

# LP20 : Conversion de Puissance électromécanique

Avril 2021

**Niveau :** CPGE deuxième année

**Prérequis :** mécanique (couple de force, théorème de l'énergie cinétique, théorème du moment cinétique), milieux magnétiques, électromagnétisme (lois de l'induction), électricité (circuit électrique, lois des mailles)

## Introduction :

L'énergie que l'on utilise au quotidien est exclusivement transportée sous forme électrique. Cependant elle est produite par un travail mécanique comme une turbine et elle est souvent utilisée également sous forme de travail mécanique (TGV, aspirateur...). Entre toutes ces étapes il y a donc besoin de conversion électromécanique. Ce procédé essentiel va être développé dans cette leçon autour d'un exemple qui est la machine synchrone.

## 1 Organisation de la machine synchrone

### 1.1 Organisation

[Schéma de la machine sur diapo](#)

Définir calmement les différentes parties de la machine en s'appuyant sur le diapo.

La machine synchrone est composée de deux parties en matériau magnétique. On fait l'hypothèse que ce matériau magnétique est **idéal** ( $\mu_r \rightarrow \infty$ ).

Le **stator** est fixe alors que le **rotor** va pouvoir tourner. Entre les deux un espace vide s'appelle **l'entrefer**.

Des bobinages se trouvent sur le Rotor et le stator. Ceux du rotor vont être parcourus par un courant d'excitation permanent et va jouer le rôle d'inducteur alors que les circuits du stator vont être des circuits induits.

### 1.2 Circuit statorique

#### 1.2.1 Etude d'une spire :

Schéma d'une spire sur le stator et lignes de champ créées par cette spire.

Les lignes de champs sont radiales dans l'entrefer. On veut étudier la forme des lignes de champ créées par cette spire.

On effectue un théorème d'Ampère sur une ligne de champ.  $\vec{H}$  est nul sur les portions de la ligne de champ dans le matériau magnétique car matériau idéal.

Avec la symétrie du système on a pour  $\theta \in ]\frac{-\pi}{2}; \frac{\pi}{2}[$   $B(\theta) = \frac{\mu_0 i}{2e}$ .

Par symétrie : pour  $\theta \in ]\frac{\pi}{2}; \frac{3\pi}{2}[$   $B(\theta) = -\frac{\mu_0 i}{2e}$

Courbe de  $B(\theta)$  sur diapo, cela forme un créneau.

On aimerait avoir un champ sinusoïdal d'espace. Voyons ce qu'il se passe si on rajoute 2 spires à  $\pm\frac{\pi}{3}$  de la première spire.

Schéma des trois spires et la courbe de  $B(\theta)$  sur diapo, on a quelque chose qui se rapproche plus de la sinusoïde.

On peut en conclure que si on rajoute de nombreuses spires à ce circuit on va pouvoir créer un champ qui s'écrit :

$$B(\theta) = ki(t) \cos(\theta)$$

avec k qui dépend du matériau du stator, de la géométrie des spires et du nombre de spire.

L'ensemble de ces spires forment un bobinage qui est parcouru par un seul et même courant.

### 1.2.2 Etude de deux circuits

On cherche à présent à produire un champ tournant. Pour ça on va rajouter un circuit dans le stator.

Schéma des deux circuits statoriques en quadrature sur diapo.

Le premier circuit va créer un champ de la forme :  $\vec{B}_{S1} = ki_1(t) \cos(\theta) \vec{e}_r$

Le second circuit va créer un champ de la forme :  $\vec{B}_{S2} = ki_2(t) \cos(\theta - \frac{\pi}{2}) \vec{e}_r$ .

On déphase les intensités également :

$$\begin{cases} i_1(t) = I \cos(\omega t) \\ i_2(t) = I \cos(\omega t - \frac{\pi}{2}) \end{cases}$$

Le champ créé par le stator est alors la somme des deux champs créés par les deux circuits :

$$\vec{B}_s = kI \cos(\omega t - \theta)$$

C'est donc un champ glissant.

*Rq: La plupart des machines utilisées sont des machines triphasées c'est à dire avec trois circuits déphasés de  $\frac{2\pi}{3}$  ici on se limite à du diphasé pour simplifier les calculs.*

## 1.3 Circuit Rotorique

Schéma du circuit rotorique sur diapo.

On a un bobinage qui est parcouru par un courant d'excitation permanent d'intensité  $I_e$ . Il crée un champ :

$$\vec{B}_r = k' I_e \cos(\theta - \theta_r)$$

## 2 Principe de la machine synchrone

### 2.1 Couple électromécanique

L'énergie magnétique est égale à celle dans l'entrefer. Si on fait le calcul on trouve trois termes. Le premier dû au rotor, le second au stator et le troisième est dû au couplage entre les deux.

L'expression du couple est :

$$\Gamma = \left( \frac{\partial E_{mag}}{\partial \theta_r} \right)$$

Avec  $I$  et  $I_e$  indépendant de  $\theta_r$

Après calcul :  $\gamma_{em} = K I I_e \sin(\omega t - \theta_r)$

Il faudrait peut-être réfléchir à mettre le bilan de puissance à ce niveau là de la leçon et à démontrer ce couple même si la démonstration n'est pas au programme de prépa. Pour la démo voir le poly de JBD.

### 2.2 Condition de synchronisme

En régime permanent, lorsque le rotor est à la vitesse de rotation  $\Omega$ , on a :  $\frac{d\theta_r}{dt} = \Omega \Rightarrow \theta_r = \Omega t + \alpha$

On injecte cette expression dans l'expression du couple.

$< \Gamma_{em} = 0$  si  $\omega \neq \Omega$ .

Pour que la machine entraîne le rotor il faut que  $\omega = \Omega$ . C'est la **Condition de synchronisme**.

$$\Gamma_{moy} = K I_e I \sin(\alpha)$$

.

*Rq:  $\alpha$  est l'angle que fait l'axe du rotor avec l'axe du stator à  $t = 0$*

### 2.3 Réversibilité

La machine synchrone peut fonctionner en mode Alternateur ou moteur. L'angle  $\alpha$  est constant au cours du temps. La machine va fonctionner dans un régime ou dans l'autre en fonction du signe de  $\alpha$ . Voir le signe du couple.

Voir la courbe de  $\Gamma$  sur diapo

### 3 Bilan de Puissance

Comme dit précédemment il faudrait remanier le plan et peut-être réfléchir différemment à cette partie

Montrer le modèle électrique d'une phase sur diapo.

On peut écrire la loi des mailles associée et de là faire un bilan de puissance.

Voir bilan de puissance important sur diapo.

La puissance électrique qui est fournie au moteur est convertie en pertes Joule et en puissance électromagnétique. Celle-ci est convertie en puissance mécanique et en perte par frottement.

### Conclusion

On peut conclure sur un autre système qui permet de convertir de la puissance : la machine asynchrone. Elle a la même organisation statorique mais a un rotor qui fonctionne différemment.

On peut d'ailleurs signaler qu'au vu de la condition de synchronisme la machine synchrone ne peut pas démarrer seule. On utilise alors parfois des petits moteurs asynchrone pour l'entraîner.

### 4 Choix pédagogique

Au départ j'avais prévu de faire le contacteur en première partie. Ce système bien que ne servant pas pour faire de la conversion de puissance me semblait un bon exemple pour introduire les notions plus facilement qu'avec la machine synchrone. J'ai finalement décidé de ne pas en parler pour prendre le temps d'expliquer l'organisation de la machine synchrone pour que la géométrie soit la plus claire possible. J'ai donc choisi de faire une grande partie de ces explications sur diapo car à moins de sortir des beaux arts il est impossible de faire les schémas de cette machine sur le tableau.

### 5 Questions/Commentaires

- dans calcul synchronisme pourquoi on s'intéresse à la moyenne du couple ?
- Notion de paire de pôles pas central dans la leçon
- à quel endroit plus de risque de saturation ? (diapo circuit statorique) proche de la spire car champ le plus fort là où ligne de champ serrées
- de quoi dépend le coefficient  $k$  ? de la géométrie des spires, du matériau, du nombre de spires.
- Energie magnétique : Expliciter un peu plus les termes sur le diapo  $E_{mag, stator \text{ ou } rotor}$
- la formule du couple utilisée n'est valable que dans des cas particuliers par exemple pas valable pour machine asynchrone pour laquelle il faut rajouter un terme

- dans graph sur réversibilité que représente  $\alpha$  c'est l'angle entre l'axe du circuit rotorique et l'axe du champ statorique.
- Que se passe-t-il si on appelle plus de puissance que ce que le système est capable de convertir ? on sort du régime permanent, l'alternateur va décrocher et s'arrêter.
- sur le dernier slide y a un terme de pertes qui manque Ce sont les pertes fer à placer avec les pertes méca. Mais ici en supposant le matériau magnétique comme idéal elles n'y sont effectivement pas.
- dans conclusion, parler de machine asynchrone en disant pareil pour stator mais rotor différent
- petite manip pourrait être cool : par exemple création champ tournant avec deux bobines et petite aiguilles qu'on fait tourner et qui tourne avec condition de synchronisme (travailler autour de 10Hz) faire attention quand même, ne pas en faire dire trop
- NE PAS TRAITER LA MACHINE ASYNCHRONE DANS LA LECON
- Condition de synchronisme toujours vraie ? Oui pour une paire de pôles.

## 6 Bibliographie

- Tout en un, PSI/PSI\*, Dunod
- Cours de JBD
- H-prépa d'électrotech