LP20 - Conversion de puissance électromécanique

10 juin 2021

Tristan Jocteur & Julie Deleuze

Niveau : PSI

Bibliographie

✍ http://lnspe2.fr/Cours_Phys/CP02.pdf — le cours auquel se réfère J. Fillette
✍ https://gitlab.in2p3.fr/jeremy.neveu/Moteurs — le cours d'agreg de Ulm

Prérequis

- Electromagnétisme dans les milieux matériels
- Induction

Table des matières

1 Principe de la conversion électromagnétique : le contacteur électromagnétique **2**
1.1 Présentation . . . 2
1.2 Force exercée . . . 3
1.3 Généralisation . . . 4

2 La machine synchrone **4**
2.1 Principe de fonctionnement . . . 4
2.2 Mise en oeuvre pratique . . . 6
2.3 Couple électromagnétique . . . 6
2.4 Fonctionnement moteur . . . 7
2.5 Réversibilité : fonctionnement en alternateur . . . 8
2.6 Machine réelle et critiques . . . 8

3 Conclusion **9**

4 Questions/Remarques bref le bordel c'est Hervax **9**

5 Remarques du jury **9**

Remarques sur les leçons précédentes

- **2017** : Une approche à l'aide des seules forces de Laplace est insuffisante. Les candidats doivent aussi s'interroger sur l'intérêt d'utiliser des matériaux ferromagnétiques dans les machines électriques.
- **2016** : Afin de pouvoir aborder des machines électriques de forte puissance, le rôle essentiel du fer doit être considéré car les forces électromagnétiques ne se réduisent pas aux seules actions de Laplace s'exerçant sur les conducteurs traversés par des courants.
- **2015** : Il est souhaitable de préciser le rôle de l'énergie magnétique lors de l'étude des convertisseurs électromécaniques constitués de matériaux ferromagnétiques linéaires non saturés.
- **2014** : Dans le cas des machines électriques, les candidats sont invités à réfléchir au rôle du fer dans les actions électromagnétiques qui peuvent également être déterminées par dérivation d'une grandeur énergétique par rapport à un paramètre de position.

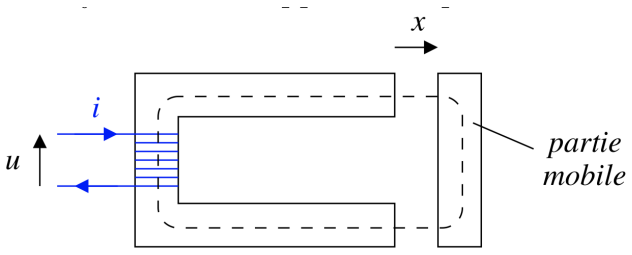
L'enseignement des machines tournantes en PSI a changé avec l'arrivée des derniers programmes. Tout d'abord, la machine asynchrone n'est plus au programme. Ensuite la façon dont la machine synchrone et la machine à courant continu est présentée ici est similaire à celle qui devait être enseignée avant : calcul des forces de Laplace appliquée à une/des spires(s) de conducteur métallique et calcul de la force électromotrice. Cette vision a l'avantage d'appliquer les notions d'électromagnétisme liées à l'induction, mais ne représente pas la réalité d'une machine réelle. En effet, dans une machine réelle les conducteurs de l'induit sont logés dans des encoches du rotor ferromagnétique comme suggéré dans la figure 17. Le matériau ferromagnétique canalisant les lignes de champ magnétique venant du stator, le champ magnétique devient quasi nul au niveau des conducteurs ce qui compromet le calcul des forces de Laplace subies par le conducteur. De plus, il n'a pas été pris en compte l'interaction mutuelle du rotor comme dipôle magnétique avec le stator. Dans les nouveaux programmes, le couple électromécanique est déduit de considération sur l'énergie magnétique stockée dans la machine et convertie en force mécanique. Cette nouvelle approche permet de prendre en compte l'effet des matériaux ferromagnétiques présents dans le rotor et leur influence réciproque sur le stator. Conclusion, pour la leçon sur la conversion de puissance électromécanique, attention à bien respecter le programme !

Je pense qu'il faut quand même essayer de traiter la machine synchrone une leçon que sur la machine à courant continu ça me paraît trop spécifique. Les rapports insistent beaucoup sur l'importance des matériaux ferromagnétiques, les circuits électriques équivalents et la réversibilité. Du coup l'idée de traiter le contacteur électromagnétique je pense que c'est pas mal parce qu'on parle des ferro direct ! On fait qques calculs et l'idée c'est de s'en servir au max en généralisant aux machines à courant continu et synchrone. Le bail de traiter la MCC comme un quadripôle et de trouver un point de fonctionnement sur les 4 cadrans des caractéristiques ça me paraît assez efficace pour expliquer le fonctionnement je pense que c'est à reprendre (cf leçon Francis). Du coup je propose ça :

1 Principe de la conversion électromagnétique : le contacteur électromagnétique

1.1 Présentation

Le contacteur electromagnétique est un composant électrique qui permet d'ouvrir ou de fermer un circuit electrique de puissance à partir d'une commande en courant. Un noyau ferromagnétique fixe en forme de U est excité par une bobine de N spires parcourue par un courant d'intensité i. Deux entrefers d'épaisseur x variable le séparent d'un bloc ferromagnétique mobile en translation selon Ox. On note S la section constante du circuit magnétique et l sa longueur moyenne en l'absence de l'entrefer. En présence d'un courant i non nul, le champ magnétique $\vec{B}$ créé par la bobine et canalisé par le matériau ferromagnétique va exercer une force sur la partie mobile que l'on va chercher à déterminer.



L'application du théorème d'Ampère sur le contour en pointillé conduit à :

$$H_{\text{fer}} l + H_{\text{ext}} 2x = Ni$$

En fait H c pas au programme juste dire qu'on applique le théorème d'AMpère dans un milieu matériel et remplacer μ_0 par $\mu_0\mu_r$. Le champ magnétique étant à flux conservatif, l'hypothèse d'une canalisation parfaite des lignes de champ à section constante impose :

$$B_{\text{fer}} = B_{\text{ext}} = B$$

De plus on suppose les matériaux linéaires :

$$B_{\text{ext}} = \mu_0 H_{\text{ext}} \text{ et } B_{\text{fer}} = \mu_0\mu_r H_{\text{fer}}$$

En combinant les différentes relations, on en déduit :

$$\frac{B \times \ell}{\mu_0\mu_r} + \frac{B \times 2x}{\mu_0} = Ni \quad \Rightarrow \quad B = \frac{\mu_0 N i}{2x + \ell/\mu_r}$$

On obtient alors le flux du champ magnétique à travers le bobinage :

$$\Phi = NBS \quad \Rightarrow \quad \Phi = \frac{\mu_0 N^2 S}{2x + \ell/\mu_r} i$$

On en déduit l'inductance propre du système

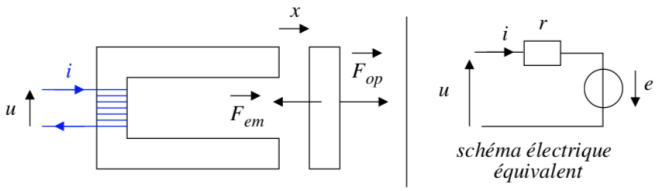
$$L(x) = \frac{\mu_0 N^2 S}{2x + \ell/\mu_r}$$

qui est une fonciton décroissante de x. L'énergie magnétique du dispositif vaut

$$E_m(x, i) = \frac{1}{2} L(x) i^2$$

1.2 Force exercée

On considère le système constitué de l'ensemble noyau + bobine. On suppose qu'un opérateur extérieur déplace le barreau en exerçant la force Fop, la bobine étant traversée par un courant i et soumise à la tension u



L'action de l'opérateur modifie le flux (inductance propre fonction de la position), ceci entraîne l'apparition d'une force électromotrice. En notant r la résistance du bobinage, l'équation s'écrit :

$$u = ri - e = ri + \frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}$$

À ce stade, il ne faut pas sortir $L(x)$ de la dérivée car l'inductance varie avec le déplacement de la partie mobile. On applique le premier principe à l'ensemble noyau + bobine entre deux instants voisins :

$$\mathrm{d}\left(\mathcal{E}_m + E_c\right) = \delta W + \delta Q = ui \ \mathrm{d}t + F_{op} \ \mathrm{d}x - ri^2 \ \mathrm{d}t$$

En reportant l'expression de la tension dans l'équation , on obtient :

$$\mathrm{d}\left(\mathcal{E}_m + E_c\right) = i \ \mathrm{d}\Phi + F_{op} \ \mathrm{d}x$$

Appliqué à la partie mobile seule, le théorème de l'énergie cinétique conduit à :

$$\mathrm{d}E_c = F_{op} \ \mathrm{d}x + F_{em} \ \mathrm{d}x$$

On compare alors les deux équations précédentes, ce qui donne :

$$\mathrm{d}\mathcal{E}_m = i \ \mathrm{d}\Phi - F_{em} \ \mathrm{d}x \quad \Rightarrow \quad F_{em} \ \mathrm{d}x = i \ \mathrm{d}(Li) - \mathrm{d}\left(\frac{1}{2} L i^2\right)$$

$$F_{em} \ \mathrm{d}x = iL \ \mathrm{d}i + i^2 \ \mathrm{d}L - \frac{1}{2} i^2 \ \mathrm{d}L - Li \ \mathrm{d}i \quad \Rightarrow \quad F_{em} = \frac{1}{2} i^2 \frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}x}$$

La dernière formule peut se réécrire :

$$F_{em} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{1}{2}Li^2\right)_i = \left(\frac{\partial \mathcal{E}_m}{\partial x}\right)_{i=cste}$$

Connaissant l'expression de l'inductance propre, on en déduit la force électroma- gnétique exercée sur la partie mobile :

$$F_{em} = -\frac{\mu_0 N^2 S i^2}{(\ell/\mu_r + 2x)^2}$$

- Cette force, proportionnelle à i^2, est une force de rappel quel que soit le signe de i et est donc non nulle en moyenne dans le temps pour une excitation sinusoïdale.
- Ce type de dispositif peut servir de contacteur électromagnétique permettant de commander la fermeture ou l'ouverture d'un circuit électrique via le déplacement de la partie mobile qui, en l'absence de courant dans la bobine, est ramenée à sa position initiale par l'intermédiaire d'un ressort. En position verticale, un tel système peut servir à soulever une masse, il s'agit alors d'un électroaimant de levage.

1.3 Généralisation

On vient d'établir une méthode systématique quelque soit le mode d'actionneur : on détermine l'inductance vue par le circuit électrique au moyen du théorème d'Ampère et de la conservation du flux de champ magnétique, on en déduit l'énergie magnétique stockée puis la force exercée sur la partie mobile.

$$d\mathcal{E}_m = id\Phi - F_{em}dx \Longleftrightarrow \frac{d\mathcal{E}_m}{dt} = -P_{\text{meca}} - P_e$$

De manière générale, pour un système électromécanique, la force électromagnétique exercée sur la partie mobile en translation selon x, se déduit de l'énergie électromagnétique par la relation :

$$F_{em} = \left(\frac{\partial \mathcal{E}_m}{\partial x}\right)_{i=cste}$$

ce qui illustre la conversion de puissance électromécanique. La variation d'énergie magnétique stockée est égale à la somme de la puissance perdue par induction et de la puissance mécanique fournie à la barre. Pour un système électromécanique, le couple exercé sur la partie mobile en rotation d'angle θ, se déduit de l'énergie électromagnétique par la relation :

$$\Gamma_{em} = \left(\frac{\partial \mathcal{E}_m}{\partial \theta}\right)_{i=cste}$$

Utilisons cette méthode pour étudier le fonctionnement de moteurs

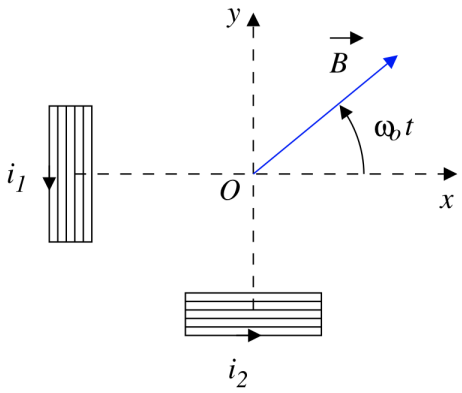
2 La machine synchrone

Ce type de machine produit l'énergie électrique dans les centrales électriques de forte puissance (on parle d'alternateur). Elle a été également utilisée en traction ferroviaire (rôle moteur) dans le TGV Atlantique. Les premiers TGV fonctionnaient à l'aide de moteurs à courant continu (voir section 3) mais le développement de l'électronique de puissance dans les années 1980 a permis son remplacement par les moteurs synchrones, alimentés à l'aide d'onduleurs de courant convertissant le courant continu fournit via les caténaires 6 en courant alternatif de fréquence commandable.

2.1 Principe de fonctionnement

Pour obtenir une conversion électromécanique, on peut utiliser un champ magné- tique tournant et mettre à profit le couple $\vec{\Gamma}$ exercé par le champ magnétique sur le moment magnétique : $\vec{Gamma} = \vec{M} \times \vec{B}$.

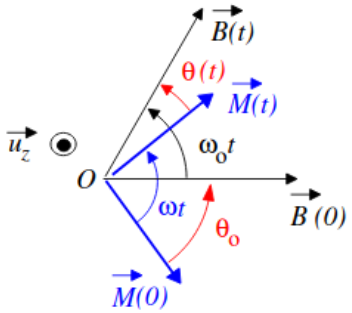
La manière la plus simple de générer un champ magnétique tournant consiste à utiliser deux bobines placées en quadrature spatiale (bobines d'axes Ox et Oy) et de les faire parcourir par des courants en quadrature temporelle (déphasés de $\pi/2$).



Avec $i_1(t) = i_0 \cos(\omega_0 t) et i_0 \cos(\omega_0 t + \pi/2)$, on obtient un champ magnétique tournant :

$$\vec{B} = ki_1(t)\vec{u}_x + ki_2(t)\vec{u}_y \Rightarrow \vec{B} = ki_0 \left[\cos(\omega_0 t)\,\vec{u}_x + \sin(\omega_0 t)\,\vec{u}_y\right]$$

Considérons maintenant le mouvement d'un moment magnétique permanent, libre de tourner autour de l'axe de rotation de ce champ :



À l'instant t, le champ magnétique $\vec{B}(t)$ et le moment magnétique $\overrightarrow{\mathcal{M}}(t)$ forment entre eux un angle $\theta(t)$ tel que :

$$\theta(t) = \theta_0 + \omega_0 t - \omega t = \theta_0 + (\omega_0 - \omega)\, t$$

L'action du champ magnétique tournant se traduit par un couple dont le moment par rapport à l'axe de rotation est :

$$\Gamma_z(t) = \mathcal{M}B \sin[\theta(t)] = \mathcal{M}B \sin\left[(\omega_0 - \omega)\, t + \theta_0\right]$$

En moyenne dans le temps, le couple est non nul ssi $\omega = \omega_0$, l'action du champ magnétique tournant se traduit alors par un couple de moment :

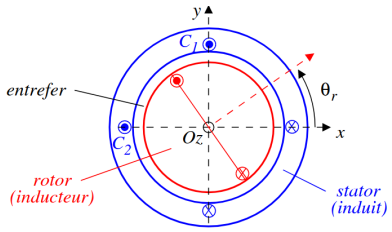
$$\Gamma_z = \mathcal{M}B \sin\theta_0$$

Le moment magnétique et le champ magnétique tournent à la même vitesse : on parle de machine synchrone.

Remarque : le courant distribué étant triphasé, on utilise préférentiellement trois bobines dont les axes font entre eux des angles de $\pi/3$ et dont les courants sont déphasés de $\pi/3$.

En réalité dans un moteur synchrone, le rotor est trop gros pour pouvoir faire une approximation dipolaire

Comment le champ et le moment magnétiques sont-ils mis en place dans la machine synchrone ? On s'intéresse à une machine synchrone à pôles lisses et à excitation séparée. Comme dans toutes les machines tournantes, on distingue la partie fixe appelée stator, de la partie tournante appelée rotor.



Le matériau constituant le stator (fixe) et le rotor (mobile) est un matériau magnétique linéaire de perméabilité relative infinie.

- L'épaisseur de l'entrefer notée e est constante. On parle de machine à pôles lisses.
- L'ensemble du dispositif est de longueur L selon l'axe Oz. On négligera les effets de bord.

2.2 Mise en oeuvre pratique

✍ Cours de PSI

Le bobinage au niveau du stator est parcouru par des courants sinusoïdaux et a un structure (*Lire le cours de PSI car ça viendra sûrement en question*) de telle sorte qu'il créer dans l'entrefer un champ radial dit glissant :

$$\vec{B_s} = K_s I_s \cos(\omega t - \gamma)\vec{u}_r = K_s I_s \cos\left(\omega\left[t - \frac{\gamma}{\omega}\right]\right)\vec{u}_r \tag{1}$$

avec γ la coordonnée spatiale angulaire polaire, I_s l'amplitude des courants parcourant le bobinage et K_s un facteur de structure du bobinage.

Le champ magnétique est spatialement sinusoïdal, il est maximal dans la direction $\gamma = \omega t$. Il tourne donc dans le sens trigonométrique à la vitesse angulaire ω.Le champ magnétique statorique est une onde sinusoïdale se propageant dans l'entrefer, d'où l'appellation de champ glissant. (représentation vectorielle sous Python ?)

Le bobinage au niveau du rotor est lui parcouru par un courant permanent d'intensité I_R qui permet de créer un champ rotorique de la forme :

$$\vec{B_s} = K_r I_r \cos(\gamma - \theta_r)\vec{u}_r \tag{2}$$

Ce champ tourne avec le rotor à la vitesse angulaire $\dot{\theta_R}$.

2.3 Couple électromagnétique

Maintenant que l'on connaît les champs magnétique, on va pouvoir calculer l'énergie électromagnétique dans la machine. L'énergie magnétique du dispositif s'obtient en calculant l'intégrale :

$$\mathcal{E}_m = \iiint_V \frac{B^2}{2\mu_0\mu_r}\,\mathrm{d}v$$

Dans l'hypothèse d'une perméabilité infinie du matériau ferromagnétique, l'énergie magnétique est localisée dans l'entrefer. On note $a \gg e$ le rayon du rotor et L la longueur selon l'axe Oz de la machine :

$$\mathcal{E}_m = \iiint_{\text{entrefer}} \frac{B^2}{2\mu_0}\,\mathrm{d}v = \int_{\gamma=0}^{2\pi} \frac{(B_r + B_s)^2}{2\mu_0} L \times e \times a\,\mathrm{d}\gamma$$

L'intégrale se décompose en trois termes :
→ le terme propre au champ rotorique :

$$\mathcal{E}_{m,r} = Lea\int_{\gamma=0}^{2\pi} \frac{B_r^2}{2\mu_0}\,\mathrm{d}\gamma = \frac{Lea}{2\mu_0}K_r^2 I_r^2 \int_{\gamma=0}^{2\pi} \cos^2(\gamma - \theta_r)\,\mathrm{d}\gamma = \frac{Lea\pi}{2\mu_0}K_r^2 I_r^2$$

→ le terme propre au stator :

$$\mathcal{E}_{m,s} = \text{Lea}\int_{\gamma=0}^{2\pi} \frac{B_s^2}{2\mu_0}\,\mathrm{d}\gamma = \frac{Lea}{2\mu_0}K_s^2 I_s^2 \int_{\gamma=0}^{2\pi} \cos^2(\omega t - \gamma)\mathrm{d}\gamma = \frac{Lea\pi}{2\mu_0}K_s^2 I_s^2$$

→ le terme de couplage entre le stator et le rotor :

$$\mathcal{E}_{m,c} = \text{Lea} \int_{\gamma=0}^{2\pi} \frac{B_s B_r}{\mu_0} \, \mathrm{d}\gamma = \frac{Lea}{\mu_0} K_s I_s K_r I_r \int_{\gamma=0}^{2\pi} \cos(\omega t - \gamma) \cos(\gamma - \theta_r) \, \mathrm{d}\gamma$$

avec

$$\cos(\omega t - \gamma) \cos(\gamma - \theta_r) = \frac{\cos(\omega t - \theta_r)}{2} + \frac{\cos(\omega t + \theta_r - 2\gamma)}{2}$$

Seule l'intégrale du premier terme sera non nulle, on en déduit :

$$\mathcal{E}_{m,c} = \frac{\pi Lea}{\mu_0} K_s I_s K_r I_r \cos(\omega t - \theta_r)$$

Le couple se déduit alors :

$$\Gamma_{em} = \left(\frac{\partial \mathcal{E}_m}{\partial \theta_r} \right)_{i_r, i_s} \left(\frac{\partial \mathcal{E}_{m,c}}{\partial \theta_r} \right)_{i_r, i_s} \Rightarrow \Gamma_{em} = \frac{\pi hea}{\mu_0} K_s I_s K_r I_r \sin(\omega t - \theta_r(t)) \tag{3}$$

On retrouve alors le fait que le couple n'est de moyenne non nulle que si :

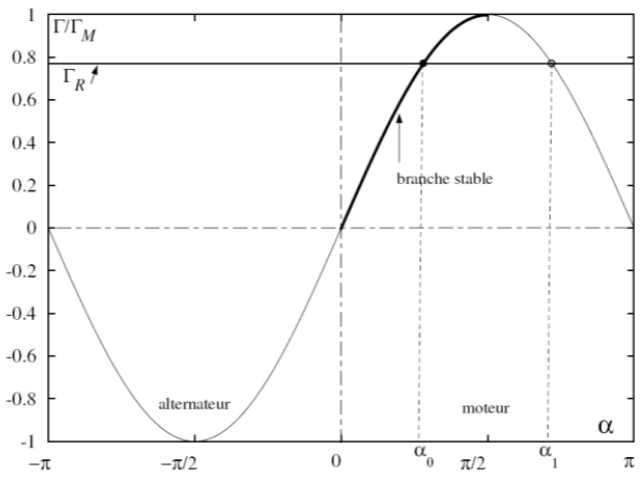
$$\theta_R(t) = \omega_R t - \alpha \tag{4}$$

donc le rotor tourne bien à la même vitesse angulaire que le champ statorique et on a :

$$\Gamma = \Gamma_{max} \sin \alpha \tag{5}$$

2.4 Fonctionnement moteur

La machine fonctionne en moteur lorsque que le couple qui s'exerce sur le rotor est positif, donc pour α compris entre 0 et π. Le rotor est donc en retard par rapport au champ statorique, il "suit le mouvement en tentant de s'aligner". Si on trace le couple en fonction de α on a :



Le point de fonctionnement est défini par la compensation du couple moteur et des couples de frottement et de charge. On note :

$$\Gamma_R = \Gamma_{charge} + \Gamma_{frott} \tag{6}$$

Pour une même valeur de Γ_R on a deux valeurs de retard possibles. Mais sont-elles les deux stables ?

Pour la position α_0 on voit que si l'on perturbe légèrement le système de telle sorte que l'on retarde le rotor (on augmente α) alors le couple moteur augmente et donc tend à compenser ce retard. Si on applique cette fois une perturbation ayant tendance à "avancer" le rotor, le couple moteur diminue et donc tend à faire perdre cette avance. Cette position est donc bien stable. La position α_1 se situant sur une pente décroissante, les résultats sont inversés et donc ce point est instable. On a donc un seul point de fonctionnement stable.

2.5 Réversibilité : fonctionnement en alternateur

Le moteur synchrone est réversible, il peut fonctionner en générateur, et on le nomme alors alternateur. Le moment magnétique du rotor est la source du champ magnétique, dont le flux dans les enroulements du stator (constitué de trois bobinages qui ne sont plus alignés) est alternatif à cause de la rotation. On obtient donc un ensemble triphasé de forces électromotrices à la fréquence de rotation du rotor. Le rotor devient l'inducteur et le rotor l'induit. C'est ce qui est utilisé notamment dans les centrales nucléaires.

2.6 Machine réelle et critiques

Je recopie le calcul du cours de PSI

Pour effectuer le bilan de puissance sur cette machine, on va considérer un cas simple dans lequel le champ statorique est crée par deux spires orthogonales (Cf figure précédente). En réalité, on montre que pour former le champ statorique glissant voulu, il faut un grand nombre couple de spires comme ça, cet exemple n'est donc pas purement fictif.

On note respectivement I_r, i_1 et i_2 les intensités des courants dans l'enroulement du rotor, et les deux enroulements du stator. De la même manière, on définit les résistances des enroulements R_r, r_1 et r_2 et les flux à travers ces enroulements Φ_r, Φ_1, Φ_2 → Équation électrique pour l'enroulement du rotor :

$$u_r = RI_r - e_r = RI_r + \frac{\mathrm{d}\Phi_r}{\mathrm{d}t}$$

Le flux au niveau du rotor peut se décomposer selon un flux propre et un flux créé par le champ du stator : $\Phi_r = \Phi_{r,p} + \Phi_{s\to r}$. Pour le rotor $I_r = \text{cste}$, donc Φ_r est une constante ; de même le rotor tournant à la même vitesse que le champ statorique, $\Phi_{s\to r}$ est aussi une constante, on a donc :

$$u_r = RI_r$$

→ Équation électrique pour le premier enroulement du stator :

$$u_1 = r_1 i_1 + \frac{\mathrm{d}\Phi_1}{\mathrm{d}t}$$

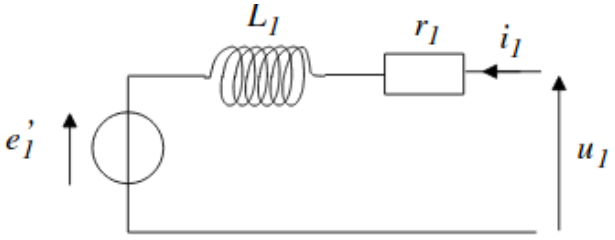
Le flux à travers cet enroulement s'écrit de façon générale :

$$\Phi_1 = L_1 i_1 + M_{12} i_2 + M_{1,r} I_r$$

L_1 est l'inductance propre du bobinage $\mathcal{C}_1$; M_{12} est l'inductance mutuelle entre les deux enroulements $\mathcal{C}_1$ et $\mathcal{C}_2$ du stator, ces deux enroulements étant spatialement orthogonaux, il semble raisonnable de poser $M_{12} = 0$. $M_{1,r}$ représente l'inductance mutuelle entre l'enroulement du rotor et $\mathcal{C}_1$. Pour $\theta_r = 0$, les bobinages coincident, le couplage est maximal ; pour $\theta_r = \pi/2$, les bobinages sont spatialement orthogonaux, le couplage est nul, on peut raisonnable postuler $M_{1,r} = M_0 \cos\theta_r$. Avec $\omega t - \theta_r = \alpha$: $\Phi_1 = L_1 i_1 + M_0 I_r \cos(\omega t - \alpha)$, ce qui donne pour l'équation électrique :

$$u_1 = r_1 i_1 + L_1 \frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} + e_1' \quad \text{avec} \quad e_1' = -M_0 I_r \omega \sin(\omega t - \alpha)$$

Le terme e_1' du à la rotation du rotor est appelé force contre-électromotrice. Le schéma électrique équivalent est alors :



Pour le deuxième bobinage on a la même chose, seul le coefficient d'inductance mutuel est déphasé spatialement de $\pi/2$:

$$u_2 = r_2 i_2 + L_2 \frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t} + e_2' \quad \text{avec} \quad e_2' = M_0 I_r \omega \cos(\omega t - \alpha) \tag{7}$$

On peut donc réaliser le bilan de puissance. On suppose que toute la puissance fournie aux bobinages est absorbée par la machine et on a alors :

$$u_1 i_1 + u_2 i_2 + u_r I_r = \underbrace{r_1 i_1^2 + r_2 i_2^2 + R_r I_r^2}_{\text{effet Joule}} + \underbrace{\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{L_1 i_1^2 + L_2 i_2^2}{2}\right)}_{=0 \text{ en moyenne}} + e_1' i_1 + e_2' i_2$$

Et donc en moyenne : $P_{\text{elec}}^{\text{fournie}} = P_{\text{cuivre}}^{\text{pertes}} + P_{\text{fcem}}^{\text{absorbée}}$

La puissance absorbée par les forces contre-électromotrices vaut :

$$P_{\text{fcem}}^{\text{absorbée}} = e_1' i_1 + e_2' i_2 = M_0 I_r I_s \omega [\sin(\omega t)\cos(\omega t - \alpha) - \sin(\omega t - \alpha)\cos(\omega t)]$$
$$P_{\text{fcem}}^{\text{absorbée}} = M_0 I_r I_s \omega \sin\alpha$$

Or la puissance mécanique fournie par le couple électromagnétique vaut :

$$P_{\text{meca}}^{\text{fournie}} = \Gamma_{em}\omega = \Gamma_{\max}\omega \sin\alpha$$

En identification $M_0 = \frac{\Gamma_{\max}}{I_r I_s} = \frac{K_s K_r \pi h e a}{\mu_0}$, on en déduit l'égalité des deux puissances : $P_{\text{meca}}^{\text{fournie}} = P_{\text{fcem}}^{\text{absorbée}}$
soit finalement :

$$P_{\text{elec}}^{\text{fournie}} = P_{\text{cuivre}}^{\text{pertes}} + P_{\text{meca}}^{\text{fournie}} \tag{8}$$

Toute la puissance électrique fournie est donc soit dissipée par effet Joule dans les bobinages soit convertie mécaniquement. En réalité, pour une machine réelle on a deux autres sources de perte de puissance à prendre en compte : du point de vue mécanique avec les forces de frottement et du point de vue électromagnétique avec les pertes fer (pertes par hysteresis et par courants de Foucault dans les ferromagnétiques non parfaits). Le bilan réel est alors :

$$\mathcal{P}_{\text{élec ext}} + \mathcal{P}_{\text{méca ext}} = \mathcal{P}_J + \mathcal{P}_{\text{frot}} + \mathcal{P}_{\text{fer}} \tag{9}$$

3 Conclusion

Une chose à remarque c'est que pour la machine synchrone, le couple est nul au démarrage, on a donc besoin d'avoir recours à un dispositif annexe qui lance le rotor -> Ouverture sur la machine asynchrone qui elle n'en n'a pas besoin.

4 Questions/Remarques bref le bordel c'est Hervax

- Mdr il est frustré
- Il pense qu'Antoine a traité trop de trucs...
- sortez des créneaux standards mais vous aurez une moins bonne note de toute façon c la physique qui nous intéresse pas les notes la passion... tout simplement
- SYstème 4 cadrans comme le transistor askip. propose de plus développer la MCC.

5 Remarques du jury

Ils arrêtent pas de dire qu'il faut parler des ferromagnétiques. Oui g vu et apparemment tu peux avoir 18 en faisant que la MCC...