

Chap 10: Conversion électro-magnéto-mécanique

I: Introduction

1° Nécessité des milieux ferros et convertisseurs électroméca

En PSI, couplage électro-méca par induct° sous milieu mag. Mais on obtient une puiss volg suffisante $\rightarrow$ milieu mag $\rightarrow$ induit et inducteur.

Il n'est plus possible de calculer directement les actions électroméca (force de Laplace, couple ...) $\rightarrow$ approche énergétique.

Convertisseur électroméca: actionneur qui met en jeu le couplage électroméca en présence de chp $\vec{B}$ (moteur ou générateur).

3 exles du le cours de PSI:

- * Le contacteur électroméca en translat°
- * Machine tournante alternative à moteur synchrone (MS)
- * Machine courante à courant continu à le (FCC)

2° Méthodologie et cadre de l'étude

$\rightarrow$ Méthode: Calculer l'énergie mag du l'entrefer des convertisseurs et étudier sa variations en fct des paramètres de la partie mobile

- x : posit° de l'actionneur linéaire
- θ : la posit° angulaire, l'angle, du rotor par les machines tournantes

$$U_m = \frac{1}{2} L i^2 \quad - \quad U_m = \int_V \frac{B^2}{2\mu_0} dV = \int_{\text{fer}} \frac{B^2}{2\mu_0} dV + \int_{\text{entrefer}} \frac{B^2}{2\mu_0} dV$$

négligeable $\mu_r \rightarrow +\infty$

$\rightarrow$ Cadre de l'étude:

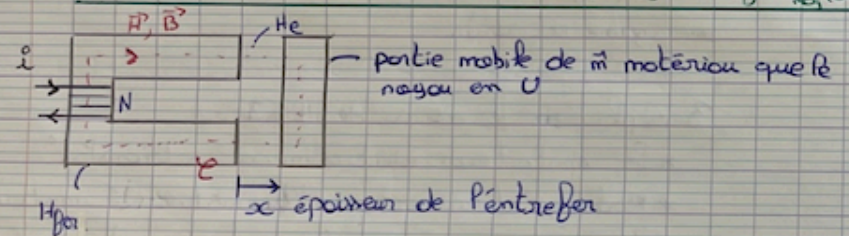
- * Milieux ferros linéaires MLHI (doux non saturé)
- * Considéat° des lignes de chp et $\perp$ à la surface du matériau de l'entrefer avec $\mu_r \rightarrow +\infty$

A° - Contacteur électroméca en translation

1° Dispositif de l'électroaimant de levage: Force électroméca

Circuit mag déformable où une partie peut se déplacer en translat°. Un syst de guidage permet ce mvt.

2° Inductance variable $L(x)$ et énergie mag $U_{mag}(x)$



$\rightarrow$ Excitat° mag $\vec{H}$

Soit P le périmètre mag du convertisseur ($x=0$)

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = N i$$

$$H_{fer} \times (P - 2x) + H_e \times 2x = N i$$

ds le milieu ds l'entrefer

$$\hookrightarrow H_{fer} \times P + H_e \times 2x = N i$$

$\rightarrow$ Conservat° du flux de $\vec{B}$

$$\Phi_e S = \Phi_{fer} S \Rightarrow \boxed{B_{fer} = B_e = B}$$

→ MLHI

$$\frac{\mu_0 N^2}{\mu_0 \mu_r} p + \frac{\mu_0}{\mu_0} x 2x = N i \Leftrightarrow \frac{\mu_0}{\mu_0} \left(\frac{p}{\mu_r} + 2x \right) = N i$$

$$L \Rightarrow B = \frac{\mu_0 N i}{\frac{p}{\mu_r} + 2x}$$

Rq : Δ Ici x faible et $\frac{p}{\mu_r}$ n'est pas forcément négligeable devant x .

→ Inductance propre $L(x)$:

Varie avec x car circuit déformable

$\Phi = L i$ flux propre (à travers le circuit et son enroulement)

avec $\Phi = NBS = \left(\frac{\mu_0 N^2 S}{\frac{p}{\mu_r} + 2x} \right) i$

$$L(x) = \frac{\mu_0 N^2 S}{\frac{p}{\mu_r} + 2x}$$

$L(x)$ max pr $x=0$ et $\propto$ de x

→ Énergie magnétique du dispositif $U_{\text{mag}}(x)$

$$U_{\text{mag}}(x) = \frac{1}{2} L(x) i^2$$

$$L(x) = \frac{1}{2} \left(\frac{\mu_0 N^2 S}{\frac{p}{\mu_r} + 2x} \right) i^2$$

L'énergie mag emmagasinée dep de x et i

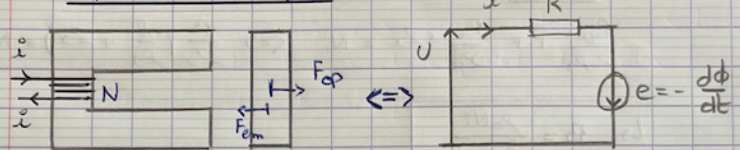
Rq : On peut aussi calculer

$$U_{\text{mag}} = \iiint_{\text{entier}} \frac{B^2}{2\mu_0} dV \quad \text{car } \mu_r \rightarrow +\infty, \text{ l'excitation mag est concentrée ds l'entrefer.}$$

3° Force électromag

a) Bilans énergétique et méca (non exigible)

→ Équat° électrique



L'act° de l'opérateur modifie le flux pr l'intermédiaire de $L(x)$ qui entraîne l'appareil d'une fem.

$$U = Ri - e = Ri + \frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

Δ $\Phi = L(x)i$ ne pr soit $L(x)$ qui dep du tps par x .

→ Bilan énergétique

Syst global → { Dév + enroulement }

Entre t et $t+dt$, 1^{er} principe de la thermo

$$\begin{aligned} d(U + E_p + E_c) &= \delta W + \delta Q = \delta W_{\text{ext}} + \delta W_{\text{int}} + \delta Q_{\text{ext}} \\ &= P_{\text{ext}} dt + F_{\text{ep}} dx + P_{\text{ Joule}} dt \\ &= U i dt + F_{\text{ep}} dx - Ri^2 dt \end{aligned}$$

$$(1) \Rightarrow i d\Phi + F_{\text{ep}} dx$$

T du syst est $\Rightarrow dU = c dT = 0$

$$dE_p = dU_{\text{mag}} \text{ partie mobile}$$

$$d(U_{\text{mag}} + E_c) = i d\Phi + F_{\text{ep}} dx \quad (2)$$

→ Bilan méca TEC

$$dE_c = \sum \delta W_{\text{ext et int}} = F_{\text{ep}} dx + F_{\text{em}} dx$$

$$dU_{\text{mag}} = -dE_c + F_{\text{ep}} dx + F_{\text{em}} dx$$

$$= i d\Phi - F_{\text{em}} dx \quad (3)$$

L'énergie mag est ici bc de Φ et de x avec

$$F_{\text{em}} = - \left(\frac{\partial U_{\text{mag}}}{\partial x} \right)_{\text{stat}}$$

Rq: Même résultat avec les puissances

$$P_{\text{elec}} = e i = - \frac{d\phi}{dt} i$$

$$P_{\text{elec}} dt = - i d\phi$$

$$P_{\text{mech}} dt = F_{\text{em}} \frac{dx}{dt} dt$$

$$dU_{\text{mag}} = \underbrace{P_{\text{elec}} dt}_{\text{puiss cédée}} - P_{\text{mech}} dt = i d\phi - F_{\text{em}} dx$$

Cherchons à exprimer ③ en fct de i

$$U_{\text{mag}} = \frac{1}{2} L i^2 = \frac{1}{2} i \phi$$

$$dU_{\text{mag}} = \frac{1}{2} (i d\phi + \phi di) \Rightarrow i d\phi = 2 dU_{\text{mag}} - \phi di$$

$$dU_{\text{mag}} = 2 dU_{\text{mag}} - \phi di - F_{\text{em}} dx$$

$$\Rightarrow dU_{\text{mag}} = \phi di + F_{\text{em}} dx$$

$$F_{\text{em}} = \left(\frac{\partial U_{\text{mag}}}{\partial x} \right)_{i, dt}$$

$$\Gamma_{\text{em}} = \left(\frac{\partial U_{\text{mag}}}{\partial \theta} \right)_{i, dt}$$

b) Généralisat° : force et couple

c) Express° de la force

$$F_{\text{em}} = - \frac{\mu_0 N^2 i^2}{(\frac{l_0}{2} + 2x)^2} = - \frac{B^2}{2\mu_0} S$$

(pas par 2)

→ Forces ljs attractives pu v l'entrefer, vsigne de i

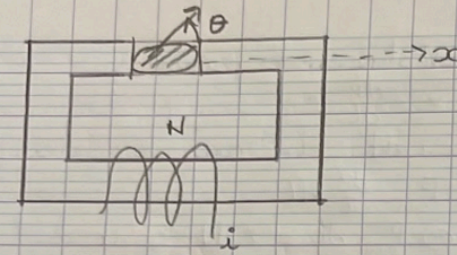
↳ C'est une force de rappel

→ Force $\propto i^2$ et S

→ $\propto \frac{1}{x^2}$, très Gde qd x faible

4° - Exple de contacteur en rotat° & moteur à reluctance variable

a) Dispositif : convertisseur à un seul circuit en rotat°



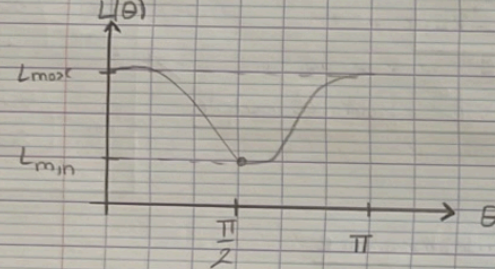
b) Calcul du couple

$$U_{\text{mag}} = \frac{1}{2} L(\theta) i^2 \rightarrow \text{dep de } \theta$$

$$L_{\text{max}} \text{ en } \theta = 0 = 0[\pi] \quad \text{entrefer min}$$

$$L_{\text{min}} \text{ en } \theta = \frac{\pi}{2}[\pi] \quad \text{entrefer max}$$

On pose P_{approx} en $L(\theta)$ π périodique



$$\langle L \rangle = \frac{L_{\text{max}} + L_{\text{min}}}{2}$$

Rq: On peut calculer L_{min} et L_{max}

$$L(\theta) = \langle L \rangle + \frac{L_{\text{max}} - L_{\text{min}}}{2} \cos 2\theta$$

$$U_{\text{mag}} = \frac{1}{2} L(\theta) i^2 \rightarrow \Gamma_{\text{em}} = \left(\frac{\partial U_{\text{mag}}}{\partial \theta} \right)_{i, dt}$$

$$\Gamma_{\text{em}} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial L}{\partial \theta} \right)_{i, dt} i^2 \Rightarrow \Gamma_{\text{em}} = - \frac{1}{2} i^2 (L_{\text{max}} - L_{\text{min}}) \sin 2\theta$$

Le couple est d'autant + élevé que l'écart $L_{\text{max}} - L_{\text{min}}$ est Gd, et varie en i^2 .

Rq: Si rotor denté, cad cylindrique, $L_{\text{max}} = L_{\text{min}}$ et pas de couple

↳ nécessite d'un rotor aimanté

c) Analyse du fct

1^{ère} situat° : alimentat° continue $i = i_0$

$$\Gamma_{em} \propto \frac{1}{2} i^2 \sin 2\theta$$

$$\langle \Gamma_{em} \rangle_{\theta=\pi} = 0$$

Les phases motrices $\Gamma_{em} > 0$ compensées par phases de freinage $\Gamma_{em} < 0$

↳ fct moteur impossible

2^{ème} situat° :

en alternatif $i = i_0 \cos \omega t$

$$\Gamma_{em} \propto i^2 \Rightarrow \langle \Gamma_{em} \rangle \neq 0$$

et le moteur est entraîné à la m pulsat°, m freq que ω l'alimentat°

B° Machine synchrone

I° Rappel de PCSI

1° Principe du moteur synchrone : effet moteur d'un dip $\vec{B}$ tournant

→ Principe : on utilise $\vec{B}$ tournant on mettra à profit le couple $\vec{\Gamma}$ exerce par $\vec{B}$ sur un moment mag

$$\vec{m} : \boxed{\vec{\Gamma} = \vec{m} \wedge \vec{B}}$$

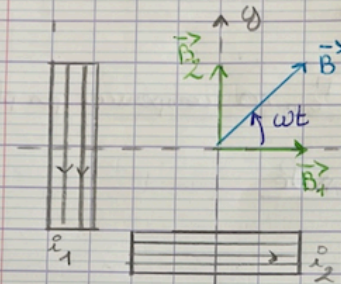
$\vec{B}$ tournant radial entraîne $\vec{m}$

$\vec{m}$: spine parcourue par un courant (ou aimant)

→ Créat° d'un dip $\vec{B}$ tournant :

• Product° diphase :

bobines identiques) en quadrature spatiale, selon Ox et Oy , parcourues par des intensités de m même mais en quadrature (temporelle) $\varphi = \frac{\pi}{2}$



$$\begin{aligned} i_1 &= i_0 \cos \omega t \\ i_2 &= i_0 \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \\ i_3 &= i_0 \sin \omega t \end{aligned}$$

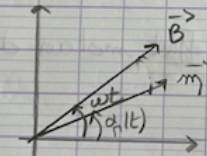
$$\begin{aligned} \vec{B} &= \vec{B}_1 + \vec{B}_2 \quad \text{par superposit°} \\ &= k i_0 (\cos \omega t \vec{e}_x + \sin \omega t \vec{e}_y) \end{aligned}$$

$$\theta = \omega t \quad \theta = \omega t$$

$$\vec{B} = k i_0 \vec{u}_r = B \vec{u}_r \Rightarrow \text{chp mag tournant à la vit } \omega$$

• Prod triphasé : essentielle mais HP

2° Mise en rotat° et condit° de synchronisat°



$$\alpha(t) = \omega_r t - \alpha$$

↳ mvt à vit ate et α décroissant
 $\vec{B}$ et $\vec{m}$ à $t=0$

$$\begin{aligned} \vec{\Gamma}_{em} &= \vec{m} \wedge \vec{B} = m B \sin(\omega t - \alpha(t)) \vec{e}_z \\ &= m B \sin(\omega t - \omega_r t + \alpha) \vec{e}_z \\ &\quad (\omega - \omega_r) t + \alpha \end{aligned}$$

$\langle \Gamma_{em} \rangle \neq 0$ si $(\omega - \omega_r) t = 0$ angé at tel $\vec{m}$ et $\vec{B}$
de $\omega_r = \omega$ condit° de synchronisat°

↳ m pulsat° p la rotat° du rotor et du dip tournant
(→ cad de l'align ©)

On ce cas $\Gamma_{em} = m B \sin \alpha$

$$\Gamma_{em} = \Gamma_{max} \sin \alpha$$

$\hookrightarrow$ max pour $\alpha = \frac{\pi}{2}$, min pour $\alpha = 0$

II. Structure de la machine synchrone et générat° des chps $\vec{B}$ de l'entrefer

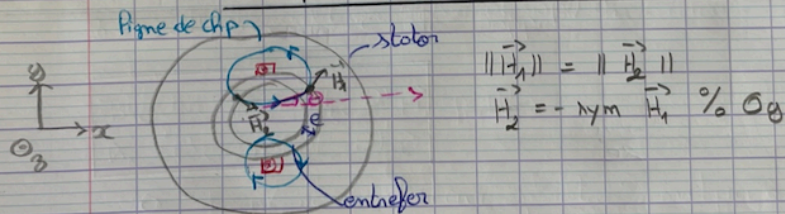
1° - Descript° de la structure

- Rotor et stator $\rightarrow$ meilleurs mag MLHI (fer doux), $\mu_r \rightarrow +\infty$
- Machine à pôle fixe $\rightarrow$ entrefer est (un élevé)
- Machine bipolaire : stator alimenté en CC et rotor alimenté en CC à excitat° séparée $\rightarrow$
- Machine diphasée : 2 phases au stator par la prod du chp $\vec{B}_1$ glissant

Rq : Machine triphasée $\rightarrow$ 3 phases au stator

2° Obten° d'un chp glissant statonique de l'entrefer

a) Chp $\vec{B}$ crée par une phase statonique unique



$$\|\vec{H}_1\| = \|\vec{H}_2\|$$

$$\vec{H}_2 = -\sin \alpha \vec{H}_1 \quad \% \quad \theta_0$$

$\rightarrow$ Chp $\vec{B}$ crée par une paire d'encoches

- Constat° des lignes de chp avec $\vec{B}$ et $\vec{H}$ (m lignes) et radiaux de l'entrefer
- H est concentré de l'entrefer à la p. milieu ferro

$H \rightarrow 0$ car $\mu_r \rightarrow +\infty$

° Symétries :

- Tt plan (xOy) qui est $\perp$ à l'axe de rotat° est plan d'antym de la distribut° de courants $\vec{H}$ et de $\vec{B}$ (xOy)
- Tt plan contenant l'axe de rotat° (yOz) est plan de sym de D_0 .
- Pn $\theta \in]-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}[$, $\vec{B} = B \vec{e}_r$
- $\theta \in]\frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}[$, $\vec{B} = -B \vec{e}_r$
- Sym $\Rightarrow \begin{cases} H(\theta) = -H(\pi - \theta) \\ B(\theta) = -B(\pi - \theta) \end{cases}$ } p. paire de θ

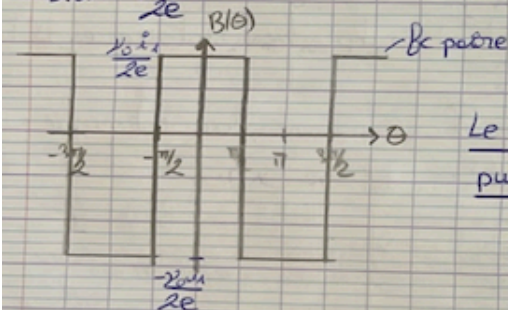
° TR d'Ampère :

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{P} = \int_{\text{stator}} \vec{H} \cdot d\vec{P} + \int_{\text{milieu}} \vec{H} \cdot d\vec{P} \quad 0 \text{ car } \mu_r \rightarrow \infty$$

$$= 2H\ell = i_1$$

$$\hookrightarrow \frac{B}{\mu_0} \ell = i_1$$

$$B(\theta) = \frac{\mu_0 i_1}{2\ell}$$



Le chp n'est pas sinusoïdal pur

$\rightarrow$ Effet de la multipliat° des encoches

En combinant N_s spires ou paires d'encoches à la phase 1, alimentées par le m courant avec bonne répartit° spatiale, on obtient un $\vec{B}$ radial spatialement CC.

Barreau de Bourne

$$B_s = K_s i \cos \theta \vec{u}_r \quad \text{avec } K_s = K_s \times N_s \times \frac{\mu_0}{2e}$$

b) Chp statonique obtenu avec 2 phases : le chp B_s glissant

But : g nerer un chp $\vec{B}$ tournant   l'aide de 2 phases avec 2 enroulements orthogonaux et alimentés en quadrature.

→ Effet d'une rotation de l'enroulement

Après rotation de α : $\vec{B}_s = K_s i \cos(\theta - \alpha) \vec{u}_r$

→ Chp statonique crée par la 2  phase

$$\vec{B}_{s1} = K_{s1} i_1(t) \cos(\theta - \frac{\pi}{2}) \vec{u}_r$$

$$\vec{B}_{s2} = K_{s2} i_2(t) \sin \theta \vec{u}_r$$

→ Chp B_s glissant crée par les 2 phases

$$\vec{B}_s = \vec{B}_{s1} + \vec{B}_{s2} \quad \text{avec } K_{s1} = K_{s2} \text{ m r partit  des enroulements   et  }$$

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

$$\vec{B} = K_s I_s (\cos \omega t \cos \theta + \sin \omega t \sin \theta) \vec{u}_r$$

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

$$\vec{B}_s = B_s \cos(\omega t - \theta) \vec{u}_r$$

Evaluat  selon θ avec $\cos(\omega t - \theta) = \cos \omega t - \frac{\theta}{\omega}$

de la Bourne $B(t - \frac{\theta}{\omega})$ c'est une onde magnétique

harmonique qui se propage selon θ

↳ chp glissant statonique

La direct  du max de $\vec{B}$ tourne   la vitesse ω (on la

retrouve pr $\theta = \omega t$)

3 - Obtent  du chp glissant rotorique

But : pr obtenir au niveau du rotor l' qu de $\vec{m}$ on utilise un enroulement parcouru par un courant permanent

On y multiplie aussi encoches et enroulements $\rightarrow B_r$ spatialement harmonique

R p sons $\alpha_n(t)$ l'angle de la normale   l'enroulement rotorique qui tourne   la vitesse $\dot{\alpha}_n(t) = \omega_r$

$$\vec{B}_{rn} = K_{rn} I_r \cos(\theta - \alpha_n(t)) \vec{u}_r$$

$$\vec{B}_r = B_r \cos(\theta - \alpha_n) \vec{u}_r \rightarrow \text{chp glissant rotorique}$$

II. Fct de la machine synchrone

1 - Energie et couple

U_{mag} est localisée   l'entrefer car $r_1 \rightarrow +\infty$

On note a le rayon du rotor avec $a \gg e$ et R la taille du moteur selon son axe

$$U_{mag} = \int_{entrefer} \frac{B^2}{2\mu_0} dV, \quad \text{avec } \vec{B}^2 = (\vec{B}_s + \vec{B}_r)^2$$

Elle se décompose en 3 termes

→ Energie propre du rotor

$$U_{mag,r} = \iiint_{entrefer} \frac{B_r^2}{2\mu_0} dV, \quad dV = R a e d\theta$$

$$= \frac{R a e}{2\mu_0} \int_{\theta=0}^{\theta=2\pi} B_r^2 \cos^2(\theta - \alpha_n) d\theta$$

L'indép de α_n

→ Énergie propre du stator

$$U_{mag,s} = \iiint_{\text{entrefer}} \frac{B_s^2}{2\mu_0} dV = \frac{\rho_{ae}}{2\mu_0} \int_0^{2\pi} \underbrace{B_s^2 \cos^2(\omega t - \theta)}_{B_s^2/2} d\theta$$

↳ Indép de α_n

Rq: Ces énergies propres permettent de calculer l'inductance propre des circuits L_s et L_n . ($U_{mag} = \frac{1}{2} L i^2$)

→ Énergie de couplage (mutuel)

$$U_{mag,c} = \iiint_{\text{entrefer}} \frac{B_s B_n}{\mu_0} dV = \frac{\rho_{ae}}{\mu_0} k_s k_n I_s I_n \int_0^{2\pi} \cos(\omega t - \theta) \cos(\theta - \alpha_n(t)) d\theta$$

$$\text{avec } \cos(\omega t - \theta) \cos(\theta - \alpha_n) = \frac{1}{2} \cos(-2\theta + \omega t + \alpha_n) + \frac{1}{2} \cos(\omega t - \alpha_n)$$

Après intégrat° selon θ ,

$$U_{mag,c} = \frac{\rho_{ae}}{\mu_0} \pi k_s k_n I_s I_n \cos(\omega t - \alpha_n)$$

Rq: $U_{mag,c}$ max pr $\omega t = \alpha_n$ céd rotor aligné avec $\vec{B}$ de couplage nul.

→ Couplage

$$\Gamma_{em} = \left(\frac{\partial U_{mag,c}}{\partial \alpha_n} \right)_{i_s, i_n \text{ sat}} = \frac{\rho_{ae}}{\mu_0} \pi B_s B_n \sin(\omega t - \alpha_n)$$

$$\Gamma_{em} = \frac{V_{entrefer}}{2\mu_0} B_s B_n \sin(\omega t - \alpha_n)$$

2° - Conditi° de synchronisme

a) Couple moyen

$$\langle \Gamma_{em} \rangle \neq 0 \text{ si } \omega t - \alpha_n(t) = \omega t - \alpha = \alpha$$

$$\text{avec } \alpha_n(t) = \omega_n t - \alpha$$

$$\omega = \omega_n \Rightarrow \boxed{\omega = \omega_n} \text{ et } \alpha = \alpha$$

↳ conditi° de synchronisme

La vit du rotor doit é égale à celle de $\vec{B}_s$ passant et de à la pulsati° de l'alimentati° des phases statoriques.

$$\boxed{\langle \Gamma_{em} \rangle = \frac{V_{entrefer}}{2\mu_0} B_s B_n \sin \alpha = \Gamma_{max} \sin \alpha}$$

$$\text{avec } \Gamma_{max} = \frac{V_{entrefer}}{2\mu_0} B_s B_n$$

↳ % $V_{entrefer} \Rightarrow$ Gde machine = couple élevé

↳ % B_s et B_n à $1/e \Rightarrow$ entrefer réduit $\nearrow \Gamma_{max}$

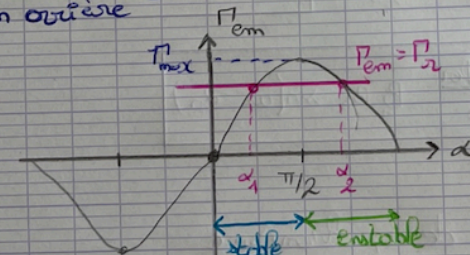
↳ on rq que cette expren° est identique à $\vec{\Gamma} = \vec{m} \wedge \vec{B}$
direct° du max de $\vec{B}_n$ ← obtient du max de $\vec{B}_s$
dir glissant

b) Fct et stabilité

→ Fct moteur

α désigne le retard de phase, angle entre la normale au rotor et $\vec{B}_s$ de entre les axes de sym de $\vec{B}_n$ et $\vec{B}_s$

↳ $\vec{B}_s$ entraîne le rotor qui le suit avec retard ("déphase" en arrière)



Couplage max pr $\alpha = \frac{\pi}{2}$
 $\vec{B}_s$ et $\vec{B}_n \perp$

$$\Gamma_{em} > 0 \text{ pr } \alpha \in]0, \pi[\Rightarrow \text{Moteur}$$

→ Pt de Bct

Lorsque le moteur tourne en charge en régime établi,
 $\omega \text{ est } \rightarrow \frac{d\omega}{dt} = 0$

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \sum \vec{\Gamma} = 0 \quad \frac{d\vec{\omega}}{dt} = \sum \vec{\Gamma}$$

$$\rightarrow 0 = \sum \vec{\Gamma}$$

$$\Gamma_{em} - \Gamma_{Bct} - \Gamma_{charge} = 0 \Rightarrow \Gamma_{em} = \Gamma_{résultat} = \Gamma_n$$

→ 2 pts de Bct

→ Stabilité

Dps α_1 , supposons une perturbat° de vitesse que ralentit le rotor
 $\rightarrow \alpha \nearrow$ donc $\Gamma_{em} \nearrow$, le rotor rattrape son retard et $\alpha \searrow$,
 Bct stable m $\alpha \in]0, \pi/2[$ (α_1) (voir schéma précédent)
 instable m $\alpha \in]\pi/2, \pi[$ (α_2)

L'état d'orthogonalité $\vec{B}_s \perp \vec{B}_r$ maximise le couple mais ne permet pas la stabilité (naturelle)
 → nécessité de l'autopilotage

→ Décrochage

Si $\Gamma_n \nearrow$, $\alpha \nearrow \rightarrow \frac{\pi}{2}$ et $\Gamma_n > \Gamma_{max}$ produit le décrochage du moteur

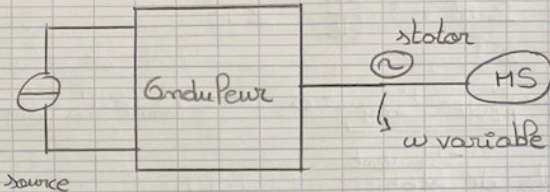
c) Démarrage du moteur et autopilotage

Au démarrage, le rotor est immobile de $\alpha_n = \omega_n t - \alpha = -\alpha$
 $\Gamma(t) \propto \sin(\omega t - \alpha_n(t)) \propto \sin(\omega t + \alpha)$

$$\langle \Gamma(t) \rangle_{dt} = 0$$

Au démarrage, pas de couple par la machine synchrone (MS).
 On utilise un autopilotage qui d'abord permet

d'ajuster la pulsat° ω des courants d'alimentat° et
 faire progresser ω de 0 à ω_{ref} : $\omega = \omega_n \forall t$
 On utilise par exple un onduleur qui permet
 d'ajuster ω_{elec} .



~~On utilise par exple un autopilotage permet de contrôler~~

- On contrôle en permanence l'état du moteur, mesure de ω et α à la sortie et asservissement:

- Asservissement de ω par commande élec et de la vit de rotat° ω_n
- Asservissement en posit° angulaire par commande de la phase de commutat° de l'onduleur (décrochage).

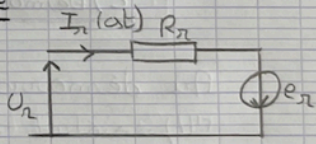
3° Modèle électrique du MS et bilan d'énergie

Ces moteur ici.

Les dpts $\vec{B}_s$ et $\vec{B}_r$ variables ds le tps $\Rightarrow d\Phi(t)$ à travers les bobinages du stator et rotor $\Rightarrow B_{em}$

a) Modélisat° électrique

• Eq élec du rotor inducteur

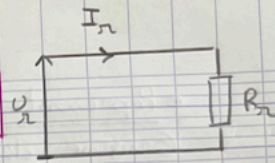


$$U_r = R_r I_r + \frac{d\Phi_{\rightarrow r}}{dt}$$

avec $\Phi_{\rightarrow r} = \Phi_{propre} + \Phi_{stator \rightarrow r}$
 $\left\{ \begin{array}{l} \Phi_{propre} = L_r I_r = \alpha I_r \\ \Phi_{stator \rightarrow r} = \alpha I_s \text{ car stator et rotor tournent à la m même vitesse} \end{array} \right.$
 $\rightarrow$ synchrones

$$\text{dc } \frac{d\phi_{\rightarrow r}}{dt} = 0,$$

$$U_r = R_r I_r$$

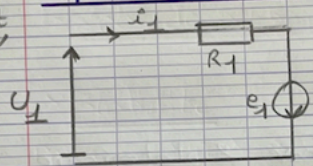


Uniquement la résistance R_r

Puiss cédée par effet Joule $\rightarrow$ pertes cuivre au rotor
Aucun phénomène d'induct° du rotor $\Rightarrow$ c'est l'inducteur

1 et 2 • Eq élec de la phase 1 du stator : l'induct

enroulement
en de $\frac{\pi}{2}$



$$U_1 = R_1 i_1 + \frac{d\phi_{\rightarrow s}}{dt}$$

$$\phi_{\rightarrow s} = \phi_{\text{propre}} + \phi_{\text{phase 2} \rightarrow \text{phase 1}} + \phi_{\text{rotor} \rightarrow s}$$

$$= L_1 i_1 + 0 + \frac{M I_r}{\omega}$$

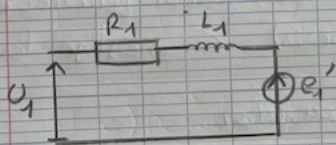
car spatialem^t $\perp$ avec M l'inductance mutuelle, ϕ du stator
car le rotor tourne

$$\phi_{\text{rotor} \rightarrow s} = M_0 I_r \cos(\omega t - \alpha)$$

$$\frac{d\phi_{\text{rotor} \rightarrow s}}{dt} = -M_0 I_r \sin(\omega t - \alpha)$$

$$U_1 = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} - M_0 I_r \omega \sin(\omega t - \alpha)$$

$$U_1 = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + e_1' \quad \text{avec } e_1' = -M_0 I_r \omega \sin(\omega t - \alpha)$$



$$e_1' = -M_0 I_r \omega \sin(\omega t - \alpha)$$

$\phi_{\text{com}} \Rightarrow$ contre-EMF $\propto \omega$

C'est bien le stator qui est l'induct.

Rq: Evaluat° de M_0 et L_1

$$\left. \begin{array}{l} L_1 \propto V k_s^2 \dots \\ M_0 \propto V k_s k_r \end{array} \right\} \text{A partir de l'énergie } U_{\text{mag}}$$

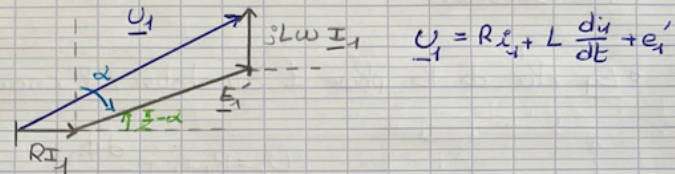
• Représentat° de Fresnel en la phase 1

Origine des phases : $i_1(t) = I_1 \cos \omega t$

$$i_1 = I_1 e^{j\omega t} = \underline{I_1} e^{j\omega t}, \text{ où } \underline{I_1} = \frac{I_1}{\sqrt{2}}$$

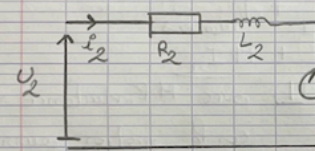
$$e_1' = -M_0 I_r \omega \sin(\omega t - \alpha) = M_0 I_r \omega \cos(\omega t - \alpha + \frac{\pi}{2})$$

$$e_1' = M_0 I_r \omega e^{-(\alpha + \frac{\pi}{2})} e^{j\omega t} = \underline{E_1} e^{j\omega t}, \quad \underline{E_1} = M_0 I_r \omega e^{j(-\alpha + \frac{\pi}{2})}$$



$$\underline{U_1} = R_1 \underline{I_1} + L_1 \frac{d\underline{I_1}}{dt} + \underline{E_1}'$$

• Modèle électrique de la phase 2 statoreque



Par analogie avec 1

$$e_2' = M_0 I_r \omega \cos(\omega t - \alpha)$$

$\hookrightarrow$ décalage de $\frac{\pi}{2}$ % phase 1

$$U_2 = R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + e_2'$$

b) Bilan de puissance

Puiss élec absorbée = puiss méca fournie

Rq: En minimiser les pertes, stator peu frotte et matériau doux non saturé (hystérésis). On néglige les pertes fer.

$$P_{\text{elec}} = U_1 i_1 + U_2 i_2 + U_r i_r$$

puiss absorbée stator au rotor

$$P_{\text{elec}} = \underbrace{R_1 i_1^2 + R_2 i_2^2 + R_r I_r^2}_{\text{puiss Joule, pertes Cu}} + \underbrace{\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L_1 i_1^2 + \frac{1}{2} L_2 i_2^2 \right)}_{\text{vel moy nulle}} + \underbrace{i_1 e_1' + i_2 e_2'}_{P_{\text{com}}}$$

$$\langle P_{\text{elec}} \rangle = \langle P_{\text{ Joule }} \rangle + \langle P_{\text{ com }} \rangle$$

dissipée
pertes
chauffée, puissance utile

$$P_{\text{geom}} = -M_0 I_n \omega I_s \cos(\omega t) \sin(\omega t - \alpha) + M_0 I_n \omega I_s \sin(\omega t) \cos(\omega t - \alpha)$$

$$= M_0 I_n I_s \omega \sin \alpha$$

$$P_{\text{méca}} = -\Gamma_{\text{em}} \times \omega = -\Gamma_{\text{em}} \omega \sin \alpha$$

$$P_{\text{geom}} + P_{\text{méca}} = 0 \quad \text{analogue avec } P_{\text{reface}} + P_{\text{dec}} = 0 \text{ en 1^{ère} année}$$

$\text{Bourne} < 0$

$$\text{Identificat}^\circ : M_0 = \frac{\Gamma_{\text{max}}}{I_n I_s} = \frac{B_s B_n V_{\text{entrefer}}}{2 \mu_0 I_n I_s} = \frac{K_n K_s}{2 \mu_0} V_{\text{entrefer}}$$

$$\langle P_{\text{ref}} \rangle_{\text{absorbée}} = \langle P_{\text{saule}} \rangle_{\text{dissipée}} + \langle P_{\text{méca}} \rangle_{\text{Bourne}}$$

À l'aide du diag de Fresnel, pr $\alpha = \frac{\pi}{2}$, u_s et e_s' sont en phase, c'est la puissance absorbée est max et le couple est max
 pr $\alpha = 0$, u_s et e_s' en quadrature, c'est puissance absorbée nulle et couple nul.

4° Réversibilité : alternateur

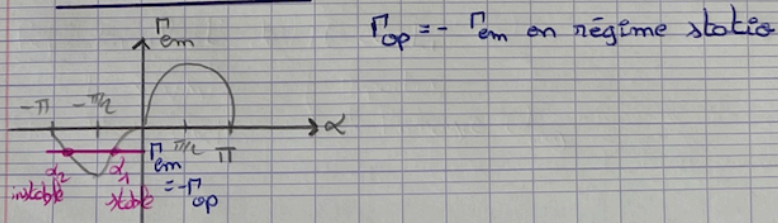
→ Principe :

Le rotor est entraîné à ω par un opérateur ext $\Gamma_{\text{op}} > 0$.
 Le mvmt du rotor génère un $\vec{B}_n$ glissant $\rightarrow \vec{B}_n(t)$ des enroulements du stator et crée une fem par induct° qui fournit la puissance élct.

La condit° de synchronisme est automatique, le courant $\odot$ ptt est à ω .

Par ses effets, les fem induites s'opposent à Γ_{op} avec un couple $\Gamma_{\text{em}} < 0$ (résistant).

→ Fct et stabilité



Dps α

Le rotor accélère et α va $\nearrow$ en val abs et $\alpha < 0$

$\Gamma_{\text{em}} \searrow$ et $\nearrow$ en val abs.

Le couple résistant du MS $\nearrow$ et freine le rotor.

→ Bilan d'énergie

$\Gamma_{\text{em}} \omega < 0$ et $P_{\text{ref}} (B_{\text{em}}) < 0$, elles fournissent de l'énergie à partir du stator qui est branché en série sur Z_c .