

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins  
**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke  
**Band:** 35 (1944)  
**Heft:** 13

**Artikel:** Le réglage fréquence-puissance des interconnexions  
**Autor:** Gaden, D. / Keller, R.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1061583>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 15.01.2026

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

REDAKTION:

Sekretariat des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins  
Zürich 8, Seefeldstrasse 301

ADMINISTRATION:

Zürich, Stauffacherquai 36 ♦ Telefon 5 17 42  
Postcheck-Konto VIII 8481

Nachdruck von Text oder Figuren ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit Quellenangabe gestattet

XXXV. Jahrgang

N° 13

Mittwoch, 28. Juni 1944

## Le réglage fréquence-puissance des interconnexions

Par D. Gaden, Genève, et R. Keller, Baden

621.316.728

Le problème du télérégage de la puissance d'échange transmise par une ou plusieurs interconnexions, entre réseaux, est un de ceux qui préoccupe depuis longtemps exploitants et constructeurs. Certains côtés de la question furent entre autres traités au cours de la réunion de l'ASE du premier mai 1937 à Berne (Bull. ASE 1937, No. 22).

Il s'agit-là d'un problème fort délicat, preuve en soit le nombre restreint d'installations de télérégage qui ont été réalisées, en particulier par l'application du système fréquence-puissance, pourtant déjà préconisé depuis plusieurs années. Il est à la fois du ressort du constructeur électricien et du constructeur mécanicien, puisque c'est finalement à chacun des régulateurs automatiques de vitesse des machines motrices des groupes électrogènes qu'il faut avoir recours.

Dans cet article, les auteurs exposent la solution qui fut obtenue par la collaboration d'un constructeur électricien, A.-G. Brown, Boveri & Cie et d'un constructeur mécanicien, les Ateliers des Charmilles S. A. Ils rappellent le principe du réglage fréquence-puissance, la façon particulière dont ils le mirent en œuvre, les détails de réalisation de l'équipement électro-mécanique de réglage fréquence-puissance Brown Boveri-Charmilles les avantages qui s'y attachent et les possibilités d'applications offertes, enfin les résultats d'essais industriels.

Das Problem der Fernregulierung der Leistung, die zwischen zusammengeschlossenen Netzen durch eine oder mehrere Verbindungsleitungen übertragen wird, beschäftigt seit längerer Zeit die Betriebsleute und die Konstrukteure. Gewisse Fragen aus diesem Gebiet wurden u. a. an der Diskussionsversammlung des SEV vom 1. Mai 1937 in Bern behandelt (Bull. SEV 1937, Nr. 22).

Dass es sich dabei um ein sehr heikles Problem handelt, geht aus der Tatsache hervor, dass trotz der relativ grossen Zahl von vorhandenen Fernmessenrichtungen nur wenige Fernregulierungen ausgeführt wurden, die zudem nur als reine Leistungsregulierungen arbeiten und nicht auf Grund des seit mehreren Jahren als vorteilhaft erkannten Frequenz-Leistungsgesetzes ausgebaut sind. Das Problem stellt dem Elektro- wie dem Turbinenkonstrukteur neue Aufgaben, weil damit erstmals elektrische Grössen direkt auf den mechanischen Turbinenregler einwirken.

In der vorliegenden Arbeit wird eine Lösung beschrieben, die sich aus der Zusammenarbeit der Firmen A.-G. Brown, Boveri & Cie. und Ateliers des Charmilles S. A. ergeben hat. Die Verfasser erläutern das Prinzip der Frequenz-Leistungsregulierung und zeigen dann die besondere Art, nach welcher dieses Prinzip bei der Frequenz-Leistungsregulierung nach System Brown Boveri-Charmilles angewendet wurde, die Vorteile, die sich daraus ergeben, sowie die unabhängig vom Fernmessen bestehende Anwendungsmöglichkeiten und die Betriebsergebnisse.

### 1° Introduction

Il est un fait indiscuté, connu déjà depuis longtemps par tous les exploitants, à savoir que pour assurer le réglage stable<sup>1)</sup> de la répartition de la puissance produite par deux groupes électrogènes alternatifs<sup>2)</sup> marchant en parallèle, il est nécessaire que le réglage de vitesse de l'un au moins de ces groupes soit doté d'une loi vitesse-puissance ou loi fréquence-puissance, ou encore loi de statisme, établissant une relation bien définie entre la puissance produite par le groupe et sa vitesse de régime.

Ce n'est que beaucoup plus récemment que s'est imposée l'idée que pour assurer le réglage stable

<sup>1)</sup> Nous entendons par réglage stable de la répartition de la puissance produite par les deux groupes, celui assurant le partage bien déterminé et sans oscillations, de la puissance à fournir pour satisfaire à une consommation supposée constante. Il va sans dire que si la valeur de cette consommation change, les puissances produites par l'un et l'autre groupe changeront également et même la proportion entre ces puissances peut aussi en être modifiée. Le réglage de la répartition restera néanmoins stable, pour le nouveau régime, si cette proportion est encore bien déterminée.

<sup>2)</sup> Chacun des groupes étant par lui-même stable en fonctionnement isolé.

de la puissance d'échange passant par une interconnexion entre deux réseaux, comportant chacun un ensemble de groupes producteurs et un ensemble d'appareils de consommation, il était nécessaire que le réglage de vitesse de l'un au moins des réseaux soit doté d'une loi de statisme fréquence-puissance, établissant une relation bien définie entre la puissance d'échange et la fréquence de régime.

Dans ces deux cas, la préoccupation première est pourtant bien la même: la stabilité; mais malgré cela le réglage fréquence-puissance d'une interconnexion ou de plusieurs interconnexions, n'a pas encore reçu de nombreuses applications. Nous devons même ajouter qu'il est encore discuté et qu'il n'apparaît pas à tous les intéressés comme la solution idéale qu'elle est cependant à nos yeux d'une façon indubitable.

La cause en est peut-être une compréhension insuffisamment claire et sûre de son fonctionnement ou la crainte de complications dans le jeu du réglage fréquence-puissance, combiné à celui du réglage de fréquence de chacun des réseaux et celui de la répartition de la charge entre les groupes producteurs des dits réseaux. Ces craintes sont

d'ailleurs en partie motivées par la superposition de réglages primaires et de réglages secondaires qu'utilisent certains systèmes actuellement en exploitation.

Nous estimons, au contraire, que le réglage fréquence-puissance convenablement mis en œuvre, permet d'aboutir aux solutions les plus simples et les plus claires, par conséquent les plus sûres, des problèmes posés, à condition que l'on veuille bien se débarrasser de l'idée du recours à cette superposition de réglages primaires et secondaires qui constitue, en effet, tout au plus un pis-aller, mais non une véritable solution d'avenir.

Nous tenons en débutant à rendre ici hommage aux précurseurs qu'ont été, en Allemagne, Osanna et Graner, puis à J. Fallou, G. Darrieus et P. Aillet qui furent, en France, les véritables promoteurs du réglage fréquence-puissance. Nous souhaitons pouvoir montrer, par la présente étude, comment donnant suite aux idées qu'ils ont émises et en les perfectionnant encore, nous avons réussi, avec les moyens techniques de nos Sociétés, à mettre au point le système de réglage fréquence-puissance Brown Boveri-Charmilles et grâce à l'amabilité compréhensive d'un de nos clients, l'Energie de l'Ouest-Suisse, à en assurer les essais industriels.

Nous rappellerons tout d'abord les principes qui nous ont guidés et espérons que nos lecteurs trouveront dans notre exposé les notions qui leur feront apparaître la simplicité de ce système de réglage, simplicité qui est le vrai critère d'une bonne solution et lui assure une adaptation facile à tous les problèmes que l'on peut avoir à envisager.

## 2° Du principe du réglage fréquence-puissance d'une interconnexion introduit par comparaison avec la marche en parallèle de deux groupes électrogènes alternatifs

Nous avons déjà rappelé que, lorsque deux groupes électrogènes fonctionnent en parallèle, la stabilité de la répartition de la puissance produite par chacun exige que le réglage de la vitesse de l'un d'entre eux au moins soit doté d'une loi de statisme vitesse-puissance. Si le réglage des deux groupes s'effectue selon une telle loi, la fréquence est alors une fonction décroissante de la puissance consommée que l'ensemble des deux groupes est appelé à fournir. Quand on désire que la fréquence soit rigoureusement maintenue à sa valeur de consigne, le réglage d'un seul des deux groupes doit, en principe, en être chargé, car si l'on procédait au réglage des deux groupes selon une caractéristique isodrome (vitesse constante indépendamment de la puissance produite), la part de la puissance totale fournie par chacun des groupes serait indéterminée et, par conséquent, instable. Le groupe chargé du réglage à fréquence constante, ajuste seul la puissance à produire — par modification de celle qu'il produit lui-même — en fonction de la charge consommée, essentiellement variable.

Il nous paraît inutile d'insister sur ces considérations parfaitement connues de tous et, nous le

répétons, indiscutées. Nous rappellerons encore seulement que la loi de statisme, selon laquelle la puissance produite par le groupe est une fonction linéaire<sup>3)</sup> définie de sa vitesse de régime, est couramment réalisée par un mécanisme d'asservissement établissant une liaison entre l'ouverture du vannage de la turbine (c'est-à-dire la valeur de la puissance qu'elle produit) et le mouvement du tiroir de distribution d'huile sous pression au servomoteur de son régulateur.

Pour procéder à la transposition de ces principes directeurs sur le plan du réglage fréquence-puissance d'une puissance d'échange transmise par une interconnexion entre les réseaux *A* et *B*, nous ferons le raisonnement suivant, toujours basé sur l'examen du fonctionnement en parallèle de deux groupes électrogènes *I* et *II*. Sans rien changer à l'état de choses ci-dessus exposé, nous pouvons imaginer, par la pensée, que c'est le groupe *II* qui alimente le réseau de consommation. Le groupe *I* lui apporte une aide sous forme d'une puissance d'échange positive  $P_{I\ II} > 0$ , qui est transmise par les barres du groupe *I* vers le groupe *II*, le départ de ligne vers le réseau *B* étant branché à l'aval du groupe *II* (voir fig. 1).

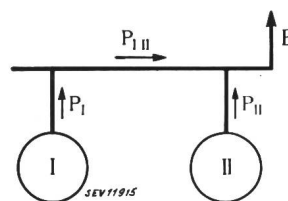


Fig. 1.  
Fonctionnement  
en parallèle de deux groupes  
*I* et *II* sur un réseau de  
consommation *B*

L'application des règles ci-dessus rappelées conduit alors à dire que chacun des groupes étant stable par lui-même, la stabilité du fonctionnement de l'ensemble exige:

que le réglage de l'un des groupes, le groupe *II*, soit le seul qui soit effectué à fréquence constante,

que le réglage du groupe *I* soit doté d'une loi de statisme vitesse-puissance établissant une relation bien déterminée entre la puissance qu'il produit et la fréquence.

Le groupe *II* est alors le *chef d'orchestre* du réseau et pour maintenir la fréquence à sa valeur de consigne, il subvient seul aux variations de la puissance à produire en fonction de celles de la charge consommée.

Le groupe *I* contribue à la production de la puissance nécessaire à l'alimentation du réseau, ceci toutefois par une *participation* en valeur absolue *constante*, du moins tant que la fréquence *f*, que le groupe *II* a charge de régler, demeure correctement égale à sa valeur de consigne  $f_0$ . En effet, du fait de la loi vitesse-puissance ou loi de statisme<sup>4)</sup> réalisée par le mécanisme d'asservissement de son régulateur:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = -\delta_I \frac{\Delta P_I}{P_{I\ max}}$$

une variation  $\Delta P_I$  de la puissance fournie par le

<sup>3)</sup> Tout au moins pratiquement linéaire.

<sup>4)</sup> La valeur du coefficient  $\delta_I$  définit la valeur du statisme du régulateur du groupe *I*, celui du groupe *II* étant nul  $\delta_{II} = 0$  (réglage isodrome).

groupe *I* ne peut automatiquement intervenir que s'il se produit une variation  $\Delta f$  de fréquence. Le réglage du groupe *I* est dès lors stable.

Si le réglage de fréquence effectué par le groupe *II* est momentanément défaillant, le groupe *I* lui vient en aide, en ce sens:

que lorsque la fréquence décroît, parce que le réglage du groupe *II* n'a pas suffisamment augmenté la puissance produite par ce groupe, en face d'une consommation accrue de la part du réseau, le groupe *I* augmente sa participation,  $P_{I II} > P_{I II_0}$ ,

que lorsque la fréquence croît, parce que le réglage du groupe *II* n'a pas suffisamment diminué la puissance produite par ce groupe, en face d'une consommation réduite de la part du réseau, le groupe *I* diminue sa participation,  $P_{I II} < P_{I II_0}$ .

L'importance de cette aide du groupe *I*, par modification de sa participation à la production de puissance, est caractérisée par la grandeur  $K_I$ :

$$K_I = \frac{1}{\delta_I} \frac{P_{I \max}}{f_0}$$

grâce à l'emploi de laquelle l'équation ci-dessus rappelée de la loi de statisme peut se mettre sous la forme:

$$\frac{\Delta P_I}{\Delta f} = -K_I$$

Il s'agit d'une grandeur homogène à une énergie, dite *énergie réglante*. Elle correspond avec les unités courantes:

$\Delta P_I$  mesuré en kW     $\Delta f$  mesuré en pér./s

au nombre de kW dont le groupe *I* modifie sa puissance pour une variation de la fréquence égale à une pér./s.

La valeur de l'énergie réglante du groupe *I* est d'autant plus grande:

que la puissance maximum  $P_{I \max}$  de ce groupe est de valeur élevée,

que le statisme  $\delta_I$  de son régulateur est réduit.

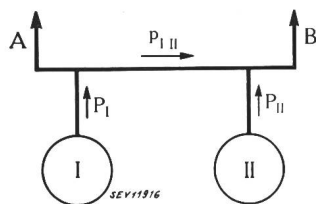


Fig. 2.  
Fonctionnement  
en parallèle de deux groupes  
*I* et *II* sur deux réseaux de  
consommation *A* et *B*

Faisons maintenant un pas de plus et supposons (voir fig. 2) qu'il existe, sur les barres omnibus reliant les groupes *I* et *II*, un second départ de ligne, cette fois à l'amont du groupe *I*, alimentant un autre réseau *A*. Si les régulateurs des groupes *I* et *II* conservent respectivement leurs caractéristiques ci-dessus définies:

réglage à fréquence constante, sans statisme, pour le groupe *II*,

réglage selon une loi vitesse-puissance, avec statisme, pour le groupe *I*,

le processus du réglage demeurera le même, autrement dit, le groupe *II* restera le chef d'orchestre de l'ensemble des deux réseaux *A* et *B* et subviendra seul aux variations de la charge consommée, tandis que le groupe *I* continuera à fournir une partici-

pation constante à la production de puissance, ceci du moins tant que la fréquence sera correctement réglée par le groupe *II* à sa valeur de consigne  $f_0$ .

Mais faisons l'hypothèse que l'on veuille soulagier le groupe *II* dans son rôle de chef d'orchestre des réseaux *A* et *B* (rôle qui dans la pratique correspond au service le plus dur) et que pour cela on convienne de confier au groupe *II* le réglage de fréquence du réseau *B*, puis au groupe *I* celui du réseau *A*. Une première solution consiste évidemment à lever les sectionneurs des barres omnibus entre les groupes *I* et *II*, pour les rendre indépendants l'un de l'autre (fréquences différentes sur les deux réseaux); ceci nous conduirait toutefois à priver le groupe *II* de la participation, que lui assurait auparavant le groupe *I*, en vue de la production de la puissance nécessaire au réseau *B*.

Nous conviendrons qu'il faille maintenir cette participation et laisser par conséquent l'ensemble interconnecté en parallèle. L'application des règles précédemment exposées fait immédiatement ressortir la solution à adopter, pour le réglage de la puissance  $P_I$  du groupe *I*, composée de celle  $P_A$  absorbée par le réseau *A* et de celle  $P_{I II}$  débitée sur le groupe *II*:

$$P_I = P_A + P_{I II}$$

1° Le groupe *I*, devant assurer le réglage à fréquence constante du réseau *A*, son réglage devra être effectué *sans statisme* (réglage isodrome) *par rapport à la part*  $P_A$  (consommée par le réseau *A*) de la puissance totale  $P_I$  qu'il produit, de la même façon que le groupe *II* est réglé sans statisme par rapport à sa puissance  $P_{I II}$ .

2° Le groupe *I* devant apporter une contribution  $p_{I II}$ , de valeur de consigne  $p_{I II_0}$ , bien déterminée pour  $f = f_0$ , à la production de puissance qui est nécessaire au réseau *B* et à laquelle participe le groupe *II*, le réglage du groupe *I* devra, *pour être stable*, être effectué *avec statisme*, c'est-à-dire selon une loi vitesse-puissance, *par rapport à la valeur instantanée*  $p_{I II}$  de cette puissance de contribution ou puissance d'échange.

Le seul changement, ainsi apporté au réglage du groupe *I*, est qu'au lieu de l'asservir à la valeur totale  $P_I$  de la puissance qu'il fournit, ce réglage n'est plus asservi qu'à la puissance partielle  $p_{I II}$ , que le groupe *I* débite sur le groupe *II*.

La loi de statisme:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = -\delta_I \frac{\Delta P_I}{P_{I \max}} \quad \text{ou} \quad \frac{\Delta P_I}{\Delta f} = -K_I$$

où apparaissait un statisme de groupe  $\delta_I$  et une énergie réglante de groupe  $K_I$  est remplacée par celle:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = -\delta_{II} \frac{\Delta p_{I II}}{P_{I \max}} \quad \text{ou} \quad \frac{\Delta p_{I II}}{\Delta f} = -K_{II}$$

où apparaît un statisme d'interconnexion  $\delta_{II}$  et une énergie réglante d'interconnexion  $K_{II}$ .

Le groupe *I* est alors doté d'un *réglage fréquence-puissance* de son interconnexion avec le groupe *II*.



Il suffit maintenant d'imaginer (voir fig. 3) que les groupes *I* et *II* ne sont plus dans la même centrale, mais l'un, le groupe *I*, parmi d'autres au milieu du réseau *A*, l'autre, le groupe *II*, également

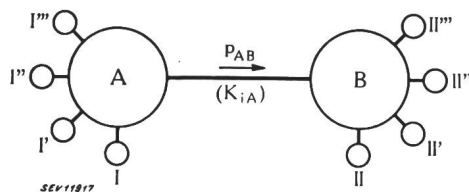


Fig. 3.

Interconnexion entre deux réseaux *A* et *B* comportant chacun plusieurs groupes producteurs:  
*I*, *I'*, *I''*, etc. . . et *II*, *II'*, *II''*, *III''*, etc.

parmi d'autres au milieu du réseau *B*, pour réaliser le schéma du réglage fréquence-puissance, par le groupe *I*, de l'interconnexion entre les réseaux *A* et *B*. Le groupe *II* reste le chef d'orchestre du réseau *B* et le groupe *I* celui du réseau *A*. La puissance d'échange  $p_{AB}$  (au lieu de  $p_{I II}$ ) transmise par l'interconnexion est fournie par le groupe *I* aidé ou non des autres groupes producteurs du réseau *A*. C'est d'après cette puissance  $p_{AB}$  qu'est réalisée la loi fréquence-puissance:

$$\frac{\Delta p_{AB}}{\Delta f} = -K_{IA}$$

du régulateur du groupe *I* et comme la dite puissance ne peut être mesurée qu'au point d'interconnexion, elle est transmise par télémessure jusqu'au régulateur, pour commander son asservissement de la même manière que celui-ci est habituellement commandé en fonction de la puissance totale  $P_I$  (ouverture du vannage) fournie par le groupe, c'est-à-dire d'une façon *directe et continue*.

### 3° Du schéma d'un régulateur automatique de vitesse équipé du dispositif de réglage fréquence-puissance Brown Boveri-Charmillès

Le réglage fréquence-puissance, tel que nous venons de le décrire, est celui que réalise le système Brown Boveri-Charmillès. Il diffère de celui que certains promoteurs du réglage fréquence-puissance avaient envisagé, selon un système qui conservait au régulateur un statisme de groupe, c'est-à-dire un asservissement à la puissance totale fournie par ce groupe, avec superposition d'un régulateur secondaire chargé (par action discontinue sur le dispositif de changement de vitesse) de corriger plus ou moins correctement le jeu de cet asservissement en vue de réaliser la loi:

$$\frac{\Delta p_{AB}}{\Delta f} = -K_i$$

Le réglage fréquence-puissance Brown Boveri-Charmillès est au contraire caractérisé:

- par l'absence de statisme de groupe, le régulateur n'étant pas asservi à la puissance totale fournie par le groupe considéré,
- par la commande directe et continue de l'asservissement du régulateur en fonction de la valeur instantanée de la puis-

sance d'échange transmise par l'interconnexion, ceci de manière à réaliser la loi fréquence-puissance:

$$\frac{\Delta p_{AB}}{\Delta f} = -K_i$$

Ainsi qu'il ressort de la description ci-après, la commande de cet asservissement fait appel à un relais (voire à plusieurs montés en cascade) à pression d'huile, si bien qu'on pourrait, à cet égard, la qualifier de commande indirecte. Toutefois, ce relais est, comme nous l'expliquerons plus loin, asservi (servomoteur auxiliaire *s*) de sorte que le système présente bien le caractère d'une commande:

- directe:** parce que les déplacements du mécanisme d'asservissement sont proportionnels à la valeur instantanée de l'écart entre puissance réelle et puissance de consigne à l'interconnexion,
- continue:** parce que le mouvement du mécanisme d'asservissement s'amorce pour le moindre écart de puissance et ne s'arrête que lorsque la position du dit mécanisme correspond à telle valeur bien déterminée de l'écart entre puissance réelle et puissance de consigne à l'interconnexion.

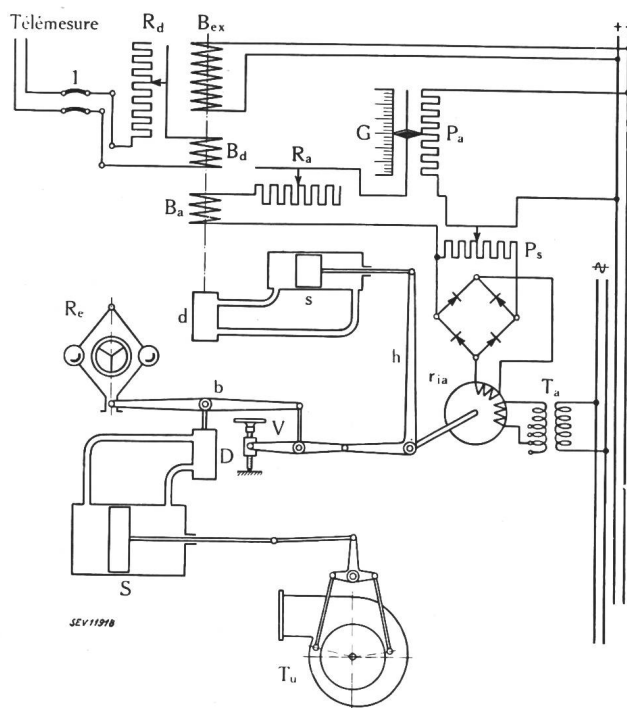


Fig. 4.

Schéma d'un régulateur automatique de vitesse, équipé du dispositif de réglage fréquence-puissance Brown Boveri-Charmillès

Fonctionnement en réglage fréquence-puissance avec asservissement à la puissance d'échange

La fig. 4 donne le schéma de principe de l'équipement d'un régulateur automatique de vitesse, en vue du réglage fréquence-puissance selon ce système.

$R_c$  est le régleur <sup>5)</sup> du régulateur, régleur unique d'ailleurs, car il n'y a ici ni régulateur primaire, ni régulateur secondaire. Il attaque l'une des extrémités du balancier *b* de commande du tiroir de distribution *D* du servomoteur principal *S*, chargé

<sup>5)</sup> Régleur tachymétrique ou mieux accéléro-tachymétrique.

de la manœuvre du vannage. L'autre extrémité du balancier  $b$  est actionnée:

d'une part par le dispositif de changement de vitesse  $V$  lequel, une fois la mise en parallèle effectuée, demeure en position invariable et n'intervient donc pas,

d'autre part par le mécanisme d'asservissement, schématisé par le levier  $h$ , lequel au lieu d'être relié au servo-moteur du vannage, selon le mode habituel, est commandé par un servo-moteur auxiliaire  $s$ , dont le piston occupe une position bien déterminée pour chaque valeur de la puissance mesurée à l'interconnexion.

A cet effet, le tiroir de distribution  $d$  de ce servomoteur auxiliaire  $s$  est actionné par un relais électro-magnétique, comportant en principe trois enroulements distincts:

1° tout d'abord une bobine d'excitation  $B_{ex}$  branchée sur une source de courant continu et ayant pour but de réaliser un système amplificateur d'effet;

2° une bobine détectrice  $B_d$  recevant le courant milliampèremétrique du récepteur de la télémesure. Le relais est sensible à une variation de courant inférieure à 0,1 milliampère, dans le circuit de la bobine détectrice;

3° une bobine d'asservissement  $B_a$  dont l'effet, s'opposant à celui de la bobine détectrice  $B_d$ , doit, en remplaçant le tiroir de distribution  $d$  dans sa position moyenne, arrêter le mouvement du piston du servomoteur auxiliaire  $s$ , lorsque la course du dit piston correspond bien à telle valeur de la puissance d'échange, c'est-à-dire à telle valeur du courant milliampèremétrique dans la bobine détectrice  $B_d^*$ .

Dans ce but, l'intensité du courant traversant la bobine  $B_a$  est fonction du déplacement du mécanisme d'asservissement, auquel est attelé le régulateur d'induction  $r_{ia}$ . Celui-ci est, en effet, alimenté par le transformateur  $T_a$  et il est branché, au travers d'un redresseur, sur un potentiomètre  $P_s$ , lui-même inséré dans le circuit de la bobine  $B_a$ .

Un autre potentiomètre  $P_a$ , monté en opposition avec le précédent  $P_s$ , sert à régler l'intensité du courant dans la bobine  $B_a$ , ou ce qui revient au même dans la bobine  $B_d$ , pour la position moyenne du mécanisme d'asservissement, tout le système étant par ailleurs en équilibre. Autrement dit, le potentiomètre  $P_a$  permet d'ajuster la valeur de consigne de la puissance d'échange à transmettre par l'interconnexion, lorsque la fréquence  $f$  est égale à sa valeur de consigne  $f_o$ . L'échelle  $G$  du potentiomètre  $P_a$  est donc graduée en kW.

Selon la position du curseur du potentiomètre  $P_s$ , telle course du mécanisme d'asservissement, attelé au régulateur d'induction  $r_{ia}$ , entraîne une variation plus ou moins grande du courant dans la bobine  $B_a$ . Autrement dit, à telle variation de fréquence correspond une variation plus ou moins grande de la valeur de la puissance d'échange. En conséquence, le potentiomètre  $P_s$  permet de régler le statisme de la loi fréquence-puissance, ou plus exactement la valeur de l'énergie réglante  $K_i$ :

$$\frac{\Delta p_{AB}}{\Delta f} = -K_i$$

\*) La première bobine est fixe, tandis que les deux autres sont montées sur l'équipage mobile du relais électromagnétique.

La résistance ohmique de la bobine détectrice  $B_d$  est telle qu'elle peut, sans inconvénient pour le wattmètre du récepteur de la télémesure, être insérée en série dans son circuit. La télémesure peut donc être utilisée à la fois pour la lecture ou l'enregistrement de la puissance d'échange transmise par l'interconnexion et pour son télé réglage fréquence-puissance. Il s'agit-là d'un avantage certain, auquel s'ajoute les deux autres suivants:

1° la télémesure n'est employée que pour la mesure de la puissance d'échange et non pour celle de la fréquence dont la valeur est détectée par le régleur, sur le groupe lui-même, ce qui est à la fois plus rationnel et plus sûr,

2° le réglage de la valeur de consigne de la puissance d'échange s'effectue à la centrale, ainsi qu'expliqué plus haut par la manœuvre du curseur du potentiomètre  $P_a$  dont l'échelle est graduée en kW. Ce procédé nous paraît le plus logique, car la direction de l'exploitation de la centrale doit être avertie du programme de fourniture d'énergie à observer, selon les heures de la journée, et c'est à elle qu'il revient de prendre, en conséquence, les mesures utiles, en procédant, entre autres, à la mise en service du nombre de groupes voulu.

Toutefois, si, pour des raisons spéciales, on désirait que le réglage de la puissance d'échange soit effectué, non pas à la centrale, mais au poste de couplage où a lieu l'interconnexion, ce système peut sans difficulté répondre à cette exigence. Il faut alors que l'indication transmise par la télémesure corresponde, non plus à la valeur de la puissance d'échange, mais à l'écart entre la valeur instantanée de cette puissance et sa valeur de consigne. Dans ces conditions, la télémesure ne peut plus être employée pour la lecture à la centrale de la puissance d'échange, ce qui constitue un inconvénient. Le curseur du potentiomètre  $P_a$  doit en outre être ramené à l'origine de son échelle graduée, c'est-à-dire au point zéro, et il ne doit plus être manœuvré, sauf si l'on veut intentionnellement fausser les ordres transmis, du poste de couplage, par la télémesure.

#### 4° Des autres possibilités de l'équipement de réglage fréquence-puissance Brown Boveri-Char-milles

Le relais électro-magnétique de commande du tiroir de distribution  $d$  du servomoteur auxiliaire  $s$  peut aussi être utilisé, en vue de commander le mécanisme d'asservissement du régulateur en fonction de la puissance totale fournie par le groupe, c'est-à-dire pour réaliser un statisme de groupe du réglage avec asservissement ordinaire.

Dans ce but, il suffit de déconnecter la bobine détectrice  $B_d$  du récepteur de la télémesure et de la brancher sur un circuit émetteur dont l'intensité du courant mesure la puissance fournie par le groupe. Cette mesure peut être effectuée soit à partir des kW débités aux bornes de l'alternateur, soit à partir du degré d'ouverture de la turbine.

C'est ce dernier procédé qu'illustre le schéma de la fig. 5, selon lequel le circuit émetteur, branché sur la bobine détectrice  $B_d$ , comporte:

un régulateur d'induction  $r_{ie}$ , alimenté par le transformateur  $T_e$  et actionné par le mouvement du vannage,

un redresseur par l'intermédiaire duquel le secondaire du régulateur d'induction  $r_{ie}$  est relié au potentiomètre  $P_e$ , lui-même connecté à la bobine détectrice  $B_d$ .

Le fonctionnement du régulateur est alors le même qu'avec l'asservissement mécanique habituel. D'une façon analogue à ce qui était précédemment le cas (cas du réglage fréquence-puissance), le potentiomètre  $P_a$  sert à ajuster la valeur de la puis-

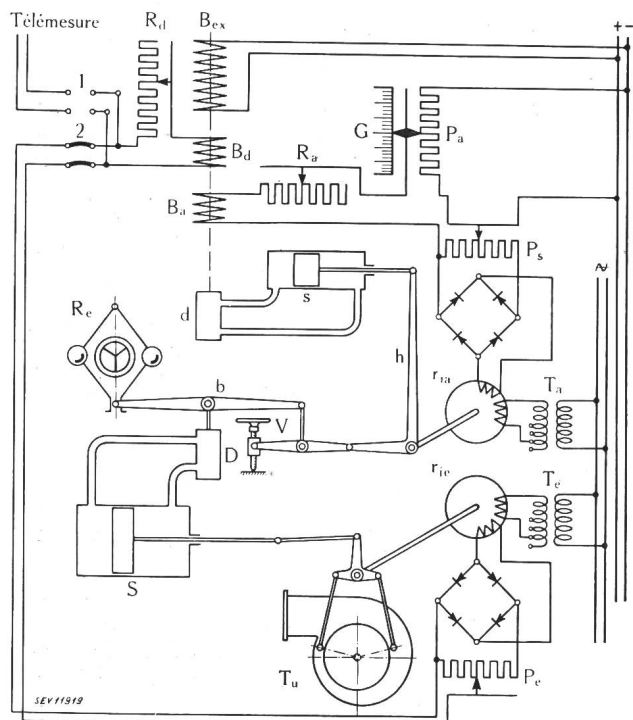


Fig. 5.

Schéma d'un régulateur automatique de vitesse équipé du dispositif de réglage fréquence-puissance Brown Boveri-Charmillès

Fonctionnement en réglage ordinaire avec asservissement à la puissance totale du groupe considéré.

sance que le groupe doit développer lorsque la fréquence  $f$  est égale à sa valeur de consigne  $f_0$ ; autrement dit, le potentiomètre  $P_a$  peut être utilisé comme le dispositif de changement de vitesse d'un régulateur ordinaire. Quant au potentiomètre  $P_s$ , il peut encore être employé pour régler la valeur du statisme, en d'autres termes la valeur de l'énergie réglante:

$$\frac{\Delta P_I}{\Delta f} = -K_I$$

Le circuit émetteur  $T_e$ ,  $r_{ie}$ ,  $P_e$  du régulateur d'un groupe pilote, généralement celui du groupe chef d'orchestre, permet enfin de gouverner, d'une manière continue, le réglage d'un ou plusieurs groupes pilotés, en fonction de la puissance développée par le groupe pilote. A cet effet, le relais électromagnétique est pourvu d'un quatrième enroulement, celui d'une bobine de pilotage  $B_p$ , et les connexions à réaliser sont alors celles du schéma de la fig. 6.

Le régulateur du groupe piloté est tout d'abord doté d'un asservissement ordinaire, ceci comme expliqué plus haut, en branchant sur son propre circuit  $T_e$ ,  $r_{ie}$ ,  $P_e$  de mesure de la puissance qu'il développe, la bobine détectrice  $B_d$ . La bobine de pilotage  $B_p$  est en outre connectée au circuit  $T_e$ ,  $r_{ie}$ ,  $P_e$  de mesure de la puissance produite par le groupe pilote.

L'effet de la bobine de pilotage  $B_p$  s'ajoute maintenant à celui de la bobine d'asservissement  $B_d$  pour compenser celui de la bobine détectrice  $B_d$ . Autrement dit, une variation d'intensité du courant traversant la bobine de pilotage  $B_p$  agit comme la

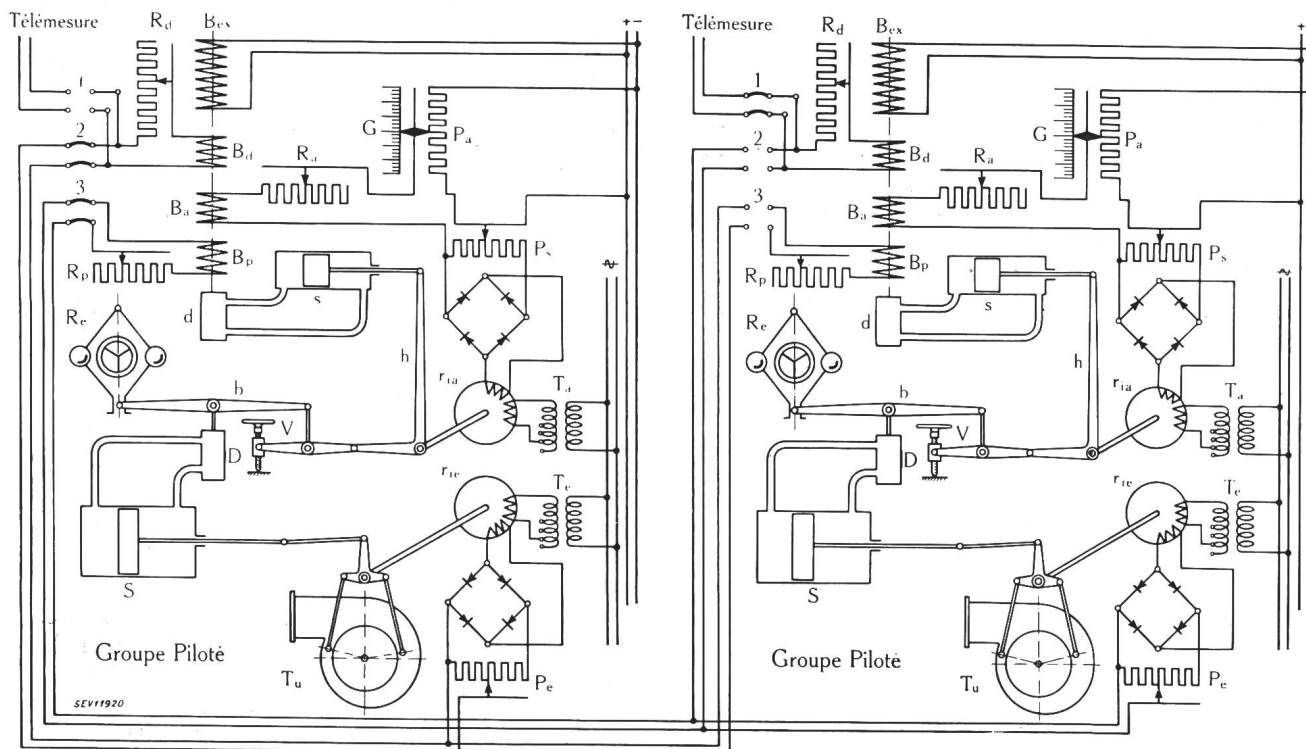


Fig. 6.

Schéma de deux régulateurs automatiques de vitesse, équipés de dispositifs de réglage fréquence-puissance Brown Boveri-Charmillès

Fonctionnement d'un groupe piloté en réglage gouverné selon puissance produite par un groupe pilote

conséquence d'une manœuvre du potentiomètre  $P_a$  et provoque donc une modification de la valeur de consigne de la puissance à fournir par le groupe piloté. L'action de la bobine de pilotage  $B_p$  étant fonction de la puissance produite par le groupe pilote, le réglage du groupe piloté est bien gouverné par le réglage du groupe pilote et ainsi se trouve résolu le problème de la répartition des charges selon un mode *rapide et continu*.

Un équipement de réglage fréquence-puissance Brown Boveri-Charmilles peut donc, par une simple commutation de circuits, servir à trois fins:

Réglage fréquence-puissance, avec asservissement à la puissance d'échange.

Réglage ordinaire, avec asservissement à la puissance totale du groupe considéré.

Pilotage du réglage d'un ou plusieurs groupes en fonction de la puissance développée par un groupe pilote, chef d'orchestre.

### 5° Du maintien de la fréquence en réglage fréquence-puissance

#### Partage du rôle de chef d'orchestre

Le rôle du groupe chef d'orchestre, chargé du maintien de la fréquence d'un réseau, est certainement un des plus délicats à assurer. Son régulateur peut bien, en effet, comme expliqué au paragraphe précédent, piloter le réglage d'autres groupes de la même centrale ou du même réseau pour bénéficier de leur part d'une aide dans les variations de puissance à produire; mais ce régulateur reste néanmoins seul à ajuster les dites variations de puissance en fonction de la charge consommée. En réglage automatique, il ne peut pas y avoir plusieurs groupes chefs d'orchestre dans un même réseau.

Si donc l'on doit envisager de confier à un groupe le rôle de chef d'orchestre d'un réseau, il faut éviter de l'étendre à plusieurs réseaux interconnectés, ce qui rendrait son service encore plus difficile. Or, le réglage fréquence-puissance permet précisément de laisser à chaque réseau, par les soins de son groupe chef d'orchestre, la charge de maintenir la fréquence en face des variations de sa propre consommation.

Nous ferons ici abstraction des régimes transitoires de courte durée, consécutifs à de brusques variations de charge sur l'un ou l'autre des réseaux, régimes pendant lesquels l'effet du jeu des régulateurs n'étant pas entièrement accompli, les impédances électriques d'une part et les inerties mécaniques d'autre part, interviennent dans la répartition des puissances. Mais réserve faite de cette question, le réglage fréquence-puissance *oblige chacun des réseaux à pourvoir lui-même aux variations de charge de sa consommation*.

Une variation de la consommation du réseau  $B$  (voir fig. 3) est satisfaite par le réglage de son chef d'orchestre: le groupe  $II$ . Ce réglage étant, en effet, assuré selon le mode isodrome, le groupe chef d'orchestre subvient seul, sans modification de la fréquence, aux variations de la puissance consommée dans le réseau  $B$ , tandis que le groupe  $I$ , dont le réglage est effectué selon une loi fréquence-puissance, avec statisme par rapport à la puissance

$p_{AB}$  transmise par l'interconnexion, ne peut participer à ces variations que s'il se produit momentanément une variation de fréquence.

Réciproquement, une variation de la consommation du réseau  $A$  est satisfaite par le réglage de son groupe chef d'orchestre: le groupe  $I$ .

Comme exposé au paragraphe 3, la loi fréquence-puissance est réalisée, selon le nouveau système, par la commande du mécanisme d'asservissement du régulateur, en fonction de la valeur de la puissance transmise par l'interconnexion. C'est dire que ce mécanisme d'asservissement, comme le dispositif de changement de vitesse qu'il comporte, ne doivent être actionnés par aucun autre organe, en fonction d'aucune autre grandeur.

Le régulateur du groupe chef d'orchestre doit donc être susceptible d'assurer un réglage isodrome stable par le seul jeu de son régleur tachymétrique ou accéléro-tachymétrique, du type mécanique ou du type électrique. Ce résultat peut être obtenu d'une manière satisfaisante<sup>6)</sup> par un régulateur automatique de vitesse moderne de qualité.

Certains systèmes de réglage de la fréquence font usage de régulateurs tachymétriques munis:

d'un asservissement momentané (par dash-pot) créant un statisme temporaire important, nécessaire à leur stabilité, mais qui disparaît progressivement dans le temps,

d'un asservissement permanent, donnant lieu à un statisme de valeur appréciable, qui subsiste une fois le statisme temporaire évanoui et qui rend nécessaire la présence:

d'un régulateur secondaire de fréquence agissant par impulsions discontinues sur le dispositif de changement de vitesse du mécanisme d'asservissement, en vue de faire à son tour disparaître l'effet du statisme permanent.

Cette façon d'atteindre en trois étapes la caractéristique isodrome d'un réglage sans asservissement, est à proscrire pour l'emploi du réglage fréquence-puissance, selon le nouveau système, dans lequel le mécanisme d'asservissement doit, nous le répétons, ne pas être utilisé par un régulateur secondaire de fréquence.

L'appel à un régulateur secondaire de fréquence ne constitue d'ailleurs, à notre avis, qu'un pis-aller, qui n'est tout au plus à envisager que pour des régulateurs automatiques de vitesse surannés. Nous ajoutons même que si un tel régulateur est instable quand il fonctionne sans asservissement permanent, il restera instable si l'on maintient apparemment le dit asservissement, mais que l'on charge un régulateur secondaire de fréquence d'en annuler les effets. Tout ce que l'on aura gagné en recourant à un régulateur secondaire de fréquence à action lente et discontinue, c'est de ralentir les manifestations de l'instabilité, sans toutefois les supprimer.

Un régulateur automatique de vitesse moderne de qualité doit être en mesure d'assurer lui-même le réglage de la fréquence, sans le secours d'aucun régulateur secondaire. Si la chose nous paraît possible avec un bon régulateur tachymétrique qui ne peut pourtant pas se passer d'un asservissement momentané, elle est naturellement encore bien mieux réalisable avec un régulateur accéléro-tachy-

<sup>6)</sup> Pour un groupe hydro-électrique, sous réserve cependant des conditions hydrauliques de son installation et d'un  $GD^2$  suffisant son rotor.



métrique pour la stabilité duquel aucun asservissement n'est nécessaire.

#### 6° De la stabilité du réglage de la puissance d'échange

Les contrats d'échange d'énergie entre exploitants tendent actuellement à prédéterminer la valeur de la puissance livrée par un réseau à un autre, au moyen d'une interconnexion, dans des limites aussi serrées que possible. Cette valeur de la puissance d'échange doit en outre pouvoir être modifiée selon les heures d'une journée.

Le réglage fréquence-puissance du nouveau système assure le maintien parfaitement stable de la puissance d'échange et permet également d'en modifier rapidement la valeur à l'aide d'une manœuvre des plus simples, celle du curseur du potentiomètre  $P_a$  dont il a été question au paragraphe 3. Nous voudrions insister ici sur les raisons du fonctionnement stable du réglage fréquence-puissance selon ce système.

Si l'on considère un groupe fonctionnant en parallèle avec d'autres, on sait qu'une action sur son mécanisme d'asservissement, ou sur le dispositif de changement de vitesse que ce mécanisme comporte, produit une modification de la puissance fournie par ce groupe. En d'autres termes, cette action tend bien à changer la vitesse du groupe, mais elle provoque en réalité un changement de sa puissance.

On peut donc dire qu'agir sur le mécanisme d'asservissement du régulateur de vitesse d'un groupe fonctionnant en parallèle avec d'autres, pour ajuster à une valeur déterminée la puissance produite par ce groupe, c'est régler sa vitesse pour maintenir en principe constante la puissance qu'il fournit. Ce processus est le symétrique de celui qu'assure le jeu normal du régulateur d'un groupe isolé, à savoir régler la puissance du groupe en vue de maintenir en principe constante la vitesse à laquelle il tourne.

Or, on sait que pour assurer le réglage stable de la puissance d'un groupe isolé en vue de maintenir sa vitesse en principe constante, il faut:

ou bien avoir recours, en plus du détecteur d'écart de vitesse  $\Delta f$  (tachymètre), à un détecteur de sa dérivée première  $\frac{d}{dt} \Delta f$ , c'est-à-dire à un accéléromètre,

ou bien déroger au principe d'une vitesse rigoureusement constante et établir, au moyen d'un asservissement, une loi de statisme puissance-vitesse:  $\frac{\Delta P}{\Delta f} = -K$ .

De même, pour assurer le réglage stable de la vitesse d'un groupe fonctionnant en parallèle, en vue de maintenir en principe constante la puissance (ou une partie de la puissance: puissance d'échange) qu'il fournit, il faut:

ou bien avoir recours, en plus du détecteur d'écart de puissance  $\Delta P$  (relais wattmétrique), à un détecteur de sa dérivée première  $\frac{d}{dt} \Delta P$ ,

ou bien déroger au principe d'une puissance rigoureusement constante et établir, au moyen d'un asservissement, une loi de statisme vitesse-puissance ou fréquence-puissance:  $\frac{\Delta P}{\Delta f} = -K$ .

Lorsque, pour le réglage de la puissance d'un groupe isolé, en vue de maintenir sa vitesse constante à l'aide d'un régulateur purement tachymétrique, on a recours au second moyen, celui de l'asservissement, on est amené à en pousser l'emploi jusqu'à de très fortes valeurs du statisme, ceci en vue d'obtenir une stabilité satisfaisante<sup>7)</sup>. Cette obligation résulte de la valeur limitée de l'inertie des masses tournantes du groupe, correspondant à une constante de temps (inertie spécifique) relativement faible du réglage. C'est pour éviter les inconvénients indéniables d'un statisme très important, fut-il temporaire, sur la sensibilité tachymétrique du réglage, que les constructeurs de régulateurs accéléro-tachymétriques ont préféré abandonner ce second moyen et faire appel au premier: l'accéléromètre.

Au contraire, pour le réglage de la vitesse d'un groupe, en vue de maintenir constante la valeur d'une puissance d'échange, la marche en parallèle des réseaux interconnectés met à la disposition du dit groupe des inerties mécaniques considérables et il suffit, comme l'expérience l'a prouvé, d'un statisme peu élevé pour assurer une stabilité convenable du fonctionnement. Le premier moyen est alors inutile, le second étant pleinement satisfaisant et c'est ce dernier qu'utilise le réglage fréquence-puissance du nouveau système.

Si un faible statisme d'interconnexion est suffisant, encore faut-il qu'il existe et qu'il ne soit pas nul, puisque c'est en lui que réside la cause de la stabilité, faute de quoi le réglage serait par principe même instable. C'est là l'explication des déboires inévitables rencontrés dans le jeu des régulateurs secondaires wattmétriques pour le réglage à puissance constante indépendamment de la fréquence. Le réglage fréquence-puissance permet d'éviter cet écueil.

Enfin, nous avons dit plus haut que, pour la réalisation de la loi fréquence-puissance, selon le nouveau système, le mécanisme d'asservissement du régulateur était commandé, en fonction de la valeur de la puissance d'échange, de la même façon que, dans un régulateur habituel, ce mécanisme était commandé en fonction de la valeur de la puissance totale produite par le groupe, c'est-à-dire du degré d'ouverture du vannage de sa turbine.

Pour réaliser une telle commande à partir de l'ouverture du vannage de la turbine, il ne viendrait à l'idée de personne d'agir par impulsions successives et par l'intermédiaire d'un petit moteur électrique sur une tringlerie du mécanisme d'asservissement, comme le ferait un régulateur secondaire. La liaison entre le vannage et l'asservissement est directe et continue. De même, pour réaliser la commande du mécanisme d'asservissement à partir de la valeur de la puissance d'échange, le système Brown Boveri-Charvillat n'a recours à aucun intermédiaire à action discontinue, mais utilise le dispositif d'entraînement direct et continu décrit au

<sup>7)</sup> Ceci surtout dans le cas du réglage de turbines hydrauliques dont les conditions d'installation sont à cet égard difficiles.



paragraphe 3. Grâce à ce mode d'action, le nouveau système bénéficie, non seulement de la *meilleure stabilité*, mais également de la *plus grande précision*, jointe à la *rapidité de réglage la plus poussée*.

### 7° De l'entr'aide entre les réseaux interconnectés

Que chaque réseau assure lui-même, par les soins de son chef d'orchestre, le maintien de la fréquence en face des variations de sa consommation, ceci sans troubler le réseau voisin, puis que la puissance d'échange soit réglée d'une façon stable à sa valeur de consigne, telle est bien la règle du fonctionnement normal. Toutefois, il est également indiqué qu'en cas de défaillance momentanée de la tenue de la fréquence, par exemple par la faute du réseau *B* récepteur, le réseau *A* fournisseur fasse acte de solidarité et accorde au réseau *B* un appui (voir fig. 3).

Or, le réglage fréquence-puissance réalise pleinement cet avantage, comme exposé au paragraphe 2 pour le cas de deux alternateurs:

si la fréquence décroît, parce que le réglage du groupe *II*, chef d'orchestre du réseau *B*, n'a pas suffisamment augmenté la puissance produite par ce groupe, en face d'une consommation accrue de la part du réseau *B*, le réseau *A*, par le jeu du régulateur de son groupe *I*, chef d'orchestre, augmente la valeur de la puissance d'échange:  $p_{AB} > p_{AB_0}$ .

si la fréquence croît, parce que le réglage du groupe *II*, chef d'orchestre du réseau *B*, n'a pas suffisamment diminué la puissance produite par ce groupe, en face d'une consommation réduite de la part du réseau *B*, le réseau *A*, par le jeu du régulateur de son groupe *I*, chef d'orchestre, diminue la valeur de la puissance d'échange:  $p_{AB} < p_{AB_0}$ .

Mais l'intervention du réseau *A* ne va toutefois pas jusqu'à rétablir la valeur de la fréquence et au contraire, tant que le réglage du réseau *B* est défaillant, cette intervention est limitée à un appui dont l'importance est fonction de la différence entre la valeur instantanée  $f$  de la fréquence et sa valeur de consigne  $f_0$ . Lorsque cette différence devient nulle, l'appui supplémentaire accordé par le réseau *A* au réseau *B* disparaît et la puissance d'échange reprend sa valeur de consigne:  $p_{AB_0}$ .

L'importance de l'appui supplémentaire accordé par le réseau *A* au réseau *B* est caractérisée par l'énergie réglante d'interconnexion  $K_{IA}$  du réseau *A*: sa valeur correspond à la constante de la loi fréquence-puissance:

$$\frac{\Delta p_{AB}}{\Delta f} = -K_{IA}$$

qu'a pour charge d'observer le régulateur du groupe *I*, chef d'orchestre du réseau *A*. Il est, en effet, le seul qui, par son équipement de réglage fréquence-puissance (plus exactement par la bobine détectrice  $B_d$  de son relais électro-magnétique), soit sensible à la valeur de la puissance d'échange  $p_{AB}$ .

C'est donc *uniquement sur ce régulateur du groupe I, chef d'orchestre*, que l'on peut ajuster, à la valeur choisie, l'énergie réglante d'interconnexion  $K_{IA}$  et il reste seul responsable de sa réalisation, ceci que le groupe *I* soit ou non aidé, pour la production de la puissance, par d'autres groupes  $I'$ ,  $I''$ ,  $I'''$ , etc..., du réseau *A*, dont les régula-

teurs réalisent des *énergies réglantes de groupe*:  $K_{I'}$ ,  $K_{I''}$ ,  $K_{I'''}$ , etc...:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta P_{I'}}{\Delta f} &= -K_{I'} & \Delta P_{I'} &= -K_{I'} \Delta f \\ \frac{\Delta P_{I''}}{\Delta f} &= -K_{I''} & \Delta P_{I''} &= -K_{I''} \Delta f \\ \frac{\Delta P_{I'''}}{\Delta f} &= -K_{I'''} & \Delta P_{I'''} &= -K_{I'''} \Delta f \end{aligned}$$

Dans le réglage fréquence-puissance selon le nouveau système, ces valeurs des *énergies réglantes des groupes* fonctionnant en parallèle avec le groupe *I*, chef d'orchestre, *n'interviennent pas* dans la valeur de  $K_{IA}$ , *énergie réglante d'interconnexion du réseau A*, laquelle dépend seulement du réglage de l'équipement fréquence-puissance du régulateur du groupe *I*, chef d'orchestre.

Si, par exemple, la fréquence décroît  $\Delta f < 0$ , les groupes  $I'$ ,  $I''$ ,  $I'''$ , etc..., fourniront une puissance supplémentaire:

$$\Delta P_{I'} + \Delta P_{I''} + \Delta P_{I'''} + \dots = (K_{I'} + K_{I''} + K_{I'''} + \dots) \Delta f$$

et comme la puissance d'échange doit, selon la loi fréquence-puissance, augmenter de:

$$\Delta p_{AB} = K_{IA} \Delta f$$

le groupe *I*, chef d'orchestre, devra subvenir à l'écart de puissance:

$$\Delta P_I = [K_{IA} - (K_{I'} + K_{I''} + K_{I'''} + \dots)] \Delta f$$

Selon que la valeur de  $K_{IA}$ , énergie réglante d'interconnexion, sera plus grande ou plus petite que la somme  $(K_{I'} + K_{I''} + K_{I'''} + \dots)$  des énergies réglantes de groupe, le régulateur du groupe *I*, chef d'orchestre, commandera une augmentation ( $\Delta P_I > 0$ ) ou une diminution ( $\Delta P_I < 0$ )<sup>8)</sup> de la puissance développée par ce groupe.

Si la fréquence croît  $\Delta f > 0$ , le processus du réglage sera symétrique.

Le choix des valeurs des énergies réglantes de groupe  $K_{I'}$ ,  $K_{I''}$ ,  $K_{I'''}$ , etc..., lesquelles dépendent des puissances:  $P_{I' \max}$ ,  $P_{I'' \max}$ ,  $P_{I''' \max}$ , etc... des groupes  $I'$ ,  $I''$ ,  $I'''$ , etc..., mais aussi des statismes  $\delta_{I'}$ ,  $\delta_{I''}$ ,  $\delta_{I'''}$ , etc... de leurs régulateurs, doit donc être effectué pour limiter les interventions du groupe *I*, chef d'orchestre, à des variations de puissance  $\Delta P_I$  compatibles avec sa puissance maximum  $P_{I \max}$ . Dans ce but, il est avantageux de choisir, comme groupe chef d'orchestre, un des groupes les plus puissants du réseau et même de lui faire piloter une série d'autres groupes, ce qui revient à augmenter fictivement la valeur  $P_{I \max}$  de la puissance maximum du chef d'orchestre.

Quant au choix de la valeur de l'énergie réglante d'interconnexion  $K_{IA}$ , celui-ci est, à notre avis, d'ordre expérimental et doit être entre autres considéré du point de vue commercial. Un réseau *A*

<sup>8)</sup> Ce cas a été expérimenté, lors des essais dont il sera question plus loin, sous 9°, et qui furent effectués à la centrale de Chandoline. Le régulateur du groupe chef d'orchestre fonctionne alors comme s'il était doté d'un statisme négatif, vis-à-vis de la puissance d'échange transmise par l'interconnexion.

fournisseur, disposant des possibilités de production voulues et consentant à accorder au réseau *B* récepteur une aide plus ou moins importante, en cas de défaillance de son réglage de fréquence (ce qui correspond à une valeur plus ou moins grande de l'énergie réglante d'interconnexion du réseau *A*), doit pouvoir, nous semble-t-il, réclamer du réseau *B* une prime plus ou moins élevée pour la vente de l'énergie qu'il lui livre.

Cet appui supplémentaire apporté au réseau *B* récepteur par le réseau *A* fournisseur, dont le groupe *I*, chef d'orchestre, est équipé en réglage fréquence-puissance, trouverait sa réciproque dans un appui identique accordé au réseau *A* fournisseur, momentanément défaillant dans la tenue de sa fréquence, par le réseau *B* récepteur, si son groupe *II*, chef d'orchestre, était aussi équipé en réglage fréquence-

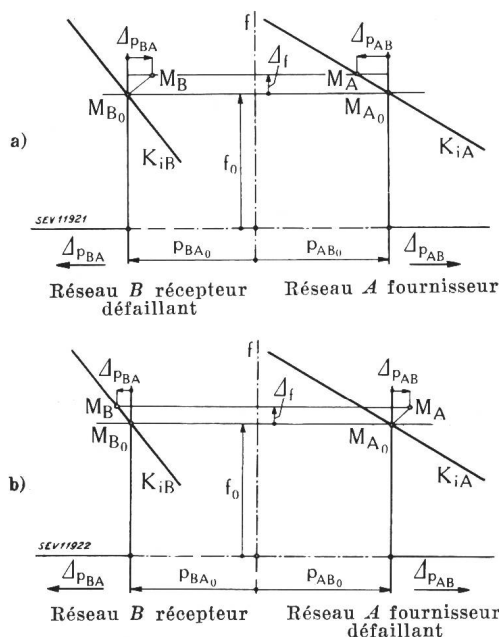


Fig. 7 a und 7 b.

Réglage fréquence-puissance appliqué au cas d'une interconnexion entre deux réseaux

Examen à l'aide de diagrammes ( $\Delta p, f$ ), du jeu des appuis réciproques accordés par un des réseaux à l'autre en cas de défaillance de ce dernier

puissance, ce qui n'est toutefois pas indispensable pour la stabilité de l'ensemble. Le régulateur du groupe *II*, chef d'orchestre du réseau *B*, réaliserait alors une loi fréquence-puissance:

$$\frac{\Delta p_{BA}}{\Delta f} = -K_{iB}$$

l'énergie réglante d'interconnexion du réseau *B*:  $K_{iB}$  (laquelle peut fort bien être différente de  $K_{iA}$ ) caractérisant l'appui accordé par le réseau *B* au réseau *A*, en cas de défaillance momentanée dans la tenue de sa fréquence.

Sur les diagrammes des figures 7a et 7b, où sont portés en abscisse les écarts de puissance  $\Delta p_{AB}$  et  $\Delta p_{BA}$  et en ordonnée la fréquence  $f$ , sont indiquées graphiquement les deux lois de fréquence-puissance:

$$\frac{\Delta p_{AB}}{\Delta f} = -K_{iA} \quad \text{du réseau } A \text{ fournisseur}$$

$$\frac{\Delta p_{BA}}{\Delta f} = -K_{iB} \quad \text{du réseau } B \text{ récepteur}$$

La considération de ces diagrammes permet de se rendre compte du jeu des appuis supplémentaires dont il vient d'être question, appuis accordés par un réseau à l'autre en cas de défaillance de ce dernier.

Si, selon la figure 7a, c'est le réseau *B* récepteur qui est défaillant et qui laisse momentanément augmenter la fréquence en face d'une réduction de sa consommation (ce qui abaisse la valeur de la puissance d'échange), le réseau *A* fournisseur lui vient en aide en diminuant sa fourniture de puissance de la quantité  $\Delta p_{AB} = -\Delta p_{BA} = -K_{iA}\Delta f$ . Le régulateur du groupe chef d'orchestre du réseau *B* est alors sollicité par un écart de fréquence (fréquence trop élevée) et par un écart de puissance (puissance d'échange trop faible), qui tendent tous deux à lui faire opérer la correction pour ramener le point figuratif  $M_B$  sur la loi fréquence-puissance, ce qui le place de nouveau obligatoirement en  $M_{B0}$  avec  $\Delta p = 0$  et  $\Delta f = 0$ .

Si, selon la figure 7b, c'est le réseau *A* fournisseur qui est défaillant et qui laisse momentanément augmenter la fréquence en face d'une réduction de sa consommation (ce qui élève la valeur de la puissance d'échange), le réseau *B* récepteur lui vient en aide en augmentant son appel de puissance de la quantité

$$\Delta p_{BA} = -\Delta p_{AB} = -K_{iB}\Delta f.$$

Le régulateur du groupe chef d'orchestre du réseau *A* est alors sollicité par un écart de fréquence (fréquence trop élevée) et par un écart de puissance (puissance d'échange trop forte) qui tendent tous deux à lui faire opérer la correction pour ramener le point figuratif  $M_A$  sur la loi fréquence-puissance, ce qui le place de nouveau obligatoirement en  $M_{A0}$  avec  $\Delta p = 0$  et  $\Delta f = 0$ .

## 8° Du réglage fréquence-puissance étendu au cas de plusieurs interconnexions entre plusieurs réseaux

Nous n'avons jusqu'ici examiné que le cas du réglage de la puissance d'échange fournie par un réseau *A* à un réseau *B*, au moyen d'une interconnexion. Mais le réglage fréquence-puissance peut également être appliqué au réglage des puissances transmises par plusieurs interconnexions, entre plusieurs réseaux.

En principe, il suffit de multiplier le nombre des régulateurs de groupes chefs d'orchestre équipés en réglage fréquence-puissance, de manière à établir autant d'équations, c'est-à-dire de lois fréquence-puissance, qu'il y a de puissances d'échange à régler, en d'autres termes d'inconnues au problème à résoudre.

Si le réglage n'a trait qu'à une seule puissance d'échange  $p_{AB}$ , entre deux réseaux *A* et *B*, nous avons montré qu'il suffit qu'un seul régulateur,

celui du groupe chef d'orchestre du réseau *A* par exemple, soit équipé en réglage fréquence-puissance et réalise l'unique équation nécessaire, correspondant à la loi:

$$\Delta p_{AB} = -K_{iA} \Delta f.$$

Elle implique  $\Delta p_{AB} = 0$ , autrement dit  $p_{AB} = p_{AB0}$ , si  $\Delta f = 0$  ou  $f = f_0$ .

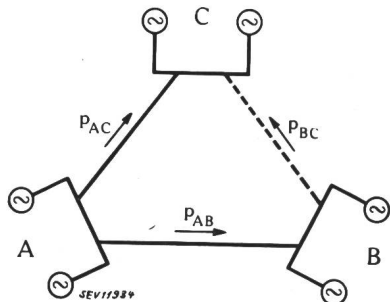


Fig. 8.

Réglage fréquence-puissance appliqué au cas de deux ou trois interconnexions entre trois réseaux

Si, selon la fig. 8 (sans l'interconnexion *BC*), le réglage intéresse deux puissances d'échange, l'une  $p_{AB}$  entre les réseaux *A* et *B*, l'autre  $p_{AC}$  entre les réseaux *A* et *C*, deux régulateurs doivent être équipés en réglage fréquence-puissance, ceux des groupes chefs d'orchestre des réseaux *A* et *B* par exemple.

Le réseau *A* fournisseur, règlera en fonction de la somme des puissances qu'il exporte:

$$\Delta (p_{AB} + p_{AC}) = \Delta p_{AB} + \Delta p_{AC} = -K_{iA} \Delta f$$

et le régulateur de son groupe chef d'orchestre recevra dès lors, par télémesure, les indications totalisées des puissances transmises par les deux interconnexions *AB* et *AC*.

Le réseau *B* récepteur règlera en fonction de la puissance  $p_{BA} = -p_{AB}$  qu'il importe:

$$\Delta p_{BA} = -K_{iB} \Delta f.$$

En remarquant que  $\Delta p_{AB} = -\Delta p_{BA}$ , les deux équations ainsi établies peuvent aussi s'écrire sous la forme suivante:

$$\Delta p_{AC} = -(K_{iA} + K_{iB}) \Delta f \text{ et } \Delta p_{BA} = -K_{iB} \Delta f$$

laquelle permet de se rendre compte que les deux puissances d'échange  $p_{AB}$  et  $p_{AC}$  sont bien chacune réglées suivant une loi fréquence-puissance, par les réseaux *A* et *B*, de sorte que si le réseau *C* maintient bien la fréquence  $f$  à sa valeur de consigne  $f_0$ , les valeurs de consigne  $p_{AB0}$  et  $p_{AC0}$  des puissances d'échange seront également réalisées.

Si, selon la fig. 8 (avec l'interconnexion *BC*), il existe entre les trois réseaux *A*, *B* et *C*, trois interconnexions *AB*, *AC* et *BC*, dont les puissances d'échange doivent être réglées, les trois régulateurs des groupes chefs d'orchestre en *A*, en *B* et en *C* seront équipés en réglage fréquence-puissance. Chacun d'entre eux règlera en fonction de la somme algébrique des puissances exportées ou importées par son réseau et il recevra donc, par télémesure,

les indications totalisées des puissances transmises aux frontières du dit réseau:

$$\Delta p_{AB} + \Delta p_{AC} = -K_{iA} \Delta f$$

$$\Delta p_{BA} + \Delta p_{BC} = -K_{iB} \Delta f$$

$$\Delta p_{CA} + \Delta p_{CB} = -K_{iC} \Delta f$$

$$\Delta p_{AB} = -\Delta p_{BA} \quad \Delta p_{AC} = -\Delta p_{CA} \quad \Delta p_{BC} = -\Delta p_{CB}$$

Ce système d'équations ne peut être satisfait que si l'écart de fréquence  $\Delta f$  est nul, c'est-à-dire si la fréquence  $f_0$  de consigne est respectée. Dès lors, les puissances de consigne le sont également:

$$p_{AB} = p_{AB0} \quad p_{AC} = p_{AC0} \quad p_{BC} = p_{BC0}$$

et la solution recherchée est ainsi réalisée.

Ces quelques exemples montrent, sans qu'il soit nécessaire d'insister, la façon dont l'application du réglage fréquence-puissance peut être étendue au cas de plusieurs interconnexions entre plusieurs réseaux.

## 9° Des résultats du réglage fréquence-puissance appliqué à l'interconnexion de Galmiz

Ainsi qu'il ressort du schéma général de la fig. 9, où sont figurées les principales lignes du réseau de l'Energie de l'Ouest-Suisse, l'interconnexion de Galmiz établit la liaison entre le dit réseau, sur lequel sont branchés tous ceux des divers producteurs et consommateurs de la Suisse romande, et le réseau

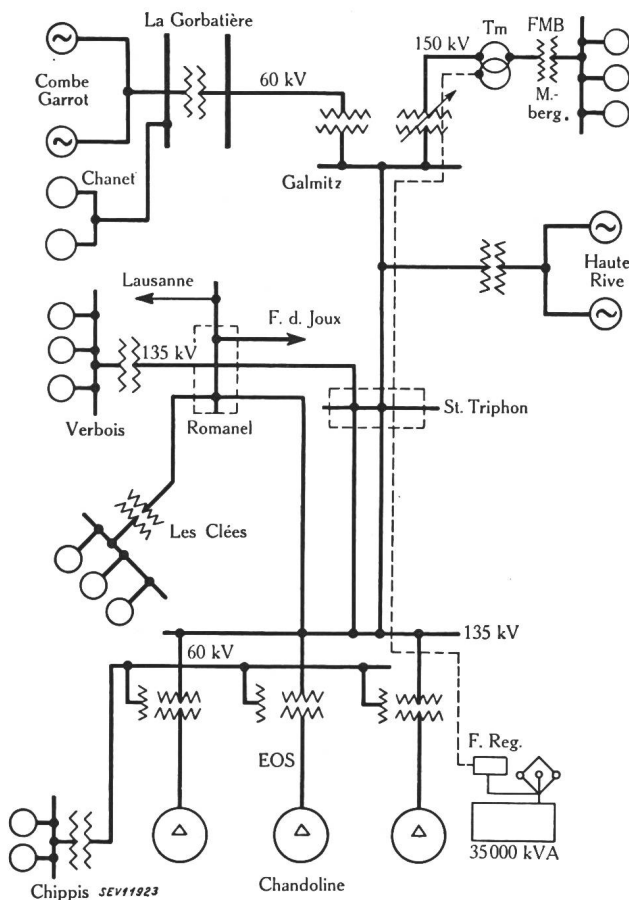


Fig. 9.

Schéma des principales lignes de transport d'énergie appartenant au réseau de l'E.O.S. ou qui y sont raccordées, puis de l'interconnexion de Galmiz avec le réseau des F.M.B.

des Forces Motrices Bernoises, lui-même interconnecté à d'autres réseaux de la Suisse alémanique. C'est dire que de part et d'autre, les puissances mises en jeu peuvent atteindre quelques centaines de MW.

Or, selon les heures de la journée <sup>9)</sup>, la puissance d'échange à transmettre par l'interconnexion de Galmiz, de l'EOS vers les FMB, varie en chiffre rond de 5 à 40 MW. Etant donné la valeur relativement faible de cette puissance d'échange, par rapport à la totalité des puissances mises en jeu, on conçoit que la moindre tendance à une modification de la fréquence, sur l'un ou l'autre réseau, entraîne infailliblement un changement important dans la valeur de la puissance traversant l'interconnexion. Autrement dit, le réglage de cette puissance d'échange se révèle particulièrement délicat.

Les fig. 11 et 14 d'une part et 12 d'autre part, reproduisent les enregistrements graphiques relevés au cours des journées des 28 février, 29 février et 5 mars 1944:

de la puissance d'échange, lue au wattmètre du récepteur de la télémesure Galmiz-Chandoline (fig. 11),

de la puissance d'échange, lue au wattmètre du poste de Galmiz (fig. 14),

de la fréquence commune des réseaux de l'EOS et des FMB (fig. 12).

Avant la mise en service du réglage fréquence-puissance, qui eut lieu le 29 février vers 15 h 30, la centrale de Chandoline de l'EOS avait pour consigne de régler la fréquence et les FMB prenaient charge d'ajuster la puissance qu'elles recevaient par l'interconnexion de Galmiz. Les relevés de fréquence de la journée du 28 février et de la première partie de la journée du 29, dénotent une tenue approximative, mais non parfaite, de la périodicité normale de 50 per./s. Les relevés de la puissance d'échange sont encore bien moins satisfaisants et, avec les oscillations qu'ils révèlent, on ne peut même pas parler du réglage d'une tranche constante pendant telle durée de service.

Le régulateur du groupe n° 4 de la centrale de Chandoline fut équipé d'un dispositif de réglage fréquence-puissance selon le nouveau système, ci-dessus décrit. La fig. 10 montre la disposition constructive réalisée à titre d'essai, sans prétention quant à la question de l'aspect extérieur qui peut évidemment être grandement amélioré. Il s'agit d'un régulateur accéléro-tachymétrique Charmilles se prêtant particulièrement bien au mode de réglage envisagé, d'une part à cause de ses qualités de stabilité, absolument indépendantes de toute considération d'asservissement, et d'autre part du fait de sa grande sensibilité tachymétrique et accélérométrique, qui n'est gênée par aucun dispositif stabilisateur à dash-pot.

Il y a toutefois lieu d'observer que du fait des difficultés de réglage inhérentes aux conditions hydrauliques d'installation des turbines de la centrale de Chandoline, les mouvements de correction du vannage sont extrêmement ralentis pour de faibles écarts de réglage. Le système d'alimentation de ses cinq groupes de 33 000 kW, mesuré à l'arbre des turbines, comprend en effet des conduites de longueur très importante, même par rapport à la

valeur élevée de la chute utilisée d'environ 1650 m, conduites où la vitesse d'écoulement est en outre relativement grande. La rapidité de réaction d'un tel régulateur pourrait donc être encore bien mieux employée avec des turbines équipant des chutes moyennes, ceci en vue d'une finesse de réglage encore plus poussée.

Quoi qu'il en soit, l'intervention du réglage fréquence-puissance, assuré par le régulateur du groupe n° 4, a apporté les améliorations qui ressortent des

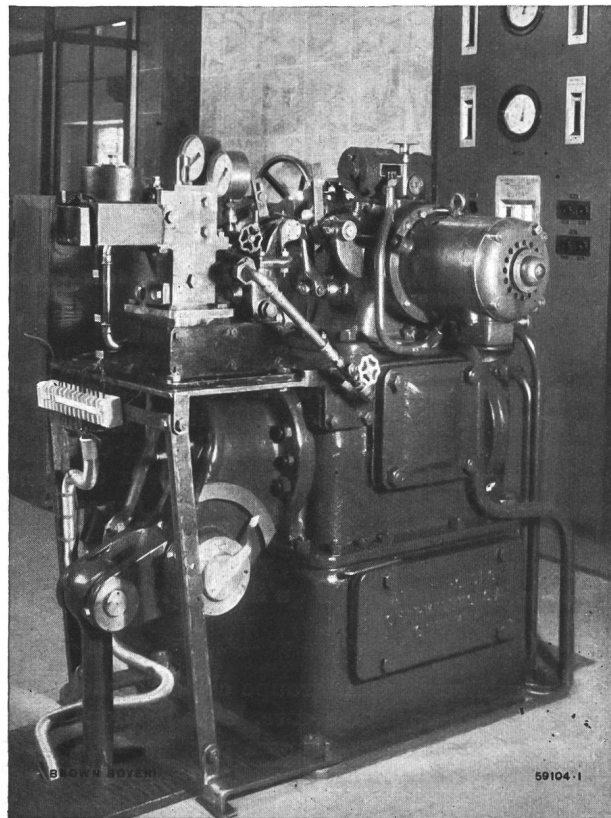


Fig. 10.

Régulateur accéléro-tachymétrique Charmilles, équipé du dispositif de réglage fréquence-puissance Brown Boveri-Charmilles (La disposition constructive montrée par cette photographie est celle réalisée pour les essais)

relevés de la fin de la journée du 29 février et de ceux de la journée du 5 mars, donnés à titre d'exemple. La perfection de la tenue de la fréquence — sans recours à aucun réglage secondaire — et l'obtention tout à fait satisfaisante de tranches de puissance bien constantes, pendant telles et telles durées de service, nous dispensent de tout commentaire. La comparaison avec les relevés précédents éclaire d'un jour assez élogieux les qualités de stabilité et de sensibilité du système. Les changements de la valeur de consigne de la puissance à transmettre s'effectuent quasi instantanément par la manœuvre du curseur du potentiomètre.

Pour que l'on ne soit pas tenté de croire que la régularité des enregistrements est la conséquence d'une absence de modifications de la charge consommée, la fig. 13 donne le relevé de la puissance fournie par le groupe n° 4 chef d'orchestre, réglant sans asservissement par rapport à la dite puissance,

<sup>9)</sup> Dans les mois de février et mars 1944.



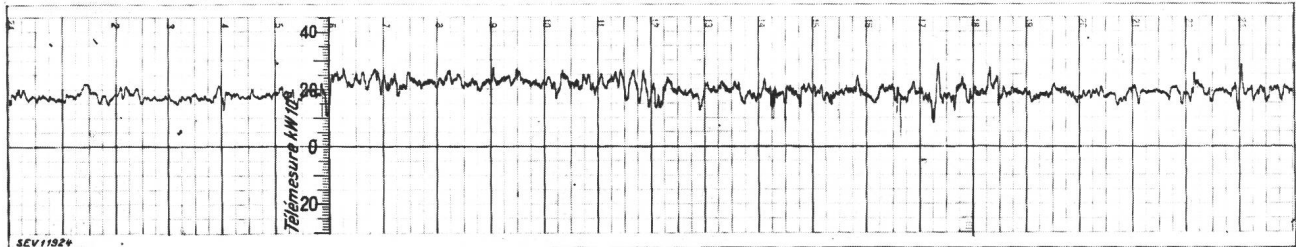
mais *avec asservissement* par rapport à la puissance d'échange traversant l'interconnexion et dont la valeur est transmise par télémesure du poste de Galmiz à la centrale de Chandoline.

En face de perturbations provoquées, au cours du service, sur l'un et l'autre réseau, le système s'est bien comporté. Parmi ces perturbations, nous citons les suivantes:

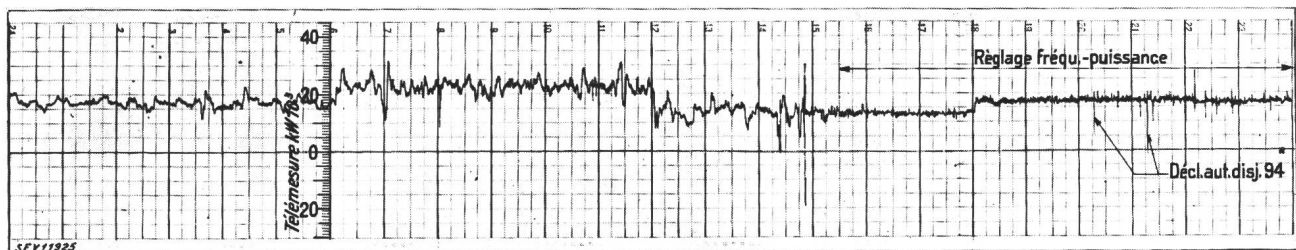
c'est-à-dire d'une façon parfaitement stable, à leurs valeurs de consigne.

*b) Perturbations à la production du réseau EOS.*

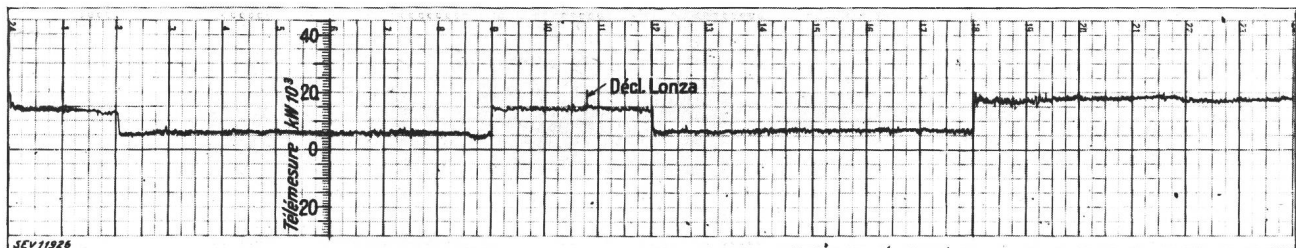
Ces perturbations furent intentionnellement provoquées en modifiant d'abord progressivement, puis brusquement, la puissance produite par les autres groupes de la centrale de Chandoline, fonction-



Usine de Chandoline, 28 février 1944, télémesure Galmiz



Usine de Chandoline, 29 février 1944, télémesure Galmiz



Usine de Chandoline, 5 mars 1944, télémesure Galmiz

Fig. 11.

Enregistrement au wattmètre de la centrale de Chandoline (récepteur de la télémesure) de la puissance d'échange transmise par l'interconnexion de Galmiz pendant les journées des 28 février, 29 février et 5 mars 1944

*a) Perturbations à la consommation du réseau EOS.*

Une telle perturbation a été relevée sur les enregistrements de la journée du 5 mars vers 10 h 47; un des clients de l'E.O.S. a, à la suite d'un déclenchement, brusquement supprimé sa consommation qui correspondait à une puissance d'environ 10 000 kW. Cette puissance instantanément libérée a provoquée, pendant la durée de la correction du réglage:

une augmentation momentanée de la fréquence de 0,15 pér./s,

une augmentation momentanée de 7000 kW de la puissance d'échange transmise par l'interconnexion, augmentation de puissance absorbée par l'accélération des masses tournantes des groupes, accompagnant l'accroissement de la fréquence.

Le groupe n° 4, chef d'orchestre du réseau EOS a, au bout de quelques secondes, réduit sa production de puissance de la valeur correspondant intégralement à la diminution de la consommation; la puissance d'échange et la fréquence ont été ainsi de suite rétablies, sans surréglages appréciables,

nant en parallèle avec le groupe n° 4, chef d'orchestre. Les expériences furent ensuite répétées en opérant sur un groupe de la centrale d'Hauterive, beaucoup plus proche du point d'interconnexion de Galmiz que la centrale de Chandoline (voir le schéma de la fig. 9). L'amplitude des variations fut poussée jusqu'à atteindre environ 10 000 kW, soit approximativement la moitié de la valeur de consigne ordonnée, à ce moment, par le réglage pour la puissance d'échange à l'interconnexion.

Les variations effectuées sur un rythme lent furent fidèlement suivies par le réglage du groupe n° 4, chef d'orchestre, qui a pu y satisfaire complètement à lui seul, sans écart sensible sur la valeur de la puissance d'échange, ni sur celle de la fréquence. Les décharges brusques donnèrent lieu à un régime transitoire analogue à celui signalé sous a) (diminution momentanée de la fréquence et de la puissance d'échange), puis le réglage du groupe n° 4,

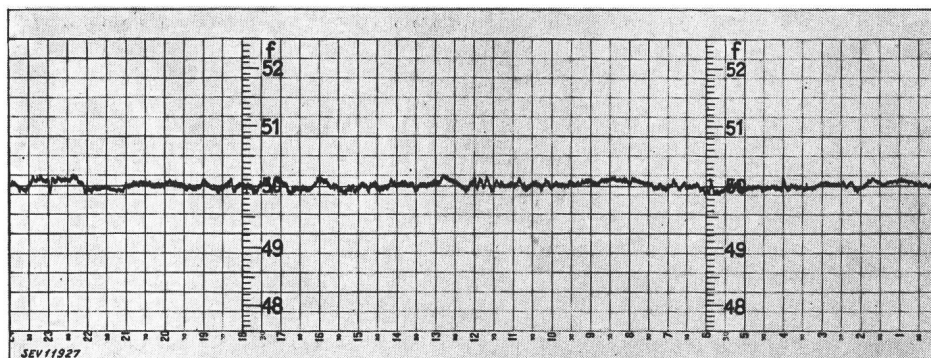


chef d'orchestre, rétablit de la même façon les valeurs de consigne.

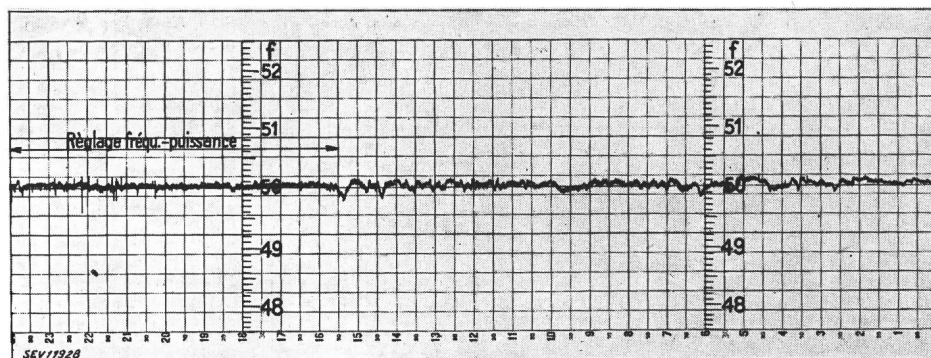
*c) Perturbations à la production du réseau FMB.*

Leurs résultats firent encore ressortir la réalisation pleine et entière des prévisions. L'une d'entre elles comporta le déclenchement d'un groupe fournissant une puissance de 15 000 kW environ; il fut suivi:

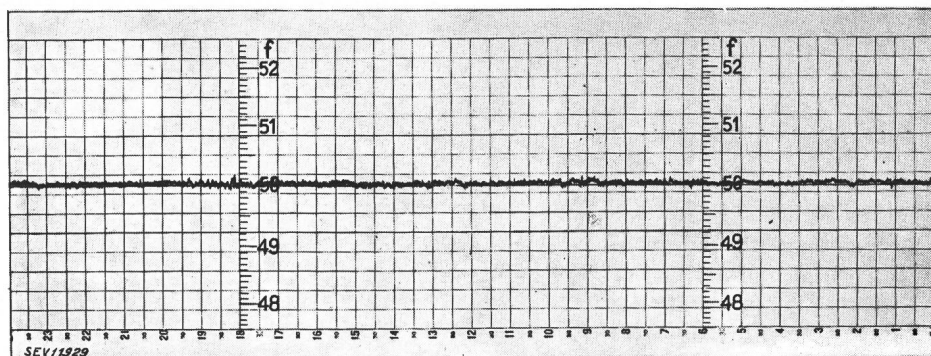
imposer à l'interconnexion de Galmiz une surcharge risquant de provoquer un déclenchement, l'EOS avait demandé que l'énergie réglante fut réduite à une faible valeur; elle fut dès lors fixée approximativement à 7000 kW par pér./s. Cette énergie réglante d'interconnexion étant sensiblement plus petite que la somme des énergies réglantes de groupe, des groupes producteurs du réseau EOS, fonctionnant en parallèle avec le groupe n° 4, chef



Usine de Chandoline,  
28 février 1944,  
barres 130 kV No. 1,  
fréquencemètre



Usine de Chandoline,  
29 février 1944,  
barres 130 kV No. 1,  
fréquencemètre



Usine de Chandoline,  
5 mars 1944,  
barres 130 kV No. 1,  
fréquencemètre

Fig. 12.

Enregistrement de la fréquence des réseaux interconnectés de l'EOS et des FMB pendant les journées des 28 février, 29 février et 5 mars 1944

d'une diminution momentanée de la fréquence, d'une augmentation momentanée de la puissance d'échange transmise par l'interconnexion, pour subvenir au manque de puissance survenu dans la production du réseau FMB.

Toutefois, à cette augmentation momentanée de puissance, participèrent, du fait de la diminution de fréquence, tous les groupes producteurs du réseau EOS. Or, au cours de ces expériences et dans la crainte que le réglage fréquence-puissance puisse

d'orchestre, celui-ci fut amené, en face d'une diminution de la fréquence, à réduire la puissance qu'il fournissait<sup>10)</sup>, de manière à limiter l'augmentation de la puissance d'échange à l'écart correspondant à la loi fréquence-puissance:

$$\frac{\Delta p}{\Delta f} \cong -7000 \text{ kW pér./s.}$$

<sup>10)</sup> Voir sous 7°.

Le réglage du réseau FMB ayant ensuite rétabli la fréquence à sa valeur de consigne, la puissance d'échange reprit automatiquement la sienne, par réouverture du vannage du groupe n° 4 de la centrale de Chandoline.

Nous remarquons en terminant que la précision du réglage de la puissance d'échange paraît moins bonne sur l'enregistrement du wattmètre de Galmiz que sur celui du wattmètre de Chandoline. Comme la bobine détectrice du dispositif de réglage fréquence-puissance est branchée sur le circuit du wattmètre de Chandoline (circuit récepteur de la télémessure), c'est aux indications de ce wattmètre qu'il faut se référer pour juger de la précision du système; or, les écarts sont inférieurs à  $\pm 1000$  kW.

La différence constatée entre les enregistrements des deux wattmètres peut provenir d'amortissements inégaux de leurs équipages ou de légers retards dans la transmission assurée par la télémessure. Ce serait là un point où, si nécessaire, des perfectionnements pourraient être apportés.

des inerties mécaniques des groupes de chacun des réseaux et des impédances électriques des lignes.

Un calcul approché permet en effet de se rendre compte que le temps d'établissement de cette valeur de pointe de la puissance d'échange est d'un ordre *beaucoup plus petit* que celui correspondant à l'action corrective d'un régulateur automatique de vitesse, chargé du réglage de la turbine du groupe chef d'orchestre.

En vue d'effectuer le dit calcul — nous le répétons avec la seule prétention de chiffrer l'ordre de grandeur du temps d'établissement de la valeur de pointe de la puissance d'échange — nous admettrons diverses hypothèses simplificatrices, qui seront définies au cours de la démonstration, mais qui ne sont pas de nature à fausser le résultat approximatif recherché.

Considérons, selon la fig. 3, un réseau *B* récepteur, lors d'un régime permanent stable pendant lequel la puissance fournie par ses groupes producteurs s'élève à 100 000 kW et satisfait entièrement

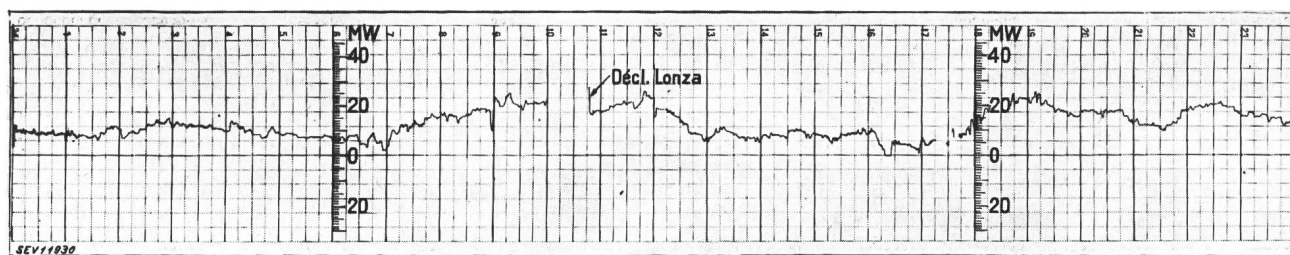


Fig. 13.

Enregistrement de la puissance fournie, pendant la journée du 5 mars 1944, par le groupe No. 4 de la centrale de Chandoline, dont le régulateur est équipé du nouveau dispositif de réglage fréquence-puissance

### 10° Des régimes transitoires consécutifs à de brusques variations de charge sur l'un ou l'autre de deux réseaux reliés par une interconnexion

Nous avons déjà, au paragraphe 5°, fait allusion à ces régimes, puis nous y sommes revenus au paragraphe 9°, sous a), b) et c), dans l'exposé des constatations faites à l'occasion des essais de perturbation effectués lors de l'application, à l'interconnexion de Galmiz, du nouveau système de réglage fréquence-puissance.

Nous avons fait ressortir qu'après de telles perturbations, il fallait un certain temps, d'environ quelques secondes, pour permettre au régulateur du groupe chef d'orchestre d'au moins un des réseaux de procéder à la correction voulue, afin de faire respecter la loi fréquence-puissance du réglage de l'interconnexion. Cette correction ne pouvant pas être instantanée, la perturbation est donc suivie d'un régime transitoire de durée limitée<sup>11)</sup>, mais au début de laquelle, *quel que soit le système de réglage utilisé*, la valeur de pointe atteinte par la puissance d'échange est uniquement fonction de l'ampleur de la perturbation, puis de l'importance

à la consommation de ce réseau; la puissance d'échange reçue du réseau *A* fournisseur, par l'interconnexion, est donc à ce moment nulle. Supposons maintenant qu'il se produit, sur le réseau *B*, le déclenchement d'une centrale dont les groupes intervenaient pour 20 000 kW dans la production. Les groupes restants diminuent dès lors de vitesse et, si l'aide du réseau *A* demeurerait nulle, c'est-à-dire si le réseau *B* était isolé, la rapidité  $\frac{d}{dt} \Delta n$  de ce ralentissement serait définie par l'équation:

$$\frac{d}{dt} \Delta n = -\frac{n_0}{T} \frac{\Delta P}{P_0} \quad 12)$$

ou, avec les données numériques de l'exemple considéré et en introduisant la fréquence:

$$\frac{d}{dt} \Delta f = \frac{f_0}{T} \frac{20\,000}{100\,000}$$

ceci, tant que les régulateurs automatiques des groupes ne réagissent pas encore.

Le coefficient *T* du second membre de cette équation est l'inertie spécifique de l'ensemble des

<sup>11)</sup> Grâce à son mode d'action direct et continu, le réglage fréquence-puissance, du nouveau système, est certainement le plus rapide (voir paragraphe 6°, dernier alinéa). Il assure donc la réduction la plus prononcée de la durée du régime transitoire.

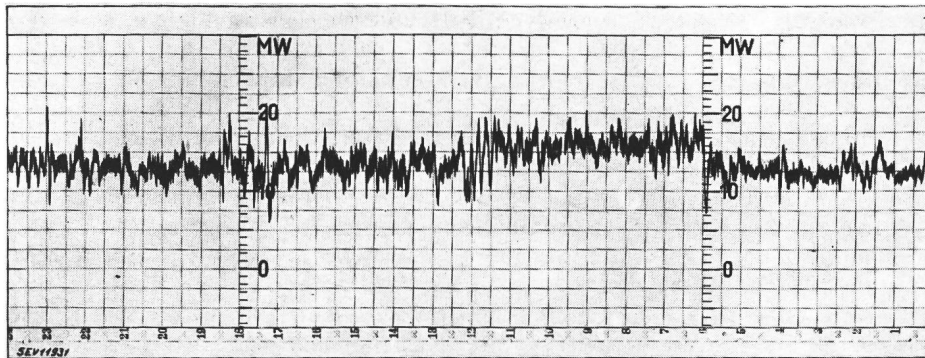
<sup>12)</sup> Cette équation suppose aussi que la baisse de vitesse n'influe pas sur la valeur de l'écart entre couple moteur et couple résistant, correspondant à la différence entre puissance produite et puissance consommée.

groupes du réseau *B*; on le dénomme aussi constante de temps ou constante de démarrage et sa valeur, mesurée en secondes, correspond à l'expression:

$$T = \frac{\Sigma (GD^2 \times n^2)}{0,368 \cdot P_o} \cdot 10^{-6}$$

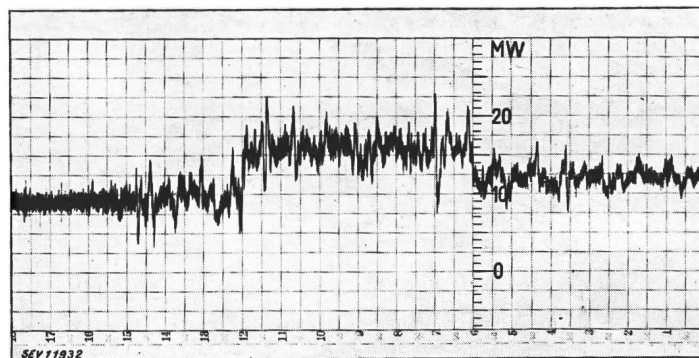
dans laquelle:

atteindrait, dans ces conditions, avec  $f_o = 50$  pér./s, la valeur de 1 pér./s<sup>2</sup>, soit  $\Delta f = t$ . En conséquence, l'angle  $\varphi$  de déphasage électrique (exprimé en degrés), entre les groupes du réseau *A*, dont la vitesse continue de correspondre à la fréquence normale  $f_o$ , et les groupes du réseau *B* supposé isolé, croîtrait selon la fonction:



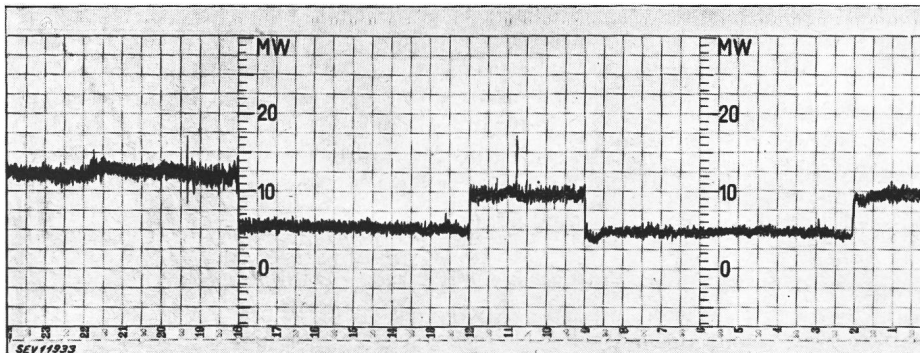
Galmiz, 28 février 1944,  
ligne Mühleberg 150 kV,  
wattmètre

NB. Le wattmètre de Galmiz  
ne totalise que la puis-  
sance de deux phases



Galmiz, 29 février 1944,  
ligne Mühleberg 150 kV,  
wattmètre

NB. Le wattmètre de Galmiz  
ne totalise que la puis-  
sance de deux phases



Galmiz, 5 mars 1944,  
ligne Mühleberg 150 kV,  
wattmètre

NB. Le wattmètre de Galmiz  
ne totalise que la puis-  
sance de deux phases

Fig. 14.

Enregistrement au wattmètre du poste de Galmiz de la puissance d'échange transmise par l'interconnexion de Galmiz pendant les journées des 28 février, 29 février et 5 mars 1944

$\Sigma (GD^2 \times n^2)$  est la somme des produits de l'inertie ( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ) de chacun des groupes par le carré de leur vitesse (t/min) normale,  
 $P_o$  est la puissance (kW) totale qu'ils fournissent, dans l'exemple choisi: 100 000 kW.

Nous admettrons pour cette inertie spécifique de l'ensemble des groupes du réseau *B* une valeur de 10 s, proche de celles en moyenne réalisées dans la pratique.

La rapidité de diminution de la fréquence  $\frac{d}{dt} \Delta f$

$$\varphi = \int_0^t \Delta f dt \cdot 360^\circ = \frac{1}{2} t^2 \cdot 360^\circ$$

Or, on sait que l'angle de déphasage électrique entre le rotor d'un alternateur synchrone fonctionnant à pleine charge sur un réseau infiniment grand, d'une part, et le champ tournant de son induit, d'autre part, s'élève à environ 20°. La puissance que l'alternateur fournit varie en outre proportion-



nellement au sinus de cet angle de déphasage ou, comme la valeur de celui-ci n'est pas grande, à peu près proportionnellement à l'angle lui-même.

Admettons enfin que la puissance produite par les groupes du réseau *A* soit également de 100 000 kW, de sorte que le complément maximum de puissance de 20 000 kW, que la perturbation survenue dans le réseau *B* peut appeler de la part des groupes du réseau *A*, représente 20 % de la puissance débitée par ceux-ci; la fourniture de cette puissance complémentaire exigera dès lors une augmentation d'environ 4° (20 % de 20°) de l'angle de déphasage ci-dessus défini.

Comme dans l'exemple considéré et ainsi que nous venons de l'établir, l'angle de déphasage électrique entre les groupes du réseau *A* et les groupes du réseau *B*, supposé isolé, croît selon la fonction  $\varphi = 180^\circ \cdot t^2$ , l'angle de 4° serait atteint en:

$$t = \sqrt{\frac{4}{180}} \cong 0,15 \text{ s.}$$

C'est également à peu près au bout du même temps que le réseau *A*, supposé maintenant relié par l'interconnexion au réseau *B*, apportera à ce dernier sa contribution maximum voisine de 20 000 kW.

En réalité, cette contribution maximum sera moindre et mettra un peu plus de temps à s'établir, ceci notamment du fait que l'ensemble des groupes du réseau *A* ne possédant pas une inertie spécifique infinie (mais finie et de valeur proche de celle du réseau *B*), leur vitesse (fréquence) diminuera aussi, de sorte que l'angle de déphasage augmentera moins vite que nous l'avons évalué. Le calcul exact, qui devrait tenir compte des inerties spécifiques des deux réseaux et de l'impédance de la ligne, serait notablement plus compliqué.

Toutefois, ces quelques considérations numériques approchées permettent de formuler les conclusions suivantes:

1° Lors d'une perturbation brusque intervenant dans l'un des réseaux, soit par changement de la puissance produite, soit par modification de la charge consommée, l'à-coup que subit la valeur de la puissance d'échange traversant l'interconnexion, se développe avec une rapidité telle que l'action corrective des régulateurs de vitesse des groupes chefs d'orchestre des deux réseaux ne peut pratiquement pas influencer sur l'importance du dit à-coup, mais seulement sur sa durée.

2° La variation de la fréquence dépend par contre de cette action des régulateurs, puis des inerties spécifiques. Mais lorsqu'au bout du temps très court, dont nous avons cherché à déterminer l'ordre de grandeur, la puissance d'échange atteint sa valeur de pointe, c'est-à-dire subit une modification brusque importante, la fréquence, au contraire, n'a encore presque pas varié. On conçoit par conséquent que, pour pousser au maximum la rapidité de l'action corrective des régulateurs, il faut moins compter sur l'effet de la variation de fréquence que sur celui de la variation de la puissance d'échange. Il y a donc de toute évidence un énorme avantage à placer les régulateurs sous l'influence de la valeur instantanée de la puissance d'échange, non pas selon un mode indirect et discontinu, inévitablement lent, mais selon un mode direct et continu. Or, c'est précisément là une des caractéristiques essentielles du nouveau système de réglage fréquence-puissance qui lui permet de prétendre à l'attention particulière des exploitants.

3° La valeur de pointe de la puissance d'échange peut, pendant un très court instant, dépasser notablement la valeur de consigne. Un tel à-coup, de faible durée, ne saurait constituer un inconvénient pour l'appareillage du poste d'interconnexion, mais son éventualité doit tout de même être prise en considération, pour le dimensionnement de la ligne, afin que le dit à-coup ne risque pas d'atteindre la limite de stabilité dynamique du fonctionnement en parallèle des deux réseaux.

## Die Verwendung von elektro-akustischen Wandlern in VIVAVOX-Sprechanlagen<sup>1)</sup>

Von O. Tschumi, Solothurn

621.395.61: 621.395.62

Es wird die Eignung der verschiedenen elektro-akustischen Wandler, insbesondere des elektro-magnetischen und des dynamischen Wandlers, hinsichtlich Frequenzbereich und Leistung, bei Verwendung in Vivavox-Lautsprechanlagen untersucht und die Überlegenheit des dynamischen Wandlers festgestellt.

L'auteur examine, au point de vue de la gamme des fréquences et de la puissance, les propriétés des transformateurs électro-acoustiques, notamment celle du transformateur électro-mécanique et du transformateur dynamique, destinés à des installations de hauts-parleurs Vivavox; c'est le transformateur dynamique qui convient le mieux dans un cas de ce genre.

### I. Einleitung

Das Verhalten der verschiedenen Systeme elektro-akustischer Wandler beim Arbeiten unterhalb, oberhalb und auf ihrer Resonanzfrequenz zur Übertragung von Sprachsignalen ist hinreichend abgeklärt.

Bei lautstarken Verständigungsanlagen wird oft der gleiche elektro-akustische Wandler als Schallsender zur Wiedergabe der menschlichen Sprache und akustischer Signale, sowie als Schallempfänger zur Übertragung der menschlichen Sprache auf elektrischem Wege benützt. Diese wechselseitige Anwendung stellt besondere Anforderungen, mit denen sonst nicht zu rechnen ist. Das Kohlenkörnermikro-

<sup>1)</sup> Siehe Bull. SEV 1941, Nr. 25, S. 726, und 1943, Nr. 9, S. 252.