ÉLECTRICITÉ

Quelques vues d'ordre très général sur le problème de la récupération en traction électrique

par L. Barbillion, *Professeur à la Faculté des Sciences de Grenoble*

PREMIÈRE PARTIE

Considérations générales sur la récupération en matière de traction électrique

Cette question a fait couler déjà des flots d'encre, et il est à peine utile de rappeler ici, qu'en dépit de leur intérêt, les solutions pratiques sont loin d'avoir égalé en valeur les études théoriques fournies par nombre d'éminents techniciens. C'est ainsi que la récupération en monophasé commence à peine à fonctionner systématiquement en Suisse, sur le chemin de fer du Gothard, et encore avec des unités motrices en très petit nombre (Oerlikon).

La traction triphasée, depuis longtemps, a fait usage de récupération, mais, dans son cas, c'est là une facilité si spéciale qu'on nous dispensera d'y insister. Facilité, si l'on veut, mais liée également à une source de difficultés incompressibles, par exemple l'abaissement du facteur de puissance du réseau, du fait de l'emprunt aux stations centrales de la totalité du courant déwatté, tant pour les trains fonctionnant en moteurs que pour ceux fonctionnant en récupération.

En ce qui concerne le continu, la récupération fonctionne depuis de nombreuses années, même depuis l'origine de la traction électrique, si l'on peut dire, puisque les premiers tramways à accumulateurs du Nord-Parisien (1) (lignes ayant leur terminus à la Madeleine) rechargeaient leurs accumulateurs, soit sous trolley, soit par gravité sur les parcours en pente. Cependant, dès que l'unité motrice devient importante, que ses régimes de vitesse se multiplient, et surtout que le nombre des autres motrices en service sur le réseau s'accroît, compte tenu des variations, pour ainsi dire instantanées, des régimes de chacune d'elles, le problème prend une importance et offre des difficultés exceptionnellement considérables. C'est ce qui explique que, sur les grands réseaux où l'on procède actuellement à l'électrification, le P.-L.-M., le P. O. et le Midi, en France, pour ne parler que d'eux, la récupération ait été loyalement essayée, mais on doit le dire, momentanément suspendue, au moins partiellement et sur quelques tronçons, et avec certains types de locomotives.

Faillite du système ? Non pas, mais un temps d'arrêt utilisé pour réorganiser ses forces, pour les regrouper et tâcher d'en finir au prix des perfectionnements désirables.

Eléments du problème

Nous avons donné déjà, par ailleurs et après beaucoup d'autres, une étude complète au point de vue mathématique, de la question (1). Nous résumons, en quelques lignes, cette étude, pour servir de base à notre contribution actuelle.

Soit une motrice gravissant une rampe de valeur α. Le couple à fournir à la jante à cet effet est $C_J = P(\alpha + f) R$. L'équipement moteur développe à la jante un couple moteur C_m, qui est fonction de l'intensité I représentée par la courbe O B de la figure 1. Cette courbe est indépendante de la tension appli-

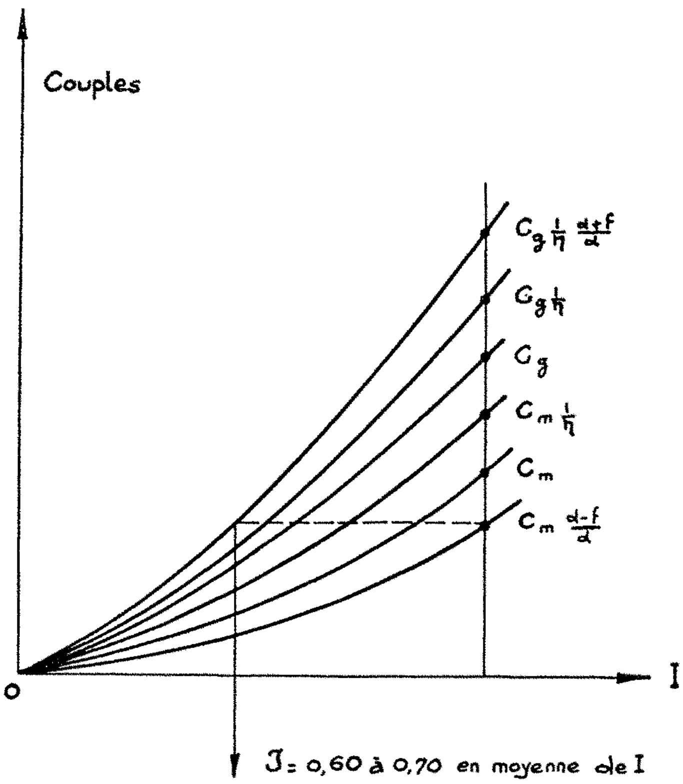

Fig. 1. — Couples divers en fonction des courants absorbés (les courbes de couples sont arrêtées avant que la saturation soit atteinte).

quée. La même machine, descendant la pente α, qui constitue la rampe de tout à l'heure, développe un couple générateur C_g qui, en supposant un rendement moyen   pour tout l'équipement, quel que soit le régime, est déduit par la suite de formules ci-après, en fonction du couple moteur précédent :

$$\left.\begin{aligned} C_m &= P(\alpha + f) R \\ C_m &= C_{\text{absorbé}}\, \eta \\ C_g &= C_{\text{réc}}\, \eta \\ C_{\text{réc}} &= P(\alpha - f) R \end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

d'où

$$\frac{C_g}{C_{abs}} = \eta^2 \left(\frac{\alpha - f}{\alpha + f}\right)$$

(1) Tramways de Paris et du département de la Seine.

(1) Voir *Industrie Electrique*, 39e année, N° 902, 25 Janvier 1930.

relation en apparence indépendante des vitesses, mais qui leur est liée en réalité, car f est fonction de ces mêmes vitesses.

On en déduit, au cas où l'on ne changerait pas le flux d'excitation du moteur devenu génératrice, le courant J qu'il fournirait en tant que génératrice débitant sur la ligne.

Nous le répétons, pour un même flux Φ, associé soit à I, courant *moteur*, soit à I, courant *récupéré*, nous aurons :

$$\boxed{\frac{C_g}{C_{abs}} = \frac{J\,\Phi}{I\,\Phi} = \frac{J}{I} = \eta^2 \left(\frac{\alpha - f}{\alpha + f}\right)} \qquad (1')$$

Il ne correspond pas, nous le répétons encore, à une réalité immédiatement concrète, car les modes de création des flux sont totalement différents en marche motrice et en récupération. Nous allons le montrer ci-après.

Un certain nombre de points essentiels dominent cette question si délicate de la récupération. Il est bon, surtout après une analyse incomplète comme celle que nous avons faite, de les mettre en valeur, comme directives à observer.

Premier point. — Un fait d'abord s'impose : celui de l'égalité des divers couples, compte tenu, naturellement, des rendements.

Donc :

$$\boxed{C_g = \eta\, P\, (\alpha - f)\, R = J\, \Phi} \qquad (2)$$

c'est-à-dire qu'aux variations de rendement près, $J\,\Phi$ est fixé, quand $P\,(\alpha - f)\,R$ l'est (conservation de la pente).

Etant donné que le flux à créer dans les inducteurs ne le sera plus dans le cas de la récupération, par la variation plus ou moins spontanée des ampères-tours institués par J, mais bien par des artifices extérieurs, nous dénommerons ce flux Ψ.

Donc :

$$\boxed{J\,\Psi = C^{te}} \qquad (2')$$

Deuxième point. — Ou l'on maintient en pente la même vitesse qu'en rampe, ou *l'on adopte une vitesse différente.* Dans les deux cas, la puissance récupérable, en supposant en première approximation que la tension aux bornes soit à peu près identique à la force électro-motrice de générateur développée, est donnée par la formule :

$$\boxed{P_{réc} = U\,J = \bar{\omega}\,\eta = \eta\,(\alpha - f)\,P\,R\,\omega} \qquad (3)$$

Nous supposerons d'abord que la vitesse soit maintenue la même, ω, en cours de récupération sur la pente α, quelles que soient les variations de la tension. Ainsi, pour $\omega = C^{te}$,

$$\boxed{U\,J = C^{te}} \qquad (3')$$

Par conséquent, si la tension aux bornes U varie, l'intensité J varie corrélativement, mais en sens contraire. D'où le *deuxième lemme.* Approximativement *à vitesse constante de récupération* ω, le courant J a une variation relative égale et de sens contraire à la variation de la tension U.

Soit :

$$\boxed{\begin{array}{l} U' = U + \Delta U \\ J' = J + \Delta J \end{array}}$$

ΔU, ΔJ, accroissements respectifs de U et de I.

Posons :

$$\frac{\Delta U}{U} = \delta U \qquad\qquad \frac{\Delta J}{J} = \delta J$$

Nous aurons, à vitesse constante ω :

$$\boxed{\delta U = -\,\delta J} \qquad (4)$$

Enfin, un *troisième point.* Les couples moteur et récupéré étant constants, la variation relative du flux est égale et de sens contraire à la variation relative de l'intensité, donc égale et de même sens que la variation relative de tension. On a, en effet :

$$\boxed{\delta \Psi + \delta J = o} \qquad (5)$$

d'où :

$$\boxed{\delta \Psi = -\,\delta J} \qquad (5')$$

Si l'on suppose maintenant la vitesse de récupération variant de ω à $\omega\,(1 + \varepsilon)$, et la puissance à récupérer maintenue constante et égale à la nouvelle valeur $U\,J_0\,(1 + \varepsilon)$, la formule ci-après nous permet de généraliser les conclusions qui précèdent :

$$\boxed{P_{réc} = U\,J_0\,(1 + \varepsilon) = U\,J'_0} \qquad (6)$$

Nous aurons ainsi :

$$\varepsilon = \frac{\omega' - \omega_0}{\omega_0}$$

$$J'_0 = J_0\,(1 + \varepsilon)$$

ε est un accroissement fixe de vitesse, agréé à l'effet de rehausser la puissance de P en P'.

Alors

$$\boxed{U\,J' = C^{te}} \qquad (6')$$

encore, en cas de modifications de la tension pour ce nouveau régime de vitesse, par rapport à la valeur moyenne U_0 :

$$\boxed{\omega' = \omega_0\,(1 + \varepsilon)} \qquad (6'')$$

ainsi :

$$\begin{cases} \delta \Psi' = +\,\delta U \\ \delta \Psi = -\,\delta J' = \delta U \end{cases}$$

avec :

$$\begin{cases} J' = J\,(1 + \varepsilon) \\ \delta J' = \delta J + \varepsilon\,\delta J \end{cases}$$

Nous aurons donc, finalement :

$$\boxed{\begin{array}{l} \delta J\,(1 + \varepsilon) = -\,\delta U \\ \delta \Psi\,(1 + \varepsilon) = +\,\delta U \end{array}}$$

Donc, à vitesse accrue, $\omega' = \omega_0\,(1 + \varepsilon)$

$$\boxed{\begin{array}{l} \delta J = -\,\dfrac{\delta U}{1 + \varepsilon} \\[2ex] \delta \Psi = +\,\dfrac{\delta U}{1 + \varepsilon} \end{array}} \qquad (7)$$

Examinons encore un cas particulier : soit réalisée la marche à courant constant J. Alors, on doit, pour sauvegarder la constante du couple, non plus agir sur le flux, mais régler par le jeu de la vitesse. Le machiniste observant son indicateur de vitesse maintient simplement le courant constant à l'ampèremètre, et la puissance à récupérer U J, avec J constant et U variable et la vitesse ω, sont éminemment variables.

Constructions graphiques relatives à la marche en récupération

On peut utiliser, dans ce cas, des caractéristiques apparemment de même nature, mais philosophiquement tout à fait différentes de celles employées pour caractériser la marche en motrice (fig. 2). Nous conserverons dans leur emploi, pour simplifier, les hypothèses très approximatives ci-dessus.

La formule ci-après nous donne la vitesse en récupération, en fonction du courant récupéré :

$$\boxed{N = \frac{U + RJ}{n\Psi}} \qquad (8)$$

n nombre de conducteurs de l'induit, ou constante en tenant lieu.

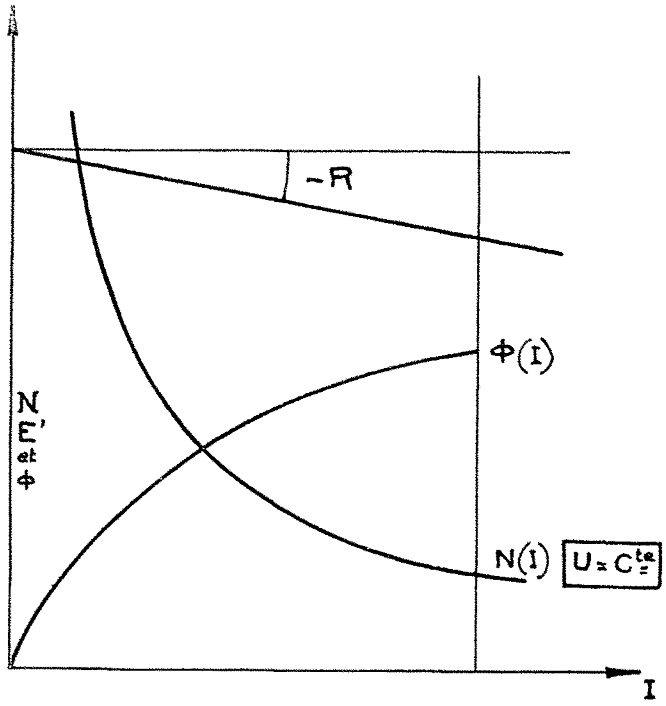

Fig. 2. — Caractéristiques de vitesse et de flux d'un moteur série de traction marchant à tension constante.

N se présente comme le quotient de l'ordonnée d'une droite montante de coefficient angulaire R et d'une ordonnée représentant le flux Ψ, à développer dans les inducteurs, en fonction du courant récupéré. Qu'on y prête attention, ce n'est pas une courbe d'aimantation, c'est une hyperbole équilatère déduite de la condition :

$$\boxed{\Psi J = C^{te} = P(\alpha - f)R} \qquad (2')$$

En d'autres termes, à chaque point de cette hyperbole, correspond la valeur du flux qu'il faut créer pour réaliser la constance du couple récupérateur.

Ainsi, deux caractéristiques extrêmes de vitesse se présenteront comme l'indique la figure 3. Elles ont l'allure de courbes d'aimantation ou de force électromotrice à vide de machines série, mais à concavité tournée vers les ordonnées. L'ordonnée à l'origine de la droite n'étant autre chose que la tension du réseau, on construira aisément ces deux caractéristiques extrêmes. Si la tension devient plus grande pour une même intensité récupérée, la vitesse du train deviendra plus grande. Les variations relatives d'intensité et de vitesse sont alors données en fonction des variations relatives de tension par la formule ci-après :

$$\boxed{\partial J = \partial\omega - \partial U} \qquad (5'')$$

qui, lorsque ω est maintenu constant, redevient

$$\boxed{\partial J = -\partial U} \qquad (5')$$

La figure 3 donne donc les intensités nécessaires à refouler pour maintenir une vitesse constante, suivant que la tension est forte ou faible.

Une dernière construction graphique permet d'obtenir très aisément les puissances récupérées. Les ordonnées à l'origine

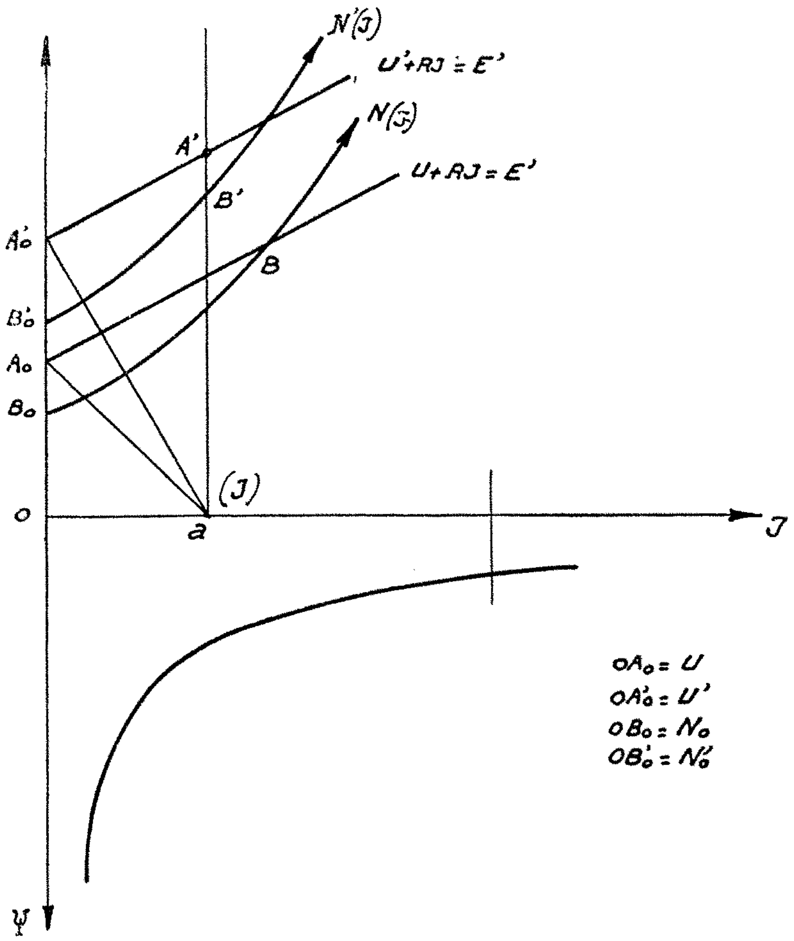

Fig. 3. — Caractéristiques de récupération d'un moteur série pour diverses valeurs de la tension du réseau.

étant proportionnelles aux tensions, on voit qu'il suffit de joindre chaque point J à l'ordonnée à l'origine pour avoir un triangle dont la surface représente précisément la puissance récupérée correspondante. Donc, le régime à vitesse variable, mais à courant constant, peut constituer la loi à adopter pour la récupération lorsqu'on marche à tension également variable.

Relations entre le démarrage et le freinage par récupération jusqu'à l'arrêt. Constructions graphiques.

Les liens qui existent entre les deux problèmes du démarrage et du freinage, sont extrêmement nombreux et étroits ; nous les avons signalés à plusieurs reprises. Nous désirerions cependant attirer ici l'attention sur quelques conceptions analogiques un peu particulières qui leur sont relatives.

D'habitude, dans la période de démarrage, on s'impose de maintenir le courant entre deux valeurs : I_{max} et I_{min}, et l'on ne sort de ces valeurs vers I_{min} que lorsqu'on a renoncé, le régime allant être atteint, aux résistances de passage ou à l'emploi d'artifices équivalents, tels que survolteurs-dévolteurs, etc. ; en d'autres termes, le démarrage vitesse est encadré par deux parallèles aux ordonnées passant par I_{max} et I_{min}.

On opère de même en matière de freinage. On s'impose deux limites de courant, entre lesquelles on se maintient, limites qui correspond à des valeurs acceptables pour l'effort moteur. On remarquera cependant la différence capitale qui existe entre le freinage et le démarrage : dans le démarrage, le courant fixe en somme la valeur du flux, donc celle du couple ou de l'effort moteur. Dans la période de freinage, il y a une relation, non pas immédiate, mais médiate, c'est-à-dire par l'intermédiaire des systèmes régulateurs de flux, entre l'intensité et ce même flux. Ce qui est fixé, nous l'avons dit, par le couple P ($\alpha - f$) R, c'est le produit du flux par l'intensité. Si l'on s'impose des limites d'intensité, on s'impose par cela même des limites de flux ; d'où la forme des graphiques représentatifs du freinage.

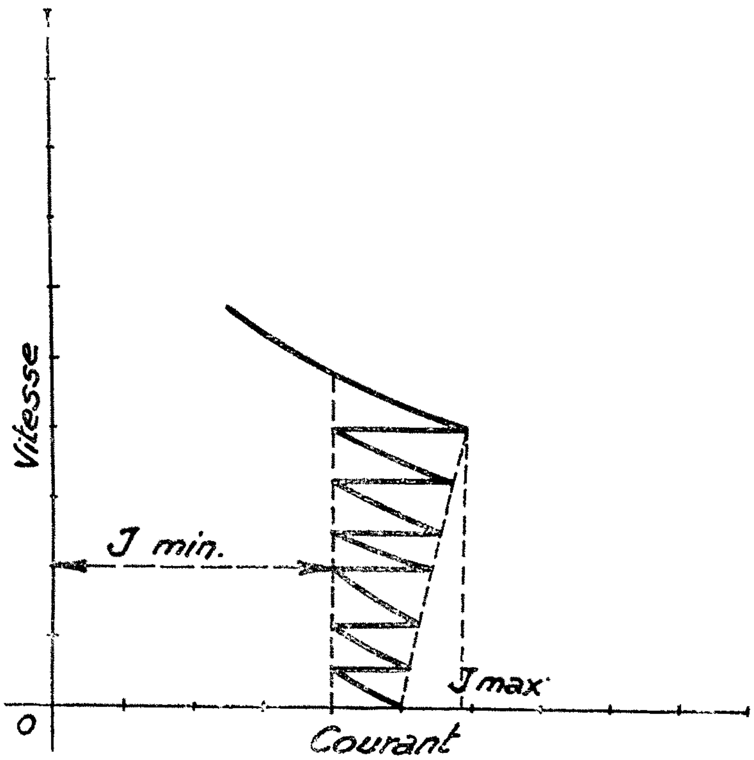

Fig. 4. — Mode spécial de démarrage avec échelons de vitesse constants pour moteur série à courant continu sous tension constante.

Les caractéristiques de vitesse N (J) sont ainsi fonction de deux paramètres U et J. Si U ne varie pas (réseau de refoulement à tension stable), le seul paramètre fixant les caractéristiques N (J) sera le flux Ψ.

On peut aussi employer, pour le freinage, comme pour le démarrage, un autre mode, celui qui consiste à utiliser des variations de vitesse égales quand on passe d'un plot ou d'un cran au suivant (1). En d'autres termes, divisant la longueur correspondant à la vitesse nulle jusqu'à la vitesse maximum, en un certain nombre de tronçons, on passera d'un cran au suivant lorsque la variation de vitesse survenue sera égale à celle qu'on s'est imposée. L'aspect des graphiques sera alors tout à fait différent de celui des graphiques classiques. On peut en déduire aisément la loi des flux Ψ à réaliser en fonction des intensités dans la période de freinage (fig. 4 et 5).

DEUXIÈME PARTIE

Etude analytique simplifiée du problème de la récupération

Notations. — Dorénavant, nous serons amenés systématiquement à dénommer U_0 et Ψ_0 les valeurs normales de la tension et du flux, ω_0 la vitesse normale de récupération, A la constante $\frac{E_0}{\omega_0 \Psi_0}$, I_0 le courant normal de récupération, R_T la somme de la résistance de l'induit R_g du moteur génératrice et R une résistance en série, dite *stabilisatrice*, et dont nous ne pouvons définir ici le rôle assez complexe (1).

Hypothèses. — Nous supposerons, en outre, provisoirement, que le flux Ψ qui doit varier du fait de l'excitation, généralement complexe, des inducteurs du moteur-génératrice, les variations étant ajustées d'après celles de ω pour maintenir $\tilde{\omega}$ constant,

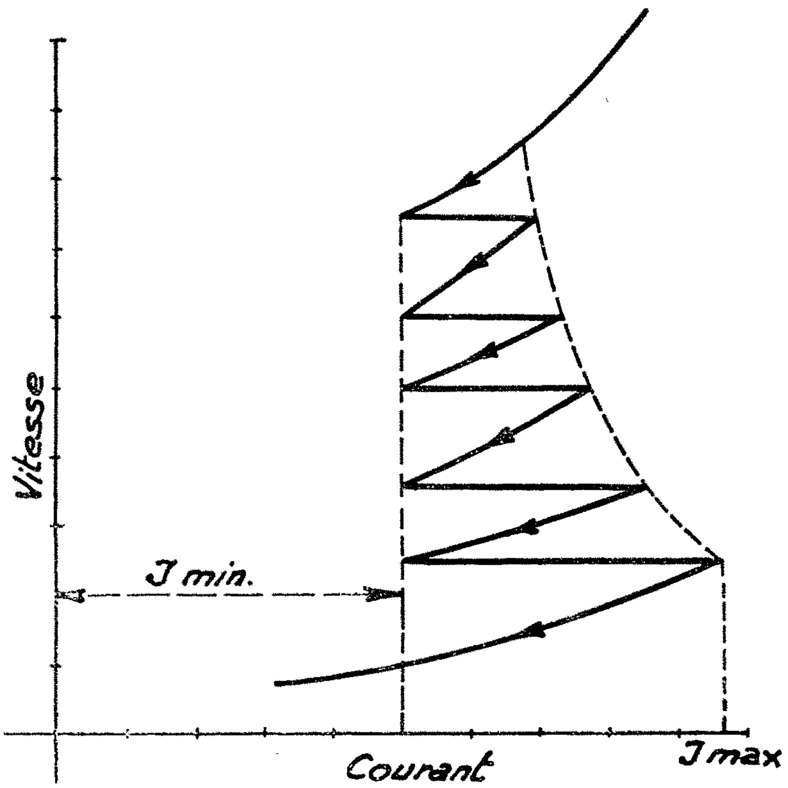

Fig. 5 — Mode spécial de récupération à échelons de vitesse constants pour moteur série à courant continu, à tension constante.

le fait instantanément, au moins sauf hypothèse contraire. Nous entendons par là que, à la tension d'excitation appliquée aux inducteurs (U_e) correspond immédiatement le courant I_e donné par la formule :

$$I_e = \frac{U_e}{R_e}$$

Mais, pratiquement, il n'en est pas ainsi, du fait de la self-induction des enroulements excitateurs. Enfin, même si le courant inducteur I_e était en phase avec la tension U_e, il n'en résulterait pas qu'il le fût avec le flux qu'il produit, du fait des courants de Foucault développés dans les masses voisines. Nous admettrons, cependant, sauf hypothèses contraires, que le flux Ψ est en phase avec la tension appliquée aux enroulements excitateurs correspondants. En effet, en pratique, cette conception n'est pas invraisemblable, du fait de la sur-régulation qu'il faut toujours apporter en vue de compenser la première période de dépression consécutive aux variations de U. En fin de compte, il y a compensations successives en cas de hausse de tension (nous adopterons uniformément cette hypothèse dans notre étude) entre les embardées de vitesse qui se produisent d'abord, et les diminutions corrélatives de cette vitesse, ensuite. On a en effet, à l'origine de la perturbation,

---

(1) Procédé rappelé fort judicieusement par M. Della Riccia dans sa communication à la Société Française des Electriciens (*Bulletin de la S. F. E.*, octobre 1929).

(1) Voir Gratzmuller, *Bulletin de la Société Française des Electriciens*, N° 98, Tome IX, Octobre 1929.

Δ U étant supposé avoir été créé brusquement, et les enroulements induits dépourvus de self-induction :

$$\boxed{\frac{A\,\omega_0\,\Psi_0 - (U_0 + \Delta\,U)}{R_T} = J'_0 < J_0} \qquad (9)$$

avec J_0 valant :

$$\boxed{J_0 = \frac{A\,\omega_0\,\Psi_0 - U_0}{R_T}} \qquad (9')$$

Il n'est pas déraisonnable, au moins en première approximation, de supposer que les enroulements induits ont une constante de temps infinie

$$\left(\frac{R_a}{L_a} = \infty\right)$$

c'est-à-dire $L_a = o$, alors que le flux Ψ, délicat à créer, surtout dans le cas d'excitatrices extérieures, toujours complexes, ne prend sa nouvelle valeur que suivant la loi exponentielle

$$\boxed{\Psi = \Psi_0 + \Delta\,\Psi_0 \left(1 - e^{-\frac{R_e}{L_e}t}\right)} \qquad (10)$$

la constante de temps équivalant à l'inertie du réglage.

L'idéal théorique de cette transformation de courant, soit de J_0, serait donné par la figure 6, dans laquelle J'_0 correspond à la

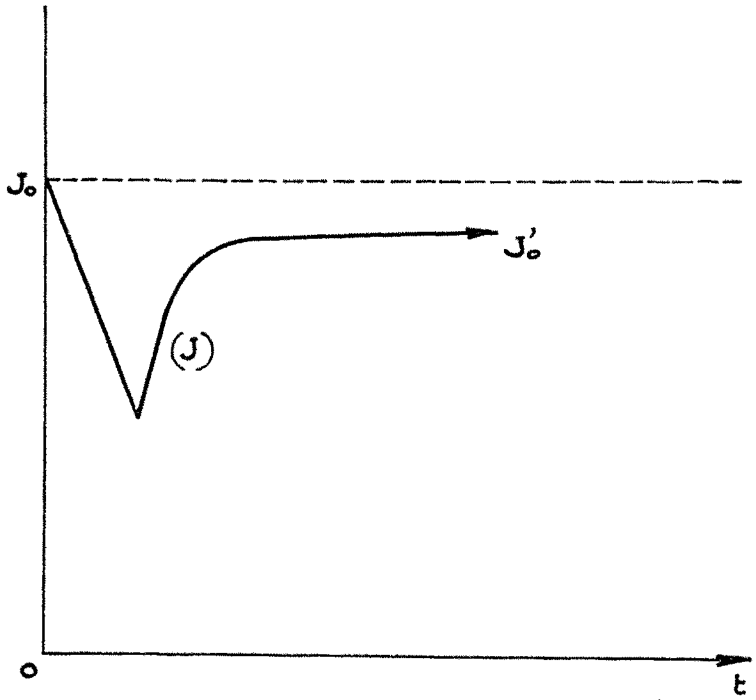

Fig. 6. — Forme théorique des variations du courant d'armature d'un moteur série travaillant en récupération lors d'une variation de régime.

nouvelle valeur de Ψ_0. Pour une puissance récupérée constante, J'_0 sera, en général, différent de J_0, pour la raison suivante, à savoir que l'on a bien :

$$\boxed{C_{réc} = P\,(\alpha - f)\,R = C^{te} = J\,\Psi = B\,J\,\Psi} \qquad (2'')$$

Rappel des principes fondamentaux de la récupération

Nous croyons utile, en vue de la poursuite de notre étude, de résumer ci-après, à nouveau, mais sous forme succincte, la base de cette théorie délicate.

La puissance récupérable est fixée quand la puissance récupérée l'est. Or, cette puissance récupérée se présente sous la forme ci-après :

$$\boxed{C_{réc}\,\omega = P\,(\alpha - f)\,R\,\omega = \frac{U\,J}{\eta}}$$

Si η est le rendement moyen de l'équipement des jantes à la prise, la puissance récupérable sera donnée par la formule approchée, U toujours voisin de la force électromotrice développée dans le moteur-génératrice, D étant une constante :

$$\boxed{U\,J = \eta\,C_{réc}\,\omega = D\,\omega}$$

Ainsi, à vitesse donnée, ω J est fixé, pour une tension U, et l'égalité se maintient, si l'on règle la vitesse à sa valeur de régime :

$$\boxed{U\,J = (U + \Delta\,U)\,(J + \Delta\,J)}$$

et en posant

$$\left\{\begin{array}{l} \dfrac{\Delta\,U}{U} = \delta\,U \\[2mm] \dfrac{\Delta\,J}{J} = \delta\,J \end{array}\right.$$

$$\boxed{\delta\,U + \delta\,J = o}$$

ce qui fixe J.

Il en résulte immédiatement la fixation de Ψ, car :

$$\boxed{\Psi = \frac{C_{réc}}{B\,J}}$$

Les trois relations ci-après, B constante, très suffisamment approchées, conviennent donc pour les besoins de la pratique :

$$\boxed{P_{réc} = C_{réc}\,\omega = G\,\omega} \qquad (\alpha)$$

avec :

$$G = C^{te}$$

$$\boxed{P_{réc} = U\,J = U_0\,J_0\,\frac{\omega}{\omega_0}} \qquad (\beta)$$

J_0, ω_0, U_0, régime moyen de récupération sur la pente α; d'où :

$$\boxed{\delta\,J + \delta\,U = \delta\,\omega} \qquad (\beta')$$

quand on change de régime de vitesse,

ou :

$$\boxed{\delta\,J + \delta\,U = o} \qquad (\beta'')$$

quand on conserve la même vitesse. Enfin :

$$\boxed{\Psi = \frac{C_{réc}}{B\,J}} \qquad (\gamma)$$

ce qui nous donne :

$$\boxed{\delta\,J + \delta\,\Psi = o} \qquad (\gamma')$$

et comme conséquence de (β), soit :

$$\boxed{\delta\,U - \delta\,\omega = +\,\delta\,\Psi} \qquad (\gamma'')$$

soit :

$$\boxed{\delta\,U = \delta\,\Psi} \qquad (\gamma''')$$

Remarque essentielle.— Cette relation simple ($\delta\,\Psi = \delta\,U$) à vitesse constante, $\omega = \omega_0$, ou la relation plus générale :

$$\delta\,\Psi = \delta\,U - \delta\,\omega$$

à vitesse variable $\omega \neq \omega_0$, n'est valable qu'*en régime établi*, et non dans la période transitoire, qui suit une perturbation. Elle constitue la loi de *réajustement définitif du flux*, une fois la perturbation terminée.

Première solution

Marche a flux constant et a vitesse variable.

En particulier, on peut laisser le flux constant. Alors, d'après (γ''), l'accroissement de vitesse à tolérer sera :

$$\delta\,\omega = \delta\,U$$

si cette variation est compatible avec la sécurité de l'exploitation et la tenue du matériel.

Si $\delta U = \pm 0{,}50$ (comme on le sait sur certains réseaux, U variant de 1000 volts à 1800 volts pour 1500 volts moyens), on admettra difficilement une variation de vitesse de $\pm$ 50 %. Du reste, les variations de U sont soudaines, et la vitesse ne pourrait pas suivre avec une quasi-instantanéité suffisante les variations de U.

On peut déterminer ainsi, à titre de renseignement, la loi, dans le cas où la récupération ne fonctionnant pas durant un temps θ, suivant laquelle la vitesse s'accélère.

Remarque I. — Toujours abstraction faite de la période transitoire, maintenir Ψ constant revient à maintenir J constant. La puissance récupérée est, en effet :

$$P_{réc} = U J \neq U' J \neq U'' J$$

Donc :

$$\frac{U}{\omega} = \frac{U'}{\omega'} = \frac{U''}{\omega''}$$

Cette solution possible, et même presque automatiquement réalisée dans le cas de *petites variations de tension*, n'est pas désavantageuse pour la sous-station, dont les machines reçoivent de la puissance variable à courant constant, ce qui offre divers avantages, à tel point que certains systèmes de récupération prévoient une transformation de l'énergie sur la motrice, de façon à faire apparaître à la sortie de celle-ci, un courant constant.

Remarque II. — Une hypothèse également à envisager est celle qui consiste à supposer que le flux Ψ n'a pas eu le temps de se modifier (effet des constantes de temps des circuits) pas plus que le courant dans l'induit. L'accélération *immédiate* est alors donnée par la formule :

$$\boxed{C_{réc} - \frac{A\,\omega_0\,\Psi_0}{\omega}\left(\frac{A\,\omega_0\,\Psi_0 - U + \Delta U}{R_T}\right) = K\,\frac{d\,\omega}{dt}} \quad (10)$$

avec :

$$C_{réc} = P\,(\alpha - f)\,R\,\eta$$

Equation facilement intégrable, qui s'écrit :

$$1 - \frac{1}{1+z}\,(I - \delta U) = 2\,\mathfrak{T}\,\frac{dz}{dt}$$

en posant

$$2\,\mathfrak{T} = \frac{W}{P\,(\alpha - f)\,R\,\eta\,\omega_0}$$

W, énergie cinétique du train à la vitesse considérée.

Cette équation n'est naturellement valable que pour un temps suffisamment court. Mais ce cas particulier relève du cas beaucoup plus général, de la période transitoire, que nous allons étudier ci-après.

Etude de la période transitoire en récupération

Sur les éléments qui définissent cette période. — Sous l'influence des variations de la tension, le nouveau régime s'établira en vertu des relations suivantes :

$$\boxed{J = \frac{A\,\omega\,\Psi - (U + \Delta U)}{R_T} = \frac{A\,\omega\,\Psi - U\,(1 + \delta U)}{R_T}}$$

Ψ est généralement fonction de ω, de U et de t, soit sous forme explicite, soit sous forme implicite. On peut laisser, nous l'avons dit, la vitesse se modifier et produire spontanément un nouveau réglage. En outre de cette forme singulière de régulation, on obtient souvent l'équilibre par l'intermédiaire d'un mécanisme... un peu aveugle, ... ou même par action manuelle, faisant varier le flux suivant une loi donnée du temps, plus ou moins simple, telle la suivante :

$$\boxed{\Psi = \Psi_0\,(I \pm at) = \Psi_0\left(1 \pm \frac{t}{\theta}\right)}$$

θ, temps d'action pour une régulation complète du flux minimum au flux maximum. On a alors l'image de la régulation indirecte, bien connue. Ou bien ce sont les variations mêmes de la tension et du courant, conjointement — c'est là l'image de la régulation directe — qui tendent à modifier ce flux :

$$\Psi = f\,(U, J, \Delta U, \Delta J)$$

La puissance livrée au réseau aura ainsi pour expression :

$$\boxed{P_{réc} = U' J = U\,(I + \delta U)\,\frac{A\,\omega\,\Psi - U\,(1 + \delta U)}{R_T}}$$

C'est donc une *puissance récupérée disponible* aux bornes de la voiture, mais elle doit être diminuée encore de la perte de puissance dans les lignes jusqu'à la sous-station. Cette perte de puissance est imprévisible, donc impossible à calculer.

Dans notre analyse, nous aurons souvent à considérer la puissance récupérable comme celle disponible dans la machine génératrice elle-même, c'est-à-dire que nous nous préoccuperons de l'origine électromagnétique de cette puissance, liée à la puissance récupérée. Celle-ci est donnée par la formule :

$$\boxed{P_{réc} = A\,\omega\,\Psi\,\frac{A\,\omega\,\Psi - U\,(1 + \delta U)}{R_T}}$$

Cependant, en raison de l'approximation forcément très lâche employée, on pourra faire usage à peu près indifféremment de ces deux expressions :

$$\boxed{P_{réc} = U\,(1 + \delta U)\,J = E_g\,J}$$

avec

$$\boxed{E_g = A\,\omega\,\Psi}$$

et

$$\boxed{J = \frac{E_g - U}{R_T}}$$

Remarquons que, dans cette formule, R représente la résistance extérieure équivalente à la présence des autres motrices sur la ligne (seule manière dont nous ne nous dissimulons pas la médiocrité opératoire, de tenir compte de la décharge du réseau). On voit donc qu'une étude logique de la récupération comporte celle des deux problèmes ci-après :

1° La loi du régime à laquelle on doit parvenir pour maintenir constante la puissance récupérée, étant toujours entendu qu'on demeure sur une pente constante. Nous venons de résoudre ce problème.

2° La période transitoire pendant laquelle s'établit ce régime, et les répercussions qui en résultent sur la vitesse et la puissance momentanée transmises au réseau.

Nous reporterons enfin, à la fin de notre étude, quelques considérations pratiques relatives au problème de la récupération jusqu'à l'arrêt. Il n'est pas plus difficile à traiter que le précédent, mais il correspond à une conception industrielle tout à fait différente.

TROISIÈME PARTIE

Etude des régimes transitoires

Forme exacte de la loi de la régulation du flux en fonction de la tension. — Nous avons examiné déjà en gros comment devait varier le flux Ψ en fonction de Δ U. Nous avons montré que $J\Psi$ était fixé par l'équilibre des couples. On pourrait demeurer à vitesse constante ($\omega = C^{te}$), ou tolérer une variation de vitesse

$$\delta\omega = \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} = z$$

dans le cas d'une régulation combinée par le flux et la vitesse.

L'équation

$$\boxed{J\Psi = C^{te}}$$

doit donc être, en tout état de cause, vérifiée.

Il en résulte :

$$\boxed{J\Phi = A\Psi \frac{A\omega'\Psi' - \overline{U + \Delta U}}{R_T} = A\Psi\frac{(A\omega\Psi - U)}{R_T}} \quad (a)$$

D'où aisément si

$$\begin{cases} E_0 = A\omega_0\Psi_0 \\ E_0 - U_0 = \dfrac{1}{\Delta}E_0 \\ U_0 = U = E_0\left(\dfrac{\Delta - 1}{\Delta}\right) \\ R_T + R = R_T\Delta \end{cases}$$

Avec R résistance équivalente de charge du réseau.

$$\boxed{\left(\frac{\Delta+1}{\Delta}\right)\delta\Psi + \delta\omega - \frac{\Delta - 1}{\Delta}\delta U = o} \quad (b)$$

C'est l'équation canonique et *exacte* de la récupération, exacte aux effets réactifs près, dans les inducteurs et les induits.

Ainsi est établie une relation générale entre $\delta\Psi$, $\delta\omega$, δU et t.

Si l'on marche à flux constant, la vitesse nouvelle $\omega(1 + \delta\omega)$ sera liée à l'accroissement δU par la relation

$$\boxed{\begin{array}{c}\delta\omega = \left(\dfrac{\Delta - 1}{\Delta}\right)\delta U \\ \Psi = C^{te}\end{array}} \quad (c)$$

Si l'on s'astreint à marcher à vitesse constante ω, le flux aura dû varier de

$$\boxed{\delta\Psi = \delta U\left(\frac{\Delta - 1}{\Delta + 1}\right)} \quad (d)$$

Ces formules de régime établi ne peuvent servir à étudier le régime transitoire. Nous y revenons donc ci-après.

Régime transitoire

Sous le bénéfice des hypothèses précédentes, nous pourrons écrire :

$$\boxed{P(\alpha - f)R - \left(\frac{A\omega\Psi - U}{R_T}\right)A\Psi = K\frac{d\omega}{dt}} \quad (e)$$

Nous aurons encore ainsi, au prix d'une transformation facile :

$$\boxed{2\mathcal{T}\frac{dz}{dt} + \Delta z - \delta U(\Delta - 1) - \delta\Psi(\Delta + 1) = o} \quad (f)$$

Cette équation se rapproche beaucoup de l'équation (b) qui cependant, elle, est relative au régime établi ; $\delta\omega$ est le nouvel écart de vitesse, $\delta\Psi$, le nouvel écart de flux, δU étant toujours l'écart de tension brusquement apparu.

Dans la dernière formule, $\delta\Psi$ est variable ; nous le représenterons, pour éviter toute confusion, avec $\delta\Psi$ constant, par la variable χ.

Notre équation devient donc :

$$\boxed{2\mathcal{T}\frac{dz}{dt} + \Delta z - \delta U(\Delta - 1) - \chi(\Delta + 1) = o} \quad (f')$$

Pour intégrer cette équation, il faut connaître une loi simple $\chi(U)$, ou $\chi(t)$, ou $\chi(z)$.

Ces trois lois correspondent à des hypothèses différentes ; $\chi(U)$ ne peut avoir une existence concrète que si U varie continûment, et non par sauts brusques. Du reste $\chi(U)$ ne peut suivre $U(t)$ qu'avec un retard (self-induction des enroulements excitateurs) $\Psi(z)$ ne se conçoit que par entrecroisement d'indications tachymétriques avec des indications tensimétriques, ce qui est en fait possible. On agrée une loi de régime $\delta\omega(\delta U)$ et l'on ajuste $\delta\Psi$ d'après cette loi (procédé déjà examiné). Enfin $\Psi(t)$ constitue une manière de régulation indirecte, image assez fidèle de celle employée pour un groupe électrogène. Cette loi ne peut apparaître qu'en combinaison, et très estompée, avec la loi $\delta\Psi(\delta U)$.

Premier mode

Etude de la période transitoire dans l'hypothèse d'une loi de manœuvre $\Psi(U)$ de l'excitation

En réalité, comme nous le montrerons plus loin, $\Psi(U)$ se traduit toujours, non par une relation directe $\delta\Psi = \delta U$, mais par une relation de forme complexe $\delta\Psi = a\,\delta U - b\,\delta J$, J en dernière analyse une fois l'équilibre rétabli, étant lié à U par la relation :

$$\boxed{UJ = U_0J_0(1 + \delta\omega)} \quad (g)$$

donc

$$J = \frac{U_0J_0}{U}(1 + \delta\omega)$$

$$\boxed{J = \frac{\bar\omega_0(1 + \delta\omega)}{U}} \quad (g')$$

Ainsi J, valeur de régime, est *imposée* par U. Nous aurons donc, en particulier, à vitesse constante, dans le cas de deux composantes (voir plus loin) du flux Ψ,

$$\boxed{\Psi = aU - bJ} \quad (h)$$

$$\Delta\Psi = aU(1 + \delta U) - \frac{b\,\bar\omega_0}{U(1 + \delta U)}$$

On aura aisément pour $\delta\Psi = \dfrac{\Delta\Psi}{\Psi}$, l'expression :

$$\boxed{\delta\Psi = \delta U + 2\,\delta U\left(\frac{b\,\bar\omega_0}{U}\,\frac{1}{aU - \dfrac{b\,\bar\omega_0}{U}}\right)} \quad (i)$$

Or, il y a toujours, dans les conditions de régime moyen, une relation numérique simple entre $a\,U_0$ et $\dfrac{b\,\bar\omega_0}{U_0}$. Ces deux termes se retranchent dans la constitution du flux Ψ, mais l'un $a\,U_0$, est naturellement prépondérant. Soit donc :

$$a\,U_0 = \frac{b\,\bar\omega_0}{U_0}\,\alpha$$

avec $\alpha > 1$.

$\alpha = 2$ est une bonne valeur, souvent adoptée et à recommander.

Alors

$$\delta \Psi = \delta U + 2 \delta U \frac{1}{\alpha - 1}$$

Soit $\alpha = 2$; on aura ainsi :

$$\boxed{\delta \Psi = \delta U + 2 \delta U = 3 \delta U} \qquad (i')$$

La variation de Ψ est très large, car le terme a U croît quand la tension croît, et ainsi ($- b$ J) croît, car J diminue quand U augmente.

Deuxième mode

LOI DE MANŒUVRE DE L'EXCITATION Ψ (t) UNIQUEMENT FONCTION DU TEMPS

Une correction manuelle de l'excitation peut, en première approximation, être représentée par une forme analogue à

$$\delta \Psi = \delta U \left(\frac{t}{\theta}\right)$$

ou mieux

$$\boxed{\chi = \delta U \left(\frac{t}{\theta}\right)} \qquad (k)$$

Le machiniste, constatant la hausse de tension Δ U, manœuvre l'excitation avec une vitesse qu'on peut supposer constante, d'où, très *lointainement*, un flux Ψ dont les variations sont proportionnelles au temps.

Un système correcteur d'excitation à moteur indépendant et à mise en route indirecte (analogie avec un groupe électrogène à régulateur indirect), satisfera à cette loi analytique.

Nous aurons ainsi :

$$\boxed{2 \mathfrak{T} \frac{dz}{dt} + \Delta z - \delta U (\Delta - 1) - \delta \Psi (\Delta + 1) = o} \qquad (l)$$

comme équation de l'équilibre dynamique, dans laquelle

$$\delta \Psi = \delta U \left(\frac{t}{\theta}\right)$$

θ temps de la manœuvre complète, depuis U_{min} à U_{max}.

Du reste,

$$\boxed{\delta \Psi = \delta U \frac{t}{\theta} = \chi} \qquad (k')$$

En réalité, à $\delta \Psi$, quantité constante puisque de régime, nous devrons substituer pour être correct la notation χ, définissant une valeur variable.

D'où la loi :

$$\boxed{2 \mathfrak{T} \frac{dz}{dt} + \Delta z - \delta U \left[(\Delta - 1) + \frac{t}{\theta}(\Delta + 1)\right] \quad o} \qquad (f'')$$

L'utilisation de cette équation suppose, nous le rappelons, que le courant d'induit se modifie *instantanément* dans l'armature sous l'influence de la force électromotrice effective qui lui est appliquée et que le flux inducteur naisse instantanément dans les enroulements excitateurs, suivant les indications de la tension U, aux bornes de ceux-ci. En réalité, il y a retard de J et de Ψ sur les valeurs théoriques.

Intégrons cependant cette équation, telle quelle.

Nous aurons :

$$\boxed{\frac{dz}{dt} 2 \mathfrak{T} + \Delta z - \delta U \left[\frac{t}{\theta}(\Delta + 1) + (\Delta - 1)\right] = o} \qquad (f''')$$

Ce qui nous donnera aisément pour la solution générale :

$$Z = z_1 + z_2$$

avec

$$\boxed{z_1 = \lambda e^{-\frac{\Delta t}{2 \mathfrak{T}}}}$$

λ constante à déterminer d'après les conditions initiales et

$$\boxed{z_2 = \alpha t + \beta}$$

α et β constantes déterminées par voie d'identification. Il vient, en effet :

$$\beta = \frac{\delta U}{\Delta \theta} [(\Delta - 1) \theta - 2 \mathfrak{T} (\Delta + 1)]$$

$$\alpha = \frac{\delta U}{\Delta \theta} [\Delta + 1]$$

pour $t = o$, on a bien $z = o$

d'où $\lambda + \beta = o \qquad \lambda = - \beta$

et enfin

$$\boxed{z = \frac{\delta U}{\Delta \theta}\left[(\Delta + 1) t + \{(\Delta - 1) \theta - 2 \mathfrak{T}(\Delta + 1)\} \left\{1 - e^{-\frac{\Delta t}{2 \mathfrak{T}}}\right\}\right]} \qquad (f^{IV})$$

On pourra ainsi trouver une deuxième valeur du temps t_2 pour laquelle z sera encore nul. La courbe en $e^{-\frac{\Delta t}{2 \mathfrak{T}}}$ a un coefficient angulaire à l'origine plus grand que celui de la droite

$$z_1 = (\Delta + 1) t \frac{\delta U}{\Delta \theta},$$

d'où l'existence de cette deuxième valeur t_2 du temps pour lequel $z = o$.

L'équation donnant z se présentera ainsi sous la forme définitive :

$$\boxed{z = \frac{\delta U}{\Delta \theta}\left[(\Delta + 1) t - \{2 \mathfrak{T}(\Delta + 1) - \theta (\Delta - 1)\} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{2 \mathfrak{T}}}\right)\right]} \qquad (f^{V})$$

Application. — Soit :

$$\Delta = 10 \qquad \theta = 5 \qquad \delta U = 0{,}25$$

il viendra aisément, tous calculs faits :

$$\boxed{z = 0{,}005 \left[11 t - 175 \left(1 - e^{-\frac{t}{2}}\right)\right]} \qquad (I)$$

Il faut d'abord que

$$\boxed{2 \mathfrak{T} (\Delta + 1) > \theta (\Delta - 1)}$$

ou que

$$\theta < 4{,}11 \text{ secondes.}$$

On trouve que $z = o$ pour $t = o$ naturellement, et pour $t = 3{,}74$ sec. environ, le maximum de z se produisant pour 1,75 secondes environ. Il correspond à cette valeur de $t = 1{,}75$ introduite dans l'équation :

$$z = \frac{\delta U}{\Delta \theta}\left[(\Delta + 1) t - \{2 \mathfrak{T}(\Delta + 1) - \theta (\Delta - 1)\} \left\{1 - e^{-\frac{\Delta t}{2 \mathfrak{T}}}\right\}\right]$$

ou numériquement :

$$z = 0{,}005 \left[11 t - 175 \left(1 - e^{-\frac{t}{2}}\right)\right],$$

c'est-à-dire :

$$z = 0{,}005 \left[19{,}25 - 175 \left(1 - e^{-0{,}875}\right)\right]$$

Premier mode

Ψ' (U) Complément-Correction des constantes de temps

Revenant au premier mode et adoptant $\delta\Psi' = \delta U$, on aboutit à une équation simple. On peut introduire l'effet retard du flux sur le courant, ou mieux la tension excitatrice proportionnelle à U. On aura ainsi :

$$\boxed{2\mathfrak{T}\frac{dz}{dt} + \Delta z - \delta u\left[(\Delta - 1) + (\Delta + 1)\left(1 - e^{-\frac{t\,R_e}{L_e}}\right)\right]} \quad (\mathrm{IV})$$

avec

$$\boxed{I_e = I_e^0 + (I'^0_e - I_e^0)\left(1 - e^{-\frac{t\,R_e}{L_e}}\right)} \quad (m)$$

Pour tenir compte du retard du flux excitateur Ψ', sur U.

Cette équation s'intègre aisément encore ; z est représentée par une courbe dont les ordonnées sont la somme de deux ordonnées variant respectivement, comme celles des fonctions :

$$\boxed{\begin{array}{c} 1 - e^{-\frac{t\,R_e}{L_e}} \\ \hline 1 - e^{-\frac{\Delta t}{2\mathfrak{T}}} \end{array}}$$

Soit la forme pratique du flux à deux composantes, adoptée en fait dans les équipements :

$$\boxed{\delta\Psi' = a\,\delta U - b\,\delta J}$$

Si $U' = U(1 + \delta U)$ et $J' = J(1 + \delta J)$ sont les nouvelles valeurs de U et de I après réglage, nous aurons :

$$\boxed{\delta\Psi' = \delta U\left[a\left(1 - e^{-\frac{R_e\,t}{L_e}}\right) + b\left(1 - e^{-\frac{R_a}{L_a}t}\right)\right]} \quad (n)$$

Ce qui justifie bien nos propositions précédentes.

Introduisons cette valeur de $\delta\Psi'$ dans l'équation de l'équilibre dynamique.

Il viendra :

$$\boxed{\begin{array}{l} 2\mathfrak{T}\dfrac{dz}{dt} + \Delta z - \delta U\,[(\Delta - 1) + (\Delta + 1) \\ \left\{a\left(1 - e^{-\frac{R_e}{L_e}t}\right) + b\left(1 - e^{-\frac{R_a}{L_a}t}\right)\right\}] = o \end{array}} \quad (f^{VI})$$

Equation facile à intégrer et qui nous donnera z comme la somme de trois fonctions exponentielles en

$$e^{-\frac{t\Delta}{2\mathfrak{T}}},\ e^{-\frac{R_e}{L_e}t},\ e^{-\frac{R_a}{L_a}t}$$

Troisième mode

Autoréglage par la vitesse a flux constant.

L'équation utilisable est la suivante :

$$\boxed{2\mathfrak{T}\frac{dz}{dt} + \Delta z - \delta U\,[(\Delta - 1)] = o} \quad (f^{VII})$$

Nous avons déjà étudié la période transitoire sous cette forme. Nous n'y reviendrons pas. Rappelons seulement qu'en régime :

$$\boxed{(z)_{\text{régime}} = \delta\omega = \delta U\left(\frac{\Delta - 1}{\Delta}\right)} \quad (o)$$

à flux constant naturellement, $\delta\omega$ étant un *écart* fixe en régime de vitesse et z cet écart de vitesse variable dans la perturbation.

Quant aux réalisations pratiques des dispositions qui précèdent, elles ont été remarquablement analysées par notre collègue, M. Gratzmuller (voir note 1, page 115).

Cet ingénieur a mis en lumière les diverses méthodes possibles, et du reste utilisées en traction, pour faire apparaître les deux composantes du flux inducteur, l'une proportionnelle a la tension, et l'autre proportionnelle à l'intensité.

Nous renverrons nos lecteurs à ce travail éminemment intéressant.

QUATRIÈME PARTIE

Récupération jusqu'a l'arrêt. — Sa réalisation en pratique

Dans ce qui précède, nous nous sommes occupé surtout de la récupération en régime sur pente constante. La récupération à l'arrêt est beaucoup plus délicate, puisque la vitesse baissant d'une manière continue, la tension des moteurs, travaillant en génératrices, ne peut, l'excitation étant limitée, dépasser une certaine valeur. Il arrive donc un moment où la force électromotrice du générateur ne peut plus dépasser la tension du réseau. C'est ce qui justifie les systèmes si compliqués, bien que si intéressants, mis en œuvre pour essayer de faire de la récupération jusqu'à l'arrêt. Ces systèmes consistent essentiellement en la création d'une sorte de tension potentiométrique sur laquelle on dérive, pour la mise en vitesse, des tensions variables pour alimenter les moteurs et sur laquelle on renvoie, lors du freinage en récupération, des tensions également variables de manière à ce que le courant refoulé se rapproche, autant que possible, de la constance.

Parmi ces dispositifs très nombreux, les plus connus sont les suivants : ceux de MM. Della Riccia, Somaïni et Heidman, le premier ingénieur-conseil bien connu, le deuxième instaurateur de son système sur les Tramways de Milan et de Rome, et le troisième ingénieur en chef des ateliers des Etablissements de Jeumont, ayant attaché son nom au perfectionnement du système STAR, en essai sur le Métropolitain de Paris depuis 1913.

Le principe commun est le suivant : prenons comme exemple le système Della Riccia. Il comporte quatre moteurs génératrices montés sur le même arbre, que nous dénommerons respectivement A, B, C, et D. Les inducteurs de A et de D sont couplés en série, et identiques ; les inducteurs de B et de C le sont de même. Une gamme de tensions peut être réalisée, soit en dérivant en parallèle des bornes sur A, B C, D, ces moteurs étant tous solidaires et montés sur le même arbre, donc absorbant à peu près chacun le quart de la tension totale, soit en croisant les connexions comme l'indique la figure 7, ce qui permet une deuxième gamme de variations de tension, qui s'emboîte dans la première. Les moteurs de l'équipement sont divisés en deux groupes ; le premier, M, sera relié aux bornes des combinaisons côté A B, le deuxième, groupe N, aux bornes des combinaisons côté C D. Comme on le voit, à la mise en vitesse, on pourra établir théoriquement, sans emploi de résistances, des tensions variables et croissantes aux bornes de chacun des groupes de moteurs. Lors de la récupération à l'arrêt, on opérera de même, mais en ordre inverse.

Dans le système Somaïni, il est fait usage de trois moteurs solidaires, au lieu de quatre, avec des combinaisons d'inducteurs légèrement différentes (fig. 8).

Dans le système Heidman, on relève des dispositions moins voisines, qui constituent surtout des perfectionnements apportés au système STAR.

Un inconvénient commun à tous ces systèmes semble consister dans l'adjonction à l'équipement moteur proprement dit, d'une série de trois à quatre moteurs génératrices inertes, dont les capacités sont cependant, sinon identiques, du moins comparables à celles des moteurs de traction, d'où la localisation sur la voiture d'une puissance nouvelle, fraction importante dans le cas des motrices à récupération, de celle qui est nécessaire pour les motrices ordinaires.

A supposer que la récupération soit parfaite en tant que fonctionnement, justifie-t-elle une telle augmentation de poids et de capitaux ? Il ne le semblait pas hier encore acquis, au moins pour la traction des tramways légers et des omnibus automobiles, qui, du reste, ne freinent généralement pas jusqu'à l'arrêt, mais récupèrent seulement en pente, soit pour recharger leurs batteries, soit pour économiser l'énergie du réseau. Or, il se trouve que les statistiques d'exploitation des tramways urbains démontrent que, dans les conditions les meilleures, sur les lignes les plus favorables en ce qui concerne les rampes, on ne récupérait, avec des systèmes un peu anciens, jamais plus de 20 à 30 % d'énergie, correspondant à la montée en rampe de ces mêmes profils. Quant à la récupération à l'arrêt, elle est rendue fort compliquée avec les voitures de tramways ordinaires, en raison de la nécessité que doit toujours se réserver le wattman de freiner avec une extrême rapidité en cas d'accident. Le gain était jusqu'à ces derniers temps considéré insignifiant. C'est ce qu'a fait remarquer M. Andriès, ainsi que M. Bacqueyrisse, au cours d'une discussion récente à la Société des Electriciens, sur la matière ; ils ont mis en lumière le très grand intérêt de la récupération à l'arrêt en traction métropolitaine, mais son insignifiance économique, au moins jusqu'à présent, en traction purement urbaine.

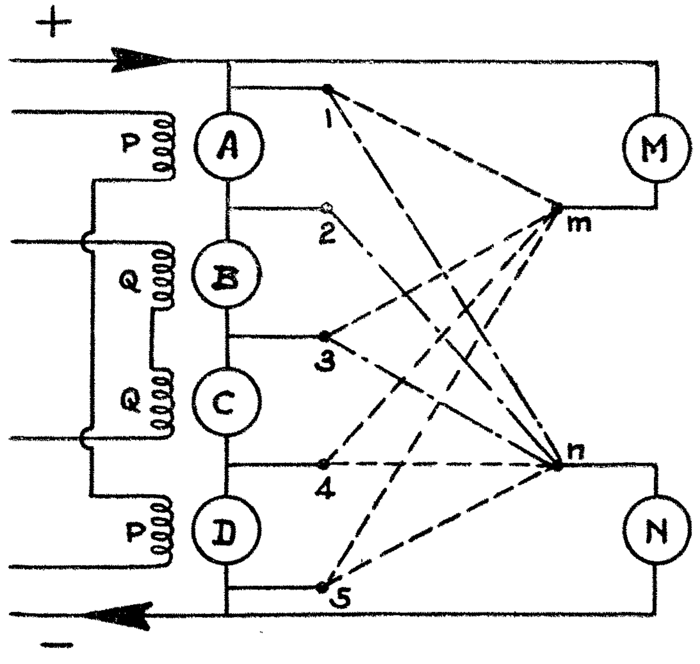

Fig. 7. — Procédé de démarrage et de freinage par récupération (système Della Riccia).

Toutefois, le meilleur emploi d'un équipement à moteur compound, actuellement essayé à Paris, à la S. T. C. R. P., à permis déjà d'obtenir des résultats éminemment intéressants. Le procès reste donc ouvert, avec grand espoir d'une solution favorable.

C'est sur ces considérations que nous voulons terminer, renvoyant nos lecteurs au Bulletin de mars 1929 de la Société Française des Electriciens, où figure in-extenso la discussion relative à cette intéressante question (1).

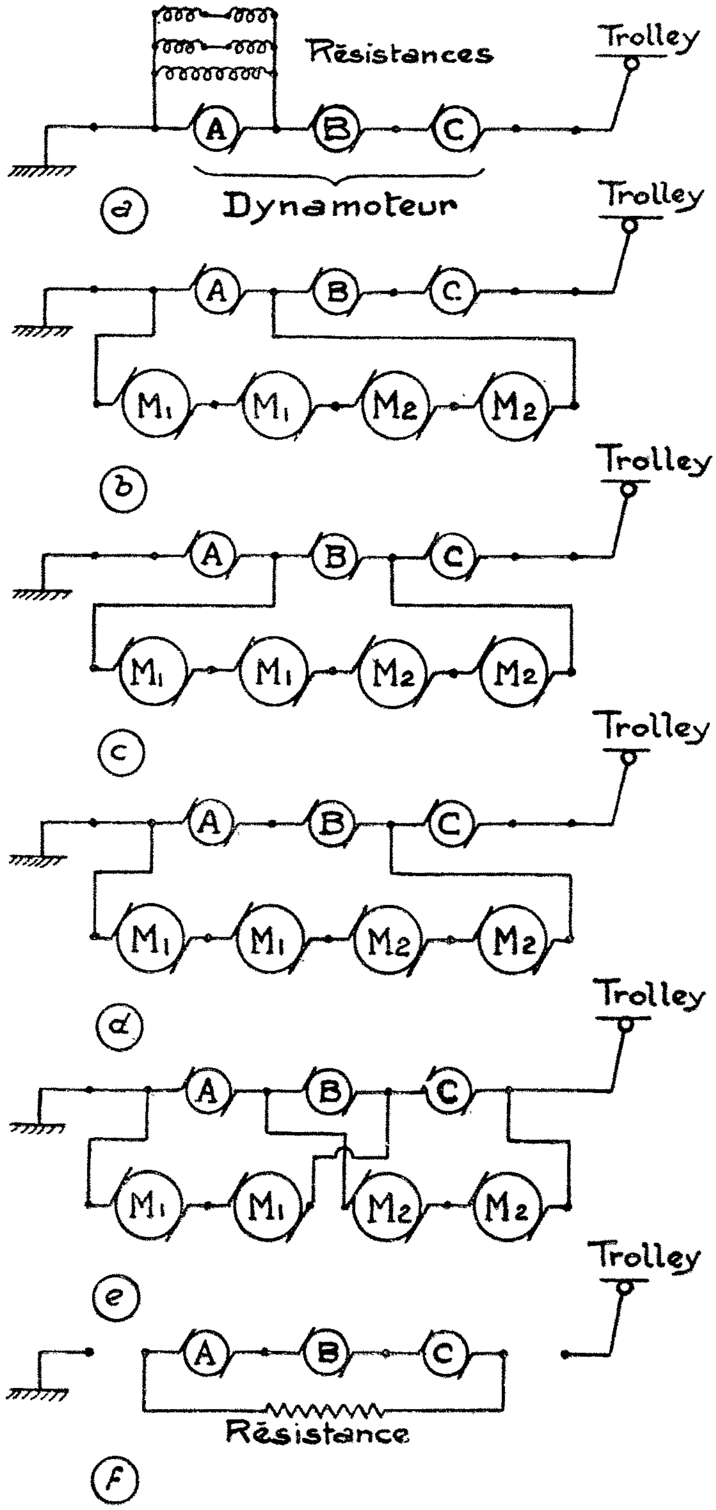

Fig. 8. — Procédé de démarrage et de freinage par récupération (système Somaïni)

(1) On lira également avec intérêt, dans le *Bulletin de la Société Française des Electriciens* de septembre 1927, la communication de M. Della Riccia sur le système de régulation automatique A. D. R., et dans celui d'avril 1928, une très captivante discussion sur le même sujet. Enfin, la communication de M. Legouez, dans le bulletin de la même Société, décembre 1913, n'a pu vieillir, loin de là.