Chapitre 3 : MACHINES SYNCHRONE ET ASYNCHRONE

1.Principe et description.

Les machines synchones et asynchrones fonctionnent avec des champs magnétiques tournants créés par le stator.

Le circuit rotorique (circuit d'induit) possède un moment magnétique $\vec{M} = \vec{S}.I$ qui interagit avec le champ inducteur par l'intermédiaire d'un couple : $\vec{C} = \vec{M} \wedge \vec{B}$

- Dans la machine *synchrone*, l'induit est alimenté par un courant continu et possède de ce fait un moment magnétique $\vec{M}$ constant qui interagit avec $\vec{B}$.
  Exemples : alternateur de voiture, TGV Atlantique.

- Dans la machine *asynchrone*, le rotor est un circuit fermé sur lui même ; les courants induits dans le circuit rotorique créent un moment magnétique $\vec{M}$ interagissant avec $\vec{B}$. C'est la plus utilisée.
  Exemple : moteur de machine à laver, Eurostar.

2. Réalisation d'un champ tournant avec un système diphasé

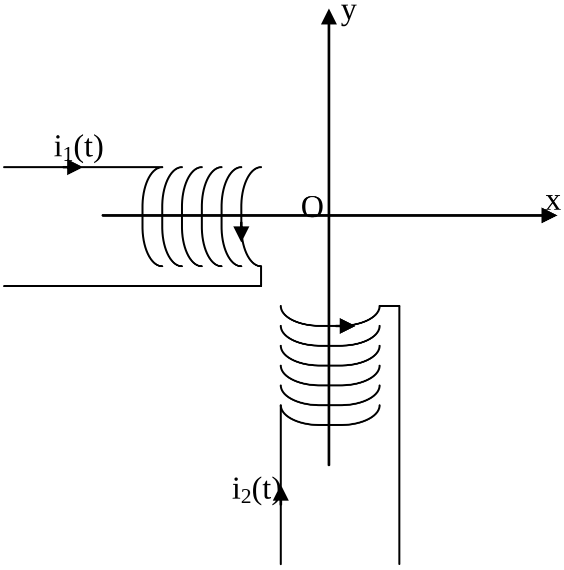
Avec deux bobines, il est possible de réaliser un champ tournant.
Pour cela on alimente deux bobines identiques par des courants alternatifs déphasés de $\pi/2$:

$$i_1 = Im.\cos(\omega_0 t) \ ;$$
$$i_2 = Im.\cos(\omega_0 t - \pi/2) = Im.\sin(\omega_0 t).$$

Les champs magnétiques en O créés par i_1 et i_2 sont :

$$\vec{B}_1 = B_m.\cos(\omega_0 t).\vec{u}_x \ ;$$
$$\vec{B}_2 = B_m.\sin(\omega_0 t).\vec{u}_y.$$

Le champ résultant en O $\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2$ tourne donc à la vitesse angulaire ω_0 dans le sens direct.



➢ Dessiner le vecteur champ magnétique ainsi créé, et représenter la phase $\omega_0 t$ sur le schéma.

3. Machine synchrone :

On étudie ici l'interaction d'un champ supposé uniforme et d'un moment magnétique constant.

3.1. Couple :

On considère un moment magnétique :

$$\vec{M} = M.[\cos(\omega t - \varphi_0).\vec{u}_x + \sin(\omega t - \varphi_0).\vec{u}_y]$$

tournant à vitesse ω constante dans le champ

$$\vec{B} = B_m[\cos(\omega_0 t).\vec{u}_x + \sin(\omega_0 t).\vec{u}_y.]$$

- Dessiner ces deux vecteurs à l'instant initial t = 0.
- Déterminer la valeur moyenne du couple exercé par le champ sur le rotor.
- A quelle condition le couple moyen est-il non nul ? Donner son expression.
- Justifier l'appellation du moteur.

ω_0 est appelée vitesse de synchronisme et φ_0 angle interne.

3.2.Fonctionnement en moteur :
Le couple est alors moteur soit $C.\omega > 0$.

- A quelle gamme d'angles internes cela correspond-il ?
- Le moment du rotor est-il en avance ou en retard sur le champ ?

Pour un fonctionnement en régime permanent, avec un couple résistant $C_r < 0$, on a :

$$C_r + C = 0.$$

- Comment l'angle interne évolue-t-il quand le couple résistant augmente ?
- Quel couple résistant maximal le moteur peut-il supporter ?
- Quelle gamme d'angle interne permet un *fonctionnement stable* du moteur, vis-à-vis d'une variation du couple résistant (augmentation ou diminution) ?

3.3 Fonctionnement en alternateur -- Fém induite.
Les bobinages statoriques ne sont pas alimentés ; le moment magnétique $\vec{M}$ est entrainé en rotation à vitesse constante ω. Il apparait donc dans chaque bobine une fém induite :

$$e = - d\phi/dt.$$

où ϕ est le flux à travers un bobinage du champ $\vec{B}$ créé par $\vec{M}$.

Si l'on suppose que ce champ est uniforme sur la surface d'un bobinage de surface S comportant N spires, on a :

$$\phi = N.B.S.\cos(\omega t) \Rightarrow e = N.B.S.\omega.\sin(\omega t).$$

Les deux bobines étant spatialement déphasées de $\pi/2$, les fém induites le seront également.

3.4 Utilisations du moteur synchrone

Avantages :
- vitesse fixe même lorsque le couple varie ;
- très bon rendement (85 à 95 %) ;

Inconvénients :
- démarrage assisté ;
- décrochage en cas de surcharge ;

Utilisations :
- peu de démarrages ;
- charge variable avec vitesse constante .

4. Machine asynchrone :

On modélise le rotor par un cadre conducteur rectangulaire de surface S tournant à ω autour de l'axe Oz, fermé sur lui-même, et possédant une résistance R et d'auto-inductance L.
On suppose qu'à t = 0 les vecteurs $\vec{B}$ (champ tournant à ω_0 et créé par le stator) et $\vec{M}$ sont colinéaires.

4.1. Courant induit dans le rotor :

C'est le champ tournant qui crée un courant induit dans le rotor.

- Expliquer pourquoi le moteur doit nécessairement être asynchrone pour fonctionner : $\omega \neq \omega_0$.
- Dessiner les deux vecteurs à un instant $t \gtrsim 0$.
- Expliquer l'origine de l'expression du flux du champ dans le cadre :

$$\Phi = B.S.\cos[(\omega_0 - \omega)t] = B.S.\cos[\Omega t]$$

où la différence des vitesses angulaires $\Omega = \omega_0 - \omega$ est appelé vitesses de synchronisme.
- Représenter (Ωt) sur le dessin.

- En déduire l'expression de la fém. Ecrire l'équation électrique de l'induit.
- Soit $i(t) = I_m.\cos(\Omega t - \Psi)$. Introduire la notation complexe.
- En déduire l'amplitude et le retard de phase Ψ du courant.
- En déduire que $\sin(\Psi) = R/\sqrt{R^2 + L^2\Omega^2}$

4.2. Couple agissant sur le rotor :

$$\vec{\Gamma} = \vec{M} \wedge \vec{B} = \vec{S}i(t) \wedge \vec{B}$$

$$\vec{\Gamma} = S.B.I_m.\cos(\Omega t - \psi).\sin(\Omega t)\vec{u}_z.$$

- Montrer que le couple moyen s'écrit :

$$<\Gamma> = S.B.I_m.\sin(\Psi)/2 \quad \text{soit} \quad \langle \Gamma_\Delta \rangle = \frac{\varphi_0^2 \Omega}{2} \frac{R}{R^2 + L^2\Omega^2}$$

- En régime moteur, montrer que le champ doit aller plus vite que le moment du rotor.

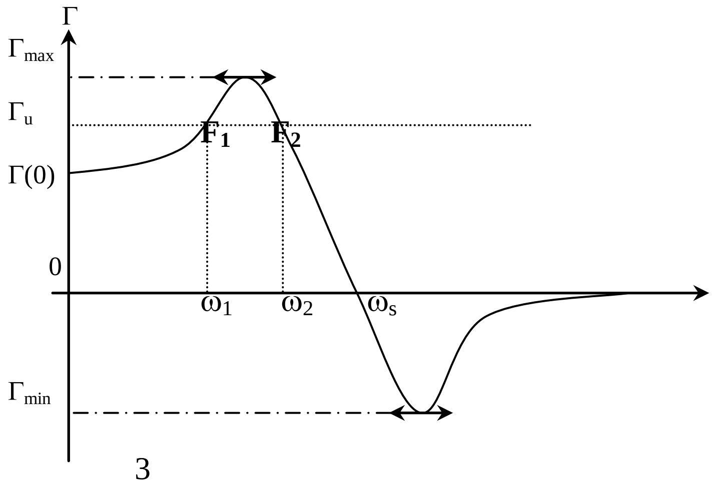
4.3. Etude du couple moyen :

$$\frac{d\langle \Gamma_\Delta \rangle}{d\omega} = 0 \Leftrightarrow \begin{cases} \omega_{max} = \omega_s - R/L \\ \omega_{min} = \omega_s + R/L \end{cases}$$ (ω_s représente ω_0 ici, supposé supérieur à R/L)

$$\langle \Gamma_\Delta \rangle(0) = \frac{\phi_0^2 \omega_s}{2} \frac{R}{R^2 + L^2\omega_s^2} \;;\; \langle \Gamma_\Delta \rangle(\omega_{min}) = -\frac{\phi_0^2}{4L} \;;\; \langle \Gamma_\Delta \rangle(\omega_{max}) = \frac{\phi_0^2}{4L} \;;$$

Le couple est moteur ($\langle \Gamma_\Delta \rangle > 0$) pour $0 < \omega < \omega_s$.

Le moteur asynchrone possède un couple de démarrage non-nul. Si le couple résistant lui est supérieur, il faudrait « lancer à la main » le rotor pour le mettre en route (si couple résistant inférieur au couple max du moteur).



4.4. Etude de la stabilité en fonctionnement moteur :

On suppose que le rotor est soumis au couple moteur et à un couple de charge constant - $\Gamma_u < 0$.
Les points de fonctionnement en régime permanent correspondent à $d\omega/dt = 0$ soit $\langle\Gamma_\Delta\rangle - \Gamma_u = 0$.

Il y a deux points de fonctionnement :

- le point F_1 est instable, car si ω diminue, $\langle\Gamma_\Delta\rangle$ diminue ; le moteur ralentit puis s'arrête.
- Le point F_2 est stable, car si ω diminue, $\langle\Gamma_\Delta\rangle$ augmente ; le moteur accélère.

4.5. Rendement du moteur :

$$\eta = \frac{\Gamma_\Delta\omega}{P_{ém}} = \frac{\Gamma_\Delta\omega}{\Gamma_\Delta\omega + RI_m^2/2} = \frac{\omega}{\omega_s} \ .$$

MACHINES SYNCHRONE ET ASYNCHRONE : EXERCICES

Machine synchrone (CCP PSI 08) :

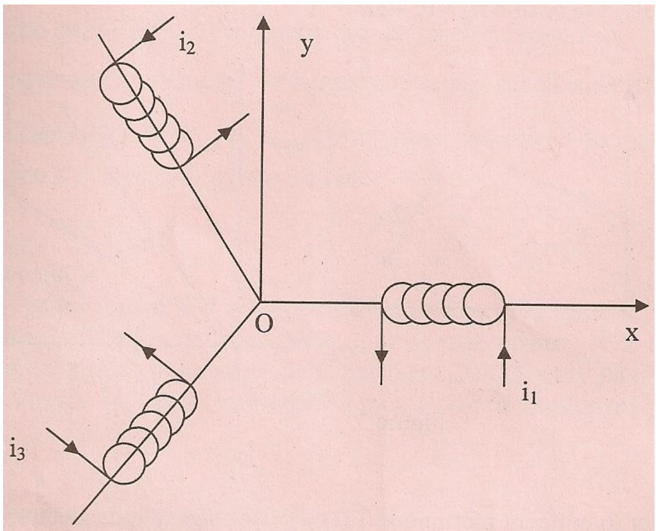
Le principe de la conversion d'énergie électrique en énergie mécanique repose sur une interaction champ magnétique - courant électrique. Dans la machine synchrone, le stator est alimenté par un système de courants triphasés. Il crée à l'intérieur de la machine un champ tournant. Le rotor s'apparente à une bobine alimentée en courant continu. L'interaction du champ magnétique créé par le stator sur le courant du rotor est à l'origine d'un couple électromagnétique.
Un formulaire se trouve en fin de problème.

A] Etude du stator :

Le stator est constitué de trois bobines, dont les axes principaux contenus dans le plan xOy sont décalés de $2\pi/3$ les uns par rapport aux autres. Elles sont alimentées par un système de courant triphasé d'amplitude maximale I_m, (de valeur efficace I_{eff}) et de fréquence f_s (de pulsation ω_s) . On a

$$i_1(t) = I_m.\cos (\omega_s t + \varphi)$$
$$i_2(t) = I_m.\cos (\omega_s t + \varphi - 2\pi/3)$$
$$i_3(t) = I_m.\cos (\omega_s t + \varphi + 2\pi/3)$$

Chaque bobine crée dans la machine un champ magnétique proportionnel au courant qui la traverse et dirigé suivant son axe principal.
On note K le coefficient de proportionnalité et on a :
$\vec{B}_j(t)=K.i_j(t).\vec{e}_j$ avec j = 1, 2 ou 3 ; $\vec{e}_1 = \vec{e}_x$; $\vec{e}_2$ et $\vec{e}_3$ se déduisent de $\vec{e}_1$ par les rotations d'angle respectif $2\pi/3$ et $-2\pi/3$.



A.1) Donner l'expression du champ magnétique $\vec{B}_s$ créé par le stator à l'intérieur de la machine dans la base $(\vec{e}_x,\vec{e}_y)$ .On exprimera chaque composante en fonction de K, I_m, $\omega_s t$ et φ.

A.2) Montrer que ce champ est de norme constante et porté par un vecteur unitaire dont on précisera le sens et la direction dans la base $(\vec{e}_x,\vec{e}_y)$ .Justifier l'appellation de champ tournant et préciser son sens de rotation.

A.3) Que se passe t-il si on inverse les phases 1 et 2 de la machine c'est à dire si on a :

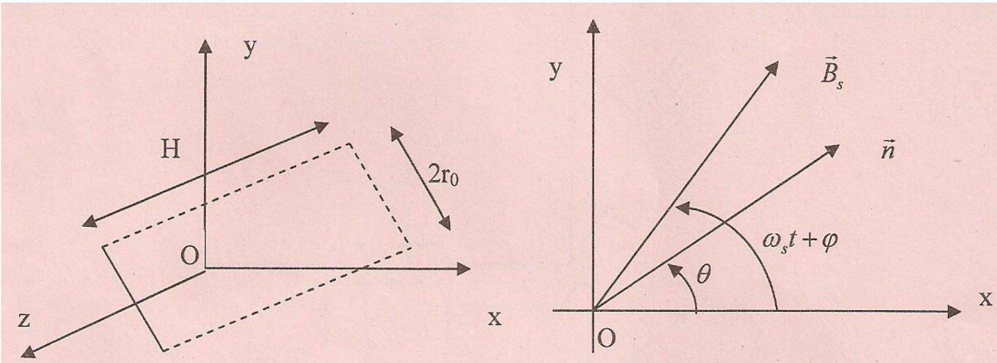
$$i_1(t) = I_m.\cos (\omega_s t + \varphi - 2\pi/3)$$
$$i_2(t) = I_m.\cos (\omega_s t + \varphi)$$
$$i_3(t) = I_m.\cos (\omega_s t + \varphi + 2\pi/3)$$

A.4) On donne K = 0,05 $T.A^{-1}$, I_{eff} = 15 A, f_s = 50 Hz. Calculer la valeur numérique de $\|\vec{B}_s\|$ et la vitesse de rotation de ce champ tournant en tr/min.

B] Couple exercé sur le rotor :

Dans la suite du problème, on pose $\vec{B}_s = B_s.\vec{u}(t)$ où B_s est l'amplitude du champ magnétique créé par le stator et $\vec{u}(t)$ le vecteur unitaire de la base $(\vec{e}_x,\vec{e}_y)$ tel que l'angle $(\vec{e}_x,\vec{u}(t))$ = $\omega_s t + \varphi$.

Le rotor tourne autour de l'axe Oz, à la vitesse angulaire constante $\vec{\Omega} = \Omega.\vec{e}_z$. D'un point de vue électrique, il est assimilable à une bobine plate rectangulaire de surface géométrique S = $2.r_0.H$, de largeur $2.r_0$ et de longueur H suivant Oz. Cette bobine comporte p spires en série. Elles sont géométriquement confondues. Chaque spire est parcourue par le courant continu d'intensité I.
Soit $\vec{n}(t)$ le vecteur unitaire de la base $(\vec{e}_x,\vec{e}_y)$, normal à la surface S orientée du rotor. On note θ l'angle $(\vec{e}_x,\vec{n})$. On pose $\theta(t) = \theta_0 + \Omega t$.



B.1) Déterminer le moment mécanique $\vec{\Gamma}(t)=\Gamma(t).\vec{e}_z$ des actions électromagnétiques, exercé sur le rotor .

B.2) La pulsation ω_s étant imposée et constante, établir, suivant les valeurs de Ω, le couple moyen Γ_{syn} associé à Γ(t). Pourquoi ce type de moteur est-il qualifié de synchrone ? Ce type de moteur, connecté à un réseau de fréquence fixe peut-il démarrer seul ?

B.3) Tracer la courbe représentant Γ_{syn} en fonction du décalage angulaire $\Psi = \varphi - \theta_0$. Délimiter les intervalles de Ψ correspondant aux fonctionnements moteur et générateur. Que vaut Ψ lorsque Γ_{syn} est maximum ? Donner l'expression de ce couple maximum, noté Γ_{max}.
Que vaut le flux magnétique Φ_{mag} créé par le stator, c'est à dire le flux de $\vec{B}_s$ à travers le rotor lorsque $\Gamma_{syn} = \Gamma_{max}$?

B.4) Pour un couple $0 \le \Gamma_{syn} \le \Gamma_{max}$ donné, il existe deux valeurs (éventuellement une valeur double) de l'écart angulaire $\Psi = \varphi - \theta_0$. Discuter de la stabilité du fonctionnement de la machine pour chacune de ces deux valeurs. Cette étude doit aussi prendre en compte la valeur double.
On étudiera l'effet sur le couple moteur d'une perturbation (motrice ou non) de la position du rotor, c'est-à-dire la répercussion d'une variation de l'angle sur le couple moteur.

Formulaire :

$\cos(p)+\cos(q) = 2\cos(\frac{p+q}{2})\cos(\frac{p-q}{2})$

$\cos(p) - \cos(q) = -2\sin(\frac{p+q}{2})\sin(\frac{p-q}{2})$

$\cos(2p) = 1 - 2\sin^2(p)$

$\cos(p+q) = \cos(p).\cos(q) - \sin(p).\sin(q)$

$\sin(p+q) = \sin(p)\cos(q) + \sin(q)\cos(p)$.