

Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 83 (1957)
Heft: 18

Artikel: Le circuit non linéaire de réglage et la représentation géométrique de ses caractéristiques
Autor: Gerecke, Ed.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-62792>

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: 26.01.2026

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

BULLETIN TECHNIQUE DE LA SUISSE ROMANDE

Paraissant tous les quinze jours

Abonnements:
Suisse: 1 an, 26 francs
Etranger: 30 francs
Pour sociétaires:
Suisse: 1 an, 22 francs
Etranger: 27 francs
Prix du numéro: Fr. 1.60
Ch. post. « Bulletin technique de la Suisse romande »
N° II. 57 75, à Lausanne.

Adresser toutes communications concernant abonnements, changements d'adresse, expédition à
Imprimerie La Concorde,
Terreaux 31, Lausanne

Rédaction
et éditions de la S. A. du
Bulletin technique (tirés à
part), Case Chauderon 475
**Administration de la S.A.
du Bulletin Technique**
Ch. de Roseneck 6 Lausanne

Organe de la Société suisse des ingénieurs et des architectes, des Sociétés vaudoise et genevoise des ingénieurs et des architectes, de l'Association des Anciens élèves de l'Ecole polytechnique de l'Université de Lausanne et des Groupes romands des anciens élèves de l'Ecole polytechnique fédérale

Comité de patronage — Président: J. Calame, ingénieur, à Genève; Vice-président: † G. Epitoux, architecte, à Lausanne — Membres: Fribourg: MM. H. Gicot, ingénieur; M. Waeber, architecte — Vaud: MM. A. Gardel, ingénieur; A. Chevalley, ingénieur; E. d'Okolski, architecte; Ch. Thévenaz, architecte — Genève: MM. Cl. Grosgrin, architecte; E. Martin, architecte — Neuchâtel: MM. J. Béguin, architecte; R. Guye, ingénieur — Valais: MM. G. de Kalbermatten, ingénieur; D. Burgener, architecte.

Rédaction: D. Bonnard, ingénieur. Case postale Chauderon 475, Lausanne.

Conseil d'administration
de la Société anonyme du Bulletin technique: A. Stucky, ingénieur, président;
M. Bridel; P. Waltenpuhl, architecte; R. Neeser, ingénieur.

Tarif des annonces

1/1 page	Fr. 275.—
1/2 »	» 140.—
1/4 »	» 70.—
1/8 »	» 35.—

Annonces Suisses S. A.
(ASSA)



Place Bel-Air 2. Tél. 22 33 26
Lausanne et succursales

SOMMAIRE: *Le circuit non linéaire de réglage et la représentation géométrique de ses caractéristiques*, par le professeur ED. GERECKE, Directeur de l'Institut d'Electrotechnique générale de l'E.P.F., Zurich. — *Introduction à la théorie des distributions pour l'étude des réglages linéaires*, par E. STIEFEL, Professeur à l'Ecole polytechnique fédérale, Zurich. — *Principes et exemples d'application des dispositifs de stabilisation*, par M. CUENOD, Ing. dipl. E.P.F. Dr ès. sc. techn. — *Quelques applications de la servo-technique et des calculateurs analogiques dans la défense antiaérienne*, par L. AMBROSINI, Ing. dipl. E.P.F., Genève. — **DIVERS.** — **COMMUNIQUÉ.** — **CARNET DES CONCOURS.** — **SERVICE DE PLACEMENT.** — **DOCUMENTATION GÉNÉRALE.** — **DOCUMENTATION DU BATIMENT.** — **INFORMATIONS DIVERSES.**

LE CIRCUIT NON LINÉAIRE DE RÉGLAGE ET LA REPRÉSENTATION GÉOMÉTRIQUE DE SES CARACTÉRISTIQUES

par le professeur ED. GERECKE,

Directeur de l'Institut d'Electrotechnique générale de l'E.P.F., Zurich¹

Synthèse de l'article

Le problème traité dans cet article est celui du réglage d'une source d'énergie. Ce réglage nécessite l'intervention d'un organe de commande.

Lorsqu'il s'agit d'une source d'énergie électrique, les grandeurs de réglage sont sa tension et son courant. Lorsqu'il s'agit d'une source mécanique, les grandeurs de réglage sont la vitesse et le couple moteur (resp. la fréquence et la puissance). Si l'on maintient la grandeur de commande constante, on peut représenter la relation entre les grandeurs de réglage par la caractéristique externe « naturelle » $U - I$, resp. $n - M$ du dispositif. Si on

prend la grandeur de commande comme un paramètre variable, on obtient comme caractéristique une famille de courbes.

Au moyen d'un asservissement ou d'un réglage automatique, on obtient de nouvelles « caractéristiques externes »; ces caractéristiques coupent les « caractéristiques naturelles » et sont plus ou moins inclinées selon le degré et le sens de l'asservissement. Ces nouvelles caractéristiques peuvent, au moyen de constructions géométriques simples, se déduire facilement de la caractéristique externe naturelle.

Les consommateurs d'énergie peuvent être également caractérisés par une caractéristique ou une famille de caractéristiques. En régime stationnaire, il s'établit un certain équilibre « naturel » entre producteur et consommateur d'énergie. Les conditions de cet équilibre sont déterminées par le point d'intersection entre les caractéristiques

¹ Conférence complétée, tenue le 7 décembre 1956 à l'E.P.F., à Zurich, lors du 1^{er} Congrès de l'A.S.P.A. (Association suisse pour l'Automatique).

correspondantes. Dans un schéma fonctionnel, ces conditions d'équilibre sont caractérisées par une chaîne d'actions et de réactions.

Les problèmes d'ordre mécanique et électrique peuvent être traités par des méthodes similaires.

Parmi les sources d'énergie électrique, on peut signaler les suivantes : génératrices à courant continu en montage simple ou en série, amplificatrices (métadyne, amplidyne), amplificateurs magnétiques, redresseurs à vapeur de mercure. Les propriétés de ces différentes sources d'énergie peuvent être représentées par des caractéristiques semblables, tandis que le générateur synchrone présente des caractéristiques plus complexes.

1. Source d'alimentation constante

La figure 1 représente le schéma électrique d'une source d'alimentation à courant continu. Ce schéma est caractérisé par la « tension de la source » U_q , supposée être appliquée aux bornes U_1 et U_2 , et la résistance de la source R_q , en sorte que l'on peut mesurer aux bornes U_3 et U_4 de cette source la « tension aux bornes » U . La charge est constituée par une combinaison de la résistance ohmique R , de l'inductivité L et d'une tension U_i supposée sans résistance interne (par ex. la tension interne d'une batterie ou la tension induite d'une génératrice à courant continu). Lorsque l'on ferme l'interrupteur S on obtient, en régime permanent, le courant I et la tension U aux bornes

$$U = U_q - R_q I \quad (1)$$

La figure 2 représente cette relation sous forme graphique. La tension aux bornes U décroît de façon linéaire, à partir du point de régime à vide L (avec $U = U_q$ et $I = 0$) selon la droite G_1 , la « caractéristique de la source ». Pour un point de régime quelconque T , le segment de droite AT caractérise la tension aux bornes U , et le segment TD caractérise la chute de tension interne $R_q I$. La caractéristique G_2 de la charge monte linéairement, proportionnellement au courant depuis le point du régime à vide E caractérisé par la contre-tension U_i . Le segment BT caractérise la chute de tension RI sur la résistance R . A la suite de la fermeture de l'interrupteur S s'établit le point de régime T à l'intersection des caractéristiques G_1 et G_2 . Sur la figure 2 est également porté le courant nominal

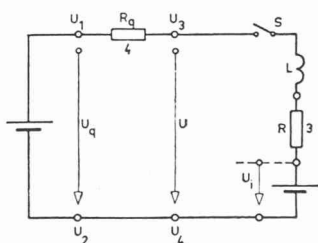


Fig. 1. — Schéma électrique d'une source de tension U_q avec une résistance interne R_q et un circuit de charge constitué de U_i , R et L .

Parmi les sources d'énergie mécanique, on peut citer : les turbines à eau, à vapeur ou à gaz, les moteurs à courant continu ou alternatif.

L'expression « amplificateur » désigne toujours une source d'énergie réglable; il faut relever que l'énergie ne peut pas être « amplifiée » mais seulement « réglée ».

La présente étude traite, en utilisant le langage et les symboles graphiques de l'automatique, les caractéristiques statiques de sources d'énergie réglables. Elle montre comment les schémas électriques classiques peuvent être traduits en schémas fonctionnels, schémas qui peuvent présenter des éléments non linéaires dans leur chaîne d'actions et de réactions.

I_n du dispositif. Si la contre-tension U_i est plus élevée que la tension interne U_q , le courant I est inversé (partie gauche de la fig. 2). On dit, dans ce cas, qu'il y a « récupération ».

La figure 3 représente le « schéma fonctionnel » qui correspond à la figure 1, appelé également « schéma mathématique » parce qu'il représente les relations mathématiques qui existent entre les différents grandeurs de réglage.

La ligne horizontale supérieure représente la « chaîne de tension », la ligne inférieure la « chaîne de courant ». Tensions et courants sont désignés par une seule ligne qui représente la transmission d'un signal. Les variables indépendantes U_q sont désignées comme étant les grandeurs d'entrée ou « cause ». Ainsi que l'indique l'équation (1), la tension aux bornes U est obtenue en soustrayant à U_q la chute de tension $R_q I$. Le symbole « 1 » représente l'opération mathématique de la soustraction.

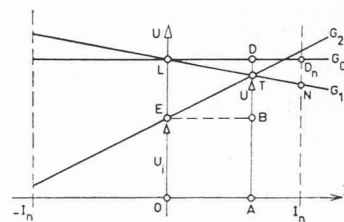


Fig. 2. — Caractéristiques G_1 de la source et G_2 du consommateur correspondant à la figure 1.

L = Point de marche à vide
 T = Point de marche
 N = Point de marche nominale
 OL = U_q
 OE = U_i
 OA = I
 AT = U
 TD = $R_q I$
 BT = RI

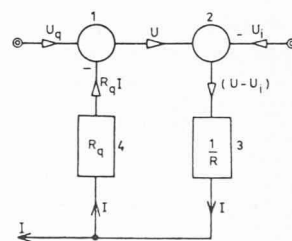


Fig. 3. — Schéma fonctionnel correspondant à la figure 1.

L'action antagoniste des deux tensions U et U_1 est représentée par le symbole 2. En appliquant la loi d'Ohm, on obtient pour le courant I :

$$I = \frac{U - U_1}{R} \quad (2)$$

Le symbole 3 de la figure 3 représente cette opération; la différence de tension (cause) provoque le courant I (effet). L'opération mathématique correspondante est une division par la constante R . D'autre part, le courant I réagit sur la tension aux bornes U . Cette réaction (ou action en retour) est représentée par le symbole 4 qui signifie la multiplication de I avec la constante R_q .

Les figures 4a à e représentent les différents symboles structurels:

Figure 4a addition $y = x_1 + x_2$

Figure 4b soustraction $y = x_1 - x_2$

Figure 4c multiplication avec une constante $y = kx$

Figure 4d multiplication de deux variables $y = x_1 x_2$

ainsi que la relation fonctionnelle non linéaire $y = F(x)$ entre la variable « indépendante » x et la variable « dépendante » y .

Le circuit de réglage fermé représenté par les symboles 1 à 4 de la figure 3, montre l'action en retour du courant I sur la tension; c'est un exemple élémentaire d'un « système avec réaction ».

Entre la source d'énergie et la consommation s'établit ainsi un *équilibre naturel*. Les conditions de cet équilibre se déduisent géométriquement de la figure 2 par l'intersection T des deux caractéristiques G_1 et G_2 , et du circuit asservi représenté par la figure 3.

Si la tension aux bornes U doit être maintenue constante indépendamment de la valeur du courant I , cela peut s'obtenir en modifiant la tension interne U_q en fonction du courant I . Il faut alors prévoir un circuit d'asservissement pour compenser la chute de tension interne $R_q I$.

Le schéma fonctionnel d'un réglage à tension constante est caractérisé par deux circuits antagonistes; l'un de ceux-ci est le « circuit de charge » ou « circuit d'action », l'autre est le circuit de « l'action en retour » ou « circuit de réaction », selon le principe de Lenz. On peut facilement trouver une relation mathématique qui soit l'équivalent de ce schéma. L'équation:

$$(3a) \quad y = 3x + 7 \quad 3x + 7 = y_s \quad (3b)$$

signifie qu'à chaque valeur de la « variable indépendante » x correspond, de façon rigide, une valeur de la « variable dépendante » y . L'équation 3a caractérise ainsi une « commande ». Toutefois, si y doit être maintenu égal à une valeur de consigne y_s , il est possible, en résolvant l'équation 3b, de déterminer la valeur correspondante de x . Autrement dit, la valeur x doit être choisie « par une action en retour » de façon que y soit égal à sa valeur de consigne. La résolution d'une équation correspond donc à un « réglage ».

2. Source d'alimentation variable

La figure 5 représente le schéma d'une génératrice à courant continu avec excitation séparée. La figure 6 donne le schéma fonctionnel correspondant et les

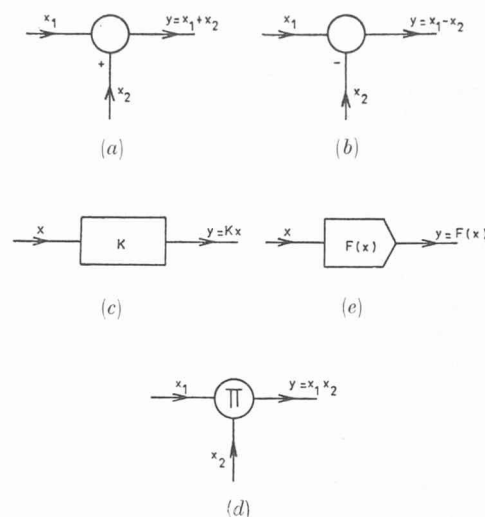


Fig. 4. — Symboles graphiques pour opérations fonctionnelles.

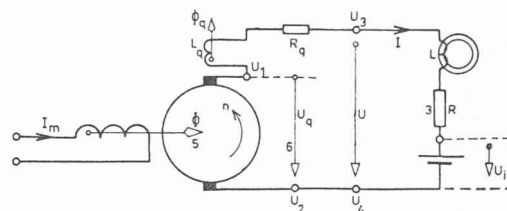


Fig. 5. — Schéma électrique d'une génératrice à courant continu avec excitation séparée.

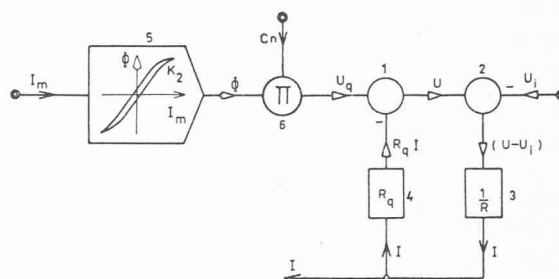


Fig. 6. — Schéma fonctionnel correspondant à la figure 5.

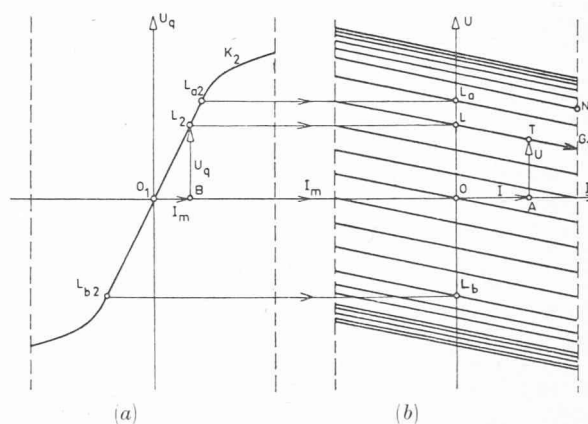


Fig. 7a. — Caractéristique K_2 correspondant à la figure 5.

Fig. 7b. — Caractéristiques externes correspondant à la figure 5.

figures 7a et 7b indiquent les caractéristiques qui s'y rapportent.

Ainsi que le représente le schéma fonctionnel donné par la figure 6, le flux Φ induit par le « courant d'excitation » I_m ou le « courant de magnétisation », ou encore par la « grandeur de réglage », n'a pas une caractéristique linéaire et peut même présenter, selon le symbole de structure 5, un phénomène d'hystérésis. La tension induite U_q est proportionnelle à la vitesse de rotation

$$U_q = Cn\Phi. \quad (4)$$

Cette rotation est indiquée par le symbole « 6 », représentant une multiplication.

Ainsi que le montre la figure 7 a, la caractéristique à vide K_2 présente un segment rectiligne $L_{a2}L_{b2}$, puis deux extrémités incurvées. Le courant de charge I induit de son côté le champ transversal Φ_q qui est caractérisé, dans la partie rectiligne de la caractéristique de Φ , par l'inductivité L_q (inductivité interne de la source). La résistance rotorique R_q , la tension aux bornes U et la charge constituée par U_i , R et L correspondent exactement aux mêmes éléments de la figure 1; la figure 3 se retrouve dans la partie droite du schéma mathématique de la figure 6. La figure 7 b représente la caractéristique externe de la génératrice, à savoir, la variation de la tension aux bornes U en fonction du courant de charge I pour un courant d'excitation I_m constant. Lorsque la valeur du courant d'excitation est donnée ($I_m = O_1D$), il en résulte les points de marche à vide L_2 de la figure 7 a et L de la figure 7 b. La caractéristique externe G_1 qui passe par L est, en première approximation, une droite selon l'équation (1). Pour un courant d'excitation I_m variable, on obtient, comme caractéristique externe, une famille de droites représentée par la figure 7 b; N est le point de charge nominale.

3. Action en retour du courant

Nous examinons tout d'abord la répercussion sur l'allure des caractéristiques externes de la machine de « l'action en retour » du courant, ainsi que le représente la figure 8. Aux ampères-tours $N_o I_o$ de l'excitation séparée, viennent s'ajouter les ampères-tours NI de l'enroulement d'asservissement; il en résulte au total:

$$\theta = N_o I_o + NI = N_o \left(I_o + \frac{N}{N_o} I \right). \quad (5)$$

Considérons que l'enroulement N_o soit parcouru par un courant I_m conduisant à la même magnétisation θ , il en résulte:

$$\theta = N_o I_m \quad I_m = I_o + \rho I \quad \rho = \frac{N}{N_o}. \quad (6)$$

ρ est le « facteur d'asservissement ». Ce facteur est positif si l'asservissement est « positif », c'est-à-dire, renforce l'action de l'excitation séparée (compoundage), il est négatif dans le cas inverse (anticompoundage).

La figure 9 représente le schéma fonctionnel ou mathématique correspondant au schéma de la figure 6 avec, en plus, le symbole d'addition 7. En plus de la boucle de « l'équilibre naturel » 1-2-3-4 et représentée par la figure 6, vient s'ajouter la boucle « artificielle » 7-8.

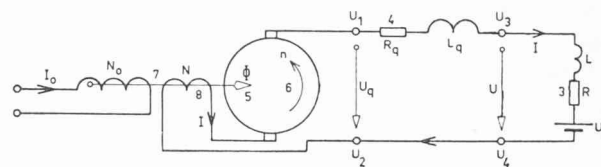


Fig. 8. — Schéma électrique d'une génératrice à courant continu avec asservissement. (compoundage.)

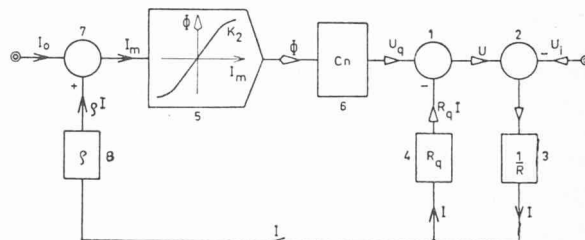


Fig. 9. — Schéma fonctionnel correspondant à la figure 8.

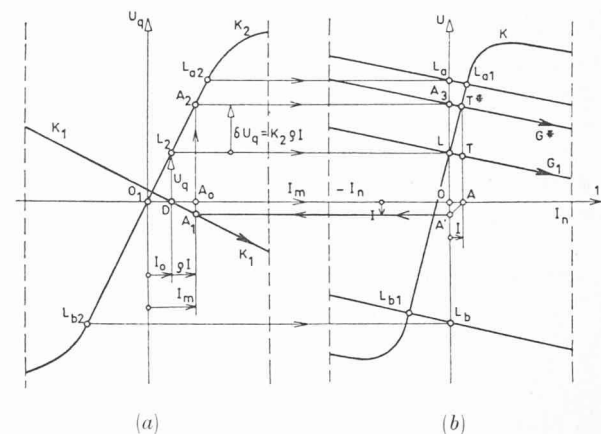


Fig. 10 a et 10 b. — Caractéristiques correspondant à la figure 8.

Les figures 10 a et b se rapportent à une génératrice avec compoundage. En cas de marche à vide ($I = 0$) correspondent, ainsi que le représente la figure 10 a, le courant d'excitations $I_o = O_1D$ et la tension d'alimentation $U_q = DL_2$ et, ainsi que le représente la figure 10 b, le point de marche à vide L . Sans action en retour ($\rho = 0$) la tension aux bornes serait donnée par la caractéristique G_1 ; au courant $OA = I$ correspondrait le point de régime T , avec $AT = U$.

Pour construire la caractéristique externe avec asservissement, nous portons sur la figure 10 a le courant $I = OA = OA' = A_oA_1$ et nous choisissons $DA_o = \rho A_oA_1 = \rho I$. Le courant total de magnétisation est alors égal à $O_1A_o = O_1D + DA_o = I_o + \rho I = I_m$. Tous les points A_1 sont situés sur la droite K_1 . A une valeur donnée du courant I_m correspond la tension augmentée $A_oA_2 = OA_3$ et la caractéristique G^* passant par le nouveau point de marche à vide A_3 . En cas d'asservissement le point de régime T^* est plus élevé de la valeur δU_q par rapport au point T :

$$\delta U_q = K_2 \rho I \quad (7)$$

avec $K_2 = \frac{\delta U_q}{\rho I}$ = facteur de transfert statique de la tension.

Il en résulte dans la partie linéaire de la caractéristique :

$$U = U_q + (K_2 \rho - R_q) I \quad (8)$$

Ainsi que le montre la figure 10 b, la partie tombante LT de la caractéristique $\rho = 0$ se transforme en une courbe K en S dont les extrémités sont d'autant plus inclinées que le facteur d'asservissement ρ est élevé. Pour le cas particulier où

$$\rho = R_q : K \quad (9)$$

la caractéristique est horizontale aux environs du point de régime. Lorsqu'il y a anticompoundage la droite K_1 monte à partir de D et la caractéristique externe K est tombante. Cette construction graphique correspondant au schéma de la figure 11 est indiquée sur les figures 13 a et b. La chute de tension $R_s I$ mesurée sur la résistance R_s est amplifiée, le courant I_p ainsi obtenu est opposé au courant I_o ; la caractéristique K_1 de cet amplificateur est indiquée sur le symbole 8 du schéma fonctionnel de la figure 12. Elle est également portée sur la figure 13 a, selon une droite verticale qui part du point D . Sur cette figure le courant d'excitation I_o est représenté par OD et la tension correspondante de source U_q est représentée par $DL_2 = OL$ (avec $\rho = 0$). G_1 est la caractéristique correspondante. La construction graphique s'effectue de la façon suivante : on part d'un courant quelconque $I = OA$, on porte $OA = OA'$ et on cherche l'intersection A_1 de la droite horizontale qui passe par A' avec la caractéristique K_1 de l'amplificateur. $A_1 E$ est alors le courant de sortie I de l'amplificateur. La tension $A_0 A_2 = OA_3$ correspondant au courant d'excitation $I_m = I_o - I_p = O_1 A_0$ est inférieure de la valeur δU_q à la tension qui serait obtenue sans asservissement négatif. La droite G^* passant par le point A_3 donne le point de régime cherché correspondant au courant $OA = I$. Si on répète cette construction pour différentes valeurs du courant I et une même valeur I_o du courant de l'excitation séparée, on obtient comme caractéristique externe la courbe K en forme de S fermé. Les parties tombantes de cette courbe constituent une limitation du courant ; même en cas de court-circuit ($U = 0$) les courants obtenus peuvent être inférieurs au courant nominal. Ces caractéristiques correspondent à une « source de courant » constante, même en cas de grandes variations de la tension. Pour chaque valeur de I_o correspond une certaine caractéristique externe K .

La figure 14 montre cette famille de courbes pour un asservissement négatif et la figure 15, les mêmes courbes pour un asservissement positif.

4. Actions en retour de la tension

Ce mode d'actions en retour est destiné à fournir une tension aux bornes U aussi constante que possible. Ainsi que l'indique la figure 16, cette tension est prise comme « grandeur réglée ». Elle est mesurée sur un potentiomètre qui la divise dans la proportion k ; la tension ainsi réduite est comparée à la tension de référence U_o . On détermine ainsi l'écart de réglage e , appelé également « erreur » :

$$e = kU - U_o. \quad (10)$$

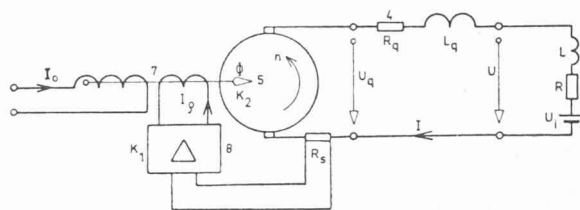


Fig. 11. — Schéma électrique d'une génératrice à courant continu et réglage automatique en fonction du courant de charge.

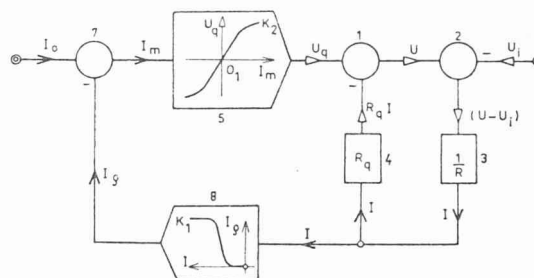


Fig. 12. — Schéma fonctionnel correspondant à la figure 11.

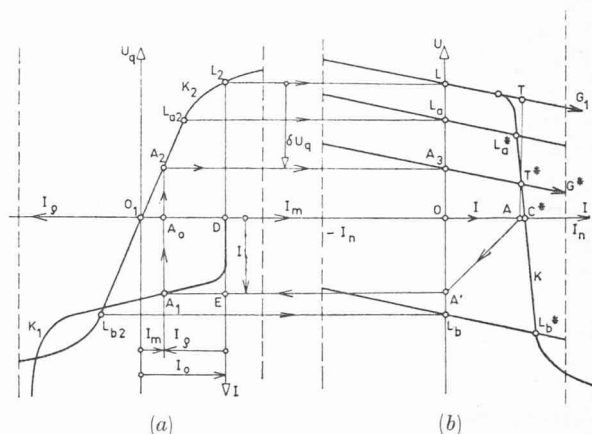


Fig. 13 a et 13 b. — Caractéristiques correspondant à la figure 11.

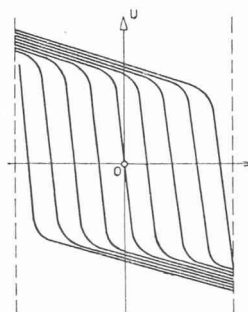


Fig. 14.

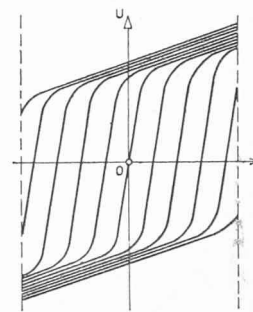


Fig. 15.

Fig. 14. — Caractéristiques d'une génératrice à courant continu avec asservissement négatif en fonction de la tension.

Fig. 15. — Caractéristiques d'une génératrice à courant continu avec asservissement positif en fonction du courant.

Cet écart de tension agit à l'entrée d'un amplificateur dont la sortie fournit le courant I_p . L'action de ce courant s'oppose à celle du courant I_o de l'excitation auxiliaire. Ainsi que l'indique le symbole de soustraction 7 du schéma fonctionnel représenté par la figure 17, la tension kU est comparée avec sa valeur de consigne U_o . Le symbole 8 représente, au moyen de la courbe $I_p = f(e)$ la caractéristique K_1 de l'amplificateur. Lorsque l'écart est nul, on obtient sur cette caractéristique le point de régime D_1 ; cette caractéristique est également représentée sur la figure 18 a avec son origine au point D et avec l'axe de tension e disposé verticalement et situé à la distance I_o de l'axe U_q passant par l'origine O_1 .

Nous considérons tout d'abord le point de marche à vide L (voir fig. 18 b) auquel correspond la tension à vide $OL = U_q$. Il en résulte sur le potentiomètre P la tension partielle $O_oL' = kU_q$. La caractéristique k du potentiomètre est située à la distance voulue entre les centres O et O_2 . Au point de régime L correspondent les points L_2 sur K_2 , et à ce dernier point, le courant de magnétisation $O_1A_o = I_m$. Le segment $A_oO'_3 = I_o - I_m$ est donc égal au courant de magnétisation inverse I_p en marche à vide. On fait passer une droite horizontale par L' et on obtient ainsi le point L_1 , par lequel on fait passer la caractéristique d'amplification K_1 . Celle-ci, ainsi que l'origine D et D_1 sont, d'une part, fixés par le choix de la tension U_q (qui détermine la position du point L), et, d'autre part, par le courant $I_o = O_1O'_3$.

Ainsi que l'indique la figure 18 a, la hauteur entre le point L_1 et le point D est égale à la tension e_o , cet écart de tension provoque le courant I_p . Il résulte de l'équation (10) que l'ordonnée du point D est égale à la tension de consigne $U_o = D O'_3$.

S'il n'y avait pas d'actions en retour, la tension aux bornes $U = AT$ diminuerait de la quantité $\delta U = LB$, selon la droite G_1 , proportionnellement au courant $I = OA$. Cette chute de tension δU provoque sur le potentiomètre P une variation de tension $k\delta U = L'B'$. Il en résulte, ainsi que le montre la figure 18, que l'écart e s'est modifié de $\delta e = k\delta U$, que le point L_1 s'est déplacé en B_1 , et que le courant I_p de sortie de l'amplificateur a varié de la quantité $\delta I_p = A_oA'_1$. La diminution de la tension U provoque une réduction du courant antagoniste I_p ; le courant de magnétisation résultant augmente ainsi que la tension interne qui atteint la valeur suivante (voir fig. 18 a)

$$A'_1 B_2 = OB_3 = U_q + \delta U_q.$$

Le point de régime se déplace sur la caractéristique K_2 de L_2 en B_2 et la caractéristique de réglage se déplace de G_1 en G^* (fig. 18 b) en passant par le point B_3 . Le nouveau point de régime T^* est donné par l'intersection de G^* par l'horizontale passant par T , située à la distance δU de l'horizontale passant par L . Le courant I^* correspondant à T^* est plus élevé que le courant I correspondant à T . La courbe LT^* est la nouvelle caractéristique K de la génératrice avec action en retour de la tension; cette caractéristique n'est pas horizontale, cependant sa pente est beaucoup moins forte que celle de la caractéristique

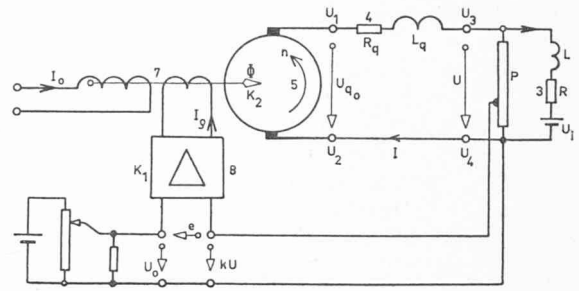


Fig. 16. — Schéma électrique d'une génératrice à courant continu et réglage automatique en fonction de la tension aux bornes.

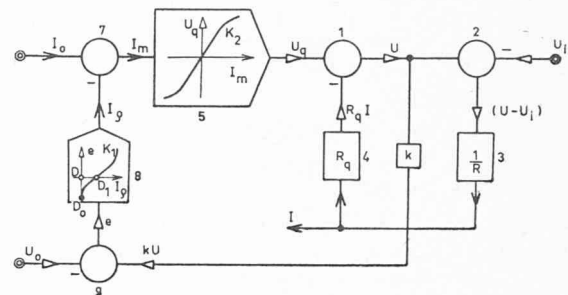


Fig. 17. — Schéma fonctionnel correspondant à la figure 16.

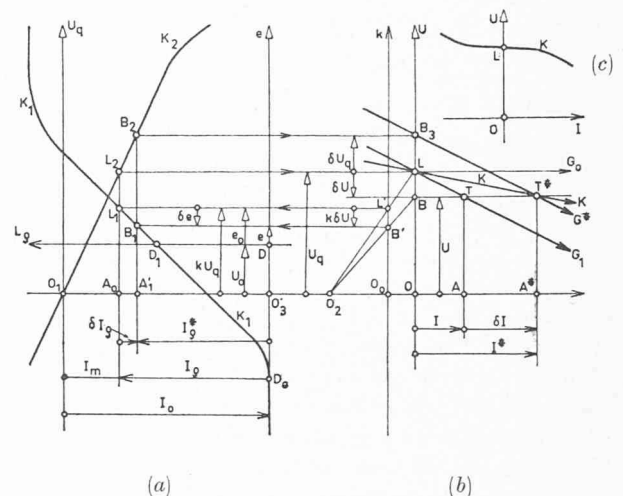


Fig. 18 a et 18 b. — Caractéristiques correspondant à la figure 16.

Fig. 18 c. — Caractéristiques externes avec asservissement négatif en fonction de la tension.

G_1 obtenue sans actions de réglage; la figure 18 c en donne la variation complète.

Dans le domaine de linéarité des caractéristiques, on peut écrire :

$$\begin{aligned} \delta I_p &= K_1 \cdot \delta e = k K_1 \delta U \\ \delta U_q &= K_2 \cdot \delta I_p = k K_1 K_2 \delta U = K \delta U \\ K &= k K_1 K_2. \end{aligned} \quad (11)$$

L'élévation δU_q de la tension interne est donc proportionnelle à la chute de tension δU , on dit alors que le réglage est à « action proportionnelle ».

Les triangles B_3BT^* et LBT sont semblables.

En utilisant la loi des triangles semblables, on obtient :

$$\frac{B_3L}{LB} = \frac{T^*T}{TB} \quad \text{et} \quad \frac{\delta U_q}{\delta U} = \frac{\delta I}{I} = K$$

il en résulte :

$$\delta I = KI \quad \text{et} \quad I^* = (1 + K) I. \quad (12)$$

L'augmentation de courant δI est également proportionnelle à $\delta U = R_q I$

$$\text{d'où} \quad \frac{\delta U}{I^*} = \frac{R_q I}{(1 + K) I} = \frac{R_q}{1 + K} = R_q^*. \quad (13)$$

Le réglage a pour résultat que la résistance interne R_q est diminuée dans la proportion $1/(1 + K)$, à la valeur R_q^* .

Les figures 18 a et 18 b indiquent de façon frappante comment la fermeture du circuit de réglage déplace les points de régime sur les différentes caractéristiques. Le parallélogramme $LL'L_1L_2L$ se transforme dans le polygone $BB'B_1B_2B_3T^*$. Le déplacement de la caractéristique externe K peut être obtenu par deux moyens :

— ou bien en modifiant la valeur de consigne U_o sur le potentiomètre visible sur la figure 16, ce qui provoque une variation du segment $O_3'D$ et une translation de la caractéristique K_1 dans le sens vertical,

— ou bien en variant comme grandeur de référence, le courant I_o de l'excitation indépendante, ce qui conduit à une translation de K_1 dans le sens horizontal. On obtient ainsi la famille des caractéristiques K .

Bien entendu, le sens du courant fourni par l'amplificateur représenté par la figure 16 peut être inversé et peut agir, dans ce cas, dans le même sens que celui de l'excitation fournie par le courant I_o . La caractéristique K_1 , de la fig. 18 a est, dans ce cas, inversée. Cet asservissement a pour effet d'augmenter la pente de la caractéristique K représentée sur la figure 18 b.

La figure 18 d est un cas spécial de la figure 16, dans ce sens que le courant de réaction I_p qui passe par le bobinage shunt, est proportionnel à U , avec comme conséquence K_1 droite dans la figure 18 e. La caractéristique extérieure K a la forme d'un S renversé et possède trois points de marche à vide L_1 , L_2 et L_3 . Pour $I_o = 0$, elle se transforme en caractéristique extérieure bien connue d'une machine shunt.

5. Géométrie des caractéristiques de réglage

A partir de la caractéristique externe de la source de tension non réglée, on peut, au moyen d'une construction géométrique simple, compte tenu de la caractéristique K_1 de l'amplificateur, et de la caractéristique de réglage K_2 , déterminer la caractéristique du système asservi, que l'asservissement soit positif ou négatif. En cas d'asservissement négatif en fonction de la tension, ainsi que le représente la figure 18 b, on obtient une caractéristique de réglage qui se rapproche de l'horizontale.

On peut rajouter à l'enroulement de courant I_m , représenté par la figure 5, un enroulement de tension

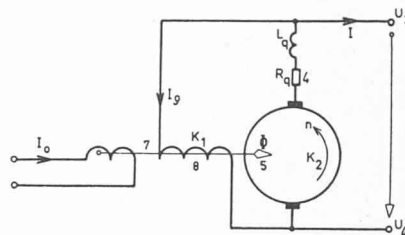


Fig. 18 d. — Machine avec enroulement shunt et courant de commande I_o (asservissement positif en fonction de la tension).

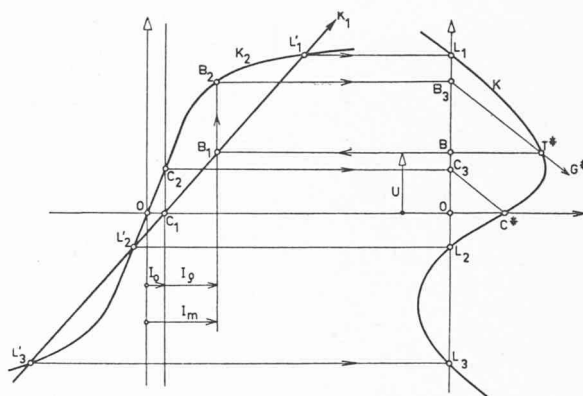


Fig. 18 e. — Caractéristiques correspondantes à la figure 18 d.

branché ; on obtient ainsi une machine avec « enroulement shunt et enroulement de commande », figures 18 d et 18 e, à asservissement positif.

La figure 14 représente la famille des caractéristiques externes avec un fort asservissement négatif du courant selon le principe indiqué par les figures 8 et 11. Les caractéristiques ont une forme en S ; la machine se comporte comme une « source de courant ». Si l'asservissement positif en fonction du courant est faible, on peut obtenir une marche à tension constante. Si cet asservissement est au contraire très fort, on obtient, ainsi que le représente la figure 15, des caractéristiques en forme de S renversé, qui peuvent même conduire à une marche instable, nous allons le voir. La pente de la caractéristique externe est donnée d'une façon générale par l'expression suivante (pour de petites variations) :

$$\frac{dU}{dI} = R_q \pm \rho K_1 K_2 \quad (14)$$

dans laquelle K_1 = coefficient d'amplification de l'amplificateur ;

K_2 = facteur de transfert statique.

La figure 19 représente le schéma fonctionnel d'un système de réglage asservi en fonction du courant avec des éléments non linéaires dans la chaîne directe et dans la chaîne d'asservissement. Pour de petites variations, on obtient un système linéaire dont le schéma fonctionnel est représenté par la figure 20.

Les asservissements en fonction du courant et de la tension peuvent être combinés à volonté et on peut même ainsi obtenir un dispositif à tension constante et limité en fonction du courant, dispositif dont la caractéristique est représentée par la figure 21, parties a et b.

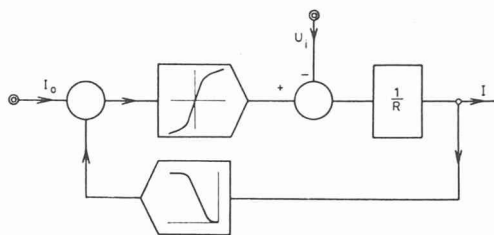


Fig. 19. — Schéma fonctionnel d'une génératrice à courant continu avec asservissement en fonction du courant.

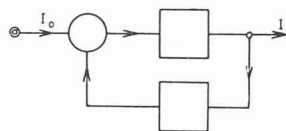


Fig. 20. — Schéma fonctionnel linéarisé d'une génératrice à courant continu avec un asservissement en fonction du courant.

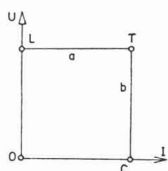


Fig. 21. — Caractéristiques externes d'une génératrice à courant continu avec asservissement continu en fonction du courant et de la tension.

Branche a : tension constante ; branche b : courant limité.

6. Caractéristiques d'un réglage de vitesse d'un moteur

Si le consommateur représenté sur les figures 5, 8, 11 et 14 est un moteur à courant continu avec excitation séparée à flux constant, on obtient un groupe Ward-Leonard représenté par la figure 22. La tension induite U_i est proportionnelle à la vitesse n :

$$U_i = C_1 n = k U_T. \quad (15)$$

Elle peut être mesurée au moyen de la tension U_T qui lui est proportionnelle et qui est fournie par un tachymètre. Le couple M_m est proportionnel au courant I :

$$M_m = C_2 \cdot I. \quad (16)$$

En utilisant la géométrie des caractéristiques obtenue ci-dessus pour les différents modes d'asservissement du courant I et de la tension U_i , on peut obtenir sans difficulté le diagramme des caractéristiques « vitesse — couple moteur ». Ainsi, la courbe 1 de la figure 23 représente une caractéristique de la vitesse n en fonction du couple M_m avec le « point idéal de marche à vide L », le « point du régime nominal N » et le « point de court-circuit mécanique C ». La droite horizontale 2 correspond à une marche à vitesse constante, à savoir à un « réglage astatique de la vitesse ». La droite 3, faiblement inclinée, représente le cas d'un « réglage à faible statisme ». Cette droite 4 se rapporte à un réglage à couple constant indépendamment de la vitesse, tel que cela est exigé pour des machines d'ex-

traction, pour des engins de levage, pour des sondages ou dans l'industrie textile.

Au contraire, l'hyperbole 4 correspond à une marche à puissance constante :

$$P_m = 2 \pi n M_m. \quad (17)$$

Le moteur M de la figure 22 a est le « générateur de couple », tandis que la « machine A » est le consommateur d'énergie mécanique. Nous admettrons que la caractéristique « vitesse-couple » de cette machine est représentée par les courbes 1 jusqu'à 5 de la figure 24. Souvent, le couple résistant est une puissance de n , par exemple :

$$M_A = k n^v. \quad (18)$$

La figure 24 représente les cas avec

$v = 0$ (courbe 2, $M_A = \text{constant}$)

$v = 1$ (courbe 3)

$v = 2$ (courbe 4, pompe, ventilateur).

La « géométrie des caractéristiques » développée ci-dessus peut être aussi utilisée pour le cas du réglage de vitesse. La figure 25 a représente, par exemple, la famille des caractéristiques K_1 , vitesse-couple moteur d'une turbine pour différentes ouvertures de la turbine.

Lorsque la turbine n'est pas réglée, son fonctionnement est illustré par la caractéristique K_1 qui passe par le point de régime N . Cette caractéristique montre la relation entre la vitesse n et le couple M .

L'intervention du « régulateur » a pour conséquence de modifier l'allure de la caractéristique.

La droite horizontale 1 passant par le point de régime N est la caractéristique d'un réglage astatique, la droite 2 correspond à un réglage à faible statisme. De même que dans le cas des réglages électriques, ce réglage s'obtient par un asservissement de l'ouverture s dans la turbine, à la vitesse n . Remarquons que la possibilité d'un réglage est liée à l'existence d'une famille de caractéristiques extérieures.

Comme pour la figure 2, le point de régime est donné, sur la figure 25 a, par l'intersection dans le diagramme « couple-vitesse » de la caractéristique K_1 de la turbine ou du moteur, et de la caractéristique K_2 de la charge.

Ces caractéristiques mécaniques ont pris une grande importance par suite du développement du réglage automatique des puissances d'échange entre réseaux électriques interconnectés, en particulier entre réseaux nationaux voisins.

Pour garantir une bonne répartition de la charge entre turbines marchant en parallèle, il est nécessaire de donner à leur dispositif de réglage un certain statisme. La caractéristique « puissance-fréquence » d'une turbine représentée par la figure 25 indique la relation qui existe entre la fréquence f du générateur proportionnelle à la vitesse n du groupe ($f = p_o \cdot n$ avec $P_o = \text{nombre de paires de pôles}$) et la puissance P débitée par le groupe ; cette caractéristique obéit à l'équation suivante :

$$\begin{aligned} \text{avec} \quad P + kf &= kf_o \\ k &= P_n / (f_o - f_n) \\ f_o &= \text{fréquence en marche à vide.} \end{aligned} \quad (19)$$

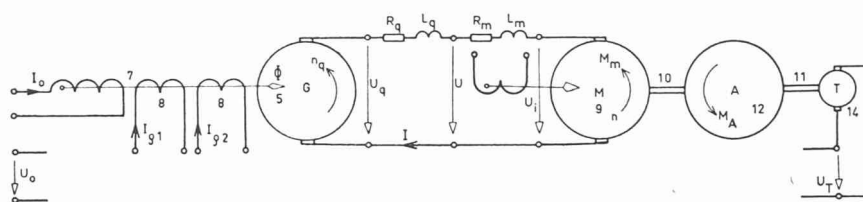


Fig. 22 a. — Groupe Ward-Leonard.

I_o = Courant de commande, M = Moteur,
 U_o = Tension de consigne, M_A = Machine entraînée.
 I_{p1}, I_{p2} = Courant d'asservissement, T = Dynamotac hymé-
 G = Générateur. trique.

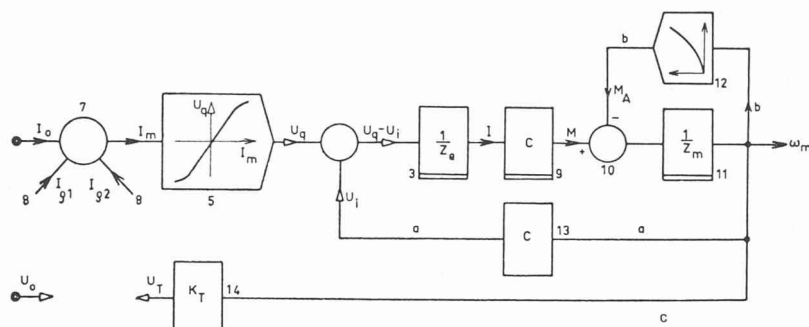


Fig. 22 b. — Schéma fonctionnel du groupe Ward-Leonard.

a = chaîne de réaction électrique,
 b = chaîne de réaction mécanique,
 c = chaîne d'asservissement.

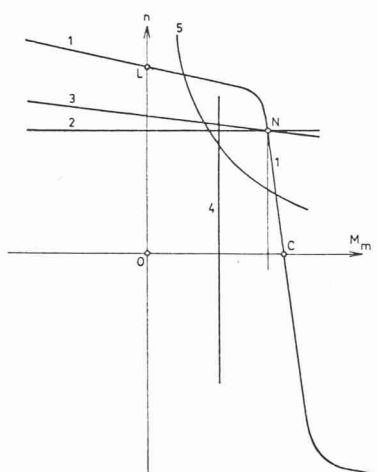


Fig. 23. — Caractéristiques couple-vitesse d'un moteur.

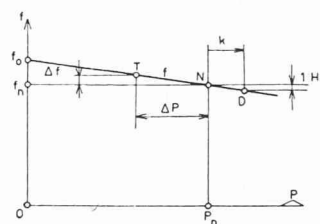


Fig. 25 b. — Caractéristique puissance/fréquence d'un groupe turbine/générateur.

P = Puissance fournie par le groupe;
 P_n = Puissance normale.
 f = Fréquence de la tension aux bornes du générateur;
 f_n = Fréquence nominale.
 f_o = Fréquence en marche à vide.
 ΔP = Ecart de puissance.
 Δf = Ecart de fréquence.
 k = Ecart de puissance pour un écart de fréquence de 1 Hz.

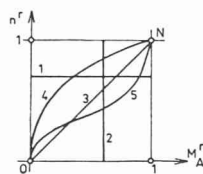


Fig. 24. — Caractéristiques couple-vitesse d'une machine de charge.

En valeurs relatives:
 $M_A^r = M_A : M_n$ et $n^r = n : n_n$.

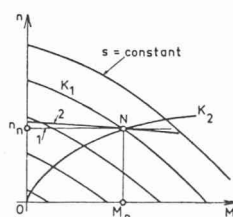


Fig. 25 a. — Famille des caractéristiques couple-vitesse d'un moteur ou d'une turbine et de sa machine de charge.

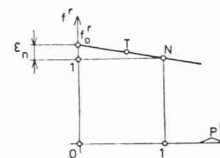


Fig. 25 c. — Caractéristique puissance/fréquence exprimée en valeur relative.

$p^r = P/P_n$ = Valeur relative de la puissance.
 $f^r = f/f_n$ = Valeur relative de la fréquence.
 $f_o^r = f_o/f_n$ = Valeur relative de la fréquence en marche à vide.
 $\epsilon_n = f_o^r - 1$ = Augmentation relative de la fréquence entre la marche avec puissance nominale et la marche à vide.

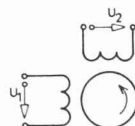


Fig. 25 d. — Schéma d'un moteur biphasé avec induit court-circuité.

La constante k est définie comme étant « l'énergie réglante » du groupe. Lorsque le réglage est « astatique », cette constante devient infinie. Elle est nulle lorsque le dispositif de réglage du groupe est bloqué. L'écart de fréquence Δf est lié à l'écart de puissance ΔP du groupe par la relation suivante :

$$\Delta P + k \Delta f = 0; \quad k = -\frac{\Delta P}{\Delta f} \quad (20)$$

k caractérise l'augmentation de la puissance fournie par le groupe lorsque la fréquence diminue de 1 Hz.

La figure 25 c représente les relations exprimées en valeurs relatives avec

$$\begin{aligned} Pr &= P/P_n \\ fr &= f/f_n \end{aligned} \quad (21)$$

L'augmentation relative ε_n de la vitesse entre la marche avec puissance nominale et la marche à vide est la suivante :

$$\varepsilon_n = f'_o - 1. \quad (22)$$

Cette augmentation caractérise le « statisme du réseau » ; elle se tient pratiquement entre les valeurs 0,05 et 0,1. Ces valeurs correspondent à la chute de tension des caractéristiques tombantes représentées par les figures 1 et 2.

De même que pour la bonne marche en parallèle des générateurs, il est nécessaire de donner un certain statisme à leur réglage de tension (caractéristique tombante), de même la marche en parallèle des turbines hydrauliques, à vapeur ou à gaz, nécessite que soit donné un certain statisme au réglage de leur vitesse.

Pour le réglage des puissances d'échange entre réseaux électriques interconnectés, ces puissances d'échange sont mesurées au point d'interconnexion, transmises par télémesures, comparées à leur valeur de consigne, transformées en une grandeur mécanique, puis agissent par l'intermédiaire d'un servo-mécanisme sur le vannage des turbines asservies au réglage.

Nous avons donc ici un exemple d'une combinaison de réglage et de transmission de grandeurs électriques et mécaniques.

Dans le schéma fonctionnel représenté par la figure 22 b et correspondant au groupe Ward-Leonard, nous reconnaissons une chaîne de réaction électrique a , une chaîne de réaction mécanique b et une chaîne d'asservissement c . La chaîne a caractérise l'équilibre naturel en régime permanent entre la tension du générateur U_q , la tension du moteur U_m , la chute de tension proportionnelle au courant provoquée par les résistances rotoriques R_q et R_m , et les inductivités rotoriques L_q et L_m . La chaîne de réaction mécanique b caractérise l'équilibre naturel entre le couple moteur $M = CI$, le couple antagoniste M_A , le couple dû au frottement $\rho\omega_m$ et le couple $Id\omega_m/dt$ résultant de l'accélération des masses affectées du moment d'inertie J .

Exceptionnellement, nous prenons en considération le phénomène transitoire et écrivons :

$$(R_q + R_m) i + (L_q + L_m) \frac{di}{dt} = u_q - u_i \quad (23)$$

$$\rho\omega_m + J \frac{d\omega_m}{dt} = M - M_A. \quad (24)$$

En utilisant les transformations de Laplace (avec $p = \sigma + j\omega =$ fréquence complexe) on obtient, en généralisant la loi d'Ohm :

$$L(i) = \frac{L(u_q) - L(u_i)}{\bar{Z}_e} \quad (25)$$

$$L(\omega_m) = \frac{L(M) - L(M_A)}{\bar{Z}_m} \quad (26)$$

$$\text{avec } \bar{Z}_e = (R_q + R_m) + p(L_q + L_m) \quad (27)$$

$$\text{et } \bar{Z}_m = \rho + pJ.$$

Sur la figure 22 b sont portées les impédances électriques \bar{Z}_e et mécaniques \bar{Z}_m mécaniques. Il est admis, d'autre part, que le couple M_A du moteur de charge ne varie pas linéairement avec la vitesse angulaire ω_m .

Si l'on remplace, dans les schémas fonctionnels représentés par les figures 1, 6, 8, 12 et 17, les valeurs R_q resp. R par les impédances

$$\bar{Z}_q = R_q + pL_q \quad \text{et} \quad \bar{Z} = R + pL, \quad (29)$$

ces schémas sont également valables pour décrire des phénomènes transitoires.

Un autre exemple d'un moteur électrique réglable est le moteur biphasé avec induit court-circuité dont le principe est représenté par la figure 25 d. Une phase de ce moteur est alimentée à une tension alternative constante U_1 (à 50 ou 400 Hz) ; l'autre phase est alimentée par une autre tension U_2 variable et décalée de 90° par rapport à U_1 . On obtient ainsi les caractéristiques vitesse-couple ($n - M$) représentées par la figure 25 a.

Nous nous proposons maintenant d'examiner les caractéristiques d'autres sources d'énergie électrique.

7. Machines amplificatrices

Pour obtenir des facteurs d'amplification importants on est amené, ainsi que le représente la figure 26, à mettre deux ou plusieurs génératrices à courant continu en cascade. Ce mode d'amplification est utilisé en particulier pour l'excitation des alternateurs de grande puissance et constitue un amplificateur « à deux étages ». Le courant de sortie de la deuxième machine peut être reconduit sur la première machine et augmente ou affaiblit l'action du « courant de variateur » I_o . Le schéma fonctionnel donné par la figure 27 représente un dispositif avec asservissement négatif en fonction du courant de sortie I_2 . Ce dispositif contient dans la chaîne d'action directe, 2 éléments non linéaires. En ce qui concerne le comportement de ce dispositif en régime stationnaire, ces deux éléments peuvent être combinés en un seul élément. Pour chaque valeur du courant I_o correspond pour $\rho = 0$ une certaine valeur de la tension U_{q2} de source de la deuxième machine. La géométrie des caractéristiques que nous avons développée ci-dessus s'applique également à l'ensemble formé par plusieurs amplificateurs en série ; on peut également établir les familles de courbes représentées par les figures 14 et 15.

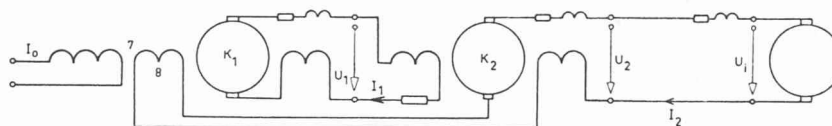


Fig. 26. — Génératrice à courant continu en cascade.

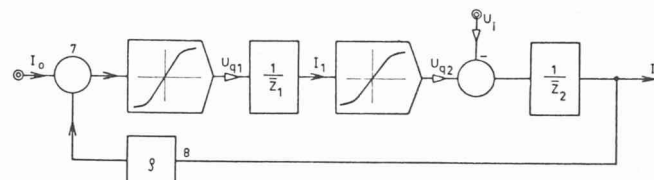


Fig. 27. — Schéma fonctionnel correspondant à la fig. 26.

Les deux machines représentées par la figure 26 peuvent également être combinées en une seule machine, ainsi que le représente la figure 28, machine que le professeur Pestarini a baptisée du nom de *Métadyne*.

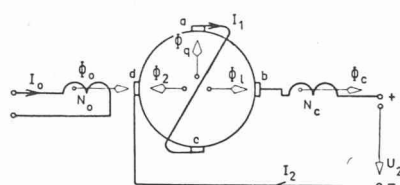


Fig. 28. — Schéma électrique d'une « Métadyne ».

$$\Phi_l = \Phi_o - \Phi_2 + \Phi_c,$$

Le champ magnétique longitudinal Φ_o résultant du courant I_o induit entre les balais ac une tension U_{q1} . Ces balais sont court-circuités et le courant de court-circuit I_1 qui les parcourt provoque le champ magnétique transversal Φ_q . Ce champ induit à son tour la tension U_{q2} entre les balais bd du deuxième circuit. Le courant de charge I_2 induit le champ Φ_2 qui agit dans le sens longitudinal en direction inverse du champ Φ . Il en résulte que les courants I_2 et I_o agissent en sens inverse, ce qui conduit à la caractéristique $U_2 - I_2$, semblable à celle représentée par la figure 14. La « Métadyne » fonctionne donc comme une source de courant, avec, pour $U_2 = 0$, un courant de court-circuit I_{c2} proportionnel au courant I_o . On peut compenser partiellement ou totalement l'effet de ce courant I_2 en ajoutant un enroulement statorique, l'enroulement de compensation N_c représenté par la figure 28. Si cette compensation s'effectue à 85 %, les caractéristiques ont encore la même allure que celle représentée par la figure 28. Si cette compensation s'effectue à 100 %, on obtient une source à tension constante selon les caractéristiques externes de la figure 7 b. Si la compensation dépasse légèrement 100 %, il en résulte que la tension U_2 est indépendante du courant de charge I_2 . Les machines de ce genre sont connues sous le nom d'« Amplidyne » et ont trouvé un vaste champ d'application en servo-technique.

Ces machines conviennent particulièrement bien pour une amplification de puissance. Au moyen d'une puissance d'entrée $R_o I_o^2$ de 1 à 10 W déterminée par les pertes par effet de Joule dans l'enroulement de commande, elles permettent de commander une puissance de sortie s'élevant jusqu'à 50 kW. Elles permettent d'obtenir des facteurs d'amplification qui peuvent aller jusqu'à 20 000.

Les « métadynes réactives », avec compensation partielle, sont utilisées lorsqu'une limitation du courant est souhaitée, par exemple, pour éviter toute détérioration des collecteurs, on peut ainsi obtenir des dispositifs destinés, par exemple, aux locomotives Diesel, avec des caractéristiques imposées semblables à celles représentées par la figure 23 et cela, en utilisant les moyens de la technique des courants forts et sans faire appel à l'électronique.

8. Redresseurs de courant à grilles commandées

Les circuits de tubes à décharge commandés au moyen de grilles polarisées présentent, en principe, les mêmes caractéristiques que les génératrices à courant continu. Lorsque le courant est suffisamment élevé pour ne plus être intermittent, la caractéristique externe d'un redresseur à vapeur mercure à l'allure d'une droite légèrement inclinée, dont la pente est déterminée par la résistance ohmique et la résistance de fuite de la source d'alimentation. Pour les redresseurs au Germanium et au silicium, cette chute de tension peut être considérée en bonne approximation, comme étant proportionnelle au courant, ce qui est moins le cas pour des redresseurs au sélénium.

La figure 28 a représente un redresseur de courant utilisé pour la commande d'un moteur à courant continu avec excitation séparée. La machine entraînée A doit tourner à vitesse constante. Cette vitesse n est mesurée par la tension U_T de la dynamo tachymétrique T . La grandeur de consigne est fixée par la tension U_o donnée par un potentiomètre ajustable. L'écart de réglage e est amplifié, puis appliqué au dispositif de commande des grilles S . La caractéristique de réglage K_2 représentée par la figure 28 b, montre la relation entre la tension de commande et la tension U_α de la source $U_s = O_1 D$ fournie par le redresseur et correspondant à l'angle α de commande des grilles.

La tension induite U_i en fonction du courant I est représentée par la droite LT de la figure 28 c. La caractéristique de réglage K_2 remplace la caractéristique de magnétisation. La figure 29 représente le schéma fonctionnel correspondant avec les deux éléments non-linéaires de l'amplificateur et du dispositif de commande des grilles. L'impédance du circuit formé par le rotor et le redresseur (voir figure 28 a) est donnée par l'expression suivante :

$$\bar{Z}_e = R_q + R_a + p(L_q + L_a)$$

avec $p = \sigma + j\omega$, comme fréquence complexe des régimes transitoires.

Cette impédance est l'équivalent de « l'impédance mécanique » due au frottement ρ et au moment d'inertie J

$$\bar{Z}_m = \rho + pJ.$$

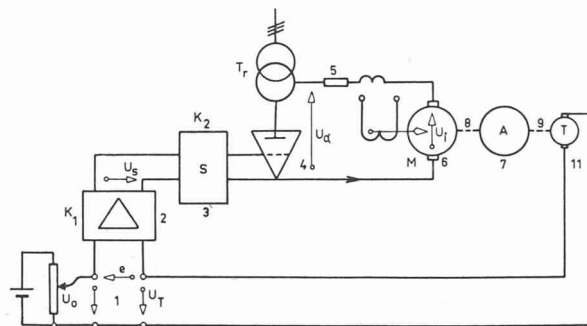


Fig. 28 a. — Schéma du réglage de vitesse d'un moteur à courant continu au moyen d'un redresseur à vapeur de mercure.

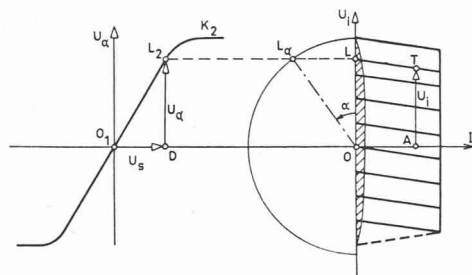


Fig. 28 b. — Caractéristique externe du redresseur représenté par la figure 28 a.

Fig. 28 c. — Caractéristique externe du moteur représenté par la figure 28 a.

La figure 30 représente un redresseur biphasé. Le domaine I de la figure 31 correspond à un régime avec courant intermittent et le domaine II à un régime avec courant non-intermittent. A la limite entre ces deux domaines la caractéristique externe K_I , K_{II} présente une cassure.

Cette caractéristique externe est formée des trois tronçons K_o , K_I , K_{II} .

Un autre exemple de dispositif conduisant à des caractéristiques de ce genre est l'amplificateur magnétique que nous nous proposons maintenant d'examiner.

9. Amplificateur magnétique

La figure 32 représente un amplificateur magnétique auto-excitée biphasé, avec deux noyaux séparés et 2 redresseurs.

Ces noyaux sont équipés de 4 enroulements :

- l'enroulement de charge N
- l'enroulement de commande N_o
- l'enroulement de prémagnétisation N_s
- l'enroulement d'asservissement N_p

Les ampère-tours de chacun de ces noyaux sont donnés par l'expression suivante :

$$\theta_m = N_o I_o + N_s I_s + N_p I \quad (30)$$

$$\theta_m = N_o (I_o + s I_s + \rho I) = N_o I_m \quad (31)$$

$$\text{avec } s = \frac{N_s}{N_o}; \quad \rho = \frac{N_p}{N_o}; \quad I_m = I_o + s I_s + \rho I \quad (32)$$

(I_m = courant de magnétisation résultant).

Ainsi que le montre la figure 33 b, les caractéristiques externes K correspondant à un courant de commande constant I_o , présentent une forte courbure, dues aux déformations du courant de charge I .

L'amplificateur magnétique a la même action qu'un redresseur biphasé en marche avec courant intermittent dont la caractéristique est représentée par la courbe K_1 de la figure 31.

La caractéristique externe K_2 en marche à vide (voir fig. 33 a) indique la relation entre la tension à vide $U_q = OL = DL_2$ et le courant de magnétisation $I_m = OD$.

Lorsque la charge de l'amplificateur magnétique est ohmique à cette charge correspond la caractéristique G représentée par la figure 33 b.

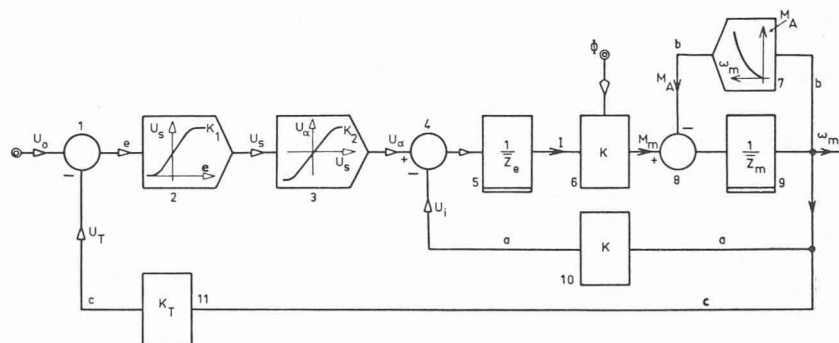


Fig. 29. — Schéma fonctionnel correspondant à la figure 28 a.

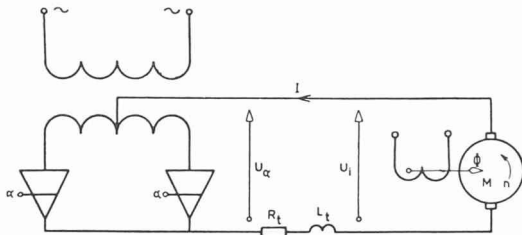


Fig. 30. — Redresseur biphasé avec commande par grilles.

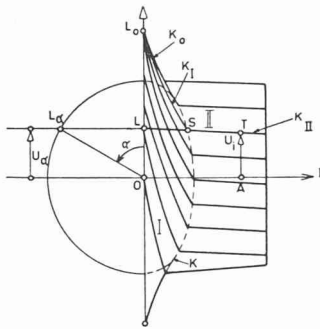


Fig. 31. — Caractéristique externe du redresseur biphasé.

- I = Domaine de marche avec courant intermittent.
 II = Domaine de marche avec courant non intermittent.
 K = Ellipse, limite entre les domaines I et II .
 α = Angle de commande.
 K_1, K_2 = Caractéristique correspondant à un angle de commande constant.

$$OL\alpha = \frac{2}{\pi} OL_0 \quad OL = OL\alpha \cos \alpha.$$

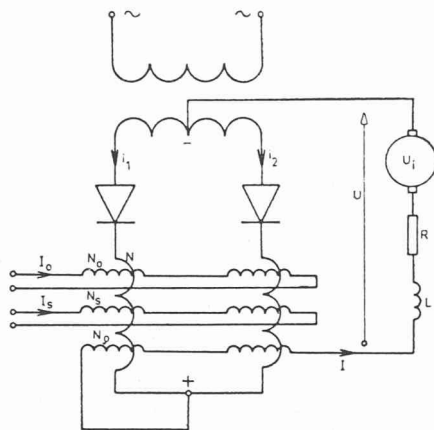


Fig. 32. — Amplificateur magnétique avec auto-excitation.

Au courant de magnétisation I_m correspond le point de régime T avec la tension U . La courbe K_2 est définie comme étant la *caractéristique de réglage en charge*. Cette courbe donne la tension U en fonction du courant I_m pour $\rho = 0$.

Dans de nombreux cas d'application, on souhaite que cette caractéristique K_2 soit linéaire sur un domaine aussi étendu que possible.

La caractéristique $K_{2\rho}$ est obtenue pour un asservissement positif en position de courant ($\rho > 0$). Elle peut être construite selon la méthode indiquée par la figure 10 a avec :

$$A_0A_1 = OA' = I \\ A_0D = \rho I.$$

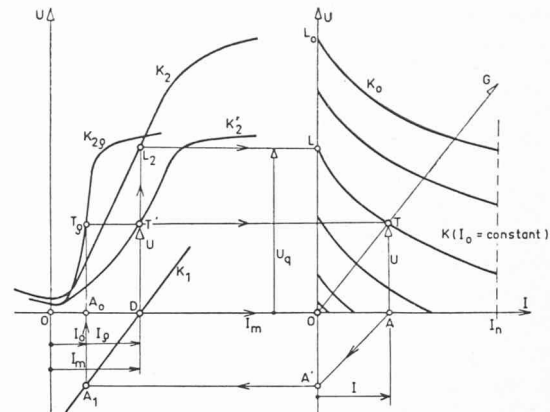


Fig. 33 a.

Fig. 33 b.

Fig. 33 a. — Caractéristique de réglage d'un amplificateur magnétique.

- K_2 = à vide.
 K_2 = en charge.
 $K_{2\rho}$ = avec asservissement.

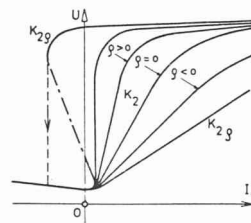
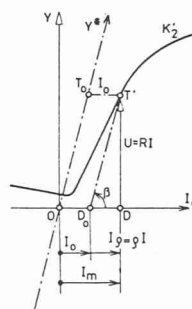
Fig. 33 b. — Caractéristique externe d'un amplificateur magnétique avec $\rho = 0$.Fig. 34. — Caractéristique de réglage d'un amplificateur magnétique avec charge ohmique et différentes valeurs positives et négatives du coefficient d'asservissement ρ .

Fig. 35. — Caractéristique de réglage d'un amplificateur magnétique.

La figure 34 représente les caractéristiques $K_{2\rho}$ de réglage en charge pour différentes valeurs positives et négatives de ρ . En cas d'asservissement négatif, ces courbes sont moins inclinées que pour $\rho = 0$. Elles sont, au contraire, plus inclinées pour un asservissement positif.

Parmi ces différentes caractéristiques, il y en a une qui est verticale. Lorsque l'asservissement positif est très élevé, cette caractéristique prend une forme en S, avec une pente négative pour sa partie médiane.

La figure 35 montre une construction très simple dérivée de la figure 33 a, applicable lorsque la charge est purement ohmique, et qu'il n'y a pas de tension antagoniste.

Dans la figure 35, on a :

$$DT' = U = RI$$

$$D_o D = I_p = \rho I$$

$$\text{il en résulte } \frac{DT'}{D_o D} = \frac{R}{\rho} = \text{tg } \beta = \text{constant.}$$

L'enroulement de commande N_o ne doit fournir que la part $OD_o = I_o$ du courant de magnétisation total I_m correspondant au point T' , le reste $D_o D = I$ est fourni par le courant qui parcourt l'enroulement d'asservissement.

Si l'on fait passer par O une parallèle Y^* à $D_o T'$, on voit que la distance $T'T_o$ est égale au courant de commande I_o . On obtient ainsi la caractéristique de réglage U/I_o avec asservissement en prenant comme axe des ordonnées la droite Y^* , au lieu de Y .

Lorsque cette droite est parallèle à la sortie rectiligne de la caractéristique primitive de réglage K'_2 en charge, il en résulte que la caractéristique K_{2p} du système asservi présente une partie qui est verticale. Pour des valeurs encore supérieures de ρ , la droite Y^* est encore plus plate, ce qui conduit à une caractéristique K_{2p} penchée en arrière (fig. 34). Il en résulte les conditions de marche représentées par la fig. 36 a sur laquelle les caractéristiques K en forme de S sont visibles, pour les valeurs élevées d'asservissement positif. La construction est la même que pour les figures 10 a et 10 b. Le courant $OA = I$ est porté de A' en A_1 sur la droite K_1 avec

$$DA_o = \rho I$$

on obtient ainsi le courant de magnétisation total $I_m = I_o + \rho I$ et le point de marche à vide A_2 situé sur la caractéristique à vide K_2 .

Le nouveau point de régime T^* se trouve sur la caractéristique externe G passant par A_3 . Il en résulte que la caractéristique G_1 ($LT C$) se transforme en K [$LT^* T_1$]. Lorsque la charge est purement ohmique, il faut déterminer les intersections des courbes K avec la caractéristique G_2 , ce qui permet de construire point par point la caractéristique de réglage K_{2p} .

Pour des valeurs élevées du courant de commande, le point de régime se trouve sur la courbe $T'_1 T'_2$ de la figure 36 b et au point T_1 de la figure 36 a ; T_2 est donné par l'intersection de G_2 avec K ; par suite de la saturation, les différentes courbes K sont très proches les unes des autres. Lorsque I_o diminue, il peut se produire que la caractéristique K_3 touche G_2 au point T_3 . Les points T_4, T_5 et T_6 des caractéristiques K_4, K_5 et K_6 conduisent à des courants de commande plus élevés que celui correspondant au point T_3 . La partie de la caractéristique avec les points T'_3, T'_4, T'_5 et T'_6 correspond à un régime de marche instable ; pour une certaine valeur de courant I_p , la tension U , et, partant, le courant I , diminuent brusquement et rejoignent la caractéristique T'_8 et T'_9 .

Si I_o augmente ensuite, la tension augmente brusquement à partir du point T_6 sur la caractéristique K_6 , touche la droite G_2 , et atteint le point T'_2 . La caractéristique K_{2p} présente deux valeurs critiques de courant, pour lesquelles l'amplificateur magnétique « bascule » sans transition d'un régime en un autre

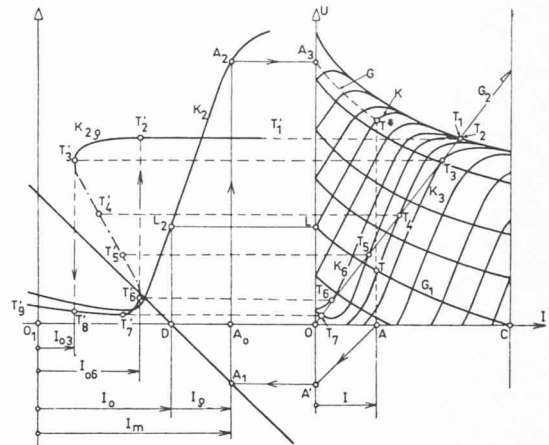


Fig. 36 b.

Fig. 36 a.

Fig. 36 b. — Caractéristique de réglage d'un amplificateur magnétique avec coefficient d'asservissement très élevé.

Fig. 36 a. — Caractéristiques externes d'un amplificateur magnétique.

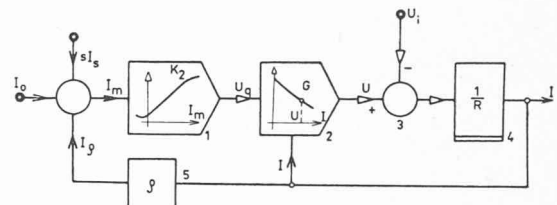


Fig. 37. — Schéma fonctionnel d'un amplificateur magnétique.

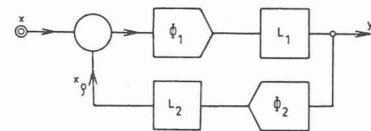


Fig. 38. — Schéma fonctionnel d'un circuit de réglage avec un élément non linéaire dans la chaîne d'action (Φ_1) et de réaction (Φ_2), ainsi que des éléments linéaires L_1 et L_2 fonction du temps.

régime, une valeur inférieure I_{o3} et une valeur supérieure I_{o6} . On utilise cette propriété pour la réalisation de « relais sans contacts » avec un « courant d'enclenchement I_{o6} » et un « courant de déclenchement I_{o3} ».

Le schéma fonctionnel de l'amplificateur magnétique avec asservissement, représenté par la figure 37, présente la particularité que les caractéristiques externes (pour $\rho = 0$) ne sont pas des droites. La caractéristique de réglage K_2 représentée à l'intérieur du symbole 1, indique la tension à vide U_q en fonction du courant I_m . Le symbole 2 indique que la tension aux bornes U peut être déduite au moyen des caractéristiques externes G à partir des deux variables indépendantes U_q et I . Ce symbole 2 remplace l'élément qui était constitué par le terme $R_q I$. Si on veut analyser le processus transitoire, il faut tenir compte, en outre, de l'inductivité L_q de la source. En première approximation, on peut remplacer dans la figure 37, R par la somme $(R + R_q + p(L + L_q))$.

10. Conclusion

Aux différents cas traités ci-dessus, correspond, d'une façon générale, le schéma fonctionnel représenté par la *figure 38* avec, tant dans la chaîne d'action, que dans la chaîne de réaction, des éléments non linéaires et deux autres éléments linéaires, mais présentant un retard par rapport au temps. Pour des oscillations de faibles amplitudes, les critères de stabilité classiques

peuvent être utilisés, par contre, pour des amplitudes importantes et des asservissements positifs très forts, peuvent se produire des instabilités ^{1, 2}.

¹ Traduit de l'allemand par M. Cuénod, Dr. ès sciences techniques, Genève.

² Littérature : « Drei Beispiele aus der Elektroservotechnik », par EDUARD GERECKE. (Z. für angewandte Mathematik und Physik [ZAMP], vol. V, 1954, fasc. 6, pages 443 à 465.)

INTRODUCTION A LA THÉORIE DES DISTRIBUTIONS POUR L'ÉTUDE DES RÉGLAGES LINÉAIRES

par E. STIEFEL, Professeur à l'Ecole polytechnique fédérale, Zurich ¹

Définition de la linéarité

Une des notions fondamentales de la servo-technique est celle des « dispositifs de transfert » représentés en principe par la *figure 1*. C'est un organe qui, excité par la variation d'une certaine grandeur d'entrée (input), est caractérisé par une certaine « réponse » de sa grandeur de sortie (output). Excitation et réponse sont des fonctions du temps « *t* ». Un exemple d'un tel dispositif est donné par un circuit électrique. La grandeur d'entrée est la tension appliquée à ce circuit. La grandeur de sortie est le courant qui parcourt ce circuit. Il serait facile de donner d'autres exemples de dispositifs de transfert parmi les appareils mécaniques ou hydrauliques.

Nous limitons nos considérations aux dispositifs de transfert linéaire, c'est-à-dire à ceux pour lesquels le principe de superposition est valable. Ce principe s'exprime mathématiquement de la façon suivante :

Lorsque pour une excitation $f_1(t)$ un organe de transfert donne la réponse $g_1(t)$ et que pour une excitation $f_2(t)$ sa réponse est $g_2(t)$, il doit en résulter que pour une excitation égale à la somme $c_1 f_1(t) + c_2 f_2(t)$, sa réponse doit être égale à la somme $c_1 g_1(t) + c_2 g_2(t)$, les paramètres c_1 et c_2 étant des constantes quelconques. Les notions de « linéarité » et de « non-linéarité » sont fondamentales en mathématiques ; il n'existe aujourd'hui de théories générales et complètes que pour l'étude des phénomènes linéaires.

Suites de temps

Ainsi que le représente la *figure 2*, une fonction quelconque du temps t peut être décomposée en première approximation en une suite d'impulsions ayant une base uniforme égale à h et comme hauteurs les ordonnées $f_0, f_1, \dots, f_n, \dots$ et se suivant à l'intervalle h .

¹ Exposé présenté au cours de perfectionnement organisé par l'A.S.P.A. les 7 et 8 décembre 1956, à Zurich, sur le thème « Méthodes modernes pour l'analyse de phénomènes dynamiques dans la mécanique, l'électrotechnique et l'automatique ».

Nous appelons « suite de temps », la suite $(f_0, f_1, f_2, \dots, f_n, \dots)$ qui correspond à la fonction $f(t)$.

Considérons en particulier la suite $(\frac{1}{h}, 0, 0, \dots, 0)$

qui ne comprend qu'un seul terme d'amplitude $\frac{1}{h}$, les autres termes étant nuls ainsi que le représente la *figure 3*.

La suite caractérise une fonction discontinue pour $t = h$, fonction que l'on peut définir comme étant une « impulsion unité » et à laquelle on a donné le nom de « suite de Dirac » en l'honneur du physicien Dirac qui le premier a opéré systématiquement avec des fonctions de ce genre pour l'étude de phénomènes physiques.

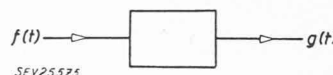


Fig. 1. — Principe d'un dispositif de transfert.

Nous admettons qu'un dispositif de transfert a été excité par une fonction de ce genre et qu'il en résulte la réponse $\phi(t)$ représentée par la *figure 4* et appelée « réponse impulsionnelle ». Nous admettons que la suite $(\phi_0, \phi_1, \dots, \phi_n)$ qui caractérise cette réponse soit connue. Quelle sera la réponse de ce dispositif pour une variation quelconque de sa grandeur d'entrée ? On peut répondre à cette question en faisant usage du principe de superposition. Ainsi que l'indique la *figure 2*, on peut décomposer la fonction $f(t)$ en une suite d'impulsions qui se suivent à l'intervalle h . La réponse à la première impulsion d'amplitude f_0 est caractérisée par la suite de temps suivante :

$$hf_0\phi_0, hf_0\phi_1, hf_0\phi_2, \dots, hf_0\phi_n, \dots$$

La deuxième impulsion caractérisée par l'amplitude f_1 et retardée de h par rapport à la première impulsion, conduit à la réponse suivante :

$$0, hf_1\phi_0, hf_1\phi_1, \dots, hf_1\phi_{n-1}, \dots$$