

Zeitschrift:	Bulletin technique de la Suisse romande
Band:	85 (1959)
Heft:	21
Artikel:	Étude théorique des conditions de stabilité des dispositifs de réglage secondaire
Autor:	Watteville, H. de
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-64143

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: 26.01.2026

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

calcul utilisé par la machine sera sensiblement augmenté.

Un pas de plus a été franchi par l'invention des programmes d'assemblages tels que FORTRAN (programme de *Formulation Transposée*). Dans ce système, le mathématicien n'a plus à faire que le 15 à 20 % du travail total nécessaire au passage des problèmes en machine. Il lui suffira d'écrire les formules mathématiques en respectant certaines règles (qui peuvent d'ailleurs être apprises en quelques heures) et la machine, dans une phase préalable d'assemblage, construira le programme, écrit dans son langage propre, nécessaire pour le calcul des formules qui lui auront été données. Le programme ainsi établi automatiquement par l'ordinateur sera un « bon programme », c'est-à-dire qu'il utilisera la machine au maximum ou, en d'autres termes, qu'il nécessitera un temps minimum lors de l'exécution des calculs. Un énorme avantage de ces systèmes est de permettre à des personnes ne connaissant pas une machine de pouvoir l'utiliser après quelques heures d'étude.

Lorsqu'un système interprétatif est tellement perfectionné qu'il transforme réellement la machine pour laquelle il est écrit en une autre machine, on peut l'appeler un *programme de simulation*. C'est un tel

système qui a été développé pour l'Ordinateur IBM 650 et qui le transforme en une machine capable de faire de l'algèbre matricielle. Dans ce système, une opération matricielle telle que :

- addition ou soustraction de deux matrices ;
- multiplication de deux matrices l'une par l'autre ou d'une matrice par un nombre ;
- transposition, inversion d'une matrice ;
- etc.

peut être programmée au moyen d'une seule instruction. Une suite d'opérations matricielles qui, sur une machine normale, nécessite l'utilisation successive de plusieurs programmes (un par opération) peut être effectuée sans autre par la machine munie de son programme de simulation, et surtout entièrement automatiquement. Il est inutile d'insister sur la puissance d'un tel programme et les services qu'il peut rendre pour la résolution de tous les problèmes faisant intervenir des matrices.

Nous avons voulu, par cet exemple, mettre en évidence le fait que l'emploi des ordinateurs modernes dépasse le cadre de la résolution de problèmes particuliers, même très difficiles et que, considérés sous un aspect plus général, ils peuvent nous amener à forger de puissants instruments de travail.

ÉTUDE THÉORIQUE DES CONDITIONS DE STABILITÉ DES DISPOSITIFS DE RÉGLAGE SECONDAIRE

PAR ANALYSE DE LA REPRÉSENTATION LOGARITHMIQUE, GAIN-PHASE, DE LA
FONCTION DE TRANSFERT A BOUCLE OUVERTE,
DES ÉLÉMENTS CONSTITUTIFS DES DIVERSES CHAÎNES DE RÉGLAGE¹

par H. DE WATTEVILLE, ingénieur à la Société Les Télétransmissions Electroniques, Paris

SOMMAIRE :

L'interconnection des grands réseaux électriques a posé le problème du réglage de la puissance produite à l'intérieur de chaque réseau, de façon à limiter les échanges entre réseaux à des valeurs de consigne, tout en permettant le libre jeu de l'entraide apportée par la mise en commun des statismes des réseaux (1).

L'étude des conditions de stabilité de tels dispositifs de réglage secondaire est assez complexe, du fait du grand nombre d'éléments mis en jeu (réglateurs secondaires — dispositifs d'asservissement — réseaux, etc.). L'établissement des diagrammes de représentation logarithmique gain-phase de la fonction de transfert à boucle ouverte (2) des éléments constitutionnels des chaînes d'asservissement permet de mettre en évidence le rôle joué par les divers paramètres entrant en action.

¹ Exposé présenté le 5 septembre 1957, à Zurich, dans le cadre des 2^{mes} Journées d'informations de l'Association suisse pour l'Automatique.

INTRODUCTION

Principe de la représentation logarithmique gain-phase (Diagramme de Bode)

Dans une chaîne asservie, chaque élément constitutif peut être représenté par sa fonction de transfert, en calcul symbolique :

$$G(p) = \frac{y}{x}$$

- $p = \sigma + j\omega$ fréquence complexe
 y = signal de sortie
 x = signal d'entrée

Cette fonction de transfert se présente pour les éléments courants sous forme d'un polynôme en p .

La représentation de Bode conduit à figurer en regard d'une échelle des abscisses communes (en $\log \omega$) les variations du gain et de la phase de la fonction $G(p)$.

La figure 1 donne un exemple de la représentation des éléments les plus souvent rencontrés :

Elément proportionnel avec temps de réponse T_1
Elément intégrateur (constante de temps T_2)

La stabilité d'une chaîne bouclée, constituée par différents éléments, est donnée par la fonction de transfert à boucle ouverte.

$$\phi(p) = G_1(p) \cdot G_2(p) \dots G_n(p)$$

produit des fonctions de transfert $G_i(p)$.

L'utilisation des échelles logarithmiques dans la représentation de Bode permet de déduire la représentation de la fonction de $\phi(p)$ de celle de $G_1(p) \dots G_n(p)$ par simple addition des ordonnées des courbes.

La stabilité de la chaîne asservie représentée sur la figure 2 peut ainsi être déterminée par examen de l'écart de phase qui apparaît pour le point :

$$G = 0 \text{ db } (\omega_o)$$

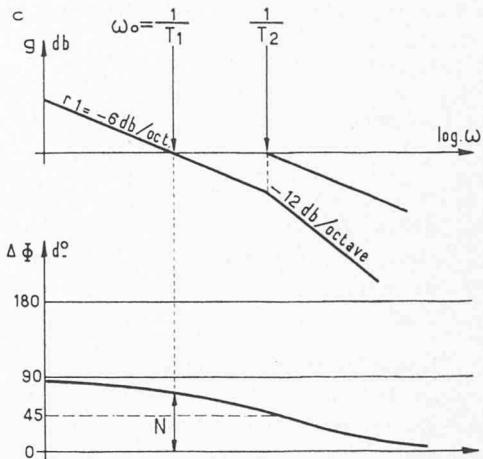
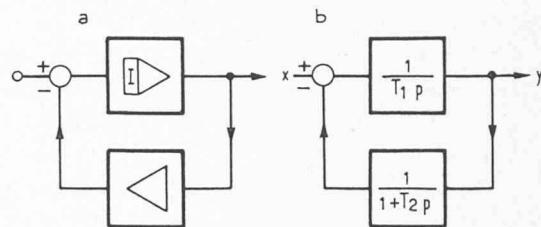
La condition de stabilité admise est

$$N > 45^\circ$$

N . écart de phase ($180^\circ - \Phi$) relatif à ω_o

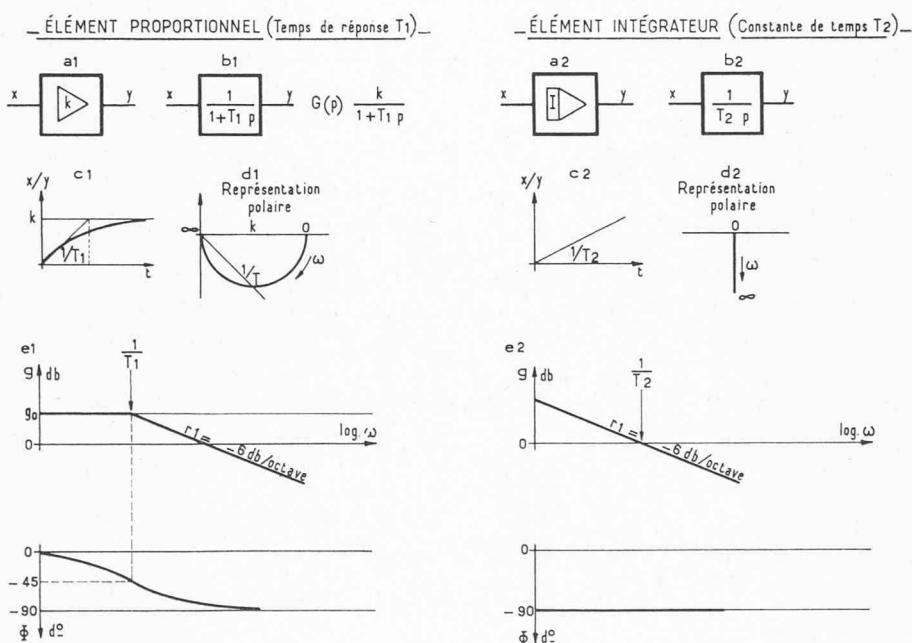
Remarque. A côté de l'examen de la stabilité en régime transitoire, la représentation de Bode donne la précision en régime permanent :

Précision statique ($\epsilon_s = 0$) $r_1 < -6 \text{ db/octave}$
Précision dynamique ($\epsilon_d \rightarrow 0$) g_0 aussi grand que possible.



a Représentation synoptique.
b Fonction de transfert.
c Représentation de Bode.

Fig. 2.



- a Représentation synoptique.
b Fonction de transfert à boucle ouverte.
c Représentation cartésienne de la variation de la fonction $y/x(t)$.
d Représentation polaire de la fonction de transfert.
e Représentation de Bode.

Fig. 1
Représentations classiques d'éléments proportionnel et intégrateur.

RÉGLAGE D'UN RÉSEAU ISOLÉ

I. Constitution de la chaîne d'asservissement

I.1 En négligeant les interactions des réglages de la fréquence et de la tension, on peut ramener le schéma général de la chaîne d'asservissement en réglage secondaire au schéma idéal suivant, établi dans l'hypothèse d'une commande des variations de puissance des groupes par action sur les moteurs variateurs de vitesse.

I.2 La chaîne d'asservissement se compose (figure 3) :

— du régulateur secondaire R_s , que nous supposerons être du type « puissance phase » (3) (4) élaborant l'ordre de réglage.

$$N = \alpha \Delta \psi = \alpha \int_0^t \Delta f dt$$

— le dispositif de commande A du variateur de vitesse M (dispositif à impulsions) ;

— le régulateur de la turbine commandé par son variateur ;

— le groupe qui fournit les variations de puissances proportionnelles à $N(\Delta P = \rho N)$;

— le réseau sur lequel est connecté le groupe et qui est représenté par son statisme $\Delta P + k\Delta f = 0$ qui fait correspondre à toute variation de charge, ΔP , une variation de fréquence proportionnelle, Δf , transmise à R_s .

I.3 En pratique, l'ensemble variateur de vitesse-groupe n'a pas une réponse parfaitement linéaire, et on réalise un asservissement en puissance du groupe à l'aide de l'équipement de mesure W et d'un élément comparateur introduit dans A .

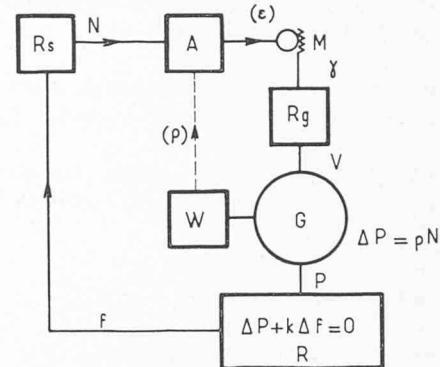
II. Etablissement des schémas équivalents des différents éléments constitutifs de la chaîne d'asservissement

II.1 Régulateur de groupe R_g :

grandeur d'entrée γ : position du variateur de vitesse ;

grandeur de sortie V : position du vannage.

On négligera les effets du coup de bâlier (groupes couplés) et l'action du tachymètre (petites variations de puissance).



R_s	Régulateur secondaire.
A	Dispositif de commande du variateur de vitesse.
M	Variateur de vitesse.
R_g	Régulateur de turbine.
G	Groupe.
R	Réseau.
W	Wattmètre mesurant la puissance délivrée par le groupe.

Fig. 3.

II.1.4 Premier cas. Régulateur statique simple (figure 4)

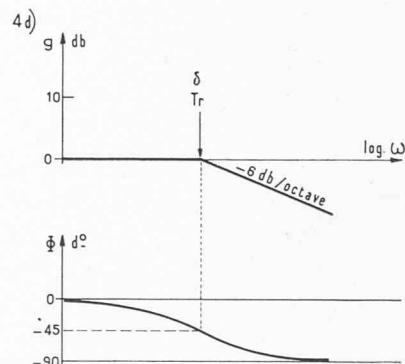
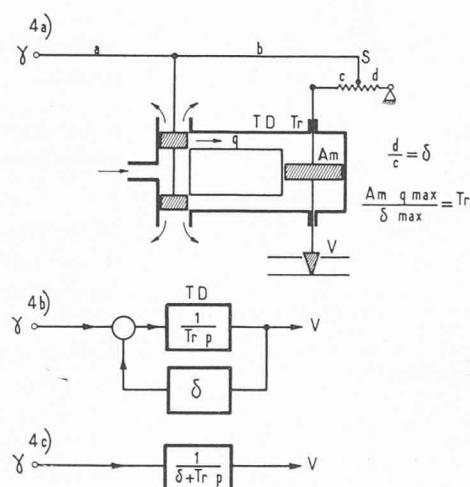
L'ouverture du vannage V est asservie à la position γ du variateur de vitesse par le tiroir de distribution $T.D.$ et la barre S de statisme δ (figure 4 a).

Le schéma équivalent (figure 4 b) comprend :

— un équipement intégrateur correspondant au tiroir de distribution, de constante T_r ;

— une boucle d'asservissement de gain δ . La fonction de transfert équivalente (figure 4 c) s'écrit :

$$G(p) = G_1 \frac{1}{1 + G_1 G_2} = \frac{1}{T_r p \left(1 + \frac{\delta}{T_r p}\right)} = \frac{1}{\delta + T_r p}.$$



TD	Tiroir de distribution.
V	Vannage.
γ	Position du variateur de vitesse.
S	Barre de statisme.

Fig. 4.

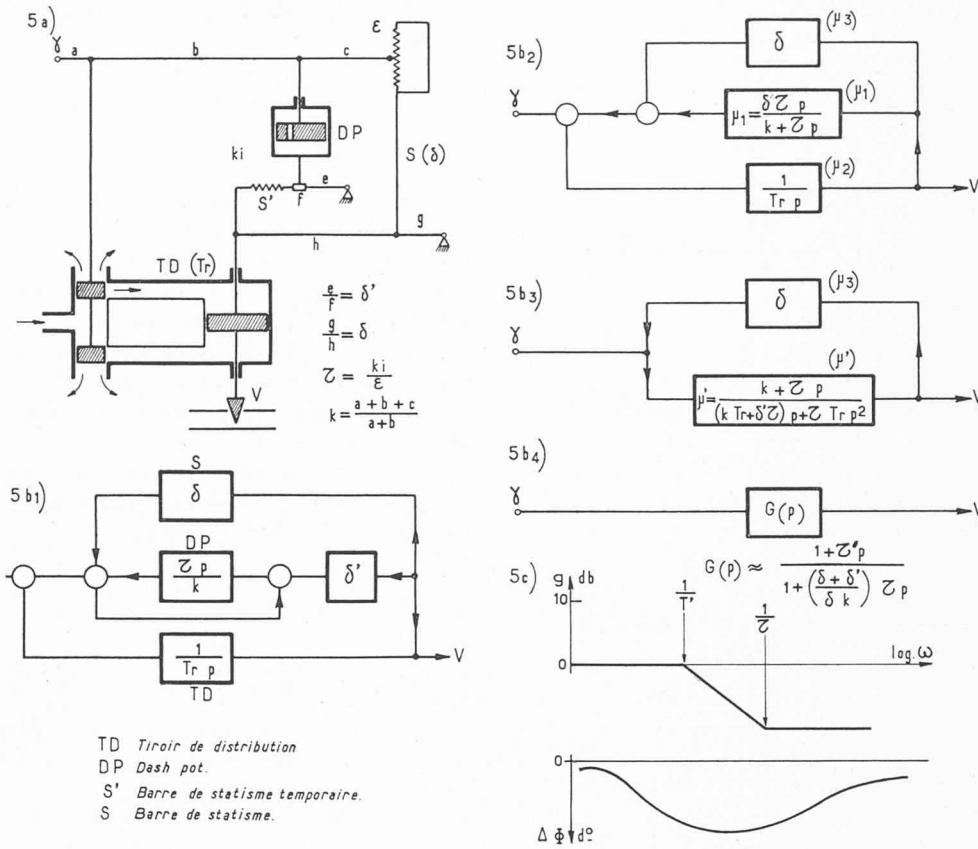


Fig. 5.

Sa représentation logarithmique est figurée en 4d.

Remarque : La promptitude équivalente est

$$T'r = \frac{Tr}{\delta}.$$

II.1.2 Deuxième cas. Régulateur à statisme temporaire (figure 5)

L'ouverture du vannage V est asservie à la position γ du variateur de vitesse par le tiroir de distribution $T.D.$, et d'un côté la barre S' de statisme temporaire (δ') accouplée au dash-pot $D.P.$ de temps de relaxation τ , et d'un autre côté par la barre de statisme permanent δ (figure 5 a).

L'établissement du schéma équivalent et le calcul de la fonction de transfert équivalent s'effectuent simplement en considérant (figure 5 b) : tout d'abord l'asservissement du tiroir de distribution $T.D.$ par la barre S' de statisme temporaire, puis par l'asservissement de cet ensemble par la barre S de statisme permanent.

II.1.2.1 La fonction de transfert du dash-pot s'écrit :

$$\mu_1 = \frac{\delta' \tau p}{k \left(1 + \frac{\tau p}{k}\right)} = \frac{\delta' \tau p}{k + \tau p}$$

d'où celle de la boucle - tiroir de distribution - barre de statisme temporaire :

$$\mu' = \mu_2 \frac{1}{1 + \mu_1 \mu_2} = \frac{k + \tau p}{(k Tr + \delta' \tau) p + \tau Tr p^2}.$$

Remarque : La promptitude équivalente $T'r$ est $kTr + \delta'\tau$ somme de la promptitude propre du

tiroir de distribution Tr multipliée par la constante k et de celle du dash-pot, multipliée par le statisme temporaire.

II.1.2.2 La fonction de transfert correspondante au régulateur est alors :

$$G(p) = \frac{\mu'}{1 + \mu' \mu_3} = \frac{k + \tau p}{\delta k + [k Tr + (\delta + \delta') \tau] p + \tau Tr p^2}$$

qui pour les fréquences basses se réduit à

$$G(p) \approx \frac{1 + \tau' p}{1 + \frac{\delta + \delta'}{\delta k} \tau p} = \frac{1 + \tau' p}{1 + T'r p} \quad \text{avec } \tau' = \frac{\tau}{k}.$$

La promptitude équivalente de l'ensemble est ainsi voisine de $\frac{\delta + \delta'}{\delta k} \tau$
soit $\frac{\delta + \delta'}{\delta} \tau' = T'r$.

II.1.3 Troisième cas. Régulateur accéléro-tachymétrique

Dans un régulateur accéléro-tachymétrique, la loi reliant l'ouverture de la turbine à la position du variateur de vitesse est une loi statique, et la fonction de transfert est la même que dans le cas d'un régulateur statique simple.

II.2 Groupe (figure 6)

Grandeur d'entrée	Ouverture V
Grandeur de sortie	Puissance P

Nous admettrons que la relation puissance fournie par le groupe (P) position du vannage (V) est linéaire.

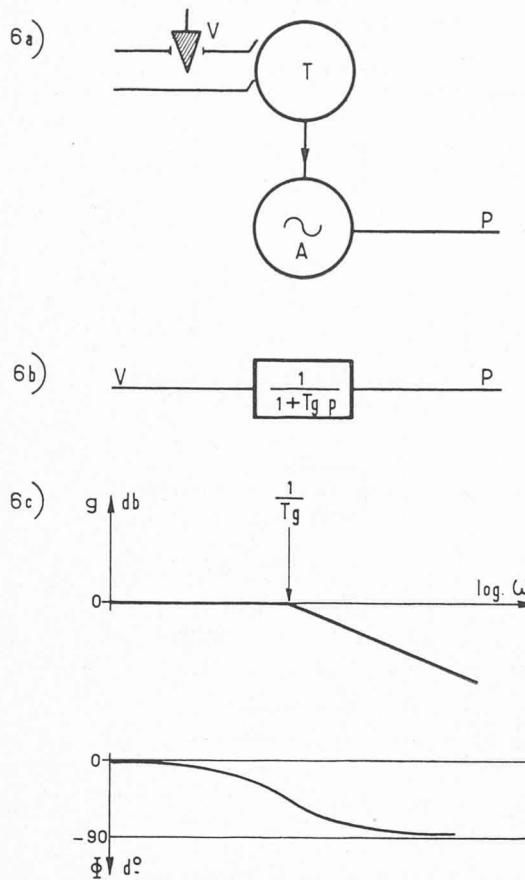


Fig. 6.

Compte tenu de l'inertie du groupe, la fonction de transfert correspondante est :

$$\mu g = \frac{1}{1 + p T_g}$$

T_g = constante de temps du groupe.

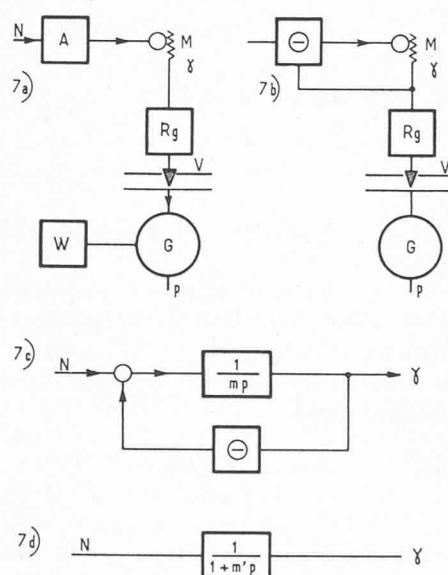


Fig. 7.

II.3 Dispositif de commande à impulsions (figure 7)

Grandeur d'entrée Ordre de réglage N
 Grandeur de sortie Déplacement du variateur de vitesse

II.3.1 La position du variateur de vitesse est commandée par l'envoi d'impulsions sur le moteur de commande ; l'asservissement est, en pratique, obtenu par une opposition de la puissance fournie par le groupe à l'ordre de réglage (I.3) figure 7 a. Nous admettrons toutefois que cet asservissement est donné par la position du variateur de vitesse (figure 7 b), ce qui est équivalent tant que la réponse de l'ensemble régulateur-groupe reste linéaire.

Le moteur de commande intègre les impulsions avec une constante de temps m . La fonction de transfert de la chaîne s'écrit :

$$\mu = \mu_1 \frac{1}{1 + \mu_1 \mu_2} = \frac{1}{1 + m' p} \quad m' = \frac{m}{\theta}.$$

II.4 Réseau (figure 8)

Grandeur d'entrée Puissance P
 Grandeur de sortie Fréquence f

En admettant la loi de statisme du réseau

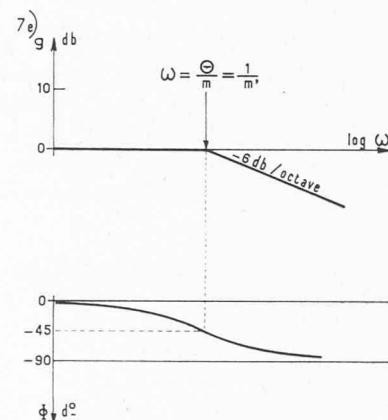
$$\Delta P + \kappa \Delta f = 0$$

et l'existence d'un temps de lancer T_l , la fonction de transfert correspondante s'écrit

$$\mu = \frac{\frac{1}{k}}{1 + T_l p}.$$

II.5 Régulateur secondaire (figure 9)

Grandeur d'entrée Fréquence f
 Grandeur de sortie Ordre de réglage
 $N = \alpha \int_o^t (f - f_o) dt.$



- A Dispositif de commande du variateur de vitesse.
- M Variateur de vitesse.
- Rg Régulateur de turbine.
- V Vanage.
- W Wattmètre mesurant la puissance délivrée par le groupe.
- G Groupe.

Le dispositif se compose d'un intégrateur simple de pente α . En faisant apparaître les variations de puissance à la place des variations de fréquence, on a

$$N = \frac{\alpha}{k} \int_0^t (P - P_0) dt$$

k/α a les dimensions d'un temps et peut être défini comme la constante de temps de l'intégration.

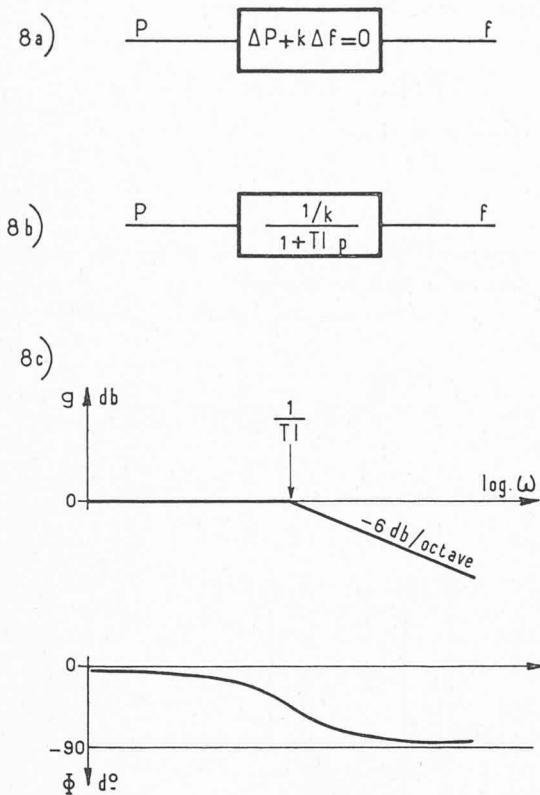


Fig. 8.

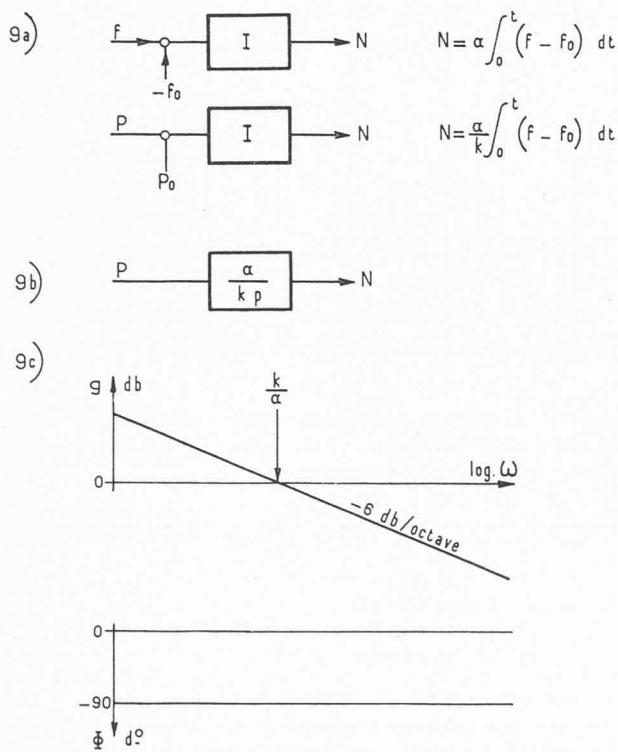


Fig. 9.

III. Représentation logarithmique gain-phase de la chaîne d'asservissement

III.1 Cette représentation est obtenue en combinant les représentations des ensembles isolés, les gains étant calculés en prenant pour base les variations de puissance.

Si G est la correspondance, ordre de réglage, exprimée en Mégawatt, puissance fournie par le groupe, le schéma équivalent simplifié de la chaîne est celui représenté figure 10.

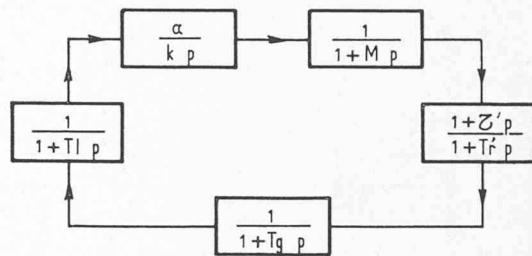


Fig. 10.

III.1.1 Sur ce diagramme apparaissent :

III.1.1.1 Les deux paramètres fondamentaux du réglage secondaire soit

$\frac{k}{\alpha}$ de l'intégration, — la constante de temps

$T'r$ — le temps caractéristique de l'application des ordres de réglage aux variations de vitesse,

$$M = \frac{m'}{G}$$

correspondant à la constante de temps de la réponse en puissance, aux ordres de réglage, d'un groupe muni d'un régulateur idéal de temps de réponse nul.

III.1.1.2 Les paramètres caractéristiques des machines en réglage

$T'r$ temps de relaxation du dash-pot
 $T'r$ promptitude équivalente des groupes, soit :

$T'r = \frac{T_r}{\delta}$ pour les groupes à régulateur statique,

$T'r = \frac{\delta + \delta'}{\delta} T'$ pour les groupes à statisme temporaire,

T_g temps de réponse à des groupes.

III.1.1.3 Le paramètre du réseau
 Tl = temps de lancer.

III.2 La fonction de transfert de la boucle ouverte correspondante est :

$$\mu = \frac{\alpha}{kp} \frac{1}{(1+Tlp)} \frac{1}{(1+Mp)} \frac{1+\tau'p}{(1+T'rp)} \frac{1}{(1+Tgp)}.$$

III.2.1 Sur les figures 11 et 12, sont présentées les représentations logarithmiques de cette fonction pour différentes valeurs de α et de M . La marge de stabilité est représentée par la marge de phase correspondant au gain 0 en db.

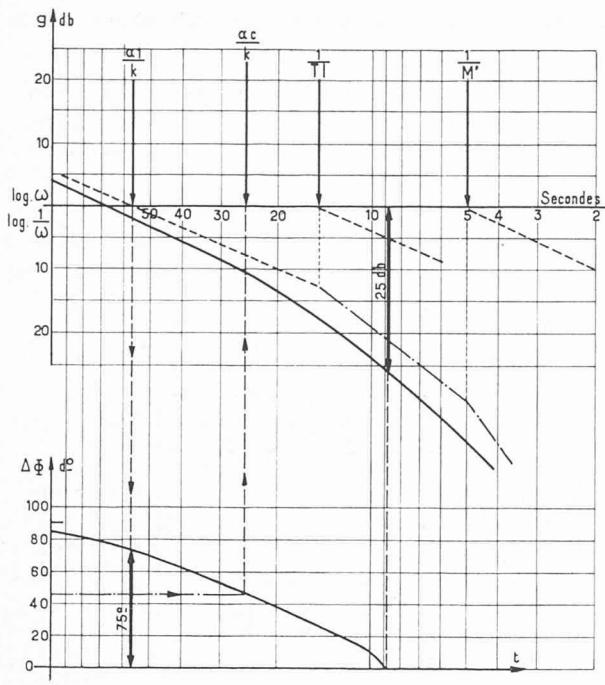


Fig. 11. — Représentation logarithmique gain - phase de la chaîne d'asservissement. Cas du réglage de la fréquence d'un réseau isolé (réseau thermique).

$$\mu = \frac{\alpha}{kp} \frac{1}{1+Tlp} \frac{1}{1+Mp} \frac{1+\tau'p}{1+T'rp} \frac{1}{1+Tgp} = \frac{\alpha}{kp(1+Tlp)(1+M'p)}$$

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= 20 \text{ MW/t} \\ k &= 1100 \text{ MW/Hz} \\ Tl &= 15 \text{ secondes} \\ M' &= 5 \text{ secondes}\end{aligned}$$

Le temps de réponse du dispositif de réglage secondaire est défini par le point correspondant au gain zéro (65 secondes).

La stabilité de la boucle de réglage est donnée par la valeur de la marge de phase $\Delta\Phi$ en ce point ($> 75^\circ$).

Pour différentes valeurs de α les courbes de gain se déduisent l'une de l'autre par translation, les courbes de phase restant identiques. On peut déterminer ainsi le α critique ($\Delta\Phi = 45^\circ$) et le temps de réponse le plus réduit que l'on peut espérer du réglage (24 secondes).

III.2.2 On remarquera que, dans cette fonction, le paramètre $\frac{\alpha}{k}$ n'apparaît que comme facteur et qu'ainsi :

- la courbe de phase est indépendante de la valeur choisie pour α ;
- les courbes de gain, correspondant à des α distincts, se déduisent l'une de l'autre par simple translation suivant l'axe des ordonnées.

La détermination d'une seule courbe gain-phase correspondant à un α donné, permettra ainsi de trouver les conditions de stabilité relatives aux différents α possibles. En particulier, on pourra déduire de la courbe de phase la fréquence fc correspondant à la marge de phase limitée de 45° ; la courbe de gain dont le 0 correspondra à cette fréquence fc , déterminera la valeur critique α_c de α au-dessus de laquelle on risque une instabilité.

En pratique, on pourra choisir pour $\frac{\alpha_c}{k}$ une valeur voisine de fc .

La condition de stabilité pourra s'écrire :

$$\alpha < kf_c$$

III.2.3 Pour les fréquences basses $p < \frac{1}{20}$ on peut remplacer dans la chaîne de réglage la représentation du groupe par ces trois fonctions

$$\frac{1}{1+Mp}, \quad \frac{1}{1+T'rp}, \quad \frac{1}{1+Tgp}$$

par la fonction simple

$$\frac{1}{1+M'p}$$

en définissant par M' le temps de réponse global du groupe aux ordres de réglage.

La fonction de transfert simplifiée s'écrit alors :

$$\mu = \frac{\alpha}{k} \frac{1}{p(1+Tlp)(1+M'p)}.$$

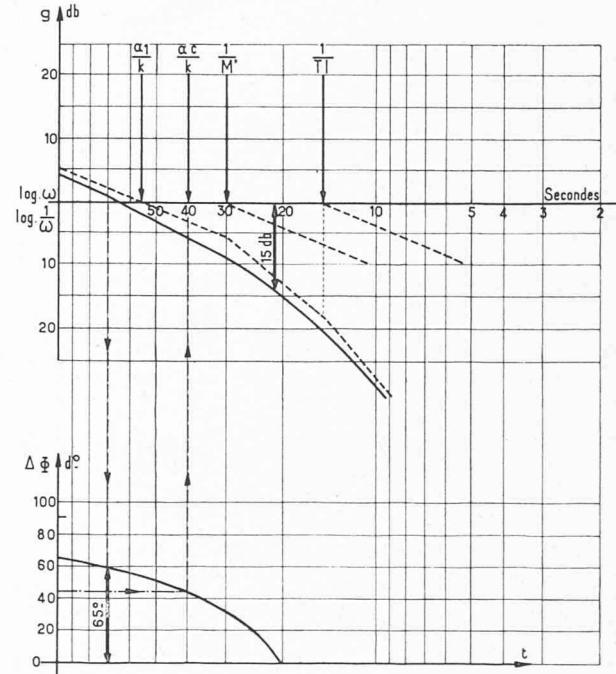


Fig. 12. — Représentation logarithmique gain - phase de la chaîne d'asservissement. Cas du réglage de la fréquence d'un réseau isolé (réseau hydraulique).

$$\mu = \frac{\alpha}{kp} \frac{1}{1+Tlp} \frac{1}{1+Mp} \frac{1+\tau'p}{1+T'rp} \frac{1}{1+Tgp} = \frac{\alpha}{k(1+Tlp)(1+M'p)}$$

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= 20 \text{ MW/t} \\ k &= 1100 \text{ MW/Hz} \\ Tl &= 15 \text{ secondes} \\ M' &= 30 \text{ secondes}\end{aligned}$$

Courbes identiques à celle de la figure 10.

Le α critique correspond à un temps de réponse minima de 40 secondes ; imposé en particulier par la réponse lente des groupes hydrauliques.

III.3 Conclusions

III.3.1 La stabilité du réglage diminue quand on augmente α ou M' ; on pourra admettre en première approximation, comme condition de stabilité

$$M' + Tl < \frac{\alpha}{k} \quad \text{ou} \quad \alpha < \frac{k}{M' + Tl}.$$

III.3.2 Le retour à l'équilibre est obtenu d'autant plus rapidement que α est grand.

III.3.3.3 Si α est maintenu constant, le retour à l'équilibre est obtenu plus rapidement quand on diminue ce temps M' . On ne peut agir toutefois que sur le paramètre M qui définit le temps d'action du dispositif de commande du réglage secondaire.

Dès que M' est inférieur à $Tl/2$ son action devient négligeable devant celle des retards apportés par les groupes et le réseau. Dans certains cas, on peut toutefois diminuer M' en réduisant le temps de réponse des régulateurs (modification du temps de relaxation des dash-pot, ou commande par limiteur d'ouverture).

III.3.3.4 Les retards apportés par les organes de transmission (télémesure), de même que le temps d'attente des dispositifs discontinus s'ajoutent au temps M' , on a donc intérêt à les réduire au minimum. Une valeur de quelques secondes semble admissible.

III.4 Remarque. Réglage direct.

Les anciens systèmes de réglage utilisaient un régulateur proportionnel, au lieu d'un régulateur intégral. L'intégration des écarts était faite sur le moteur de commande du variateur de vitesse. Le schéma de la chaîne d'asservissement est facilement reconstitué à partir des éléments précédents (figure 13).

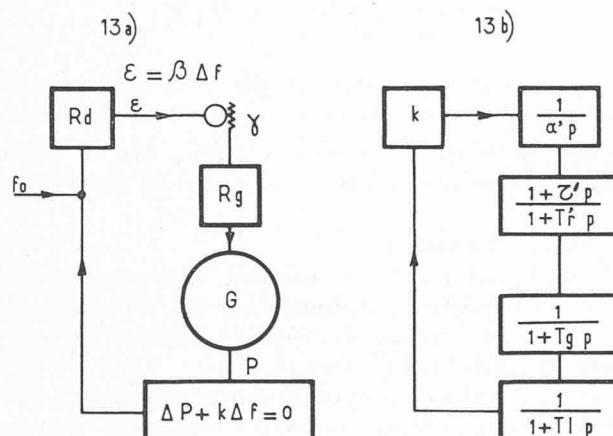


Fig. 13.

La constante de temps de l'intégration est alors : k/α .

Le temps M n'est plus défini, la commande du variateur n'étant plus contrôlée.

On voit ainsi que la commande est plus brutale $M = 0$ sans que le réglage ne soit vraiment accéléré, puisque l'on doit toujours avoir

$$\frac{k}{\alpha} > Tl + T'r + Tg.$$

Le réglage centralisé puissance-phase présente donc, outre une meilleure précision que le réglage direct, l'avantage de permettre d'ajuster la rapidité des actions de réglage demandée aux machines en fonction des temps de réponse effectivement nécessaires à la stabilité du réglage secondaire.

IV. Commande simultanée de plusieurs groupes par un même régulateur

IV.1 Le calcul de la fonction de transfert s'établit très facilement à partir des fonctions de transfert des éléments constitutifs, en admettant que les mêmes ordres de réglage soient envoyés aux différents groupes.

Nous ramènerons les fonctions de transfert des deux groupes asservis à leur forme simplifiée (figure 14).

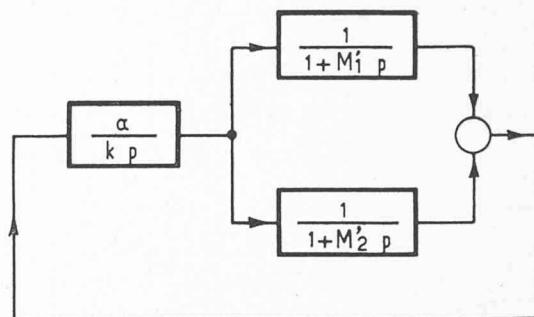


Fig. 14.

IV.2 La figure 15 est relative à la représentation logarithmique correspondante.

IV.2.1 Comme précédemment pour les différentes valeurs de α :

Les courbes de phase sont identiques.

Les courbes de gain se déduisent les unes des autres par simple translation.

On peut ainsi déterminer par construction graphique, la fréquence critique f_c et en déduire la valeur maxima de α .

IV.2.2 Par rapport à la fonction de transfert relative au cas de la commande d'un groupe unique, on remarque une avance de phase due au terme $1 + \frac{M'_1 + M'_2}{2} p$ au numérateur, avance réduite en partie par le terme $M'^1 M'^2 p^2$ du dénominateur.

IV.2.3 Conclusions

- La mise en réglage de groupes de caractéristiques différentes est possible.
- L'utilisation de groupes rapides ($M' < 10$ sec) aux côtés de groupes lents ($M' \# 40$ sec) permet, tout en conservant une stabilité correcte, de choisir un α relativement élevé, et par suite d'obtenir une rapidité de réponse suffisante.
- Pour un α donné, la mise en réglage de groupes rapides aux côtés de groupes lents ne permet pratiquement pas de

réduire le temps de réponse du réglage secondaire.

- d) La puissance réglante du réglage α peut être choisie en observant la condition de stabilité approchée.

$$\alpha < \frac{k}{Tl + \sqrt{M'_1 M'_2}}.$$

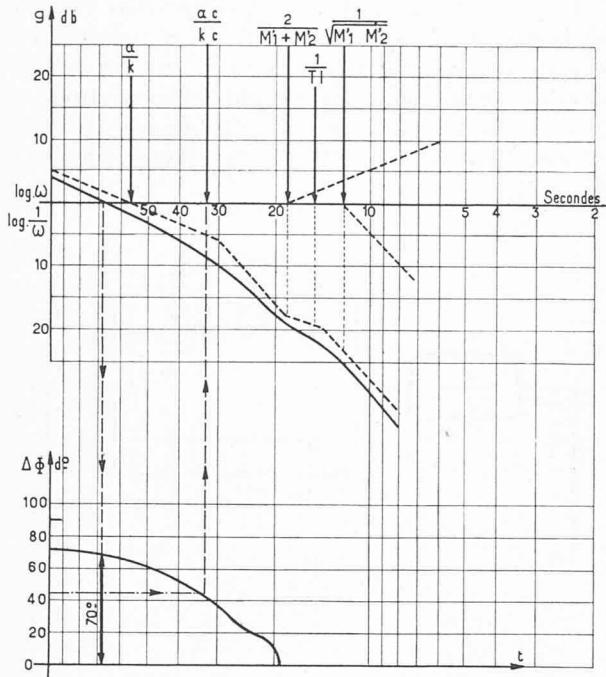


Fig. 15. — Représentation logarithmique gain - phase de la chaîne d'asservissement. Cas du réglage de la fréquence d'un réseau isolé ; commande simultanée de groupes thermiques et hydrauliques par un même régulateur.

$$\mu = \frac{1}{2} \frac{\alpha}{kp} \frac{1}{1+Tlp} \left[\frac{1}{1+M'_1 p} + \frac{1}{1+M'_2 p} \right]$$

$$\frac{\alpha}{kp} \frac{1}{1+Tlp} \frac{1 + \frac{M'_1 + M'_2}{2} p}{1 + (M'_1 + M'_2) p + M'_1 M'_2 p^2}$$

$$\alpha_1 = 20 \text{ MW/t}$$

$$k = 1100 \text{ MW/Hz}$$

$$Tl = 15 \text{ secondes}$$

$$M'_1 = 5 \text{ secondes}$$

$$M'_2 = 30 \text{ secondes}$$

La marche en parallèle de groupes hydrauliques et de groupes thermiques permet d'obtenir un temps de réponse plus réduit que si seuls des groupes hydrauliques étaient commandés.

V. Marche en parallèle de deux régulateurs

V.1 La fonction de transfert se déduit du schéma représenté *figure 16*.

$$\mu = \frac{1}{1+Tlp} \left[\frac{\alpha_1}{kp(1+M'_1 p)} + \frac{\alpha_2}{kp(1+M'_2 p)} \right]$$

$$\mu = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{kp} \frac{1}{1+Tlp} \frac{1 + \frac{\alpha_1 M'_2 + \alpha_2 M'_1}{\alpha_1 + \alpha_2} p}{(1+M'_1 p)(1+M'_2 p)}$$

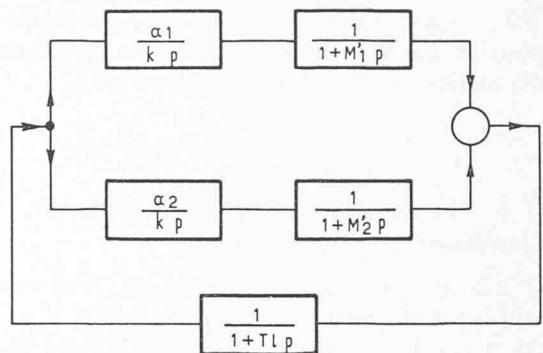


Fig. 16.

Le dénominateur est identique à celui trouvé dans le cas de la commande simultanée de deux groupes par le même régulateur, mais la fonction représentée au numérateur

$$1 + \frac{\alpha_1 M'_2 + \alpha_2 M'_1}{\alpha_1 + \alpha_2} p$$

diffère par sa constante de temps.

$$\frac{\alpha_1 M'_2 + \alpha_2 M'_1}{\alpha_1 + \alpha_2} \text{ au lieu de } \frac{M'_1 + M'_2}{2}.$$

Il s'ensuit que, selon les valeurs de α , l'avance de phase correspondante se fait sentir, soit plus tôt, soit plus tard.

Si l'on fait

$$\frac{\alpha_1 M'_2 + \alpha_2 M'_1}{\alpha_1 + \alpha_2} = \sqrt{M'_1 M'_2}$$

on retrouve les mêmes courbes asymptotiques que dans le cas de la commande d'un groupe unique de temps de réponse $\sqrt{M'_1 M'_2}$ par un régulateur unique de puissance réglante $\alpha_1 + \alpha_2$ (*figure 17*).

V.2 Conclusion

La marche en parallèle de régulateurs de puissance réglante différente, commandant des groupes de temps de réponse différents, pose des problèmes de stabilité.

On a en principe avantage à doter les régulateurs d'une puissance réglante d'autant plus grande que leurs groupes sont plus rapides. Ce qui conduit, en fait à n'appliquer le réglage que sur ces groupes rapides.

Remarque. Dans l'étude du comportement de deux groupes de réglage commandés par un régulateur unique (I, V) on avait admis que le même ordre de réglage était appliqué aux deux groupes.

Si on affiche sur ces deux groupes des participations distinctes on est ramené au cas présent.

En pratique, on doit faire régler aussi les groupes lents et on leur applique une part importante de la puissance réglante. La stabilité n'est alors plus assurée que par les autres régulateurs marchant en parallèle.

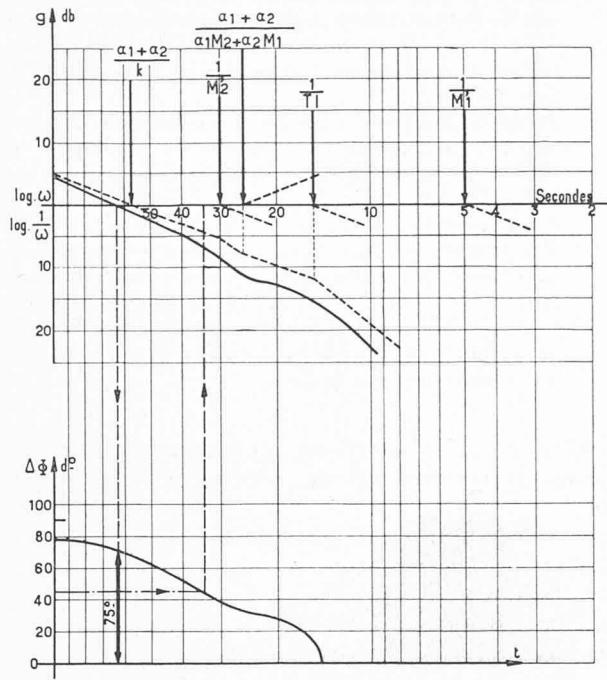


Fig. 17. — Représentation logarithmique gain - phase de la chaîne d'asservissement. Cas du réglage de la fréquence d'un réseau isolé ; commande simultanée de groupes thermiques et hydrauliques par des régulateurs distincts.

$$\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{kp} \frac{1}{1 + Tlp} \frac{1 + \frac{\alpha_1 M'_2 + \alpha_2 M'_1}{\alpha_1 + \alpha_2} p}{(1 + M'_1 p)(1 + M'_2 p)}$$

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= 15 \text{ MW/t} & \alpha_2 &= 5 \text{ MW/t} \\ M'_1 &= 5 \text{ secondes} & M'_2 &= 30 \text{ secondes} \\ Tl &= 15 \text{ secondes} & & \\ k &= 1100 \text{ MW/Hz} & &\end{aligned}$$

Dans un réseau mixte hydraulique-thermique, on a avantage à demander une participation plus forte aux groupes thermiques rapides qu'aux groupes hydrauliques rapides.

VI. Introduction dans l'ordre de réglage d'un terme proportionnel à l'écart de fréquence

L'utilisation d'un régulateur intégral simple élaborant un ordre de réglage de la forme :

$$N = \frac{\alpha}{k} \int_0^t k \Delta f dt \quad (\text{II.5})$$

conduit comme on l'a vu à des temps de réponse critiques k/α_c importants surtout si la réponse des groupes est lente.

Dans la théorie des servomécanismes, on sait corriger la lenteur de la réponse de tel ensemble, en ajoutant à l'ordre de réglage un terme proportionnel à sa dérivée. Cette dérivée dans le cas présent n'est autre que l'écart de fréquence Δf .

L'ordre de réglage devient ainsi :

$$N' = \frac{\alpha}{k} \int_0^t k \Delta f dt + \beta \Delta f$$

où β est un paramètre caractérisant le dosage de ce terme Δf .

La fonction de transfert à boucle ouverte de la chaîne d'asservissement devient :

$$\mu = \frac{\alpha}{kp} \frac{1 + \frac{\beta}{\alpha} p}{(1 + Tlp)(1 + M'_1 p)}.$$

L'introduction du terme $\beta \Delta f$ amène une avance de phase qui tend vers $+90^\circ$ pour les pulsations élevées.

La figure 18 illustre la représentation logarithmique correspondante. On voit que selon la valeur du terme β/α on peut arriver théoriquement à éliminer le retard apporté par la réponse lente des groupes ($\beta/\alpha = M'$).

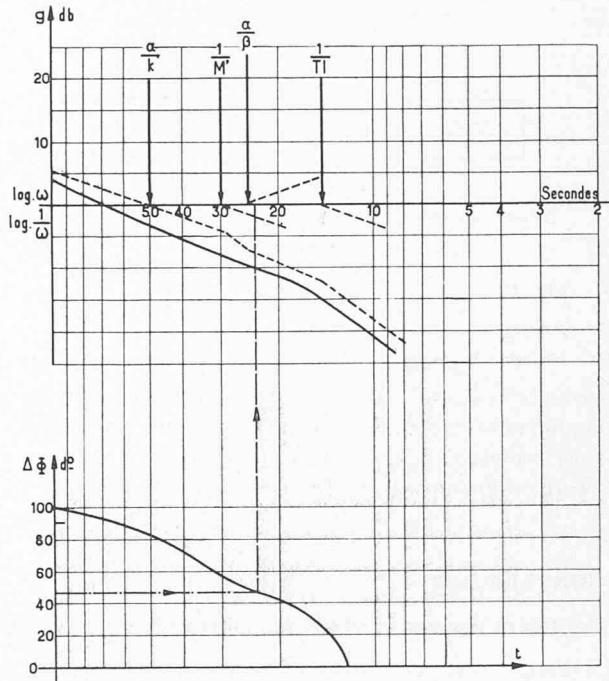


Fig. 18. — Introduction d'un terme proportionnel à l'écart de fréquence Δf .

$$\mu = \frac{\alpha}{kp} \frac{1 + \frac{\beta}{\alpha} p}{(1 + Tlp)(1 + M'_1 p)}$$

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= 20 \text{ MW/t} \\ k &= 1100 \text{ MW/Hz} \\ Tl &= 15 \text{ secondes} \\ M' &= 30 \text{ secondes}\end{aligned}$$

En fait, l'introduction de ce terme $\beta \Delta f$ conduit à accélérer la réponse des groupes en réglage et à leur demander des variations de charge incompatibles avec leur servitude hydraulique.

L'intérêt de l'introduction de ce terme $\beta \Delta f$ doit être vu dans les réductions possibles qu'il entraîne pour la valeur des écarts de fréquence Δf . En particulier dans le cas de réseau interconnecté on sait qu'à ces variations de fréquence sont liées des variations de puissance échangées aux frontières, que l'on s'efforce de réduire.

L'expression des variations de cette fréquence en fonction des variations de charge Δc s'écrit : (figlre 19).

$$\frac{\Delta f}{\Delta c} = \frac{p(1 + M'p)}{kp(1 + Tlp)(1 + M'p) + \alpha + \beta p}$$

$$= \frac{p(1 + M'p)}{\alpha \left[1 + \frac{\beta + k}{\alpha} p + \frac{k}{\alpha} (T_l + M') p^2 + \dots \right]}.$$

Cette expression fait ressortir la réduction de l'écart de fréquence passager qui apparaît lors d'un à-coup de charge qui de

$$\frac{\Delta c}{k} \quad \text{devient} \quad \frac{\Delta c}{k + \beta}.$$

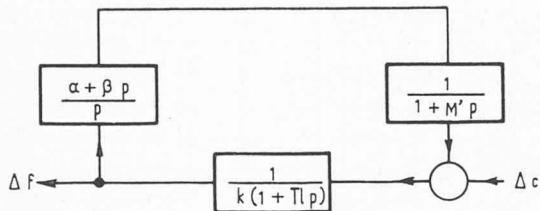


Fig. 19.

En fait, si le réglage secondaire fonctionne correctement, les écarts de fréquence ne sont guère modifiés, la fréquence étant ramenée automatiquement à sa valeur de consigne, et le paramètre β n'ayant aucune influence sur les termes d'ordre plus élevé en p .

CONCLUSIONS

Considération sur le choix des paramètres du réglage

L'étude précédente permet de déterminer les caractéristiques théoriques optima à choisir pour chaque élément de la chaîne de réglage. En fait, le problème est beaucoup plus complexe, car la plupart des éléments correspondants sont imposés et présentent des caractéristiques antérieurement déterminées en fonction d'autres problèmes que ceux du réglage secondaire.

Le devoir de l'ingénieur est alors de chercher non ces conditions théoriques optima, mais les conditions économiques optima, qui tout en assurant un réglage efficace :

- demandent le moins d'effort aux groupes chargés du réglage ;
- ne nécessitent que le minimum de modification sur les équipements existants, en particulier sur les régulateurs des groupes ;
- conduisent au matériel le plus sûr et le moins compliqué.

L'expérience du réglage du réseau français : mi-thermique, mi-hydraulique a montré que l'on pouvait obtenir une telle solution en suivant les directives suivantes :

- 1° Mettre le plus grand nombre de groupes en réglage, afin de réduire l'effort demandé à chaque groupe ; ceci conduit à concevoir un réseau de téléréglage très décentralisé, d'où obligation d'avoir recours à un réglage du type intégral.
- 2° Doser la puissance réglante du réglage de façon à obtenir une constante de temps du régulateur de l'ordre de 50 secondes, ce qui conduit à laisser au réglage deux ou trois minutes pour résorber les 90 % d'une variation de charge.
- 3° Equiper, sur les groupes en réglage, des dispositifs de commande qui permettent d'obtenir un temps de réponse aux ordres du réglage M' de 10 à 20 secondes. Ceci a été obtenu en utilisant des dispositifs d'asservissement à impulsions qui permettent de vaincre l'inertie des régulateurs des groupes.

Ces dispositifs d'asservissement commandent le déplacement du variateur de vitesse ou du limiteur d'ouverture.

a) *Le déplacement du variateur de vitesse* conduit à adopter un taux de statisme relativement élevé (4 à 6 %) et à demander pour le régulateur une promptitude assez grande. Dans le cas des groupes hydrauliques à régulateurs à asservissement temporaire, cette promptitude a parfois pu être augmentée en modifiant légèrement le dash-pot, de façon à obtenir, une fois le groupe couplé, un temps de relaxation réduit. Cette modification est opérée manuellement aux usines de la Truyère dans lesquelles on introduit, après avoir couplé le groupé au réseau, une aiguille qui maintienne levé le pointeau du dash-pot, laissant l'huile s'écouler plus librement. Aux usines de Bort, cette modification est automatique grâce à un clapet commandé par un électro-aimant placé sous la dépendance de l'interlock du disjoncteur. Pour les groupes à régulateur accéléro-tachymétrique, cette solution n'est hélas pas utilisable. Il faudrait en effet modifier la promptitude du tiroir de distribution lui-même, organe de puissance, ce qui entraînerait des frais, considérables. On est conduit alors à introduire, dans le dispositif d'asservissement en puissance du groupe, un terme proportionnel à la dérivée de la variation de puissance à commander, réalisant ainsi une chaîne calquée sur le tachymètre-accéléromètre.

On a critiqué cette augmentation de la promptitude des régulateurs des groupes arguant que la stabilité du réseau pourrait s'en trouver diminuée. En fait, ces modifications ont été effectuées sur des groupes spécialisés dans le réglage dont la puissance fournie n'a d'intérêt que si elle peut être absorbée par l'ensemble du réseau. Au cas où ces groupes resteraient couplés sur un réseau partiel, il est évident que la stabilité de celui-ci pourrait devenir précaire. Mais il n'y a aucun inconvénient alors à déclencher les groupes de réglage dont la puissance ne peut plus être utilisée.

b) *Déplacement du limiteur d'ouverture*. Cette solution conduit à des promptitudes avantageuses, mais présente l'inconvénient de supprimer le statisme du groupe et, par suite, de diminuer l'énergie réglante du réseau, que l'on cherche justement à augmenter en introduisant un terme en $\beta \Delta f$.

En outre, elle peut donner lieu pour certains limiteurs à des usures de butées dans le régleur. Quoi qu'il en soit, cette solution a été retenue depuis longtemps en particulier à l'usine de Marèges où les groupes sont asservis par leur limiteur d'ouverture. On remarque que la conduite

des groupes par limiteur d'ouverture n'est possible que si ces groupes sont couplés à un réseau important.

4^e Introduction d'un terme proportionnel à Δf . Cette introduction permet d'augmenter la stabilité du réglage en rendant possible l'utilisation de puissance réglante plus forte.

Pour conclure, après examen de ces solutions utilisées pour mettre en réglage d'anciens groupes générateurs, il reste à souhaiter que les fabricants de turbines prévoient directement dans la conception de leur turbine, la possibilité d'asservir la puissance de celle-ci aux ordres d'un régulateur secondaire. Il ne restera plus alors qu'à chercher une entente générale qui concilie les exigences des exploitants des réseaux qui désirent toujours un réglage trop rapide et celles des producteurs d'énergie électrique qui demandent que les variations

de puissance commandées à leur machine s'effectuent avec une sage lenteur.

- (1) Télétransmissions : Introduction à l'étude du réglage automatique fréquence-puissance.
- (2) M. PUN : « Régulation de vitesse des groupes hydro-électriques. Analyse et recherche d'une constitution optimum. » Bulletin de la Société française des Électriciens, 7^e série, tome V, octobre 1955, n° 58.
- (3) F. CAHEN et A. CHEVALLIER : « Le réglage automatique de la fréquence dans les grands réseaux » (CIGRE, Rapport n° 339, 1954).
- (4) F. CAHEN, A. CHEVALLIER, R. ROBERT, B. FAVEZ, J. CARPENTIER : « Les problèmes de réglage automatique de la fréquence et des échanges de puissance dans les grands réseaux » (CIGRE, Rapport n° 325, 1956).

LES CONGRÈS

18^e Journée suisse de la technique des télécommunications

organisée par

l'Association suisse des Électriciens
et l'Association « Pro Téléphone »

le 17 septembre 1959, à Aarau

Ponctuellement, le Dr P. Waldvogel, directeur à la S.A. Brown Boveri & Cie, ouvre la séance en saluant les nombreux invités et participants. M. H. Weber, professeur à l'E.P.F., président de cette journée, situe en quelques mots bien choisis le sujet des conférences : le traitement électronique de l'information. M. A. P. Speiser, docteur ès sc. techn., directeur des laboratoires de recherches de l'I.B.M., à Zurich, parle ensuite des machines à calculer en général.

Il montre que les éléments de base d'une machine digitale, le flip-flop ou le cycle d'hystérèse carré, sont des éléments très simples ; la complication ne vient que du nombre d'éléments nécessaires. La précision d'une machine analogique est d'environ 1 % ; celle d'une machine digitale est celle du dernier chiffre, le nombre de chiffres étant fonction du nombre d'éléments. Il montre le grand rôle joué par les mémoires artificielles et que, si on veut garder des dimensions et une grande vitesse de calcul, on est amené à chercher des éléments toujours plus petits pouvant travailler à des fréquences toujours plus élevées. De nombreux clichés montrent les derniers perfectionnements obtenus grâce aux super-conducteurs, aux couches magnétiques très minces et aux circuits pour fréquences très élevées. Un jour, on pourra apprendre à une machine à jouer aux échecs. On lui donnera comme programme les règles du jeu ; ensuite, il faudra la faire jouer contre un champion. Au début, la machine perdra, mais elle « apprendra » et jouera de mieux en mieux. De telles machines coûteront toujours très cher et elles ne sont pas encore prêtes à remplacer les hommes partout, tout comme les grands paquebots à vapeur n'ont pas supprimé les bateaux à rames ; on peut compter que de telles machines ne seront vraiment au point que dans cinq ou dix ans et seulement fabriquées en série bien plus tard.

M. A. Schärer, docteur ès sc. pol., chef du service d'organisation de la Direction générale des C.F.F., à Berne, parle de l'application de machines digitales dans une grande entreprise qui cherche à automatiser au maximum son exploitation.

Il faut pouvoir faire les changements progressivement, sans perturber l'exploitation. Les C.F.F. ont commencé par

un système à cartes perforées qui pourra être intégré plus tard dans un système à machine digitale. Finalement, le système pourra être alimenté directement par des textes écrits au Telex, des machines à imprimer les billets, un système de comptage des wagons le long des voies relevant directement leurs numéros, etc. Les C.F.F. ont commandé une machine de moyenne taille récemment mise sur le marché répondant à ces besoins et qui leur sera livrée en 1961. Dès maintenant, une équipe de douze personnes, bien au courant de l'exploitation et de ses problèmes, s'occupe de la programmation pour cet appareil. On espère que sa mise en service permettra de rationaliser notablement l'entreprise et qu'une meilleure utilisation du matériel roulant permettra de raccourcir les durées de transport tant des voyageurs que des marchandises.

M. P. Ceroller, ingénieur diplômé, de la maison Brown Boveri & Cie, à Baden, montre que les machines digitales sont peu aptes à résoudre des équations aux différentielles partielles et qu'il vaut mieux avoir recours à des machines analogiques pour de tels problèmes.

Dans quelques cas particuliers, lorsque la représentation de certains organes par des circuits électriques devient difficile, on peut intégrer directement les organes en question dans la machine à calculer analogique. Celle-ci permet aussi de faire facilement intervenir des phénomènes de saturation, des limites par butées et d'obtenir l'influence de différents paramètres. Les résultats sont obtenus soit par la lecture d'un appareil de mesure électrique, soit par une courbe enregistrée par un oscilloscope cathodique ou un enregistreur potentiométrique. Le conférencier cite en exemple deux machines utilisées par Brown Boveri & Cie, l'une destinée à déterminer des vitesses critiques des arbres, l'autre à résoudre des problèmes de réglage.

M. Berlovitz, de la maison Omni Ray, à Zurich, prit part à la discussion en montrant le fonctionnement d'une nouvelle machine dite « digital differential analyzer (DDA) », qui réunit la simplicité des machines analogiques à la précision des machines digitales. On n'est plus lié au temps comme variable indépendante, mais on peut avoir une variable ayant des accroissements négatifs.

Après un apéritif offert par les entreprises électriques d'Aarau et un dîner très bien servi, où chacun trouva à sa place deux ampoules électriques fabriquées à Aarau, les participants purent visiter l'usine de Sprecher & Schuh S.A., la fabrique de ciment de Holderbank-Willegg ou le château de Willegg.

Organisation parfaite assurée par les associations invitantes.

H.