



HAL
open science

Etude d'un nouveau fréquencemètre - Application au réglage de fréquence puissance

André Saint-Joanis

► **To cite this version:**

André Saint-Joanis. Etude d'un nouveau fréquencemètre - Application au réglage de fréquence puissance. Autre. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 1951. tel-00165227

HAL Id: tel-00165227

<https://theses.hal.science/tel-00165227>

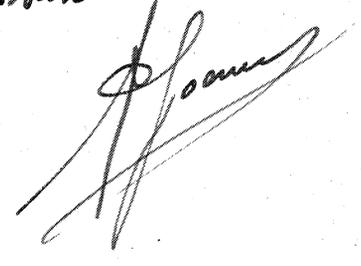
Submitted on 25 Jul 2007

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

01310141
B14

Hommage respectueux et
reconnaisant



N° d'ordre : 28

THÈSES

présentées à la Faculté des Sciences de l'Université de Grenoble
en vue de l'obtention du grade d'Ingénieur-Docteur

PAR

André SAINT-JOANIS

Ingénieur I. E. G.

PREMIÈRE THÈSE

Étude d'un nouveau fréquencesmètre Application au réglage fréquence-puissance

DEUXIÈME THÈSE

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ

Soutenues le 14 décembre 1951, devant la Commission d'Examen

JURY

MM. NÉEL, *Président* ; ESCANGLON, *Rapporteur* ; FALLOT et KUNTZMANN, *Examineurs*

IMPRIMERIE ALLIER
26, Cours Jean-Jaurès
GRENOBLE

1952

UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

FACULTÉ DES SCIENCES

Doyens Honoraires	:	MM. GAU, FORTRAT.
Doyen	:	M. MORET.
Professeurs Honoraires	:	MM. FLUSIN, Electrochimie-Electrometallurgie. FAVARD, Professeur à la Sorbonne. FORTIER, Mécanique des Fluides.
Professeurs	:	MM. GIGNOUX, Géologie et Minéralogie, Membre de l'Institut. FORTRAT, Physique Générale, Correspondant de l'Institut. MORET, Géologie, Correspondant de l'Institut. ANDRIEUX, Chimie. de LITARDIÈRE, Botanique, Correspondant de l'Institut. NÉEL, Physique Expérimentale. BRELOT, Calcul Différentiel et Intégral. PARDE, Hydrologie Fluviale. ESCLANGON, Physique Industrielle. DORIER, Zoologie. HEILMANN, Chimie. KRAVTCHEKNO, Mécanique Rationnelle. BENOIT, Radioélectricité. CHÈNE, Chimie Papetière. NOBÉCOURT, Micrographie Papetière. WEIL, Physique. FELICI, Physique.
Professeurs sans chaire	:	MM. DODERO, Electrochimie-Electrometallurgie. FALLOT, Physique. KUNTZMANN, Analyse appliquée. SANTON, Mécanique.
Maître de Conférences Honoraire	:	M. OFFNER, Botanique.
Maîtres de Conférences	:	MM. SILBER, Mécanique des Fluides. REULOS, Physique. REEB, Mathématiques. SOUTIF, Physique. GALVANI, Mathématiques. TRAYNARD, Chimie. BARBIER, Géologie.
Secrétaire	:	M. GRENIER.

TABLE DES MATIÈRES

	Pages
AVANT-PROPOS	5
PREMIÈRE PARTIE :	
ÉTUDE D'UN NOUVEAU FRÉQUENCEMÈTRE	7
Rappel du principe et description de ce fréquencemètre	7
Précision de ce fréquencemètre	8
Essais de sensibilité et de fidélité de ce fréquencemètre	9
Application principale de ce fréquencemètre	10
DEUXIÈME PARTIE :	
APPLICATION AU RÉGLAGE FRÉQUENCE D'UN GROUPE ISOLÉ	11
Rappel du principe du régulateur accéléro-tachymétrique	11
Considérations générales	12
Schéma du régulateur réalisé au laboratoire	13
Description sommaire des éléments de ce régulateur	15
Equation du mouvement de l'ensemble groupe-régulateur. — Essais directs	17
Essais de ce régulateur en régime permanent harmonique. — Tracé du critère de NYQUIST	19
Autre possibilité d'emploi d'un régulateur primaire électrique	21
TROISIÈME PARTIE :	
APPLICATION AU RÉGLAGE FRÉQUENCE-PUISSANCE D'UN GROUPE INTERCONNECTÉ	22
Rappel de quelques généralités	22
Loi de réglage fréquence-puissance. — Définition du statisme virtuel.	23
Possibilités d'asservissement du fréquencemètre	25
Application au régulateur primaire réalisé au Laboratoire	26
Résultats obtenus	27
Considérations générales sur les éléments d'un régulateur électrique destiné à une application industrielle	29
CONCLUSION	31

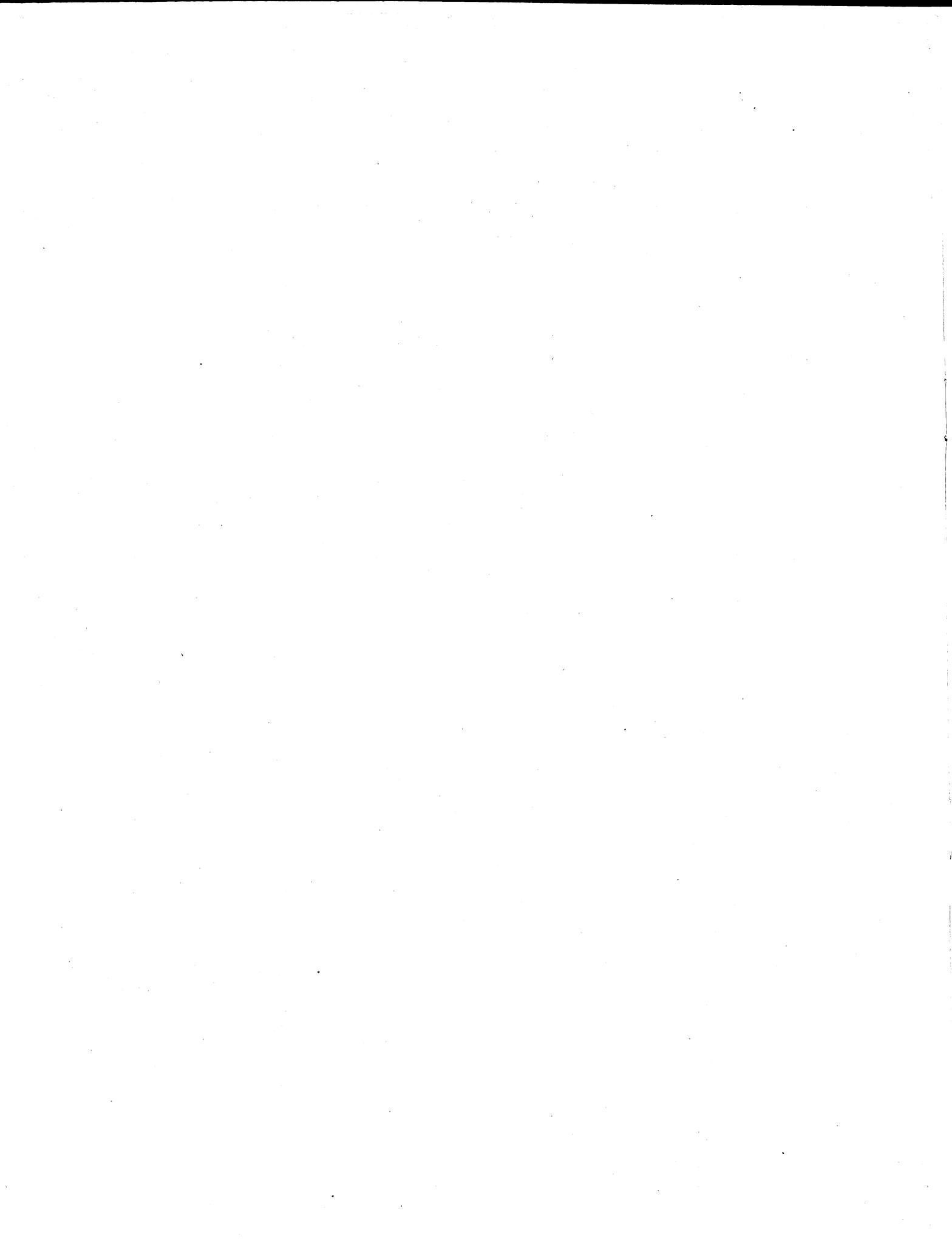


AVANT-PROPOS

De nombreux ponts à courant alternatif, du type « pont de Wheatstone », permettent la mesure des fréquences industrielles (48 à 51 hertz pour l'Europe). Un de ceux-ci, signalé par M. B. HAGUE¹ sous le nom de « Tuned arm bridge », a été retenu pour sa constitution simple, et son comportement intéressant pour de légers déséquilibres. Dans un article publié à la Société Française des Electriciens, M. F. ESCLANGON² a proposé une utilisation industrielle commode du pont à résonance, et a démontré tous les avantages de son système. La première partie de ce rapport, qui ne fait que préciser certains points importants, constitue l'entrée en matière à l'étude d'une application intéressante : le réglage fréquence-puissance.

¹ B. HAGUE : "Alternating current bridge methods". Londres, Pitman, 1945.

² F. ESCLANGON : « Présentation d'un nouveau type de fréquencesmètre et son application au réglage fréquence-puissance ». (*Bulletin de la Société Française des Electriciens*, janvier 1947.)



PREMIERE PARTIE

Etude d'un nouveau fréquencemètre

Rappel du principe et description de ce fréquencemètre (figure 1) :

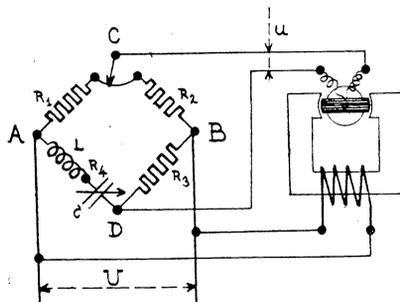


Fig. 1.

Le pont à résonance comprend dans les branches AC, CB, BD, des résistances pures, dépourvues de self et de capacité répartie R_1 , R_2 , R_3 , et dans la branche DA un circuit oscillant $L C R_4$, constitué par une self bobinée sur un tore non magnétique, constante, insensible aux champs extérieurs, en série avec une capacité variable par décades, pour permettre l'ajustage de la résonance. R_1 et R_2 sont réunies par un potentiomètre à réglage très fin.

Les deux conditions d'équilibre de ce pont sont les suivantes : $R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4$ et $L \cdot C \cdot \omega^2 = 1$.

La première condition étant réalisée une fois pour toute au moyen du potentiomètre C, à chaque valeur de la capacité C correspond une pulsation ω^0 , ou une fréquence F^0 , pour laquelle la différence de potentiel aux bornes de la diagonale CD est nulle.

Nous utilisons le pont à résonance pour la mesure des variations de fréquence de faible amplitude, autour de la fréquence d'équilibre F^0 . L'étude du diagramme des tensions du pont montre, que pour de légers déséquilibres, la tension u qui apparaît entre les bornes C et D, en quadrature avec la tension d'alimentation U entre les bornes A et B, est proportionnelle à la variation de fréquence $(F - F^0)$:

$$u = 4\pi \cdot L \cdot \frac{R_3}{(R_3 + R_4)^2} \cdot U \cdot (F - F^0); \text{ avec } L \cdot C \cdot 2\pi \cdot F^0{}^2 = 1$$

L'électrodynamomètre à cadre mobile, employé comme appareil détecteur, a précisément sa sensibilité maximum pour une tension en quadrature avec la tension d'excitation de son inducteur, en parallèle avec l'alimentation du pont. Il consiste simplement en un électro-aimant dans l'entrefer duquel tourne un cadre branché entre les bornes C et D. Un miroir solidaire de ce dernier permet d'obtenir des enregistrements photographiques de la fréquence.

On repère le zéro de l'électrodynamomètre qui correspond à l'équilibre F^0 , le cadre fermé sur la résistance du pont, sans que celui-ci soit alimenté. Le couple créé par la force électromotrice induite dans le cadre est ainsi exactement compensé. Remarquons la faible valeur de ce couple, puisque l'inductance du cadre a une valeur à peu près 100 fois plus petite que celle de sa résistance ohmique.

Précision de ce fréquencemètre :

Les éléments du pont sont constants à 1/10.000 près pendant plusieurs années.

Pour que l'électrodynamomètre soit complètement insensible à une tension en phase produite par la variation de proportionnalité des résistances avec la température, il suffit de lui adjoindre un circuit déphaseur classique qui donne une quadrature exacte entre la tension d'alimentation de l'ensemble et le flux inducteur.

La déviation de l'électrodynamomètre proportionnelle au flux inducteur et à la tension u dans la diagonale du pont, exprimée en fonction de la tension d'alimentation U a pour valeur :

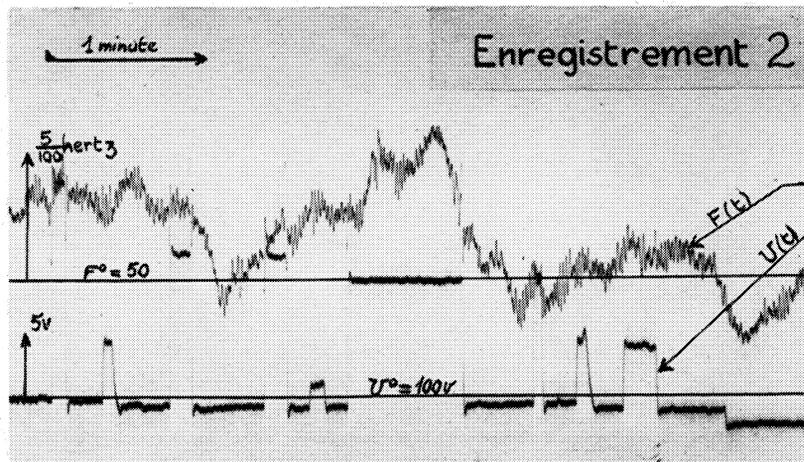
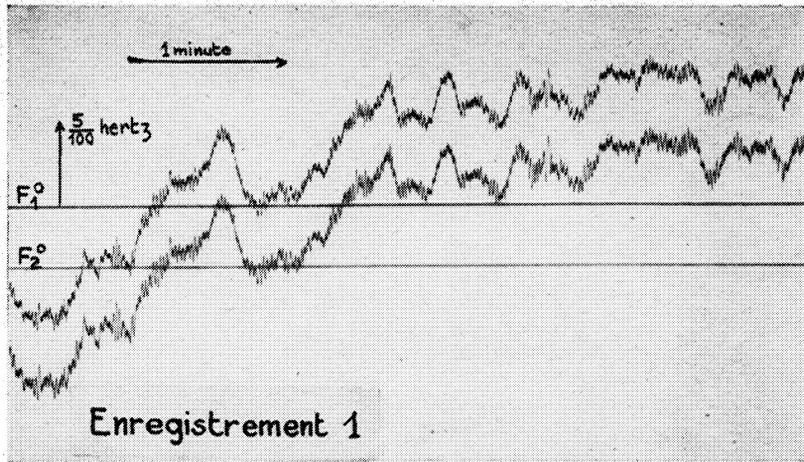
$$\Theta = A \cdot \bar{U}^2 \cdot (F - F^0).$$

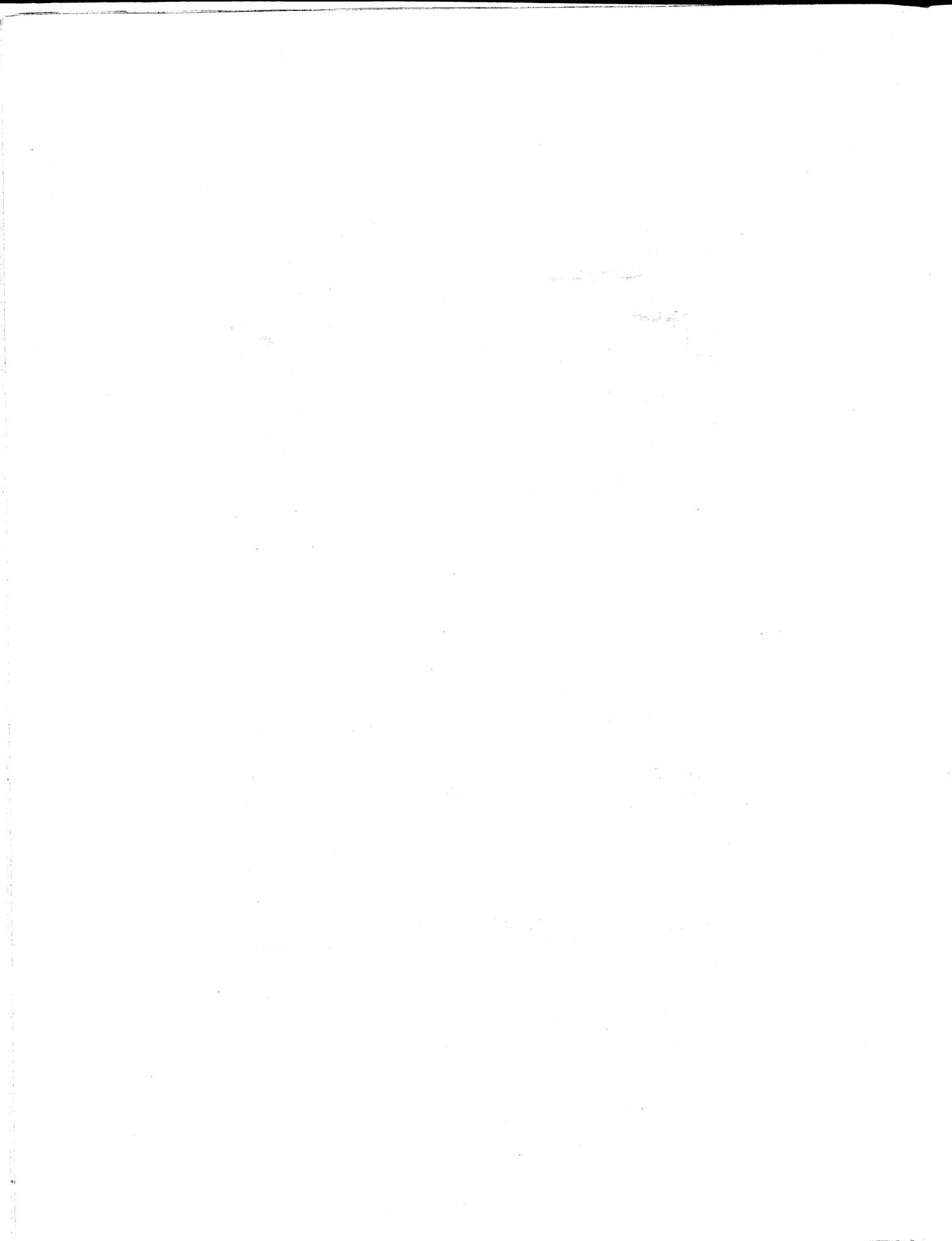
Une variation ΔU a pour conséquence une erreur sur la déviation :

$$\Delta \Theta = 2\Theta \cdot \frac{\Delta U}{U}.$$

Au voisinage de l'équilibre, à cause de la très grande sensibilité en fréquence, $\Delta \theta$ proportionnelle à la déviation initiale, représente toujours une variation de fréquence infiniment petite. Nous l'avons vérifié.

Comme tous les ponts à courant alternatif, accordés pour la fréquence fondamentale, le pont à résonance laisse subsister dans sa diagonale une tension résiduelle assez inconstante, qui provient des harmoniques du courant. Mais une harmonique de rang n agit sur l'équipage mobile de l'électrodynamomètre avec un couple $n \cdot k \cdot k'$ fois plus petit que le couple





normal dû à la fondamentale, k étant le rapport entre l'amplitude de l'harmonique et celle de la fondamentale de la tension U , k' étant le rapport entre l'amplitude de l'harmonique et celle de la fondamentale de la tension u . Nous avons vérifié qu'un filtrage sommaire, à l'entrée de l'ensemble pont et électrodynamomètre, suffit pour une bonne précision.

Essais de sensibilité et de fidélité de ce fréquencemètre :

Nous reproduisons dans ce rapport des enregistrements photographiques à l'échelle 1/2, obtenus avec le papier sensible à 1,47 mètre du miroir de l'équipage mobile de l'électrodynamomètre.

Enregistrement 1 :

Nous avons mesuré la fréquence du réseau au moyen de deux fréquencemètres à résonance de constructions différentes, l'un alimenté par l'intermédiaire d'un filtre à grand taux d'affaiblissement pour toutes les harmoniques, comportant un électrodynamomètre muni d'un déphaseur destiné à le rendre absolument insensible aux variations de la température, l'autre avec un filtre sommaire et un électrodynamomètre sans déphaseur.

Le décalage entre les deux courbes résulte d'équilibres différents pour les deux ponts à résonance. Ainsi les zéros des électrodynamomètres indiqués par des droites horizontales correspondent à $F^{\circ}_1 = F^{\circ}_2 = 48,55$ hertz.

Pour obtenir un meilleur critère de fidélité, nous avons ajusté les sensibilités des appareils jusqu'à les rendre égales chacune à $\frac{265}{10.000}$ hertz

pour 1 centimètre de déviation à 1 mètre. Cette valeur ne représente pas la sensibilité maximum des fréquencemètres employés qui est 6 à 7 fois

plus grande, soit $\frac{5}{1.000}$ hertz pour 1 centimètre de déviation à 1 mètre.

Nous remarquons que les deux courbes peuvent se superposer exactement. Nous démontrons ainsi la fidélité du fréquencemètre à résonance non influencé par les variations de la température, par les harmoniques du courant, et par les variations de la tension d'alimentation. Le déphaseur et le filtre à grand taux d'affaiblissement sont donc des auxiliaires d'usage superflu pour les mesures courantes.

Enregistrement 2 :

Nous insistons sur l'influence négligeable des variations de la tension d'alimentation sur la mesure de la fréquence.

Nous enregistrons simultanément la fréquence du réseau, et la tension d'alimentation du fréquencemètre au moyen d'un voltmètre différentiel

très sensible. Pour obtenir un essai très démonstratif nous avons créé des variations rapides de la tension d'alimentation jusqu'à 12 % de la valeur nominale égale à 100 volts. Ces sauts de tension n'existent jamais dans la pratique courante. Ils décalent légèrement la courbe de fréquence pour les points éloignés du zéro, et engendrent des variations rapides du flux inducteur de l'électrodynamomètre qui se manifestent par de faibles impulsions sur son équipage mobile.

Application principale de ce fréquencemètre :

Le fréquencemètre électrique à résonance peut mesurer la vitesse des groupes électrogènes, et remplacer ainsi avantageusement le tachymètre des régulateurs mécaniques. Tout en étant plus sensible et plus fidèle, il peut avoir une fréquence propre élevée qui permet naturellement une plus grande rapidité de réponse du servomécanisme commandé. Sa liaison avec le servomoteur se fait avec des organes électriques, électromagnétiques ou électroniques. De plus son action peut s'ajouter sans aucune difficulté à celles d'autres détecteurs électriques, et notamment à celle d'un wattmètre classique pour le réglage fréquence-puissance.

DEUXIEME PARTIE

Application au réglage fréquence d'un groupe isolé

Le régulateur électrique réalisé au Laboratoire utilise, comme détecteur de vitesse, le fréquencesmètre étudié dans la première partie de ce rapport, des amplificateurs électronique et électromagnétique. Son principe de fonctionnement reste identique à celui des régulateurs mécaniques classiques.

Rappel du principe du régulateur accélero-tachymétrique (figure 2) :

Il s'agit de maintenir la vitesse d'un groupe électrogène isolé à une valeur constante Ω^0 , quelles que soient les demandes de sa clientèle que l'on compense par des variations égales de la puissance produite.

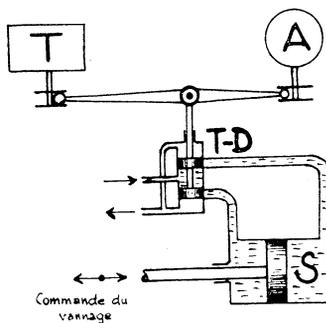


Fig. 2.

Le cercle de vannage de la turbine, solidaire du piston du servomoteur à pression d'huile (S), se déplace à une vitesse proportionnelle à la section découverte par le tiroir de distribution (T-D), c'est-à-dire à l'écart de vitesse ($\Omega - \Omega^0$) détecté par le tachymètre (T).

L'accéléromètre (A) qui mesure $\frac{d\Omega}{dt}$ ajoute son action à celle du tachymètre, pour compenser les effets d'inertie, et créer ainsi un amortissement convenable du mouvement pendulaire de l'ensemble groupe-régulateur.

L'action tachymétrique seule engendre un mouvement oscillatoire, souvent amorti, mais qui peut être amplifié dans le cas où le couple résistant décroît plus vite que le couple moteur pendant des variations de vitesse positives. L'action accélérométrique qui joue un rôle important

pour la stabilité de fonctionnement du régulateur, est souvent remplacée par l'action pratique d'un asservissement temporaire. La remarque suivante faite par M. Daniel³, est valable dans les deux cas théoriquement identiques.

Considérons à nouveau le montage schématisé dans la figure 2. L'action accélérométrique subit deux transformations successives et inutiles, puisqu'elles se compensent. En effet la variation de vitesse dérivée par l'accéléromètre est intégrée ensuite par le servomoteur dont la dérivée de la sortie, — vitesse de déplacement du piston — suit la commande d'entrée — déplacement du tiroir de distribution —.

Dans le schéma du régulateur électrique proposé, nous supprimons cette anomalie de la façon suivante : nous conservons l'action indirecte du tachymètre remplacé par un fréquencemètre, mais nous substituons à l'action indirecte de l'accéléromètre, celle du même fréquencemètre qui agit directement sur le vannage par le seul intermédiaire d'un amplificateur d'effort, qui transforme simplement une tension électrique en un déplacement mécanique correspondant. Avant de préciser le projet de ce régulateur susceptible de commander avec précision, promptitude et sécurité le vannage d'un groupe hydroélectrique de grande puissance, nous avons fait des essais avec les moyens limités dont nous disposons au laboratoire. Le préambule qui suit est nécessaire pour la bonne compréhension de quelques originalités. Nous nous en excusons.

Considérations générales :

Un moteur électrique à courant continu et un alternateur de faible puissance constituent le groupe d'essai du Laboratoire. Un moteur à excitation shunt ou indépendante tourne à une vitesse indépendante du couple moteur, si l'on néglige les chutes de tension internes. En ajoutant en série avec l'induit une résistance de valeur beaucoup plus élevée que celle de sa résistance propre, on crée une chute de tension proportionnelle à l'intensité absorbée. Sous tension d'alimentation constante, il en résulte une chute de vitesse proportionnelle à la puissance motrice; la caractéristique de couple moteur en fonction de la vitesse, d'allure parabolique, est ainsi analogue à celle d'une turbine. Toutes choses égales d'ailleurs, ce couple est sensiblement proportionnel au courant d'excitation; le réglage doit donc agir soit en modifiant la résistance du circuit inducteur, soit en modifiant sa tension d'alimentation.

³ Daniel : « Le statisme des régulateurs et son élimination ». (Revue de « La Houille Blanche », janvier-février 1950.)

Ne pouvant pas disposer d'un servomoteur à pression d'huile, nous le remplaçons, à titre occasionnel, par un moteur électrique dont l'induit grâce à un système différentiel absorbe une puissance toujours très supérieure à celle qu'il faut pour son démarrage. De plus sa vitesse de référence d'équilibre dépend de la vitesse absolue du groupe réglé, pour éliminer une erreur due à l'alimentation de son induit également fonction de la vitesse absolue du groupe. Moyennant ces précautions indispensables, nous sommes en possession d'un intégrateur de réponse acceptable, suffisamment précis et fidèle.

Dans les régulateurs mécaniques de groupes de grande puissance, le servomoteur comporte plusieurs étages d'amplification, et constitue avec ses organes auxiliaires un système complexe et volumineux. Dans un régulateur électrique il est possible de faire une préamplification de puissance, afin de le réduire à un seul étage. En conséquence nous alimentons notre servomoteur par l'intermédiaire d'une dynamo amplificatrice, « amplidyne », destinée à remplir cette fonction importante.

Le schéma du régulateur réalisé au laboratoire, décrit en détail dans les paragraphes suivants, pourra paraître complexe à première vue. Nous faisons remarquer qu'il n'est pas conçu pour le cas particulier du réglage de vitesse d'un moteur à courant continu. Il doit être considéré comme l'avant-projet d'un régulateur électrique de groupe générateur, de principe identique à celui d'un régulateur accéléro-tachymétrique.

Schéma du régulateur réalisé au Laboratoire (figure 3) :

Nous rappelons que ce schéma est analogue à celui du régulateur accéléro-tachymétrique.

Action tachymétrique : Le fréquencemètre qui remplace le tachymètre mécanique, est constitué par le pont à résonance (P) et l'électrodynamomètre (E). Une cellule photo-électrique (c) enregistre ses déviations.

Le courant photo-électrique crée dans la résistance ρ , une chute de tension amplifiée par l'amplificateur électronique (A).

L'amplification en puissance, qui prélève l'énergie nécessaire à une source à pression d'huile dans le dispositif mécanique, se fait au moyen d'une génératrice amplidyne (Ay) entraînée par le groupe réglé (M et G), excitée par l'intermédiaire de l'enroulement de contrôle V_2 . Cette dynamo fournit finalement la puissance nécessaire au réglage à un potentiel :

$$U_a = U_a^0 \left(1 \pm K \frac{F - F^0}{F^0} \right)$$

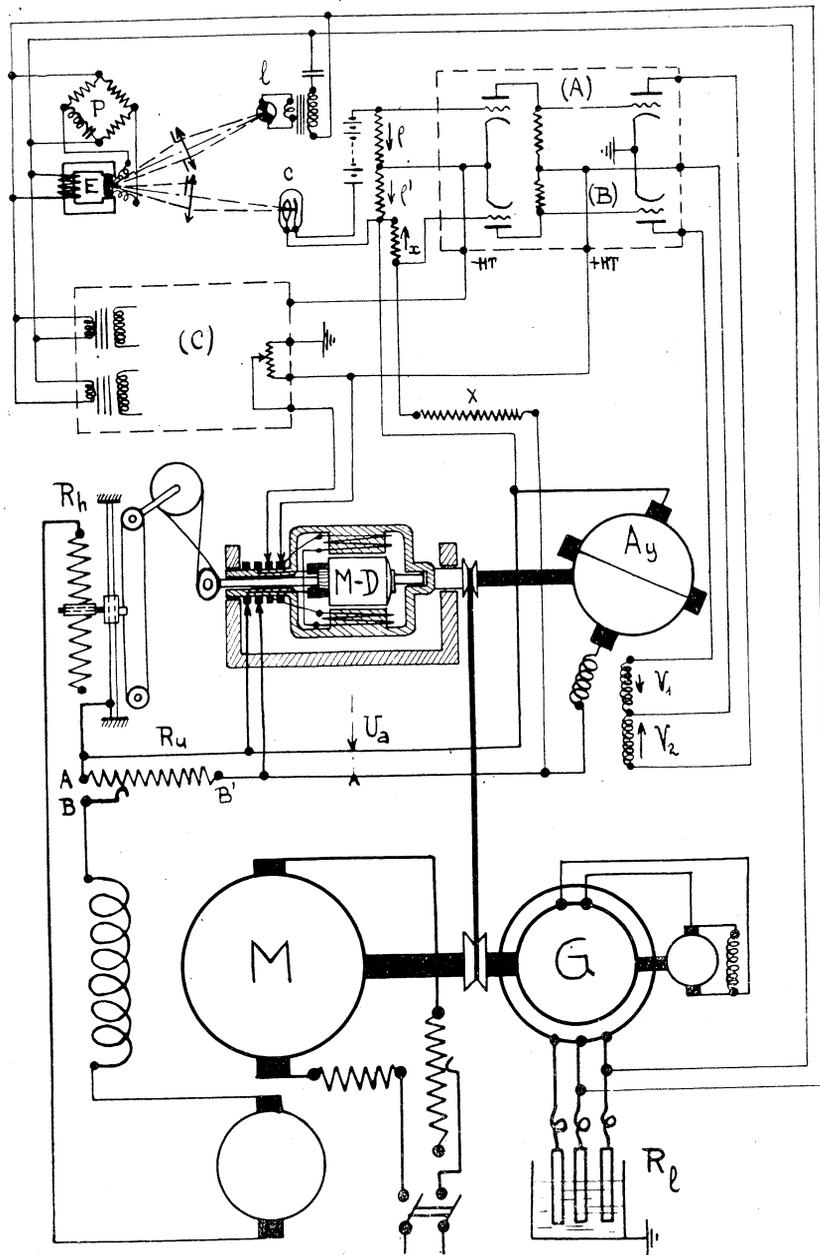


Fig. 3

Le moteur-différentiel (M-D) remplace le servo-moteur à pression d'huile dans sa fonction d'intégrateur. Ce moteur à courant continu, à excitation indépendante et constante, a son inducteur entraîné à une vitesse constante par rapport à un axe fixe : ω_{so} . Son induit alimenté directement par l'amplidyne, tourne en sens inverse par rapport à l'axe de l'inducteur. ω_{so} et U_a^0 sont telles qu'à l'équilibre, le rotor est immobile par rapport à un axe fixe. Pour un écart de fréquence ($F - F^0$) en plus ou en moins, il entraîne le curseur du rhéostat de réglage (Rh) à une vitesse proportionnelle à la variation de fréquence détectée, et modifie le courant inducteur du moteur (M) dont la variation de couple tend à annuler la perturbation.

Action accélérométrique : Comme nous l'avons déjà précisé, elle consiste simplement à obtenir une variation du courant inducteur proportionnelle à l'écart de fréquence détecté : une fraction de la tension U_a fournie par l'amplidyne prise aux bornes A B du pont de résistances (Ru) est en série avec l'alimentation de l'inducteur du moteur; ses variations d'amplitude amortissent convenablement le mouvement de l'ensemble groupe-régulateur.

Montage général : L'amplificateur électronique (B), correcteur d'hystérésis de l'amplidyne, compare constamment une fraction de la tension fournie par l'amplidyne $\left(U_a \cdot \frac{x}{X+x} \right)$ à la tension aux bornes de la résistance q' , égale à la tension de mesure aux bornes de la résistance q . Il modifie son courant de sortie qui traverse l'enroulement de contrôle V_1 , jusqu'à ce que les grandeurs comparées à l'entrée soient égales.

Le dispositif électronique (C) comporte les alimentations stabilisées des amplificateurs (A) et (B) et de l'inducteur du moteur-différentiel (M — D).

La résistance liquide (Rl) constitue la charge variable de l'alternateur.

Description sommaire des éléments de ce régulateur :

Nous avons déjà décrit le fréquencemètre dans la première partie de ce rapport.

Le relais photo-électrique est une reproduction de celui indiqué par E. HOCHARD⁴. Le montage adopté permet d'obtenir sur la couche sensible de la cellule une image fixe du filament de la lampe sous-voltée, avec un

⁴ E. HOCHARD : « Mesure des petits courants thermo-électriques; amplification des déviations d'un galvanomètre au moyen de cellules photo-électriques ». Thèse de Docteur ès Sciences. — Société Générale d'Imprimerie et d'Édition. Paris, 1935.

flux lumineux proportionnel à la déviation angulaire du miroir pilote. Cette disposition assure une très bonne fidélité de l'élément photo-électrique. L'alimentation de la lampe, par l'intermédiaire d'un transformateur à ferro-résonance, donne à l'ensemble une bonne stabilité, à l'abri des variations de tension du groupe.

Les deux amplificateurs électroniques à deux étages, du type classique « à courant continu », à caractéristique linéaire, ne diffèrent que par leurs circuits d'entrée; l'un commande l'amplidyne, l'autre contrôle et corrige instantanément la tension fournie par cette génératrice, lorsqu'elle n'est pas proportionnelle au courant photo-électrique. Leurs alimentations stabilisées (une pour chaque étage) sont également classiques : un tube pilote dont la grille mesure la différence entre la tension de sortie et celle d'une pile étalon, commande un tube régulateur en série sur le pôle positif de la haute tension.

L'amplidyne utilisée dans ce montage, construite par la Société Alsthom (Type MAD, forme en T) est décrite par M. VALENTIN⁵. Elle est munie des enroulements auxiliaires suivants : l'enroulement de neutralisation qui compense la réaction d'induit en charge, l'enroulement de réaction dérivée qui diminue le courant permanent de court-circuit, et améliore le facteur d'amplification dynamique, l'enroulement de réaction série qui atténue l'amplitude des variations du courant de court-circuit.

Rappelons que la vitesse de l'arbre moteur du moteur-différentiel reproduit fidèlement les variations de la tension d'alimentation de son induit, autour de sa valeur d'équilibre. Nous avons déjà précisé dans le paragraphe « Considérations générales » les raisons qui imposent ce dispositif différentiel. Comme l'inducteur à excitation indépendante et constante tourne à la vitesse du groupe et que l'induit tourne par rapport à lui à une vitesse inverse, proportionnelle à la tension fournie par l'amplidyne également entraînée par le groupe, son équilibre est parfaitement stable et indépendant de la fréquence de consigne. Le réglage n'intervient donc que lorsque le fréquencemètre détecteur modifie « le contrôle de l'amplidyne ».

Le rhéostat de réglage est un rhéostat classique à spires jointives sur lequel nous avons adapté un curseur à contacts roulants. De nombreux guides assurent un mouvement de translation continu, sans irrégularité, et sans jeu appréciable. Ce curseur est entraîné par un câble d'acier souple, tendu par un ressort. L'ensemble de ce rhéostat qui comporte la seule partie mécanique du montage nous a demandé une mise au point relativement longue, malgré sa simplicité apparente.

⁵ VALENTIN : « L'amplidyne et ses applications ». Revue d'électricité et de Mécanique. — ALSTHOM, Juillet, Août, Septembre 1948.

Equation du mouvement de l'ensemble groupe-régulateur. Essais directs :

Nous avons établi l'équation du mouvement de l'ensemble groupe-régulateur, initialement à l'équilibre (vitesse $\Omega = \Omega^0$ et couple $C^0 = C_m = C_r$) sous l'effet d'une perturbation brusque : $(C_r - C^0) (1 - n_0 Y_{(t)}) - (n \cdot Y_{(t)})$ est une fraction de la fonction échelon unité, avec les données suivantes :

a) La perturbation crée un déséquilibre de faible amplitude qui ne dépasse pas les limites de réglage.

b) Les caractéristiques de fonctionnement des éléments du régulateur sont linéaires. Nous l'avons obtenu après une mise au point approfondie et nous l'avons soigneusement vérifié.

c) Le moteur est alimenté à tension constante pendant la durée de la perturbation.

d) Les caractéristiques de couples moteur et résistant sont linéaires au voisinage de l'équilibre.

Ainsi l'équation générale du mouvement s'écrit :

$$\frac{d^2 \Delta \omega}{d.t^2} \left[1 - \frac{\nu \cdot \Delta t_2}{T} \right] + \frac{1}{T} \cdot \left[\alpha_r + \nu - \frac{\Delta t_4}{\bar{C}'} \right] \cdot \frac{d. \Delta \omega}{d.t} + \frac{\Delta \omega}{\bar{C}' \cdot T} = n \cdot \delta_{(t)}$$

$\Delta \omega = \frac{\Omega - \Omega^0}{\Omega^0}$ est la variation relative de vitesse.

T est l'inertie spécifique des masses tournantes du groupe.

$\alpha_r = \alpha - \alpha'$; α : pente de la caractéristique du couple moteur en fonction de la vitesse; α' : pente de la caractéristique du couple résistant en fonction de la vitesse.

$\nu = \beta \frac{\Delta u^0}{\Delta \omega^0}$ caractérise l'importance de l'action accélérométrique.

β : pente de la caractéristique du couple moteur en fonction du courant inducteur,

Δu^0 : action accélérométrique maximum à la limite de réglage,

$\Delta \omega^0$: limite de réglage,

$\frac{1}{\bar{C}'} = \frac{1}{\Delta \omega^0} \cdot \frac{\zeta}{\bar{C}}$ est la promptitude de réglage (définition de GADEN (6)).

$\frac{1}{\bar{C}}$ est la vitesse de manœuvre maximum du curseur du rhéostat de réglage à la limite de réglage.

⁶ GADEN : « Contribution à l'étude des régulateurs de vitesse. Considérations sur le problème de la stabilité ». — *La Concorde*, Lausanne, 1945.

Δt_1 est la résultante des retards de réglage dans l'action tachymétrique,
 Δt_2 est la résultante des retards de réglage dans l'action accélérométrique,
 $\delta_{(t)}$ est la fonction de DIRAC, dérivée de la fonction échelon unité.

Ces différents facteurs ont été calculés à partir des caractéristiques des appareils, mesurées avec précision; l'inertie spécifique a été déterminée par un essai de ralentissement.

Rappelons très sommairement la solution générale et la discussion classique de cette équation :

$$\Delta \omega_{(t)} = \frac{n}{\lambda \cdot \lambda'} \cdot (e^{\lambda \cdot t} - e^{\lambda' \cdot t})$$

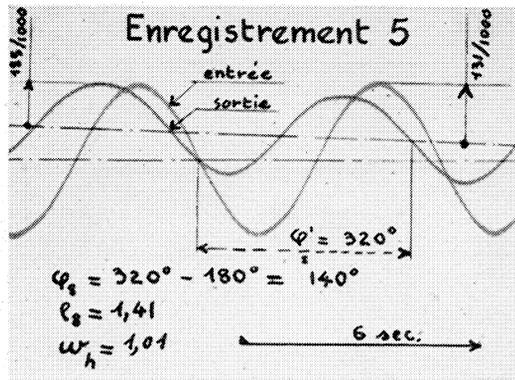
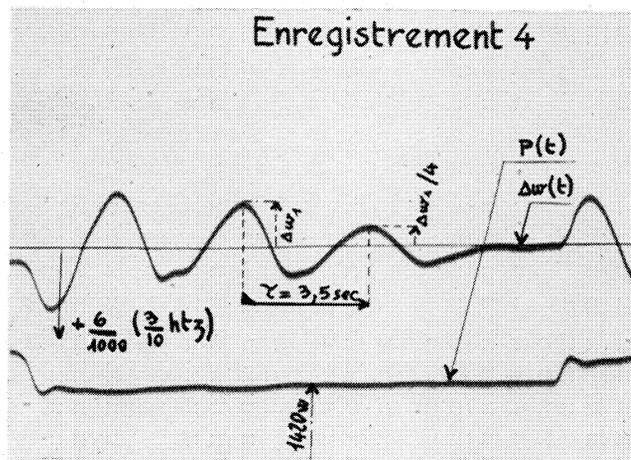
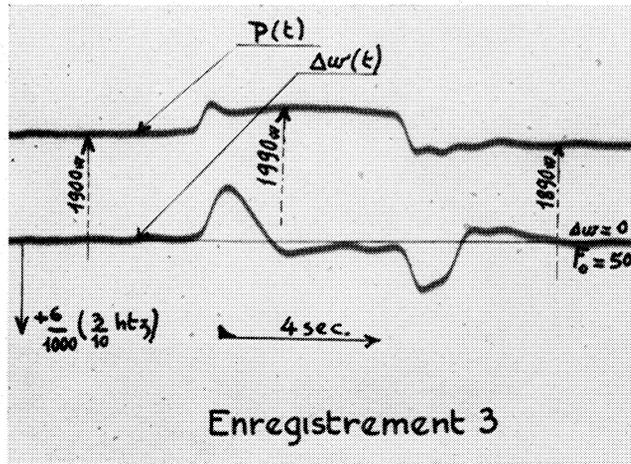
Si les racines λ et λ' de l'équation caractéristique sont négatives, $\Delta \omega_{(t)}$ est une fonction exponentielle décroissante. On a un réglage Isodrome qui tend à annuler la variation de vitesse.

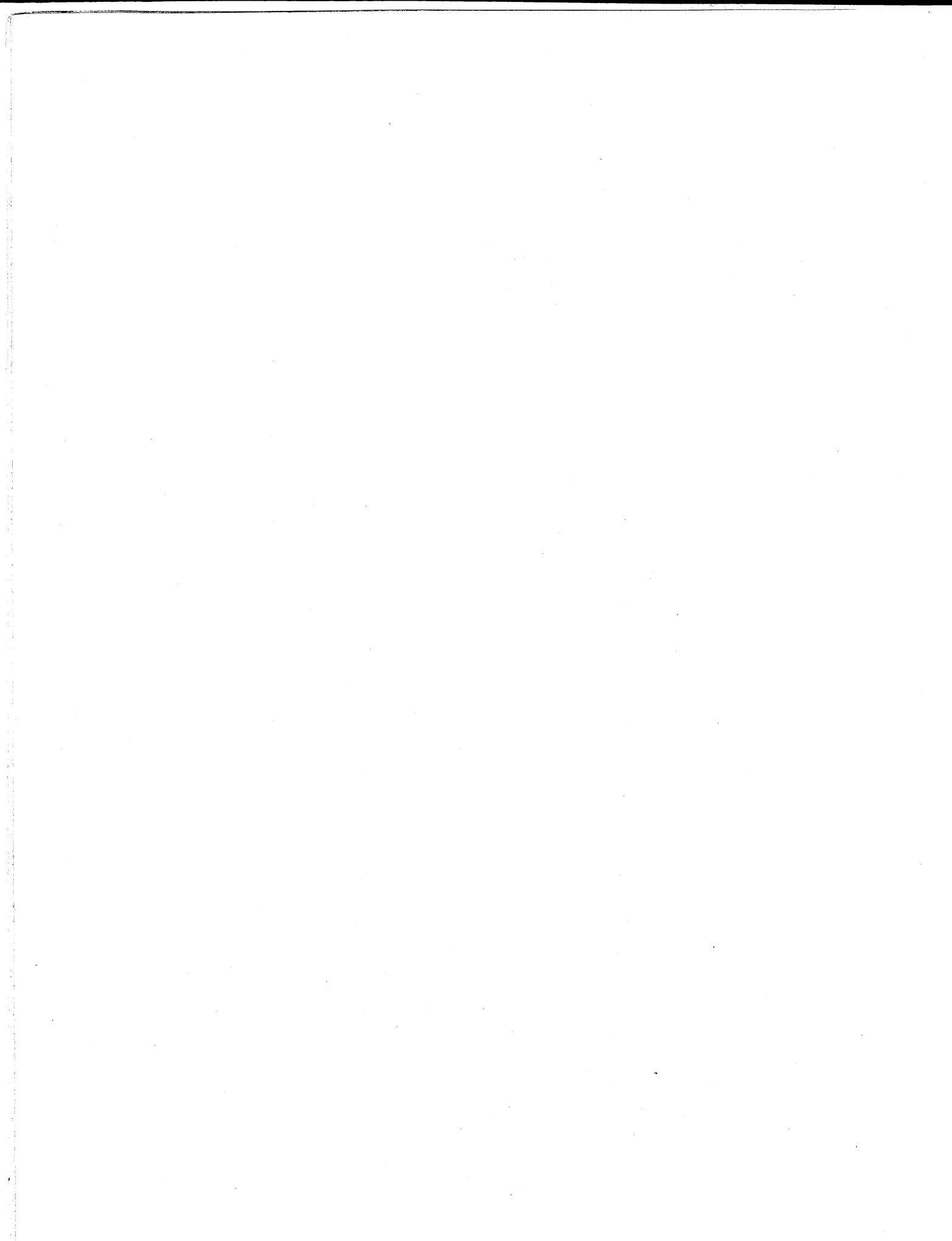
Le coefficient du terme en $\Delta \omega$ est toujours positif. Si le coefficient du terme en $\frac{d \Delta \omega}{d \cdot t}$ est négatif, le mouvement est oscillatoire à amplitude croissante, et de nature dangereuse. A cause de l'action accélérométrique qui intervient par le facteur v , ce terme est toujours positif. Il est possible de doser cet effet artificiel de stabilisation de façon à obtenir un mouvement d'amortissement peu différent de l'amortissement critique (discriminant nul). Nous remarquons que l'influence néfaste du retard de réglage Δt_1 est d'autant plus importante que la « promptitude de réglage » est de valeur élevée : une régulation rapide sera difficilement stable si les jeux mécaniques et les constantes de temps des circuits électriques n'ont pas été réduits au strict minimum. Dans le cas d'un groupe hydro-électrique le retard Δt_1 provient en majeure partie de la conduite forcée soumise aux effets des « coups de bélier ». C'est la raison principale pour laquelle certains régulateurs ont une promptitude limitée. Un mouvement trop apériodique ne doit pas être pris en considération, car il correspond à un temps de retour à l'équilibre trop grand.

En possession des caractéristiques du groupe réglé, et de tous les éléments du régulateur, nous avons vérifié par des essais directs, que le mouvement de l'ensemble groupe-régulateur (voir les enregistrements $\Delta \omega_{(t)}$), après une perturbation rapide de la puissance consommée (voir les enregistrements $P_{(t)}$), correspondait au signe du discriminant de l'équation générale.

Enregistrement 3 :

Le groupe fonctionne à pleine puissance avec $\alpha_r = 1,83$, $\beta = 1,25$,
 $T = 1,22$ sec.; le régulateur agit avec les conditions optimum : action





accélérométrique normale définie par $\nu = 1,54$. La valeur du discriminant calculé $\Delta = 5,50 - 5,05$ correspond bien au mouvement faiblement apériodique observé.

Enregistrement 4 :

Le groupe fonctionne à plus faible charge avec $\alpha_r = 2,44$, $\beta = 2,44$, $T = 1,45$ sec.; le régulateur agit avec les conditions les plus défavorables : action accélérométrique nulle. La valeur du discriminant calculé $\Delta = 0,78 - 12,05$ correspond bien au mouvement oscillatoire observé.

Pseudo-période calculée : 3,74 secondes.

Pseudo-période observée : 3,50 secondes.

Essais de ce régulateur en régime permanent harmonique — tracé du critère de Nyquist :

Un régulateur constitué avec le groupe réglé une chaîne fermée analogue à celle d'un amplificateur à réaction. Si l'on coupe cette chaîne en un point quelconque, et si on applique à l'entrée du nouveau système ainsi obtenu un signal sinusoïdal $e^{j\omega_h t}$ pris comme unité, la sortie subit également un mouvement sinusoïdal $\rho \cdot e^{j\omega_h t} \cdot \varphi$ rapport de transmission, fonction de la pulsation ω_h , est un nombre complexe de module : β' (rapport entre les amplitudes d'entrée et de sortie), d'argument φ' (déphasage entre les oscillations d'entrée et de sortie).

Connaissant β' et φ' pour différentes valeurs de la pulsation on peut appliquer le critère de Nyquist : la condition nécessaire et suffisante pour qu'un système soit stable est que le point $z = -1 + j \cdot 0$, dans le plan complexe de o , soit extérieur à la courbe $o(\omega_h)$, compte tenu de la branche infinie de la courbe correspondant à $\omega_h = 0$. D'après l'avis de M. KUNTZMANN, Professeur à la Faculté des Sciences de Grenoble, l'intérêt de cette méthode est de pouvoir discuter le passage de la stabilité à l'instabilité quand la courbe vient autour du point $(-1,0)$, la branche infinie étant déterminée à partir de l'étude de l'équation générale du système.

Comme nous avons à opérer sur un ensemble entièrement électrique, l'expérimentation du critère de Nyquist a pu être faite sans grandes difficultés.

Le signal sinusoïdal d'entrée de pulsation variable (de 0,1 à 5) est obtenu au moyen d'un relais capacimétrique construit par M. SAUVAGE⁷,

⁷ SAUVAGE : « Etude et réalisation d'un équipement électronique pour la mesure et l'enregistrement de faibles variations de capacité ». — Publication scientifique et technique du Ministère de l'Air, n° 245.

Professeur à l'Institut Polytechnique. Cet appareil que nous utilisons également pour le réglage fréquence-puissance (son schéma général est décrit dans la troisième partie) transforme une faible variation de capacité, de l'ordre de quelques picofarads, en un courant continu qui lui est proportionnel. Ainsi, si l'on dispose d'un condensateur variable à air, à variation

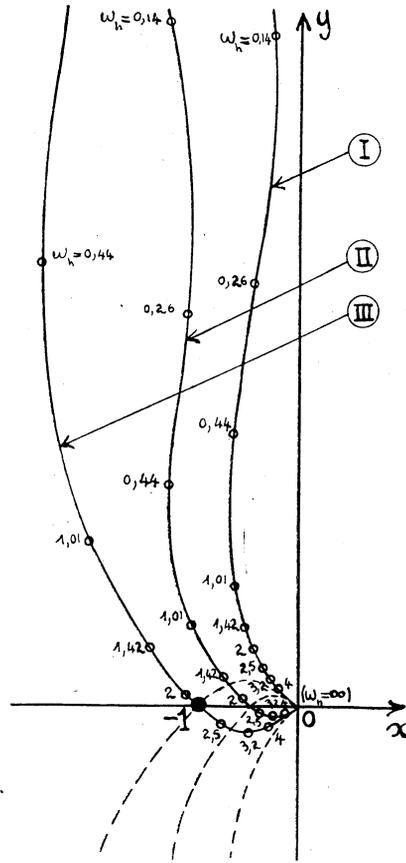


Fig. 4

sinusoïdale, dont l'armature mobile tourne à une vitesse qui correspond à la pulsation ω_n , on obtient par l'intermédiaire de ce relais la source étalon désirée.

On coupe la chaîne entre la diagonale du pont à résonance et le cadre de l'électrodynamomètre, éléments du fréquencemètre détecteur. Le cadre d'entrée est solidaire d'un autre cadre mobile dans l'entrefer d'un aimant permanent. Ce dernier parcouru par le courant sinusoïdal

d'excitation, de période toujours très supérieure à la période propre de l'équipage perturbé, crée le mouvement permanent harmonique. Un autre électrodynamomètre, branché aux bornes de la diagonale du pont à résonance situé à la sortie, détecte alors un écart de fréquence à variation sinusoïdale. Les enregistrements simultanés de sa déviation et de celle d'un galvanomètre qui mesure le courant perturbateur permettent de déduire expérimentalement le module et l'argument du rapport de transmission — on étalonne au préalable les appareils enregistreurs —. L'enregistrement 5 montre à titre d'exemple, l'un des 18 essais à partir desquels a été tracé les courbes de Nyquist de la figure 4 :

La courbe I définit un système légèrement apériodique dont le mouvement transitoire est représenté par l'enregistrement 3.

La courbe II définit un système oscillatoire amorti dont le mouvement transitoire est représenté par l'enregistrement 4.

La courbe III qui passe au point critique ($-1 + j \times 0$) définit un système à la limite de la stabilité.

Toutes ces courbes se ferment par un demi-cercle non représenté, de rayon ∞ , dans le demi-plan des x positifs. Cette limite théorique correspond à une excitation continue ($\omega_h = 0$) et permet d'affirmer que dans les cas I et II, le point ($-1 + j \cdot 0$) est extérieur à la courbe $q(\omega_h)$.

Autre possibilité d'emploi d'un régulateur primaire électrique :

Le problème du réglage de fréquence d'un groupe isolé comme nous l'avons étudié dans cette deuxième partie, ne se pose pratiquement plus. Sauf en cas d'accident, un groupe se trouve toujours incorporé dans un réseau d'interconnexion.

Ainsi l'automatisme doit intervenir non seulement sur la fréquence, mais aussi sur les puissances d'échanges entre groupes, réparties suivant un « programme ».

Actuellement, cette seconde fonction de réglage est remplie en général par un régulateur secondaire télécommandé, qui corrige l'action du régulateur primaire de fréquence asservi à la puissance produite par le groupe. Pour des raisons complexes, ce deuxième organe agit lentement, ou par impulsions brèves et espacées.

Dans la troisième partie de ce rapport nous décrivons et montrons les essais d'un système simple qui s'adapte facilement à un régulateur primaire électrique, et qui permet un réglage fréquence-puissance à « statisme virtuel » continu, rapide et cohérent.

TROISIEME PARTIE

Application au réglage fréquence-puissance d'un groupe interconnecté

Rappel de quelques généralités :

Dans cette étude de principe du réglage fréquence-puissance nous nous plaçons dans le cas simple d'une interconnexion comprenant n groupes réunis par $(n - 1)$ artères transportant des puissances d'échange de somme algébrique nulle. Nous considérons chaque groupe de puissance totale produite P_i , avec une consommation locale Q_i , exportateur ou importateur d'une puissance d'échange Π_{ij} avec le reste de l'interconnexion. Un réseau d'interconnexion comporte autant de paramètres de réglage (degré d'ouverture des vannages des turbines) qu'il y a de groupes; la fréquence unique est la seule grandeur à régler. On doit donc poser d'autres conditions de réglage, ou admettre $(n - 1)$ indéterminations sur la répartition des puissances.

Si en cas de perturbation générale créée par des variations de consommation, tous les régulateurs obéissent au seul écart de fréquence, ils rétablissent automatiquement l'équilibre entre la puissance totale produite et la consommation totale, mais ils répartissent la puissance entre les groupes d'une manière indéterminée et imprévisible, qui dépend pratiquement des promptitudes et des insensibilités des régulateurs.

Les régulateurs de fréquence peuvent être asservis à la puissance totale fournie par leur groupe. En période de réglage ils admettent une variation de cette puissance fonction de la puissance nominale, et de la variation de fréquence détectée : le rapport constant entre les variations relatives des deux grandeurs réglées est appelé « statisme permanent ». Les groupes « chef d'orchestre » à grande puissance nominale, et à faible statisme,

suffisent presque à eux seuls pour absorber les variations de consommation, tandis que ceux à grand statisme maintiennent leur puissance produite à peu près constante. Avec des statismes égaux pour tous les groupes munis de régulateurs sans insensibilité, on répartit la variation de consommation perturbatrice proportionnellement aux puissances nominales. Par une commande manuelle du changement de vitesse qui déplace la caractéristique de statisme parallèlement à elle-même, on peut modifier la répartition des puissances entre groupes si celle-ci est trop différente du « programme » prévu.

Loi de réglage fréquence-puissance. Définition du statisme virtuel :

La loi de réglage fréquence-puissance proposée par M. FALLOU^s :

$K_i \cdot (F - F^0) + (\Pi_{ij} - \Pi_{ij}^0) = 0$, établit une relation linéaire entre la fréquence du réseau et la puissance d'échange du groupe d'indice i avec le reste de l'interconnexion. A l'équilibre $F = F^0$ fréquence de consigne, et $\Pi_{ij} = \Pi_{ij}^0$ puissance d'échange fixée par le programme. Le coefficient K_i appelé « Energie réglante » du groupe d'indice i , définit la participation de ce groupe au réglage de l'interconnexion ($\Pi - \Pi^0$) quand la fréquence varie de $(F - F^0)$.

Nous verrons par la suite, que cette loi appliquée rationnellement présente des avantages importants pour l'économie et l'automatisme d'une interconnexion. Rappelons que sa première application consiste à remplacer la commande manuelle du changement de vitesse des régulateurs primaires à statisme permanent, par l'action d'un régulateur secondaire qui déplace lentement la caractéristique de statisme, lorsque l'écart de la puissance d'échange est différent de $-K_i (F - F^0)$.

Le système que nous avons étudié réalise la même loi de réglage fréquence-puissance avec un seul régulateur primaire électrique qui agit d'une façon continue, avec rapidité et cohérence. La fréquence d'équilibre de ce régulateur au lieu d'être la fréquence de consigne F^0 comme dans le cas d'un réglage isodrome, a une valeur F' variable :

$$-\Delta f^0 = S \cdot \Delta \pi \text{ avec } \Delta f^0 = \frac{F' - F^0}{F^0} \text{ et } \Delta \pi = \frac{\pi - \pi^0}{\pi^0}$$

L'écart détecté résultant est égal à $\Delta f - \Delta f^0$, avec $\Delta f = \frac{F - F^0}{F^0}$.

^s FALLOU : « Vue d'ensemble sur les systèmes de réglage automatique de la fréquence et de la puissance ». — Bulletin de la Société Française des Electriciens, Mai 1936.

Le régulateur tend à annuler cet écart. Ainsi nous retrouvons la loi de réglage fréquence-puissance exprimée avec les variables en valeur relative : $\Delta f + S. \Delta \pi = 0$. $S = \frac{\Pi^{\circ}}{K \cdot F^{\circ}}$ représente le « statisme virtuel ».

Il est virtuel parce qu'il n'existe que pendant le réglage; son influence est nulle sur l'équilibre ajusté suivant la demande du programme.

Étudions sommairement le fonctionnement d'un groupe interconnecté, muni d'un régulateur primaire, à statisme virtuel. Supposons, par exemple, que la consommation locale augmente instantanément. La puissance produite reste constante avant que le régulateur agisse, et la puissance d'échange augmente de la même quantité. Ensuite le régulateur modifie son équilibre d'une quantité $\frac{F' - F^{\circ}}{F^{\circ}}$ en valeur relative égale à $S. \Delta \pi$;

il agit dans le sens d'une augmentation de fréquence jusqu'à ce que $\Delta P = \Delta Q$ et $\Delta \pi = 0$. Si tous les régulateurs de l'interconnexion opèrent de la même façon, les variations de consommation ne sont pas transportées par les lignes d'interconnexion, et la fréquence se maintient automatiquement constante. Dans le cas d'une baisse de fréquence, produite par exemple par une déficience partielle du réseau aux heures de pointe, les groupes ayant encore de l'énergie disponible augmentent leur puissance d'échange sous l'action de leur régulateur qui détecte Δf . La fréquence du réseau remonte, l'écart détecté n'est plus que $\Delta f - S. \Delta \pi$. Le réglage se termine lorsque le réseau se trouve dans des conditions normales pour tous les groupes avec une fréquence F'° inférieure à F° , telle que

$$\frac{F'^{\circ} - F^{\circ}}{F^{\circ}} = S. \frac{\Pi'^{\circ} - \Pi^{\circ}}{\Pi^{\circ}}$$

Π° est la nouvelle puissance d'échange d'équilibre du groupe considéré. Lorsque la déficience disparaît, les régulateurs agissent à nouveau en sens inverse, pour rétablir l'équilibre initial.

Ainsi ce mode de réglage permet d'obtenir les avantages intéressants suivants :

a) Les variations de la consommation sont compensées dans leur propre domaine, sans réaction du groupe sur le réseau.

b) Les artères peuvent être utilisées le plus économiquement possible : les variations des puissances qu'elles transportent sont dues principalement à des déficiences ou des excès momentanés de puissance générale ou partielle du réseau, par rapport au programme prévu.

c) Dans ces cas normalement rares, ce réglage établit rapidement un équilibre de fréquence, et demande à chacun des groupes une variation

de sa puissance d'échange qui dépend uniquement de son statisme virtuel, d'une valeur arbitraire, choisie au mieux de ses possibilités (puissance nominale et réserve d'énergie).

d) Pour l'adapter à un régulateur primaire il suffit d'asservir l'équilibre du fréquencemètre à la variation de la puissance d'échange du groupe considéré avec le reste de l'interconnexion.

Possibilités d'asservissement du fréquencemètre :

Sur un régulateur mécanique, l'asservissement ne peut se faire que sur la tringlerie de commande du tiroir de distribution. Avec un régulateur électrique, nous présentons trois méthodes pour asservir le fréquencemètre à la variation de la puissance échangée. Il est certainement possible d'en imaginer beaucoup d'autres.

Première méthode : On dispose d'une part d'un fréquencemètre suivi d'un relais qui donne à sa sortie une tension continue proportionnelle à la variation de fréquence Δf , et d'autre part d'un wattmètre suivi d'un relais qui donne à sa sortie une tension continue proportionnelle à une fraction de la variation de la puissance d'échange $S. \Delta \pi$. L'addition de ces deux tensions de mesure, au moyen d'un pont de résistances à l'entrée des amplificateurs, permet de réaliser la loi de réglage fréquence-puissance.

Deuxième méthode : La fréquence F' (voir la définition du statisme virtuel) est considéré comme la fréquence d'équilibre du pont à résonance. La différence entre la résonance correspondant à la fréquence de consigne F° et la résonance correspondant à la fréquence F' , provient d'une inductance mutuelle, en série avec le circuit résonant du pont, dont la self mobile est solidaire du cadre d'un wattmètre qui mesure $(\Pi - \Pi^\circ)$.

Troisième méthode : Le cadre de l'électrodynamomètre branché dans la diagonale du pont à résonance, est lié mécaniquement à un autre cadre mobile dans l'entrefer d'un aimant permanent. Ce dernier élément traversé par un courant continu, obtenu à partir d'un relais qui mesure la déviation d'un wattmètre, crée un couple qui déplace le zéro de l'électrodynamomètre détecteur de fréquence suivant $(\Pi - \Pi^\circ)$.

Quel que soit le système d'amplification utilisé, on peut toujours choisir parmi ces méthodes théoriquement identiques, celle qui s'adaptera le mieux au détecteur fréquencemétrique.

Application au régulateur primaire réalisé au Laboratoire (figure 5) :

L'électrodynamomètre du régulateur isodrome, étant muni d'un dispositif galvanométrique, nous lui avons adapté le système de la troisième méthode décrite ci-dessus, sans aucune modification du montage prévu initialement pour le réglage du groupe isolé. Nous lui avons simplement adjoint un relais qui traduit la déviation du wattmètre d'interconnexion en un courant continu qui lui est proportionnel. Pour cette conversion, nous aurions pu nous servir encore d'un relais photo-électrique. Il nous semble plus utile d'expérimenter un relais capacimétrique mis au point par M. SAUVAGE⁹, susceptible d'applications industrielles, qui déjà lors de l'étude du critère de Nyquist (voir la deuxième partie de ce rapport) nous a donné d'excellents résultats.

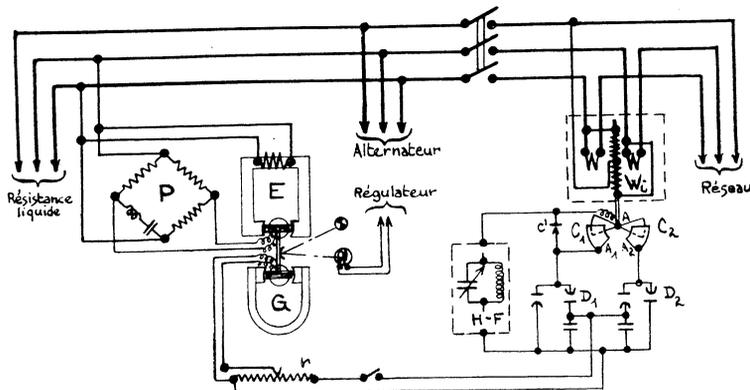


Fig. 5

L'équipage mobile du wattmètre d'interconnexion (W_1) porte une plaquette d'aluminium (A) qui tourne devant deux armatures métalliques fixes (A_1 et A_2), et forme avec elles deux condensateurs variables indépendants C_1 et C_2 , alimentés en parallèle par une source haute fréquence (H — F), schématisée par son circuit oscillant. Les courants qui les traversent sont mis en opposition après détection (D_1 et D_2). Le courant continu différentiel est proportionnel à la différence des capacités C_1 et C_2 , soit à la rotation de l'équipage du wattmètre qui mesure les variations autour de l'équilibre Π° (puissance d'échange fixée par le programme). Ce courant commande le cadre galvanométrique (G) solidaire de celui de l'électrodyna-

⁹ SAUVAGE : « Etude et réalisation d'un équipement électronique pour la mesure et l'enregistrement de faibles variations de capacité ». — Publication scientifique et technique du Ministère de l'Air, n° 245.

momètre (E) qui détecte l'écart de fréquence autour de F^0 (fréquence de consigne). La valeur de la puissance Π^0 s'ajoute en modifiant le zéro du wattmètre ou en déplaçant la position des armatures fixes des condensateurs C_1 et C_2 . La valeur du statisme virtuel (ou de l'énergie réglante) s'ajuste en modifiant la sensibilité du relais capacimétrique (la fréquence de son générateur peut être réglée entre 100 et 1000 kilocycles par seconde), ou en modifiant la position du curseur du potentiomètre r . Le petit condensateur c' permet d'annuler avec précision la dissymétrie qui résulte des capacités parasites. On compense le couple électrostatique qui s'exerce sur les armatures mobiles des condensateurs par un montage symétrique de C_1 et de C_2 :

$$\text{Couple}_{\text{moy}} = \frac{1}{4} \cdot V^2 \cdot \left(\frac{dC_1}{d\Theta} - \frac{dC_2}{d\Theta} \right) = 0$$

(V est la tension efficace entre les armatures).

Le seuil de sensibilité de ce relais capacimétrique est inférieur au $1/2000^{\circ}$ du courant de la déviation totale, après quelques minutes de fonctionnement. Sa stabilité en déviation diminue de 2 % pendant la première demi-heure de fonctionnement, pour se fixer à $\pm 1/1000^{\circ}$ environ.

Résultats obtenus :

Le groupe d'essai du Laboratoire d'une puissance de 2 kw, muni du régulateur à réglage fréquence-puissance précédemment décrit, a été couplé au réseau général.

Les essais effectués dans ces conditions nous permettent de séparer deux fonctionnements distincts du régulateur :

a) Le groupe subit la fréquence du réseau, sans pouvoir la modifier.

Les variations de sa puissance d'échange suivent, en sens inverse, les variations de fréquence : $S \cdot \Delta \pi = - \Delta f$. S définit la participation du groupe au réglage de l'interconnexion.

b) Les variations de la consommation locale sont absorbées par le groupe après un régime transitoire amenant une variation de la puissance d'échange, et sans la complexité d'une variation sensible de la fréquence sur le réseau.

Nous avons enregistré simultanément la fréquence du réseau ($\Delta f_{(t)}$) les variations de la consommation locale ($Q_{(t)}$) et les variations de la puissance d'échange ($\pi_{(t)}$). Pour tenir compte des variations de la fréquence du réseau, qui se manifestent pendant un temps assez large, nous avons opéré avec des statismes très faibles. Le fonctionnement du régulateur

est éprouvé d'abord par des variations brusques de la consommation locale, comme dans le cas du réglage isodrome d'un groupe isolé, et ensuite par des variations brusques de fréquence créées artificiellement (la fréquence du réseau sans grandes variations rapides nous étant imposée).

Variations de la consommation locale (Enregistrement 6 et 7) :

Pour ces deux enregistrements le réglage fonctionne avec un statisme virtuel de valeur calculée égale à $S = 1, 19.10^{-2}$. Le premier à déroulement rapide montre très exactement le retour à l'équilibre de la puissance d'échange, après une variation brusque de la consommation locale. Le deuxième à déroulement 7 fois plus lent montre que ces périodes transitoires de réglage suivant la consommation ont une influence négligeable sur la répartition de la puissance d'échange qui reproduit fidèlement les variations lentes de la fréquence. On mesure facilement le statisme virtuel : pendant la durée de l'essai partiellement reproduit, la fréquence se maintient dans une bande dont la largeur correspond à 0,078 hertz (0,156 %), tandis que la puissance d'échange se maintient dans une bande dont la largeur correspond à 100 watts (13,3 %); $S_{\text{mesuré}} = 0,156/13,3 = 1, 17.10^{-2}$.

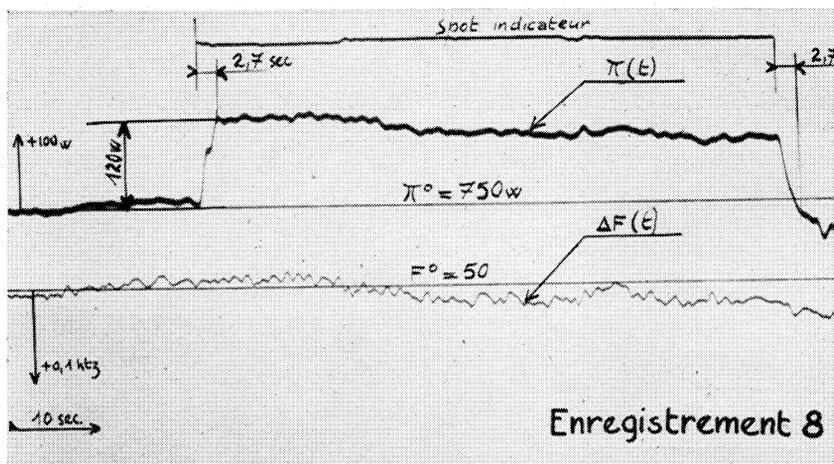
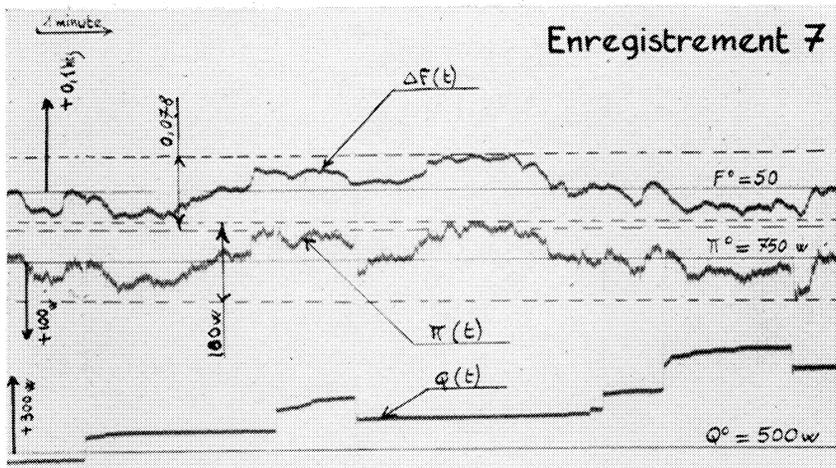
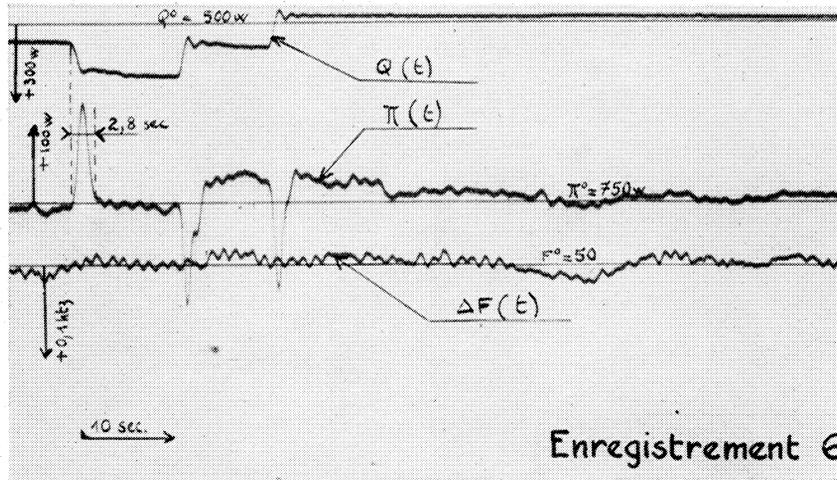
Variations rapides de la fréquence (Enregistrement 8) :

Le réglage fonctionne également avec un statisme de 1,19 %. La consommation locale maintenue constante n'est pas représentée. Nous obtenons la variation artificielle de fréquence par un déplacement de la fréquence d'équilibre du pont à résonance facilement calculable. Le changement de vitesse est fait instantanément par une commande manuelle qui met en circuit, ou hors-circuit, une petite fraction ΔC de la capacité du circuit résonnant (un spot indicateur marque le début et la fin de l'essai).

ΔC correspond à une variation de la fréquence $\Delta f^{\circ} = 0,192 \%$ qui engendre une variation de la puissance Π égale à 120 watts soit 16 %. Le retour au nouvel équilibre se fait au bout de 2,7 secondes. On retrouve encore la valeur du statisme calculé $S = 0,192/16 = 1, 20 \cdot 10^{-2}$.

Les retards de réglage de l'ordre de 2, 7 à 2, 8 secondes quoique de valeur acceptable peuvent être diminués par l'emploi d'un servo-moteur à pression d'huile. En effet, ils sont dus principalement à l'imperfection du servo-moteur électrique (moteur-différentiel) de trop grande inertie spécifique.

Cependant avec un statisme virtuel de 1,19 % qui, nous le rappelons, fait correspondre à des variations de puissance de valeur relative importante, des écarts détectés de fréquence d'équilibre très faibles, nous obtenons dans l'ensemble un bon fonctionnement du réglage fréquence-puissance; il vérifie bien la loi FALLOU.



Considérations générales sur les éléments d'un régulateur électrique destiné à une application industrielle :

Malgré les résultats satisfaisants obtenus avec les moyens matériels réduits d'un Laboratoire de Faculté, nous ne considérons pas le montage de la figure 3 et son complément de la figure 5 comme un projet définitif destiné à une application industrielle. Dans une discussion sommaire, nous allons considérer à nouveau certains éléments fondamentaux de ce régulateur.

Les avantages du fréquencemètre utilisé ont été exposés dans la première partie de ce rapport; les chiffres et les enregistrements présentés nous dispensent de tous commentaires. Son volume peut être considérablement réduit si on l'alimente à une fréquence plus élevée (500 hertz par exemple), au moyen d'un alternateur pilote. Asservi à la déviation d'un wattmètre classique, il permet le réglage fréquence-puissance, sans régulateur secondaire.

Le relais photo-électrique, quoique de haute fidélité, présente de nombreux inconvénients : il exige l'emploi d'une lampe à incandescence de courte durée; son montage optique demande de la précision; le courant photo-électrique de l'ordre de quelques microampères entraîne un circuit d'entrée de l'amplificateur de grande impédance, bien isolé, exempt de courant grille. Il est remplacé avantageusement par le relais capacimétrique SAUVAGE qui a déjà fait ses preuves industrielles. Cependant ce dernier ne suffit plus pour la détection de puissance lorsque l'asservissement doit être télécommandé. Dans ce cas nous pensons à un générateur basse fréquence dont la fréquence dépend de la déviation du wattmètre d'interconnexion, et qui excite un émetteur à modulation de fréquence; à la réception un fréquencemètre de type classique crée un courant continu amplifiable.

Après des essais de fidélité de longue durée, on peut envisager de remplacer les amplificateurs électroniques du type « à courant continu » par des amplificateurs magnétiques équivalents, plus robustes, mais d'une souplesse d'utilisation moins grande. A notre avis, l'usage de la technique électronique doit être pris en considération car il permet, dans le circuit détection, des combinaisons variées qui s'adaptent aux problèmes les plus complexes.

Pour les réglages qui nécessitent de grande puissance sur l'arbre de commande du vannage, l'amplidyne constitue deux étages précieux d'amplification en puissance. Munie d'un correcteur d'hystérésis et d'enroulements de réaction bien conditionnés, elle a un fonctionnement linéaire, et une vitesse de réponse acceptable.

L'inertie spécifique du moteur-différentiel peut être considérablement diminuée si l'on conçoit son induit sous la forme d'une cloche constituée seulement par le collecteur et les conducteurs nus, maintenus dans une matière isolante moulée, tournant dans l'entrefer d'un circuit magnétique à partie centrale fixe. On envisage difficilement une telle construction pour des moteurs électriques de grande puissance; le servo-moteur à pression d'huile est le seul moteur de fabrication courante, à faible inertie spécifique.

CONCLUSION

Nous avons montré qu'un fréquencemètre électrique permet de commander un servo-moteur par l'intermédiaire de relais et d'amplificateurs électriques et électroniques aussi sûrs, plus fidèles, de fonctionnement continu plus linéaire, de vitesse de réponse beaucoup plus élevée que les organes mécaniques correspondants. De plus l'assemblage de ces dispositifs, d'une grande souplesse d'utilisation, permet des combinaisons variées de réalisation simple.

Nous soulignons particulièrement l'association logique et efficace de l'action de ce fréquencemètre à celle d'un wattmètre ordinaire pour le réglage fréquence-puissance à statisme virtuel des groupes interconnectés.

Les résultats obtenus nous permettent de conclure que le fréquencemètre électrique associé à des éléments électriques et électroniques a une souplesse d'utilisation bien supérieure à celle du tachymètre classique.

Grâce à l'appui et aux idées modernes de M. F. ESCLANGON, Professeur à la Faculté des Sciences de Grenoble, Directeur de l'Institut Polytechnique, j'ai pu mener à bien cette étude. Que Monsieur le Directeur veuille trouver ici l'expression de ma profonde et respectueuse reconnaissance.

Je suis heureux de remercier M. NÉEL, Professeur à la Faculté des Sciences, Directeur de la Section de Grenoble du Centre National de la Recherche Scientifique, de m'avoir fait l'honneur de présider la soutenance de ma thèse.

Je remercie amicalement mes collègues et camarades pour leur soutien et leurs conseils très appréciés.

