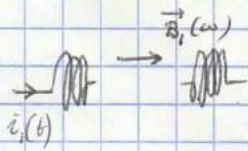


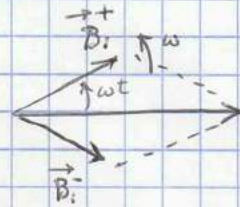
5] Rotors à champ tournant - Moteur synchrone, alternateur

5.1] Champ tournant (diphasé - triphasé)

Théorie de Leblanc = champ pulsant = Σ de 2 champs tournants/géométriques.



$$\vec{B}_1(t) = B_{10} \cos \omega t \vec{e}_x$$



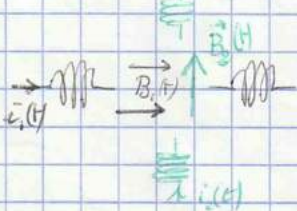
At :

$$\vec{B}_1(t) = \vec{B}_1^+(t) + \vec{B}_1^-(t)$$

$$= \frac{B_{10}}{2} [\cos \omega t \vec{e}_x + \sin \omega t \vec{e}_y] + \frac{B_{10}}{2} [\cos \omega t \vec{e}_x - \sin \omega t \vec{e}_y]$$

vecteur unitaire tournant à ω
autour de $\vec{e}_z$

On crée en pratique un champ tournant avec 2 enroulements orthogonaux : (ou 3 en triphasé)



De même :

$$\vec{B}_2(t) = B_{20} \cos(\omega t + \varphi_2) \vec{e}_y$$

$$= \vec{B}_2^+(t) + \vec{B}_2^-(t)$$

$$= \frac{B_{20}}{2} [\cos(\omega t + \varphi_2) \vec{e}_y + \sin(\omega t + \varphi_2) \vec{e}_x] +$$

$$\frac{B_{20}}{2} [\cos(\omega t + \varphi_2) \vec{e}_y - \sin(\omega t + \varphi_2) \vec{e}_x]$$

On souhaite équilibrer $B_1^+(t) = B_2^+(t)$

et $B_1^-(t) = B_2^-(t)$ } $\Rightarrow \begin{cases} \cos \omega t = \sin(\omega t + \varphi_2) \\ \sin \omega t = \cos(\omega t + \varphi_2) \end{cases}$

Solution : $\varphi_2 = -\pi/2$

$\Rightarrow$ Champ tournant créé par 2 bobinages + alimentation en courants en quadrature.

(ou 3 " à 120° alimentés par 3 phases (et φ déphasé))

5.2] Répartition sinusoïdale de champ magnétique dans l'entrefer

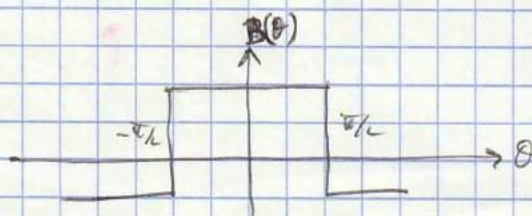
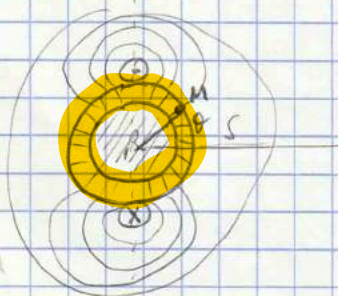
EX : calcul du champ statorique

$\vec{B}$ radial dans l'entrefer $\vec{B}(M,t) = B(\theta,t) \vec{e}_r$

On montre aisément :

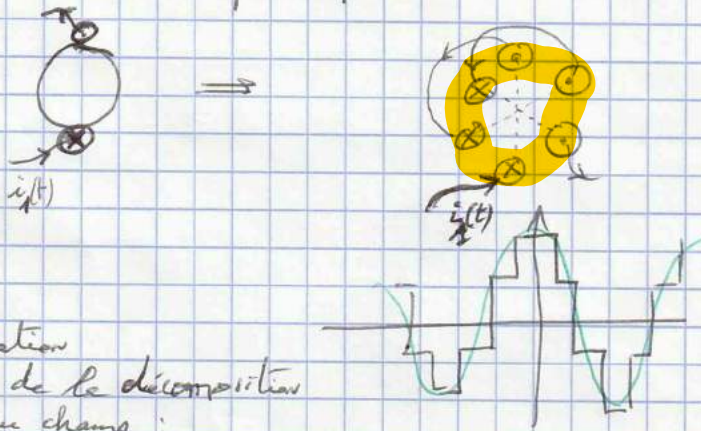
TR d'Ampère

$$B(\theta) = \begin{cases} \frac{\mu_0 i(t)}{2e} & \text{pour } \theta \in]-\pi/2; \pi/2[\\ -\frac{\mu_0 i(t)}{2e} & \text{sinon} \end{cases}$$



$\Rightarrow$ PAS sinusoïdal !

On tend vers une répartition sinusoïdale de champ en optimisant le bobinage des phases.
 Pourquoi? $\rightarrow$ Plus la répartition de $|\vec{B}|$ sera sinusoïdale, plus on limitera les "à-coups" du couple (vibrations)
 Comment? $\rightarrow$ on répartir le bobinage sur des spires réparties autour de l'axe de rotation:



On retiendra pour modélisation simple, le 1er terme de la décomposition en série de Fourier du champ:

$$\vec{B}(\theta) = K_s i_s(t) \cos(\theta) \vec{u}_r \quad (K_s = \text{facteur de proportionnalité pour stator})$$

$\Rightarrow$ Avec 2 bobinages $\perp$, alignés en quadrature $\Rightarrow$ champ $\vec{B}$ sinusoïdal glissant dans l'entrefer.

$$i_1(t) = \sqrt{2} I_{eff} \cos(\omega t)$$

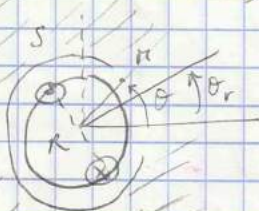
$$i_2(t) = \sqrt{2} I_{eff} \cos(\omega t - \pi/2)$$

$$\left. \begin{array}{l} i_1(t) = \sqrt{2} I_{eff} \cos(\omega t) \\ i_2(t) = \sqrt{2} I_{eff} \cos(\omega t - \pi/2) \end{array} \right\} \vec{B}_s(\theta, t) = K_s I_{eff} \sqrt{2} \cos(\omega t - \theta) \vec{u}_r$$

• Pour un rotor constitué d'un bobinage rotorique alimenté par un courant $i_r(t)$:

de même, on écrira

$$\vec{B}_r(\theta) = K_R i_r(t) \cos(\theta - \theta_r) \vec{u}_r$$



5.3] Principe du moteur synchrone / alternateur

• Stator = porte le circuit d'induit, créant champ glissant sinusoïdal dans l'entrefer

• Rotor = porte le circuit inducteur, $i_r(t) = I_e$ (constant) courant d'excitation

$$\text{Rotor} \equiv \mathcal{L}_{\text{rot}}$$

$$C = d\vec{\mathcal{L}}_{\text{rot}} \wedge \vec{B}_{\text{stator}} \Rightarrow \text{Le rotor va s'aligner sur champ tournant à } \omega$$

$\Rightarrow$ condition synchronisme

= Le rotor peut être à aimants permanents "

(Moteur brushless car évite contacts glissants pour alimenter rotor.)

Alternateur: Turbines entraînent rotor à rotation $\omega = 50\text{Hz} \Rightarrow$ création de triphase sur réseau électrique.

5.4) Calcul du couple par approche énergétique

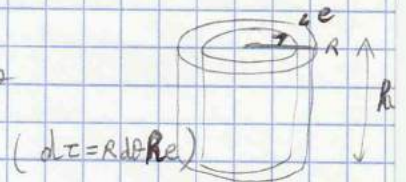
$$E_{\text{mag}} = \iiint E_{\text{mag}}^{\text{vol}} d\tau$$

Énergie stockée dans l'entrefer (majoritairement)

$$E_{\text{mag}}^{\text{vol}} = \frac{B^2}{2\mu_0}$$

$$\vec{B} = \vec{B}_s + \vec{B}_r \quad \text{radiaux}$$

$$E_{\text{mag}} = \iiint_{\text{entrefer}} \frac{[\vec{B}_r + \vec{B}_s]^2}{2\mu_0} d\tau = \frac{1}{2\mu_0} \int_0^{2\pi} (B_r^2 + B_s^2 + 2B_r B_s) R e h d\theta$$



$$= \frac{R e h}{2\mu_0} \int_0^{2\pi} (B_r^2 + B_s^2 + 2B_r B_s) d\theta$$

$$\text{avec } B_r = k' I_e \cos(\theta - \theta_r)$$

$$B_s = k I_{\text{eff}} \sqrt{2} \cos(\omega t - \theta)$$

$$= cte + \frac{R e h}{\mu_0} \frac{K K'}{S R} \sqrt{2} I_{\text{eff}} I_e \int_0^{2\pi} \cos(\theta - \theta_r) \cos(\omega t - \theta) d\theta$$

$\frac{1}{2} \cos(\omega t - \theta_r) + \frac{1}{2} \cos(2\theta - \omega t - \theta_r)$
 $\downarrow$
 $\rightarrow 0$

$$= cte + \frac{R e h}{\mu_0} \frac{K K'}{S R} \sqrt{2} I_{\text{eff}} I_e \pi \cos(\omega t - \theta_r)$$

TR. travaux virtuels :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_{\text{mag}}}{\partial \theta_r} \right)_{\substack{I_e = cte \\ I_{\text{eff}} = cte}} = \sqrt{2} \pi \frac{K K' R e h}{\mu_0} I_e I_{\text{eff}} \sin(\omega t - \theta_r)$$

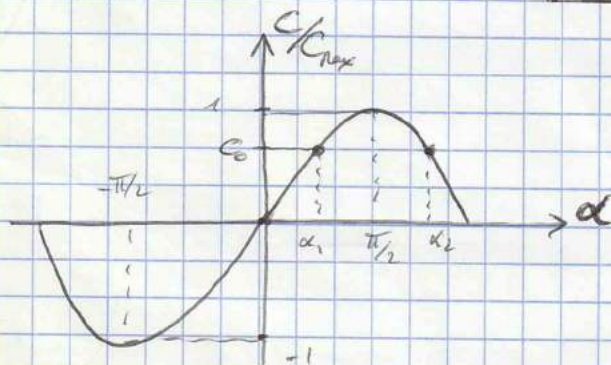
Couple moyen :

Condition synchronisme :

$$\theta_r = \omega t - \alpha$$

$C_{\text{moy}} = \langle C(t) \rangle = 0$! sauf si $\theta_r = \omega t - \alpha$
 en régime permanent

$$\text{Alors } C_{\text{moy}} = K I_{\text{eff}} I_e \sin \alpha$$



Pour un couple de consigne $C_0 < C_{\text{max}}$:

2 positions d'équilibre

$\alpha_1 < \pi/2$ = stable

(si rotor retardé, $\alpha \uparrow \Rightarrow C \uparrow$
 $\Rightarrow$ retard rattrapé)

$\alpha_2 > \pi/2$ = instable

(si retard, $\alpha \uparrow \Rightarrow C \downarrow \Rightarrow$ retard accru)
 $\Rightarrow$ décrochage

Régime alternateur
 $C < 0$

Régime moteur $C > 0$

$\alpha > 0$ = Le rotor "suit" le champ tournant statorique

$\alpha < 0$ = Le rotor

"précède" le champ tournant
 qui est provoqué par les
 courants induits au stator

• Si $C_0 > C_{\text{max}}$ = décrochage

• il faut "lancer" le moteur synchrone. Fréquence statorique
 $\Rightarrow$ utiliser réseau d'alimentation à fréquence
 variable (auto pilotage)

5.5] Stabilité, accrochage et couple sur le réseau, réversibilité

Pour un couple de consigne donné (moteur ou alternateur) = 2pts de fonctionnement

• Si $C > C_{max}$ = décrochage

stable
 $\alpha_1 < \frac{\pi}{2}$

instable
 $\alpha_2 > \frac{\pi}{2}$

• Roteur aisément réversible après accrochage sur le réseau
(Ex: utilisation en hydroélectricité)

• Accrochage à la vitesse du réseau ω nécessaire (= couple de démarrage nul)

↳ soit lancer le moteur avec un auxiliaire (Rachin à courant continu)

↳ soit démarrer avec un champ tournant très lentement et $\uparrow \omega$

↳ autopilotage (délai de puissance)

↳ soit démarrer en M. asynchrone si équipé d'amortisseurs de l'inducteur
(cage d'écureuil)
(cf chap. Moteur asynchrone)

5.6] Modélisation de type "Behn-Escherbourg"

Hyp: stator triphase, champ tournant statorique sinusoïdal, excitation en régime linéaire
(Non saturé)
 $\Phi_0^{r+s} = k I_c$

• Moteur hypothétiquement "à vide" ($I_A = I_B = I_C = 0$)

Loi de Lenz - $\left\{ \begin{array}{l} e_A^v(t) = - \frac{d\Phi_{r+s}^A(t)}{dt} \text{ avec } \Phi_{r+s}^A(t) = \Phi_0^{r+s} \cos(\omega t) \quad (\propto \vec{B}_r(t,0)) \\ e_B^v(t) = - \frac{d\Phi_{r+s}^B(t)}{dt} \text{ avec } \Phi_{r+s}^B(t) = \Phi_0^{r+s} \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ e_C^v(t) = - \frac{d\Phi_{r+s}^C(t)}{dt} \text{ avec } \Phi_{r+s}^C(t) = \Phi_0^{r+s} \cos(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{array} \right.$

ferm inducteur "à vide"
pas rotation rotor

$$\text{Donc } e_A^v(t) = \Phi_0^{r+s} \omega \sin(\omega t) = \frac{k \omega I_c}{E_v \sqrt{2}} \sin \omega t$$

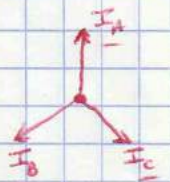
E_v = tension efficace à vide pour chaque phase

• Moteur en charge on suppose triphase "équilibre" ($I_A = I_B = I_C$)
($I_A + I_B + I_C = 0$)

Pour phase A:

$$e_A^c(t) = - \frac{d\Phi_A^c(t)}{dt} = - \frac{d(\Phi_{r+s}^A + \Phi_A + \Phi_{B \rightarrow A} + \Phi_{C \rightarrow A})}{dt}$$

(auto-ind.) (mutuelle ind.)



Fem "échange":

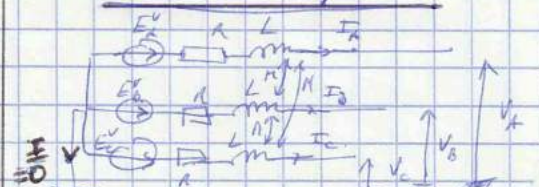
En notation complexe: $\underline{\Phi}_A = \underline{L} \underline{I}_A / \underline{\Phi}_{B \rightarrow A} = \underline{M} \underline{I}_B / \underline{\Phi}_{C \rightarrow A} = \underline{M} \underline{I}_C$

$$\underline{V}_A = \underline{E}_A^c = \underbrace{-j\omega \Phi_{r+s}^A}_{E_A^v} - j\omega L \underline{I}_A - \underbrace{j\omega M(\underline{I}_B + \underline{I}_C)}_{+ j\omega M \underline{I}_A \text{ (équilibre)}}$$

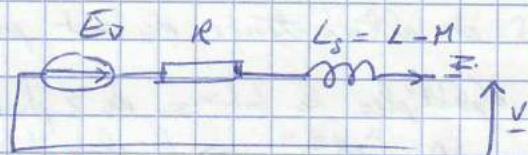
→ Equation d'une phase: Tension d'acier $\underline{V}_A = \underline{E}_A^c - R \underline{I}_A$ pertes Joule

système non couplé!
 $\left\{ \begin{array}{l} \underline{E}_A^v = \underline{V}_A + R \underline{I}_A + j\omega(L-M) \underline{I}_A \\ \text{pertes Joules} \quad \underline{L}_s = L - M \text{ inductance gélifique/synchrone} \end{array} \right.$

Représentation triphase équivalente:

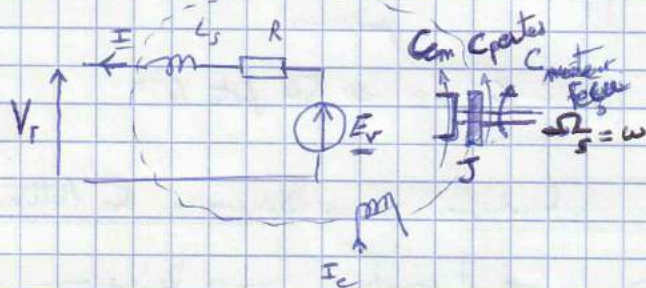


Modèle Behr-Eschenbourg =



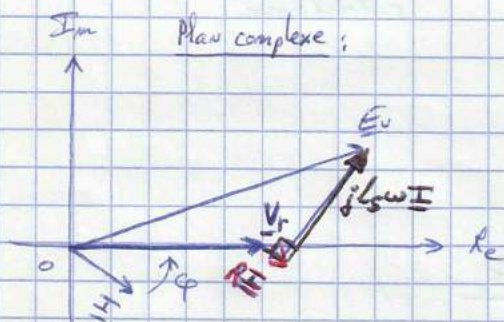
⇒ On peut modéliser une machine triphasée avec un modèle simple monophasé, découplé.

ex: E_v mode alternateur



$$E_v = V + RI + j\omega L_s I$$

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{\text{moteur}} - C_{\text{partes}} - C_{\text{e.m.}} \quad \text{e.m. produit par l'arbre et converti}$$



"sur-excitation"
⇒ déphasage arrière
⇒ alternateur capacitif.

En modifiant I_c , on peut rendre "sous-excité"
→ alternateur inductif

↳ Le "cos φ" est gérable!

↳ on utilise des alternateurs tournant à vide sur le réseau pour compenser la puissance réactive du réseau EDF (compensateurs synchrones)

5.7] N.S. réelles = réaction magnétique d'induit - pôles lisses/saillants
Nb pôles.

o Modèle précédent très simplifié adapté aux machines réelles qui fonctionnent en régime de saturation, et possèdent des géométries de rotors à pôles saillants.

o la réaction d'induit en outre et la création d'une contribution de champ

tournant à ω due à la circulation de courant dans le stator (induit)

(à vide) ⇒ elle contribue à la saturation du circuit magnétique



Fonctionnement nominal en régime faiblement saturé
→ Adapter les modèles

Déf. des pôles : P.S. et alternateurs ne sont pas conçus à 50 Hz $= \omega$
 $= 3000 \text{ tr/min}$
 On multiplie le bobinage des 3 phases sur $2p$ à trouver
 p "pôles" $\Rightarrow$ le champ tourne à $\omega = 3000 \text{ tef/min}$
 correspond à une rotation méca. effective à $\frac{3000}{p} \text{ tr/min}$
 En pratique : $\begin{cases} p \sim 1-4 \text{ en faible puissance} \\ p \sim 6-30 \text{ en très forte } P_{\text{me}}$

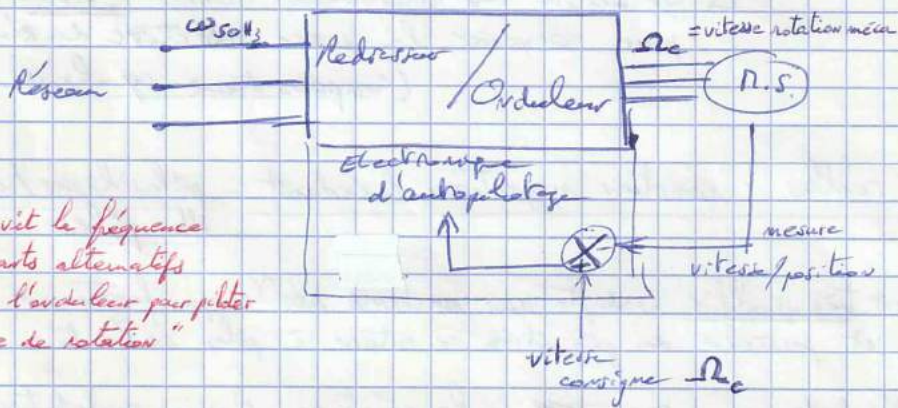
- Pôles lisses = géométrie cylindrique $\rightarrow$ Diagramme de Pottier
- Pôles saillants =  $\rightarrow$ 3 couple réductance $\rightarrow$ Diagramme de Blondel

5.8] ON mot sur la commande

- Moteur accouplé $\Rightarrow$ commande très simple à vitesse constante
- Ajustement du facteur de puissance possible ($\cos \phi$)

Vitesse constante $\Rightarrow$ peu pratique

- L'électronique de P_{me} permet l'auto-pilotage



"On asservit la fréquence des courants alternatifs créés par l'onduleur pour piloter la vitesse de rotation"

- Moteur "brushless" dans la gamme faible puissance :

M.S. à courants permanents, alimentée en continu via

électronique de commande - qui reçoit courant alternatif à fréquence nécessaire (onduleur)

$\rightarrow$ remplace avantageusement les MCC à balais / collecteur