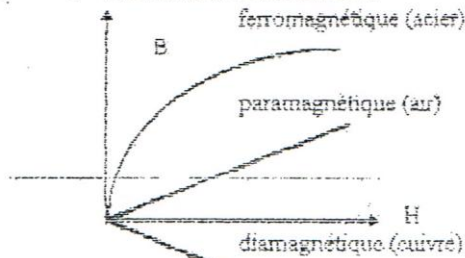


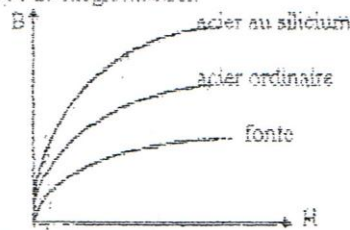
**SUPPORT DE COURS
MACHINES ELECTRIQUES APPROFONDIES
MASTER 1
PARCOURS ELECTROTECHNIQUE INDUSTRIELLE**

Rappels sur les circuits magnétiques

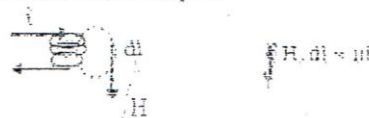
1- Classification des matériaux



2- Courbe de magnétisation

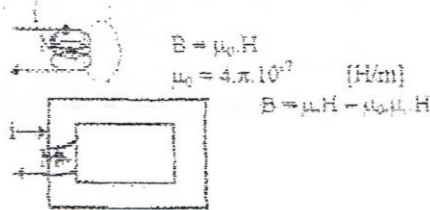


3- Théorème d'Ampère



ni : force magnétomotrice (F.M.M.) [At]

4- Rôle du circuit magnétique

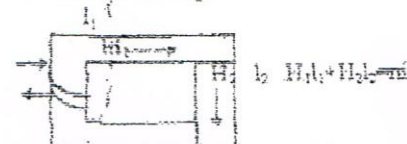


μᵣ : perméabilité relative

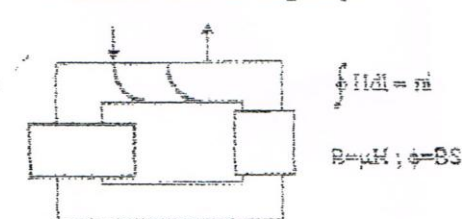
5- Bobinage d'un circuit magnétique



6- Circuit non homogène



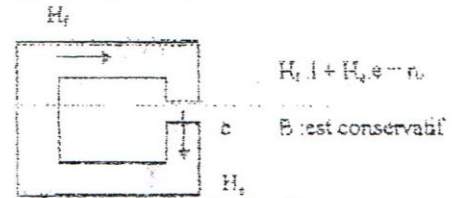
7- Réductance d'un circuit magnétique



$$\oint \frac{\phi}{\mu S} dl = ni \quad ; \quad \oint \frac{dl}{\mu S} = \mathfrak{R}$$

\mathfrak{R} Réductance [At/wb] $\mathfrak{R}\phi = ni$

8- Champ dans les entrefers



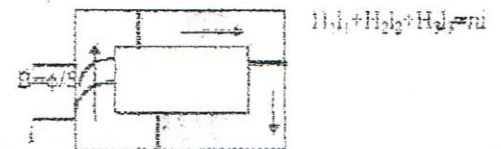
$$B_1 = B_2 \Rightarrow \mu_0 \mu_r H_1 = \mu_0 H_2 \rightarrow$$

$$H_1 = \frac{ni}{1 + \mu_r e} \quad ; \quad H_2 = \mu_r \frac{ni}{1 + \mu_r e}$$

Alors B est la même :

$$\frac{B}{\mu_0} \left(e + \frac{l}{\mu_r} \right) = ni$$

9- Analogie d'Hopkinson

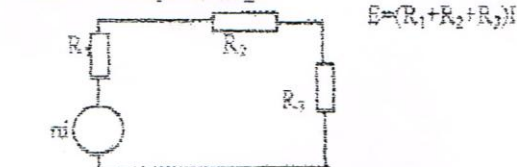


$$\left(\frac{l_1}{\mu_1 S} + \frac{l_2}{\mu_2 S} + \frac{l_3}{\mu_3 S} \right) \phi = ni$$

$$(\mathfrak{R}_1 + \mathfrak{R}_2 + \mathfrak{R}_3) \phi = ni$$

Circuit FMM	Magn.	Circuit FEM	Ele.
$n i$	At	E	v
Flux ϕ	wb	Courant I	A
Réductance \mathfrak{R}	At/wb	Résistance R	Ω
Pot. Magn. U	At	Pot. Elect. V	v
$U = ni - \mathfrak{R}\phi$		$V = E - RI$	
Maille Magnétique		Maille Electrique	
Nœud Magnétique		Nœud Electrique	

Circuit électrique analogue



10- Calcul des circuits magnétiques

C'est la détermination de la FMM nécessaire pour produire un flux ; ou la détermination du flux qui est produit par une FMM donnée (problème inverse)

Données : Dimensions et B(H) ou B(μ) ou φ(ni)

A- Méthode analytique

a- 1^{ère} catégorie : φ connu → calculer ni

1) $B_1 = \phi/S_1$; $B_2 = \phi/S_2$

2) H_1, H_2 ... de B(H) ou $B = \mu_0 H$

3) Ampères tours partiels $H_1 l_1$; $H_2 l_2$...

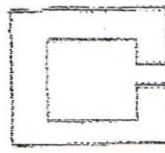
* une seule maille $ni = H_1 l_1 + H_2 l_2 + \dots$

* plusieurs mailles, introduire le potentiel magnétique.

b- 2^{ème} catégorie: ni connu \rightarrow calculer ϕ

... (si μ_1, μ_2, \dots) \rightarrow impossible de calculer ϕ puisque $\mathcal{R}_1, \mathcal{R}_2, \dots$ dépendent de μ donc de B donc du flux qui est inconnu.

De même avec $ni = H_1 l_1 + H_2 l_2 + \dots$ puisque H dépend de B donc de ϕ qui est inconnu. Alors il faut faire le calcul approximatif.

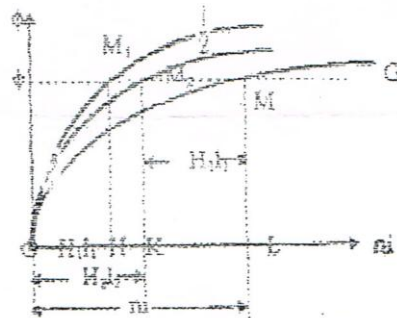
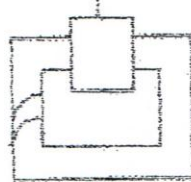


$$ni = \left(\frac{l}{\mu_0 \mu_r S} + \frac{e}{\mu_0 S} \right) \phi$$

$$ni = \left(\frac{l}{\mu_0 \mu_r} + \frac{e}{\mu_0} \right) B$$

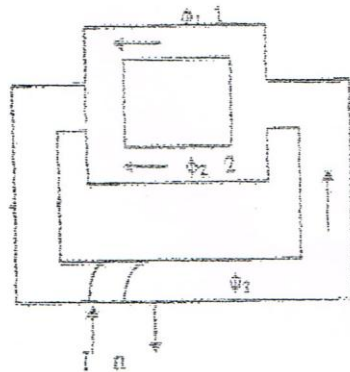
de $B(H)$ ou $B(\mu)$ à une valeur de B correspond μ .

B- Méthode graphique

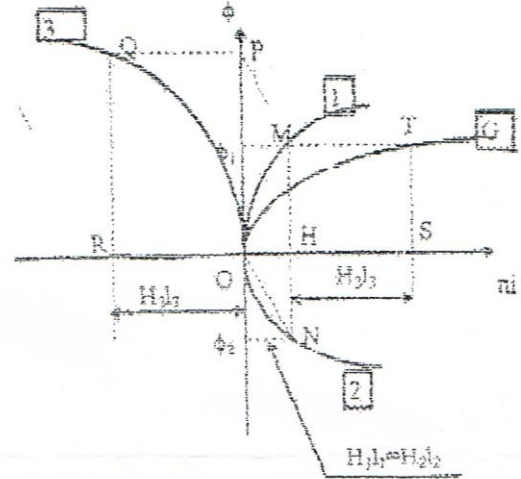
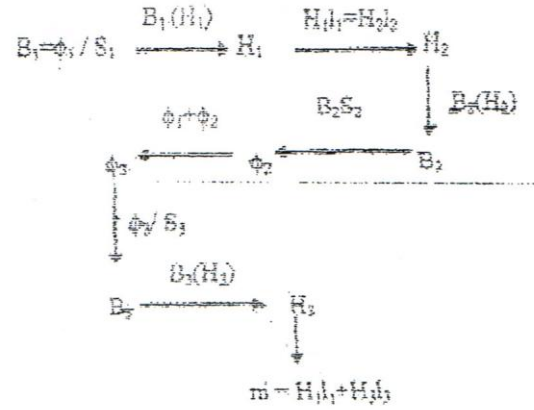


$ni = H_1 l_1 + H_2 l_2$; pour un flux ϕ on a M_1 et M_2
 $ni = OH + OK = OL$; on obtient M de coordonnées (ϕ, ni) .

On peut déterminer ϕ quand on connaît i



La conduite des calculs correspond aux opérations suivantes: pour ϕ , connu dans 1:



1 caractéristique partielle de 1
 2 caractéristique partielle de 2

Pour $\phi_1 \rightarrow H_1 l_1 = H_2 l_2 \rightarrow$ on déduit ϕ_2 de 2

$MH + HN = \phi_1 + \phi_2 \rightarrow MN = \phi_3$

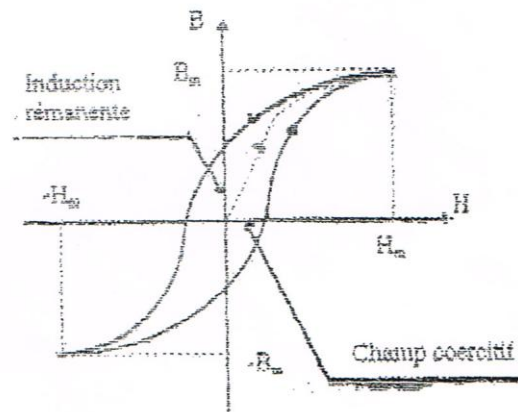
On mène de M une parallèle MP à ON , $OP = \phi_3$

En projetant P sur 3 $\rightarrow Q$; $OR = H_1 l_1$

$HS = OR \rightarrow OS = H_1 l_1 + H_2 l_2 = ni$. T de coordonnées (ϕ_1, ni) est un point de la caractéristique globale.

11- Pertes ferromagnétiques

k- pertes par hystérésis



Chapitre I : Principes généraux

Principe de la conversion d'énergie électromécanique. Principe du couplage stator/rotor. Bobinages des machines électriques. Calcul des forces magnétomotrices. Équation mécanique

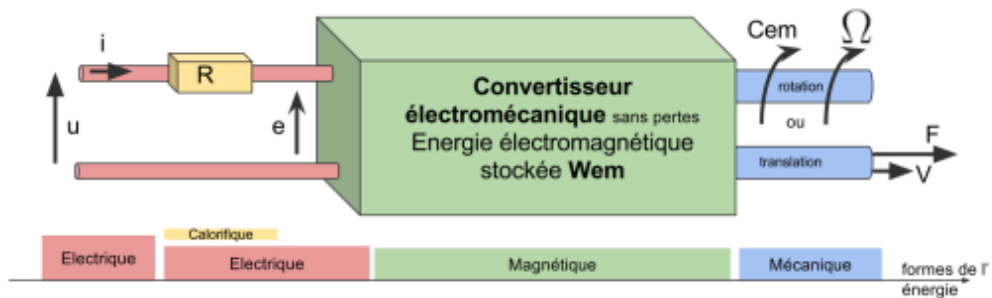
Chapitre II : Machine synchrone

Equations et caractéristiques de fonctionnement. Différents diagrammes vectoriels (Behn-Eschunburg, Potier, Bipolaire, etc...)

Cours Machines Electriques Approfondies

Chapitre I : Principes généraux

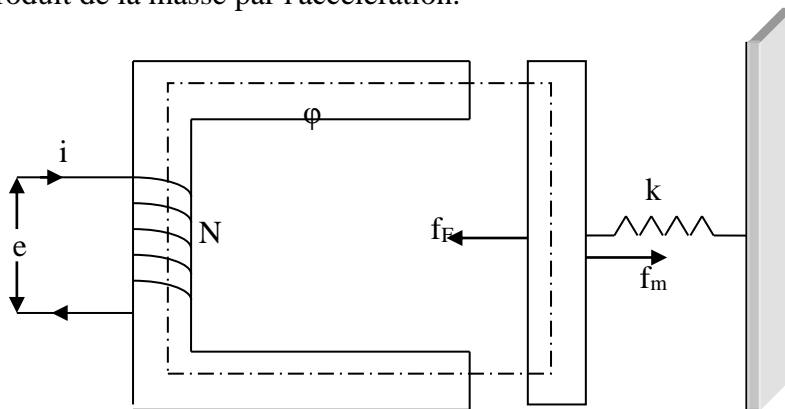
1-Principe de la conversion d'énergie électromécanique



Dans la conception, ou une analyse, d'un système électromécanique, la détermination des forces et des couples agissant sur différentes parties du système est généralement d'une importance primordiale. De telles forces peuvent être divisées en :

- 1- forces mécaniques, causées, par exemple, par un moteur principal, un ressort, ou l'accélération
- 2- forces du champ, provoquées par couplage de flux magnétique, ou l'interaction de charges électriques.

Les forces mécaniques peuvent en général être déterminées à partir de la mécanique classique. Par exemple, une force de ressort évaluée à partir du produit de l'allongement et le coefficient du ressort, tandis que les forces d'accélération, y compris la gravité, sont évaluées à partir du produit de la masse par l'accélération.



Toutefois, l'évaluation des forces du champ n'est pas si simple.

On considère le système électromécanique ci-dessus.

Dans les conditions d'équilibre de la f_m force mécanique produite par l'extension du ressort linéaire, d'une distance x , est égale à f_F de la force du champ magnétique produit par le courant i circulant à travers le solénoïde de N spires.

Alors que $f_m = kx$, il est pas si évident comment f_F peut être évaluée en fonction des paramètres i , N , et la longueur entrefer g .

Afin d'analyser les systèmes électromécaniques, ces relations doivent être développées. L'approche adoptée est basée sur la relation énergie-force

$$f\Delta x = \Delta W_m$$

Où dW est l'énergie mécanique développée lorsqu'une force f provoque un déplacement dx . Lorsque l'énergie mécanique est une fonction de déplacement seulement, l'équation peut être mise sous la forme différentielle

$$f = \frac{dW_m}{dx}$$

En prenant en considération la courbe d'aimantation du système électromécanique

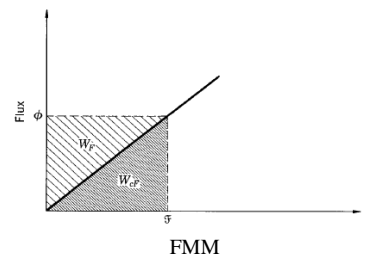


Avant la saturation, le flux augmente de manière sensiblement linéaire la FMM appliquée augmente linéairement aussi. Une telle approximation est représentée

Si n'y a pas de mouvement, aucune partie de l'énergie fournie par la source électrique ne peut être convertie en énergie mécanique. Par conséquent (si les pertes cuivre négligées) toute l'énergie fournie par la source doit être stockée sous forme d'énergie de champ magnétique.

Pour une augmentation supplémentaire d'énergie de la source provoque l'augmentation de l'énergie de champ

$$\Delta W_F = \Delta W_S$$



Par conséquent, si l'énergie fournie par la source électrique est déterminée, elle est égale à l'énergie magnétique emmagasinée.

Considérons une FEM appliquée à la bobine parcourue par un courant I pendant un temps dt . L'énergie fournie par la source est

$$\Delta W_S = e.i.\Delta t ; e = N \frac{d\phi}{dt} ; \text{ sous forme différentielle } dW_S = N \frac{d\phi}{dt} i dt = N i d\phi$$

$$\text{Mais; } \mathcal{F} = Ni ; dW_S = dW_F ; \text{ alors } dW_F = \mathcal{F} d\phi$$

Par intégration, l'énergie totale stockée dans le champ lorsque le flux est ϕ est

$$W_F = \int_0^\phi \mathcal{F} d\phi$$

L'équation est représentée graphiquement par la zone au-dessus de la courbe d'aimantation, comme indiqué sur la figure.

Bien que l'aire sous la courbe de magnétisation n'a pas de signification physique, qui peut être utilisée et est appelé CoEnergy, et représenté par le symbole W_{CF} . La zone comprise entre la courbe d'aimantation et l'axe de FMM est obtenue par intégration et donc l'énergie du champ est

$$W_{CF} = \int_0^\phi \phi(F) dF$$

où la fmm appliquée est \mathcal{F}

Lorsque la courbe d'aimantation est supposée être linéaire, les zones au-dessus et au-dessous de la courbe sont égaux, ou en d'autres termes, l'énergie du champ est égale à l'énergie stockée dans le champ, de sorte que $W_{cF} = W_F$

En résumé,

1-CoEnergy est donnée par la zone comprise entre la courbe d'aimantation et l'axe, de la FMM

2-CoEnergy n'a pas de signification physique

3-CoEnergy est une expression mathématique pratique

4- CoEnergy est égale à l'énergie, lorsque la courbe d'aimantation est linéaire

L'énergie magnétique emmagasinée (courbe linéaire) est donnée par

$$W_F = \int_0^\phi \mathcal{F}(\phi) d\phi = \frac{1}{2} \mathcal{F} \phi$$

Et aussi

$$\mathcal{F} = \mathcal{R}\phi ; \phi = \mathcal{F}\mathcal{P} ; W_F = \frac{1}{2} \mathcal{R}\phi^2 = \frac{1}{2} \mathcal{F}^2 \mathcal{P} ; \mathcal{F} = Ni ; L = \frac{N\phi}{i} ; W_F = \frac{1}{2} Ni\phi = \frac{1}{2} Li^2$$

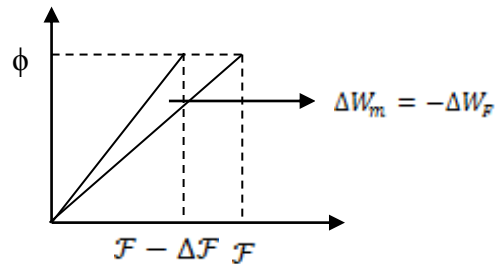
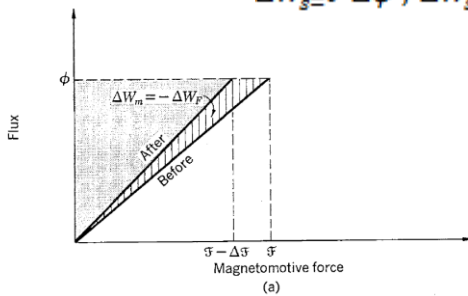
On considère deux cas avec $\phi = \text{const}$, et $\mathcal{F} = \text{const}$

L'énergie de la source est la somme des énergies emmagasinée et mécanique (de travail)

$$\Delta W_s = \Delta W_F + \Delta W_m \rightarrow \Delta W_m = \Delta W_s - \Delta W_F$$

A flux constant et

$$\Delta W_s = \mathcal{F} \Delta \phi ; \Delta W_s = 0 ; \Delta W_m = -\Delta W_F ;$$



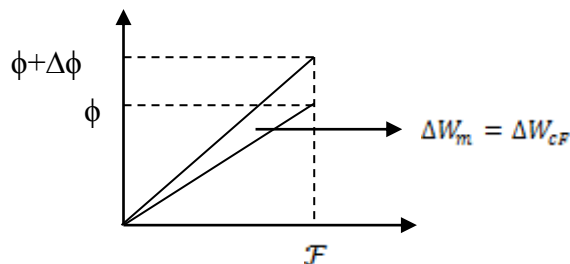
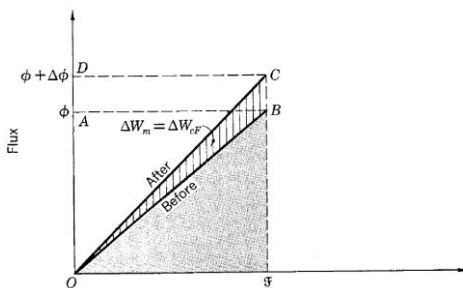
Comme $f \Delta x = -\Delta W_F$ sous forme différentielle $f = -\frac{dW_F}{dx}$ à $\phi = \text{cst}$

Le travail mécanique est donné par la zone hachurée donc on utilise la relation :

$$f = -\frac{1}{2} \phi \frac{d\mathcal{F}}{dx} \text{ à } \phi = \text{cst}$$

En utilisant la reluctance du circuit magnétique $f = -\frac{1}{2} \phi^2 \frac{d\mathcal{R}}{dx}$ à $\phi = \text{cst}$

A FMM constante $\Delta W_s = \Delta W_F + \Delta W_m \rightarrow \Delta W_m = \Delta W_s - \Delta W_F$



$$\Delta W_s = \int_{\phi}^{\phi+\Delta\phi} \mathcal{F}(\phi) d\phi \quad \Delta W_m = \int_{\phi}^{\phi+\Delta\phi} \mathcal{F}(\phi) d\phi - \left(\int_0^{\phi+\Delta\phi} \mathcal{F}(\phi) d\phi - \int_0^{\phi} \mathcal{F}(\phi) d\phi \right)$$

Donc $f = \frac{dW_{cF}}{dx}$ à $\mathcal{F} = cst$

Si la courbe de magnétisation est linéaire, l'énergie et la co-énergie sont égales, donc on peut écrire

$$f = \frac{dW_F}{dx} \text{ à } \mathcal{F} = cst$$

Par remplacement, on peut établir les équations suivantes :

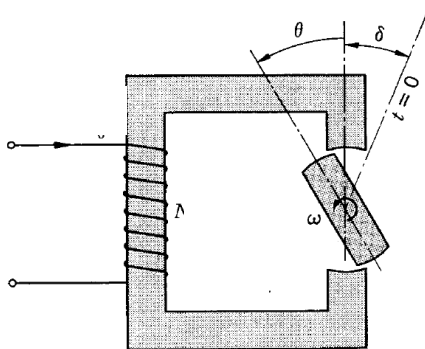
$$f = \frac{1}{2} \mathcal{F} \frac{d\phi}{dx}$$

$$f = \frac{1}{2} \mathcal{F}^2 \frac{d\mathcal{P}}{dx}$$

$$f = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{dx}$$

à $\mathcal{F} = cst$

Si le système électromécanique à un mouvement rotatif, dans ce cas on s'intéresse au couple au lieu de la force et à θ au lieu de x



$$C = f \cdot R \quad \text{et } \theta = x/R$$

Dans ce cas :

$$C = - \frac{dW_F}{d\theta} \text{ à } \phi = cst$$

$$C = \frac{dW_{cF}}{d\theta} \text{ à } \mathcal{F} = cst$$

Par analogie au système linéaire (en translation) on peut écrire pour le système en rotation :

$$C = \frac{1}{2} \mathcal{F} \frac{d\phi}{d\theta}$$

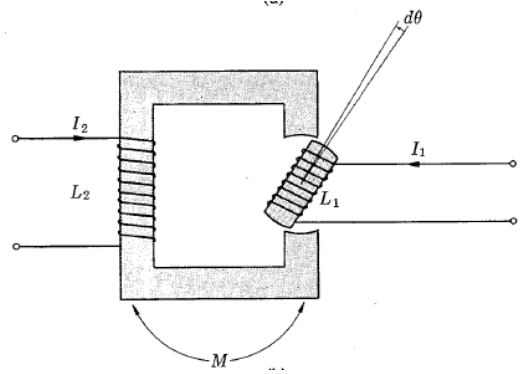
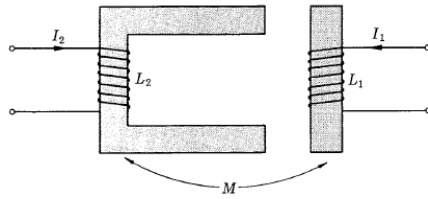
$$C = \frac{1}{2} \mathcal{F}^2 \frac{d\mathcal{P}}{d\theta}$$

$$C = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta}$$

à $\mathcal{F} = cst$

$$C = - \frac{1}{2} \phi \frac{d\mathcal{F}}{d\theta} \text{ à } \phi = cst$$

Soient les circuits suivants :



L'énergie est donnée par l'expression :

$$W_F = \frac{1}{2} I_1^2 L_1 + \frac{1}{2} I_2^2 L_2 + I_1 I_2 M ; f = \frac{dW_F}{dx} \text{ à } I_1, I_2 = cst$$

L'équation de la force et du couple :

$$f = \frac{1}{2} I_1^2 \frac{dL_1}{dx} + \frac{1}{2} I_2^2 \frac{dL_2}{dx} + I_1 I_2 \frac{dM}{dx} \quad (\text{force})$$

$$C = \frac{1}{2} I_1^2 \frac{dL_1}{d\theta} + \frac{1}{2} I_2^2 \frac{dL_2}{d\theta} + I_1 I_2 \frac{dM}{d\theta} \quad (\text{couple})$$

2-Bobinage des machines électriques

Machines courant continu

Différents types d'enroulement : imbriqué simple, ondulé simple, imbriqué multiple, ondulé multiple et mixte.

Détermination des paramètres des enroulements

Le premier pas partiel $y_1 = \frac{z_p}{2p} \pm A$ + pas allongé ; - pas raccourci

Enroulement imbriqué *le deuxième pas partiel* $y_2 = y_r - y_1$ avec $y_r = \pm 1$

+ pour un enroulement avant non croisé et - arrière croisé

Enroulement ondulé *le deuxième pas partiel* $y_2 = y_r - y_1$ avec $y_r = \frac{K \pm 1}{p}$

+ pour un enroulement avant croisé et - arrière non croisé

Des exemples seront traités pendant le TD

Machines courant alternatif

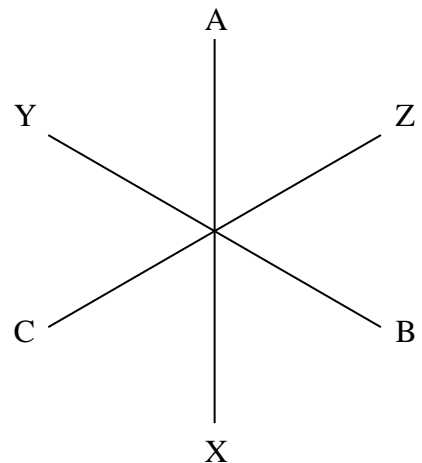
Différents types d'enroulement triphasé: par pôles, par pôles consécutifs, en chaîne, à q fractionnaires etc...

Il existe des enroulements à une couche, à une deux couches

Le paramètre essentiel pour le calcul est le nombre d'encoches par pôle et par phase.

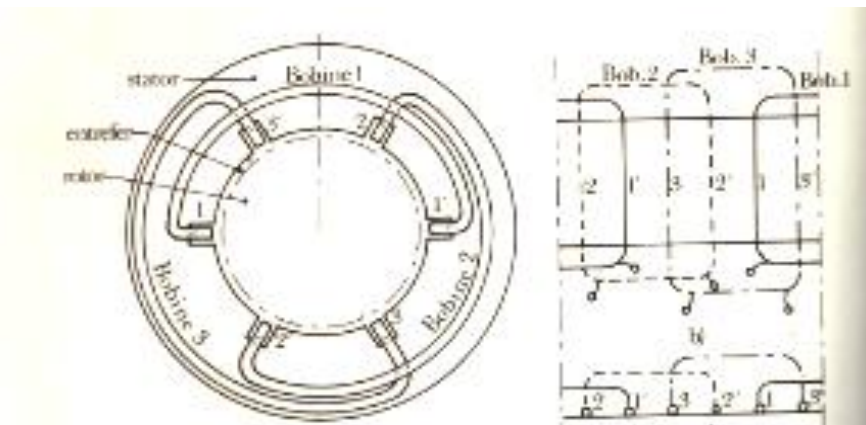
$$q = \frac{Z}{2pm}$$

La réalisation se fait en respectant l'étoile des phases A-Z-B-X-C-Y



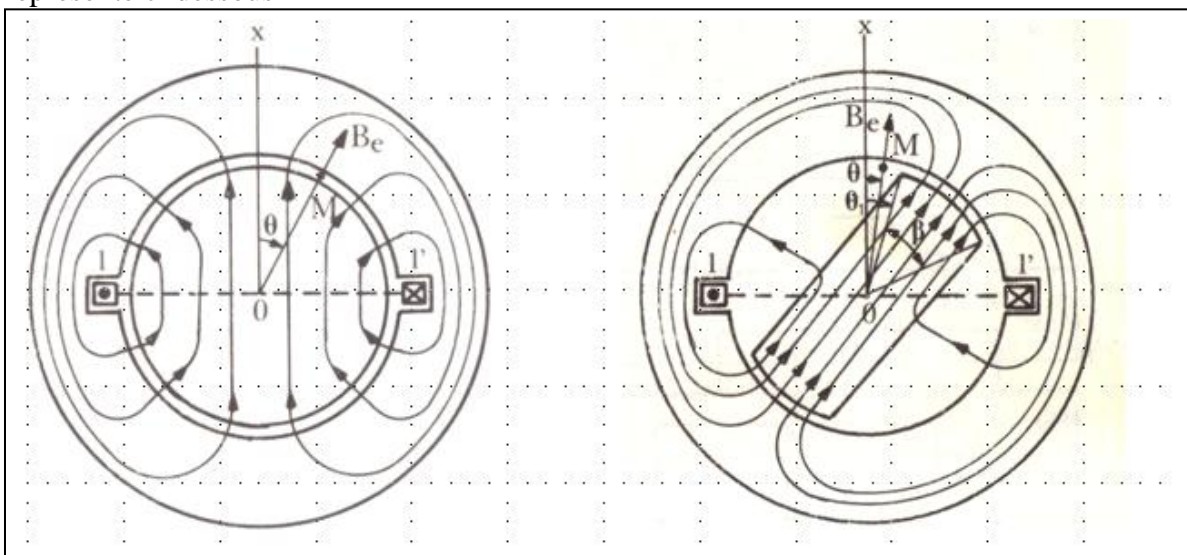
Des exemples seront traités pendant le TD

3-Forces magnétomotrices tournantes



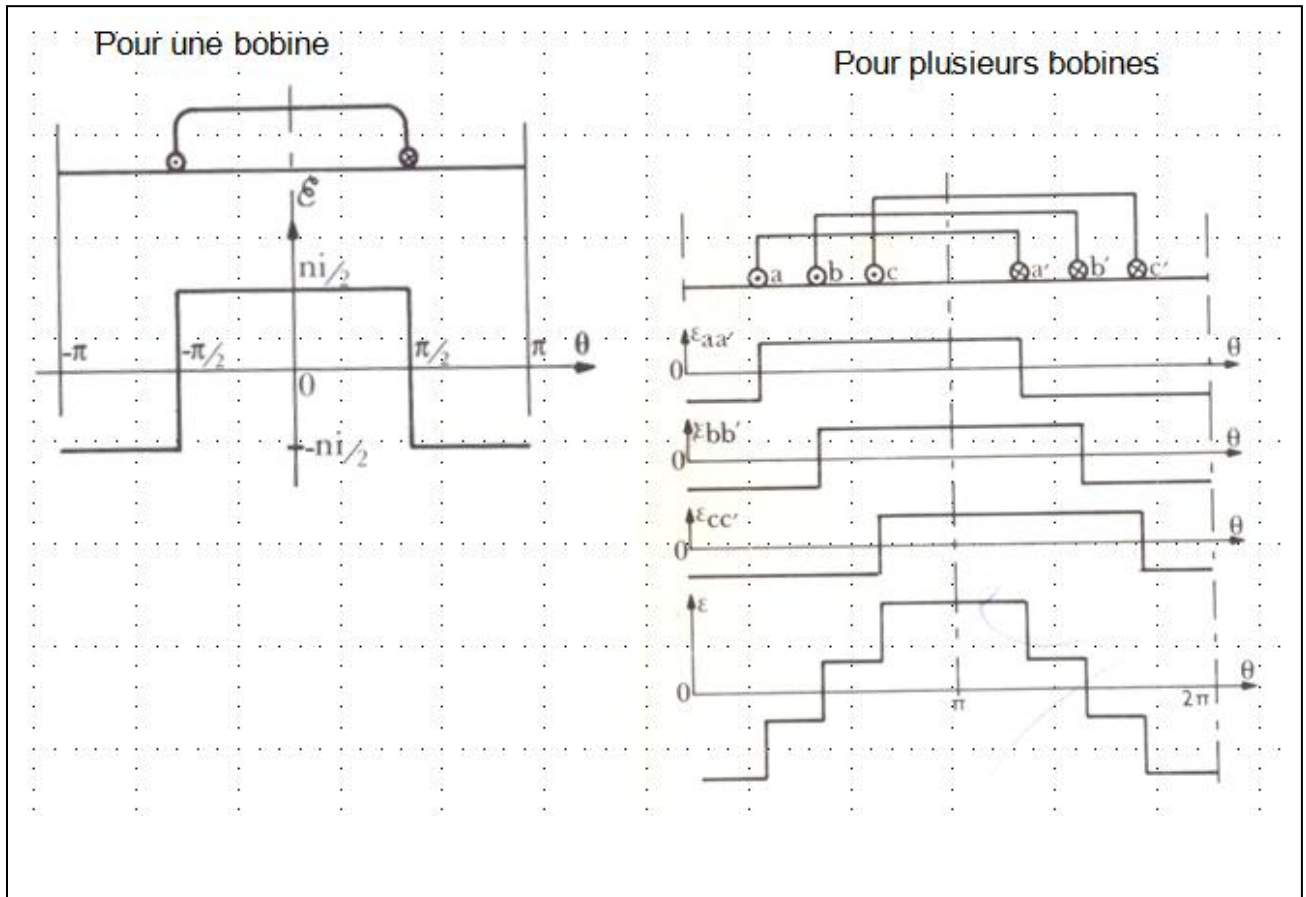
- L'augmentation du nombre d'encoches permet
- la bonne utilisation du circuit magnétique statorique
 - d'avoir des FMM plus sinusoïdales
 - de rendre les FEM plus sinusoïdales

Envisageons la répartition de la FMM d'une bobine pour deux formes de rotor comme représenté ci dessous



La courbe de l'induction dans l'entrefer dépend de la forme et de la position du rotor. Pour un entrefer constant B est positive entre $-\pi/2$ et $\pi/2$; négative $\pi/2$ et $3\pi/2$
 Pour un entrefer non constant (2eme cas) B est positive et faible ; entre $-\pi/2$ et θ_1 et $\theta_1+\beta$ et $\pi/2$ positive et forte. Avec un signe moins pour l'opposé.

a- Représentation des FMM



b-FMM tournante (bipolaire)

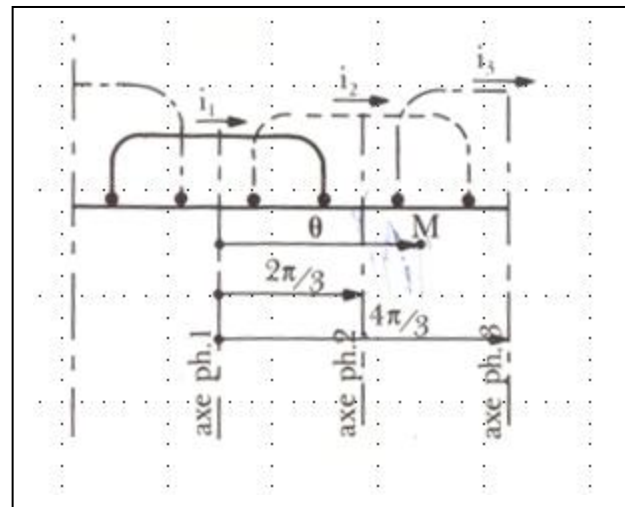
La FMM créée par trois courants sinusoïdaux d'un bobinage triphasé supposé à répartition sinusoïdale le long de l'entrefer

Les courants dans les phases 1, 2, 3 ont les expressions :

$$i_1 = I_M \cos \omega t$$

$$i_2 = I_M \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$i_3 = I_M \cos \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right)$$



Au point M les trois courants créent trois FMM qui sont distant de θ de l'axe de la phase 1 et de $\theta - 2\pi/3$

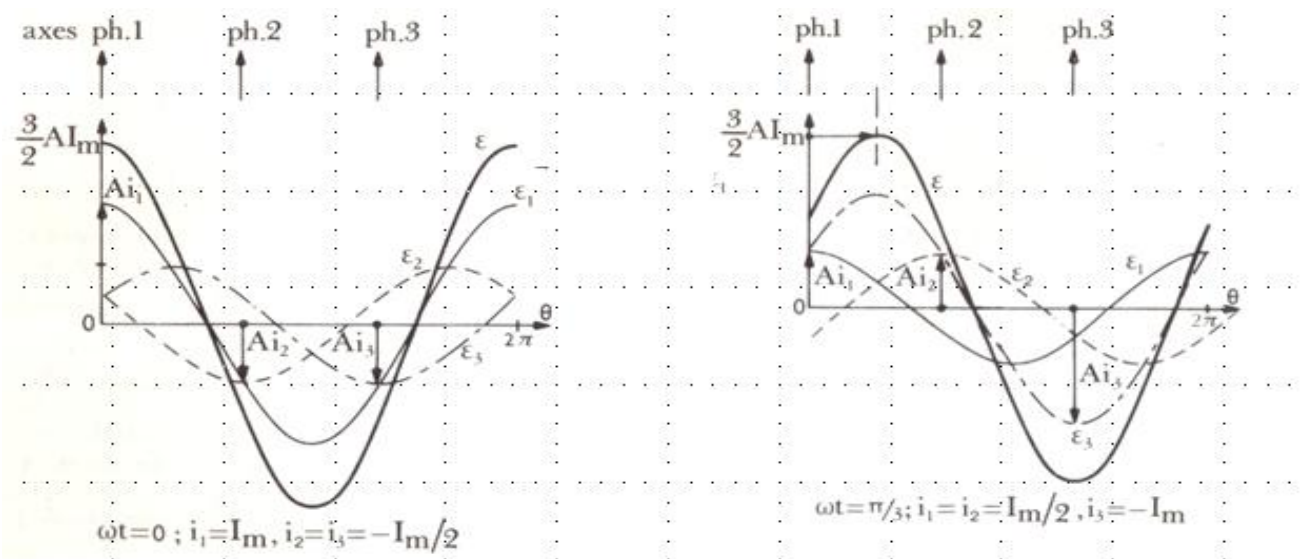
de l'axe de la phase 2 et de $\theta - 4\pi/3$ de l'axe de la phase 3,
dont les expressions

$$\begin{aligned} f_1 &= NI_M \cdot \cos \omega t \cdot \cos \theta \\ f_2 &= NI_M \cdot \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \cdot \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ f_3 &= NI_M \cdot \cos \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \cdot \cos \left(\theta - \frac{4\pi}{3} \right) \end{aligned}$$

La FMM résultante est

$$\begin{aligned} f &= f_1 + f_2 + f_3 \\ &= NI_M \cdot \cos \omega t \cdot \cos \theta + NI_M \cdot \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \cdot \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ &= \frac{NI_M}{2} (\cos(\omega t + \theta) \\ &\quad + \cos(\omega t - \theta) \\ &\quad + \cos(\omega t + \theta - \frac{4\pi}{3}) + \cos(\omega t - \theta) + \cos(\omega t + \theta - \frac{2\pi}{3}) + \cos(\omega t - \theta)) \end{aligned}$$

C'est la relation de la FMM répartie sinusoidalement dans l'entrefer et qui tourne à la vitesse angulaire ω . On dit que l'enroulement produit un champ tournant.



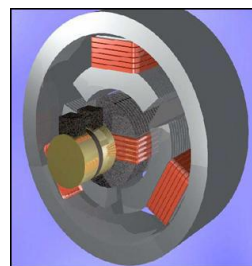
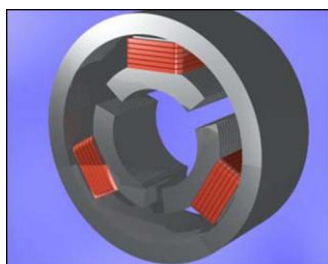
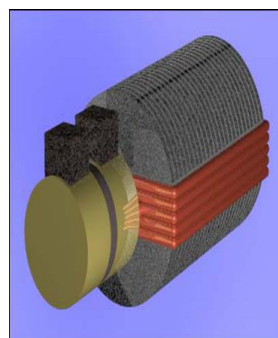
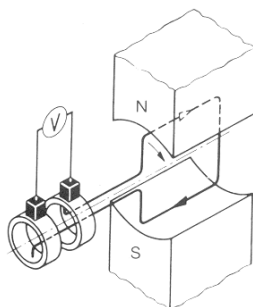
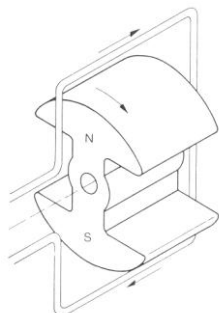
Pour un enroulement polyphasé

$$f = \frac{q}{2} NI_M \cos(\omega t - \theta) \quad q \text{ nombre de phase}$$

Machine Synchrone

La machine est dite synchrone car la vitesse de rotation du rotor est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique inducteur est généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation

Il existe deux manières de construire une machine synchrone, soit l'inducteur est tournant soit l'inducteur est fixe. Mais la plupart des machines synchrones sont à induit fixe et inducteur tournant.



La fréquence dépend de la vitesse de variation du champ $N_s = f/p$

Pour la fréquence de 50Hz) engendre :

- pour une machine à 2 pôles $p = 1$, une vitesse de rotation de 50tr/s soit 3000tr/mn
- pour une machine à 4 pôles $p = 2$, une vitesse de rotation de 25tr/s soit 1500tr/mn
- pour une machine à 6 pôles $p = 3$, une vitesse de rotation de 17tr/s soit 1000tr/mn
- pour une machine à 8 pôles $p = 4$, une vitesse de rotation de 12.5tr/s soit 750tr/mn

Organisation de la machine synchrone

Une machine synchrone est une machine électrique tournante réversible. En fonctionnement moteur, elle est alimentée par une source de tension alternative le plus souvent triphasée pour entraîner une charge mécanique à une vitesse de rotation constante. En fonctionnement générateur, elle est entraînée par un dispositif mécanique pour produire de l'énergie électrique alternative dont la fréquence est proportionnelle à la vitesse de rotation. La machine synchrone a dans un premier temps essentiellement trouvé des applications dans la génération d'énergie électrique alternative, sous le nom d'*Alternateur*. Par ailleurs, la structure de ces machines reste très semblable.

Stator

C'est la partie fixe de la machine. Il est formé par un empilage de disques de tôles ferromagnétiques isolées entre elles pour minimiser les pertes par courants de Foucault.

L'intérieur du stator est encoché et porte généralement un enroulement triphasé de l'induit ou exceptionnellement monophasé à $2p'$ pôles. Alimenté par une source électrique triphasée, l'enroulement du stator crée un champ tournant à une vitesse angulaire Ω' égale au rapport de la pulsation d'alimentation ω' et le nombre de paire de pôle $\Omega' = \omega'/p$

Les machines à pôles lisses, le rotor est un cylindre plein (entrefer constant). Il possède le plus souvent deux pôles pour s'adapter aux grandes vitesses. Les enroulements sont logés dans des

encoches pratiquées sur le rotor. L'alimentation en courant continu s'effectue via l'ensemble bagues-balais aux bagues de bout d'arbre.



Rotor

C'est la partie tournante de la machine (appelé aussi roue polaire) ayant pour rôle de générer le champ d'induction (inducteur). Il doit porter le même nombre de paire de pôle que le stator. Le rotor est composé d'un empilement de disques ferromagnétiques. A l'extérieur du rotor, on trouve des enroulements qui doit être alimentés par une source de tension continue dans le cas de machines de moyenne et grande puissance ou des aimants permanents dans le cas de machines de faible puissance pour créer le champ inducteur.

On distingue donc trois grandes familles de machine synchrone : Les rotors bobinés à pôles lisses, les rotors bobinés à pôles saillants ainsi que les rotors à aimant permanent

Les machines à pôles lisses, le rotor est un cylindre plein (entrefer constant). Il possède le plus souvent deux pôles pour s'adapter aux grandes vitesses. Les enroulements sont logés dans des encoches pratiquées sur le rotor. L'alimentation en courant continu s'effectue via l'ensemble bagues-balais.



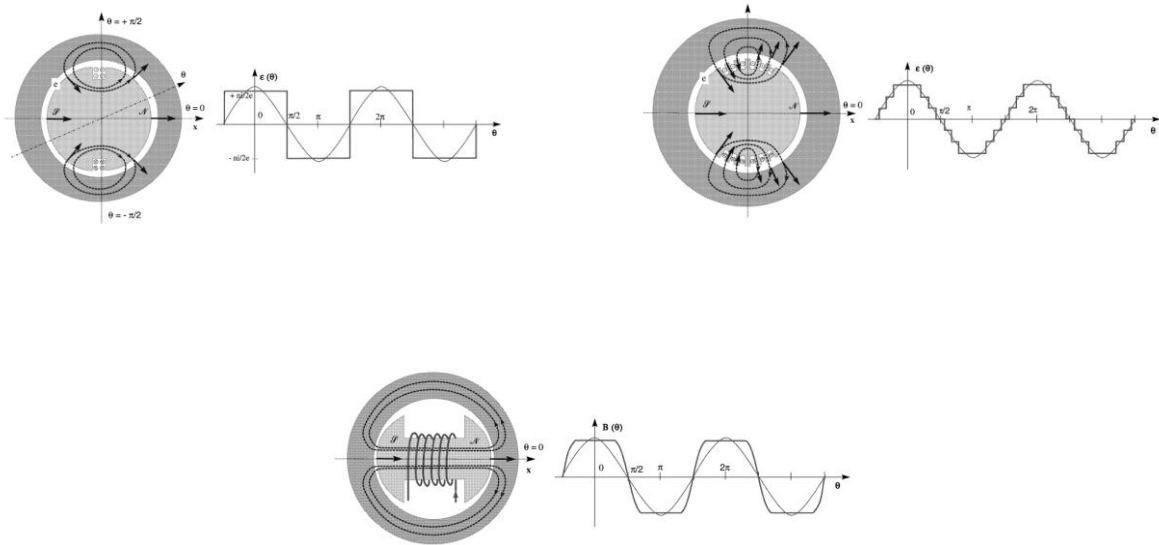
La machine à pôles saillants est presque de même constitution la machine à pôles lisses sauf qu'ils laissent un vide entre un pôle et l'autre (entrefer variable). Vu l'inertie importante, la machine à pôles saillants est souvent utilisée à basse vitesse



Les aimants permanents sont disposés directement sur la périphérie du rotor

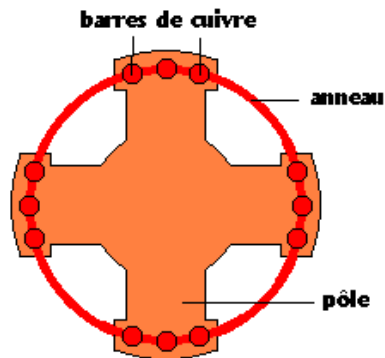


Forme d'onde



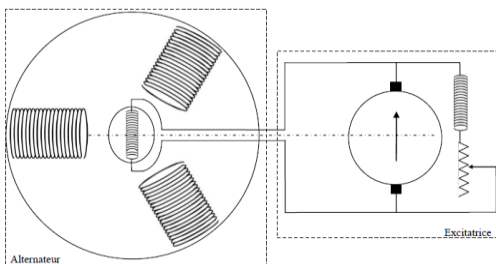
Enroulement amortisseur

Il intervient chaque fois que le champ tournant subit une variation (variation rapide de la charge, pulsation dans le couple moteur). Des courants induits naissent dans l'amortisseur et produisent un couple qui atténue les oscillations et maintient le synchronisme. Il est constitué de barres de cuivre, logées dans les pôles, parallèlement à l'axe de rotation et réunies entre elles par deux anneaux (cage d'écureuil). Cet enroulement est parfois utilisé pour démarrer un moteur Synchronne en asynchrone.

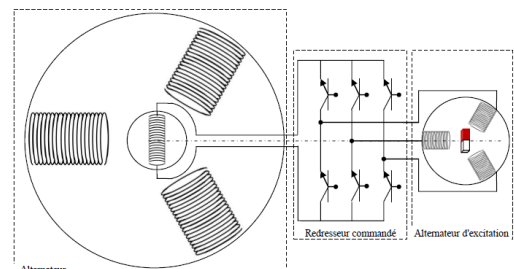


Types d'excitations des machines synchrones

Excitatrice à courant continu



Excitatrice à courant alternatif



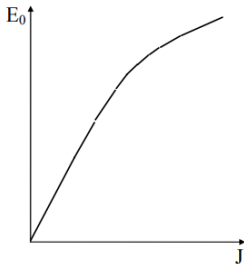
Equations générales régissant le fonctionnement de la MS

Alternateur

Fonctionnement à vide

Le seul champ régnant dans l'entrefer est alors celui créé par le courant rotorique. Ce champ tourne à la vitesse de rotation Ω du rotor et induit dans les bobinages statoriques une f.é.m. par enroulement de pulsation $\omega = 2\pi f = p\Omega$ et de valeur efficace $E_0 = KNf\Phi_0$. Avec p : nombre de paires de pôles, K : coefficient de Kapp, N : nombre de brins actifs et Φ_0 : flux sous un pôle.

$$K = K_1 \cdot K_2 = 2,22$$



Fonctionnement en charge

Réaction magnétique d'induit

Les courants statoriques créent des FMM perturbant ainsi le champ rotorique d'où résulte le phénomène de réaction magnétique d'induit qui modifie le flux utile et par conséquent la FEM induite. L'effet de cette réaction dépend du type de charge.

a) Charge purement inductive

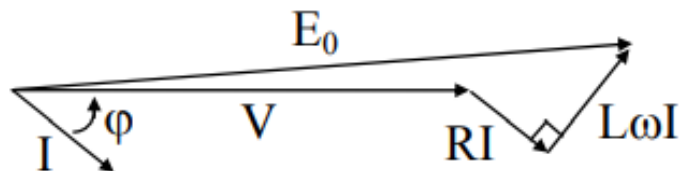
Les champs statoriques et rotoriques sont parallèles et opposés, on dit que la réaction magnétique est "longitudinale" est démagnétisante.

b) Charge purement capacitive

Les champs statoriques et rotoriques sont parallèles et dans le même sens, on dit que la réaction magnétique est "longitudinale" et magnétisante.

Modèle de Behn-Eschenburg

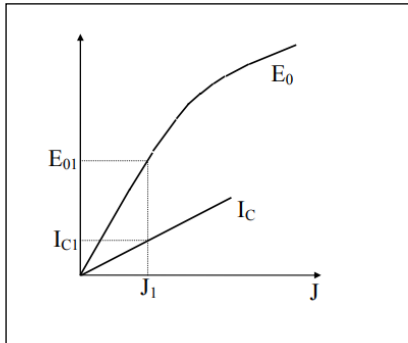
On ne tient pas compte de la saturation. Comme le circuit magnétique est linéaire, les flux engendrés



Le diagramme vectoriel aura pour expression

$$\vec{E} = \vec{V} + R\vec{I} + L\omega\vec{I}$$

Détermination expérimentale des paramètres



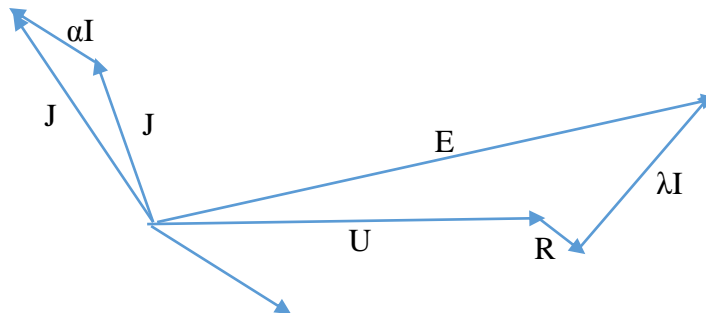
$$Z = \sqrt{R^2 + X_S^2} = \frac{E}{I_{cc}}$$

Modèle de Potier

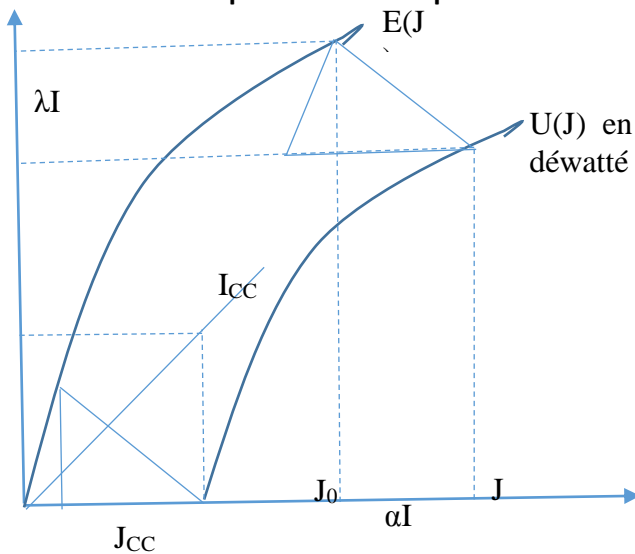
Dans le modèle de Potier la saturation est prise en considération. Le raisonnement se fait par les FMM.

$$\vec{F}_R = \vec{F}_{induc} + \vec{F}_{induit} \quad \vec{J}_0 = \vec{J} + \vec{\alpha I}$$

$$\vec{E} = \vec{U} + \vec{R I} + \vec{\lambda I}$$



Détermination expérimentale des paramètres

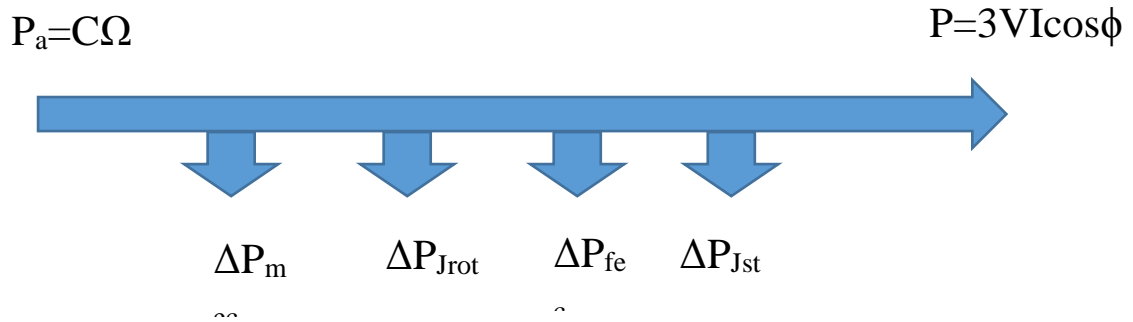


La détermination des paramètres λ et α se fait par des essais à vide en court-circuit comme pour le diagramme de Behn-Eschunburg en plus de l'essai en déwatté.

Conditions de couplage au réseau

- Egalité des tensions
- Egalité des fréquences
- Même ordre de succession des phases

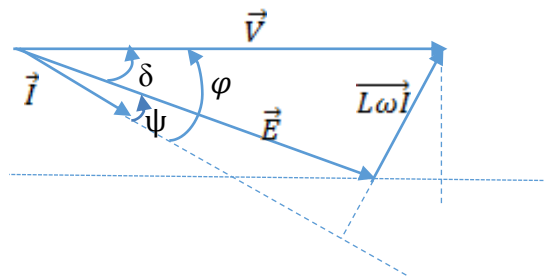
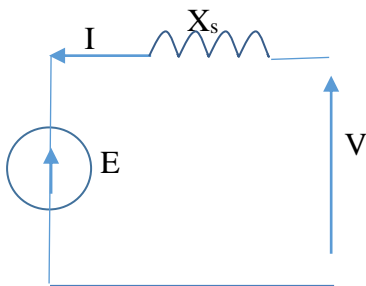
Bilan de puissance



Moteur

Le couple électromagnétique se détermine à partir de la puissance électromagnétique P_e et de la vitesse de synchronisme, on emploie la convention récepteur (moteur).

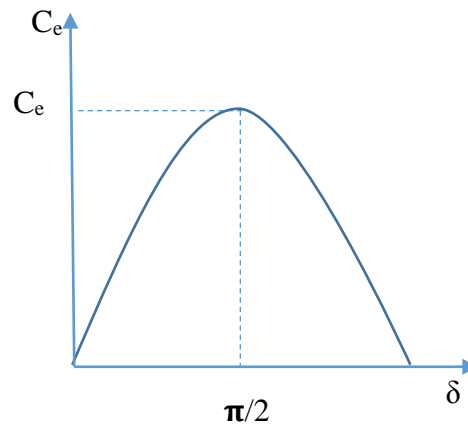
Le diagramme vectoriel correspondant



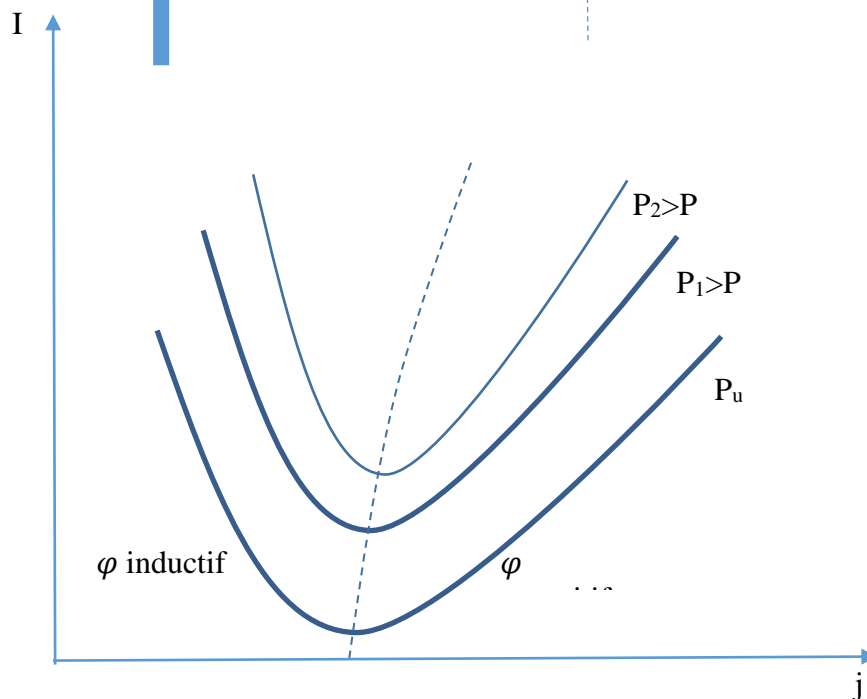
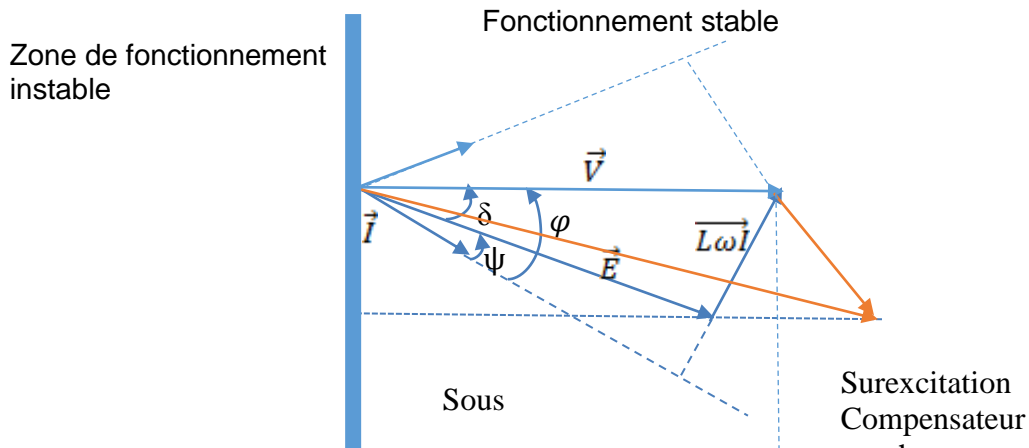
$$P_e = 3EI\cos\psi \quad \text{donc } C_e = \frac{3EI\cos\psi}{\Omega} \quad \text{si les pertes au stator sont négligées } C_e = \frac{3VI\cos\phi}{\Omega}$$

$$L\omega I\cos\phi = E\sin\delta \quad \rightarrow \quad C_e = \frac{3VE\sin\delta}{L\omega\Omega}$$

Le maximum du couple est donné par la figure avec E et V constants



Les courbes en V de MORDEY peuvent être déduites du diagramme vectoriel
 On peut utiliser le moteur synchrone pour la compensation de la puissance réactive quand il fonctionne en surexcitation pour améliorer le facteur de puissance d'une installation industrielle.



Le démarrage se fait en asynchrone ou à l'aide d'un moteur auxiliaire