

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins  
**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke  
**Band:** 49 (1958)  
**Heft:** 13

**Artikel:** Influence des variations de tension et de fréquence sur la charge absorbée par les consommateurs  
**Autor:** Juillard, E.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1059732>

### **Nutzungsbedingungen**

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

### **Conditions d'utilisation**

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

### **Terms of use**

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

**Download PDF:** 03.04.2025

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

## Influence des variations de tension et de fréquence sur la charge absorbée par les consommateurs

Conférence donnée à l'Assemblée d'informations sur le réglage des grands réseaux organisée par l'ASE  
le 24 avril 1958, à Berne,  
par E. Juillard, Lausanne

621.316.726 : 621.728 : 621.311.161

*L'auteur expose le moyen de déterminer la valeur du moment d'inertie  $GD^2$  d'un ensemble de groupes électrogènes par l'enregistrement des variations de charge de la clientèle et des variations de fréquence qui en résultent. Puis il passe à l'influence des variations de tension et de fréquence sur la consommation et commente les procédés d'enregistrement, ainsi que l'interprétation des diagrammes. Il montre que la connaissance de la dépendance de la charge d'avec la fréquence doit permettre de dimensionner plus économiquement le moment d'inertie des machines tournantes.*

*Der Autor zeigt, wie das Massenträgheitsmoment  $GD^2$  von Generator-Gruppen aus den Angaben bestimmt werden kann, die durch Registrierung der Schwankungen der Netzlast und der daraus resultierenden Schwankungen der Frequenz gewonnen werden können. Er legt dar, wie Spannungs- und Frequenzschwankungen die Belastung beeinflussen, und erläutert die Registriermethoden und die Auswertung der Diagramme. Er zeigt, wie die Kenntnis der Frequenzabhängigkeit der Last eine wirtschaftlichere Dimensionierung des Massenträgheitsmomentes rotierender Maschinen ermöglicht.*

Si l'on examine d'un peu près le diagramme d'enregistrement de la puissance consommée par un réseau, enregistrée avec un déroulement assez rapide du papier, on constate une certaine périodicité qui se retrouve sur les diagrammes correspondants de la tension et de la fréquence (fig. 1). Les organes de réglage de la tension et de la vitesse des groupes s'efforcent constamment de corriger les écarts de tension et de fréquence, provoqués par l'agitation de la charge, sans jamais y arriver complètement. Si on limite l'examen du diagramme à un intervalle raisonnable,  $\frac{1}{4}$  d'heure ou 1 heure, il est assez naturel de prendre pour critère des

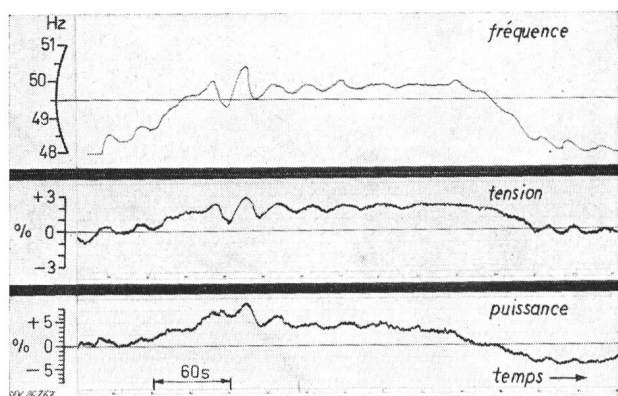


Fig. 1  
Exemple d'enregistrement

écarts de tension et de fréquence d'avec leur valeur de consigne, la moyenne quadratique des écarts ou ce que les électriciens appellent simplement leur valeur efficace. Quant à la puissance, si on fait abstraction des déplacements très lents, qui ne constituent aucune difficulté au réglage, on évaluera également son agitation par la valeur efficace des écarts dans l'intervalle de temps considéré. Ces 3 valeurs efficaces, soit tension, fréquence et puissance, constituent un critère simple qui permet d'apprécier la qualité du réglage. Si on les calcule sur des intervalles d'un quart d'heure, par exemple, il est bien évident qu'elles peuvent varier quelque peu au cours de la journée ou de la semaine, tout en conservant le même rapport. Mais ce n'est pas là le seul enseignement qu'on puisse tirer de ces diagrammes.

Au lieu de considérer le régulateur de vitesse comme le capitaine du groupe électrogène, cherchant à imposer au groupe une vitesse constante, malgré la turbulence du réseau des consommateurs, renversons la hiérarchie, et considérons le régulateur de vitesse comme la victime chicanée par l'agitation du réseau. On peut ainsi représenter le système par le schéma suivant (fig. 2) qui montre qu'entre les variations de puissances créées par le réseau et les écarts de vitesse subis par le régulateur il existe une certaine relation, fonction de l'inertie des masses tournantes d'une part, et des qualités, plus spécialement de la promptitude du régulateur de vitesse d'autre part. Pour chiffrer cette dépendance, le plus simple est de décomposer le graphique de la puissance en série de Fourier. On obtient ainsi l'équivalent de l'agitation du réseau sous la forme d'une somme de composantes

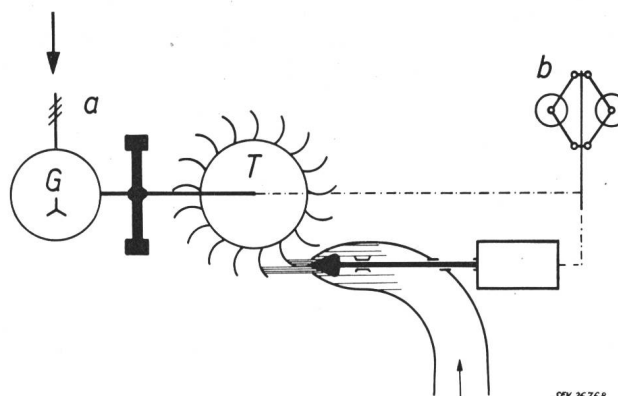


Fig. 2  
Schéma du réglage  
a Cause: perturbations; b Effet: variation de la vitesse  
G Génératrice; T Turbine

d'amplitudes différentes, et de fréquences croissantes, de l'ordre de  $\frac{1}{60}$  Hz (durée de la période 1 minute) jusqu'à 1 Hz environ (durée de la période 1 seconde). Les variations plus lentes ne présentent pas d'intérêt, car elles sont sans peine «suivies» par le jeu du vannage, et sans effet sur le régulateur de vitesse qui maintient facilement la vitesse constante; il en est de même des variations de charge très rapides, qui sont étouffées par l'inertie des groupes, sans avoir de répercussion sur le régu-

lateur de vitesse. Enfin, si on reporte toutes les amplitudes en fonction de leurs fréquences respectives, la courbe qui relie les extrémités de toutes ces ordonnées n'est autre chose que le spectre de l'agitation du réseau (fig. 3).

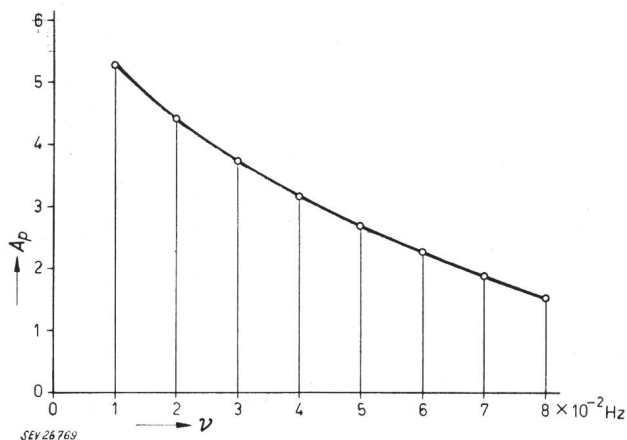


Fig. 3  
Spectre de l'agitation du réseau  
 $A_p$  amplitude des variations de puissance  
 $\nu$  fréquence d'agitation

On procédera de même pour le diagramme des écarts de vitesse qui présente les mêmes fréquences; la fig. 4 en représente le spectre. Aux très basses fréquences de variation de la charge, comme aux très hautes, les amplitudes des écarts de vitesse sont minimales, pour les raisons rappelées ci-dessus. Remarquons en passant que la connaissance de toutes ces amplitudes  $A_1, A_2, A_i$ , etc., c'est-à-dire du spectre de l'agitation donne également la valeur efficace de l'agitation par la formule bien connue

$$A = \sqrt{\frac{1}{2} \sum A_i^2}$$

Or, supposons pour un instant que l'agitation de la charge se réduise à une simple oscillation sinusoïdale, avec une seule fréquence. La vitesse effectuera de son côté une oscillation de même fré-

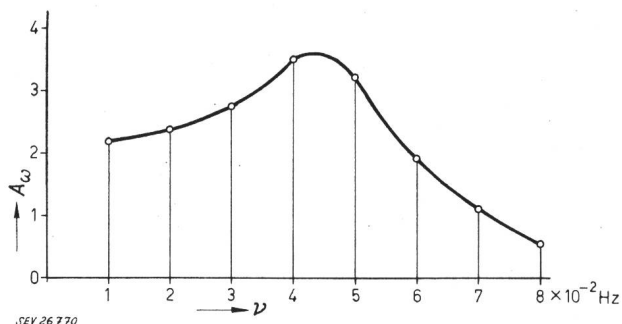


Fig. 4  
Spectre de l'agitation de la vitesse  
 $A_w$  amplitude des variations de vitesse;  $\nu$  fréquence d'agitation

quence. Si l'amplitude des variations de charge est doublée, l'amplitude des variations de vitesse le sera également; ceci en raison du genre d'organes qui relie le réseau au régulateur de vitesse (voir fig. 2). Les mathématiciens disent que ce système est linéaire. Le rapport entre l'amplitude des variations de vitesse accusées par le tachymètre et l'am-

plitude, à la même fréquence, des écarts de puissance, ne dépend donc que de la fréquence avec laquelle ces variations de charge se produisent. Et ce rapport de l'effet à la cause, qui ne dépend que de la fréquence, nous le désignerons par le terme concis de «transmittance». On peut donc calculer ce rapport des amplitudes pour chaque fréquence des spectres de vitesse et de puissance, et on obtient ainsi la courbe de la transmittance du groupe électrogène réglé (fig. 5).

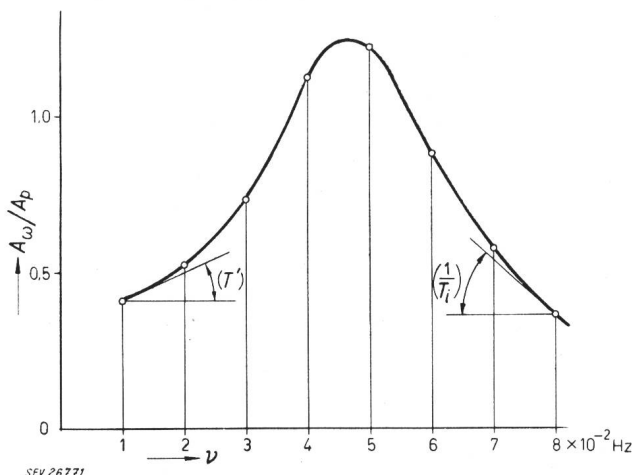


Fig. 5  
Transmittance  $\frac{A_w}{A_p} = f(\nu)$

$T'$  promptitude du régulateur;  $T_i$  inertie spécifique;  
 $\nu$  fréquence d'agitation

Or, cette courbe contient l'influence des éléments du groupe: inertie des machines et promptitude du régulateur. Et on démontre en particulier que l'inclinaison de la tangente à la courbe, aux basses fréquences, est égale à  $T'$ , celui-ci étant la promptitude du régulateur, et que la tangente à la courbe aux hautes fréquences donne  $\frac{1}{T_i}$ ,  $T_i$  étant l'inertie spécifique du temps de lancer (Anlaufzeit), ceci à des facteurs numériques près.

La démonstration rigoureuse et détaillée des propriétés que nous venons de résumer succinctement sera publiée dans un des tout prochains Bulletins sous la plume experte de M. le professeur D. Gaden, directeur des Ateliers des Charmilles S. A., Genève<sup>1)</sup>.

L'enregistrement des diagrammes de puissance et de vitesse, cette dernière fournie par la fréquence du courant alternatif livré par les groupes doit être effectué avec des appareils suffisamment sensibles, et à déroulement du papier assez rapide. Les enregistreurs courants ne s'y prêtent pas. La Commission d'Etude pour le Réglage des Grands Réseaux a dû s'équiper elle-même en appareils spéciaux. Une description de ces appareils a déjà paru au Bulletin de l'ASE<sup>2)</sup>. Les vitesses de déroulement du papier sont de 30, 60 et 240 mm par minute; leur sensibilité est telle qu'une déviation de 1 cm révèle un écart de tension de 1 % ou un écart de puissance de 2,5 %.

<sup>1)</sup> cf. Bull. ASE t. 49(1958), n° 10, p. 439...448.  
<sup>2)</sup> cf. Bull. ASE t. 43(1952), n° 13, p. 571...574.

Quant à la vitesse, elle est mesurée ici par un pont de fréquence. Un amplificateur ad hoc, transforme l'écart de fréquence d'avec la fréquence normale de 50 Hz en une tension continue. La sensibilité de ce fréquencemètre est telle qu'une déviation de 1 cm de l'aiguille du scripteur représente un écart de fréquence de 0,025 Hz. Enfin, les fréquences propres de ces appareils sont de l'ordre de 10 Hz, ce qui leur permet de reproduire fidèlement les variations, pratiquement beaucoup plus lentes, du réseau. La fig. 6 donne une idée du diagramme de fréquence obtenu: il s'agit de la fréquence mesurée sur le réseau à Lausanne dans le courant d'un après-midi en semaine.

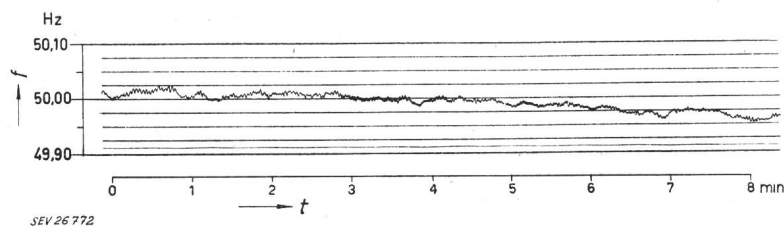


Fig. 6

Exemple d'un enregistrement de fréquence

En enregistrant donc l'allure des variations de puissance consommée par la clientèle, et conjointement les variations concomittantes de la vitesse des groupes travaillant en parallèle, on obtient ainsi le moyen d'en déterminer le  $GD^2$  par le temps de lancer  $T_i$ , qui n'est pas autre chose que le rapport entre le double de la force vive du groupe à sa vitesse nominale et sa puissance nominale, soit

$$T_i = 2 \frac{J \omega_n^2 / 2}{P_n} \text{ où}$$

$J$  moment d'inertie

$P_n$  puissance nominale

$\omega_n$  vitesse angulaire nominale

On possède ainsi le moyen d'évaluer exactement les conséquences qu'aurait toute modification du  $GD^2$  ou de la promptitude du régulateur sur la qualité du réglage, ceci bien entendu sans préjudice des conditions de stabilité. La promptitude, comme également les autres éléments du régulateur de vitesse qui entrent dans la transmittance, sont connus ou peuvent être aisément déterminés dès qu'on connaît en détail la construction du régulateur. Seule, la façon dont évolue la charge prise par la clientèle doit être empruntée à la statistique. Et nous osons croire qu'en particulier MM. les Exploitants trouveront les résultats esquissés ci-dessus suffisamment intéressants pour nous aider à continuer nos investigations dans ce sens et enrichir ainsi notre patrimoine de renseignements pratiques.

Plaçons-nous maintenant à un autre point de vue, et examinons comment varie la puissance consommée sous l'effet de variations de tension et de fréquence.

On sait que le couple actif développé par une turbine varie à peu de chose près linéairement avec la vitesse. La vitesse en régime nominal est sensiblement au milieu entre l'arrêt et la vitesse d'emballement. Supposons (fig. 7) que la droite  $\overline{AB}$  repré-

sente le couple de la turbine en fonction de sa vitesse angulaire. Soient  $M_n = \overline{CC_1}$  et  $\omega_n = \overline{OC_1}$  le couple et la vitesse en régime nominal. Dans cet état, le couple résistant opposé par l'alternateur est égal au couple actif  $M_n$ , et la vitesse reste uniforme.

Supposons que survienne une diminution subite de la charge, et que le couple résistant de l'alternateur tombe à la valeur  $\overline{DC_1}$ . L'excédent de couple actif  $\overline{CD}$  va provoquer une augmentation de la vitesse. Or, selon la façon dont varie le couple résistant opposé par l'alternateur, en fonction de la vitesse, les conséquences peuvent être très différentes.

Admettons — ce qui est généralement le cas — que le réglage de la tension soit beaucoup plus rapide que celui de la vitesse du groupe, et faisons abstraction de la tension en la considérant comme invariable. Supposons, pour fixer les idées, que le couple résistant de l'alternateur soit le même,

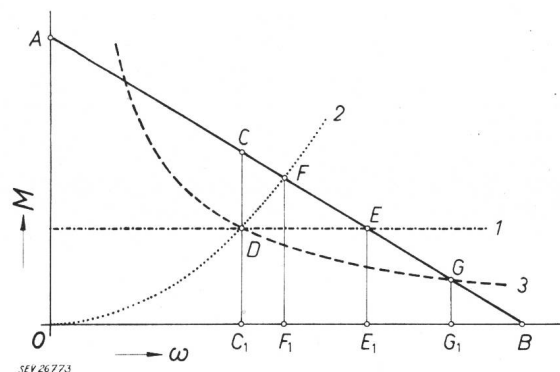


Fig. 7

Couples  $M$  en fonction de la vitesse angulaire de rotation  $\omega$   
 $\overline{AB}$  Couple de la turbine en fonction de sa vitesse angulaire;  
 $\overline{CC_1}$  Couple en régime nominal; 1 Couple constant (machines-outil); 2 Couple proportionnel à  $\omega^2$  (ventilateurs, pompes); 3 Couple proportionnel à  $1/\omega$  (résistances pures)

quelle que soit la vitesse. Ce serait à peu près le cas par exemple, d'un alternateur alimentant des moteurs synchrones ou asynchrones entraînant des machines-outils. Le nouveau couple résistant  $\overline{DC_1}$  restant constant, la vitesse augmentera jusqu'en  $E$ , et le nouveau régime s'établirait en  $E$ , si le régulateur de vitesse n'intervient pas assez rapidement.

Supposons par contre que l'alternateur alimente des moteurs asynchrones entraînant des pompes centrifuges ou des ventilateurs. Dans ce cas la puissance consommée est proportionnelle au cube de la vitesse; le couple résistant par conséquent, croît proportionnellement au carré de celle-ci. La courbe du couple résistant est une parabole  $\overline{DF}$  qui ren-

contre la droite de la turbine en  $F$ , et l'augmentation de vitesse, sans intervention du réglage, sera seulement de  $\overline{C_1 F_1}$  au lieu de  $\overline{C_1 E_1}$  du cas précédent.

Si, par contre, cas très défavorable, la puissance débitée par l'alternateur est indépendante de la fréquence, ce qui serait le cas d'un réseau ne comportant que des résistances (chauffe-eau, cuisinière), le couple résistant est ici inversement proportionnel à la vitesse, et décrit une hyperbole. Celle-ci ne rencontre la droite de la turbine qu'en  $G$ , et l'augmentation de vitesse serait  $\overline{C_1 G_1}$ .

Pour éviter cette augmentation de vitesse, c'est-à-dire améliorer le réglage, il faut donner au régulateur de vitesse une grande rapidité d'action, ce qui n'est pas toujours possible, eu égard au coup de bélier, et à la fatigue du mécanisme. Il ne reste pas d'autre moyen que d'augmenter le  $GD^2$ , pour donner au régulateur de vitesse le temps de faire tranquillement son travail, sans que, pendant ce temps, la vitesse atteigne des valeurs trop élevées. On peut du reste corriger la situation, dans une certaine mesure, en rendant le régulateur de tension sensible à la fréquence, mais ce procédé peut avoir une répercussion fâcheuse sur la puissance réactive.

Nous avons voulu, par ce rappel, vous montrer l'intérêt qu'il y a à connaître comment la puissance consommée dépend de la fréquence. Les réseaux ne comportant que des éléments résistants sont rares; presque tous comptent une certaine proportion de moteurs, ce qui a pour effet de ne nécessiter, à qualité de réglage égale qu'une plus petite inertie des masses tournantes. La pratique qui consiste à exiger un réglage parfait, même sur charge par rhéostat hydraulique seulement, conduit à des  $GD^2$  inutilement élevés.

Dans la Commission d'Etude pour le Réglage des Grands Réseaux de l'ASE nous avons cherché à déterminer sur le vif cette dépendance de la puissance consommée d'avec la tension et la fréquence; et pour ce faire, nous avons fait appel à la bienveillance de certains réseaux. Les conditions à remplir étaient les suivantes: il nous fallait disposer du réseau d'une clientèle qui puisse être alimenté tout entier par une seule ligne, et en service séparé, par une ou des machines mises entièrement à notre disposition. On se rend compte des difficultés d'ordre hydraulique et électrique que ces exigences imposent. Ensuite, il nous fallait faire varier soit la tension, soit la fréquence, isolément ou simultanément, dans des limites suffisamment larges pour obtenir des chiffres assez précis, sans toutefois trop gêner la clientèle. Grâce aux appareils spéciaux construits à cet effet, nous avons pu nous limiter à des variations de l'ordre de 2 à 3 % des valeurs moyennes. Les premières mesures furent effectuées sur le réseau de Lausanne, dont la consommation était de 45 MW environ. L'alimentation était faite par l'usine de l'EOS à Chandoline. Plus récemment, un nouvel enregistrement fut pratiqué sur une partie du réseau de Genève, le réseau de la Renfile, dont la consommation était de l'ordre de 20 MW. La Renfile était alimentée par Verbois.

Qu'il nous soit permis ici, en passant, d'adresser en public nos remerciements à l'EOS en la personne

de son directeur M. Manfrini, et au Service de l'Electricité de la Ville de Lausanne, par son directeur M. Meystre. De même au Service de l'Electricité de Genève, à son directeur M. Roesgen, vice-président de l'ASE et à son ingénieur M. Rollard. Tous ces Messieurs ont mis le plus aimable empressement à nous faciliter nos expériences.

Venons-en à l'interprétation de ces enregistrements. Partant de la valeur normale, la tension fut élevée de 2 à 3 % et maintenue à cette valeur pendant une minute environ de façon à laisser au nouveau régime le temps de devenir stationnaire. La fréquence était maintenue constante par le régulateur de vitesse. Puis la tension est ramenée à sa valeur normale, et ensuite abaissée de 2 à 3 %. L'enregistrement accuse donc une série de paliers. La même opération est ensuite effectuée sur la fréquence, la tension étant maintenue à peu près constante par le réglage de tension. Simultanément, on enregistre la puissance active. La concordance des 3 enregistrements est assurée par des «top» marqués toutes les 30 secondes au même instant sur les trois bandes de papier (fig. 1).

La puissance consommée est donc, dans l'hypothèse d'un réseau dont la constitution (c'est-à-dire l'ensemble des appareils d'utilisation) reste invariable pendant l'essai, une fonction de la tension et de la fréquence,  $P = F(U, f)$ .

En développant cette fonction en série, et en n'admettant que de petites variations (ce qui est le cas ici) on obtient:

$$\Delta P = \frac{\partial P}{\partial U} \Delta U + \frac{\partial P}{\partial f} \Delta f$$

En divisant par les valeurs moyennes pendant l'essai, la relation devient une relation entre valeurs relatives:

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{\partial P/P}{\partial U/U} \cdot \frac{\Delta U}{U} + \frac{\partial P/P}{\partial f/f} \cdot \frac{\Delta f}{f}$$

$$\text{Posons pour abrégier } \frac{\Delta U}{U} = \Delta u, \text{ et } \frac{\Delta f}{f} = \Delta \varphi$$

$\Delta u$  et  $\Delta \varphi$  sont les variations relatives de la tension et de la fréquence, qui provoquent une variation relative  $\frac{\Delta P}{P} = \Delta p$  de la puissance. Les coefficients

placés devant  $\Delta u$  et  $\Delta \varphi$  peuvent être considérés comme constants dans le voisinage des puissances, tension et fréquences moyennes. Nous écrirons donc:

$$\Delta p = \alpha \Delta u + \beta \Delta \varphi.$$

Remarquons en passant qu'en remontant à la puissance, l'équation ci-dessus dit simplement que

$$P = K \cdot U^\alpha \cdot f^\beta$$

$K$  étant un facteur de proportionnalité qui dépend de la constitution du réseau au moment de la mesure.

En effet, écrite autrement, l'équation dit:

$$\frac{dP}{P} = \alpha \frac{dU}{U} + \beta \frac{df}{f}$$



et puisque  $\alpha$  et  $\beta$  sont invariables, eu égard à la petitesse des variations, c'est-à-dire:

$$\ln P = \alpha \ln U + \beta \ln f + \ln K$$

$$P = K U^\alpha f^\beta$$

Nous trouvons donc sur nos enregistrements toute une collection de valeurs d'écart relatifs de puissance  $\Delta p$  et  $\Delta \varphi$ , qui nous permettent de calculer les 2 exposants  $\alpha$  et  $\beta$ . Or, il suffit de 2 groupes de valeurs seulement pour déterminer ces 2 inconnues. Si toutes les mesures étaient rigoureusement exactes, tous les groupes donneraient les mêmes résultats. Mais malheureusement, il nous faut compter avec une certaine dispersion qui provient essentiellement du fait que pendant nos enregistrements, la constitution du réseau varie quelque peu continuellement, en plus et en moins de la valeur moyenne. Aussi avons-nous procédé comme suit:

Si nous divisons toute l'équation par  $\Delta p$ , nous obtenons

$$\alpha \frac{\Delta u}{\Delta p} + \beta \frac{\Delta \varphi}{\Delta p} = 1$$

En calculant pour chaque groupe les quotients

$$\frac{\Delta u}{\Delta p} = y, \quad \frac{\Delta \varphi}{\Delta p} = x$$

l'expression  $\alpha y + \beta x = 1$  représente une droite. Et tous les points mesurés devraient s'aligner sur cette droite. Comme il n'en est rien, nous empruntons la solution au procédé dit «des moindres carrés», en recherchant la droite pour laquelle la somme des carrés des distances des points mesurés à la droite soit un minimum. Cette droite a pour particularité

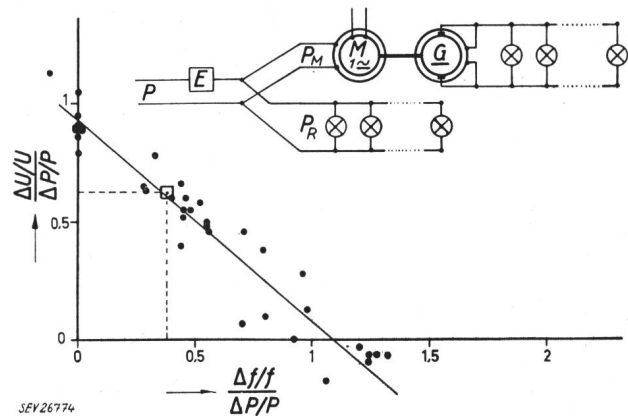


Fig. 8  
Mesures en laboratoire

Réseau constitué par un groupe de lampes à incandescence ( $P_R$ ) et un moteur asynchrone monophasé chargé par une génératrice alimentant aussi des lampes ( $P_M$ )  
 $P_R = K_R U^{1,6} f^0 = 3,2 \text{ kW}$  = puissance «résistante»  
 $P_M = K_M U^0 f^{2,0} = 1,6 \text{ kW}$  = puissance «motrice»  
 $P = P_M + P_R = 4,8 \text{ kW}$  = puissance totale enregistrée en E

$$P = K U^{1,09} f^{0,91} \text{ ou } \frac{\Delta P}{P} = 1,09 \frac{\Delta U}{U} + 0,91 \frac{\Delta f}{f}$$

□ point fixe

de passer par le centre de gravité de tous les points mesurés. Les deux exposants  $\alpha$  et  $\beta$  les plus probables apparaissent comme l'inverse des segments découpés par la droite sur les axes de coordonnées.

La fig. 8 montre d'abord les résultats obtenus par un essai au laboratoire d'électrotechnique de l'EPUL. Ici le réseau est constitué par un groupe de lampes à incandescence, absorbant 3,2 kW et un moteur asynchrone monophasé chargé par une génératrice alimentant aussi des lampes. Le moteur absorbait 1,6 kW. La puissance totale consommée apparaît ici comme:

$$P = K \cdot U^{1,09} \cdot f^{0,91}; \alpha = 1,09; \beta = 0,91$$

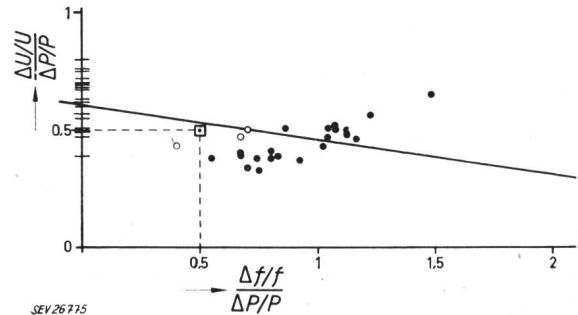


Fig. 9  
Mesures à Pierre-de-Plan  
(Réseau de Lausanne)

● essai n° 1 — essai n° 2 ○ essai n° 3 □ point fixe  
 $\Delta P = K U^{1,65} f^{0,35}$  ou  $\frac{\Delta P}{P} = 1,65 \frac{\Delta U}{U} + 0,35 \frac{\Delta f}{f}$

La fig. 9 montre les résultats obtenus à Pierre-de-Plan sur le réseau de Lausanne, un jour de semaine:

$$P = K \cdot U^{1,65} \cdot f^{0,35}; \alpha = 1,65; \beta = 0,35$$

La fig. 10 donne les résultats des mesures sur le réseau de La Renfile (Genève) le 11 mars 1958 par

$$P = K \cdot U^{1,36} \cdot f^{0,87}; \alpha = 1,36; \beta = 0,87$$

Ces enregistrements sont assez difficiles à mettre en œuvre, parce que, comme nous l'avons dit plus haut, ils posent au producteur des conditions souvent difficiles à réaliser (conditions hydrologiques, mise à disposition de machines et de lignes, etc.).

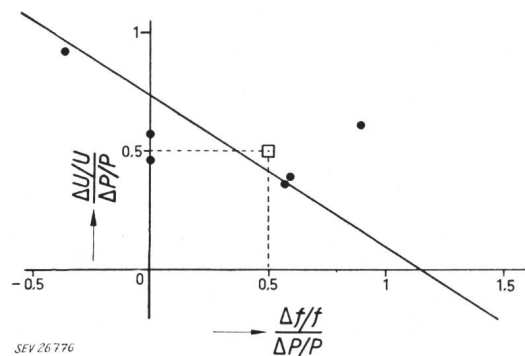


Fig. 10  
Mesures à Verbois  
(Réseau de La Renfile, Genève)

□ point fixe  
 $P = K U^{1,36} f^{0,87}$  ou  $\frac{\Delta P}{P} = 1,36 \frac{\Delta U}{U} + 0,87 \frac{\Delta f}{f}$

Aussi vaut-il la peine de rechercher s'il n'est pas possible d'obtenir la connaissance des deux exposants  $\alpha$  et  $\beta$ , au moins approximativement par d'autres moyens.

On peut admettre que le réseau d'utilisation ne comprend en général que des éléments résistants (chauffe-eau, cuisinière, éclairage) et des moteurs asynchrones. La puissance consommée par les résistances est indépendante de la fréquence, et varie avec le carré de la tension; celle des lampes à incandescence, avec la puissance 1,6 à 1,7 de la tension.

Posons cette puissance  $P_R = K_R \cdot U^r$  où  $r \approx 2$ , la proportion de lampes étant relativement petite par rapport à celle des cuisinières et chauffe-eau.

La vitesse des moteurs asynchrones est pratiquement indépendante de la tension, et ne dépend que de la fréquence. Certains moteurs travaillent à couple constant (machines-outils, par exemple). La puissance qu'ils absorbent est proportionnelle à la fréquence. D'autres entraînent des pompes ou des ventilateurs. Leur puissance varie avec le cube de la fréquence. On peut admettre que, dans l'ensemble, la puissance «motrice» varie à peu près avec le carré de la fréquence. Pour généraliser, disons que la puissance absorbée par l'ensemble des moteurs est proportionnelle à la puissance  $m$  de la fréquence (où  $m \approx 2$ ), soit  $P_M = K_M f^m$ , de sorte que la puissance totale absorbée par la clientèle est:

$$P = P_M + P_R = K_R U^r + K_M f^m$$

Si nous provoquons une petite variation de tension et de fréquence, la variation de puissance sera:

$$\Delta P = r K_R U^{r-1} \Delta U + m K_M f^{m-1} \Delta f$$

ou:

$$\frac{\Delta P}{P} = r \frac{P_R}{P} \frac{\Delta U}{U} + m \frac{P_M}{P} \frac{\Delta f}{f}$$

$\frac{P_R}{P} = p_R$  est la proportion de puissance absorbée par les éléments résistants,  $\frac{P_M}{P} = p_M$  est la proportion de puissance absorbée par la force motrice. En comparant la relation

$$\frac{\Delta P}{P} = \Delta p = r p_R \frac{\Delta U}{U} + m p_M \frac{\Delta f}{f}$$

avec ce que nous avons trouvé plus haut, soit:

$$\Delta p = \alpha \frac{\Delta U}{U} + \beta \frac{\Delta f}{f}$$

on en conclut que:

$$\alpha = r p_R; \quad \beta = m p_M$$

et comme nécessairement  $p_R + p_M = 1$ , il en résulte une relation entre les 2 exposants

$$\frac{\alpha}{r} + \frac{\beta}{m} = 1$$

$r$  et  $m$  sont des valeurs fixes, généralement très voisines de 2. D'autre part, il n'est pas déraisonnable d'admettre qu'en général le rapport entre la puissance motrice et la puissance totale consommées par la clientèle est le même que celui de la puis-

sance motrice installée et la puissance installée totale. De même en ce qui concerne les charges résistantes. Ces derniers chiffres sont connus par la statistique des Services d'électricité, et si on se contente de cette approximation, on peut ainsi calculer directement les valeurs des 2 exposants  $\alpha$  et  $\beta$ .

A titre d'exemple, le Service d'Electricité de Lausanne nous a indiqué qu'en 1955, il y avait d'installés sur le réseau de Lausanne:

142 MW de puissance «résistante»  
30 MW de puissance «motrice»

Total 172 MW, ce qui donne les proportions suivantes:

$$p_R = \frac{142}{172} = 0,83 \text{ et } p_M = \frac{30}{172} = 0,17$$

D'où

$$\alpha = r p_R = 2 \cdot 0,83 = 1,66 \text{ contre } 1,65 \text{ par l'enregistrement}$$

$$\beta = m p_M = 2 \cdot 0,17 = 0,34 \text{ contre } 0,35 \text{ par l'enregistrement}$$

Pour le réseau de La Renfile, nous ne connaissons pas les puissances installées. Par contre, nous avons comme renseignement, les consommations au moment de nos mesures, soit:

Puissance «résistante» environ 11 MW  
Puissance «motrice» environ 9 MW  
Puissance totale environ 20 MW

ce qui donne, par les mêmes calculs:

$$\alpha = 2 \cdot \frac{11}{20} = 1,1 \text{ contre } 1,36 \text{ par l'enregistrement}$$

$$\beta = 2 \cdot \frac{9}{20} = 0,9 \text{ contre } 0,87 \text{ par l'enregistrement}$$

Enfin, pour l'essai en laboratoire (fig. 8) nous avons déterminé exactement les deux exposants fixes  $r$  et  $m$ , exposants que dans les deux cas précédents nous avons estimés tous deux à 2, faute de mieux. Ces deux exposants sont donc ici  $r = 1,6$  et  $m = 2,6$  et par conséquent

$$\alpha = \frac{3,2}{4,8} 1,6 = 1,06 \text{ contre } 1,09 \text{ par l'enregistrement}$$

$$\beta = \frac{1,6}{4,8} 2,6 = 0,87 \text{ contre } 0,91 \text{ par l'enregistrement}$$

Remarquons encore en passant que, si la proportion de charge ohmique et de force motrice change au cours du temps, la droite qui détermine  $\alpha$  et  $\beta$  se déplace, mais passe toujours par un point fixe dont les coordonnées sont  $\frac{1}{r}$  et  $\frac{1}{m}$ , soit en général 0,5 et 0,5. La preuve en est facile à apporter, compte tenu des relations que nous venons de rappeler.

Les quelques calculs que nous venons d'effectuer, basés sur la statistique des installations, n'ont nullement la prétention d'être rigoureux; mais ils

devraient suffire pour donner une idée approximative de l'influence d'une variation de la tension et de la fréquence sur la puissance consommée, et fournir les éléments nécessaires à un dimensionnement plus économique du  $GD^2$ .

Il n'en reste pas moins qu'il serait précieux de poursuivre sur quelques autres réseaux les enregistrements commencés à Lausanne et à Genève, pour obtenir confirmation d'une concordance satisfaisante entre les prévisions et la réalité.

Nous ne pouvons qu'exprimer encore une fois le vœu que plusieurs exploitants veuillent bien mettre dans ce but leurs réseaux à la disposition de notre Comité d'Etude pour le Réglage des Grands Réseaux. Nous espérons les avoir convaincus de l'intérêt pratique et économique que présentent ces investigations.

Adresse de l'auteur:

E. Juillard, D<sup>r</sup> ès sc. techn., professeur à l'Ecole Polytechnique de l'Université de Lausanne, Les Rangiers-Béthusy, 51, av. Béthusy, Lausanne.

## Les divers modes d'application du réglage fréquence-puissance

Conférence donnée à l'Assemblée d'informations sur le réglage des grands réseaux, organisée par l'ASE

le 24 avril 1958 à Berne,

par D. Gaden, Genève

621.316.726 : 621.728 : 621.311.161

*Der Verfasser legt die verschiedenen Verfahren der Frequenz-Leistungs-Regelung dar, wobei der Ausdruck «Leistung» sich auf die durch Netz-Zusammenschluss übertragene Leistung bezieht. Zum Vergleich des direkten mit dem indirekten Verfahren bedient er sich eines Netzreglers. Das indirekte Verfahren wird häufig auch Leistung-Phase-Energie-Regelung genannt, wobei sich der Ausdruck «Leistung» in diesem Fall auf die durch die regelnden Maschinengruppen erzeugte Leistung, und der Ausdruck «Energie» auf die an der Übergabestelle abgegebene oder aufgenommene Energie bezieht. Der Verfasser erwähnt diejenigen schweizerischen Erzeugungsanlagen, welche nach dem einen oder anderen Verfahren ausgerüstet sind und entscheidet sich für das indirekte, weil damit auf einfachere Weise die Beteiligung einer grossen Zahl von Kraftwerken eines Netzes an der Regelung möglich ist, was ohne Zweifel einen Vorteil darstellt. Bei der gegenwärtigen Entwicklung der Netze und des Verbundbetriebes muss dieser Vorteil unbedingt ausgenutzt werden.*

*L'auteur expose quels sont les divers modes d'application du réglage fréquence-puissance, le terme «puissance» ayant trait, dans cette expression, à la puissance transmise par l'interconnexion. Il effectue la comparaison entre le mode d'application direct et celui indirect faisant appel à un régulateur de réseau. Ce dernier mode est souvent dénommé réglage puissance-phase-énergie, le terme «puissance» ayant cette fois trait à la puissance engendrée par les groupes réglants et le terme «énergie» à l'énergie livrée ou reçue à l'interconnexion. L'auteur indique celles des installations suisses qui sont équipées selon l'un et l'autre modes et conclut en faveur du mode indirect qui permet le plus facilement de faire participer au réglage de nombreuses centrales du réseau, ce qui constitue un incontestable avantage. Or, en présence du développement des réseaux et de leurs interconnexions, il devient absolument nécessaire de mettre cet avantage à profit.*

### I. Introduction

Le rappel du principe du réglage fréquence-puissance, ainsi que sa raison d'être, en vue de tirer le meilleur parti des interconnexions entre réseaux, a fait l'objet des exposés de M. Manfrini et de M. Keller<sup>1)</sup>. Nous nous proposons maintenant de considérer ici les divers modes d'application de ce principe de réglage, qui consiste donc à établir, du moins en régime permanent, la loi:

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

selon laquelle, en présence d'un écart de fréquence  $\Delta f$ , on laisse subsister, à l'interconnexion, un écart de puissance  $\Delta P_i = P_i - P_{i0}$ , différence entre la valeur instantanée  $P_i$  et la valeur de consigne  $P_{i0}$  de la puissance transmise. Le facteur de proportion  $K_i$  entre les deux écarts s'exprime en MW/Hz et a été dénommé l'énergie réglante d'interconnexion.

Nous montrerons comment ce principe de réglage peut être réalisé suivant divers modes d'application, en faisant ressortir les analogies qu'ils présentent, les différences existant entre leurs processus et la limite des possibilités auxquelles ils sont en mesure de répondre.

Nous laisserons intentionnellement de côté le détail des dispositions d'exécution des équipements,

lesquelles sont l'affaire des constructeurs des appareils, et nous nous bornerons à décrire l'essentiel de leur fonction. Nous espérons pouvoir ainsi apporter une contribution à la comparaison de ces divers modes d'application du réglage fréquence-puissance et aider les exploitants dans le choix auquel ils auront à procéder, selon les cas.

La Commission d'Etudes pour le Réglage des Grands Réseaux de l'Association Suisse des Electriciens a procédé à l'examen de cette question au cours de plusieurs de ses séances de travail et nous résumons ici les résultats auxquels elle est arrivée dans l'état actuel de ses études. Toutefois, ces résultats ne peuvent pas encore être considérés comme des «Recommandations» de caractère définitif à l'usage des producteurs d'énergie électrique et des constructeurs de machines. Les travaux de la Commission doivent en effet être poursuivis et complétés par des essais déjà entrepris, notamment pour se rendre compte de la tenue d'une puissance d'interconnexion, par rapport à sa valeur de consigne, ceci selon que son réglage est assuré au moyen de tel ou tel mode d'application du réglage fréquence-puissance.

Ajoutons encore que cet exposé est principalement destiné aux intéressés de notre pays et qu'il fera surtout état d'exemples d'exécution concernant des centrales suisses.

<sup>1)</sup> Ces conférences seront publiées ultérieurement dans le Bulletin de l'ASE.