

Conversion de puissance

III — Machine synchrone (2)

La machine synchrone est un convertisseur électromécanique réversible, pouvant fonctionner en moteur (conversion d'énergie électrique en énergie mécanique) ou en générateur (conversion d'énergie mécanique en énergie électrique).

Structure d'une machine synchrone à pôles lisses et à excitation séparée

Deux parties mécaniques :

le stator partie extérieure **fixe**, de forme cylindrique, constituée d'un matériau ferromagnétique doux non saturé.

le rotor partie **mobile**, de forme cylindrique, en rotation à l'intérieur du stator. Il peut être constitué d'un aimant permanent (pour les machines de faible puissance), ou d'un milieu ferromagnétique doux non saturé.

On se place dans le cas $\mu_r \rightarrow \infty$.

Deux éléments électriques :

l'inducteur qui crée un champ magnétique constant (dans son référentiel). C'est un aimant permanent, ou un circuit bobiné parcouru par un courant permanent (pour une machine bipolaire)

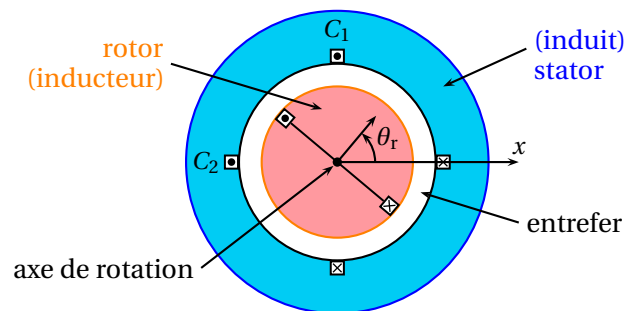
l'induit constitué de deux circuits parcourus par un courant sinusoïdal (pour une machine diphasée).

L'induit est solidaire du stator et l'inducteur est solidaire du rotor.

Les fils des bobinages sont placés dans des encoches creusées dans les milieux magnétiques, de telle sorte que l'épaisseur de l'entrefer est constante : on parle de **machine à pôles lisses**.

Chaque circuit bobiné sur le stator représente une phase de l'induit. Le schéma ci-contre représente un circuit diphasé (il possède deux bobinages induits C_1 et C_2 parcourus par des intensités $i_1(t)$ et $i_2(t)$).

Les circuits du rotor et du stator sont alimentés par des sources distinctes (courant alternatif pour le stator, courant continu pour le rotor) : on parle de **machine à excitation séparée**.

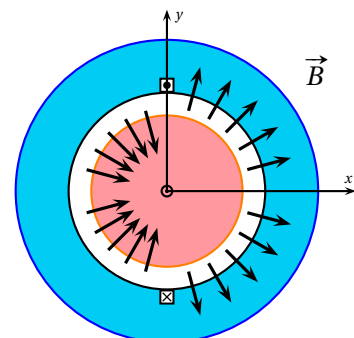
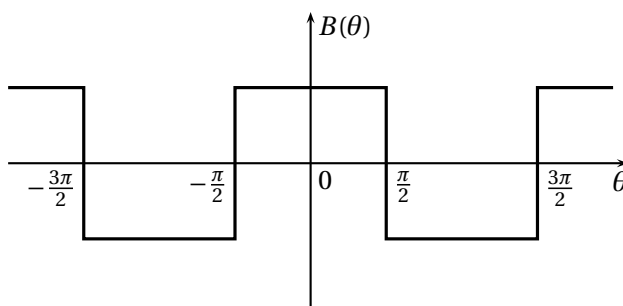


Champ magnétique dans l'entrefer

Champ créé par une spire statorique

En coordonnées cylindriques, le champ créé dans l'entrefer par une spire statorique est radial, de la forme $\vec{B}(M, t) = B(\theta, t) \vec{e}_r$, avec $B(\pi - \theta, t) = -B(\theta, t)$ et $B(-\theta, t) = B(\theta, t)$:

$$\vec{B}(\theta, t) = \begin{cases} \frac{\mu_0 i(t)}{2e} \vec{e}_r & \text{pour } \theta \in \left] -\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \right[\\ -\frac{\mu_0 i(t)}{2e} \vec{e}_r & \text{pour } \theta \in \left] \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2} \right[\end{cases}$$



Obtention d'un champ dont la dépendance angulaire est sinusoïdale

En ajoutant plusieurs spires parcourues par le même courant $i(t)$, on peut, avec une répartition spatiale *ad hoc* des spires, approcher un champ magnétique fonction sinusoïdale de la position angulaire :

$$\vec{B}(\theta, t) = K_s i(t) \cos(\theta) \vec{e}_r,$$

où K_s est un facteur de forme qui dépend du nombre de spires et de leur répartition spatiale.

L'ensemble des N spires parcourues par le même courant $i(t)$ forme une **phase** du circuit induit.

- Pour simplifier, on continuera par la suite à représenter les enroulements d'une phase par deux encoches diamétralement opposées (C_1 sur notre exemple), chaque phase créant un champ variant sinusoïdalement.

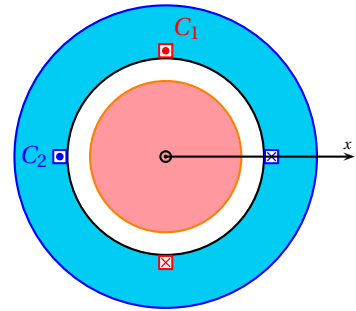
Champ glissant statorique créé par un stator diphasé

On utilise deux phases C_1 et C_2 alimentées par des courants en quadrature, de même pulsation : $i_1(t) = I_s \cos(\omega t)$ et $i_2(t) = I_s \sin(\omega t)$.

En utilisant deux phases alimentées en quadrature, solidaires du stator, on obtient un champ statorique tournant à la vitesse angulaire ω , pulsation des courants dans les spires du stator :

$$\vec{B}_s(\theta, t) = K_s I_s \cos(\omega t - \theta) \vec{e}_r.$$

on parle de **champ glissant statorique**.



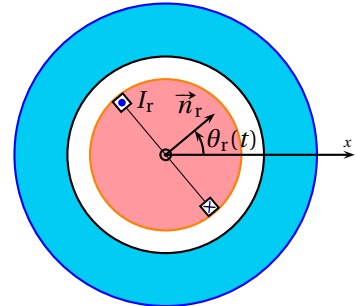
Champ glissant rotorique

Le rotor est muni d'encoches permettant d'y placer un bobinage parcouru par un courant permanent d'intensité I_r , qui crée dans l'entrefer le champ magnétique rotorique tournant à la vitesse angulaire $\Omega_r = \dot{\theta}_r$ de rotation du rotor :

$$\vec{B}_r(\theta, t) = K_r I_r \cos[\theta_r(t) - \theta] \vec{e}_r,$$

où $\theta_r(t)$ repère la position du rotor.

En utilisant une phase alimentée par un courant continu, solidaire du rotor, on obtient un champ rotorique tournant à la vitesse angulaire Ω_r de rotation du rotor : on parle de **champ glissant rotorique**.



Énergie magnétique

L'énergie magnétique est donnée par

$$\mathcal{E}_m = \iiint_{\text{fer}} \frac{B^2}{2\mu_0\mu_r} d\tau + \iiint_{\text{entrefer}} \frac{B^2}{2\mu_0} d\tau = \iiint_{\text{entrefer}} \frac{B^2}{2\mu_0} d\tau$$

car $\mu_r \rightarrow \infty$: l'énergie stockée dans le milieu magnétique est donc nulle, et l'énergie magnétique est entièrement localisée dans l'entrefer. On note R_1 le rayon du rotor et ℓ sa longueur selon l'axe de rotation.

On obtient

$$\mathcal{E}_m(\theta_r) = \frac{\pi \ell R_1}{2\mu_0} K_s^2 I_s^2 + \frac{\pi \ell R_1}{2\mu_0} K_r^2 I_r^2 + \frac{\pi \ell R_1}{\mu_0} K_s K_r I_s I_r \cos[\omega t - \theta_r(t)].$$

Couple magnétique

Le couple s'exerçant sur le rotor est donné par $\Gamma = \left(\frac{\partial \mathcal{E}_m}{\partial \theta_r} \right)_{I_s, I_r}$, soit

$$\Gamma = \frac{\pi \ell R_1}{\mu_0} K_s K_r I_s I_r \sin[\omega t - \theta_r(t)].$$

Condition de synchronisme

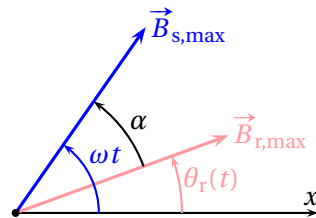
Le couple moyen exercé sur le rotor est non nul s'il y a synchronisme entre le champ statorique et le champ rotorique :

$$\omega = \dot{\theta}_r, \quad \text{soit} \quad \omega t = \theta_r(t) + \alpha.$$

On a alors un couple constant

$$\Gamma = \frac{V}{2\mu_0} B_{sm} B_{rm} \sin \alpha,$$

où $V = 2\pi R_1 e \ell$ est le volume de l'entrefer, B_{sm} l'amplitude du champ statorique, B_{rm} l'amplitude du champ rotorique et α l'angle entre le champ rotorique et le champ statorique.

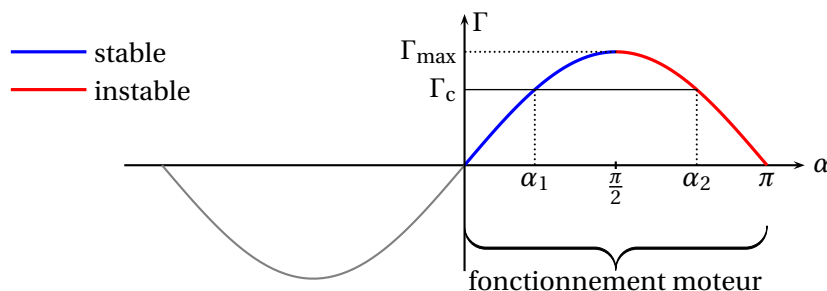


- Le couple fourni est d'autant plus important que les dimensions de la machine (R_1 et ℓ) sont importantes.
- Les champs magnétiques créés varient comme $1/e$, le terme $V B_{sm} B_{rm}$ est proportionnel à $e \times \frac{1}{e} \times \frac{1}{e} = \frac{1}{e}$: le couple est d'autant plus important que l'entrefer e est petit.

Stabilité du système en fonctionnement moteur

Le moteur entraîne une charge mécanique exerçant sur le rotor un couple résistant $-\Gamma_r < 0$.

Le fonctionnement moteur correspond à un couple électromagnétique positif : $\Gamma > 0$.



Le fonctionnement est moteur pour $0 < \alpha < \pi$.

Le fonctionnement est stable pour $0 < \alpha < \pi/2$.

- Le couple moteur exercé sur le rotor est maximal pour $\alpha = \pi/2$. Si $\Gamma_c > \Gamma_{\max}$, il y a décrochage et le rotor finit par s'immobiliser.
- Le moteur synchrone ne peut pas démarrer seul : on a $\langle \Gamma \rangle = 0$ partant du repos initial $\dot{\theta}_r = 0$.
On peut démarrer le moteur à l'aide d'un autre moteur, ou faire croître progressivement la pulsation ω des courants statoriques en l'asservissant à la vitesse angulaire du rotor pour satisfaire $\omega(t) = \dot{\theta}_r(t)$ à chaque instant : on parle de **machine auto pilotée**.

Modèle électrique

On considère les deux enroulements du stator identiques, de résistance R_s , tandis que l'enroulement du rotor a pour résistance R_r . Les deux enroulements du stator ont la même inductance propre L_s .

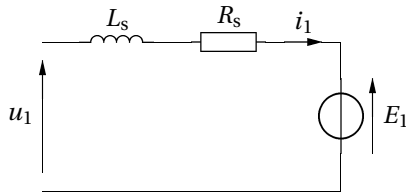
On note ϕ_1 et ϕ_2 les flux du champ magnétique total à travers les deux enroulements du stator et ϕ_r le flux à travers l'enroulement du rotor.

Du fait du synchronisme de sa rotation, le flux ϕ_r à travers le rotor est constant : il n'y a pas de phénomène d'induction, ce circuit est ainsi qualifié d'**inducteur**. On a alors $u_r = R_r I_r$.

Les deux phases du stator étant perpendiculaire leur coefficient d'inductance mutuelle est nul : $M_{12} = 0$.

Le coefficient d'inductance mutuelle de la phase C_1 avec le rotor s'écrit $M_{r \rightarrow 1} = M_0 \cos \theta_r$.

Le flux magnétique à travers la phase C_1 est $\phi_1 = L_s i_1 + M_{12} i_2 + M_{r \rightarrow 1} I_r$, d'où le schéma électrique



$$u_1 = R_s i_1 + L_s \frac{di_1}{dt} + E_1 \quad \text{avec} \quad E_1 = -M_0 I_r \omega \sin(\omega t - \alpha)$$

► On note $E_1 = + \frac{d\phi_{r \rightarrow 1}}{dt}$ la **force contre électromotrice fcém**.

Le coefficient d'inductance mutuelle de la phase C_2 , perpendiculaire à C_1 , avec le rotor s'écrit $M_{r \rightarrow 2} = M_0 \sin \theta_r$, d'où $\phi_2 = L_s i_2 + M_0 \sin \theta_r$ et

$$u_2 = R_s i_2 + L_s \frac{di_2}{dt} + E_2 \quad \text{avec} \quad E_2 = M_0 I_r \omega \cos(\omega t - \alpha)$$

► Contrairement au rotor, il y a bien un phénomène d'induction dans le stator; on appelle donc les enroulements du stator l'**induit**.

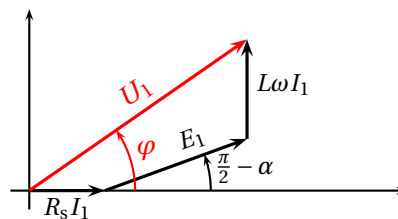
Notation complexe pour le circuit C_1 :

$$\underline{U}_1 = R_s \underline{I}_1 + j L_s \omega \underline{I}_1 + \underline{E}_1 \quad \text{avec} \quad \underline{E}_1 = M_0 I_r \omega e^{j(\frac{\pi}{2} - \alpha)}$$

Notation complexe pour le circuit C_2 :

$$\underline{U}_2 = R_s \underline{I}_2 + j L_s \omega \underline{I}_2 + \underline{E}_2 \quad \text{avec} \quad \underline{E}_2 = M_0 I_r \omega e^{-j\alpha}$$

Représentation de Fresnel associée à la phase C_1 de l'induit :



Bilan énergétique

La puissance électrique totale reçue par la machine s'écrit

$$p(t) = u_1 i_1 + u_2 i_2 + u_r I_r = R_s i_1^2 + R_s i_2^2 + R_r I_r^2 + \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L_s (i_1^2 + i_2^2) \right) + E_1 i_1 + E_2 i_2.$$

La puissance moyenne vaut

$$P = R_s I_s^2 + R_r I_r^2 + \langle E_1 i_1 + E_2 i_2 \rangle.$$

► Le terme $R_s I_s^2 + R_r I_r^2$ correspond aux **pertes cuivre** par effet Joule dans les fils des enroulements.

La puissance absorbée par les fcém dans l'induit vaut $P_{fcém} = E_1 i_1 + E_2 i_2$, soit $P_{fcém} = M_0 I_r I_s \sin \alpha$.

► La puissance absorbée par les fcém dans l'induit est positive pour $\alpha \in]0, \pi/2[$, c'est-à-dire lorsque la machine a un fonctionnement moteur.

Le bilan de puissance électrique de la machine synchrone s'écrit

$$P_{\text{élec}} = P_{\text{cuivre}} + P_{\text{fcém}}$$

où $P_{\text{élec}}$ est la puissance électrique fournie à la machine, P_{cuivre} la puissance dissipée par effet Joule dans les enroulements des circuits (pertes cuivre) et $P_{\text{fcém}}$ la puissance électrique absorbée par les fcém de l'induit. La puissance électrique absorbée par les fcém est intégralement convertie en puissance mécanique fournie à la charge :

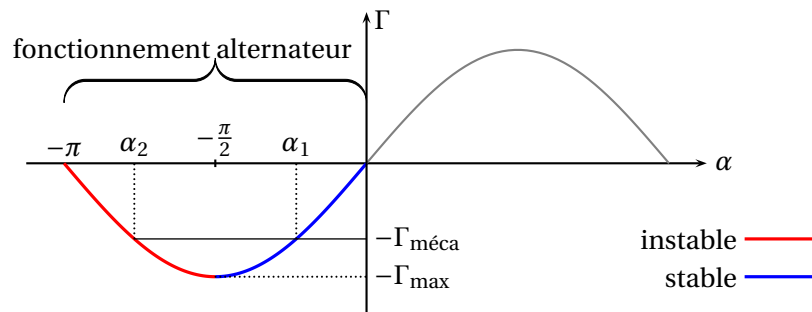
$$P_{\text{méca}} = P_{\text{fcém}}.$$

Réversibilité : fonctionnement en alternateur

La machine synchrone a un fonctionnement parfaitement réversible.

Fonctionnement moteur : elle reçoit de la puissance électrique qu'elle convertit en puissance mécanique, entraînant la rotation du rotor.

Fonctionnement alternateur : elle reçoit de la puissance mécanique par la mise en rotation du rotor, qu'elle convertit en puissance électrique.



Applications

Les moteurs synchrones sont utilisés pour des TGV, dans des voitures électriques (Toyota Prius), dans des installations industrielles de puissance fonctionnant en continu (pompes, convoyeurs, laminoirs, etc.)

Avantages :

- rendement élevé;
- bon rapport couple/encombrement.

Inconvénient :

- démarrage non autonome;
- possibilité de décrochage si la charge est trop importante.

Les machines synchrones sont principalement utilisées en alternateur, équipant toutes les centrales électriques.