

Examen Final	: EL61 – A2015.
Durée	: 2 heures.
Documents	: non autorisés sauf une feuille manuscrite de format A4.

Etude d'un moteur synchrone à aimants permanents (MSAP) et sa commande

Soit un moteur synchrone à aimants permanents (MSAP), entraînant une charge mécanique opposant un couple résistant constant. Ce moteur est alimenté par un onduleur de tension. Pour tout l'énoncé, on négligera toutes les pertes de la machine.

A. Modélisation du MSAP

La figure 1 schématise la MSAP étudiée. On donne les paramètres suivants :

- p : nombre de paires de pôles ;
- Ω : vitesse angulaire de rotation du rotor $\Omega = \frac{d\theta_m}{dt} = \frac{1}{p} \cdot \frac{d\theta_e}{dt}$;
- θ_m : angle permettant de repérer la position du rotor par rapport à la position du stator ;
- θ_e : angle électrique $\theta_e = p \times \theta_m = \omega_e \times t$;
- ω_e : pulsation des courants et tensions statoriques $\omega_e = p \times \Omega$;
- L_s : inductance propre d'un enroulement statorique ;
- M_s : inductance mutuelle entre deux enroulements statoriques.

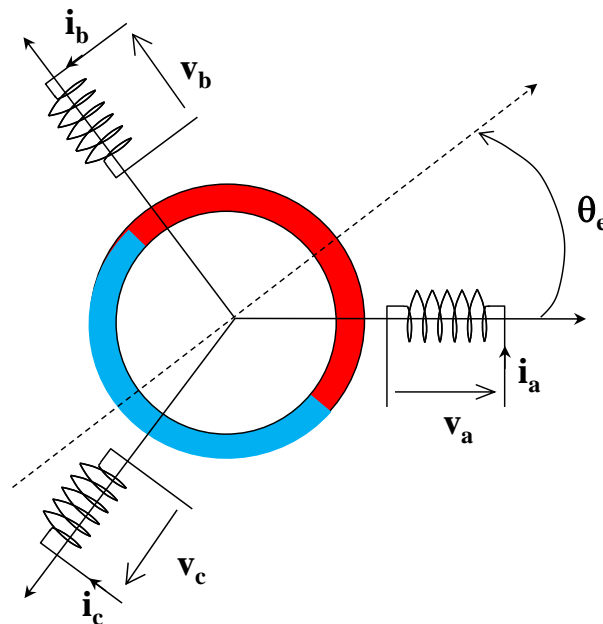


Figure 1. Représentation du MSAP à 1 paire de pôles

Dans cette machine on admet une répartition spatiale sinusoïdale du champ magnétique dans l'entrefer. De ce fait les expressions des flux totaux dans les phases statoriques et provenant du rotor, s'expriment comme suit :

$$\Phi_{fa} = \Phi_{max} \cdot \cos(\theta_e) \qquad \Phi_{fb} = \Phi_{max} \cdot \cos(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) \qquad \Phi_{fc} = \Phi_{max} \cdot \cos(\theta_e + \frac{2\pi}{3})$$

A.1.) Donner l'expression du flux total la phase « a », ϕ_a en fonction de i_a , L , ϕ_{max} et θ_e (où $L = L_s - M_s$ et i_a est le courant de la phase a). En déduire les expressions de ϕ_b et ϕ_c .

A.2.) En utilisant la loi $v = Ri + \frac{d\Phi}{dt}$ donner les équations de tensions des trois phases a, b et c en fonction de i_a , i_b , i_c , e_a , e_b et e_c qui sont respectivement les courants et les f.e.m des trois phases a, b et c.

A.3.) Donner les expressions de e_a , e_b et e_c . Quelle est la valeur maximale de ces f.e.m E_{max} en fonction de Ω , Φ_{max} et p ?

A.4.) Calculer le couple électromagnétique de la machine et donner l'équation mécanique de l'ensemble MSAP-charge.

A.5.) On suppose que le MSAP est alimenté avec des courants sinusoïdaux, donner le modèle équivalent d'une phase en régime permanent et linéaire de la MSAP.

A.6.) Dessiner le schéma électrique équivalent en y reportant les paramètres électriques de la machine en notation complexe. Donner l'équation de tension correspondant en en convention moteur et tracer son diagramme vectoriel.

A.7.) On veut brancher ce MSAP sur le réseau EDF 220V, 50Hz. Pour la suite de l'énoncé, on donne les caractéristiques suivantes du MSAP :

- Puissance apparente nominale $S_n = 10 \text{ kVA}$?
- $\Phi_{max} = 0,57 \text{ Wb}$;
- vitesse nominale de rotation : $n_N = 3000 \text{ tr.min}^{-1}$;
- résistance statorique : $R = 0\Omega$;
- inductance cyclique statorique $L = 2 \text{ mH}$;
- nombre de paires de pôles = 1 ;

Calculer la valeur de E_{max} ? Quel couplage (triangle ou étoile) doit-on adopter pour cette machine ?

A.8.) Calculer le courant nominal d'induit de cette machine et sa réactance synchrone en sachant que sa puissance apparente est de 10 kVA?

A.9.) On exerce sur l'arbre un couple résistant de 15,92Nm, calculer : le courant d'induit I , φ , Q et δ .

A.10.) Le moteur couplé sur le réseau EDF est maintenant à vide, calculer sa puissance réactive? Conclure sur le régime de fonctionnement du moteur.

B. Etude de l'onduleur

Le MSAP précédent est alimenté par un onduleur de tension. La figure 2 représente la partie puissance incluant le bus continu U_{dc} , les interrupteurs de puissance (K1, K1', K2, K2', K3 et K3') et les trois phases de la machine, dont les tensions respectives sont v_a , v_b et v_c , est connectée en étoile. Chaque interrupteur K_m est commandé de façon opposée à K'_m à l'aide de la fonction dite de commande f_m où $m = 1, 2, 3$.

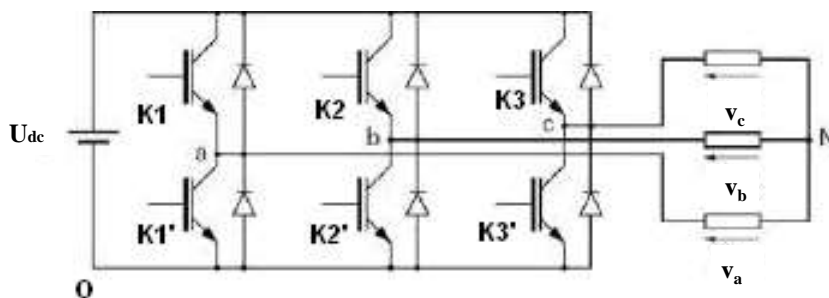


Figure 2 : Partie puissance de l'ensemble onduleur - MSAP

- B.1.) Donner les expressions des tensions v_{aO} , v_{bO} et v_{cO} en fonction de U_{dc} , f_1 , f_2 et f_3 . En déduire celles de v_{NO} , v_a , v_b et v_c .
- B.2.) Observer les fonctions de commande représentées sur la figure 3 où θ_e est l'angle électrique de la machine. Quel est le nom de cette commande ? Représenter les formes d'ondes des signaux v_{aO} , v_{bO} , v_{cO} et v_a correspondants.

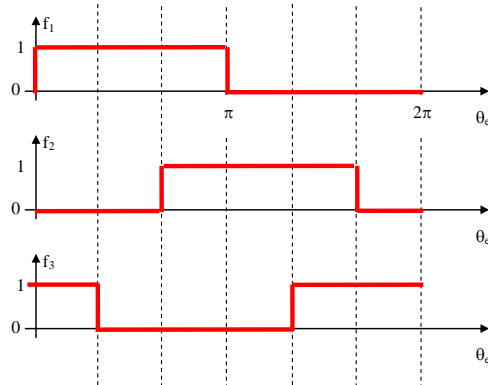


Figure 3

- B.3.) Donner l'équation différentielle régissant l'évolution du courant dans la phase a. En déduire l'expression de $i_a(t)$ en supposant que la constante de temps mécanique est beaucoup plus grande de la constante de temps électrique.
- B.4.) Tracer la forme d'onde de ce courant.
- B.5.) Quels sont les inconvénients de cette commande ?
- B.6.) Pour remédier à ces inconvénients on se propose d'utiliser une commande MLI-triangle sinus. Expliquer son principe de fonctionnement en s'aidant de schémas pertinents.

C. Etude du contrôle vectoriel du MSAP

Maintenant on alimente le MSAP à l'aide de l'onduleur de tension précédent que l'on commande à l'aide d'une MLI triangle-sinus. On veut réaliser un contrôle vectoriel en couple de cet ensemble.

- C.1.) Dessiner un schéma synoptique pertinent de ce contrôle, expliquer son principe et donner ses avantages et ses inconvénients.
- C.2.) Quelle est la valeur maximale que peut avoir la tension du bus continu U_{dc} (voir figure 2) ?
- C.3.) Démontrer que pour obtenir un fonctionnement équivalent à celui d'une MCC où la commande du couple est complètement indépendante de celle du flux inducteur, il faut choisir pour la référence du courant $i_d = 0$.
- C.4.) En régime établi à ($i_d = 0$), calculer la vitesse maximale pour un couple de charge $C_{r0} = 31.84\text{Nm}$ et $L_d = L_q = L$.
- C.5.) **Question bonus (2 points) :** Pour atteindre une vitesse de 10% au-delà de la vitesse maximale trouvée en (§4), on peut agir sur i_d . Expliquer comment et donner sa valeur.