

Master 1 SMIS EEAS Parcours SYGELEC

2M8EE2M : Commande des convertisseurs et machines

Examen du 19 juin 2006

Sans document

Durée : 2H

PREMIER PROBLÈME

On considère le convertisseur statique de la Figure 1. La position de l'interrupteur K est repérée par la variable u :

$$\begin{cases} u = 1 & \text{lorsque T est fermé,} \\ u = 0 & \text{lorsque T est ouvert.} \end{cases}$$

On suppose que les variables i_1 , v , i_2 et v_s sont strictement positives.

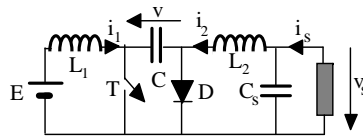


Figure 1

1) Déterminer les équations d'état en valeurs instantanées de ce convertisseur, avec u comme variable de commande. La charge sera modélisée comme une source de courant variable.

On suppose que u est piloté par modulation de largeur d'impulsion. Le rapport cyclique est noté α .

2) Donner le modèle d'état moyen de ce convertisseur (on notera avec des majuscules les variables d'état moyennes).

3) On note $(\alpha_0, I_{10}, V_0, I_{20}, V_{s0})$ un point d'équilibre. Donner les conditions d'équilibre et exprimer en particulier les rapports $\frac{V_0}{E}$, $\frac{V_{s0}}{E}$ et $\frac{I_{10}}{I_{20}}$ en fonction de α_0 . De quelle nature est ce convertisseur continu-continu tension-tension ?

Le dimensionnement de la structure permet de supposer que la tension v évolue très peu sur plusieurs périodes de découpage.

4) Montrer alors qu'autour d'un point d'équilibre, on peut en première approximation se ramener à un système d'ordre 3.

On ne s'intéresse qu'aux équations d'état moyennes régissant l'évolution du courant I_2 et de la tension V_s .

5) Écrire ces 2 équations d'état en faisant apparaître la valeur à l'équilibre V_0 de V . Proposer un schéma électrique équivalent.

On se propose, au moyen de ce dernier modèle, de développer un asservissement basé sur une commande en courant maximum appliquée i_2 et permettant de réguler la tension de sortie à une consigne notée V_c .

6) Rappeler le principe d'une commande en courant maximum (cas de la conduction continue), on notera I_c la consigne en courant.

7) En supposant cette boucle de courant idéale (I_2 et la consigne I_c confondus), proposer un schéma fonctionnel pour la régulation externe de tension en justifiant la nature du correcteur choisi.

8) Calculer la fonction de transfert en boucle fermée $\left. \frac{V_s(p)}{V_c(p)} \right|_{I_c=0}$ et proposer des éléments de choix pour les paramètres du correcteur.

SECOND PROBLÈME

- Les 2 parties du problème peuvent être résolues indépendamment, mais il est vivement conseillé de prendre connaissance de la totalité de l'énoncé.
- Les données numériques nécessaires à la résolution du problème sont reportées en annexe, à la fin de l'énoncé

La figure 2 représente, de manière simplifiée, la structure de conversion d'une éolienne utilisant une génératrice à courant continu à aimants permanents. L'énergie récupérée est stockée dans une batterie d'accumulateurs. Un onduleur de tension permet ensuite d'alimenter une installation électrique en régime alternatif sinusoïdal. L'étage élévateur entre la batterie et l'onduleur n'est pas considéré ici.

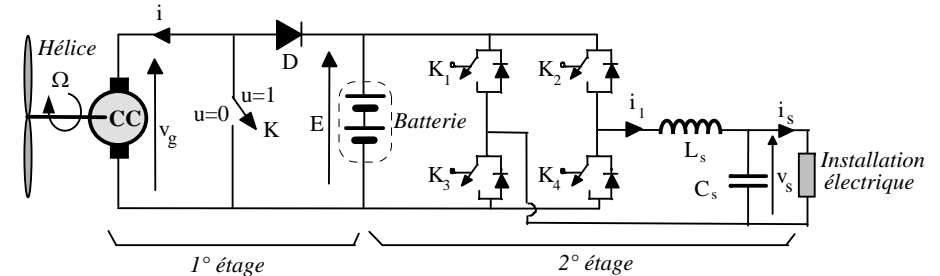


Figure 2

Partie I : Asservissement du courant dans la génératrice (1° étage de la figure 2)

On supposera dans cette partie que la vitesse de rotation Ω est lentement variable et que le hacheur fonctionne en mode de conduction continue.

- **Remarque :** On utilise une convention récepteur aux bornes de la génératrice, ce qui signifie ici que le courant i est en réalité négatif en valeur algébrique. Bien que a priori peu naturelle, cette convention facilite cependant la synthèse de l'asservissement de courant qui suit.

1) Donner un schéma détaillé du 1° étage de la figure 2, dans lequel le modèle électrique de la génératrice sera explicité. Les interrupteurs du hacheur parallèle sont supposés parfaits et la batterie est assimilée à une source de tension idéale. La force électromotrice de la génératrice sera notée E_g , et est dirigée suivant le sens de la tension v_g .

2) La position de l'interrupteur K est repérée par la variable u : Lorsque $u=1$ l'interrupteur est ouvert, lorsque $u=0$ il est fermé. Donner alors l'équation d'état vérifiée par le courant instantané $i(t)$. A quelle condition peut-on faire croître ou décroître ce courant au moyen de u ?

3) La variable u est pilotée par modulation de largeur d'impulsion (MLI). Rappeler le principe de cette modulation.

4) La valeur moyenne de toute variable f dépendant du temps est définie de la manière suivante :

$$F(t) = \bar{f}(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t f(\tau) d\tau, \text{ où } T \text{ est la période de découpage.}$$

Établir alors l'équation d'état vérifiée par le courant moyen $I(t)$ et donner le schéma électrique équivalent associé.

On se propose d'asservir le courant moyen I suivant le schéma de la figure 3. U est la valeur moyenne de u .

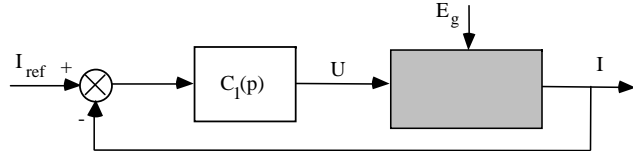


Figure 3

5) Après avoir explicité la partie du schéma-blocs représentant le processus en boucle ouverte non corrigé (bloc gris), proposer un correcteur en justifiant son choix.

6) Exprimer la fonction de transfert de poursuite $\frac{I(p)}{I_{ref}(p)} \Big|_{E_g=0}$.

7) On souhaite un temps de réponse à 95% voisin de 10ms en réponse à un échelon de position. Proposer et justifier une méthode de synthèse pour le correcteur. Calculer alors ses paramètres.

Partie II : Asservissement de la vitesse de rotation de l'hélice

La boucle de courant précédente est **suffisamment rapide** pour pouvoir considérer que $I = I_{ref}$. La figure 4 représente le schéma-blocs de base de l'asservissement de vitesse. La vitesse de consigne Ω_{ref} de l'hélice est calculée à partir de la vitesse du vent mesurée au moyen d'un anémomètre.

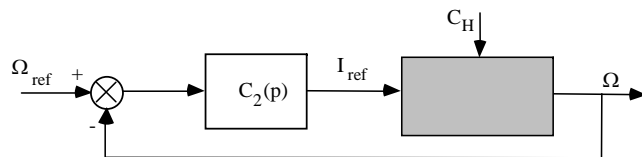


Figure 4

En toute rigueur, le couple fourni par l'hélice à la génératrice C_H est proportionnel au carré de sa vitesse de rotation. Cependant il est possible, en première approche, de considérer que ce couple est indépendant de la vitesse. En notant C_g le couple électromécanique de la génératrice et J l'inertie à considérer, la relation fondamentale de la dynamique peut s'écrire :

$$C_g - C_H = J \frac{d\Omega}{dt}.$$

• **Remarque :** Cette relation a été établie pour une machine fonctionnant en moteur. Cela signifie alors que, pour un fonctionnement en génératrice, C_H et C_g sont en réalité négatifs en valeur algébrique. Bien que a priori peu naturelle, cette convention est adoptée pour la suite, car elle facilite néanmoins la synthèse de l'asservissement de vitesse qui suit.

8) Après avoir explicité la partie du schéma-blocs de la figure 4 représentant le processus en boucle ouverte non corrigé (bloc gris), proposer un correcteur en justifiant son choix.

9) Exprimer la fonction de transfert de poursuite $\frac{\Omega(p)}{\Omega_{ref}(p)} \Big|_{C_H=0}$.

10) On désire un temps de réponse à 95% voisin de 100 ms en réponse à un échelon de position. Proposer et justifier une méthode de synthèse pour le correcteur. Calculer alors ses paramètres.

11) On souhaite, pour optimiser le point de fonctionnement de l'éolienne, évaluer sans mesure directe le couple C_H fourni par l'hélice à la génératrice. Proposer une méthode pour estimer ce couple. Comment utiliser cette estimation pour améliorer par ailleurs l'asservissement de vitesse ?

Partie III : Asservissement de la tension de sortie de l'onduleur (2° étage de la figure 2)

L'objectif est d'asservir la tension de sortie de l'onduleur à une référence sinusoïdale 50Hz.

12) Proposer une méthodologie pour réaliser cet asservissement. On pourra s'aider de schémas fonctionnels.

• Annexe 1 : Données techniques de l'éolienne

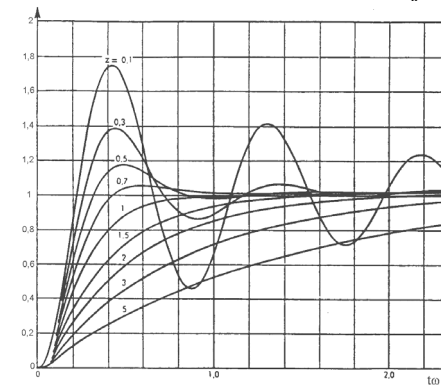
- Moment d'inertie de l'hélice : $1500 \cdot 10^{-5} \text{ kgm}^2$
- Caractéristiques principales de la machine à courant continu et à aimants permanents :

FEM par 1000tr/mn	Couple par ampère	Résistance de l'induit	Inductance de l'induit	Moment d'inertie
38.5 V	0.37 NmA ⁻¹	0.2 Ω	1.8 mH	530.10 ⁻⁵ kgm ²

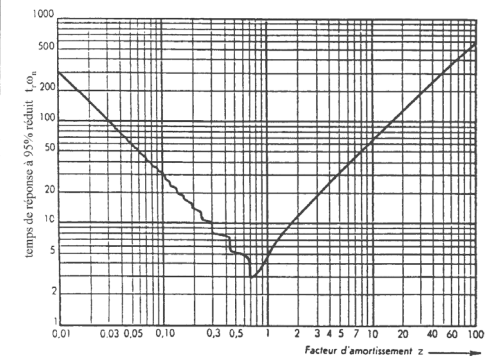
- Fréquence de découpage du hacheur : 20 kHz
- Tension nominale batterie : 70 V

• Annexe 2 : Système du 2° ordre

- Fonction de transfert : $F(p) = \frac{1}{1 + \frac{2z}{\omega_n} p + \frac{p^2}{\omega_n^2}}$



Réponse à un échelon de position unitaire



Évolution du temps de réponse en fonction de z

Master 1 SMIS EEAS Parcours SYGELEC

2M8EE2M : Commande des convertisseurs et machines

Examen du 19 juin 2006

Correction

PREMIER PROBLÈME

PBT ①

$$\begin{cases} \frac{di_1}{dt} = \frac{E - v(1-u)}{L_1} = -\frac{v}{L_1} + \frac{vu}{L_1} + \frac{E}{L_1} \\ \frac{dv}{dt} = \frac{i_1(1-u) - i_2 u}{C} = \frac{i_1}{C} - \frac{i_1}{C}u - \frac{i_2}{C}u \\ \frac{di_2}{dt} = \frac{vu - v_s}{L_2} = -\frac{v_s}{L_2} + \frac{vu}{L_2} \\ \frac{dv_s}{dt} = \frac{i_2 - i_s}{C_s} = \frac{i_2}{C_s} - \frac{i_s}{C_s} \end{cases}$$

② $\bar{u} = \alpha \quad \bar{i}_1 = I \quad \bar{v} = V \quad \bar{i}_2 = I_2 \quad \bar{v}_s = V_s$

$$\begin{cases} \frac{dI_1}{dt} = -\frac{V}{L_1} + \frac{V\alpha}{L_1} + \frac{E}{L_1} \\ \frac{dV}{dt} = \frac{I_2}{C} - \frac{I_2}{C}\alpha - \frac{I_2}{C}\alpha \\ \frac{dI_2}{dt} = -\frac{V_s}{L_2} + \frac{V}{L_2}\alpha \\ \frac{dV_s}{dt} = \frac{I_2}{C_s} - \frac{I_s}{C_s} \end{cases}$$

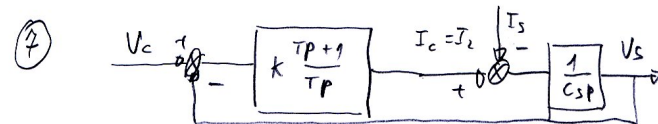
③ $\frac{dx}{dt}\bigg|_0 = 0 \Rightarrow \frac{V_0}{E} = \frac{1}{1-\alpha_0} \quad \frac{I_{10}}{I_1} = \frac{\alpha_0}{1-\alpha_0} \quad \left. \begin{array}{l} \frac{V_{s0}}{E} = \frac{\alpha_0}{1-\alpha_0} \\ \frac{V_{s0}}{V_0} = \alpha_0 \end{array} \right\} \text{Alors on a :}$

⑤ $V \approx \text{cte}$ sur plusieurs périodes

④

$$\begin{cases} \frac{dI_2}{dt} = -\frac{V_s}{L_2} + \frac{V}{L_2}\alpha \\ \frac{dV_s}{dt} = \frac{I_2}{C_s} - \frac{I_s}{C_s} \end{cases} \text{ avec } V \text{ qui évolue lentement}$$

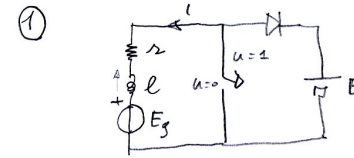
équation d'un abaisseur : $V \approx V_0 = \frac{E}{1-\alpha_0}$



⑧ $\frac{V_s(p)}{V_c(p)}\bigg|_{I_s=0} = K \frac{Tp+1}{K + KTp + CsTp^2} = \frac{1+Tp}{1+Tp + \frac{CsT}{K}p^2}$

SECOND PROBLÈME

Partie I



② $E_s + L \frac{di}{dt} + Ri = Eu$

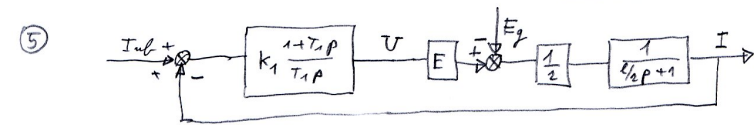
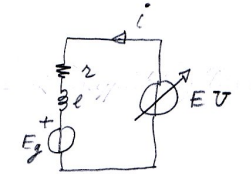
$$\frac{di}{dt} = \frac{-E_s - Ri + Eu}{L}$$

si $E > E_s$: $\begin{cases} i \text{ croît pour } u=1 \\ i \text{ décroît pour } u=0 \end{cases}$

③ question de cours.

④ $\frac{dI}{dt} = \frac{-E_s - RI + EU}{L}$

$U = \alpha$ rapport cyclique



⑥ $\frac{I(p)}{I_{ref}(p)}\bigg|_{E_s=0} = \frac{1+T_1p}{1+T_1\left(\frac{2+K_1E}{K_1E}\right)p + \frac{T_1L}{K_1E}p^2}$

cf. annexe 2 (200 mHz)

⑦ $\frac{I(p)}{I_{ref}(p)}\bigg|_{E_s=0} = \frac{1+T_1p}{1 + \frac{2Z_1}{\omega_{n1}}p + \frac{p^2}{\omega_{n1}^2}}$

avec $Z_1 = 0,7 \quad \omega_{n1} = \frac{3}{T_{n1}} = 300 \text{ rad/s}$

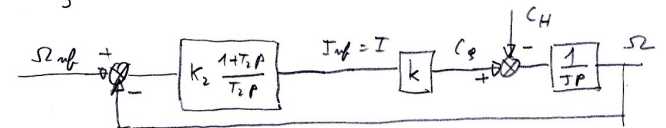
Rq : Compensation du pôle dom :

$$\frac{I(p)}{I_{ref}(p)} = 1 + \frac{p}{K_1E}$$

$$\begin{cases} K_1 = \frac{1}{E}(2Z_1\omega_{n1}L - 2) = 7,94 \cdot 10^{-3} \text{ A}^{-1} \\ T_1 = \frac{K_1E}{L\omega_{n1}^2} = 3,43 \text{ ms} \\ T_1 = \frac{L}{2} = 9 \text{ ms} \quad (Z = \frac{1}{2}) \\ K_1 = \frac{3L}{ET_1} = 7,94 \cdot 10^{-3} \text{ A}^{-1} \end{cases}$$

Partie II

⑧ $C_g = kI \quad k \text{ constante de couple et } I = I_{ref}$



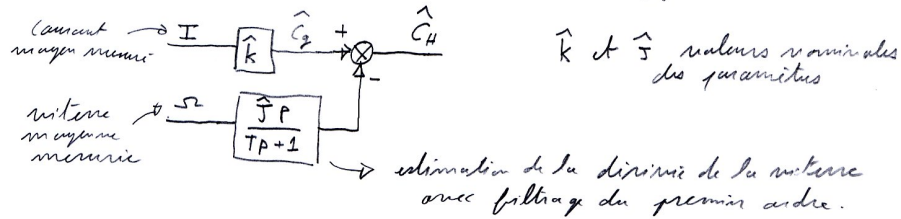
⑨ $\frac{I_2(p)}{I_{ref}(p)}\bigg|_{C_4=0} = \frac{1+T_2p}{1+T_2p + \frac{T_2I}{kCs}p^2} = \frac{1+T_2p}{1 + \frac{2Z_2}{\omega_{n2}}p + \frac{p^2}{\omega_{n2}^2}}$

⑩ avec $z_2 = 0,7 \rightarrow t_{r2} = \frac{3}{\omega_{n2}}$ (influence du zéro du numérateur négligée)
 d'où $\omega_{n2} = \frac{3}{t_{r2}} = 30 \text{ rad/s}$

$$\begin{cases} T_2 = \frac{2z_2}{\omega_{n2}} = 46,7 \text{ ms} \\ K_2 = \frac{T_2 J}{K} \omega_{n2}^2 = 2,3 \text{ A} \cdot \text{rad}^{-1} \cdot \text{s} \end{cases}$$
 $J = (1500 + 530) \cdot 10^{-5} = 2030 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
 $K = 0,34 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1}$
 cf Annexe 1

⑪ • Estimation de C_H à partir de Ω et I

$$C_H = C_S - J \frac{d\Omega}{dt} = kI - J \frac{d\Omega}{dt}$$



• Pour améliorer l'accroissement, on peut utiliser une chaîne d'anticipation à partir de \hat{C}_H :

