ANNALES DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

P. ALMÉRAS

Étude de la stabilité des groupes hydroélectriques interconnectés en tenant compte de l'inertie de l'eau dans les conduites forcées

Annales de l'université de Grenoble, tome 22 (1946), p. 105-113

<http://www.numdam.org/item?id=AUG_1946__22__105_0>

© Annales de l'université de Grenoble, 1946, tous droits réservés.

L'accès aux archives de la revue « Annales de l'université de Grenoble » implique l'accord avec les conditions générales d'utilisation (http://www.numdam.org/conditions). Toute utilisation commerciale ou impression systématique est constitutive d'une infraction pénale. Toute copie ou impression de ce fichier doit contenir la présente mention de copyright.

NUMDAM

Article numérisé dans le cadre du programme
Numérisation de documents anciens mathématiques
http://www.numdam.org/

ÉTUDE DE LA STABILITÉ DES GROUPES HYDROÉLECTRIQUES INTERCONNECTÉS EN TENANT COMPTE DE L'INERTIE DE L'EAU DANS LES CONDUITES FORCÉES

par **P. ALMÉRAS.**

Je vais essayer d'attirer votre attention sur un fait qui a une influence profonde sur le réglage des groupes hydroélectriques en général : je veux parler de l'inertie de l'eau des conduites d'alimentation. Cette inertie du fluide moteur est une particularité des groupes hydroélectriques et est pratiquement négligeable pour les moteurs utilisant d'autres fluides que l'eau. Peut-être sera-t-on tenté de penser que le problème soulevé n'est pas d'un très grand intérêt. Cependant, il faut connaître son existence. Le rapport de la puissance hydraulique à la puissance thermique débitée en France sur le réseau général est destiné à augmenter, et il serait anormal de méconnaître une influence qui agit sur plus de la moitié de la puissance fournie.

Dans les cahiers de charges d'installations hydroélectriques, on constate habituellement entre autres, deux préoccupations du maître de l'œuvre, en ce qui concerne les conditions de régulation :

1° Le régulateur doit manœuvrer le vannage de la turbine, soit à l'ouverture, soit à la fermeture, sans créer de surpressions ou dépressions dans la conduite, supérieures à certaines garanties. Ceci nécessite que la vitesse maximum de vannage, soit à l'ouverture, soit à la fermeture, soit suffisamment lente, ses valeurs étant liées à la quantité $\frac{\Sigma LV}{gHT} = \frac{\Theta}{T}$ où T est le temps de manœuvre et Θ un temps caractérisant l'inertie de l'eau des conduites, $\Theta = \frac{\Sigma LV}{gH}$.

2° Le régulateur doit manœuvrer le vannage lors d'une variation

brusque et totale de la charge (déclenchement) à une vitesse telle que l'écart de vitesse maximum qui en résulte soit inférieur à la garantie. Cette survitesse est liée au rapport T/τ du temps de manœuvre T au temps de lancer du groupe fonction du Pd^2, caractérisant l'inertie des masses tournantes $\left(\tau = \frac{I\omega^2}{P}\right)$.

En réalité, le paramètre Θ intervient lui aussi, mais à titre plutôt correctif, dans le calcul de la survitesse.

Finalement, ces considérations conduisent à choisir un temps de manœuvre assez petit pour ne pas dépasser la survitesse admise, et assez grand pour ne pas dépasser la surpression admise. Étant donnés les éléments du problème, à savoir :

le Pd^2 de l'alternateur de construction normale,

les caractéristiques prévues pour la conduite $\Theta = \frac{\Sigma LV}{gH}$,

il arrive que, dans certains cas, ces conditions sont incompatibles : il est alors impossible de trouver un temps de manœuvre T tel que survitesse et surpression ne dépassent pas les garanties.

On peut s'en tirer alors, de plusieurs manières :

1° En prenant un temps de fermeture conduisant à une surpression admissible, augmenter le temps de lancer, c'est-à-dire l'inertie, pour diminuer la survitesse qui s'ensuit ; ceci peut se faire, soit en demandant au constructeur de l'alternateur d'augmenter son Pd^2, ce qu'il peut faire dans une certaine mesure, soit en prévoyant un volant destiné à apporter un Pd^2 supplémentaire.

2° En prenant un temps de fermeture conduisant à une survitesse admissible, diminuer le coup de bélier qui en résulte en diminuant Θ, ce qu'on peut faire : soit en augmentant le diamètre de la conduite pour diminuer V, soit en employant un déchargeur qui diminue le débit coupé pendant la fermeture et, par suite, diminue fictivement V, soit en employant une cheminée d'équilibre pour diminuer la longueur L de la conduite.

Ces divers systèmes sont tout aussi capables les uns que les autres de résoudre le problème, et ce sont uniquement des conditions d'économie qui déterminent leur choix.

Or, il est une autre condition qui fait qu'il y a intérêt à réduire Θ et augmenter le temps de lancer τ. C'est la condition de stabilité du groupe, liée à sa capacité à régler la fréquence du réseau qu'il alimente. Parlons d'abord du cas où le groupe est seul à alimenter le réseau (réseau séparé).

Parmi les travaux qui tiennent compte de l'influence de l'inertie de l'eau, on peut citer ceux que M. Fabritz expose dans son ouvrage « Die Regulung der Kraftmaschinen ».

D'autre part, M. Gaden et moi-même avons été conduits, dans des études parallèles, à des résultats qui, pour être d'aspects assez dissemblables, ne s'en trouvent pas moins concordants. La plus grande complexité de mise en œuvre des résultats de M. Gaden provient de ce qu'il a tenu compte, non seulement de l'inertie de l'eau, mais aussi de son élasticité, ce qui lui permet de traiter aussi bien les hautes chutes, alors que mes résultats ne sont pas applicables aux très hautes chutes. D'ailleurs, à ce point de vue, les hautes chutes diffèrent des autres uniquement par la valeur des coefficients qui entrent dans les formules, mais non pas par leur forme même.

Quoi qu'il en soit, on aboutit à la conclusion suivante : l'inertie de l'eau des conduites d'alimentation et d'évacuation, caractérisée par le paramètre $\Theta = \frac{\Sigma LV}{gH}$, a une influence déterminante sur la stabilité du réglage. Il n'y a pas lieu d'en être surpris. Dans toutes les installations, du fait de l'inertie du fluide moteur, lorsqu'on ferme le vannage, la puissance du groupe diminue d'abord moins rapidement qu'elle ne le ferait si cette inertie n'existait pas. Bien mieux, dans les installations où le paramètre ρ d'Alliévi est supérieur à 0,5, la puissance augmente au début d'une manœuvre de fermeture, c'est-à-dire que le régulateur fait alors le contraire de ce qu'on voudrait qu'il fît.

Dans ces formules de stabilité, apparaissent différents paramètres :

— d'abord les paramètres τ et Θ que nous avons déjà définis et qui caractérisent les inerties des masses tournantes et du fluide moteur.

— ensuite, les paramètres caractérisant l'action du régulateur, à savoir :

1° pour un régulateur tachymétrique avec asservissement temporaire : le degré d'asservissement σ et sa rigidité T_r. la rapidité de réponse tachymétrique K_0.

2° pour un régulateur accéléro-tachymétrique : la rapidité de réponse tachymétrique K_0, la rapidité de réponse accélérométrique K_1.

M. Gaden emploie, à la place de K_0, son inverse τ' qu'il appelle promptitude de réglage, et qui a les dimensions d'un temps, et à la

place de K_1 le rapport $m = \frac{K_1}{K_0}$ dosage accélérotachymétrique qui a, lui aussi, les dimensions d'un temps.

Considérons un régulateur dans lequel nous éliminons l'action de l'asservissement ou de l'accéléromètre ; tout écart de vitesse $\frac{\Delta\omega}{\omega_0}$ détermine un déplacement du tiroir de distribution et, par suite, une vitesse de vannage $\frac{dy}{dt}$, y étant l'ouverture comptée de 0 à 1.

La courbe qui donne $\frac{dy}{dt}$ en fonction de $\frac{\Delta\omega}{\omega_0}$, représente la loi de réponse tachymétrique. La rapidité de réponse tachymétrique est la pente K_0 de cette courbe au voisinage de l'origine. On définirait de même, la rapidité de réponse accélérométrique K_1 ou le dosage accélérotachymétrique $m = \frac{K_1}{K_0}$.

Les formules de stabilité ne font nullement intervenir la vitesse maximum de vannage, caractérisée par le temps de manœuvre T ; par suite, la stabilité d'un groupe ne dépend nullement de la valeur absolue de la surpression, pas plus que de la valeur absolue de la survitesse qui se produisent lors d'un déclanchement. Seuls, interviennent la rapidité de réponse K_0 (pente de la loi de réponse), le paramètre $\Theta = \frac{\Sigma LV}{gH}$, qui ne contient que les données géométriques de l'installation, et le paramètre τ lié au Pd^2.

On constate que la recherche de la stabilité conduit :

a) dans un régulateur à asservissement, à augmenter au maximum la rapidité de réponse tachymétrique K_0, mais aussi à donner au degré d'asservissement et à sa rigidité, des valeurs d'autant plus grandes que Θ est plus grand et τ plus petit.

b) dans un régulateur accélérotachymétrique, après avoir donné à sa rapidité de réponse accélérométrique une certaine valeur, à donner à sa rapidité de réponse tachymétrique une valeur d'autant plus faible que Θ est plus grand et τ plus petit.

Finalement, quel que soit le système employé, la recherche de la stabilité conduit à freiner l'action du tachymètre, soit directement, soit indirectement, et par suite, à augmenter l'écart de fréquence qui suit une variation donnée de la charge demandée. D'où diminution de la capacité du groupe à régler la fréquence. Cette difficulté du réglage de la fréquence par les groupes hydroélectriques a

été depuis longtemps remarquée, mais on l'attribuait souvent à une mauvaise construction ou à une mauvaise conception des régulateurs qu'on songeait même à remplacer ou à « coiffer » par des super-régulateurs électriques. Or, il faut bien se rendre compte de ce que les régulateurs ne sont pour rien dans cette difficulté qui est dans la nature même des choses et qui ne sera aucunement résolue par le remplacement de systèmes hydrauliques sûrs et robustes par des systèmes électriques (super-régulateurs).

Un régulateur à asservissement temporaire peut, suivant le point de vue où l'on se place, être regardé soit comme un régulateur à asservissement permanent dont l'asservissement disparaît avec le temps (et c'est la conception classique) soit aussi (et c'est la conception de M. Gaden qui se présente d'une manière moins immédiate) comme un régulateur accélérotachymétrique ; les équations qui régissent son mouvement après une pertubation, tiennent des deux systèmes. Nous allons le regarder pour faciliter l'exposé, comme un régulateur à asservissement permanent. Mais les résultats ne seraient pas changés si nous avions pris le cas de régulateurs tachy-accélérométriques. Nous appellerons degré d'asservissement efficace, le degré d'asservissement du régulateur à asservissement permanent, qui donnerait au groupe la même stabilité ; le degré d'asservissement efficace est fonction, à la fois, du degré d'asservissement réel (auquel il est inférieur) et de la rigidité du dash-pot. Dans tout ce qui suit, nous dirons simplement, pour abréger, degré d'asservissement, sans ajouter le qualificatif « efficace ».

Nous préférons ce mode d'exposé, parce que le degré d'asservissement efficace donne une mesure de capacité du régulateur à régler la fréquence : en effet, une variation relative de charge $\frac{\Delta p}{p_0}$ est suivie d'une variation de fréquence $\frac{\Delta\omega}{\omega_0} = K'\sigma\frac{\Delta p}{p_0}$, σ étant le degré d'asservissement.

La condition de stabilité d'un régulateur à asservissement est de la forme $\sigma = K''\frac{\Theta}{\tau}$, où K'' est au moins égal à un nombre compris entre 3/2 et 1, qui dépend du régulateur. Les écarts de fréquence seront donc de la forme $\frac{\Delta\omega}{\omega_0} = K\frac{\Theta}{\tau}\frac{\Delta p}{p_0}$. Ils sont donc d'autant plus grands que le temps de lancer est plus petit et que le paramètre Θ caractérisant l'inertie de l'eau sera plus grand.

Lorsqu'il est impossible d'utiliser l'artifice du volant, le temps de

lancer ne peut guère être modifié, de sorte que si l'on ne veut pas diminuer outre mesure la capacité du régulateur à régler la fréquence, il faut s'attacher à diminuer Θ. Nous avons vu qu'il y avait plusieurs manières de le faire. Mais toutes ces manières, qui étaient efficaces pour le problème des garanties de surpression et de survitesse, ne le sont pas également en ce qui concerne le problème de la stabilité : l'augmentation du diamètre des conduites et l'adjonction d'une cheminée d'équilibre restent des mesures efficaces. Mais, par contre, l'adjonction d'un déchargeur est inefficace. En effet, d'une part le déchargeur ne fonctionne que dans un seul sens — (cas d'une baisse de charge) — et uniquement pour des baisses de charges notables. Il est d'ailleurs essentiel que le déchargeur reste fermé pendant les petits mouvements normaux de réglage, car autrement il occasionnerait une perte d'eau inadmissible. On voit donc que lorsque l'exploitant, pour des raisons d'économie, adopte la solution du déchargeur de préférence à celle de la cheminée d'équilibre, il diminue de ce fait la capacité du groupe à régler la fréquence, sauf si l'on peut augmenter en conséquence par des volants, le Pd^2 du groupe.

Il faut ajouter, à ce qui précède, que pour les groupes de basse chute, on ne possède aucun moyen de diminuer Θ autre que celui de diminuer la puissance unitaire du groupe. Pour une chute donnée Θ est, en effet, pratiquement proportionnel à la racine de la puissance du groupe.

Les circonstances du réglage de la fréquence par un groupe en réseau séparé étant ainsi précisées, qu'y-a-t-il de changé lorsqu'on considère plusieurs groupes alimentant un grand réseau. On pourrait croire que, comme l'a montré M. Gaden, pour la condition de Thoma (stabilité des cheminées d'équilibre) ces conditions de stabilité disparaissent après couplage du groupe sur un grand réseau. En fait, il n'en est rien. L'interconnexion n'est pas, par elle-même, génératrice de stabilité. Lorsqu'on couple plusieurs groupes sur un réseau, on peut dire qu'en gros, l'ensemble se conduit comme si le réseau était alimenté par un seul groupe qui aurait des caractéristiques de régulation moyenne, et notamment, un degré d'asservissement moyen égal à la moyenne harmonique des degrés d'asservissement des groupes :

$$\frac{P}{\sigma} = \Sigma \frac{P_i}{\sigma_i}.$$

Nous appellerons $\frac{P_i}{\sigma_i}$ puissance réglante temporaire du groupe i :

la puissance réglante temporaire du groupe équivalent est la somme des puissances réglantes des groupes. L'écart de fréquence produit par une variation de puissance $\Delta p/P$ s'écrit :

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_0} = K\sigma\frac{\Delta p}{P} = K\frac{1}{P}\Delta P.$$

Mais lorsqu'un réseau augmente de puissance, les variations de charge les plus fréquentes n'augmentent pas proportionnellement à la puissance : un calcul sommaire de probabilités montre que les variations de charge les plus fréquentes sont proportionnelles à la racine carrée de la puissance du réseau, de sorte que la même qualité de réglage de la fréquence sera obtenue avec une puissance réglante proportionnelle à la racine carrée de la puissance totale. De la sorte, lorsqu'on couple entre eux deux réseaux de puissance identique et ayant même charge de stabilité, le réseau résultant possède pratiquement la même marge de stabilité, mais les écarts de fréquence les plus fréquents sont divisés par $\sqrt{2}$, la qualité du réglage de la fréquence est donc augmentée. Si on avait voulu conserver au réseau résultant, une qualité de réglage égale à celle des deux réseaux composants, on pouvait donner au réseau résultant un degré d'asservissement égal à celui des réseaux composants, multiplié par $\sqrt{2}$, et la stabilité du réseau résultant s'en serait trouvée augmentée. C'est dans ce sens-là, seulement, qu'on peut dire, malgré tout, que l'interconnexion est génératrice de stabilité. De fait, sur le réseau français, un nombre considérable de groupes travaillent sur limiteur d'ouverture (degré d'asservissement infini) sans que le réglage de la fréquence du réseau général soit mauvaise.

On peut donc pratiquement coupler, sans inconvénient pour la fréquence des groupes à grand Θ et possédant, de ce fait, un fort degré d'asservissement (faible puissance réglante), si ces groupes ne doivent jamais travailler en réseau séparé, ce qui est le cas, notamment, des groupes Kaplan de basse chute et de grosse puissance unitaire (usines marémotrices notamment). Remarquons d'ailleurs, que souvent, parce que leur réserve n'est pas suffisante, ils sont pratiquement au fil de l'eau ; de toute façon, on ne peut pas s'en servir pour régler la fréquence, de sorte qu'il n'y a pas d'inconvénients à leur donner de grand Θ, c'est-à-dire de grandes puissances.

Cependant, il ne faudrait pas trop exagérer dans ce sens.

Il y a, évidemment, intérêt à donner aux valeurs de Θ/τ des nou-

veaux groupes projetés, des valeurs faibles lorsque c'est possible, ne serait-ce que pour pouvoir, plus tard, en construire d'autres pour lesquels il sera pratiquement impossible de diminuer Θ/τ : nous pensons notamment aux usines marémotrices.

De plus, il ne faut pas considérer seulement la puissance installée, mais la puissance débitée en un instant donné. Il est certain que pendant les heures creuses, seuls sont en action les groupes au fil de l'eau, et si tous ces groupes sont à grand Θ, la fréquence sera mal réglée à ces moments-là. C'est aux exploitants de dire, dans chaque cas, de quoi ils ont besoin. Mais on ne pourra rien faire de sensé, tant qu'on ne connaîtra pas, d'une manière plus précise, le réseau français. Il y aurait intérêt à faire une statistique des groupes comportant, suivant l'heure de la journée, son mode normal d'exploitation, la puissance qu'il fournit, et les caractéristiques de régulation : paramètre Θ, degré d'asservissement ou promptitude de réglage. On pourrait ainsi connaître la marge de stabilité du réseau français. Si elle se trouvait très grande, on pourrait se permettre de supprimer, après couplage, l'asservissement de certains groupes à grand Θ et les faire ainsi participer convenablement au réglage. Sinon, il ne faudrait pas compter pouvoir le faire impunément.

Une autre statistique à faire serait celle de la proportion de la puissance qui est, suivant l'heure de la journée, employée à faire tourner les moteurs, par rapport à celle qui est fournie à des résistances. Ces moteurs doués d'inertie ajoutent leurs Pd^2 aux Pd^2 des groupes et contribuent à la stabilité de l'ensemble.

Nous avons supposé, dans nos calculs, que l'interconnexion était rigide. En fait, elle ne l'est pas complètement. L'angle de phase entre un générateur et un récepteur doués d'inertie donne lieu à des oscillations lors des variations de régime. Nous avons supposé qu'elles étaient de période faible vis-à-vis de la période d'oscillation naturelle des groupes hydroélectriques (5 à 10″) ; mais il n'en est pas toujours ainsi, notamment lorsque les lignes d'interconnexion sont très chargées. Dans ce cas, ces calculs ne sont plus valables, et il est prudent de considérer deux réseaux réunis par une telle ligne, comme séparés l'un de l'autre. Ils devront alors avoir chacun une marge de stabilité suffisante, et il serait imprudent de compter sur l'un pour stabiliser l'autre.

En résumé, il faut retenir de ce qui précède que le problème de la qualité du réglage de la fréquence d'un groupe hydroélectrique en réseau séparé est un problème hydraulique, que les deux paramètres

qui entrent en ligne de compte pour le définir sont le temps de lancer τ et le paramètre $\Theta = \frac{\Sigma LV}{gH}$, et que ce n'est qu'en agissant sur ces paramètres qu'on peut améliorer la qualité du réglage et non pas en changeant de type de régulateur. D'autre part, ce problème ne se pose d'une manière vraiment aigüe, que pour les groupes qui sont appelés à marcher en réseau séparé et pour lesquels il est essentiel qu'ils règlent alors parfaitement la fréquence (papeteries). Il se pose aussi, d'une manière essentielle pour les groupes qui sont destinés à fournir le « gros » de la puissance d'un réseau et ceci est surtout vrai, pour les pays dans lesquels l'exploitation de la houille blanche est encore à l'état embryonnaire et la puissance interconnectée faible.

Pour des pays comme la France, il se pose d'une manière moins aiguë, mais il serait imprudent de ne pas en tenir compte tant que certaines statistiques, destinées à préciser les données, ne sont pas faites. En tout cas, il faut se rappeler que dans un réseau interconnecté, tous les groupes participent au prorata de leurs puissances, à la stabilité de l'ensemble et au réglage de sa fréquence et que, par conséquent, les défauts des uns doivent être compensés par les qualités des autres.