pour équation :

$$P_e = P_z - c' P_a$$

Supposons que par suite de l'enclenchement d'un consommateur supplémentaire dans le réseau B, la puissance disponible P_b tombe brusquement de la valeur P_{b1} à P_{b2} . La caractéristique D du réseau passe de D en D'. Tout d'abord, ce sont les

régulateurs de vitesse qui entrent en action et le résultat de leur action est le passage du point de fonctionnement M_1 en

Fig. 9. — Schéma d'une réalisation de compensation ou de correction astatique dans le cas d'un régulateur indirect.

M'_1 . Le régulateur électrique de la puissance d'échange se met en marche et porte le point de fonctionnement en M_2 . S'il est pourvu du dispositif de compensation, ce dernier rétablit enfin la puissance d'échange à sa valeur prescrite en amenant M_2 en M'_2 , comme nous l'avons déjà dit à propos des figures 5 et 10.

Ce sera, d'autre part, le rôle des régulateurs de vitesse du réseau A, (fig. 11) (des centrales de maintien de la fréquence) de faire suivre à la puissance totale P_A produite par le réseau A, les fluctuations de la consommation C_A de ce réseau, ainsi que les fluctuations de la puissance d'échange reçue P_e , de façon à assurer à chaque instant l'égalité

$$P_A + P_e = C_A$$

Le diagramme de la figure 12 ne serait exact que si la fréquence était constante, condition qui n'est jamais rigoureusement réalisée. Néanmoins, ce diagramme est très utile, car il montre l'allure du réglage.

REMARQUE

Le servo-moteur M des figures 3 et 10 a, comme nous le savons, pour rôle d'augmenter ou diminuer la puissance P_a fournie par le groupe réglé, sans influencer la vitesse de celui-ci. Il peut agir directement sur le vannage de la turbine du groupe, ou de préférence sur le « point fixe » F du régulateur (fig. 6) de cette turbine. On provoque, dans les deux cas, un déplacement de la caractéristique ω (P ou C) parallèlement à elle-même (fig. 13). Mais, remarquons que ce déplacement de la caractéristique est *perpendiculaire* au déplacement que subit cette même caractéristique au cours de l'action du dispositif de compensation du régulateur mécanique, qui s'effectue, non pas à vitesse, mais à *couple constant* (fig. 7).

B. — Réglage de la fréquence

RÉGLAGE DE LA FRÉQUENCE EN GÉNÉRAL

On connaît le mécanisme du réglage de la fréquence. Les groupes ou les centrales chargés de ce réglage doivent supporter aussi complètement que possible les variations de la charge. Nous avons déjà rappelé à propos de la fig. 1 qu'une variation de charge se répartit entre différents groupes en raison de

l'inclinaison de leur caractéristique $C(\omega)$. Plus le coefficient $\frac{dC}{d\omega}$ d'une machine sera grand, plus elle participera à la va-

on tend, actuellement, à réaliser le maintien de la fréquence avec une précision telle que l'on ne puisse pas — paraît-il — réaliser des régulateurs mécaniques possédant un degré d'insensibilité suffisamment faible.

Fig. 10. — Compensation de réglage statique au moyen d'un servo-moteur.

riation de charge. La centrale chargée du maintien de la fréquence devra donc posséder un coefficient $\frac{dC}{d\omega}$ très grand, qui peut être, dans le cas extrême, égal à ∞ , ce qui correspond à une caractéristique $C(\omega)$ parallèle aux ordonnées.

RÉGLAGE MÉCANIQUE

Les régulateurs mécaniquement asservis et compensés, par exemple, le régulateur « Isodrom » (fig. 9), permettent de réaliser cette condition $\left(\frac{dC}{d\omega} = \infty\right)$, en faisant abstraction de la période de réglage pendant laquelle ils se comportent comme des régulateurs statiques et pendant laquelle le réglage affecte, en général, la forme d'une oscillation amortie.

Fig. 11. — Processus de l'échange de puissance entre deux réseaux. Rôle des stations régulatrices et de leurs régulateurs de vitesse.

Les régulateurs mécaniques possèderaient donc, de ce point de vue, les qualités nécessaires pour ce genre de réglage. Mais,

RÉGLAGE DE LA FRÉQUENCE MOYENNE

Dans ce dernier cas, la valeur désirée est définie par une horloge astronomique au mouvement duquel on compare celui d'une horloge synchrone. On peut ainsi atteindre une très grande précision et réaliser une caractéristique statique à inclinaison réglable (fig. 11), en rendant le couple fourni par la machine réglée fonction de l'écart avec l'horloge astronomique. En supposant que tous les régulateurs utilisent la même horloge astronomique pour l'émission de la valeur désirée, l'écart δt est le même pour toutes les machines, d'où la possi-

Fig. 12. — Processus de l'échange de puissance entre deux réseaux. Représentation graphique.

bilité d'une répartition bien définie de la puissance, que l'on

pourra modifier à volonté en agissant sur la pente des caractéristiques, tout en maintenant la valeur moyenne de la fréquence à une valeur constante.

Il se peut également que chaque centrale ait son horloge astronomique. Ces horloges étant, en général, d'une grande précision, leur écart ne dépasse guère une faible fraction de seconde (0,2 sec., par exemple) par jour. Il en résulte un déplacement ε des caractéristiques (fig. 15) des centrales, l'une par rapport à l'autre, qui croît très lentement avec le temps, ayant pour effet un déplacement de la charge d'une centrale à l'autre (dans le cas de la figure, de 2 vers 1), déplacement toujours suffisamment lent pour qu'une mise au point manuelle une ou deux fois par jour soit suffisante.

On peut compléter ce réglage par horloge par une *correction astatique* et maintenir à une valeur rigoureusement constante la valeur moyenne (intégrée) de la fréquence. On peut encore réaliser ce maintien rigoureux de la fréquence moyenne en faisant travailler l'appareillage de réglage en fonction de l'*écart intégré* de la fréquence, par rapport à une fréquence rigoureusement constante provenant, par exemple, d'un maître oscillateur ou d'un diapason de haute précision. On peut employer à cet effet, par exemple, un moteur d'induction à double alimentation qui tourne à une vitesse correspondant à la différence des deux fréquences. Son chemin total parcouru correspond à l'écart intégré en fonction du temps des deux fréquences. Ce réglage permet, sans autre, le raccordement de pendules et horloges électriques synchrones dans le réseau (1).

Fig. 13. — Solution du problème précédent par déplacement de la caractéristique $\omega(P)$ ou $\omega(C)$.

RÉGLAGE DE LA FRÉQUENCE INSTANTANÉE

Il est indispensable d'assurer le réglage de la valeur instantanée, ou, plus exactement, le *réglage à action rapide de la valeur moyenne* de la fréquence, le seul efficace, lors d'une brusque variation de la charge. En vue de ce réglage, l'horloge astronomique ne peut pas servir pour fournir la « valeur désirée », car le pendule battant la seconde n'assure pas la continuité nécessaire des mesures. La comparaison ne pourrait s'effectuer que toutes les secondes. La solution consiste, par exemple, à transmettre depuis le poste répartiteur (dispatcher) une fréquence acoustique normale à toutes les centrales du réseau. On peut encore installer dans toutes les centrales des maîtres oscillateurs ou des diapasons de haute précision.

(1) Ce réglage de la fréquence moyenne peut aussi être simplement manuel. Il suffit de comparer le mouvement d'une horloge synchrone à celui d'une horloge astronomique à l'aide d'un mouvement différentiel qui indique les écarts avec une grande précision. Il suffit d'intervenir de temps à autre à la main dans le réglage pour corriger l'écart de la fréquence, c'est-à-dire ramener à zéro la différence de marche des deux horloges.

RÉGLAGE COMBINÉ DE LA FRÉQUENCE ET D'UNE PUISSANCE D'ÉCHANGE

Signalons enfin que l'on préconise encore de faire participer les mêmes groupes, les mêmes centrales simultanément, et au réglage de la fréquence, et au réglage d'une puissance d'échange. On peut, en effet, combiner le réglage d'une puissance d'échange au réglage statique de la fréquence par horloge, suivant un criterium de réglage composé. Lorsque, par exemple, la puissance d'échange prescrite varie de 1000 kW., la part de la machine réglée est de $x = 1000$ kW., et lorsque la fréquence varie de 0,01 p.p.s. cette part devient de $y = 1000$ kW. Ce genre de réglage présenterait l'avantage de répartir les variations de charge d'une façon déterminée et plus uniforme sur tout le réseau.

Fig. 14. — Réglage de la fréquence moyenne. Régulation électrique à forte pente réglable de la caractéristique $C(\omega)$.

C — Les qualités principales des régulateurs électriques

Il existe, comme nous l'avons fait déjà remarquer, une certaine analogie entre les régulateurs électriques qui nous occupent et les régulateurs indirects mécaniques. Ces régulateurs électriques comparent comme ceux-ci la valeur réelle de la grandeur réglée à la valeur désirée et, suivant le sens de l'écart constaté, mettent en marche le servo-moteur de commande dans un sens ou dans l'autre. Comme avec les régulateurs indirects mécaniques, la grandeur réglée ne pourra pas être maintenue d'une façon rigide. Il est tout d'abord nécessaire que des variations se produisent pour vaincre l'*insensibilité* du régulateur et amorcer le fonctionnement de celui-ci. La valeur réelle pourra s'écarter notablement de la valeur prescrite, au cours de la période de réglage, pour revenir à cette valeur généralement sous la forme d'une oscillation amortie. L'allure de cette oscillation dépend surtout de la *vitesse de réglage*. Cette vitesse ne doit pas dépasser une certaine limite, au delà de laquelle des surréglages et, en conséquence, des oscillations importantes seraient à craindre. L'*inertie* des appareils de réglage doit être réduite au minimum, car elle peut favoriser aussi les surréglages et oscillations.

Ainsi, les principales caractéristiques d'un régulateur sont : l'insensibilité, l'inertie et la vitesse de réglage.

L'insensibilité doit être réduite au minimum. Elle ne doit pas être, dans certains cas, inférieure à une certaine limite et il peut être utile de pouvoir la faire varier à volonté.

La vitesse de réglage doit également être variable à volonté. Comme dans les régulateurs électriques, on emploie, en général, des servo-moteurs à vitesse constante ; on s'arrange à les faire tourner suivant le mode « pas-à-pas ». Pour augmenter la vitesse de réglage, on peut, soit augmenter la durée de chaque impulsion,

soit diminuer l'intervalle qui sépare deux impulsions successives. Le choix de cette vitesse de réglage est très important. Si elle est trop faible, le réglage n'est pas effectué assez rapidement ; si elle est trop forte, il en résulte des sursurajages et des oscillations. Généralement, on rend la vitesse proportionnelle à l'écart à corriger. Il peut même être utile que le coefficient de proportionnalité soit plus grand pour les écarts importants que pour les faibles variations.

Fig. 15. — Régulation électrique de la fréquence moyenne. Influence d'un lent déplacement des caractéristiques $C(\omega)$.

DEUXIÈME PARTIE

Réalisation des régulateurs électriques

A. — Régulateurs de puissance

La comparaison entre la valeur réelle et la valeur prescrite peut être effectuée, comme le montrent schématiquement les figures 3 et 10, par un branchement différentiel des polarités, dans un système à trois fils. Comme le réglage est effectué de préférence par impulsions, c'est-à-dire par « pas-à-pas », ce qu'on doit obtenir, ce n'est pas une simple fermeture de contact, mais une série de fermetures successives, un train d'impulsions. Entre deux impulsions, on donne à la grandeur réglée le temps de réagir sur l'impulsion de réglage.

L'interruption répétée du réglage est donc en même temps un dispositif d'asservissement. Comme l'asservissement d'un régulateur indirect mécanique, l'interruption revient à prévoir, en quelque sorte, l'effet de l'action du réglage, qui se produit toujours avec un certain retard. Au bout d'un temps donné, la comparaison entre valeurs réelle et prescrite est recommencée et, si le résultat du réglage n'est pas encore parfait, il se produit de nouveau un pas de réglage plus petit.

La réalisation de ce principe peut différer beaucoup suivant le caractère des impulsions que l'on veut réaliser et suivant la nature du système de réglage, ainsi que le montreront les quelques exemples qui suivent.

Fig. 16. — Réglage avec dispositif de faux asservissement. Système à trois fils.

I. — LE DISPOSITIF DE « FAUX ASSERVISSEMENT »

C'est une réalisation directe du principe de l'asservissement, appliqué à un système de réglage à courant continu à trois

fils, du genre de ceux représentés par les figures 3 et 10. La figure 16 montre le schéma de ce dispositif. Les appareils E et S sont les émetteurs des courants i_e et i_s respectivement proportionnels aux puissances existante et prescrite (1). Lorsque $i_e = i_s$, le relais R est en équilibre. Lorsque $i_e > i_s$, il ferme le circuit du relai auxiliaire r , qui provoque à son tour la mise en marche du servo-moteur de réglage dans le sens d'une diminution de la puissance existante, donc de i_e . Mais, en même temps, le relai r ferme le contact c , de façon que tout se passe comme si le courant i_e , représentant la valeur à régler, était diminué du courant Δi qui passe par la résistance δ . Le résultat du réglage est en quelque sorte devancé.

Le relais de réglage R atteint son état d'équilibre et le relais auxiliaire r décolle avec un faible retard. A ce moment, la valeur réelle n'est plus faussée et une comparaison exacte se produit. Le retard au décollage du relai auxiliaire a produit un certain sursurajage, qui peut être dimensionné, de façon qu'il représente bien l'allure des variations survenues dans l'exploitation du réseau. Lorsqu'il y a encore une différence entre les deux valeurs, un nouveau pas de réglage s'établit et, de nouveau, est interrompu prématurément. Par un ajustage convenable des temps de temporisation et des courants Δi faussant la comparaison, on peut rendre très petit le nombre de pas nécessaire pour un réglage. On peut faire mieux, en rendant les courants Δi et les temps de temporisation, eux-mêmes fonctions de l'écart à corriger, de façon à correspondre fidèlement aux conditions du réseau. Ce système convient dans le cas d'un réseau dont les conditions d'exploitation restent à peu près constantes. Une mise au point du système, à chaque nouvelle condition du réseau, est nécessaire.

Fig. 17. — Dispositif émetteur d'impulsions proportionnelles à l'écart à régler.

II. — DISPOSITIF ÉMETTANT DES IMPULSIONS PROPORTIONNELLES A L'ÉCART A RÉGLER

Un tel dispositif est représenté par la figure 17. L'équipage de mesure M déplace le bras de contact K , muni de deux pièces

(1) Nous supposons qu'il s'agisse d'un réglage de puissance d'échange. Des appareils de même genre peuvent, naturellement, servir au réglage d'une grandeur quelconque.

de contact k_1 et k_2 . Lorsqu'il y a équilibre, le bras de contact se trouve dans la position médiane et les contacts ne touchent pas les roues à rochets $R+$ et $R-$. Ces roues à rochets sont commandées par un moteur, par l'intermédiaire du même arbre a , à vitesse constante. Lorsque l'équipage de mesure constate une petite différence, le contact correspondant touche les dents de la roue correspondante pendant une partie, d'autant plus longue, de la révolution, que l'écart constaté est plus important. On obtient ainsi des impulsions courtes de réglage, dont la durée peut être rendue dans une certaine étendue proportionnelle à la différence mesurée par une forme appropriée des dents.

L'appareil de mesure M peut être, par exemple, le relai R des figures 3 et 10. Il suffit d'un couple très faible pour obtenir un bon contact par le frottement des lames à ressorts des contacts k_1 et k_2 sur les roues à rochets.

III. — RÉGLAGE COMBINÉ AVEC TÉLÉMESURE A IMPULSIONS DE DURÉE PROPORTIONNELLE A LA GRANDEUR MESURÉE

Nous décrirons maintenant une réalisation dans laquelle les grandeurs à comparer ne sont pas transformées en courants continus proportionnels, mais en impulsions de durée proportionnelle. Ce système s'adapte avantageusement aux nombreux dispositifs de télémesure, qui émettent, pour caractériser la grandeur mesurée, des impulsions de courant de durée proportionnelle à cette grandeur. La réalisation de ce système est particulièrement simple, comme on le verra plus loin, seulement sa mise au point est plus délicate que celle des systèmes précédents, dans lesquels les grandeurs à comparer sont représentées par des courants continus proportionnels.

Le fonctionnement de ce système ressort du schéma de la figure 18. Il comporte simplement deux relais, RS et RE , actionnés, l'un par les impulsions s représentant la valeur prescrite (P_s) et l'autre, par les impulsions e représentant la valeur existante (P_e) de la puissance d'échange. Ces relais actionnent un jeu de quatre interrupteurs insérés dans les

circuits $r+$ et $r-$, fournissant au servo-moteur de réglage SM des impulsions de réglage en plus ou en moins. Lorsque les deux relais ne sont pas excités, les deux circuits sont ouverts. Il en est de même lorsque les deux relais sont excités simultanément. Mais, lorsque RS est seul excité, il y a fermeture du circuit $r-$. Lorsque RE est seul excité, il y a fermeture du circuit $r+$. Ceci posé, on comprendra le schéma du fonctionnement, à droite sur la figure.

Les impulsions de mesure arrivent à des intervalles réguliers T_0 ; e représente les durées des impulsions de la valeur réelle représentée en $P_e(t)$; s représente les durées des impulsions de la valeur prescrite tracée en $P_s(t)$ et supposée constante.

Le commencement de l'émission des deux impulsions est simultané. Lorsque $e = s$, comme pendant la première période, il n'y a pas d'impulsion de réglage. Mais, au cours de cette période, la puissance réelle a diminué d'une quantité ΔP_1 . L'impulsion e suivante diminue également, d'où une impulsion de réglage en plus $r+$. S'il n'y avait pas de retard dans le réglage, la puissance augmenterait suivant la droite en pointillés. Pratiquement, elle suit la courbe indiquée, de façon que pendant la période suivante, il y a un nouveau pas de réglage $r+$, plus petit. Le pas de réglage va en diminuant et le réglage est réalisé d'une façon aperiodique.

La variation ΔP_2 de la puissance d'échange, en plus, produit un réglage analogue en sens inverse par des impulsions $r-$.

Le réglage précédemment décrit est purement astatique. Pour le rendre statique, il suffit de ne pas faire la comparaison directement avec la valeur prescrite, mais avec la puissance P_a de la machine, plus exactement avec une puissance $P_z = c' P_a$ (comme sur la fig. 3), que l'on transforme également en impulsions de durée proportionnelle. Le relai R de la figure 3 est remplacé par le système de deux relais RE et RS , de la figure 18.

Pour réaliser une correction astatique, on a ajouté sur la figure 10 un nouveau relai RZ identique à R , afin de comparer la puissance existante $P_e = P_z = c' P_a$ à la puissance prescrite P_s . Le procédé sera analogue dans le cas actuel. On ajoutera

au système de deux relais RE et RS un deuxième système identique, qui effectuera la comparaison des impulsions représentant la puissance prescrite, à celles représentant la puissance existante. Ce deuxième système agit dans un deuxième réglage superposé, d'où un déplacement de la caractéristique vers le haut ou vers le bas.

IV. — RÉGLAGE COMBINÉ AVEC TÉLÉMESURE A IMPULSIONS DE FRÉQUENCE PROPORTIONNELLE A LA GRANDEUR MESURÉE

Ce dispositif (fig. 19) peut être employé avec un système de télémesure à fréquence d'impulsions, dans lequel la grandeur à régler (puissance d'échange dans le cas actuel) est caracté-

Fig. 18. — Réglage combiné avec télémesure à impulsions de durée proportionnelle à la grandeur mesurée.

sée par une suite d'impulsions, dont la fréquence est proportionnelle à cette grandeur. D'une part, la fréquence caractérisant la grandeur réelle (P_e), d'autre part, celle caractérisant la

le chemin parcouru par le levier de contact, donc, non pas les valeurs *instantanées*, mais les valeurs *intégrées* des deux puissances.

Fig. 19. — Réglage combiné avec télémessure à impulsions de fréquence proportionnelle à la grandeur mesurée. Détail.

grandeur prescrite (P_s), sont transformées en une vitesse de rotation par les deux relais de rotation R_e et R_s . Chaque impulsion fait avancer d'un pas les pôles du relais correspondant. Tant que les deux systèmes tournent à la même vitesse, les contacts d'un système de leviers, qui relie les deux systèmes, restent ouverts ; sinon, il y a fermeture avec l'un ou l'autre contact dans le système de leviers. Mais, le contact est interrompu à chaque nouvelle impulsion par le débrayage à ressort r . Le levier à contact l est toujours remis dans la position médiane de la fourche f . Lorsque, après le déplacement du bras de contact, il reste encore une différence entre les valeurs réelle et prescrite, la différence des vitesses de rotation produit de nouveau un contact après un temps sensiblement inversement proportionnel à la valeur de la différence. Le point mort des contacts est, en effet, traversé d'autant plus vite que la différence des deux valeurs de comparaison est plus grande.

Fig. 20. — Dispositif émetteur de la valeur contractuelle de la puissance.

Le même principe de régulateur peut être également réalisé par l'utilisation d'un engrenage différentiel. La fourche de contact est alors fixe et le levier de contact se déplace par rapport à cette fourche à la vitesse différentielle.

Le débrayage est nécessaire pour éviter un surrégime, car, sans cela, ce ne serait plus la vitesse qui serait comparée, mais

Fig. 21. — Dispositif semi-automatique émetteur de la valeur contractuelle de la puissance.

Emetteur de la valeur contractuelle de la puissance

Dans la pratique, il est important de pouvoir déplacer à volonté, manuellement ou automatiquement, l'index de l'appareil émetteur de la valeur contractuelle ou prescrite. Dans le cas habituel, où l'appareil émet un courant continu proportionnel à la valeur indiquée, le changement de la valeur indiquée revient simplement au déplacement du curseur d'un rhéostat ou d'un potentiomètre. Comme les valeurs d'un programme contractuel à régler sont connues pour 24 heures à l'avance, on peut utiliser un dispositif automatique du genre de celui représenté par la figure 20, dans lequel la courbe du programme journalier de puissance contractuelle est découpée dans une feuille de papier, déplacée par un mouvement d'horlogerie au moyen des tambours T et guidée par les pièces G . Le doigt explorateur D , donc en même temps l'index I , se trouvent ainsi, à tout instant, à la hauteur correspondante du programme journalier. Les augmentations de charges doivent être prévues suffisamment progressives, c'est-à-dire les rampes du diagramme suffisamment faibles, pour que le doigt explorateur ne soit pas bloqué. Comme on est libre de choisir l'échelle du temps, il n'y a, de ce côté, aucune difficulté.

La valeur de la puissance prescrite garde dans de nombreux cas une valeur constante pendant plusieurs heures et il suffit d'intervenir de temps en temps pour faire passer la puissance d'une valeur à l'autre. On peut employer, dans ce cas, un dispositif semi-automatique, par exemple, celui de la figure 21. La puissance prescrite est définie par la position de l'index I_s qui peut être déplacé par un servo-moteur M à une vitesse réglable à volonté par le rhéostat R . On peut graduer ce rhéostat en kW : mn. Supposons que l'on veuille passer d'une puissance P_1 à une autre P_2 . A cet effet, on déplace à la main l'index auxiliaire I_2 , qui est normalement superposé à I_1 , à cette nouvelle valeur de la puissance. On ferme ainsi, par l'inter-

médiaire du contact $c +$, l'alimentation du moteur, de façon que celui-ci commence à entraîner l'index I_1 vers la nouvelle valeur de la puissance, mais à la vitesse choisie sur le rhéostat R . Lorsque l'index I_1 se superpose à l'index I_2 , le contact est rompu en $c +$, et le moteur s'arrête.

B. — Régulateurs de fréquence

I. — RÉGLAGE DE LA VALEUR INSTANTANÉE DE LA FRÉQUENCE

Un des dispositifs des plus simples est celui de la figure 17, dans lequel on remplace l'équipage de mesure M par un fréquencesmètre. On réalise ainsi un régulateur à caractéristique purement astatique, qui ne conviendra donc que dans les cas simples, car on ne peut en coupler plusieurs en parallèle.

On peut réaliser un régulateur de fréquence *statique*, éventuellement, avec correction astatique, suivant un schéma analogue à ceux des régulateurs de puissance (fig. 3 et 10). Il faut transformer alors la variation de la fréquence en courant continu proportionnel, avec une précision suffisante. On n'aura donc qu'à remplacer l'appareil E , récepteur de télémessure (fig. 3), par un appareil fréquencesmètre, qui peut effectuer cette transformation.

On obtient ainsi une caractéristique $\omega(c)$ analogue à celle d'un régulateur mécanique normal (fig. 7). On peut la déplacer parallèlement à elle-même ou changer son inclinaison à volonté. La répartition des charges peut être modifiée bien plus aisément qu'avec les régulateurs mécaniques.

II. — RÉGLAGE SIMULTANÉ DE LA FRÉQUENCE ET DE LA PUISSANCE

Nous avons déjà dit qu'on peut combiner ces deux réglages, de façon à faire participer la machine réglée aussi bien au maintien de la fréquence qu'au maintien de la puissance d'échange en un point d'interconnexion.

La figure 22 représente le schéma d'un tel réglage de fréquence et de puissance combiné. Le réglage de la puissance s'effectue, comme sur la figure 10, avec laquelle l'analogie est évidente. Ici le relai R est également influencé par le courant i_g représentant la valeur existante de la fréquence et émise par l'appareil E_f . Il est, par exemple, nul à 49 p.p.s. et maximum à 51 p.p.s. Les courants i_e et i_g passent par le diviseur de courant D pour traverser l'enroulement du relai régulateur, seulement dans les proportions αi_e et βi_g ($\alpha, \beta < 1$). La condition d'équilibre de R s'écrit donc

$$\alpha i_e + \beta i_g + i_h + i_z = 0$$

Le réglage possède donc simultanément deux caractéristiques dont on peut changer l'inclinaison à volonté, en déplaçant les index du diviseur de courant.

Les relais RZ_p et RZ_f servent respectivement à la correction astatique (compensation), soit par rapport à la puissance d'échange, soit par rapport à la fréquence. On met en fonctionnement l'un ou l'autre par le commutateur C . Comme l'appareil S émet le courant i_s représentant la valeur prescrite de la puissance d'échange, l'appareil S_g émet le courant i_{st} représentant la valeur prescrite de la fréquence.

III. — RÉGLAGE DE LA VALEUR MOYENNE (INTÉGRÉE) DE LA FRÉQUENCE

Un tel réglage a pour but de permettre le branchement de pendules et horloges synchrones sur le réseau. Ce réglage s'effectue en se basant sur la comparaison entre une horloge synchrone et une horloge astronomique, dont on peut mettre en évidence la différence de marche, par exemple, par un mouvement différentiel. Il est facile de voir qu'un réglage astatique réglant en fonction de cette différence de marche, qui représente l'écart intégré de la fréquence en fonction du temps, entraîne des oscillations non amorties. La différence de deux horloges est maximum lorsque l'écart de fréquence est nul et inversement. L'asservissement est indispensable.

On peut employer, par exemple, le schéma de la figure 19 dans lequel on remplace les deux relais R_e et R_s respectivement par une horloge synchrone et une horloge astronomique. Il existe dans le fonctionnement de ce système une espèce de « faux asservissement », car dès que l'écart intégré des deux mouvements atteint une certaine valeur, un pas de réglage se produit, l'impulsion est automatiquement interrompue par les ressorts r , comme si l'écart était déjà corrigé. On donne ainsi le temps à la machine de réagir à l'impulsion. Lorsqu'une impulsion de réglage a été suffisante pour corriger l'écart, le régulateur reste au repos. Dans le cas contraire, un nouveau pas de réglage est effectué au bout d'un temps d'autant plus long

Fig. 22. — Réglage simultané de la fréquence et de la puissance. Représentation schématique.

que l'écart rémanent est plus faible. La tendance aux oscillations n'existe plus.

Pour pouvoir faire travailler plusieurs régulateurs de la fréquence moyenne en parallèle, il faut réaliser un asservissement réel, c'est-à-dire rendre la différence de marche des deux horloges fonction de la puissance réelle de la machine (fig. 14). Dans ce cas, le réglage dépasse le but du maintien de la fréquence en vue de raccorder des pendules synchrones, pour devenir un moyen précieux de marche en parallèle de plusieurs centrales dans un réseau. On peut ainsi répartir le maintien de la fréquence sur plusieurs centrales, tout en réalisant une répartition de puissance bien définie, en même temps qu'une fréquence moyenne rigoureusement constante.

Un tel réglage est représenté sur la figure 23, toujours analogue au schéma de la figure 10. Pour augmenter la précision du réglage, on contrôle dans le relai R la valeur instantanée de la fréquence, caractérisée par le courant i_f émis par l'appareil E . L'équation d'équilibre de ce relai est :

$$i_f + i_a' + i_r = 0 \quad (1)$$

ce qui correspond à une caractéristique d'inclinaison réglable en agissant, par exemple, sur le rhéostat r' et d'ordonnée à l'origine réglable, en agissant sur la valeur i_z , c'est-à-dire sur le potentiomètre Z .

Le relai de correction astatique RZ agit suivant le mécanisme déjà connu sur ce potentiomètre Z . Son équation d'équilibre est :

$$i_s + i''_a = 0 \quad (2)$$

où i_s est le courant continu émis par le potentiomètre PH , proportionnel, comme on le voit, à l'écart des deux horloges

synchrones HS et astronomique HA . Le relai RZ déplace donc la caractéristique (1) parallèlement à elle-même, en agissant sur i_z , de façon à vérifier à chaque instant l'équation (2). Cette dernière signifie que l'écart entre les deux horloges est zéro à

Fig. 23. — Réglage de la valeur moyenne (intégrée) de la fréquence. Représentation schématique.

vide et maximum à pleine charge (fig. 14). Ce maximum est de l'ordre de la seconde, d'où la nécessité d'appareils très sensibles, influencés par des différences de fractions de seconde entre les deux horloges.

L'analogie des différents schémas montre la possibilité de réalisation, au moyen de ces différents éléments de réglage, des conditions d'exploitation les plus compliquées.