IFL5

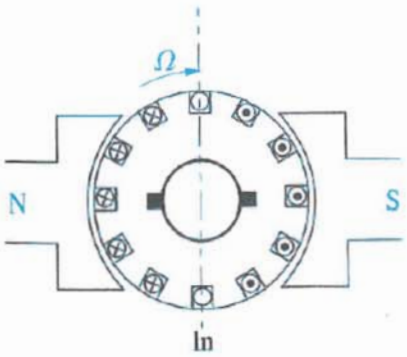
- **Machine réelle**

L'induit d'une machine réelle comporte un grand nombre d'encoches (et autant de lames au collecteur) dans lesquelles N conducteurs sont répartis pour formés $N/2$ spires.
L'ensemble des spires liées les unes à la suite des autres en permettant d'aller d'un balai à l'autre constitue une voie d'enroulement.
Lorsque le nombre de conducteurs par encoche et le nombre d'encoches sont importants, la valeur moyenne E de e est sensiblement égale à e :

E de -e

fém.

$$E = \frac{N\Phi_0\Omega}{2\pi} = K\Phi\Omega$$

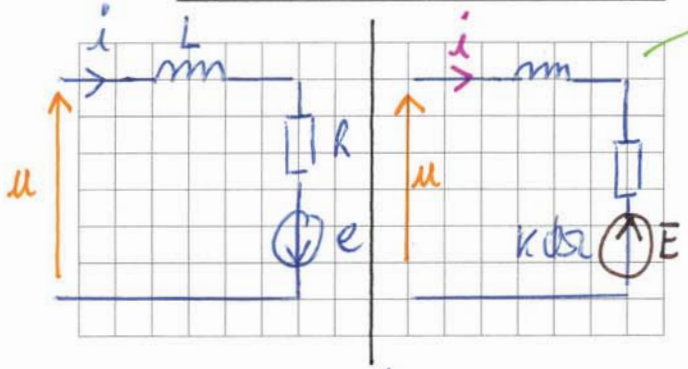


Rq

Lorsque les conducteurs de l'induit parcourus par un courant d'intensité I sont des sources de champ magnétique qui créent un flux, cela s'appelle la réaction magnétique d'induit. Ce phénomène implique une diminution de la fém lorsque l'intensité I augmente. A l'aide d'un enroulement auxiliaire, on peut remédier aux conséquences de ce phénomène : la machine est alors dite compensée.

3.3. Equations électrique et mécanique

Convention récepteur



fcem $E = -e = K\Phi\Omega$

L = inductance de l'induit
R = résistance
→ enroulements (R faible).

Loi des mailles = $\boxed{u = Ri + L\frac{di}{dt} + E}$

* Equation mécanique = J moment d'inertie par rapport à l'axe Oz.

Couple résistant = $\vec{\Gamma}_{charge} = -G\vec{e}_z$

$$\boxed{J\frac{d\Omega}{dt} = K\Phi i - G}$$

3.4. Bilan de puissance

Le couplage électromécanique est supposé parfait.

La puissance des forces de Laplace et celle de la fem induite se compensent exactement.

$$\mathcal{P}_{Lap} + \mathcal{P}_{Fem} = 0$$

↳ puissance méca fournie au rotor.

↳ puissance élec fournie au circuit.

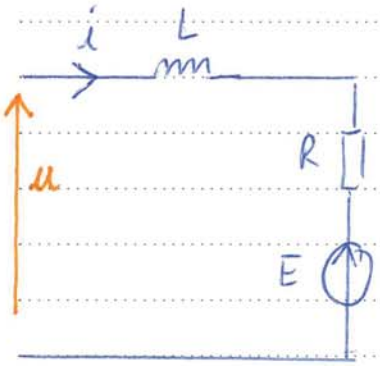
$\mathcal{P}_{Lap} = C\Omega = Ki\Omega$ $\qquad$ $\mathcal{P}_{Fem} = ei = -Ei$ (conv. récepteur)

conv. générateur

3.5. Réversibilité

- **Fonctionnement moteur**

Si le couple C et la vitesse de rotation Ω sont de même sens, alors la puissance mécanique est positive, et la machine fonctionne en moteur. La puissance induite est négative, la fém induite s'oppose au passage du courant. Il faut fournir de l'énergie électrique au moteur.



On se place en régime permanent.

$U = RI + E$ (fcem)

$\mathcal{P}_{élec} = UI = RI^2 + EI = C\Omega = \mathcal{P}_{méca}$

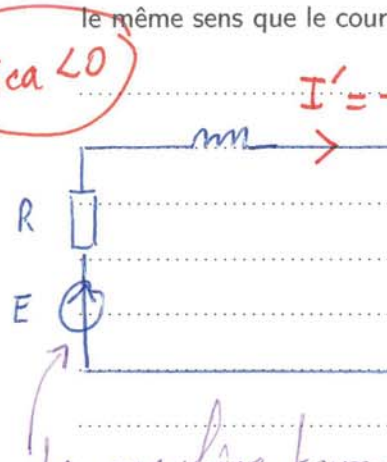
$RI^2 > 0$

$$\eta = \frac{\mathcal{P}_{méca}}{\mathcal{P}_{élec}}$$

- **Fonctionnement en génératrice**

Si, par rapport au fonctionnement en moteur, une seulement des deux grandeurs I ou Ω change de signe, alors la puissance induite et la puissance mécanique changent de signes aussi.

La machine fonctionne alors en génératrice. La puissance induite est positive, donc la fém induite est dans le même sens que le courant. Par contre, il faut fournir de la puissance mécanique à l'arbre moteur.



Convention générateur.

Régime permanent : $u = E - RI'$

$P_{élec} = UI' = EI' - RI'^2$

$= e_i$

$EI' = P_{élec} + RI'^2$

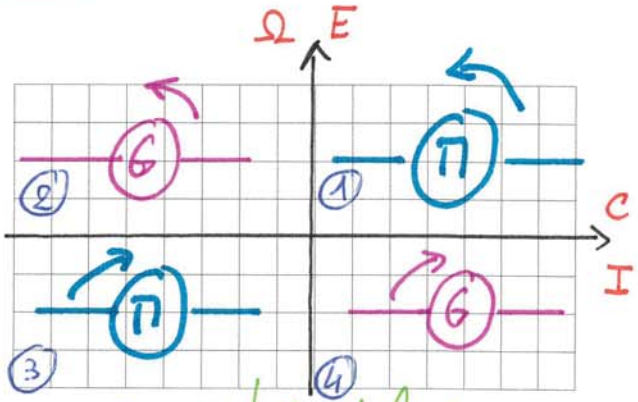
$-P_{méca}$

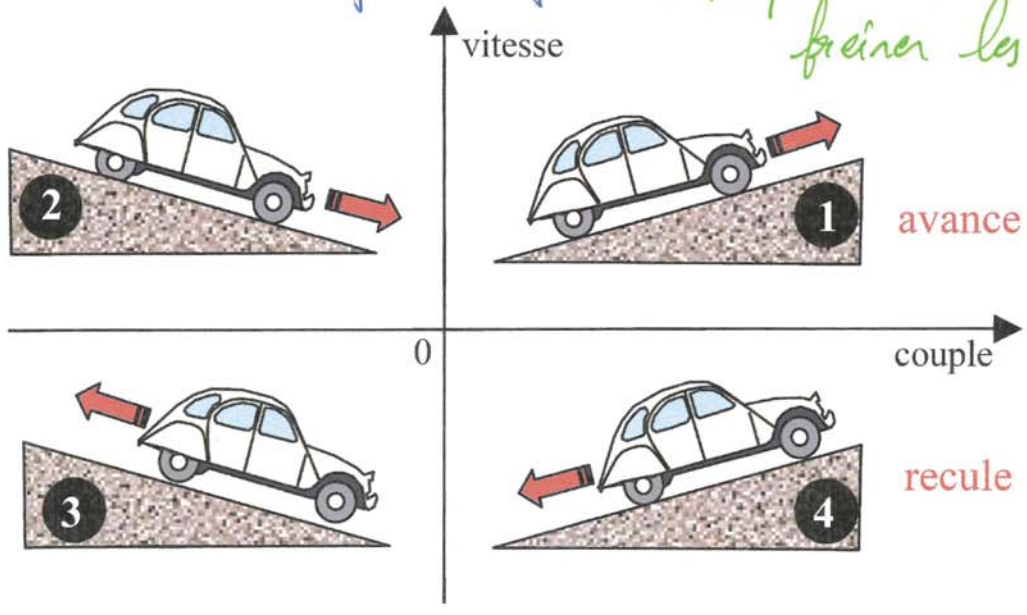
$$\eta = \frac{P_{élec}}{-P_{méca}}$$

- **Quadrants de fonctionnement**

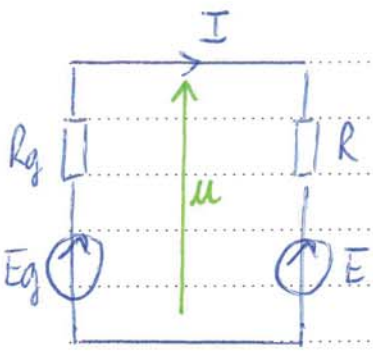
Convention récepteur pour le circuit élec (fcem)

un moteur peut se mettre à fonctionner en génératrice sans changer de sens de rotation si le courant change de signe. ⇒ Propriété utilisée pour freiner les moteurs.





3.6. Régime stationnaire et caractéristiques



① $U = E + RI$ → $U = K\phi\Omega + RI$ (pente faible)

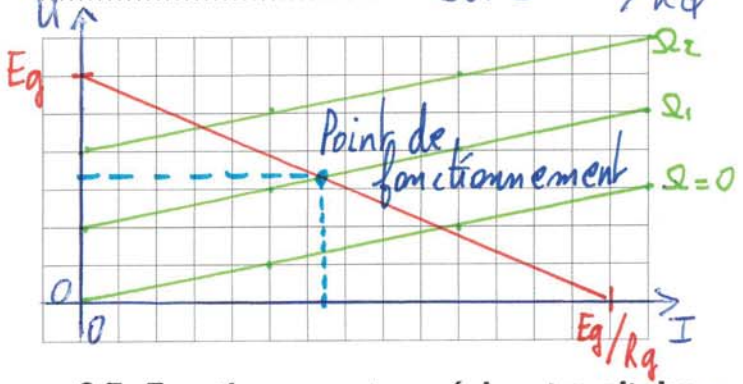
② $C = K\phi I$ → $U = K\phi\Omega + RC/K\phi$

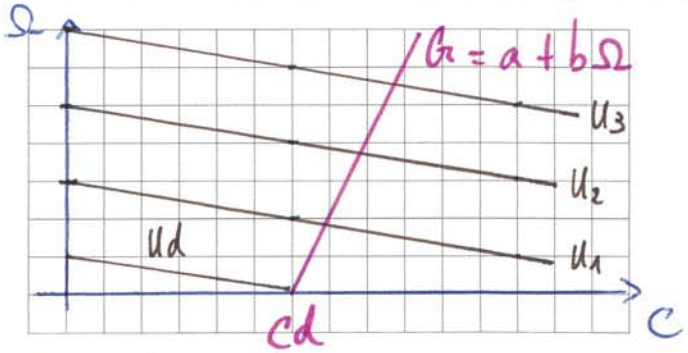
$$\Omega = -\frac{R}{K^2\phi^2}C + \frac{U}{K\phi}$$

Changement de type : $G = a + b\Omega$

Le démarrage ne se fait qu'à partir d'une certaine tension U_d qui correspond au couple de démarrage $C_d = a$

$I_d = C_d/K\phi$ $\quad U_d = RI_d$ $\quad (E = 0 \; \Omega = 0)$.





3.7. Fonctionnement en régime transitoire

$J\frac{d\Omega}{dt} = K\phi i$ ← éventuellement C_r $\quad U = Ri + K\phi\Omega$ ⚠ inductance propre négligée

$$U = \frac{RJ}{K\phi}\frac{d\Omega}{dt} + K\phi\Omega$$

éq. diff du 1er ordre à coeff cst.

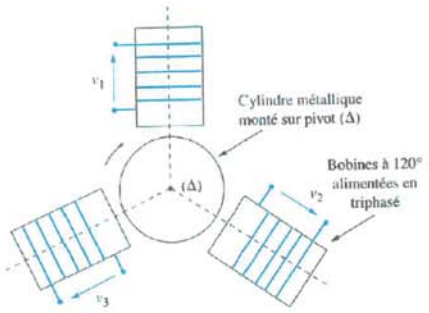
Constante de temps électromécanique $\tau = \frac{RJ}{(K\phi)^2}$

τ augmente avec le moment d'inertie J.

Si on prend en compte l'inductance propre ⇒ système du 2e ordre

3. Machine Asynchrone

3.1. Constitution



Les trois bobines sont alimentées par une système de tensions triphasé équilibré. Le cylindre monté sur une liaison pivot d'axe vertical se met à tourner.
Si on inverse deux phases au niveau des bobines, on constate que le rotor tourne en sens inverse.

Interprétation :

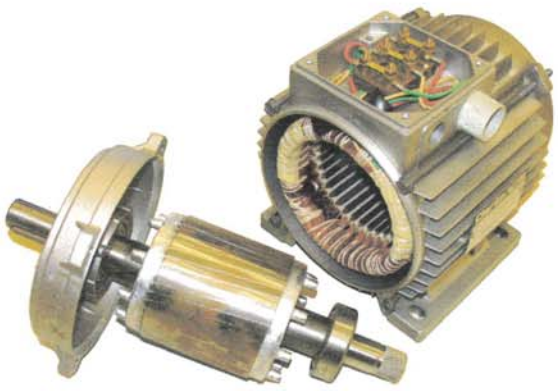
Les trois bobines produisent au centre du dispositif un champ tournant à la fréquence de rotation n_s (en tour par seconde) égale à la fréquence f du réseau alimentant les trois bobines.

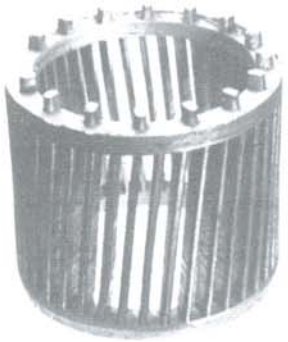
Dès que les bobines sont alimentées, le cylindre métallique est balayé par une champ magnétique tournant. Il est soumis à un champ magnétique variable dans le temps et donc à un flux variable. Il est donc le siège de courants de Foucault qui circulent dans le métal(de manière à s'opposer à la cause qui leur a donné naissance).

Le cylindre est soumis à des forces de Laplace et tourne donc à la poursuite du champ tournant.

Le rotor peut-il tourner exactement à la même vitesse que le champ tournant ?
Non, car le champ magnétique serait fixe par rapport au rotor : si le balayage du cylindre par le champ cesse, il n'y a plus de courants de Foucault et le cylindre métallique n'est plus entraîné.

La fréquence de rotation du rotor est donc légèrement inférieure à celle du champ tournant (d'où le nom de machine asynchrone).





- **Stator :**
  Le stator est analogue à celui d'une machine synchrone. Il comporte trois enroulements placés dans les encoches d'une carcasse ferromagnétique.
  le stator constitue l'inducteur du moteur et a pour rôle de créer un champ tournant dans l'entrefer de la machine.
  Alimentés par une réseau triphasé équilibré, les enroulements génèrent dans l'entrefer du moteur un champ tournant dont la vitesse de rotation Ω_s (vitesse de synchronisme) est fonction de la pulsation ω du réseau et du nombre de paires de pôles p du stator.

$$\Omega_s = \frac{\omega}{p} \qquad \text{ou} \qquad n_s = \frac{f}{p}$$

f fréquence du réseau, n_s fréquence de rotation du champ tournant (en tr/s)

Application I

Quel est le nombre de pôles d'un moteur asynchrone qui, alimenté par un réseau 50 Hz génère un champ tournant à 1000 tr/min ?

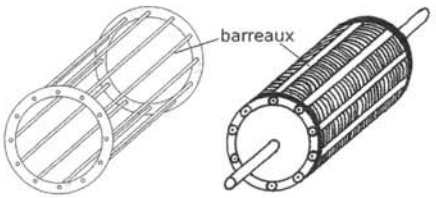
$n_s = \frac{1000}{60}$ tr/s $\quad n_s = \frac{f}{p} \quad p = \frac{f}{n_s} = \frac{50 \times 6}{100} = 3$

3 paires de pôles (moteur hexapolaire).

- **Rotor :**

Il existe deux types de rotor :

→ Rotor à cages d'écureuil : des barres de cuivre (ou en aluminium) logées dans les encoches d'un cylindre ferromagnétique sont mises en court-circuit par des anneaux de cuivre.



→ Rotor bobiné : trois enroulements sont logés dans les encoches d'un cylindre ferromagnétique feuilleté constituant le rotor. Celui-ci présente le même nombre de pôles que le stator. Ces enroulements rotoriques sont reliés à trois bornes par l'intermédiaire de bagues solidaires du rotor et de balais frottant sur ces bagues.
Le rotor bobiné doit être fermé sur lui-même directement (mis en court-circuit) ou par l'intermédiaire de résistances.

Le moteur asynchrone à cage d'écureuil est évidemment plus simple à réaliser. Il est plus robuste (pas de contacts glissants). Il présente l'avantage d'être beaucoup moins coûteux.
Le développement de l'électronique de puissance a permis d'étendre le domaine d'application des moteurs à cage d'écureuil au détriment des moteurs à rotor bobiné (et des moteurs à courant continu).

3.2. Glissement

La vitesse de rotation du rotor est forcément différente de la vitesse de synchronisme.

Un observateur lié au rotor voir donc un champ tournant créé par le stator glissé par rapport à lui.

Définition

On définit le glissement comme la grandeur sans dimension suivante :

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} = \frac{n_s - n}{n_s}$$

IFL5

Application 2

Quel est le glissement d'un moteur asynchrone tétrapolaire alimenté par un réseau de fréquence 50 Hz et qui tourne à 1420 tr/min.

$n_s = \frac{f}{p} = 25$ tr/s $\quad n_s = 1500$ tr/min.

$g = \frac{n_s - n}{n_s} \quad g = 5{,}3\,\%$

Fréquence des courants rotoriques :

La vitesse relative à laquelle le champ tournant balaie les conducteurs du rotor vaut $\Omega_s - \Omega$. La pulsation ω_R des courants induits est égale à

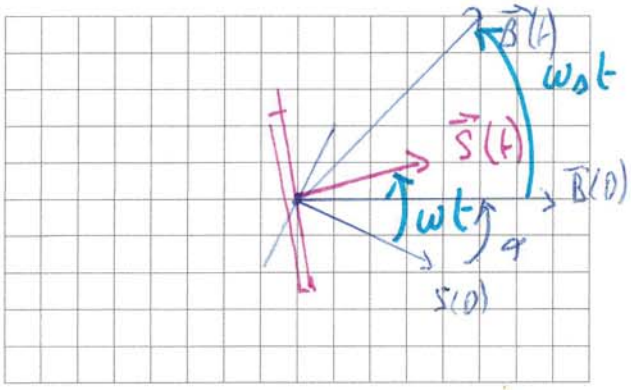
$$\omega_R = p\,(\Omega_s - \Omega) = \omega \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} \qquad \omega_R = g\omega$$

Cette fréquence varie donc avec le glissement.

A l'arrêt $\Omega = 0$ $f_R = f$ $g = 1$

En fonctionnement normal, $g_n \ll 1$.

3.3. Principe de fonctionnement



Loi de Lenz

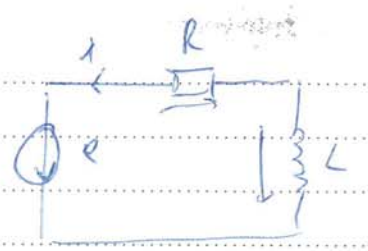
- si $\omega < \omega_s$ = le couple a tendance à accélérer la spire : couple moteur
- si $\omega = \omega_s$ = aucun couple exercé
- si $\omega > \omega_s$ = le couple a tendance à freiner la spire : couple résistant.

- Equation électrique $\quad e = -\frac{d\Phi}{dt}$

$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = BS \cos((\omega_s - \omega)t + \varphi)$

$e = BS(\omega_s - \omega) \sin((\omega_s - \omega)t + \varphi)$

Courant induit dans la bobine



$L\frac{di}{dt} + Ri = e$

Après régime transitoire $\Rightarrow$ RSF de pulsation $\omega_s - \omega$

$(jL(\omega_s - \omega) + R)\underline{I} = \underline{E}$

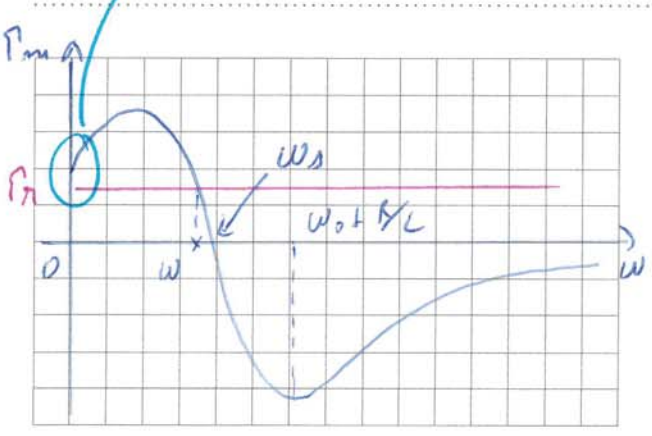
* Couple EM $\vec{\Gamma} = \vec{M} \wedge \vec{B} = iSB\sin((\omega_s - \omega)t + \varphi)\vec{u_z}$

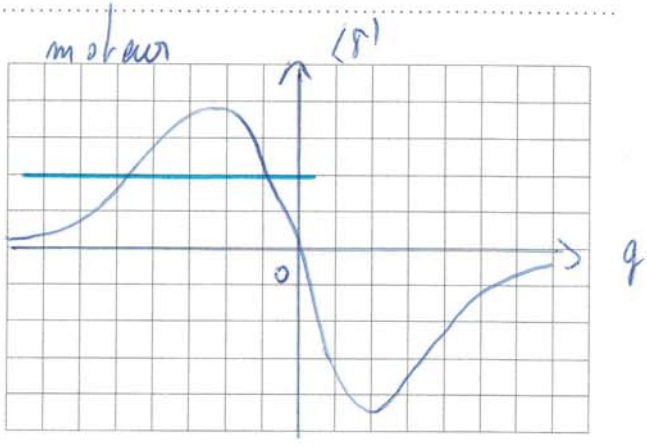
On remplace i par son expression

$i(t) = \frac{BS(\omega_s - \omega)}{R^2 + L^2(\omega_s - \omega)^2}\left(R\sin((\omega_s - \omega)t + \varphi) - L(\omega_s - \omega)\cos(\ )\right)$

$\langle\vec{\Gamma}\rangle = \frac{B^2S^2(\omega_s - \omega)R}{2(R^2 + L^2(\omega_s - \omega)^2} \vec{u_z}$

démarrage si $\Gamma_0 > \Gamma_r$





3.4. Freinage

- En survitesse : si la charge tend à entraîner le rotor à une vitesse supérieure à N_S, on obtient un fonctionnement en génératrice et donc un freinage.
- Si on inverse deux phases aux stator pour obtenir un champ tournant en sens inverse de la rotation du rotor, on obtient un couple de freinage. Si le rotor est bobiné, on peut régler l'intensité du freinage en modifiant la résistance rotorique.
- On peut aussi injecter du courant continu dans les enroulements statoriques. On crée un champ de direction fixe dans la machine, le rotor est freiné par un couple d'autant plus élevé que N est importante. L'impédance d'une phase rotorique étant beaucoup plus faible en continu qu'en alternatif, on abaisse la tension à une valeur de 40 à 50 V au moyen d'un transformateur avant de la redresser par un pont de diodes qui alimente deux phases du stator.