

# Conversion Electro-mécanique de puissance

Roland Poyac - Prépa agreg de Rennes

April 2020

Niveau : PSI

Prérequis : Force de Laplace, Conversion électromécanique, Equations de Maxwell

Bibliographie :

- Principes d'électrotechnique, Max Marty, Daniel Dixneuf, Deplhine Garçia Gilabert; DUNOD
- J'intègre PSI-PSI\*, DUNOD

## Contents

<b>1</b>	<b>Champ magnétique</b>	<b>3</b>
1.1	Cycle d'hysteresis, pertes fer . . . . .	3
1.2	Circuit magnétique avec entrefer . . . . .	4
1.3	Energie magnétique . . . . .	5
1.4	Production d'un champ magnétique tournant . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Machine à champ tournant : Moteur synchrone</b>	<b>7</b>
2.1	Principe . . . . .	7
2.2	Calcul du couple par la méthode des travaux virtuels . . . . .	7
2.3	Conditions de fonctionnement . . . . .	8
2.4	Fonctionnement moteur/générateur. . . . .	9
2.4.1	Modèle de Behn Eschenburg . . . . .	9
2.4.2	Bilan de puissance . . . . .	9
2.4.3	Utilisations du moteur synchrone . . . . .	9

# Rappel

## Force de Laplace

Soit un conducteur placé dans un champ  $\mathbf{B}$  se déplaçant à une vitesse  $\mathbf{v}_c$ , la force de Laplace sur l'élément de volume  $dV$ , d'épaisseur  $dl$  s'écrit :

$$d\mathbf{f}_{Laplace} = i d\mathbf{l} \wedge \mathbf{B}$$

On peut alors calculer la puissance échangée sur un porteur :

$$\delta p = d\mathbf{f}_{Laplace} \cdot \mathbf{v}_c + \mathbf{E}_{em} \cdot i d\mathbf{l}$$

$$\delta p_{meca} + \delta p_{elec} = 0$$

Sur un circuit fermé, on obtient finalement :

$$C\Omega + U_{em} \cdot i = 0$$

## Réversibilité et pertes

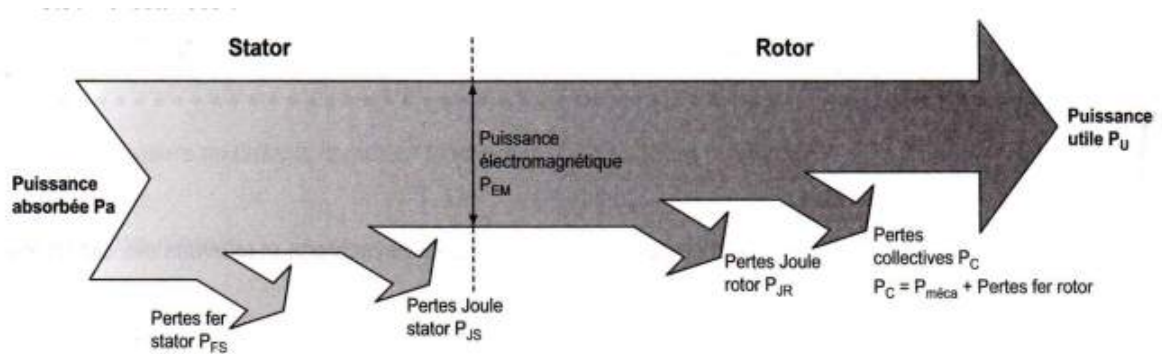


Figure 1 – Représentation des pertes au stator et au rotor d'un moteur.

Avec :

$$P_{JS} = R_S \cdot I_S^2$$

$$P_{JR} = R_R \cdot I_R^2$$

$$P_{FS/R} = P_{Foucault} + P_{hysteresis}$$

$$P_{mca} = \text{frottements, balais/collecteurs}$$

# 1 Champ magnétique

## 1.1 Cycle d'hysteresis, pertes fer

On privilégie l'utilisation de matériaux doux car ils présentent un cycle d'hysteresis étroit, ce qui permet de minimiser les pertes par hysteresis. On obtient également une zone linéaire hors saturation :  $B = \mu H$ .

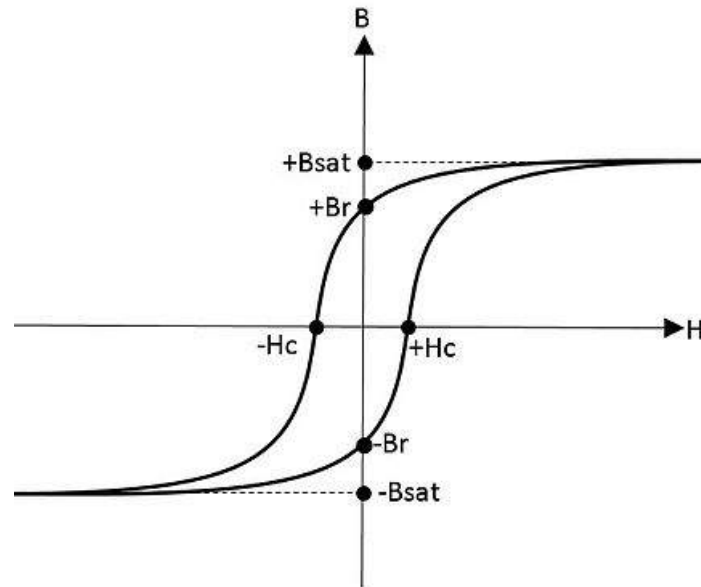


Figure 2 – Cycle d'hysteresis d'un matériau ferromagnétique

Parcourir le cycle requiert de l'énergie, ce qui engendre des pertes. Les pertes par hysteresis sont données par la formule de Steinmetz :  $P_{hysteresis} = \eta f B_{sat}^2$  en Watt/kg pour du fer avec adjonction de silicium.

Tout matériau soumis à des champs mobiles à des pertes par courants de Foucault :  $P_{Foucault} = \gamma e^2 f^2 B_{sat}^2$  en Watt/kg

On donne l'ordre de grandeur des pertes fer pour des matériaux de 0.35 mm d'épaisseur soumis à une fréquence de 50 Hz :

Tôles de fer doux	3,6 W/kg pour une induction de	1 T
Fer + quelques % Si	1,4 W/kg	1,4 T
Cristaux orientés (fragiles)	1,1 W/kg	1,7 T
Mumétal (quand prix secondaire)	0,1 W/kg	1,7 T

Figure 3 – Pertes pour différents matériaux

## 1.2 Circuit magnétique avec entrefer

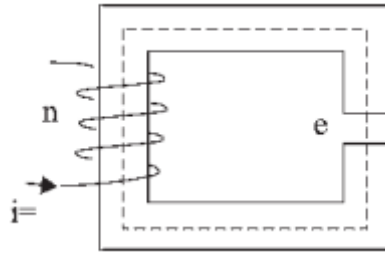


Figure 4 – circuit avec un entrefer étroit

La conservation du flux donne  $\text{div}\mathbf{B} = 0$  et on a donc  $\phi_f = \phi_e$ . Dans le cas d'un entrefer étroit, les lignes d'induction sont canalisées et on a  $B_e = B_f$ . On applique Maxwell Ampère sur le circuit :

$$\oint_{\text{Circuit}} \mathbf{H}d\mathbf{l} \rightarrow H_f \cdot l_f + H_e \cdot e = ni$$

$$l_f \frac{B}{\mu_0 \mu_r} + e \frac{B}{\mu_0} = ni$$

$$B = \frac{\mu_0 ni}{\left(e + \frac{l_f}{\mu_r}\right)}$$

Or, dans le cas d'un matériau doux,  $\mu_r \gg 1$  et on a donc :

$$B = \frac{\mu_0 ni}{e}$$

On remarque que dans le cas d'un entrefer large, les lignes d'induction ne sont plus canalisées et on observe des fuites :

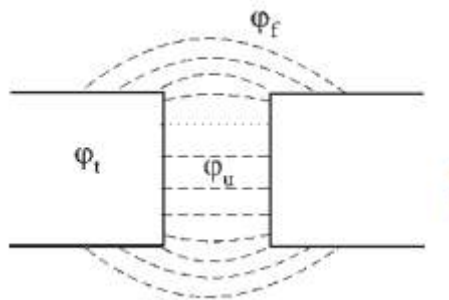


Figure 5 – On observe des fuites magnétiques autour de l'entrefer

### 1.3 Energie magnétique

La densité d'énergie magnétique est donnée par :

$$\mathcal{E}_{vol}^{mag} = \int_0^{B_0} H(B)dB$$

Hors du régime saturé, dans la zone linéaire :

$$\mathcal{E}_{vol}^{mag} = \frac{1}{2}B_0H_0$$

L'énergie étant proportionnelle au champ B, on remarque que l'énergie n'est pas stockée dans le fer mais dans l'entrefer.

### 1.4 Production d'un champ magnétique tournant

Le théorème de Leblanc annonce qu'un champ pulsant est la somme de deux champs tournant

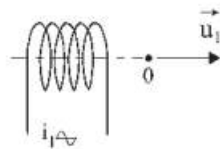


Figure 4.1

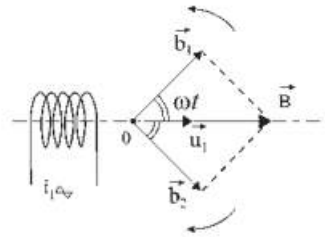


Figure 4.2

Figure 6 – Champ pulsant représenté dans le plan complexe

Un champ pulsant s'écrit :

$$\mathbf{B} = \frac{B}{2}e^{j\omega t}\mathbf{u}_1 + \frac{B}{2}e^{-j\omega t}\mathbf{u}_1 = \mathbf{b}_1 + \mathbf{b}_2$$

En utilisant deux champs pulsant on peut obtenir un champ tournant. Pour se faire on égalise les composantes des deux champs pulsant :

$$b_1 = b'_1$$

$$b_2 = b'_2$$

Il faut donc que les champs B et B' soient orthogonaux, dans ce cas on obtient :

$$B(\theta, t) = \frac{\mu_0 i(t)}{2e} \text{ pour } \theta \in \left] \frac{-\pi}{2}; \frac{\pi}{2} \right[$$

$$B(\theta, t) = -\frac{\mu_0 i(t)}{2e} \text{ sinon}$$

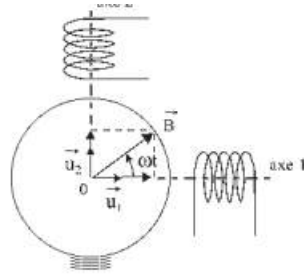


Figure 7 – Utilisation de deux champs orthogonaux pour former un champ tournant

On obtient alors un signal en créneau, afin de le rendre plus sinusoïdal on répartit le bobinage dans des encoches :

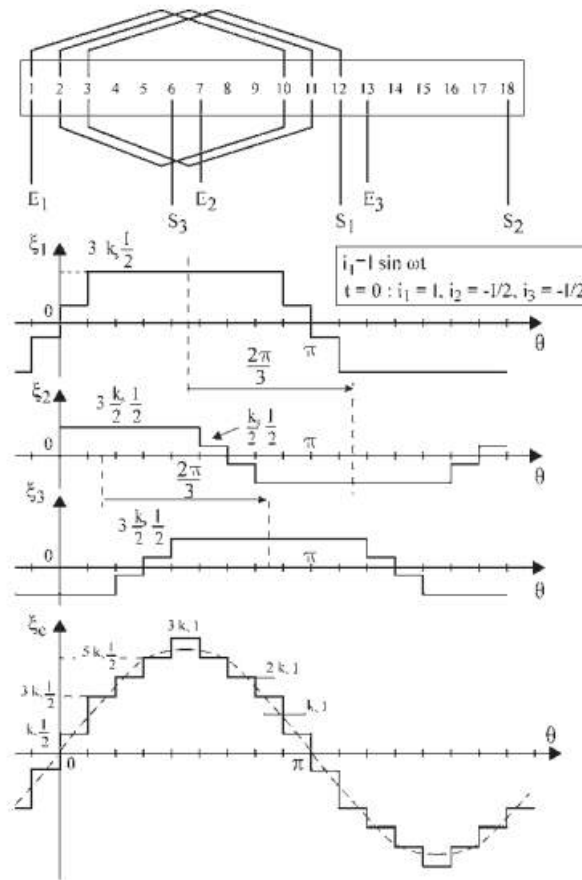


Figure 7.30

Figure 8 – Représentation des enroulements d'une phase et la force magnétique créée

## Expérience

Transition : Expérience évoquée en cours (bobines de Helmholtz+boussole)

## 2 Machine à champ tournant : Moteur synchrone

### 2.1 Principe

Une machine à champ tournant est constituée d'un :

- Stator : Partie fixe du moteur, il porte l'induit.
- Rotor : Partie mobile du moteur, il porte l'inducteur

### 2.2 Calcul du couple par la méthode des travaux virtuels

Le théorème des travaux virtuels s'écrit :

$$C = \frac{\partial \mathcal{E}_{mag}}{\partial \theta}$$

On a vu précédemment que l'énergie était principalement stockée dans l'entrefer, donc :

$$\mathcal{E}_{mag} = \iiint_{V_{entrefer}} \frac{(B_R + B_S)^2}{2\mu_0} d\tau$$

Avec :  $B_S = K_S I_{eff} \sqrt{2} \cos(\omega t - \theta)$  et  $B_R = K_R I_e \cos(\theta - \theta_r)$

On note  $d\tau = S_e d\theta$  volume élémentaire de l'entrefer. On a donc :

$$\mathcal{E}_{mag} = f(\theta) + \frac{S_e}{\mu_0} K_S K_R I_{eff} I_e \sqrt{2} \int_0^{2\pi} \cos(\theta - \theta_r) \cos(\omega t - \theta) d\theta$$

$$\mathcal{E}_{mag} = f(\theta) + \frac{S_e}{\mu_0} K_S K_R I_{eff} I_e \sqrt{2} \cos(\omega t - \theta_r)$$

En appliquant le théorème des travaux virtuels :

$$C = \frac{S_e K_S K_R I_{eff} I_e \sqrt{2}}{\mu_0} \sin(\omega t - \theta_r)$$

## 2.3 Conditions de fonctionnement

On remarque que le couple que l'on vient de calculer à une moyenne nulle sauf si  $\theta_r = \omega t - \alpha$  : c'est la condition de synchronisme.

Dans ce cas le couple vaut :  $C = KI_{eff}I_e \sin\alpha$

On peut donc tracer le couple en fonction de l'angle  $\alpha$  :

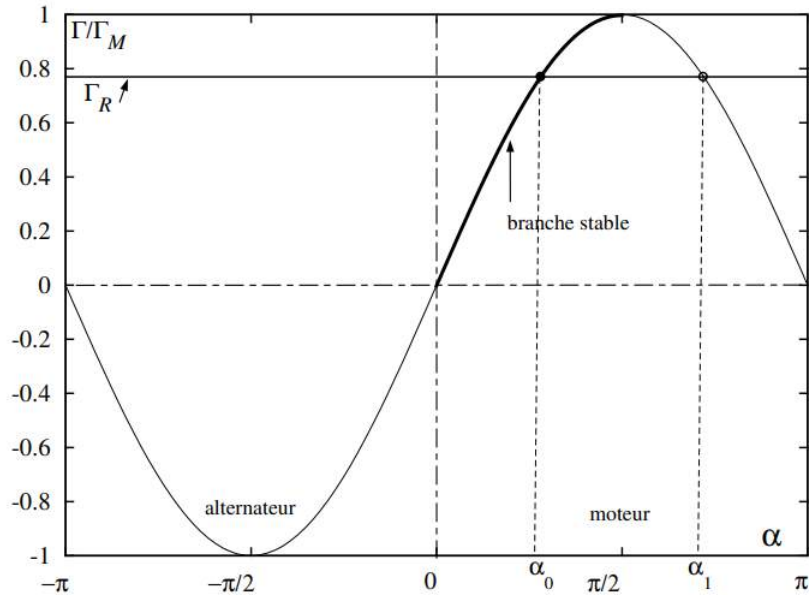


Figure 9 – Couple en fonction de l'angle  $\alpha$ , sont notés le fonctionnement moteur et alternateur ainsi que la branche stable

On voit donc que pour un couple donné il existe deux points de fonctionnements, l'un stable ( $\alpha < \frac{\pi}{2}$ ) et l'autre instable ( $\alpha > \frac{\pi}{2}$ )

Il existe un couple maximum au delà duquel le moteur "décroche".

Les moteurs synchrones nécessitent d'être démarré (on parle d'accrochage) à l'aide d'un moteur auxiliaire afin d'atteindre la vitesse de synchronisme.

Ils sont facilement réversibles après accrochage.



## 2.4 Fonctionnement moteur/générateur.

### 2.4.1 Modèle de Behn Eschenburg

Le modèle de Behn Eschenburg permet de représenter une machine triphasée :

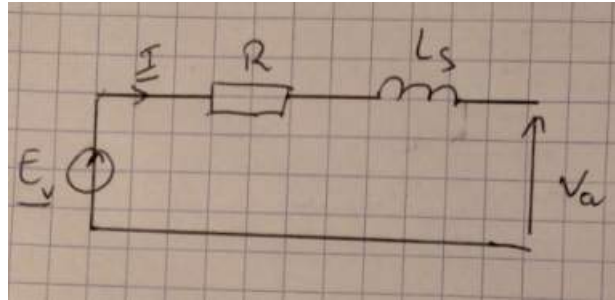


Figure 10 – Modélisation d'une machine triphasée par un modèle monophasé découplé.

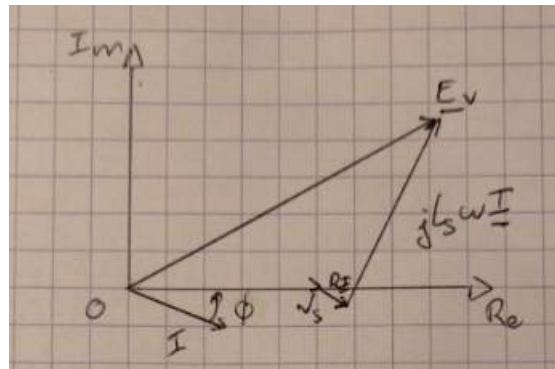


Figure 11 – Diagramme de Fresnel utilisant le modèle de Behn Eschenburg

### 2.4.2 Bilan de puissance

La puissance électrique reçue par le moteur s'écrit :

$$P_{elec} = \frac{1}{2} \text{Re}(V_S I_S) = \frac{1}{2} V_S I_S \cos \Phi$$

où  $\cos \Phi$  est le facteur de puissance que l'on cherche à maximiser.

On a donc

$$P_{elec} + \sum \text{Pertes} = P_{meca}$$

en fonctionnement moteur.

En régime stationnaire, il n'y a pas de pertes fer au rotor, celui-ci tournant avec le champ.

### 2.4.3 Utilisations du moteur synchrone

Le moteur synchrone présente un rendement élevé mais on des problèmes au démarrage, ils sont donc utilisés dans l'industrie de puissance qui tourne longtemps (pompes, convoyeurs,...).

Des moteurs auto-synchrone ont été utilisés pour le TGV atlantique.

De petits moteurs synchrones sont également utilisés lorsqu'il est nécessaire d'obtenir un déplacement à vitesse constante (chariot de Michelson).