

# Chapitre II

---

---

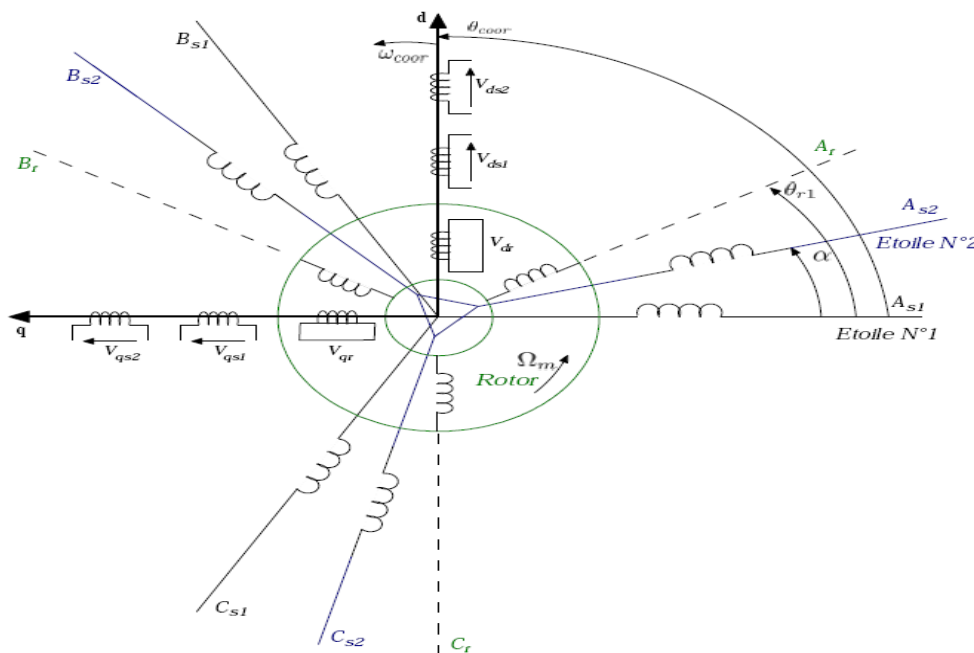
Modélisation, Commande de la  
Machine Asynchrone Double Etoile

## II.1. Introduction

Dans le présent chapitre, nous présenterons la modélisation de la MASDE (alimentation. Nous débuterons par la mise en équation de la MASDE en exprimant les équations électriques, magnétiques et mécaniques qui régissent son fonctionnement dans le référentiel triphasé que l'on notera  $(A, B, C)$ . Nous réduirons l'ordre du système et éliminerons la dépendance qui existe entre les coefficients d'inductances et la position du rotor par la transformation de Park. Cette transformation nous permettra de donner un nouveau modèle de la MASDE dans le référentiel biphasé de Park noté usuellement  $(d, q)$ . Ensuite, nous aborderons la modélisation de l'onduleur de tension et leur commande MLI de type *sinus triangle*. Une série de simulations réalisées à l'aide du logiciel MATLAB/SIMULINK a été envisagée, à la fin de ce chapitre est de présenter la technique de découplage par retour d'état de la commande vectorielle appliquée à la MASDE [11]. Nous présenterons tout d'abord, le principe de la commande à flux orienté et on applique le découplage par retour d'état par la suite, nous nous intéresserons à l'étude de la robustesse du système étudié vis-à-vis des variations paramétriques de la machine.

## II.2. Description d'une MASDE

Comme la machine asynchrone triphasée, la MASDE se compose d'un stator fixe et d'un rotor mobile (à cage d'écureuil), la seule différence est que le stator de la MASDE porte deux enroulements triphasés identiques décalés entre eux d'un angle électrique  $\alpha = \pi/6$  [12].



**Figure II.1 :** Représentation de la machine synchrone à aimants permanents.

La Figure II.1 représente la position des axes d'enroulement des neuf phases constituant la machine. Six axes pour les deux enroulements triphasés (As1, Bs1, Cs1 Etoile 1 et As2, Bs2, Cs2 Etoile 2) du stator et trois axes (Ar, Br, Cr) pour le rotor [13].

### II.3. Modélisation de la Machine Asynchrone Double Etoile

L'étude des systèmes électromagnétiques ne peut se faire que moyennant des hypothèses ou des transformations mathématiques afin d'obtenir un ou plusieurs modèles simplifiés. Les hypothèses usuelles données dans la majorité des références sont adoptées comme suit [11] ,[12] :

- Le circuit magnétique n'est pas saturé et l'effet de Peau et d'hystérésis est négligé. Les flux sont des fonctions linéaires des courants qui leur donnent naissance.
- La force magnétomotrice créée le long de l'entrefer dans chaque phase de l'induit est à répartition spatiale sinusoïdale, on ne considère que le fondamental et on néglige les harmoniques d'espace.
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température.
- On admettra que les deux enroulements triphasés statiques sont équilibrés et identiques.

#### II.3.1. Mise en équations de la MASDE

A partir de la Figure II.1 nous écrivons les équations de la machine Asynchrone Double Etoile dans le repère fixe au rotor :

##### II.3.1.1. Equations électriques

Les équations des tensions des phases statorique (1,2) et rotorique sont représentent:

$$\begin{aligned} [V_{s1}] &= [R_{s1}] [I_{s1}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{s1}] \\ [V_{s2}] &= [R_{s2}] [I_{s2}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{s2}] \\ [V_r] &= [R_r] [I_r] + \frac{d}{dt} [\varphi_r] \end{aligned} \quad (2.1)$$

Les vecteurs des tensions, courants et flux statoriques sont :

Pour l'étoile (01) :

$$\begin{cases} [V_{s1}] = [v_{as1} \ v_{bs1} \ v_{cs1}]^T \\ [I_{s1}] = [I_{as1} \ I_{bs1} \ I_{cs1}]^T \\ [\Phi_{s1}] = [\phi_{as1} \ \phi_{bs1} \ \phi_{cs1}]^T \end{cases} \quad (2.2)$$

Pour l'étoile (02) :

$$\begin{cases} [V_{s2}] = [v_{as2} \ v_{bs2} \ v_{cs2}]^T \\ [I_{s2}] = [I_{as2} \ I_{bs2} \ I_{cs2}]^T \\ [\Phi_{s2}] = [\phi_{as2} \ \phi_{bs2} \ \phi_{cs2}]^T \end{cases} \quad (2.3)$$

Pour le rotor :

$$\begin{cases} [V_r] = [v_{ar} \ v_{br} \ v_{cr}]^T \\ [I_r] = [I_{ar} \ I_{br} \ I_{cr}]^T \\ [\Phi_r] = [\phi_{ar} \ \phi_{br} \ \phi_{cr}]^T \end{cases} \quad (2.4)$$

$[R_{s1}]$ ,  $[R_{s2}]$ ,  $[R_r]$  les matrices des résistances statoriques (étoile 1 et 2) et rotoriques respectivement.

### II.3.1.2. Equations magnétiques

Les hypothèses que nous avons présentées précédemment, conduisant à une matrice des inductances, qui établit les relations linéaires entre les flux et les courants.

$$\begin{aligned} [\Phi_{s1}] &= [L_{s1,s1}][I_{s1}] + [M_{s1,s2}][I_{s2}] + [M_{s1,r}][I_r] \\ [\Phi_{s2}] &= [M_{s2,s1}][I_{s1}] + [L_{s2,s2}][I_{s2}] + [M_{s2,r}][I_r] \\ [\Phi_r] &= [M_{r,s1}][I_{s1}] + [M_{r,s2}][I_{s2}] + [L_{r,r}][I_r] \end{aligned} \quad (2.5)$$

Où, les matrices des inductances sont exprimées comme suit :

$$\begin{aligned} [L_{s1,s1}] &= \begin{bmatrix} L_{s1} + L_{ms} & -L_{ms}/2 & -L_{ms}/2 \\ -L_{ms}/2 & L_{s1} + L_{ms} & -L_{ms}/2 \\ -L_{ms}/2 & -L_{ms}/2 & L_{s1} + L_{ms} \end{bmatrix} \\ [L_{s2,s2}] &= \begin{bmatrix} L_{s2} + L_{ms} & -L_{ms}/2 & -L_{ms}/2 \\ -L_{ms}/2 & L_{s2} + L_{ms} & -L_{ms}/2 \\ -L_{ms}/2 & -L_{ms}/2 & L_{s2} + L_{ms} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$[L_{r,r}] = \begin{bmatrix} L_r + L_{ms} & -L_{ms}/2 & -L_{ms}/2 \\ -L_{ms}/2 & L_r + L_{ms} & -L_{ms}/2 \\ -L_{ms}/2 & -L_{ms}/2 & L_r + L_{ms} \end{bmatrix}$$

$$[M_{s1,s2}] = L_{ms} \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \cos(\alpha + 2\pi/3) & \cos(\alpha + 4\pi/3) \\ \cos(\alpha + 4\pi/3) & \cos(\alpha) & \cos(\alpha + 2\pi/3) \\ \cos(\alpha + 2\pi/3) & \cos(\alpha + 4\pi/3) & \cos(\alpha) \end{bmatrix}$$

$$[M_{s1,r}] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta_{r1}) & \cos(\theta_{r1} + 2\pi/3) & \cos(\theta_{r1} + 4\pi/3) \\ \cos(\theta_{r1} + 4\pi/3) & \cos(\theta_{r1}) & \cos(\theta_{r1} + 2\pi/3) \\ \cos(\theta_{r1} + 2\pi/3) & \cos(\theta_{r1} + 4\pi/3) & \cos(\theta_{r1}) \end{bmatrix}$$

$$[M_{s2,r}] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta_{r2}) & \cos(\theta_{r2} + 2\pi/3) & \cos(\theta_{r2} + 4\pi/3) \\ \cos(\theta_{r2} + 4\pi/3) & \cos(\theta_{r2}) & \cos(\theta_{r2} + 2\pi/3) \\ \cos(\theta_{r2} + 2\pi/3) & \cos(\theta_{r2} + 4\pi/3) & \cos(\theta_{r2}) \end{bmatrix}$$

$$[M_{s2,s1}] = [M_{s1,s2}]^T ; [M_{r,s1}] = [M_{s1,r}]^T ; [M_{r,s2}] = [M_{s2,r}]^T$$

Avec :

$L_{s1}$ : L'inductance propre cyclique de la 1ere étoile ;

$L_{s2}$ : L'inductance propre cyclique de la 2ieme étoile ;

$L_r$ : L'inductance propre cyclique du rotor ;

$L_{ms}$ : La valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle statorique ;

$L_{mr}$ : La valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle rotorique ;

$M_{sr}$ : La valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle entre une étoile et le rotor ;

### II.3.1.3. Equation mécanique

L'expression du couple électromagnétique est obtenue par la dérivation de la Co énergie par rapport au l'angle  $\theta_{r1}$  [14] [15]

$$C_{em} = [I_{s1}]^T \frac{\delta}{\delta \theta_{r1}} \{ [M_{s1,r}] [I_r] \} + [I_{s2}]^T \frac{\delta}{\delta \theta_{r1}} \{ [M_{s2,r}] [I_r] \} \quad (2.6)$$

Finalement, la relation entre la dérivée de la vitesse et les couples électromagnétique et résistant) a été complétée par l'équation suivante :

$$\frac{d\Omega_m}{dt} = \frac{1}{J} (C_{em} - C_r - K_f \Omega_m) \quad (2.7)$$

$$\theta_{r1} = \Omega_m t + \theta_0 \quad (2.8)$$

Avec :

$J$  : le moment d'inertie de la machine ;

$C_{em}$  : le couple électromagnétique ;

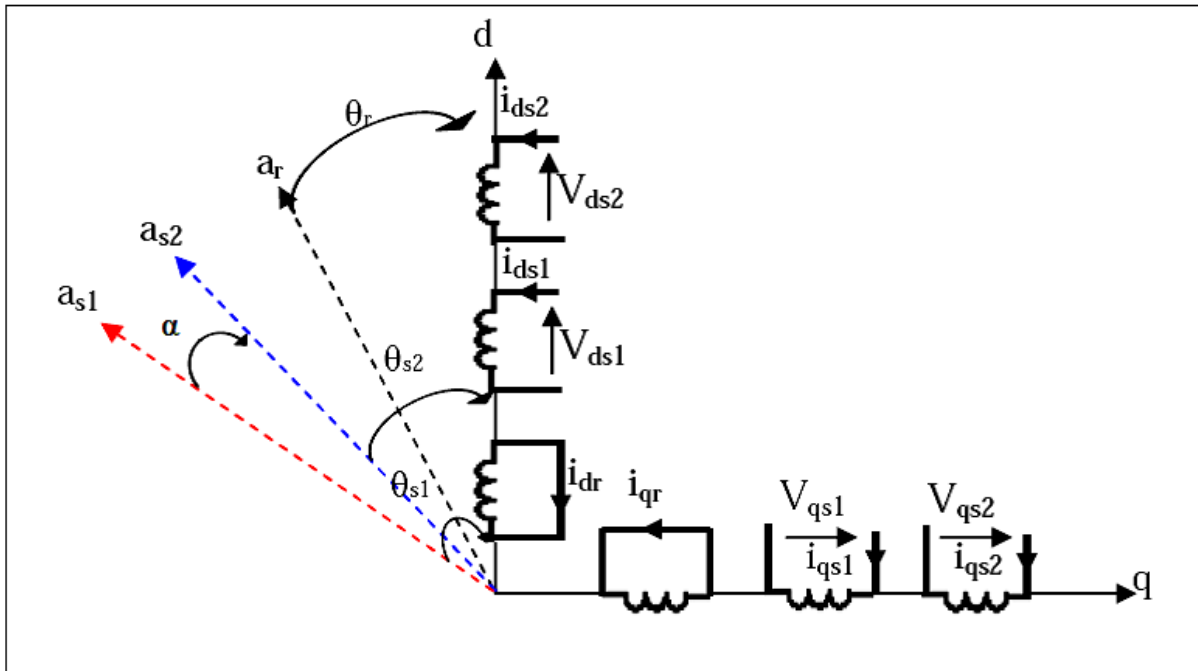
$C_r$  : le couple résistant (couple de la charge) ;

$K_f$  : le coefficient de frottement ;

$\theta_0$  : la position initiale du rotor par rapport au l'étoile 1.

#### II.3.1.4. Transformation de PARK

Le modèle de la machine Asynchrone Double Etoile est basé sur la transformation de PARK qui permet d'obtenir un système équivalent formé de deux enroulements orthogonaux qui sont situés dans le même plan que les enroulements a, b et c. Avec cette transformation, nous pouvons passer d'une représentation dans le repère triphasé (a, b, c) à une représentation dans un repère cartésien d'axes (d, q) [16], comme nous le montre la figure suivante :



**Figure II.2 :** Schéma équivalent de la MASDE dans le repère (d,q).

Algébriquement, pour le passage du système triphasé au système biphasé, on utilise la relation (2.25) et pour le passage inverse on utilise (2.26).

$$[G_{dq0}] = [A_p][G_{abc}] \quad (2.9)$$

$$[G_{abc}] = [A_p^{-1}][G_{dq0}]$$

Avec :

$$[A_p] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\vartheta) & \cos(\vartheta + 2\pi/3) & \cos(\vartheta + 4\pi/3) \\ -\sin(\vartheta) & -\sin(\vartheta + 2\pi/3) & -\sin(\vartheta + 4\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix}$$

$$[A_p^{-1}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\vartheta) & -\sin(\vartheta) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\vartheta + 2\pi/3) & -\sin(\vartheta + 2\pi/3) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\vartheta + 4\pi/3) & -\sin(\vartheta + 4\pi/3) & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix}$$

Où :  $[G_{abc}]$  est le vecteur assemblé les grandeurs du système triphasé équilibrée,  $[G_{dq0}]$  le vecteur assemblé des grandeurs du système biphasé. L'axe homopolaire est orthogonale au plan (d; q).

### II.3.1.5. Equations des tensions et des flux dans référentiel de PARK

A partir cette transformation, les équations s'écrivent comme:

$$\begin{bmatrix} v_{ds1} \\ v_{qs1} \\ v_{0s1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{s1} & 0 & 0 \\ 0 & R_{s1} & 0 \\ 0 & 0 & R_{s1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds1} \\ i_{qs1} \\ i_{0s1} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ds1} \\ \Phi_{qs1} \\ \Phi_{0s1} \end{bmatrix} + \frac{d\theta_{coor}}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{ds1} \\ \Phi_{qs1} \\ \Phi_{0s1} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$\begin{bmatrix} v_{ds2} \\ v_{qs2} \\ v_{0s2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{s2} & 0 & 0 \\ 0 & R_{s2} & 0 \\ 0 & 0 & R_{s2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds2} \\ i_{qs2} \\ i_{0s2} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ds2} \\ \Phi_{qs2} \\ \Phi_{0s2} \end{bmatrix} + \frac{d(\theta_{rcoor} - \alpha)}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{ds2} \\ \Phi_{qs2} \\ \Phi_{0s2} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Pour le rotor : Le rotor étant en court-circuit c-à-d. que :

$$v_{ar} = v_{br} = v_{cr} = 0$$

$$\begin{bmatrix} v_{dr} \\ v_{qr} \\ v_{0r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \\ i_{0r} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \\ \Phi_{0r} \end{bmatrix} + \frac{d\theta_{rcoor}}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \\ \Phi_{0r} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Avec :

$\theta_{coor}$  : l'angle constitue par les axes  $A_{s1}$  et d, Fig. 2.3 ;

$\theta_{rcoor} = \theta_{coor} - \theta_{r1}$  : l'angle constitue par les axes  $A_r$  et d ;

$\frac{d\theta_{coor}}{dt} = \omega_{coor}$  : la vitesse de rotation du repère (d; q) par rapport à l'étoile 1.

$\frac{d\theta_{rcoor}}{dt} = \omega_{coor} - \omega_r$  : la vitesse de rotation du repère (d; q) par rapport au rotor.

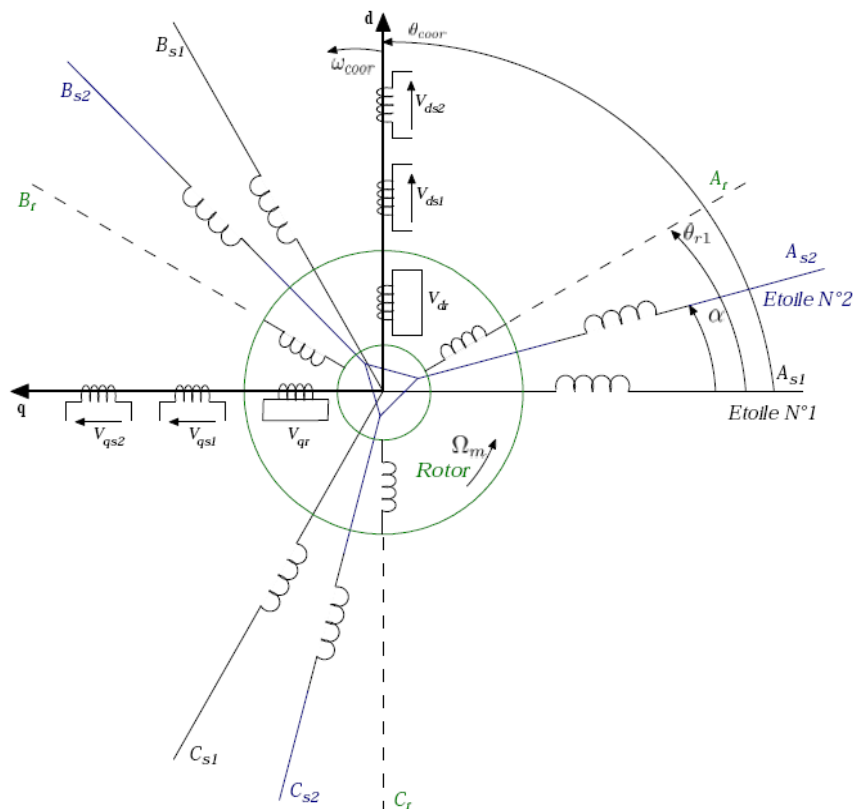
On écrit les relations matricielles (2.10) (2.12) sous forme d'équations comme suit:

$$\begin{aligned}
v_{ds1} &= R_s i_{ds1} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds1} - \omega_{coor} \Phi_{qs1} \\
v_{qs1} &= R_s i_{qs1} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs1} + \omega_{coor} \Phi_{ds1} \\
v_{ds2} &= R_s i_{ds2} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds2} - \omega_{coor} \Phi_{qs2} \\
v_{qs2} &= R_s i_{qs2} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs2} + \omega_{coor} \Phi_{ds2} \\
0 &= R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi_{dr} - (\omega_{coor} - \omega_r) \Phi_{qr} \\
0 &= R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \Phi_{qr} + (\omega_{coor} - \omega_r) \Phi_{dr}
\end{aligned} \tag{2.13}$$

Selon la vitesse de coordonnée  $\omega_{\text{coor}}$ , on distingue trois références : lié au stator ( $\omega_{\text{coor}} = 0$ ), lié au rotor ( $\omega_{\text{coor}} = \omega_r$ ) et lié au champ tournant ( $\omega_{\text{coor}} = \omega_s$ ). Dans notre étude on utilise le référentiel lié au champ tournant pour lui appliquer une commande de vitesse [16].

### II.3.1.6. Equations des Flux

De la même manière, on appliquera la transformation algébrique de Park sur les relations deux ((2.12), (2.13) et (2.14)) nous aboutissons aux équations suivantes :



**Figure II.3 :** Enroulement de la MASDE dans les axes d, q.



$$\begin{aligned}
\Phi_{ds1} &= L_{s1}I_{ds1} + \frac{3}{2}L_{ms}I_{ds1} + \frac{3}{2}L_{ms1}I_{ds2} + \frac{3}{2}M_{sr}I_{dr} \\
\Phi_{qs1} &= L_{s1}I_{qs1} + \frac{3}{2}L_{ms}I_{qs1} + \frac{3}{2}L_{ms}I_{qs2} + \frac{3}{2}M_{sr}I_{qr} \\
\Phi_{ds2} &= L_{s2}I_{ds2} + \frac{3}{2}L_{ms}I_{ds2} + \frac{3}{2}L_{ms}I_{ds1} + \frac{3}{2}M_{sr}I_{dr} \\
\Phi_{qs2} &= L_{s2}I_{qs2} + \frac{3}{2}L_{ms}I_{qs2} + \frac{3}{2}L_{ms}I_{qs1} + \frac{3}{2}M_{sr}I_{qr} \\
\Phi_{dr} &= L_rI_{dr} + \frac{3}{2}L_{mr}I_{dr} + \frac{3}{2}M_{sr}I_{ds1} + \frac{3}{2}M_{sr}I_{ds2} \\
\Phi_{qr} &= L_rI_{qr} + \frac{3}{2}L_{mr}I_{qr} + \frac{3}{2}M_{sr}I_{qs1} + \frac{3}{2}M_{sr}I_{qs2}
\end{aligned} \tag{2.14}$$

On a :  $\frac{3}{2}L_{ms} = \frac{3}{2}L_{mr} = \frac{3}{2}M_{sr} = L_m$

L'ensemble des équations (2.14) sont réécrit comme suit :

$$\begin{aligned}
\Phi_{ds1} &= L_{s1}I_{qs1} + L_m(I_{ds1} + I_{qs1} + I_{dr}) \\
\Phi_{qs1} &= L_{s1}I_{qs1} + L_m(I_{qs1} + I_{qs2} + I_{qr}) \\
\Phi_{ds2} &= L_{s2}I_{ds1} + L_m(I_{ds1} + I_{qs1} + I_{dr}) \\
\Phi_{qs2} &= L_{s2}I_{qs2} + L_m(I_{ds1} + I_{qs1} + I_{qr}) \\
\Phi_{dr} &= L_rI_{dr} + L_m(I_{ds1} + I_{ds2} + I_{dr}) \\
\Phi_{qr} &= L_rI_{qr} + L_m(I_{qs1} + I_{qs2} + I_{qr})
\end{aligned} \tag{2.15}$$

$L_m$  : L'inductance mutuelle cyclique entre l'étoile 1, l'étoile 2 et le rotor.

### II.3.1.7. Expression du couple électromagnétique

$$\begin{aligned}
C_{em} &= p(\Phi_{ds1}I_{qs1} + \Phi_{ds2}I_{qs2} - \Phi_{qs1}I_{ds1} - \Phi_{qs2}I_{ds2}) \\
C_{em} &= pL_m[(I_{qs1} + I_{qs2})I_{dr} - (I_{ds1} + I_{ds2})I_{qr}]
\end{aligned} \tag{2.16}$$

Une autre expression du couple peut être déduite, on introduit les courants rotoriques (2.16) obtenus de (2.14) dans (2.15).

$$I_{dr} = \frac{1}{L_m + L_r} [\Phi_{dr} - L_m(I_{ds1} + I_{ds2})]$$

$$I_{qr} = \frac{1}{L_m + L_r} [\Phi_{qr} - L_m(I_{qs1} + I_{qs2})]$$

$$C_{em} = p \frac{L_m}{L_m + L_r} [(I_{qs1} + I_{qs2}) \Phi_{dr} - (I_{ds1} + I_{ds2}) \Phi_{qr}] \tag{2.17}$$

### II.3.2. Equations d'état de la MASDE

On met le système d'équations avec  $\omega_{coor} = \omega_r$  sous forme d'équation d'état :

$$\dot{X} = AX + BU \quad (2.18)$$

Le vecteur d'état regroupe tous les flux, le vecteur d'entrée (commande) regroupe les tensions statoriques de même ordre que le vecteur de commande. Donc le but est de trouver les deux matrices A et B.

Dans (2.15) on suppose

$$\begin{aligned} \Phi_{md} &= L_m (I_{ds1} + I_{ds2} + I_{dr}) \\ \Phi_{mq} &= L_m (I_{qs1} + I_{qs2} + I_{qr}) \end{aligned}$$

Le système des équations (2.14) devient :

$$\begin{aligned} \Phi_{ds1} &= L_{s1} I_{ds1} + \Phi_{md} \\ \Phi_{qs1} &= L_{s1} I_{qs1} + \Phi_{mq} \\ \Phi_{ds2} &= L_{s2} I_{ds2} + \Phi_{md} \\ \Phi_{qs2} &= L_{s2} I_{qs2} + \Phi_{mq} \\ \Phi_{dr} &= L_r I_{dr} + \Phi_{md} \\ \Phi_{qr} &= L_{s1} I_{qr} + \Phi_{mq} \end{aligned} \quad (2.19)$$

A partir des relations précédentes, on tire :

$$\begin{aligned} I_{ds1} &= (\Phi_{ds1} - \Phi_{md}) / L_{s1} \\ I_{qs1} &= (\Phi_{qs1} - \Phi_{mq}) / L_{s1} \\ I_{ds2} &= (\Phi_{ds2} - \Phi_{md}) / L_{s2} \\ I_{qs2} &= (\Phi_{qs2} - \Phi_{mq}) / L_{s2} \\ I_{dr} &= (\Phi_{dr} - \Phi_{md}) / L_r \\ I_{qr} &= (\Phi_{qr} - \Phi_{mq}) / L_r \end{aligned} \quad (2.20)$$

En introduisant les courants statoriques et rotoriques (2.19) dans (2.20), on aura :

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \Phi_{ds1} &= v_{ds1} - \frac{R_{s1}}{L_{s1}} (\Phi_{ds1} - \Phi_{md}) + \omega_s \Phi_{qs1} \\ \frac{d}{dt} \Phi_{qs1} &= v_{qs1} - \frac{R_{s1}}{L_{s1}} (\Phi_{qs1} - \Phi_{mq}) - \omega_s \Phi_{ds1} \\ \frac{d}{dt} \Phi_{ds2} &= v_{ds2} - \frac{R_{s2}}{L_{s2}} (\Phi_{ds2} - \Phi_{md}) + \omega_s \Phi_{qs2} \\ \frac{d}{dt} \Phi_{qs2} &= v_{qs2} - \frac{R_{s2}}{L_{s2}} (\Phi_{qs2} - \Phi_{mq}) - \omega_s \Phi_{ds2} \end{aligned} \quad (2.21)$$

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt}\Phi_{dr} &= -\frac{R_r}{L_r}(\Phi_{dr} - \Phi_{md}) + \omega_{gl}\Phi_{qs1} \\ \frac{d}{dt}\Phi_{qr} &= -\frac{R_r}{L_r}(\Phi_{qr} - \Phi_{mq}) - \omega_{gl}\Phi_{qs1}\end{aligned}$$

On introduit les courants (2.20) dans (2.21), on trouve :

$$\begin{aligned}\Phi_{md} &= L_a(\Phi_{ds1}/L_{s1} + \Phi_{ds1}/L_{s2} + \Phi_{dr}/L_r) \\ \Phi_{mq} &= L_a(\Phi_{qs1}/L_{s1} + \Phi_{qs2}/L_{s2} + \Phi_{qr}/L_r)\end{aligned}$$

Où :

$$L_a = \frac{1}{(1/L_{s1}) + (1/L_{s2}) + (1/L_r) + (1/L_m)}$$

Le système d'équations (2.21) devient :

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt}\Phi_{ds1} &= v_{ds1} + \frac{L_a - L_{s1}}{T_{s1}L_{s1}}\Phi_{ds1} + \omega_s\Phi_{qs1} + \frac{L_a}{T_{s1}L_{s2}}\Phi_{ds2} + \frac{L_a}{T_{s1}L_r}\Phi_{dr} \\ \frac{d}{dt}\Phi_{qs1} &= v_{qs1} + \frac{L_a - L_{s1}}{T_{s1}L_{s1}}\Phi_{qs1} - \omega_s\Phi_{ds1} + \frac{L_a}{T_{s1}L_{s2}}\Phi_{qs2} + \frac{L_a}{T_{s1}L_r}\Phi_{qr} \\ \frac{d}{dt}\Phi_{ds2} &= v_{ds2} + \frac{L_a - L_{s1}}{T_{s2}L_{s2}}\Phi_{ds2} + \omega_s\Phi_{qs2} + \frac{L_a}{T_{s2}L_{s1}}\Phi_{ds1} + \frac{L_a}{T_{s2}L_r}\Phi_{dr} \\ \frac{d}{dt}\Phi_{qs2} &= v_{qs2} + \frac{L_a - L_{s1}}{T_{s2}L_{s2}}\Phi_{qs2} - \omega_s\Phi_{ds2} + \frac{L_a}{T_{s2}L_{s1}}\Phi_{qs1} + \frac{L_a}{T_{s2}L_r}\Phi_{qr} \\ \frac{d}{dt}\Phi_{dr} &= \frac{L_a}{T_rL_{s1}}\Phi_{ds1} + \omega_{gl}\Phi_{qr} + \frac{L_a}{T_rL_{s2}}\Phi_{ds2} + \frac{L_a - L_r}{T_rL_r}\Phi_{dr} \\ \frac{d}{dt}\Phi_{qr} &= \frac{L_a}{T_rL_{s1}}\Phi_{qs1} - \omega_{gl}\Phi_{dr} + \frac{L_a}{T_rL_{s2}}\Phi_{qs2} + \frac{L_a - L_r}{T_rL_r}\Phi_{qr}\end{aligned} \quad (2.22)$$

Avec :

$T_{s1} = \frac{L_{s1}}{R_{s1}}$ : constante de temps statorique de la première étoile ;

$T_{s2} = \frac{L_{s2}}{R_{s2}}$ : constante de temps statorique de la deuxième étoile ;

$T_r = \frac{L_r}{R_r}$ : constante de temps rotorique ;

$$\omega_{gl} = \omega_s - \omega_r$$

Finalement, nous aboutissons aux matrices suivantes :

$$A = \begin{bmatrix} \frac{L_a - L_{s1}}{T_{s1}L_{s1}} & \omega_s & \frac{L_a}{T_{s1}L_{s2}} & 0 & \frac{L_a}{T_{s1}L_r} & 0 \\ -\omega_s & \frac{L_a - L_{s1}}{T_{s1}L_{s1}} & 0 & \frac{L_a}{T_{s1}L_{s2}} & 0 & \frac{L_a}{T_{s1}L_r} \\ \frac{L_a}{T_{s2}L_{s1}} & 0 & \frac{L_a - L_{s1}}{T_{s2}L_{s2}} & \omega_s & \frac{L_a}{T_{s2}L_{s1}} & 0 \\ 0 & \frac{L_a}{T_{s2}L_{s2}} & -\omega_s & \frac{L_a - L_{s1}}{T_{s2}L_{s2}} & 0 & \frac{L_a}{T_{s2}L_r} \\ \frac{L_a}{T_rL_{s1}} & 0 & \frac{L_a}{T_rL_{s2}} & 0 & \frac{L_a - L_r}{T_rL_r} & \omega_{gl} \\ 0 & \frac{L_a}{T_rL_{s1}} & 0 & \frac{L_a}{T_rL_{s2}} & -\omega_{gl} & \frac{L_a - L_r}{T_rL_r} \end{bmatrix} ; \quad B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Le schéma bloc de ce système est représenté par la Figure II.3 :

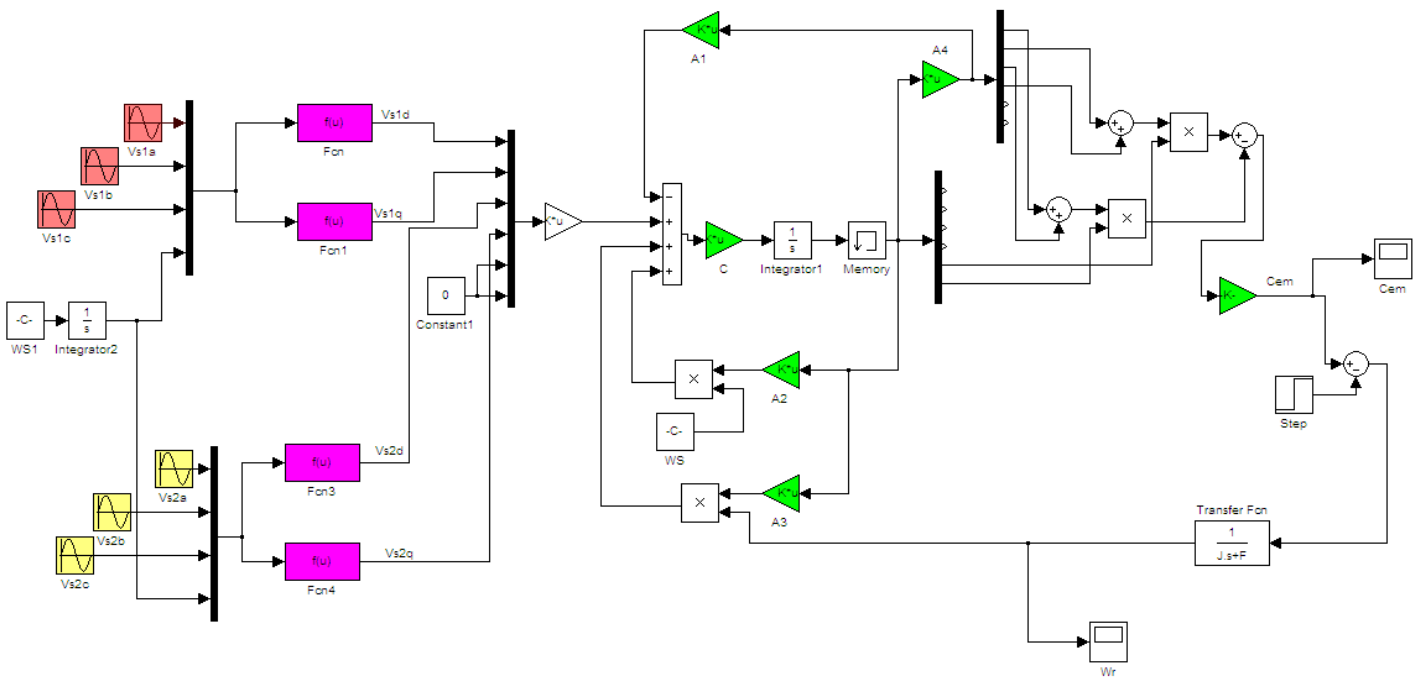


Figure II.4 : Schéma bloc du modèle de la MASDE.

## II.4. Modélisation de l'onduleur de tension

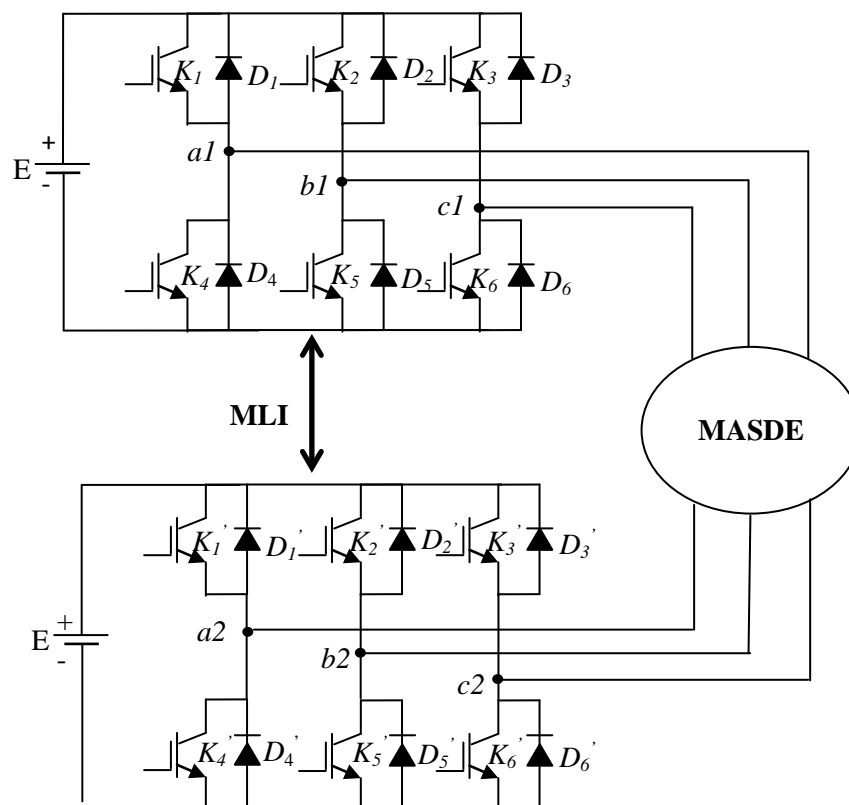
Les onduleurs deviennent de plus en plus importants dans le domaine de l'électronique de puissance. Les entraînements électriques à vitesse variable font également de plus en plus appel aux onduleurs.

Un onduleur de tension triphasé dont les composants semi-conducteurs contrôlables IGBT, et il est constitué de trois bras, de deux interrupteurs pour chacun. Chaque interrupteur est monté en parallèle inverse avec une diode de récupération. Pour assurer la continuité des courants alternatifs et éviter le court-circuit de la source, les interrupteurs K1 et K2, K3 et K4,

K5 et K6 pour l'onduleur 1 et les interrupteurs K1' et K2', K3'et K4', K5' et K6' pour l'onduleur 2 doivent être contrôlés de manière complémentaire [17].

Pour alimenter la MASDE, on utilise deux onduleurs triphasés symétriques.

La Figure II.4 représente l'association de la MASDE avec deux onduleurs de tension triphasés à commande MLI.



**Figure II.5 :** Représentation schématique d'une l'association deux onduleur -MASDE.

Pour simplifier l'étude, on supposera que [17] :

- La commutation des interrupteurs est instantanée.
- La chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable.
- La charge triphasée, est équilibrée, couplée en étoile avec un neutre isolé.

Les ordres de commande de l'onduleur sont transmis aux trois bras par l'intermédiaire des signaux de commande  $c_1$ ,  $c_2$  et  $c_3$ . La convention adoptée pour le fonctionnement du bras  $i$  est la suivante [17] :

Si  $c_i = 1$  : L'interrupteur du haut  $K_i$  est fermé et l'interrupteur de bas  $K_{i+3}$  est ouvert.

Si  $c_i = 0$  : L'interrupteur du haut  $K_i$  est ouvert et l'interrupteur de bas  $K_{i+3}$  est fermé.

Les commandes  $c_i$  de l'onduleur de tension triphasé sont généralement générées par une stratégie de Modulation de Largeur d'Impulsions (MLI).

Si la charge connectée à l'onduleur est équilibrée ( $V_a + V_b + V_c = 0$ ), les tensions phase - neutre s'expriment comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

#### II.4.1. Commande par MLI

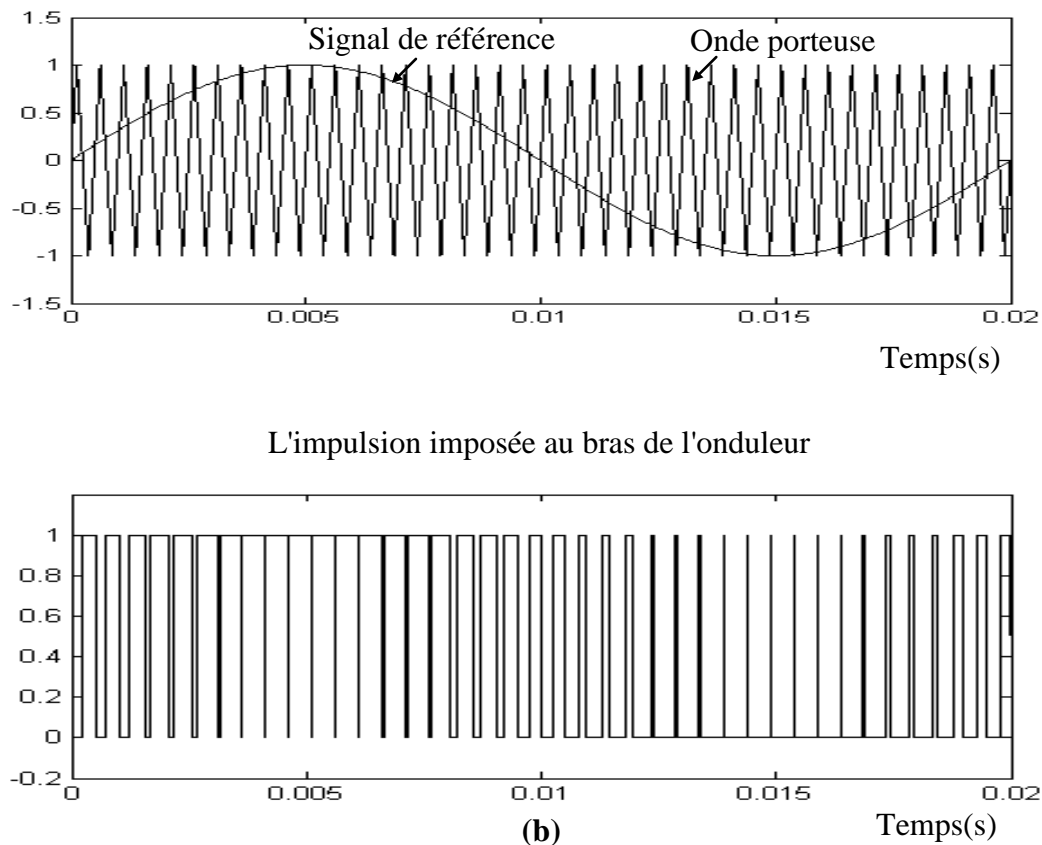
La technique de la *MLI* naturelle repose sur la comparaison entre deux signaux :

- le premier, qui est appelé signal de référence (Modulatrice) représente l'image de la sinusoïde qu'on désire à la sortie de l'onduleur. Ce signal est modulable en amplitude et en fréquence;
- le second, qui est appelé signal de la porteuse (Triangulaire), définit la cadence de la commutation des interrupteurs statiques de l'onduleur. C'est un signal de hautes fréquences (HF) par rapport au signal de référence.

L'onde en impulsion est meilleure que l'onde rectangulaire si:

$$f_{\text{porteuse}} > 20. f_{\text{référence}} \quad (2.24)$$

La Figure II.5 représente deux signaux à MLI générés par la comparaison de deux signaux de la porteuse en triangle ayant deux fréquences différentes 2kHz, avec le même signal de référence sinusoïdal.



**Figure II.6 :** Génération d'une MLI naturelle pour un signal de la porteuse de 2kHz .

## II.5. Résultats de simulation

La simulation consiste à implanter le modèle électromécanique de la MASDE sous L'environnement Matlab/Simulink.

La Figure II.6 montre le comportement du MASDE alimentant par deux onduleur lors de l'application d'une charge de 5 N.m à l' instant  $t=.....$ . On voit que la vitesse prend des oscillations plus importantes que précédemment, mais se stabilise toujours au synchronisme puis déminé après l'application du charge est stabilise d'environ 104.72 rad/s. A vide, le couple électromagnétique présente au démarrage, un pic de 57 N:m et des oscillations, après ce régime, le couple compense les pertes par frottement.

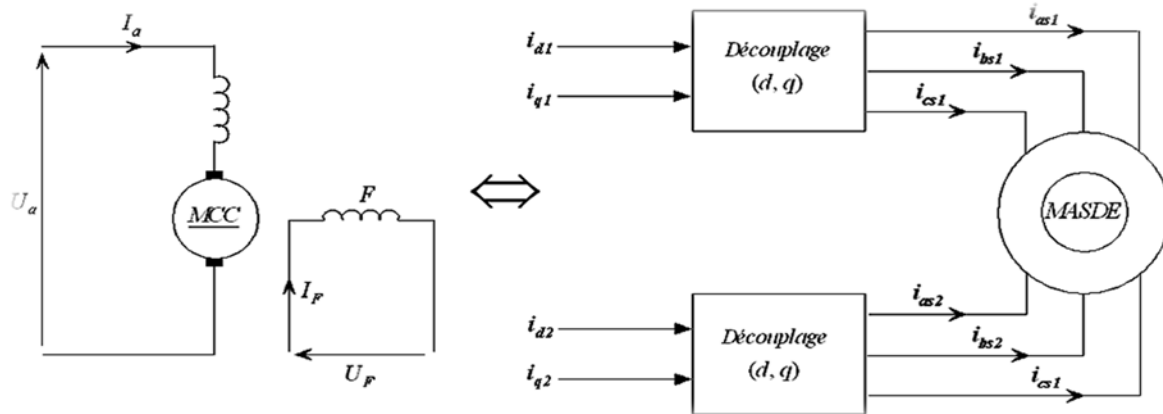
## II.6. Commande Vectorielle

### II.6.1. Principe de la commande vectorielle

La commande par orientation du flux, consiste à régler le flux par une composante directe du Courant et le couple par la composante en quadrature. Dans ce contexte, le choix adéquat du

Système (d, q) est très important. Il doit être adapté à cette commande qui garantit le couplage entre le flux et le couple [18] , [19] .

Le principe de pilotage vectoriel de la MASDE est analogue à celui de la MCC a excitation Séparée. La Figure II.7 représente le schéma du principe de pilotage vectoriel de la MCC et de la MASDE.



**Figure II.7 :** Principe de pilotage vectoriel de la MCC et de la MASDE.

### II.6.2. Choix d'orientation du flux

Il existe trois types d'orientation du flux :

- ❖ Orientation du flux rotorique avec les conditions :  $\Phi_{dr} = \Phi_r$ ;  $\Phi_{qr}=0$
- ❖ Orientation du flux statorique avec les conditions :  $\Phi_{ds} = \Phi_s$ ;  $\Phi_{qs}=0$
- ❖ Orientation du flux d'entrefer avec les conditions :  $\Phi_{dg} = \Phi_g$ ;  $\Phi_{qg}=0$

Dans notre étude, nous sélectionnons le choix de l'orientation du flux rotorique, car elle éliminée l'influences des réactances de fuites rotorique et statorique et donnant de meilleurs résultats et cela permet d'aboutir à un variateur de vitesse où le flux et le couple électromagnétique sont indépendamment commandés à travers les courants statoriques.

### II.6.3. Méthodes de la commande vectorielle

La commande vectorielle de la MASDE peut être soit directe ou indirecte.

#### II.6.3. 1Commande directe

Cette méthode consiste à déterminer la position et le module du flux quel que soit le régime de fonctionnement. Pour cela deux procédés sont utilisés:

- ❖ la mesure du flux dans l'entrefer de la machine {l'aide de capteur, l'inconvénient principal de cette technique réside dans le fait que les capteurs du flux sont mécaniquement très fragiles [20].



- ❖ l'estimation du flux à l'aide des méthodes mathématiques. Cette méthode est sensible aux variations des paramètres de la machine [20].

### II.6.3.2. Commande indirecte

Cette méthode n'utilise pas l'amplitude du flux de rotor mais seulement sa position, elle n'exige pas l'utilisation d'un capteur de flux rotorique mais nécessite l'utilisation d'un capteur ou un estimateur de position (vitesse) du rotor [18]. L'inconvénient majeur de cette méthode est la sensibilité de l'estimation envers la variation des paramètres de la machine due à la saturation magnétique et la variation de la température, surtout la constante de temps rotorique [18].

## II.7. Commande Vectorielle Indirecte de la MASDE

Dans notre étude, on oriente le flux rotorique. Pour la machine asynchrone double étoile, la commande vectorielle consiste à réaliser un découplage des grandeurs génératrices du couple électromagnétique et du flux rotorique. Dans l'expression du couple de la MASDE (2.16), si on fait coïncider le flux rotorique avec l'axe (d) du référentiel lié au champ tournant [24].

$$C_{em} = p \frac{L_m}{L_m + L_r} [(I_{qs1} + I_{qs2}) \Phi_{dr} - (I_{ds1} + I_{ds2}) \Phi_{qr}] \quad (2.25)$$

Après l'orientation du flux rotorique :

$$\Phi_{dr} = \Phi_r ; \Phi_{qr} = 0$$

$$C_{em} = p \frac{L_m}{L_m + L_r} [(I_{qs1} + I_{qs2}) \Phi_r] = k \Phi_r I_{qs}$$

Avec :  $k = \frac{L_m}{L_m + L_r}$  ;  $I_{qs} = I_{qs1} + I_{qs2}$ .

Par l'assimilation de (2.25) et l'expression du couple de la MCC (2.16) on peut dire que les courants d'axe d servent à régler le flux rotorique, alors que les courants d'axe q servent à régler le couple de MASDE.

L'expression du couple électromagnétique de la MCC est donnée par :

$$C_{em} = k \Phi I_a = k' I_a I_f$$

Avec :

$\Phi$  : Le flux imposé par le courant d'excitation  $I_f$  ;  $I_a$  : le courant d'induit ;  $k, k'$  constantes

On applique l'orientation du flux rotorique au système d'équations de tension et du flux dans le repère lié au champ tournant obtenu dans le chapitre 2. L'objectif est de générer des tensions de références pour les convertisseurs statiques de tension alimentant la MASDE. On

notera  $\mathbf{x}^*$  pour les grandeurs de références (couple, flux, tensions et courants). L'application de l'orientation du flux rotorique sur le système d'équations :

$$\begin{aligned}
 I_{dr} &= \frac{1}{L_m + L_r} [\Phi_r - L_m (I_{ds1} + I_{ds2})] \\
 I_{qr} &= \frac{-L_m}{L_m + L_r} (I_{qs1} + I_{qs2}) \\
 \phi_{ds1} &= \lambda_1 I_{ds1} + L_l L_r I_{ds2} + L_l \Phi_r^* \\
 \phi_{qs1} &= \lambda_1 I_{qs1} + L_l L_r I_{qs2} \\
 \phi_{qs2} &= \lambda_2 I_{qs2} + L_l L_r I_{qs1}
 \end{aligned} \tag{2.26}$$

Ou' :

$$\begin{aligned}
 L_l &= \frac{L_m}{L_m + L_r} ; \\
 \lambda_{1,2} &= L_{s1,s2} L_r I_{ds2} + L_l L_r .
 \end{aligned}$$

Et on a :

$$\Phi_r^* = L_m (I_{ds1} + I_{ds2}) \tag{2.27}$$

$$I_{qr} = -\frac{\omega_{gl}^* \Phi_r^*}{R_r} \tag{2.28}$$

L'évolution du flux rotorique est donnée par :

$$\frac{d}{dt} \Phi_r + \frac{R_r}{L_m + L_r} \Phi_r = \frac{R_r L_m}{L_m + L_r} (I_{ds1} + I_{ds2})$$

En remplaçant (2.26), (2.27) et la deuxième équation de (2.24) dans le système d'équations (2.28), on obtient :

$$\begin{aligned}
 v_{ds1}^* &= R_{s1} I_{ds1} + L_{s1} \frac{d}{dt} I_{ds1} - \omega_s^* (L_{s1} I_{qs1} + T_r \Phi_r^* \omega_{gl}^*) \\
 v_{qs1}^* &= R_{s1} I_{qs1} + L_{s1} \frac{d}{dt} I_{qs1} + \omega_s^* (L_{s1} I_{ds1} + \Phi_r^*) \\
 v_{ds2}^* &= R_{s2} I_{ds2} + L_{s2} \frac{d}{dt} I_{ds2} - \omega_s^* (L_{s2} I_{qs2} + T_r \Phi_r^* \omega_{gl}^*) \\
 v_{qs2}^* &= R_{s2} I_{qs2} + L_{s2} \frac{d}{dt} I_{qs2} + \omega_s^* (L_{s2} I_{ds2} + \Phi_r^*)
 \end{aligned} \tag{2.29}$$

Avec les deux expressions suivantes :

$$I_{qs1}^* + I_{qs2}^* = \frac{(L_m + L_r)}{p L_m \Phi_r^*} C_{em}^* \tag{2.30}$$

$$\omega_{gl}^* = \frac{R_r L_m}{(L_m + L_r) \Phi_r^*} (I_{qs1} + I_{qs2}) \quad (2.31)$$

Le système (2.29) constitue de deux termes : le premier terme (2.30) où les tensions de références sont calculées en fonction de plusieurs grandeurs telles que, courants statoriques, la pulsation de synchronisme et de glissement, et le flux rotorique de référence ; le deuxième terme (2.31) montre que les tensions statoriques  $v_{ds1}$ ;  $v_{qs1}$ ;  $v_{ds2}$ ;  $v_{qs2}$  sont directement liées aux courants statoriques  $i_{ds1}$ ;  $i_{qs1}$ ;  $i_{ds2}$ ;  $i_{qs2}$  respectivement. Pour assurer le découplage entre le flux et le couple, des régulateurs de courants statoriques sont introduits de générer les tensions de références [13][21][22].

$$\begin{aligned} v_{ds1c}^* &= \omega_s^* (L_{s1} I_{qs1} + T_r \Phi_r^* \omega_{gl}^*) \\ v_{qs1c}^* &= \omega_s^* (L_{s1} I_{ds1} + \Phi_r^*) \\ v_{ds2c}^* &= \omega_s^* (L_{s2} I_{qs2} + T_r \Phi_r^* \omega_{gl}^*) \\ v_{qs2c}^* &= \omega_s^* (L_{s2} I_{ds2} + \Phi_r^*) \\ v_{ds1l}^* &= R_{s1} I_{ds1} + L_{s1} \frac{d}{dt} I_{ds1} \\ v_{qs1l}^* &= R_{s1} I_{qs1} + L_{s1} \frac{d}{dt} I_{qs1} \\ v_{ds2l}^* &= R_{s2} I_{ds2} + L_{s2} \frac{d}{dt} I_{ds2} \\ v_{qs2l}^* &= R_{s2} I_{qs2} + L_{s2} \frac{d}{dt} I_{qs2} \end{aligned} \quad (2.32)$$

### II.7.1. Régulation du Flux

Le flux rotorique dans cette méthode est règle par une réaction appelée bloc de defluxage, où le flux est généralement maintenu constant a sa valeur nominale  $\Phi_r^n$  pour les vitesses du rotor inferieures ou égale à la vitesse nominale de la machine  $\Omega_m^n$  pour des vitesses supérieures, le flux décroît lorsque la vitesse augmente afin de limiter la tension aux bornes de la machine [23].

$$\Phi_r^* = \begin{cases} \Phi_r^n & \text{si } \Omega_m \leq \Omega_m^n \\ \frac{\Omega_m^n}{\Omega_m} \Phi_r^n & \text{si } \Omega_m > \Omega_m^n \end{cases}$$

### II.7.2. Synthèses des Régulateurs PI

Les régulateurs de courants ont pour but d'assurer une meilleure robustesse vis-à-vis des perturbations internes ou externes. La Figure II.8 montre le schéma fonctionnel de régulation des courants selon les deux axes d [23].

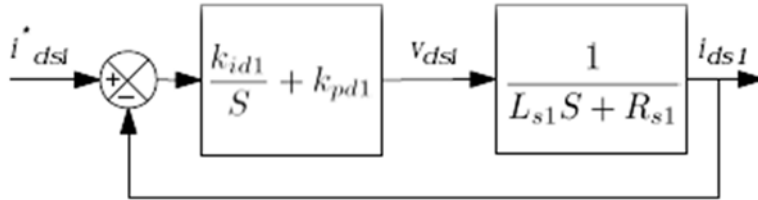


Figure II.8 : Schéma de régulation de courant.

#### Calcul des paramètres du régulateur PI

La fonction de transfert en boucle fermée de la Figure II.8 est écrite comme suit :

$$\frac{I_{ds1}}{I_{ds1}^*} = \frac{K_{id1} + K_{pd1}S}{L_{s1}S^2 + (R_{s1} + K_{pd1})S + K_{id1}} \quad (2.33)$$

On impose une paire de pôles complexes conjugués  $S_{1,2} = \rho_{d1} \mp j\rho_{d1}$  le polynôme

Caractéristique désiré en boucle fermée s écrit comme suit :

$$P(S) = S^2 + 2\rho_{d1}S + 2\rho_{d1}^2 \quad (2.34)$$

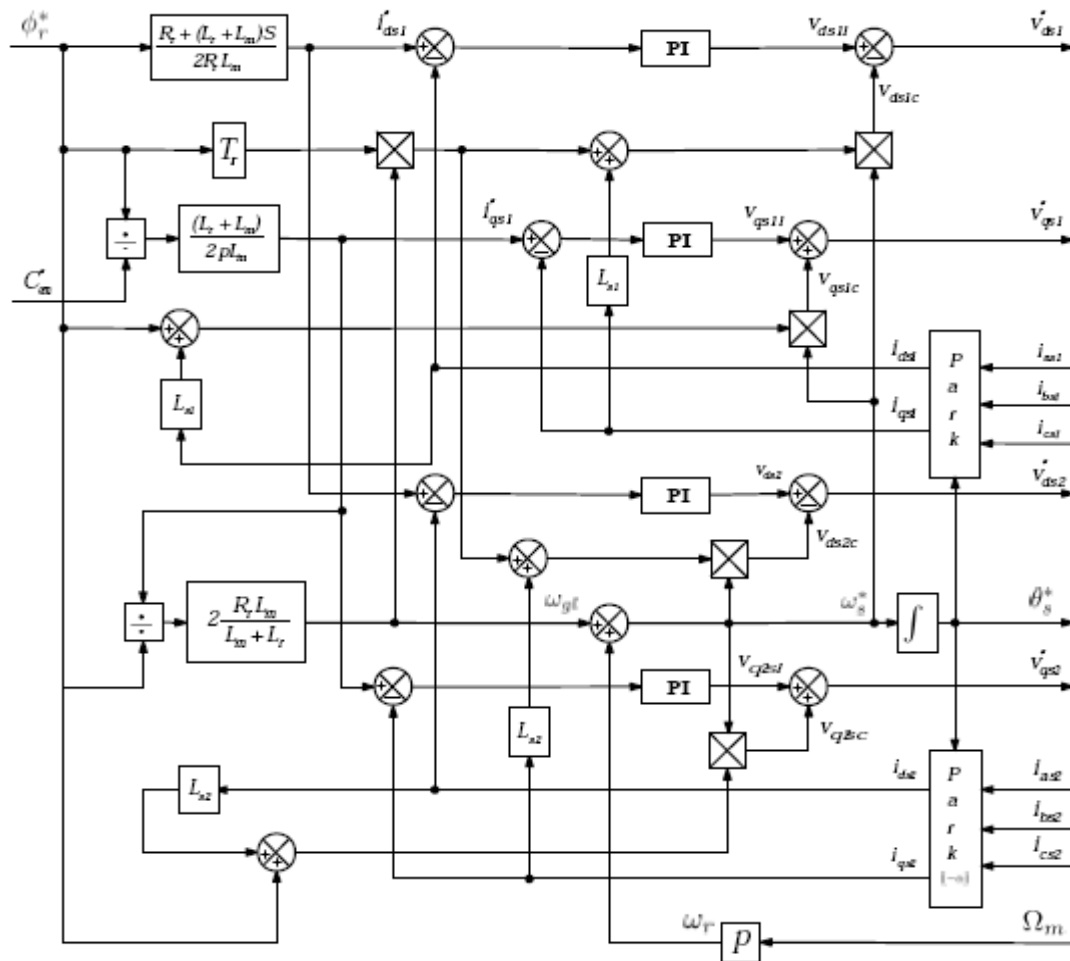
Par identification, nous aboutissons aux paramètres du régulateur PI suivants :

$$K_{pd1} = 2\rho_{d1}L_{s1} - R_{s1}$$

$$K_{id1} = 2\rho_{d1}^2L_{s1}$$

la synthèse des régulateurs de courants forment le schéma bloc de découplage en tension (FOC : Field Oriented Control) Figure II.9 , en admettant que :

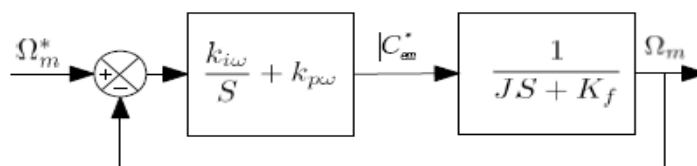
$$I_{ds1} = I_{ds1}^* \text{ et } I_{qs1} = I_{qs1}^*$$



**Figure II.9 : Schéma Bloc de découplage en tension (FOC).**

### II.7.3. Régulateur de Vitesse

Le schéma de régulation de la vitesse est présenté sur la figure suivante Figure II.10 :



**Figure II.10 : Schéma fonctionnel de la régulation de vitesse.**

### Calcul des paramètres du régulateur PI

La fonction de transfert en boucle fermée de l'asservissement de vitesse Figure II.11 est donnée par :

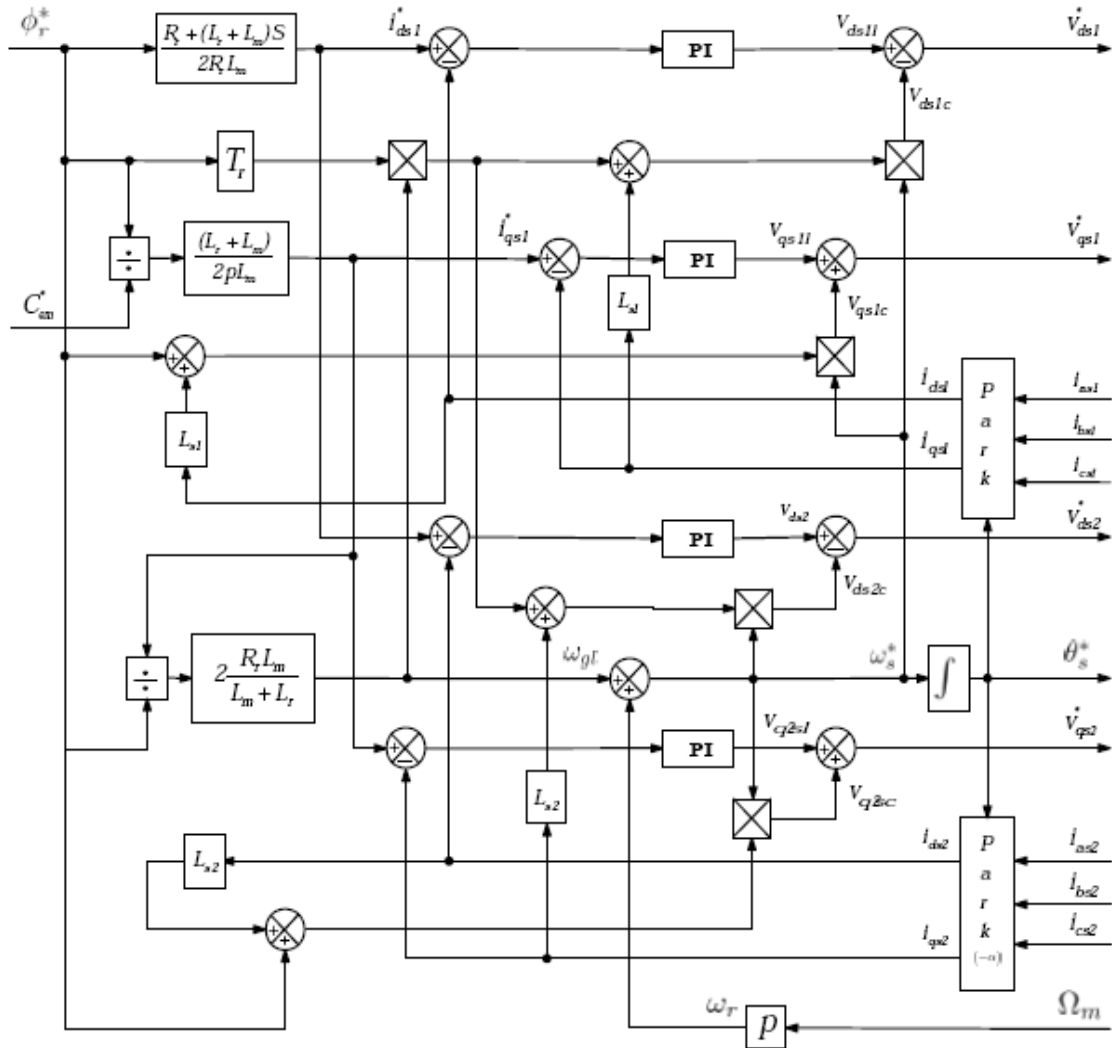
$$\frac{\Omega_m}{\Omega_m^*} = \frac{K_{i\omega} + K_{P\omega}S}{JS^2 + (K_f + K_{P\omega})S + K_{i\omega}} \quad (2.35)$$

Les paramètres du régulateur de vitesse sont calculés par la même méthode utilisée pour déterminer les gains des régulateurs de courants. On aboutit aux paramètres suivants :

$$K_{P\omega} = 2\rho_{\omega} J - K_f$$

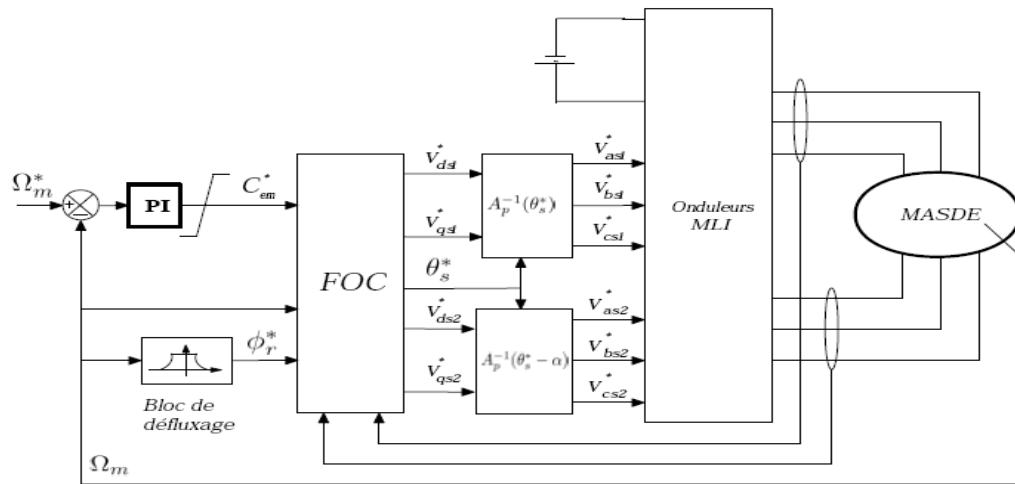
$$K_{i\omega} = 2\rho_{\omega}^2 J$$

La synthèse des régulateurs de courants forment le schéma bloc de découplage en tension (FOC : Field Oriented Control) Figure II.11, en admettant que  $I_{ds1} = I_{ds2}$  et  $I_{qs1} = I_{qs2}$ .



**Figure II.11** : Schéma bloc de régulation de vitesse de la MASDE par la méthode indirecte.

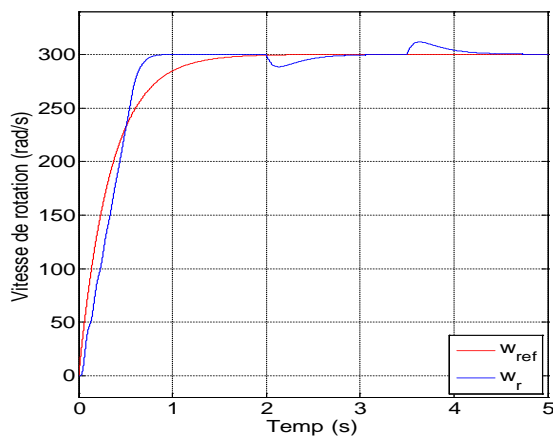
Pour régler la vitesse de la MASDE, on ajoute un régulateur de vitesse au schéma bloc montre dans la Figure II.12. La synthèse de régulateur PI de vitesse est décrite dans la section suivante.



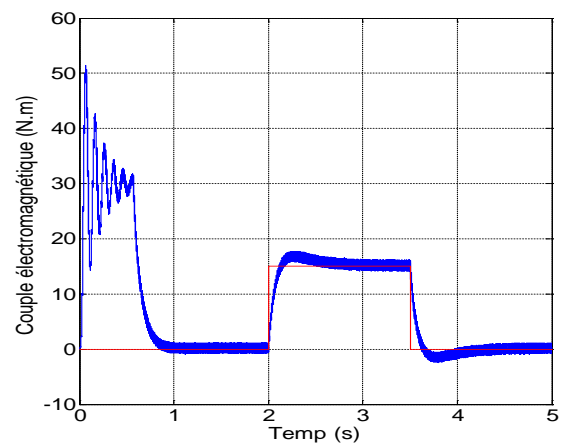
**Figure II.12 :** Schéma bloc de régulation de vitesse de la MASDE par la méthode indirecte.

#### I.7.4. Résultats de simulation

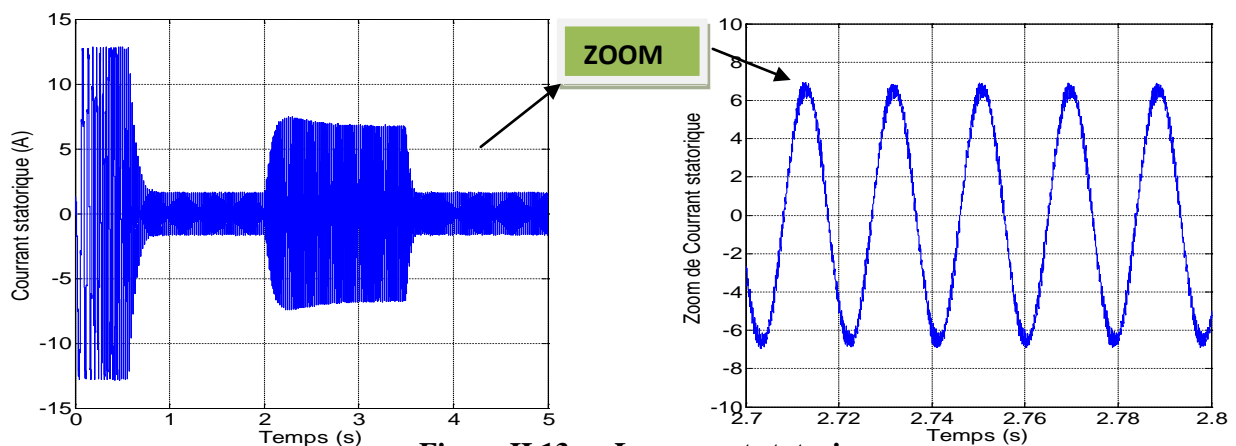
Les simulations présentées dans cette partie sont réalisées sur une machine asynchrone à double étoile alimentée par deux onduleur, La machine commandée vectoriellement par orientation du flux rotorique, est mise en évidence par simulation numérique sous environnement MATLAB/ SIMULINK.



**Figure II.13 a :** La vitesse de rotation



**Figure II.13 b :** Le couple électromagnétique



**Figure II.13 c :** Le courant statorique

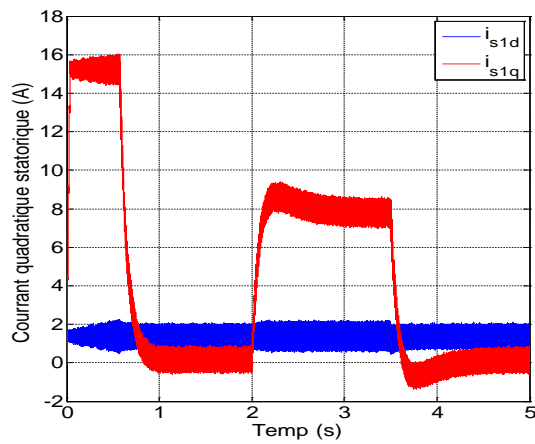


Figure II.13 d : Le courant quadratique  
statorique

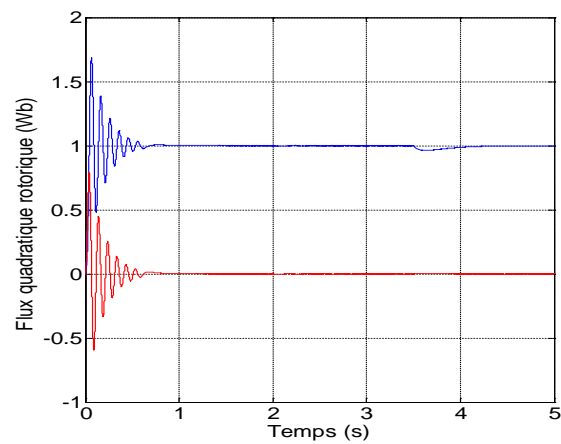


Figure II.13 e : Le flux quadratique  
rotorique

Figure II.13 : Résultats de simulation de la Machine Asynchrone Double Etoile

Les figures II.13 montrent les performances de réglage lors d'un démarrage à vide pour une consigne de référence  $W_{\text{réf}}=300$  rad/s, suivi de l'application de la charges  $C_r = 15$  N.m entre l'intervalle de temps  $t = [2, 3.5]$  s.

L'allure de la vitesse suit parfaitement sa référence qui est atteinte rapidement sans dépassement avec une petite perturbation lorsque on applique un couple résistant a  $t = 2$  s et son élimination a  $t = 3.5$  s. Le temps de réponse est environ 0.7s. L'effet de la perturbation est rapidement éliminé et que le couple électromagnétique se stabilise à la valeur du couple de charge 15 N.m.

Les deux flux rotoriques d'axe d et q suivent les valeurs imposées en régime totalement établi, on dit que le Orientation.

Les deux courant statorique d'axe d et q suivent les valeurs imposées en régime totalement établi et indépendamment de la charge appliquée, on dit que le découplage est parfait.

Le courant de la première étoile  $i_{as1}$  a une valeur crête de 15A en régime transitoire ; en présence de la charge, le courant atteint une valeur crête de 6.2A, la valeur crête à vide est de 2.6A, il présente des harmoniques Ces résultats montrent que le réglage avec les régulateurs PI donne des réponses satisfaisantes par rapport à la grandeur de perturbation

## II.7. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation de la machine synchrone double étoile dans le référentiel de PARK lié au rotor. Dans ce référentiel, les équations électromagnétiques de la MASDE ont considérablement simplifiés et nous permettent d'aborder aisément à la commande vectorielle pour l'asservissement de la vitesse.



On a également présenté la modélisation de l'onduleur de tension et de sa commande à MLI sinus triangle.,a la fin la commande vectorielle indirecte et les résultats de simulation sont présenté.

Pour améliorer le comportement dynamique et statique de la MASDE la commande IFOC par la logique floue, commande par mode glissant, commande par mode glissant floue fera l'objet du chapitre suivant.