

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 50 (1959)
Heft: 25

Artikel: Fluctuations de la puissance transmise par une interconnexion
Autor: Gaden, D.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1059493>

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: 22.02.2026

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

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

GEMEINSAMES PUBLIKATIONSORGAN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS (SEV) UND
DES VERBANDES SCHWEIZERISCHER ELEKTRIZITÄTSWERKE (VSE)

Fluctuations de la puissance transmise par une interconnexion

Compte rendu des essais effectués à ce sujet par la Commission d'études de l'ASE pour le réglage des grands réseaux

Par D. Gaden, Genève

621.316.726 + 621.316.728 : 621.311.161

L'auteur donne suite à son exposé précédent sur les divers modes d'application du réglage fréquence-puissance publié dans le Bulletin de l'ASE t. 49(1958), n° 13, p. 576...583. Sur la base de divers essais effectués au poste d'interconnexion de Chamoson, par la Commission d'études de l'ASE pour le réglage des grands réseaux, il compare les résultats obtenus avec le mode direct (sans régulateur de réseau) et le mode indirect (avec régulateur de réseau). Il donne quelque chiffres caractéristiques des fluctuations constatées dans la valeur de la puissance d'échange et les accompagne de ses commentaires.

Der Verfasser schliesst an seinen Aufsatz «Les divers modes d'applications du réglage fréquence-puissance», erschienen im Bulletin SEV Bd. 49(1958), Nr. 13, S. 576...583, an. Auf Grund verschiedener Versuche, die von der Studienkommission des SEV für die Regelung grosser Netzverbände in der Kuppelstation Chamoson durchgeführt wurden, vergleicht er deren Ergebnisse mit der direkten Methode (ohne Netzregler) und der indirekten Methode (mit Netzregler). Er produziert einige charakteristische Zahlen der festgestellten Änderungen der Austauschleistung und kommentiert sie.

I. Généralités; Réglage fréquence-puissance

A côté de bien d'autres aujourd'hui hautement appréciées, il est une possibilité offerte par les lignes de liaison établies entre grands réseaux qui ne paraît pas être encore unanimement estimée, dans nos cercles nationaux, comme un avantage: il s'agit de la réduction de la tâche de réglage incomptant aux groupes réglants de chacun des réseaux interconnectés.

Il faut bien reconnaître qu'un obstacle très motivé, qui s'opposa à cette manière de voir, fut la crainte de l'exploitant d'un réseau de voir son voisin incapable de subvenir convenablement à la consommation de sa clientèle et obligé, par conséquent, de laisser tomber la fréquence commune en-dessous de sa valeur de consigne.

Ces circonstances qui relèvent de la période d'après-guerre, ont dès lors conduit les intéressés à limiter tout d'abord l'usage d'une interconnexion à une fraction isolée de leur réseau, fraction essentiellement consommatrice pour un importateur ou essentiellement productrice pour un exportateur. Puis les inconvénients de cette façon d'exploiter s'étant fait jour, l'extension de l'usage de telle interconnexion à l'ensemble d'un réseau fut progressivement appliquée, mais encore avec le souci de souffrir le moins possible des défaillances éventuelles du voisin. La tendance demeura donc de régler la puissance d'échange à une valeur entièrement (puissance constante) ou à peu près indépendante de la fréquence.

Cette manière de concevoir le réglage n'a pas encore complètement perdu, en Suisse, ses partisans qui la pratiquent toujours, en s'appuyant sur un argument apparemment fondé: Vouloir que tel réseau règle la puissance transmise par une inter-

connexion avec une certaine énergie réglante, c'est-à-dire avec un certain facteur d'influence de la fréquence sur la valeur de cette puissance, en d'autres termes vouloir appliquer la loi fréquence-puissance:

$$\Delta P_i + K_i \Delta f = 0 \quad (1)$$

où

ΔP_i écart de la puissance d'échange P_i [MW], par rapport à sa valeur de consigne;
 Δf écart de la fréquence f [Hz], par rapport à sa valeur de consigne de 50 Hz;
 K_i énergie réglante ou facteur d'influence de la fréquence en MW par Hz;

c'est prétendre faire participer le réseau considéré au maintien de la fréquence commune de l'ensemble des réseaux interconnectés. Or, quel peut être à cet égard l'effet de l'aide apportée par le réseau suisse aux réseaux européens qui l'entourent et qui sont considérablement plus puissants? Cette aide serait vraiment trop minime et mieux vaut en faire abstraction!

Ce raisonnement ne ressemble-t-il pas à celui d'un contribuable qui estimerait pouvoir être dispensé du paiement de ses impôts parce que leur montant serait trop faible par rapport au total des besoins de la communauté? Répétons que cette façon de voir pouvait être défendue lorsque existait la crainte de trop grandes variations de la fréquence; mais avec l'étendue actuelle des interconnexions et l'importance des moyens de production des réseaux interconnectés cette crainte est devenue illusoire.

Rappelons ici que G. Darrieus a montré que pour réduire à son minimum la tâche de réglage d'un réseau, au point de vue de la puissance transmise par son interconnexion avec un réseau voisin, il fallait donner à l'énergie réglante d'interconnexion

K_i du réseau considéré, une valeur égale à sa propre énergie réglante naturelle K , à savoir celle qui découle de la puissance P de ses groupes et du stastisme δ de leurs régulateurs:

$$K = \frac{P}{\delta f_0} \text{ [MW/Hz]} \text{ avec } f_0 = 50 \text{ Hz} \quad (2)$$

En réalité, l'expérience a prouvé que l'on disposait dans le choix de l'énergie réglante d'interconnexion K_i d'une assez grande latitude, sans mettre en danger la stabilité du réglage, ni exagérer les mouvements de vannage des groupes qui en sont chargés, en d'autres termes sans augmenter outre mesure l'importance de la tâche de réglage. Naturellement la valeur de cette énergie réglante d'interconnexion K_i doit être proportionnée à celle de la puissance P_0 [MW] mise en jeu dans le réseau considéré, ainsi qu'à ses possibilités d'assurer une variation plus ou moins grande de cette puissance, c'est-à-dire à la largeur économique de sa bande de réglage. Les résultats de certaines expériences étrangères conduisent à fixer une valeur de l'énergie réglante d'interconnexion d'un réseau de l'ordre de:

$$K_i = \frac{P_0}{10} \text{ [MW/Hz]} \quad (3)$$

déjà généralement inférieure à celle préconisée par G. Darrieus, sans oublier que plus on s'en éloigne, plus la tâche de réglage augmente.

Finalement, le choix de l'énergie réglante d'interconnexion relève surtout de l'aide que le réseau en question souhaite, en cas d'une défaillance de sa part, recevoir de son voisin, ou admet, en cas de défaillance de ce dernier, de lui apporter [1]¹⁾. Cette considération du régime transitoire qui fait suite à un incident est, à cet égard, beaucoup plus importante que celle des régimes quasi-permanents au cours desquels chacun des réseaux est en mesure d'assurer convenablement le réglage. Elle n'échappera pas aux yeux des exploitants qui savent la gravité des interruptions de service que peut entraîner une défaillance même de courte durée.

Ajoutons pour terminer que cette manifestation de solidarité entre réseaux, qui constitue un des grands avantages des interconnexions, peut être limitée à une certaine bande de fréquence, autour de la fréquence de consigne. En dehors de cette bande, il est possible de réduire l'importance du supplément d'aide reçue ou donnée, par la diminution automatique de l'énergie réglante d'interconnexion.

II. Rapidité de réponse du réglage

L'application d'une loi fréquence-puissance étant admise et la question du choix de l'énergie réglante étant supposée résolue, il en reste encore une autre: celle de la fidélité des résultats du réglage à la loi précitée. Cette seconde question fait appel à une nouvelle notion: la rapidité de réponse du réglage.

Si l'on considère, en réglage de vitesse, un groupe de puissance P_g , dont le régulateur astatique est doté d'une promptitude caractérisée par le temps τ' , la variation ΔP de la puissance fournie par ce groupe, entre deux états de régime permanent

¹⁾ Voir la bibliographie à la fin de l'article.

atteints aux temps t_1 et t_2 et pour lesquels la fréquence est égale à sa valeur de consigne: $f = f_0$, est donnée par l'expression:

$$\Delta P = \frac{P_g}{\tau' f_0} \int_{t_1}^{t_2} \Delta f \, dt = \alpha \Delta \varphi \quad (4)$$

avec:

$$\alpha = \frac{P_g}{\tau' f_0} \quad (5)$$

$\Delta \varphi$ (intégrale de la variation de fréquence en Hz ou en cycles/s) étant la variation en cycles [2] du déphasage entre les heures d'une horloge synchrone à 50 Hz et d'une horloge synchrone à la fréquence du réseau. Le facteur α est donc la variation de puissance fournie par le groupe lorsque le déphasage en question varie d'un cycle (ou de 0,02 s pour $f_0 = 50$ Hz²⁾; c'est la pente de la loi de réglage caractérisant sa rapidité de réponse.

Cette notion peut être étendue à l'ensemble des groupes d'un réseau, dont les facteurs α sont additifs. Elle peut être également généralisée au cas où le réglage s'effectue selon une loi fréquence-puissance. Il suffit de remplacer:

l'écart Δf sur la fréquence réelle

par:

l'écart $\Delta f'$ sur la fréquence complexe

$$\Delta f' = \frac{\Delta P_i}{K_i} + \Delta f \quad (6)$$

La variation $\Delta \varphi' = \int \Delta f' \, dt$ devient dès lors la combinaison d'un écart horaire et d'un écart d'énergie transmise à l'interconnexion, ce dernier écart étant ramené à l'échelle des cycles au moyen de la division par l'énergie réglante d'interconnexion K_i .

Cette notion de rapidité de réponse caractérisée par le facteur α , peut donc être aussi bien appliquée au régulateur de vitesse d'un groupe, qu'à un régulateur de réseau. On parlera alors soit de la valeur *naturelle* (celle du régulateur de vitesse) de ce facteur, soit de sa valeur *imposée* (par le régulateur de réseau). La première intervient seule dans le mode *direct* (sans régulateur de réseau) d'application du réglage fréquence-puissance, tandis que les deux interviennent dans le mode *indirect* [2].

Il est évident que plus la rapidité de réponse est grande, meilleurs seront les résultats du réglage; mais cette rapidité est forcément limitée, du moins pour chacun des groupes pris individuellement et la façon la plus indiquée de l'augmenter, dans un réseau, est de faire participer un plus grand nombre de groupes à la tâche de réglage [augmentation de $P_g = \sum P_{gi}$ dans l'expression (4)].

Selon certaines expériences étrangères portant sur des réseaux de plusieurs milliers de MW, il

²⁾ Cette définition n'est rigoureusement exacte que si $f = f_0 = \text{const.}$ pour $t = t_1$ et $t = t_2$ ou si l'on ne considère que la corrélation d'intégrale, établie par le régulateur entre la variation ΔP de la grandeur de réglage et la variation Δf de la grandeur réglée. Le facteur α est donc le facteur de corrélation d'intégrale du réglage.

Définition	Formules	Auteurs
$E_{f(A-B)}$: Valeur quadratique moyenne de la différence de fréquence entre les réseaux A et B découplés	$E_{AB} = E_{f(A-B)} \frac{K_A K_B}{K_A + K_B} \quad (1)$	MM. Chevallier Holleville Passéieux
$E_A = \sqrt{m_A P_A}$ $E_B = \sqrt{m_B P_B}$ $m = m_A = m_B$	$E_{AB} = \frac{\sqrt{K_A^2 E_B^2 + K_B^2 E_A^2}}{K_A + K_B} \quad (2)$ $E_{AB} = \sqrt{m} \sqrt{P_A P_B} \frac{\sqrt{\frac{K_A^2}{P_A} + \frac{K_B^2}{P_B}}}{K_A + K_B} \quad (3)$	MM. Cahen Dejou
$S_A = \frac{2 P_A}{K_A}$ $S_B = \frac{2 P_B}{K_B}$	$E_{AB} = \sqrt{m} \sqrt{P_A P_B} \frac{\sqrt{\frac{P_A}{S_A^2} + \frac{P_B}{S_B^2}}}{\frac{P_A}{S_A} + \frac{P_B}{S_B}} \quad (4)$	M. Favez
$S = S_A = S_B$	$E_{AB} = \sqrt{m} \sqrt{\frac{P_A P_B}{P_A + P_B}} \quad (5)$	M. Ailleret

semble qu'un réglage satisfaisant peut être obtenu avec une valeur du facteur α de l'ordre de:

$$\alpha \text{ [MW/cycle]} = (0,15 \text{ à } 0,30) \frac{[P_0 \text{ [MW]}]}{100} \quad (7)$$

III. Fluctuations de la puissance d'échange

Les fluctuations constatées dans la puissance transmise par une interconnexion peuvent être classées en deux catégories³⁾, bien que celles-ci ne puissent pratiquement pas être distinguées de prime abord sur un relevé wattmétrique.

1. Il s'agit tout d'abord des variations voulues qui, par la loi fréquence-puissance, sont en relation avec les fluctuations de la fréquence. Elles correspondent à l'aide apportée par un réseau à l'autre en vue du maintien de la fréquence. Elles tendent à diminuer la tâche de réglage de chacun des réseaux. Toutefois, ces variations ne peuvent exactement être réalisées de la façon désirée que si elles sont lentes (période des variations de l'ordre d'une dizaine de minutes) et qu'elles peuvent de ce fait être assimilées à une succession de régimes permanents. Pour des variations plus rapides, c'est-à-dire de périodes plus courtes, qui donnent lieu à des régimes transitoires, le réglage devient imparfait à cause du retard apporté aux actions correctives du réglage (rapidité de réponse limitée).

2. Il subsiste donc un second genre de fluctuations qui ne sont ni voulues, ni entièrement corrigées par le réglage et qui proviennent des variations de consommation de la clientèle de l'ensemble des réseaux[3]. Ces variations sont de valeur relativement faibles et de période relativement courte; en outre, elles se compensent au moins partiellement d'un réseau à l'autre, si bien qu'elles ne donnent pas lieu à des variations sensibles de fréquence⁴⁾. A leur

sujet, le réglage n'est donc principalement sollicité que par le terme ΔP_i du binôme $(\Delta P_i + K_i \Delta f)$.

Plus la consommation de la clientèle des réseaux est mouvementée, plus les fluctuations en question sont importantes. Par contre, elles ne dépendent absolument pas de la valeur de consigne de la puissance d'échange; on ne peut donc pas les exprimer en pour-cent de cette valeur.

Diverses tentatives ont été effectuées en vue d'estimer par avance l'importance de ces fluctuations caractérisée par leur écart quadratique moyen (ou écart type) E_{AB} . Le tableau I donne quelques-unes des formules proposées par différents ingénieurs d'Electricité de France.

Ces cinq formules, qui sont d'ailleurs équivalentes, supposent que le réglage fréquence-puissance est appliqué selon le mode *indirect*, c'est-à-dire avec régulateur de réseau, et que la rapidité de réponse de ce régulateur est assez faible pour qu'il *n'intervienne pas du tout* vis-à-vis des fluctuations considérées, du second genre; seule l'action des régulateurs de vitesse est prise en compte.

Pour la première formule, le paramètre adopté est la valeur quadratique moyenne $E_{f(A-B)}$ de la différence entre les fréquences des deux réseaux lorsqu'ils fonctionnent isolément. Si la valeur de ce paramètre peut être déterminée par des mesures préalables, cette formule peut prétendre à la plus grande précision, à supposer que soient naturellement connues les énergies réglantes *naturelles* K_A et K_B des deux réseaux A et B .

Pour les quatre autres expressions, il a été admis que les écarts quadratiques moyens de la consommation de la clientèle de chacun des réseaux est proportionnelle à la racine carrée de la puissance mise en jeu:

$$E = \sqrt{m} \cdot \sqrt{P} \quad (8)$$

m étant un paramètre, dont la valeur qui s'exprime en kW est à déterminer par voie de statistique. La formule de M. Ailleret suppose en outre que les énergies réglantes *naturelles* des réseaux sont pro-

³⁾ Nous ferons ici abstraction d'un troisième genre de fluctuations de période très courte (peu supérieure à une seconde) qui ne sont pas justifiables du réglage et qui proviennent du couplage élastique des machines synchrones des réseaux.

⁴⁾ Si même la compensation était complète, il n'y aurait aucune cause de variation de fréquence.

portionnelles à leurs puissances, c'est-à-dire que les réseaux ont le même statisme résultant.

Si l'on applique cette dernière formule au contrôle d'un écart quadratique moyen de la puissance d'échange, calculé d'après des mesures effectuées sur une interconnexion, on en déduira une valeur du paramètre m qui ne sera exacte que si, selon l'hypothèse faite, le régulateur de réseau n'est pas intervenu au cours des fluctuations enregistrées. Si, au contraire, ce régulateur a développé une action — fût-elle d'un effet partiel — la valeur de m trouvée sera trop faible.

MM. Cahen et Dejou [1] ont articulé les chiffres suivants pour des réseaux européens :

$m = 30 \text{ kW}^5)$	les jours ouvrables
$m = 10 \text{ kW}$	les jours fériés.

IV. Etendue de la tâche de réglage

Faut-il chercher à réduire l'importance de ces fluctuations du second genre, en les soumettant à l'action du réglage, quitte à augmenter sa tâche, ou faut-il les laisser subsister, comme un bruit de fond, en économisant sur le recours au réglage ?

On ne saurait, à notre avis, répondre d'une façon absolue à cette question et il nous paraît nécessaire d'examiner chaque fois les avantages et les inconvénients auxquels l'une et l'autre de ces tendances risquent de conduire. Il est évidemment très flatteur d'avoir à disposition un réglage rapide et très efficace; mais ce n'est pourtant pas pour cette pure satisfaction de l'esprit qu'il faut encourir des ennuis pires que ceux que l'on a cherché à éviter.

Et tout d'abord quels peuvent être les inconvénients de ces fluctuations du second genre, dont nous nous occupons ?

1. On a fait ressortir que les pertes en ligne et celles auxquelles donnent lieu les transformateurs éventuellement insérés dans l'interconnexion, sont plus grandes quand la puissance d'échange oscillait autour d'une valeur moyenne, que lorsque cette valeur moyenne (égale à la valeur de consigne) était rigoureusement tenue. Ceci est bien exact; mais si les fluctuations de puissance qui subsistent demeurent dans des limites raisonnables, l'augmentation de ces pertes est minime et elle ne peut constituer un argument de poids pour plaider en faveur de la tendance à les faire disparaître.

2. Toujours avec la préoccupation d'assurer à la liaison l'utilisation la meilleure et la plus sûre, on a également évoqué les risques de déclenchement par surcharge temporaire de la ligne et effectivement de tels déclenchements se sont en pratique produits. Toutefois, les fluctuations du second genre en question, ne peuvent surcharger et décharger successivement les éléments de l'interconnexion qu'avec des périodes de variation relativement courtes, bien inférieures aux constantes de temps thermiques de ces éléments. Elles ne peuvent donc pas les mettre en danger par échauffement, étant donné les faibles variations de températures qu'elles sont susceptibles d'entraîner [4]. Il s'agit seulement d'un problème de protections à ajuster d'une façon convenable.

⁵⁾ Contre 40 à 45 kW pour les réseaux plus industrialisés des Etats Unis d'Amérique [1].

Par ailleurs, le seul moyen de réduire l'importance des fluctuations du second genre réside dans une rapidité de réponse plus poussée du réglage, c'est-à-dire dans une augmentation de la valeur du facteur α . Or, en ce qui concerne sa valeur *naturelle* (celle de chacun des régulateurs de vitesse), elle est déterminée par la mise au point du régulateur considéré, laquelle dans le cas des groupes hydro-électriques et pour des raisons de stabilité du réglage, exige en général un temps τ' caractéristique de la promptitude de l'ordre d'une à deux secondes au moins, parfois plus lorsqu'il s'agit d'unités difficiles à régler. Cette valeur *naturelle* du facteur α ne peut donc pas être impunément augmentée. Quant à sa valeur *imposée*, par le régulateur de réseau, laquelle intervient dans le mode *indirect* d'application du réglage fréquence-puissance, il n'y a pas d'intérêt à la rendre notablement plus grande que la valeur *naturelle*, vu que la rapidité de réponse à laquelle correspondrait une valeur *imposée* plus élevée, ne serait tout de même pas réalisée en régime transitoire, du fait du ralentissement apporté par la rapidité de réponse limitée des régulateurs de vitesse (valeur *naturelle* du facteur α [2]).

Enfin, il faut surtout considérer qu'en cherchant à augmenter la rapidité de réponse du réglage d'un groupe pris isolément, afin de rendre ce réglage plus efficace, on est inévitablement conduit à rendre les mouvements de vannage plus importants, plus fréquents et plus brutaux. On encourt dès lors le risque d'usures beaucoup plus prononcées des mécanismes de réglage et ceci vaut tant pour les groupes hydrauliques que pour les groupes thermiques qui peuvent être dotés d'une rapidité de réponse plus grande. En outre, pour les premiers de ces groupes qui sont alimentés par une (ou plusieurs) conduite forcée, des mouvements de vannage plus importants, plus fréquents et plus brutaux appellent, par coup de bâlier, de continues et sensibles variations de pression préjudiciables à la bonne conservation de cette conduite.

En résumé, le problème de l'étendue de la tâche du réglage, dans le sens de la gamme des fréquences de variations pour lesquelles il doit se montrer efficace, se révèle être une question de mesure. Il est certes indiqué de ne pas tolérer une importance exagérée des fluctuations du second genre de la puissance d'échange et, pour cela, de réaliser une rapidité de réponse suffisante du réglage du réseau. A cette fin, et surtout pour un réseau comportant principalement des groupes hydro-électriques, le meilleur moyen consiste à *multiplier* le nombre de groupes et de centrales appelées à participer au réglage, de manière à obtenir par addition des facteurs α individuels un facteur α résultant, dont la valeur convienne. Une autre considération à laquelle il y a lieu, dans ce sens, de s'attacher, est celle très importante de la sensibilité des régulateurs de vitesse à utiliser. Ce serait un leurre que de penser avoir recours à des régulateurs de vitesse anciens, de type périmé, pour les commander à partir d'un régulateur de réseau moderne, aux ordres duquel ils ne sauraient convenablement répondre.

Ceci dit et les fluctuations en question étant ramenées à des limites raisonnables, compatibles

avec la bonne utilisation et la sécurité de la liaison, ce serait à nos yeux une erreur de tendre à les réduire encore plus. Leur existence constitue *un avantage de l'interconnexion* parce qu'elles diminuent la tâche du réglage des réseaux. Vouloir se priver de cet avantage serait non seulement inutile, mais risquerait de mettre en péril le comportement à l'usage des groupes réglants et de leurs équipements annexes.

V. Essais effectués sur l'interconnexion de Chamoson

C'est pour explorer ce domaine des fluctuations du second genre constatées dans la puissance transmise par une interconnexion, que la Commission d'études de l'ASE pour le réglage des grands réseaux, a entrepris quelques essais. Ceux-ci ont commencé au poste de Chamoson, aimablement mis à sa disposition par la S. A. l'Energie de l'Ouest-Suisse (EOS) et où diverses interconnexions pouvaient être réalisées soit avec le réseau des Forces Motrices Bernoises (BKW) et par son intermédiaire avec les autres réseaux suisses alémaniques, voire avec le réseau allemand (RWE), soit avec le réseau d'Electricité de France (EdF).

Des relevés de la puissance d'échange et de la fréquence ont été simultanément enregistrés, au moyen du wattmètre et du fréquencemètre de haute précision de la Commission, avec une vitesse de déroulement de 60 mm par minute. La durée des relevés a été de cinq à six minutes et les échelles comprises, selon les essais:

pour la fréquence: entre 1 cm = 0,0275 Hz
et 1 cm = 0,0235 Hz

pour la puissance: entre 1 cm = 2,3 MW
et 1 cm \approx 1 MW

Les fig. 1, pour les essais du 14 février 1958, et 3, 4, 5 et 6 pour les essais du 12 mars 1959, sont des reproductions à échelle réduite de quelques-uns de ces relevés. On remarquera, notamment sur le relevé de puissance de la fig. 1, les oscillations

rapides de cette puissance (période peu supérieure à une seconde) dues au couplage élastique des machines synchrones du réseau. Elles n'ont été reportées, dans la reproduction, que sur deux petites fractions du relevé, tandis que sur le reste seul le trait moyen a été conservé. Les reproductions des fig. 3, 4, 5 et 6 sont par contre intégrales.

1. Essais du 14 février 1958

Au cours de ces essais, le réglage du réseau EOS (y compris les réseaux romands qui y sont rattachés) était assuré, selon le mode *direct* d'application du réglage fréquence-puissance, par un groupe de 35 MW de la Centrale de Chandoline, équipé d'un régulateur à tête électrique «Erelstat» des Ateliers des Charmilles. La mesure de la puissance d'échange était directement injectée, sous forme d'une tension continue, dans la tête électrique du régulateur.

L'énergie réglante d'interconnexion K_i a été ajustée, selon les essais, à 20 ou 30 MW/Hz. La valeur *naturelle* du facteur α , caractérisant la rapidité de réponse du groupe réglant, peut être estimée à environ 0,7 MW/cycle. Le rapport K_i/α de ces deux grandeurs était donc approximativement compris entre 30 et 40 s.

Le réseau EOS qui *fonctionnait ce jour comme importateur* était interconnecté:

pour l'essai n° 5

avec le réseau BKW et par son intermédiaire avec les autres réseaux suisses alémaniques, ainsi qu'avec le réseau allemand RWE,

pour l'essai n° 8

avec le réseau BKW et par son intermédiaire avec les autres réseaux suisses alémaniques, sans liaison avec des réseaux étrangers,

pour l'essai n° 11

avec le réseau EdF seul.

La fig. 1 est une reproduction des relevés enregistrés au cours de l'essai n° 11. Sur le relevé de

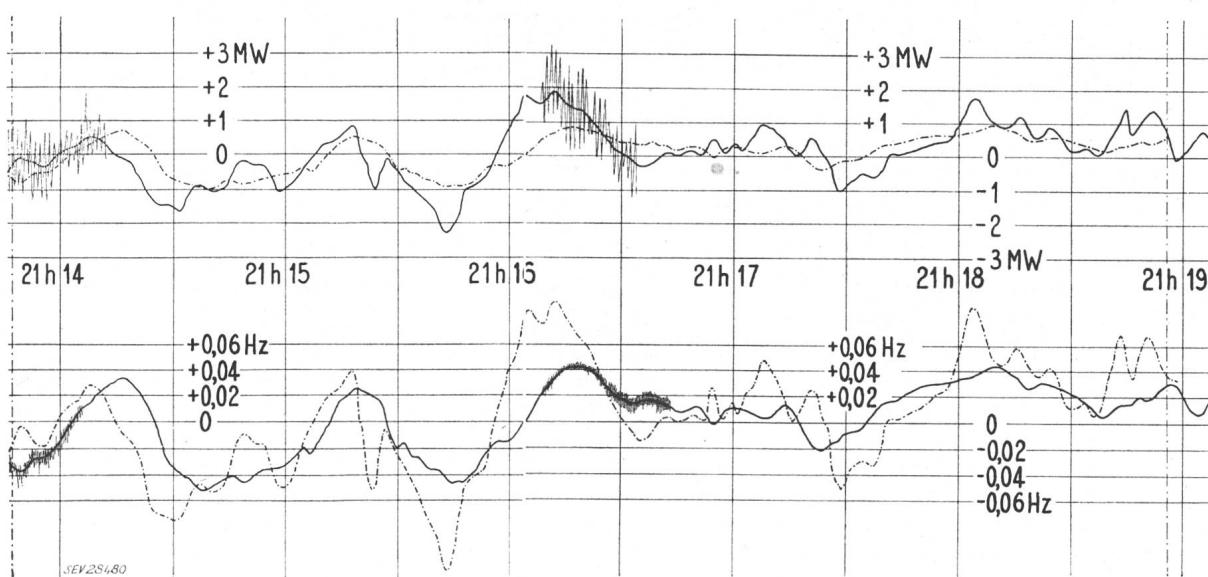


Fig. 1
Essai n° 11 — Chamoson le 14 février 1958

EOS fonctionnait ce jour comme importateur. Mode direct d'application du réglage fréquence-puissance
en haut: diagramme de la puissance
en bas: diagramme de la fréquence

puissance a été portée, en trait-point, la courbe de la valeur que la puissance aurait dû avoir (fluctuations du premier genre) pour réaliser exactement la loi fréquence-puissance, compte tenu des variations réelles de la fréquence. De même sur le relevé de fréquence, a été portée en trait-point la courbe de la valeur que la fréquence aurait dû avoir pour réaliser exactement la loi fréquence-puissance, compte tenu des variations réelles de la puissance.

La courbe (trait plein) de la valeur réelle de la puissance et celle (trait-point) de la valeur que la puissance aurait dû avoir, ont bien le même dessin général, ceci d'une façon plus marquée quand les variations sont lentes (de 21 h 14 min 30 s à 21 h 15 min 30 s et de 21 h 17 min à 21 h 18 min 30 s) que lorsqu'elles sont plus rapides (vers 21 h 16 min), ce à quoi il fallait s'attendre. Cette remarque prouve que l'action du réglage s'est exercée pendant l'enregistrement.

Essais de Chamoson du 14 février 1958

Tableau II

Essai	n° 11 EOS←EDF	n° 8 EOS←BKW	n° 5 EOS←BKW ↔RWE
Heure	21h14 - 21h19	20h45 - 20h50	17h38 - 17h43
Puissance moyenne à l'interconnexion MW environ	- 23	- 50	- 18
Energie réglante K_i MW/Hz	20	20	30
Ecart quadratique moyen de puissance MW	0,80	1,25	0,60
Ecart quadratique moyen de fréquence Hz	0,027	0,025	0,013
Moyenne quadratique des écarts de réglage (fluctuations du second genre): $(\Delta P_i + K_i \Delta f)$			
en puissance . . . MW	0,6	1,11	0,6
en fréquence . . . Hz	0,03	0,055	0,02
en % de 50 Hz	0,06	0,11	0,04

La différence d'ordonnées entre les deux courbes représente l'écart de réglage (fluctuations du second genre), à savoir la valeur du binôme $(\Delta P_i + K_i \Delta f)$ qui devrait théoriquement être nulle. Le tableau II, ci-dessus, donne le résultat des calculs effectués, sur la base des relevés, pour les écarts de puissance, les écarts de fréquence et les écarts de réglage, en valeurs quadratiques moyennes. L'ensemble de ces résultats se révèle satisfaisant, puisque la moyenne quadratique des écarts de réglage évalués en Hz et rapportée à la fréquence de consigne de 50 Hz ne dépasse pas 0,1%.

La puissance mise en jeu dans le réseau EOS était d'environ 250 MW et celle des réseaux suisses alémaniques d'environ 1350 MW; quant à celle des réseaux EdF ou RWE, elle peut être pratiquement considérée comme infinie par rapport à celle du réseau EOS. Le mode d'application du réglage fréquence-puissance n'ayant pas été celui *indirect*, aucune des formules du tableau I n'est logiquement applicable. Notons toutefois, à titre de simple indication, que si à l'aide de la formule 5 du tableau précédent, on calcule les valeurs atteintes par le paramètre m , on trouve:

pour les essais n° 11 et 5: $m = 1,5$ à 2,5 kW

pour l'essai n° 8: $m = 7,5$ kW

Ces chiffres sont bien inférieurs à ceux cités par MM. Cahen et Dejou, mais — nous le répétons — pour d'autres conditions de fonctionnement du réglage.

2. Essais du 12 mars 1959

Au cours de ces essais, le réglage du réseau EOS a été encore assuré par le même groupe de la Centrale de Chandoline que celui utilisé le 14 février 1958. Toutefois, le réglage fréquence-puissance a été successivement appliqué, selon le mode *direct*, puis selon le mode *indirect*. Pour le mode direct, les dispositions sont restées celles exposées sous 2. Pour le mode indirect, il a été fait appel à un régulateur de réseau Brown-Boveri du type électro-magnétique, installé à la Centrale de Chandoline. L'ordre de réglage émis par ce régulateur était directement injecté, sous forme d'une tension continue, dans la tête électrique du régulateur de vitesse.

Le régulateur de réseau réalisait une corrélation d'intégrale, entre l'écart sur la fréquence complexe $\Delta f'$ [voir équation (6)] et la variation d'ordre Δo ⁶⁾:

$$\Delta o = \alpha \int \Delta f' dt \quad (8)$$

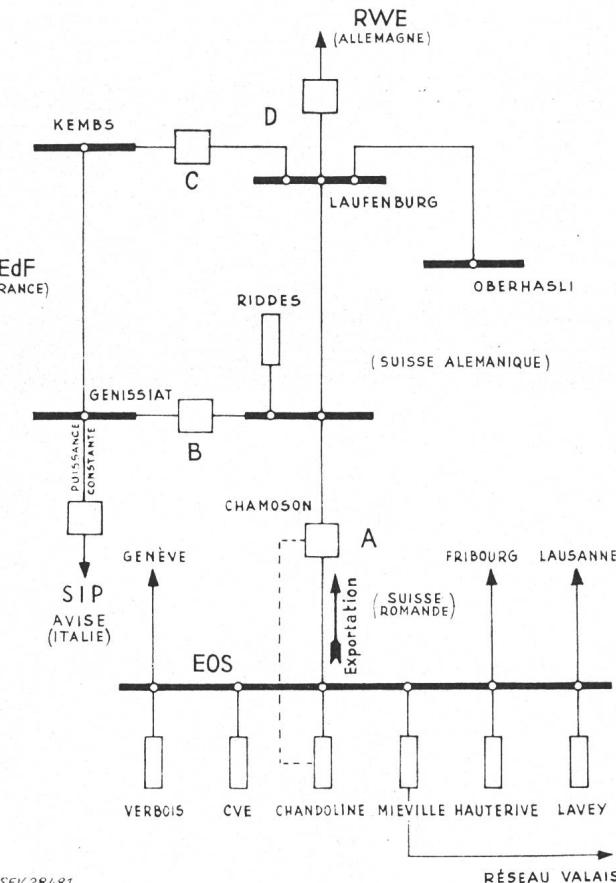


Fig. 2
Essais de Chamoson du 12 mars 1959

Schéma des interconnexions

Chandoline	règle	A
EdF	règle	B + C
Oberhasli	règle	B + C + D
RWE	règle	D

⁶⁾ Variation d'ordre exprimée en variation de puissance (en MW) que le groupe réglant doit accomplir.

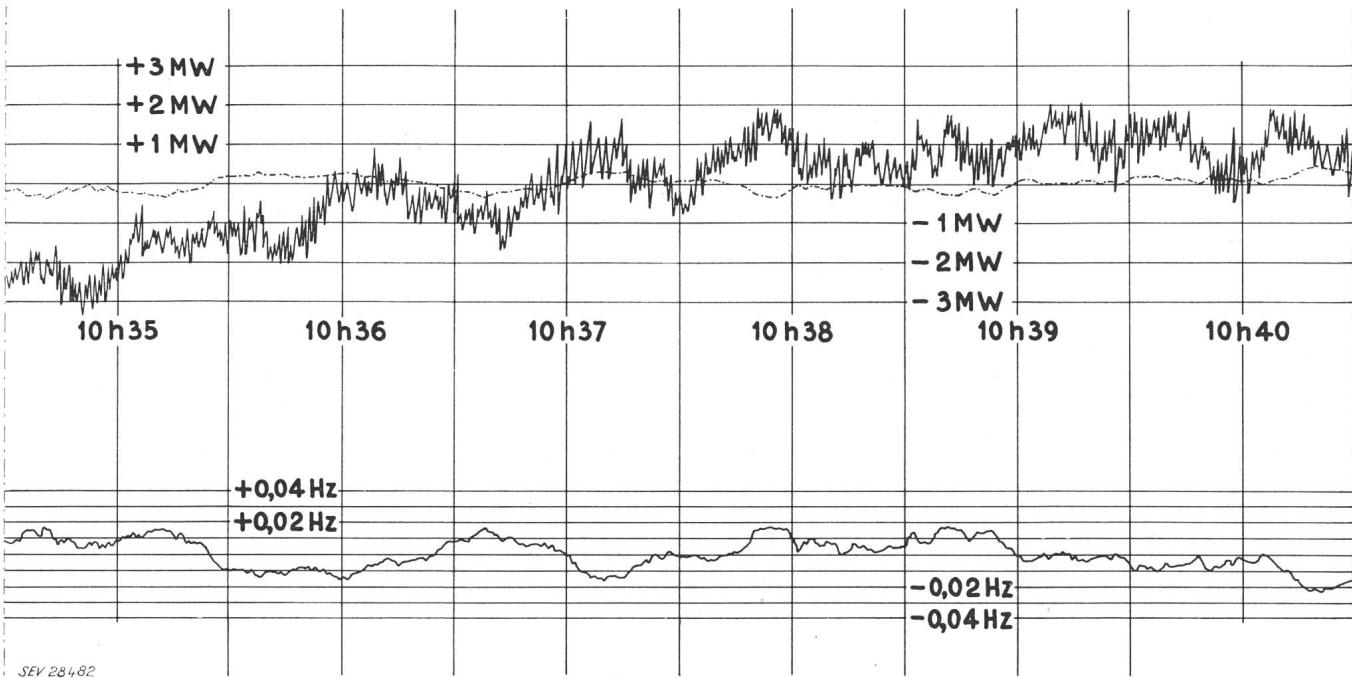


Fig. 3
Essai n° 1 — Chamonson le 12 mars 1959

EOS fonctionnait ce jour comme exportateur. Mode indirect d'application du réglage fréquence-puissance
en haut: diagramme de la puissance
en bas: diagramme de la fréquence

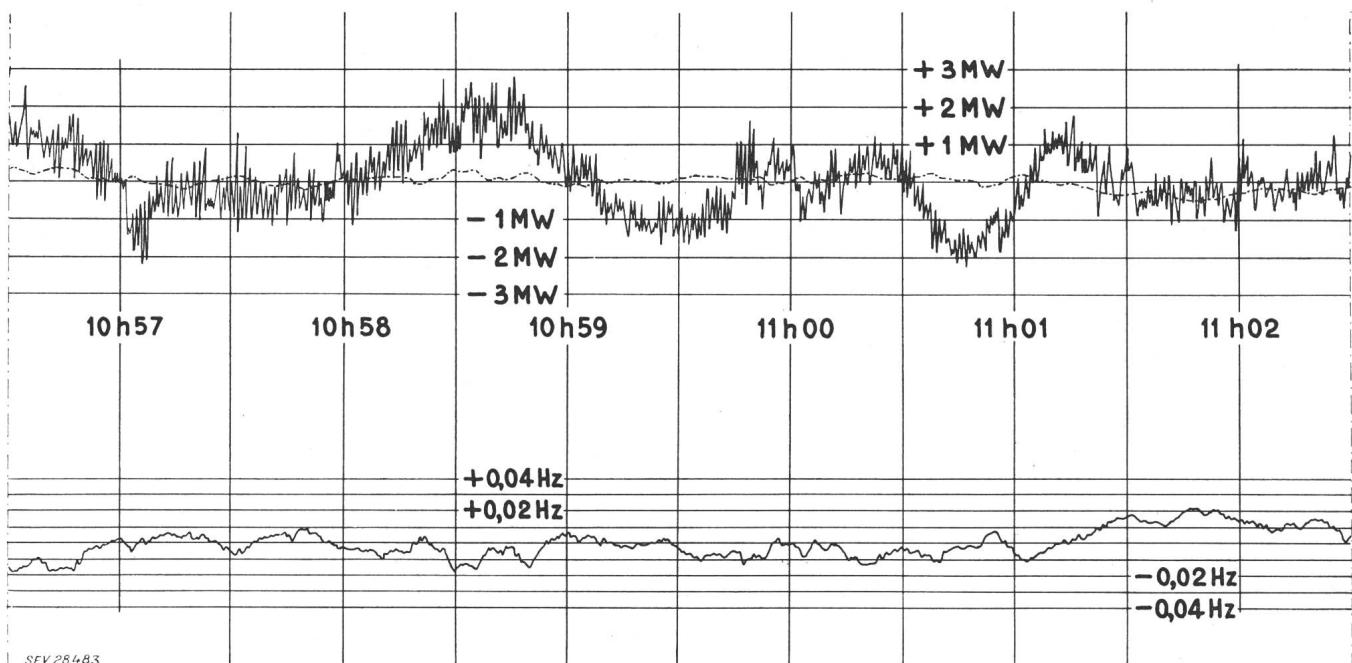


Fig. 4
Essai n° 2 — Chamonson le 12 mars 1959

EOS fonctionnait ce jour comme exportateur. Mode direct d'application du réglage fréquence-puissance
en haut: diagramme de la puissance
en bas: diagramme de la fréquence

la valeur du facteur α (valeur imposée) étant ajustée à 1,5 MW/cycle, supérieure à la valeur naturelle $\alpha = 0,7$ MW/cycle du régulateur de vitesse. Le régulateur de réseau réalisait en outre une corrélation complémentaire de proportion:

$$\Delta o = \beta \Delta f' \quad (9)$$

la valeur du facteur β ayant été ajustée à 100 MW/Hz.

L'énergie réglante d'interconnexion K_i a été fixée selon les essais à 20 MW/Hz ou à 60 MW/Hz. Le rapport K_i/α (valeur imposée de α) était donc approximativement comprise entre 13 et 40 s.

Le réseau EOS fonctionnait ce jour comme exportateur et était interconnecté, par l'intermédiaire du réseau EdF, à l'ensemble des réseaux européens (y compris les réseaux suisses alémaniques), ceci selon le schéma de la fig. 2.

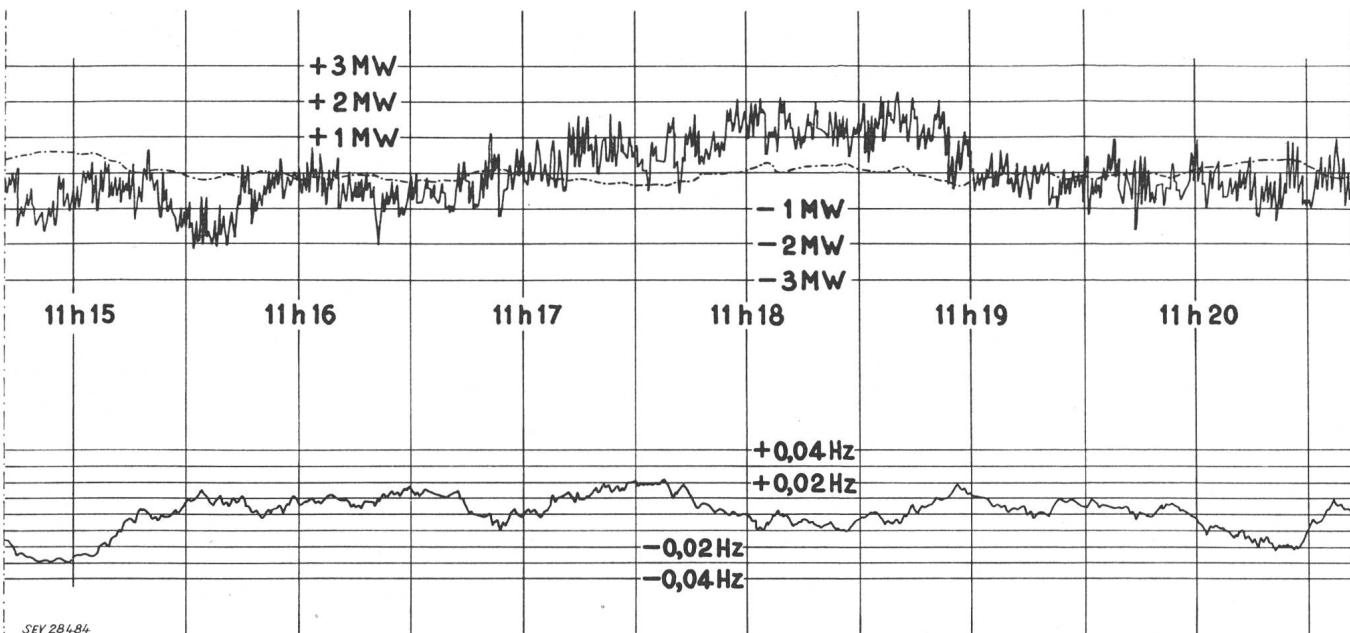


Fig. 5
Essai n° 3 — Chamoson le 12 mars 1959

EOS fonctionnait ce jour comme exportateur. Mode indirect d'application du réglage fréquence-puissance
en haut: diagramme de la puissance
en bas: diagramme de la fréquence

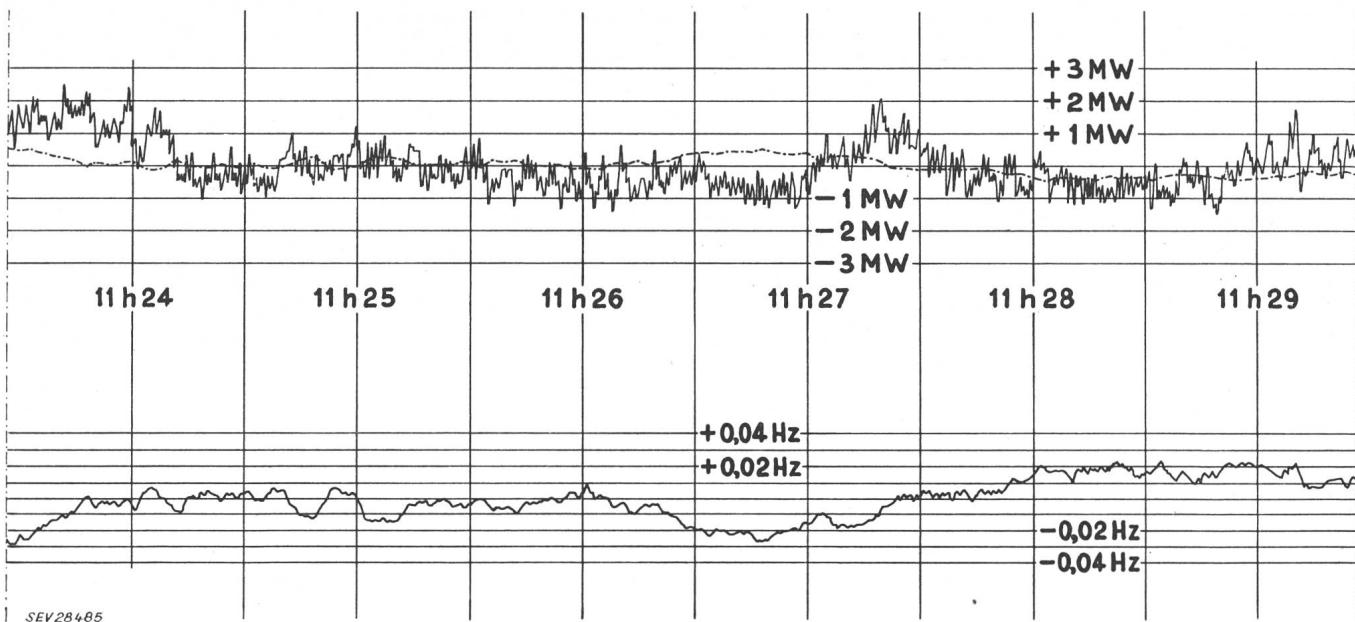


Fig. 6
Essai n° 4 — Chamoson le 12 mars 1960

EOS fonctionnait ce jour comme exportateur. Mode direct d'application du réglage fréquence-puissance
en haut: diagramme de la puissance
en bas: diagramme de la fréquence

EOS réglait donc l'interconnexion A (Chamoson), EdF la somme de ses interconnexions B et C avec la Suisse, Oberhasli la somme des interconnexions B, C et D de la Suisse avec la France et l'Allemagne, RWE son interconnexion D avec la Suisse.

Les fig. 3, 4, 5 et 6 sont des reproductions des relevés enregistrés au cours des essais n° 1, 2, 3 et 4, chacun de six minutes, pendant lesquels ont été successivement appliqués le mode direct (Essais n° 2, 4 et 5), puis le mode indirect (Essais n° 1, 3 et 6). Comme sur le relevé de puissance de la fig. 1, sur celui de ces figures a été portée la courbe de la

valeur que la puissance aurait dû avoir pour réaliser exactement la loi fréquence-puissance, compte tenu des variations réelles de la fréquence.

Le tableau III ci-dessous donne le résultat des calculs effectués, sur la base des relevés, pour les écarts de puissance, les écarts de fréquence et les écarts de réglage (fluctuations du second genre) en valeurs quadratiques moyennes. L'ensemble de ces résultats sont aussi satisfaisants que ceux du 14 février 1958, puisque la moyenne quadratique des écarts de réglage évalués en Hz et rapportés à la fréquence de 50 Hz reste en général inférieur à 0,1%.

Tableau III

Essai	n° 1	n° 2	n° 3	n° 4	n° 5	n° 6
Heure	Environ 10 h 35 à 10 h 40	Environ 10 h 57 à 11 h 02	Environ 11 h 15 à 11 h 20	Environ 11 h 24 à 11 h 29	Environ 11 h 41 à 11 h 46	Environ 11 h 54 à 11 h 59
Mode d'application du réglage fréquence-puissance	indirect	direct	indirect	direct	direct	indirect
Puissance moyenne à l'interconnexion environ. . . . MW	40	42	44	48	48	45
Energie réglante K_i MW/Hz	20	20	20	20	60	60
Ecart quadratique moyen de puissance MW	1,16	0,86	0,78	0,70	0,83	1,46
Ecart quadratique moyen de fréquence Hz	0,010	0,009	0,011	0,012	0,012	0,016
Moyenne quadratique des écarts de réglage (fluctuations du second genre): ($\Delta P_i + K_i \Delta f$)						
en puissance MW	1,11	0,81	0,85	0,69	1,35	1,44
en fréquence Hz	0,056	0,041	0,042	0,034	0,022	0,024
en % de 50 Hz	0,111	0,081	0,085	0,069	0,045	0,048

Il est spécialement intéressant de remarquer que les résultats obtenus avec le mode *indirect* sont pratiquement équivalents à ceux obtenus avec le mode *direct*. Nous attribuons cette heureuse constatation au fait déjà souligné que l'ordre émis par le régulateur de réseau est *directement* injecté dans la tête électrique du régulateur de vitesse, sans aucun dispositif intermédiaire (transformant l'ordre électrique en un mouvement mécanique), tel que ceux auxquels il est nécessaire d'avoir recours pour des régulateurs de vitesse à tête mécanique.

La puissance mise en jeu dans le réseau EOS était d'environ 300 MW; quant à celle des autres réseaux européens interconnectés, elle peut être considérée comme infinie, par rapport à celle du réseau EOS. Dès lors, si à l'aide de la formule 5 du tableau I, qui de ce fait se réduit à:

$$E_{AB} = \sqrt{m} \cdot \sqrt{P_{EOS}} = E_{EOS}$$

on calcule les valeurs atteintes par le paramètre m , on trouve des chiffres compris entre 1,7 kW (Essai n° 4) et 7 kW (Essai n° 6), de nouveau bien inférieurs à ceux indiqués par MM. Cahen et Dejou [1] pour des jours ouvrables. Or, il ne nous paraît pas possible qu'une telle différence puisse s'expliquer par une variabilité de la consommation de la clientèle du réseau EOS qui serait, dans ces proportions, moindre que celle des réseaux considérés par les auteurs précités. Il faut donc, à notre avis, en chercher la raison dans le fait qu'au cours des fluctuations enregistrées, le réglage est intervenu⁷⁾ et que le groupe réglant de Chandoline a, en conséquence, subvenu — fût-ce partiellement — aux variations de la consommation du réseau EOS. La confirmation de cette hypothèse ressort de l'examen

⁷⁾ Voir chapitre III.

de certains relevés effectués à l'aide d'un wattmètre enregistreur à déroulement rapide qui était branché aux bornes de l'alternateur du groupe réglant. Ce wattmètre enregistreur n'a malheureusement pas pu être mis régulièrement en service pendant toute la durée des essais, mais les quelques relevés enregistrés montrent que les variations maximales de la puissance fournie par le groupe réglant ont été de l'ordre de ± 1 MW.

VI. Conclusions

Les essais décrits ont montré qu'un réseau d'environ 300 MW, dont le mouvement de la consommation est comparable à celui de la clientèle du réseau EOS, peut être convenablement réglé avec une rapidité de réponse du réglage caractérisée par une valeur du facteur α de l'ordre de 0,7 MW/cycle:

$$\alpha = 0,23 \frac{(P_0 = 300 \text{ MW})}{100} \approx 0,7 \text{ MW/cycle} \quad (7')$$

Les fluctuations de puissance observées à l'interconnexion, restent ainsi dans des limites raisonnables.

Ce résultat devrait évidemment être confirmé par d'autres essais, effectués sur d'autres interconnexions. S'il se révélait en moyenne exact, on pourrait en tirer la règle approximative suivante.

En comptant prudemment et en moyenne, pour un groupe hydro-électrique, sur en temps $\tau' = 1,5$ s caractéristique de la promptitude de son réglage, on obtient pour le facteur α correspondant à sa rapidité de réponse la valeur de:

$$\alpha = \frac{P_g}{\tau' f_0} = 1,33 \frac{P_g}{100} \quad (5')$$

On en déduit [équations (5') et (7')] que la puissance ($\sum P_{gi}$) des groupes réglants (en service et non compris la réserve), devrait être de l'ordre de 17% ($0,23 = 1,33 \cdot 0,17$) de la puissance mise en jeu dans le réseau considéré. Cette proportion est supérieure à celle résultant d'expériences étrangères, il est vrai dans des cas où la production comporte des groupes thermiques qui peuvent être dotés d'une rapidité de réponse plus élevée.

Cette considération relative à la puissance des groupes réglants est indépendante de celle de leur bande de réglage, dont il y a aussi lieu de tenir compte. Si par exemple, cette bande était, toujours en moyenne, de 20%, et que la puissance des groupes réglants représentait les 17% de celle mise en jeu dans le réseau, les groupes réglants pourraient subvenir à des variations, correspondant à la dentelle de la consommation, de 3,4%, chiffre qui nous paraît, d'une manière générale, amplement suffisant.

Quoiqu'il en soit, étant donné la proportion et donc l'importance que doit atteindre la puissance des groupes réglants, on voit tout l'intérêt qu'il y a à en multiplier le nombre, de manière à réduire la tâche de réglage de chacun d'entre eux, et à avoir, par conséquent, recours à plusieurs centrales du réseau. Or, ces conditions ne peuvent pratiquement et économiquement être réalisées qu'en ayant recours au mode *indirect* d'application du réglage fré-

quence-puissance [2], c'est-à-dire en faisant emploi d'un régulateur de réseau. Les essais du 12 mars 1959 ayant démontré l'équivalence des résultats du mode *indirect* et du mode *direct*, nous ne saurions donc assez chaudement recommander l'utilisation du premier d'entre eux. Ajoutons, pour terminer, que les régulateurs de vitesse auxquels il y a lieu d'avoir recours pour accomplir les ordres émanant du régulateur de réseau, doivent être bien adaptés à ce genre de service. Les régulateurs de vitesse à tête électrique qui permettent l'injection directe de l'ordre sous forme d'une tension — sans aucun dispositif intermédiaire, cause d'inévitables retards — méritent d'être à cet égard particulièrement préconisés.

Bibliographie

- [1] Cahen, F. et A. Dejou: Le contrôle automatique de la marche en parallèle de très vastes ensembles d'interconnexion. Bull. Soc. franç. Electr. 7^e série, t. 8(1958), n° 92, p. 463...478.
- [2] Gaden, D.: Les divers modes d'application du réglage fréquence-puissance. Bull. ASE t. 49(1958), n° 13, p. 576...583.
- [3] Juillard, E.: Influence des variations de tension et de fréquence sur la charge absorbée par les consommateurs. Bull. ASE t. 49(1958), n° 13, p. 570...576.
- [4] Renchon, R. et G. Daumerie: Image thermique de ligne aérienne. Conférence internationale des Grands Réseaux électriques à haute tension (CIGRE) 16^e session 1956, t. 3, rapp. 303.
- Cuénod, M. et R. Renchon: Le contrôle de la surcharge des lignes aériennes par image thermique. Bull. ASE t. 48(1957), n° 12, p. 564...566; 575...579.

Adresse de l'auteur:

D. Gaden, professeur, directeur des Ateliers des Charmilles S. A., Genève.

Berücksichtigung der Impedanz des Messbelages bei Verlustfaktormessungen

Von F. Deutsch, Wettingen

621.317.374 : 621.317.733.011.4

In der Arbeit wird der Einfluss von Messbelägen mit verteilter Impedanz auf Verlustfaktormessungen untersucht. Zu diesem Zwecke werden zuerst allgemeine Formeln für die Ersatzimpedanz des Kreises impedanzbehafteter Messbelag-Dielelektrika hergeleitet. Dabei werden zwei in der Praxis vorkommende Anschlussmöglichkeiten berücksichtigt. Aus den gefundenen Formeln und den Abgleichbedingungen der Schering-Brücke wird der Messfehler, welcher von der Impedanz des Messbelages herrührt, berechnet und die Anwendung der abgeleiteten einfachen Ausdrücke an einem numerischen Beispiel gezeigt.

L'auteur examine l'influence d'armatures à impédance répartie sur les mesures du facteur de pertes. Dans ce but, il établit tout d'abord des formules générales pour l'impédance équivalente du circuit constitué par les armatures de mesure à impédance et le diélectrique, en tenant compte de deux possibilités de connexion usuelles. A l'aide de ces formules et des conditions d'équilibre du pont de Schering, il calcule l'erreur de mesure résultant de l'impédance des armatures, puis il indique par un exemple numérique l'emploi des expressions simples ainsi obtenues.

1. Einleitung

Befindet sich ein festes Isoliermaterial in einem elektrischen Wechselfeld, so erwärmt es sich («dielektrische Verluste»). Die dielektrischen Verluste sind weit grösser, als es der Ohmschen Leitfähigkeit des Materials entsprechen würde; zusätzlich zu den Jouleschen Verlusten sind die Reibungsverluste durch die Umorientierung der polarisierten Moleküle und die Verluste durch Glimmen in Lufteinschlüssen des Dielektrikums für die Erwärmung verantwortlich.

Im allgemeinen nehmen die dielektrischen Verluste mit steigender Temperatur und steigender Feldstärke zu. Eine Folge davon ist der sog. «Wärmedurchschlag». Das elektrische Feld erzeugt im Dielektrikum Wärme; im stationären Zustand wird die gesamte Verlustwärme an die Umgebung abgegeben, wozu ein Temperaturgradient zu den Endflächen des Dielektrikums notwendig ist, d. h. seine Innentemperatur ansteigen muss. Die erhöhte Innentemperatur verursacht höhere Verluste, diese erhöhen wiederum die Temperatur usw., bis sich schliesslich ein Gleichgewichtszustand einstellt. Überschreitet jedoch die Spannung einen gewissen kritischen Wert, so stellt sich kein Gleichgewicht ein, Verluste und Innentemperatur schaukeln sich gegenseitig hoch, bis es zur Zerstörung der Isolation kommt. Die Kippsspannung ist eine wichtige Konstante des Isolierstoffes [1]¹⁾.

Sind in einer Isolation Lufteinschlüsse vorhanden, so beginnen diese von einer gewissen Feldstärke an zu glimmen; die Verluste werden dadurch wesentlich höher. Die Kurve der dielektrischen Verluste in Funktion der Spannung zeigt einen Knick nach

oben («Ionisationsknick») und deutet damit auf das Vorhandensein von unerwünschten Lufteinschlüssen im Dielektrikum hin.

Die Messung der dielektrischen Verluste einer Isolation in Funktion der Spannung und Temperatur gibt also einen wichtigen Hinweis für die Beurteilung ihrer Güte; folgende Rechnung zeigt, wie man die Verluste erfassen kann.

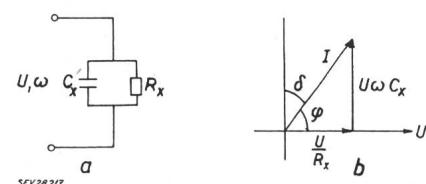


Fig. 1
Ersatzschema (a) und Vektordiagramm (b) eines verlustbehafteten Dielektrikums

U angelegte Wechselspannung mit der Kreisfrequenz ω ; C_x , R_x Kapazität und Ohmscher Ersatzwiderstand des Dielektrikums; I durch das Dielektrikum fliessender Strom, gegenüber der Spannung U um den Winkel φ phasenverschoben; δ Komplementärwinkel zu φ (Verlustwinkel)

Das Ersatzschema eines nicht verlustfreien Dielektrikums werde durch die Parallelschaltung eines Kondensators C_x und eines Ohmschen Widerstandes R_x dargestellt (Fig. 1a). Bei Einwirkung einer Wechselspannung vom Effektivwert U und der Kreisfrequenz ω sind die Verluste P im Dielektrikum — im Ersatzschema die Verluste im Widerstand R_x (Fig. 1b):

$$P = \frac{U^2}{R_x} = U^2 \omega C_x \operatorname{ctg} \varphi = U^2 \omega C_x \operatorname{tg} \delta \quad (1a)$$

Dann ist (mit $B = U^2 \omega C_x$ = Blindleistungsaufnahme des Dielektrikums):

¹⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.