ÉLECTRICITÉ

Les Machines électriques à vitesse variable

(SUITE ET FIN)

Avec un moteur à vitesse variable fonctionnant sur sa caractéristique naturelle, la vitesse lors de l'essai unihoraire et de l'essai à puissance continue peut être très différente, ce qui rend difficile l'interprétation du coefficient r.

De toute façon, la notion d'« aptitude à supporter la surcharge » est une notion purement qualitative. Il n'y a pas, comme nous l'avons vu, de température dangereuse en absolu : ce qui est dangereux est une certaine durée d'application de cette température. Ce n'est pas au constructeur de garantir, suivant une formule consacrée par l'usage, que sa machine peut tenir la surcharge « sans échauffement dangereux » ; c'est à l'exploitant de ne pas rendre cet échauffement dangereux en le prolongeant.

Il y a là une question d'appréciation. On peut d'ailleurs concevoir qu'un exploitant préfère une petite machine à bon rendement et grand échauffement, mais de vie assez courte, à une plus grosse machine de rendement moindre et de faible échauffement lui assurant une durée illimitée. C'est un calcul à faire.

NOTE ANNEXE I

Calcul d'échauffement d'une machine. — Une machine électrique est assimilée à un anneau métallique cylindrique, siège de pertes constantes W.

Les surfaces de convection sont :

1° La surface cylindrique extérieure S_e placée dans l'air immobile (convection naturelle) ;

2° La surface cylindrique intérieure S_i balayée par un débit q d'air.

On néglige les surfaces terminales du cylindre pour l'évacuation des pertes.

a) Problème de régime stationnaire. — Quelle est la température maxima du métal ?

La surface S_i se charge d'évacuer les pertes W_i et la surface S_e les pertes W_e ; avec $W = W_i + W_e$.

Il faudrait une seconde relation entre W_i et W_e pour fixer le problème. Faute d'une telle relation nous admettrons une répartition arbitraire.

Prenons l'origine O des abscisses x à l'entrée de l'air dans le canal :

soit Θ la température de l'air dans la section d'abscisse x ; avec $\Theta = \Theta_0$ pour $x = 0$; et τ la température du fer à la surface intérieure.

p le périmètre du canal, de longueur l.

On a $d\sigma = p\,dx$

Admettons les pertes W_i uniformément réparties sur la longueur l. Par suite

$$\frac{dW_i}{dx} = \text{constante} = \frac{W_i}{l}$$

Sur la longueur dx l'air s'échauffe de $d\Theta$ en se chargeant des pertes $dW_i = 4.200\,q\,c\,d$

et l'on a $K_i = \dfrac{dW_i}{(\tau - \Theta)\,d\sigma}$, K_i dépendant de la vitesse de l'air. La température maxima du métal est à l'extrémité du canal, et sa valeur se déduit immédiatement des relations précédentes :

$$\tau_{max} = \Theta_e + W_i \left[\frac{1}{4200\,q\,c\,d} + \frac{1}{K_i\,S_i}\right] \quad (1)$$

On peut encore raisonner approximativement par des moyennes :

Soit τ_m la température moyenne du fer.

Θ_m la température moyenne de l'air dans le canal intérieur. On a :

$$\Theta_l - \Theta_0 = \frac{W_i}{4200\,q\,c\,d}$$

Θ_l étant la température de l'air à l'extrémité du canal

$$\Theta_m = \Theta_0 + \frac{\Theta_l - \Theta_0}{2} = \Theta_0 + \frac{1}{2}\,\frac{W_i}{4200\,q\,c\,d}$$

La loi de la convection s'écrit :

$$\frac{W_i}{S_i\,K_i} = \tau_m - \Theta_m$$

d'où

$$\tau_m = \Theta_0 + \frac{1}{2}\,\frac{W_i}{4200\,q\,c\,d} + \frac{W_i}{K_i\,S_i} \quad (2)$$

ce résultat diffère peu de τ *max* obtenu par la formule (1), car le second terme de cette somme est en général petit devant le troisième.

D'autre part, on a pour la surface extérieure :

$$K_e = \frac{W_e}{S_e\,(\tau'_m - \Theta_0)}$$

τ'_m représentant la température moyenne de la surface extérieure et Θ_0 celle de l'air ambiant : d'où

$$\tau'_m = \Theta_0 + \frac{W_e}{K_e\,S_e}$$

b) Problème de régime variable. — Les pertes W étant appliquées pendant l'intervalle de temps (t_0, t) on demande la température moyenne du fer τ_m à l'instant t.

Nous suivrons le calcul indiqué par Luke (1) qui n'est autre que l'application immédiate des lois indiquées ci-dessus.

L'énergie calorifique dissipée par convection est :

a) pour la surface externe

$$\int_0^t K_e\,S_e\,(\tau'_m - \Theta_0)\,dt$$

b) pour la surface interne

$$\int_0^t K_i\,S_i\,(\tau_m - \Theta_m)\,dt$$

Il faut exprimer que cette dernière énergie passe dans l'air de ventilation. Les watts évacués à l'instant sont $K_i\,S_i\,(\tau_m - \Theta_m)$ et l'air en absorbant ces watts s'échauffe de $2\,(\Theta_m - \Theta_0)$.

On a

$$4200\,d\,c\,2\,(\Theta_m - \Theta_0) = K_i\,S_i\,(\tau_m - \Theta_m).$$

Pour évaluer l'énergie calorifique absorbée par le corps, il faut considérer son élévation de température entre l'instant o et l'instant t.

Soit τ_0 la température moyenne de S_i à l'instant 0 ; S_i a subi dans le temps t l'élévation $(\tau_m - \tau_0)$.

De même S_e a subi l'élévation $(\tau'_m - \tau_0)$.

Comme toute la masse totale du fer n'a pas subi la même élévation de température, l'application de la loi de la chaleur

(1) Bulletin de l'Institut des Ingénieurs électriciens américains, mars 1922.

spécifique demanderait une intégration, connaissant la répartition de la température du fer. On admettra que le poids de l'anneau auquel on a assimilé la machine se décompose en deux poids partiels : π_i qui a subi l'élévation $(\tau_m - \tau_o)$ et π_e qui a subi l'élévation $\tau'_m - \tau'_o$.

Finalement énergie calorifique absorbée =

$$4200\, c\, [\pi_e (\tau'_m - \tau'_o) + \pi_i (\tau_m - \tau_o)]$$

Il reste alors à écrire que l'énergie engendrée est égale à l'énergie calorifique dissipée. On obtient une relation où figurent le temps t, les températures τ_m et τ'_m. Le problème sera déterminé si l'on admet une relation entre τ_m et τ'_m ; par exemple

$$\frac{\tau_m - \Theta_o}{\tau'_m - \Theta_o} = \text{constante}$$

Dans ces conditions, la solution de l'équation différentielle dont nous venons d'évaluer les différents termes est la suivante :

τ_m suit une loi exponentielle en fonction du temps :

$$\tau_m - \tau_o = (\tau_\infty - \tau_o) \left(1 - e^{-\frac{t}{t_1}}\right)$$

τ_o étant la température du fer du canal intérieur à l'instant initial ;

τ_∞ étant la température fictive du fer que l'on aurait pour les pertes W, en régime stationnaire. t_1 étant le temps nécessaire pour amener le corps à la température τ_∞, en admettant que les pertes constantes W soient intégralement employées à élever la température du fer.

Les deux termes t_1 et τ_∞ se calculent aisément par les relations données, et leur représentation graphique est simple (fig. 107).

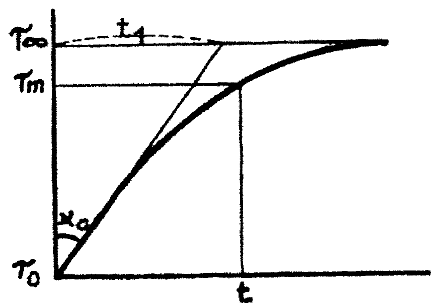

FIG. 107.

NOTE ANNEXE II

Emploi des volants avec les moteurs électriques. — L'emploi de volants en liaison avec des moteurs électriques ne correspond pas au cas d'emploi habituel des volants en mécanique : le rôle du volant n'est pas de maintenir la régularité du couple moteur, qui est constant avec les moteurs électriques, exception faite pour les moteurs monophasés, mais de réduire les variations de la charge dans le fonctionnement en régime intermittent.

Supposons un moteur travaillant à charge variable sur sa caractéristique naturelle couple-vitesse $C_m = f$ (N). Quand le moteur est déchargé, le couple moteur est C_o et la vitesse N_o.

Pour une charge C_1 la vitesse prend la valeur N_1 sur la caractéristique mécanique.

Considérons le *régime variable* correspondant à l'application brusque de ce couple résistant C_1 à partir de la vitesse N_o, ce couple étant maintenu pendant un temps T.

A l'instant t compris entre O et T on a :

$$C_1 = C_m + K \frac{2\pi}{60} \frac{dN}{dt}$$

K étant le moment d'inertie de l'ensemble des masses en mouvement.

Comme C_m est une fonction connue de la vitesse, cette relation donne la loi de variation de la vitesse avec le temps (fig. 108), et la loi de variation du couple C_m avec le temps (fig. 109).

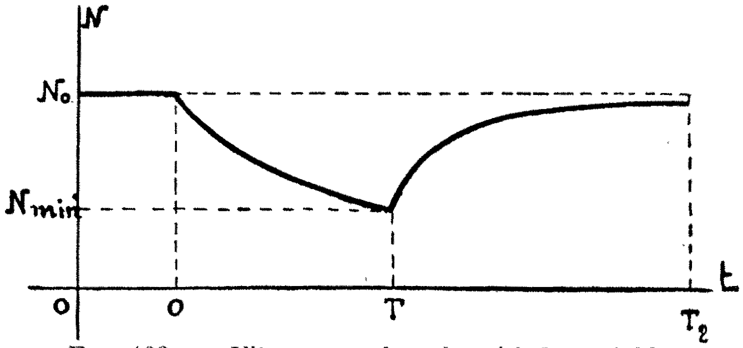

FIG. 108. — Vitesses pendant la période variable.

On voit donc que le couple C_m du moteur suit une loi bien déterminée en fonction du temps à partir du moment où la charge C_1 est appliquée ; il varie de C_o à C_T.

Cette loi dépend de la valeur du moment d'inertie K. Si on augmente le moteur d'inertie en plaçant un volant sur l'arbre, on aura une courbe différente.

L'énergie fournie par le moteur dans le temps T est l'aire O C_o C_T T.

Celle fournie par l'inertie des parties tournantes est C_o *a b* C_T. (Plus exactement ces aires sont à évaluer sur le diagramme des puissances qui se déduit aisément du diagramme des couples).

La charge étant supprimée, le couple résistant reprend la valeur C_o, le moteur accélère à nouveau.

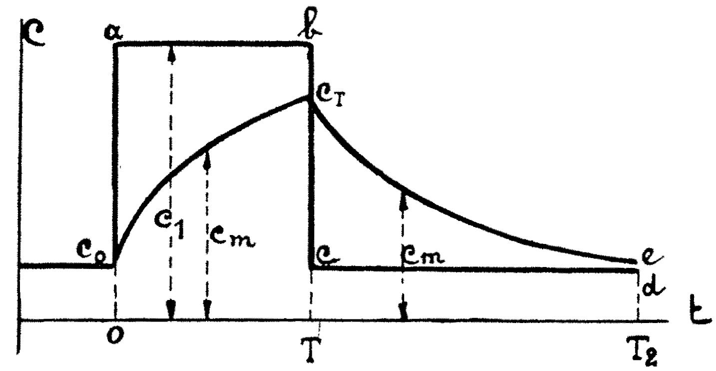

FIG. 109.— Couples pendant la période variable.

On a :

$$C_m = C_o + K \frac{2\pi}{60} \frac{dN}{dt}$$

entre le temps T et le temps T_2 l'énergie fournie par le moteur au volant est C C_T *e d*, l'énergie fournie par le moteur est T C_T *e* T_2.

En conclusion, le moteur au lieu de suivre le diagramme C_o *a b c d*, suit un diagramme C_o C_T *e*.

Il en résulte différents avantages :

1° La pointe de puissance du moteur qui serait T*b* sans volant, est réduite à la valeur T C_T ; ce qui soulage la centrale (le plus souvent les centrales font payer, outre la consommation totale, un supplément qui est fonction de la valeur des pointes, d'où l'intérêt que présente la réduction de ces pointes). En outre les pointes sont moins brusques, le moteur se charge progressivement, bien que le couple résistant croisse brusquement de zéro à sa pleine valeur.

2° Les dimensions du moteur qui assure le travail, peuvent être réduites pour deux raisons :

a) Le couple maximum que doit fournir le moteur est moindre. Or la condition de couple maximum est parfois celle qui fixe les dimensions de la machine.

b) Les pertes du moteur sont moindres. En effet l'ordonnée efficace de la courbe $C_0 C_T e$ est beaucoup moindre que celle de la courbe $C_0\ a\ b\ c\ d$. Avec la courbe $C_0 C_T e$, l'ordonnée efficace se rapproche de l'ordonnée moyenne, et en première approximation peut être confondue avec elle. Dans ces conditions l'énergie que le volant doit pouvoir libérer est celle qui est représentée par l'aire du diagramme située au-dessus de l'ordonnée moyenne.

Cette remarque permet une détermination rapide de l'ordre de grandeur du volant par un glissement maximum donné :

En effet l'énergie que possède le volant à la vitesse maxima est

$$\frac{1}{2}\ K\ \frac{2\pi}{60}\ N^2\ max.$$

$$\text{Si l'on pose } g = \frac{N\ max. - N\ min.}{N\ max.},$$

en passant à la vitesse N min., exprimée en pour cent de l'énergie qu'il possède à la vitesse N max., est :

$$\frac{N^2\ max. - N^2\ min.}{N^2\ max.} = 2g - g^2.$$

Les relations précédentes déterminent K en fonction de l'énergie libérée déduite du diagramme.

Ce n'est là qu'un calcul d'avant projet, le calcul exact impliquant le tracé des courbes qui a été indiqué.

3° Le rendement est amélioré, du fait de la réduction des pertes du moteur et de ses dimensions.

On voit que le rôle du volant est de se partager avec le moteur la charge totale à surmonter, et par suite de réduire celle qui est demandée au moteur pour une même puissance totale prise au réseau. Au début le volant fournit toute la charge, le moteur se charge ensuite progressivement à mesure qu'il ralentit,suivant la loi définie par sa caractéristique mécanique.

Mais encore faut-il que la surcharge soit assez courte pour que la courbe $C_0 C_T$ ne rejoigne pas la droite *ab*.

Il faut en outre que la caractéristique compound, qui est nécessaire pour permettre l'intervention du volant, soit compatible avec le service assuré par le moteur.

On utilise parfois le volant pour maintenir la vitesse d'un moteur en cas de manque de tension momentanée sur le réseau : la dimension du volant ne dépendant que du glissement que l'on peut admettre pendant la durée d'interruption du couple moteur.

Conclusion générale

Le problème que nous avions en vue dans la présente étude était le suivant : comment choisir la machine électrique qui convient le mieux pour un service donné ?

Il faut d'abord que le service à réaliser soit complètement défini par les diagrammes de couple et de vitesse : nous avons rappelé les lois de la mécanique qu'il convenait d'avoir présentes à l'esprit pour établir ces courbes. (1)

Des grandeurs mécaniques, on passe aux grandeurs électriques comme exposé.

Il faut alors connaître les propriétés générales des différentes machines, pour faire le choix de celle qui possède la caractéristique convenable.

L'exploitant ne peut connaître la théorie complète des machines : il suffit qu'il en connaisse les propriétés qui lui sont utiles. Il appartient au constructeur de le renseigner sur les machines qu'il a su mettre au point, avec l'indication générale des possibilités de réalisation.

L'exploitant est alors à même de poser au constructeur le problème précis qui l'occupe, puisqu'il sait que ce problème peut être résolu par un moyen connu, suivant un schéma déterminé.

Le matériel électrique est en constante évolution ; d'une année à l'autre des progrès sont accomplis, et le tableau que nous avons esquissé dans ce qui précède, fixe sensiblement les possibilités actuelles (2).

Il ne reste alors plus qu'une étude économique : on peut en général hésiter entre différentes solutions, et l'exploitant doit demander au constructeur son prix et ses garanties dans chaque cas, afin de reconnaître la solution qui est la plus économique en tenant compte de la dépense fixe de premier établissement et de la dépense variable d'exploitation.

Nous avons donné en outre quelques indications sur la manière dont le constructeur conduisait ses calculs pour respecter la condition d'échauffement, qui est étroitement liée à la vie de la machine et aux différents services que l'on peut en attendre.

R. L.-B.

(1) Pour l'unité de notre exposé, nous n'avons pas hésité à revenir sur des notions parfois élémentaires.

(2) Sans doute, les électriciens avertis s'étonneront-ils de nous voir passer sous silence différentes combinaisons qui ont été proposées et parfois réalisées avec succès : nous nous sommes limités aux machines les plus usuelles parmi celles qui rentrent dans notre pratique courante.

(Extrait de *Jeumont*, avril-juin 1928).