

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 28 (1937)
Heft: 22

Artikel: De l'utilisation des régulateurs automatiques mécaniques des machines motorices de groupes électrogènes pour le réglage des interconnexions
Autor: Gaden, D. / Volet, E.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1059884>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 12.05.2025

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

De l'utilisation des régulateurs automatiques mécaniques des machines motrices de groupes électrogènes pour le réglage des interconnexions^{*)}.

Par D. Gaden, Paris, et E. Volet, Genève.

Les nécessités du réglage des interconnexions ont conduit les exploitants à des exigences de plus en plus poussées; mais est-ce à dire que les régulateurs mécaniques des machines motrices ne puissent plus y satisfaire et qu'il faille envisager d'autres systèmes? Au contraire, le degré de perfectionnement auquel leur construction a été portée, les rend parfaitement propres à réaliser, avec l'aide de dispositifs auxiliaires électriques, les différents procédés de réglage auxquels on peut avoir recours dans les réseaux. Il y a lieu toutefois de ne pas oublier que les qualités d'un réglage ne dépendent pas seulement de celles du régulateur mais aussi des aptitudes à régler de la machine qu'il conduit. En particulier, dans le domaine des turbines, les caractéristiques hydrauliques d'une installation peuvent influencer d'une manière considérable sur le rôle que l'on peut assigner à ses groupes dans la régulation générale.

I. Introduction.

Sur les tendances actuelles en matière de réglage.

Le développement pris au cours de ces dernières années par les lignes de transport d'énergie à grande distance, ainsi que par les interconnexions entre réseaux comprenant à la fois des usines de production et des centres de consommation, a posé une série de problèmes d'ordres divers, dont exploitants et constructeurs ont cherché et recherchent encore à perfectionner les solutions. Parmi ces problèmes, celui particulièrement délicat du réglage de la fréquence et de la puissance a fait l'objet de plusieurs travaux et a donné lieu à la mise au point de nombreux appareils qui ont permis, les uns de mieux dégager les lois des phénomènes provoqués par les échanges d'énergie, les autres de marquer des progrès successifs dans la voie de leur contrôle.

Nous nous proposons d'exposer ici quelques considérations générales au sujet des possibilités que nous semblent présenter les régulateurs mécaniques de machines motrices de groupes électrogènes, en particulier ceux des turbines hydrauliques, en vue de la réalisation des solutions de principe proposées pour le réglage combiné de la fréquence et de la puissance. Alors que les constructeurs de régulateurs mécaniques ont mis à la disposition des exploitants des appareils grandement perfectionnés, leur utilisation ne paraît être encore envisagée que comme régulateurs primaires, soumis à l'action corrective d'un ou plusieurs régulateurs électriques sensibles, soit à la fréquence, soit à la puissance. Poussant encore plus loin dans cette voie, quelques électriciens ont attribué aux régulateurs mécaniques l'origine de difficultés de réglage dont ils ne sont en réalité pas responsables et qui, comme nous le préciserons, sont le fait des conditions d'installation de certaines centrales hydrauliques. Ne se rendant peut-être pas compte du fait que, pour assurer la stabilité du réglage malgré certaines conditions hydrauliques défavorables, les déplacements du servo-

Die scharfen Bedingungen der Regulierung zusammengegeschlossener Netze haben die Betriebsleiter zu stets weitergehenden Anforderungen geführt; soll dies aber heissen, dass die mechanische Regulierung der Antriebsmaschinen nun nicht mehr imstande ist, diesen Anforderungen nachzukommen und dass andere Wege gesucht werden sollen?

Die Vollkommenheit der mechanischen Regulier Vorrichtungen hat im Gegenteil einen Grad erreicht, bei welchem die verschiedenen, für die zusammengeschlossenen Netze erforderlichen Regulierverfahren, in Verbindung mit elektrischen Hilfsapparaten, anstandslos erzielt werden können. Dabei darf man aber nicht vergessen, dass die Qualität irgendwelcher Regulierung nicht nur von derjenigen des eigentlichen Reglers, sondern ebensosehr von der Regulierfähigkeit der gesteuerten Maschine abhängig ist. Im besondern, auf dem Gebiet der Wasserturbinen, können die hydraulischen Verhältnisse auf die Aufgabe, die den betreffenden Gruppen in bezug auf die allgemeine Regulierung zugewiesen werden darf, den grössten Einfluss ausüben.

moteur en fonction du temps doivent s'effectuer suivant un mode bien déterminé, ils en sont venus à déclarer de bonne foi, qu'étant données les nécessités actuelles du réglage des interconnexions, les régulateurs mécaniques ne suffisaient décidément plus¹⁾. Autrement dit, on ne pourrait tout au plus leur laisser le soin d'intervenir que lors d'importantes variations de fréquence et de puissance, mais le véritable réglage de la fréquence et de la puissance devrait être assuré par des dispositifs électriques effectuant en quelque sorte une super-régulation.

Diverses solutions ont été présentées qui réduisent le régulateur mécanique au rôle d'un outil intermédiaire, travaillant sous la direction d'appareils électriques chargé de subvenir à ses soi-disant imperfections, ou même de supplanter un de ses organes détecteurs essentiels comme le tachymètre, à remplacer par un fréquencesmètre¹⁾. Un des arguments invoqués à ce sujet est que l'on peut construire des fréquencesmètres électriques ne comportant pas de masses en mouvement et par conséquent d'une sensibilité extrême; or, tous les tachymètres de régulateurs mécaniques modernes possèdent déjà une sensibilité amplement suffisante. Le problème du réglage de la vitesse ne réside plus dans la recherche d'une meilleure précision tachymétrique, mais bien dans celle des moyens de la rendre compatible avec l'obtention d'une stabilité satisfaisante. Le remplacement du tachymètre, de robustesse éprouvée, par un fréquencesmètre électrique n'éliminera à cet effet aucune des difficultés que certains électriciens ont cru pouvoir reprocher au fonctionnement des régulateurs mécaniques.

Nous ne prétendons certes pas que les régulateurs mécaniques peuvent, en vue des systèmes de réglage actuellement proposés pour les interconnexions, se passer d'appareils électriques, en particulier comme nous le préciserons plus loin de relais wattmétriques. Mais nous pensons néanmoins que, le réglage de la vitesse d'un groupe électrogène étant en premier

^{*)} Cette étude plus complète a été faite sur la base de l'intervention sommaire de M. D. Gaden dans la discussion.

¹⁾ Rob. Keller, voir page 545.

lieu un problème mécanique, des éléments mécaniques de détection de la variation de vitesse sont mieux que tous autres susceptibles de fournir les bases d'une solution satisfaisante. En outre, l'adaptation à un régulateur mécanique d'appareils auxiliaires électriques nous paraît être plus rationnelle que l'inverse, à condition toutefois — et dès qu'il s'agit d'automatisme — que cette adaptation soit recherchée dans une autre voie que celle suivie jusqu'ici, au moyen de moteurs-relais. Non seulement ces moteurs nécessitent l'emploi de mécanismes de transmission qui sont la source de retards d'action, mais tels qu'ils sont actuellement conçus pour réaliser un réglage astatique²⁾, ils constituent des dispositifs non-asservis, c'est-à-dire par principe instables. En l'absence d'un élément réagissant en fonction de la dérivée de la grandeur à mesurer, on ne parvient à pallier à cet inconvénient qu'en faisant agir le dispositif par à-coups, selon le système dit «exponentiel» comportant des impulsions répétées à intervalles ou temps d'action proportionnés (inversément ou directement) à l'écart de réglage; or, cet artifice ne saurait s'accommoder d'une intervention rapide qui serait d'ailleurs souvent nuisible à la stabilité du régulateur primaire. Il ne peut donc pas être considéré comme une solution d'avenir satisfaisante, mais seulement comme un pis-aller³⁾.

Nous voudrions montrer que pour obtenir dans le réglage à la fois la meilleure sensibilité, la plus grande stabilité et l'intervention la plus rapide, il y aurait un réel avantage, non pas à déplacer la caractéristique d'un régulateur mécanique primaire, par un régulateur secondaire électrique, mais à donner de suite au premier une caractéristique convenable. Nous nous proposons d'exposer quelles sont dans ce but les possibilités du régulateur mécanique et faire ressortir à quels concours il pourrait judicieusement faire appel de la part d'appareils électriques, la méthode à suivre, entre mécaniciens et électriciens, nous paraissant être celle de la collaboration, et non pas celle de la lutte d'une concurrence stérile.

II. De quelques principes généraux du réglage de la vitesse et de la puissance.

Parmi les buts essentiels proposés au réglage d'un groupe électrogène ou à un ensemble de groupes, il y a lieu dès l'abord d'en distinguer deux principaux et courants qui, du fait des caractères différents qu'ils présentent, ne correspondent pas aux mêmes nécessités, ni aux mêmes solutions.

Le premier d'entre eux est communément appelé «réglage de vitesse» et le second «réglage de puissance», bien que ces termes, sans être véritablement impropres, ne définissent pas entièrement leurs particularités. Il s'agit dans le fond, en effet, de deux réglages de puissance et il serait peut-être plus

juste de marquer leur différence en utilisant les termes de «réglage selon la puissance consommée» et de «réglage selon la puissance prescrite». Nous nous expliquerons successivement au sujet de ces deux réglages que certains groupes peuvent être appelés à réaliser indépendamment, nous voulons dire, qu'ils doivent alors fonctionner selon l'un des deux modes à l'exclusion de l'autre. Mais, dans nombre de cas et en particulier dans ceux des interconnexions, les deux réglages peuvent et doivent même être combinés en ce sens qu'un groupe ou un ensemble de groupes est susceptible d'être appelé à régler selon la puissance consommée, par rapport aux besoins d'un réseau de distribution intérieur, et selon la puissance prescrite, par rapport à une interconnexion vers un ou plusieurs réseaux extérieurs. La valeur de la puissance prescrite ou valeur de consigne fait, en effet, l'objet de contrats d'échange d'énergie entre réseaux, contrats qui tendent à la prédéterminer dans des limites étroites et bien définies.

a) Réglage de vitesse ou selon la puissance consommée.

Par ce réglage on se propose de maintenir la vitesse, ou ce qui revient au même, la fréquence, à une valeur en principe constante. Autrement dit, ce réglage doit s'opposer à tout écart de vitesse, qui ne peut provenir que d'une différence entre la puissance P_m produite par la machine motrice, et la puissance P_r demandée par le réseau de consommation. Il a donc pour fonction d'ajuster, à tout instant, la valeur du couple moteur à celle du couple résistant du générateur électrique, ce qui correspond bien finalement à un réglage de puissance.

Si nous considérons un groupe électrogène dont les parties tournantes, douées d'un moment d'inertie J , sont animées d'une vitesse de rotation ω (en régime normal ω_0), la relation bien connue existant entre la valeur instantanée de cette vitesse, puis la différence du couple moteur M_m et du couple résistant M_r , s'exprime par:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_m - M_r \quad (1)$$

ou, en supposant que la vitesse ne s'écarte pas sensiblement de sa valeur normale, et en désignant par $\Delta\omega$ l'écart relatif de vitesse:

$$\Delta\omega = \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt} \Delta\omega = \frac{P_m - P_r}{J\omega_0^2} = \frac{\Delta P}{J\omega_0^2} \quad (3)$$

Nous obtiendrons enfin en intégrant entre l'origine des temps, pour laquelle $\omega = \omega_0$, et un instant t quelconque:

$$\Delta\omega = \frac{1}{J\omega_0^2} \int_0^t \Delta P \quad (4)$$

²⁾ Certains auteurs désignent ce dispositif sous le nom de compensation.

³⁾ J. Fallou: Vue d'ensemble sur les systèmes de réglage automatique de la fréquence et de la puissance: Bull. Soc. Franç. Electr., mai 1936.

Cette équation fait ressortir que la valeur de la variation vitesse dans le temps retarde sur celle de l'écart de puissance et, s'il s'agissait d'une variation périodique (oscillation de la vitesse autour de sa valeur de régime), on pourrait dire que l'écart de vitesse est déphasé de $\frac{\pi}{2}$ par rapport à l'écart de puissance.

Le réglage de vitesse exige évidemment l'emploi d'un tachymètre mécanique ou électrique (fréquencemètre), mais s'il utilise seulement ce détecteur de l'écart de vitesse $\Delta\omega$, on constate par ce qui précède:

1° que la correction de réglage, alors proportionnelle à $\Delta\omega$, est nulle ou infime, lorsque l'écart de puissance est voisin de son maximum,

2° que cette correction de réglage continue à s'effectuer, ou pire encore, s'accroît, même lorsque l'écart de puissance a disparu ou s'est renversé, ceci à cause du retard de $\Delta\omega$ sur ΔP . Ce processus correspond presque exactement au rebours de ce qui devrait rationnellement être le cas⁴⁾, puisqu'un réglage est correct quand il mesure son action d'après la cause de la perturbation et non d'après son effet $\Delta\omega$.

La première remarque conduit à conclure à un retard inévitable dans le départ à l'action d'un régulateur tachymétrique pur, qu'il soit mécanique ou électrique; ce défaut est incorrigible. La seconde fait ressortir la tendance certaine à l'instabilité de ce genre de régulateur et l'on sait qu'elle ne peut être limitée, sans pour cela éviter des surréglages successifs mais d'amplitudes amorties, que par une dérogation au principe du réglage à vitesse constante. Elle consiste à rendre, par le jeu d'un dispositif d'asservissement, la vitesse de régime ω_0 légèrement variable et fonction continue décroissante de la puissance produit P_m ; entre zéro et sa valeur maximum P_{max} ; au lieu de la caractéristique astatique $\omega_0 = \text{cte}$, le régulateur prend alors une caractéristique statique:

$$\begin{aligned}\omega_0 &= \omega_{0max} - (\omega_{0max} - \omega_{0min}) \frac{P_m}{P_{max}} \\ &= \omega_{0max} \left(1 - \delta \frac{P_m}{P_{max}}\right) \quad (5)\end{aligned}$$

δ définissant la valeur du statisme (supposé linéaire) résultant de l'asservissement.

Pour réaliser un réglage qui n'entraîne pas d'oscillations amorties de l'écart de vitesse $\Delta\omega$, et réalise un retour au régime d'allure apériodique, les constructeurs mécaniciens ont eu depuis longtemps recours à un artifice de stabilisation qui consiste

⁴⁾ Les conditions seraient plus mauvaises encore dans le cas où l'on se servirait d'un élément détectant non plus l'écart de vitesse mais l'écart de chemin parcouru par deux horloges fonctionnant l'une à la vitesse ω l'autre à la vitesse ω_0 . La grandeur mesurée serait alors proportionnelle à $\int \Delta\omega$, dont la variation en cas d'oscillations périodiques, serait en opposition de phase avec ΔP . Cette observation met en lumière le défaut de principe du réglage dit «par intégration de fréquence», dès qu'il s'agit d'une intervention automatique.

à utiliser un asservissement très important mais qui, grâce à l'insertion d'un dash-pot, disparaît progressivement dans le temps. Cet asservissement temporaire, dont on définit la rigidité grande ou faible par la durée, longue ou courte, pendant laquelle il subsiste, a permis d'obtenir par des dispositions constructives savamment combinées, un réglage convenablement stable. Cette stabilité peut être maintenue, même sans aucun asservissement permanent, c'est-à-dire à statisme permanent nul ($\delta = 0$), mais c'est alors au prix d'un asservissement temporaire très rigide, qui par l'effet de frein qu'il développe sur les déplacements commandés par le tachymètre, accroît le défaut signalé plus haut, comme conséquence de notre première remarque; autrement dit, il diminue la sensibilité d'action du tachymètre.

Cette considération est tellement vraie que les constructeurs eux-mêmes ont cherché à y parer les uns en limitant au voisinage du régime de marche à vide l'intervention d'un asservissement temporaire très rigide⁵⁾, ceci pour augmenter la stabilité du réglage ou moment de la mise en parallèle du groupe, les autres en réduisant progressivement la rigidité de l'asservissement temporaire jusqu'à l'annuler pour les puissances les plus fortes de la machine⁶⁾. Ces deux artifices procèdent de la même préoccupation de diminuer l'effet de l'asservissement temporaire sur la sensibilité du réglage, mais ils tendent également à réduire la stabilité propre du régulateur qui devrait être recherchée aussi bien aux fortes charges qu'en marche à vide. Ils établissent donc un compromis, dont l'inconvénient ne demeure caché, que si le groupe ainsi réglé fonctionne en parallèle avec d'autres, munis de régulateurs peut-être moins sensibles, mais plus stables, qui eux assurent la stabilité de l'ensemble.

Quoi qu'il en soit, cette tendance des constructeurs de régulateurs tachymétriques montre à elle seule les imperfections du système. Nous ne méconnaissons certes pas les résultats qui ont été obtenus au moyen du réglage tachymétrique pur, avec asservissement temporaire par dash-pot; mais sans compter la complication toujours assez grande à laquelle ont dû être portés ces dispositifs stabilisateurs, en vue de leur perfectionnement, puis celle de leurs mécanismes modificateurs, nous croyons que les remèdes ainsi appliqués à un inconvénient de principe, restent malgré tout incomplets.

Quant aux constructeurs électriciens, nous avons déjà dit⁷⁾ de quelle façon ils ont cherché à obvier à l'instabilité du réglage astatique de la fréquence et ce que nous pensions des solutions qu'ils utilisent.

Un processus de réglage rationnel doit, comme indiqué plus haut, calquer son action, non pas sur

⁵⁾ Gagg: Die Entwicklung und die Leistungen der heutigen Turbinenregler von Escher Wyss & Cie. Escher Wyss Mitt., Nov./Dez. 1929. — Le degré d'irrégularité des régleurs de turbines et l'influence de l'asservissement de marche à vide EW. Bull. Escher Wyss No. 2, mars-avril 1934.

⁶⁾ F. Cahen: Réglage direct de la fréquence par régulateur de vitesse à faible coefficient d'insensibilité. Bull. Soc. Franç. Electr., juillet 1936.

⁷⁾ Voir chapitre I.

l'effet de la perturbation, c'est-à-dire sur l'écart de vitesse $\Delta\omega$ mais remonter à sa cause, l'écart de puissance ΔP . Si, à notre connaissance, aucun appareil électrique n'est encore parvenu à détecter la valeur de cet écart de puissance ΔP , il existe une solution mécanique simple et des plus satisfaisantes, celle de l'accéléromètre. L'accélération constitue en effet une mesure directe de l'écart de puissance et l'équation (3) fait ressortir qu'elle lui est directement proportionnelle à tout instant, autrement dit que les deux grandeurs sont en phase.

La combinaison, dans un régulateur mécanique, d'un tachymètre et d'un accéléromètre permet le plus sûrement d'obtenir, même sans aucun asservissement, c'est-à-dire en respectant une caractéristique de réglage astatique $\omega_0 = \text{cte}$, à la fois la plus grande stabilité, avec des retours au régime apériodiques et la sensibilité la plus poussée, ceci grâce à l'entière liberté laissée aux deux organes détecteurs dont l'action n'est freinée par aucun dash-pot. Nous n'insisterons pas plus sur les avantages indéniables de la solution accéléro-tachymétrique qui ont été mis en évidence par nombre d'auteurs⁸⁾ et qui ont reçu la consécration d'une longue expérience dans le domaine du réglage des turbines hydrauliques, sous toutes conditions d'installation.

Ce système de réglage est naturellement applicable à n'importe quelle autre machine motrice et nous ajouterons seulement, pour donner une idée de la sensibilité de ses éléments mécaniques de détection de la vitesse et de l'accélération, que le tachymètre réagit à des variations de vitesse inférieures à 0,1 % et l'accéléromètre à des accélérations de l'ordre de 0,01 % par seconde. Sous réserve de difficultés inhérentes à la machine motrice, ou à ses conditions d'installation, sur lesquelles nous reviendrons plus loin, il nous paraît donc que le réglage de la fréquence peut et doit être recherché par l'emploi d'un bon régulateur mécanique sensible, spécialement du type accéléro-tachymétrique.

b) Réglage de puissance ou selon la puissance prescrite.

Par ce réglage, on se propose de maintenir la puissance débitée par le groupe à une valeur en principe constante, ou du moins en principe indépendante de la vitesse, ceci en dehors de toute considération de puissance consommée, aux variations de laquelle un autre groupe ou ensemble de groupes est chargé de satisfaire. Autrement dit, ce réglage ne peut être envisagé que lorsque le groupe en question fonctionne en parallèle avec d'autres.

⁸⁾ Nous citerons entre autres:

Barbillion et Cayère: Note sur une nouvelle solution du problème de la régulation des groupes électrogènes. Rev. gén. Electr., mai-juin 1918.

E. Volet: Le régulateur accéléro-tachymétrique des Ateliers des Charmilles S. A., Genève. Bull. Techn. Suisse Romande 1926.

A. Tenot: Régulateurs automatiques de vitesse des Groupes Hydro-électriques et Centrales automatiques, Science et Industr. 1936.

La valeur de la puissance prescrite peut dépendre d'un ou plusieurs autres facteurs, tels que le niveau de l'eau dans un bief amont ou aval (réglage de débit), la position d'ouverture d'une autre machine (problème de la répartition des charges) ou plus généralement d'une consigne horaire fixée par le programme d'échange d'énergie avec une interconnexion.

Le moyen le plus simple d'assurer le réglage de puissance pur pourrait paraître celui consistant à régler directement un dispositif de commande mécanique de l'ouverture de la machine. Mais, sans compter que dans nombre de grosses unités un tel mécanisme n'existe point et qu'il est alors nécessaire d'agir sur un servomoteur, l'éventualité de perturbations importantes, comme un déclanchement de ligne, ne permet d'habitude pas de se passer d'un régulateur de vitesse prêt à entrer, dans ce cas, en action.

Les possibilités qu'offre à ce point de vue un régulateur moderne sont de deux sortes:

1° Action par le dispositif limiteur d'ouverture. Ce dispositif permet de régler, au moyen du servomoteur, l'ouverture de la machine, à telle valeur prédéterminée, une fois la précaution prise que le réglage de vitesse ait toujours tendance à faire prendre de la charge au groupe. Il suffit pour cela de donner au réglage de vitesse une caractéristique telle, que quelle que soit la position du vannage de la machine et eu égard aux valeurs possibles de la fréquence du réseau, elle commande l'ouverture de la machine. Le déplacement qu'il est nécessaire de donner dans ce but à la caractéristique astatique ou statique du régulateur sera d'autant plus faible que le statisme résultant des autres groupes du réseau sera réduit.

Ce mode de réglage de la puissance est couramment employé par les turbiniers dans les régulateurs de débit, puis également pour régler l'ouverture d'une ou plusieurs machines en fonction de celle d'une autre machine (répartition des charges). La transmission du mouvement peut se faire, soit mécaniquement, soit électriquement.

Le même moyen peut être employé sans difficulté pour le réglage selon la puissance prescrite, par l'emploi d'un relais wattmétrique, combiné au besoin avec un modificateur de consigne commandé par une horloge. Nous lui donnerions sans hésitation la préférence, chaque fois qu'il s'agit d'un groupe fonctionnant en réglage de puissance seulement.

2° Action par le dispositif de changement de vitesse. Ce dispositif a pour effet de déplacer la caractéristique du régulateur parallèlement à elle-même et de modifier en conséquence la puissance fournie par la machine sur le réseau doué d'une fréquence déterminée. Contrairement à ce qui était le cas dans le mode de commande précédent, le réglage de vitesse reste ici constamment en action et la puissance fournie dépend de la fréquence du réseau.

Si donc on commande le dispositif de changement de vitesse par un relais wattmétrique, avec la prétention de régler à puissance constante et indépendante de la vitesse (fréquence), on constitue ainsi un régulateur secondaire non-asservi et par conséquent instable. Il faut alors s'accommoder d'un des artifices précités de réglage très lent et par à-coups. C'est la raison pour laquelle ce mode de réglage est à déconseiller chaque fois qu'il est possible de s'en passer et que l'on peut adopter le précédent.

Ce n'est seulement que dans le cas où le même groupe ou ensemble de groupes doit assurer à la fois un réglage de vitesse et un réglage de puissance (partielle)⁹⁾, qu'on ne peut faire autrement que de laisser le réglage de vitesse en action et d'agir par conséquent, pour le réglage de puissance, par le dispositif de changement de vitesse. Nous montrerons, dans le chapitre suivant, combien il est alors avantageux d'établir un asservissement entre la puissance et la fréquence, c'est-à-dire d'admettre l'existence d'un statisme positif puissance-fréquence.

III. Des réglages indépendants ou combinés de vitesse (fréquence) et de puissance.

L'exposé du problème du réglage de plusieurs réseaux reliés par une interconnexion peut être simplifié en considérant l'ensemble de chacun des réseaux¹⁰⁾ constitué par un groupe générateur fournissant une puissance P , une distribution intérieure absorbant une consommation Q et une liaison débitant une puissance p , positive s'il s'agit d'une puissance reçue de l'interconnexion, ou négative dans le cas inverse. Ces trois puissances sont évidemment liées par l'équation:

$$P = Q - p \quad (6)$$

Nous avons montré dans le chapitre précédent quels étaient les caractères du réglage:

1° si $p = 0$, c'est-à-dire si le groupe ne doit satisfaire qu'à une consommation variable, mais à fréquence constante: réglage de vitesse ou selon la puissance consommée.

2° si $Q = 0$, ou du moins $Q = \text{cte}$, c'est-à-dire si le groupe ne doit régler que pour maintenir la puissance d'échange p à une valeur prescrite: réglage de puissance ou selon la puissance prescrite.

Dans le cas de plusieurs réseaux interconnectés, les deux systèmes de réglage doivent être réalisés à la fois, par le même groupe ou ensemble de groupes, pour les raisons déjà exposées¹¹⁾, et l'on peut alors envisager deux solutions différentes, l'une communément employée jusqu'ici, dite du réseau chef d'orchestre, l'autre nouvelle mais ayant fait déjà l'objet de quelques applications et particulièrement prônée en France par MM. Fallou¹²⁾ et Darrieus¹³⁾; il s'agit du réglage combiné fréquence-puissance, ou à statisme virtuel.

a) Réglage avec réseau chef d'orchestre.

Il est clair que si l'on néglige les pertes en ligne, les puissances p échangées par n réseaux interconnectés doivent physiquement satisfaire à la relation:

$$p_1 + p_2 + p_3 \dots + p_n = 0 \quad (7)$$

On ne peut donc pas avoir la prétention, au cours d'un régime troublé, de régler ces n grandeurs p à leurs valeurs de consigne $p_{01}, p_{02} \dots p_{0n}$ et de maintenir à la fois la fréquence constante, car on se trouverait en face de $(n+2)$ conditions à satisfaire par $(n+1)$ variables, les puissances d'échange et la fréquence.

La solution du réglage avec réseau chef d'orchestre consiste à ne régler que $(n-1)$ puissances d'échange à leurs valeurs prescrites, indépendantes de la vitesse, et à laisser au n^{me} réseau, dénommé chef d'orchestre, le soin de maintenir la fréquence. On obtient ainsi un système de n équations:

$$P_1 = P_{01} \quad P_2 = P_{02} \quad P_3 = P_{03} \dots P_{(n-1)} = P_{0(n-1)} \quad (8) \\ f = f_0$$

qui ne contiennent que n variables, la puissance d'échange p_n du réseau chef d'orchestre se déduisant sans autre de l'équation supplémentaire (7).

Tandis que le réglage du réseau chef d'orchestre reste alors uniquement un réglage de vitesse ou selon la puissance consommée, le réglage des $(n-1)$ autres réseaux devient un réglage mixte ou combiné; il doit en effet s'effectuer selon la puissance consommée, par rapport à Q , et selon la puissance prescrite, par rapport à p . Il est donc nécessaire, comme nous l'avons indiqué plus haut¹⁴⁾, d'avoir recours à un régulateur de vitesse et de faire appel à son dispositif de changement de vitesse pour le réglage de la charge partielle p .

Du fait de la valeur relativement faible du statisme des régulateurs des groupes électrogènes, une variation de fréquence donnée a beaucoup plus d'effet sur la puissance produite P que sur la puissance consommée Q et l'on peut en première approximation négliger $\frac{\partial Q}{\partial f}$ devant:

$$\frac{\partial P}{\partial f} = \left(\frac{\partial P}{\partial P_{\max}} : \frac{\partial f}{f_0} \right) \frac{P_{\max}}{f_0} = - \frac{1}{\delta} \frac{P_{\max}}{f_0} = -K_s \quad (9)$$

La grandeur K_s est homogène à une énergie et M. Darrieus propose de la désigner par le terme d'énergie réglante. Sa valeur varie en proportion inverse du statisme δ du régulateur et en proportion directe de la puissance $P_{\max}$ du groupe (ou des groupes en service). Elle est, autrement dit, d'autant plus grande que le statisme est faible, c'est-à-dire la caractéristique de réglage peu inclinée, et que la puissance maximum est élevée, conditions qui, comme nous le montrerons plus loin, doivent caractériser le réseau chef d'orchestre.

⁹⁾ Voir chapitre II.

¹⁰⁾ A l'intérieur de chaque réseau le problème du réglage des diverses centrales de production travaillant en parallèle peut se traiter d'une façon analogue.

¹¹⁾ Voir chapitre II.

¹²⁾ op. cit.

¹³⁾ G. Darrieus: Réglage rationnel de la fréquence et de la répartition des charges entre centrales interconnectées. Bull. Soc. Franç. Electr., mai 1936.

¹⁴⁾ Voir chapitre II b 2°.

Considérons maintenant un groupe ou réseau chef d'orchestre A , dont le régulateur possède une caractéristique inclinée K_{sA} , et travaillant en parallèle avec un ensemble de groupes ou de réseaux, que nous remplacerons par la pensée par un groupe B , dont le régulateur possède une caractéristique également inclinée K_{sB} . Nous ferons pour le moment abstraction des puissances de consommation Q en les supposant invariables et nous étudierons le processus de réglage par rapport aux seules puissances d'échange p_A , que nous admettrons par exemple négative, et p_B positive. La loi de variation des puissances p_A et p_B , imposée par le fonctionnement des régulateurs primaires, eux-mêmes caractérisés par les valeurs K_{sA} et K_{sB} , sont les suivantes:

$$\begin{aligned} p_A &= Q_{0A} - P_A = Q_{0A} - P_{0A} + K_{sA} (f - f_0) = \\ & \quad P_{0A} + K_{sA} (f - f_0) \\ p_B &= Q_{0B} - P_B = Q_{0B} - P_{0B} + K_{sB} (f - f_0) = \\ & \quad P_{0B} + K_{sB} (f - f_0) \end{aligned}$$

Pour obtenir un réglage astatique $f=f_0$ et $p_B=p_{0B}$, on a habituellement recours à un régulateur secondaire actionnant le dispositif de changement de vitesse du régulateur primaire, en A en fonction de l'écart de fréquence $(f-f_0)$, en B en fonction de l'écart de puissance (p_B-p_{0B}) .

Pour la clarté de l'exposé, nous admettrons comme l'a fait M. Labouret¹⁵⁾, que les mouvements confondant avec l'axe des abscisses $f=f_0$ et pour B sont successifs, ce qui est évidemment plus défavorable au point de vue de la recherche de la stabilité que des mouvements concomitants. Si donc notre examen nous montre que le processus de réglage tend ainsi vers un régime stable nous pourrions à coup sûr prétendre que ce sera également le cas avec les mouvements simultanés qu'effectuent pratiquement les organes des régulateurs automatiques secondaires. Par contre, s'il révèle une tendance à l'instabilité, cela ne signifiera pas qu'elle

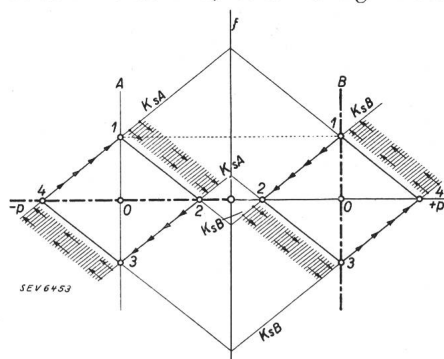


Fig. 1.

se manifestera réellement, mais seulement que le processus de réglage est relativement moins favorable. L'emploi de cette méthode simplifiée nous paraît donc bien justifié lorsqu'il s'agit de comparer divers procédés de réglage.

Si dans un diagramme cartésien (fig. 1) en p et

f , nous figurons dès lors les lois de consigne imposées par les régulateurs secondaires, nous obtenons pour le chef d'orchestre A une caractéristique se confondant avec l'axe des abscisses $f=f_0$ et pour B une parallèle à l'axe des ordonnées $p_B=p_{0B}$, valeur de la puissance prescrite. Les points de régime permanents viennent en O_A et O_B , ($p_{0A}=-p_{0B}$).

Supposons qu'à la suite d'une perturbation, les points figuratifs se trouvent en 1_A et 1_B , c'est-à-dire au-dessus de la caractéristique de consigne pour A , mais sur cette caractéristique pour B .

Le régulateur secondaire A détectant une vitesse trop élevée déplace la caractéristique K_{sA} du régulateur primaire parallèlement à elle-même; si le régulateur secondaire B ne réagit pas au cours du réglage du régulateur A , le point figuratif de B reste sur la caractéristique K_{sB} du régulateur primaire, tandis que le point figuratif A se déplace sur la droite symétrique puisque l'on doit avoir à tout instant $p_A=-p_B$. Le réglage conduit ainsi aux points 2_A et 2_B à supposer que la correction secondaire de A soit bien stable et qu'elle s'effectue sans surréglage. Nous avons déjà exposé au chapitre II, sous a), la difficulté de réaliser cette condition, du moins avec un réglage rapide et rigoureusement astatique $f=f_0$.

A partir des points 2_A situés sur la caractéristique de consigne de A et 2_B tombant en dehors de la caractéristique de consigne de B , c'est le régulateur secondaire B qui intervient et déplace la caractéristique primaire K_{sB} parallèlement à elle-même, tandis que le point figuratif de A demeure sur sa caractéristique primaire K_{sA} passant par 2_A . On aboutit ainsi en 3_A et 3_B , du moins si la correction secondaire de B est bien stable et qu'elle s'effectue sans surréglage. Nous avons déjà exposé au chapitre II, sous b) la difficulté de réaliser cette condition avec un réglage rigoureusement astatique $p_B=p_{0B}$, pour autant qu'il doive être rapide.

En continuant ainsi de proche en proche, on constate:

1° que si, comme c'est le cas de la fig. 1, $K_{sA}=K_{sB}$, c'est-à-dire si les caractéristiques des régulateurs primaires, ramenées à la puissance maximum de leurs groupes, ont la même inclinaison (même énergie réglante), le processus de réglage se poursuit selon un cycle fermé qui n'atteint jamais les valeurs de régime. Si les caractéristiques étaient telles que $K_{sA} < K_{sB}$, les mouvements de réglage se poursuivraient avec des amplitudes croissantes jusqu'au décrochage, ainsi que l'on peut s'en persuader en refaisant la figure dans cette hypothèse.

2° que pour que les mouvements de réglage soient amortis, il faut que $K_{sA} > K_{sB}$, ce qui est le cas de la fig. 2 qui pourtant fait ressortir plusieurs surréglages.

Autrement dit, à la difficulté initiale de la stabilité en réglage rapide, des régulateurs secondaires proprement dits, qui doivent réaliser des caractéristiques astatiques $f=f_0$ et $p_B=p_{0B}$, vient s'ajouter une autre difficulté, celle de la tendance à l'instabilité du réglage des échanges suivant des caractéristiques de consigne astatiques.

¹⁵⁾ J. Labouret: Les oscillations de puissance en cours du réglage de la charge dans les réseaux interconnectés. Bull. Soc. Franç. Electr., mai 1936.

On peut obvier à ces difficultés sur le groupe *A*, pour autant qu'il soit suffisamment puissant par rapport au groupe *B*, en lui affectant un très faible statisme, voire un statisme nul, en faisant appel à un régulateur accéléro-tachymétrique qui restant, malgré cela, parfaitement sensible et stable. On peut même ainsi avantageusement se passer en *A* d'un régulateur secondaire déplaçant la caractéristique du régulateur primaire et effectuer directement le réglage de fréquence.

Il subsistera encore néanmoins les inconvénients suivants:

1° Obligation d'avoir au groupe *B* des actions très lentes pour ne pas amorcer une instabilité du réglage secondaire astatique (non asservi) $p_B = p_{0B}$.

2° Obligation de choisir le groupe *A* notablement plus puissant que le groupe *B* et de le laisser subvenir, par des prises ou des rejets de charge rapides, à toutes les défaillances temporaires du réglage lent du groupe *B*. L'exploitation du groupe (ou du réseau) *A* se trouve placé de ce fait dans des conditions économiques spécialement défavorables.

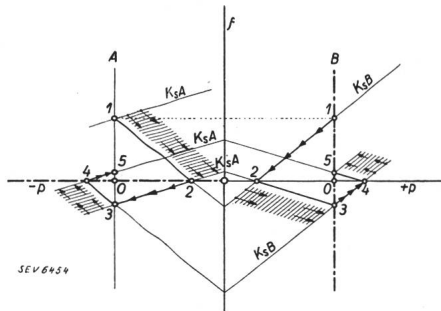


Fig. 2.

Ces désavantages, qui sont devenus d'autant plus marqués que les réseaux interconnectés sont maintenant de puissances très grandes et comparables entre elles, tendent à faire rejeter ce mode de réglage pour un autre mieux approprié.

b) Réglage combiné fréquence-puissance ou à statisme virtuel.

Ce procédé se caractérise par l'établissement d'une liaison statique (asservissement) dans le réglage de la fréquence et de la puissance d'échange $p = p_0 + k(f - f_0)$. Il a pour conséquences immédiates et particulièrement avantageuses:

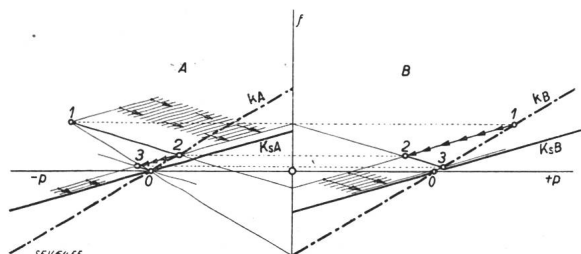


Fig. 3.

1° de ne plus établir aucune différence entre l'un quelconque des *n* réseaux et les autres,

2° d'apporter un élément de stabilité dans le réglage secondaire de puissance de chacun des réseaux considéré pour lui-même, ceci grâce à la loi

d'asservissement de la puissance prescrite à la fréquence.

Le tracé de quelques diagrammes montre en outre que le processus du réglage des puissances d'échange *p* est infiniment plus favorable et plus stable:

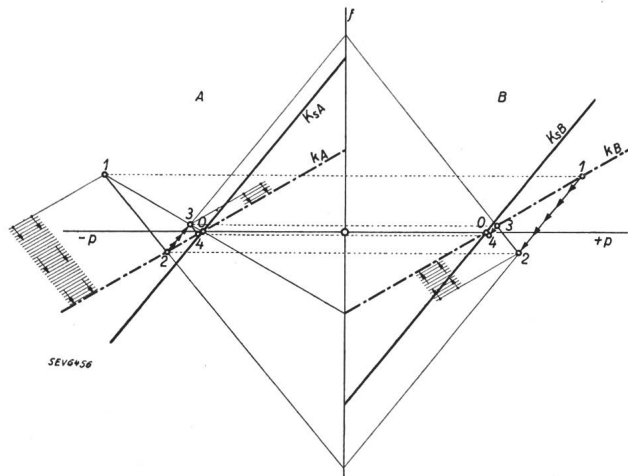


Fig. 4.

Les équations traduisant les lois de consigne sont au nombre de $(n+1)$

$$\left. \begin{aligned} p_1 &= p_{01} + k_1(f - f_0) \\ p_2 &= p_{02} + k_2(f - f_0) \\ p_n &= p_{0n} + k_n(f - f_0) \\ p_1 + p_2 + \dots + p_n &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

pour $(n+1)$ variables. Comme par ailleurs, la somme des valeurs prescrites de puissance d'échange est nulle $\sum_0^n p_{0n} = 0$, ce système d'équations ne

peut être satisfait que si $f = f_0$ et en conséquence $p_1 = p_{01}$, $p_2 = p_{02}$, $p_n = p_{0n}$, ce qui est bien le but recherché.

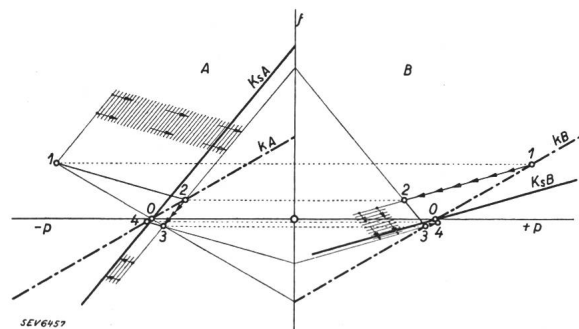


Fig. 5.

Considérons donc à nouveau deux groupes *A* et *B*, dont les régulateurs primaires possèdent des caractéristiques inclinées K_{sA} et K_{sB} , et affectons à chacun d'eux, selon la règle du statisme virtuel, une caractéristique de consigne non plus astatique (horizontale ou verticale) mais statique (inclinaison) soit:

$$\begin{aligned} p_A &= p_{0A} + k_A(f - f_0) \text{ pour } A \\ p_B &= p_{0B} + k_B(f - f_0) \text{ pour } B. \end{aligned}$$

Supposons encore pour le moment que la réalisation de ces caractéristiques de consigne soit confiée à des régulateurs secondaires qui, cette fois, fonctionneront dans de meilleures conditions de stabilité parce qu'asservis.

Dans un diagramme cartésien en p et f (fig. 3, 4, 5 et 6) effectuoons, avec les mêmes hypothèses

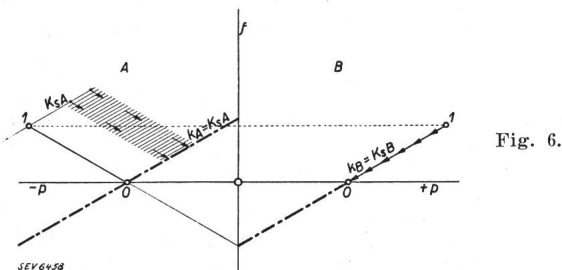


Fig. 6.

que celles du cas précédent, le tracé du graphique des mouvements de réglage. On constate dès lors:

1° que les mouvements de réglage sont dans tous les cas, sinon apériodiques, du moins très fortement amortis. Dans le cas de la fig. 3 où $K_{SA} = k_A$, $k_A = k_B$ avec $K_{SA} > k_A$, $K_{SB} > k_B$ il n'y a pas de surréglages de f par rapport à f_0 , mais de légers surréglages de p par rapport à p_0 . Dans le cas de la fig. 4 où $K_{SA} = K_{SB}$, $k_A = k_B$ avec $K_{SA} < k_A$, $K_{SB} < k_B$ il n'y a pas de surréglage de p par rapport à p_0 , mais de légers surréglages de f par rapport à f_0 . Dans le cas de la fig. 5 où $K_{SA} \neq K_{SB}$, $k_A = k_B$ avec $K_{SA} < k_A$, $K_{SB} > k_B$ il y a de légers surréglages en p et en f .

Enfin, dans le cas de la fig. 6 où $K_{SA} \neq K_{SB}$, mais avec $K_{SA} = k_A$ et $K_{SB} = k_B$, il n'y a aucun surréglage; le régulateur secondaire de B n'a aucune correction à effectuer, seul le régulateur secondaire A étant en l_A , hors de sa loi de consigne, procède à sa correction d'une seule course, s'il est lui-même bien stable.

Ces dernières valeurs particulières des grandeurs K_s et k correspondent à la proposition de M. G. Darrieus; si elles ne sont pas indispensables au bon fonctionnement du réglage avec statisme virtuel, elles le placent, comme nous venons de le voir, dans des conditions éminemment favorables. Toutefois, cette proposition n'élimine point la nécessité d'un régulateur secondaire adapté à chacun des régulateurs primaires, car il reste encore à réaliser le réglage astatique de vitesse, ou selon la puissance consommée, par rapport aux charges intérieures Q de chaque réseau. De plus, elle exige pour les grandeurs k des valeurs bien déterminées et égales à K_s , alors que, comme nous le montrerons au chapitre suivant, il peut être intéressant de réserver leur choix sur la base d'autres considérations.

Nous préférierions donc proposer l'utilisation de régulateurs primaires accéléro-tachymétriques stables, avec caractéristique astatique $\delta = 0$, qui assureraient seuls et directement le réglage de la fréquence sans nécessiter aucun régulateur secondaire. La loi de consigne du statisme virtuel serait réalisée par un relais wattmétrique combiné au besoin avec

un modificateur horaire de consigne comme schématisé sur la fig. 7.

Le processus du réglage s'effectuerait ainsi plus simplement encore, selon le diagramme de la fig. 8, le passage du point l_A au point 0_A ne se faisant même plus par déplacement de la caractéristique primaire, mais par le mouvement de réglage propre

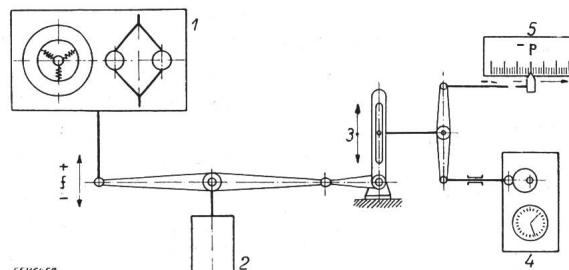


Fig. 7.

- 1 Régleur accélérotachymétrique. 2 Tiroir de distribution.
3 Réglage de k . 4 Modification horaire de consigne.
5 Relais wattmétrique.

du régulateur primaire. Ce système protégerait en outre au mieux le réseau A contre un appel intempestif de puissance de la part du réseau B. Dans ce cas en effet, malgré l'action du régleur accélérotachymétrique, la tendance à ouvrir serait immédiatement freinée, voire arrêtée par l'action du relais wattmétrique, le régulateur laisserait la fréquence diminuer pour provoquer la prise de charge, par le régulateur de l'autre réseau B, sur lequel, au contraire, les actions du régleur accéléro-tachymétrique et du relais wattmétrique seraient concourantes.

Nous précisons qu'il ne s'agit là que d'une proposition, mais dont la réalisation ne doit pas présenter de difficultés insurmontables, bien que le relais wattmétrique devrait non seulement mesurer

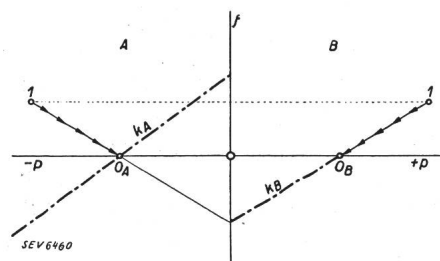


Fig. 8.

une puissance d'échange en un point d'interconnexion éloigné, mais fournir un effort suffisant pour déplacer le pilote d'un relais à pression d'huile du régulateur mécanique. Ce même problème se pose d'ailleurs pour l'obtention d'un bon réglage quelle que soit la loi de fréquence-puissance que l'on veuille réaliser.

IV. Du choix de la grandeur k dite énergie réglante d'un réseau ou d'une centrale.

La grandeur k , à laquelle M. G. Darrieus propose de donner la même valeur qu'à la grandeur K_s , directement fonction du statisme δ du régulateur et de la puissance maximum P_{max} du groupe, possède elle-même un certain caractère particulier. Celui-ci nous conduit plutôt à établir comme nous le montrerons, une différence entre les deux grandeurs

K_s et k , en distinguant parallèlement un statisme de groupe, ou statisme de réseau dans le cas d'un ensemble de groupes, et indépendamment un statisme d'interconnexion concernant seulement la puissance d'échange ¹⁶⁾.

En effet, en considérant à nouveau le système d'équations (10) du réglage à statisme virtuel (ou réglage combiné fréquence-puissance), nous constatons que si l'un quelconque des n réseaux est défaillant, les $(n-1)$ autres se partagent l'écart de puissance proportionnellement à la valeur de leur énergie réglante, caractérisé par la grandeur k . Supposons par exemple que, par suite d'un déclenchement de la ligne de liaison, la puissance d'échange du réseau 1 s'annule $p_1 = 0$; il s'établit alors un écart de fréquence $(f-f_0)$ qui se déduit sans difficulté du système d'équations précité:

$$f - f_0 = \frac{p_{01}}{\sum_2^n k_n} \quad (11)$$

si bien que les puissances d'échanges des réseaux 2, 3... n diffèrent de leurs valeurs de consigne p_{02} , p_{03} ... p_{0n} des quantités suivantes:

$$\left. \begin{aligned} p_2 - p_{02} &= p_{01} \frac{k_2}{\sum_2^n k_n} \\ p_3 - p_{03} &= p_{01} \frac{k_3}{\sum_2^n k_n} \\ p_n - p_{0n} &= p_{01} \frac{k_n}{\sum_2^n k_n} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

ce qui constitue bien la démonstration de la proposition que nous avons avancée.

En conséquence, nous pouvons dire que devront choisir pour leur énergie réglante une grande valeur (faible statisme d'interconnexion), ceux des réseaux qui admettront de participer dans une forte proportion à la défaillance de l'un d'entre eux. Ce sera par exemple le cas des réseaux ayant une importante réserve de puissance, soit dans le cas d'installations hydrauliques, des réseaux dont les turbines sont alimentées par un bassin d'accumulation (réserve faite de la considération du programme d'utilisation de la dite accumulation, journalière ou saisonnière), ou au fil de l'eau, alors que le débit disponible est surabondant par rapport à celui utilisé pour les besoins de la distribution intérieure.

Au contraire, devront choisir pour leur énergie réglante, une faible valeur (fort statisme d'interconnexion), ceux des réseaux qui n'ont pas de réserve de puissance, soit que leur équipement est déjà utilisé en plein, compte tenu des besoins de la distribution intérieure, soit, dans le cas d'instal-

lations hydrauliques, que le débit d'eau disponible est à ce moment très court.

Nous avons jusqu'à présent considéré, comme lois du réglage, celles qui régissent, en fonction de la fréquence, les valeurs de la puissance produite du régime permanent; autrement dit, nous avons admis que les variations de puissance étaient assez faibles et surtout — nous insistons bien sur ce point — assez lentes *par rapport aux possibilités d'action des régulateurs*, pour que le groupe puisse satisfaire aux dites variations de puissance, sans que les organes détecteurs du régulateur (tachymètre et accéléromètre) s'écartent sensiblement de leurs positions d'équilibre de régime permanent, c'est-à-dire sans que la fréquence s'éloigne d'une façon appréciable de ses valeurs de régime. Ces possibilités d'action du régulateur participent à la fois de sa sensibilité et de sa rapidité de manœuvre, un réglage étant d'autant plus favorable qu'il peut sans variation sensible de fréquence, faire suivre au groupe qu'il commande une variation de puissance plus importante et plus rapide.

Dans le cadre de ces hypothèses on peut alors faire abstraction de la valeur absolue de la vitesse de manœuvre du régulateur, une fois celle-ci reconnue suffisante en égard à la rapidité des variations attendues de puissance. Mais cette valeur de la vitesse de manœuvre intervient tout autrement si la variation de charge est assez brusque et assez importante pour que l'équilibre des organes détecteurs du régulateur soit rompu. Dans ce cas, la rapidité d'action du régulateur étant inférieure à la rapidité de la variation de puissance, la différence qui s'établit entre couple moteur et couple résistant, provoque une variation de fréquence qui dépend, non seulement de la vitesse de manœuvre du régulateur, par rapport à la rapidité de charge, mais aussi l'inertie des masses tournantes, dont le rôle devient aussi prépondérant. La valeur de la vitesse de manœuvre des différents régulateurs intervient alors dans la répartition des charges entre groupes et entre réseaux, au cours de la perturbation brusque.

Il nous paraît toutefois que, sauf cas exceptionnel et rare, on peut éviter de considérer, dans les problèmes d'interconnexion, les conséquences d'écarts de réglage rapides et grands. En effet, précisément du fait des énormes puissances mises en jeu dans l'ensemble de réseaux interconnectés, les appels ou rejets de charge demeurent d'importance relativement très réduite, car plus il y a de systèmes de distribution reliés les uns avec les autres, moins il y a de probabilités que des variations de charge, se produisant en divers lieux, interviennent simultanément et dans le même sens. Enfin, chacune de ces variations bénéficie non seulement des possibilités de production de l'ensemble, mais également de l'inertie totale (GD^2) des masses tournantes de tous les groupes générateurs et récepteurs. Cette inertie également très grande limite donc très fortement les variations de fréquence, si bien que celle-ci ne s'éloigne pratiquement pas, à la sensibilité près, des valeurs correspondant aux

¹⁶⁾ C'est ce statisme là qui peut être considéré comme virtuel comme le dénomme M. J. Fallou, du moins dès que la condition $f = f_0$ est rigoureusement réalisée.

lois de régime permanent (régulateur en équilibre)¹⁷⁾.

Cette conclusion appelle cependant certaines réserves car il ne faudrait pas croire que l'on peut, sans précaution supplémentaire, faire participer au réglage, des groupes qui sont particulièrement insensibles, paresseux, en un mot inaptes à subvenir à des variations de charge, tant soit peu rapides. Cette inaptitude peut provenir de régulateurs mécaniques de mauvaise conception, le plus souvent parce que de types démodés¹⁸⁾, ne répondant plus aux exigences modernes; nous ne nous arrêterons pas sur ce cas, qu'il appartient aux exploitants de faire disparaître et nous ajoutons seulement que si l'on recherche par le réglage fréquence-puissance à répartir entre les réseaux les difficultés du réglage, il serait inadmissible que l'un d'entre eux profite de cette solidarité pour ne pas remplir correctement sa tâche, comme il pourrait le faire, ceci à cause du maintien en service de régulateurs qui devraient être rebutés, plutôt que soi-disant rénovés par leur mise sous tutelle de régulateurs secondaires électriques. Nous avons déjà dit ce que nous pensions de cette solution.

Mais cette inaptitude peut aussi provenir, dans les centrales hydrauliques, de certaines particularités inévitables, imposées, qui n'ont rien à voir avec le genre de régulateur, ni avec le type de turbine employés. Nous voudrions appeler sur ce point l'attention des exploitants qui sont tentés d'attribuer telles consignes à telles de leurs centrales, sans quelquefois prendre garde aux possibilités dont elles sont douées de par leurs conditions hydrauliques.

Un exploitant sait que lorsqu'il charge une de ses centrales d'un certain régime de vidange d'un réservoir d'accumulation et qu'il ne veut par conséquent pas que la dite centrale puisse même temporairement avoir sa puissance influencée par la fréquence, il doit prendre certaines dispositions concernant son réglage. Dans le système du réglage combiné fréquence-puissance, il adoptera une faible valeur de l'énergie réglante. Or, il est des cas où, du fait de l'impossibilité physique d'admettre des vitesses de réglage rapides de ses groupes, l'exploitant ne peut faire autrement que de prendre la même précaution. C'est évidemment ici une affaire de mesure, de proportion entre l'importance et la rapidité des variations de charge attendues d'une

part, puis des possibilités hydrauliques d'autre part. Mais, cela n'enlève rien au principe qu'il est inutile de chercher à améliorer la participation d'un groupe au réglage, si les conditions hydrauliques y imposent une limite infranchissable¹⁹⁾. Un régulateur secondaire électrique ne pourra pas faire mieux qu'un régulateur primaire mécanique et devra, sous peine d'empirer la qualité du réglage, se contenter d'actions lentes.

Si le système de réglage combiné fréquence-puissance doit donc être établi, non seulement en vue de la répartition permanente des puissances d'échange, mais également pour la répartition des variations de ces puissances, de telles centrales devront être affectées d'une faible énergie réglante. Dans le même ordre d'idées, un réseau qui possède dans sa distribution intérieure un récepteur susceptible de provoquer de brusques et importantes variations de charge, devra choisir une faible valeur de son énergie réglante, s'il désire mettre l'interconnexion à l'abri des répercussions de ses propres fluctuations.

Ces considérations qui doivent présider aux choix de la grandeur k caractérisant l'énergie réglante, ou encore le statisme d'interconnexion, bien que de nature analogue, ne sont, on le voit, pas les mêmes que celles dont il y a lieu de tenir compte pour fixer le statisme des régulateurs, ou statisme de réseau. Du point de vue des charges intérieures Q d'un participant, il y a un intérêt évident à réduire ce statisme de réseau au minimum, voire à l'annuler pour effectuer le réglage direct de la fréquence par le régulateur mécanique.

V. Conclusions.

Nous avons montré quels étaient les avantages incontestables du système de réglage combiné fré-

¹⁹⁾ Ces cas défavorables se rencontrent aux limites extrêmes du domaine d'utilisation des turbines hydrauliques. Ce sont:

1° *Les unités de basses chutes et de grande puissance.* La difficulté du réglage provient du rapport élevé entre l'énergie cinétique moyenne des masses d'eau en mouvement et l'énergie potentielle de la chute. Ce rapport est caractérisé par le coefficient $(L \cdot v_{\text{moy}} : H)$ ou $(L : \sqrt{H})$ si l'on admet en première approximation que la vitesse moyenne d'écoulement dans le système sous pression, de longueur L , entre les deux niveaux libres, est proportionnelle à la racine de la chute H . Or, on peut dire que dans les basses chutes la longueur L est proportionnelle aux dimensions de la turbine et dépend donc directement de sa puissance.

Plus ce rapport est élevé, plus la vitesse de réglage doit être faible sous peine de voir, à la fermeture par exemple, le coup de bélier de surpression compenser et au-delà la réduction de puissance qui devrait être la conséquence de la diminution de débit. Lors de l'ouverture, le phénomène provoqué par la dépression a un effet analogue, et dans les deux cas la machine est inapte à subvenir à une variation de charge rapide.

2° *Les unités de très hautes chutes.* Les conduites d'alimentation de ces unités devenant très longues, leur période propre d'oscillation, au point de vue du coup de bélier, atteint une durée de plusieurs secondes. Ici encore, la vitesse de réglage doit être choisie à une faible valeur, pour éviter le risque que les mouvements de vannage entrent en résonance avec les oscillations de pression dans la conduite.

On voit que ces considérations sont tout-à-fait indépendantes du type de régulateur et du genre de la turbine.

¹⁷⁾ Nous connaissons des centrales qui, pour satisfaire à certaines conditions hydrauliques (limite de surpression) ont été dotées d'un temps de manœuvre très long, par rapport à une inertie exagérément faible de leurs groupes, au point qu'en cas de fonctionnement isolé sur un réseau témoignant de quelques variations de charge, il est plus que douteux que le maintien de la fréquence serait satisfaisant. Or, ces centrales remplissent leur service dans un ensemble d'interconnexions, sans qu'il soit apparu d'inconvénient.

¹⁸⁾ Nous nous gardons certes de considérer comme démodés les régulateurs secondaires électriques comprenant les moteurs-relais sur lesquels on agit par impulsions répétées. Ils représentent au contraire la solution actuelle et courante. Mais, nous persistons à croire, comme indiqué plus haut (chapitre I), qu'elle ne peut pas satisfaire à une intervention rapide et stable et qu'il est éminemment souhaitable de trouver mieux.

quence-puissance ou à statisme virtuel. Nous avons indiqué quelles étaient, à notre avis, les considérations dont devrait s'inspirer le choix des valeurs de l'énergie réglante, indépendamment de la question du statisme des régulateurs.

Nous avons exposé quelles étaient les possibilités actuelles des régulateurs mécaniques, spécialement du type accéléro-tachymétrique, pour le réglage direct de la fréquence dans les solutions proposées pour le contrôle des échanges dans un système d'interconnexions. Ce type de régulateur, dont l'application dans le domaine des turbines hydrauliques n'a rencontré aucune difficulté qui lui soit particulière, pourrait être avantageusement utilisé pour les turbines à vapeur. Ce genre de machine motrice n'est-il pas en effet spécialement indiqué pour satisfaire favorablement aux petites variations momentanées qui caractérisent la dentelle d'un diagramme de charge? Il nous paraît l'être aussi bien que les turbines hydrauliques bénéficiant de bonnes conditions d'installation et ainsi pourrait-on subvenir, dans l'ensemble d'un réseau, aux difficultés inévitables que peut offrir le réglage d'autres turbines hydrauliques qui, comme nous l'avons signalé, sont moins favorablement placées, du fait des valeurs relatives de leurs dimensions, de la longueur

de leur système d'alimentation sous pression et de leur chute.

Nous avons indiqué dans quel sens les constructeurs électriciens pouvaient, non seulement apporter leur aide, mais fournir des solutions nécessaires au perfectionnement des régulateurs mécaniques.

Nous voudrions, en terminant, adresser un appel aux exploitants qui, seuls, peuvent donner aux constructeurs un champ d'expérience vraie. Ce serait une juste récompense aux efforts développés par les constructeurs que de les voir conviés à des fournitures d'essais, sans devoir prendre seuls à charge les responsabilités et les frais de recherches, de mises au point successives et parfois même d'échecs qui sont l'inévitable rançon de tout progrès.

En retour, les exploitants peuvent s'attendre à obtenir, par un meilleur réglage de l'ensemble des interconnexions, une discipline mieux observée dans le régime des échanges de puissance, le respect plus précis des programmes horaires de livraison ou d'absorption d'énergie et, en conséquence, une utilisation plus avantageuse de leurs centrales de production.

Der Vorsitzende dankt Herrn Gaden verbindlich für das interessante Referat.

4. Allgemeine Diskussion.

Herr A. Engler, Direktor der Nordostschweiz. Kraftwerke A.-G., Baden (NOK): Herr Prof. Dubs hat auf die physikalischen Zusammenhänge hingewiesen, die für eine gegebene Anlage bei Regulierungsvorgängen bestehen zwischen der sogenannten Schliesszeit der Turbinenregulierung (Schliesszeit des Leitapparates bei Francis-turbinen, Schliesszeit des Ablenkens bei Freistrahlturbinen) und dem vorübergehenden Drehzahlanstieg einerseits und zwischen der Schliesszeit des Wasserabschliessorgans (Schliesszeit des Druckreglers bei Francis-turbinen) bzw. Schliesszeit der Düsennadel bei Freistrahlturbinen) und der vorübergehenden Drucksteigerung in der Rohrleitung andererseits. Ich möchte mir gestatten, aus der Praxis des Betriebes von Wasserkraftwerken auf einige mit dem Regulierproblem zusammenhängende spezielle Fragen zu sprechen zu kommen.

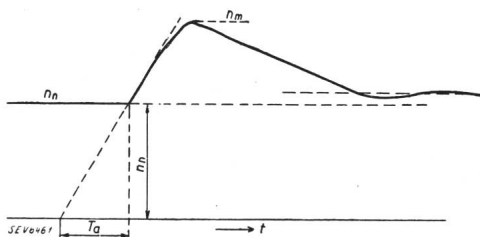


Fig. 1.

1. Massgebend für das Verhalten verschiedener Kraftmaschinen nach plötzlicher Entlastung bei Störung ist das Regulierdiagramm, welches die Abhängigkeit der Drehzahl in Funktion der Zeit darstellt (Fig. 1).

Die Winkelbeschleunigung im ersten Moment nach der Entlastung ist:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{M_a}{\Theta} = \frac{38\,200 \cdot P_a}{n_n \cdot GD^2}$$

d. h. sie ist für eine gegebene Maschine mit der Normaldrehzahl n_n und dem Schwungmoment GD^2 nur abhängig von der abgeschalteten Leistung P_a (in kW). Bei Vollastabschaltung ($P_a = P_n$) ist:

$$\frac{d\omega}{dt} = 0,104 \cdot \frac{n_n}{T_a}$$

$$\text{wo} \quad T_a = \frac{1}{365\,000} \cdot \frac{n_n^2 \cdot GD^2}{P_n}$$

Beim gleichzeitigen Hochgehen zweier verschiedener Turbinen-Generator-Gruppen besteht kein Bestreben für Pendelungen oder Aussertrittfallen, wenn die Zunahme der relativen Winkelgeschwindigkeit $d\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)$ gleich gross ist; das

ist bei Vollastabschaltung nur dann der Fall, wenn die beiden Maschinen die gleiche Anlaufzeit T_a aufweisen. Diese Anlaufzeit ist im Drehzahl-Diagramm dargestellt durch die Subtangente der Regulierkurve im ersten Moment nach der Abschaltung.

Die Grösse der Anlaufzeit ist für verschiedene Maschinen-Gruppen von normal parallellaufenden Werken gar nicht so sehr verschieden, wie man vielleicht vermuten möchte. Sie beträgt für die Maschinen der wichtigsten Werke, die im NOK-Netz parallelarbeiten, z. B.:

	P_n kW	n_n 1/min	GD^2 t m ²	T_a s
a) Niederdruckwerke:				
Bezau	1 750	66,7	600	4,13
Eglisau	4 500	83,4	1 400	5,88
Ryburg-Schwörstadt	28 500	75	12 500	6,62
b) Hochdruckwerke:				
Löntsch	4 500	375	55	4,68
Wägital, Siebnen	11 000	300	300	6,56
» Rempen	13 000	500	120	6,25
» Rempen	16 500	500	110	4,46
Etzelwerk	16 000	500	130	5,40

Im Betrieb wirken sich weniger die verschiedenen grossen Anlaufzeiten verhängnisvoll aus als die verschiedenen Belastungszustände der verschiedenen Maschinen-Gruppen. Stellen wir uns als Grenzfall in einem Werk 2 Maschinen-Gruppen vor, von denen die eine leer läuft ($\beta = 0$), die andere vollbelastet ist ($\beta = 100\%$) (Fig. 2). Wird das Werk infolge Öffnens des Leitungsschalters entlastet, so wird die vollbelastete Gruppe 2 mit maximaler Winkelbeschleunigung hochgehen, während Gruppe 1 keine Beschleunigung erfährt. Die beiden Gruppen haben also das Bestreben, ausser Tritt zu