Maîtrise E.E.A. EEP

UE5 - Commande des Convertisseurs et Machines

Examen du 6 septembre 2004 *Sans Document*
*Durée : **2H***

PROBLÈME I

La figure 2 représente un variateur de vitesse destiné à entraîner une pompe hydraulique.

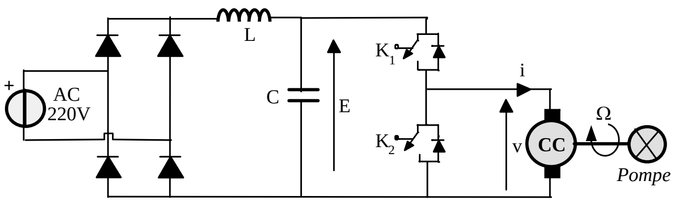


Figure 2

Les caractéristiques du système sont les suivantes :

- Hacheur série :
  - E=200 V (tension supposée continue)
  - Fréquence de découpage F=15 kHz
  - Commande M.L.I. (rapport cyclique α)
- Moteur à courant continu et aimants permanents :
  - Résistance de l'induit $R = 0{,}8\ \Omega$
  - Inductance de l'induit $L = 5{,}4$ mH
  - Constante de couple $K_m = 0{,}315\ \mathrm{N.A^{-1}}$
  - Moment d'inertie $J_m = 130 \cdot 10^{-5}\ \mathrm{kg.m^2}$
- Pompe :
  - Moment d'inertie $J_p = 100 \cdot 10^{-5}\ \mathrm{kg.m^2}$
  - Couple résistant en charge C_r de type **visqueux** ($C_r = 2{,}2$ N.m à 2500 tr.mn^{-1})

1) Peut-on inverser le sens de rotation de la pompe ? Peut-on la freiner au moyen du variateur de vitesse ? Expliquer.

2) Le rapport cyclique du hacheur série est limité à 0,6. Quelle vitesse maximale peut-on théoriquement atteindre lorsque la pompe fonctionne à vide ? (Les différentes pertes seront négligées).

3) Etablir le schéma-blocs décomposé du moteur couplé à sa charge mécanique (v : entrée; Ω : sortie). Calculer la constante de temps électrique du moteur et la constante de temps mécanique de l'ensemble.

Dans la suite, on se propose de réaliser un asservissement de la vitesse de rotation Ω de la pompe. La structure de commande retenue comporte une boucle interne de courant sur le moteur et une boucle externe de vitesse.

- **Etude de la boucle de courant**

Cahier des charges :
- Temps de réponse à 95% en poursuite : $t_{r_i} = 2$ ms
- Erreur statique de position nulle.

4) En utilisant un modèle électrique du moteur aux valeurs moyennes ($V(t) = \frac{1}{T}\int_{t-T}^{t} v(\tau)d\tau$, $I(t) = \frac{1}{T}\int_{t-T}^{t} i(\tau)d\tau$, T période de découpage du hacheur), quel modèle simplifié peut-on employer pour représenter le hacheur ? Justifier.

La boucle de courant est réalisée suivant le schéma de principe de la figure 3.

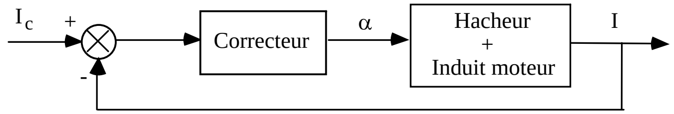


Figure 3

5) Expliciter le schéma-bloc de cet asservissement en justifiant le type de correcteur retenu.

6) Déterminer les paramètres du correcteur pour satisfaire le cahier des charges par une méthode au choix, mais pour laquelle les avantages et les inconvénients seront cités.
On rappelle que le temps de réponse est :
- $t_r = 3\tau$ pour un système du 1° ordre de constante de temps τ,
- $t_r = \frac{3}{\omega_n}$ pour un système du 2° ordre de pulsation propre non amortie ω_n et de facteur d'amortissement z=0,7.

7) Comment améliorer le rejet de la "perturbation" principale de cette boucle?

- **Etude de la boucle de vitesse**

Cahier des charges :
- Temps de réponse à 95% en poursuite : $t_{r_i} = 25$ ms
- Erreur statique de position nulle.

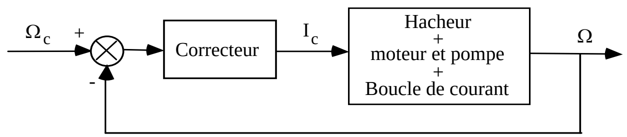


Figure 4

8) Pour réaliser la synthèse de l'asservissement de vitesse représenté schématiquement sur la figure 4, quelle hypothèse simplificatrice peut-on employer ?

9) Expliciter alors le schéma-bloc de cet asservissement en justifiant le type de correcteur choisi.

10) En utilisant une méthode de compensation de pôle, déterminer les paramètres du correcteur.

PROBLÈME II

• *On se propose d'étudier une régulation de la tension de sortie d'un élévateur de tension, réversible en courant, commandé en MLI, dont le schéma est représenté sur la figure 2. La charge est assimilée à une résistance R.*

On donne : E=36 V L = 100 μH C_s= 600μF R=4Ω Fréquence de découpage : 40 kHz

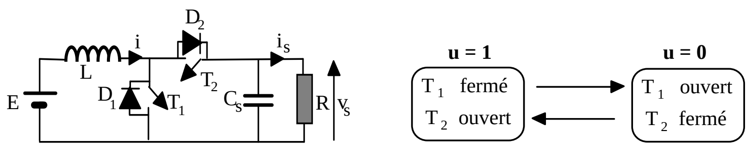


Figure 2

1) Donner la représentation d'état en variables instantanées. En déduire la représentation d'état en valeurs moyennes. Les variables moyennes seront écrites en lettres majuscules et on notera α le rapport cyclique.

Par la suite, on étudiera le fonctionnement autour d'un point d'équilibre statique défini par $[\alpha_0 , V_{s0}]$. *Les valeurs moyennes seront notées sous la forme* $\alpha = \alpha_0 + \tilde{\alpha}$, $V_s = V_{s0} + \tilde{V}_s$ *et ainsi de suite. Les lettres majuscules surmontées du signe ~ représentent les variations des grandeurs autour du point d'équilibre statique.*

2) Donner les conditions d'équilibre statique. En particulier, déterminer la relation liant V_{s0} et α_0. Que doit valoir le rapport cyclique pour obtenir une tension moyenne de sortie égale à 2E ?

Afin de réguler la tension de sortie, on développe un modèle dynamique aux petites variations du convertisseur commandé par MLI. Le retard pur du modulateur MLI est négligé.

3) Déterminer le modèle d'état aux petites variations ("petit signal") par un développement au premier ordre du modèle moyen obtenu en **1)**.

4) En employant les conditions d'équilibre obtenues en 2, déduire la fonction de transfert $\dfrac{\tilde{V}_s(p)}{\tilde{\alpha}(p)}$ sous la forme

$G(p) = K_0 \dfrac{1-\tau_0 p}{1+\dfrac{2z_0}{\omega_{n0}}p+\dfrac{p^2}{\omega_{n0}^2}}$. Expliciter les paramètres K_0, τ_0, ω_{n0} et z_0 en fonction de E, L, C_s, R et α_0.

5) Calculer numériquement cette fonction de transfert autour du point d'équilibre correspondant à $V_{s0} = 2E$.

On réalise une boucle de régulation de tension autour du point $V_{s0} = 2E$, *tel que représenté sur la figure 3. En première approche, la variable Δ symbolise une entrée de perturbation, rendue homogène à une variation de rapport cyclique.*

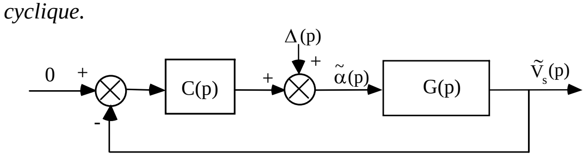


Figure 3

On désire tout d'abord effectuer le choix d'un correcteur à avance de phase, $C(p) = K\dfrac{1+aTp}{1+Tp}$, *dont les principales caractéristiques sont données en annexe. On supposera pour cela que l'entrée de perturbation est*

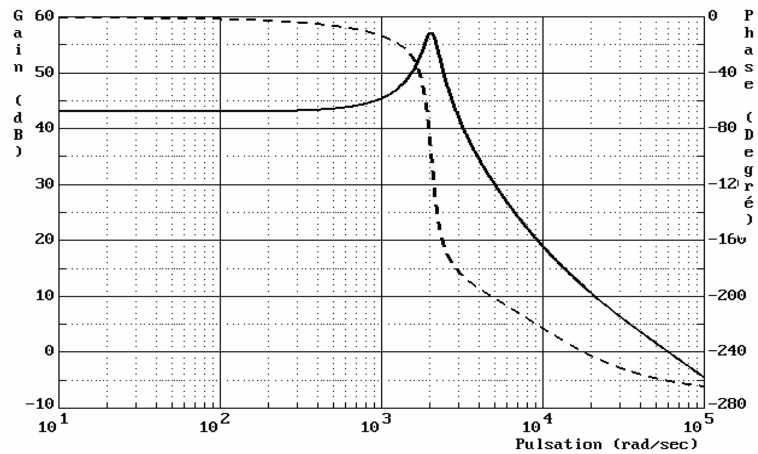
Université Paul Sabatier U.F.R. P.C.A. Année Universitaire 2003-04

nulle. On admettra enfin que le critère du revers est applicable, bien que le système considéré ne soit pas a minimum de phase.

6) Calculer les paramètres du correcteur a, T, et K qui permettent d'obtenir une marge de phase corrigée $\Delta\Phi_C$ = + 45° pour la fonction de transfert en <u>boucle ouverte corrigée</u> C(p)G(p), à une pulsation ω_{c0d} =5000 rd/s. Le lieu de Bode de G(p) est donné en annexe. La démarche proposé devra être suffisamment détaillée.

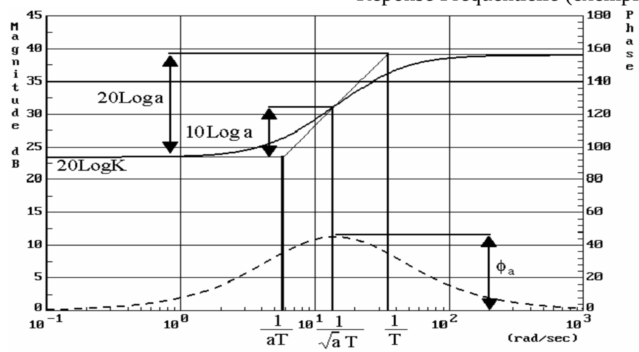
7) Quelle correction série *supplémentaire* conviendrait-il d'apporter à l'asservissement ? Pourquoi ? Expliciter la fonction de transfert du correcteur complet et dessiner un schéma-bloc de principe de la régulation modifiée. Indiquer *qualitativement* quel positionnement fréquentiel pourrait être employé pour cette correction série supplémentaire en partant des résultats obtenus à la question 5.

• ANNEXE 1 : RÉPONSE FRÉQUENTIELLE PETIT SIGNAL DE L'ÉLÉVATEUR $G(j\omega)$



• ANNEXE 2 : CORRECTEUR À AVANCE DE PHASE $D(p) = K\dfrac{1+aTp}{1+Tp}$

• Réponse Fréquentielle (exemple) :



• Phase maximale apportée par le correcteur : $\boxed{\phi_a = \arcsin\dfrac{a-1}{a+1}}$;

qui donne : $\boxed{a = \dfrac{1+\sin\phi_a}{1-\sin\phi_a}}$

* * *

Maîtrise E.E.A. EEP

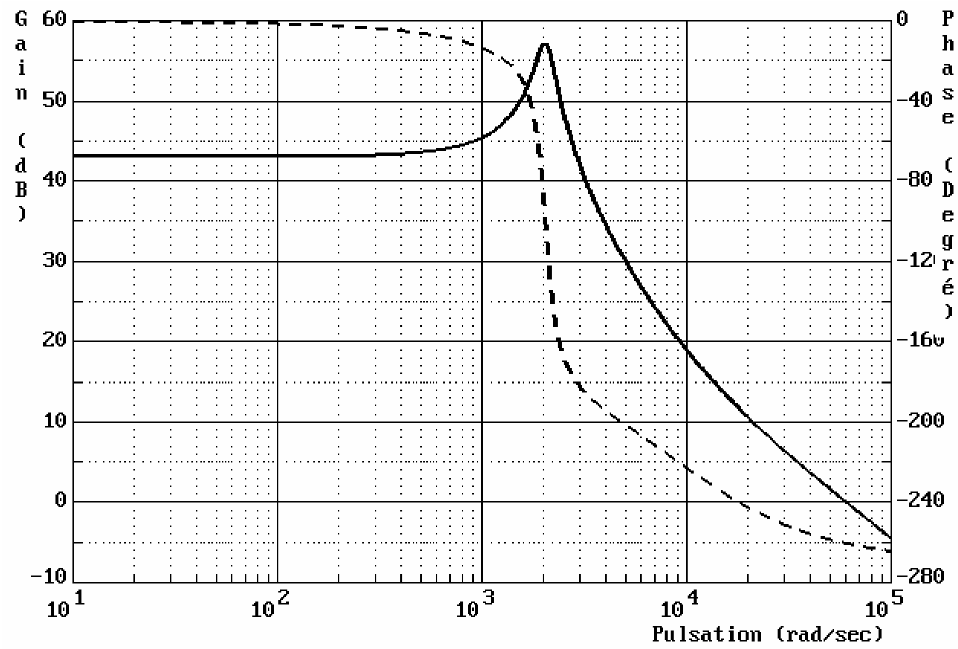
UE5 - Commande des Convertisseurs et Machines

Examen du 6 septembre 2004

NOM :

Prénom :

N° carte étudiant :



Maîtrise E.E.A. EEP *UE5* - Commande des Convertisseurs et Machines

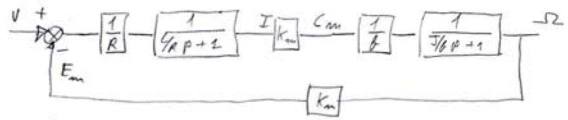
Examen du 6 septembre 2004

Correction PB I

1)

2) $V = 0{,}6E = K_m \Omega_{max} \Rightarrow \Omega_{max} = \frac{0{,}6E}{K_m} = 381\ rd/s = \underline{3638\ t/mn}$

3)



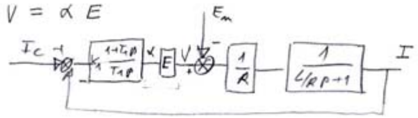
$\tau_e = \frac{L}{R} = \underline{6{,}75\ ms}$

$J = J_m + J_p = 230\cdot10^{-5}\ kg\,m^2 \qquad f = \frac{2{,}2\times 30}{2500\ \pi} = 8{,}4\cdot10^{-3}\ N.m.rd^{-1}s$

$\tau_m = \frac{J}{f} = \underline{273\ ms}$

4) $V = \alpha E$

5)



6) a) compensation de pôle : $T_1 = L/R = 6{,}75\ ms$

$$\left.\frac{I(p)}{I_c(p)}\right|_{E_m=0} = \frac{1}{\frac{L}{K_1E}p+1} = \frac{1}{\tau_1 p+1} \qquad \tau_1 = \frac{t_r}{3} = 0{,}67\ ms$$

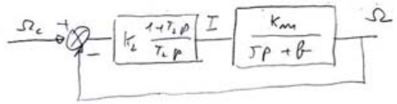
$$K_1 = \frac{L}{\tau_1 E} = 0{,}04\ V/A$$

b) $$\left.\frac{I(p)}{I_c(p)}\right|_{E_m=0} = \frac{T_1p+1}{\frac{T_1L}{K_1E}p^2 + T_1\frac{R+K_1E}{K_1E}p+1} = \frac{T_1p+1}{\frac{p^2}{\omega_{n_1}^2}+\frac{2z_1}{\omega_{n_1}}p+1}$$

$$\begin{cases} K_1 = \frac{1}{E}(2z_1\omega_{n_1}L - R) \\ T_1 = \frac{K_1E}{L\omega_{n_1}^2} \end{cases} \qquad \omega_{n_1} = \frac{3}{t_r} = 1492\ rd/s \qquad z_1 = 0{,}7$$

$$\begin{cases} K_1 = 0{,}052\ V/A \\ T_1 = 0{,}364\ ms. \end{cases}$$

9)



10) $T_2 = \frac{J}{f} = 273\ ms.$

$$\frac{\Omega(p)}{\Omega_c(p)} = \frac{\frac{K_2K_m}{Jp}}{1+\frac{K_2K_m}{Jp}} = \frac{K_2K_m}{Jp+K_2K_m} = \frac{1}{\frac{J}{K_2K_m}p+1} = \frac{1}{\tau_2p+1}$$

$\tau_2 = \frac{t_{r_2}}{3} = 8{,}3\ ms. \Rightarrow K_2 = \frac{J}{K_m\tau_2} = \underline{0{,}876\ A\,rd^{-1}s.}$

Correction PB II

1) $$\begin{cases} \dfrac{di}{dt} = \dfrac{E}{L} - \dfrac{v_s}{L}(1-u) \\ \dfrac{dv_s}{dt} = \dfrac{i(1-u)}{C_s} - \dfrac{v_s}{RC_s} \end{cases} \xrightarrow{\text{moyen}} \begin{cases} \dfrac{dI}{dt} = \dfrac{E}{L} - \dfrac{V_s}{L}(1-\alpha) \\ \dfrac{dV_s}{dt} = \dfrac{I(1-\alpha)}{C_s} - \dfrac{V_s}{RC_s} \end{cases}$$

2) $V_{s_0} = \dfrac{E}{1-\alpha_0}$ et $I_0(1-\alpha_0) = \dfrac{V_{s_0}}{R}$ $\quad V_{s_0} = 2E \Rightarrow \alpha_0 = 0{,}5$

3) $$\begin{cases} \dfrac{d\tilde{I}}{dt} = -\dfrac{1-\alpha_0}{L}\tilde{V}_s + \dfrac{V_{s_0}}{L}\tilde{\alpha} \\ \dfrac{d\tilde{V}_s}{dt} = \dfrac{1-\alpha_0}{C_s}\tilde{I} - \dfrac{1}{RC_s}\tilde{V}_s - \dfrac{I_0}{C_s}\tilde{\alpha} = \dfrac{1-\alpha_0}{C_s}\tilde{I} - \dfrac{1}{RC_s}\tilde{V}_s - \dfrac{V_{s_0}}{RC_s(1-\alpha_0)}\tilde{\alpha} \end{cases}$$

4) $$p\tilde{I}(p) = -\frac{1-\alpha_0}{L}\tilde{V}_s(p) + \frac{V_{s_0}}{L}\tilde{\alpha}(p)$$

$$p\tilde{V}_s(p) = \frac{1-\alpha_0}{C_s}\tilde{I}(p) - \frac{1}{RC_s}\tilde{V}_s(p) - \frac{V_{s_0}}{RC_s(1-\alpha_0)}\tilde{\alpha}(p)$$

$$p^2\tilde{V}_s(p) = -\frac{(1-\alpha_0)^2}{LC_s}\tilde{V}_s(p) + \frac{(1-\alpha_0)V_{s_0}}{LC_s}\tilde{\alpha}(p) - \frac{1}{RC_s}p\tilde{V}_s(p) - \frac{V_{s_0}}{RC_s(1-\alpha_0)}p\tilde{\alpha}(p)$$

$$\left(\frac{LC_s}{(1-\alpha_0)^2}p^2 + \frac{L}{R(1-\alpha_0)^2}p + 1\right)\tilde{V}_s(p) = \left(\frac{V_{s_0}}{1-\alpha_0} - \frac{L\,V_{s_0}}{R(1-\alpha_0)^3}p\right)\tilde{\alpha}(p)$$

$$\boxed{\frac{\tilde{V}_s(p)}{\tilde{\alpha}(p)} = \frac{V_{s_0}}{1-\alpha_0}\,\frac{1-\dfrac{L}{R(1-\alpha_0)^2}p}{1+\dfrac{L}{R(1-\alpha_0)^2}p + \dfrac{LC_s}{(1-\alpha_0)^2}p^2}}$$

$K_0 = \dfrac{V_{s_0}}{1-\alpha_0}$ $\quad \tau_0 = \dfrac{L}{R(1-\alpha_0)^2}$ $\quad \omega_{n_0} = \dfrac{1-\alpha_0}{\sqrt{LC_s}}$ $\quad z_0 = \dfrac{1}{2R(1-\alpha_0)}\sqrt{\dfrac{L}{C_s}}$

5) $\alpha_0 = 0{,}5$ $\quad V_{s_0} = 2E$

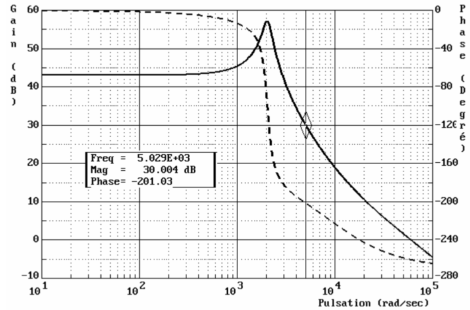
$$\frac{\tilde{V}_s(p)}{\tilde{\alpha}(p)} = 144\,\frac{1-1\cdot10^{-4}p}{1+1\cdot10^{-4}p+2{,}4\cdot10^{-7}p^2}$$

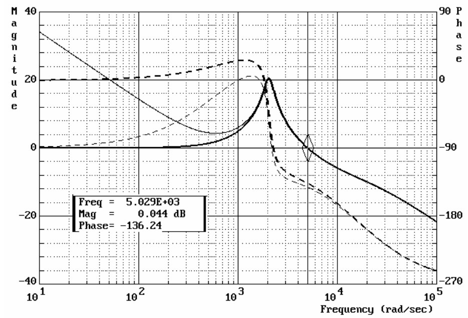
Université Paul Sabatier U.F.R. P.C.A. Année Universitaire 2003-04

Asservissement de la tension de sortie de l'élévateur

$$G(p) = 144\,\frac{1-8.10^{-4}p}{1+10^{-4}p+2{,}4\cdot10^{-7}p^2}$$

a=22 ; T = 42,6µS ; $K = 6{,}7\cdot10^{-3}\,V^{-1}$





$\varphi_e = 201 - 135 = 66°$

$a = \dfrac{1+\sin\varphi_a}{1-\sin\varphi_a} = 22$

$\dfrac{1}{\sqrt{a}\,T} = 5000 \Rightarrow T = \dfrac{1}{5000\sqrt{a}} = 42{,}6\mu S$

$20\log K = -30 - 10\log a = -43$

$\Rightarrow K = 10^{-\frac{43}{20}} = 6{,}7\cdot10^{-3}\,V^{-1}$