

Zeitschrift:	Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber:	Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band:	54 (1963)
Heft:	2
Artikel:	Nouveaux résultats d'essais : concernant le rapport existant entre les variations de la charge consommée par la clientèle d'un réseau et les variations de fréquence qui en résultent
Autor:	Goden, D.
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-916448

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)

Nouveaux résultats d'essais

concernant le rapport existant entre les variations de la charge consommée par la clientèle d'un réseau et les variations de fréquence qui en résultent

Compte rendu des essais effectués par la Commission d'études de l'ASE pour le réglage des grands réseaux (D. Gaden)

621.311.153.2

La considération des variations de la charge consommée par la clientèle d'un réseau et des variations consécutives de la fréquence conduit à l'obtention de précieux renseignements. Elle permet tout d'abord de se rendre compte de l'importance relative des variations de charge du réseau, définie par leur écart quadratique moyen et la répartition (spectre) de ce dernier selon les fréquences avec lesquelles ces variations se produisent. Elle renseigne ensuite sur les caractéristiques qu'il est nécessaire de donner au réglage pour maintenir l'écart quadratique moyen de fréquence à une valeur limite déterminée.

Die Betrachtung der durch die Verbraucher eines Netzes verursachten Laständerungen und als Folge davon der Frequenzänderungen führt zu wertvollen Erkenntnissen. Einmal kann man sich über die relative Wichtigkeit der Netlaständerungen, welche durch die mittlere quadratische Abweichung dieser Änderungen und die Verteilung (das Spektrum) dieser Abweichung gemäß den Frequenzen, bei welchen die Änderungen vorkommen, gekennzeichnet sind, ein Bild machen. Ferner erhält man Auskunft über die Charakteristiken, die man der Regelung zu Grunde zu legen hat, damit ein bestimmter Grenzwert der mittleren quadratischen Frequenzabweichung aufrecht erhalten bleibt.

1. Introduction

L'étude du rapport existant entre les variations de la charge consommée par la clientèle d'un réseau et les variations de fréquence qui en résultent — ou plus exactement entre les écarts quadratiques moyens de ces variations — a déjà fait l'objet de publications et d'essais entrepris par la Commission d'études de l'ASE pour le réglage des grands réseaux. Nous prions nos lecteurs de se reporter à ce sujet aux articles [1; 2] mentionnés dans la bibliographie à la fin de l'article, ainsi qu'à ceux qui les ont précédés et qui y sont cités.

Dans le cadre des études qui avaient été élaborées, les essais en question ont été effectués sur un réseau — celui de la Ville de Lausanne — alimenté par une unique Centrale — celle de Chandoline d'E.O.S. — ceci notamment pour déterminer les caractéristiques du réglage de cette Centrale. Ils pourraient être étendus au cas de l'alimentation par plusieurs Centrales, réserve faite des possibilités de mesure de la charge consommée par la clientèle du réseau.

L'intérêt des résultats de ces essais fut d'abord de montrer la bonne concordance de l'allure des spectres obtenus, pour les variations de charge et les variations de vitesse (fréquence de la tension alternative du réseau), avec celle que la théorie permet de prévoir. En outre, par l'utilisation de ces spectres, nous avons pu établir les caractéristiques du réglage de la Centrale, sous forme de sa transmittance harmonique ou facteur de transfert du circuit de réglage. Cette transmittance est le rapport des amplitudes des variations de vitesse aux amplitudes des variations de charge, en régime sinusoïdal entretenu, ce rapport étant une fonction de la fréquence de ce régime. Chacune des parties extrêmes de la courbe figurative de la transmittance, admet une asymptote; l'une permet de calculer la promptitude du

réglage, c'est-à-dire sa rapidité de réponse, l'autre l'inertie spécifique des masses tournantes, en d'autres termes leur temps de lancer. Le niveau et la forme de la courbe autour de son maximum, compris entre les deux asymptotes, caractérisent l'amortissement du réglage.

L'encouragement apporté par ces résultats des premiers essais de Lausanne-Chandoline, a conduit la Commission d'études pour le réglage des grands réseaux à en entreprendre une seconde série. Elle fut effectuée sur le réseau de la Ville de Fribourg, alimenté par la Centrale de Hauterive des Entreprises Électriques Fribourgeoises. Le but de cette note est de présenter leurs résultats et de les commenter.

2. Généralités

Nous ne reviendrons pas ici en détail sur les trois documents caractéristiques du réglage, que nous serons amenés à considérer:

a) Le spectre des variations Δp_r de charge, à savoir leur densité énergétique spectrale $A_p(\nu)$, fonction de la fréquence ν avec laquelle ces variations se produisent. Le carré moyen des écarts de charge (carré de l'écart quadratique moyen), de la fréquence ν_1 à la fréquence ν_2 , s'obtient par intégration entre ces deux limites de la fonction $A_p(\nu)$:

$$\left| \overline{[\Delta p_r(t)]^2} \right|_{\nu_1}^{\nu_2} = \int_{\nu_1}^{\nu_2} A_p(\nu) d\nu \quad (1)$$

Ce document correspond aux données du réglage, c'est-à-dire à la façon dont les perturbations évoluent.

b) Le spectre des variations $\Delta \omega$ de vitesse (fréquence de la tension alternative du réseau), à savoir leur densité énergétique spectrale $A_\omega(\nu)$, fonction de la fré-

quence ν avec laquelle ces variations se produisent. Le carré moyen des écarts de vitesse, de la fréquence ν_1 à la fréquence ν_2 , s'obtient par intégration entre ces deux limites de la fonction $A_\omega(\nu)$:

$$\overline{[\Delta\omega(t)^2]}_{\nu_1}^{\nu_2} = \int_{\nu_1}^{\nu_2} A_\omega(\nu) d\nu \quad (2)$$

Ce document correspond aux résultats du réglage, c'est-à-dire à la façon dont la grandeur réglée: la vitesse, témoigne d'écarts par rapport à sa valeur de consigne.

c) La transmittance harmonique $g(\nu)$ du circuit de réglage, précédemment définie et fonction de la fréquence ν du régime sinusoïdal considéré. Elle renseigne sur les possibilités du réglage, en permettant de passer de la densité énergétique spectrale $A_p(\nu)$ des variations de charge, à la densité énergétique spectrale $A_\omega(\nu)$ des variations de vitesse, au moyen de la relation:

$$A_\omega(\nu) = A_p(\nu) \cdot [g(\nu)]^2 \quad (3)$$

Précisons que les grandeurs Δp_r et $\Delta\omega$ sont exprimées en valeurs relatives par rapport aux moyennes temporelles de charge et de vitesse.

Si les documents a) et b) sont déterminés par l'expérience, on peut en déduire le document c) caractérisant les possibilités du réglage.

Si les documents a) et c) sont connus, on peut en déduire le document b) caractérisant les résultats à attendre du réglage: le comportement de la vitesse.

Nos lecteurs trouveront dans les articles [1; 2] les explications nécessaires relatives à ces trois documents.

3. Conditions des essais

Les essais en question ont eu lieu le jour ouvrable du vendredi 11 décembre 1959. La valeur moyenne de la charge absorbée mesurée à la Centrale de Hauterive était de 11 MW et la puissance correspondante était fournie par le groupe N° 5 de ladite centrale sans aucune liaison extérieure (fig. 1).

Il s'agit d'un groupe de 17,8 MW de puissance nominale tournant à 300 t./min et comprenant un alternateur doté d'un PD^2 de 500 tm^2 . Pour contrôler cette valeur de l'inertie résultant d'un calcul du constructeur, nous avons effectué un relevé de la vitesse du groupe lors d'une décharge brusque. La fig. 2 est une reproduction (à échelle réduite) du tachygramme enregistré lors d'une coupure de 12,2 MW à zéro. Ce relevé témoigne d'un léger défaut à l'origine qui se révèle par l'arrondi avec lequel il commence et qui est dû au filtre interposé entre la dynamo tachymétrique et l'enregistreur. La détermination de l'accélération au départ ne doit pourtant pas être entachée d'erreur appréciable. Elle s'élève à 9,55% par seconde. On en déduit que le temps de lancer est de $1/9,55 = 10,4$ s pour 12,2 MW ou de 11,6 s pour 11 MW. Cette valeur correspond d'une façon satisfaisante avec le résultat du calcul si l'on tient compte de l'inertie complémentaire qu'apporte la roue de turbine.

Les enregistrements des variations Δp_r de puissance et des variations $\Delta\omega$ de fréquence (vitesse) ont été relevés à l'aide du wattmètre et du fréquencemètre de haute précision de la Commission, avec une vitesse de déroulement de 240 mm/min, soit de 4 mm/s. Les échelles des ordonnées étaient les suivantes:

Puissance: 1 cm = 1,91% de la puissance moyenne
Fréquence (vitesse): 1 cm = 0,125% de la fréquence de consigne.

Quatre échantillons longs de relevés, chacun d'environ 5 min, ont été retenus pour effectuer les calculs:

relevé de 11.04 à 11.09 h
relevé de 11.09 à 11.14 h
relevé de 15.07 à 15.12 h
relevé de 15.15 à 15.20 h

En outre, dans chacun de ces échantillons, il a été retenu des relevés courts d'environ une minute chacun:

relevé de 11.06 à 11.07 h
relevé de 11.11 à 11.12 h
relevé de 15.09 à 15.10 h
relevé de 15.17 à 15.18 h

Les ordonnées des échantillons longs ont été lues tous les 8 mm (2 s). Ces lectures ont permis d'explorer la gamme des fréquences de variations de $\nu = 0,0115$ Hz à $\nu = 0,0992$ Hz.

Les ordonnées des échantillons courts ont été lues tous les 2 mm (0,5 s). Ces lectures ont permis d'explorer la gamme des fréquences de variations de $\nu = 0,0435$ Hz à $\nu = 0,3768$ Hz.

A l'aide de ces lectures, les enregistrements ont été développés en série de Fourier. Le calcul des coefficients c (amplitudes) correspondant, dans les gammes précitées, à chaque fréquence ν , c'est-à-dire à chaque harmonique, a été effectué à l'aide de la calculatrice électronique Zébra de l'Institut de mathématiques appliquées de l'Ecole polytechnique de l'Université de Lausanne.

A partir de ces coefficients c , exprimés en % (et non en centimètres), on a déterminé avec une approximation suffisante la densité énergétique spectrale $A(\nu)$ en appliquant la formule:

$$A(\nu) = \frac{1}{d} \cdot \frac{c^2}{2} = T_s \frac{c^2}{2} \quad [\%^2 \text{ s}] \quad (4)$$

T_s étant le temps en secondes correspondant à la longueur de l'échantillon et par conséquent $d = 1/T_s$ l'écart en Hz entre les fréquences ν_n et ν_{n+1} de deux harmoniques consécutifs.

Sur la base des chiffres ainsi obtenus, nous avons effectué, pour chacun des échantillons (longs et courts) des moyennes de densité énergétique spectrale par bandes successives de fréquences correspondant aux limites et aux moyennes de fréquences suivantes:

Fréquences limites en Hz pour les échantillons longs	Fréquence moyenne en Hz pour les échantillons courts
$\nu = 0,0115$ à $0,0305$	$\nu = 0,021$
$\nu = 0,0344$ à $0,0534$	$\nu = 0,044$
$\nu = 0,0573$ à $0,0763$	$\nu = 0,067$
$\nu = 0,0802$ à $0,0992$	$\nu = 0,090$
pour les échantillons courts	
$\nu = 0,0435$ à $0,1159$	$\nu = 0,080$
$\nu = 0,1304$ à $0,2029$	$\nu = 0,167$
$\nu = 0,2174$ à $0,2899$	$\nu = 0,254$
$\nu = 0,3043$ à $0,3768$	$\nu = 0,340$

Nous avons enfin établi la moyenne des quatre valeurs de la densité énergétique spectrale déduites, comme nous venons de l'indiquer, des quatre échantillons longs d'une part et des quatre échantillons courts d'autre part.

Les graphiques (fig. 3 et 5) portent les points marqués d'un cercle dont les coordonnées sont: en abscisses les valeurs moyennes susmentionnées des fréquences ν et en ordonnées les valeurs moyennes de la densité énergétique spectrale $A(\nu)$ calculées par bandes succes-

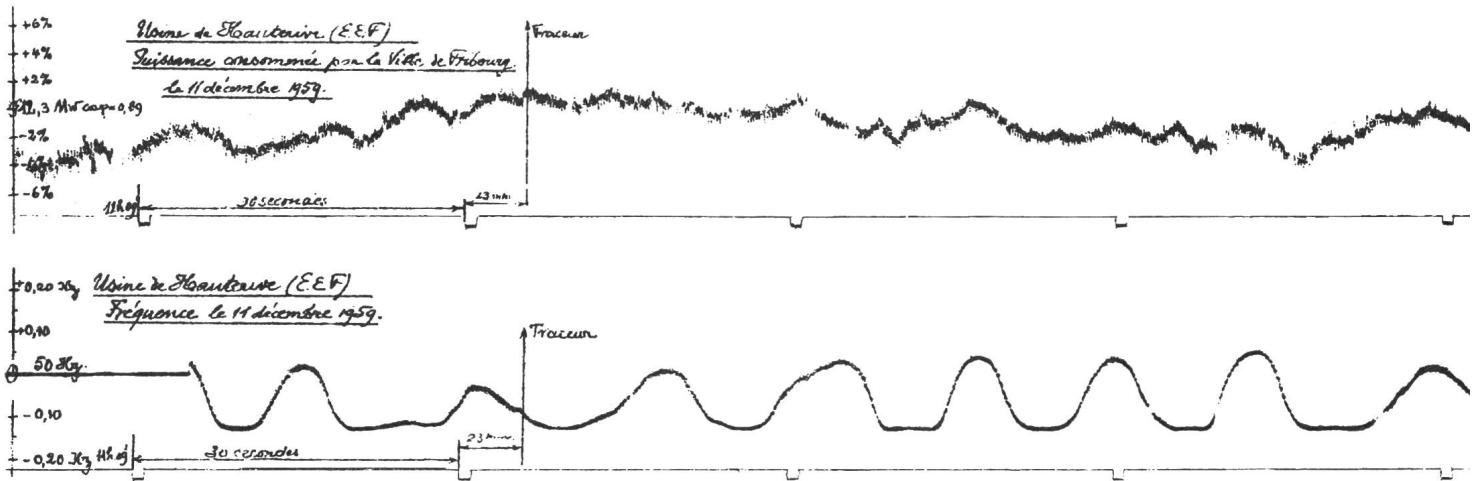


Fig. 1
Echantillon des relevés effectués à l'usine de Houterive, le 11 décembre 1959

sives de fréquences, bandes indiquées au moyen de traits horizontaux côtoyés par des hachures.

Nous avons ainsi pu tracer avec la meilleure certitude, pour les variations de puissance [fig. 3: $A_p(\nu)$] comme pour les variations de vitesse [fig. 5: $A_\omega(\nu)$] la courbe représentative de la fonction $A(\nu)$. La dispersion des points, qui est dans la nature des choses, ne paraît pas anormale.

4. Spectre des Variations de charges Δp_r

Il fait l'objet du graphique à échelles logarithmiques de la fig. 3 où les valeurs de la densité énergétique spectrale des variations de charge $A_p(\nu)$ sont portées en ordonnées en $\%^2 \text{ s}$. Nous rappelons que ce spectre constitue le document caractérisant les données du réglage: la variabilité de la charge, en d'autres termes le comportement de la clientèle du réseau.

Dans sa partie à fréquences hautes ($\nu > 0,06 \text{ Hz}$) la courbe P_1 représentative de la fonction $A_p(\nu)$ coïncide d'une façon très convenable avec une droite P_1P' de pente -2 , comme la théorie le faisant prévoir et comme nous l'avons déjà trouvé par les résultats des essais de Lausanne du 18 décembre 1952 et du 28 mars 1957 [2; 3; 4]. Cette première et importante constatation est donc satisfaisante.

L'équation de cette partie de la courbe représentative de la fonction $A_p(\nu)$ s'écrit:

$$A_p(\nu) = \frac{1,6}{10^2 \nu^2} \quad [\%^2 \text{ s}] \quad (5)$$

Dans sa partie à fréquences basses ($\nu < 0,06 \text{ Hz}$) la courbe représentative de la fonction $A_p(\nu)$ s'infléchit en P_2 et s'écarte de la droite P_1P' précitée. Ici se

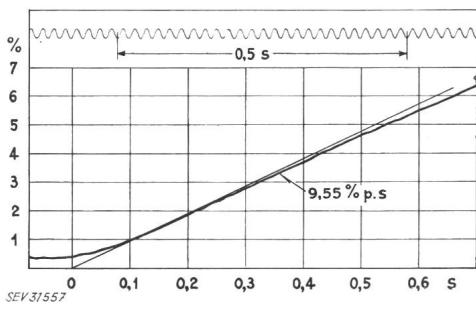


Fig. 2
Accélération du groupe pour une décharge de 12 200 kW

révèle une différence avec les résultats des essais de Lausanne selon lesquels, même dans sa partie à fréquences basses, la courbe en question demeurait une droite de pente -2 jusqu'aux environs de $\nu = 0,01 \text{ Hz}$. La courbe P_2 de la fig. 3 ne doit toutefois pas être considérée comme sujette à caution car, comme nous le verrons plus loin, elle correspond d'une façon satisfaisante avec la courbe Ω_2 (fig. 5) de la fonction $A_\omega(\nu)$ de la densité énergétique spectrale des variations de vitesse (fréquence). D'ailleurs la théorie laisse prévoir une telle inflexion à partir d'une certaine fréquence basse.

Le carré moyen des variations de charge s'obtient en intégrant la fonction $A_p(\nu)$. Nous avons utilisé à

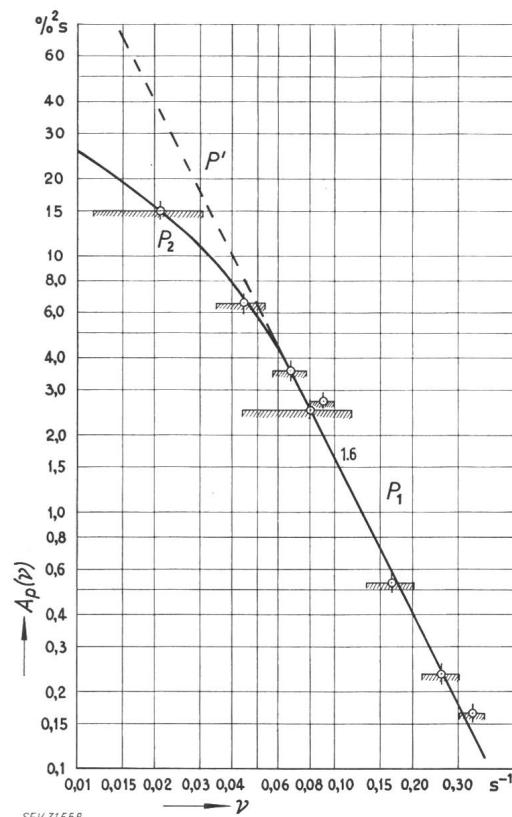


Fig. 3
Spectre des variations de charge Δp_r
Densité énergétique $A_p(\nu)$ des variations de charge en fonction de leur fréquence
Echelles logarithmiques

cette fin le graphique à échelles linéaires de la fig. 4 en nous fixant en outre les limites de fréquences suivantes :

$$\nu_1 = 0,01 \text{ Hz} \quad \text{et} \quad \nu_2 = 0,2 \text{ Hz}$$

Nous avons ainsi abouti à un carré moyen des variations de charge :

$$\overline{[\Delta p_r(t)]^2} = 0,73 [\%^2] \quad (6)$$

d'où un écart quadratique moyen :

$$\sqrt{\overline{[\Delta p_r(t)]^2}} = 0,855 [\%] \quad (7)$$

Si, comme le montraient les résultats des essais de Lausanne, la courbe $A_p(\nu)$ était demeurée une droite P_1P' , l'intégration pourrait s'effectuer analytiquement :

$$\overline{[\Delta p_r(t)]^2} = \int_{\nu_1}^{\nu_2} A_p(\nu) d\nu = 1,6 \cdot 10^{-2} \left(\frac{1}{\nu_1} - \frac{1}{\nu_2} \right) = 1,52 [\%^2] \quad (8)$$

d'où un écart quadratique moyen :

$$\sqrt{\overline{[\Delta p_r(t)]^2}} = 1,23 [\%] \quad (9)$$

5. Spectre des variations de vitesse (fréquence)

Il fait l'objet du graphique à échelles logarithmiques de la fig. 5 où les valeurs de la densité énergétique spectrale des variations de vitesse $A_\omega(\nu)$ sont portées en ordonnées en $\%^2 \text{ s}$. Nous rappelons que ce spectre constitue le document caractérisant le résultat du réglage, à savoir les variations de vitesse qu'il laisse subsister.

Dans sa partie à fréquences hautes, la courbe Ω_1 représentative de la fonction $A_\omega(\nu)$, doit, selon la théorie, tendre vers une droite de pente -4 , droite que l'on détermine en considérant :

que, dans un diagramme à échelles logarithmiques, la courbe représentative de la fonction $A_p(\nu)$ est dans cette partie une droite de pente -2 , c'est-à-dire que cette fonction est en ν^{-2} [voir équation (5)],

que la relation qui lie la fonction $A_\omega(\nu)$ à la fonction $A_p(\nu)$ est celle que l'on obtient en admettant que le vannage est immobile (ce qui est d'autant plus le cas

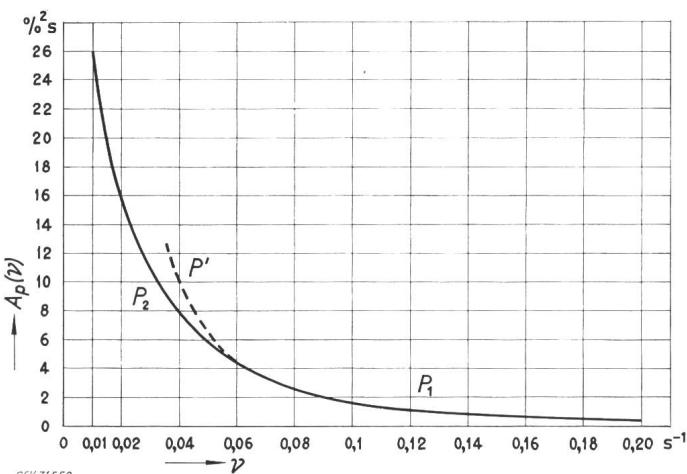


Fig. 4

Spectre des variations de charge Δp_r

Densité énergétique $A_p(\nu)$ des variations de charge en fonction de leur fréquence
Echelles linéaires

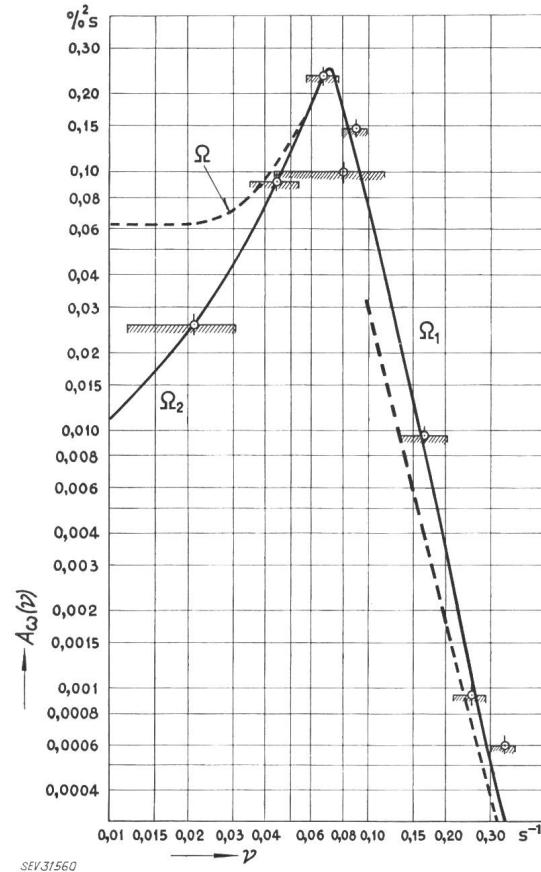


Fig. 5
Spectre des variations de vitesse $\Delta \omega$

Densité énergétique $A_\omega(\nu)$ des variations de vitesse en fonction de leur fréquence
Echelles logarithmiques

que la fréquence ν des variations est élevée) et que cette relation est également en ν^{-2} .

En effet, il y a lieu de se rappeler que d'une façon tout à fait générale :

$$\frac{A_\omega(\nu)}{A_p(\nu)} = \left[\frac{\Delta \omega}{\Delta p_r} \right]^2 \quad (10)$$

Equation dans laquelle Δp_r et $\Delta \omega$ sont les variations de charge et les variations subséquentes de vitesse en régime sinusoïdal entretenu. Or, si l'on calcule ce rapport en supposant que le vannage reste immobile, on trouve¹⁾ :

$$\left[\frac{\Delta \omega}{\Delta p_r} \right]^2 = \frac{1}{(2\pi T_a)^2} \cdot \frac{1}{\nu^2} \quad (11)$$

Relation dans laquelle T_a est le temps caractéristique de l'inertie des masses tournantes ou temps de lancer.

¹⁾ La relation (11) suppose en outre qu'avec l'ouverture de vannage correspondant au régime considéré, la vitesse d'emballement de la turbine est approximativement égale à deux fois la vitesse normale, c'est-à-dire que la courbe de couple moteur tracée en valeurs relatives en fonction de la vitesse, a une pente d'environ -1 .

Cette hypothèse est bien satisfaite dans le cas où la puissance de régime est voisine de la puissance maximale du groupe. Toutefois, dans le cas des essais de Fribourg la puissance de régime de 11 MW n'atteignait que les 61 % de la puissance maximale du groupe de 17,8 MW. A l'ouverture correspondante du vannage, la vitesse d'emballement n'est plus que d'environ 1,6 fois la vitesse normale (compte tenu du nombre de tours spécifique de la turbine) et la pente de la courbe du couple moteur de l'ordre de $-1,7$. La relation (11) devient alors :

$$\left[\frac{\Delta \omega}{\Delta p_r} \right]^2 = \frac{1}{(2\pi T_a)^2 \nu^2 + 0,5}$$

mais la correction qui en découle reste très faible.

Finalement, en tenant compte de l'équation (5), on calcule la densité énergétique spectrale des variations de vitesse $A_\omega(\nu)$, dans la gamme des fréquences hautes, par l'équation :

$$A_\omega(\nu) = \frac{1}{(2\pi T_a)^2} \cdot \frac{1}{\nu^2} \cdot \frac{1,6}{10^2 \nu^2} \quad [\%^2 \text{s}] \quad (12)$$

d'où il ressort qu'il s'agit bien d'une fonction en ν^{-4} . En introduisant $T_a = 11,6$ s, l'équation (12) devient :

$$A_\omega(\nu) = \frac{0,3}{10^5 \nu^4} \quad (12a)$$

Nous avons tracé en pointillé sur la fig. 5, la droite correspondant à cette équation et l'on constate que la courbe $A_\omega(\nu)$ ne se confond pratiquement avec cette asymptote qu'au-delà de $\nu = 0,4$ à $0,5$ Hz²⁾. En d'autres termes, si l'on voulait calculer la valeur du temps de lancer T_a par la connaissance de cette asymptote, la courbe de la densité énergétique $A_\omega(\nu)$ devrait être prolongée jusqu'à $0,4 \dots 0,5$ Hz et les mesures effectuées en conséquence.

Après avoir passé par un maximum pour la fréquence $\nu = 0,07$ Hz (période de 14,3 s voisine de la période propre du réglage), la courbe représentative de la fonction $A_\omega(\nu)$ redescend en Ω_2 qui constitue sa partie à fréquences basses.

6. Transmittance du circuit de réglage

Il s'agit de la transmittance $g(\nu)$ du circuit de réglage considéré fermé, en prenant comme grandeur d'entrée les variations sinusoïdales de charge Δp_r et comme grandeur de sortie les variations sinusoïdales subséquentes de vitesse $\Delta\omega$. On sait qu'on la calcule par l'équation :

$$g(\nu) = \left[\frac{\Delta\omega}{\Delta p_r} \right] = \sqrt{\frac{A_\omega(\nu)}{A_p(\nu)}} \quad (10a)$$

La courbe G_1G_2 représentative de la fonction $g(\nu)$ de la transmittance, fait l'objet du graphique à échelles logarithmiques de la fig. 6. Nous rappelons qu'il constitue le document qui définit les possibilités du réglage et par conséquent sa qualité principale, la précision avec laquelle il assure la tenue de la vitesse (fréquence f) au plus près de sa valeur de consigne $f = 50$ Hz.

La courbe G_1G_2 comporte de part et d'autre d'un maximum très prononcé pour $\nu = 0,074$ Hz (période propre du réglage 13,5 s) deux branches, l'une G_1 dans la gamme des fréquences hautes tendant vers une asymptote de pente -1 , l'autre G_2 dans la gamme des fréquences basses tendant vers une asymptote de pente $+1$.

L'asymptote de la branche G_1 a pour équation :

$$g(\nu) = \frac{1}{2\pi T_a} \cdot \frac{1}{\nu} = \frac{1}{73 \nu} \quad (11a)$$

Quant à la branche G_2 , nous avons procédé à son tracé dans la gamme des fréquences basses, en utilisant l'équation (10a) et en lisant les valeurs des densités $A_p(\nu)$ et $A_\omega(\nu)$ sur les branches P_2 et Ω_2 des courbes des fig. 3 et 5. Cette branche G_2 tend bien vers une pente $+1$, comme le fait prévoir la théorie, ce qui est

²⁾ Cette constatation correspond bien à celle que M. Th. Laible a faite en se basant sur une expression approchée de la transmittance.

une preuve de la bonne correspondance des courbes P_2 et Ω_2 et par conséquent de l'exactitude des mesures. L'équation limite de la branche G_2 s'écrit théoriquement :

$$g(\nu) = 2\pi \tau' \nu^3 \quad (13)$$

et comme son tracé fait aboutir à :

$$g(\nu) = 1,97 \nu \quad (14)$$

on en déduit :

$$\tau' = 0,315 \text{ s}$$

ce temps τ' étant celui caractéristique de la promptitude ou de la rapidité de réponse du réglage, correspondant à la puissance de 11 MW. Pour la puissance nominale de 17,8 MW, le temps caractéristique de la promptitude variant comme la puissance et inversément proportionnellement à la pente de la courbe de puissance (environ 3,5 fois plus forte à 11 MW qu'autour de la pleine charge), il devient approximativement $\tau' = 1,8$ s.

7. Résultats finals

Après nous être assurés, de la façon que nous venons d'exposer, que le tracé de la courbe $\Omega_1 \Omega_2$ (fig. 5) de la densité énergétique spectrale $A_\omega(\nu)$ des variations de vitesse, compte tenu du tracé de la courbe $P_1 P_2$ (fig. 3) de la densité énergétique spectrale $A_p(\nu)$, des variations de charge, correspond bien à une transmittance dont la courbe représentative $G_1 G_2$ (fig. 6) revêt une allure satisfaisante, nous avons passé à l'intégration de la fonction $A_\omega(\nu)$. Nous avons utilisé à cette fin le graphique à échelles linéaires de la fig. 7 et nous avons naturellement respecté les mêmes limites de fréquence 0,01 et 0,2 Hz que pour l'intégration de la fonction $A_p(\nu)$.

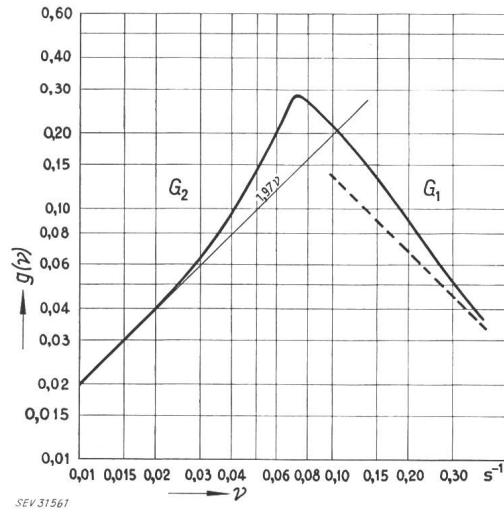


Fig. 6
Transmittance du circuit de réglage $g(\nu)$

Rapport entre l'amplitude des variations de vitesse et l'amplitude des variations de charge, en régime sinusoïdal, en fonction de leur fréquence
Echelles logarithmiques

³⁾ En réalité, l'équation (13) n'est exacte que si l'on néglige l'effet du statisme δ . Dans le cas contraire elle prend la forme $g(\nu) = \sqrt{(2\pi\tau' \nu)^2 + \delta^2}$ (13a)

Lors des essais de Fribourg, le statisme ramené à la puissance de régime de 11 MW était d'environ $\delta = 0,015$ et l'application de l'équation (10a) ne conduirait dès lors dans la gamme des fréquences ν considérées, qu'à des différences négligeables.

Nous avons ainsi abouti à un carré moyen des variations de vitesse :

$$[\Delta\omega(t)]^2 = 0,0124 \quad [\%^2]$$

d'où un écart quadratique moyen :

$$\sqrt{[\Delta\omega(t)]^2} = 0,111 \quad [\%]$$

Si, comme ce fut le cas pour les essais effectués sur le réseau de Lausanne, la courbe représentative de la fonction $A_p(\nu)$ s'était prolongée sous la forme d'une droite P_1P' (fig. 3), jusqu'à $\nu = 0,01$ Hz, correspondant comme nous l'avons vu sous 4, à un écart quadratique moyen des variations de charge de 1,23%, la courbe représentative de la fonction $A_\omega(\nu)$ se serait modifiée pour prendre la forme $\Omega_1\Omega'$ (fig. 5). La branche Ω' de cette courbe se détermine aisément à partir de la branche P' de la courbe représentative de la fonction $A_p(\nu)$ et de la branche G_2 de la transmittance qui demeure naturellement la même. Comme il était à prévoir, la branche Ω' tend vers une horizontale. Le carré moyen des variations de vitesse devient dès lors 0,0136%² et l'écart quadratique moyen 0,116%. On remarque donc l'influence de la forme de la courbe représentative du spectre $A_p(\nu)$ des variations de charge sur le rapport des écarts quadratiques moyens de vitesse et de puissance. Ceci ressort des chiffres du tableau I :

Tableau I

Désignation	Selon les courbes P_1P_2 et $\Omega_1\Omega_2$	Selon les courbes P_1P' et $\Omega_1\Omega'$
Ecart quadratique moyen des variations de charge	0,855% de 11 MW	1,23% de 11 MW
Ecart quadratique moyen des variations de vitesse (fréquence)	0,111%	0,116%
Ecart quadratique moyen des variations de vitesse (fréquence) pour un écart quadratique moyen des variations de charge égal à 1% de 11 MW	0,130%	0,094%

Enfin, toujours dans l'hypothèse de la forme rectiligne P_1P' (en coordonnées logarithmiques) de la courbe représentative du spectre $A_p(\nu)$ des variations de charge, on peut faire abstraction des inévitables imperfections d'amortissement du réglage (dans lesquelles intervient notamment le phénomène du coup de bâlier) et ne tenir compte que des deux principales grandeurs dont dépend la transmittance, le temps caractéristique de la promptitude $\tau' = 0,315$ s et le temps de lancer $T_a = 11,6$ s. Ceci revient à assimiler la courbe de la transmittance à ses deux asymptotes, c'est-à-dire à calculer l'écart quadratique moyen de vitesse à l'aide de la dernière formule (15) proposée dans le mémoire cité sous [2]. On calcule dès lors un écart quadratique moyen de vitesse de 0,08% ; comparer à l'écart quadratique moyen réel de 0,116%.

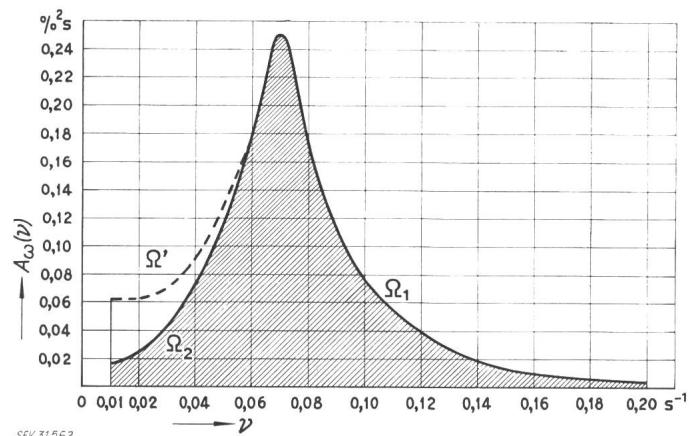


Fig. 7
Spectre des variations de vitesse
Densité énergétique $A_\omega(\nu)$ des variations de vitesse en fonction de leur fréquence
Echelles linéaires

8. Conclusions

Les résultats des essais de Fribourg viennent confirmer ceux des essais précédents de Lausanne quant à l'emploi de la méthode proposée pour utiliser des enregistrements statistiques.

Connaissant l'écart quadratique moyen des variations de charge d'un réseau, entre deux fréquences limites, on peut tracer la courbe représentative du spectre de ces variations, droite de pente -2 en coordonnées logarithmiques.

Sur la base de la transmittance du réglage du réseau, il est possible de passer du spectre des variations de charge au spectre des variations de vitesse et par conséquent de calculer l'écart quadratique moyen des variations de fréquence de la tension du réseau.

Ces renseignements nous paraissent offrir un précieux intérêt notamment pour l'étude des écarts de puissance transmise par une interconnexion entre deux réseaux.

Bibliographie

- [1] Gaden, D.: Essai d'un procédé pour caractériser la clientèle d'un réseau selon la variabilité de sa consommation. Son application à l'établissement de prévisions sur la tenue de la fréquence. Bull. ASE 46(1955)2, p. 45...56.
- [2] Gaden, D.: Rapport existant entre les variations de la charge consommée par la clientèle d'un réseau et les variations de fréquence qui en résultent. Résultats des essais effectués à ce sujet sur le réseau de Lausanne par la Commission d'Etudes de l'ASE pour le Réglage des Grands Réseaux. Bull. ASE 49(1958)10, p. 439...448.
- [3] Lehmann, G.: Calcul du spectre des fluctuations du courant absorbé par un réseau de distribution électrique. Bull. Soc. franç. Electr. 7^e sér., 3(1953)34, p. 593...595.
- [4] Fortet, R.: Spectre des fluctuations du courant absorbé par un réseau de distribution électrique. Bull. Soc. franç. Electr. 7^e sér., 4(1954)47, p. 712...717.

Adresse de l'auteur:

Dr ès sc. techn. h. c. D. Gaden, professeur, ancien directeur des Ateliers de Charmilles S. A., 15, route de Florissant, Genève.