

Université 8 Mai 1945  
Guelma



جامعة 8 ماي 1945  
قائمة

Département de génie Electrotechnique  
et Automatique

## Commande des systèmes électro-énergétiques

Chapitre 3: commande vectorielle de la machine asynchrone



M. M&Euml;ND&Auml;CI Sofiane  
Guelma-2020

Ce cours sur la commande vectorielle de la machine asynchrone est destiné aux étudiants de master « électromécanique » et « réseaux électriques ».

Le contenu de ce cours est inspiré de plusieurs références, parmi lesquelles :

- Entraînements électriques à vitesse variable; Jean Bonal, Guy Séguier, 1998,
- Commande électronique des moteurs électriques; Michel Pinard; Dunod, 2004 page | 27
- Commandes des systèmes électriques ; Loron Luc, Lavoisier, 2004
- Modélisation et commande de la machine asynchrone, J.P.Hautier et J.P.Caron, Technip, 1995
- Electrotechnique Theodore WILDI De BEOCK UNIVERSITE
- [https://fr.wikipedia.org/wiki/Commande\\_vectorielle](https://fr.wikipedia.org/wiki/Commande_vectorielle)
- [https://fr.wikipedia.org/wiki/Nikola\\_Tesla](https://fr.wikipedia.org/wiki/Nikola_Tesla)
- [https://fr.wikipedia.org/wiki/Transform%C3%A9\\_de\\_Park](https://fr.wikipedia.org/wiki/Transform%C3%A9_de_Park)
- Mihai Cheles, Hafedh Smmoud, "Sensorless Field Oriented Control (FOC) of an AC Induction Motor (ACIM) Using Field Weakening", Microchip-AN1206, 06/13/2008.

2

## Chapitre 3. Commande vectorielle de la machine asynchrone

### 1. Introduction générale :

Les machines électriques à courant alternatif sont devenues très utilisées dans tous les domaines (domestiques, traction, industrie,...). Parmi ces machines, on trouve essentiellement la Machine ASynchrone **MAS** et la Machine Synchrone **MS**.

Cependant, plusieurs techniques dédiées pour la commandes des machines à courant alternatif sont utilisées dans l'industrie.

Ce chapitre est consacré à la présentation des:

- Commandes classiques,
- Commandes scalaires.
- **Commandes vectorielles (FOC ou DTC).**

Appliquées à la **MAS** et à la **MS**.

3

### 3. Le moteur asynchrone triphasé

### 2. Généralités sur la MAS:

La machine asynchrone a été inventée par

**Nikola Tesla** en 1887.

Du fait de sa simplicité de construction, d'utilisation

et d'entretien, de sa robustesse et son faible prix

de revient, la machine asynchrone est aujourd'hui très couramment utilisée:

- Comme moteur dans une gamme de puissance allant de quelques centaines de watts à plusieurs milliers de kilowatts.
- Comme génératrice dans les éoliennes, les hydroliennes et les systèmes de génération d'électricité à vitesse variable.



4

## 3. Le moteur asynchrone triphasé

Le moteur asynchrone est constitué de deux parties : le **stator** et le **rotor**.

**Le stator:**

Le stator est formé d'une carcasse ferromagnétique qui contient trois enroulements électriques. C'est la partie fixe du moteur. Le passage d'un courant dans les enroulements crée un champ magnétique tournant à l'intérieur du stator. Sur les moteurs triphasés, il y a 3 enroulements alimentés (en étoile 220V ou en triangle 380V). Pour le moteur asynchrone, le stator est l'inducteur (celui qui "induit", qui crée le champ magnétique).

**Le rotor:**

Le circuit magnétique du rotor est constitué de tôles d'acier qui sont de même origine que celles utilisées pour la construction du stator. Les rotors des MAS peuvent être de deux types : bobinés ou à cages d'écureuil. <sup>5</sup>

**2.1. Principe de fonctionnement:**

## 3. Le moteur asynchrone triphasé

Le passage d'un courant triphasé dans les enroulements (reliés en étoile ou en triangle) crée un champ magnétique tournant à l'intérieur du stator. La fréquence de rotation de ce champ est imposée par la fréquence des courants statoriques, donc, elle est proportionnelle à la fréquence de l'alimentation électrique. La vitesse de ce champ tournant est appelée **vitesse de synchronisme**.

Ce champ variable créera des courants induits dans les bobines (barres) du rotor (lois de Faraday). Ces courants, avec le champ tournant, créent une force de Laplace qui tend à mettre le rotor en rotation pour s'opposer à la cause qui leur a donné naissance (c'est la loi de Lenz). Cette cause, est le déplacement du champ par rapport aux conducteurs du rotor. **Le rotor en court circuit part ainsi à la "poursuite" du champ magnétique tournant.** <sup>6</sup>

## 3. Le moteur asynchrone triphasé

**Glissement:**

La vitesse de rotation de l'arbre du moteur est différente de la vitesse de synchronisme (vitesse du champ tournant). Cette différence s'appelle le **glissement « g »**. Il est généralement exprimé en pourcentage de la vitesse de synchronisme par :

$$g = \frac{w_s - w_r}{w_s} = \frac{N_s - N_r}{N_s}$$

Avec:  $w_s$  est la vitesse de synchronisme (du champ tournant) en rd/s.  
 $w_r$  est la vitesse du rotor en rd/s.  
 $N_s$  est la vitesse de synchronisme (du champ tournant) en tr/mn.  
 $N_r$  est la vitesse du rotor en tr/mn.

- Si  $w_r = w_s$  (à vide et sans frottements)  $g = 0$ .
- Si  $w_r = 0$  (démarrage)  $g = 1$ .
- Si  $w_r < w_s$  (mode de fonctionnement nominal)  $g = \text{quelques } \%$ .

En pratique le glissement nominal varie entre 2% (grosses machines) et 6% (petites machines). Mais, généralement, le glissement max peut aller, pour de faibles durées, jusqu'à 20% ... au delà le moteur cale <sup>7</sup>

## 3. Le moteur asynchrone triphasé

**3. Modélisation de la machine asynchrone:****a. Les hypothèses simplificatrices:**

Les hypothèses généralement admises dans les modèles de la MAS sont :

- Entrefer constant.
- Effet d'encoche et pertes ferromagnétiques négligeables.
- Influences de l'effet de peau et de l'échauffement sont négligés.
- Distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer.
- Circuit magnétique parfaitement feuilleté (seuls les enroulements sont parcourus par des courants) et non saturé (perméabilité magnétique constante).

Parmi les conséquences importantes de ces hypothèses on peut citer :

- Additivité des flux.
- Constance des inductances propres.
- Variation sinusoïdale (en position) des inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques. <sup>8</sup>

*3. Le moteur asynchrone triphasé*

Ainsi, nous pouvons schématiser la MAS comme la montre la figure suivante:

- Le stator est formé de trois enroulements fixes décalés dans l'espace de 120° et traversés par trois courants variables.
- Le rotor peut être modélisé par trois enroulements identiques décalés dans l'espace de 120°. Ces enroulements sont court-circuités.

*3. Le moteur asynchrone triphasé*

**b. Équations électriques:**

Les équations des tensions statoriques décrites dans le repère **lié au stator** sont:

$$\begin{cases} U_{sa}(t) = R_s i_{sa}(t) + \frac{d\Phi_{sa}(t)}{dt} \\ U_{sb}(t) = R_s i_{sb}(t) + \frac{d\Phi_{sb}(t)}{dt} \\ U_{sc}(t) = R_s i_{sc}(t) + \frac{d\Phi_{sc}(t)}{dt} \end{cases}$$

D'autre part, les équations rotoriques décrites dans le repère **lié au rotor** sont :

$$\begin{cases} U_{ra}(t) = 0 = R_r i_{ra}(t) + \frac{d\Phi_{ra}(t)}{dt} \\ U_{rb}(t) = 0 = R_r i_{rb}(t) + \frac{d\Phi_{rb}(t)}{dt} \\ U_{rc}(t) = 0 = R_r i_{rc}(t) + \frac{d\Phi_{rc}(t)}{dt} \end{cases}$$

Les relations entre les courants et les flux sont données par :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sabc}(t) \\ \Phi_{rabc}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sabc}(t) \\ i_{rabc}(t) \end{bmatrix}$$

10

*3. Le moteur asynchrone triphasé*

Avec:

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix}; [L_r] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix}$$

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

$\theta$  est l'angle de rotation du rotor.

Les équations obtenues sont à coefficients variables  $\theta = f(t)$ , par conséquent leur manipulation est souvent difficile, d'où la nécessité de trouver un modèle mathématique équivalent plus simple, entre autre celui obtenu par la transformation dite de **Park**.

11

*3. Le moteur asynchrone triphasé*

**c. Transformation de Park:**

La transformation de Park (publiée en 1929) permet le passage d'un système triphasé à un système biphasé.

Le passage du système **abc** au système **dqo** s'obtient par la matrice suivante:

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_o \end{bmatrix} = [P(\theta_s)] \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_s - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_s) & -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix}$$

12

## 3. Le moteur asynchrone triphasé

La transformation inverse de Park qui permet le passage du système **dqo** au système **abc** est donnée par la matrice suivante:

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = [P^{-1}(\theta_s)] \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & -\sin(\theta_s) & 1 \\ \cos\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta_s - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_s - \frac{4\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_o \end{bmatrix}$$

Ce repère de Park (**dq**), peut être choisi:

- Repère général (mobile):  $\theta_s = w_g t$
- Repère lié au champ tournant (mobile):  $\theta_s = w_s t$
- Repère lié au rotor (mobile):  $\theta_s = w_r t$
- Repère lié au stator (fixe):  $\theta_s = 0$

13

## 3. Le moteur asynchrone triphasé

**d. Application de la transformation de Park à la MAS:**

Dans un repère lié au champ tournant, les équations électriques du stator est du rotor deviennent:

$$\begin{cases} u_{sd}(t) = R_s i_{sd}(t) + \frac{d\Phi_{sd}(t)}{dt} - w_s \Phi_{sq}(t) \\ u_{sq}(t) = R_s i_{sq}(t) + \frac{d\Phi_{sq}(t)}{dt} + w_s \Phi_{sd}(t) \\ 0 = R_r i_{rd}(t) + \frac{d\Phi_{rd}(t)}{dt} - (w_s - w_r) \Phi_{rq}(t) \\ 0 = R_r i_{rq}(t) + \frac{d\Phi_{rq}(t)}{dt} + (w_s - w_r) \Phi_{rd}(t) \end{cases}$$

Aussi, l'application de cette transformation sur les équations du flux donne:

$$\begin{aligned} \Phi_{sd}(t) &= L_s i_{sd}(t) + M i_{rd}(t) \\ \Phi_{sq}(t) &= L_s i_{sq}(t) + M i_{rq}(t) \\ \Phi_{rd}(t) &= L_r i_{rd}(t) + M i_{sd}(t) \\ \Phi_{rq}(t) &= L_r i_{rq}(t) + M i_{sq}(t) \end{aligned}$$

$L_s = l_s - M_s$  inductance propre cyclique du stator.

$L_r = l_r - M_r$  inductance propre cyclique du rotor.

$M = 1.5M_{sr}$  inductance mutuelle cyclique entre le stator et le rotor.

14

## 3. Le moteur asynchrone triphasé

**e. Expression du couple électromagnétique:**

La puissance électrique instantanée fournie aux enroulements statoriques et rotoriques est donnée par (il faut utiliser Clark pour la démontrer):

$$\begin{aligned} P_e &= u_{sa} i_{sa} + u_{sb} i_{sb} + u_{sc} i_{sc} + u_{ra} i_{ra} + u_{rb} i_{rb} + u_{rc} i_{rc} \\ &= \left(\frac{3}{2}\right) (u_{sd} i_{sd} + u_{sq} i_{sq} + u_{rd} i_{rd} + u_{rq} i_{rq}) \end{aligned}$$

En développant cette expression, nous trouvons que  $P_e$  se décompose en trois termes : puissance dissipée en pertes Joule, puissance représentant les échanges d'énergie électromagnétique avec la source, et puissance mécanique :

$$\begin{aligned} P_e &= \left(\frac{3}{2}\right) [R_s (i_{sd}^2 + i_{sq}^2) + R_r (i_{rd}^2 + i_{rq}^2) + i_{sd} \frac{d\Phi_{sd}}{dt} + i_{sq} \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + \\ & i_{rd} \frac{d\Phi_{rd}}{dt} + i_{rq} \frac{d\Phi_{rq}}{dt} + w_r (\Phi_{rd} i_{rq} - \Phi_{rq} i_{rd})] = P_J + P_{em} + P_{mec} \end{aligned}$$

Or la puissance mécanique est reliée au couple électromagnétique par :

$$P_{mec} = C_m \Omega = C_m \frac{w_r}{p} = \left(\frac{3}{2}\right) w_r (\Phi_{rd} i_{rq} - \Phi_{rq} i_{rd})$$

Donc le couple électromagnétique est donné par:

$$C_m = \left(\frac{3}{2}\right) p (\Phi_{rd} i_{rq} - \Phi_{rq} i_{rd})$$

15

## 3. Le moteur asynchrone triphasé

En tenant compte des expressions des flux, nous pouvons avoir aussi :

$$\begin{aligned} C_m &= \left(\frac{3}{2}\right) p (\Phi_{sd} i_{sq} - \Phi_{sq} i_{sd}) = \left(\frac{3}{2}\right) p M (i_{rd} i_{sq} - i_{rq} i_{sd}) \\ &= \left(\frac{3}{2}\right) \frac{pM}{L_r} (\Phi_{rd} i_{sq} - \Phi_{rq} i_{sd}) \end{aligned}$$

**f. Modélisation en régime permanent de la MAS sinusoïdal:**

Si on considère la représentation complexe (utilisée généralement pour étudier les régimes sinusoïdaux permanents), donc on suppose:

$$X = x_d + jx_q$$

Dans le régime permanent et dans un repère lié au champ tournant, les grandeurs sans toutes constantes donc:  $\frac{d\bar{X}}{dt} = 0$ . Dans ce cas le modèle de la MAS devient:

$$\begin{cases} U_s(t) = R_s I_s(t) + jw_s \Phi_s(t) \\ 0 = R_r I_r(t) + j(w_s - w_r) \Phi_r(t) \\ \Phi_s(t) = L_s I_s(t) + M I_r(t) \\ \Phi_r(t) = L_r I_r(t) + M I_s(t) \\ C_m = \frac{3}{2} p (\Phi_s(t) \otimes I_s(t)) \end{cases}$$

16

## 3. Le moteur asynchrone triphasé

L'équation du rotor peut être écrite de la forme suivante:

$$0 = \frac{R_r}{g} I_r(t) + j\omega_s \Phi_r(t)$$

À partir du modèle de la MAS du régime permanent, on peut trouver une nouvelle expression du couple électromagnétique:

$$C_m = \frac{3}{2} p (\Phi_s(t) \otimes I_s(t)) = C_m = \frac{3}{2} p \cdot \text{Im}(\Phi_s^*(t) I_s(t))$$

$$= \frac{3}{2} p \left( \frac{M}{L_s} \right)^2 \Phi_s^2 \left( \frac{R_r w_{rr}}{R_r^2 + (\sigma L_r w_{rr})^2} \right) \quad \text{avec: } \sigma = 1 - \frac{M^2}{L_r L_s} \text{ et } w_{rr} = g \omega_s$$

17

## 3. Le moteur asynchrone triphasé

#### 4. procédés de réglage classiques de la vitesse de la MAS

À partir de l'expression du glissement est donnée par :

$$g = \frac{(\omega_s - \omega_r)}{\omega_s}$$

On peut déduire que la vitesse du rotor est donnée par :

$$\omega_r = \omega_s (1 - g) = \frac{2\pi f}{p} (1 - g)$$

Cette équation montre qu'il y a trois mode de réglage de la vitesse:

- Par variation du glissement  $g$ .
- Par variation du nombre de paire de pôles  $p$ .
- Par variation de la fréquence  $f$ , ce qui nécessite un onduleur.

18

## 3. Le moteur asynchrone triphasé

#### Remarques sur le réglage par variation de de la fréquence :

Le convertisseur statique de type "onduleur" permet un fonctionnement du moteur à fréquence variable donc à vitesse variable, pour cela on a 2 modes:

- Fréquence variable et tension fixe: ce mode sature la machine aux faibles vitesses et par conséquent le rendement diminue. Rarement utilisé.
- Fréquence variable et tension variable (avec conservation du rapport U/f): ce mode permet un fonctionnement à vitesse variable sans saturation (un bon rendement sur toute la plage de vitesse) et permet un couple maximal aussi à chaque vitesse. C'est le mode le plus utilisé. Il constitue le principe des commandes scalaires et vectorielles.

19

## 3. Le moteur asynchrone triphasé

#### 5. Commande vectorielle de la MAS par orientation du flux rotorique:

**5.1. Généralités:** La MCC à excitation séparée offre comme principal avantage d'être facilement commandable. Le flux et le couple sont découplés et contrôlés indépendamment. Cependant, la présence du collecteur mécanique limite ses domaines d'utilisation,

Comme pour les MCC, on cherche aussi à obtenir une commande de la MAS découplée pour régler le flux et le couple qu'elle développe indépendamment l'un de l'autre. Pour y parvenir, la méthode dite du flux orienté (ou commande vectorielle) permet de piloter la machine suivant deux axes : un axe pour le flux et un autre pour le couple.

20

*3. Le moteur asynchrone triphasé*

De nombreuses variantes basées sur ce principe d'orientation ont été présentées dans la littérature. Généralement ces techniques se diffèrent :

- Selon la source d'énergie : commande en tension ou en courant.
- Selon l'orientation du repère (d,q): suivant le flux statorique, le flux rotorique ou le flux d'entrefer.
- Selon le contrôle du flux : **direct** par calcul de la phase du flux à partir des mesures ou **indirect** par calcul basé sur les grandeurs de références.

Schéma bloc du brevet de 1971 déposé par Blaschke  
[https://fr.wikipedia.org/wiki/Commande\\_vectorielle](https://fr.wikipedia.org/wiki/Commande_vectorielle)

21

*3. Le moteur asynchrone triphasé*

**5.2. Principe de la Commande par orientation du flux rotorique:**

Si on suppose que le repère de Park (**d,q**) tourne à la vitesse de synchronisme et que l'axe **d** est lié au flux rotorique  $\Phi_r$ , dans ce cas :

$$\Phi_{rd} = \Phi_r$$

$$\Phi_{rq} = 0$$

Dans ces conditions, l'équation du couple s'écrit :

$$C_m = \left(\frac{3}{2}\right) \frac{pM}{L_r} \Phi_{rd} i_{sq}$$

Si le flux rotorique  $\Phi_r$  est constant, le couple devient proportionnel au courant  $i_{sq}$  comme pour le cas de la machine à courant continu à excitation séparée :

$$C_m = k i_{sq} \quad \text{avec: } k = \left(\frac{3}{2}\right) \frac{pM}{L_r} \Phi_{rd}$$

22

*3. Le moteur asynchrone triphasé*

**Conclusion:**

Pour avoir un couple de la machine asynchrone proportionnel au courant de l'axe **q** du repère de Park, il faut :

- Orienter l'axe **d** avec le flux rotorique,
- Régler le module du flux rotorique pour qu'il soit constant.

**ROTOR:** si on applique la condition d'orientation ( $\Phi_{rd} = \Phi_r, \Phi_{rq} = 0$ ) du repère (**d,q**) sur les équations en tensions rotoriques, on trouve :

$$\begin{cases} R_r i_{rd}(t) + \frac{d\Phi_{rd}(t)}{dt} = 0 \\ R_r i_{rq}(t) + w_{rr} \Phi_{rd}(t) = 0 \end{cases}$$

Avec:  $w_{rr} = w_s - w_r = w_s - p\Omega$

En remplaçant les courants rotoriques  $i_{rd}$  et  $i_{rq}$  par leurs expressions :

$$i_{rd}(t) = \frac{\Phi_{rd}(t) - M i_{sd}(t)}{L_r} \quad ; \quad i_{rq}(t) = -\frac{M i_{sq}(t)}{L_r}$$

23

*3. Le moteur asynchrone triphasé*

On trouve :

$$\begin{cases} \frac{d\Phi_{rd}(t)}{dt} = \frac{M}{T_r} i_{sd}(t) - \frac{1}{T_r} \Phi_{rd}(t) \\ T_r \Phi_{rd}(t) w_{rr}(t) = M i_{sq}(t) \end{cases}$$

Avec:  $T_r = L_r / R_r$

Finalement, on aura **les trois équations de base de la commande vectorielle à flux rotorique orienté (FOC)**, suivantes :

$$\begin{cases} \Phi_{rd}(s) = \frac{M}{T_r s + 1} i_{sd}(s) & (1) \\ C_m = \left(\frac{3}{2}\right) \frac{pM}{L_r} \Phi_{rd} i_{sq} & (2) \\ w_{rr}(t) = \frac{M i_{sq}(t)}{T_r \Phi_{rd}(t)} = w_s - p\Omega & (3) \end{cases}$$

24

3. Le moteur asynchrone triphasé

L'examen des équations (1) et (2) précédentes, montre que:

- La composante  $i_{sd}$  permet de contrôler l'amplitude du flux rotorique .
- La composante  $i_{sq}$  permet de contrôler le couple électromagnétique lors que le flux rotorique est maintenu constant.

Il n'y a pas alors aucun couplage des actions de  $i_{sd}$  et de  $i_{sq}$  et on retrouve la configuration des machines à courant continu.

**STATOR:**

si on applique la condition d'orientation ( $\Phi_{rd} = \Phi$ ,  $\Phi_{rq} = 0$ ) du repère **(d,q)** sur les équations du flux et les équations en tensions statoriques, on trouve:

$$\Phi_{sd}(t) = L_s \sigma i_{sd}(t) + \frac{M}{L_r} \Phi_{rd}(t)$$

$$\Phi_{sq}(t) = L_s \sigma i_{sq}(t)$$

Avec:  $\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$  est le coefficient de dispersion.

3. Le moteur asynchrone triphasé

Dans ce cas les équations en tension du stator deviennent:

$$u_{sd}(t) = R_s i_{sd}(t) + L_s \sigma \frac{di_{sd}(t)}{dt} + \frac{M}{L_r} \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - w_s L_s \sigma i_{sq}$$

$$u_{sq}(t) = R_s i_{sq}(t) + L_s \sigma \frac{di_{sq}(t)}{dt} + w_s \left( \frac{M}{L_r} \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - L_s \sigma i_{sq} \right)$$

Sachant que :

$$\frac{d\Phi_{rd}(t)}{dt} = \frac{M}{T_r} i_{sd}(t) - \frac{1}{T_r} \Phi_{rd}(t)$$

Si on remplace dans les équations en tension, on trouve:

$$u_{sd}(t) = L_s \sigma \frac{di_{sd}(t)}{dt} + \left( R_s + R_r \frac{M^2}{L_r^2} \right) i_{sd}(t) - R_r \frac{M}{L_r^2} \Phi_{rd} - w_s L_s \sigma i_{sq}$$

$$u_{sq}(t) = L_s \sigma \frac{di_{sq}(t)}{dt} + \left( R_s + R_r \frac{M^2}{L_r^2} \right) i_{sq}(t) + p\Omega \frac{M}{L_r} \Phi_{rd} + w_s L_s \sigma i_{sd}$$

Avec:  $w_s = p\Omega + w_{rr}(t) = p\Omega + \frac{M}{T_r} \frac{isq(t)}{\Phi_{rd}(t)}$  équation d'autopilotage

Donc:  $p\Omega \frac{M}{L_r} \Phi_{rd} = \left( w_s - \frac{M}{T_r} \frac{isq(t)}{\Phi_{rd}(t)} \right) \frac{M}{L_r} \Phi_{rd} = w_s \frac{M}{L_r} \Phi_{rd} - R_r \frac{M^2}{L_r^2} i_{sq}(t)$

3. Le moteur asynchrone triphasé

Les équations statoriques précédentes montrent que les deux axes **d** et **q** sont couplés, ce qui nécessite l'utilisation d'un bloc de **découplage** des deux axes **d** et **q** au niveau du stator. Au final, on aura un contrôle séparé du couple par  $i_{sq}$  et du flux par  $i_{sd}$ .

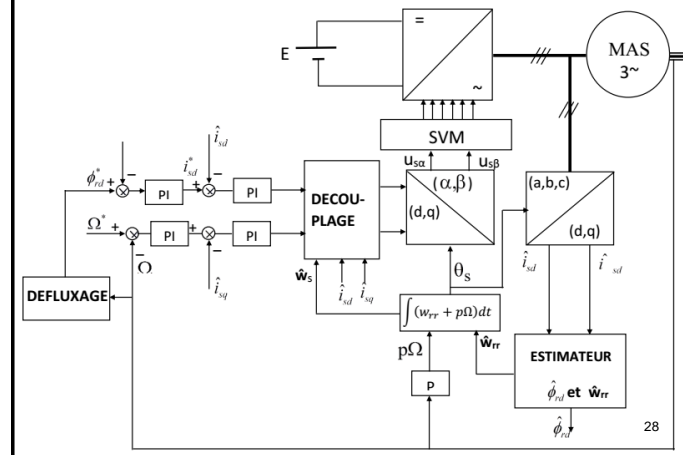
**A- Commande directe par orientation du flux rotorique d'une MAS alimentée en tension:**

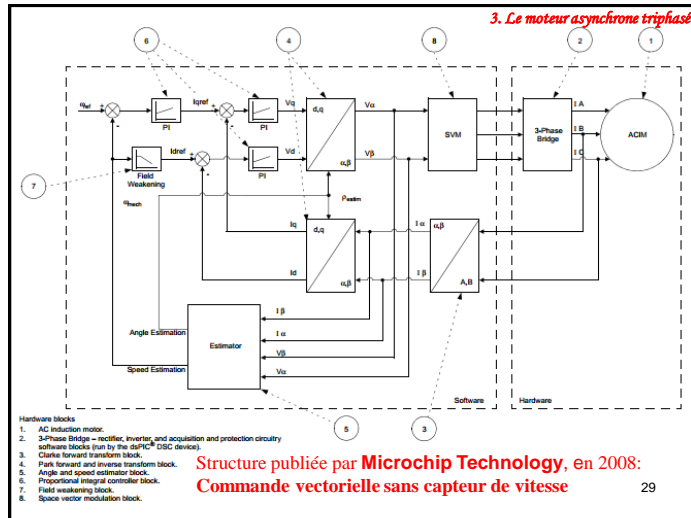
Dans la commande directe, la position et le module du flux rotorique sont estimés ou mesurés. Cette commande contient :

- Un correcteur pour régler le flux rotorique (facultatif),
- Un correcteur pour régler la vitesse,
- Un correcteur du courant  $I_{sq}$  (pour contrôler le couple),
- Un correcteur du courant  $I_{sd}$  (pour contrôler le flux rotorique),
- Un bloc de découplage des deux axes (d,q) au stator (facultatif),
- Deux transformations de Park (directe et inverse),
- Un bloc de calcul de la position et du module du flux,
- Un bloc de défluxage (facultatif).

3. Le moteur asynchrone triphasé

Le schéma de cette technique est donné par la figure suivante:





**3. Le moteur asynchrone triphasé**

**Remarque:**

- On peut supprimer le correcteur du flux rotorique et laisser celui du courant  $I_{sd}$ , cela n'affecte pas trop les performances mais la structure de commande devient moins complexe.

**Bloc de défluxage :**

- On peut rajouter un bloc de défluxage (à l'entrée de la référence de flux) pour fonctionner en survitesse à puissance constante (mode utilisé pour les faibles charges).

$$\Phi_r^* = \begin{cases} \Phi_{r,nom} & \text{si } \Omega < \Omega_{nom} \\ \frac{\Phi_{r,nom} \Omega_{nom}}{\Omega} & \text{si } \Omega > \Omega_{nom} \end{cases}$$

30

**3. Le moteur asynchrone triphasé**

**Estimateur du flux rotorique, de sa vitesse et de sa position:**

Les grandeurs de sorties utilisées pour l'élaboration d'une commande sont souvent difficilement accessibles pour des raisons techniques (c'est le cas du flux) ou pour des problèmes de coût. Le flux peut être reconstitué par :

- Des estimateurs utilisés en boucle ouverte,
- Des observateurs corrigeant en boucle fermée les variables estimées.

Les estimateurs reposent sur le modèle de la machine définie en régime permanent (estimateur statique) ou transitoire (estimateur dynamique). L'intérêt des estimateurs est la mise en œuvre simple et ils sont rapide. Toutes fois, ils sont peu robustes aux variations paramétriques (résistance rotorique et statorique, mutuelle, etc).

L'équation suivante permet d'estimer le flux rotorique à partir du courant  $i_{sd}$  :

$$\Phi_{rd}(s) = \frac{M}{T_r s + 1} i_{sd}(s)$$

31

**3. Le moteur asynchrone triphasé**

Un estimateur de la vitesse du flux rotorique, peut être donné par:

$$w_s(t) = \frac{M}{T_r} \frac{i_{sq}(t)}{\Phi_{rd}(t) + 0,001} + p\Omega$$

L'estimateur de la position est donné par:

$$\theta_s(s) = \frac{1}{s} w_s(s)$$

**Bloc de découplage par compensation:**

L'objectif est de limiter le couplage des deux axes **d** et **q** **au niveau du stator**. La commande devient découplée et on aura deux systèmes mono variables évoluant en parallèle. Différentes techniques de découplage existent : découplage utilisant un régulateur, découplage par retour d'état, découplage par compensation, ect. Le découplage par compensation est le plus utilisé. Cependant, plusieurs façon peuvent être utilisées pour faire ce découplage par compensation. Le choix dépend de la qualité du correcteur que l'on veut utiliser et de la sensibilité de la commande aux paramètres de la machine.

32



*3. Le moteur asynchrone triphasé*

Les deux équations statoriques sont données par:

$$u_{sd}(t) = L_s \sigma \frac{di_{sd}(t)}{dt} + \left( R_s + R_r \frac{M^2}{L_r^2} \right) i_{sd}(t) - R_r \frac{M}{L_r^2} \Phi_{rd} - w_s L_s \sigma I_{sq}$$

$$u_{sq}(t) = L_s \sigma \frac{di_{sq}(t)}{dt} + \left( R_s + R_r \frac{M^2}{L_r^2} \right) i_{sq}(t) + p\Omega \frac{M}{L_r} \Phi_{rd} + w_s L_s \sigma I_{sd}$$

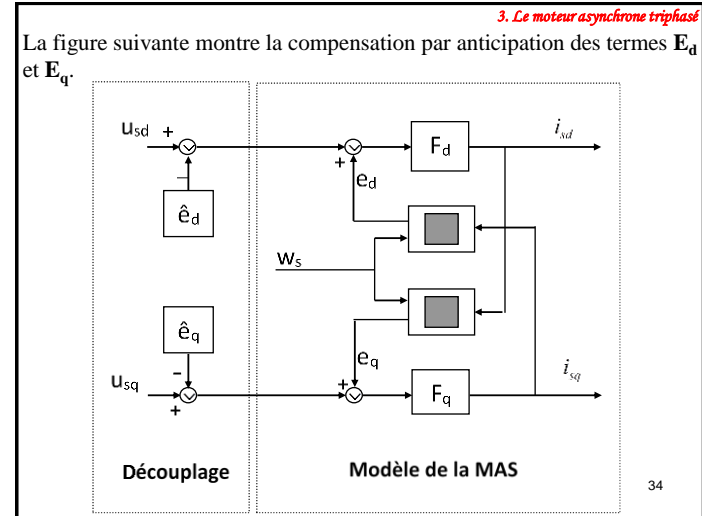
Les fonctions de transfert entre les courants et les tensions sont:

$$F_d = \frac{1}{L_s \sigma s + \left( R_s + R_r \frac{M^2}{L_r^2} \right)} = \frac{i_{sd}}{u_{sd} + E_d}$$

$$F_q = \frac{1}{L_s \sigma s + \left( R_s + R_r \frac{M^2}{L_r^2} \right)} = \frac{i_{sq}}{u_{sq} + E_q}$$

Avec:  $E_d = R_r \frac{M}{L_r} \Phi_{rd} + w_s L_s \sigma I_{sq}$  et:  $E_q = -p\Omega \frac{M}{L_r} \Phi_{rd} - w_s L_s \sigma I_{sd}$

33



*3. Le moteur asynchrone triphasé*

**B- Commande indirecte par orientation du flux rotorique d'une MAS alimentée en courant:**

La commande vectorielle indirecte, proposée par HASSE en 1968, n'a besoin ni de la valeur du flux ni de sa position. En effet, elle contrôle indirectement le flux rotorique en imposant la valeur du courant  $I_{sd}$  et estime sa position en utilisant les courants de références et l'équation d'autopilote. On plus, l'utilisation d'une commande en courant par hystérésis (onduleur de tension commandé en courant) n'a pas besoin du bloc de découplage au niveau du stator puisque les courants seront imposés dans le stator par les correcteur à hystérésis à chaque instant. La méthode indirecte est plus courante (très utilisée) car elle est plus simple à réaliser et elle permet de se passer d'un calculateur ou capteur de flux rotorique. De plus, elle fonctionne correctement sur toute la plage de vitesse. Mais elle est plus sensible aux variations paramétriques que la méthode directe,

35

