

TD 5 – Moteur 2

Boucles de courant, de vitesse et de position

1 Présentation

Nous allons reprendre l'étude faite dans le TD précédent sur le fonctionnement et le contrôle d'un moteur à courant continu à aimant permanent. On a vu que le courant consommé par le moteur peut dépasser les limites autorisées par le constructeur et donc entraîner la destruction du moteur. Pour régler ce problème nous allons limiter la valeur du courant en amont du moteur. Ensuite, nous allons réguler la vitesse et enfin la position.

On rappelle que les équations physiques décrivant le fonctionnement du moteur sont :

$$u(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + E_m(t) \quad J \frac{d\omega(t)}{dt} = C_m(t) - C_r(t)$$
$$C_m(t) = K_c i(t) \quad E_m(t) = K_c \omega(t)$$

$C_r(t)$ représente les couples résistants présents et J le moment d'inertie de la charge et du moteur. Le contexte utilisé dans le montage de simulation est basé sur la documentation technique du moteur (voir annexe du TD 4) :

```
R=0.8;
L=400E-6;
Kc=20.52E-3;
J=18E-5;
Cr=9.23E-3;
taum=R*J/Kc^2;
taue=L/R;
Krpm=60/(2*pi);
Kci=1;
Kd=0.001;
Ts=1;
```

Description des variables :

- K_{ci} représente le gain du capteur de courant (unité [V/A])
- K_d représente le gain du capteur de vitesse (unité [V/tr/min])
- τ_m représente la constante de temps mécanique
- τ_e représente la constante de temps électrique

2 Boucle de courant

Nous allons dans un premier temps réguler l'évolution du courant. Il faut donc mesurer le courant consommé. Pour cela, on utilisera un capteur à effet Hall ou plus simplement une résistance de faible valeur dont on mesurera la chute de tension aux bornes.

On rappelle que d'après la documentation technique du moteur le courant maximum admissible est de 2.8 [A].

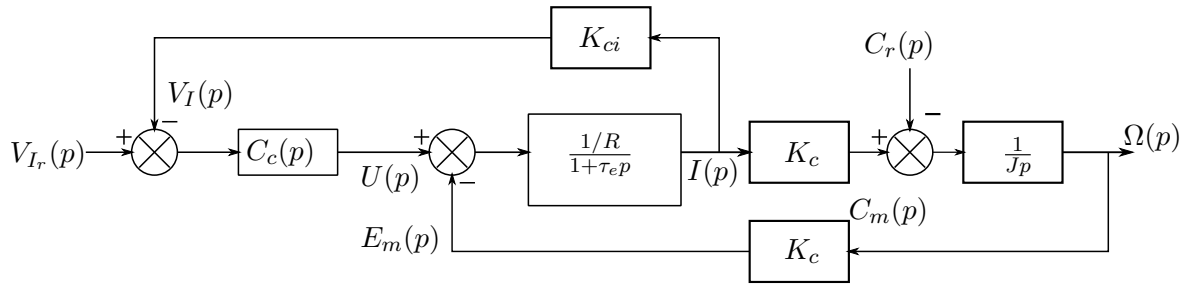
2.1 Théorie ($C_r = 0$)

Pour simplifier l'étude théorique on supposera toujours dans la suite que $\tau_m \gg \tau_e$ donc que $1 + \tau_m p + \tau_m \tau_e p^2 = (1 + \tau_m p)(1 + \tau_e p)$

1. En utilisant les équations du moteur et en supposant que $C_r(t) = 0$ montrer que l'expression de la fonction de transfert reliant la tension $U(p)$ au courant $I(p)$ s'écrit

$$A(p) = I(p)/U(p) = \frac{1}{R} \frac{\tau_m p}{(1 + \tau_m p)(1 + \tau_e p)}$$

Le montage représentant la boucle de courant est le suivant :

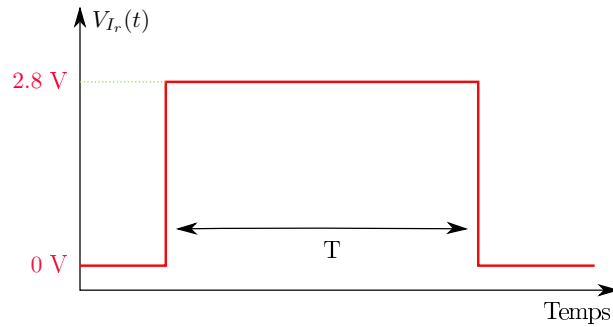


$V_{Ir}(p)$ représente la consigne et $C_c(p) = G_i \frac{1 + \tau_e p}{\tau_e p}$ un correcteur proportionnel-intégral.

2. On cherche à contrôler le courant alors que la consigne est une tension. Si on veut que le courant consommé soit de 1 [A] comment doit-on choisir $V_{Ir}(p)$?
3. Calculer l'expression de la fonction de transfert en boucle fermée

$$A_I(p) = \frac{I(p)}{V_{Ir}(p)} = \frac{C_c(p)A(p)}{1 + K_{ci}C_c(p)A(p)} = \frac{K_1}{1 + \tau_1 p}$$

4. Donner les expressions du gain statique K_1 et de la constante de temps τ_1 en fonction de G_i . Faites l'application numérique avec $G_i = 1$. On prendra pour la suite $G_i = 1$.
5. Supposons que $V_{Ir}(t)$ soit un créneau de durée T et d'amplitude 2.8 V.



Calculer la durée T nécessaire pour que la vitesse atteigne 11000 tr/min. Peut-on réduire cette valeur de T sans détruire le moteur ?

2.2 Simulation

1. Construire avec le logiciel **Xcos** le montage permettant de simuler la boucle de courant avec le correcteur $C_c(p)$.
2. Faire une simulation avec comme entrée le créneau défini dans la partie théorique. Vérifier que les résultats de la simulation sont en accord avec les résultats théoriques. Pour cela il faut visualiser le courant et la vitesse. On visualisera également l'entrée du correcteur $V_{I_r} - V_I$. Attention en théorie on a supposé que $C_r(t) = 0$. Il faut donc faire une simulation avec $C_r(t) = 0$ pour pouvoir comparer.
3. Faites une simulation avec $C_r(t) = 9.2310^{-3}$ Nm. Que se passe-t-il ? Ne faites pas de nouveaux calculs mais donner des explications qualitatives.

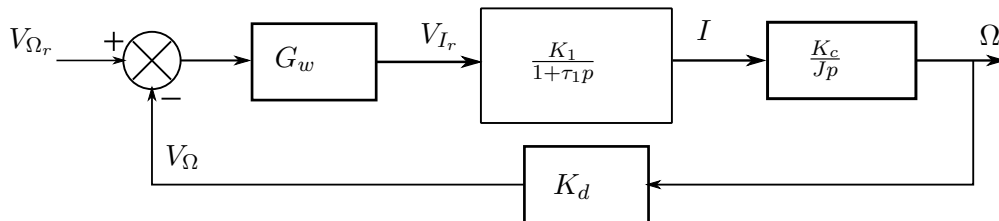
3 Boucle de vitesse

Nous allons maintenant réguler l'évolution de la vitesse. Pour cela nous allons mesurer la vitesse en utilisant un capteur de gain $K_d = 0.001$ [V/tr/min] = $0.001 \times 60/(2\pi)$ [rad/s].

3.1 Théorie

On supposera dans l'étude théorique que $C_r(t) = 0$.

Le montage représentant la boucle de vitesse est le suivant :



G_w représente un gain dont la valeur reste à déterminer.

1. Donner l'expression de la fonction de transfert en boucle fermée $B(p) = \Omega(p)/V_{\Omega_r}(p)$

2. Calculer la valeur de G_w donnant un coefficient d'amortissement en boucle fermée de 0.7. On notera cette valeur G_{w0} .
3. Pour la valeur de G_{w0} trouvée précédemment calculer la valeur de la pulsation propre ω_0 de $B(p)$
4. Utiliser les commandes `evans` et `sgrid` de `Scilab` pour vérifier la valeur de gain trouvée ainsi que celle de ω_0 . Dans la commande `evans` on prendra $Kmax = 2000$ (cf doc de la commande).

3.2 Simulation

3.2.1 Vérification de la partie théorique

1. Compléter le montage de simulation de la boucle de courant dans le but de simuler la boucle de vitesse.
2. Faire une simulation avec comme entrée un échelon de vitesse de 0 [tr/min] à 11000 [tr/min]. Vérifier que les résultats de la simulation sont en accord avec les résultats théoriques. Pour cela on mesurera l'amplitude du premier dépassement. Attention en théorie on a supposé que $C_r(t) = 0$. Il faut donc faire une simulation avec $C_r(t) = 0$ pour pouvoir comparer.
3. Visualiser l'évolution du courant au cours du temps. Commenter le tracer obtenu.

3.2.2 Montage industriel

Pour protéger le matériel dans les systèmes industriels on place une saturation en sortie du gain G_w pour limiter la valeur du courant $i_r(t)$ à $\pm 2.8A$. Nous allons donc ajouter cette saturation dans le montage de simulation. Dans la suite, nous allons travailler sur deux montages en simulation. Un montage sans saturation permettant de vérifier les résultats théoriques et un montage incluant la saturation de courant. Il faut donc créer deux fichiers différents.

On prendra dans les simulations $G_w = G_{w0}$.

1. Compléter le montage de simulation en plaçant la saturation en courant. Justifier vos choix pour le paramétrage du bloc "saturation".
2. Faire la même simulation que précédemment mais maintenant avec la saturation de courant. Visualiser la vitesse, le courant et la tension V_{I_r} . Expliquer les courbes obtenues. Ne pas faire de nouveaux calculs mais donner des explications qualitatives.

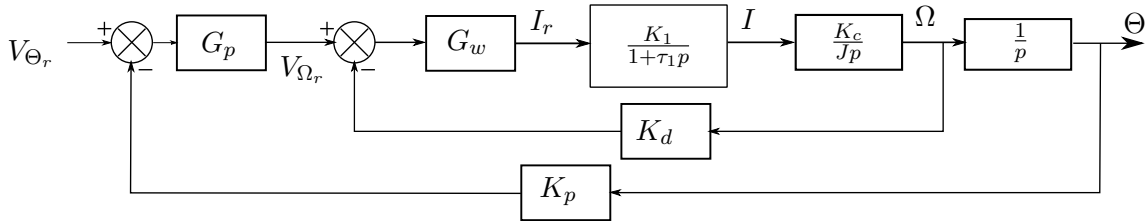
4 Boucle de position

Nous allons maintenant réguler l'évolution de la position. Pour cela nous allons mesurer la position en utilisant un capteur de gain $K_p = 10$ [V/rad]. On rappelle que la position est l'intégrale de la vitesse.

4.1 Théorie

On supposera dans l'étude théorique que $C_r(t) = 0$. On utilisera la valeur de G_w trouvée dans le paragraphe précédent

Le montage représentant la boucle de position est le suivant :



G_p représente un gain dont la valeur reste à déterminer.

1. Donner l'expression de la fonction de transfert en boucle fermée $D(p) = \Theta(p)/V_{\Theta_r}(p)$ en fonction de $B(p)$ puis en fonction de l'amortissement et de la pulsation propre de $B(p)$ et des paramètres G_p , K_p et K_d .
2. En utilisant le critère de Routh, déterminer la plage de valeurs de G_p garantissant la stabilité du montage en boucle fermée. On notera ce gain G_{pmax} .
3. Déterminer la valeur du gain G_p donnant une marge de gain de 20 dB. On notera ce gain G_{p0} .
4. Vérifier la valeur trouvée précédemment en traçant le lieu de Black d'un système que l'on précisera. En déduire la valeur de la marge de phase (à vérifier avec `p_margin`).
5. Tracer le lieu d'Evans correspondant en utilisant la fonction de transfert en boucle ouverte. Dans la commande `evans` on prendra $Kmax = 2.5$ (cf doc de la commande)
6. Peut-on dire que pour $G_p = G_{p0}$ on a deux pôles dominants en boucle fermée? Quel est le pôle dominant? Que peut-on en conclure sur la forme de la réponse indicielle et sur la rapidité du montage?

4.2 Simulation

On prendra dans les simulations $G_p = G_{p0}$.

4.2.1 Vérification de la théorie

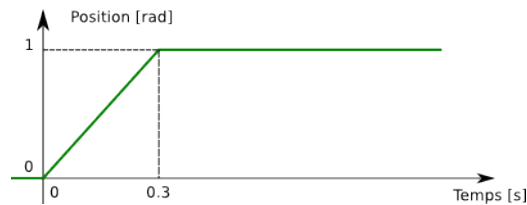
Attention pour vérifier les résultats théoriques il faut utiliser le montage sans la saturation de courant.

1. Compléter le montage de simulation de la boucle de vitesse dans le but de simuler la boucle de position.
2. Faire une simulation avec un échelon de position de 0 [rad] à 1 [rad] comme entrée. Vérifier que les résultats de la simulation sont en accord avec les résultats théoriques. Attention en théorie on a supposé que $C_r(t) = 0$. Il faut donc faire une simulation avec $C_r(t) = 0$ pour pouvoir comparer.

4.2.2 Montage industriel

On utilise maintenant le montage avec la saturation de courant. Choisir une durée de simulation de 1 [s]

1. Compléter le montage de simulation de la boucle de vitesse avec la saturation de courant dans le but de simuler la boucle de position.
2. Faire une simulation avec un échelon de position de 0 [rad] à 1 [rad] comme entrée. Il faut donc faire une simulation avec $C_r(t) = 0$ pour pouvoir comparer.
3. Visualiser la position, la vitesse, le courant. Commenter les courbes obtenues.
4. Modifier la valeur de G_p de façon à ne pas avoir de dépassement sur la réponse indicielle. Quelle valeur avez vous choisie ?
5. Prendre de nouveau $G_p = G_{p0}$. Faire une simulation avec la consigne de position suivante :



Théoriquement tracer les consignes de vitesse et d'accélération correspondant à la consigne de position utilisée.

En simulation visualiser la position, la vitesse, le courant. Commenter les courbes obtenues. Augmenter, diminuer le temps de montée de la consigne. Faire les simulations correspondantes et commenter les résultats obtenus.