Amélioration de la tenue de la fréquence dans un réseau alimenté par une centrale hydro-électrique

Autor(en): **Cuénod, M. / Wahl, J.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin technique de la Suisse romande**

Band (Jahr): **80 (1954)**

Heft 6

PDF erstellt am: **29.03.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-60700

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

80e année 20 mars 1954 N° 6

BULLETIN TECHNIQUE DE LA SUISSE ROMANDE

Paraissant tous les quinze jours

Abonnements:
Suisse: 1 an, 24 francs
Etranger: 28 francs
Pour sociétaires:
Suisse: 1 an, 20 francs
Etranger: 25 francs
Prix du numéro: Fr. 1.40
Ch. post. « Bulletin technique de la Suisse romande » N° II. 5775, à Lausanne.
Expédition
Imprimerie « La Concorde » Terreaux 31 — Lausanne.
Rédaction
et éditions de la S. A. du Bulletin technique (tirés à part), Case Chauderon 475
Administration générale
Ch. de Rosenesk 6 Lausanne

Organe de la Société suisse des ingénieurs et des architectes, des Sociétés vaudoise et genevoise des ingénieurs et des architectes, de l'Association des Anciens élèves de l'Ecole polytechnique de l'Université de Lausanne et des Groupes romands des anciens élèves de l'Ecole polytechnique fédérale.

Comité de patronage — Président: R. Neeser, ingénieur, à Genève; Vice-président: G. Epitaux, architecte, à Lausanne; Secrétaire: J. Calame, ingénieur, à Genève — Membres, Fribourg: MM. P. Joye, professeur; † E. Lateltin, architecte — Vaud: MM. F. Chenaux, ingénieur; † H. Matti, ingénieur; E. d'Okolski, architecte; Ch. Thévenaz, architecte — Genève: MM. † L. Archinard, ingénieur; Cl. Grosgurin, architecte; E. Martin, architecte; V. Rochat, ingénieur — Neuchâtel: MM. J. Béguin, architecte; R. Guye, ingénieur — Valais: MM. J. Dubuis, ingénieur; D. Burgener, architecte.

Rédaction: D. Bonnard, ingénieur. Case postale Chauderon 475, Lausanne.

Conseil d'administration
de la Société anonyme du Bulletin technique: A. Stucky, ingénieur, président; M. Bridel; G. Epitaux, architecte; R. Neeser, ingénieur.

Tarif des annonces

1/1 page		Fr. 264.—
1/2	»	» 134.40
1/4	»	» 67.20
1/8	»	» 33.60

Annonces Suisses S. A. (ASSA)

Rue Centrale 5. Tél. 22 33 26
Lausanne et succursales

SOMMAIRE : *Amélioration de la tenue de la fréquence dans un réseau alimenté par une centrale hydro-électrique*, par MM. M. Cuénod et J. Wahl, ingénieurs à la Société Ofinco, Genève. — Registre suisse des ingénieurs, des architectes et des techniciens : *Code des devoirs professionnels.* — Bibliographie. — Société vaudoise des ingénieurs et des architectes : *Assemblée générale annuelle.* — Service de placement. — Documentation générale. — Nouveautés, Informations diverses.

AMÉLIORATION DE LA TENUE DE LA FRÉQUENCE DANS UN RÉSEAU ALIMENTÉ PAR UNE CENTRALE HYDRO-ÉLECTRIQUE

par MM. M. CUÉNOD et J. WAHL, ingénieurs à la Société Ofinco, Genève

Introduction

Le réglage automatique de la vitesse des groupes hydro-électriques est un problème complexe. De nombreux travaux ont été consacrés, en particulier, à la détermination de ses conditions de stabilité. Ils ont conduit au développement de dispositifs de stabilisation qui ont pratiquement éliminé tout danger d'instabilité. L'extension des réseaux électriques augmente les exigences imposées à ce réglage automatique. Sa stabilité est une condition nécessaire, mais non suffisante. On exige que la fréquence d'un réseau soit maintenue toujours mieux constante, quelles que soient les fluctuations de la charge du réseau.

Comme le remarque M. Gaden (1) [1] : « Si le maintien de la fréquence au plus près de sa valeur de consigne ne constitue pas toujours un but en soi, il n'en correspond pas moins à une des principales préoccupations des exploitants, ne fût-ce que pour leur permettre de régir convenablement la répartition de la puissance à produire entre les différentes centrales génératrices ainsi que les échanges d'énergie entre réseaux interconnectés. »

L'interconnexion des réseaux s'étendant, les variations de charge tendent à se compenser. Leur importance relative en est réduite. Tout réseau peut cependant devoir fonctionner en régime séparé. Les consommateurs sont enclins à exiger alors la même tenue de la fréquence que lors du fonctionnement avec interconnexion. Pour pouvoir étudier systématiquement l'influence des différents facteurs dont dépend la tenue de la fréquence, il est nécessaire de calculer les écarts de fréquence qui résultent de variations données de la charge du réseau. La répercussion des fluctuations de la charge sur la tenue de la fréquence a déjà fait l'objet de plusieurs exposés (1 à 3). Nous nous proposons de mettre en évidence l'influence des paramètres qui entrent en jeu et de décrire certains dispositifs permettant d'améliorer cette tenue de la fréquence. Nous restreignons cette étude au cas d'une centrale hydro-électrique à basse chute. C'est le cas le plus défavorable. D'autre part, nous ne considérons que des écarts de puissance relativement faibles qui constituent

[1] Les chiffres entre parenthèses se réfèrent à la bibliographie indiquée en fin de l'exposé.

la majorité des variations de la charge d'un réseau d'extension moyenne. Lorsque, par suite du déclenchement d'une ligne d'interconnexion par exemple, il se produit des écarts de charge importants, les caractéristiques du dispositif de réglage des turbines ne sont plus linéaires ; d'autre part on équipe souvent ce dispositif d'organes spéciaux tels que orifices compensateurs ou déflecteurs qui écartent tout danger de survitesse. Le comportement du réglage n'est alors plus le même que pour les faibles variations de puissance. Les écarts de fréquence que l'on constate dans ces cas exceptionnels portent moins à conséquence que les écarts de fréquence normaux qui se produisent en permanence par suite des variations continuelles de la charge du réseau.

I. Brève description du dispositif de réglage d'un groupe hydro-électrique

Le principe du dispositif du réglage de la vitesse d'un groupe hydro-électrique est bien connu. Nous ne ferons qu'en rappeler sommairement les éléments tels qu'ils sont représentés par la figure 1.

La turbine T entraîne par son couple mécanique m_t le générateur G qui débite son énergie sur la charge K et qui oppose le couple électrique m_e. La vitesse angulaire ω est mesurée par le tachymètre R qui commande l'ouverture l de la turbine par l'intermédiaire du servomoteur SM. Soit h la hauteur de chute. La tension u aux bornes de l'alternateur est mesurée par le transformateur de tension Tu et contrôlé par le régulateur de tension Ru qui commande l'excitation de l'excitatrice E. Le potentiomètre P inséré dans le circuit de mesure du régulateur de tension permet d'ajuster la valeur de consigne de la tension aux bornes de l'alternateur. Le réglage de vitesse est stabilisé par un dispositif de stabilisation (accéléromètre ou à statisme passager), dispositif dont le principe est connu et qui n'est pas représenté sur la figure 1. La stabilité peut être améliorée par un asservissement fréquence-tension (4). Pour ce faire, la fréquence du courant débité par l'alternateur est mesurée par le régulateur de fréquence Rf dont la résistance de réglage est branchée dans le circuit de mesure du régulateur de tension. Ainsi la tension aux bornes de l'alternateur est asservie à la fréquence.

Nous admettons tout d'abord que le réseau est isolé et alimenté par un seul groupe. Nous verrons ensuite comment généraliser cette étude au cas d'un réseau alimenté par plusieurs groupes.

II. Détermination de la variation de la vitesse à la suite d'une variation de la charge selon une impulsion rectangulaire

A. *Détermination analytique*

Nous nous proposons d'apporter une contribution à l'étude théorique du réglage automatique de la vitesse d'un groupe hydro-électrique en calculant l'allure des écarts de vitesse résultant d'une variation de la charge du réseau (4-17).

L'allure des fluctuations de charge prend des formes très variées. Le calcul des variations de fréquence

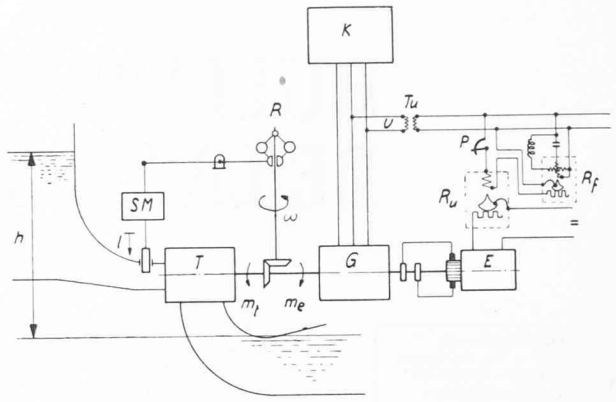


Fig. 1. — Principe de la disposition du dispositif de réglage de vitesse d'un groupe hydro-électrique.

qu'elles provoquent n'est possible par voie analytique que lorsque la variation de charge a une forme très simple. Nous considérons tout d'abord une impulsion rectangulaire.

L'annexe I rappelle comment on obtient le système de cinq équations différentielles définissant la relation dynamique qui existe entre les six variables du dispositif de réglage. Nous considérons les écarts relatifs par rapport à un état de régime initial. Les grandeurs de référence correspondent à la charge nominale du groupe.

Equation des masses tournantes : $T_a \frac{d\nu}{d_t} + \mu_e = \mu_t.$

Equation du couple moteur : $\mu_t = \lambda + \frac{3}{2}\lambda_o\sigma + \nu \mathrm{tg}\alpha_t.$

Equation de la surpression : $\sigma = -\theta\left(\frac{d\lambda}{dt} + \frac{1}{2}\lambda_o \frac{d\sigma}{dt}\right).$

Equation du couple résistant : $\mu_e = \nu \mathrm{tg}\alpha_e + \kappa.$

Equation du dispositif de réglage : $\frac{d\lambda}{dt} = -\left(b\frac{d\nu}{dt} + \frac{1}{T_r}\right).$

Avec ν = variation relative de la vitesse.
λ = variation relative de l'ouverture de la turbine.
μ_t = variation relative du couple moteur.
μ_e = variation relative du couple résistant.
σ = variation relative de la pression.
κ = variation relative de la charge.
T_a = constante d'accélération du groupe.

$$T_a = \frac{PD^2 n^2}{366N} \text{ (sec).}$$

PD^2 en tm^2.
N = puissance nominale du groupe en kW.
n = vitesse angulaire en t/min.
θ = chiffre caractéristique de la conduite

$$\theta = \frac{L\nu_n}{gh_o} \text{ (sec).}$$

L = longueur de la conduite forcée (m)
ν_n = vitesse de l'eau dans la conduite pour la puissance nominale (m/sec)
h_o = hauteur statique du plan d'eau (m).
T_r = constante de temps du dispositif de réglage (sec).
b = facteur de stabilisation.

$\text{tg}\alpha_e$ = augmentation relative du couple résistant en fonction de la vitesse.
$\text{tg}\alpha_t$ = diminution relative du couple moteur en fonction de la vitesse.
λ_o = coefficient de charge du groupe
— pour la charge nominale : $\lambda_o = 1$
— pour la marche à vide : $\lambda_o = 0$.

Pour étudier la relation dynamique qui existe entre les variations de la charge du groupe et les variations de la vitesse, il faut éliminer les quatre variables λ, μ_t, μ_e, et σ, et déterminer ν en fonction de κ. Cette élimination s'effectue de façon commode au moyen du calcul opérationnel qui transforme le système d'équations différentielles en un système d'équations algébriques. En remplaçant le signe de différenciation d/dt par l'opérateur p on obtient :

$$\begin{cases} pT_a\nu + \mu_e = \mu_t \\ \mu_t = \lambda + \frac{3}{2}\lambda_o\sigma + \nu\,\text{tg}\,\alpha_t \\ \sigma = -\theta\left(p\lambda + \frac{1}{2}\lambda_o\, p\sigma\right) \\ \mu_e = \nu\,\text{tg}\,\alpha_e + \kappa \\ p\lambda = -\left(bp\nu + \frac{1}{T_r}\right). \end{cases}$$

Après résolution de ce système d'équations, on obtient l'expression suivante sous forme symbolique pour la variation relative de la vitesse $\nu(p)$ en fonction de la variation relative de la charge $\kappa(p)$.

$$\nu(p) = -\frac{\kappa(p)}{T_a T_c}\,\frac{T_c p^2 + p}{p^3 + Ap^2 + Bp + C}$$

avec $A = \dfrac{T_a + T_c\,(a - 2b)}{T_a T_c}$

$B = \dfrac{T_r\,(a + b) - 2T_c}{T_a T_r T_c}$

$C = \dfrac{1}{T_a T_r T_c}$

$T_c = \lambda_o \dfrac{\theta}{2}$ = constante de temps du dispositif hydraulique.

$a = \text{tg}\,\alpha_e - \text{tg}\,\alpha_t$ = facteur de sensibilité des couples par rapport aux écarts de fréquence.

Le facteur a (voir annexe I) dépend de la structure du réseau et peut être augmenté au moyen d'un asservissement fréquence-tension.

A l'aide des tables de transformation du calcul opérationnel, on peut déterminer la variation de la vitesse en fonction du temps résultant d'une variation de charge selon une impulsion rectangulaire ; cette variation est appelée « courbe de réponse du dispositif de réglage ».

Soit p_1, p_2, p_3, les trois racines de l'équation caractéristique :

$$p^3 + Ap^2 + Bp + C = 0.$$

Il faut distinguer pratiquement deux cas lorsque le réglage est stable :

1° Les trois racines de l'équation sont réelles et négatives :

$$p_1 = -\alpha \qquad p_2 = -\beta \qquad p_3 = -\gamma.$$

Il en résulte :

$$\frac{\nu(t)}{\kappa}\nu = \left(\frac{e^{-\alpha t}}{(\alpha-\beta)\,(\alpha-\gamma)}\right)\left(\frac{1}{T_a T_c} - \frac{\alpha}{T_a}\right) + \frac{e^{-\beta t}}{(\beta-\gamma)\,(\beta-\alpha)}\left(\frac{1}{T_a T_c} - \frac{\beta}{T_a}\right) - \frac{e^{-\gamma t}}{(\gamma-\alpha)\,(\gamma-\beta)}\left(\frac{1}{T_a T_c} - \frac{\gamma}{T_a}\right).$$

Le signe négatif du terme de droite signifie que si la charge augmente, la vitesse diminue et vice versa.

2° Une des racines de l'équation est réelle, les deux autres racines sont conjuguées et complexes :

$$p_1 = -\alpha \qquad p_2 = -\beta + j\Omega \qquad p_3 = -\beta - j\Omega.$$

Il en résulte :

$$\frac{\nu(t)}{\kappa} = -\frac{1}{T_a\,[(\alpha-\beta)^2 + \Omega^2]}\left[e^{-\alpha t}\left(\frac{1}{T_c} - \alpha\right) + \frac{e^{-\beta t}}{\Omega}\sqrt{\left(\beta^2+\Omega^2-\alpha\beta+\frac{\alpha-\beta}{T_c}\right)^2 + \left(\Omega\left(\alpha-\frac{1}{T_c}\right)\right)^2}\,\sin(\Omega t+\delta)\right]$$

avec $\text{tg}\,\delta = \dfrac{\left(\alpha - \dfrac{1}{T_c}\right)\Omega}{\beta^2 + \Omega^2 - \alpha\beta + \dfrac{\alpha-\beta}{T_c}}$.

B. *Détermination expérimentale*

Des essais de décharges partielles ont été effectués à la centrale de Reckingen en décembre 1949 par les soins des maisons Escher-Wyss et Brown-Boveri. La disposition générale de cette centrale est représentée par la figure 2. Cette centrale à basse chute est située au fil de l'eau sur le Rhin. Elle a fait l'objet de plusieurs descriptions (18 et 19). Elle est équipée de deux groupes avec turbine Kaplan et régulateur tachymétrique électrique. Ces groupes ont les caractéristiques suivantes :

puissance nominale de la turbine .	22 500 Ch
puissance nominale de l'alternateur	17 600 kW
PD^2	800 tm²
tension aux bornes de l'alternateur	11 kV
hauteur de chute moyenne	8,5 m
vitesse angulaire nominale	75 t/min
temps de relaxation de l'asservissement passager T_s	8,8 sec
statisme passager δ_t . . . à vide	40 %
à pleine charge	75 %
débit à pleine charge	255 m³/sec
chiffre caractéristique de la conduite	3,5 sec
constante d'accélération T_a	7,45 sec

Lors des essais en question, le groupe débitait une puissance de 8 MW sur des fours. En plus de cette

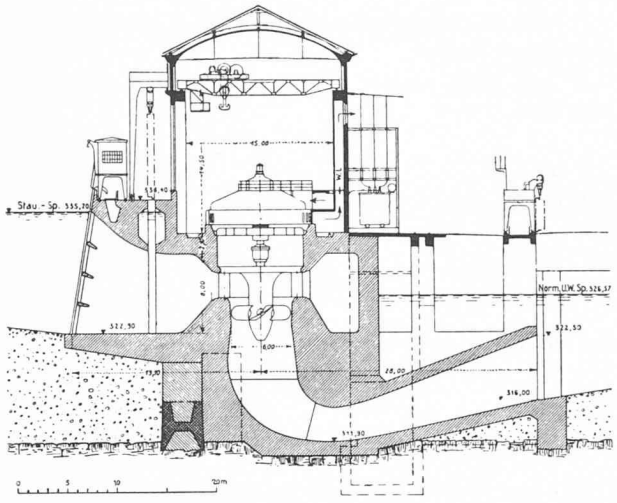


Fig. 2. — Disposition générale de la centrale de Reckingen. [Tiré de (19)].

charge de base, on enclenchait et déclenchait une résistance hydraulique consommant 5 MW. La marche du groupe était stabilisée par un statisme passager et par un asservissement fréquence-tension tel que le coefficient de sensibilité des couples aux écarts de fréquence était environ de 2,5 (à demi-charge).

Le diagramme donné par la figure 3 représente

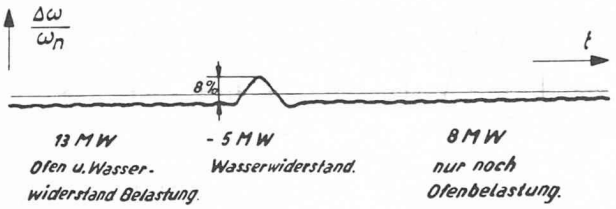


Fig. 3. — Diagramme de la variation de la vitesse résultant d'une décharge partielle du groupe.

l'augmentation passagère de la vitesse qui a résulté de la décharge partielle provoquée par le déclenchement de la résistance hydraulique. L'avancement du papier étant de 1 mm par seconde, nous constatons qu'après 5 sec, l'écart de vitesse atteignait sa valeur maximum de 8 % et s'annulait après 10 sec sans présenter d'oscillation. Ce diagramme fait honneur aux fournisseurs du tachymètre et du dispositif de réglage. Il illustre l'action favorable de l'asservissement fréquence-tension sur le réglage de la vitesse.

Compte tenu du fait que le groupe est à demi-charge, nous avons introduit les valeurs numériques suivantes :

charge relative $\lambda_o \cong 0{,}5$

statisme temporaire $\delta_t \cong 60\ \%$;

constante de temps du dispositif de réglage

$$T_r = \delta_t T_i \cong 5{,}5 \text{ sec} ;$$

constante de temps du dispositif hydraulique

$$T_c = \theta \frac{\lambda_o}{2} = \frac{3{,}5 . 0{,}5}{2} \cong 0{,}9 \text{ sec} ;$$

constante d'accélération du groupe

$$T_a = 7{,}45 \text{ sec} ;$$

facteur de stabilisation

$$b = \frac{1}{\delta_t} = 1{,}6 ;$$

facteur de sensibilité des couples aux écarts de fréquence $a = 3$.

Nous obtenons comme variation de vitesse résultant d'une variation unitaire de la charge l'expression suivante :

$$\Phi_R = -0{,}247 .$$

$$\left(1{,}065\, e^{-0{,}046\, t} + 1{,}068\, e^{-0{,}518 t} . \sin (0{,}567\, t + 4{,}781)\right).$$

Cette variation est représentée par la courbe 1 de la figure 4. La courbe 2 représente cette variation pour $a = 2$.

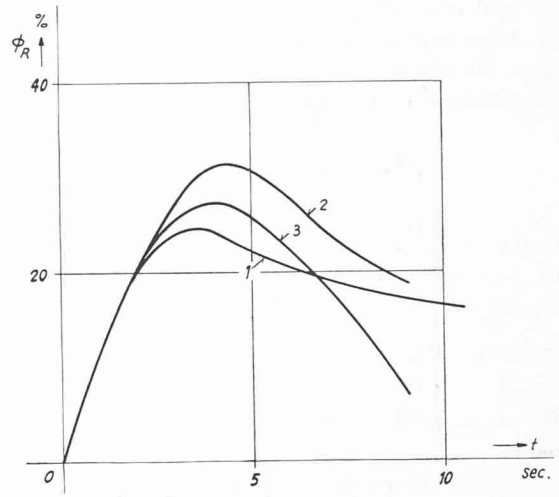


Fig. 4. — Comparaison entre les variations de la vitesse mesurées et calculées.

Courbe 1 : Variation de vitesse calculée avec $a = 3$.
Courbe 2 : Variation de vitesse calculée avec $a = 2$.
Courbe 3 : Variation de vitesse mesurée.

Par simplification, nous avons représenté la courbe de réponse positive. Elle correspond à une diminution de charge. Nous avons conservé cette représentation dans la suite de l'exposé.

La courbe 3 représente la variation mesurée ramenée à une variation unitaire de la charge.

La courbe mesurée est encadrée par les deux courbes déterminées par voie analytique. L'amplitude et le moment de l'écart de fréquence maximum calculés coïncident assez bien avec les valeurs obtenues par voie expérimentale. Cette concordance est satisfaisante si l'on tient compte des considérations suivantes :

- Certaines valeurs numériques ne sont pas connues avec précision.
- Plusieurs hypothèses simplificatrices ont été nécessaires pour rendre le calcul analytique possible (voir annexe I).
- L'écart de charge de 5 MW est une variation très importante par rapport à la charge de 13 MW. Elle sort des limites de validité des calculs établis pour des variations de charge relativement faibles.

La courbe de réponse permet de préciser la notion souvent mal définie de « rapidité de réglage ». Dans chaque cas particulier, il est nécessaire de préciser ce que l'on désigne par cette expression.

III. Détermination des caractéristiques optimums du dispositif de réglage

Un réglage automatique est stable si les parties réelles des racines de l'équation caractéristique qui décrit son comportement sont négatives. On sait que cette condition peut être contrôlée à l'aide du critère de Hurwitz (15).

L'équation caractéristique du dispositif de réglage de vitesse indiquée au paragraphe II a la forme :

$$p^3 + Ap^2 + Bp + C = 0.$$

En chassant les dénominateurs des coefficients A, B et C on obtient :

$$a_o p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3 = 0 ;$$

avec :

$$a_o = T_a\, T_c\, T_r$$

$$a_1 = T_r\left(T_a + T_c\,(a - 2b)\right)$$

$$a_2 = T_r\,(a + b) - 2\,T_c$$

$$a_3 = 1.$$

Les deux conditions de stabilité sont que :

1°) tous les coefficients de cette équation soient de même signe ;

2°) $a_o\, a_3 - a_1\, a_2 = T_r\,(T_a + aT_c - 2\,b\,T_c)\,(aT_r + b\,T_r - 2\,T_c) - T_a\,T_c\,T_r > 0.$

En résolvant cette inégalité par rapport à T_r on obtient :

$$T_r > \frac{4\,b\,T_c^2 - 3\,T_c\,T_a - 2\,a\,T_c^2}{2b^2\,T_c + b\,(aT_c - T_a) - a^2\,T_c - aT_a}.$$

La figure 5 *a* représente la valeur limite de T_r en fonction de b pour les mêmes valeurs numériques que précédemment, à savoir :

$$T_a = 7{,}45 \text{ sec}$$
$$T_c = 0{,}9 \text{ sec}$$
$$a = 2$$

Pour satisfaire la condition 1) ci-dessus, la valeur de T_r doit être comprise entre les deux asymptotes verticales. T_r est minimum pour une valeur optimum du facteur de stabilisation b_{opt} :

$$b_{opt} = \frac{2\,aT_c + 3\,T_a - \sqrt{3\,T_c^2 + 6\,a\,T_a\,T_c}}{4\,T_c}.$$

La figure 5 *b* représente la variation de b_{opt} en fonction de a avec le coefficient de charge λ_o comme paramètre. La figure 5 *c* représente les valeurs minimums admissibles pour T_r en fonction de a avec λ_o comme paramètre (coefficient de charge). Cette valeur est valable seulement dans l'hypothèse que le facteur de stabilisation a sa valeur optimum b_{opt}.

Dans le cas particulier où $a = 0$, nous obtenons [1] :

$$b_{opt} = 0{,}317\,\frac{T_a}{T_c}$$

$$T_{r\,min} > 14{,}89\,\frac{T_c^2}{T_a}.$$

Dans le cas particulier où $b = 0$, c'est-à-dire si l'on supprime toute action du dispositif de stabilisation, nous obtenons :

$$T_r > \frac{3T_aT_c + 2aT_c^2}{a^2T_c + aT_a}.$$

Pour la centrale de Reckingen, avec $a = 0$, les conditions de stabilité sont les suivantes :

$$b_{opt} = \frac{T_a}{T_c}\,0{,}317 = \frac{7{,}45}{1{,}8}\,0{,}317 \cong 1{,}3$$

$$T_r > 14{,}81\,\frac{T_c^2}{T_a} = 6{,}45 \text{ sec.}$$

Il en résulte le statisme passager optimum suivant :

$$\delta_{t\,opt} = \frac{1}{b} = 0{,}77 \quad \text{soit } 77\ \%.$$

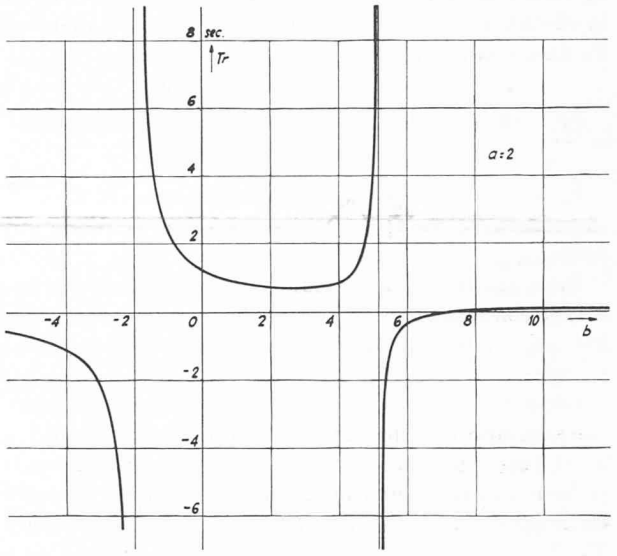


Fig. 5 *a* : Détermination de T_{min} en fonction de b avec $a = 2$.

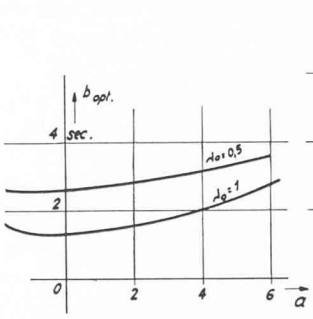


Fig. 5 *b* : Détermination de b_{opt} en fonction de a avec le coefficient de charge λ_o comme paramètre.

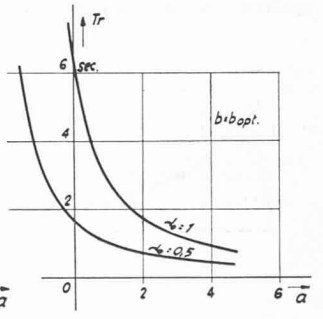


Fig. 5 *c* : Détermination de T_r en fonction de a avec le coefficient de charge λ_o comme paramètre et dans l'hypothèse que $b = b_{opt}$.

Fig. 5. — Relation entre le coefficient de stabilisation et la constante de temps du dispositif de réglage d'une part et le coefficient de sensibilité des couples par rapport aux écarts de fréquence d'autre part.

[1] Nous retrouvons, par ce cas particulier, les résultats obtenus précédemment pour la pleine charge du groupe ($\lambda_0 = 1$)

— par M. Gaden (5)

$T_r\,T_a > K\left(\frac{3}{5}\right)^2$ avec $K = 1{,}66$ et $\theta = 2T_c$

à savoir $T_r\,T_a > 1{,}66\,(3T_c)^2 = 14{,}89\,T_c$

— par M. Almeras (7)

$$K_1 = b = \frac{T_a}{\theta}\,0{,}633 = \frac{T_a}{T_c}\,0{,}3165$$

$$K_0 = \frac{1}{T_r} = 0{,}268\,\frac{T_a}{\theta^2} = \frac{T_a}{T_c^2}\,\frac{1}{14{,}89}$$

Cette valeur est proche de celle qui a été choisie (75 %). La constante de temps du dispositif de réglage réalisé est la suivante, à pleine charge :

$$T_r = 8{,}8 . 0{,}75 = 6{,}6 \text{ sec.}$$

Cette valeur est légèrement supérieure à celle que le calcul donne comme valeur minimum admissible. Le groupe est donc à la limite de sa stabilité.

La figure 5 *c* montre que pour la valeur relativement faible du facteur $a = 2$ la valeur minimum admissible de la constante de temps du réglage peut être réduite de 6,4 à 1,7 sec. Autrement dit, pour la valeur de la constante de temps choisie, on obtient, avec $a = 2$, une grande marge de stabilité (voir le paragraphe suivant).

D'autre part, on constate que lorsque la charge diminue, le facteur de stabilisation pourrait augmenter et la constante de temps du dispositif de réglage diminuer.

Exemple : Si l'on passe de la pleine charge à la demi-charge pour $a = 0$, la valeur optimum de b pourrait augmenter de 1,3 à 2,6 et la constante de temps T_r diminuer de 6,45 à 1,81 sec.

Il en a été tenu compte pour le dispositif de réglage de vitesse de la centrale de Reckingen. En effet, lorsque la charge diminue, le statisme passager et la valeur de T_r diminuent.

IV. Influence des caractéristiques de l'installation sur la tenue de la fréquence

La « qualité » d'un réglage automatique est d'autant meilleure que les écarts de la grandeur contrôlée sont faibles.

Pour déterminer les conditions optimum de réglage, il faut connaître non seulement les conditions de stabilité, mais aussi l'allure de la variation de la grandeur à régler.

Cette allure peut être caractérisée en particulier par :
— l'amplitude maximum de l'écart et
— l'intégrale de la valeur absolue de l'écart.

Nous avons vu que le comportement d'un dispositif de réglage de vitesse est défini par cinq paramètres : T_a, T_r, T_c, a et b.

Une détermination systématique des répercussions de toutes les combinaisons possibles de ces différents paramètres conduirait à de très longs calculs. Pour estimer l'influence de chacun d'eux, nous nous sommes contentés de les faire varier l'un après l'autre séparément. Dans chaque cas, l'amplitude maximum de l'écart de vitesse et l'intégrale de la valeur absolue de cet écart ont été déterminées en fonction de cette variation. Comme valeurs de référence, nous avons pris celles de l'exemple déjà calculé avec les données suivantes :

$T_a = 7{,}45$ sec $\qquad a = 2$
$T_r = 5{,}5$ sec $\qquad b = 1{,}6$
$T_c = 0{,}9$ sec

La courbe de réponse de ce cas de référence est portée en trait fort sur les figures 6 à 11.

A. *Influence de la constante d'accélération* T_a

La partie supérieure de la figure 6 montre la courbe de réponse obtenue pour trois valeurs de T_a. On constate que, lorsque la constante d'accélération est faible, l'amplitude maximum s'accroît et le processus de réglage prend un caractère oscillatoire. Si, par contre, T_a est grand, l'amplitude maximum diminue ; par contre, l'écart de vitesse prend davantage de temps à s'annuler.

Dans la partie inférieure de la figure 6 sont indiquées, en fonction de T_a, la valeur relative de l'amplitude maximum $\Phi_{R\,max}$ de l'écart de fréquence, ainsi que celle de la surface intégrée S de 0 à 30 sec de cet écart. L'amplitude maximum décroît lorsque T_a augmente ; la surface intégrée passe par un minimum aux environs de 7,45 sec, ce qui constitue une sorte d'optimum dans le cas particulier, toutes autres choses restant égales.

B. *Influence de la constante de temps du dispositif de réglage* T_r

La figure 7 représente la courbe de réponse pour différentes valeurs de T_r, la valeur relative de l'amplitude maximum de l'écart de fréquence et la surface intégrée. L'écart maximum dépend dans une faible mesure de T_r. La surface intégrée présente un minimum

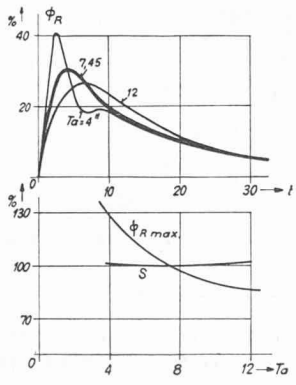


Fig. 6. — Influence de la constante d'accélération T_a sur la tenue de la fréquence.

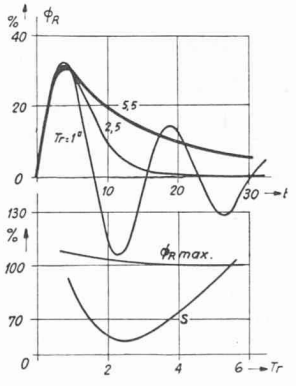


Fig. 7. — Influence de la constante de temps du dispositif de réglage T_r sur la tenue de la fréquence.

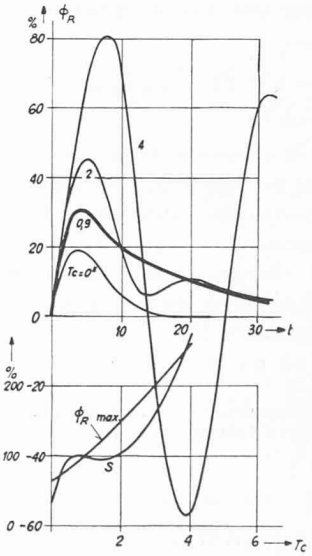


Fig. 8. — Influence de la constante de temps de la conduite forcée T_c sur la tenue de la fréquence.

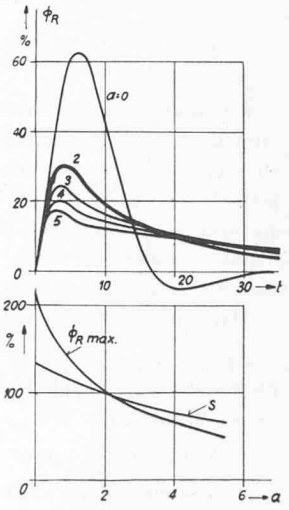


Fig. 9. — Influence du facteur de sensibilité des couples par rapport aux écarts de fréquence (facteur a) sur la tenue de la fréquence.

accusé aux environs de 2,5 sec, valeur optimum. Le processus de réglage est à la limite entre les régimes périodique et apériodique.

C. *Influence de la constante de temps* T_c *de la conduite forcée*

La figure 8 illustre l'influence défavorable du coup de bélier sur la tenue de la fréquence. La constante de temps T_c de la conduite forcée dépend d'une part des caractéristiques hydrauliques de l'installation, d'autre part du coefficient de charge.

Pour les centrales à grand débit et à basse chute, les conditions de réglage les plus défavorables sont obtenues lorsqu'elles sont à pleine charge.

La valeur $T_c = 2$ sec correspond environ à la pleine charge de la centrale de Reckingen. Lorsque T_c augmente, l'amplitude de l'écart maximum et la valeur de l'intégrale de l'écart augmentent également ; cette augmentation serait encore plus accusée si l'intégrale n'était pas limitée à 30 sec.

Pour $T_c = 4$, nous approchons déjà de la limite de stabilité.

D. *Influence du facteur de sensibilité des couples aux écarts de fréquence* (facteur a)

La figure 9 met en évidence l'action favorable du facteur a sur la tenue de la fréquence. En passant de 0 à 2, l'écart maximum de fréquence diminue de 50 %. Ce facteur peut être augmenté par un asservissement de la tension à la fréquence. Cependant, il est souhaitable de limiter la valeur de ce coefficient à $2 \div 3$. Au-delà de ces valeurs, l'amélioration des conditions de réglage de la vitesse est relativement faible.

E. *Influence du facteur de stabilisation* (facteur b)

La figure 10 montre qu'il existe une valeur optimum de ce facteur, valeur qui est de 3,5 environ. Si l'on dépasse la valeur critique de 4,5 environ, le réglage devient instable comme le montre la courbe obtenue pour la valeur de $b = 6{,}4$.

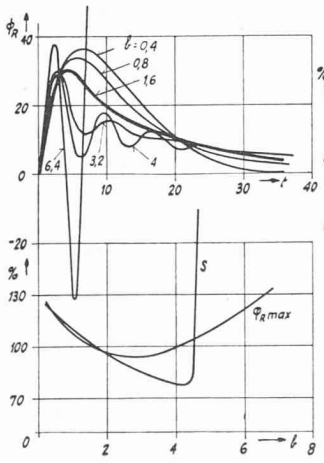


Fig. 10. — Influence du facteur de stabilisation (facteur b) sur la tenue de la fréquence.

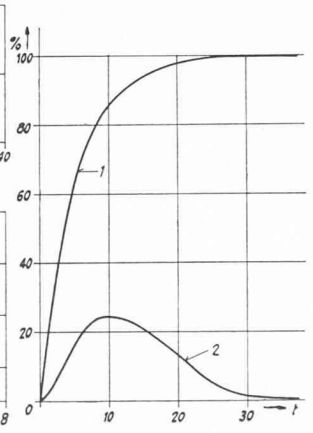


Fig. 11. — Variation de la vitesse résultant d'une variation progressive de la charge.
Courbe 1 : Allure de la variation progressive de la charge ($T_k = 5$ sec).
Courbe 2 : Variation résultante de la vitesse.

Nous concluons que le facteur de stabilisation doit être convenablement dosé. Il est moins défavorable que la valeur choisie soit inférieure à la valeur optimum que supérieure. Cette valeur optimum varie avec la charge et augmente lorsque la charge diminue.

V. Détermination des variations de la vitesse à la suite d'une variation de la charge de forme quelconque

Lorsque l'on a déterminé par le calcul ou par voie expérimentale la variation de vitesse résultant d'une variation de la charge selon une impulsion rectangulaire, il est aisé de déterminer les variations de la vitesse résultant d'une variation quelconque de la charge au moyen du calcul à l'aide de suites (20).

Il suffit de faire le « produit composé » de la suite caractérisant la courbe de réponse de la vitesse par la suite de la dérivée de l'à-coup de charge (voir annexe II). Nous considérons deux cas particuliers :

— variation progressive de la charge ;
— variation de la charge sous forme d'à-coup.

A. *Variation progressive de la charge*

La cause d'écarts de vitesse est que d'une part la variation de la charge électrique d'un groupe peut être instantanée, mais que d'autre part, la variation de la puissance fournie par la turbine ne peut être que graduelle par suite de l'inertie de l'eau dans la conduite forcée. Cette cause est atténuée si la variation de la charge est progressive. Ceci peut être obtenu par exemple, lorsque la charge a un caractère ohmique, en modifiant passagèrement la tension aux bornes de l'alternateur lors d'une variation de la charge.

La courbe 1 de la figure 11 représente une variation progressive de la charge avec une constante de temps $T_k = 5$ sec. La courbe 2 représente la variation de la vitesse qui en résulte en admettant les valeurs numériques suivantes :

$$T_a = 7{,}45 \text{ sec} ; \quad T_r = 4{,}4 \text{ sec} ; \quad T_c = 0{,}9 \text{ sec} ; \quad a = 2 ; \quad b = 0{,}5.$$

La partie supérieure de la figure 12 montre la variation de la vitesse pour différentes valeurs de T_k.

La partie inférieure de cette figure indique la valeur maximum $\Phi_{R\,max}$ de l'écart de vitesse en fonction de cette constante de temps ainsi que l'intégrale S de cet écart.

Cette figure met en évidence combien il est possible de réduire la valeur maximum de l'écart de fréquence résultant d'une variation de la charge en rendant cette variation progressive.

B. *Variations de la charge sous forme d'à-coups triangulaires*

Les variations de la charge d'un réseau électrique se présentent sous la forme d'à-coups plus ou moins réguliers se superposant à une charge moyenne. La courbe 1 de la figure 13 représente un à-coup unitaire de forme triangulaire ayant une durée $T_i = 8$ sec, et la courbe 2 la variation de vitesse qui en résulte en admettant les mêmes valeurs numériques que dans le paragraphe précédent ; nous voyons que cette variation prend la forme d'une oscillation rapidement amortie.

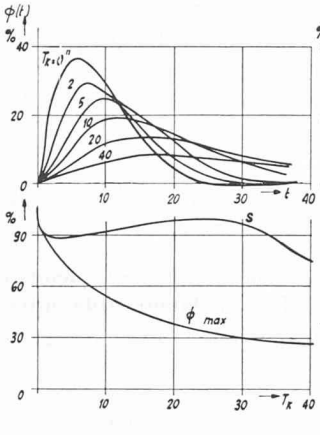


Fig. 12. — Influence de la constante de temps T_k d'une variation progressive de la charge sur la tenue de la fréquence.

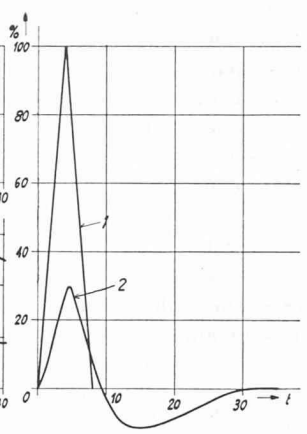


Fig. 13. — Variation de la vitesse résultant d'une variation de la charge sous forme d'à-coup.

Courbe 1 : Variation de charge de forme triangulaire ($T_i = 8$ sec).
Courbe 2 : Variation résultante de la vitesse.

La partie supérieure de la figure 14 représente les variations de vitesse résultant d'à-coups de charge unitaire de forme triangulaire et de différentes durées T_i.

La courbe 1 de la partie inférieure de cette même figure représente la valeur relative de l'amplitude maximum de l'écart de vitesse en fonction de la durée de l'à-coup T_i. La courbe 2 représente la valeur relative de la surface intégrée par cet écart, la courbe 3 représente le rapport de cette surface divisée par la surface de l'à-coup. Comme valeurs de référence, nous avons choisi celles qui correspondent à un à-coup de 16 sec.

Cette figure montre que, pour des à-coups de charge de très faibles durées, la variation de vitesse est négligeable. La variation de puissance est fournie par l'énergie cinétique accumulée dans les masses tournantes du réseau.

Pour des à-coups de longue durée, la variation de fréquence est également très faible. Le dispositif de réglage a le temps d'ajuster l'ouverture de la turbine à la puissance demandée.

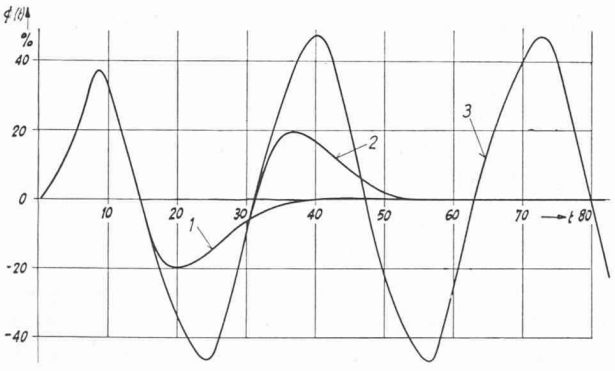


Fig. 15. — Influence de la répétition des à-coups de charge sur la tenue de la fréquence.

Courbe 1 : Variation de la vitesse résultant d'un à-coup isolé de 8 sec.
Courbe 2 : Variation de la vitesse résultant d'un double à-coup alterné de 2×8 sec.
Courbe 3 : Variation de la vitesse résultant d'une succession d'à-coups alternés de 8 sec.

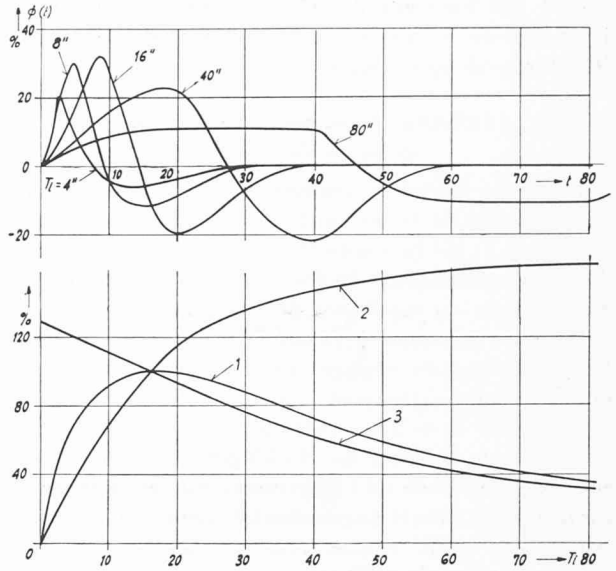


Fig. 14. — Influence de la durée T_i d'un à-coup de charge sur la tenue de la fréquence.

Courbe 1 : Ecart maximum relatif de la vitesse.
Courbe 2 : Valeur relative de la surface intégrée par la variation de vitesse.
Courbe 3 : Valeur relative de la surface intégrée de la variation de fréquence divisée par la surface de l'à-coup.

Par contre; pour une durée intermédiaire de l'à-coup qui correspond à la fréquence propre du dispositif de réglage, l'écart de vitesse passe par une valeur maximum.

Nous avons considéré jusqu'à présent le cas de l'à-coup isolé. Si l'on considère le cas d'une succession d'à-coups, positifs et négatifs, il suffit de superposer l'écart de vitesse résultant de chacun des à-coups pris isolément. La courbe 1 de la figure 15 représente la variation de vitesse qui résulte d'un à-coup de 16 sec. La courbe 2 représente la variation de vitesse qui résulte du double à-coup négatif et positif. Nous constatons que l'écart maximum de fréquence augmente et passe de 32 % à 48 %. La courbe 3 représente la variation de vitesse qui résulte de la succession d'à-coups alternativement positifs et négatifs. Nous voyons que l'écart maximum de vitesse n'augmente pas, mais se stabilise à 48 %.

Cette méthode de calcul est utilisable pour toutes les formes d'à-coups. Le diagramme de charge du réseau indiquera dans chaque cas la forme à prendre en considération.

VI. Le régulateur différentiel

Nous avons vu précédemment tout l'intérêt qu'il y a pour la tenue de la fréquence que les variations de charge se fassent de façon progressive. On peut l'obtenir, lorsque la charge est ohmique, en insérant dans le circuit de mesure du régulateur de tension la résistance de réglage d'un « régulateur différentiel » qui enregistre les variations de la puissance active fournie par le groupe.

A. *Principe de réalisation*

La figure 16 donne le principe d'un régulateur différentiel. Le système moteur M mesure la grandeur que l'on veut enregistrer, par exemple la puissance active

fournie par le groupe. En régime permanent, le couple de ce système moteur est en équilibre avec le couple du ressort antagoniste F_1.

En cas de variations de la grandeur enregistrée, la rotation de l'arbre du système moteur est transmise

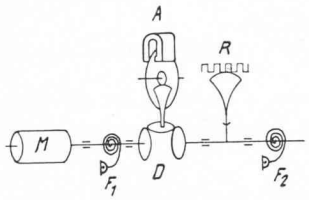


Fig. 16. — Disposition de principe du régulateur différentiel.

par l'intermédiaire du différentiel D et déplace le segment de contact de la résistance de réglage R. Le ressort F_2, tendu, se détend alors progressivement par l'intermédiaire du différentiel D en entraînant le disque de l'amortissement A. Il ramène le contact de la résistance de réglage à sa position initiale (position médiane) dès que le couple du système moteur est constant pendant un temps suffisant.

La figure 17 illustre le fonctionnement de ce régulateur.

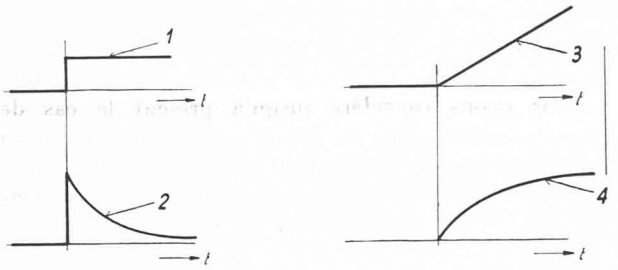


Fig. 17. — Courbe de réponse du régulateur différentiel.

Courbe 1 : Variation de la grandeur mesurée selon une impulsion rectangulaire.
Courbe 2 : Course du régulateur résultant d'une variation de la grandeur mesurée selon la courbe 1.
Courbe 3 : Variation de la grandeur mesurée selon une fonction linéaire.
Courbe 4 : Course du régulateur résultant d'une variation de la grandeur mesurée selon la courbe 3.

La courbe 1 représente une variation selon une impulsion rectangulaire de la grandeur enregistrée par le système de mesure.

La courbe 2 représente la course du contact mobile de la résistance de réglage R ; c'est la courbe de réponse du régulateur :

La courbe 3 représente une variation linéaire de la grandeur mesurée.

La courbe 4 indique la course du contact mobile qui en résulte. Cette course tend asymptotiquement vers une valeur constante. Le régulateur différentiel mesure ainsi en quelque sorte la dérivée de la grandeur enregistrée.

B. *Utilisation du régulateur différentiel*

On pourrait compléter avantageusement l'action des dispositifs de réglage connus, en utilisant le régulateur différentiel dans un grand nombre de problèmes de réglage.

En particulier, pour asservir la tension aux fluctuations de la charge, il faut brancher ce régulateur différentiel de la même façon que le régulateur de fréquence R_f de la figure 1, à la seule différence que son système de mesure est connecté en wattmètre.

Si la charge augmente, la tension est passagèrement diminuée pour ramener la charge à sa valeur initiale ; puis la tension rejoint sa valeur de consigne à un rythme tel que la turbine puisse fournir au fur et à mesure la charge demandée.

En agissant sur le dispositif de changement de vitesse — ou directement sur l'ouverture de la turbine, le régulateur différentiel peut compléter l'action de l'accéléromètre en provoquant, lors d'une augmentation de charge par exemple, une ouverture de la turbine avant même que la fréquence n'ait eu le temps de varier. Cette méthode permet de relier directement la cause (variation de la charge) à l'effet que l'on veut obtenir (variation de l'admission de l'eau entraînant la turbine) sans passer par le truchement de la variation de la vitesse (grandeur dérivée). La tâche du régulateur de vitesse n'est alors que de nuancer et de compléter l'action de ce premier réglage en fonction des écarts de puissance. *(à suivre)*

REGISTRE SUISSE DES INGÉNIEURS, DES ARCHITECTES ET DES TECHNICIENS

Code des devoirs professionnels [1]

Ce code est fondé sur les règles en usage dans les associations ayant institué le Registre :

S.I.A. *Société suisse des ingénieurs et des architectes.*
U.T.S. *Union technique suisse.*
F.A.S. *Fédération des architectes suisses.*
A.S.I.C. *Association suisse des ingénieurs-conseils.*

Les ingénieurs, architectes et techniciens inscrits au Registre sont conscients de l'importance de la technique et de l'architecture dans la vie moderne et de leurs responsabilités envers la société.

Ils exercent leur profession en tenant compte du progrès technique et des règles générales que la morale et la culture imposent.

Ils respectent les droits professionnels et la dignité de leurs collègues, de leurs chefs et de leurs collaborateurs.

Ils s'engagent à observer les règles suivantes et s'efforcent de les faire appliquer :

1. Ils défendent les intérêts légitimes du mandant au mieux de leur expérience et selon les règles de l'art et ne cherchent pas à faire illusion sur les limites de leurs propres capacités.
2. Ils observent la dignité que leur profession requiert ; ils ne recourent à aucun procédé contraire à l'honneur.
3. Ils sont liés par le secret professionnel sur les affaires de leurs clients ou de leurs employeurs.

[1] Publié à la demande du Secrétariat général de la S.I.A. (Réd.).