

Fiche de T. D. No 4

Exercice 1

Le mouvement de rotation de l'arbre d'un moteur électrique à C.C. résulte de l'action d'un champ magnétique (produit par le courant inducteur) sur un conducteur de courant (le circuit d'induit). Lorsque le circuit d'excitation est séparé du circuit d'induit (cas des moteurs à excitation indépendante), la variation du couple moteur appliqué à l'arbre peut en principe être obtenue par:

- Variation du courant inducteur (courant d'induit constant)
- Variation du courant d'induit (courant inducteur constant)

L'angle Θ est l'angle dont a tourné l'arbre à partir d'une référence. On suppose que pour la mise en équation le couple résistant peut comporter les composantes suivantes :

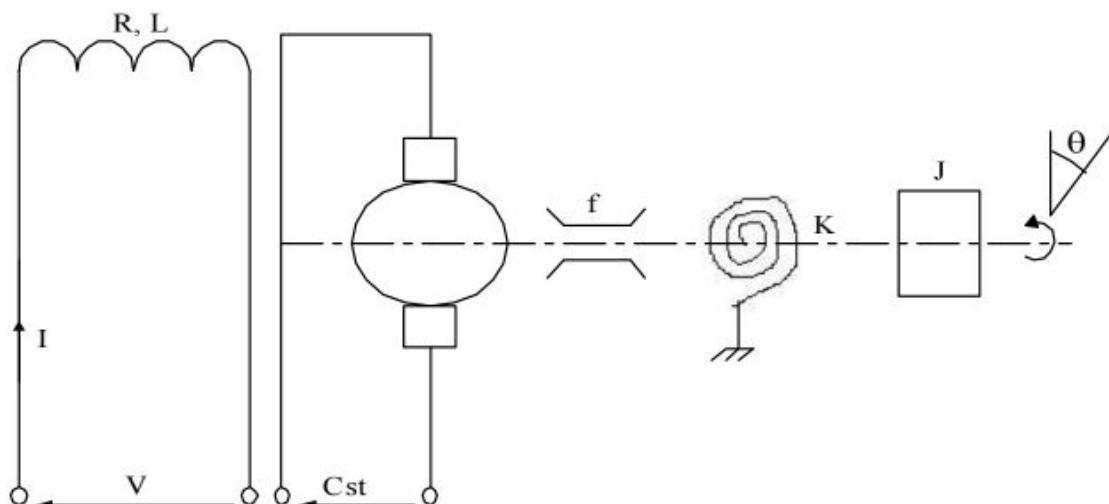
- Couple d'inertie $J \frac{d^2\theta}{dt^2}$
- Couple de frottement fluide $f \frac{d\theta}{dt}$
- Couple de rappel $K \Theta$ (K : coefficient d'élasticité)

I. Commande par inducteur (courant d'induit constant)

Le couple moteur Γ est proportionnel au courant inducteur I

$$\Gamma = K_c I$$

La tension appliquée au circuit inducteur est V



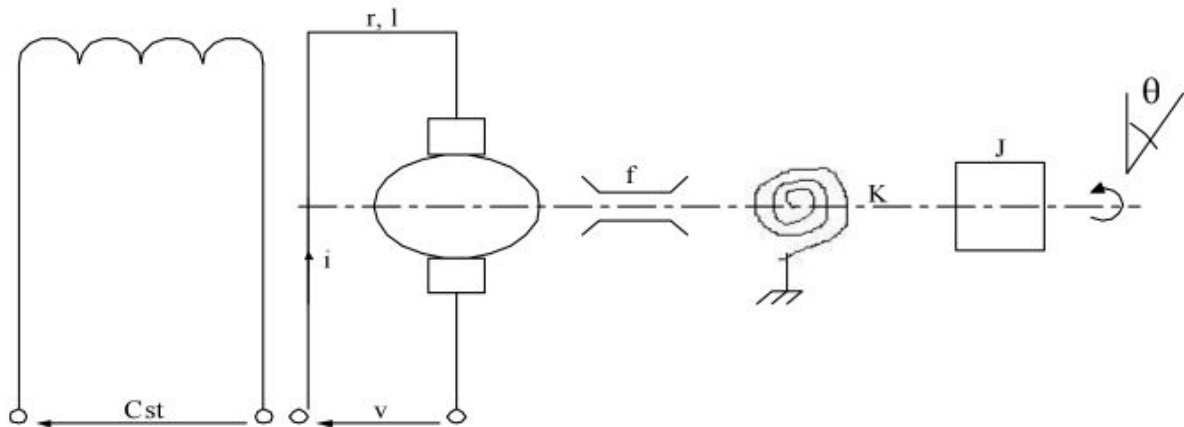
1. Donner la fonction de transfert $F(s) = \frac{\theta(s)}{V(s)}$
2. $K = 0$
 - a. Mettre $F(s)$ sous la forme

$$F(s) = \frac{k_1}{s^n (1 + \tau_1 s)(1 + \tau_2 s)}$$

Donner la valeur de l'exposant n , en déduire le type du système, et les expressions de k_1 , τ_1 et τ_2 en fonction des paramètres électriques et mécaniques du système.

- b. Donner l'équation différentielle en θ associée à la fonction de transfert.
3. Tracer le diagramme de Bode de la fonction de transfert (courbes asymptotiques).

II. Commande par l'induit (courant d'inducteur constant)



Le couple moteur est toujours proportionnel au courant d'induit et la f.e.m est en série avec r (résistance de l'induit) et l (inductance propre).

$$E = k_e \frac{d\theta}{dt} \text{ (f.e.m)}$$

$$k_e = k_i$$

$$\Gamma = k_i i$$

1. Donner la fonction de transfert $F(s) = \frac{\theta(s)}{V(s)}$

2. Dans le cas où $f = l = K = 0$

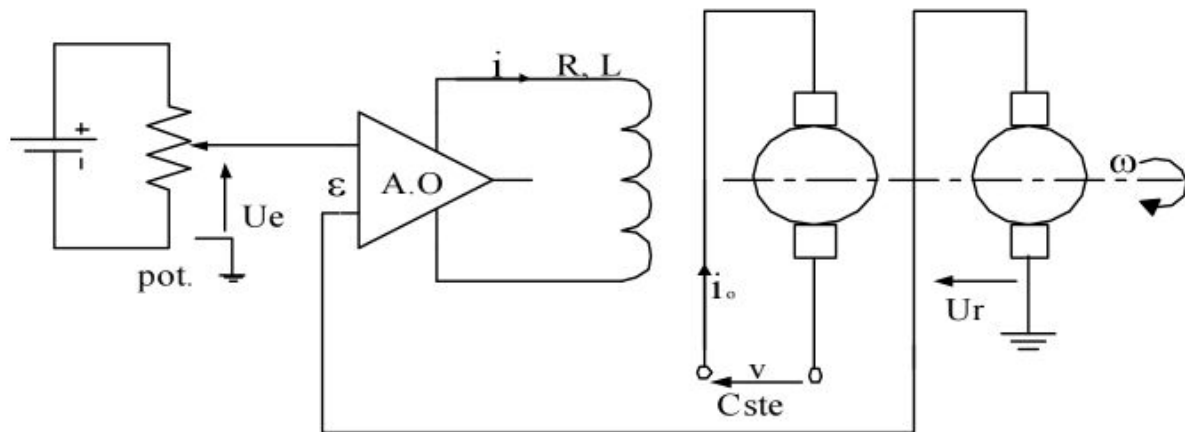
- a. Mettre la fonction de transfert sous la forme :

$$F(s) = \frac{k_2}{s(1 + \tau s)}$$

- b. Exprimer K_2 et τ en fonction des paramètres du système
 - c. Donner l'équation différentielle en θ associée à la fonction de transfert

Exercice 2

Soit l'asservissement de vitesse suivant :

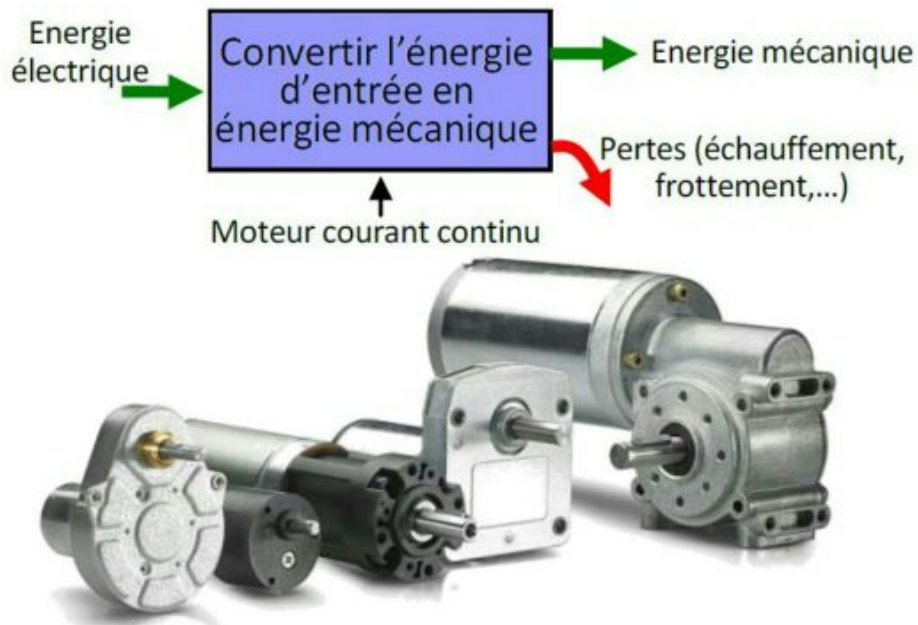


L'A.O. à un gain égal à A , λ représente le rapport de la tension U_r délivrée par la génératrice tachymétrique à la vitesse de rotation ω de l'arbre du moteur.

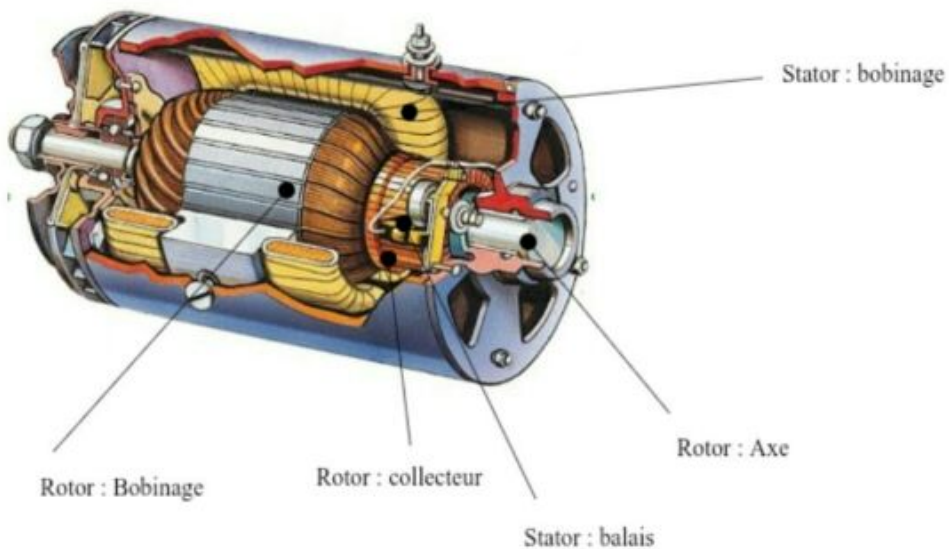
1. Trouver le schéma fonctionnel de l'asservissement.
2. Trouver sa fonction de transfert en boucle ouverte.
3. Trouver sa fonction de transfert en boucle fermée.

Fiche TD 04 (correction) :

Exercice 01 :



La MCC (machine ou moteur à courant continu) se compose comme tous les moteurs, d'une partie fixe, le *stator*, et d'une partie mobile en rotation, le *rotor*. Sur la figure 1, on observe une vue interne du moteur. La légende *Stator:bobinage* doit se lire *bobinage appartenant au Stator*.



Selon les données de l'exercice :

L'angle d'inclinaison de l'arbre de moteur est : $\theta(t)$

Le couple résistant $\Gamma_r(t)$ comporte les composantes suivantes :

1. Couple d'inertie : $J \frac{d^2\theta(t)}{dt^2}$
2. Couple de frottement : $f \frac{d\theta(t)}{dt}$
3. Couple de rappel : $K\theta(t)$

C-à-d que : $\Gamma_r(t) = J \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} + f \frac{d\theta(t)}{dt} + K\theta(t)$

Le couple moteur est proportionnel au courant inducteur : $\Gamma_m(t) = K_c i(t)$

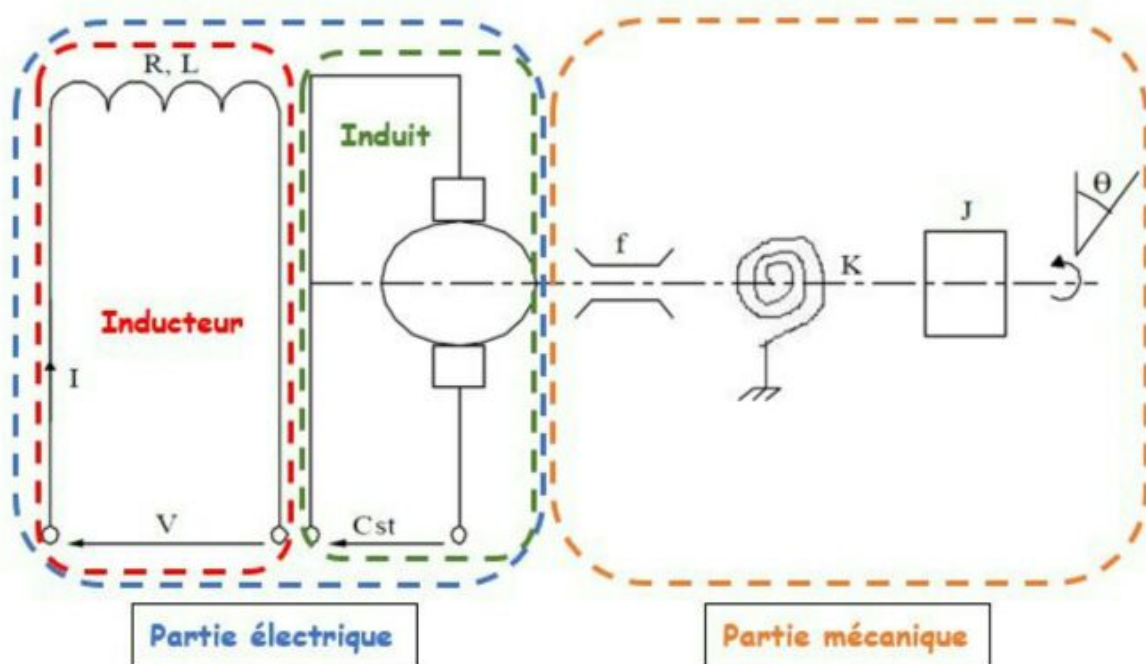
Pour que le moteur MCC commence à tourner il faut qu'en minimum : $\Gamma_m(t) = \Gamma_r(t)$

$$K_c i(t) = J \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} + f \frac{d\theta(t)}{dt} + K\theta(t) \xrightarrow{z} K_c I(s) = Js^2\Theta(s) + fs\Theta(s) + K\Theta(s)$$

$$\Rightarrow K_c I(s) = (Js^2 + fs + K)\Theta(s) \dots (1)$$

Cette équation est dite, équation mécanique du moteur MCC.

I. Commande par inducteur (courant d'induit constant) :



Commande par inducteur :

$$V(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} \xrightarrow{z} \overline{V(s)} = RI(s) + LsI(s) = \overline{(R + Ls)I(s)} \dots (2)$$

1. La fonction de transfert : $F(s) = \frac{\Theta(s)}{V(s)}$

De l'équation (2) on tire $I(s) : I(s) = \frac{1}{(R+Ls)}V(s) \dots (3)$

On remplace l'équation (3) dans l'équation (1) :

$$K_c \frac{1}{(R+Ls)}V(s) = (Js^2 + fs + K)\Theta(s) \Rightarrow \boxed{\frac{\Theta(s)}{V(s)} = \frac{K_c}{(R+Ls)(Js^2 + fs + K)}}$$

2. Pour $K=0$:

a. Calcul de $F(s)$ sous la nouvelle forme :

$$\begin{aligned} \frac{\Theta(s)}{V(s)} &= \frac{K_c}{(R+Ls)(Js^2 + fs)} = \frac{\Theta(s)}{V(s)} = \frac{\frac{K_c}{Rf}}{s \frac{(R+Ls)}{R} \frac{(Js+f)}{f}} \\ &= \frac{K_c / (Rf)}{s \left(1 + \frac{L}{R}s\right) \left(1 + \frac{J}{f}s\right)} = \frac{K_1}{s^n (1 + \tau_1 s)(1 + \tau_2 s)} \end{aligned}$$

Par comparaison :

$$\Rightarrow \begin{cases} K_1 = \frac{K_c}{Rf} \\ n = 1 \\ \tau_1 = \frac{L}{R} \\ \tau_2 = \frac{J}{f} \end{cases}$$

b. L'équation différentielle :

$$\begin{aligned} \frac{\Theta(s)}{V(s)} &= \frac{K_c / (Rf)}{s \left(1 + \frac{L}{R}s\right) \left(1 + \frac{J}{f}s\right)} \Rightarrow \left(s \left(1 + \frac{L}{R}s\right) \left(1 + \frac{J}{f}s\right) \right) \Theta(s) = \frac{K_c}{Rf} V(s) \\ \Rightarrow \left(\frac{LJ}{Rf} s^3 + \left(\frac{L}{R} + \frac{J}{f} \right) s^2 + s \right) \Theta(s) &= \frac{K_c}{Rf} V(s) \Rightarrow \frac{LJ}{Rf} s^3 \Theta(s) + \left(\frac{L}{R} + \frac{J}{f} \right) s^2 \Theta(s) + s \Theta(s) = \frac{K_c}{Rf} V(s) \\ \xrightarrow{z} \boxed{\frac{LJ}{Rf} \frac{d^3 \theta(t)}{dt^3} + \left(\frac{L}{R} + \frac{J}{f} \right) \frac{d^2 \theta(t)}{dt^2} + \frac{d\theta(t)}{dt} = \frac{K_c}{Rf} V(t)} \end{aligned}$$

3. Diagramme de Bode (réponse fréquentielle) :

Soit un nombre complexe : $Z = a + jb$

Le module est : $|Z| = \sqrt{a^2 + b^2}$

L'argument : $\angle Z = \arctan\left(\frac{b}{a}\right)$

Dans le digramme de Bode, la fonction de transfert pouvant être assimilée à un gain complexe, il suffit de tracer les **courbes de variation du module (ou gain) et du déphasage (argument) en fonction de la fréquence (ou de la pulsation)**.

$$F(s) = \frac{K_1}{s(1+\tau_1 s)(1+\tau_2 s)} \Rightarrow F(s) = \frac{K_1 / (\tau_1 \tau_2)}{s \left(\frac{1}{\tau_1} + s \right) \left(\frac{1}{\tau_2} + s \right)} \Rightarrow F(j\omega) = \frac{K_1 / (\tau_1 \tau_2)}{j\omega \left(\frac{1}{\tau_1} + j\omega \right) \left(\frac{1}{\tau_2} + j\omega \right)}$$

$$|F(j\omega)| = \frac{K_1 / (\tau_1 \tau_2)}{\omega \sqrt{\left(\frac{1}{\tau_1}\right)^2 + \omega^2} \sqrt{\left(\frac{1}{\tau_2}\right)^2 + \omega^2}}$$

$$\begin{aligned} \angle F(j\omega) &= \arctan\left(\frac{0}{K_1 / (\tau_1 \tau_2)}\right) - \arctan\left(\frac{\omega}{0}\right) - \arctan\left(\frac{\omega}{1/\tau_1}\right) - \arctan\left(\frac{\omega}{1/\tau_2}\right) \\ &= \arctan(0) - \arctan(\infty) - \arctan\left(\frac{\omega}{1/\tau_1}\right) - \arctan\left(\frac{\omega}{1/\tau_2}\right) \\ &= 0 - \frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{\omega}{1/\tau_1}\right) - \arctan\left(\frac{\omega}{1/\tau_2}\right) \end{aligned}$$

$$\angle F(j\omega) = -\frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{\omega}{1/\tau_1}\right) - \arctan\left(\frac{\omega}{1/\tau_2}\right)$$

| ω | 0 | $1/\tau_1$ | $1/\tau_2$ | ∞ |
|---|----------------------------------|--|--|-------------------------|
| $K_1 / (\tau_1 \tau_2)$ | $K_1 / (\tau_1 \tau_2)$ | $K_1 / (\tau_1 \tau_2)$ | $K_1 / (\tau_1 \tau_2)$ | $K_1 / (\tau_1 \tau_2)$ |
| ω | ω | ω | ω | ω |
| $\sqrt{\left(\frac{1}{\tau_1}\right)^2 + \omega^2}$ | $1/\tau_1$ | ω | ω | ω |
| $\sqrt{\left(\frac{1}{\tau_2}\right)^2 + \omega^2}$ | $1/\tau_2$ | $1/\tau_2$ | ω | ω |
| $ F(j\omega) = \frac{K_1 / (\tau_1 \tau_2)}{\omega \sqrt{\left(\frac{1}{\tau_1}\right)^2 + \omega^2} \sqrt{\left(\frac{1}{\tau_2}\right)^2 + \omega^2}}$ | K_1 / ω | $K_1 / (\tau_1 \omega^2)$ | $K_1 / (\tau_1 \tau_2 \omega^3)$ | |
| $20 \log(F(j\omega))$ | $20 \log(K_1) - 20 \log(\omega)$ | $20 \log(K_1) - 20 \log(\tau_1) - 40 \log(\omega)$ | $20 \log(K_1) - 20 \log(\tau_1) - 20 \log(\tau_2) - 60 \log(\omega)$ | |
| Pentes | <u>(-1)</u> | <u>(-2)</u> | <u>(-3)</u> | |
| Phase (argument) = Pente * $\pi/2$ | $-\pi/2$ | $-\pi$ | $-3\pi/2$ | |

Note : les pentes

$$20 \log(K) \Rightarrow \text{pente} = 0$$

$$20 \log(\omega) \Rightarrow \text{pente} = 1$$

$$20 \log(\omega^2) = 40 \log(\omega) \Rightarrow \text{pente} = 2$$

$$20 \log(\omega^3) = 60 \log(\omega) \Rightarrow \text{pente} = 3$$

$$-20 \log(\omega) \Rightarrow \text{pente} = -1$$

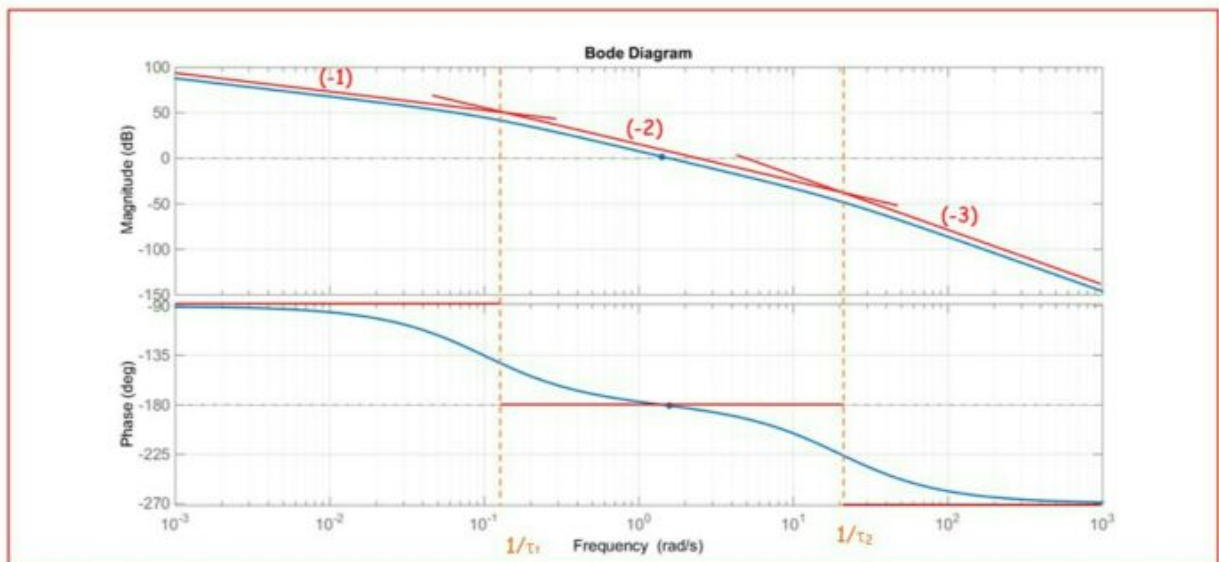
$$-20 \log(\omega^2) = -40 \log(\omega) \Rightarrow \text{pente} = -2$$

$$-20 \log(\omega^3) = -60 \log(\omega) \Rightarrow \text{pente} = -3$$

$$\log\left(\frac{a}{b}\right) = \log(a) - \log(b)$$

$$\log(a^2) = 2 \log(a)$$

$$\log(a * b) = \log(a) + \log(b)$$



En rouge, sont les asymptotes (خطوط المقاربة) et en Blue sont le gain $20 \log(|F(j\omega)|)$ et la phase $\angle F(j\omega)$

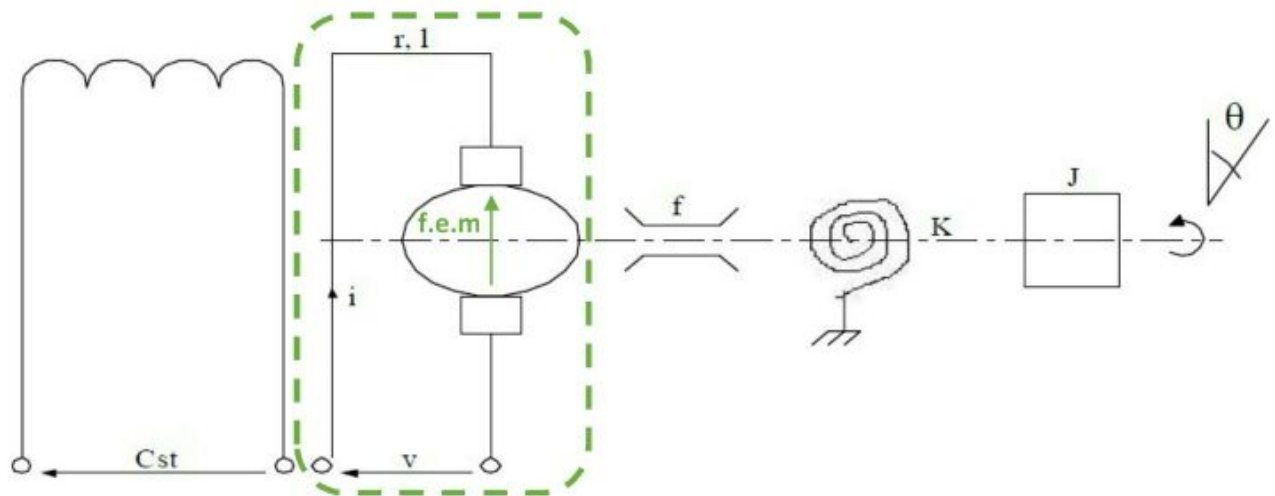
II. Commande par induit (courant inducteur constant) :

Selon les données de l'exercice :

1. La force électromotrice (f.e.m) : $E = K_e \frac{d\theta(t)}{dt}$
2. Le couple moteur : $\Gamma_m = K_i i(t)$
3. $K_i = K_e$

Donc l'équation mécanique du moteur reste la même :

$$K_i I(s) = (Js^2 + fs + K) \Theta(s) \dots (1)$$



Commande par induit :

$$V(t) = ri(t) + l \frac{di(t)}{dt} + E(t) = ri(t) + l \frac{di(t)}{dt} + K_e \frac{d\theta(t)}{dt}$$

$$\xrightarrow{z} \left[\overline{V(s)} = rI(s) + lsI(s) + K_e s\Theta(s) = (r + ls)I(s) + K_e s\Theta(s) \right] \dots (2)$$

1. La fonction de transfert : $F(s) = \frac{\Theta(s)}{V(s)}$

De l'équation (2) on tire $I(s)$: $I(s) = \frac{1}{(r + ls)} (V(s) - K_e s\Theta(s)) \dots (3)$

On remplace l'équation (3) dans l'équation (1) :

$$K_i \frac{1}{(r + ls)} (V(s) - K_e s\Theta(s)) = (Js^2 + fs + K) \Theta(s)$$

$$\Rightarrow \frac{K_i}{(r + ls)} V(s) - \frac{K_i K_e}{(r + ls)} s\Theta(s) = (Js^2 + fs + K) \Theta(s)$$

$$\Rightarrow \frac{K_i}{(r + ls)} V(s) = (Js^2 + fs + K) \Theta(s) + \frac{K_i K_e}{(r + ls)} s\Theta(s)$$

$$\Rightarrow \frac{K_i}{(r + ls)} V(s) = \left((Js^2 + fs + K) + \frac{K_i^2}{(r + ls)} s \right) \Theta(s)$$

$$\Rightarrow \frac{K_i}{(r + ls)} V(s) = \left(\frac{(Js^2 + fs + K)(r + ls) + K_i^2 s}{(r + ls)} \right) \Theta(s)$$

$$\Rightarrow \frac{\Theta(s)}{V(s)} = \frac{\frac{K_i}{(r+ls)}}{\frac{(Js^2 + fs + K)(r+ls) + K_i^2 s}{(r+ls)}}$$

$$\Rightarrow \boxed{\frac{\Theta(s)}{V(s)} = \frac{K_i}{(Js^2 + fs + K)(r+ls) + K_i^2 s}}$$

2. Pour $K=I=f=0$:

a. Calcul de $F(s)$ sous la nouvelle forme :

$$\frac{\Theta(s)}{V(s)} = \frac{K_i}{(Js^2 + \cancel{f}s + \cancel{K})(r + \cancel{l}s) + K_i^2 s} = \frac{K_i}{(rJs^2 + K_i^2 s)} = \frac{K_i}{s(rJs + K_i^2)} = \frac{\frac{K_i}{K_i^2}}{s(rJs + K_i^2)}$$

$$= \frac{1/K_i}{s\left(1 + \frac{rJ}{K_i^2}s\right)} = \frac{K_2}{s(1 + \tau s)}$$

Par comparaison :

$$\Rightarrow \begin{cases} K_2 = \frac{1}{K_i} \\ \tau = \frac{rJ}{K_i^2} \end{cases}$$

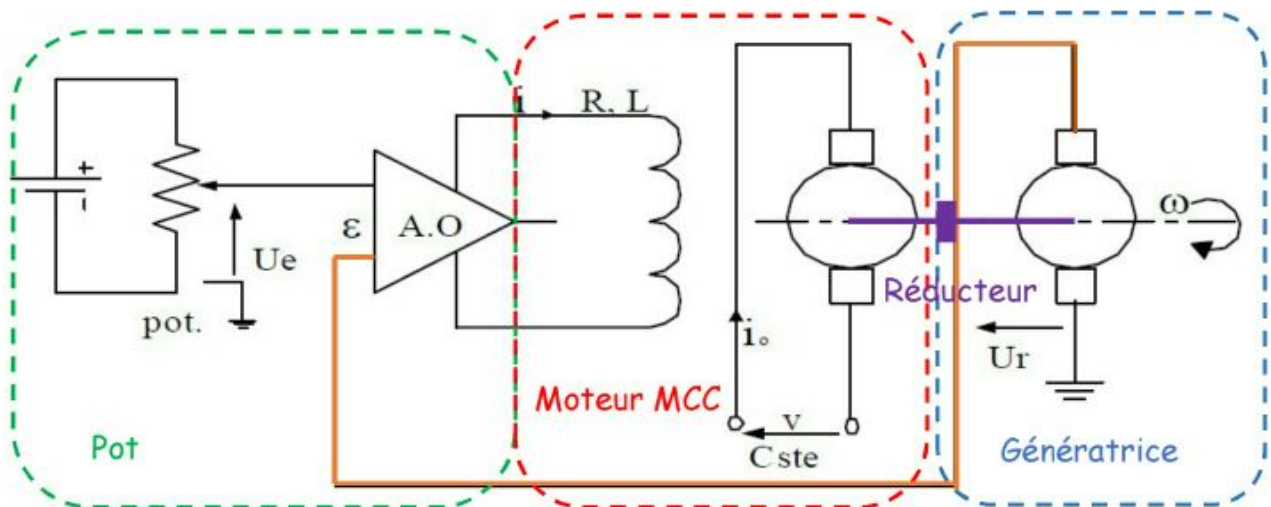
b. L'équation différentielle :

$$\frac{\Theta(s)}{V(s)} = \frac{1/K_i}{s\left(1 + \frac{rJ}{K_i^2}s\right)} \Rightarrow \left(s\left(1 + \frac{rJ}{K_i^2}s\right)\right)\Theta(s) = \frac{1}{K_i}V(s)$$

$$\Rightarrow \left(\frac{rJ}{K_i^2}s^2 + s\right)\Theta(s) = \frac{1}{K_i}V(s) \Rightarrow \frac{rJ}{K_i^2}s^2\Theta(s) + s\Theta(s) = \frac{1}{K_i}V(s)$$

$$\xrightarrow{z} \boxed{\frac{rJ}{K_i^2} \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} + \frac{d\theta(t)}{dt} = \frac{1}{K_i}V(t)}$$

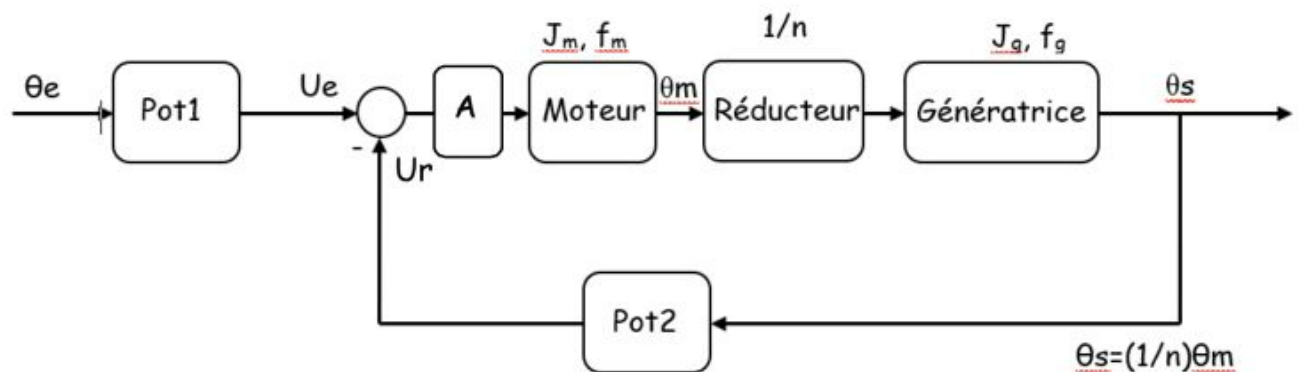
Exercice 02 :



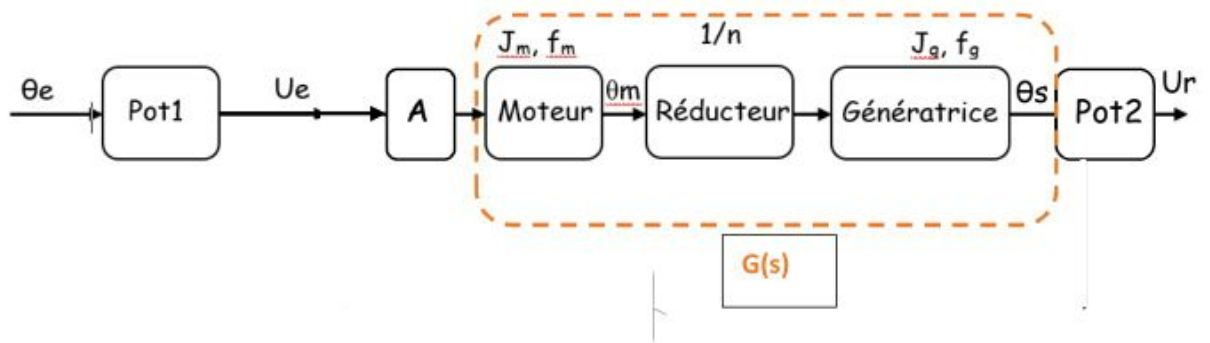
1. Schéma fonctionnel :

Selon les données de l'exercice :

- L'amplificateur opérationnel (A.O.) = A
- λ Représente le rapport de la tension U_r délivrée par la génératrice tachymétrique à la vitesse de rotation ω de l'arbre du moteur.



2. Fonction de transfert en boucle ouverte :



Commande par induit : $l=K=0$

$$V(t) = ri(t) + E(t) = ri(t) + K_e \frac{d\theta_m(t)}{dt} \xrightarrow{z} V(s) = rI(s) + K_e s\Theta_m(s)$$

$$\Rightarrow I(s) = \frac{V(s) - K_e s\Theta_m(s)}{r} \dots (1)$$

$$\Gamma_m = \Gamma_{r-\text{moteur}} + \frac{1}{n} \Gamma_{r-\text{génératrice}} = J_m \frac{d^2\theta_m(t)}{dt^2} + f_m \frac{d\theta_m(t)}{dt} + \frac{1}{n} \left(J_g \frac{d^2\theta_g(t)}{dt^2} + f_g \frac{d\theta_g(t)}{dt} \right)$$

On a : $\boxed{\theta_g(t) = \frac{1}{n} \theta_m(t)}$

θ_g : angle inclinaison de la tige de la génératrice, qui est en même temps θ_s : angle d'inclinaison de la sortie du système. θ_m : angle inclinaison de la tige du moteur.

$$\Gamma_m = \Gamma_{r-\text{moteur}} + \frac{1}{n} \Gamma_{r-\text{génératrice}} = J_m \frac{d^2\theta_m(t)}{dt^2} + f_m \frac{d\theta_m(t)}{dt} + \frac{1}{n^2} \left(J_g \frac{d^2\theta_m(t)}{dt^2} + f_g \frac{d\theta_m(t)}{dt} \right)$$

$$\Gamma_m = \left(J_m + \frac{1}{n^2} J_g \right) \frac{d^2\theta_m(t)}{dt^2} + \left(f_m + \frac{1}{n^2} f_g \right) \frac{d\theta_m(t)}{dt}$$

$$K_i i(t) = \left(J_m + \frac{1}{n^2} J_g \right) \frac{d^2\theta_m(t)}{dt^2} + \left(f_m + \frac{1}{n^2} f_g \right) \frac{d\theta_m(t)}{dt}$$

$$\xrightarrow{z} K_i I(s) = \left(\left(J_m + \frac{1}{n^2} J_g \right) s^2 + \left(f_m + \frac{1}{n^2} f_g \right) s \right) \Theta_m(s) \dots (2)$$

Nous remplaçons l'équation (1) dans l'équation (2) :

$$\begin{aligned}
K_i \frac{V(s) - K_e s \Theta_m(s)}{r} &= \left(\left(J_m + \frac{1}{n^2} J_g \right) s^2 + \left(f_m + \frac{1}{n^2} f_g \right) s \right) \Theta_m(s) \\
\Rightarrow V(s) &= \frac{r}{K_i} \left(\left(J_m + \frac{1}{n^2} J_g \right) s^2 + \left(f_m + \frac{1}{n^2} f_g \right) s \right) \Theta_m(s) + K_e s \Theta_m(s) \\
\Rightarrow V(s) &= \frac{r}{K_i} \left(\left(J_m + \frac{1}{n^2} J_g \right) s^2 + \left(f_m + \frac{1}{n^2} f_g + K_e \right) s \right) \Theta_m(s) \\
\Rightarrow V(s) &= \left(\frac{r}{K_i} \left(J_m + \frac{1}{n^2} J_g \right) s^2 + \frac{r}{K_i} \left(f_m + \frac{1}{n^2} f_g + \frac{K_e K_i}{r} \right) s \right) \Theta_m(s) \\
\Rightarrow \frac{\Theta_m(s)}{V(s)} &= \frac{K_i * 1}{K_i * \left(\frac{r}{K_i} \left(J_m + \frac{1}{n^2} J_g \right) s^2 + \frac{r}{K_i} \left(f_m + \frac{1}{n^2} f_g + \frac{K_e K_i}{r} \right) s \right)} \\
&= \boxed{\frac{K_i}{\left(r \left(J_m + \frac{1}{n^2} J_g \right) s^2 + r \left(f_m + \frac{1}{n^2} f_g + \frac{K_e K_i}{r} \right) s \right)}}
\end{aligned}$$

Nous on cherche : $G(s) = \frac{\Theta_s(s)}{V(s)}$, donc :

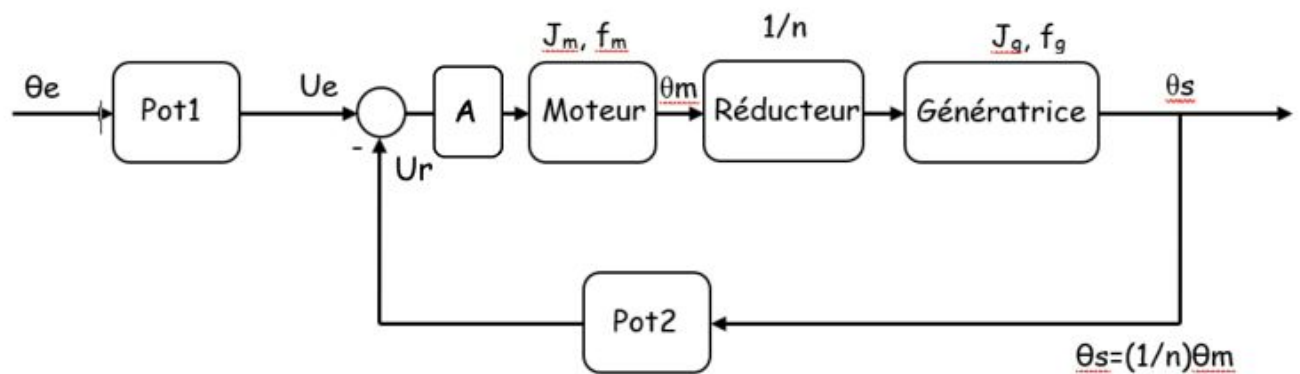
$$\begin{aligned}
\frac{\Theta_s(s)}{V(s)} &= \frac{1}{n} \frac{\Theta_m(s)}{V(s)} = \frac{K_i}{n \left(r \left(J_m + \frac{1}{n^2} J_g \right) s^2 + r \left(f_m + \frac{1}{n^2} f_g + \frac{K_e K_i}{r} \right) s \right)} \\
\Rightarrow G(s) &= \frac{\Theta_s(s)}{V(s)} = \boxed{\frac{K_i}{\left(r \left(n J_m + \frac{1}{n} J_g \right) s^2 + r \left(n f_m + \frac{1}{n} f_g + \frac{n K_i^2}{r} \right) s \right)}} \\
\Rightarrow A^* G(s) &= \frac{A K_i}{\left(r \left(n J_m + \frac{1}{n} J_g \right) s^2 + r \left(n f_m + \frac{1}{n} f_g + \frac{n K_i^2}{r} \right) s \right)}
\end{aligned}$$

$$\Theta_s(s) = \frac{AK_i}{\left(r \left(nJ_m + \frac{1}{n} J_g \right) s^2 + r \left(nf_m + \frac{1}{n} f_g + \frac{nK_i^2}{r} \right) s \right)} V(s)$$

$$\begin{cases} \Theta_e(s) \rightarrow U_e(s) \\ \Theta_s(s) \rightarrow U_r(s) \end{cases} \Rightarrow U_r(s) = \frac{\Theta_s(s)}{\Theta_e(s)} U_e(s)$$

$$\Rightarrow U_r(s) = \frac{AK_i V(s)}{\Theta_e \left(r \left(nJ_m + \frac{1}{n} J_g \right) s^2 + r \left(nf_m + \frac{1}{n} f_g + \frac{nK_i^2}{r} \right) s \right)} U_e(s)$$

3. Fonction de transfert en boucle fermée :



$$\Theta_s(s) = A(s)G(s)(U_e(s) - U_r(s))$$

$$\Theta_s(s) = \frac{AK_iV(s)}{\left(r\left(nJ_m + \frac{1}{n}J_g\right)s^2 + r\left(nf_m + \frac{1}{n}f_g + \frac{nK_i^2}{r}\right)s\right)} \left(U_e(s) - \frac{\Theta_s(s)}{\Theta_e(s)}U_e(s)\right)$$

$$\Theta_s(s) = \frac{AK_iV(s)}{\left(r\left(nJ_m + \frac{1}{n}J_g\right)s^2 + r\left(nf_m + \frac{1}{n}f_g + \frac{nK_i^2}{r}\right)s\right)} \left(1 - \frac{\Theta_s(s)}{\Theta_e(s)}\right)U_e(s)$$

$$\left(1 + \frac{AK_iV(s)}{\left(r\left(nJ_m + \frac{1}{n}J_g\right)s^2 + r\left(nf_m + \frac{1}{n}f_g + \frac{nK_i^2}{r}\right)s\right)} \frac{U_e(s)}{\Theta_e(s)}\right) \Theta_s(s) = \frac{AK_iV(s)}{\left(r\left(nJ_m + \frac{1}{n}J_g\right)s^2 + r\left(nf_m + \frac{1}{n}f_g + \frac{nK_i^2}{r}\right)s\right)} U_e(s)$$

$$\Theta_s(s) = \frac{\frac{AK_iV(s)}{\left(r\left(nJ_m + \frac{1}{n}J_g\right)s^2 + r\left(nf_m + \frac{1}{n}f_g + \frac{nK_i^2}{r}\right)s\right)} U_e(s)}{\left(1 + \frac{AK_iV(s)}{\left(r\left(nJ_m + \frac{1}{n}J_g\right)s^2 + r\left(nf_m + \frac{1}{n}f_g + \frac{nK_i^2}{r}\right)s\right)} \frac{U_e(s)}{\Theta_e(s)}\right)}$$

| |
|---|
| $\Theta_s(s) = \frac{AK_iV(s)\Theta_e(s)U_e(s)}{\left(r\left(nJ_m + \frac{1}{n}J_g\right)s^2 + r\left(nf_m + \frac{1}{n}f_g + \frac{nK_i^2}{r}\right)s\right)\Theta_e(s) + AK_iV(s)U_e(s)}$ |
|---|