

## Chapitre 3 : Stratégies de contrôle et de commande des MAS

### PARTIE I

#### COMMANDE VECTORIELLE DE LA MACHINE ASYNCHRONE

##### 1. Rappels

Une machine asynchrone (MAS) à cage est constituée principalement de deux parties :

**\*Stator :** Le stator est constitué d'un circuit magnétique comportant des encoches où sont logés les trois enroulements statoriques

**\*Rotor :** Le circuit magnétique du rotor est composé de barres , généralement, en cuivre ou en aluminium coulé sous pression et qui sont reliées entre-elles à chaque extrémité par un anneau de court circuit.

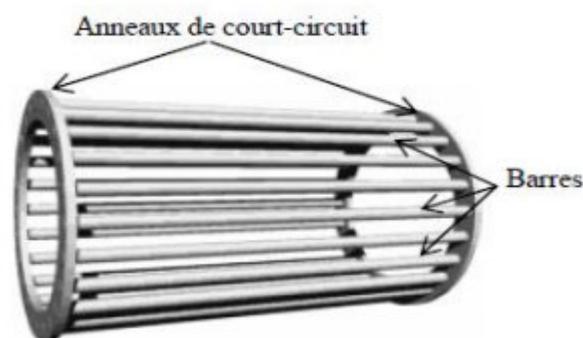


Fig. 1. Rotor à cage

Sa représentation est montrée par la figure 2.

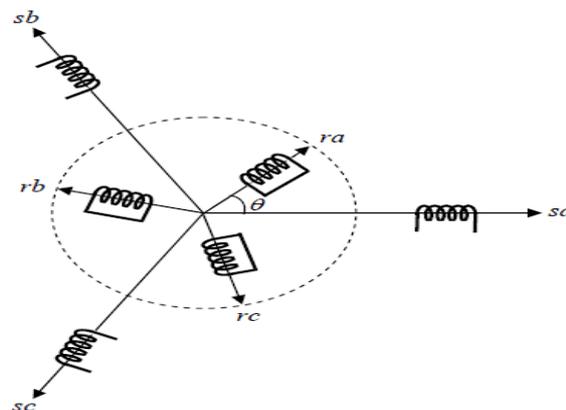


Fig. 2. Représentation spatiale des enroulements de la MAS

Pour la modélisation de la machine asynchrone dans un repère triphasé , on tient compte , généralement, des hypothèses suivantes :

- L'entrefer est constant ;
- On néglige l'effet d'encoche, l'influence de l'effet de peau et de l'échauffement ;
- On considère que la distribution spatiale des forces magnétomotrices dans l'entrefer est sinusoïdale ;
- On ne considère que circuit magnétique est parfaitement feuilleté et non saturé (perméabilité magnétique constante).

Ces hypothèses entraînent que : le champ magnétique soit sinusoïdal, les flux sont additifs vectoriellement et des inductances propres soient constantes.

## 2. Commande vectorielle de la machine asynchrone

### 2.1 Généralités et principe

La Commande vectorielle dite « *commande par orientation de flux* » assure un découplage entre les variables de commande : couple et flux. L'idée de sa mise en existence revient à BLASCHKE en 1971 sous le nom « *commande vectorielle* ».

On distingue deux (2) types de la commande vectorielle:

- méthode directe ( développée par F.Blaschke) ;
- méthode indirecte (développée par K.Hasse) .

#### 2.1.1 Commande vectorielle directe

La position et la norme du flux sont obtenues grâce aux capteurs à effet HALL placés sur les dents de stator (moteur spéciaux). Ceci rend la MAS fragile mécaniquement et de ne pas être adaptée aux vibrations et aux échauffements excessifs.

#### 2.1.2 Commande vectorielle indirecte

Elle n'utilise pas de capteur de flux rotorique mais nécessite l'utilisation d'un capteur ou un estimateur de position (vitesse) du rotor. L'inconvénient majeur de cette méthode est la sensibilité aux variations des paramètres de la machine, principalement, la constante du temps rotorique de la machine et ce due à la saturation magnétique et la variation de température .

Le vecteur du flux rotorique est obtenu indirectement à partir des courants et des tensions statoriques mesurées.

### 2.2 Principe de la commande par orientation de flux rotorique

Le principe est de commander la machine asynchrone d'une façon analogue à la machine à courant continu à excitation séparée (MCC), voir la figure suivante.

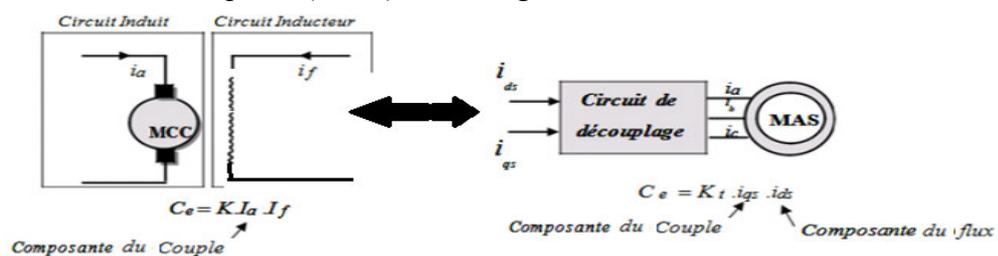


Fig. 3. Analogie entre le MAS et le MCC

Le dispositif balais-collecteur dans la machine à courant continu est remplacé, dans le cas de la machine asynchrone par le système d'autopilotage qui permet de réaliser une harmonie entre la fréquence de rotation et celle des courants induits dans le rotor, telle que la relation suivante soit vérifiée :

$$\omega_s = \omega_r + \omega = P\Omega_r + \omega \quad (1)$$

$$\theta_s = \int \omega_s dt \quad (2)$$

Ainsi, la composante directe des courants statoriques ( $I_{ds}$ ) de la MAS est analogue au courant d'excitation de la machine à courant continu ( $I_f$ ), tandis que la composante indirecte des courants statoriques ( $i_{qs}$ ) est analogue au courant d'induit ( $i_a$ ). En conséquence, les deux composantes  $I_{ds}$  et  $I_{qs}$  sont mutuellement découplées. Pour cela, il faut choisir le référentiel (d, q) lié au champ tournant. Un choix judicieux de l'angle d'orientation du repère «d, q» entraîne l'alignement de l'axe «d» sur la résultante du flux, cet alignement permet l'annulation de la composante transversale du flux comme l'indique dans la figure 4, c'est-à-dire de telle façon que l'axe (d) coïncide avec la direction du flux ( $I_{ds}$ ) et que l'axe (q) coïncide avec la direction de la composante ( $I_{qs}$ ) donnant le couple électromagnétique.

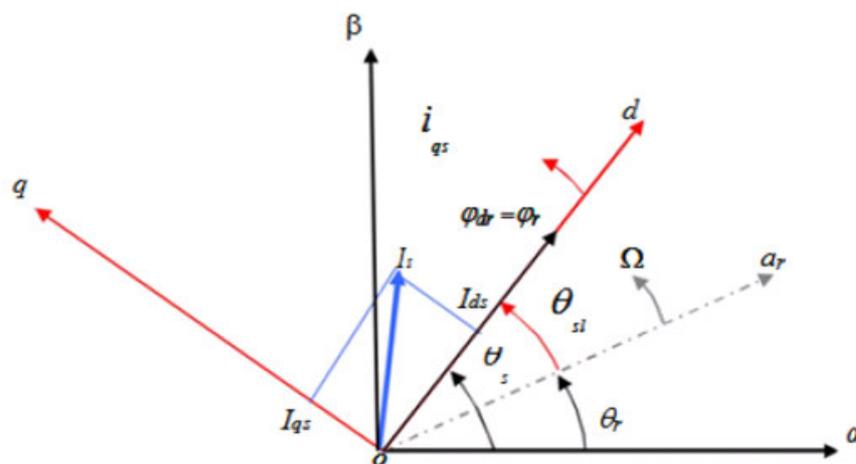


Fig. 4. Orientation du flux

Que la MAS soit alimentée en courant ou en tension, la commande vectorielle peut être réalisée par l'orientation de l'un des trois flux :

❖ Flux rotorique : (3)

$$\phi_{dr} = \phi_r \quad \text{et} \quad \phi_{qr} = 0$$

❖ Flux statorique : (4)

$$\phi_{ds} = \phi_s \quad \text{et} \quad \phi_{qs} = 0$$

❖ Flux d'entrefer : (5)

$$\phi_{d\bar{g}} = \phi_{\bar{g}} \quad \text{et} \quad \phi_{q\bar{g}} = 0$$

Pour les trois référentiels le couple est proportionnel au produit du flux par la composante du courant ( $I_{qs}$ ), mais seul le choix du flux rotorique permet un découplage caractérisé par une indépendance du flux et de la composante du courant en quadrature avec le flux. De plus ce choix permet d'avoir un couple de démarrage important, ce qui justifie le recours à ce type d'orientation du flux.

Soit la mise en équations de la MAS en tenant en compte de l'orientation du flux rotorique :

$$\phi_{dr} = \phi_r \quad \text{et} \quad \phi_{qr} = 0 \quad (6)$$

Sous ces conditions, on déduit le système d'équations ci-dessous, où S désigne l'opérateur de Laplace :

$$\begin{cases} V_{sd} = (R_s + s\sigma L_s)I_{sd} + s\frac{M}{L_r}\phi_r - W_s\sigma L_s I_{sq} \\ V_{sq} = (R_s + s\sigma L_s)I_{sq} + W_s\frac{M}{L_r}\phi_r + W_s\sigma L_s I_{sd} \\ \phi_r = \frac{M}{1 + sT_r} I_{sd} \\ W_r = \frac{M}{T_r\phi_r} I_{sq} \\ Ce = \frac{pM}{L_r}\phi_r I_{sq} \end{cases} \quad (7)$$

### Observations :

- Pour un flux rotorique ( $\phi_r$ ) constant le couple et le flux sont indépendants (contrôle indépendant du couple et du flux);
- L'expression du couple est analogue à celle du couple délivré par la MCC ;
- La vitesse étant facilement mesurable, une boucle de réglage de vitesse (PI régulateur) est réalisable ;
- Le flux étant difficilement mesurable, on réalise donc un contrôle du type à réaction.

Le contrôle du flux est assuré grâce à l'algorithme ci-dessus :

$$\Phi_{r\_ref} = \Phi_{r\_nom} : \text{pour } |\Omega| \leq \Omega_{nom} \quad (8)$$

$$\Phi_{r\_ref} = \frac{\Omega_{r\_nom} \Omega_{nom}}{|\Omega|} \quad (9)$$

Avec :

$\Phi_{r\_ref}$  : flux rotorique de référence .

$\Phi_{r\_nom}$  : flux rotorique de nominal

$\Omega_{ref}$  : vitesse de référencé .

$\Omega_{nom}$  : vitesse de rotation nominal .

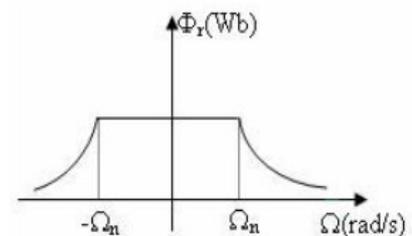


Fig. 5. Contrôle du flux

Ainsi, la figure 6 présente le schéma bloc de la commande vectorielle indirecte d'une MAS alimenté en courant.

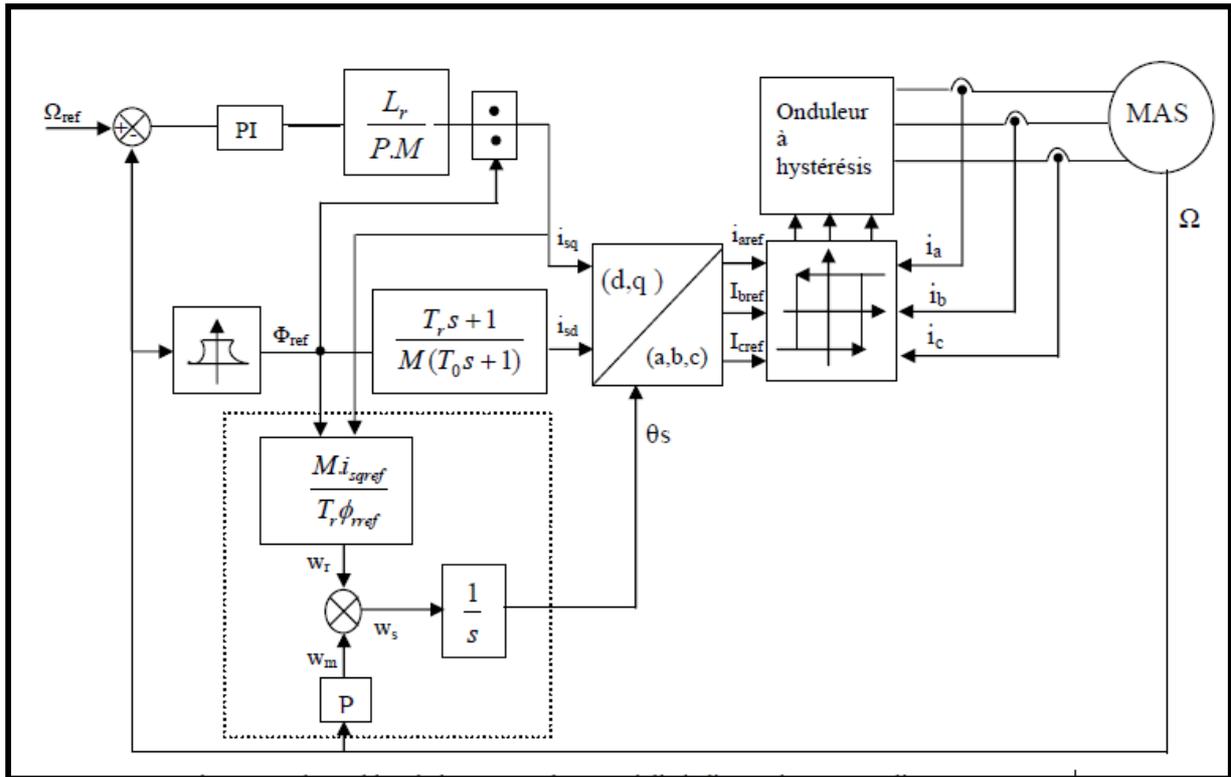


Fig. 6. Structure de commande vectorielle ( alimentation en courant)

### 2.3 Orientations du flux dans une machine asynchrone triphasé commandée en tension

Les équations sont :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{sd} = \sigma L_s \frac{di_{sd}}{dt} + \left( R_s + R_r \frac{M^2}{L_r^2} \right) i_{sd} - \omega_s \sigma L_s i_{sq} - \frac{M}{L_r^2} R_r \Phi_r \\ V_{sq} = \sigma L_s \frac{di_{sq}}{dt} + \left( R_s + R_r \frac{M^2}{L_r^2} \right) i_{sq} - \omega_s \sigma L_s i_{sd} + \frac{M}{L_r^2} P \Omega \Phi_r \\ T_r \frac{d\Phi_r}{dt} + \Phi_r = M i_{sd} \\ \omega_s = P \Omega + \frac{M i_{sq}}{T_r \Phi_r} \end{array} \right. \quad (10)$$

Ces expressions montrent que  $V_{sd}$  et  $V_{sq}$  influent à la fois sur  $i_{sd}$  et  $i_{sq}$  et par conséquent sur le flux et le couple, comme l'illustre la Figure 7.

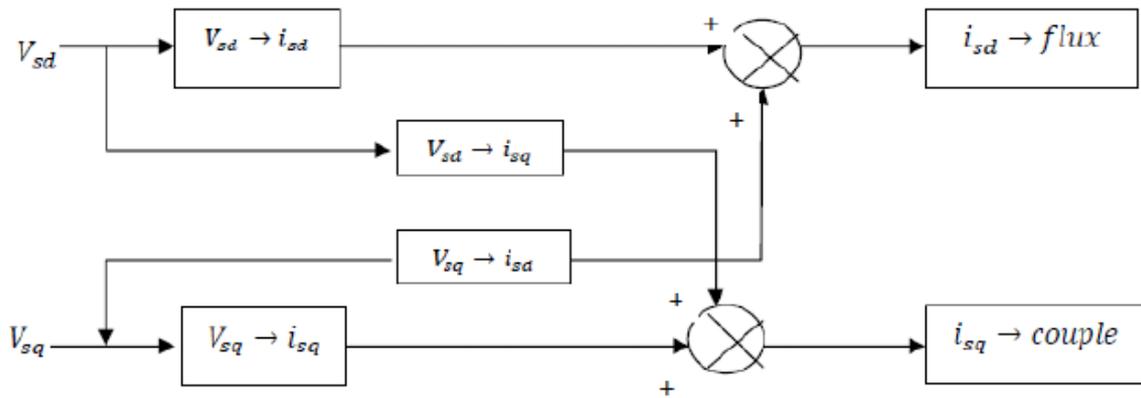


Fig. 7. Présentation graphique du couplage entre le flux et le couple

Le principe est donc de réaliser un découplage entre les grandeurs de commande notamment le flux et le couple.

Pour une orientation du flux rotorique, on obtient les relations suivantes et dont le schéma du bloc de découplage est représenté par la figure\*\*\*\*.

$$\begin{aligned}
 V_{sd} &= \sigma L_s \frac{di_{sd}}{dt} + R_s i_{sd} - \omega_s \sigma L_s i_{sq} + \frac{M}{L_r} \frac{d\Phi_r}{dt} \\
 V_{sq} &= \sigma L_s \frac{di_{sq}}{dt} + R_s i_{sq} + \omega_s \sigma L_s i_{sd} + \omega_s \frac{M}{L_r} \Phi_r \\
 \frac{d\Phi_r}{dt} &= \frac{M}{T_r} i_{sd} \\
 C_e &= \frac{PM}{L_r} \Phi_r i_{sq} \\
 \omega_r &= \frac{M}{T_r} \frac{i_{sq}}{\Phi_r} \\
 J \frac{d\Omega_r}{dt} &= C_e - C_r - f \Omega_r
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

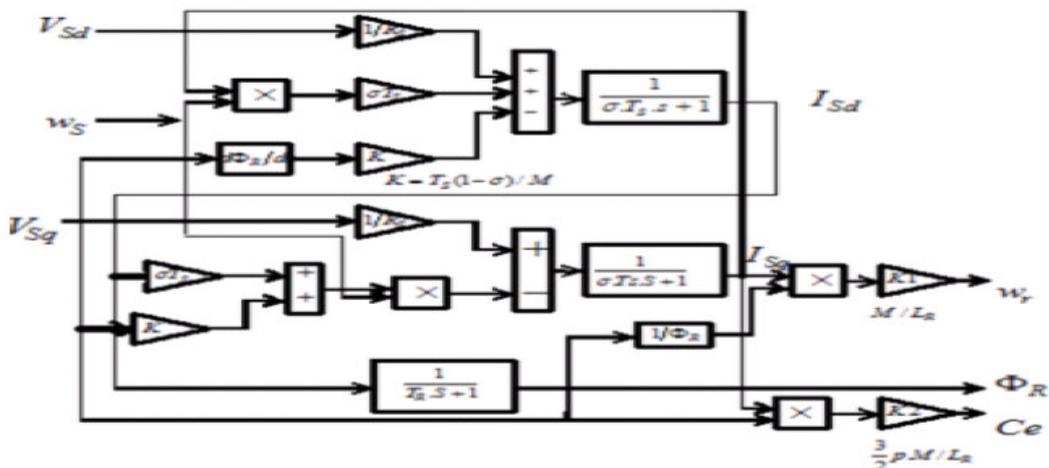


Fig. 8. Structure de la commande par orientation du flux rotorique

## 2.4 Orientation du flux statorique

Dans ce cas, on tient compte des conditions d'orientations suivantes :

- Orientation du flux statorique avec les conditions:

$$\varphi_{ds} = \varphi_s, \varphi_{qs} = 0 \quad (12)$$

Dans le cas d'une alimentation en tension, les équations s'écrivent :

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{M}{L_r} \frac{d\varphi_{dr}}{dt} + \sigma L_s \frac{di_{ds}}{dt} - \omega_s \left( \frac{M}{L_r} \varphi_{qr} + \sigma L_s i_{qs} \right) \quad (13)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{M}{L_r} \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + \sigma L_s \frac{di_{qs}}{dt} - \omega_s \left( \frac{M}{L_r} \varphi_{dr} + \sigma L_s i_{ds} \right) \quad (14)$$

Les courants et flux rotoriques sont exprimées par les relations suivantes:

$$i_{dr} = \frac{\varphi_{ds} - L_s i_{ds}}{M} \quad (15)$$

$$i_{qr} = \frac{\varphi_{qs} - L_s i_{qs}}{M} \quad (16)$$

$$\varphi_{dr} = \frac{L_r \varphi_{ds} - (L_s L_r - M^2) i_{ds}}{M} \quad (17)$$

$$\varphi_{qr} = \frac{L_r \varphi_{qs} - (L_s L_r - M^2) i_{qs}}{M} \quad (18)$$

$$\frac{d\varphi_{ds}}{dt} = -\frac{\varphi_{ds}}{T_r} + \omega_s \varphi_{qs} - \omega_s \sigma L_s i_{qs} + L_s \left( \frac{1+s\sigma T_r}{T_r} \right) i_{ds} \quad (19)$$

$$\frac{d\varphi_{qs}}{dt} = -\frac{\varphi_{qs}}{T_r} - \omega_s \varphi_{ds} + \omega_s \sigma L_s i_{ds} + L_s \left( \frac{1+s\sigma T_r}{T_r} \right) i_{qs} \quad (20)$$

Par orientation du vecteur flux statorique selon l'axe direct « d », on obtient le modèle décrit par:

$$\varphi_s = L_s \left( \frac{1+s\sigma T_r}{1+sT_r} \right) i_{ds} - \omega_{sl} \left( \frac{\sigma L_s T_r}{1+sT_r} \right) i_{qs} \quad (21)$$

$$\omega_{sl} = L_s \left( \frac{1+s\sigma T_r}{T_r} \right) \left( \frac{1}{\varphi_s - \sigma L_s i_{ds}} \right) i_{qs} \quad (22)$$

$$C_{em} = p \frac{M}{L_r} \varphi_s i_{qs} \quad (23)$$

Nous déduisons aussi les tensions de références à partir du système des équations (14) et (15):

$$v_{ds}^* = R_s i_{ds}^* + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} \quad (24)$$

$$v_{qs}^* = R_s i_{qs}^* + \omega_s \varphi_s \quad (25)$$

$$\omega_{sl} = L_s \left( \frac{1+s\sigma T_r}{T_r} \right) \left( \frac{1}{\varphi_s - \sigma L_s i_{ds}^*} \right) i_{qs}^* \quad (26)$$

La vitesse électrique additionnée à la pulsation de glissement donnée par la relation précédente permet de calculer la pulsation  $\omega_s$ .

$$\omega_s = \omega_{sl} + \omega_r \quad (27)$$

### 3. Découplage entrée-sortie

Plusieurs techniques utilisant un régulateur existent pour réaliser le découplage. Parmi lesquelles on cite le technique le découplage par compensation.

#### 3.1 Découplage par compensation

Commençons par définir deux nouvelles variables de commande  $v_{sd\_ref}$  et  $v_{sq\_ref}$ , telles que :

$$\begin{cases} V_{sd} = V_{sd\_ref} - e_{sd} \\ V_{sq} = V_{sq\_ref} - e_{sq} \end{cases} \quad (28)$$

$$\begin{cases} e_{sd} = \omega_s \sigma L_s i_{sq} + \frac{M}{L_r^2} R_r \Phi_r \\ e_{sq} = -\omega_s \sigma L_s i_{sd} - \frac{M}{L_r^2} P \Omega \Phi_r \end{cases} \quad (29)$$

Les tensions  $v_{sd}$  et  $v_{sq}$  sont alors reconstituées, respectivement, à partir des tensions  $v_{sd\_ref}$  et  $v_{sq\_ref}$ , selon la figure suivante :

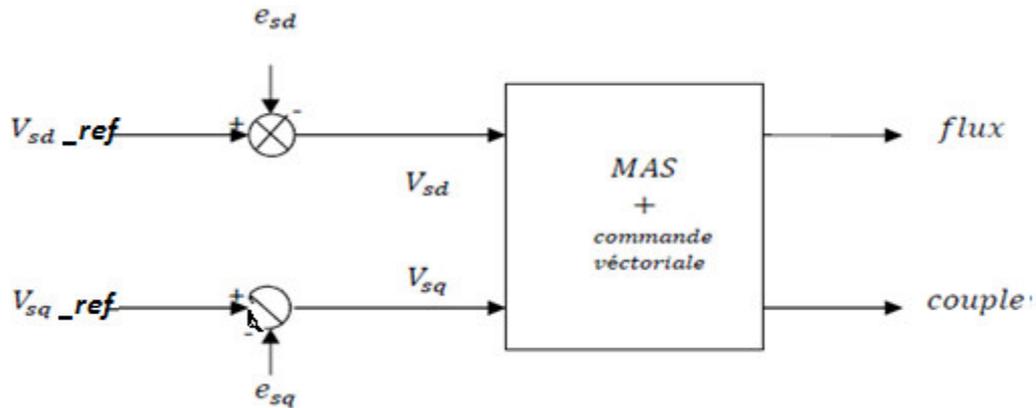


Fig. 9. Reconstitution des tensions

La Fig. 10 montre le schéma bloc de la commande par orientation du flux rotorique avec un découplage entrée sortie.

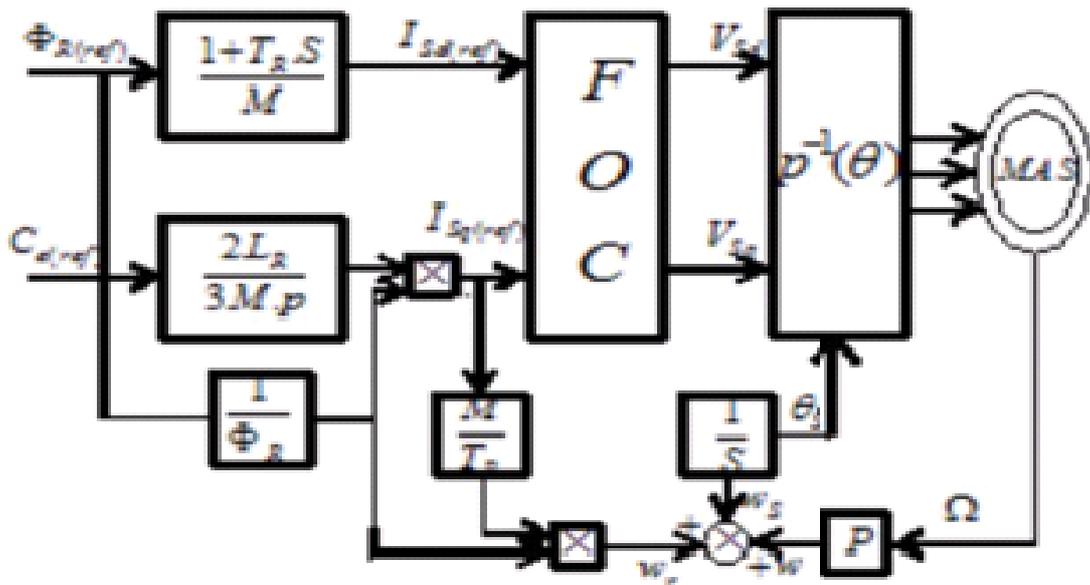


Fig. 10. Commande par orientation du flux avec découplage entrée sortie

## Bibliographie

DOCJP Caron et JP Hautier , « Modélisation et commande de la machine asynchrone par (Livre, Editions TECHNIP)», 1995.

A. Boukhelifa , « les éléments d'optimisation du pilotage d'une machine asynchrone en vue d'un contrôle vectoriel » Doctorat d'État en Electrotechnique De l'École Nationale Polytechnique, 2007.

Y. Bekhouche, R hadj arab, F. Skendraoui, « modélisation et commande vectorielle Par orientation du flux rotorique de la machine asynchrone », Mémoire d'ingénieur d'état en électrotechnique, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2011.

S.E Rezgui , « Commande de machine électrique en environnement Matlab/simulink et temps réel application à la machine asynchrone: commande vectorielle sans capteurs mécaniques svpwm, mode glissant, mras », Mémoire de magister en électrotechnique, Université Mentouri de Constantine, 2009.

A. Meroufel, « Contrôle de la machine asynchrone, Université Djillali Liabès –Sidi Bel-Abbès, Année : 2008/2009.