Les Machines électriques à vitesse variable

(SUITE)

CHAPITRE II

La consommation d'énergie

La puissance absorbée par une machine électrique sur le réseau qui l'alimente est égale à la puissance utile augmentée des pertes. Ces pertes comprennent, non seulement les pertes dans la machine même, mais encore celles dans les organes accessoires tels que les rhéostats de réglage.

A certains régimes la puissance utile peut n'être qu'une faible fraction de la puissance absorbée, elle peut même être nulle, pour une puissance absorbée finie. Un couple exige en effet pour sa production un certain courant et un certain flux : donc des pertes fer et des pertes cuivre, sans même qu'il y ait mouvement sous l'action de ce couple.

Considérons successivement les périodes de marche normale et de démarrage et de freinage et proposons-nous de calculer l'énergie totale prise au réseau.

1. *Fonctionnement à vitesse constante.*— La puissance électrique à fournir aux bornes du moteur, ou puissance absorbée, s'exprime en fonction de la puissance utile par la relation

$$\frac{Pu}{\eta}$$

η étant le rendement.

2. *Démarrage.* — Considérons un démarrage à accélération constante.

Dans le cas d'un mouvement de rotation le travail dépensé pendant la mise en vitesse est

$$\frac{C_m\,\omega_n}{2} \times T_1$$

$$= \left(\frac{C_r}{\gamma} + K\right) \frac{\omega_n^2}{2}$$

Cette énergie *ne dépend que de la vitesse finale*, quelle que soit la durée du démarrage.

Dans le cas de translation, le travail dépensé est

$$\frac{F_r\,V_n\,T_1}{2} + \frac{P'}{g}\,\frac{V^2_n}{2}$$

Lorsqu'une machine électrique est alimentée par un réseau à tension constante et démarrée à couple constant par le jeu des caractéristiques, la puissance électrique prise au réseau est constante pendant la durée du démarrage. Comme la puissance utile prise au réseau varie linéairement de 0 à un maximum pendant la durée du démarrage, on voit que le rapport

$$\frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie absorbée}}$$

relatif à la période de démarrage, atteint au plus la valeur 0,5.

3. *Freinage électrique.* — La consommation d'énergie au freinage dépend du mode de freinage employé :

On peut employer selon les cas l'une des solutions suivantes :

1° Laisser la machine électrique connectée au réseau, si elle est susceptible moyennant une manœuvre simple de fonctionner à la vitesse voulue en génératrice.

Selon les cas la machine restitue de l'énergie au réseau (marche en récupération) ou continue à lui en prendre (marche à contre courant) : l'énergie consommée sera donc très différente.

2° Déconnecter la machine du réseau et la faire débiter en génératrice isolée sur résistances, soit comme machine auto-excitatrice, soit en excitant séparément (marche en freinage rhéostatique).

4. *Diagramme de la puissance absorbée.* — En général, il faut décomposer les différentes pertes pour passer du diagramme connu de la puissance utile à celui inconnu de la puissance absorbée.

Les pertes Joule se déterminent aisément : quand la caractéristique couple-courant est connue, il est facile de passer du diagramme des couples au diagramme des courants. Le cas le plus simple est celui ou couple et courant sont proportionnels ; un seul diagramme suffit, avec des échelles proportionnelles. On calculera les pertes Joule J d'après la valeur du courant efficace. On tracera ensuite en fonction du temps les courbes de l'induction dans chaque organe avec la fréquence correspondante ; et de la vitesse de rotation. D'où les courbes des pertes fer, frottements et ventilation.

En intégrant pour la durée du cycle on aura les pertes totales, qui pourront servir à définir une induction efficace (si la fréquence reste constante), une vitesse efficace — le mot efficace signifiant une induction, une vitesse, qui maintenue constante pendant la durée du cycle donnerait les mêmes pertes totales.

Par la considération des pertes séparées on déduira finalement du diagramme de la puissance utile celui de la puissance absorbée qui pourra en différer notablement en particulier dans les périodes de démarrage et de freinage, comme nous l'avons indiqué.

CHAPITRE III

Les conditions d'échauffement des machines électriques

La raison pour laquelle l'échauffement représente l'un des facteurs essentiels à considérer parmi les conditions de fonctionnement d'une machine électrique, est la suivante : les isolants ne peuvent résister au delà de certaines températures, bien déterminées pour chacun d'eux.

Il faut donc qu'en service ces limites de température ne soient pas dépassées, et par suite, il est nécessaire de savoir calculer la température atteinte par la machine quand celle-ci réalise le service défini par son diagramme.

Les conditions d'échauffement d'une machine qui est le siège de pertes connues, sont régies par 3 lois fondamentales :

1° loi de la chaleur spécifique ;
2° loi de la convection ;
3° loi de la conduction.

Les relations qui déterminent la répartition des températures en chaque point, résultent de ces trois lois, et de l'application du principe de la conservation de l'énergie.

1. — *Loi de la chaleur spécifique.* — Quand un corps passe de la température Θ_1 à la température Θ_2 plus élevée il emmagasine une quantité d'énergie calorifique qui, exprimé en Joules, est égale à

$$4.200\,\pi\,C\,(\Theta_2 - \Theta_1)$$

π étant le poids du corps exprimé en Kg.
C sa chaleur spécifique (0,1 pour le cuivre et le fer).

Si, dans le temps dt, la température s'élève de $d\Theta$ l'énergie emmagasinée est

$$4.200\,\pi\,C\,d\Theta$$

Si dans le temps t (secondes) un corps est le siège de pertes constantes W (exprimées en watts) et si la totalité de l'énergie ainsi considérée, égale à :

$$W \times t$$

est emmagasinée dans le corps sous forme d'énergie calorifique, l'élévation de température du corps est donnée par la relation

$$\Theta_2 - \Theta_1 = \frac{W}{4.200\ \pi\ C}\ t$$

Le corps peut être lui-même le siège des pertes W réparties dans chaque unité de volume (cas du fer ou du cuivre d'une machine électrique ; dans ce cas le terme $\frac{W}{\pi}$ représente la densité de pertes en watts par Kg).

Ou bien ces pertes peuvent lui être intégralement transmises (cas d'un milieu réfrigérant qui se charge de pertes que lui communique un corps extérieur. Dans ce cas, il convient de remplacer le poids π en fonction du volume V du milieu réfrigérant qui lui est proportionnel ; le rapport $\frac{V}{t}$ mesure le débit q).

Dans le cas de l'air, q étant le débit en m³ par seconde,

$$\Theta_2 - \Theta_1 = \frac{W}{4.200\ d\ C\ q}$$

avec $d = 1{,}2$ (densité de l'air) $C = 0{,}21$ (chaleur spécifique de l'air), on a :

$$\Theta_2 - \Theta_1 = \frac{W'}{1{,}2\ q}$$

W' représentant les pertes en kilowatts.

2. — *Loi de la convection.* — Quand la surface S d'un corps est à la température Θ, Θ' représentant la température du fluide ambiant, supposée inférieure à Θ, la quantité d'énergie calorifique évacuée par la surface dans le temps dt est égale à

$$K\ S\ (\Theta - \Theta')\ dt \qquad \text{exprimée en joules.}$$

S est exprimé en dm²; K est un coefficient sensiblement constant que l'on exprime en

$$\frac{\text{joules}}{\text{seconde} \times \text{dm}^2 \times \text{degré}}.$$

Dans le temps t, l'énergie calorifique évacuée est :

$$\int_0^t K\ S\ (\Theta - \Theta')\ dt$$

Si le corps est le siège de pertes constantes W intégralement évacuées par sa surface S, la différence de températures $\Theta - \Theta'$ se fixe finalement à une valeur constante indépendante de t et l'on a :

$$W = KS\ (\Theta - \Theta')$$

Dans le cas général, les différents éléments $d\sigma$ de la surface S sont à des températures différentes et la température Θ' du milieu réfrigérant en regard de l'élément est à une température différente.

L'énergie calorifique évacuée par la surface S dans le temps dt est :

$$\int \left[\iint_S \quad K\ (\Theta - \Theta')\ d\sigma \right]\ dt$$

Θ et Θ' étant fonction de la position de l'élément $d\sigma$ sur la surface S.

Dans le cas où Θ et Θ' varient peu sur l'étendue de la surface S on peut se contenter de porter leur valeur moyenne dans la formule de la convection.

Le terme K est une fonction de la vitesse du fluide ambiant au contact de la surface S (ou de l'élément $d\sigma$).

On peut admettre en première approximation les chiffres suivants :

K = 0,10 pour l'air immobile.

= $0{,}2\sqrt{V}$ pour l'air en mouvement, V étant la vitesse de l'air en mètres par seconde, supposée comprise entre 1 et 25 m.

= 1,2 pour l'eau, vitesse de l'ordre de 1 m par seconde.

La constante K dépend en réalité d'un très grand nombre de conditions secondaires : forme des parois, rugosité, direction des filets fluides...

Si la vitesse est une fonction connue du temps, définie par le diagramme des vitesses, on voit que K sera bien défini en fonction du temps.

3. *Loi de la conduction.* — Dans le milieu qui est le siège d'un écoulement de chaleur, le flux de chaleur s'écoule normalement aux surfaces isothermes et la loi de Fourier donne les conditions de cet écoulement.

Nous n'aborderons pas ces calculs, qui n'ont pas à intervenir tant que l'on n'a en vue que la détermination de la température des surfaces accessibles au thermomètre.

4. *Régime stationnaire et régime variable.* — Dans la pratique, il faut distinguer deux catégories de problèmes :

A) problèmes de *régime stationnaire.*

B) problèmes de *régime variable.*

Dans le premier cas les pertes W dont la machine est le siège sont supposées indépendantes du temps et constantes.

Dans le second cas, nous nous limiterons au cas simple où les pertes W sont supposées maintenues constantes entre l'instant initial t_1 et l'instant final t_2.

Nous admettons que les pertes W sont indépendantes des températures; ce qui n'est pas tout à fait exact (en particulier pour les pertes Joule). Mais il serait facile de corriger par approximations successives.

La relation de conservation de l'énergie s'exprimera ainsi :

Cas (A) pertes engendrées = pertes dissipées par convection;

Cas (B) énergie engendrée du temps t_1 au temps t_2 = énergie calorifique absorbée par le corps + énergie calorifique dissipée par convection.

Il est dans tous les cas nécessaire de faire des hypothèses :

1° pour fixer les pertes par unité de volume dans chaque partie de la machine ;

2° pour fixer la vitesse de l'air sur les surfaces. On admettra, par exemple, une vitesse moyenne voisine de la vitesse périphérique ;

3° pour fixer la répartition des pertes dont chacune des surfaces assure l'évacuation ; ce qui conduira à appliquer les lois de l'échauffement à chaque partie de la machine dans la mesure où cette partie peut être considérée isolément.

Ces hypothèses sont toutes assez incertaines, ce qui rend un calcul absolu tout à fait impossible ; il est nécessaire de comparer les résultats du calcul aux essais et de corriger constamment les calculs eu égard aux essais. Le problème ne peut pas être résolu autrement.

Le lecteur trouvera dans la note annexe qui termine ce chapitre, quelques indications sur la conduite des calculs.

Conclusion. — Quand une machine donnée doit réaliser un diagramme donné, les relations établies permettent de déterminer les températures atteintes dans les cas suivants :

1° La machine fonctionne à charge constante pendant un temps assez long pour que le régime stationnaire de température soit atteint.

Dans le cas où la machine est appelée à fonctionner à différentes charges maintenues constantes pendant un temps suffisant pour atteindre dans chaque cas le régime, le calcul devra être fait pour le cas le plus défavorable.

Les pertes respectives dans le circuit magnétique et dans le circuit électrique seront calculées au préalable et serviront de point de départ au calcul d'échauffement. On tiendra compte, pour déterminer le régime le plus défavorable, de ce que lorsque les pertes de fer diminuent on peut augmenter dans une certaine mesure les pertes cuivre, etc. ; ces raisonnements étant à faire avec prudence car l'échauffement en un point dépend pour une part des pertes locales et pour une part des pertes dans la zone active adjacente, les parts respectives étant difficiles à discerner.

2º La machine fonctionne pendant un intervalle de temps donné à une charge constante donnée.

Si ce régime est suivi pendant l'intervalle suivant d'un régime à une autre charge bien définie, etc... le calcul sera poursuivi de proche en proche.

Les coefficients de convection suivront en fonction du temps, une loi qui résultera du diagramme des vitesses de la machine si celle-ci est à vitesse variable.

Il se présente des cas plus difficiles ou certaines pertes ne peuvent pas être considérées comme conservant, pendant un intervalle de temps fini du cycle, une valeur constante. Ce sera le cas des pertes fer pour une machine à vitesse variable, la fréquence de variation du flux variant avec la vitesse. En pareil cas, un calcul précis devient assez subtil.

Remarque sur les températures limites. — Il importe d'apporter une restriction à la remarque que nous avons faite au début de ce chapitre, à savoir qu'il existait pour chaque classe d'isolants une température limite, au delà de laquelle la vie de l'isolant était en danger.

Il s'agit là d'une des questions délicates de la technique des machines : Existe-t-il une température critique caractéristique de chaque genre d'isolation, qui entraîne si elle est dépassée la destruction de l'isolant, quelle que soit la durée pendant laquelle cette température est maintenue ? On peut répondre : non. La vie de l'isolant est fonction non de la température seule, mais de la *durée d'application* de cette température.

Tant qu'on reste dans la zone hachurée (fig. 103), l'isolant n'est pas compromis. Ainsi pour le coton, la température de 105º peut être tenue indéfiniment ; dans les mêmes conditions une température plus élevée peut être tenue un temps moindre.

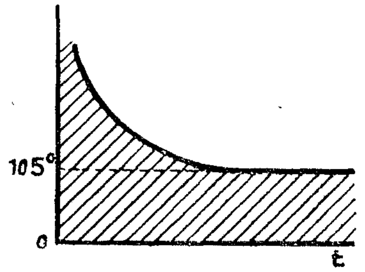

FIG. 103. — Température admissible sans endommager l'isolant (en fonction du temps).

On peut donc *logiquement* admettre pendant un temps limité des températures supérieures à 105º.

Encore faut-il que l'on sache mesurer exactement la température maxima atteinte dans la machine par les isolants. Or, la température maxima échappe souvent à toute mesure : température d'électros au milieu de l'épaisseur de la bobine, température interne du cuivre sous la capote isolante, etc.

Il y a donc un écart entre température *observable* et température *réelle*.

Les règlements fixent les températures observables à des valeurs qui tiennent compte de cet écart par une marge variable avec la méthode de mesure employée. Ils ne donnent aucune tolérance sur la température, car, en marche de régime, il ne faut pas dépasser la limite admise, dès l'instant où l'on n'a pas cru devoir faire entrer dans les règlements la notion d'une température limite fonction de la durée des surcharges successives.

Toutefois pour les machines à charge très variable comme les moteurs de traction, les règlements fixent des températures limites plus élevées que pour les machines à marche continue, et cela est également logique.

CHAPITRE IV

La définition de la machine électrique

1. *Charge constante et charge variable.* — Nous avons vu dans ce qui précède comment était défini le diagramme de service de la machine, et comment on pouvait en déduire les diagrammes de variation des grandeurs électriques qui caractérisent le fonctionnement.

Nous avons vu ensuite comment vérifier les températures successives atteintes par une machine donnée décrivant un tel diagramme, et nous avons expliqué l'importance qu'il y avait à connaître ces températures.

Quand il s'agit dans la pratique de choisir la machine électrique à employer dans un cas particulier, il faut pouvoir définir la machine qui convient ; c'est ce problème que nous allons considérer maintenant.

Les pertes d'une machine, et par suite son échauffement, dépendent de la distribution du flux dans le circuit magnétique (1), et du courant dans les circuits électriques.

Dans le cas d'une machine à marche continue devant assurer un service unique, il existe un état unique de flux et de courants, qui définit sans ambiguité le régime auquel les températures limites ne doivent pas être dépassées.

Dans le cas d'une machine à marche continue devant assurer plusieurs services permanents distincts, par exemple moteur à vitesse variable devant fournir un même couple à différentes vitesses, on calculera pour chacune des vitesses à réaliser les régimes de courant, de flux, de fréquence. Pour aucun de ces régimes les températures limites ne devront être dépassées.

Dans le cas d'une machine à régime variable dont le service est défini en fonction du temps, la question est plus délicate. En effet une machine électrique est en général prête à répondre à la demande de puissance qui lui est faite (2). Elle ne refuse pas de développer le couple ou de débiter le courant, et le moment où on lui en demande trop est seulement celui où elle dépasse les températures limites.

Le cas le plus simple de régime variable est celui d'une machine fonctionnant à flux et fréquence constantes, courant variable et vitesse constante. On adopte la règle suivante :

La machine tiendra les conditions d'échauffement si elle est établie pour le courant *efficace*.

Si le couple est proportionnel au courant, on pourra parler de couple efficace et de puissance efficace à vitesse constante ; la puissance efficace est alors la vraie puissance de la machine.

Rappelons la définition du courant efficace :

Quand la charge d'une machine varie suivant un cycle de durée

(1) Si la fréquence est variable, il y a lieu de considérer les régimes simultanés de flux et de fréquence.

(2) Sous la réserve que cette machine soit capable de donner le couple maximum du diagramme de charge sans décrocher, de donner la pointe de puissance sans étincelles au collecteur, etc.

totale T, le courant dans un organe de la machine suit pendant ce temps une certaine courbe. Le courant efficace est le courant constant qui, passant pendant ce temps T, dégagerait dans l'organe considéré la même qualité de chaleur que le courant variable.

Deux cas simples sont à considérer : on peut y ramener les cas les plus compliqués.

L'ordonnée efficace est exprimée en fonction des ordonnées intermédiaires par les relations :

$$\sqrt{\frac{a^2 + b^2 + ab}{3}} \quad \text{(Fig. 104)}$$

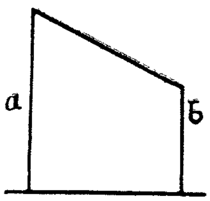

FIG. 104. — Définition du régime efficace.

$$a\sqrt{\frac{t}{T}} \quad \text{(Fig. 105)}$$

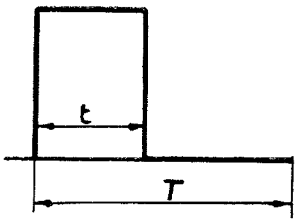

FIG. 105. — Définition du régime efficace.

De même que l'on peut parler de courant efficace, on peut parler de flux efficace dans une machine à fréquence constante et flux variable.

La règle de la puissance efficace n'est qu'approchée dans le cas d'un service comportant d'assez longues périodes de charge à un régime élevé : elle doit être contrôlée par un calcul du genre de celui indiqué à l'annexe I.

Un second cas de régime variable assez simple est le suivant :

Une machine est utilisée en marche continue à la charge constante P, puis pendant un temps limité t à la charge plus élevée α P. On désire qu'à la fin du temps t les températures limites ne soient pas dépassées. On peut définir un coefficient β par la condition que, si l'on utilise la machine à une certaine charge β P, la température atteinte en marche continue soit égale à la température limite réglementée. La puissance β P est alors la vraie puissance de la machine (fig. 106).

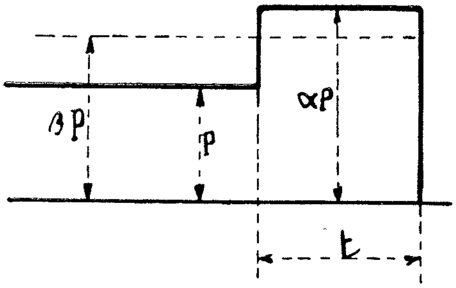

FIG. 106. — Définition du coefficient β.

On demande β en fonction de la durée t et du taux α de la surcharge. Ce problème a été posé par M. Boucherot, d'où le nom de « coefficient Boucherot » donné au facteur β.

Le problème peut être résolu par le calcul, dès l'instant où l'on connaît la relation entre la puissance d'une machine et son échauffement (1). L'hypothèse la plus naturelle consiste à admettre que l'échauffement est proportionnel aux pertes électriques, qui peuvent en général s'exprimer en fonction de la puissance.

Malheureusement l'expérience a prouvé que cette hypothèse était en général inapplicable aux échauffements locaux, qui dépendent de la répartition et de la densité locale des pertes.

Si nous revenons maintenant au cas général, la définition de la puissance vraie d'une machine apparaît assez difficile. Considérons une machine à vitesse et charge variables : pour tenir compte de la variation de l'efficacité de la ventilation avec la vitesse, de la variation simultanée de la fréquence et du flux, il faut des calculs longs et subtils.

Le constructeur, tout bien considéré, arrête son choix sur un type de machine qui est étiqueté dans sa série pour une certaine puissance continue. Cette puissance constitue finalement la seule définition logique de la machine, et la seule base de comparaison rationnelle entre deux offres.

2. *La notion de constante de temps et de surcharge.* — Un renseignement que l'exploitant désire souvent connaître est l'aptitude de son matériel à supporter les surcharges accidentelles.

Dans les prévisions d'exploitation, il faut envisager le cas où une machine devenant indisponible, les autres devront se partager sa charge ; le cas où la résistance à surmonter augmentera passagèrement, toutes circonstances échappant à une prévision certaine.

Il serait trop coûteux de majorer les puissances des machines installées et cela présenterait d'autres inconvénients, tels qu'une augmentation des pertes et de la puissance réactive consommée.

Il faut donc que l'exploitant sache comment il peut utiliser ses machines en pareille circonstance.

La notion fondamentale est celle de constante de temps d'échauffement : l'expérience montre que, si l'on applique à une machine une charge qui détermine un échauffement de régime $\Delta\theta_r$, l'échauffement au temps quelconque t est donné par la formule

$$\Delta\theta = \Delta\theta_r \left(1 - e^{-\frac{t}{t_1}}\right)$$

t_1 étant une constante, qui représente le temps nécessaire à la machine pour atteindre les 6/10 environ de son échauffement final.

Le calcul des termes $\Delta\theta_r$ et t_1 se fera par la méthode donnée à l'annexe I.

On conçoit alors que si l'on compare deux machines de constantes de temps différentes, la machine dont la constante de temps est la plus élevée mettra plus de temps à s'échauffer : elle sera plus apte à supporter la surcharge.

Si l'on compare deux machines de même puissance, l'une complètement hermétique et l'autre bien ventilée, la constante de temps de la première machine sera très supérieure et par suite elle supportera beaucoup mieux les surcharges.

En traction, on préfère souvent considérer, plutôt que la notion de constante de temps, la notion de *puissance unihoraire* : on appelle puissance unihoraire la puissance qui, maintenue constante, amène après une heure la machine à sa température limite.

Le rapport r de la puissance unihoraire à la puissance continue caractérise alors la faculté de surcharge ; il peut atteindre 2 à 3 pour une machine hermétique, et se rapproche de l'unité pour une machine ventilée.

(A suivre)

(1) Il suffit de joindre cette relation à la relation expotentielle qui donne l'échauffement en fonction du temps, pour une charge constante.