

# Chap IV: Moteur Synchrone, modélisation et réglage de vitesse

**Université M. S. Ben Yahia Jijel**

**Fac. Sciences et Technologie**

**Dépt d'Electrotechnique**

Master I Electrotechnique, option Réseaux, S2

Module: Commande des Systèmes Electro-énergétiques

Cours sur la commande de la machine synchrone

Enseignant: N. Boudjera

## BIBLIOGRAPHIE:

Lesenne, J., Notelet, F., Seguier, G., *Introduction à l'électrotechnique approfondie*, Tech. et Doc., 1981.

Philippe Ladoux, *Variation de vitesse des machines à courant alternatif*,  
<https://www.google.com/search?q=Philippe+Ladoux%2C+Variation+de+vitesse+des+machines+%C3%A0+courant+alternatif%2C&oq=Philippe+Ladoux%2C+Variation+de+vitesse+des+machines+%C3%A0+courant+alternatif%2C&aqs=chrome..69i57.1332j0j8&sourceid=chrome&ie=UTF-8>

Boudries Z., *Cours de Commande des machines électriques*, Univ. Béjaia, [https://elearning.univ-bejaia.dz/pluginfile.php/238816/mod\\_resource/content/0/COURS\\_BOUDRIES\\_COMMANDE%20DES%20MACHINES%20ELECTRIQUES.pdf](https://elearning.univ-bejaia.dz/pluginfile.php/238816/mod_resource/content/0/COURS_BOUDRIES_COMMANDE%20DES%20MACHINES%20ELECTRIQUES.pdf)

## 1/ Modélisation en grandeurs de phase

Soit un moteur synchrone triphasé (sans amortisseurs), avec les bobinages statoriques ( $a, b, c$ ) et rotorique  $f$  (Figure 1). L'application de la loi de Faraday permet d'écrire:

- **Équations électriques:**

**Pour le stator:**

$$v_{abc} = Ri_{abc} + \frac{d\varphi_{abc}}{dt} \quad (1)$$

**Pour le rotor:**

$$v_f = Ri_f + \frac{d\varphi_f}{dt} \quad (2)$$

Avec:

$v_{abc}$  et  $i_{abc}$ : tensions et courants des phases statoriques.

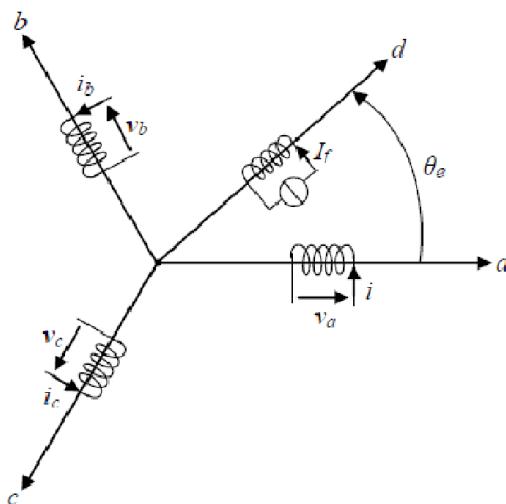
$v_f$  et  $i_f$ : tension et courant continu d'excitation rotorique.

$\varphi_{abc}$ : flux totaux à travers les phases statoriques.

$\varphi_f$ : flux à travers le circuit rotorique.

$R$ : Résistance d'une phase statorique (induit)

$R_f$ : Résistance du rotor (inducteur)



**Figure 1.** Bobinages de la machine synchrone (repère abc et repère dq lié au rotor)

- **Schéma équivalent par phase**

Dans la phase  $a$ , l'équation du flux est donnée par:

$$\varphi_a = \varphi_{aa} + \varphi_{ba} + \varphi_{ca} + \varphi_{fa} = Li_a + Mi_b + Mi_c + \varphi_{fa} = (L - M)i_a + \varphi_{fa} \quad (3)$$

Où:

$L$ : Inductance propre d'une phase statorique.

M: Mutuelle entre deux phases du stator

$\varphi_{fa}$ : Flux envoyé par l'inducteur dans la phase  $a$ .

En posant  $L_S = L - M$  (inductance cyclique statorique ou inductance synchrone), on aura pour chaque phase:

$$\varphi_{abc} = L_S i_{abc} - \varphi_{fabc}$$

En reportant les équations des flux dans les équations des tensions, on aura:

$$v_{abc} = R i_{abc} + \frac{d}{dt} (L_S i_{abc} + \varphi_{fabc}) = R i_{abc} + L_S \frac{di_{abc}}{dt} + \frac{d\varphi_{fabc}}{dt} \quad (4)$$

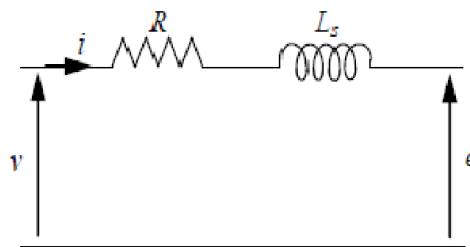
Remarquons que pour  $i_{abc} = 0$ , on aura:

$$v_{abc} (i_{abc} = 0) = e_{abc} = \frac{d\varphi_{fabc}}{dt} = \frac{d\varphi_{fabc}}{d\theta_e} \frac{d\theta_e}{dt} = p\Omega_S \frac{d\varphi_{fabc}}{dt} \quad (5)$$

Finalement, on aura:

$$v_{abc} = R i_{abc} + L_S \frac{di_{abc}}{dt} + e_{abc} \quad (6)$$

La loi des mailles appliquée à une phase du stator (induit), nous permet de tracer le schéma équivalent monophasé de la MS à pôles lisses non saturée en fonctionnement moteur.



**Figure 2.** Schéma équivalent monophasé de la machine synchrone

A partir de la figure 2, on peut poser l'équation suivante:

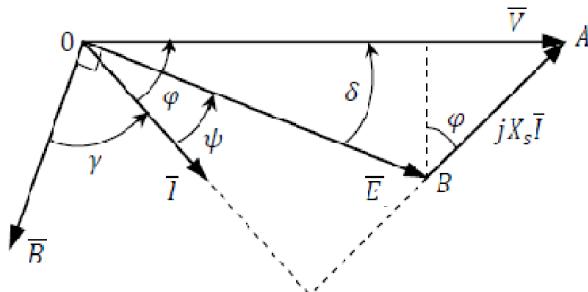
$$\bar{V} = R \bar{I} + J X_S \bar{I} + \bar{E} \quad (7)$$

avec:  $X_S = L_S \omega$

Pour  $R = 0$ , cette relation peut être simplifiée comme suit:

$$\bar{V} = J X_S \bar{I} + \bar{E} \quad (8)$$

Ce qui donne le diagramme vectoriel simplifié suivant:



$\varphi$ : Déphasage entre  $\bar{I}$  et  $\bar{V}$

$\delta$ : Déphasage entre  $\bar{E}$  et  $\bar{V}$  (décalage interne)

$\psi$ : Déphasage entre  $\bar{I}$  et  $\bar{E}$  (il permet de repérer les positions des pôles du rotor par rapport au champ statorique)

**Figure 3.** Diagramme vectoriel simplifié

## 2/ Expressions du couple électromagnétique

### a/ Expression en fonction du déphasage $\psi$

Considérons la puissance absorbée par le moteur:

$$P_{abs} = 3VI \cos(\varphi) \quad (9)$$

En négligeant les pertes joule statoriques et les pertes fer, cette puissance est intégralement transmise au rotor, ce qui donne:

$$P_{em} \approx P_{abs} = 3VI \cos(\varphi) \quad (10)$$

Si encore on néglige les pertes mécaniques on aura:

$$P_m = C_m \cdot \Omega_S \approx P_{em} = C_{em} \cdot \Omega_S \approx P_{abs} = 3VI \cos(\varphi) \quad (11)$$

Ce qui donne:

$$C_m = C_{em} = \frac{3VI \cos(\varphi)}{\Omega_S} \quad (12)$$

La projection des vecteurs  $\bar{V}$  et  $\bar{E}$  sur l'axe portant le courant  $\bar{I}$  donne (figure 3):

$$V \cos(\varphi) = E \cos(\psi) \quad (13)$$

Ce qui donne:

$$C_m \approx C_{em} = C = \frac{3EI \cos(\varphi)}{\Omega_S} \quad (14)$$

Sachant que:  $E = p\Omega_S \phi_f$  ( $\phi_f$ : Valeur efficace du flux à vide par phase réglable par  $i_f$ ), on aura:

$$C = 3p\phi_f I \cos(\psi) \quad (15)$$

Cette expression fait intervenir le courant  $I$  et l'angle  $\psi$ . Elle est adaptée à l'étude de la machine alimentée en courant (onduleur "ou commutateur" de courant). On distingue trois (03) variables permettant le réglage du couple:

- $I$ : valeur efficace du courant d'induit (stator).

- $\phi_f$ : Valeur efficace du flux à vide par phase "réglable à l'aide du courant d'excitation  $i_f$  pour les MS à pôles lisses" et constant pour les MS à aimants permanents.
- $\psi$ : Déphasage entre  $\bar{I}$  et  $\bar{E}$  (figure 3), réglable par autopilotage (on verra ça dans un prochain paragraphe).

### b/ Expression en fonction de l'angle interne $\delta$

A partir du diagramme de la figure 3, on peut écrire:

$$E \sin(\delta) = X_s I \cos(\phi) \quad (16)$$

Ce qui donne:

$$C = \frac{3V}{\Omega_s} \frac{E \sin(\delta)}{X_s} = \frac{3V}{\Omega_s} \frac{p \Omega_s \phi_f}{L_s \omega_s} \sin(\delta) = \frac{3p}{L_s} \left( \frac{V}{\omega_s} \right) \phi_f \sin(\delta) \quad (17)$$

Cette expression est adaptée à l'étude de la machine alimentée en tension (onduleur de tension). On distingue trois (03) variables permettant le réglage du couple:

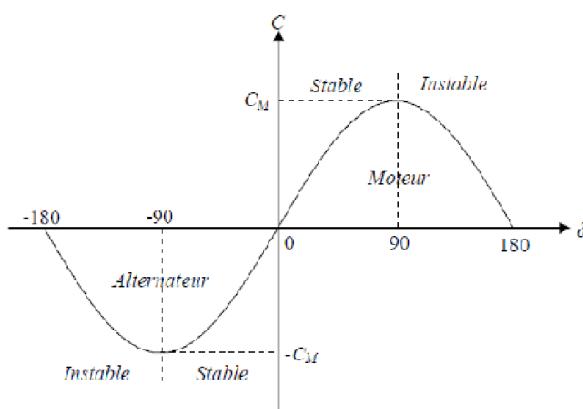
- $\left( \frac{V}{\omega_s} \right)$ : réalisable directement par une commande en MLI de l'onduleur.
- $\phi_f$ : Valeur efficace du flux à vide par phase "réglable à l'aide du courant d'excitation  $i_f$  pour les MS à pôles lisses" et constant pour les MS à aimants permanents.
- L'angle interne  $\delta$  (réglable par autopilotage)

**Remarque:** Lorsqu'on travaille avec un rapport ( $V/\omega_s$ ) et à excitation constante ( $\phi_f$  constant), le couple est proportionnel à  $\sin(\delta)$ :

$\delta > 0$  alors  $C > 0$ : Fonctionnement moteur.

$\delta < 0$  alors  $C < 0$ : Fonctionnement générateur.

Dans ce cas, l'allure du couple en fonction de  $\delta$  est donné en figure 4:

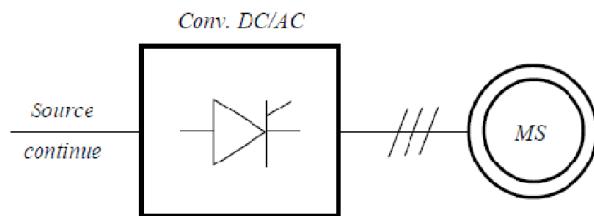


**Figure 4:** Allure du couple  $C$  en fonction de l'angle interne  $\delta$

**Remarque importante:** Pour les deux fonctionnements moteur et générateur, le domaine de stabilité est défini par la relation:  $|\delta| < \frac{\pi}{2}$ .

### 3/ Autopilotage de la machine synchrone

Le moteur synchrone est conçu pour tourner à la vitesse synchrone ( $\Omega_s = \omega_s / p$ ), qui est liée uniquement à la fréquence des tensions d'alimentation. A titre illustratif, nous considérons la commande en vitesse en boucle ouverte du moteur synchrone donné en figure 5 (le convertisseur peut être de tension ou de courant). Pour entraîner le rotor à vitesse variable, on crée à l'aide des courants au stator un champ statorique qui doit exercer sur le rotor un couple optimal; cela veut dire que le flux statorique doit rester orienté entre 0 et  $90^\circ$  (de préférence voisin de  $90^\circ$ ) en avance sur le flux rotorique. En sortie du convertisseur, on contrôle l'amplitude des tensions statoriques (alimentation en tension) ou l'amplitude des courants statoriques (alimentation en courant) et la fréquence  $f_s$ .



**Figure 5.** MS alimentée par un convertisseur DC/AC

Le champ statorique tourne à la vitesse imposée par la fréquence d'alimentation, le champ rotorique (excitation ou aimants) en fonctionnement normal est "accroché" au champ du stator. Quand le couple résistant augmente, le décalage interne  $\delta$  augmente. De plus, les dynamiques des deux champs sont très différentes ; celle du champ statorique, déterminée par les constantes de temps électriques de la source à fréquence variable, est plus rapide que la dynamique du champ rotorique liée aux parties tournantes (constantes de temps mécaniques). Il s'ensuit qu'une variation brusque de la pulsation d'alimentation entraînera une variation tout aussi rapide de la vitesse du champ statorique mais le champ rotorique ne variera pas aussi vite à cause de l'inertie des parties tournantes. Ce qui peut provoquer un **décrochage de la machine**. Pour résoudre ce problème, on effectue un asservissement de la position du champ rotorique par rapport à celle du champ statorique afin d'imposer le décalage angulaire entre les deux champs. Ceci constitue le fonctionnement du MS en autopiloté qui consiste à régler la fréquence des courants statoriques en fonction de l'angle entre le flux statorique et le flux rotorique (décalage interne  $\delta \approx 90^\circ$ ) pour éviter le décrochage de la machine. Pour cela, il faut un réglage en boucle fermée à l'aide d'un capteur de position du rotor.

#### 3.1/ Moteur synchrone autopiloté alimenté en courant

On alimente la machine par un onduleur de courant. La commande utilise la relation (15):

$$C = 3p \cdot \phi_f \cdot I \cdot \cos(\psi)$$

En considérant  $\phi_f$  constant (M S à excitation constante ou bien M S à aimants permanents), le couple est contrôlé par action sur  $\psi$  et sur l'amplitude du courant  $I$ . Ainsi, le contrôle est généralement effectué comme suit:

- Un convertisseur statique (de courant) permettant d'imposer le courant dans chaque phase.
- Un autre convertisseur statique permettant le contrôle de l'angle  $\psi$ ; ce contrôle nécessite généralement un capteur de position du rotor, qui permet de générer les ordres de commande du convertisseur pour obtenir  $\omega_s = p \cdot \Omega_s$ .

En général le système utilisé est illustré en figure 6, il comprend:

- Une source de courant continu constituée d'un pont redresseur triphasé à thyristors (Pont 1) connecté au réseau alternatif. La bobine ( $L$ ) permet de lisser le courant de sortie  $I_S$ .
- Un pont (Pont 2) à 6 composants (généralement des thyristors) travaillant en onduleur de courant et fournissant les courants alternatifs  $i_1, i_2, i_3$  du moteur.
- Un capteur de position solidaire du rotor assurant l'autopilotage en commandant la fermeture des composants de l'onduleur aux instants convenables.

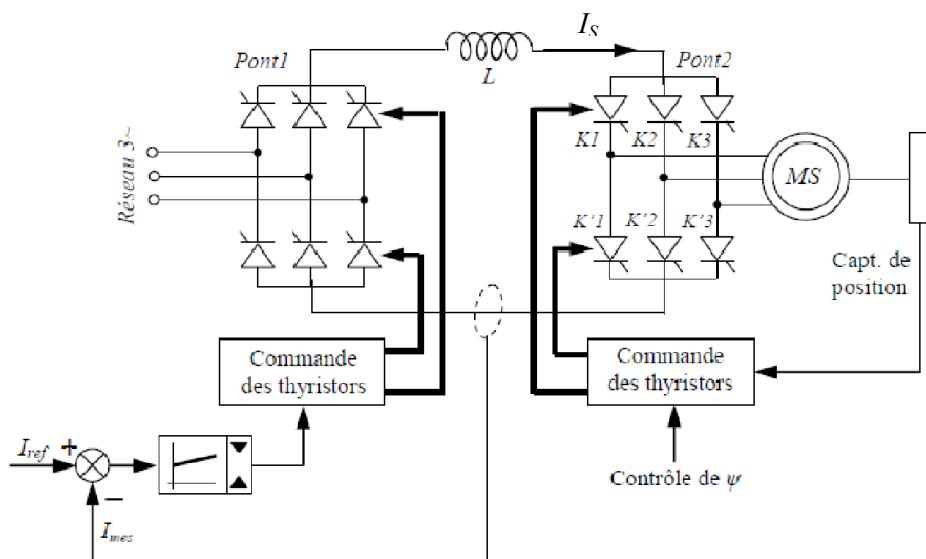
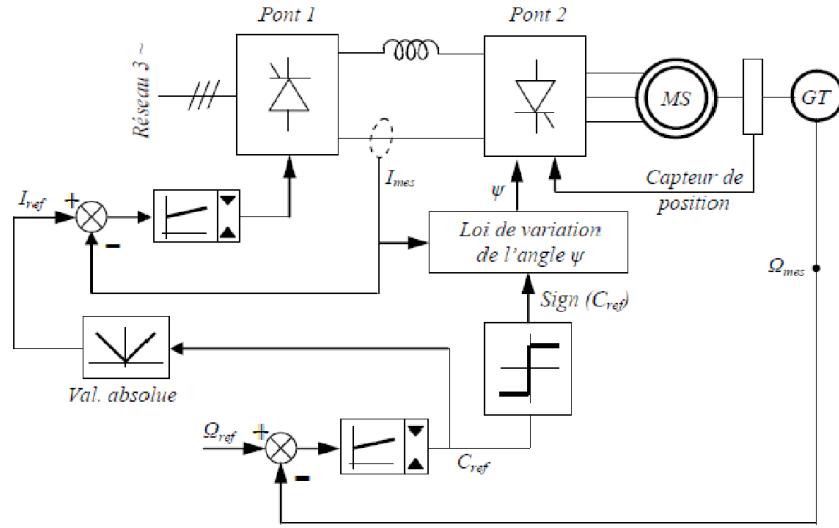


Figure 6: Moteur synchrone autopiloté associé alimenté en courant

### 3.2/ Asservissement de vitesse du moteur synchrone autopiloté alimenté en courant

L'asservissement de la vitesse de rotation peut être effectué exactement comme pour le mcc à excitation séparée, avec deux boucles en cascade ; une boucle interne pour le contrôle du couple et une boucle externe pour le réglage de la vitesse. La sortie de cette dernière constitue la référence de la boucle interne. Le schéma structurel du circuit de réglage global est donné en figure 7.



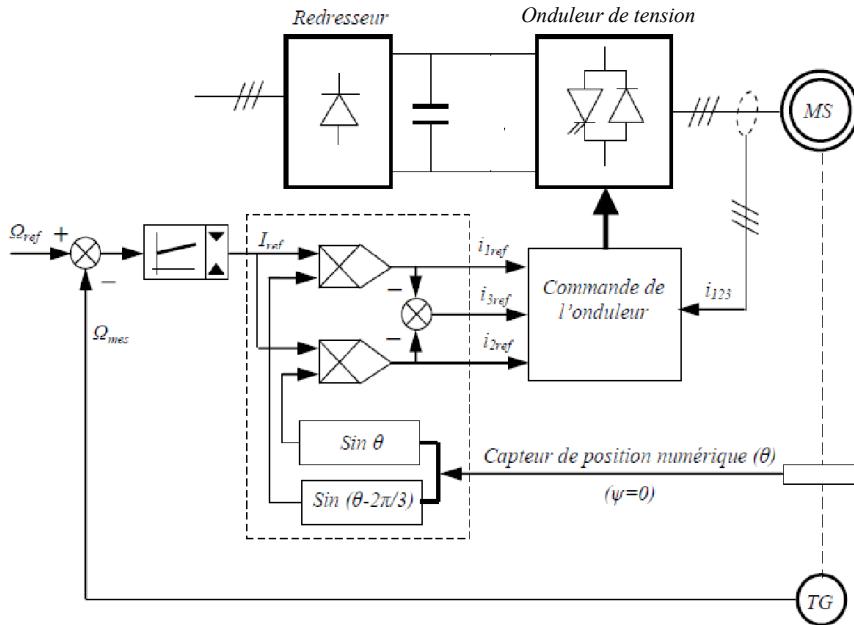
**Figure 7:** Asservissement de vitesse du moteur synchrone autopiloté alimenté en courant

### 3.2/ Asservissement de vitesse du moteur synchrone autopiloté alimenté en tension

Comme pour le cas précédent, le contrôle du couple est basé sur la relation (15):

$$C = 3p \cdot \phi_f \cdot I \cdot \cos(\psi)$$

Le schéma de principe de l'asservissement de vitesse est donné dans la figure 8 ci dessous.



**Figure 7:** Asservissement de vitesse du moteur synchrone autopiloté alimenté en tension

**Remarque:** La position du rotor par rapport au stator est effectuée à l'aide d'un capteur de position et la vitesse du moteur est mesurée à l'aide d'une génératrice tachymétrique.