Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 36 (1945)
Heft: 1

Artikel: Application pratique au réglage fréquence-puissance
Autor: Soloveicik, E.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1056444

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: 14.12.2025

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

indiquent chaque fois à minuit les totaux de tous les débitmètres. A la Handeck, le débit fut déterminé par la somme des enregistrements des débitmètres des 4 turbines et, à Innertkirchen, par la somme des enregistrements des débitmètres des 3 turbines.

Le résultat de ces mesures comparatives est consigné au tableau IV. On constatera que, durant cette période de mesures de 27 jours, l'enregistrement du débit de l'eau des deux usines est de 0,22 % plus petit à Innertkirchen qu'à la Handeck. En outre, cet écart ne présente que de très faibles dispersions, qui ne dépassent pas 1 %, sauf les dimanches, durant lesquels les dispositifs de jaugeage fonctionnaient dans des conditions défavorables à ces charges partielles.

L'étalonnage des venturimètres de la Handeck et d'Innertkirchen ayant été opéré sur la base des mesures aux moulinets, la bonne concordance des mesures comparatives prouve que les mesures aux moulinets effectuées à la Handeck en 1931 concordent pratiquement avec celles d'Innertkirchen en 1943. Ce résultat est d'autant plus remarquable que ces deux mesures furent entreprises non seulement avec un appareillage complètement différent, mais aussi dans des canaux différents.

L'importance pratique des déterminations journalières du rendement est illustré par la figure 14, qui indique le rendement moyen de l'usine d'Innertkirchen durant la période allant du 1er août au 30 novembre 1944. Les valeurs des samedis et des dimanches n'y figurent pas, car elles ne peuvent pas être comparées aux valeurs des autres jours de la semaine, en raison des conditions de charge très différentes.

La figure 14 montre que le rendement a baissé lentement du 1er août au 12 octobre, du fait de l'altération des pointeaux et des tuyères des injecteurs des turbines. Entre le 16 et le 22 octobre, les pointeaux et les tuyères des 3 turbines furent remplacés, et le rendement s'est relevé de 4 % pour atteindre environ 87,5 %, c'est-à-dire à peu près la valeur qui avait été mesurée sous charge moyenne de l'usine, lorsque les injecteurs étaient encore neufs.

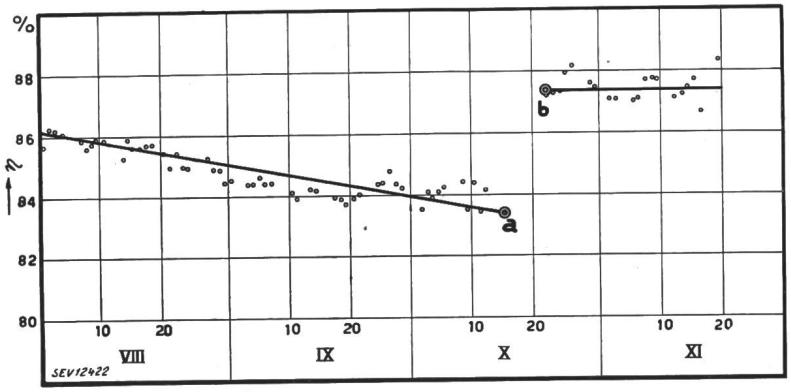

Fig. 14.

Variation du rendement journalier moyen de l'usine d'Innertkirchen, calculé d'après les lectures des compteurs de kWh et des débitmètres relevées en service (d'août à novembre 1944)

a—b Durant cette période, les pointeaux et les tuyères usés furent remplacés dans les trois groupes de machines.

Cet exemple prouve combien un contrôle permanent du rendement est important pour l'exploitation rationnelle d'une grande usine hydroélectrique. Les dépenses faites dans le but de permettre ce contrôle sont donc pleinement justifiées, puisqu'une très légère amélioration du rendement permet un accroissement considérable de la production d'énergie. Ainsi, dans le cas de l'usine d'Innertkirchen, une amélioration du rendement moyen de 1 % permet d'augmenter de 3,7 millions de kWh la production annuelle d'énergie électrique.

Application pratique au réglage fréquence-puissance

Par *E. Soloveicik*, Zoug

621.316.728

Après avoir rappelé les principes fondamentaux de la méthode de réglage fréquence-puissance, l'auteur décrit un appareillage automatique enregistrant continuellement les écarts moyens de la fréquence et les puissances moyennes échangées entre deux complexes voisins.

Es werden vorerst die Grundlagen der Frequenz-Leistungs-Regulierung in Erinnerung gerufen. Anschliessend beschreibt der Autor eine Einrichtung zur automatischen und kontinuierlichen Registrierung der mittleren Abweichung von der Normalfrequenz und des Energie-Austausches zweier gekuppelter Netze.

L'extension des interconnexions de grands réseaux électriques et l'expérience acquise dans ce domaine durant les dix dernières années a démontré que, pour assurer une exploitation rationnelle des réseaux de transport d'énergie, les puissances échangées entre chaque participant à l'interconnexion et

l'ensemble doivent être maintenues dans des limites bien déterminées — généralement très étroites — imposées par des contrats d'échange et par la capacité de transport des lignes.

Comme, d'autre part, les oscillations des puissances échangées sur les lignes d'interconnexion dépendent des oscillations de la fréquence, le réglage précis des puissances aux valeurs voulues (programmes) est intimement lié au réglage précis et serré de la fréquence.

On remarquera à cette occasion que parmi les différentes grandeurs physiques qui caractérisent un complexe électrogène, telles que puissance active et réactive, facteur de puissance, fréquence, tension etc., seules la puissance active et la fréquence peuvent être réglées par action directe sur les turbines d'entraînement des génératrices.

Or, malgré la parenté étroite évidente entre ces deux grandeurs, qui sont la puissance active et la fréquence, il est curieux de relever que les premières méthodes de réglage des puissances circulant sur les lignes d'interconnexions étaient basées sur une séparation arbitraire et artificielle des réglages de la fréquence et de la puissance.

Ainsi, dans la méthode classique, dite réglage par chef d'orchestre, encore en faveur dans de nombreux réseaux interconnectés, on assigne à l'un des participants de l'interconnexion le réglage astatique de la fréquence, alors que tous les autres sont astreints à régler la puissance d'échange. L'expérience a cependant tôt fait de démontrer les inconvénients résultant de ce mode de réglage.

Le fait de séparer les réglages de puissance et de fréquence conduit, en effet, à des oscillations incessantes de ces dernières et à des échanges d'énergie indésirés sur les lignes de liaison pouvant atteindre des valeurs inadmissibles et dangereuses. A ces inconvénients, d'ordre purement technique, viennent s'ajouter ceux d'ordre psychologique résultant de la difficulté, d'une part, de choisir l'usine ou un groupe d'usines comme chef d'orchestre, d'autre part, de la répartition équitable des frais d'exploitation afférant au réglage entre tous les réseaux participant à l'interconnexion.

Actuellement, et grâce aux travaux de MM. Fallou, Darrieus, Ailleret, Graner, etc., la tendance paraît s'orienter de plus en plus vers l'abandon des anciennes méthodes de réglage au profit du réglage fréquence-puissance qui, seul, semble présenter la solution idéale pour l'exploitation rationnelle et l'extension indéfinie des interconnexions.

Ce réglage, dont le principe fondamental est la compensation de toute variation de puissance par le réseau perturbateur et qui assigne à chacun des participants le devoir de corriger spontanément les écarts dus à ses propres variations de régime, permet d'éliminer d'une manière efficace et élégante les inconvénients de toutes sortes qui se sont manifestés avec les anciennes méthodes de réglage.

De nombreuses études ayant déjà paru à ce sujet [1]), il n'entre pas dans notre intention de reprendre, en détail, les différentes particularités du réglage fréquence-puissance, mais il nous a semblé intéressant de relever un côté du problème qui, sans être directement lié avec celui du réglage proprement dit, paraît apporter une contribution utile au règlement et au contrôle des écarts d'interconnexions entre deux complexes voisins.

L'écart d'interconnexion entre deux complexes est défini par la différence entre la puissance effectivement échangée entre eux et la somme des programmes.

L'écart propre d'un complexe est égal à la somme algébrique des écarts d'interconnexion avec les complexes voisins.

Il est convenu que pour un complexe donné, le signe positif est affecté aux exportations d'énergie et le signe négatif aux importations.

En France, le règlement provisoire d'interconnexions, entré en vigueur au 1er janvier 1941, prévoit que seuls seront pris en considération les écarts de puissance moyenne enregistrés par période horaire où la fréquence moyenne s'est écartée de plus d'un dixième de période de la fréquence de 50 Hz. On admet que la fréquence est sortie de la bande neutralisée (49,9 à 50,1 Hz), lorsque l'écart de l'heure réseau par rapport à l'heure de l'Observatoire de Paris sera de huit secondes ou plus pendant la période horaire considérée.

Le signe de l'écart moyen horaire de la fréquence sera:

0 si l'écart est compris entre 0 et 7 secondes inclus,
+ s'il y a eu avance de 8 secondes ou plus,
— s'il y a eu retard de 8 secondes ou plus.

Donneront lieu à pénalité, les écarts de puissance moyenne horaire de même signe que l'écart moyen horaire de la fréquence [2]), c'est-à-dire écart de puissance moyenne positif et écart de fréquence moyenne également positif ou écart de puissance moyenne négatif et écart de fréquence moyenne également négatif.

On voit ainsi l'intérêt que présenterait un appareil permettant d'enregistrer automatiquement et simultanément sur un diagramme les valeurs moyennes de la puissance par intervalles bien définis, (1 h, 1/2 h, 1/4 h, etc.) et l'écart moyen de la fréquence pendant le même intervalle de temps.

Un tel appareillage, système Landis & Gyr, a été réalisé et installé depuis plusieurs années déjà dans un certain nombre de postes d'interconnexions du complexe Est de la France, où se trouvent les dispatchings centralisateurs de la Cie Bourguignonne de Transport d'Energie, de la Société de Transport d'Energie de l'Ile-de-France, etc.

Dans les lignes qui suivent, nous nous proposons de décrire sommairement la construction et le fonctionnement de cet appareillage.

«Printo-Maxigraphes» fréquence-puissance

L'appareillage est constitué par:

2 «Printo-Maxigraphes», l'un servant à l'enregistrement de l'énergie exportée, l'autre à l'enregistrement de l'énergie importée.

[1]) Voir Bull. ASE 1937, No. 22; 1943, No. 7; 1944, No. 13.

[2]) Voir projet de règlement provisoire d'interconnexions du 19 décembre 1940.

1 Appareil contrôleur de fréquence.
1 Horloge de réglage actionnant, d'une part, le contrôleur de fréquence ci-dessus, d'autre part, la synchronisation des «Printo-Maxigraphes».

Le contrôleur de fréquence et l'horloge peuvent être incorporés dans le même boîtier (voir fig. 1).

«Printo-Maxigraphe»

L'appareil comporte un compteur d'énergie active, à deux ou trois éléments wattmétriques, accouplé par l'intermédiaire d'un servo-moteur et d'un accumulateur d'impulsions à un dispositif enregistrant les valeurs moyennes de la charge par période d'intégration, dont la durée peut être fixée par l'exploitant suivant ses besoins contractuels.

L'enregistrement, c'est-à-dire la représentation graphique de la courbe constituée par les différentes valeurs moyennes de la charge, se fait d'une part sous forme de traits rectilignes parallèles, d'autre part sous forme de chiffres imprimés correspondant chacun à la valeur exacte de la charge pendant la période considérée.

Dans les appareils adaptés au réglage fréquence-puissance, chaque chiffre imprimé est précédé d'un signe imprimé indiquant l'écart moyen de la fréquence pendant cette même période. Suivant que l'écart est positif, négatif ou nul (à la tolérance près), l'appareil imprime +, — ou Δ (le signe Δ a été choisi à la place de 0 pour éviter toute confusion avec les chiffres indiquant la valeur de la charge). La synchronisation, c'est-à-dire la coïncidence parfaite de l'enregistrement de l'énergie par rapport au temps avec l'enregistrement de la fréquence, est assurée par un dispositif de déclenchement actionné par l'horloge de réglage.

Contrôleur de fréquence

Cet appareil, destiné à déterminer la valeur moyenne de la fréquence par période d'intégration bien définie, est constitué essentiellement par un moteur synchrone à auto-démarrage dont la vitesse, directement proportionnelle à la fréquence du réseau d'alimentation, permet de déterminer la valeur de la fréquence moyenne intégrée pendant des intervalles de temps (périodes) bien définis. Cet appareil comprend, en outre, deux systèmes à disques entraînés alternativement par le moteur, ainsi que deux relais à armature pivotante.

Si l'on considère un point quelconque situé à la périphérie de l'un de ces disques, le chemin parcouru par ce point pendant une période d'intégration correspondra par définition à la valeur moyenne de la fréquence. Cette valeur, comparée à la valeur moyenne théorique, permet donc de déterminer l'écart de la fréquence et son signe. Suivant que ce point sera bloqué, à la fin de la période d'intégration considérée, en aval, en amont ou bien à l'endroit même correspondant à la fréquence théorique nominale de 50 Hz (à la tolérance près), l'appareil actionnera l'un des deux relais respectifs ou aucun d'eux.

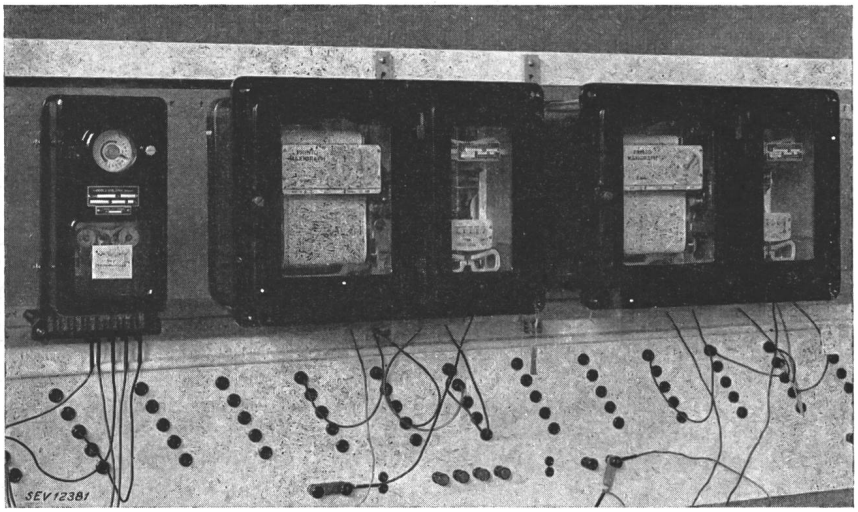

Fig. 1.

Groupe de mesure fréquence-puissance Landis & Gyr

comprenant deux «Printo-Maxigraphes» et un dispositif pour la mesure de l'écart de fréquence.

La continuité de mesure des écarts de la fréquence est assurée par un mouvement alterné du système à disques, l'un étant déclenché au moment où l'autre est bloqué et vice-versa. Outre les deux disques mentionnés ci-dessus et qui font $^2/_3$ de tour par période d'intégration, chaque système comporte encore d'autres disques faisant 10, respectivement 100 tours par période d'intégration; ces disques auxiliaires servent à déterminer, de manière précise, la longueur du chemin parcouru. A la fin de chaque période, un accouplement judicieux ramène tous ces disques à la position initiale.

Horloge de réglage

Ainsi que nous l'avons vu ci-devant, l'horloge doit assumer deux fonctions:

La commande du contrôleur de fréquence par embrayage et blocage alternés des disques.
La commande du dispositif de déclenchement et de synchronisation des «Printo-Maxigraphes».

Ces opérations de commande sont assurées à l'aide de deux commutateurs dont nous examinerons le fonctionnement plus loin. Le mouvement de l'horloge est réglé de façon à accuser une avance systématique de 10 à 20 secondes par 24 heures.

L'exactitude de marche est maintenue dans d'étroites limites par un organe récepteur de synchronisation relié à une horloge-mère extérieure.

Fonctionnement

Dans les lignes qui suivent, nous ne nous occuperons ni du compteur du «Printo-Maxigraphe», ni de l'enregistrement des valeurs moyennes de la charge, ni enfin d'autres détails des différents or-

ganes individuels des appareils que nous supposons être connus [3]).

Pour la clarté de l'exposé, le schéma (fig. 2) ne représente que les parties essentielles du dispositif réalisé pour la détermination et l'impression des écarts de la fréquence.

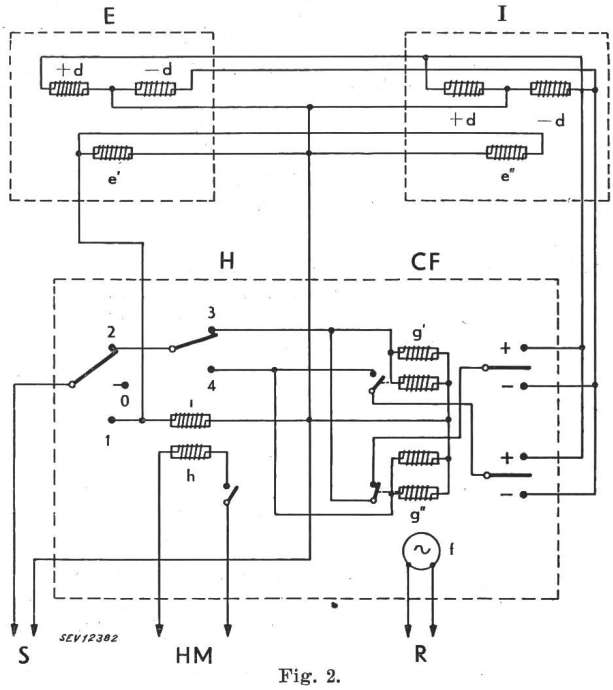

Fig. 2.
Schéma de principe

E	Printo-Maxigraphe «Exportation»	+d	relais de marquage
I	Printo-Maxigraphe «Importation»	−d	relais de marquage
H	Horloge de réglage	e' et e"	relais de synchronisation
CF	Contrôleur de fréquence	i, h	relais de synchronisation
S	Source courant continu ou alternatif		
HM	Horloge-mère	f	moteur synchrone
R	Réseau d'alimentation	g' et g"	relais de commande.

Dans le même ordre d'idées, nous supposerons la période d'intégration fixée à 15 minutes et le début des opérations successives à l'instant même où l'horloge ferme son contact sur le plot 1, opération ayant lieu 10 à 15 secondes environ avant le commencement d'une période d'intégration. Nous examinerons la succession des opérations dans l'ordre indiqué par le diagramme de temps (fig. 3).

a) Synchronisation

10 à 15 secondes environ avant le début d'une période d'intégration, désigné par *A* dans le diagramme de temps (fig. 3), le contact de l'horloge de réglage passe sur le plot 1, excite les deux électroaimants *e'* et *e''*, ainsi que le relais *i*. A la suite de ces opérations, les dispositifs de déclenchement et de synchronisation se mettent dans une position dite d'avertissement. Quelques secondes plus tard — 1,5 à 2 secondes environ avant le début de la période d'intégration — les échappements des «Printo-Maxigraphes» sont bloqués et compensent ainsi l'avance systématique du mouvement de l'horlogerie de ces derniers. Exactement au début de la période d'intégration, le contact de l'horloge de réglage passe de 1 à 2, coupe l'alimentation des relais *e'*, *e''* et *i*, libère les échappements et déclenche simultanément

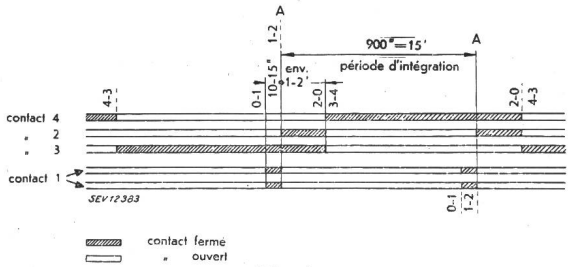

Fig. 3.
Diagramme de temps

le processus d'impression. Les mouvements d'horlogerie des appareils enregistreurs sont de la sorte réglés et synchronisés avec l'horloge de réglage au début de chaque période d'intégration.

b) Commande du contrôleur de fréquence

Simultanément à la synchronisation, un des relais *g'* ou *g''* est excité par l'intermédiaire des contacts 3, resp. 4 (contact 3 sur le schéma). Le système à disques respectifs est porté tout de suite à la vitesse correspondant à la fréquence instantanée effective du réseau d'alimentation, tandis que l'autre système qui marchait pendant la période d'intégration précédente est instantanément bloqué. Suivant sa position d'arrêt, $50 \geq f \geq 50$ Hz, le commutateur du relais *g'* resp. *g''* vient se fermer sur + ou — ou reste dans la position intermédiaire.

Si la valeur de la fréquence moyenne est supérieure à 50 Hz, le commutateur du relais se ferme sur le plot + et excite le relais de marquage + *d*. Le «Printo-Maxigraphe», qui se trouve en ce moment en marche, imprime le signe + qui apparaît à côté de la valeur moyenne de la charge correspondante. Si la valeur de la fréquence moyenne est inférieure à 50 Hz, le «Printo - Maxigraphe» imprime le signe —. Enfin, si la fréquence moyenne reste dans les limites de tolérance admises autour de 50 Hz, aucun des relais de marquage n'est excité et le dispositif d'impression imprime le signe Δ.

Une ou deux minutes après le début d'enregistrement, c'est-à-dire après l'impression du résultat, le contact qui se trouvait sur le plot 3 passe sur le plot 4, ce qui permet au système à disques, arrêté jusqu'à présent, d'avancer également et de revenir à sa position initiale où il se trouve bloqué à nouveau mécaniquement; après quoi, le cycle peut recommencer.

Limites d'exactitude de la détermination des valeurs moyennes de la fréquence

L'avance systèmatique de l'horloge, qui est de 10 à 20 secondes par jour, entraîne une erreur maximum de 0,2 seconde par période de 15 minutes, soit une erreur de 0,2 ‰. A cette erreur viennent s'ajouter

[3]) Voir Bull. ASE 1941, No. 26.

celles provenant des jeux de paliers, des ressorts de pression, de l'imprécision même du chemin parcouru par le disque et qui peuvent se chiffrer par un écart total de 0,2 ‰ au maximum dans le cas le plus défavorable. L'erreur totale s'élève ainsi à environ 0,4 ‰ de la période d'intégration, ce qui correspond à une erreur de ± 0,02 Hz.

Possibilités de réglage

L'appareillage est prévu pour une fréquence nominale de 50 Hz. Une échelle graduée, gravée sur l'un des disques de réglage fin, permet de régler l'écart moyen de la fréquence à environ ± 0,5 Hz de la valeur nominale. La graduation de l'échelle permet le réglage à 0,05 Hz près. L'appareil peut être réglé de telle façon que le signe Δ apparaît pour des valeurs quelconques de la fréquence située, par exemple, entre 49,9 et 50,1 Hz ou pour n'importe quelle autre valeur de la fréquence située entre 49,5 et 50,5 Hz. Les signes + et — sont imprimés lorsque la valeur moyenne de la fréquence est supérieure ou inférieure à l'une de ces limites de réglage.

Limites des fréquences moyennes garantissant un fonctionnement correct de l'appareillage

La limite supérieure des valeurs moyennes de la fréquence est de 53 Hz au maximum. La détermination de la limite inférieure est un peu plus compliquée. Si la tension du moteur synchrone reste approximativement stable, l'appareillage détermine correctement la fréquence jusqu'à une valeur moyenne d'environ 35 Hz, pour autant que, pendant cette période d'intégration, la fréquence ne fut, en aucun instant, inférieure à 30 Hz. Si la valeur moyenne de la fréquence représente la somme de différentes valeurs instantanées supérieures à 30 Hz, et de valeurs nulles (interruption de tension), l'enregistrement sera correct jusqu'à une valeur moyenne d'environ 7 Hz, à condition toutefois que l'interruption de la tension ne se soit pas produite à ± 0,5 minute du déclenchement de la période d'intégration.

Conclusion

De ce qui précède, il est facile de dégager les avantages offerts aux exploitants des réseaux interconnectés par l'utilisation d'un tel appareillage, à savoir:

Comptage

Chacun des «Printo-Maxigraphes» est pourvu d'un compteur d'énergie active normal, admis au poinçonnage officiel, pouvant servir à l'enregistrement de l'énergie échangée. Le dispositif enregistreur, de son côté, fournit des indications précieuses sur la courbe de charge de l'installation.

Contrôle des écarts de fréquence

Les écarts de fréquence sont automatiquement enregistrés en regard des puissances moyennes échangées pendant la période d'intégration considérée.

Le contrôle et la surveillance des écarts sont ainsi considérablement simplifiés et facilités et la bande d'enregistrement constitue une pièce comptable offrant toutes garanties de sécurité et d'exactitude, mettant le contrôle des écarts de fréquence à l'abri de toutes possibilités d'erreurs pratiquement inévitables avec les procédés actuels assurés par le personnel des dispatchings par liaisons téléphoniques.

Die Induktivität runder Spulen

Von *Karl E. Müller*, Zürich

621.318.4.011.3

Diese Mitteilung ist ein Nachtrag zu einer früheren Arbeit [1]). Dort wurde eine Formel zur einfachen Berechnung der Induktivität runder Spulen mit rechteckigem Wicklungsquerschnitt abgeleitet. Als besonderer Vorteil ergab sich eine Genauigkeit innerhalb 1 % für alle, einschliesslich der nur theoretisch möglichen, Dimensionsverhältnisse. Gleichzeitig konnte nebenbei ein Näherungsausdruck angegeben werden, der zwar weniger genau, dazu von beschränktem Gültigkeitsbereich ist, dagegen weniger Rechenarbeit erfordert und darum für Entwurfsarbeiten nützlich schien. Nun hat sich gerade dieser einfachere Näherungsausdruck in der Praxis eingeführt, und es war darum wünschenswert, das Problem einer *möglichst einfachen* Formel nochmals zu prüfen. Im folgenden soll über das Resultat dieser Untersuchung berichtet werden.

1. Vereinfachte, allgemein gültige Näherungsformel

Bereits in der früheren Arbeit konnte neben der auf 1 % genauen Formel (18) noch eine einfachere Lösung in Formeln (15, 16) angegeben werden. Man kann aber noch weiter vereinfachen, wenn von Formel (18) ausgehend, ein Näherungswert des Faktors k in den Nenner gesetzt, dabei als Faktor mit der Länge l verbunden wird, um eine graduelle Abnahme seines Einflusses bei kurzen Spulen zu erreichen. Trachtet man weiter nach möglichst einfachen Zahlenkoeffizienten, so erhält man schliesslich die folgende Formel. Eine runde Spule ohne Eisen, mit rechteckigem Wicklungsquerschnitt, vom *mittleren* Durchmesser D, der Länge l, der Dicke c, der Windungszahl N, hat eine Selbstinduktion L, alles in cm, angenähert:

$$L = \frac{14{,}4\, D^2 N^2 \log_{10}\left(23 + \frac{2{,}4\, D}{l + c}\right)}{D + 1{,}9\, c + l\left(2 + \frac{c}{D}\right)} \qquad (23)$$

Aus der Tabelle I erkennt man, dass die Fehler entsprechend den praktischen Bedürfnissen verteilt wurden; die innere Einrahmung der Tabelle bezeichnet das Gebiet der am häufigsten vorkom-

[1]) K. E. Müller, Die Induktivität runder Spulen, Bulletin SEV 1943, Nr. 12, S. 335.