

Machine synchro

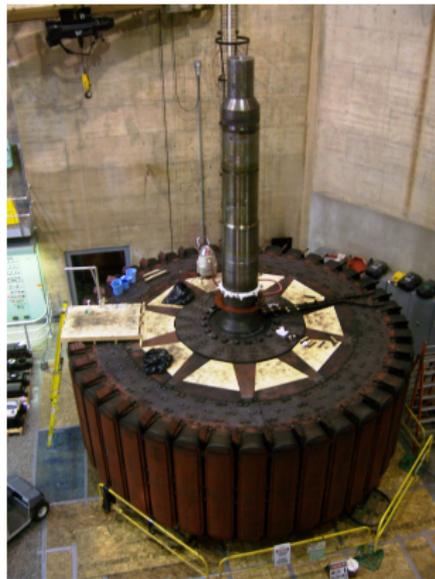
E. Saudrais

Jean Perrin PSI

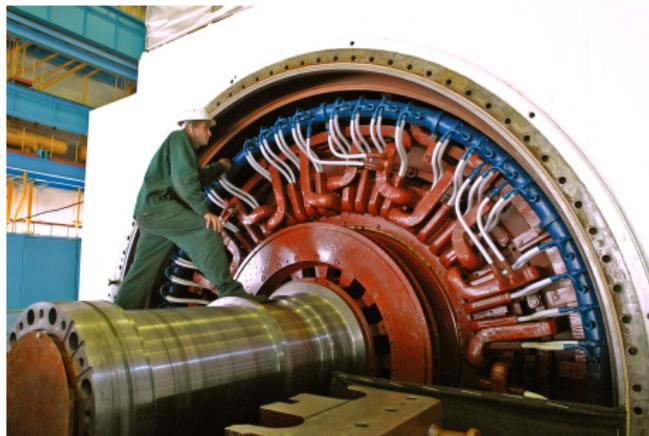
25 mars 2024

[1] – Machine synchrone

Détails : rotors



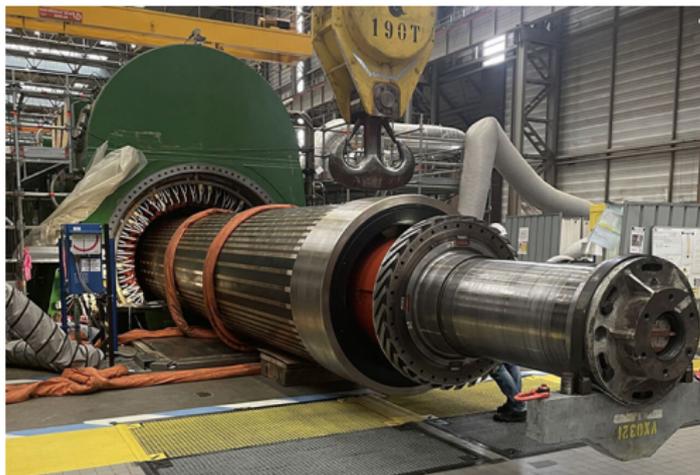
Génératrice barrage Hoover



Génératrice centrale Balakovo

[2] – Machine synchrone

Détails



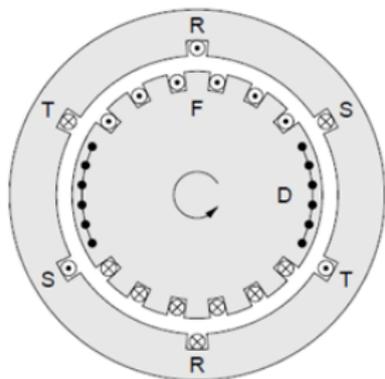
Rotor centrale



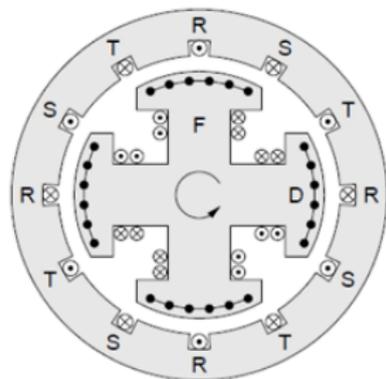
Moteur TGV

[3] – Rotors

Pôles lisses, pôles saillants



Pôles lisses



Pôles saillants

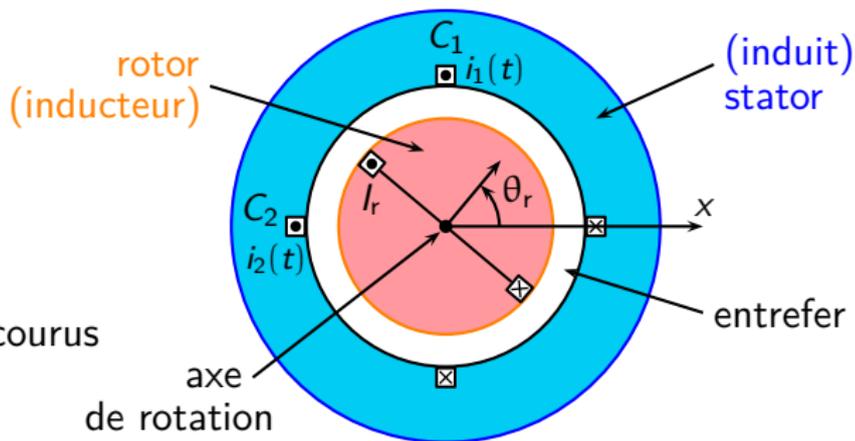
[4] – Machine synchrone bipolaire diphasée

Rotor :

Circuit parcouru par I_r continu

Stator :

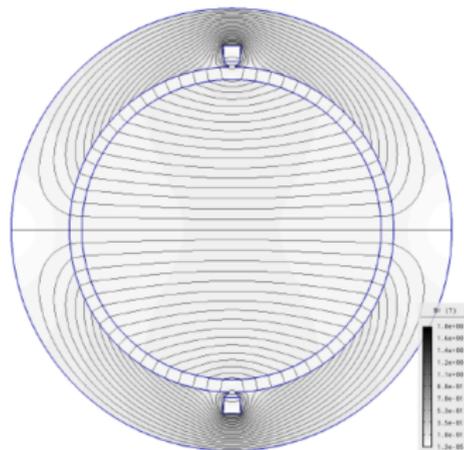
Deux circuits parcourus par $i_1(t)$ et $i_2(t)$



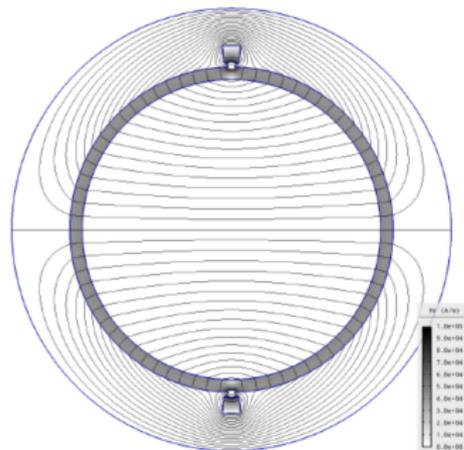
- Effets de bords négligés selon Oz
- Matériaux ferromagnétique doux avec $\mu_r \rightarrow \infty$
- Entrefer e de faible épaisseur, constante

[5] – Champ statorique

Champ créé par une spire



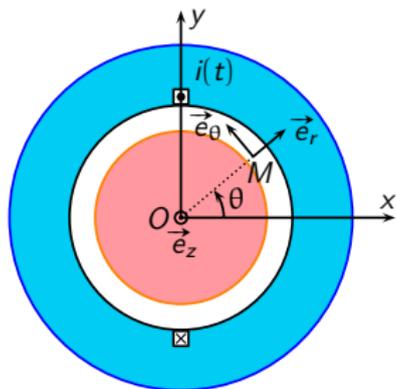
Lignes de champ de \vec{B}



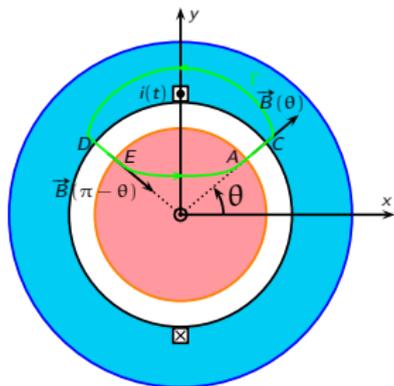
Lignes de champ de \vec{H}

[6] – Champ statorique

Propriétés



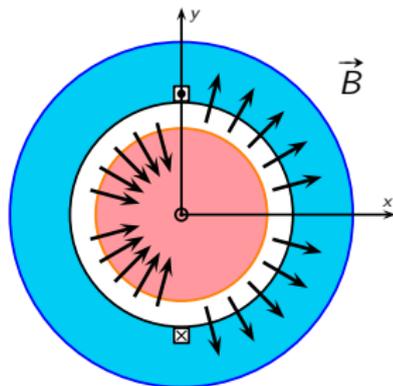
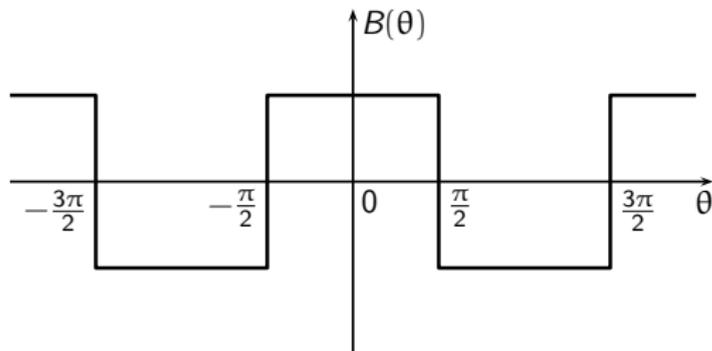
$$\vec{B}(M, t) = B(\theta, t) \vec{e}_r$$
$$B(\pi - \theta, t) = -B(\theta, t)$$



$$\oint_{\Gamma} \vec{H} \cdot d\vec{\ell} = 2eH = i(t)$$

pour $-\frac{\pi}{2} < \theta < \frac{\pi}{2}$

[7] – Champ statorique dans l'entrefer

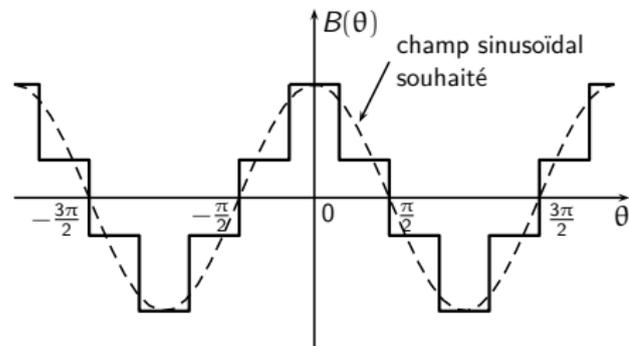
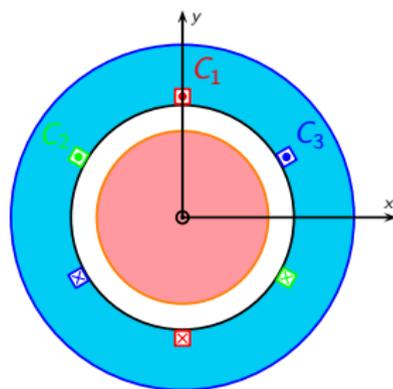
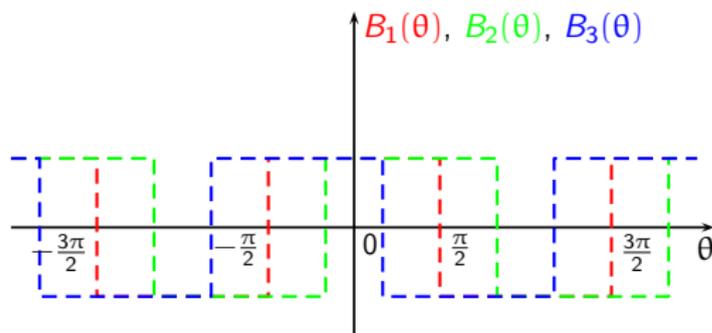


- Le champ magnétique est discontinu...

On cherche un champ sinusoïdal :

- pour minimiser les harmoniques du couple fourni pour un moteur
- pour fournir une tension proche d'une sinusoïde en générateur

[8] – Vers un champ statorique sinusoïdal



Champ créé par une phase de N spires :

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

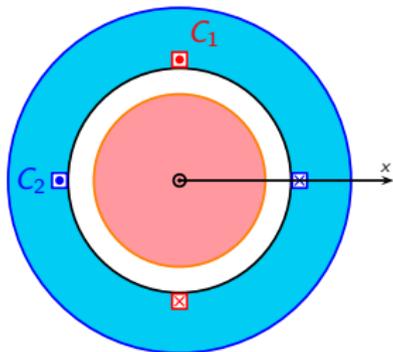
[9] – Champ glissant statorique

$i_1(t) = I_s \cos(\omega t)$ crée le champ

$$\vec{B}_1 = K_s i_1(t) \cos(\theta) \vec{e}_r$$

$i_2(t) = I_s \sin(\omega t)$ crée le champ

$$\vec{B}_2 = K_s i_2(t) \cos\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) \vec{e}_r$$



Champ glissant statorique : $\vec{B}_s(\theta, t) = \vec{B}_1 + \vec{B}_2$

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

Le champ glissant statorique tourne à la vitesse angulaire ω ,
pulsation des courants dans les spires du stator

[10] – Énergie magnétique

$$\varepsilon_m = \iiint_{\text{fer}} \frac{B^2}{2\mu_0\mu_r} d\tau + \iiint_{\text{entrefer}} \frac{B^2}{2\mu_0} d\tau \approx \varepsilon_m = \iiint_{\text{entrefer}} \frac{B^2}{2\mu_0} d\tau$$

avec $d\tau = \ell R d\theta$ et

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

Volume entrefer : $V = 2\pi R \ell$

$$\varepsilon_m = \frac{V}{4\mu_0} [K_s^2 I_s^2 + K_r^2 I_r^2 + 2K_s K_r I_s I_r \cos(\omega t - \theta_r(t))]$$

où $\theta_r(t)$ est la position angulaire du rotor

[11] – Couple magnétique

Condition de synchronisme

$$\Gamma = \left(\frac{\partial \mathcal{E}_m}{\partial \theta_r} \right)_{I_s, I_r} = \frac{V}{2\mu_0} K_s K_r I_s I_r \sin(\omega t - \theta_r(t))$$

- Condition de synchronisme : $\langle \Gamma \rangle \neq 0$ pour $\omega t - \theta_r(t) = \alpha$
- Le rotor tourne à la même vitesse angulaire que le champ glissant statorique
- Le champ moyen rotorique présente un retard angulaire α par rapport au champ moyen statorique
- Couple moyen sur le rotor :

$$\langle \Gamma \rangle = \frac{V}{2\mu_0} K_s K_r I_s I_r \sin \alpha$$

[12] – Couple magnétique

Conditions pour un couple moyen important

$$\langle \Gamma \rangle = \frac{V}{2\mu_0} K_s K_r I_s I_r \sin \alpha$$

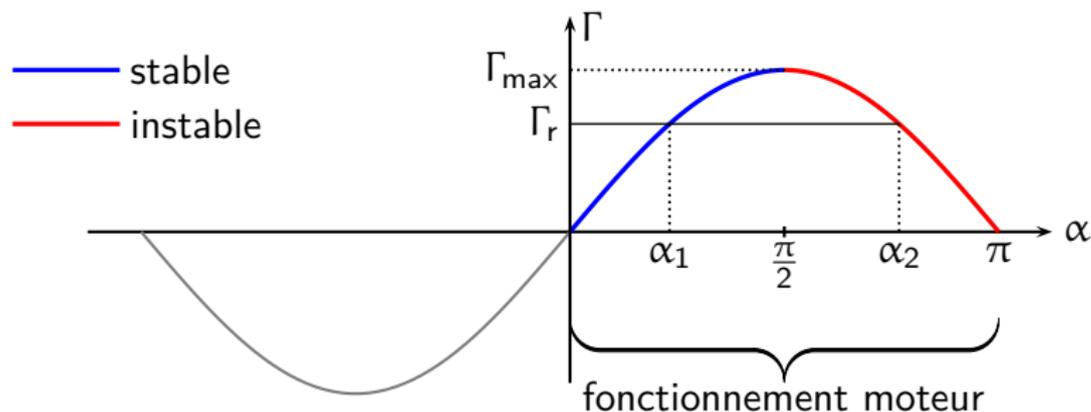
- Courants de forte intensité au rotor (I_r) et au stator (I_s)
- Épaisseur de l'entrefer faible (K_r et K_s proportionnels à $1/e$)
- Volume du rotor important (car $V = 2\pi R\ell$, soit R et ℓ grands)
- Champs en quadrature : $\alpha = \frac{\pi}{2}$

[13] – Fonctionnement en moteur

Stabilité

$$\langle \Gamma \rangle > 0 \quad \text{pour} \quad 0 < \alpha < \pi \quad (\sin \alpha > 0)$$

Couple résistant $-\Gamma_r$, à vitesse angulaire constante on a $\Gamma - \Gamma_r = 0$



- Si $\Gamma_r > \Gamma$: décrochage du moteur ; il s'arrête

[14] – Fonctionnement en moteur

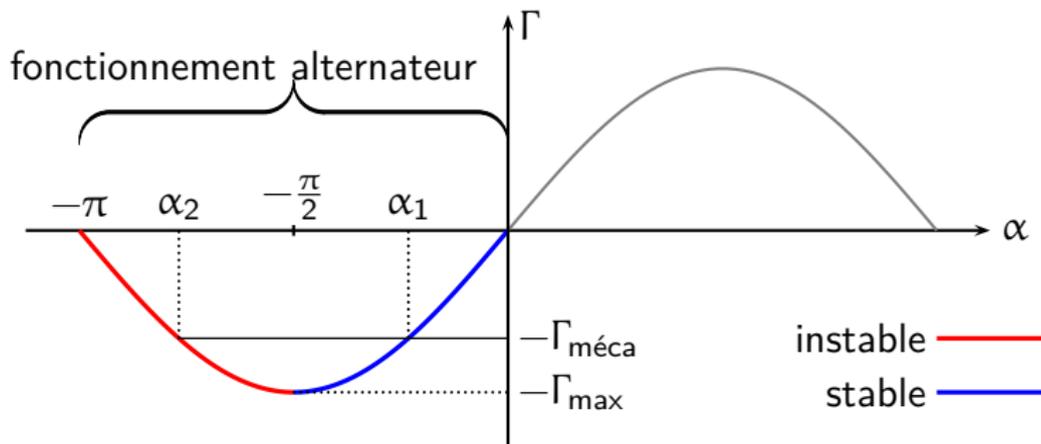
Un moteur qui ne démarre pas !

- Au démarrage, $\omega = 0$ et $\langle \Gamma \rangle = 0$: le moteur ne démarre pas !
- 1^{re} solution : lancer le moteur avec un moteur annexe jusqu'à $\frac{d\theta_r}{dt}$ légèrement supérieure à ω .
- 2^e solution : piloter la pulsation ω à l'aide d'un circuit d'électronique de puissance pour la faire varier à partir de zéro (machine synchrone autopilotée).

[15] – Fonctionnement en générateur

$$\langle \Gamma \rangle < 0 \quad \text{pour} \quad -\pi < \alpha < 0 \quad (\sin \alpha < 0)$$

Rotor entraîné par couple $\Gamma_{\text{méca}} > 0$, à vitesse angulaire constante on a $\Gamma - \Gamma_{\text{méca}} = 0$



[16] – Modèle électrique du moteur synchrone

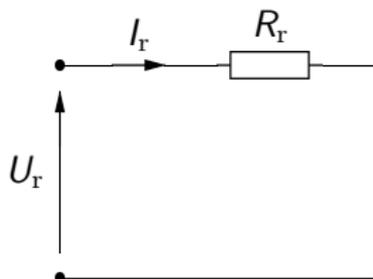
Modèle électrique du rotor

Enroulements rotoriques de résistance R_r

$$\Phi_r = \Phi_{r,\text{propre}} + \Phi_{\text{stator} \rightarrow \text{rotor}}$$

- Rotor parcouru par $I_r = \text{cte}$: $\Phi_{r,\text{propre}} = \text{cte}$
- Condition de synchronisme : $\Phi_{\text{stator} \rightarrow \text{rotor}} = \text{cte}$
- **Le rotor n'est le siège d'aucun phénomène d'induction**

Modèle électrique du rotor :



$$U_r = R I_r$$

[17] – Modèle électrique du moteur synchrone

Modèle électrique du premier enroulement du stator

1^{er} enroulement :

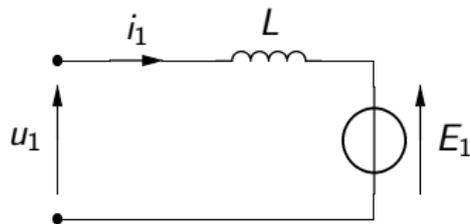
$$\Phi_1 = \Phi_{p,1} + \Phi_{2 \rightarrow 1} + \Phi_{r \rightarrow 1} = L_s i_1 + M_{12} i_2 + M(\theta_r) I_r$$

- Enroulements 1 et 2 orthogonaux : $M_{12} = 0$
- On admet $M_{r \rightarrow 1} = M_0 \cos \theta_r$

$$\Phi_1 = L_s i_1(t) + M_0 I_r \cos(\omega t - \alpha)$$

Aux bornes de l'enroulement :

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



[18] – Modèle électrique du moteur synchrone

Modèle électrique du second enroulement du stator

On remplace θ_r par $\theta_r - \frac{\pi}{2}$:

$$\Phi_2 = L_s i_2(t) + M_0 \cos\left(\theta_r - \frac{\pi}{2}\right)$$

Aux bornes de l'enroulement :

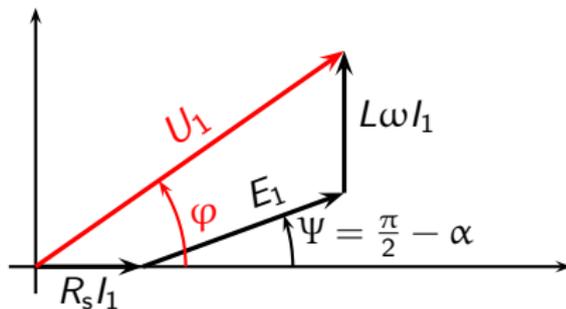
$$u_2 = R_s i_2 + L_s \frac{di_2}{dt} + E_2 \quad \text{avec} \quad E_2 = M_0 I_r \omega \cos(\omega t - \alpha)$$

[19] – Modèle électrique du moteur synchrone

Représentation de Fresnel

Enroulement 1 :

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



- Ψ est l'angle de pilotage (déphasage entre le courant et la f.c.e.m.)

[19] – Bilan de puissance du moteur synchrone

Bilan électrique

Puissance reçue : $P_{\text{élec}} = u_1 i_1 + u_2 i_2 + u_r I_r$, soit

$$p(t) = R_s i_1^2 + R_s i_2^2 + R_r I_r^2 + E_1 i_1 + E_2 i_2$$

- $P_{\text{cuivre}} = R_s i_1^2 + R_s i_2^2 + R_r I_r^2$ dissipée par effet Joule dans les enroulements
- $P_{\text{fcem}} = E_1 i_1 + E_2 i_2 > 0$ pour un moteur, absorbée par les fcem de l'induit
- Bilan de puissance : $P_{\text{élec}} = P_{\text{cuivre}} + P_{\text{fcem}}$

[20] – Bilan de puissance du moteur synchrone

Bilan mécanique

Couple résistance $-\Gamma_r$ dû à la charge

$$J \frac{d\omega}{dt} = 0 = \Gamma - \Gamma_r$$

d'où

$$0 = \Gamma\omega - \Gamma_r\omega$$

Bilan de puissance

$$P_{\text{méca,ext}} = P_{\text{em}}$$

où P_{em} est la puissance des actions électromagnétiques

[21] – Bilan de puissance du moteur synchrone

Bilan thermodynamique

Premier principe à la machine

$$dU + dE_c + dE_{em} = \delta W_{\text{élec}} + \delta W_{\text{méca,ext}} + \delta Q$$

- Température constante : $dU = 0$
- Régime permanent : $dE_c = 0$ et $dE_{em} = 0$
- $\delta W_{\text{élec}} = P_{\text{élec}} dt = (P_{\text{cuivre}} + P_{\text{fcem}}) dt$
- $\delta W_{\text{méca,ext}} = -P_{\text{méca,ext}} dt$
- $\delta Q = -P_{\text{cuivre}} dt$

Bilan :

$$P_{\text{fcem}} = P_{\text{méca,ext}} \quad \text{soit} \quad E_1 i_1 + E_2 i_2 = \Gamma_r \omega$$

- Une partie de la puissance électrique reçue est dissipée par effet Joule dans les enroulements, l'autre est absorbée par les fcem
- La puissance absorbée par les fcem est intégralement convertie en puissance mécanique fournie à la charge

[22] – Avantages et inconvénients des moteurs synchrones

Avantages

- Puissance et couple importants par rapport au volume du moteur
- Rendements très bons ($> 95 \%$)
- Vitesse de rotation contrôlé précisément, indépendamment de la charge

Inconvénient

- Démarrage non autonome (utilisation d'un moteur à courant continu, ou d'un circuit de pilotage)
- Décrochage lorsque la charge est trop importante
- Entretien des collecteurs apportant le courant continu au rotor dans le cas d'électroaimants rotoriques (pas de problème si aimants permanents)

[23] – Importance des alternateurs synchrones

Les alternateurs synchrones sont à la base de la production électrique mondiale :

- centrales nucléaires ;
- centrales hydrauliques ;
- centrales à charbon ;
- éoliennes.