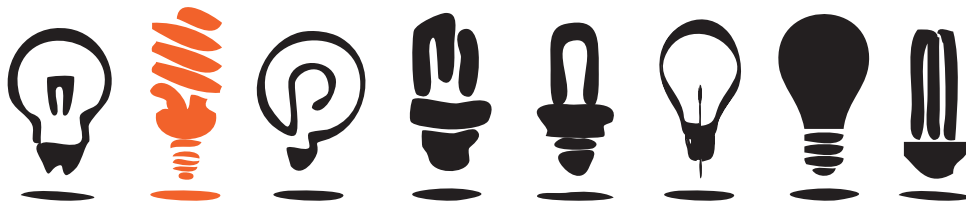


Les fiches techniques

37

Les machines tournantes L'équilibre thermique d'une machine



37 Équilibre thermique d'une machine

Une machine en fonctionnement génère des pertes qui modifient sa température d'équilibre.

Ces pertes se manifestent dans :

- les enroulements parcourus par des courants :

$$p_j = R I^2 \text{ en watts ;}$$

- les masses magnétiques : ces pertes varient avec l'induction magnétique, la fréquence de variation magnétique, la nature et la masse des matériaux utilisés :

$$p_m = k_1 (\Phi, f, m) ;$$

- les résistances passives de la mécanique (paliers, ventilation) : ces pertes sont en général proportionnelles à la fréquence de rotation :

$$p_m = k_2 (\Omega).$$

Les pertes se calculent en effectuant la différence entre la puissance absorbée et la puissance utile :

$$\text{pertes } p = P_a - P_u.$$

Les constructeurs indiquent le rendement :

$$H = P_u / P_a$$

37.1 Capacité thermique

L'énergie thermique accumulée s'exprime par :

$$dW_c = m c d\theta$$

m masse en kg,

c capacité thermique massique en $J/(kg \cdot ^\circ C)$.

Sur un petit intervalle de température :

$$W_c = m c (\theta_1 - \theta_0)$$

θ_1 température finale, θ_0 température initiale.

37.2 Résistance thermique

Une machine échange une énergie thermique avec le milieu dans lequel elle est placée. Cette énergie est transmise par :

- conduction en utilisant les masses métalliques (support),
- convection avec l'air ambiant.

La résistance thermique représente la quantité d'énergie échangée entre deux milieux, elle s'exprime par :

$$dP_{th} = k d\theta \text{ avec } k = (1 / R_{th})$$

sur un petit intervalle de température :

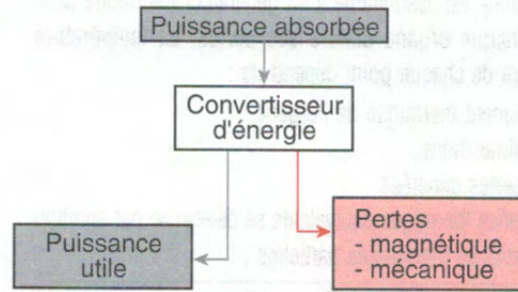
$$R_{th} = (\theta_1 - \theta_0) / P_{th}$$

P_{th} puissance thermique en W,

$(\theta_1 - \theta_0)$ différence de température,

R_{th} résistance thermique en $^\circ C/W$.

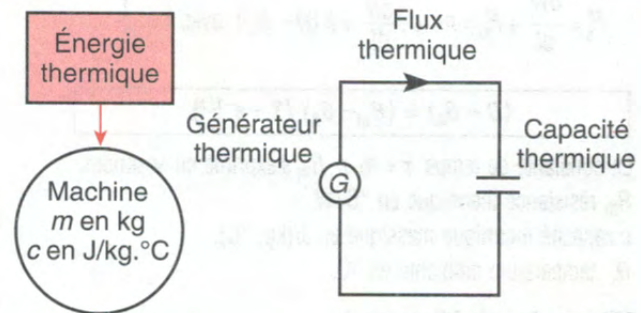
RENDEMENT



EXEMPLE D'APPLICATION :

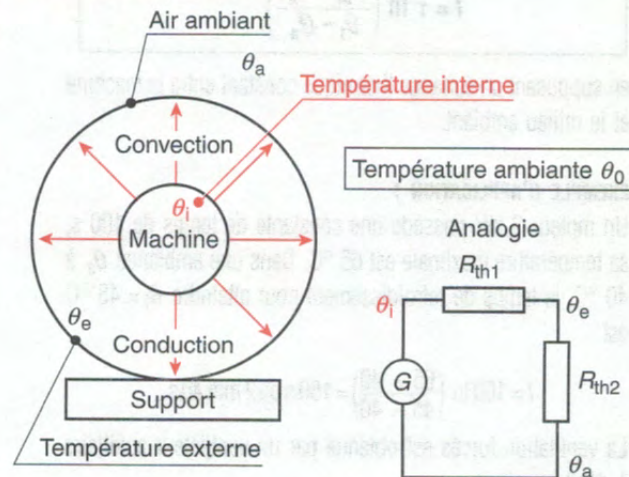
Un moteur de 3 kW a un rendement de 0,77 ; sa puissance absorbée est de $P_a = 3 / 0,77 = 3,9 \text{ kW}$; ses pertes globales sont de 0,9 kW.

CAPACITÉ THERMIQUE



Valeurs de capacité thermique massique c ($J/kg \cdot ^\circ C$) (pour $\theta < 100 \text{ } ^\circ C$)	
Aluminium	0,928
Cuivre	0,380
Fer	0,435

RÉSISTANCE THERMIQUE



37.3 Schéma équivalent

Une machine est assimilable à un générateur thermique dans lequel chaque organe délivre ses pertes. La température d'équilibre de chaque point dépend de :

- l'isolement thermique de l'organe,
- ses dimensions,
- des pertes générées.

La résistance thermique équivalente se détermine par addition des résistances thermiques partielles :

$$R_{\text{the}} = R_{\text{th}1} + R_{\text{th}2}$$

Loi d'évolution en température

En estimant que l'apport d'énergie thermique P_a reste constant, la vitesse de montée en température d'une machine respecte l'équation :

$$P_a = \frac{dW_c}{dt} + P_{\text{th}} = m \cdot c \cdot \frac{d\theta}{dt} + k(\theta - \theta_a) \quad \text{avec } k = \frac{1}{R_{\text{th}}}$$

$$(\theta - \theta_a) = (\theta_m - \theta_a)(1 - e^{-t/\tau})$$

La constante de temps $\tau = m \cdot c \cdot R_{\text{th}}$ s'exprime en secondes.

R_{th} résistance thermique en $^{\circ}\text{C}/\text{W}$.

c capacité thermique massique en $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$.

θ_a température ambiante en $^{\circ}\text{C}$.

Vitesse de refroidissement

La machine étant considérée comme un réservoir d'énergie thermique, la vitesse de refroidissement est liée aux conditions d'échange avec le milieu extérieur.

$$(\theta - \theta_a) = (\theta_m - \theta_a)(e^{-t/\tau})$$

Le temps de refroidissement pour atteindre une température de refroidissement θ_f s'exprime par :

$$t = \tau \ln \left(\frac{\theta_m - \theta_a}{\theta_f - \theta_a} \right)$$

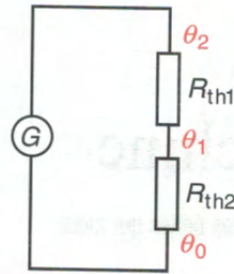
en supposant un échange thermique constant entre la machine et le milieu ambiant.

EXEMPLE D'APPLICATION :

Un moteur 3 kW possède une constante de temps de 100 s, sa température maximale est 65°C . Dans une ambiance θ_a à 40°C , le temps de refroidissement pour atteindre $\theta_f = 45^{\circ}\text{C}$ est :

$$t = 100 \ln \left(\frac{65 - 40}{45 - 40} \right) = 160 \text{ s ou } 2 \text{ min } 40 \text{ s.}$$

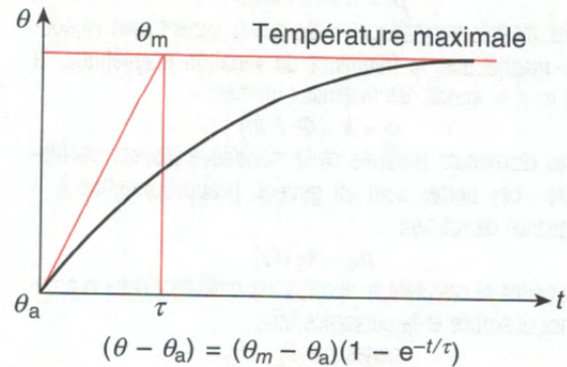
La ventilation forcée est obtenue par un ventilateur auxiliaire à débit constant.



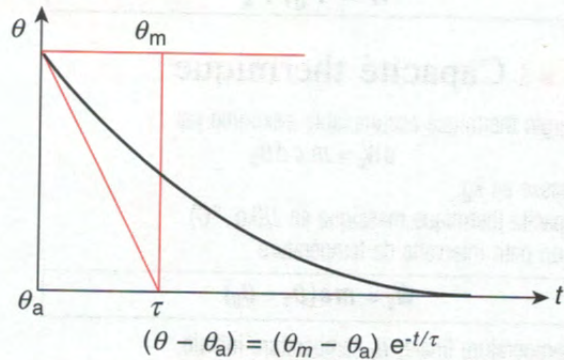
Résistance thermique des éléments internes (bobinages, circuits magnétiques, ...).

Résistance thermique des éléments externes (carcasse, ...).

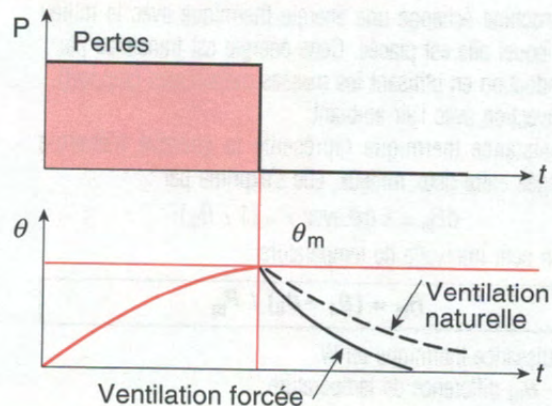
MONTÉE EN TEMPÉRATURE



REFROIDISSEMENT



CYCLE DE SERVICE D'UN MOTEUR



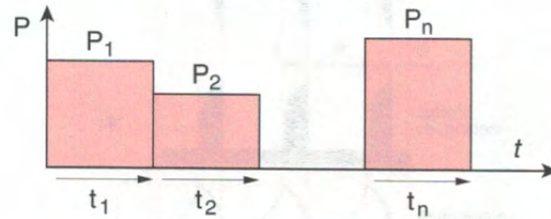
37 ■ 4

PUISSANCE EN RÉGIME INTERMITTENT

La puissance efficace en régime intermittent est la puissance nominale absorbée par la machine entraînée si cette puissance est variable au cours d'un cycle, la puissance efficace P se détermine par la relation :

$$P = \sqrt{\frac{\sum_1^n (P_i^2 t_i)}{\sum_1^n t_i}} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 \dots + P_n^2 t_n}{t_1 + t_2 \dots + t_n}}$$

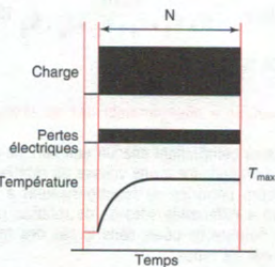
P_1 pendant le temps t_1 .
 P_2 pendant le temps t_2 .
 P_n pendant le temps t_n .



37 ■ 5

SERVICE D'UN MOTEUR

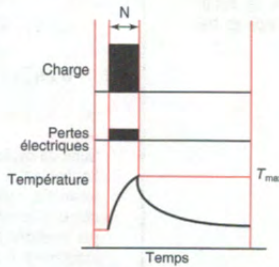
Les différents services d'un moteur sont normalisés et repérés par la lettre S suivie d'un chiffre.



N = fonctionnement à charge constante.
 T_{max} = température maximale atteinte.

S1 - Service continu

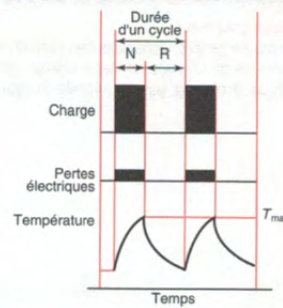
Fonctionnement à charge constante d'une durée suffisante pour que l'équilibre thermique soit atteint.



N = fonctionnement à charge constante.
 T_{max} = température maximale atteinte.

S2 - Service temporaire

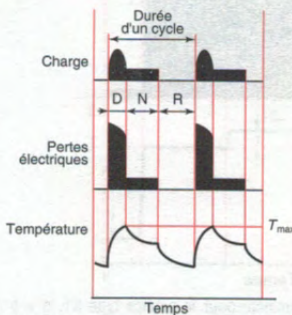
Fonctionnement à charge constante pendant un temps déterminé, moindre que celui requis pour atteindre l'équilibre thermique, suivi d'un repos d'une durée suffisante pour rétablir à 2 K près l'égalité de température entre la machine et le fluide de refroidissement.



N = fonctionnement à charge constante. R = repos.
 T_{max} = température maximale atteinte.
 Facteur de marche (%) = $\frac{N}{N+R} \cdot 100$.

S3 - Service intermittent périodique

Suite de cycles de service identiques comprenant chacun une période de fonctionnement à charge constante et une période de repos. Dans ce service, le cycle est tel que le courant de démarrage n'affecte pas l'échauffement de façon significative.

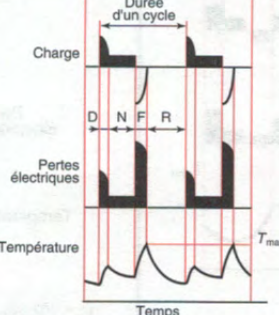


D = démarrage. N = fonctionnement à charge constante.
 R = repos. T_{max} = température maximale atteinte au cours du cycle.

Facteur de marche (%) = $\frac{D+N}{N+R+D} \cdot 100$.

S4 - Service intermittent périodique à démarrage

Suite de cycles de service identiques comprenant une période appréciable de démarrage, une période de fonctionnement à charge constante et une période de repos.

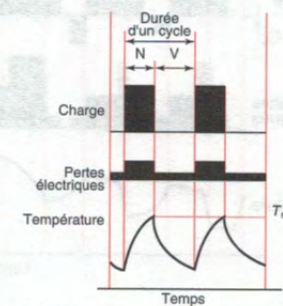


D = démarrage. N = fonctionnement à charge constante.
 F = freinage électrique. R = repos. T_{max} = température maximale atteinte au cours du cycle.

Facteur de marche (%) = $\frac{D+N+F}{D+N+F+R} \cdot 100$.

S5 - Service intermittent périodique à freinage électrique

Suite de cycles de service périodiques comprenant chacun une période de démarrage, une période de fonctionnement à charge constante, une période de freinage électrique rapide et une période de repos.

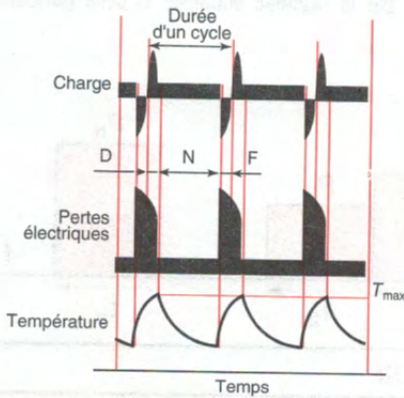


N = fonctionnement à charge constante. V = fonctionnement à vide. T_{max} = température maximale atteinte au cours du cycle.

Facteur de marche (%) = $\frac{N}{N+V} \cdot 100$.

S6 - Service ininterrompu périodique à charge intermittente

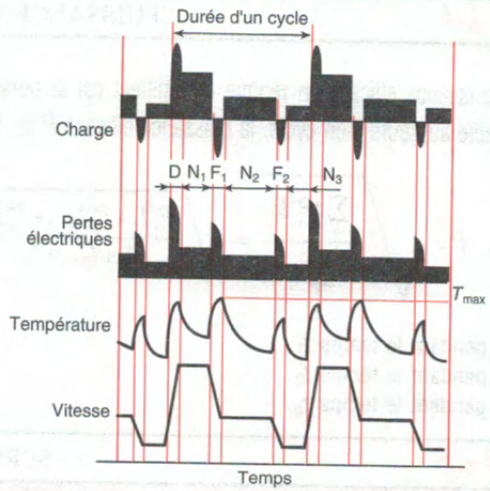
Suite de cycles de service identiques comprenant chacun une période de fonctionnement à charge constante et une période de fonctionnement à vide. Il n'existe pas de période de repos.



D = démarrage. N = fonctionnement à charge constante. F = freinage électrique. T_{max} = température maximale atteinte au cours du cycle. Facteur de marche = 1.

S7 - Freinage électrique

Suite de cycles de service identiques comprenant chacun une période de démarrage, une période de fonctionnement à charge constante et une période de freinage électrique. Il n'existe pas de période de repos.



$F_1 F_2$ = freinage électrique. D = démarrage. $N_1 N_2 N_3$ = fonctionnement à charges constantes. T_{max} = température maximale atteinte au cours du cycle.

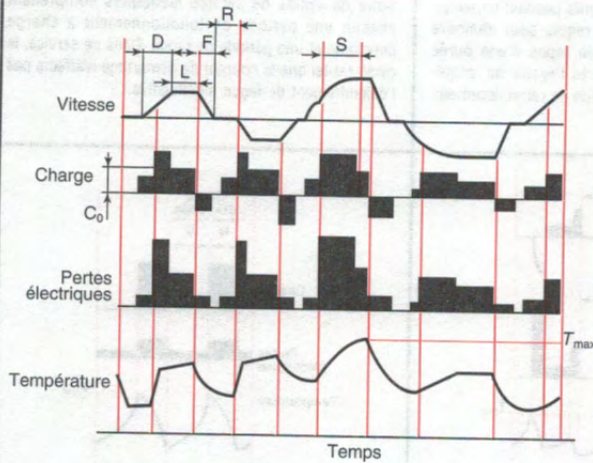
Facteur de marche :

$$\frac{D + N_1}{D + N_1 + F_1 + N_2 + F_2 + N_3} \cdot 100\% \quad \frac{F_1 + N_2}{D + N_1 + F_1 + N_2 + F_2 + N_3} \cdot 100\%$$

$$\frac{F_2 + N_3}{D + N_1 + F_1 + N_2 + F_2 + N_3} \cdot 100\%$$

S8 - Service ininterrompu périodique à changements liés de charge et de vitesse

Suite de cycles de service identiques comprenant chacun une période de fonctionnement à charge constante correspondant à une vitesse de rotation prédéterminée, suivie d'une ou plusieurs périodes de fonctionnement à d'autres charges constantes correspondant à différentes vitesses de rotation (réalisées par exemple par changement du nombre de pôles dans le cas des moteurs à induction). Il n'existe pas de période de repos.

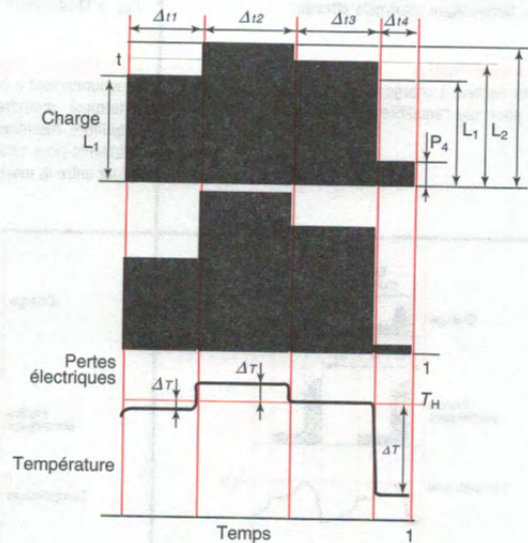


D = démarrage. L = fonctionnement sous des charges variables. F = freinage électrique. R = repos. S = fonctionnement sous surcharge. C_p = pleine charge. T_{max} = température maximale atteinte.

S9 - Service à variations non périodiques de charge et de vitesse

Service dans lequel généralement la charge et la vitesse ont une variation non périodique dans la plage de fonctionnement admissible. Ce service inclut fréquemment des surcharges appliquées qui peuvent être largement supérieures à la pleine charge (ou aux pleines charges).

Note : pour ce service type, des valeurs appropriées à pleine charge devront être considérées comme bases du concept de surcharge.



L_i = charges. N = puissance nominale pour le service type S1. $p = p / L/N$ = charge réduite. t = temps. T_p = durée d'un cycle de régimes. t_i = durée d'un régime à l'intérieur d'un cycle. $\Delta t_i = t_i / T_p$ = durée relative (p.u.) d'un régime à l'intérieur d'un cycle. P_{ij} = pertes électriques. H_M = température à puissance nominale pour un service type S1. ΔH_i = augmentation ou diminution de l'échauffement lors du i ème régime du cycle.

S10 - Service à régimes constants distincts

Service comprenant au plus quatre valeurs distinctes de charges (ou charges équivalentes), chaque valeur étant appliquée pendant une durée suffisante pour que la machine atteigne l'équilibre thermique. La charge minimale pendant un cycle de charge peut avoir la valeur zéro (fonctionnement à vide ou temps de repos).