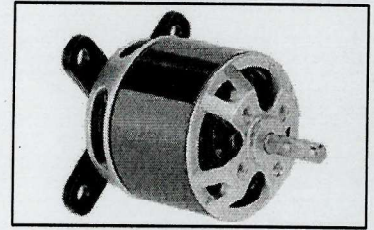


Machine synchrone triphasée

I. Introduction

Grâce aux avancées actuelles en électronique de puissance, la machine synchrone peut désormais effectuer une conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique, lui permettant de s'étendre au-delà de son domaine traditionnel de production d'énergie électrique. Sa plage d'applications est désormais très vaste, allant des petites puissances utilisées pour entraîner des bandes ou des drones (quelques watts), jusqu'aux puissances élevées nécessaires pour propulser des navires et des trains à grande vitesse TGV (quelques dizaines de mégawatts).



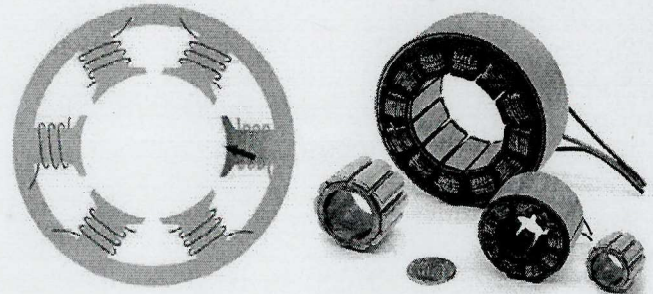
www.autocpge.info

II. Constitution de la machine synchrone

La machine synchrone est composée des éléments suivants :

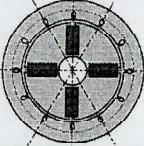
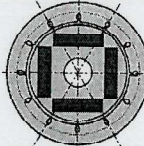
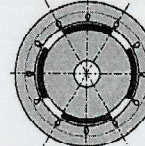

1. Stator (Induit)

Il est équipé de trois bobinages (ou enroulements) qui peuvent être couplés en étoile Y ou triangle Δ en fonction du système d'alimentation électrique.



2. Rotor (inducteur)

Contrairement à la machine asynchrone où le rotor possède une cage d'écurueil, dans la machine synchrone, le rotor est composé d'aimants (permanents ou électro-aimants). Dans ce cas, l'inducteur correspond au rotor, qui peut être soit bobiné, soit équipé d'aimants permanents. Deux types de rotors sont présentés en bas.

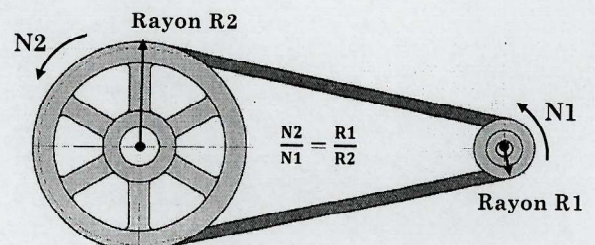
Inducteur à pôles lisses			Inducteur à pôles saillants
			
Concentration de flux	Aimants enterrés	Aimants en surface	Inducteur bobiné p = 4

L'inducteur à pôles lisses crée un entrefer constant, éliminant ainsi toute hétérogénéité magnétique le long de sa périphérie, et l'inducteur à pôles saillants qui produit un entrefer variable en fonction de la position du rotor.

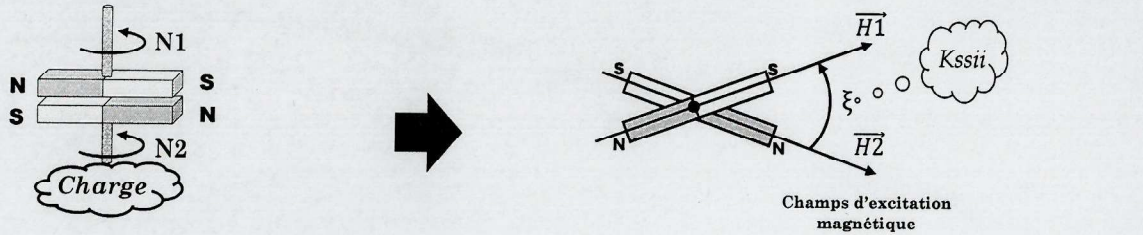
III. Notion de principe de synchronisme

Pour appréhender le fonctionnement des machines synchrones, il est crucial d'examiner en premier lieu le concept de synchronisme. Cette démarche débute en établissant une analogie avec une transmission mécanique par poulie courroie, pour ensuite évoluer vers une transmission basée sur des aimants magnétiques.

Cette transmission mécanique a la capacité d'être **synchrone**. En effet, lorsque $R1 = R2$, les deux axes tournent en parfaite synchronisation.



À présent, le même concept est appliqué en créant une transmission magnétique à l'aide de deux aimants permanents, générant respectivement les champs magnétiques H1 et H2.



Quand l'aimant 1 est en rotation, il exerce une force d'attraction sur l'aimant 2, ce qui induit également sa rotation en raison de l'interaction entre les champs magnétiques $\vec{H1}$ et $\vec{H2}$. Par conséquent, un couple est appliqué à la charge pour la faire tourner, mais celle-ci est décentrée par rapport à l'axe d'entraînement (aimant 1) :

Le couple s'exprime : $C1 = C2 = k H1 . H2 . \sin \xi$, donc on aura 3 cas :

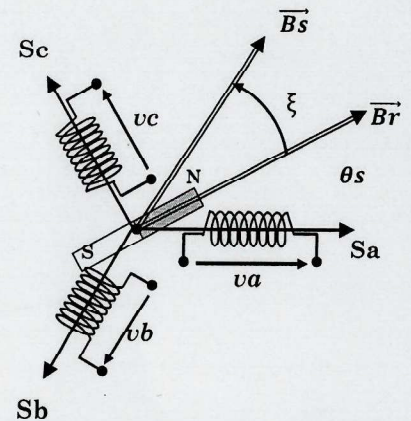
- o En l'absence de charge (fonctionnement à vide) : $\xi=0 \Rightarrow C1=0$
- o Une augmentation du couple ($C2 \nearrow$) provoque un décalage des axes, engendrant une augmentation de l'angle ξ et donc une élévation du couple C1.
- o Si l'angle ξ dépasse $\pi/2$ (c'est-à-dire lorsque $C2 > C1_{max}$), le couple C1 diminue malgré l'augmentation de C2, faisant ainsi entrer la transmission dans une phase instable : on dit qu'elle décroche « **décrochage** ».

Conclusion :

Le principe de fonctionnement d'une machine synchrone est celui de la transmission magnétique synchrone, avec ses limitations.

IV. Principe de fonctionnement de la machine synchrone en moteur

- o Ferraris : Les enroulements statoriques sont déplacés géométriquement de 120 degrés et alimentés par des courants triphasés de pulsation ω_s , ce qui crée un champ magnétique tournant (\vec{Bs}), à la vitesse $\Omega_s = \frac{\omega}{p}$, où p représente le nombre de paires de pôles au stator.
- o Le courant continu circulant dans le bobinage rotorique (ou les aimants permanents) engendre un champ magnétique B_r fixe par rapport au rotor.
- o L'interaction des deux champs magnétiques crée un couple électromagnétique $C_{em} = k . \vec{B}_r . \vec{B}_s \Rightarrow C_{em} = k . B_s . B_r . \sin(\xi)$
- o L'angle entre le champ tournant \vec{Bs} et le champ rotorique \vec{B} reste constant, assurant ainsi une garantie de la synchronisation. Cela signifie que la vitesse de rotation du rotor Ω demeure égale à celle du champ tournant Ω_s , entraînant ainsi un couple moyen constant qui n'est plus nul.
- o A vide ($C_{em} = 0$), les champs sont alignés ($\xi = 0$). En charge, ils vont se décaler d'un angle ξ mais le rotor tourne toujours à la vitesse du champ B_s . Le couple maximal est obtenu pour $\xi = 90^\circ$. Si la charge entraînée oppose un couple résistant supérieur à ce couple, le moteur décroche (s'arrête).

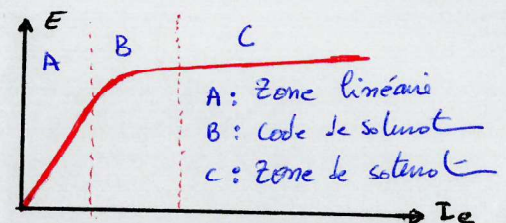


www.aufocpage.info

V. La force électromotrice

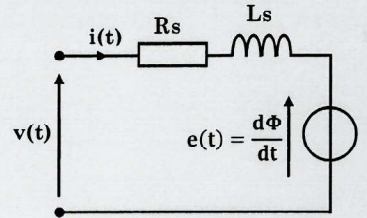
Chaque bobinage statorique génère une force électromotrice induite sinusoïdale $e(t)$ créée par le champ rotorique B_r avec une valeur efficace E, définie par: $E = K . N . \Phi_M . f$.

- K : Coefficient de Kapp qui dépend de la machine ($2,2 < K < 2,6$)
- N : Nombre de conducteurs actifs par enroulement (ou phase)
- Φ_M : Flux maximal embrassé par une spire (soit deux conducteurs actifs) en Wb
- f : Fréquence des courants statoriques en Hz



VI. modèle électrique monophasé d'une machine synchrone (moteur)

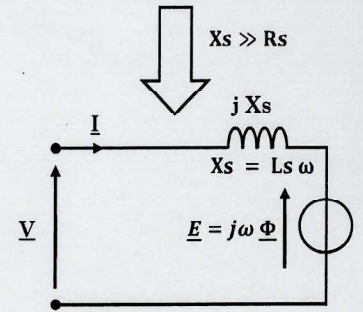
Pour une machine synchrone non saturée avec un rotor à pôles lisses, la phase peut être représentée à l'aide du modèle de Behn Eschenburg. Dans ce modèle, chaque phase est modélisée par une inductance synchrone L_s , une résistance synchrone, R_s et une fém $e(t)$ en série.



www.autocpge.info

Hypothèse :

- o Les pertes magnétiques sont exclues en raison de leur minime influence sur les formes d'onde.
- o Toutes les grandeurs sont supposées sinusoïdales.
- o Les pertes Joules sont négligées.



1. Diagramme synchrone

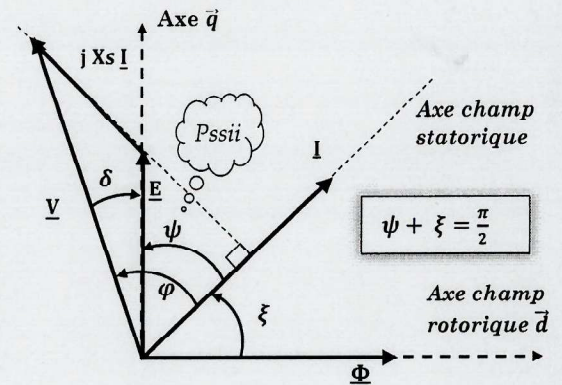
A partir de modèle monophasé de la machine synchrone :

$$v(t) = R_s i(t) + L_s \frac{di(t)}{dt} + e(t)$$

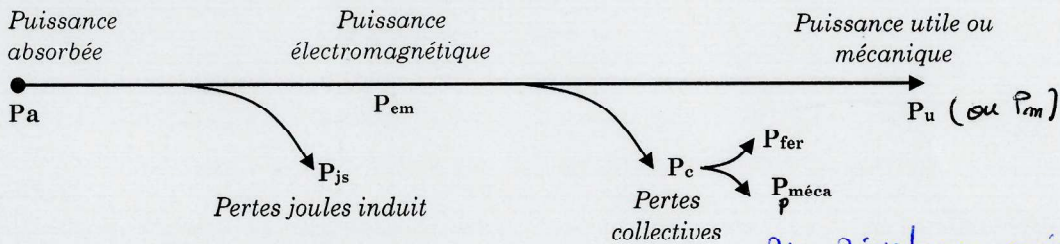
Equation de la maille $v(t)$:

Voici la représentation graphique du diagramme de Fresnel :

Angle	Désignation
ξ	Angle entre les champs rotorique et statorique.
φ	Déphasage entre le courant en ligne et la tension simple
δ	Angle interne de la machine
ψ	<u>Angle d'autopilotage (Entre E et I)</u> Angle essentiel pour l'expression du couple de la machine et son contrôle.



2. Bilan de puissances (convention moteur)



Rb : Résistance mesurée entre deux bornes du statorique

Définition des puissances actives et des couples :

Puissances	Expressions		
Puissance active	$P_a = 3VI \cos \varphi$ (plus utilisée) ou $P_a = \sqrt{3}UI \cos \varphi$		
Pertes joules statoriques ou induit	Couplage étoile $P_{js} = 3 \cdot R \cdot I^2$	Couplage triangle $P_{js} = R I^2$	\forall soit le couplage $P_{js} = \frac{3}{2} R_b \cdot I^2$
Pertes collectives	sont mesurées à vide (P_0, I_0) : $P_c = P_0 - 3RI_0^2$		
Puissance utile	$P_u = C_u \cdot \Omega$ ou $P_u = P_{em} - P_c$		
Rendement	$\eta = \frac{P_u}{P_a}$		$\eta = \frac{P_u}{P_u + P_c + P_{js}}$
Couples : C_{em}, C_p et C_u	$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega}$	$C_p = \frac{P_c}{\Omega}$	$C_u = \frac{P_u}{\Omega}$

3. Caractéristiques mécaniques $C_{em} = f(\psi)$ et $C_{em} = f(\xi)$

Dans cette section, nous visons à obtenir la formule du couple électromagnétique C_{em} . Pour ce faire, on néglige de toutes les sources de pertes (pertes joules et pertes ferromagnétiques). Nous nous appuyons sur les relations entre le couple et la puissance, ainsi que le traçage du diagramme de Fresnel pour schéma ci-contre.

Le couple est exprimé par : $C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega}$

On néglige toute les pertes (P_j s et P_f s), la puissance électromagnétique P_{em} est : $P_{em} = P_a - P_{as} - P_{fs} \Rightarrow P_{em} = P_a = 3V \cdot I \cdot \cos(\varphi)$

Alors l'expression de C_{em} devient : $C_{em} = \frac{3V \cdot I \cdot \cos(\varphi)}{\Omega}$

En projetant sur le vecteur I , on a : $E \cos(\psi) = V \cdot \cos(\varphi)$

Donc l'expression de C_{em} est : $C_{em} = \frac{3EI \cos(\psi)}{\Omega}$

Enfin, étant donné la relation $E = \omega \cdot \Phi = p \cdot \Omega \cdot \Phi$, il vient :

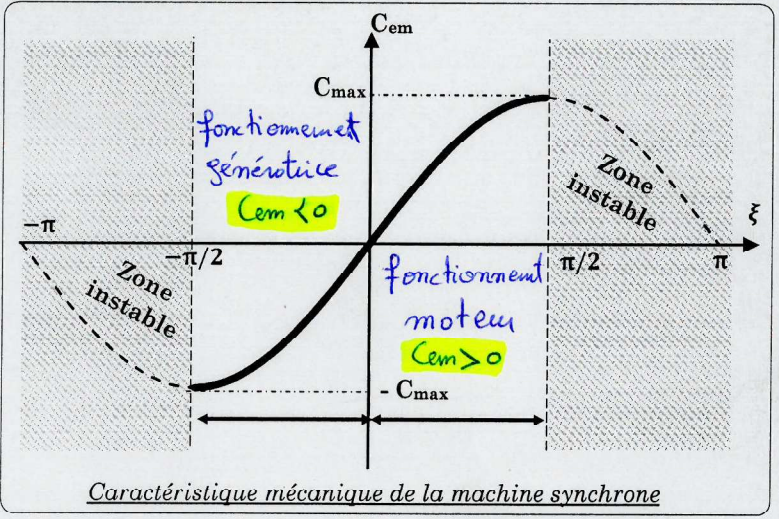
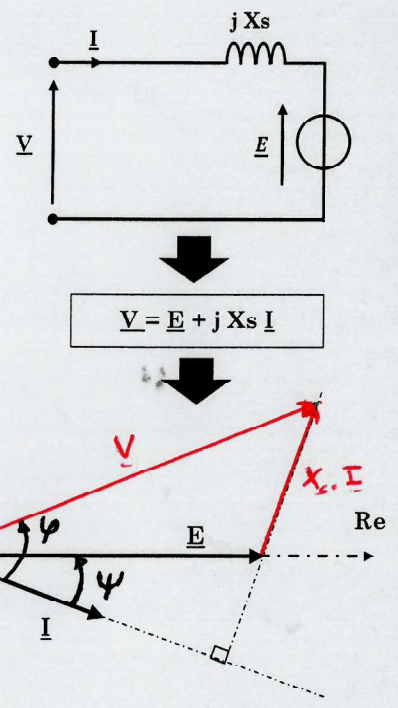
Donc : $C_{em} = 3 \cdot p \cdot \Phi \cdot I \cdot \cos(\psi)$

Or $\psi = \frac{\pi}{2} - \xi$, la relation précédente devient : $C_{em} = 3 \cdot p \cdot \Phi \cdot I \cdot \sin(\xi)$

www.autocpge.info

A Partir de la caractéristique mécanique :

- Le fonctionnement stable pour $\xi \in \left[-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}\right]$
- Le couple atteint sa valeur maximale lorsque l'angle d'autopilotage ψ est égal à 0 (dans le cas du moteur). Cela correspond au champ statorique B_s étant perpendiculaire au champ rotorique B_r (avec $\xi = \pi/2$).



Conclusion : Pour contrôler la machine synchrone, il faut contrôler le courant de phase I et l'angle d'autopilotage ψ .

VII. Contrôle de la machine synchrone en fonctionnement moteur.

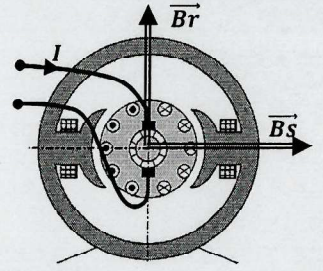
Lorsque la machine est accrochée ($\xi \leq \pi/2$), une augmentation du couple moteur engendre un décalage entre les champs (B_s et B_r). Des fluctuations brusques de fréquence ou de couple résistant peuvent causer un décrochage (l'arrêt).

Il est donc nécessaire d'asservir la position du champ tournant statorique à la position du champ rotorique afin de garantir le fonctionnement synchronisé ($\Omega = \Omega_s$) : cet asservissement est connu par la commande d'autopilotage.

Ce cours traite de deux techniques de contrôle :

- La commande scalaire en courant
- La commande vectorielle, aussi appelée commande à flux orienté

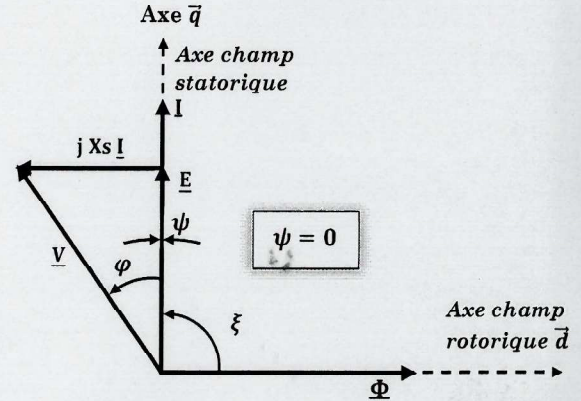
Le but de deux commandes est de réaliser un découplage entre vitesse et couple, comme la machine à courant continu. Dans ce dernier, le rotor engendre un champ B_r , et que le stator crée un champ B_s , ces deux champs étant naturellement perpendiculaires. Ainsi, le calage des balais impose automatiquement un angle d'autopilotage : $\psi = 0$.



Donc, la commande d'autopilotage exige $\psi = 0$, le couple dans ce cas :

$$C_{em} = kc \cdot \Phi \cdot I \text{ Avec } kc = 3 \cdot p$$

La loi de comportement en couple est identique à celle d'une MCC.



www.autocpage.info

1. La commande scalaire en courant des machines synchrones.

La commande scalaire en courant implique la fixation de l'angle d'autopilotage à $\psi = 0$. Elle permet ensuite de gérer le couple électromagnétique en contrôlant les courants statoriques I grâce à une boucle d'asservissement qui intègre également l'angle d'autopilotage ψ . En suite en faisant varier la vitesse par la fréquence f .

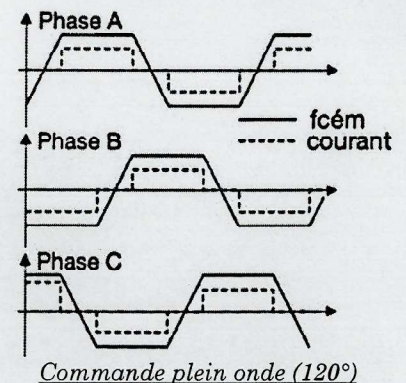
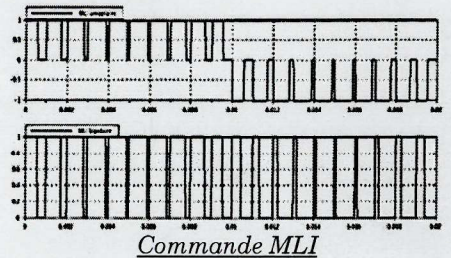
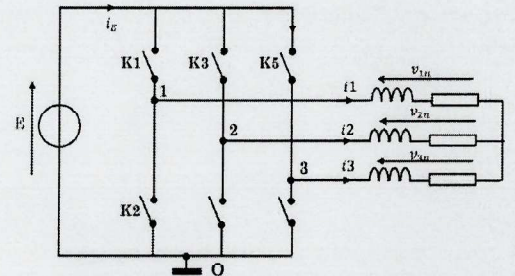
Le système de commande constitue des composantes ci-dessous :

- o Le moteur MS et l'onduleur triphasé,
- o Capteur de position (codeur optique) et des capteurs de courant.
- o Une carte de commande dans laquelle on implémente la loi de commande

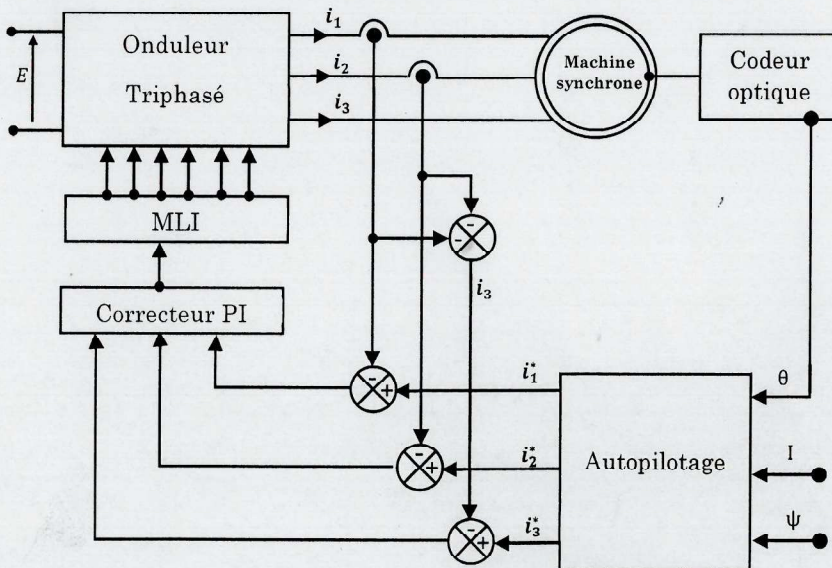
Concernant la mesure des courants statoriques, dans le contexte d'une alimentation équilibrée, on s'assure que $i_1 + i_2 + i_3 = 0$. Par conséquent, deux mesures de courant sont suffisantes, le troisième étant déduit par déduction.

❖ Type de commandes de l'onduleur selon le type de moteur.

- o La machine synchrone à aimant permanent, la force électromotrice est trapézoïdale → la commande à plein onde (Commande 120°).
- o La machine synchrone à rotor bobiné, la force électromotrice est sinusoïdale → la commande à MLI.



❖ Schéma de commande globale de la machine en commande scalaire



2. La commande vectorielle ou commande à flux orienté

Le contrôle scalaire en courant est satisfaisant en régime permanent, mais pas en régime dynamique. Le contrôle vectoriel offre une meilleure précision en régime dynamique. Pour l'appliquer, il faut modéliser la machine synchrone en régime dynamique et trouver les paramètres pour la rendre en point de vue comportementale comme le principe de la machine à courant continu MCC.

2.1. Modélisation de la machine synchrone à aimant permanent en régime dynamique

Le modèle dynamique recherché consiste à travailler dans un système diphasé fictif équivalent grâce à un modèle mathématique adapté (transformation de Park) dans le plan « dq » (d pour direct et q pour quadrature).

Hypothèse :

- Dans cette partie nous intéressons à une machine synchrone comporte trois enroulements décalés de 120°, et ils sont couplés en (Y). Le rotor à pôles lisses (entrefer constant) inclut un aimant permanent qui génère un flux Φ_M .
- La résistance d'un enroulement est notée R_s .
- On négligera les inductances de fuite au stator. On note Φ_M le flux totalisé dans la bobine «1, 2 ou 3».
- La position et la vitesse de rotation angulaire du rotor sont respectivement notées θ_m et Ω_m :



La transformée de Park permet de déterminer une machine diphasée équivalente dans le repère « dqo » où o est un axe virtuel perpendiculaire au plan « dq ». Le passage des grandeurs physiques du repère « abc » vers le repère « dqo » se fait grâce à la matrice de passage (θ_e) (voir l'annexe).

Le tableau ci-dessous présente les équations finales du modèle, car les calculs dépassent le cadre du programme en CPGE TSI.

Grandeurs	Expressions
Tension Vd et Vq	○ $v_d = R_s i_d + L_d \frac{d i_d}{dt} - L_q \omega_e i_q$
	○ $v_q = R_s i_q + L_q \frac{d i_q}{dt} + L_d \omega_e i_d + \Phi_M \omega_e$
Couple électromagnétique	○ $C_{em} = p \cdot (L_d - L_q) i_d i_q + p \Phi_M i_q$
L'équation mécanique	○ $J \frac{d \Omega_m}{dt} = C_{em} - C_r - f \Omega_m$
La relation entre la vitesse de rotation angulaire ω_e et la vitesse de rotation angulaire du rotor Ω_m : $\omega_e = p \Omega_m$ avec p est le nombre de paires de pôles	

Puisque le rotor de la machine synchrone est à pôles lisses et à forces électromotrice sinusoïdales ce qui implique $L_d = L_q = L_s$ où L_s est l'inductance cyclique de la machine synchrone. L'expression de couple C_{em} précédente se simplifie et donne :

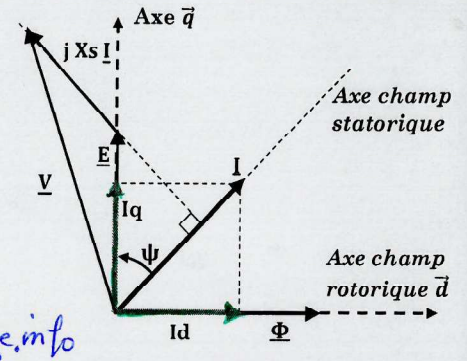
$L_d = L_q \Rightarrow$ le couple électromagnétique s'écrit :

$$C_{em} = p \cdot \Phi_M \cdot i_q$$

Conclusion : Le contrôle de courant i_q permet de contrôler directement le couple électromagnétique C_{em} .

2.2. La commande vectorielle de la machine synchrone à aimant permanent

En 1971, les chercheurs allemands Blashke et Hass ont introduit une nouvelle approche de commande basée sur l'orientation du champ, dans laquelle le vecteur du courant statorique est décomposé en deux composantes distinctes. L'une de ces composantes gère le contrôle du flux, tandis que l'autre influence sur le couple, rendant ainsi la dynamique similaire à celle des machines à courant continu (MCC). Cette méthode est aujourd'hui reconnue sous le nom de commande vectorielle.



www.autocpge.info

La commande vectorielle ou le flux orienté :

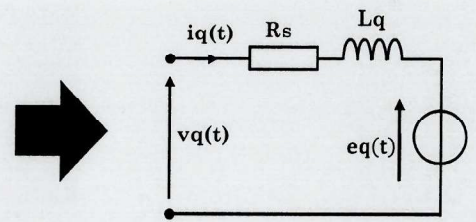
Pour assurer la condition d'autopilottage : $\psi = 0$, il est nécessaire de fixer $i_d(t)$ à zéro ($i_d(t) = 0$). Dans ce cas, les éléments suivants se réalisent :

- o Le flux rotorique orienté vers l'axe d : $\Phi_d = \Phi_M$ et $\Phi_q = 0$ (On dit que le flux est contrôlé par le courant $i_d(t)$)
- o Le couple électromagnétique Cem est contrôlé par le courant $i_q(t)$.

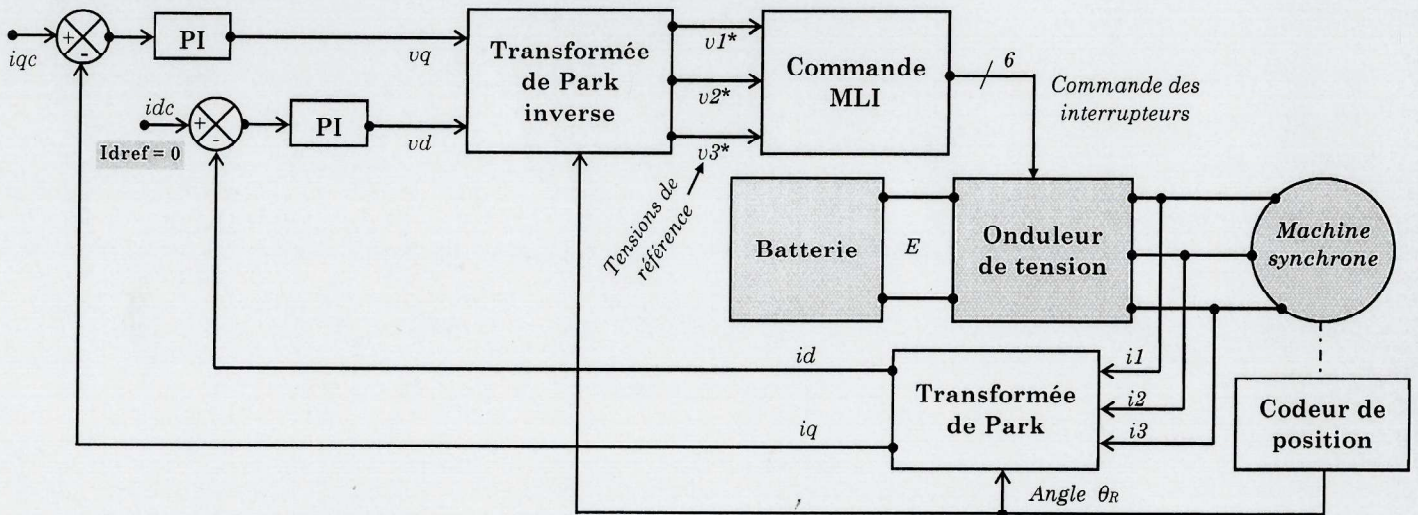
Remarque : Le choix d'une consigne nulle permet de réduire les pertes par effet Joule et ainsi d'optimiser le rendement.

Les équations précédemment présentées mènent aux équations équivalentes de la machine à courant continu à excitation séparée.

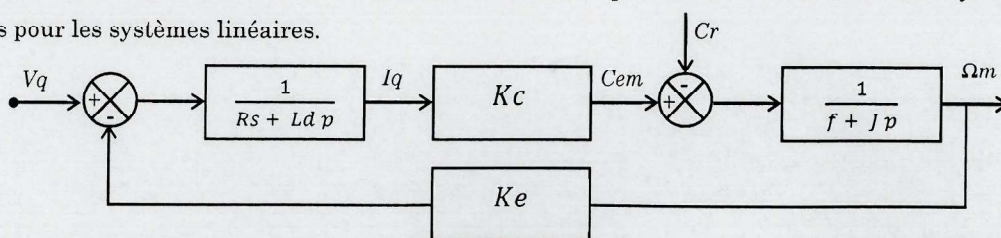
Grandeurs	Expressions
Tension $V_q(t)$	$v_q(t) = R_s i_q(t) + L_q \frac{di_q(t)}{dt} + e_q(t)$
Force électromotrice $e_q(t)$	$e_q(t) = K_e \cdot \Omega_m(t)$ avec $K_e = p \cdot \Phi_M$
Couple électromagnétique $Cem(t)$	$Cem(t) = K_c \cdot i_q(t)$ avec $K_c = p \cdot \Phi_M$
L'équation mécanique	$J \frac{d\Omega_m}{dt} = Cem(t) - Cr(t) - f \Omega_m(t)$



Le schéma fondamental de la boucle de contrôle de courant est présenté ci-dessous :



Avec des hypothèses simplificatrices, les boucles d'asservissement peuvent être formalisées au moyen de techniques classiques développées pour les systèmes linéaires.



Note : En effet, on peut noter une similitude entre ce schéma bloc et celui de la machine à courant continu (MCC).