



**Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
Université Echahid Hamma Lakhder d'El-Oued**

# **Note de cours : Commande des entraînements électromécaniques**

**Faculté: Technologie**

**Département: Génie mécanique**

**Option : Electromécanique**

**Semestre: S6**

**Crédits:04**

**Coefficient:02**

**DJOKHRAB ALA EDDINE**

**Année Universitaire : 2019/2020**

## **Chapitre3 : Régulation de la vitesse des machines a courant continu**

I- Introduction

II- Régulation de vit esse de moteur à courant continu

*1- Modélisation d'un moteur à courant continu : (schéma fonctionnel)*

*2- Etude de la boucle en courant : (régulation du courant)*

*3- Etude de la boucle en vitesse : (régulation de vitesse)*



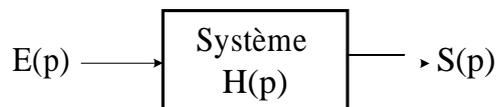


## Régulation de la vitesse des machines à courant continu

---

### I. Introduction :

L'association du convertisseur à la machine à courant continu permet le réglage de la vitesse ou la position. Mais cette commande est élaborée sans l'aide de la connaissance des grandeurs de sortie. Au niveau des inconvénients, il n'y a aucun moyen de contrôler, à plus forte raison de compenser les erreurs, les dérives, les accidents qui peuvent intervenir à l'intérieur de la boucle, autrement dit, il n'y a pas de précision ni surtout de fidélité qui dépendent de la qualité intrinsèque des composants. Enfin, ce type de commande ne compense pas les signaux de perturbation. C'est pour cela on dit qu'il s'agit d'un système en boucle ouverte. Le schéma bloc de système en boucle ouverte est donné par la **figure 1** :



*Figure. 1 : Schéma bloc d'un système en boucle ouverte*

**E** : grandeur réglant (consigne)

**S** : grandeur réglée

$$H(p) = \frac{S(p)}{E(p)}$$

Alors que la commande en boucle fermée (contre réaction) est capable de stabiliser un système instable en boucle ouverte. Dans une régulation en boucle fermée, une bonne partie des facteurs perturbateurs externes sont automatiquement compensés par la contre-réaction à travers le procédé.

L'utilisation du retour d'information est le principe fondamental en automatique. La commande appliquée au système est élaborée en fonction de la consigne et de la sortie. La **figure 2** représente le principe de retour unitaire.

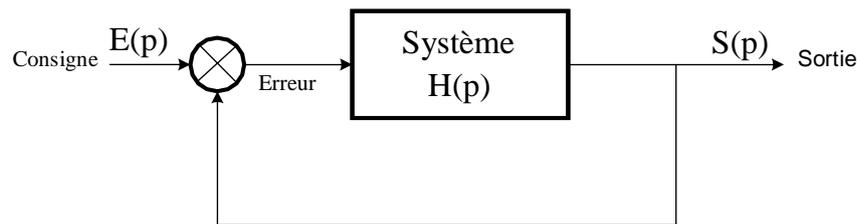


Figure. 2 : Schéma bloc d'un système en boucle fermée avec un retour unitaire

D'après la figure ci-dessus et selon Black, le comportement du processus est décrit par la

$$\text{relation : } G(p) = \frac{H(p)}{1 + H(p)}$$

**E** : grandeur réglante (consigne)

**S** : grandeur réglée

$\varepsilon$  : erreur =  $E(p) - S(p)$

## II. Régulation de vitesse de moteur à courant continu.

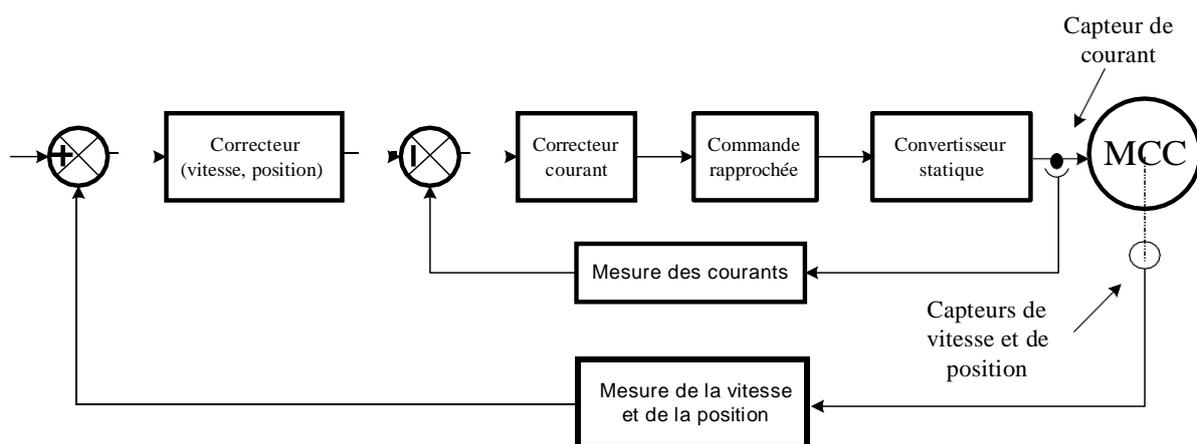
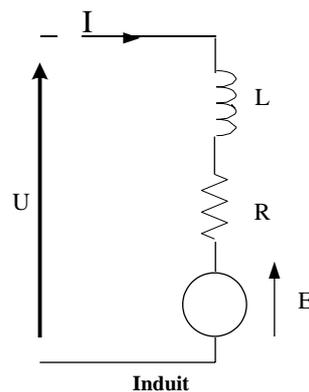


Figure. 3 : Schéma synoptique de la régulation d'un moteur à courant continu

La figure 3 donne la structure générale la plus fréquente. C'est celle d'un variateur de vitesse à deux boucles en cascade. On y distingue les deux organes de puissance (le moteur et le convertisseur statique avec son électronique de commande), les deux capteurs (courant et vitesse) et les deux régulateurs (de courant et de vitesse).

Dans cette structure, la tension de sortie du régulateur de vitesse (correcteur vitesse et position) sert de référence au régulateur de courant. C'est l'image du courant (donc du couple) désiré.

**1. Modélisation d'un moteur à courant continu : (schéma fonctionnel)**



**Figure. 3 :** Schéma équivalent d'un moteur à courant continu

On note :

R : La résistance interne de l'induit du moteur à courant continu.

L : L'inductance interne de l'induit du moteur à courant continu,

E : La f.c.e.m. du moteur

J : Le moment d'inertie ramené à l'arbre du moteur.

f : Le coefficient de frottement visqueux (Le couple de frottement est proportionnel à \$\Omega\$).

\$T\_m\$ : Le couple moteur.

\$T\_r\$ : Le couple résistant

D'après la loi de Newton, combiné à des lois de Kirchhoff, On peut écrire les équations différentielles de premiers ordres suivantes :

$$U = E + RI_a + L \frac{dI_a}{dt} \quad (1)$$

Avec :  $E = K\phi\Omega$

On passe en Laplace on obtient :

$$U - E = (R + Lp) I_a (p) \quad (2)$$

D'après le principe fondamental de la dynamique on a :

$$T_m - T_r = J \frac{d\Omega}{dt} + f.\Omega \quad (3)$$

Avec :  $T_m = K\phi I_a$

On passe en Laplace on obtient :

$$(T_m - T_r) = (Jp + f)\Omega(p) \quad (4)$$

☞ Pour \$T\_r = 0\$, obtient on a :

$$U(p) = K\phi\Omega(p) + (P + Lp) \frac{T_m}{K\phi} \quad (5)$$

Sachant que :  $T_m = (Jp + f)\Omega(p)$

$$D'où : U(p) = \Omega(p) \left[ K\phi + \left( \frac{R+Lp}{K\phi} \right) (Jp + f) \right] \quad (6)$$

$$\text{Soit } T(p) \text{ la fonction de transfert : } T(p) = \frac{\Omega(p)}{U(p)} = \frac{1}{K\phi + \left( \frac{R+Lp}{K\phi} \right) (Jp + f)}$$

$$T(p) = \frac{K\phi}{(K\phi)^2 + (R+Lp)(Jp + f)}$$

$$T(p) = \frac{K\phi}{JLp^2 + (RJ + Lf)p + Rf + (K\phi)^2} \quad (7)$$

La tension de sortie du redresseur est :

$$U = U_{co} \cos \psi \quad (8)$$

$$\cos \psi = \frac{U}{U_{co}} \quad (9)$$

La tension  $u_c$  est l'image de la vitesse souhaitée, soit alors :

$$u_c = k \cos \psi \quad (10)$$

$$\cos \psi = \frac{u_c}{k} \quad (11)$$

Des expressions (9) et (11) :

$$U = U_{co} \frac{u_c}{k} = K' u_c \quad (12)$$

D'où :

$$\frac{\Omega(p)}{u_c} = \frac{K' K \phi}{JLp^2 + (RJ + Lf)p + Rf + (K\phi)^2} \quad (13)$$

Soit alors :

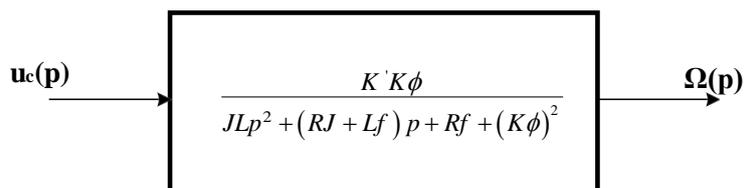


Figure. 5 : Schéma bloc de la fonction de transfert (moteur+ redresseur)

Alors le réglage de la vitesse de rotation  $\Omega$  se fait par variation de la tension aux bornes de l'induit

D'où le schéma fonctionnel de la commande en boucle ouvert d'une machine à courant continu :

$$I_a(p) = \frac{U - E}{Lp + R} ; T_m = K\phi I_a(p) ; E = K\phi\Omega(p) \text{ et } \Omega(p) = \frac{T_m - T_r}{Jp + f}$$

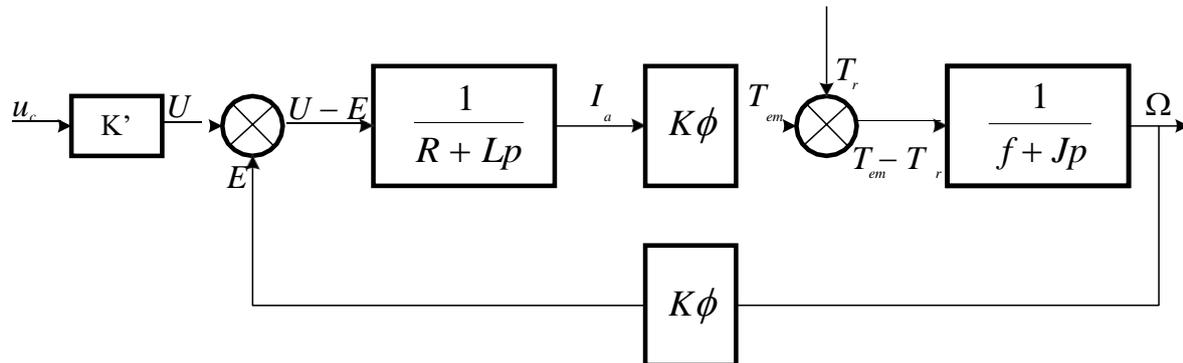


Figure. 6 : Schéma fonctionnel d'un convertisseur statique et d'un moteur à courant continu

## 2. Etude de la boucle en courant : (régulation du courant)

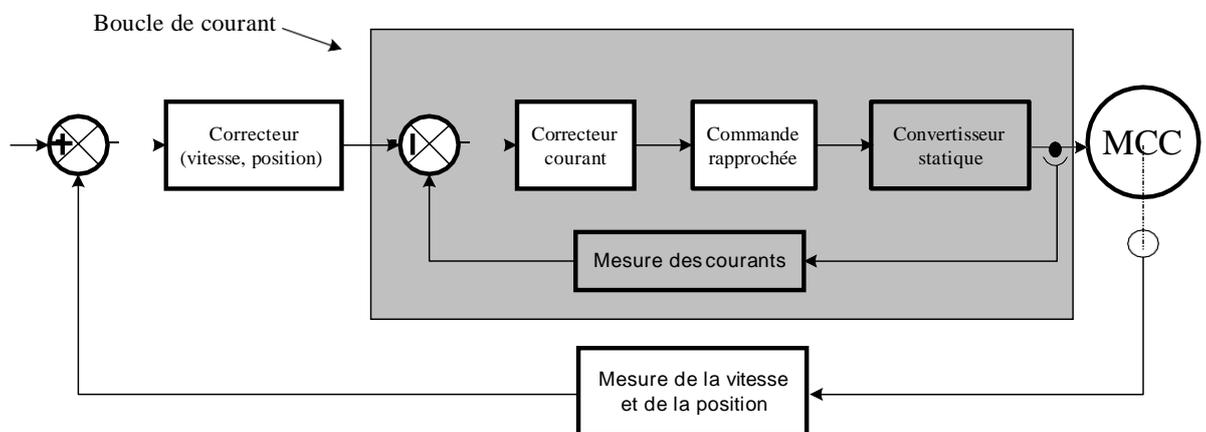


Figure. 7 : Identification de la boucle en courant

On utilise dans la chaîne de régulation des amplificateurs à courant continu et à grand gain.

Pour la boucle de courant, le schéma synoptique et le suivant :

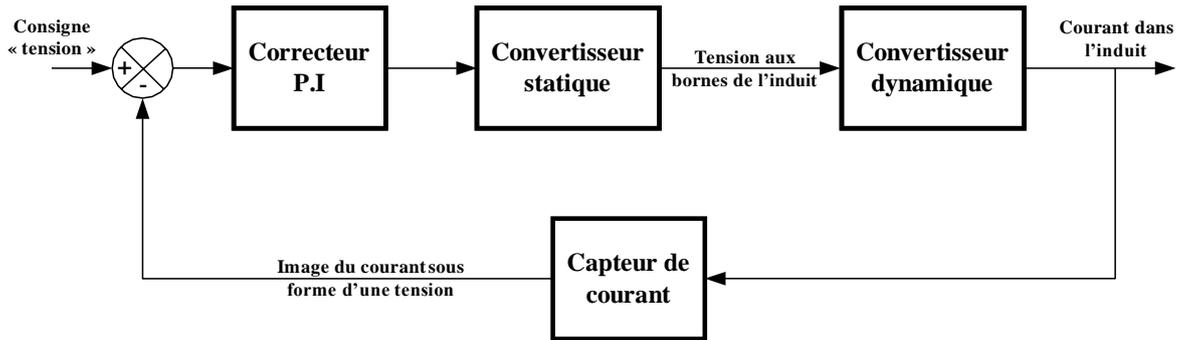


Figure. 8 : Synoptique de la boucle du courant

☞ Convertisseur dynamique :

$$\text{On a : } U = E + RI_a + L \frac{dI_a}{dt} \text{ et } E = K\phi\Omega \text{ d'où : } U = K\phi\Omega + RI_a + L \frac{dI_a}{dt}$$

D'autre part, la relation fondamentale de la dynamique permet d'écrire :

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

On néglige  $f$  et on suppose que  $T_r = 0$

$$\text{D'où : } T_m = J \frac{d\Omega}{dt}$$

Sachant que :  $T_m = K\phi I_a$

$$\text{Alors : } K\phi I_a = J \frac{d\Omega}{dt} \Rightarrow \frac{d\Omega}{dt} = \frac{K\phi}{J} I_a \quad \text{Le passage par la transformée de Laplace}$$

$$\text{donne : } p\Omega(p) = \frac{K\phi}{J} I_a(p) \Rightarrow \Omega(p) = \frac{K\phi}{J \cdot p} I_a(p)$$

$$\text{Or } U(p) = K\phi\Omega(p) + RI_a(p) + Lp \cdot I_a(p)$$

$$\text{D'où : } U(p) = K\phi \frac{K\phi}{J \cdot p} I_a(p) + RI_a(p) + Lp \cdot I_a(p) \Rightarrow$$

$$U(p) = \left( \frac{(K\phi)^2}{J \cdot p} + R + Lp \right) I_a(p)$$

$$\text{Soit : } T_m = \frac{RJ}{(K\phi)^2} \text{ d'où : } U(p) = \left( \frac{R}{T_m \cdot p} + R + Lp \right) I_a(p) \Rightarrow$$

$$U(p) = R \left( \frac{1}{T_m \cdot p} + 1 + \frac{L}{R} p \right) I_a(p) \quad \text{Soit } T_e = \frac{L}{R}$$

$$\text{D'où : } \frac{I_a(p)}{U(p)} = \frac{T_m \cdot p}{R(T_e T_m p^2 + T_m p + 1)}$$

Sachant que :  $T_m \ll T_e$  alors  $T_m + T_e \approx T_e$

Soit alors :

$$(1 + T_e \cdot p)(1 + T_m \cdot p) = 1 + (T_e + T_m) p + T_e T_m \cdot p^2 \approx 1 + T_e \cdot p + T_e T_m \cdot p^2$$

On peut utiliser cette condition pour simplifier la boucle de courant, on obtient :

$$\frac{I_a(p)}{U(p)} = \frac{T_m \cdot p}{R(1 + T_e)(1 + T_m)}$$

☞ Convertisseur statique :

$$U = U_{co} \frac{u_c}{k} = K' u_c$$

☞ Correcteur P.I :

Le correcteur PI « proportionnel-intégrale » améliore la précision de la boucle ( erreur statique nulle).

$$C(p) = g_p + \frac{g_i}{p} = g_0 \frac{1 + T \cdot p}{T \cdot p}$$

☞ Capteur de courant : Soit un shunt soit un transformateur. Dans les deux cas l'image du courant est obtenue sous forme d'une tension, soit alors :  $U_{image} = m \cdot I_a$

D'où le schéma fonctionnel :

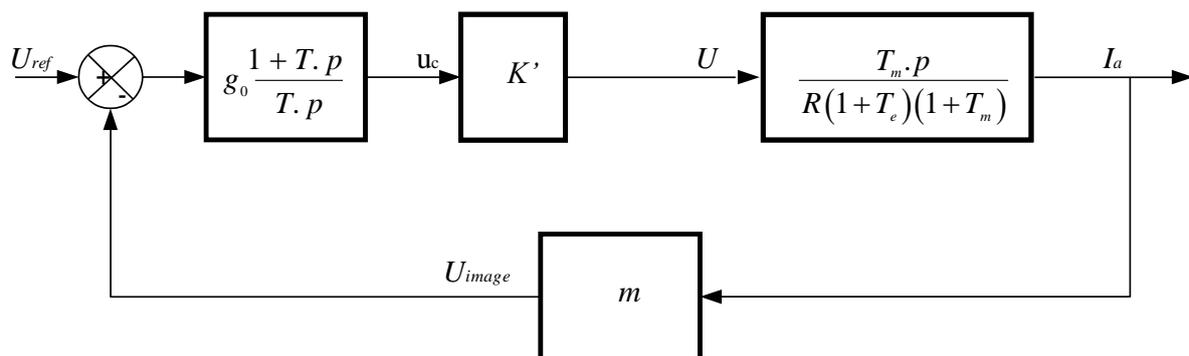


Figure. 9 : Schéma fonctionnel de la boucle du courant

Soit en faisant un schéma avec retour unitaire :

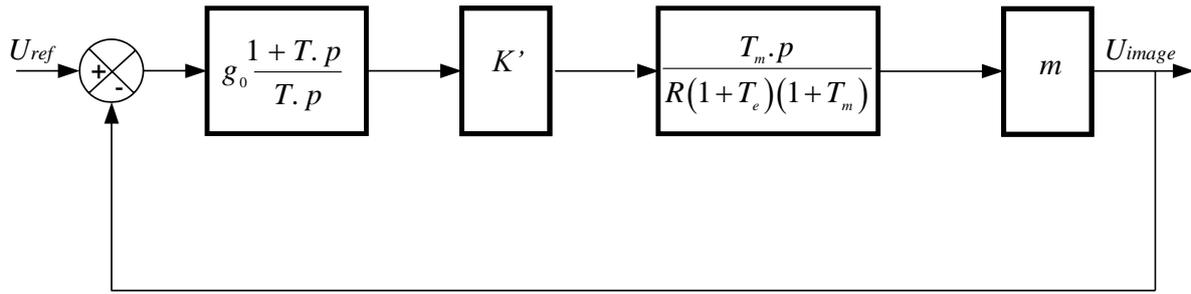


Figure. 10 : Schéma fonctionnel à retour unitaire

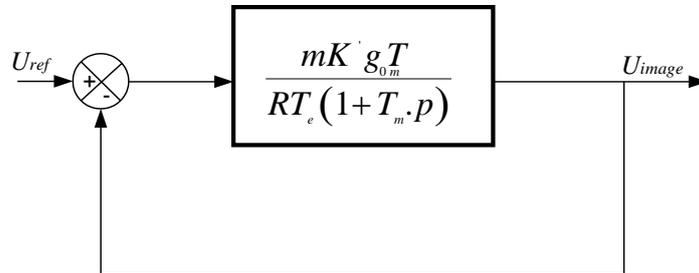
□ Fonction de transfert en boucle ouverte :

Choisissant  $T = T_e$  d'où  $C(p) = g_0 \frac{1 + T_e \cdot p}{T_e \cdot p}$

Soit  $F_{TBO}(p)$  la fonction de transfert en boucle ouverte :

$$F_{TBO}(p) = \left( g_0 \frac{1 + T_e \cdot p}{T_e \cdot p} \right) K' \frac{T_m \cdot p}{R(1 + T_e \cdot p)(1 + T_m \cdot p)} \cdot m = \frac{mK' g T}{RT_e (1 + T_m \cdot p)}$$

Ainsi :



□ Fonction de transfert en boucle fermée :

Soit  $R_0 = g m K'$

$$F_{TBF}(p) = \frac{F_{TBO}(p)}{1 + F_{TBO}(p)} = \frac{\frac{R_0 T_m}{RT_e (1 + T_m \cdot p)}}{1 + \frac{R_0 T_m}{RT_e (1 + T_m \cdot p)}} = \frac{R_0 T_m}{RT_e (1 + T_m \cdot p) + R_0 T_m}$$

Et comme  $T_m \ll T_e$  alors  $\frac{RT_e}{R_0 T_m} \ll 0$  alors la fonction de transfert en boucle fermée est

un système et de la forme :  $F_{TBF}(p) = \frac{1}{1 + \tau p} \Rightarrow$  système de 1<sup>er</sup> ordre avec  $\tau = \frac{RT_e}{R_0}$

□ Réalisation pratique du correcteur P.I

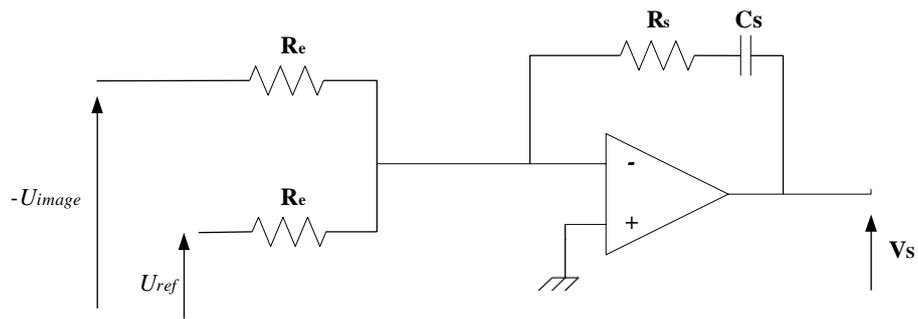


Figure. 11 : Correcteur P.I

$$\tau = \frac{R_s}{g_0} \quad V(p) = \left( g_0 + \frac{g_0}{T p} \right) [U_{ref}(p) - U_{image}(p)]$$

$$T = R_s C_s$$

### 3. Etude de la boucle en vitesse : (régulation de vitesse)

Tenant compte la boucle en courant, le schéma fonctionnel complet de la boucle de vitesse est le suivant :

