

LP20 : Conversion de puissance électromécanique

Armel JOUAN, Géraud DUPUY

Niveau : L2 (L3 pour les milieux magnétiques ?)

Prérequis :

- mécanique (couple de force, théorème de l'énergie cinétique, théorème du moment cinétique)
- milieux magnétiques
- électromagnétisme (lois de l'induction, moment magnétique d'une spire, couple d'aimantation)
- électrocinétique (circuit électrique, lois des mailles)

1 Organisation d'une machine synchrone

1.1 Structure de la machine synchrone

- Détailler le schéma sur diapo
- Définir les différentes parties de la machine: stator fixe, rotor mobile, Entrefer entre les deux
- On a deux milieux magnétiques. On les supposera idéaux avec $\mu_r = \infty$ (voir [2] p.27 1.3.1)
- Le rotor est fait d'une aimantation constante en norme et qui peut tourner. Pour cela, on peut utiliser un aimant permanent, ou (et ce sera le cas du reste de la leçon) un bobinage parcouru par un courant constant. Ce sera l'inducteur
- Le stator quand à lui va être constitué de spires, dans lesquels il va y avoir un courant induit.

1.2 Circuit statorique et création d'un champ tournant

- On part d'une spire
- Dans l'entrefer, les lignes de champs sont radiales
- Thm de d'Ampère sur une ligne de champ. H est nul dans le matériau
- Il vient par les symétries du système que $B(\theta \in [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]) = \frac{\mu_o i}{2e}$ et que $B(\theta \in [\frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}]) = -\frac{\mu_o i}{2e}$
- Tracer $B(\theta)$, montrer que c'est un créneau
- Montrer que si on rajoute deux spires à $\pm \frac{\pi}{3}$, on ajoute des créneaux qui font que ça ressemble plus à un sinus
- Avec de nombreuses spires, on approximera la relation champ-courant en $B(\theta) = k.i(t).\cos(\theta)$ avec k qui dépend du nombre de spires et de la géométrie (cf [2] p.28)
(Rq : C'est vraiment une relation courant tension, on ne spécifie pas ici si c'est le champ qui produit un courant ou l'inverse)
- Voyons désormais comment produire un champ tournant. Pour ça rajoutons un circuit identique dans le stator mais tourné de 90°
- Par ailleurs, on lui injecte du courant déphasé de 90° par rapport au premier
- On a alors :

$$\begin{aligned}\vec{B}_{tot} &= \vec{B}_1 + \vec{B}_2 = k i_1(t) \cos(\theta) \vec{e}_r + k i_2(t) \cos(\theta - \frac{\pi}{2}) \vec{e}_r \\ \vec{B}_{tot} &= k I \left[\cos(\omega t) \cos(\theta) + \cos(\omega t - \frac{\pi}{2}) \cos(\theta - \frac{\pi}{2}) \right] \vec{e}_r \\ \vec{B}_{tot} &= k I \cos(\omega t - \theta) \vec{e}_r\end{aligned}$$

- On a bel et bien créé un champ radial tournant
- Rq: On peut en fait utiliser autant de phases qu'on veut, on peut donc utiliser notamment du triphasé
- On peut utiliser l'animation (2)

Transition : Pour coupler ce champ magnétique à un mouvement et ainsi réaliser une conversion électromécanique, on va utiliser un rotor.

1.3 Circuit rotorique

- Schéma du circuit rotorique avec la paramétrisation (θ : position d'un point quelconque dans l'entrefer, θ_r : repérage de la position du bobinage rotorique)
- On modélisera à partir de maintenant le rotor comme une bobine parcourue par un courant constant d'excitation I_e pour créer une forte aimantation
- Comme précédemment, le champ créé par la bobine sera en $\vec{B} = k'I_e \cos(\theta - \theta_r) \vec{e}_r$ (avec θ_r l'angle que fait le rotor à l'axe des origines de θ). Ce champ est donc maximal pour $\theta = \theta_r$.

Transition : voyons à présent comment fonctionne la machine synchrone

2 Fonctionnement de la machine synchrone

2.1 Couple électromécanique

- Deux options:
 - Soit démonstration à base d'énergie magnétique: [2] p.31. On aboutit à :
$$\Gamma = \frac{he\pi R k k' I I_e}{\mu_o} \sin(\Omega t - \omega t + \alpha)$$
 - Soit démonstration à base d'une aimantation qu'on se donne, qui possède un angle $\theta_r = \omega t - \alpha$ avec le champ B et qui va tourner. On aboutit à la même chose, on a juste pas le préfacteur
- Avec dans tout les cas: Ω la pulsation électrique, ω la fréquence de rotation, et α l'angle de retard de M sur B
- Dans tout les cas, bien insister sur cette relation fondamentale.

2.2 Condition de synchronisme

- En régime permanent, on veut un couple moyen non nul, pour cela on doit avoir nécessairement $\Omega = \omega$
- On nomme cela la condition de synchronisme
- On a alors $\langle \Gamma \rangle = K I I_e \sin(\alpha)$
- Du fait de la condition de synchronisme, une machine synchrone ne peut pas démarrer d'elle même. Il faut soit partir d'une fréquence très basse et augmenter petit à petit, soit lancer "à la main", par exemple avec une machine à courant continu

2.3 Réversibilité : fonctionnement en alternateur/moteur

- Montrer que le fonctionnement de la machine dépend du signe de α : dans le repère (x,y), tracer \vec{B} et \vec{M} .
 - pour $\alpha > 0$, \vec{M} "suit" \vec{B} : le rotor suit le champ statorique \Rightarrow fonctionnement moteur
 - pour $\alpha < 0$, c'est l'inverse : fonctionnement alternateur (générateur)
- Montrer la courbe du couple électromécanique moyen en fonction de α .
- Discuter des zones de stabilité

Transition : on a vu comment la machine synchrone réalisait la conversion électromécanique, il est désormais de bon ton de faire un bilan de puissance de cette conversion.

3 Etude énergétique

3.1 Modélisation

- On modélise le système par des circuits équivalents :
 - pour les phases du stator : résistance en série avec une inductance (figure 24.12 de [1])
 - pour le circuit rotorique, on prend juste un élément résistif R_r

3.2 Bilan de puissance

- Reprendre le calcul ici présent : http://franck.fresnel.free.fr/doc/TGET/cours_alternateur.pdf
- Discuter le rendement en fonction de la charge.

Remarques :

- essayer d'étayer la leçon d'ODG et d'exemples d'applications (turbine, TGV atlantique pour la MS, autres TGV pour la MA, etc.)
- se refaire une culture sur les autres exemples types : MCC, machine asynchrone.

Bibliographie

- [1] Tout en un PSI-PSI* : chap 24
- [2] Cours de JBD d'électrotechnique : p.21 à 37
- [3] Précis d'électrotechnique : chap 4

Manipulations, ressources

- (1) Création d'un champ tournant avec deux bobines (cf MP15)
- (2) Cours et TP de JBD, "Simulation python sur les champs tournants"