

# Les fiches techniques

---

35

## Les machines tournantes Le moteur à courant continu



# 35 Moteur à courant continu

## 35.1 Moteur à courant continu à excitation séparée

L'excitation séparée des moteurs est réalisée :

- pour les petites puissances, par des aimants permanents (samarium, cobalt...);
- pour les puissances plus importantes, par un enroulement parcouru par un courant continu qui magnétise un noyau magnétique.

## 35.2 Mise en équation

La puissance mécanique fournie par un moteur s'écrit :

$$P_m = T_m \cdot \Omega$$

$P_m$  : puissance utile en W.

$T_m$  : couple utile sur l'arbre moteur en N.m.

$\Omega$  : vitesse angulaire de l'arbre en rd/s.

La fréquence de rotation est liée à la tension appliquée à l'induit (à flux inducteur constant).

$$E' = (p/a) N n \Phi$$

$E'$  : f.c.é.m. en volts.

$n$  : fréquence de rotation en tr/s.

$\Phi$  : flux inducteur en webers.

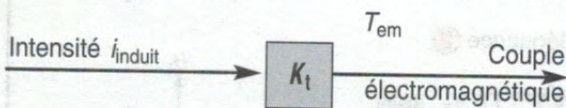
$p$  : Nb de paires de pôles.

$a$  : Nb de paires de voies enroulement.

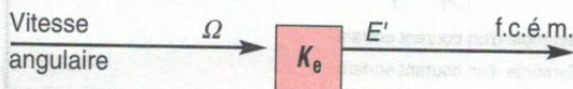
$N$  : Nb de conducteurs actifs de l'induit.

À flux constant, le couple moteur est exprimé par la relation :

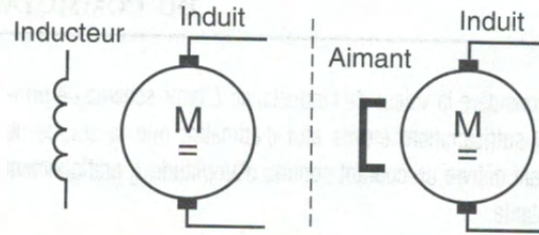
$$T_{em} = K_t \cdot I$$



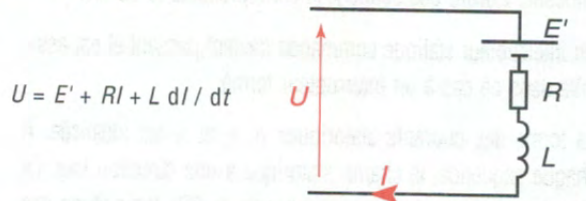
$K_e$  est la constante électrique qui exprime la relation entre la f.c.é.m.  $E$  (grandeur de sortie) en fonction de la vitesse angulaire (grandeur d'entrée).



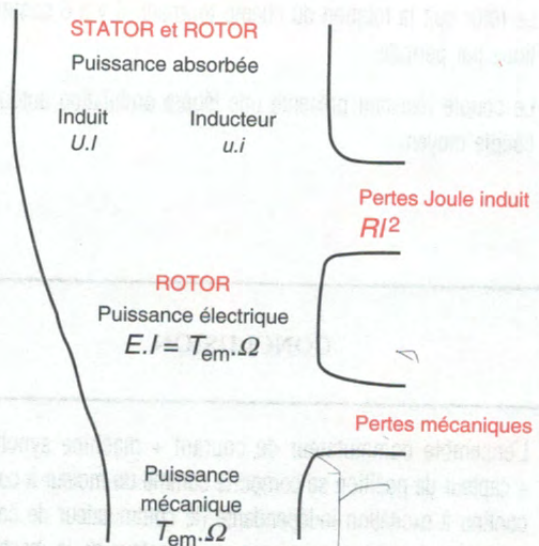
### SYMBOLE



### SCHÉMA ÉQUIVALENT DE L'INDUIT



### BILAN DES PUISSANCES



### EXERCICE D'APPLICATION :

Un moteur alimenté sous 460 V prévu pour 1 580 tr/min, de puissance 8 kW, couple utile 48 N.m, courant nominal 21 A de résistance inducteur 2,78  $\Omega$  se représente par :

$$n = 1\,580 \text{ tr/min}$$

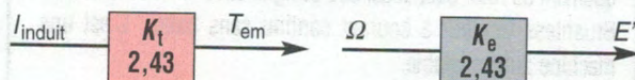
$$\Omega = 2\pi n/60 = 165 \text{ rd/s}$$

$$K_e = E / \Omega = (U - RI) / \Omega$$

$$K_e = [460 - (2,78 \times 21)] / 165 = 2,43 \text{ V/rd/s.}$$

$$K_t = \frac{p N \Phi}{a 2\pi}$$

$$K_e = \frac{p N \Phi}{a 2\pi}$$



### 35.3 Valeurs limites – Contrainte au démarrage

L'intensité de démarrage du moteur de 8 kW cité au § 34.2 serait :

si  $n = 0, E = 0$  donc  $I_d = 460/2,78 = 165 \text{ A}$ .

Cette valeur est inadmissible car :

- le contact glissant collecteur-balais serait détruit, il y aurait soudure de ce contact fragile ;
- le couple développé ne serait pas toléré par les organes mécaniques (accouplement, conducteurs d'induit...);
- la source n'a pas été prévue pour fournir cette puissance.

La puissance appelée sur le réseau, serait dans cet exemple de  $P_a = 75,9 \text{ kW}$ .

Les équipements de démarrage limitent l'intensité à des valeurs admissibles par le moteur.

Les dispositifs habituellement employés sont :

- les démarreurs qui limitent le courant induit ;
- les variateurs de vitesse dont la boucle intensité est prioritaire sur la boucle vitesse.

#### Réglage de la vitesse

- Action sur la tension induit : fonctionnement à couple constant.
- Action sur le flux : fonctionnement à puissance constante. (voir chapitre « variateurs de vitesse pour moteur à courant continu »).

### 35.4 Équation mécanique

L'équation mécanique applicable à l'arbre moteur est :

$$T_m = T_r + J \frac{d\Omega}{dt}$$

$J$  : inertie totale des masses en mouvement.

#### Calcul du couple accélérateur

Le temps de démarrage d'un ensemble entraîné en rotation dépend du moment du couple accélérateur :

$$T_a = T_m - T_r$$

$T_a$  : moment du couple accélérateur.

$T_m$  : moment du couple moteur.

$T_r$  : moment du couple résistant.

#### Contraintes mécaniques

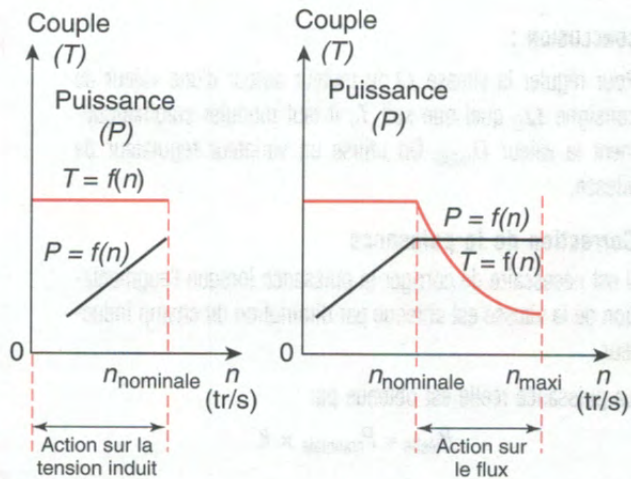
Une motorisation doit fournir ou absorber l'énergie destinée à l'application, en particulier lorsque la chaîne cinématique présente une réversibilité (31.3).

CONTRAINTES DE DÉMARRAGE ADMISSIBLE			
Surcharge	Durée	Nombre de surcharges*	
		par 20 min	par 100 min
1,8 $I_n$	20 s	1	5
1,6 $I_n$	1 min	1	5
1,2 $I_n$	2 min	1	5
1,1 $I_n$	4 min	1	5
1,05 $I_n$	10 min	*	1

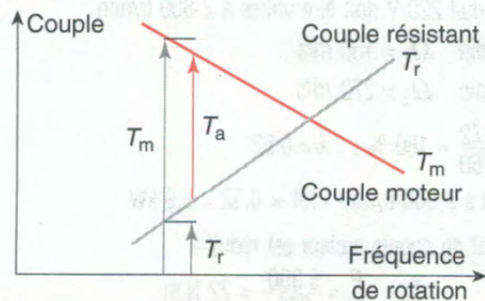
-  $n$  maximale mécanique. C'est la fréquence de rotation maximale autorisée sans destruction des organes mécaniques (une variation de 20 % reste cependant admise pour une faible durée).  
 -  $n$  maximale électrique. C'est la fréquence de rotation maximale admissible par désexcitation à puissance constante, l'induit est alimenté sous tension nominale constante.  
 Une fréquence de rotation supérieure est permise avec une réduction de la puissance donc du courant induit. La limite reste à la fréquence de rotation maximale mécanique.

\* non consécutives.

#### RÉGLAGE DE LA VITESSE



#### COUPLE



## 35 ■ 5 Modélisation

La modélisation est indispensable pour étudier le comportement du moteur et de la machine entraînée.

Cette modélisation utilise la transformation de Laplace. Le moteur se comporte comme :

– un premier ordre électrique de constante de temps :

$$\tau_1 = L/R$$

– un premier ordre mécanique de constante de temps :

$$\tau_2 = J/f$$

### Ordre de grandeur de la constante de temps électrique

Pour 1 kW,  $L = 110 \text{ mH}$   $R = 3,98 \ \Omega$   $\tau_1 = 28 \text{ ms}$  ;

Pour 18 kW,  $L = 22 \text{ mH}$   $R = 1,3 \ \Omega$   $\tau_1 = 17 \text{ ms}$ .

### CONSTATATION :

– À  $T_r = \text{Cte}$  et pour une tension  $U_{\text{induit}}$  imposée,  $\Omega = \text{Cte}$ .

– Si la charge varie, l'évolution de  $T_r$  entraîne une variation de  $\Omega$ .

### CONCLUSION :

Pour réguler la vitesse  $\Omega$  du moteur autour d'une valeur de consigne  $\Omega_c$  quel que soit  $T_r$ , il faut moduler automatiquement la valeur  $U_{\text{induit}}$ . On utilise un variateur régulateur de vitesse.

### Correction de la puissance

Il est nécessaire de corriger la puissance lorsque l'augmentation de la vitesse est obtenue par diminution du champ inducteur.

La puissance réelle est obtenue par :

$$P_{\text{réelle}} = P_{\text{nominale}} \times k.$$

### EXEMPLE :

Un moteur  $P = 11,4 \text{ kW}$  ;  $T_m = 80 \text{ N.m}$  ;  $n = 1\ 430 \text{ tr/min}$  tension induit  $220 \text{ V}$  doit être utilisé à  $2\ 600 \text{ tr/min}$ .

$1\ 430 \text{ tr/min}$   $\Omega_1 = 150 \text{ rd/s}$  ;

$2\ 600 \text{ tr/min}$   $\Omega_2 = 272 \text{ rd/s}$ .

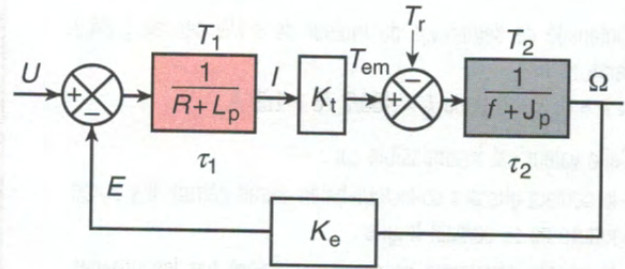
rapport  $\frac{272}{150} = 180 \%$  ;  $k = 0,52$ .

Puissance à  $2\ 600 \text{ tr/min}$   $11,4 \times 0,52 = 5,9 \text{ kW}$ .

Le moment du couple moteur est réduit à :

$$T_m = \frac{P}{\Omega} = \frac{5\ 900}{272} = 22 \text{ N.m.}$$

## MODÉLISATION



$J$  moment d'inertie des pièces en rotation.

$f$  coefficient de frottement visqueux.

### ÉQUATIONS :

$$T_m = T_r + J \frac{d\Omega}{dt} \quad T_r = \text{couple résistant.}$$

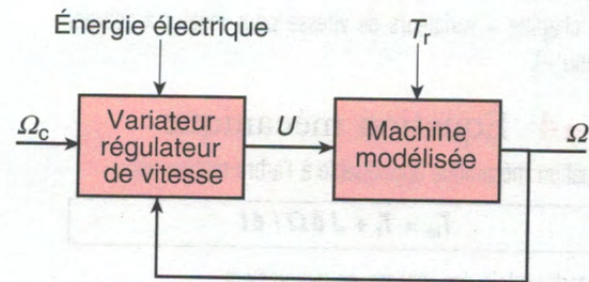
$T_m = T_{em} - \text{couple de pertes.}$

Généralement, le couple de pertes est proportionnel à la vitesse  $\Omega$ .

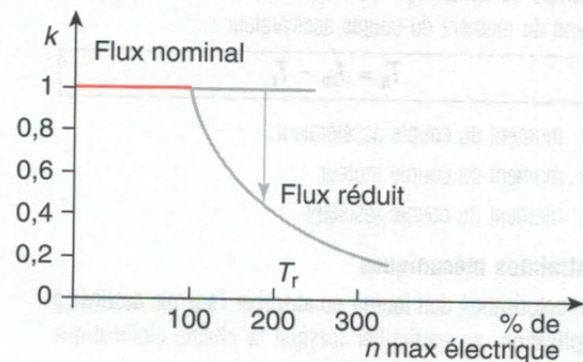
Couple de pertes :  $f \cdot \Omega$ .

$$T_{em} - f \cdot \Omega = T_r + J \frac{d\Omega}{dt} \Rightarrow T_{em} - T_r = J \frac{d\Omega}{dt} + f \cdot \Omega$$

## RÉGULATION DE VITESSE – PRINCIPE



## COEFFICIENT k DE CORRECTION DE LA PUISSANCE



### 35.6 Correction de la puissance en fonction de l'altitude et de la température ambiante

Les moteurs standard sont prévus pour fonctionner dans les conditions suivantes :

- température ambiante de + 5 °C à + 40 °C ;
- altitude inférieure à 1 000 m ;
- pression atmosphérique 0,105 MPa ;
- humidité absolue de 5 à 23 g/m.

Si les conditions d'utilisation sont différentes, la puissance du moteur doit être corrigée afin de conserver une réserve thermique identique.

Le coefficient de correction s'écrit :

$$k = P_1 / P_2$$

$P_1$  : puissance corrigée ;  $P_2$  : puissance catalogue.

### 35.7 Temps de fonctionnement à induit bloqué

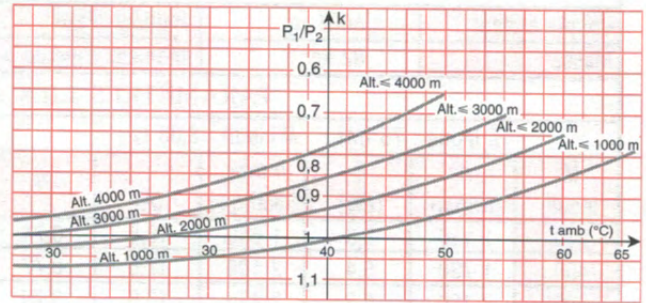
Les moteurs à courant continu sont en général pilotés par des modulateurs d'énergie (variateurs de vitesse) possédant une rampe de démarrage réglable.

L'accélération du moteur et des éléments de la chaîne cinématique est ainsi contrôlée.

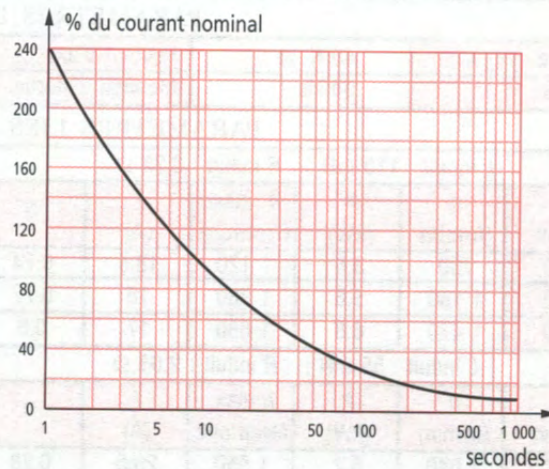
Lorsque le moteur fonctionne à induit bloqué, le système de refroidissement doit rester en fonctionnement.

Le risque de détérioration du collecteur (marquage local) est évité en effectuant un cycle de rotation de l'induit.

### COEFFICIENTS DE CORRECTION EN FONCTION DE L'ALTITUDE ET DE LA TEMPÉRATURE AMBIANTE



### TEMPS DE FONCTIONNEMENT À INDUIT BLOQUÉ EN FONCTION DE L'INTENSITÉ



### 35.8 Contraintes mécaniques sur l'arbre

Le moment d'inertie  $J_c$  des éléments de la chaîne cinématique entraînée se ramène sur l'arbre moteur :

$$J_e = J_c (n_2 / n_1)^2$$

$J_1$  moment d'inertie du moteur.

$J_e$  moment d'inertie équivalent.

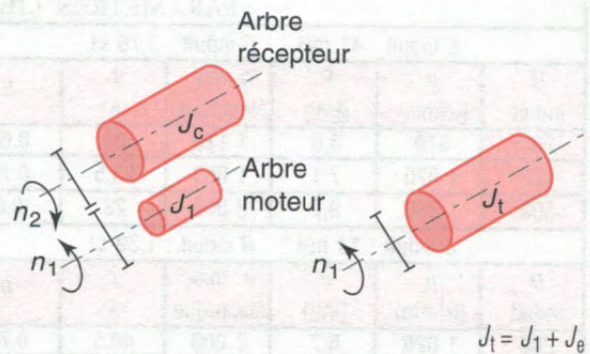
$J_c$  moment d'inertie de la chaîne cinématique entraînée.

$n_1$  fréquence de rotation de l'arbre moteur.

$n_2$  fréquence de rotation de l'arbre entraîné.

(Consulter § 31.3.)

### CONTRAINTES MÉCANIQUES SUR L'ARBRE



35.9

## PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES\*

PARAMÈTRES DE CONSTRUCTION											
Couple moteur	30 N.m		Hauteur d'axe		112 mm		$n$ mécanique maximale		4 000 tr/min		
Masse	82 kg		Moment d'inertie $J$		0,023 kg/m <sup>2</sup>		Puissance excitation		230 W		
PARAMÈTRES LIÉS À LA TENSION INDUIT											
L induit : 75 mH ; R induit : 3,38 $\Omega$ ;						L induit : 52 mH ; R induit : 2,35 $\Omega$					
$U$ induit	$n$ (tr/min)	$P$ (kW)	$n$ max. électrique	$I$ (A)	$\eta$	$U$ induit	$n$ (tr/min)	$P$ (kW)	$n$ max. électrique	$I$ (A)	$\eta$
260	1 110	3,6	1 650	18,5	0,74	260	1 290	4,5	1 920	22,5	0,76
400	1 730	5,4	2 120	17,5	0,77	400	2 010	6,5	2 350	20,5	0,79
500	2 150	5,3	2 470	13,5	0,79	500	2 510	6,5	2 900	16	0,82
L induit : 38 mH ; R induit : 1,73 $\Omega$						L induit : 25 mH ; R induit : 1,05 $\Omega$					
$U$ induit	$n$ (tr/min)	$P$ (kW)	$n$ max. électrique	$I$ (A)	$\eta$	$U$ induit	$n$ (tr/min)	$P$ (kW)	$n$ max. électrique	$I$ (A)	$\eta$
260	1 550	5,2	2 300	25,5	0,78	260	1 940	6,5	2 880	32	0,8
400	2 410	7,2	2 820	22	0,82	400	3 010	9,5	3 520	28,5	0,83
500	3 010	7,4	3 450	17,5	0,85	500	3 760	9,5	4 000	22,5	0,86
PARAMÈTRES DE CONSTRUCTION											
Couple moteur	48 N.m		Hauteur d'axe		112 mm		$n$ mécanique maximale		4 000 tr/min		
Masse	90 kg		Moment d'inertie $J$		0,032 kg.m <sup>2</sup>		Puissance excitation		450 W		
PARAMÈTRES LIÉS À LA TENSION INDUIT											
L induit : 110 mH ; R induit : 3,38 $\Omega$ ;						L induit : 75 mH ; R induit : 2,78 $\Omega$					
$U$ induit	$n$ (tr/min)	$P$ (kW)	$n$ max. électrique	$I$ (A)	$\eta$	$U$ induit	$n$ (tr/min)	$P$ (kW)	$n$ max. électrique	$I$ (A)	$\eta$
260	750	3,6	1 120	18,5	0,74	260	860	4,8	1 290	22,5	0,76
400	1 180	5,6	1 380	18	0,77	400	1 380	5,5	1 610	21,5	0,8
500	1 470	6,8	1 680	17	0,8	500	1 710	8,3	1 960	20	0,83
L induit : 55 mH ; R induit : 2,03 $\Omega$						L induit : 35 mH ; R induit : 1,05 $\Omega$					
$U$ induit	$n$ (tr/min)	$P$ (kW)	$n$ max. électrique	$I$ (A)	$\eta$	$U$ induit	$n$ (tr/min)	$P$ (kW)	$n$ max. électrique	$I$ (A)	$\eta$
260	1 040	5,2	1 550	25,5	0,78	260	1 960	6,7	1 960	32	0,8
400	1 650	7,7	1 940	24	0,82	400	2 410	10,2	2 410	31	0,82
500	2 060	9,5	2 360	22	0,86	500	2 950	12,9	2 950	30	0,86
PARAMÈTRES DE CONSTRUCTION											
Couple moteur	64 N.m		Hauteur d'axe		112 mm		$n$ mécanique maximale		4 000 tr/min		
Masse	101 kg		Moment d'inertie $J$		0,053 kg.m <sup>2</sup>		Puissance excitation		550 W		
PARAMÈTRES LIÉS À LA TENSION INDUIT											
L induit : 41 mH ; R induit : 3,76 $\Omega$						L induit : 25 mH ; R induit : 2,54 $\Omega$					
$U$ induit	$n$ (tr/min)	$P$ (kW)	$n$ max. électrique	$I$ (A)	$\eta$	$U$ induit	$n$ (tr/min)	$P$ (kW)	$n$ max. électrique	$I$ (A)	$\eta$
260	570	3,5	1 120	24	0,67	260	730	4,7	1 440	30	0,71
400	1 070	7,1	1 650	23,5	0,76	400	1 370	5,9	2 120	29	0,78
500	1 330	9,2	2 060	23	0,8	500	1 710	11,6	2 650	28,5	0,81
L induit : 14 mH ; R induit : 1,39 $\Omega$						L induit : 6,5 mH ; R induit : 0,61 $\Omega$					
$U$ induit	$n$ (tr/min)	$P$ (kW)	$n$ max. électrique	$I$ (A)	$\eta$	$U$ induit	$n$ (tr/min)	$P$ (kW)	$n$ max. électrique	$I$ (A)	$\eta$
260	1 020	6,7	2 000	40,5	0,77	260	1 580	11	3 070	60,5	0,83
400	1 910	13	2 960	39,5	0,82	400	2 950	20,2	4 000	59	0,85
500	2 390	16,3	3 700	38,5	0,85	500	3 690	25,3	4 000	58	0,87

\* Les caractéristiques électriques sont données pour :  
 -redressement triphasé double alternance (pont complet) ;  
 -refroidissement par ventilation forcée permanente ;

-indice de protection IP 23 ;  
 -température ambiante inférieure à 40 °C ;  
 -service continu S<sub>1</sub>.