

CHAPITRE 7

LES MOTEURS D'AUTOMATISME



1. Introduction.

Ces dernières années, une véritable révolution a eu lieu concernant les moteurs d'automatisme. Alors qu'il y a seulement une dizaine d'années, ce sont principalement des moteurs à courant continu de fabrication très soignée qui étaient utilisés, les moteurs alternatifs asynchrones constituent aujourd'hui l'essentiel des moteurs utilisés pour les nouvelles installations. A cela deux raisons :

- Un coût moindre ou égal à l'achat ;
- Un coût très inférieur à l'entretien.

La commande de ces moteurs est plus complexe que celle des moteurs à courants continu et fait largement appel à l'électronique. Cette partie dépasse le cadre de ce cours. Cependant, la modélisation des machines reste basée sur les mêmes équations ; nous allons donc parler essentiellement (pour simplifier) de moteurs à courant continu sachant que les équations que nous écrirons restent valables pour les moteurs asynchrones.

2. Relations générales.

Les moteurs à courant continu comportent un induit bobiné (le rotor) et un inducteur bobiné ou à aimant permanent. Le rotor tournant confère une inertie propre (J), et son implantation sur paliers implique des frottements mécaniques (f). Le schéma traditionnel pour un moteur à courant continu est donc celui de la figure 6.1.

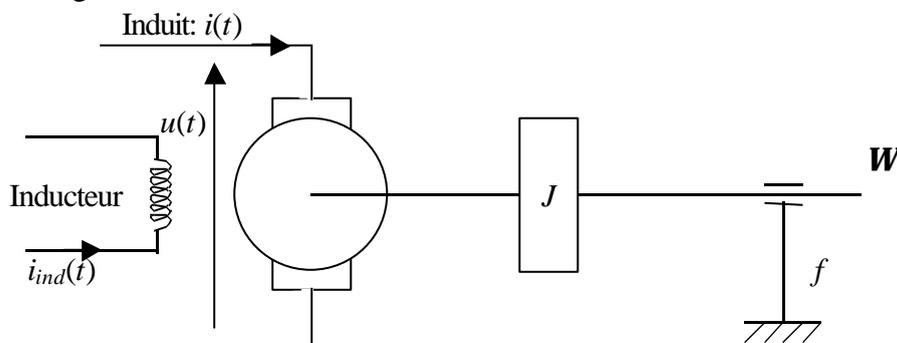


Figure 6.1. Schéma de principe du moteur à courant continu.

Le schéma électrique équivalent de l'induit est donné sur la figure 6.2.

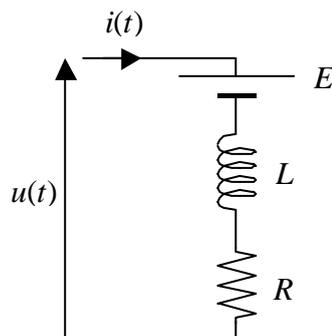


Figure 6.2. Schéma électrique équivalent de l'induit du moteur à courant continu.

E représente la force électromotrice ; L représente la self équivalente de l'enroulement d'induit ; R représente la résistance équivalente de l'induit (résistance des fils du bobinage et résistance de contact au niveau des balais).

Le schéma électrique équivalent de l'inducteur est donné sur la figure 6.3.

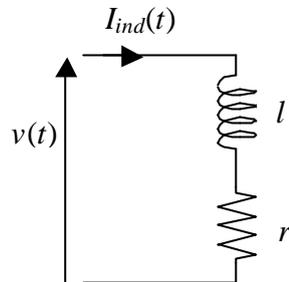


Figure 6.3. Schéma électrique équivalent de l'inducteur du moteur à courant continu.

l représente la self équivalente de l'enroulement inducteur ; r représente la résistance équivalente de l'induit (résistance des fils du bobinage).

Les équations régissant le fonctionnement du moteur de la figure 6.1 sont les suivantes :

Domaine temporel

Domaine de Laplace

$$u(t) = E(t) + Ri(t) + L \frac{di}{dt} \qquad U(p) = E(p) + RI(p) + LpI(p) \qquad (1)$$

$$E(t) = K\mathbf{j}(t)\Omega(t) \qquad E(p) = K\Phi(p)\Omega(p) \qquad (2)$$

$$M(t) = K\mathbf{j}(t)i(t) \qquad M(p) = K\Phi(p)I(p) \qquad (3)$$

$$\mathbf{j}(t) = l.i_{ind}(t) \qquad \mathbf{f}(p) = l.I_{ind}(p) \qquad (4)$$

$$v(t) = l \frac{di_{ind}}{dt} + ri_{ind}(t) \qquad V(p) = lpI_{ind}(p) + rI_{ind}(p) \qquad (5)$$

$$J \frac{d\Omega}{dt} = M(t) - f\Omega(t) \qquad Jp\Omega(p) = M(p) + f\Omega(p) \qquad (6)$$

- où : M est le moment moteur ;
 K est une constante générale liée à la machine tournante (MKSA) ;
 \mathbf{f} représente le flux inducteur (Weber).

Si le flux inducteur $\mathbf{j}(t)$ et le courant dans l'enroulement d'induit $i(t)$ sont variables, les équations (2) et (3) traduisent un système non linéaire (produit de deux variables).

Pour se placer dans le cas du fonctionnement linéaire, une des grandeurs $i(t)$ ou $\mathbf{j}(t)$ doit être maintenue constante. Ceci impose une excitation séparée. On obtient alors deux modes de fonctionnement avec commande par l'induit ou par l'inducteur.



3. Commande par l'inducteur $i(t) = I_0$.

Ce mode correspond évidemment au cas d'un inducteur bobiné dans lequel le courant pourra varier, entraînant un flux variable. Le courant d'induit est maintenu constant à l'aide d'une source extérieure que l'on peut représenter par une source de courant I_0 .

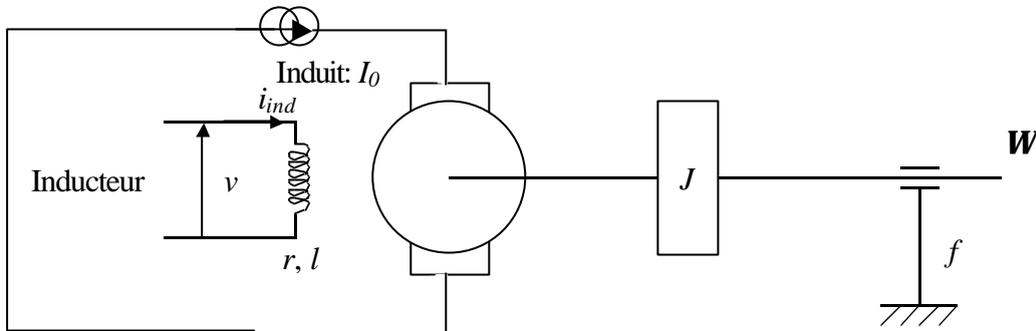


Figure 6.4. Commande par l'inducteur.

Dans cette configuration, on a :

$$\mathbf{j}(t) = l.i_{ind}(t) \tag{7}$$

avec $l=Cte$ si l'on considère le circuit magnétique inducteur non saturé, et donc:

$$M(t) = K.l.i_{ind}(t)I_0 \tag{8}$$

soit en simplifiant:

$$M(t) = k.i_{ind}(t) \tag{9}$$

En considérant les équations (5), (6) et (7), le diagramme fonctionnel du moteur est alors celui de la figure 6.5.

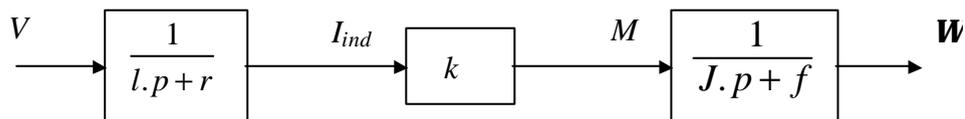


Figure 6.5. Diagramme fonctionnel de la commande par l'inducteur.

Remarque: les éléments électriques et mécaniques interviennent sous des constantes de temps séparées, il n'y a pas de réaction d'induit à considérer puisque le courant d'induit est maintenu constant quelle que soit la vitesse (voir cours électrotechnique et TP U32).

4. Commande par l'induit $i_{ind}(t) = C^{te} \Rightarrow \mathbf{j}(t) = C^{te} = \mathbf{f}_0$.

Dans ce cas le flux inducteur est maintenu constant, par l'utilisation soit d'un aimant permanent pour la création directe du flux, soit d'une source de courant régulée.

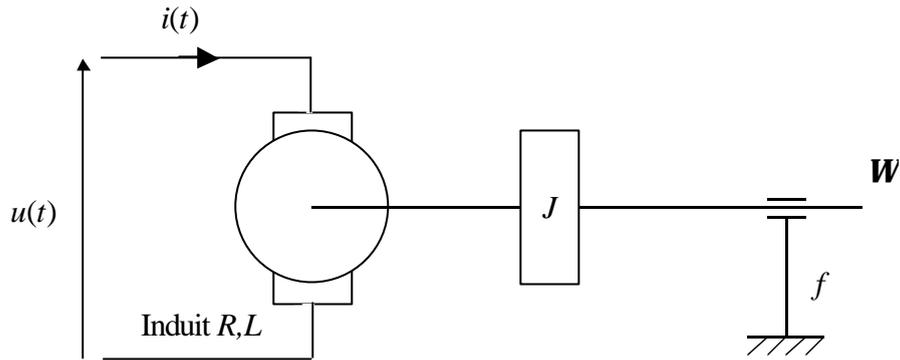


Figure 6.6. Commande par l'induit.

on a: $M(t) = K\mathbf{j}(t)i(t)$ avec $\mathbf{j}(t) = \mathbf{f}_0$ donc on peut écrire :

$$M(t) = k'i(t). \tag{10}$$

Le moment du couple est directement proportionnel au courant d'induit.
De même, on obtient à partir de la relation (2) :

$$E(t) = k'\Omega(t). \tag{11}$$

A l'aide des relations (1), (6), (10) et (11), on peut construire le diagramme fonctionnel du moteur de la figure 6.7.

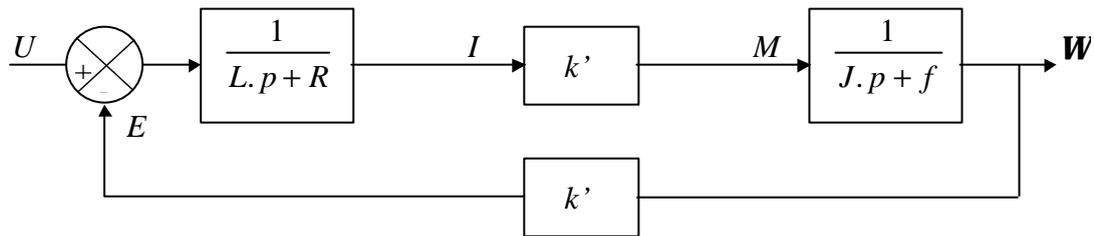


Figure 6.7. Diagramme fonctionnel de la commande par l'induit.

La fonction de transfert $\frac{\Omega(p)}{U(p)}$ s'écrit à partir du diagramme fonctionnel :

$$\begin{aligned} \frac{\Omega(p)}{U(p)} &= \frac{k}{(L.p + R)(J.p + f)} = \frac{k}{k^2 + (L.p + R)(J.p + f)} = \frac{k}{k^2 + Rf + (JR + Lf)p + LJp^2} \\ &= \frac{k/(k^2 + Rf)}{1 + \frac{JR + Lf}{k^2 + Rf}p + \frac{LJ}{k^2 + Rf}p^2} \end{aligned} \tag{12}$$

En identifiant à un système du second ordre, soit en écrivant :

$$\frac{\Omega(p)}{U(p)} = \frac{k/(k^2 + Rf)}{1 + \frac{JR + Lf}{k^2 + Rf}p + \frac{LJ}{k^2 + Rf}p^2} = \frac{K_s}{1 + 2\zeta\frac{p}{\omega_n} + \left(\frac{p}{\omega_n}\right)^2} \tag{13}$$

on obtient :

Gain statique :
$$K_s = \frac{k}{k^2 + Rf}$$

Pulsation propre du système non amorti :
$$\omega_n = \sqrt{\frac{k^2 + Rf}{LJ}}$$

Coefficient d'amortissement :
$$\alpha = \frac{1}{2} \omega_n \frac{JR + Lf}{k^2 + Rf} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{k^2 + Rf}{LJ}} \frac{JR + Lf}{k^2 + Rf} = \frac{1}{2} \frac{JR + Lf}{\sqrt{LJ(k^2 + Rf)}}$$

4.1 Cas $L = 0$

En général, la self d'induit L est négligeable car le nombre de spires est faible pour les moteurs d'automatisme.

Avec $L = 0$, on obtient :
$$\frac{\Omega(p)}{U(p)} = \frac{k / (k^2 + Rf)}{1 + \frac{JR}{k^2 + Rf} p} = \frac{k / (k^2 + Rf)}{1 + \frac{J}{k^2 / R + f} p} \tag{14}$$

Cette relation correspond à un système du premier ordre de constante de temps $t = \frac{J}{k^2 / R + f}$ et de

gain statique $K_s = \frac{k}{k^2 + Rf}$.

4.2 Cas $f = 0$

Le terme $\frac{k^2}{R}$ est homogène à un frottement, il correspond au frottement d'origine électrique de l'induit tournant dans le champ et il est généralement plus important que les frottements mécaniques. On peut donc négliger également le terme f .

Finalement, avec $f = 0$:

$$\frac{\Omega(p)}{U(p)} = \frac{1/k}{1 + \frac{JR}{k^2} p}$$

Cette relation correspond au cas où le système est dépourvu de charge, sinon il est impératif d'écrire la relation de couple complète pour obtenir la fonction de transfert du système.

5. Génératrice tachymétrique.

Quand les moteurs à courant continu sont de fabrication très soignée, ils fonctionnent très bien en génératrices tachymétriques et délivrent des tensions proportionnelles aux vitesses de rotation avec une excellente linéarité. L'inducteur est à champ permanent. Le fonctionnement dans ce type d'utilisation est d'autant plus linéaire que la génératrice est peu chargée car dans ce cas le circuit magnétique n'est pas saturé du tout.

