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 7

PDF erstellt am: **24.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-60701

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 3 avril 1954 N° 7

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* (suite et fin), par MM. M. Cuénod et J. Wahl, ingénieurs à la Société Ofinco, Genève. — Divers : *Transmission de l'énergie électrique à haute tension.* — Bibliographie. — Carnet des concours. — Service de placement. — Documentation générale. — Nouveautés, Informations diverses.

Supplément : « Bulletin S. I. A. » n° 5.

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

(Suite et fin) [1]

VII. Influences des conditions réelles d'exploitation

A. *Marche en parallèle des groupes*

Nous avons admis, comme base de calcul, que le réseau était alimenté par un seul groupe. En pratique, cette condition de marche est exceptionnelle. L'étude générale du comportement d'un réseau alimenté par différents groupes en parallèle conduit à des calculs très longs. Cependant, ce cas général peut être ramené en première approximation à celui que nous avons traité, si l'on admet que les impédances des lignes et transformateurs d'accouplement sont relativement faibles. Il suffit d'introduire comme constantes de calculs les moyennes pondérées définies de la façon suivante :

1. *Constante d'accélération du réseau* T_a

$$T_a = \frac{(3000)^2 \Sigma PD_i^2 \left(\frac{n_i}{3000}\right)^2}{366\, N_{tot}}$$

avec $PD_i^2 = PD^2$ des différentes masses tournantes accouplées au réseau ;
n_i = vitesse angulaire en t/min de ces masses tournantes ;
N_i = puissance des différents groupes alimentant le réseau ;
$N_{tot} = \Sigma N_i$ = puissance totale mise en jeu dans le réseau.

2. *Constante de temps des dispositifs de réglage du réseau* T_r

$$\frac{1}{T_r} = \frac{1}{N_{tot}} \Sigma \frac{N_i}{T_{ri}}$$

avec T_{ri} = constante de temps des dispositifs de réglage des différents groupes.

3. *Constante de temps des dispositifs hydrauliques*

$$T_c = \frac{1}{N_{tot}} \Sigma T_{ci} N_i$$

avec T_{ci} = constante de temps des dispositifs hydrauliques des différents groupes.

[1] Voir *Bulletin technique* du 20 mars 1954, p. 77.

4. *Facteur de stabilisation du réseau*

$$b = \frac{\Sigma\, b_i\, N_i}{N_{\text{tot}}}$$

avec b_i = facteur de stabilisation des différents groupes.

5. *Sensibilité des couples moteurs par rapport aux écarts de fréquence*

$$\operatorname{tg} \alpha_t = \frac{1}{N_{\text{tot}}} \Sigma \operatorname{tg} \alpha_{ti}\, N_i$$

avec $\operatorname{tg} \alpha_{ti}$ = sensibilité des couples moteurs des différents groupes.

6. *Sensibilité des couples résistants par rapport aux écarts de fréquence*

$$\operatorname{tg} \alpha_e = \frac{1}{N_{\text{tot}}} \Sigma \operatorname{tg} \alpha_{ei}\, K_i$$

avec $\operatorname{tg} \alpha_{ei}$ = sensibilité des couples résistants des différents consommateurs ;
K_i = charge des différents consommateurs.

7. *Variation relative de la charge*

$$\kappa = \frac{\Delta K}{N_{\text{tot}}}.$$

Plus l'interconnexion est étendue, plus la valeur relative de la variation de charge — et l'écart de fréquence qui en résulte — diminuent, ce qui explique l'influence très favorable de l'interconnexion sur la tenue de la fréquence.

B. *Caractéristiques dynamiques du réglage de tension*

Implicitement, nous avons admis que le réglage de tension s'effectuait instantanément (voir annexe I). En fait, ce n'est pas le cas : la constante de temps du dispositif de réglage de tension n'est pas négligeable par rapport à celle du dispositif de réglage de vitesse. Cependant, par suite de l'inertie du champ magnétique du circuit d'excitation du générateur, la tension varie tout d'abord proportionnellement à la variation de vitesse. La variation de tension est ensuite encore accentuée lorsque l'excitatrice principale et l'excitatrice auxiliaire se trouvent sur le même arbre que le rotor du générateur ; les tensions de chacune de ces excitatrices varient proportionnellement à la vitesse, et leurs variations se multiplient. Il en résulte que cette tension peut varier avec le carré et même le cube de l'écart de vitesse avant l'intervention du régulateur de tension (4). Cette variation agit favorablement sur la stabilité du réglage de vitesse. La modification de la valeur de consigne de la tension en fonction de la fréquence ou de l'écart de puissance renforce encore cette tendance à l'auto-régulation, en retardant le retour de la tension à sa valeur de consigne. Cette action s'effectue bien entendu au détriment de la tenue de la tension.

La tension et la fréquence apparaissent comme deux grandeurs complémentaires. Si on laisse les conséquences des variations de charge se répercuter sur l'une et l'autre de ces grandeurs, les variations résultantes pour chacune d'elles restent dans les limites acceptables.

L'hypothèse que nous avons faite (voir annexe I) d'un réglage de tension infiniment rapide se justifie puisque la variation naturelle de la tension en fonction de la vitesse compense le retard dû à l'inertie du régulateur de tension.

C. *Statisme permanent*

Nous avons admis que ce statisme était nul ; c'est-à-dire que le réglage de tension était astatique. Si toutefois, pendant le régime transitoire qui suit une variation de la charge, cette hypothèse est légitime, elle cesse de l'être si l'écart de fréquence en régime permanent n'est pas négligeable par rapport à l'écart de fréquence qui se produit pendant la période de réglage. Il est évident que pour la fréquence, le statisme permanent doit être choisi aussi faible que possible. Sa valeur minimum est donnée par la nécessité d'assurer une bonne répartition de la charge active des groupes interconnectés. Il est sans autre possible de tenir compte dans les calculs de l'influence du statisme permanent, au détriment cependant de la simplicité des calculs.

D. *Sensibilité des régulateurs de vitesse*

Nous avons également admis que le tachymètre était infiniment sensible, et qu'il enregistrait les moindres écarts de vitesse. Cette hypothèse n'est pas toujours admissible. Tout appareil de mesure est affecté d'une certaine zone d'insensibilité.

Pour les tachymètres modernes tels que celui de la centrale de Reckingen, cette insensibilité est inférieure à 0,3 ‰ (21). Elle n'a donc pratiquement pas d'influence sur le régime transitoire qui suit immédiatement une variation de charge.

Pour obtenir une bonne tenue de la fréquence, il est souhaitable que la sensibilité des régulateurs soit aussi élevée que possible.

E. *Réserves tournantes*

Nous avons admis également que les variations de charge n'excédaient pas la capacité de surcharge des groupes alimentant le réseau. Au-delà de cette limite, le régulateur de vitesse est à fin de course ; l'écart de fréquence n'est alors limité que par le facteur de sensibilité des couples aux écarts de fréquence et peut prendre des valeurs considérables.

La première condition pour une bonne tenue de la fréquence est de prévoir une réserve tournante suffisante pour couvrir les pointes de charge normales. Cette condition est beaucoup plus facile à remplir dans un réseau alimenté par des groupes hydro-électriques que dans un réseau alimenté par des groupes thermiques ; la marche à vide de groupes hydro-électriques ne provoque que des pertes très faibles, alors que le maintien des chaudières de groupes thermiques sous pression entraîne des pertes importantes.

F. *Relevé expérimental des caractéristiques dynamiques d'un réseau*

La détermination analytique de ces caractéristiques offre de grandes difficultés dès que ce réseau présente une certaine complexité. Il est avantageux de les mesurer. Une première méthode pour « ausculter »

ainsi un réseau consiste à relever sa courbe de comportement à fréquence variable Nyquist. On fait varier sinusoïdalement la charge et on enregistre les variations de la fréquence qui en résultent. Cette méthode a été appliquée avec succès en Suède (27). Elle conduit toutefois à des essais assez compliqués. Le calcul à l'aide de suites s'avère dans ce cas particulièrement utile. Il suffit de relever, après une période où la charge du réseau est restée constante, simultanément une variation de charge et la variation de fréquence correspondante. Il est alors possible de déterminer en première approximation la variation de fréquence qui se produirait pour toute autre variation de la charge. Il suffit de faire le quotient et le produit composé des suites caractérisant ces différentes variations (annexe II).

Les constantes qui caractérisent le réseau peuvent être calculées à partir des relevés expérimentaux précités.

Conclusion

Il ressort de cet exposé que la tenue de la fréquence dans un réseau alimenté par une centrale hydro-électrique dépend principalement de six paramètres dont les influences sont diverses et peuvent être résumées comme suit :

— *constante d'accélération* T_a (fig. 6).
Si T_a est faible, la variation de fréquence prend une allure oscillatoire et peut devenir instable. Si T_a est élevé, l'amplitude maximum de l'écart de fréquence se réduit, mais la fréquence met plus de temps à rejoindre sa valeur de consigne ;

— *constante de temps du dispositif de réglage* T_r (fig. 7)
Si T_r est faible, la variation de fréquence prend une allure oscillatoire. Si T_r est élevé, la variation de fréquence est apériodique. Entre ces deux cas, il existe une valeur optimum bien déterminée de T_r ;

— *constante de temps du dispositif hydraulique* T_c (fig. 8)
Plus T_c est élevé, plus la variation de fréquence est importante et prend un caractère oscillatoire qui risque de dégénérer en instabilité.

— *facteur de sensibilité des couples par rapport aux écarts de fréquence (facteur* a*)* (fig. 9)
Plus le facteur a augmente, plus la variation de fréquence diminue et prend une allure apériodique. L'influence de l'augmentation de ce facteur est surtout sensible lorsqu'il est faible (de 0 à 2) ;

— *facteur de stabilisation (facteur* b*)* (fig. 10)
Si b est trop faible ou trop élevé, l'écart de fréquence augmente et risque de devenir instable. Il existe une valeur optimum qui varie avec le degré de charge du groupe ;

— *constante de temps de la variation de la charge* T_k (fig. 12)
Plus cette constante de temps augmente, plus l'écart de fréquence se réduit.

On observe une tendance à diminuer le PD^2 des groupes hydro-électriques et à le ramener au « PD^2 naturel » de l'alternateur (17). Il ne semble pas, de prime abord, qu'une amélioration de la tenue de la fréquence puisse être obtenue par voie mécanique (perfectionnement du régulateur de vitesse ou augmentation du moment d'inertie). Par contre, les voies électriques semblent présenter des perspectives intéressantes. Par exemple, des résultats probants ont été obtenus par un asservissement de la tension à la fréquence. (4 et 23).

Nous avons montré les avantages qu'offre le « régulateur différentiel » qui mesure les variations de puissance fournie par le groupe et qui modifie en conséquence soit la tension de l'alternateur, soit l'ouverture de la turbine.

La distribution d'électricité met l'énergie à disposition des consommateurs qui peuvent s'en servir à volonté. Il en résulte des fluctuations continuelles de la charge des réseaux qui sont la cause des variations de fréquence, objet de notre étude.

Pour prédéterminer ces écarts de fréquence, M. Gaden a proposé (1) de mesurer la « densité spectrale » de la variation de la charge consommée en décompensant le diagramme de charge en composantes harmoniques et on détermine alors pour chacune de ces composantes l'écart de fréquence correspondant et on obtient les composantes harmoniques du diagramme de fréquence dont on peut déduire les écarts de fréquence.

Cette méthode ne donne cependant pas d'indications immédiates sur le comportement du réseau en face d'un à-coup de charge isolé.

On peut aborder ce problème d'une autre façon et considérer que le diagramme de charge d'un réseau est constitué par la superposition d'à-coups positifs et négatifs s'ajoutant à une charge moyenne constante.

Nous avons montré comment déterminer la variation de fréquence qui résulte de ces à-coups. Il est aisé ensuite de superposer ces variations de fréquence et d'obtenir ainsi le diagramme de fréquence qui correspond à un diagramme de charge donné. Le détail de l'application de cette méthode sort du cadre de cet exposé. (28).

Ces deux modes de prédétermination : « analyse spectrale » et « analyse impulsionnelle » se complètent en éclairant chacune un aspect particulier du problème.

Qu'il nous soit permis de remercier la Société Kraftwerk Reckingen AG., les Sociétés Escher-Wyss et Brown-Boveri qui ont réalisé le dispositif de réglage de la centrale de Reckingen, ainsi que la Société Motor-Colombus qui en a dirigé la construction, de leur obligeance pour les renseignements qu'elles nous ont fournis et les documents illustrant cet exposé.

ANNEXE I

Détermination des caractéristiques dynamiques des organes du circuit de réglage

A. *Equation des masses tournantes*

Les masses tournantes d'un réseau obéissent à l'équation différentielle suivante exprimée en valeurs relatives :

$$T_a \frac{d\,\frac{\omega}{\omega_n}}{dt} + \frac{m_e}{m_n} = \frac{m_t}{m_n}$$

m_e = couple résistant électrique ;

m_t = couple moteur développé par la turbine ;

m_n = couple de référence correspondant à la valeur nominale de l'installation ;

ω_n = vitesse angulaire nominale ;

T_a = constante d'accélération.

Nous considérons de faibles variations par rapport à un état initial que nous admettons permanent jusqu'au moment de la variation de charge provoquant la variation de vitesse et posons :

$$\omega = \omega_o + \Delta\omega ;$$
$$m_e = m_{eo} + \Delta m_e ;$$
$$m_t = m_{to} + \Delta m_t .$$

ω_o = valeur initiale de la vitesse angulaire ;

m_o = valeur initiale des couples moteurs et résistants.

L'équation des masses tournantes devient :

$$T_a \frac{d\nu}{dt} + \mu_e = \mu_t ;$$

avec $\nu = \dfrac{\Delta\omega}{\omega_n}$ = variation relative de la vitesse ;

$\mu_e = \dfrac{\Delta m_e}{m_n}$ = variation relative du couple moteur

$\mu_t = \dfrac{\Delta m_t}{m_n}$ = variation relative du couple résistant.

B. *Equation du couple moteur*

En première approximation, le couple moteur est donné, à vitesse constante, par le produit de la vitesse relative de l'eau en aval de la conduite et de la pression relative (en admettant que le rendement de la turbine est constant aux environs du point de régime)

$$\frac{m_t}{m_n} = \frac{h}{h_o}\frac{v}{v_n} = \frac{h}{h_o}\sqrt{\frac{h}{h_o}}\,\frac{l}{l_n} = \left(\frac{h}{h_o}\right)^{\frac{3}{2}}\frac{l}{l_n}$$

$$\frac{v}{v_n} = \frac{l}{l_n}\sqrt{\frac{h}{h_o}} = \text{vitesse relative de l'eau ;}$$

v_n = vitesse de l'eau correspondant à la charge nominale ;

l = ouverture de la turbine mesurée en puissance du groupe ;

l_n = ouverture correspondant à la charge nominale ;

h_o = hauteur de la chute d'eau.

En considérant à nouveau de faibles variations par rapport à un état initial, on obtient :

$$\frac{h}{h_o} = 1 + \frac{\Delta h}{h_o} = 1 + \sigma ;$$

avec σ = surpression relative

et $\dfrac{l}{l_n} = \dfrac{l_o + \Delta l}{l_n} = \lambda_o + \lambda ;$

avec λ_o = ouverture correspondant à la charge relative initiale ;

$\lambda = \dfrac{\Delta l}{l_n}$ = variation relative de l'ouverture.

Il en résulte à vitesse constante en négligeant les infiniment petits d'un ordre supérieur, ainsi que l'influence de la variation de rendement de la turbine pour une charge partielle, ce qui est admissible pour une turbine Kaplan.

$$\mu_t = \lambda + \frac{3}{2}\lambda_o\sigma .$$

La figure 18 représente les variations relatives des couples moteurs et résistants en fonction de la vitesse angulaire à ouverture constante pour une faible variation autour de l'état de régime

$$\frac{\mu_t}{\nu} = \operatorname{tg} \alpha_t .$$

La caractéristique des couples moteurs en fonction de la vitesse varie selon le type des turbines. Pratiquement se tient entre — 0,6 (pour les turbines à vitesse spécifique élevée) à — 1,1 (pour les turbines à vitesse spécifique faible) (6).

Nous négligeons l'influence de la variation du plan d'eau en amont de la conduite forcée pendant la durée du processus de réglage et obtenons comme équation du couple moteur la relation suivante :

$$\mu_t = \lambda + \frac{3}{2}\lambda_o\sigma + \nu \operatorname{tg} \alpha_t .$$

Si la centrale est alimentée par l'intermédiaire d'une chambre d'équilibre de volume réduit, il faut tenir compte des variations de son plan d'eau, au détriment de la simplicité des calculs (23).

C. *Equation de la surpression*

La loi de Newton énonce que la variation de la pression est égale à l'accélération de la colonne d'eau dans la conduite forcée. Il en résulte, si l'on ne considère que le coup de bélier en masse :

$$\frac{\Delta h}{h_o} = \sigma = -\frac{L}{g}\frac{v_n}{h_o}\frac{d}{dt}\frac{v}{v_n} = -\theta\frac{d}{dt}\frac{v}{v_n}$$

avec $\theta = \dfrac{Lv_n}{gh_o}$ = chiffre caractéristique de la conduite ;

v_n = vitesse de l'eau à la charge ; lorsque la conduite est formée de différents tronçons de sections différentes, le chiffre caractéristique se calcule de la façon suivante :

$$\theta = \frac{\Sigma L_i v_i}{gh_o} = \frac{Q\Sigma\frac{L_i}{S_i}}{gh_o}$$

avec $\begin{cases} Q = \text{débit à la charge nominale ;} \\ L_i, S_i = \text{longueur et section des différents tronçons.} \end{cases}$

Le signe négatif du terme de droite signifie que, en cas de diminution de la vitesse de l'eau, la surpression est négative et vice versa.

D'autre part :

$$d\frac{v}{v_n} = d\lambda + \frac{1}{2}\lambda_o d\sigma .$$

Donc la surpression est donnée par :

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

Pour une centrale à moyenne ou à haute chute, il faut tenir compte de la compressibilité de l'eau et de l'élasticité de la paroi de la conduite forcée (16).

D. *Equation du couple résistant*

La figure 18 représente la relation entre le couple résistant et la vitesse angulaire à charge constante. Pour une faible variation, nous obtenons :

$$\frac{\mu_e}{\nu} = \operatorname{tg} \alpha_e .$$

Ce coefficient dépend de la structure du réseau et des caractéristiques du réglage de tension. La puissance débitée

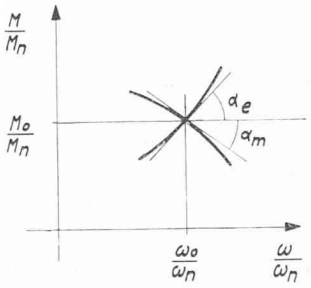

Fig. 18. — Variation relative des couples moteurs et résistants en fonction de la vitesse angulaire du groupe.

Courbe 1 : Variation relative du couple moteur en fonction de la vitesse.

Courbe 2 : Variation relative du couple résistant en fonction de la vitesse.

par l'alternateur est proportionnelle au produit du couple résistant par la vitesse angulaire. Exprimée en valeur relative, on obtient :

$$\frac{N}{N_n} = \frac{m}{m_n}\frac{\omega}{\omega_n}$$

dont la dérivée :

$$\operatorname{tg} \alpha_e = \frac{d\frac{N}{N_n}}{d\frac{\omega}{\omega_n}} - 1 .$$

On peut rendre la tension dépendante de la fréquence par un asservissement fréquence-tension ; la dérivée de la puissance est obtenue par la somme de deux dérivées partielles (24)

$$\frac{d\,\frac{N}{N_n}}{d\,\frac{\omega}{\omega_n}} = \frac{\partial\,\frac{N}{N_n}}{\partial\,\frac{\omega}{\omega_n}} + \frac{\partial\,\frac{N}{N_n}}{\partial\,\frac{U}{U_n}}\,\frac{d\,\frac{U}{U_n}}{d\,\frac{\omega}{\omega_n}}.$$

Selon la nature de la charge, la dérivée de la charge par rapport à la vitesse peut prendre les valeurs suivantes (25)

charge ohmique et inductive (avec cos Ψ = facteur de puissance du réseau)	$\sim 2\,\mathrm{tg}^2\,\Psi\,\lambda_o$
charge purement ohmique	0
charge avec moteurs à couple constant . .	λ_o
charge avec moteurs à couple proportionnel à la vitesse	$2\lambda_o$
charge avec moteurs à couple proportionnel au carré de la vitesse	$3\lambda_o$

Lorsque la charge est purement ohmique, la puissance consommée est proportionnelle au carré de la tension

$$\frac{N}{N_n} = \left(\frac{U}{U_n}\right)^2.$$

Il en résulte :

$$\frac{\partial\,\frac{N}{N_n}}{\partial\,\frac{U}{U_n}} = 2\,\frac{U}{U_n} = 2\lambda_o$$

en admettant la tension égale à sa valeur nominale.

Si la charge comprend des moteurs, seules leurs pertes sont proportionnelles au carré de la vitesse, ce qui réduit la valeur de cette dérivée.

Lorsque la charge est inductive, nous obtenons :

$$\mathrm{tg}\,\alpha_e \cong \lambda_o\,(2\,\mathrm{tg}^2\,\Psi + 2\,k_u) - 1\ ;$$

avec $k_u = \dfrac{d\,\frac{U}{U_n}}{d\,\frac{\omega}{\omega_n}}$ = coefficient d'asservissement fréquence-tension.

Si la tension est asservie à la fréquence, on peut admettre, d'une façon générale (la charge étant inductive ou ohmique), que $2 < \mathrm{tg}\,\alpha_e < 4$, valeurs confirmées par les mesures (24, 26).

A vitesse constante, les variations du couple résistant sont directement proportionnelles aux variations de la charge, si on néglige l'influence de l'impédance des lignes d'accouplement générateur-consommateur. L'équation du couple résistant obéit à la relation suivante :

$$\mu_e = \nu\,\mathrm{tg}\,\alpha_e + \alpha\ ;$$

avec $\kappa = \dfrac{\Delta K}{N_n}$ = variation relative de la charge.

Cette variation est donnée par la variation de la puissance demandée par les consommateurs du réseau, indépendamment des variations qui leur sont imposées par suite des écarts de fréquence et de tension. Si la charge est ohmique, c'est la variation de la résistance de charge. (Cette variation coïncide avec celle du wattmètre enregistreur du groupe si la fréquence et la tension sont à leur valeur de consigne.)

E. *Equation du dispositif de réglage*

Il existe deux modes de stabilisation : accéléromètre ou statisme passager. Les équations qui les caractérisent sont bien connues :

a) *Stabilisation avec accéléromètre*

L'équation d'un régulateur de turbine avec accéléromètre est la suivante (5) :

$$\nu + m\,\frac{d\nu}{dt} = -\,T_r\,\frac{d\lambda}{dt}\ ;$$

avec m = dosage accélérométrique ;

T_r = constante de temps du dispositif de réglage.

Le signe négatif du terme de droite signifie qu'à une augmentation de la vitesse ($\nu > 0$) correspond une diminution de l'ouverture de la turbine ($\lambda < 0$)

$$\frac{d\lambda}{dt} = -\left(b\,\frac{d\nu}{dt} + \frac{\nu}{T_r}\right);$$

avec $b = \dfrac{m}{T_r}$ = facteur de stabilisation ;

b) *Stabilisation avec statisme passager*

L'équation d'un régulateur de turbine avec statisme passager est la suivante (13)

$$\delta_t\,T_s\,\frac{d\lambda}{dt} + T_s\,\frac{d\nu}{dt} + \nu = 0\ ;$$

avec δ_t = statisme passager ;

T_s = temps de relaxation de l'asservissement passager.

En admettant cette relation sous la même forme que celle du réglage accélérotachymétrique, nous obtenons :

$$\frac{d\lambda}{dt} = -\left(b\,\frac{d\nu}{dt} + \frac{\nu}{T_r}\right);$$

avec $b = \dfrac{1}{\delta_t}$ = facteur de stabilisation ;

$T_r = \delta_t T_s$ = constante de temps du dispositif de réglage.

ANNEXE II

Principe du calcul à l'aide de suites

Nous nous contentons d'esquisser le principe de son application dans notre cas particulier (20).

Lorsque deux grandeurs sont liées par une relation linéaire de cause à effet et que l'on a pu déterminer la variation $\Phi_{ce}(t)$ de l'« effet » e résultant d'une variation de la « cause » c, selon une impulsion rectangulaire, on obtient au moyen de l'intégrale de Duhamel, en faisant usage du théorème de Roccard (27), la variation $c\ (t)$ qui résulte d'une variation quelconque de la cause $c\ (t)$:

$$e\,(t) = \int_0^t c'\,(\partial)\,\Phi_{ce}\,(t - \partial)\,d\partial\ ;$$

avec $$c'\,(t) = \frac{d}{dt}\,c\,(t).$$

La résolution analytique de cette intégrale conduit à des calculs compliqués dès que $c(t)$ et $\Phi(t)$ ne sont pas des fonctions analytiques simples. Une solution approchée peut être obtenue en transformant cette intégrale en une somme.

Nous posons :

$d\partial = \tau$ = unité choisie pour la mesure du temps ;

$\partial = n\tau$

et obtenons :

$$e(t) \simeq \Sigma\,c'\,(n\tau)\,\Phi_{ce}\,(t - n\tau)\,\tau.$$

Soit : $S(c') = [c'_1\,;\ c'_2\,;\ c'_3\,;\ \ldots\,;\ c'_k\,;\ \ldots]$

la suite qui correspond aux valeurs de $c'(t)$ pour $t = n\tau$ avec $n = 1,\ 2,\ 3,\ \ldots,\ k,\ \ldots$

et soit

$$S\left(\Phi_{ce}(t)\right) = [\Phi_1\,;\ \Phi_2\,;\ \ldots\,;\ \Phi_k\,;\ \ldots]$$

la suite qui caractérise $\Phi_{ce}(t)$.

Pour $n = 1$, nous obtenons, en posant $\tau = 1$, la variation de l'effet qui correspond au premier terme de la suite qui caractérise la variation de la cause

$$\Delta e_1 = [c'_1\,\Phi_1\,;\ c'_1\,\Phi_2\,;\ \ldots\,;\ c'_1\,\Phi_k\,;\ \ldots].$$

Pour $n = 2$, nous obtenons la variation de l'effet qui correspond au deuxième terme de la suite de la variation de la cause

$$\Delta e_2 = [0\,;\ c'_2\,\Phi_1\,;\ c'_2\,\Phi_2\,;\ \ldots\,;\ c'_2\,\Phi_{k-1}\,;\ c'_2\,\Phi_k\,;\ \ldots]$$

et ainsi de suite.

La variation $e(t)$ est donnée par la superposition des variations partielles.

Cette superposition s'effectue très facilement au moyen du schéma de calcul indiqué ci-dessous :

$$
\begin{array}{rcccccc}
S(\Phi_{ce}) = & \Phi_1 & \Phi_2 & \Phi_3 & \dots & \Phi_k & \dots \\
S(c') = & c'_1 & c'_2 & c'_3 & \dots & c'_k & \dots \\
\hline
 & c'_1\Phi_1 & c'_1\Phi_2 & c'_1\Phi_3 & \dots & c'_1\Phi_k & \dots \\
 & & c'_2\Phi_1 & c'_2\Phi_2 & \dots & c'_2\Phi_{k-1} & \dots \\
 & & & c'_3\Phi_1 & \dots & c'_3\Phi_{k-2} & \dots \\
 & & & \cdot & & \cdot & \\
 & & & \cdot & & \cdot & \\
\hline
\end{array}
$$

$$
S(\Phi)^{\star}S(c') = c'_1\Phi_1\,;\; c'_1\Phi_2 + c'_2\Phi_1\,;\; c'_1\Phi_3 + c'_2\Phi_2 + c'_3\Phi_1\,;\; \dots \; \dots\,;\; \sum_{n=1}^{k} c'_n\,\Phi_{k+1-n}\,;\; \dots
$$

Nous définissons cette opération comme étant le « produit composé » de la suite $S(c)$ par la suite $S(\Phi(t))$. Par convention, nous désignons ce produit composé par le signe $(^{\star})$.

Ainsi, dès que la courbe de réponse des variations de la fréquence par rapport aux variations de la charge a été déterminée théoriquement ou expérimentalement, il est facile de calculer la variation de fréquence qui résulte d'une variation quelconque de la charge. Il suffit de faire le produit composé de la suite qui caractérise la dérivée de cette variation de charge par la suite qui caractérise cette courbe de réponse.

Cette méthode de calcul donne une solution approchée ; l'approximation peut être améliorée à volonté en réduisant l'unité de temps choisie pour la détermination des suites de temps.

Le quotient composé est l'opération inverse de celle du produit composé. Cette opération est désignée conventionnellement par le signe $(^{\star}_{\star})$, elle correspond à la résolution de l'équation intégrale de Volterra. La façon de l'effectuer ressort immédiatement du schéma de calcul ci-dessous.

Soit $S(e)$ la suite de l'effet et $S(c)$ la suite de la cause.

Le quotient composé $S(e) \overset{\star}{\star} S(c)$ donne en première approximation la suite de la dérivée de la courbe de réponse:

$$
\begin{array}{lcccc|l}
S(e) = & e_1 & e_2 & e_3 & e_4 \;\dots & c_1 \quad c_2 \quad c_3 \quad \dots \\
\hline
 & e_1 & e_1\dfrac{c_2}{c_1} & e_1\dfrac{c_3}{c_1} & e_1\dfrac{c_4}{c_1} \;\dots & \dfrac{e_1}{c_1}\,;\; \dfrac{1}{c_1}\left(e_2 - e_1\dfrac{c_2}{c_1}\right);\; \dots \\
\hline
 & o & e_2 - e_1\dfrac{c_2}{c_1} & e_3 - \dfrac{e_1 c_3}{c_1} & e_4 - e_1\dfrac{c_4}{c_1} \;\dots & \\
 & & e_2 - e_1\dfrac{c_2}{c_1} & \dfrac{c_2}{c_1}\left(e_2 - e_1\dfrac{c_2}{c_1}\right) & \dfrac{c_3}{c_1}\left(e_2 - e_1\dfrac{c_2}{c_1}\right) \;\dots & \\
\hline
 & & o & e_3 - e_1\dfrac{c_3}{c_1} - \dfrac{c_2}{c_1}\left(e_2 - e_1\dfrac{c_2}{c_1}\right) \;\dots & & \\
 & & \dots & \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots & & \\
\end{array}
$$

On cherche « combien de fois e_1 entre dans c_1 » puis on multiplie tous les termes de la suite $S(c)$ par le quotient $\frac{e_1}{c_1}$, on soustrait terme à terme la suite $\frac{e_1}{c_1} S(c)$ de la suite $S(e)$.

On obtient une nouvelle suite pour laquelle on recommence la même opération et ainsi de suite.

Dès que la variation de la fréquence pour une variation donnée de la charge est connue, en combinant produit et quotient composés, on peut déterminer la variation de fréquence qui résulterait d'une variation quelconque de la charge.

Il est ainsi possible, pour un diagramme de charge donné, de prédéterminer le diagramme correspondant de fréquence

BIBLIOGRAPHIE

(1) D. Gaden : *(A propos du réglage automatique de vitesse des turbines hydrauliques) Considérations sur la précision du réglage.* Bull. de la Soc. fr. des électr., avril 1952.

(2) W. Oja : *A method for calculating the frequency properties of power-stations.* ASEA Journal, mai 1952.

(3) Th. E. Ubaghs : *Importance et incidence des pointes de charge instantanées dans un ensemble de centrales interconnectées.* CIGRE, 1950, rapport n° 329.

(4) R. Keller : *La stabilisation du réglage de la vitesse de groupes générateurs à charge indépendante de la vitesse.* Revue Brown-Boveri, juin-juillet 1947.

(5) D. Gaden : *Contribution à l'étude des régulateurs de vitesse. Considérations sur le problème de la stabilité.* Ed. La Concorde, Lausanne, 1945.

(6) D. Gaden et P. Neeser : *Influence de certaines caractéristiques intervenant dans la condition de stabilité.* La Houille Blanche, mai-juin 1948.

(7) P. Almeras : *Influence de l'inertie de l'eau sur la stabilité des groupes hydro-électriques.* La Houille Blanche, novembre 1945.

(8) M. P. Satche : *Théorie des coups de bélier de faible amplitude.* Rev. gén. d'électr., décembre 1947.

(9) J. Daniel : *Accélération du réglage de vitesse des turbines hydrauliques.* La Houille Blanche, mars-avril 1948.

(10) M. Dejou : *Considérations sur les régulateurs des groupes hydro-électriques de basse chute.* Revue gén. d'électr., août 1948.

(11) G. Nasse : *Etude de la stabilité du réglage de vitesse d'un groupe hydro-électrique.* Bulletin de la Soc. fr. des électr., janvier 1951.

(12) G. Evangelisti : *La Regolazione delle turbine idrauliche.*

(13) T. Stein : *Drehzahlregelung der Wasser turbinen.* Schw. B. Z., 1947, Nr. 39, 40 et 41.

(14) T. Stein : *Die optimale Reglung von Wasserturbinen.* Schw. B. Z., 1952, Nr. 20.

(15) M. Cuénod : *Etude des propriétés d'un réglage automatique.* Bulletin technique de la Suisse romande, 26 avril, 10 mai 1947.

(16) M. Cuénod : *Influence des phénomènes du coup de bélier sur le réglage de la vitesse des turbines hydrauliques.* La Houille Blanche, mars-avril 1949.

(17) M. Cuénod : *La détermination du moment d'inertie de groupes hydro-électriques.* La Houille Blanche, mars-avril 1951.

(18) *L'usine hydro-électrique de Reckingen.* Communication de Motor-Colombus AG. Bull. ASE, 1939, N° 6.

(19) *Vom Bau des Rheinkraftwerkes Reckingen.* Mitteilung der Motor-Colombus AG. Schw. B. Z., 21 janvier 1939.

(20) M. Cuénod : *Calcul à l'aide de suites de temps.* Bulletin technique de la Suisse romande, 31 juillet 1949.

(21) M. Cuénod : *Un régleur électrique de vitesse.* La Houille Blanche, mars-avril 1950.

(22) K. Alstrom et A. Garde : *La régulation électro-hydraulique des turbines hydrauliques.* CIGRE, 1950, n° 315.

(23) M. Cuénod et A. Gardel : *Stabilité de la marche d'une centrale hydro-électrique avec chambre d'équilibre, compte tenu des caractéristiques dynamiques du réglage de vitesse.* Bulletin technique de la Suisse romande, 26 juillet 1952.

(24) D. Gaden : *Détermination expérimentale de l'influence de la fréquence sur la puissance absorbée par un réseau de consommation.* Bulletin Soc. fr. des électr., novembre 1947.

(25) M. Cuénod et A. Gardel : *Stabilisation de la marche de centrales hydro-électriques au moyen d'un asservissement de la charge électrique à la charge hydraulique.* CIGRE, 1952, n° 313.

(26) S. B. Crary : *Rapport sur les travaux du Comité international d'étude de stabilité des réseaux.* Rapport CIGRE, 1950, n° 325.

(27) Y. Roccard : *Le génie civil.* 1935, n° 106, p. 57.

(28) M. Cuénod, A. Jacques, R. Renchon : *Contribution à l'étude de la tenue de la fréquence dans un complexe électrique.* Bulletin de la Société belge des électriciens, 1953, n° 1.

(29) T. Stein : *Einfluss der Selbsregelung auf die Stabilität von Wasserkraft Anlagen.* Schw. Bauzeitung, 7 mars 1953.

Adresse des auteurs : M. Cuénod et J. Wahl, Ofinco, 1, rue de la Cité, Genève.