LP9: Conversion électromécanique de puissance

Alexandre Fafin

09/04/18

Références

[1] P. Brenders, L. Douchet, and M. Sauzeix. *Electrotechnique, Conversion de puissance (PSI)*. Bréal, 2004.

[2] V. Renvoizé, E. Bellanger, R. Girardi, S. Paulin, B. Portelli, and E. Saudrais. *Physique PSI-PSI*, Cap prépa*. Pearson, 2014.

Niveau

PSI

Prè-requis

- Induction électromagnétique
- Forces de Laplace
- Matériaux ferromagnétiques

Objectifs

- Conversion réversible (électrique/mécanique, mécanique/électrique)
- Importance industrielle

Table des matières

Introduction

Ce cours fait suite à celui traitant des milieux ferromagnétiques où aura été introduit la notion de circuit magnétique et de transformateur.

Nous avons déjà vu en première année, PCSI, la conversion de puissance à travers l'exemple des rails de Laplace. Nous avions alors vu le caractère réversible de la transformation. On pouvait très bien convertir une puissance mécanique en puissance électrique, fonctionnnement générateur, ou a alors convertir une puissance électrique en puissance mécanique, fonctionnement moteur.

Nous allons aborder dans cette leçon des exemples de machines utilisées dans l'industrie afin de réaliser des conversion électromécaniques de puissance. Nous pouvons citer comme exemple les centrales électriques qui permettent de produire de l'électricité à partir d'un travail mécanique. Ou encore les trains électriques ou tramway qui roulent grâce à l'énergie électrique.

La science relative aux machines tournantes date de la deuxième moitiée du 19é siècle. On peut citer quelques dates :

— 1869 : Gramme, machine à courant continu (dynamo)

— 1888 : Ferraris et Tesla, Boucherot et Blondel, moteur asynchrone et alternateur

Nous allons dans cette leçon commencer par aborder les machines à courant continu et ensuite les machine à courant alternatif.

1 Position du problème et rappels

Un convertisseur électromécanique est un actionneur, moteur ou générateur d'électricité qui met en jeu le couplage entre les phénomènes mécaniques et électriques en présence d'un champ magnétique.

En première année on a introduit les rails de Laplace. On peut rappeler les principaux résultats :

— Force de Laplace

$$\overrightarrow{dF} = i\overrightarrow{dl} \wedge \overrightarrow{B}$$

— Champ électromoteur. Un conducteur mobile à la vitesse $\vec{v}$ est le siège d'un champ électromoteur :

$$E_m = \vec{v} \wedge \overrightarrow{B}$$

— Conservation de la l'énergie

$$P_e + P_m = 0$$

On va ici prendre en compte la présence de milieux magnétique. On va étudier l'énergie magnétique emmagasinée dans un entrefer (milieu vide entre une partie mobile et une partie fixe).

Dans le cours précédent on aura vu le contacteur linéaire, où on aura introduit la relation entre la force magnétique et l'énergie magnétique (à courant constant) :

$$F = \left(\frac{\partial E_{mag}}{\partial x}\right) \tag{1}$$

2 Machine synchrone

2.1 Production d'un champ magnétique tournant

Un champ magnétique tourant est un champ avec une norme B_0 constante tournant à la vitesse angulaire ω_0.

$$\overrightarrow{B} = B_0(\cos(\omega_0 t)\vec{u}_x + \sin(\omega_0 t)\vec{u}_y) \tag{2}$$

Pour réaliser ce champ tournant on peut bien sûr mettre en rotation un aimant ou un électro-aimant. On peut utiliser aussi deux bobines placées en quadrature spatiale et les faire parcourir par deux courant en quadrature temporelle :

$$i_1(t) = I_m \cos(\omega_0 t) \tag{3}$$
$$i_2(t) = I_m \sin(\omega_0 t) \tag{4}$$
$$\tag{5}$$

Si les deux bobines sont identiques, le champ créé est un champ tournant :

$$\overrightarrow{B} = B_0(\cos(\omega_0 t)\vec{u}_x + \sin(\omega_0 t)\vec{u}_y) \tag{6}$$

A l'inverse des bobines placés dans un champ magnétique tournant vont génerer une f.e.m.

Manipulation : Aiguille placé dans une champ magnétique tournant. L'aiguille (dipôle magnétique) subit un couple de momemt :

$$\overrightarrow{\Gamma} = \overrightarrow{M} \wedge \overrightarrow{B} \tag{7}$$

2.2 Description de la machine synchrone

La machine synchrone possède une partie fixe, le stator et une partie mobile, le rotor, séparée par un entrefer. Le rotor est constitué d'aimants permanents ou bobiné alimenté par un courant continu. Le rotor crée un champ magnétique que l'on peut assimiler au champ créé par un aimant permannent. Le stator est constitué de bobinages produisant un champ magnétique tournant et à répartition sinusoïdale le long de l'entrefer.

On suppose que le matériau constituant le stator et le rotor est un matériau magnétique linéaire de perméabilité magnétique relative infinie (pas de saturation). De plus l'épaisseur de l'entrefer est constante.

2.3 Champ statorique

Considèrons tout d'abord une spire unique composant le stator. On s'intéresse au champ magnétique créé dans l'entrefer. Par des considérations géométriques on montre que les lignes du champ magnétiques sont radiales dans l'entrefer. L'application du théorème d'Ampère s'écrit :

$$\oint \vec{H}.\vec{dl} = \pm i \tag{8}$$

Ainsi le champ magnétique dans l'entrefer est donné par :

$$B(\theta) = \frac{\mu_0 i}{2e} \qquad \text{pour} \theta \in]-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}[\tag{9}$$

$$B(\theta) = -\frac{\mu_0 i}{2e} \qquad \text{pour} \theta \in]\frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}[\tag{10}$$

$$\tag{11}$$

On utilise un nombre N de spire de manière à avoir un champ magnétique dans l'entrefer sinusoidal :

$$\vec{B} = K_s i \cos(\theta) \tag{12}$$

avec $K_s = \frac{2\mu_0 N}{\pi e}$

Dans la suite, nous continuerons de symboliser un enroulement bipolaire générant un champ radial sinusoïdal 2π-périodique par deux conducteurs placés dans des encoches opposés afin de simplifier les schéma.

Afin de générer un champ tourant, le stator est à présent constitué de deux enroulement bipolaires orthogonaus, appelés phases, et alimentés en quadrature à la pulsation ω. Ainsi :

$$B_s = B_1 + B_2 = K_s I_m(\cos(\omega t)\cos\phi + \sin(\omega t)\sin\phi \tag{13}$$

$$B_s = K_s I_m \cos(\omega t - \gamma) \tag{14}$$

Donc le champ magnétique est spatialement sinusoïdale et il tourne dans le sens direct à la vitesse angulaire ω. On parle de champ glissant.

2.4 Champ rotorique

Le rotor est également muni d'encoches dans lesquelles des conducteurs traversés par une intensité constante I_r génerent un champ magnétique radial solidaire du rotor. En repérant la position du rotor avec l'angle θ le champ rotorique dans l'entrefer s'écrit :

$$B_r = B_{rm}\cos(\theta - \gamma) \tag{15}$$

2.5 Energie magnétique

L'énergie magnétique s'exprime par :

$$E_{mag} = \iiint \frac{B^2}{2\mu_0\mu_r} \tag{16}$$

La perméabilité dans le rotor et le stator étant infinie (hypothèse de départ), l'énergie magnétique est entièrement localisée dans l'entrefer. Avec $\vec{B} = \vec{B}_r + \vec{B}_s$ p, obtient trois termes qui représentent :

— L'énergie magnétique du circuit stratorique
— L'énergie magnétique du circuit rotorique
— L'énergie magnétique du couplage entre les circuits stratorique rotorique. Seule cette contribution dépend de θ.

2.6 Couple et condition de synchronisme

On calcul le couple par :

$$\Gamma = \left(\frac{\partial E_{mag}}{\partial \theta}\right)_i \tag{17}$$

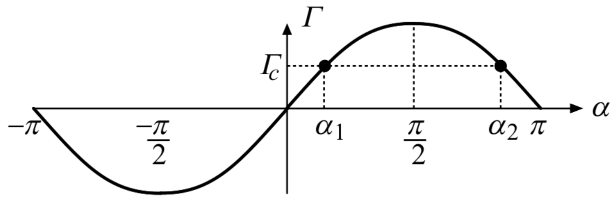
Si $\omega t - \theta \neq cste$ alors le couple moyen est nul. Il faut donc avoir synchronisme entre la rotation du rotor et le glissement du champ statorique.

2.7 Point de fonctionnement

Pour un moteur le champ rotorique est en retard par rapport au champ statorique.

Dans un alternateur le décalage α entre le moment magnétique et le champ est négatif. Le moment magnétique du rotor se trouve en avance sur le champ tournant qu'il crée.

On peut reporter les résultats précédent sur un graphique



Applications

Principale utilisation : alternateurs des centrales électriques. TGV Atlantique. Par rapport au TGV Sud Est plus de puissance et de vitesse. 8 moteurs synchrones de 1,1 MW et 1450 kg. Variation de la vitesse par onduleurs.

3 Machine à courant continu

Une machine est dite à courant continu lorsque les grandeurs électriques (potentiels et courants) sont unidirectionnelles.

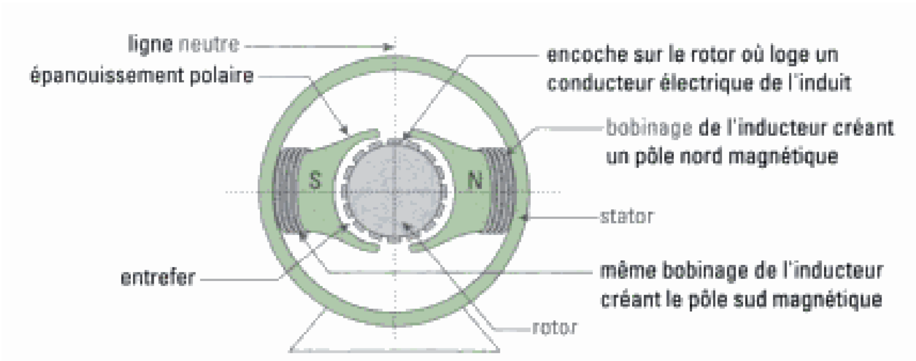
3.1 Structure

Une machine à courant continu est composée de deux circuits magnétiques, de deux circuits électriques et un dispositif de commutation[1].

— Circuits électriques
  — L'induit : circuit électrique soumis au champ magnétique et placé sur la partie mobile
  — L'inducteur : Constitue la source de champ magnétique dans la machine. (aimants permanents ou bobinage)
— Circuit magnétique
  — Le stator : Partie fixe de la machine (suffisamment massive pour ne pas être mise en mouvement).
  — Le rotor : partie mobile, solidaire de l'arbre mécanique et sur laquelle est bobiné le cirucuit induit.

— L'entrefer : espace entre l'inducteur et l'induit. Celui-ci est suffisamment faible pour optimiser le couplage électromagnétique et limiter la consomation énergétique de l'inducteur bobiné.

Le collecteur est un commutateur rotatif qui permet d'inverser le sens du courant.



3.2 Couple

La MCC est un cas particulier de la machine synchrone où $\alpha = \frac{\pi}{2}$, permettant d'avoir un couple maximal. Ainsi on peut écrire le couple sous la forme :

$$\Gamma = \phi_0 i \tag{18}$$

où la constante de couplage ϕ_0 est homogène à un flus et est proportionnelle au champ produit par l'inducteur.

3.3 f.e.m

De la conservation de l'énergie $P_e + P_m = 0$ on arrive à :

$$ei + \Gamma\omega = 0 \tag{19}$$

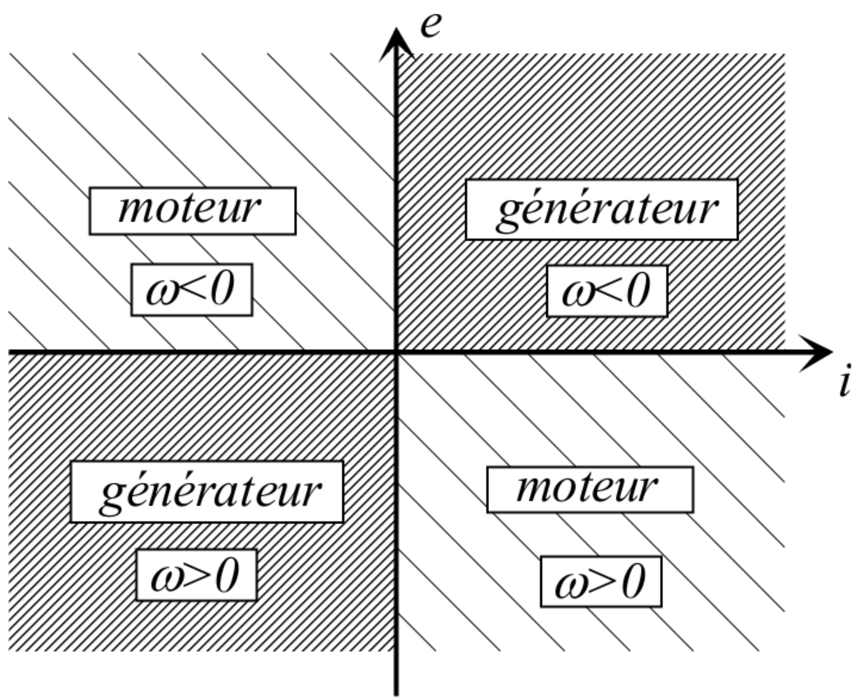
De cette égalité on peut écrire $e = -\Phi_0 \omega$
Remarques :

- P_e est la puissance électrique de la f.e.m induite en convention générateur
- P_L est la puissance mécanique du système de forces en convention générateur.
- Le flux magnétique s'exprime en T.m^2 (ou Wb)
- Φ_0 est une constante mais elle elle peut varieur si on modifie le courant dans l'inducteur
- La f.e.m. e est orientée dans le sens choisi pour l'orientation du circuit.

3.4 Réversibilité

- Fonctionnement en moteur : $\Gamma\omega > 0$. Cela impose donc $ei < 0$. La relation $e = -\Phi_0\omega$ montre que si $e > 0$ alors $\omega < 0$ ($\Phi_0 > 0$), et inversement si $e < 0$ alors $\omega > 0$
- Fonctionnement en générateur $ei > 0$.

On peut en déduire le schéma suivant :



3.5 Etude en fonctionnement moteur

On considère que lon se place à excitation indépendante et à flux constant (le courant circulant dans l'inducteur est fixe).

Equation électrique

$$u = -e + Ri + L\frac{di}{dt} \tag{20}$$
$$= \Phi_0\omega + Ri + L\frac{di}{dt} \tag{21}$$

Equation mécanique

Application du théorème du moment cinétique pour le système en rotation autour de l'axe Δ. On note J le moment d'inertie du rotor et Γ_r le moment des forces résultantes (frottements ou charge mécanique, Γ_r peut dépendre de ω). Le théorème du moment cinétique donne donc :

$$J\frac{d\omega}{dt} = \Gamma + \Gamma_r \tag{22}$$
$$= \Phi_0 i + \Gamma_r \tag{23}$$

En combinant les deux équations on arrive à :

$$LJ\frac{d^2\omega}{dt^2} + (RJ - L\frac{d\Gamma_r}{d\omega})\frac{d\omega}{dt} + \Phi_0^2\omega - R\Gamma_r = \Phi_0 u \tag{24}$$

En considérant les phénomènes d'induction propre négligeable on arrive à

$$RJ\frac{d\omega}{dt} + \Phi_0^2\omega - R\Gamma_r(\omega) = \Phi_0 u(t) \tag{25}$$

Si le moment du couple résistant Γ_r est une fonction affine de ω alors le système est linéaire. $\Gamma_r(\omega) = \Gamma_0 - f\omega$

3.5.1 Démarrage du moteur

C'est le terme Γ_r qui s'oppose au démarage du moteur. On suppose une rotation dans le sens positif ($\omega > 0$) donc $e < 0$ et $u > 0$. Le moteur démarre su $\frac{d\omega}{dt} > 0$ donc si $\Phi_0 u(0) + R\Gamma_r(0) > 0$. Cela impose donc $u(0) > U_{dem} = \frac{R|\Gamma_r(0)|}{\Phi_0}$ car $\Gamma_r(0) < 0$. On peut fair le même résonnement pour une rotation dans le sens négatif et au final on trouve

$$|u(0)| > U_{dem} \tag{26}$$

3.5.2 Point de fonctionnement

On suppose que le moteur entraîne une charge donc $\Gamma_r = \Gamma_f + \Gamma_c$, et que les frottement sont de types visqueux et sec donc $\Gamma_f = \Gamma_0 - f\omega$.

L'équation mécanique permet de trouver qu'en régime permanent on a

$$\Gamma + \Gamma_r = 0 \tag{27}$$

L'équation électrique permet de trouver Γ (toujours en négligeant L) :

$$\Gamma = \Phi_0 i = \frac{\Phi_0}{R}u - \frac{\Phi_0^2}{R}\omega \tag{28}$$

On peut tracer Γ et $-\Gamma_r$ en fonction de ω, le point de fonctionnement correspondant à l'intersection entre les deux courbes. La pente du couple moteur Γ en fonction de ω est négative et fortement inclinée car R est faible, afin de minimiser les pertes par effet Joule. On a $\omega_{max} = \frac{U}{\Phi_0}$. Le point de fonctionnement donne une vitesse voisine de ω_{max}, le mcc possède une vitesse de rotation qui dépend peu du travail mécanique qu'il fournit, c'est l'intensité qui s'ajuste pour cela.

3.5.3 Rendement

ODG : > 80%

Conclusion

On a vu deux types deux machine : à courant continu et à champ tournant. Dans les deux cas on a une conversion . La machine à courant continu présente l'avantage de ne pas a avoir de condition de synchronisme, par contre il y a nécessité d'avoir un collecteur qui coûte cher à entretenir. La machine à champ tournant présente elle l'avantage de ne pas avoir de collecteur. Un dernier type de moteur n'a pas été abordé : le moteur asynchrone.