

L'OPTIMISATION DU RÉGLAGE DE VITESSE DES GROUPES HYDROÉLECTRIQUES

PAR

B. FAVEZ / M. LECRIQUE et M. ROQUEFORT *

I. — Introduction.

Les études concernant le réglage de vitesse des groupes hydroélectriques ont progressé notablement ces dernières années par suite des perfectionnements apportés à la représentation du comportement des turbines et des ouvrages hydrauliques d'alimentation.

Mais la recherche des conditions optimales de réglage se heurte toujours à la difficulté du choix d'un critère de qualité généralement admis. Jusqu'à présent, dans les applications pratiques, cette recherche a été basée sur la considération de la réponse indicielle du système à une variation brusque en échelon de la charge du réseau. Un certain nombre de critères différents ont été proposés et utilisés pour juger de la qualité de cette réponse et de l'efficacité du réglage sans qu'un accord général puisse se faire sur le meilleur de ces critères.

En exploitation normale cependant, les variations de charge auxquelles le réglage doit faire face ne sont pas, dans la plupart des cas, des variations brusques. Elles se présentent en fait sous la forme de fluctuations aléatoires autour d'une valeur moyenne variant lentement dans le temps de façon relativement bien prévisibles. Ces lentes variations de la valeur moyenne de la puissance appelée paraissent pouvoir être négligées pour l'examen de la qualité du réglage à partir de son comportement en face de fluctuations aléatoires relativement rapides.

La recherche des conditions optimales du réglage de vitesse dans cette exploitation normale sera possible si, d'une part, les caractéristiques statistiques des fluctuations aléatoires sont connues et si, d'autre part, il existe des méthodes d'études permettant de déterminer les caractéristiques du régulateur réalisant l'optimisation du réglage en face de telles sollicitations.

Or, à l'heure actuelle, des travaux théoriques et des vérifications expérimentales ont permis de préciser les caractéristiques des fluctuations aléatoires de la charge d'un réseau, dès que la puissance de ce dernier atteint une certaine importance. Par ail-

leurs, le développement des théories de l'automatisme fournit l'outil mécanique nécessaire à de telles études d'optimisation.

Le présent article a pour objet d'exposer certains résultats obtenus par l'application de ces nouvelles méthodes d'études au problème de l'optimisation du réglage de vitesse de groupes hydroélectriques.

Cette première application concerne le cas le plus simple de turbines à simple réglage équipant une installation où il est possible d'admettre que le coup de bélier est un phénomène de masse. Mais la méthode mise en œuvre est applicable à tous les types d'équipement, sans limitation qui en restreindrait gravement le caractère général.

L'application de ces méthodes modernes d'étude nécessite des développements mathématiques complexes et des volumes de calculs importants. Aussi, on se propose uniquement dans ce qui suit d'attirer l'attention sur les possibilités offertes par ces procédés en exposant leur principe de façon très générale, sans entrer dans aucun détail de leur condition d'emploi. Le lecteur intéressé pourra se reporter pour complément aux articles spécialisés dans les nombreuses références sont fournies dans la liste bibliographique jointe. Par ailleurs, les travaux particuliers nécessités par l'application au réglage de vitesse des groupes hydrauliques feront l'objet d'une prochaine thèse présentée par l'un des auteurs du présent article.

II. — Principes généraux. des méthodes d'études mises en œuvre.

1. Choix d'un critère de qualité d'un système de réglage soumis à des perturbations aléatoires.

Pour un exploitant, la qualité d'un réglage se caractérise aisément par la largeur de la bande à l'intérieur de laquelle la grandeur réglée évolue normalement. Mais cette façon de procéder ne permet pas, lorsque les variations des grandeurs perturbatrices sont aléatoires, d'accéder directement aux qualités requises du régulateur et il est nécessaire de rechercher un autre critère qui, si possible, soit directement comparable à la notion de bande de variation de la grandeur réglée.

* Electricité de France - Direction des Etudes et Recherches.

Les méthodes d'études statistiques fournissent un tel critère à partir de la considération de l'écart type des fluctuations de la grandeur réglée, lorsque ces dernières présentent certaines particularités que l'on peut admettre réalisées dans le cas qui nous intéresse ici. En effet, si l'on connaît alors la valeur de l'écart type et la fonction de répartition des variations de la grandeur réglée, il est possible d'évaluer la proportion du temps pendant laquelle l'écart de réglage sera inférieur à un multiple quelconque de l'écart type. Pour fixer ces idées, rappelons qu'avec une répartition gaussienne, l'écart est par exemple inférieur en valeur absolue au double de l'écart type pendant 95 % du temps.

Dans ces conditions, il paraît possible de préconiser le choix d'un critère de qualité exprimé par la valeur de l'écart-type des fluctuations de la grandeur réglée et les études d'optimisation devront être basées sur la comparaison des valeurs respectives des écarts types obtenues avec différents systèmes de réglage.

Dans le cas du réglage de vitesse des groupes hydrauliques, ces idées, ainsi que les éléments de calcul statistiques constituant la base d'évaluation de l'écart type de fréquence suivant la nature des fluctuations aléatoires de charge, ont déjà été exposés par ailleurs [6, 7, 8, 10]. C'est pourquoi on se contente dans le paragraphe suivant de rappeler très brièvement les principes généraux.

2. Calcul de l'écart-type des fluctuations de la grandeur réglée.

Les données du problème ainsi posé sont :

- d'une part, les caractéristiques statistiques des perturbations aléatoires;
- d'autre part, les caractéristiques de l'ensemble du système de réglage, permettant de relier la grandeur réglée à la grandeur perturbatrice.

La forme sous laquelle seront définies les caractéristiques des perturbations aléatoires est le spectre énergétique Φ_p de la grandeur perturbatrice.

La réponse du système de réglage sera caractérisée par la fonction de transfert F reliant la grandeur réglée à la grandeur perturbatrice.

Dans ces conditions, on rappelle que l'écart type des fluctuations aléatoires de la grandeur perturbatrice est :

$$\sigma_p^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi_p(\omega) d\omega \quad (1)$$

que le spectre énergétique de la grandeur réglée est :

$$\Phi_n(\omega) = |F(j\omega)|^2 \cdot \Phi_p(\omega) \quad (2)$$

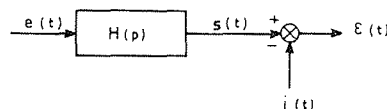
et que l'écart type des fluctuations aléatoires de la grandeur réglée est :

$$\sigma_n^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi_n(\omega) \cdot d\omega \quad (3)$$

3. Méthode d'optimisation de Wiener.

La méthode générale développée par Wiener permet de résoudre le problème suivant : étant donné

un système quelconque, dont la fonction de transfert est $H(p)$, soumis à l'action d'une grandeur d'entrée $e(t)$ aléatoire stationnaire, la grandeur de sortie étant $s(t)$, on cherche quelle est la forme de la fonction de transfert $H(p)$ qui permet de minimiser l'écart type de la différence $\varepsilon(t)$ entre la grandeur de sortie $s(t)$ et une fonction idéale $i(t)$, soit $\varepsilon(t) = s(t) - i(t)$ (fig. 1).

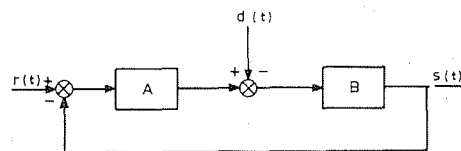


1/ Schéma général de Wiener.

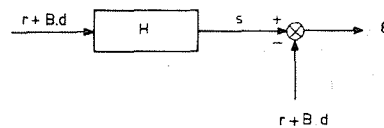
Cette méthode fait appel à des développements mathématiques qui ne peuvent être rappelés ici et le simple énoncé de la formule donnant l'expression de $H(p)$ en fonction des spectres énergétiques ne permet pas d'interprétation aisée des résultats. Nous nous contenterons d'indiquer qu'elle permet de déterminer une expression de $H(p)$ telle que le système soit stable, avec la contrainte supplémentaire qu'il existe dans la fonction de transfert $H(p)$ une fonction partielle $G(p)$ de forme imposée. Le lecteur intéressé pourra pour plus de détails se reporter aux ouvrages indiqués en [9, 14], dans la bibliographie jointe.

L'application de cette méthode au cas d'un réglage automatique qui nous intéresse ici est faite de la façon suivante :

- l'allure générale d'un tel circuit de réglage est indiquée sur la figure 2 a. $r(t)$ est la grandeur de référence de l'équipement et $d(t)$ la grandeur perturbatrice. Le système de réglage a pour objet, suivant le critère adopté, de minimiser l'écart $\varepsilon(t) = s(t) - r(t)$.



a) schéma classique



b) schéma de Wiener équivalent

2/ Schémas simplifiés de l'installation réglée.

- la fonction de transfert s/r en chaîne fermée est :

$$H = \frac{AB}{1 + AB}$$

Le calcul de l'erreur ε donne :

$$\varepsilon = s - r = (r + B \cdot d) H - (r + B \cdot d)$$

On se retrouve ainsi ramené au problème de Wiener. La grandeur d'entrée à considérer est :

$$e(t) = r + d.B$$

la sortie idéale $i(t)$ étant $(r + d.B)$ (fig. 2 b).

La détermination de la fonction de transfert $H(p)$ qui minimisera l'écart type de la grandeur $\varepsilon(t)$ est alors possible.

III. — Applications au cas du réglage de vitesse d'un groupe hydroélectrique.

1. Nature des fluctuations de charge d'un réseau.

Comme indiqué précédemment, nous considérons ici uniquement les fluctuations aléatoires de la charge du réseau, en supposant que la charge moyenne reste stable. Des études théoriques [5, 10], corroborées par des essais sur réseaux [6, 7, 8] permettent d'admettre que ces fluctuations aléatoires constituent un processus stationnaire dont le spectre énergétique est de la forme générale :

$$\Phi_p(\omega) = \frac{k}{a^2 + \omega^2} \quad (4)$$

L'écart type σ_p de ces fluctuations de charge apparaît être fonction de la puissance du réseau et de la nature des consommateurs alimentés, autrement dit de l'état de développement économique de la région desservie.

Exprimé en valeur relative rapportée à la puissance P du réseau, l'écart type σ_p est sensiblement inversement proportionnel à cette puissance soit :

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{m}{P}}$$

m caractérisant la nature du réseau. Pour fixer les idées, sa valeur est d'environ 0,03 MW pour les réseaux européens [2].

Compte tenu de la relation (1), on peut écrire :

$$\sigma_p^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{k}{a^2 + \omega^2} d\omega = k \frac{\pi}{a} \quad (5)$$

2. Fonction de transfert du système réglé.

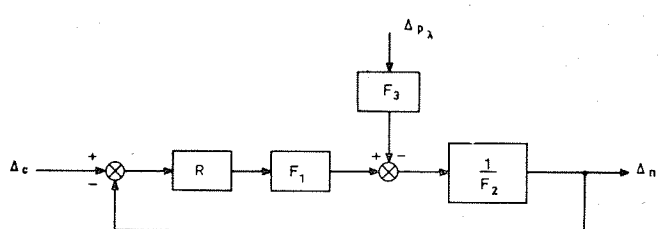
Comme déjà indiqué, l'application de la méthode d'optimisation de Wiener dont les résultats seront donnés ci-après, a été faite dans le cas simple où un seul groupe générateur alimente un réseau local, la turbine est à simple réglage (par exemple du type Francis) et l'hypothèse du phénomène de masse est applicable pour traiter des réactions hydrauliques. De plus, les phénomènes de saturations n'ont pas été pris en compte. Mais ces restrictions ne sont pas nécessaires à l'obtention d'une solution du problème posé et aussi bien les cas des turbines à double réglage que ceux des installations à lon-

gues conduites forcées sont tout à fait justiciables de mêmes procédés d'études.

Il est très rare de voir utiliser dans deux publications traitant du réglage de vitesse des groupes hydrauliques un même système de notations et, dans le cas présent, nous avons été amenés à mettre en œuvre, au sein d'Electricité de France, un nouveau système de notations dont nous donnons en annexe un extrait, relatif aux grandeurs et paramètres nécessaires dans le cours de cette étude. Ces notations, qui empruntent beaucoup aux tentatives récentes de systématisation, mais qui tiennent compte des nécessités d'harmonisation, seront dans le futur utilisées de façon générale par les Services d'Electricité de France et proposées aux organismes de normalisation.

La mise en équation de l'installation réglée est faite suivant les méthodes maintenant classiques [1], en tenant compte des caractéristiques complexes des turbines.

Dans ces conditions, en notant R la fonction de transfert du régulateur, le schéma fonctionnel de l'ensemble de l'installation est indiqué sur la figure 3.



3/ Schéma fonctionnel global.

Les fonctions de transfert :

$$F_1 = s - T_\beta p \quad F_2 = e + T_\gamma p + T_\delta T_\sigma p^2$$

$$F_3 = 1 + T_\delta p,$$

définies en annexe, traduisent le comportement de l'installation réglée.

3. Application de la méthode d'optimisation de Wiener.

Cette application nécessite une transformation du schéma fonctionnel suivant la méthode indiquée au paragraphe II 3.

On notera :

$$H = \frac{RF_1}{RF_1 + F_2}$$

la fonction de transfert en chaîne fermée reliant la variation de vitesse à l'écart d'ordre extérieur;

et l'on considérera que la grandeur d'entrée $e(t)$ est de la forme :

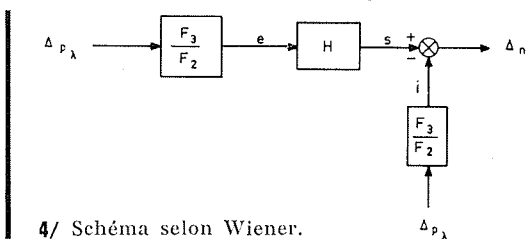
$$e(t) = \frac{F_3}{F_2} \Delta p_\lambda$$

Δp_λ représentant la variation aléatoire de charge dont le spectre énergétique est donné à la relation (4);

et que la grandeur idéale de sortie $i(t)$ est de la forme :

$$i(t) = \frac{F_3}{F_2} \Delta p_\lambda.$$

Ceci revient à admettre que les variations de l'ordre extérieur [$r(t)$ du schéma de la figure 2] ne sont pas prises en considération, soit $r(t) \equiv 0$, ce qui est justifié dans le cas présent, où l'on s'intéresse uniquement aux fluctuations de fréquence provoquées par les fluctuations aléatoires de charge. Le schéma est alors celui de la figure 4.



4/ Schéma selon Wiener.

La forme du spectre énergétique des fluctuations aléatoires de la grandeur d'entrée $e(t)$ selon Wiener, qui est également ici celle du spectre de la grandeur idéale $i(t)$, se déduit du spectre des fluctuations de puissance indiquée en III, 1 à l'aide de la formule (2) :

soit :

$$\Phi_e(\omega) = \left| \frac{F_3}{F_2} (j\omega) \right|^2 \frac{k}{a^2 + \omega^2}$$

La méthode de Wiener peut alors être directement mise en application, compte tenu du fait que certains termes composant la fonction de transfert globale H sont imposés. Plus précisément, cette fonction de transfert peut être considérée comme le produit de deux fonctions, F_1 d'une part et :

$$U = [R/(RF_1 + F_2)]$$

d'autre part. Seule, la première de ces deux fonctions dépend exclusivement des caractéristiques de l'installation réglée et doit être considérée comme un élément imposé. On déterminera ainsi la forme idéale de la fonction U , dont on pourra déduire la forme idéale de la fonction de transfert du régulateur R .

Avant de passer à l'exposé des résultats ainsi obtenus, nous reviendrons sur la question du choix du critère de qualité dans le cas particulier considéré, compte tenu de la forme du spectre des fluctuations aléatoires de charge. Le calcul montre qu'avec un spectre de la forme générale

$$k/(a^2 + \omega^2)$$

les valeurs numériques prises, d'une part, par l'écart type σ_n des variations de fréquence dans le cas de cette sollicitation aléatoire, et d'autre part par l'intégrale :

$$I = \int_0^\infty [\Delta_n(t)]^2 dt$$

du carré de l'écart de fréquence consécutif à l'apparition d'une variation de charge de la forme :

$$\Delta p_\lambda = e^{-at}$$

sont comparables pour une même installation, les expressions I et $\sigma_n^2/2k\pi$ ayant même valeur numérique.

A la limite, lorsque le terme « a » intervenant dans l'expression du spectre a une influence négligeable, la valeur numérique de l'écart type et celle de l'intégrale I consécutives à une brusque variation de la charge en échelon, sont comparables de la même façon.

On peut relier ainsi les critères usuels portant sur la forme de la réponse indicielle à celui proposé minimisant l'écart type sous l'action des fluctuations aléatoires de charge. Les critiques faites généralement à l'emploi du critère de minimisation de l'intégrale I du carré de l'écart de fréquence consécutif à une variation brusque en échelon tiennent à ce que ce critère ne renseigne aucunement sur la fréquence propre du système complet.

Il nous semble que, dans le cas particulier étudié, ces considérations ne sont pas de première importance, ce qui justifierait la prise en compte de l'intégrale I pour juger de la qualité du réglage. Mais il faut bien voir que la seule considération du critère I ne permet pas de rechercher la structure optimale des régulateurs et fournit seulement les caractéristiques optimales d'un régulateur de structure donnée.

Dans ce qui suit, seront exposés les résultats obtenus par la méthode de Wiener pour définir la structure optimale des régulateurs, puis ceux concernant l'ajustement optimal de régulateurs de structure donnée (accélérotachymétrie classique) par considération du critère de minimisation de l'intégrale I .

IV. — Résultats de l'application de la méthode de Wiener.

L'application de la méthode de Wiener, en présence de l'élément imposé F_1 , nous permet d'obtenir la forme optimale de la fonction de transfert U , associée à F_1 , permettant d'obtenir le réglage stable idéal. Son expression est la suivante :

$$U = \frac{A + Bp + Cp^2}{(s + T_\beta p)(1 + T_\delta p)} \quad (6)$$

Dans le cas, le plus fréquemment réalisé, où la fonction F_2 est intrinsèquement stable (pas de racine dans la partie droite du plan complexe) les coefficients A , B et C ont les expressions ci-après, compte tenu des notations précisées en annexe :

$$A = 1 - Kae \quad (7)$$

$$B = T_\delta + 2 \frac{T_\beta}{s} - K \left[e + a \left(T_\gamma + e \frac{T_\beta}{s} \right) \right] \quad (8)$$

$$C = \frac{KsT_\beta T_\sigma}{T_\beta} \quad (9)$$

avec :

$$K = \frac{2 T_{\beta}^2 (T_{\beta} + s T_{\delta})}{(s + a T_{\beta}) (e T_{\beta}^2 + s T_{\beta} T_{\gamma} + s^2 T_{\delta} T_{\sigma})} \quad (10)$$

Si la fonction F_2 n'est pas intrinsèquement stable, ces formules se modifient légèrement. En pratique, on ne rencontre une telle éventualité que lorsque le coefficient d'autorégulation de la turbine est supérieur à celui du réseau ($e < 0$), ce qui correspond à des conditions d'exploitation très particulières.

La fonction de transfert H en boucle fermée, reliant les variations de vitesse à l'ordre extérieur, s'exprime alors comme suit :

$$H = U F_1 = \frac{s - T_{\beta} p}{s + T_{\beta} p} \frac{A + B p + C p^2}{1 + T_{\delta} p} \quad (11)$$

La fonction de transfert F en boucle fermée, reliant les variations de vitesse aux fluctuations de charge du réseau, a pour expression, compte tenu des relations (7) à (11) :

$$F = \frac{F_3}{F_2} (H - 1) = - K s \frac{a + p}{s + T_{\beta} p} \quad (12)$$

Remarquons tout de suite que ces expressions (11) et (12) ne correspondent pas à des fonctions de transfert physiquement réalisables, un système physique ne pouvant répondre aux sollicitations de fréquence élevée. En réalité, un régulateur, quel qu'il soit, n'a pas une bande passante infinie et la fonction de transfert F tend naturellement vers $1/T_{\sigma} p$ aux hautes fréquences.

1. Structure optimale du régulateur.

L'expression de la fonction de transfert optimale R du régulateur se déduit aisément des relations (11) et (12) :

$$R = - \frac{F_3}{F_1} \frac{H}{F} = \frac{A + B p + C p^2}{K s (a + p)} \quad (13)$$

Une telle expression n'est pas nouvelle; différents auteurs l'ont déjà préconisée [4, 12] en se basant sur d'autres critères. La méthode de Wiener en augmente l'intérêt, puisque cette expression représente la structure optimale.

Remarquons que le dosage de l'asservissement permanent est proportionnel au coefficient a du spectre des fluctuations de charge. En particulier, si ce coefficient est négligeable, il est intéressant d'effectuer un réglage astatique.

D'après l'expression (9) du coefficient C , on constate que la structure de ce régulateur tend vers celle du régulateur accélérotachymétrique (*) lorsque le temps de lancer T_{σ} tend vers zéro. Inversement, nous

(*) Pour des facilités de présentation, nous appelons régulateur accélérotachymétrique un régulateur dont la fonction de transfert est de la forme $R = \frac{A + B p}{K s (a + p)}$, étant entendu qu'une telle fonction de transfert peut pratiquement être obtenue soit avec un régulateur accélérotachymétrique proprement dit, soit avec un régulateur à asservissement temporaire.

pouvons prévoir que l'amélioration des performances apportée par le réglage optimal comparative-ment au réglage accélérotachymétrique est d'autant plus sensible que le temps de lancer du groupe est important. Nous reviendrons plus loin sur cette constatation (cf. § 6).

La forme de cette fonction R ne correspond pas à une solution permettant d'éliminer le terme F_1 à déphasage non minimal. En effet, l'élimination de F_1 (qui permettrait d'obtenir des performances meilleures, car la présence d'un terme à déphasage non minimal limite obligatoirement la qualité du réglage) n'est possible que si la fonction R comporte ce terme en dénominateur. Sans entrer ici dans le détail d'un raisonnement mathématique rigoureux conduisant au même résultat, on conçoit aisément qu'une telle élimination ne correspond pas à un comportement stable.

En effet, en posant $R = (V/F'_1)$, la fonction de transfert H , telle que l'on peut la déduire par exemple du schéma de la figure 3, s'écrit

$$H = \frac{V F_1}{V F_1 + F'_1 F_2}$$

expression dont le dénominateur n'admet F_1 pour racine que lorsque $F'_1 = F_1$.

Par raison de continuité, ce dénominateur admet un facteur légèrement voisin de F_1 lorsque F_1 et F'_1 diffèrent faiblement (par suite d'un léger changement de régime de fonctionnement ou d'un réglage pas assez précis du régulateur). La fonction H présente alors un pôle instable qui n'est pas compensé par le numérateur. On remarque ainsi que l'élimination du terme à déphasage non-minimal n'est pas réalisable physiquement, puisqu'elle se place dans un domaine où le fonctionnement serait instable.

2. Performances optimales.

Compte tenu des relations (2), (3), (4) et (12), l'expression de l'écart type σ_n des fluctuations de vitesse est telle que :

$$\sigma_n^2 = k \frac{\pi K^2 s}{T_{\beta}}$$

dont la forme développée est, compte tenu de l'expression (10) de K :

$$\sigma_n^2 = \frac{4 k \pi s T_{\beta}^3 (T_{\beta} + s T_{\delta})^2}{(s + a T_{\beta})^2 (e T_{\beta}^2 + s T_{\beta} T_{\gamma} + s^2 T_{\delta} T_{\sigma})^2} \quad (14)$$

Remarquons d'abord que, lorsque le temps de lancer T_{σ} tend à s'annuler, cette expression a pour limite :

$$(\sigma_n^2)_l = \frac{4 k \pi s T_{\beta} (T_{\beta} + s T_{\delta})^2}{(s + a T_{\beta})^2 (e T_{\beta} + s T_{\gamma})^2}$$

L'influence du temps caractéristique T_{θ} de l'inertie hydraulique se déduit de l'expression (14) en tenant compte des formules de définition de T_{β} , T_{γ} et T_{δ} données en annexe. Lorsque le terme a est négligeable, l'écart type σ_n est proportionnel à la puis-

sance $3/2$ de T_θ pour les valeurs élevées du temps de lancer T_σ et à la puissance $1/2$ de T_θ lorsque T_σ tend vers zéro.

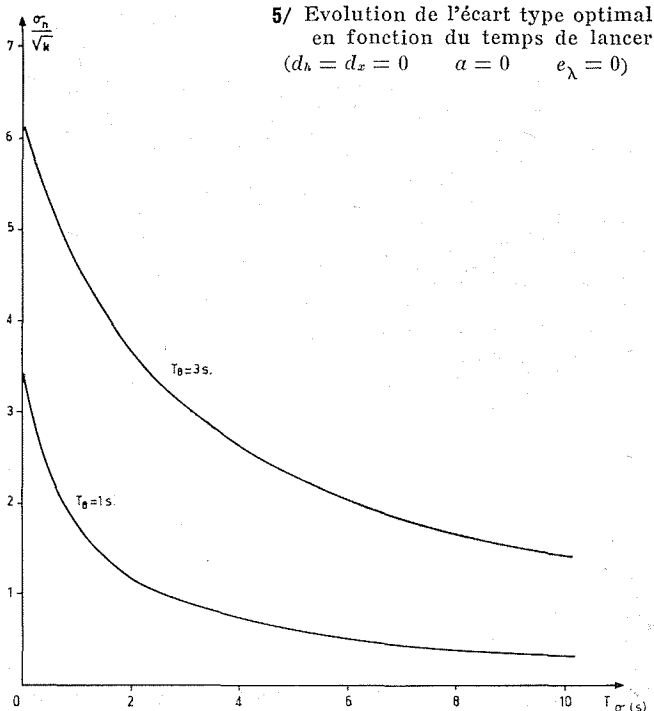
L'expression développée de la relation (14) est une fonction homogène de degré zéro en b_x et d_x . Ainsi donc, en un point de rendement maximal en fonction de l'ouverture ($d_x = 0$), l'écart type est indépendant de la sensibilité b_x du débit de la turbine à l'ouverture du distributeur. Ceci se conçoit aisément : il suffit alors de donner aux gains des régulateurs équipant deux turbines ayant des coefficients b_x différents, mais dont toutes les autres caractéristiques sont identiques, des valeurs inversement proportionnelles à ces coefficients, pour qu'une même variation à l'entrée des régulateurs provoque une même variation de débit et par suite entraîne des performances identiques.

Au cœur de la colline de rendement ($d_h = d_x = 0$), l'expression se simplifie considérablement, surtout lorsque l'on néglige les pertes de charge dans la conduite, et l'on obtient ainsi :

$$\sigma_n^2 = \frac{4 k \pi T_\theta^3}{(1 + a T_\theta)^2 [T_\sigma + T_\theta (1 + e_\lambda)]^2}$$

Cette relation est alors indépendante des autres caractéristiques de la turbine et rejoint alors celle correspondant à l'hypothèse de la turbine orifice. Nous avons reproduit sur la figure 5, dans ce cas particulier, l'évolution en fonction du temps de lancer T_σ , pour deux valeurs (1 et 3 s) du temps caractéristique du coup de bélier T_θ , de cet écart type σ_n lorsque le coefficient a est négligeable et que le coefficient e_λ d'autorégulation de la charge est nul.

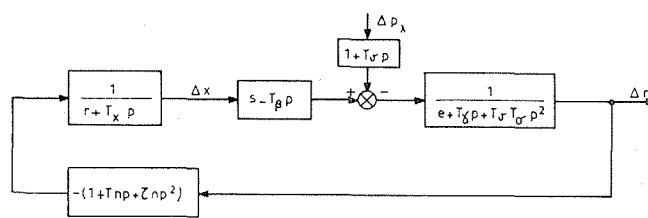
Rappelons que ces performances optimales constituent en fait une limite vers laquelle tendent les systèmes physiques, et ceci d'autant plus qu'ils sont plus perfectionnés.



V. — Réalisation du régulateur optimal.

Parmi les multiples formes de réalisations possibles de ce régulateur optimal, nous nous bornerons ici à en décrire trois, caractérisées par un perfectionnement du régulateur accélérotachymétrique classique consistant en l'adjonction d'un signal, convenablement dosé et filtré, issu d'une des trois grandeurs dont la détection est relativement aisée sur un groupe hydroélectrique : vitesse de rotation, puissance électrique, pression (ou hauteur de chute nette).

1. Adjonction de la détection de la dérivée de l'accélération.



6/ Schéma correspondant au régulateur à détection de la dérivée de l'accélération.

L'emploi d'un régulateur à détection de la dérivée de l'accélération, déjà mentionné [4, 12], découle naturellement de l'observation de la fonction de transfert R explicitée dans la relation (13). Le schéma général de l'installation correspond alors à celui représenté sur la figure 6, l'équation caractérisant le fonctionnement du régulateur étant la suivante :

$$(r + T_\sigma p) \Delta x = -(1 + T_n p + \tau_n p^2) \Delta n \quad (15)$$

τ_n étant le dosage (homogène au carré d'un temps) de l'action du signal sensible à la dérivée de l'accélération, tout comme T_n est le dosage de l'action accélérométrique.

En identifiant les relations (13) et (15), le réglage optimal correspond aux dosages suivants des paramètres de ce régulateur :

$$r_o = \frac{K s a}{A} \quad (16)$$

$$T_{\sigma o} = \frac{K s}{A} \quad (17)$$

$$T_{n o} = \frac{B}{A} \quad (18)$$

$$\tau_{n o} = \frac{C}{A} \quad (19)$$

Avec les valeurs ci-dessus, la fonction de transfert F reliant en boucle fermée les variations de vitesse à celles de charge est identique à la forme idéale de la relation (12). D'une façon générale,

avec des dosages quelconques des paramètres du régulateur, l'expression de la fonction F est la suivante :

$$F = - \frac{(1 + T_\delta p)(r + T_x p)}{(T_x T_\delta T_\sigma - \tau_n T_\beta) p^3 + (r T_\delta T_\sigma + T_x T_\gamma - T_n T_\beta + \tau_n s) p^2 + (r T_\gamma + e T_x + s T_n - T_\beta) p + (s + er)}$$

qui devient à l'optimum :

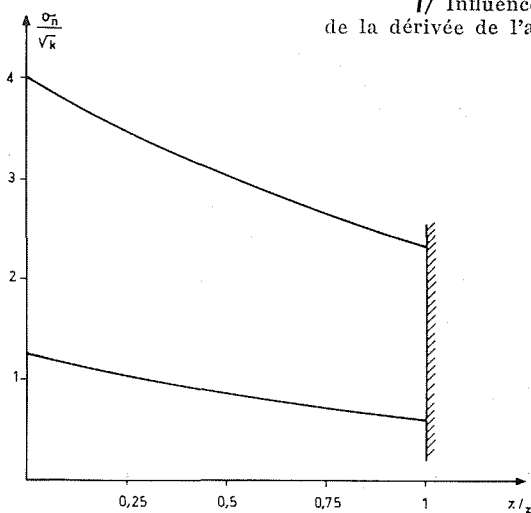
$$F = - Ks \frac{(1 + T_\delta p)(a + p)}{(1 + T_\delta p)(s + T_\beta p)}$$

On se rend immédiatement compte que le terme du troisième degré du dénominateur s'annule, entraînant ainsi un fonctionnement à une limite de stabilité. En conséquence, il n'est pas possible, avec ce type de réalisation, d'atteindre les performances optimales. Il est nécessaire en pratique de donner au dosage τ_n de l'action dérivée une valeur inférieure à la limite τ_l définie par :

$$\tau_l = \frac{T_\delta T_\sigma}{T_\beta} T_x$$

En posant $z = (\tau_n/T_x)$, il est intéressant de voir comment évolue l'écart type σ_n des variations de vitesse en fonction de ce rapport. Pour chaque valeur de z, le réglage est optimisé pour obtenir la plus faible valeur de σ_n compatible avec les conditions de stabilité, selon une méthode comparable à celle exposée plus loin (cf. § 6). Les courbes de la figure 7, établies selon cette méthode, représentent l'évolution en fonction du rapport z/z_l de l'écart type σ_n pour une turbine orifice de temps de lancer $T_\sigma = 5$ s alimentant un réseau séparé de coefficient d'autoréglage e_λ nul dont le spectre des fluctuations de puissance a un coefficient a négligé-

7/ Influence du dosage de la dérivée de l'accélération.

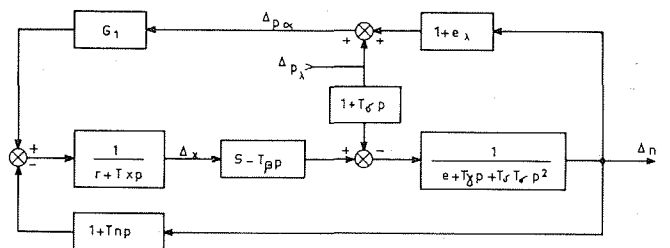


geable, ceci pour deux valeurs (1 et 3 s) du temps caractéristique du coup de bélier T_θ , en négligeant les pertes de charge dans la conduite. Ces courbes sont régulièrement décroissantes jusqu'à la limite de stabilité, point de fonctionnement préconisé par l'application de la méthode de Wiener.

Nous retiendrons donc que le régulateur accélé-

rotachymétrique comportant une détection de la dérivée de l'accélération permet d'améliorer les performances du réglage de vitesse, mais n'autorise pas l'obtention du réglage optimal. Sa réalisation est particulièrement aisée sur un régleur électrique, où la fonction de transfert recherchée peut s'obtenir avec un réseau correcteur passif, avec une précision correcte, dans la gamme des fréquences où les fluctuations de charge ne sont pas négligeables.

2. Adjonction d'un signal issu de la puissance électrique.



8/ Schéma correspondant au régulateur avec détection de puissance.

Sur un groupe, la mesure de la puissance électrique est une opération relativement aisée, c'est pourquoi il semble intéressant d'utiliser cette information. Le schéma fonctionnel de l'installation correspond maintenant à celui représenté sur la figure 8, l'équation caractéristique du régulateur étant :

$$(r + T_x p) \Delta x = -(1 + T_n p) \Delta n + G_1(p) \Delta p_\alpha$$

G_1 est ici la fonction de transfert qu'il est nécessaire d'associer au signal de puissance pour l'injecter dans le régulateur.

L'expression générale de la fonction de transfert de réglage F en boucle fermée, correspondant à ce type de régulateur à cette fois la forme suivante :

$$F = - \frac{(r + T_x p)(1 + T_\delta p) - (s - T_\beta p) G_1}{(r + T_x p)(e + T_\gamma p + T_\delta T_\sigma p^2) + (s - T_\beta p)[1 + T_n p - (1 + e_\lambda) G_1]}$$

Pour le réglage optimal, cette fonction doit prendre la forme de la relation (12). Ceci implique que G_1 soit un polynôme du second degré, de manière que le numérateur et le dénominateur de F soient des expressions de même degré. Posons donc :

$$G_1 = \alpha + \beta p + \gamma p^2$$

L'identification avec la relation (12) des rapports des termes de plus bas et de plus haut degré donne immédiatement :

$$\alpha = \frac{r - Ka(s + er)}{s [1 - Ka(1 + e_\lambda)]}$$

et :

$$\gamma = \frac{KsT_\delta T_\sigma}{T_\beta - Ks(1 + e_\lambda)} \cdot \frac{T_x}{T_\beta}$$

Remarquons tout de suite que le terme de plus haut degré du dénominateur ne s'annule pas, son expression étant :

$$T_\delta T_\sigma T_x + \gamma T_\beta (1 + e_\lambda)$$

La fonction F relative au réglage optimal prend alors la forme suivante :

$$F = -Ks \frac{a + p}{s + T_\beta p} \frac{\lambda + \mu p + \nu p^2}{\lambda + \mu p + \nu p^2}$$

Sans reprendre le raisonnement du paragraphe IV, 1, on se rend compte qu'un tel fonctionnement n'est stable que si les coefficients λ , μ et ν sont tous positifs.

Lorsque le paramètre α est négligeable, l'identification complète avec la relation (12) laisse la possibilité de choisir arbitrairement deux paramètres du régulateur. Le réglage devant être alors astatique, il semble inutile d'afficher un asservissement permanent en ouverture pour le compenser par un asservissement permanent négatif en puissance. Nous choisirons ici $\alpha = 0$ et pour simplifier encore l'allure de la fonction G_1 , nous ferons aussi $\beta = 0$. Compte tenu des relations (17) à (19), les paramètres optimaux du régulateur prennent la forme :

$$\gamma = \frac{\tau_{no} \cdot T_{x0}}{T_\beta - (1 + e_\lambda) T_{x0}} \quad T_x = T_{x0} \quad T_n = T_{n0} - \frac{s\gamma}{T_{x0}}$$

Les conditions relatives aux coefficients λ , μ et ν se réduisent à l'inégalité suivante :

$$T_\beta [T_\beta - (1 + e_\lambda) T_{x0}] > s \cdot T_\sigma \cdot T_{x0}$$

qui semble d'autant plus vérifiable que le coefficient d'autorégulation e_λ du réseau est faible, c'est-à-dire lorsque les conditions de fonctionnement sont relativement très défavorables.

En résumé, le régulateur accélérotachymétrique comportant un asservissement dynamique en puissance permet, dans certains cas, d'approcher des performances optimales du réglage de vitesse. Sa réalisation n'est concevable, en pratique, qu'avec un régleur électrique. L'obtention d'un signal électrique proportionnel à la puissance débitée par l'alternateur est assez aisée et, tout comme pour le régulateur précédent, la fonction G_1 peut être réalisée par un filtre électrique.

3. Adjonction d'un signal issu de la hauteur de chute nette.

La mauvaise qualité du réglage provenant des variations de la hauteur de chute nette (ou de la différence des pressions exercées de part et d'autre de la roue), provoquées par le coup de bélier dans la conduite, il paraît séduisant d'introduire cette grandeur dans le régulateur. De nombreux articles ont déjà paru sur ce sujet, par exemple [3, 11].

Nous nous proposons de revoir ici le problème sous l'optique du réglage optimal. Le schéma fonctionnel est celui de la figure 9, l'équation régissant le fonctionnement du régulateur étant la suivante :

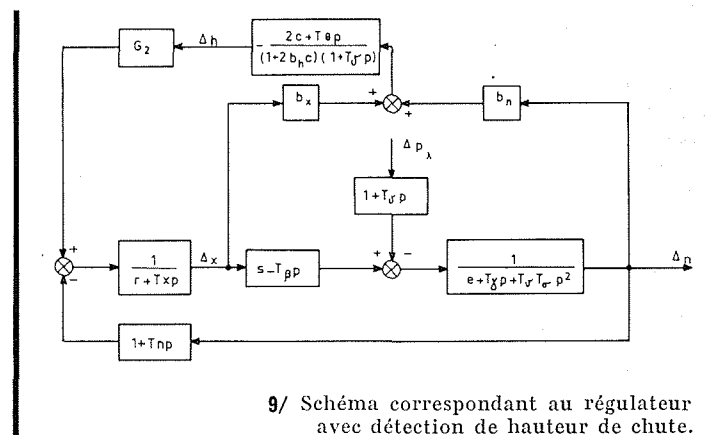
$$(r + T_x p) \Delta x = -(1 + T_n p) \Delta n + G_2(p) \cdot \Delta h$$

en appelant G_2 la fonction de transfert de correction du signal hydraulique.

L'expression générale de la fonction de transfert F est cette fois :

$$F = - \frac{(1 + T_\delta p) [(r + T_x p) (1 + T_\delta p) + b_x F_4 G_2]}{(e + T_\gamma p + T_\delta T_\sigma p^2) [(r + T_x p) (1 + T_\delta p) + b_x F_4 G_2] + (s - T_\beta p) [1 + T_n p + b_n F_4 G_2]}$$

la forme de la fonction F_4 caractérisant les variations de la hauteur de chute nette étant précisée en annexe.



9/ Schéma correspondant au régulateur avec détection de hauteur de chute.

La forme de la fonction G_2 qui permet d'identifier la fonction de transfert F à la relation (12) est telle que l'on a :

$$G_2 = (1 + T_\delta p) \frac{\alpha + \beta p + \gamma p^2}{\alpha' + \beta' p + \gamma' p^2}$$

Pour éviter que le réglage ne soit sensible aux variations permanentes de la hauteur de chute (dûes aux changements des niveaux des plans d'eau amont et aval), on a intérêt à annuler α , α' ayant une valeur non nulle. Remarquons aussi que ce mode de réglage ne permet d'obtenir théoriquement des performances optimales qu'au prix d'un fonctionnement à la limite de stabilité. En effet, après avoir éliminé le dénominateur de G_2 et le facteur commun $1 + T_\delta p$, on a une expression de F dont le numérateur est de degré 4 et le dénominateur de degré 5. Ces deux polynômes ne peuvent être ramenés au même degré qu'en annulant au dénominateur le terme de degré 5 (annulant aussi celui de degré 4 du numérateur) et le terme de degré 4. Nous avons donc ici une double condition limite de stabilité.

Dans la détermination des valeurs limites des

coefficients de G_2 , nous disposons, comme dans le régulateur précédent, d'un double choix arbitraire des paramètres. Nous en profiterons donc pour annuler α , pour la raison ci-dessus mentionnée, et β . Lorsque le coefficient a est négligeable, ainsi que les pertes de charges dans la conduite, les réglages limites des paramètres sont tels que :

$$G_2 = -\frac{Ks}{b_x T_\theta} (1 + T_\delta p) \times \frac{\tau_{no} p^2}{1 + [T_{no} - (b_n/b_x) T_{xo}] p + \tau_{no} p^2}$$

et :

$$T_x = T_{xo} \quad T_n = T_{no}$$

la fonction de transfert F prenant la forme suivante :

$$F = -Ks \frac{p}{s + T_\beta p} \frac{1 + [T_{no} - (b_n/b_x) T_{xo}] p}{1 + [T_{no} - (b_n/b_x) T_{xo}] p}$$

ce qui impose encore d'avoir :

$$b_x T_{no} > b_n T_{xo}$$

Ainsi, le régulateur accélérotachymétrique, comportant un asservissement dynamique sensible à la hauteur de chute nette, permet d'améliorer les performances du réglage de vitesse, mais n'autorise en aucun cas d'approcher les performances optimales. Il nécessite de plus l'installation de prises de pression judicieusement choisies, de manière à obtenir une information caractérisant la hauteur de chute nette et, de ce point de vue, paraît de réalisation particulièrement délicate.

4. Conclusions sur les réalisations possibles.

Nous avons envisagé ici quelques exemples de réalisations possibles de régulateurs devant permettre d'obtenir le réglage optimal, en nous limitant à des modifications relativement simples du régulateur accélérotachymétrique classique. D'autres schémas peuvent certainement être imaginés, en particulier en combinant ceux que nous avons présentés.

Si les trois principes étudiés permettent d'améliorer les performances du réglage par rapport au réglage accélérotachymétrique, ils ne permettent généralement pas (jamais pour deux d'entre eux) d'atteindre les performances optimales prévues, ceci sans même tenir compte des limitations technologiques dues à la saturation et aux phénomènes physiques limitant la bande passante du système.

Cependant nous estimons que de telles réalisations peuvent être mises en œuvre, dans les limites permises, pour améliorer la qualité du réglage lorsque les conditions d'exploitation sont particulièrement défavorables. En outre, l'adjonction d'un signal proportionnel à la dérivée de l'accélération du groupe ou sensible aux variations de charge de l'alternateur paraît relativement aisée sur les régleurs électriques.

VI. — Applications de la méthode d'optimisation à un réglage accélérotachymétrique.

Toutefois, dans le plus grand nombre d'installations, le problème de la qualité du réglage de vitesse n'a pas une acuité telle qu'il nécessite le recours à de telles solutions et l'emploi d'un régulateur accélérotachymétrique (ou à asservissement temporaire) s'avère suffisant. Il paraît donc intéressant de déterminer les paramètres caractéristiques de ce régulateur de manière à ce que le réglage de vitesse ainsi obtenu soit le meilleur possible. Nous ne réalisons pas dans ce cas le réglage optimal, mais une sous-optimisation relative à un réglage du type accélérotachymétrique.

Dans ce cas, la forme de la fonction de transfert est entièrement définie et il suffit de déterminer les valeurs numériques du temps caractéristique T_x de la promptitude du régulateur et de la constante de temps T_n de dérivation du détecteur de vitesse (ou dosage accélérométrique) rendant minimal l'écart type des variations de vitesse du groupe consécutives aux fluctuations de charge du réseau.

Compte tenu du comportement de la clientèle du réseau, il est admissible de considérer un spectre des fluctuations de charge de la forme :

$$\Phi_p(\omega) = \frac{k}{\omega^2}$$

D'autre part, le statisme permanent des régulateurs est généralement déterminé par des conditions autres que la tenue de fréquence, par exemple par le souci d'effectuer aisément une répartition des charges entre les groupes d'un même réseau. Cette valeur étant imposée, on peut alors définir les autres paramètres de réglage indépendamment de celle-ci. Nous avons admis dans ce qui suit un fonctionnement astatique.

La méthode d'optimisation correspondante a déjà été exposée [13] dans le cas équivalent de la réponse à un échelon de variation de charge. Nous nous bornerons donc simplement à présenter ici un abaque général permettant d'en déduire rapidement les valeurs numériques des paramètres du régulateur et de l'écart type des fluctuations de vitesse correspondantes en fonction des caractéristiques de l'installation à régler.

Dans le cas du réglage accélérotachymétrique, qui nous intéresse particulièrement ici, l'écart type des variations de vitesse tend vers l'infini lorsque le point de fonctionnement s'approche d'une limite de stabilité. Comme dans le plan défini par les coordonnées :

$$x = \frac{1}{T_x} \quad y = \frac{T_n}{T_x}$$

le domaine de stabilité est un domaine fermé et fini du plan, les courbes d'égal écart type σ_n sont alors aussi, dans le domaine de stabilité, des courbes fermées et il existe un point de fonctionnement où cette expression est minimale.

L'écart type σ_n est ici minimal lorsque la fonction f de la variable m est elle-même minimale. Cette fonction f a pour expression :

$$f = \frac{m(m-1)(u^2-m)}{(u+mv)^2} \quad (20)$$

u et v étant deux paramètres fonctions des caractéristiques de la turbine et de l'installation, tels que :

$$u = \frac{sT_\delta}{T_\beta} \quad v = \frac{eT_\beta + sT_\gamma}{sT_\sigma}$$

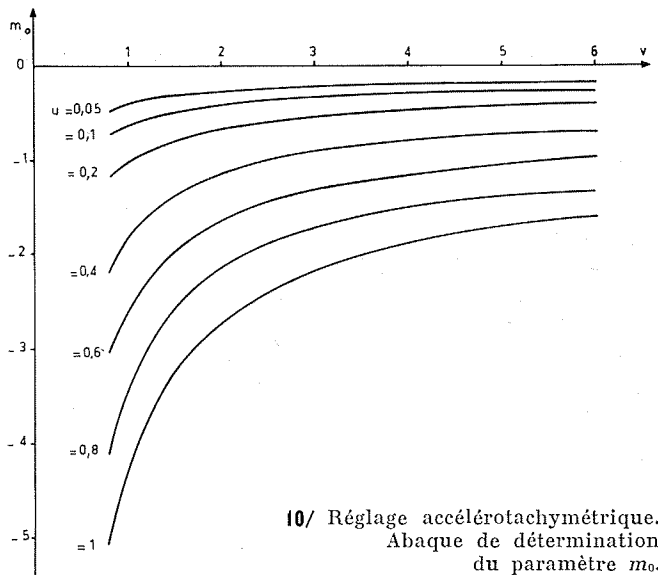
Appelons m_0 la valeur de m rendant f minimal. Cette valeur m_0 est uniquement fonction des paramètres u et v explicités ci-dessus. D'autre part, l'écart type σ_n minimal et les valeurs correspondantes des paramètres T_x et T_n du régulateur sont liés à m_0 par les relations suivantes :

$$\sigma_n^2 = \frac{4k\pi}{T_\sigma^2} \left(\frac{T_\beta}{s}\right)^3 \frac{m_0(m_0-1)(u^2-m_0)}{(u+vm_0)^2}$$

$$T_x = \frac{2T_\beta^2 m_0(1-m_0)}{sT_\sigma u + vm_0}$$

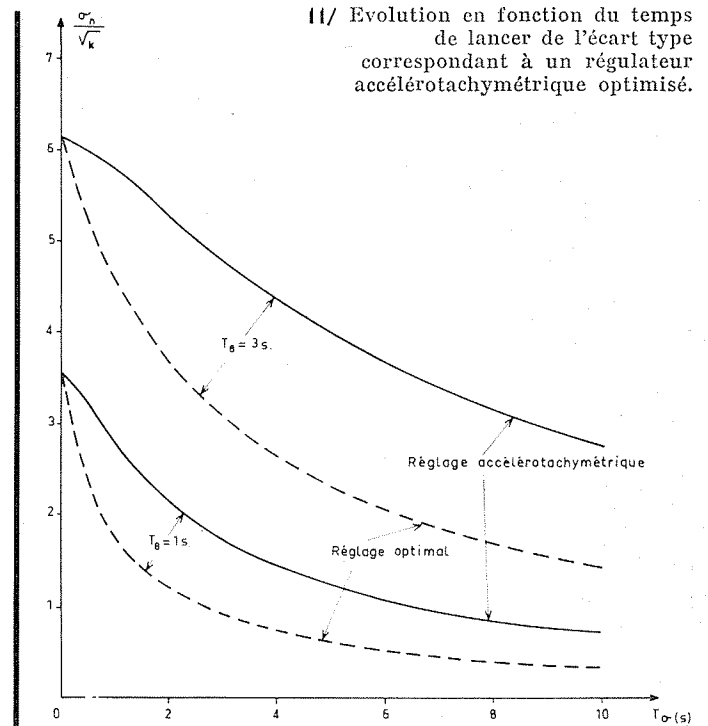
$$T_n = \frac{T_\gamma}{T_\beta} T_x + \frac{T_\beta}{s} m_0$$

Nous avons établi un abaque permettant d'obtenir directement la valeur de m_0 en fonction de celles des paramètres u et v . Cet abaque, qui peut être utilisé pour tout réglage accélérotachymétrique pour autant que l'hypothèse du coup de bélier en masse soit justifiée et que la turbine soit à réglage



unique (groupes Kaplan et Bulbes exclus), est représenté sur la figure 10 ci-jointe dans un domaine comprenant les valeurs les plus courantes des paramètres u et v .

A titre d'application, nous donnons à la figure 11 l'évolution avec le temps de lancer T_σ du groupe des



performances optimales dans l'hypothèse dite de la « turbine orifice », avec un coefficient d'autorégulation e_λ nul, pour deux valeurs (1 et 3 secondes) du temps caractéristique de l'inertie hydraulique. Nous avons reproduit en pointillés les performances correspondant dans les mêmes conditions au réglage optimal (fig. 5). Comme nous l'avons annoncé au paragraphe IV, 1, on remarque que le réglage optimal apporte une amélioration des performances d'autant plus importante que le temps de lancer T_σ est élevé. Ainsi, pour $T_\sigma = 10$ s, le réglage optimal apporte un écart type σ_n sensiblement moitié de celui obtenu avec le réglage accélérotachymétrique. De plus, un groupe de temps de lancer 2 s équipé d'un régulateur optimal a des performances identiques à celles d'un groupe équipé d'un régulateur accélérotachymétrique optimisé dont le temps de lancer est de 5 ou 6 s (selon que T_θ est de 1 ou 3 s).

Conclusions.

L'application de méthodes relativement récentes d'étude des systèmes asservis au cas du réglage de vitesse des groupes hydroélectriques permet de définir la structure optimale des régulateurs assurant la minimisation des fluctuations aléatoires stationnaires de la charge.

Les études dont certains résultats font l'objet de cet article ont permis d'aboutir aux conclusions principales suivantes.

La nature des fluctuations aléatoires de la charge dans les réseaux électriques est telle qu'il revient pratiquement au même de choisir comme critère de qualité du réglage soit la minimisation de l'écart type des fluctuations aléatoires de la fréquence en

marche normale, soit la minimisation de l'intégrale du carré de l'écart de fréquence consécutif à l'application d'une variation de charge en échelon. En toute rigueur ceci n'est vrai que lorsque le spectre énergétique des fluctuations de charge est de la forme k/ω^2 , le régulateur optimal étant alors astatique. La considération de l'écart type de fréquence en marche normale étant très généralement admise, ceci justifie la prise en compte du critère de l'intégrale du carré de l'écart sur un échelon de charge.

La méthode de Wiener permet de déterminer la structure du régulateur de vitesse qui minimise l'écart type des fluctuations de charge. Pour une installation à simple réglage (par exemple équipée de turbines Francis), dans laquelle l'hypothèse du coup de bélier en masse est justifiée, la fonction de transfert du régulateur optimal correspond à celle du régulateur accélérotachymétrique auquel est adjoint une action en dérivée de l'accélération, solution qui fut déjà préconisée à plusieurs reprises dans le passé.

L'intérêt de l'application de cette méthode est de montrer qu'il est illusoire de chercher des nouvelles techniques de réglage mieux adaptées aux conditions de fonctionnement d'un groupe hydroélectrique sur un réseau normal. Elle confirme par ailleurs que toutes les solutions consistant à introduire dans le régulateur un élément instable destiné à compenser l'action à déphasage non minimal de la partie hydraulique de l'installation (coup de bélier) sont absolument irréalisables dans la pratique.

Il faut noter d'ailleurs à ce sujet qu'en toute rigueur, la réalisation du régulateur optimal à dérivée seconde est également impossible, du fait entre autres des saturations des différents éléments de la chaîne de réglage. Toutefois, les imperfections pratiques insurmontables ne risquent pas dans ce cas

de créer des instabilités et auront pour seul effet de réduire la qualité du réglage par rapport à la qualité optimale. Au contraire, dans le cas évoqué ci-dessus, ces imperfections pratiques conduisent inévitablement à l'instabilité.

La réalisation d'un régulateur de structure optimale peut se faire en adjoignant à un régulateur accélérotachymétrique soit un signal proportionnel à la dérivée de l'accélération, soit un signal fonction de la hauteur effective de chute, soit un signal fonction de la puissance électrique aux bornes de l'alternateur. Mais l'obtention de l'optimum de réglage dans les deux premières variantes nécessite de placer le système sur la frontière du domaine de stabilité. En pratique, on sera ainsi amené à s'écarter volontairement du réglage optimal. Cet inconvénient n'existe pas toujours lorsque est utilisée la troisième variante ci-dessus.

La mise en œuvre du régulateur optimal apporte une amélioration de la qualité du réglage, par rapport à celle obtenue avec les régulateurs classiques, d'autant plus importante que le temps de lancer du groupe est plus élevé. Mais même avec des machines de temps de lancer relativement faibles (1 à 2 s) l'amélioration est encore sensible. Pour fixer les idées, avec un groupe de temps de lancer 2 s, l'emploi d'un régulateur optimal permet d'obtenir une qualité de réglage comparable à celle réalisée, toutes choses égales par ailleurs, avec un groupe de temps de lancer 5 à 6 s équipé d'un régulateur classique parfaitement réglé.

Enfin un abaque est présenté, permettant de déterminer les valeurs optimales des paramètres caractéristiques d'un régulateur accélérotachymétrique simple dans le cas d'une installation hydroélectrique de type donné (coup de bélier en masse et simple réglage) alimentant un réseau d'énergie où les fluctuations de charge sont normales.

Bibliographie.

- [1] L. BOREL. — Stabilité de réglage des installations hydroélectriques. *Payot*, Lausanne, 1960.
- [2] F. CAHEN et A. DEJOU. — Le contrôle automatique de la marche en parallèle de très vastes ensembles d'interconnexion. *Bulletin S.F.E.*, n° 92, août 1958.
- [3] J. DANIEL. — Accélération du réglage de vitesse des turbines hydrauliques. *La Houille Blanche*, n° 2, mars-avril 1948.
- [4] A. DEJOU. — Considérations sur les régulateurs des groupes générateurs hydroélectriques de basse chute. *Revue Générale d'Electricité*, août 1948.
- [5] R. FORTER. — Spectre des fluctuations du courant absorbé par un réseau de distribution électrique. *Bulletin S.F.E.*, n° 47, novembre 1954.
- [6] D. GADEN. — Essai d'un procédé pour caractériser la clientèle d'un réseau selon la variabilité de sa consommation. *Bulletin A.S.E.*, n° 2, 1955.
- [7] D. GADEN. — Rapport existant entre les variations de la charge consommée par la clientèle d'un réseau et les variations de fréquence qui en résultent. *Bulletin A.S.E.*, n° 10, 1958.
- [8] D. GADEN. — Nouveaux résultats d'essais concernant le rapport existant entre les variations de la charge consommée par la clientèle d'un réseau et les variations de fréquence qui en résultent. *Bulletin A.S.E.*, n° 2, 1963.
- [9] J. C. GILLE, P. DECAULNE et M. PÉLEGRIN. — Méthodes modernes d'étude des systèmes asservis. *Dunod*, Paris, 1960.
- [10] G. LEHMANN. — Calcul du spectre des fluctuations du courant absorbé par un réseau de distribution électrique. *Bulletin S.F.E.*, n° 34, octobre 1953.
- [11] G. NASSE. — Etude de la stabilité du réglage de vitesse d'un groupe hydroélectrique. *Bulletin S.F.E.*, n° 1, janvier 1951.
- [12] L. PUN. — Régulation de vitesse des groupes hydroélectriques - Analyse et recherche d'une constitution optimum. *Bulletin S.F.E.*, n° 58, octobre 1955.
- [13] G. RANSFORD et P. ARNAUD. — La détermination des caractéristiques optima d'un régleur hydraulique, compte tenu de l'autorégulation et de la pente de la courbe de rendement. *La Houille Blanche*, n° 3, 1958.
- [14] N. WIENER. — The Interpolation, Extrapolation and Smoothing of Stationary Time Series. *Wiley*, New York, 1950.

annexes

I. — Notations.

Comme nous l'avons précisé au paragraphe III, 2 de l'article ci-dessus, les notations suivantes sont extraites d'un système de notations préconisées au sein d'Electricité de France.

Chaque variable est exprimée par un caractère majuscule lorsque l'on considère sa valeur absolue et par le caractère minuscule correspondant pour en symboliser la valeur relative. Ces valeurs relatives sont systématiquement rapportées à la valeur prise en régime permanent par la variable au point de fonctionnement considéré (qui peut différer du régime dit nominal). L'écart de la variable par rapport à sa valeur au régime de référence est explicité en faisant précéder le caractère employé (minuscule ou majuscule suivant le cas) de la lettre majuscule grecque Δ .

Les équations régissant le fonctionnement de l'installation sont explicitées sous leur forme symbolique, en utilisant l'opérateur de Laplace p . Les principales variables utilisées dans la mise en équations d'un complexe hydroélectrique, dans le cas simple où un réseau local est relié à un seul groupe dont la turbine, à simple réglage, est alimenté à partir d'une retenue par une conduite forcée pour laquelle les phénomènes hydrauliques sont assimilables à des réactions de masse, sont les suivantes :

- C : signal extérieur de commande du régulateur (appelé aussi changement de vitesse);
- H : hauteur de chute nette à la turbine;
- N : vitesse de rotation de la turbine (proportionnelle à la fréquence du réseau);
- P_a : puissance électrique fournie par l'alternateur au réseau ;
- P_λ : perturbation de puissance électrique occasionnée par les charges branchées sur le réseau;
- P_τ : puissance mécanique fournie par la turbine à l'arbre du groupe;
- Q : débit d'eau admis à la turbine;
- X : position de l'organe d'admission de la turbine;
- η : rendement hydraulique de la turbine (de valeur relative η_r).

De plus, nous avons utilisé un certain nombre de paramètres, dont les plus caractéristiques sont rappelés ci-dessous (la signification ou l'expression des autres étant précisée au fur et à mesure de leur apparition) :

- b_h : sensibilité relative du débit à la hauteur de chute;
- b_n : sensibilité relative du débit à la vitesse de rotation;
- b_x : sensibilité relative du débit à la position de l'organe d'admission;
- c : rapport adimensionnel des pertes de charge dans la conduite à la hauteur de chute nette;
- d_h : sensibilité relative du rendement à la hauteur de chute;
- d_n : sensibilité relative du rendement à la vitesse de rotation;
- d_x : sensibilité relative du rendement à la position de l'organe d'admission;
- e : coefficient relatif d'autorégulation en couple de l'installation;
- e_λ : coefficient relatif d'autorégulation en couple du réseau;
- e_τ : coefficient relatif d'autorégulation en couple de la turbine;
- r : taux de statisme permanent en ouverture du régulateur;
- s : sensibilité relative de la puissance mécanique à la position de l'organe d'admission;
- T_n : constante de temps de dérivation du détecteur de vitesse (appelée aussi dosage accélérométrique);
- T_x : temps caractéristique de la promptitude du régulateur;
- T_θ : temps caractéristique de l'inertie hydraulique (due au coup de bélier);
- T_σ : temps caractéristique de l'inertie mécanique du groupe (auss appelé temps de lancer).

Ces paramètres interviennent dans les relations avec les valeurs numériques correspondant au régime considéré.

II. — Equations.

Nous n'effectuerons pas ici une étude détaillée de la mise en équations de l'installation, que l'on peut trouver dans d'autres publications, (en particulier [1]). Compte tenu des notations et paramètres définis ci-dessus, les relations de base sont les suivantes :

a) Débit à l'admission de la turbine :

$$\Delta q = b_h \cdot \Delta h + b_n \cdot \Delta n + b_x \cdot \Delta x$$

les conditions de similitude entraînant :

$$b_n = 1 - 2 b_h$$

b) Rendement hydraulique de la turbine :

$$\Delta \eta_r = d_h \cdot \Delta h + d_n \cdot \Delta n + d_x \cdot \Delta x$$

avec la relation de similitude :

$$d_n = -2 d_h$$

c) Hauteur de chute nette à la turbine :

$$\Delta h = -(2c + T_\theta \cdot p) \Delta q$$

c étant, au régime considéré, le rapport des pertes de charges dans la conduite à la hauteur de chute nette.

d) Puissance mécanique fournie par la turbine :

$$\Delta p_\tau = \Delta \eta_r + \Delta q + \Delta h$$

e) Puissance électrique fournie par l'alternateur :

$$\Delta p_a = \Delta p_\lambda + (1 + e_\lambda) \Delta n$$

f) Equation des masses tournantes :

$$T_\sigma \cdot p \Delta n = \Delta p_\tau - \Delta p_a$$

Dans cette équation, on a négligé le temps de lancer des charges du réseau. Dans le cas où il y a lieu d'en tenir compte, il suffit de prendre pour valeur numérique de T_σ la somme des temps de lancer du groupe et du réseau.

Compte tenu du fait que :

$$e = e_\lambda - e_\tau$$

$$e_\tau = b_n + d_n - 1 - 2 b_n c \frac{1 + b_h + d_h}{1 + 2 b_h c}$$

$$s = b_x + d_x - 2 b_x c \frac{1 + b_h + d_h}{1 + 2 b_h c}$$

et en posant :

$$T_\beta = T_\theta \frac{b_x(1 + d_h) - b_h d_x}{1 + 2 b_h c}$$

$$T_\gamma = T_\sigma + T_\theta \frac{b_n(1 + d_h) + b_h(1 + e_\lambda - d_n)}{1 + 2 b_h c}$$

$$T_\delta = \frac{b_h T_\theta}{1 + 2 b_h c}$$

on obtient la relation suivante liant Δn , Δp_λ et Δx :

$$(e + T_\gamma p + T_\delta T_\sigma p^2) \Delta n = (s - T_\beta p) \Delta x - (1 + T_\delta p) \Delta p_\lambda$$

Après avoir posé :

$$F_1 = s - T_\beta p$$

$$F_2 = e + T_\gamma p + T_\delta T_\sigma p^2 \quad F_3 = 1 + T_\delta p$$

on obtient :

$$F_2 \Delta n = F_1 \Delta x - F_3 \Delta p_\lambda$$

d'où découle le schéma de l'installation donné sur la figure 3.

De même, après avoir posé :

$$F_4 = \frac{2c + T_\theta p}{1 + 2b_h c}$$

la relation liant Δh , Δn et Δx s'écrit :

$$F_3 \Delta h = -F_4 (b_x \Delta x + b_n \Delta n)$$

Abstract

Optimized speed governing for hydro-electric power units by B. Favez, M. Lecrique and M. Roquefort

The complex difficulties involved in choosing a characteristic speed-governing "quality criterion" are briefly reviewed and the cases are considered for which statistical information on network load fluctuations is available.

General principles of the determination methods used.

The speed variation range of a unit gives a good indication of "governing quality" for practical purposes. The criterion used in the determination is directly related to this, the aim there being to reduce the standard deviation of speed fluctuations due to random network load fluctuations to a minimum. The principle of Wiener's optimization method is reviewed in this connection.

Application to the speed-governing of a hydroelectric power unit.

The pattern of electricity network power fluctuations found experimentally and theoretically is defined, also the transfer functions for the governed network, for which relevant notations and basic equations are given in the Appendix. Figure 3 shows the general system layout and Figure 4 refers directly to the application of Wiener's method.

Results obtained with Wiener's method.

The principal closed-loop transfer functions for the optimum system are given by formulae (11) and (12), and formulae (13) gives the transfer function form the governor requires so that this optimum system may result. The minimum standard deviation for speed variations is then found by formulae (14). Figure 5 gives this standard deviation in terms of acceleration constant for two special cases.

Optimum governor design.

The possibilities and limitations are compared of three different special governor systems obtained with a accelero-tachometric governor equipped to detect the derivative of power unit acceleration, electric power and net head respectively, with suitable signal-correcting filters in the last two cases. Optimum regulation corresponding to a system stability limit cannot be achieved with the first and third methods, but can with the second in certain cases.

Application of the optimization method to accelero-tachometric governing.

As a definite transfer function is specified for the governor in this case, the method can be used to determine optimum regulation. Figure 10 gives the values of a parameter m_0 in terms of two values u and v depending directly on the characteristics of the system. The standard deviation for speed variations σ_n , the promptitude time constant T_x and the derivative time constant of the speed sensor T_n are found from m_0 by simple formulae. Differences in performance between this adapted form of accelero-tachometric governing and ideal optimum governing are shown for individual applications in Figure 11.