ORDRE DES INGÉNIEURS DU QUÉBEC

SESSION DE MAI 2025

Toute documentation permise
Calculatrices : modèles autorisés seulement
Durée de l'examen : 3 heures

22-EL-B3 Électronique de puissance et entraînements.

PROBLÉME 1 (30%)

Un moteur à excitation séparée de résistance d'induit R_a=1.2Ω, d'inductance d'induit L_a=15 mH, est alimenté par un redresseur monophasé commandé à thyristors par une tension de source de valeur efficace V_{sE}= 440 V à f=60 Hz. L'inducteur de résistance R_f=390 Ω, d'inductance, L_f =120H est alimenté par la même source monophasé, redressée par un pont à diodes comme le montre la figure 1.

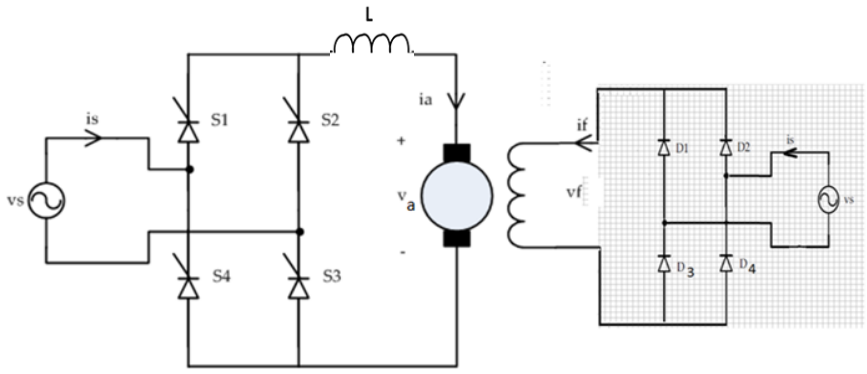

Figure 1 Alimentation d'un moteur à courant continu par un pont à thyristors

Une inductance L insérée en série avec le moteur à courant continu est supposée très grande. La vitesse du moteur est fixée à Ω=750rpm, le courant d'induit I_a=45A, le gain du moteur k_f=1.4 V/A/rad/s avec le gain k_m= k_f I_f, le coefficient de frottement, B=0.01Nm/rad/s et le moment d'inertie totale J_t=0.5kg.m^2.

1. Calculer la constante du moteur k_m, le couple électromagnétique T_{em}, le couple utile T_u et le couple de pertes T_p. **(6%)**
2. Pour une vitesse du moteur Ω=750rpm, calculer la valeur de l'angle de retard à l'amorçage

α et en déduire la valeur moyenne de la tension d'induit V_a. **(4%)**

3. Pour une inductance en série très élevée, le courant d'induit est supposé lisse, calculer la puissance active consommée par le moteur à courant continu. **(2%)**
4. Calculer la puissance apparente de la source S_s et en déduire le facteur de puissance de la source. **(2%)**
5. Calculer le rendement du moteur. **(4%)**

On désire réguler la vitesse de ce moteur à Ω=600rpm en agissant sur la tension d'induit v_a. On suppose qu'on néglige la constante de temps de la fonction de transfert du convertisseur. On désire trouver les constantes de temps du régulateur avec les exigences d'avoir une bande passante de ω_n = 15 rad/s et un amortissement optimal $\xi = 0.7$. Pour cela, on en utilise le pont à thyristor et une boucle de régulation comprenant un régulateur PI et un capteur de vitesse k_v=0.08 V/rad/s en adoptant la commande arcosinus pour générer l'angle d'amorçage α comme le montre la figure 2. Le moment d'inertie totale (moteur + génératrice) est J_t=0.5kg.m^2 et La fonction transfert du régulateur PI est donnée par :

$$G_r(s) = \frac{1 + \tau_2 s}{\tau_1 s}$$

On désire réguler la vitesse de rotation du moteur à Ω=600 rpm,

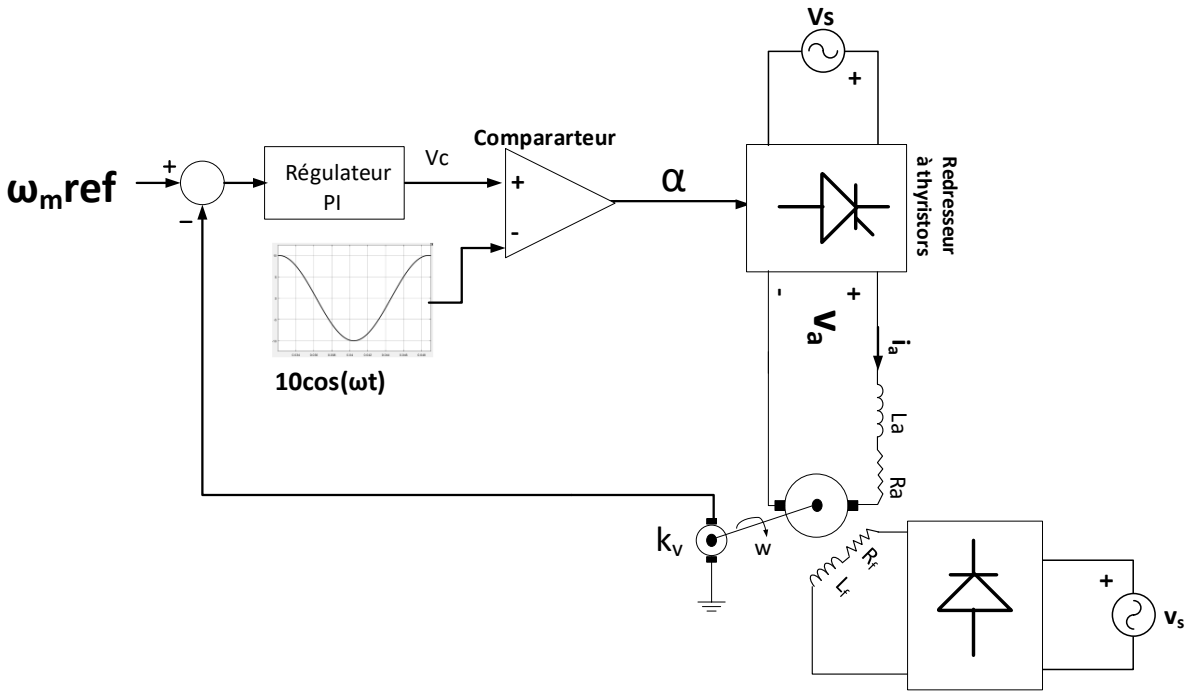

Figure 2 Régulation de vitesse d'un moteur à courant continu

On prendra que $K_m{}^2 >> R_a.B$, $\tau_{m1} = \frac{R_a J_t}{K_m{}^2}$ et que $\tau_{m1} >> \tau_a$

1. Donner l'expression de la fonction de transfert en boucle ouverte de la vitesse par rapport à la tension d'induit : $G_m(s) = \frac{\omega_m(s)}{v_a(s)}$. **(2%)**
2. Expliquer la commande arcosinus et en déduire la fonction de transfert du convertisseur (k_c et τ_c).**(2%)**
3. Donner le schéma fonctionnel de régulation de vitesse en boucle fermée. **(2%)**
4. Déterminer la fonction de transfert du réglage de la vitesse en boucle fermée avec le régulateur PI intégré. **(2%)**
5. Déterminer les paramètres du régulateur PI répondant aux exigences imposées en utilisant la méthode d'annulation pôles-zéros pour la détermination des paramètres du régulateur. **(4%)**

PROBLÉME 2 (20%)

Le moteur du problème 1 est maintenant alimenté par un hacheur abaisseur de type abaisseur (Buck) dont le schéma est donné à la figure 3. L'induit du moteur est alimenté par un hacheur abaisseur à partir d'une source continue V_d = 400 V et l''inducteur est alimenté par une source de tension continue V_f = 400V.

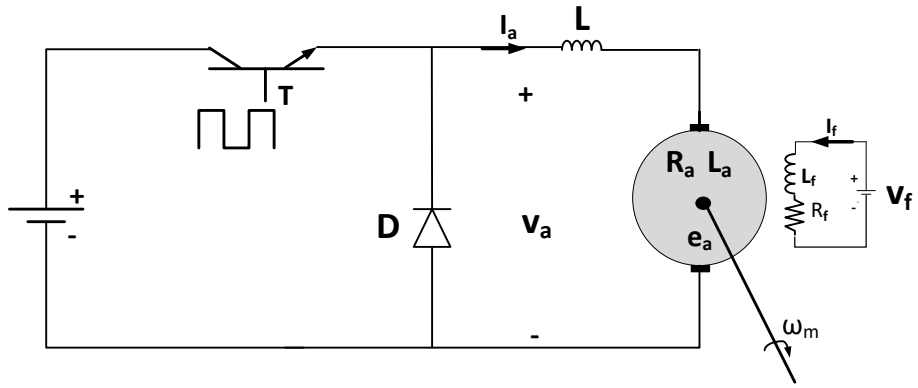

Figure 3 Alimentation d'un moteur à courant continu par un hacheur abaisseur

Une inductance L=1.5 mH a été ajoutée en série avec l'induit du moteur et on utilisera les calculs déjà fait pour k_m, k_f, T_{em}, T_p et T_u du premier exercice. Pour une vitesse de rotation de Ω=750rpm, calculer.

1. La valeur moyenne de la tension d'induit v_a **(2%)**
2. Le rapport cyclique r **(2%)**

On veut que l'ondulation de courant $\Delta I_a = 0.05 I_a$:

3. Calculer la fréquence de hachage de l'interrupteur T nécessaire pour répondre à cette exigence. **(2%)**

Pour un moteur à vide, on garde le même rapport cyclique calculé à la question (2) et que le couple de pertes calculé à la vitesse Ω=750rpm est supposé constant, calculer :

4. Le courant à vide I_{a0}. **(2%)**
5. La vitesse à vide ω_{m0}. **(2%)**

La figure 4 montre un hacheur abaisseur et une boucle de régulation comprenant un régulateur PI et un capteur de vitesse k_v=0.08 V/rad/s et adoptant la technique de modulation linéaire pour

générer le rapport cyclique r. La méthode d'imposition de pôles sera utilisée pour déterminer les constantes de temps $\tau_{2v}\ et\ \tau_{1v}$ du régulateur PI avec les exigences d'avoir une bande passante de ω_n = 15 rad/s, une erreur statique nulle et un dépassement D=5%. Le moment d'inertie totale J_t = 0.5kg.m^2 et La fonction du régulateur PI est donnée par :

$$G_r(s) = \frac{1 + s\tau_{2v}}{s\tau_{1v}}$$

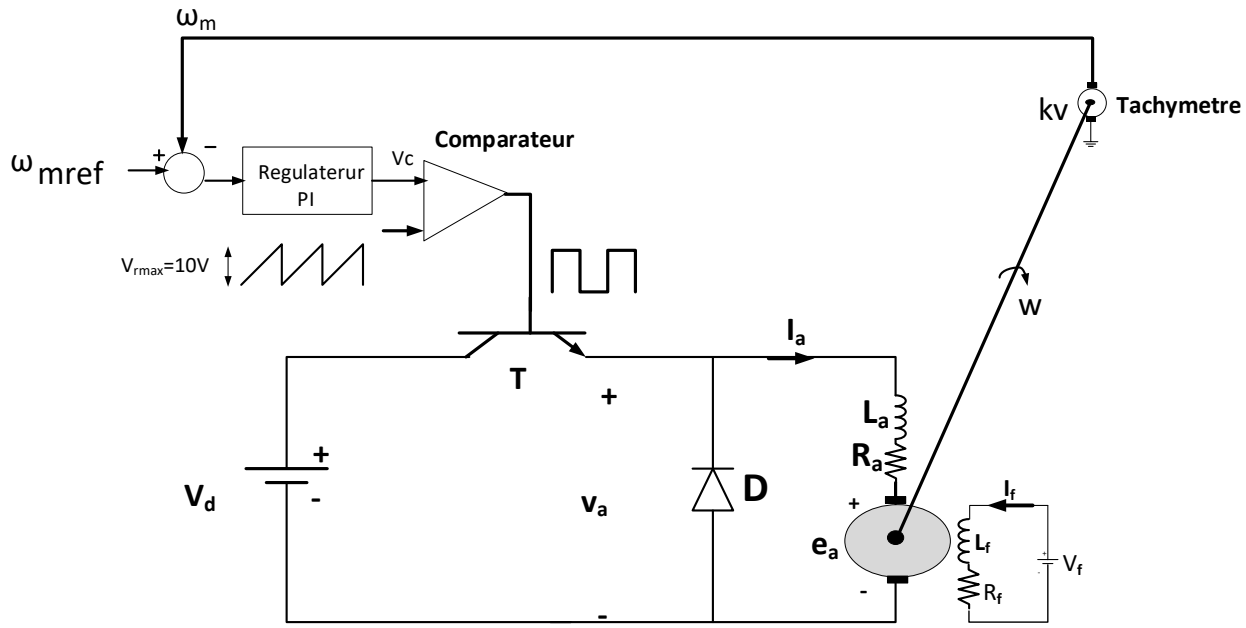

Figure 4 Régulation de vitesse d'un moteur à courant continu

1. Calculer l'amortissement ξ, le temps de réponse t_s et en déduire les pôles désirées p_1 et p_2.**(2%)**

Pour la suite du problème, on prendra la fonction de transfert du convertisseur $G_c(s) = k_c$, on négligera sa constante de temps.

2. Calculer le gain k_c **(2%)**
3. Donner le schéma fonctionnel du réglage de la vitesse en boucle fermée, on prendra que la fonction de transfert du moteur de la vitesse par rapport à la tension v_a en boucle ouverte par : **(2%)**

$$G_m(s) = \frac{\omega_m(s)}{V_a s} = \frac{\frac{1}{k_m}}{1 + s\tau_{m1}}$$

4. Donner la fonction de transfert en boucle fermée avec le régulateur PI et en tenant compte du gain du capteur de vitesse k_v. **(2%)**
5. Calculer les paramètres du régulateur PI par la méthode de placement de pôles. **(2%)**

PROBLÉME 3 (30%)

Une machine asynchrone triphasé, 4 pôles, 50 Hz, stator étoile est alimentée par un réseau triphasé de tension de ligne de 380V. Les inductances de fuites au stator, la résistance statorique et les pertes Mécaniques sont Négligeables. Le bobinage du stator possède le nombre de spire par phase N_c=200 (le coefficient de bobinage est égal à k_b=1).

m=0.38 (rapport de transformation stator/rotor)

r_2=0.3Ω (résistance rotorique)

l_2 = 4.8 mH (inductance rotorique)

p =2 (nombre de paires de pôles)

B_m = 0.0005 N.m.s (frottements)

Le moteur fonctionne à couple constant (v/f constant), T_L=20 Nm et on désire que le courant actif statorique I_a reste constant,

1. Quelle valeur de $\mathbf{V_s}$ choisira-t-on pour le fonctionnement à f_s=50 Hz et 30 Hz pour garantir v/f constant. **(2%)**
2. Calculer le glissement g pour f_s = 50 Hz et pour f_s=30 Hz pour T_L=20 Nm. **(6%)**
3. Calculer la vitesse de rotation Ω pour f_s=50Hz et f_s=30Hz. **(6%)**
4. Calculer le couple maximal pour f_s= 50 Hz et f_s = 30 Hz. **(6%)**

On veut maintenant fixer la fréquence f_s=70 Hz et T_L=20 Nm

5. A quel mode correspond ce fonctionnement, expliquer le choix de la tension efficace V_s et calculer la valeur du flux statorique Φ_s. **(4%)**
6. Calculer la vitesse de rotation Ω. **(4%)**
7. Calculer le couple électromagnétique maximal T_{emmax}. **(2%)**

PROBLÉME 4 (20%)

Soit un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuils, on veut contrôler sa vitesse de rotation en utilisant la commande scalaire en tension (figure 5). Pour la vitesse de rotation n=1500 rpm, 2 paires de pôles, f_s=60Hz, tension de ligne E_{LL}=460V, la résistance rotorique ramenée, r_2'=1.08Ω, la résistance statorique r_1=1.1Ω, l'inductance statorique, l_1=0.0059H, l'inductance rotorique ramenée, l_2'=0.0059 H, l'inductance mutuelle, L_m=0.2037 H, le couple électromagnétique T_{em}=20 Nm, le coefficient de frottement B_m nul, le moment d'inertie J=0.02 kg.m^2 et le flux statorique total est Φ_{smax} = 0.98 Weber.

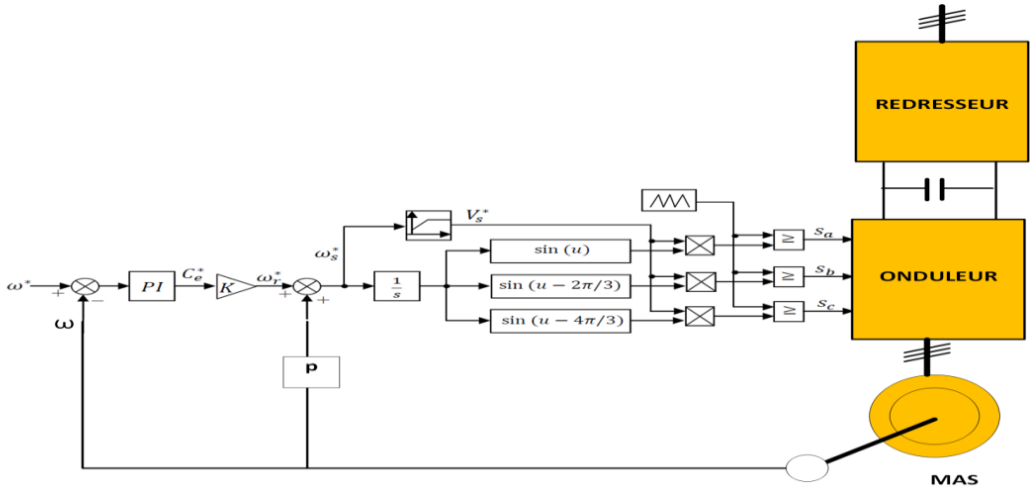

Figure 5 Régulation de vitesse avec la commande scalaire en tension

On vous demande pour T_{em}=20Nm.

1. D'expliquer le principe de la commande scalaire en tension. **(4%)**
2. De calculer la tension continue à l'entrée de l'onduleur E_d pour m_a=1. **(4%)**
3. De calculer la tension de phase statorique V_{sE}, le glissement g et en déduire la vitesse de rotation Ω pour m_a = 0.8. **(4%)**
4. De calculer le couple maximal et le couple de démarrage pour ma=0.8. **(5%)**
5. De déterminer les paramètres du régulateur de vitesse k_p et k_i si la bande passante ω_{nv} = 25 rad/s et l'amortissement ζ=0.7. **(3%)**