

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche**  
**Scientifique Université A.Mira de Bejaia**



**Faculté de Technologie**  
**Département de Génie Electrique**

**Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de Master en**  
**Génie Electrique**

**Spécialité : Machine Electrique**

**Thème**

**Etude des performances des machines**  
**asynchrone à double étoile**

**Réalisé par :**

- YOUSFI Samir
- ADJENNAD Mazigh

**Encadré par : Mr. ADJATI Arezki**

**Membres du jury :**

Mr AOUZELLAG Djamel	M.C.A	Université de Bejaia	président
Mr ALITOUCHE Karim	M.C.A	Université de Bejaia	Examineur

# Remerciements

Avant tout, nous remercierons le bon Dieu qui a illuminé notre chemin et qui nous a armés de force, de sagesse, et de bonne volonté pour achever ce modeste travail et ce cursus universitaire.

Nos premiers remerciements les plus vifs, s'adressent à notre promoteur Monsieur ADJATI Arezki pour sa confiance en acceptant de nous encadrer dans la réalisation de ce travail en dépit de ses occupations. Nous le remercierons aussi d'avoir été compréhensif et patient, de nous avoir accordé une grande autonomie . Merci monsieur pour votre soutien, votre encouragement et votre aide.

Nous tiens aussi à remercier le président et les membres du jury qui nous ont fait l'honneur d'examiner et juger notre travail. Merci à tous les professeurs qui ont déployé leurs efforts pour nous assurer une formation complète et à toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé notre réflexion et ont accepté de nous rencontrer et répondre à nos questions.

Nous adressons également nos vives reconnaissances à tous les membres d'Université  
A. MIRA – BEJAIA.

# **Dédicaces**

*Je dédie ce modeste travail*

*A mon père et ma chère mère pour tous ce qu'ils ont  
faits pour moi durant mes études*

*A mes frères YUCEF, OUARDA, MARIA*

*A mes oncles et mes tantes*

*Ainsi qu'à mes cousins et mes cousines*

*A tous mes chers amis(es) en particulier OMAR, MELISSA,  
RAMTAN*

*Mes professeurs de l'université de Bejaïa*

*A mes amis (es) et à toutes les personnes qui m'ont  
connu...*

*Samir*

# **Dédicaces**

*Je dédie ce modeste travail*

*A mon père et ma chère mère pour tous ce qu'ils  
ont faits pour moi durant mes études*

*A mon frère MASSI*

*A mes oncles et mes tantes*

*Ainsi qu'à mes cousins et mes cousines*

*A tous mes chers amis en particulier TAYEB,  
ABDOU, AHCEN*

*Mes professeurs de l'université de Bejaïa*

*A mes amis (es) et à toutes les personnes qui m'ont  
connu...*

*Mazigh*

# SOMMAIRE

## LISTE DES FIGURES

i

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale	01
-----------------------	----

## CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS SUR LES MACHINES MULTIPHASÉES

I.1	Introduction	02
I.2	Caractéristiques des machines multiphasées	02
I.2.1	Machines multiphasées de « Type 1 »	02
I.2.2	Machines multiphasées de « Type 2 »	03
I.3	Domaine d'application	04
I.4	Avantages de la machine multiphasée	04
I.4.1	La segmentation de puissance	04
I.4.2	La fiabilité	04
I.4.3	Élimination d'harmonique d'espace	04
I.4.4	Minimisation des ondulations du couple et des pertes rotoriques	04
I.4.5	Amélioration du facteur de puissance	05
I.5	Inconvénients de la machine multiphasée	05
I.5.1	Les courants harmoniques de circulation	05
I.5.2	Le coût	05
I.5.3	La commande	05
I.6	Conclusion	05

## CHAPITRE II :

### MODÉLISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE À DOUBLE ÉTOILE (MASDE)

II.1	Introduction	06
II.2	Description de la machine asynchrone à double étoile	06
II.3.1	Hypothèses simplificatrices	07
II.3.2	Modèle de la machine asynchrone à double étoile	07
II.3.2.1	Equations électriques de la machine	07
II.3.2.2	Equations magnétiques	07
II.3.2.3	Equation magnétique développée de la MASDE	09
II.3.2.4	Energie magnétique	09
II.3.2.5	Couple électromagnétique	09
II.3.2.6	Equation mécanique	09
II.3.3	Modèle biphasé de la machine asynchrone à double étoile	09
II.3.3.1	Transformation de PARK directe	09
II.3.3.2	Représentation des divers enroulements	10
II.3.3.2	Choix du référentiel	10
II.3.3.4	Transformation de PARK inverse	11
II.3.3.5	Application de la transformation de PARK à la MASDE	11
II.3.3.5.1	Equations des tensions	11

---

II.3.3.5.2	Equations magnétiques	11
II.3.3.5.3	Equations mécaniques	12
II.3.3.5.3.1	La puissance instantanée	12
II.3.3.5.3.2	Couple électromagnétique	12
II.3.3.5.3.3	Equation mécanique	12
II.4	Nécessité d'alimenter la MASDE par des onduleurs de tension	13
II.4.1	Modélisation de l'onduleur	13
II.4.2	Commande par modulation des largeurs d'impulsions sinus-triangle	13
II.5	Conclusion	14

## **CHAPITRE III :**

### **SIMULATION NUMÉRIQUE DE LA MASDE**

#### **ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS**

III.1	Introduction	15
III.2	Simulation numérique de la MASDE alimentée par le réseau électrique	15
III.2.1	Sources de tension alimentant les deux étoiles de la machine	15
III.2.1.1	Source de tension alimentant la première étoile	15
III.2.1.2	Source de tension alimentant la deuxième étoile	15
III.2.2	Vitesse de rotation et vitesse de synchronisme	16
III.2.3	Couple électromagnétique	17
III.2.4	Flux rotorique	17
III.2.5	Courants direct et en quadrature	18
III.2.6	Courants statoriques	19
II.3	Alimentation de la MASDE par des onduleurs de tension	21
II.3.1	Commande par modulation des largeurs d'impulsions sinus-triangle	21
II.3.2	Association « Onduleurs – MASDE »	21
II.3.3	Vitesse de rotation	24
II.3.4	Couple électromagnétique	26
II.3.5	Flux rotorique	26
II.3.6	Courants directs et en quadrature	26
II.3.7	Courants statoriques	26
II.4	Conclusion	26

### **CONCLUSION GÉNÉRALE**

Conclusion générale	27
---------------------	----

### **BIBLIOGRAPHIE**

Bibliographie	28
---------------	----

---

## LISTE DES FIGURES

## Chapitre I : Généralités sur les machines multiphasées

<i>N° de la Figure</i>	<i>Titre de la Figure</i>	<i>N° de Page</i>
I.1	Machines multiphasées de type « 1 »	03
I.2	<i>Machines multiphasées de type « 2 »</i>	03

## Chapitre II : Modélisation de la machine asynchrone à double étoile (MASDE)

II.1	<i>Représentation des enroulements de la machine asynchrone à double étoile</i>	06
II.2	<i>Représentation angulaire des systèmes d'axe dans l'espace électrique</i>	10
II.3	<i>Alimentation du stator par onduleurs de tension</i>	13

## Chapitre III : Simulation numérique de la MASDE et interprétation des résultats

III.1	<i>Allure des deux sources de tensions triphasées décalées de 30°</i>	16
III.2	<i>Vitesse de rotation [rd/s] et Vitesse de synchronisme [rd/s]</i>	16
III.3	<i>Couple électromagnétique [Nm] et Couple résistant [Nm]</i>	17
III.4	<i>Flux direct rotorique [Wb]</i>	18
III.5	<i>Flux en quadrature rotorique [Wb]</i>	18
III.6	<i>Composante directe du courant <math>I_{d1}</math> &amp; <math>I_{d2}</math></i>	19
III.7	<i>Composante en quadrature du courant <math>I_{q1}</math> &amp; <math>I_{q2}</math></i>	19
III.8	<i>Courant statorique <math>i_{a1}</math></i>	20
III.9	<i>Allure du courant et de la tension en fonctionnement 'Moteur'</i>	20
III.10	<i>Allure du courant et de la tension en fonctionnement 'Générateur'</i>	20
III.11	<i>Principe de modulation de largeurs d'impulsions sinus-triangle</i>	21
III.12	<i>Les fonctions sinus-triangle</i>	22
III.13	<i>Tension simple <math>V_{an1}</math></i>	22
III.14	<i>Vitesse de rotation <math>\Omega</math> [rad/s] &amp; Vitesse de synchronisme <math>\Omega_s</math> [rad/s]</i>	22
III.15	<i>Couple électromagnétique [Nm] &amp; Couple résistant [Nm]</i>	23
III.16	<i>Flux direct rotorique [Wb]</i>	23
III.17	<i>Flux en quadrature rotorique [Wb]</i>	23
III.18	<i>Courants directs</i>	24
III.19	<i>Courants en quadratures</i>	24
III.20	<i>Courant statorique <math>i_{a1}</math></i>	25
III.21	<i>Courant statorique <math>i_{a1}</math> 'à vide'</i>	25
III.22	<i>Courant statorique <math>i_{a1}</math> 'en charge'</i>	25

## Introduction Générale

La machine à courant alternatif présente de nombreux avantages, notamment, en ce qui concerne la simplicité de leur construction et le large domaine de leur utilisation. La robustesse, la fiabilité électromécanique et son faible coût la propulse à être la plus utilisée pour des entraînements à vitesse variable et élevée.

Les machines polyphasées possèdent un nombre élevé de phases où les contraintes appliquées aux interrupteurs et aux bobinages sont considérablement réduites. Cette segmentation de puissance permet l'utilisation de composants de puissance ayant une haute fréquence de commutation, ce qui réduit le taux d'harmonique du courant et du couple.

Une machine asynchrone à double étoile, en configuration classique à deux enroulements triphasés identiques. Les deux étoiles partagent le même stator et sont décalées de  $30^\circ$ . Ces enroulements ont le même nombre de pôles et fonctionnent à la même fréquence. La structure du rotor reste la même que celle de la machine triphasée.

Au milieu industriel, des onduleurs de tension sont utilisés pour l'alimentation des six enroulements statoriques provoquant des harmoniques de courant, ce qui engendre des pertes supplémentaires.

Au premier chapitre de ce modeste travail, des généralités sur les machines multiphasées seront illustrées, ainsi que ses avantages et ses inconvénients.

Le second chapitre traitera la machine asynchrone double étoile (MASDE), par une modélisation, en vue de son contrôle. Pour pouvoir faire varier la vitesse de rotation des moteurs, des onduleurs de tensions commandés par la technique de modulation de largeurs d'impulsions seront utilisés.

Le chapitre trois sera conçu pour suivre le comportement de la machine et l'évolution des différents paramètres, la caractérisant. D'abord par une alimentation directement par le réseau et ensuite par utilisation des onduleurs de tension.

L'utilisation d'un outil de simulation, à savoir, le logiciel Matlab « SIMULINK », nous permettra de suivre le comportement de cet actionneur. Les résultats des diverses simulations seront commentés. En final, une conclusion générale couronnera ce modeste travail.

# Chapitre I

## Généralités sur les machines multiphasées

### I.1 Introduction

Les machines triphasées à courant alternatif sont des actionneurs robustes de simple fabrication utilisées fortement dans le milieu industriels. L'utilisation des onduleurs de tension de commande en « Modulation de Largeur d'Impulsion » permettent une variation de la vitesse de rotation des moteurs avec de très bonnes performances [1, 2].

Pour des fortes puissances, les onduleurs doivent commuter des courants importants, ce qui nécessite l'utilisation de plusieurs structures en parallèle. La réduction des courants à commuter cause l'augmentation des tensions provoquant un vieillissement prématuré des isolants [1, 2].

Pour réduire ces tensions élevées, il faut augmenter le nombre de phase en utilisant des machines de structure multi niveaux ayant un nombre de phase supérieur à trois. Ces machines sont nommées « machines à grand nombre de phases » ou « machines multiphasées » [1,2, 3].

### I.2 Caractéristiques des machines multiphasées

Les machines multiphasées sont classées selon le nombre de phase statorique multiple de trois ou pas [4].

#### I.2.1 Machines multiphasées de « Type 1 »

Le nombre de phases statoriques « q » est un multiple de trois tel que :

$$q = 3 \cdot \eta \quad \text{avec } (\eta=1,2,3,\dots,n) \quad (\text{I.1})$$

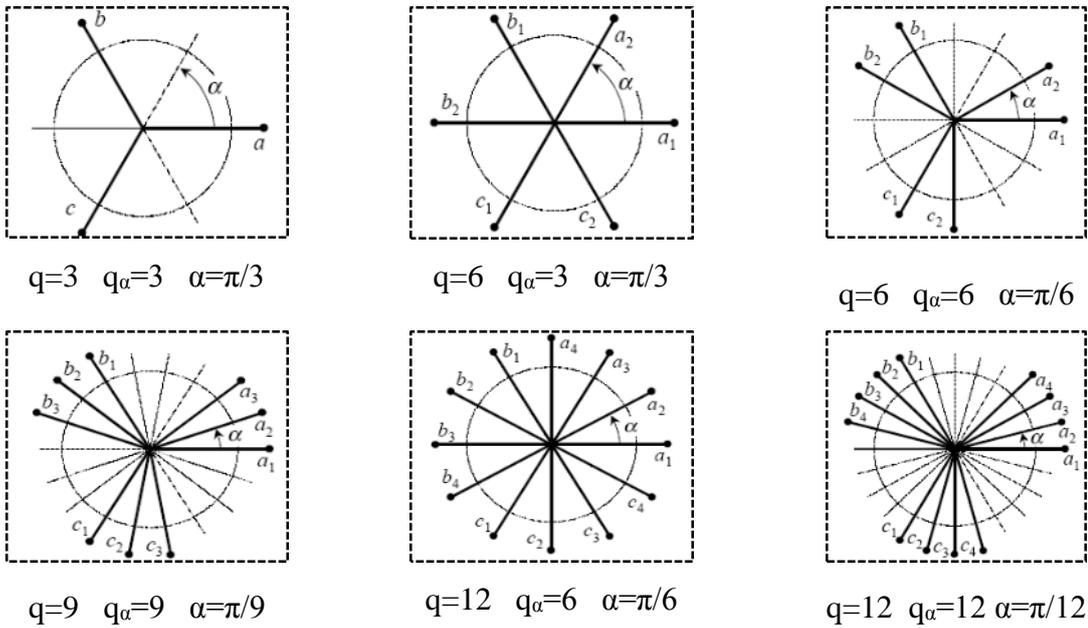
C'est-à-dire la machine possède  $\eta$  étoiles triphasées d'où la nomination de « machine multi étoile ». Il est préférable d'avoir autant de neutres que d'étoiles en fonctionnement normal [3].

Plusieurs configurations sont possibles pour un même nombre de phases, suivant le décalage angulaire ( $\alpha$ ) entre deux bobines adjacentes [2,3].

Il est important d'utiliser le « nombre équivalent de phases » pour différencier entre les possibles configurations. Ce coefficient est donné par :

$$q \times \alpha = \frac{\pi}{\alpha} \quad (\text{I.2})$$

Quelques configurations possibles sont illustrées par les figures suivantes [1, 3] :



q : Nombre de phases       $q_\alpha$  : Nombre équivalent de phases       $\alpha$  : Décalage angulaire

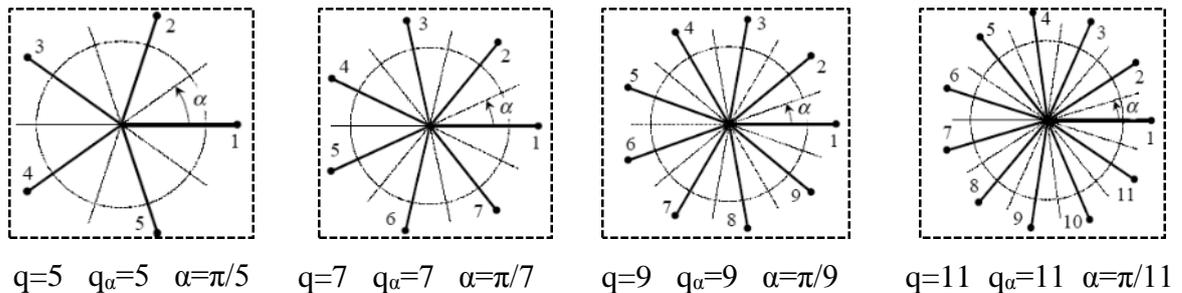
**Figure (I.1) : Machines multiphasées de type « 1 »**

**I.2.2 Machines multiphasées de « Type 2 »**

Ce type regroupe les machines multiphasées ayant un nombre de phases statoriques « q » impair. Les phases sont décalées d'un angle de «  $\frac{2*\pi}{q} = 2 * \alpha$  » avec  $\alpha$  représentant le décalage angulaire entre deux bobines adjacentes.

$$q = q_\alpha = \frac{\pi}{\alpha} \tag{I.3}$$

La figure suivante résume quelques configurations de ce type de machine [1, 3].



**Figure (I.2) : Machines multiphasées de type « 2 »**

### **I.3 Domaine d'application**

La machine multiphasée est utilisée dans la traction ferroviaire et automobile, la marine, l'avionique et l'aérospatial offrant ainsi une sécurité supplémentaire du point de vue fonctionnement, couple, vibration et bruit [1, 5].

Dans l'industrie, ces machines sont présentes comme ventilateurs, compresseurs, moulins de compresseurs, moulins de ciment et comme pompes [1].

### **I.4 Avantages de la machine multiphasée**

#### **I.4.1 La segmentation de puissance**

Lorsque le nombre de phases du stator est augmenté, cela entraîne la diminution du courant par phase sans que la tension par phase ne soit augmentée. La puissance totale est ainsi répartie sur les différentes phases.

L'onduleur alimentant la machine aura des composants de puissance de calibre inférieur, fonctionnant à des fréquences de commutation plus élevées offrant une minimisation des ondulations de courant et de couple [1, 6].

#### **I.4.2 La fiabilité**

La machine multiphasée fonctionne tant qu'au moins trois phases restent actives dans le cas de défaut d'un des bras ou de plusieurs bras de l'onduleur. Ce fonctionnement est connu sous le « régime dégradé » [1].

Il peut y avoir jusqu'à  $(q-3)$  phases ouvertes sans que la connexion du neutre ne soit nécessaire. De ce fait, la machine ayant un très grand nombre de phases offre plus de degré de liberté pour sa commande [7, 8].

#### **I.4.3 Elimination d'harmonique d'espace**

Les harmoniques d'espace d'un certain ordre sont éliminés dans les machines multiphasées. A noter que pour un nombre d'encoches donné, plus le nombre de phases augmente, plus le nombre d'encoches par pôle et phase diminue, cela revient à dire que le facteur de distribution du fondamental augmente [9, 10, 11].

#### **I.4.4 Minimisation des ondulations du couple et des pertes rotoriques**

Les machines multiphasées possèdent la propriété d'éliminer les harmoniques du couple du rang faible. Les ondulations du couple sont, plus rapidement, amorties dans une machine ayant plus de phases.

Du fait que certains harmoniques de courant statorique ne créent pas de force magnétomotrice (f.m.m), donc, n'induisent pas de courant au rotor, la machine multiphasée aura moins de perte rotorique [1, 3].

#### **I.4.5 Amélioration du facteur de puissance**

Le facteur de puissance de la machine asynchrone à double étoile est amélioré par rapport à la machine asynchrone triphasée [1, 3].

### **I.5 Inconvénients de la machine multiphasée**

#### **I.5.1 Les courants harmoniques de circulation**

L'utilisation d'un onduleur de tension cause des harmoniques de courant d'amplitude importante [12].

#### **I.5.2 Le coût**

Le fait que le nombre de phases est augmenté, le nombre des semi-conducteurs utilisés augmente aussi, ce qui engendre un supplément de coût de l'ensemble [9].

#### **I.5.3 La commande**

Les méthodes utilisées pour les machines triphasées doivent être développées pour être appliquées aux machines multiphasées [9].

### **I.6 Conclusion**

Plus le nombre de phases est élevé, plus les interactions entre harmoniques d'espace et de temps sont repoussées vers les rangs supérieurs.

La segmentation de puissance et l'amélioration de la fiabilité sont des avantages des machines multiphasées pour des puissances élevées.

La machine asynchrone à double étoile est la machine multiphasée la plus utilisée compte tenu du compromis convenable existant entre une segmentation de puissance et l'ensemble des convertisseurs utilisés.

## Chapitre II

### Modélisation de la machine asynchrone à double étoile (MASDE)

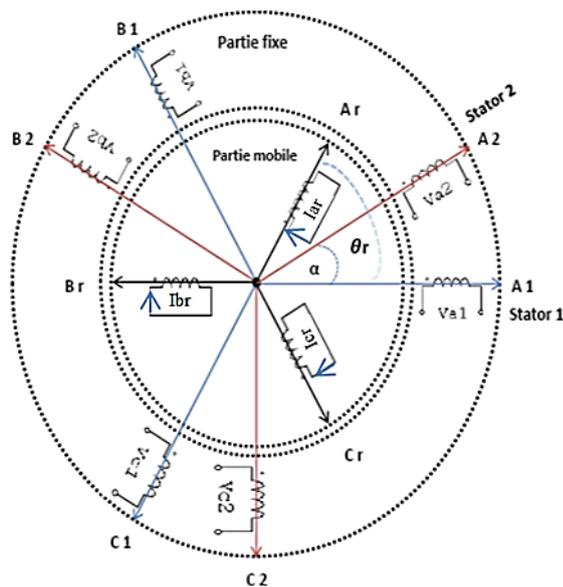
#### II.1 Introduction

Afin de contrôler un système quelconque, le modéliser, c'est concevoir un modèle mathématique de la machine décrivant le comportement électrique et dynamique [1].

#### II.2. Description de la machine asynchrone à double étoile

La machine asynchrone à double étoile se compose de deux stators fixes déphasés d'un angle «  $\alpha=30^\circ$  » et un rotor mobile à cage d'écureuil. Les deux étoiles sont alimentés par deux sources de tensions triphasées de même fréquence et de même amplitude, déphasées entre elles d'un même angle «  $\alpha$  » [1].

L'enroulement rotorique est déphasé d'un angle «  $\theta_r$  » par rapport à la première étoile [3, 13].



*Figure (II.1) : Représentation des enroulements de la machine asynchrone à double étoile*

#### II.3. Modélisation de la machine asynchrone à double étoile

La difficulté de modéliser des phénomènes de saturation magnétique et de l'effet de peau nous pousse à considérer quelques hypothèses simplificatrices pour alléger la formulation mathématique. L'effet de ces hypothèses sur le comportement de la machine est considéré comme négligeable.

### II.3.1. Hypothèses simplificatrices [1, 14]

- La machine est de constitution symétrique et à entrefer d'épaisseur uniforme ;
- La saturation du circuit magnétique est négligée ;
- Les pertes par courants de Foucault et par hystérésis sont négligeables ;
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température ;
- L'effet de peau est négligé ;
- Les inductances propres et mutuelles sont indépendantes des intensités de courant.
- La force magnétomotrice est considérée à répartition sinusoïdale.

### II.3.2. Modèle de la machine asynchrone à double étoile

#### II.3.2.1. Equations électriques de la machine

Les équations de la machine s'écrivent comme suit [1, 15] :

##### a) Première étoile

$$\begin{cases} v_{a1} = R_{s1} \times i_{a1} + \frac{d}{dt} \varphi_{a1} \\ v_{b1} = R_{s1} \times i_{b1} + \frac{d}{dt} \varphi_{b1} \\ v_{c1} = R_{s1} \times i_{c1} + \frac{d}{dt} \varphi_{c1} \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

##### b) Pour l'étoile 2

$$\begin{cases} v_{a2} = R_{s2} \times i_{a2} + \frac{d}{dt} \varphi_{a2} \\ v_{b2} = R_{s2} \times i_{b2} + \frac{d}{dt} \varphi_{b2} \\ v_{c2} = R_{s2} \times i_{c2} + \frac{d}{dt} \varphi_{c2} \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

##### c) Pour le rotor

$$\begin{cases} 0 = R_r \times i_{ar} + \frac{d}{dt} \varphi_{ar} \\ 0 = R_r \times i_{br} + \frac{d}{dt} \varphi_{br} \\ 0 = R_r \times i_{cr} + \frac{d}{dt} \varphi_{cr} \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

#### II.3.2.2. Equations magnétiques

$$\begin{bmatrix} \varphi, abc1 \\ \varphi, abc2 \\ \varphi_r, abc \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_{s1,s1}] & [L_{s1,s2}] & [L_{s1,r}] \\ [L_{s2,s1}] & [L_{s2,s2}] & [L_{s2,r}] \\ [L_{r,s1}] & [L_{r,s2}] & [L_{r,r}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i, abc1 \\ i, abc2 \\ i_r, abc \end{bmatrix} \quad (\text{II.4})$$

La relation (II.4) donne les expressions matricielles des flux mis en jeu en fonction des divers courants [1, 15].

**a) Matrice inductance de l'étoile 1**

$$[L_{s1,s1}] = \begin{bmatrix} L_{s1} + L_{ms} & \frac{-1}{2}L_{ms} & \frac{-1}{2}L_{ms} \\ \frac{-1}{2}L_{ms} & L_{s1} + L_{ms} & \frac{-1}{2}L_{ms} \\ \frac{-1}{2}L_{ms} & \frac{-1}{2}L_{ms} & L_{s1} + L_{ms} \end{bmatrix}$$

**b) Matrice inductance de l'étoile 2**

$$[L_{s2,s2}] = \begin{bmatrix} L_{s2} + L_{ms} & \frac{-1}{2}L_{ms} & \frac{-1}{2}L_{ms} \\ \frac{-1}{2}L_{ms} & L_{s2} + L_{ms} & \frac{-1}{2}L_{ms} \\ \frac{-1}{2}L_{ms} & \frac{-1}{2}L_{ms} & L_{s2} + L_{ms} \end{bmatrix}$$

**c) Matrice inductance du rotor**

$$[L_{r,r}] = \begin{bmatrix} L_r + L_{mr} & \frac{-1}{2}L_{mr} & \frac{-1}{2}L_{mr} \\ \frac{-1}{2}L_{mr} & L_r + L_{mr} & \frac{-1}{2}L_{mr} \\ \frac{-1}{2}L_{mr} & \frac{-1}{2}L_{mr} & L_r + L_{mr} \end{bmatrix}$$

**d) Matrice inductance mutuelle entre l'étoile 1 et l'étoile 2**

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

**e) Matrice inductance mutuelle entre l'étoile 1 et le rotor**

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

**f) Matrice inductance mutuelle entre l'étoile 2 et le rotor**

$$[L_{s2,r}] = L_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \alpha) & \cos(\theta - \alpha + 2\pi/3) & \cos(\theta - \alpha + 4\pi/3) \\ \cos(\theta - \alpha + 4\pi/3) & \cos(\theta - \alpha) & \cos(\theta - \alpha + 2\pi/3) \\ \cos(\theta - \alpha + 2\pi/3) & \cos(\theta - \alpha + 4\pi/3) & \cos(\theta - \alpha) \end{bmatrix}$$

Il faut noter que :  $[L_{s2, s1}] = [L_{s1, s2}]^t$  ;  $[L_{r, s1}] = [L_{s1, r}]^t$  ;  $[L_{r, s2}] = [L_{s2, r}]^t$  ;

$L_{s1}$  : Inductance de fuite du 1er stator.  $L_{s2}$  : Inductance de fuite du 2eme stator.

$L_r$ : Inductance de fuite du rotor.

$L_{ms}$  : Inductance mutuelle statorique.

$L_{mr}$  : Inductance mutuelle rotorique.

$L_{sr}$  : Inductance mutuelle entre l'une des étoiles du stator et le rotor.

### II.3.2.3. Equation magnétique développée de la MASDE

$$\begin{bmatrix} \varphi a1 \\ \varphi b1 \\ \varphi c1 \\ \varphi a2 \\ \varphi b2 \\ \varphi c2 \\ \varphi ar \\ \varphi br \\ \varphi cr \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{a1a1} & M_{a1b1} & M_{a1c1} & M_{a1a2} & M_{a1b2} & M_{a1c2} & M_{a1ar} & M_{a1br} & M_{a1cr} \\ M_{b1a1} & L_{b1b1} & M_{b1c1} & M_{b1a2} & M_{b1b2} & M_{b1c2} & M_{b1ar} & M_{b1br} & M_{b1cr} \\ M_{c1a1} & M_{c1b1} & L_{c1c1} & M_{c1a2} & M_{c1b2} & M_{c1c2} & M_{c1ar} & M_{c1br} & M_{c1cr} \\ M_{a2a1} & M_{a2b1} & M_{a2c1} & L_{a2a2} & M_{a2b2} & M_{a2c2} & M_{a2ar} & M_{a2br} & M_{a2cr} \\ M_{b2a1} & M_{b2b1} & M_{b2c1} & M_{b2a2} & L_{b2b2} & M_{b2c2} & M_{b2ar} & M_{b2br} & M_{b2cr} \\ M_{c2a1} & M_{c2b1} & M_{c2c1} & M_{c2a2} & M_{c2b2} & L_{c2c2} & M_{c2ar} & M_{c2br} & M_{c2cr} \\ M_{ara1} & M_{arb1} & M_{arc1} & M_{ara2} & M_{arb2} & M_{arc2} & L_{arar} & M_{arbr} & M_{arcr} \\ M_{bra1} & M_{brb1} & M_{brc1} & M_{bra2} & M_{brb2} & M_{brc2} & M_{brar} & L_{brbr} & M_{brcr} \\ M_{cra1} & M_{crb1} & M_{crc1} & M_{cra2} & M_{crb2} & M_{crc2} & M_{crar} & M_{crbr} & L_{crcr} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{a1} \\ I_{b1} \\ I_{c1} \\ I_{a2} \\ I_{b2} \\ I_{c2} \\ I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

### II.3.2.4. Energie magnétique

L'expression de l'énergie magnétique est donnée par :

$$\omega_{mag} = \frac{1}{2} ([I_{s1}]^t [\varphi_{s1}] + [I_{s2}]^t [\varphi_{s2}] + [I_r]^t [\varphi_r]) \quad (\text{II.6})$$

### II.3.2.5. Couple électromagnétique

Le couple électromagnétique est alors donné par la dérivée partielle de l'énergie par rapport à l'angle mécanique [1, 16].

$$C_{em} = \frac{d\omega_{mag}}{d\theta_m} = p \times \frac{d\omega_{mag}}{d\theta_e} \quad (\text{II.7})$$

I=cst      Où p: nombre de paires de pôle,  $\theta_m$ : Angle mécanique,  $\theta_e$ : Angle électrique.

### II.3.2.6 Equation mécanique

L'équation mécanique qui régit le mouvement peut être donnée par : [1,3]

$$J \times \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - F_r \times \Omega \quad (\text{II.8})$$

J : Moment d'inertie ;  $F_r$  : Coefficient de frottement ;  $\Omega = \frac{\omega_r}{p}$  : Vitesse angulaire de rotation ;  $C_r$  : Couple résistant ou couple de charge et  $C_{em}$  : Couple électromagnétique.

## II.3.3. Modèle biphasé de la machine asynchrone à double étoile

Les transformations permettent d'obtenir un système de deux bobinages en quadrature sans interactions magnétiques à partir d'un système réel des bobinages rotoriques et statoriques.

### II.3.3.1. Transformation de PARK directe

La transformation de Park consiste à transformer les systèmes d'enroulements statoriques et rotoriques en un système équivalent à deux enroulements biphasés créant un champ électromagnétique tournant générant la même force magnétomotrice. La composante homopolaire est de valeur nulle si le système (a,b,c) est considéré équilibré et symétrique [1,3].

**a) Matrice de PARK de l'étoile 1**

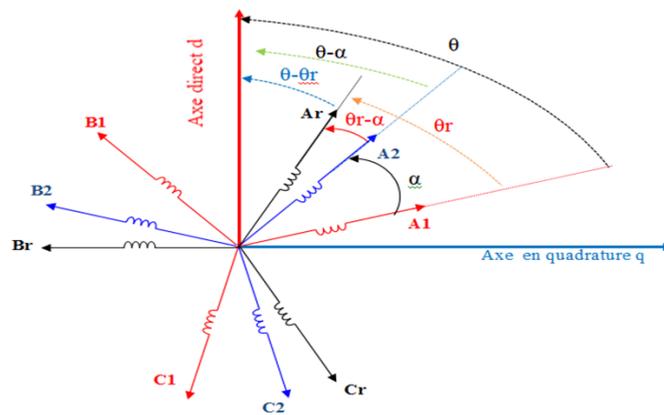
$$[p(\theta_{s1})] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix}$$

**b) Matrice de PARK de l'étoile 2**

$$[p(\theta_{s2})] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \alpha) & \cos(\theta - \alpha - 2\pi/3) & \cos(\theta - \alpha + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta - \alpha) & -\sin(\theta - \alpha - 2\pi/3) & -\sin(\theta - \alpha + 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix}$$

**c) Matrice de PARK du rotor**

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

**II.3.3.2. Représentation des divers enroulements**

**Figure (II.2) :** Représentation angulaire des systèmes d'axe dans l'espace électrique [1,3]

Les deux étoiles du stator sont représentées par (A<sub>1</sub>, B<sub>1</sub>, C<sub>1</sub>) et (A<sub>2</sub>, B<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>) et les trois phases du rotor sont représentées par (A<sub>r</sub>, B<sub>r</sub>, C<sub>r</sub>). L'angle de transformation de PARK de l'étoile 1 du stator est  $\theta = \theta_e$ ,  $\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}$ ,  $\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt}$  et  $\omega_e = \frac{d\theta_e}{dt} = \frac{d\theta}{dt}$ .

**II.3.3.2. Choix du référentiel**

L'étude de la MASDE se fera avec un référentiel lié au champ tournant où la vitesse du repère « d-q » est égale à la vitesse du champ tournant  $\omega_s$ .

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \rightarrow \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - p\Omega \quad (\text{II.9})$$

C'est un référentiel qui n'introduit pas des simplifications dans la transformation des équations électriques.

### II.3.3.4. Transformation de PARK inverse

#### a) Matrice de PARK inverse de l'étoile 1

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

#### b) Matrice de PARK inverse de l'étoile 2

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

#### c) Matrice de PARK inverse du rotor

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

### II.3.3.5. Application de la transformation de PARK à la MASDE

Après application de la transformation de Park aux courants, aux tensions et aux flux, un nouveau système d'équation sera mis en évidence tel que :

#### II.3.3.5.1 Equations des tensions

Par application de la transformation de PARK, il en résulte : [1, 2, 3]

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{d1} = R1.i_{d1} + \frac{d\varphi_{d1}}{dt} - \omega_s.\varphi_{q1} \\ V_{q1} = R1.i_{q1} + \frac{d\varphi_{q1}}{dt} + \omega_s.\varphi_{d1} \\ V_{d2} = R2.i_{d2} + \frac{d\varphi_{d2}}{dt} - \omega_s.\varphi_{q2} \\ V_{q2} = R2.i_{q2} + \frac{d\varphi_{q2}}{dt} + \omega_s.\varphi_{d2} \\ 0 = Rr.i_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r).\varphi_{qr} \\ 0 = Rr.i_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r).\varphi_{dr} \end{array} \right. \quad (II.10)$$

#### II.3.3.5.2 Equations magnétiques

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_{d1} = L_1 i_{d1} + L_m (i_{d1} + i_{d2} + i_{dr}) \\ \varphi_{q1} = L_1 i_{q1} + L_m (i_{q1} + i_{q2} + i_{qr}) \\ \varphi_{d2} = L_2 i_{d2} + L_m (i_{d1} + i_{d2} + i_{dr}) \\ \varphi_{q2} = L_2 i_{q2} + L_m (i_{q1} + i_{q2} + i_{qr}) \\ \varphi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m (i_{d1} + i_{d2} + i_{dr}) \\ \varphi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m (i_{q1} + i_{q2} + i_{qr}) \end{array} \right. \quad (II.11)$$

L'inductance mutuelle cyclique est :  $L_m = \frac{3}{2} L_{ms} = \frac{3}{2} L_{sr} = \frac{3}{2} L_{mr}$

### II.3.3.5.3 Equations mécaniques

#### II.3.3.5.3.1 La puissance instantanée

La puissance instantanée absorbée est donnée par : [1, 2, 3]

$$P = [V_s]^t [i_s] = V_{a1}i_{a1} + V_{b1}i_{b1} + V_{c1}i_{c1} + V_{a2}i_{a2} + V_{b2}i_{b2} + V_{c2}i_{c2} \quad (\text{II.12})$$

Et comme la transformation de Park utilisée repose sur l'invariance de la puissance instantanée, ce qui conduit à leur équivalence physique.

L'équation (II.12) devient :

$$P = V_{d1} \cdot i_{d1} + V_{q1} \cdot i_{q1} + V_{d2} \cdot i_{d2} + V_{q2} \cdot i_{q2} \quad (\text{II.13})$$

Après développement, la puissance devient :

$$P = [R1i_{d1}^2 + R2i_{d2}^2 + R1i_{q1}^2 + R2i_{q2}^2] + \left[ \frac{d}{dt} \varphi_{d1}i_{d1} + \frac{d}{dt} \varphi_{d2}i_{d2} + \frac{d}{dt} \varphi_{q1}i_{q1} + \frac{d}{dt} \varphi_{q2}i_{q2} \right] + \omega_s [\varphi_{d1}i_{q1} + \varphi_{d2}i_{q2} - \varphi_{q1}i_{d1} - \varphi_{q2}i_{d2}] \quad (\text{II.14})$$

Ainsi, trois termes se distinguent : [1, 2, 3]

##### a) Pertes joules

$$P_j = [R1i_{d1}^2 + R2i_{d2}^2 + R1i_{q1}^2 + R2i_{q2}^2]$$

Représente les pertes joules statoriques.

##### b) Puissance électromagnétique emmagasinée

$$P_{ém} = \left[ \frac{d}{dt} \varphi_{d1}i_{d1} + \frac{d}{dt} \varphi_{d2}i_{d2} + \frac{d}{dt} \varphi_{q1}i_{q1} + \frac{d}{dt} \varphi_{q2}i_{q2} \right]$$

C'est la réserve d'énergie stockée dans le champ.

##### c) Puissance mécanique

$$P_{mec} = \omega_s [\varphi_{d1}i_{q1} + \varphi_{d2}i_{q2} - \varphi_{q1}i_{d1} - \varphi_{q2}i_{d2}]$$

C'est la puissance mécanique obtenue avec les pertes fer supposées négligeables.

#### II.3.3.5.3.2 Couple électromagnétique

L'expression du couple est donnée par :

$$C_{em} = p \frac{L_m}{L_r + L_m} [\varphi_{dr}(i_{q1} + i_{q2}) - \varphi_{qr}(i_{d1} + i_{d2})] \quad (\text{II.15})$$

#### II.3.3.5.3.3 Equation mécanique

$$J \times \frac{d\Omega}{dt} + Fr \times \Omega = C_{em} - Cr \quad (\text{II.16})$$

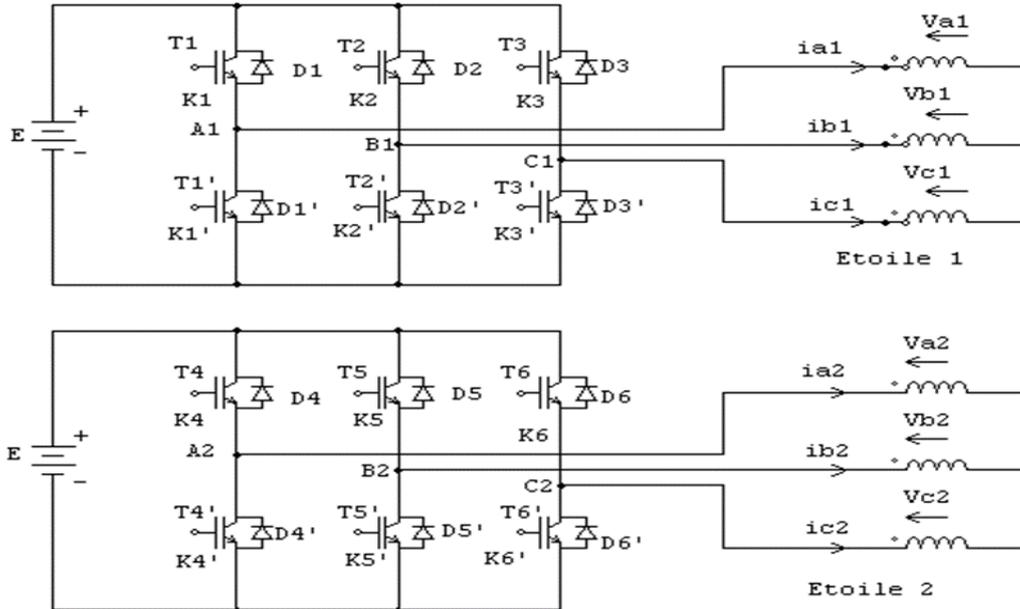
Avec  $\Omega = \frac{\omega r}{p}$ .

**II.4 Nécessité d'alimenter la MASDE par des onduleurs de tension**

Pour pouvoir varier la vitesse du moteur, il faudra l'alimenter par des onduleurs de tension [1, 3].

**II.4.1 Modélisation de l'onduleur**

Deux onduleurs triphasés, à commutations commandées, sont utilisés pour alimenter les deux étoiles [1, 2, 3].



**Figure (II.3) : Alimentation du stator par onduleurs de tension**

L'interrupteur représenté par une paire de « transistor-diode » est modélisé par : [1, 3]

$$f_i = \begin{cases} 1 & \text{l'interrupteur " i " est fermé (Ki conduit-Ki' bloqué)} \\ 0 & \text{l'interrupteur " i " est ouvert (Ki bloqué -Ki' conduit)} \end{cases} \quad (II.17)$$

Avec  $f_i + \bar{f}_i = 1 \quad i = 1,2,3,4,5,6$

$$\begin{bmatrix} V_{a1} \\ V_{b1} \\ V_{c1} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \begin{bmatrix} V_{a2} \\ V_{b2} \\ V_{c2} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_4 \\ f_5 \\ f_6 \end{bmatrix}$$

**II.4.2 Commande par modulation des largeurs d'impulsions sinus-triangle**

La « MLI » sinus-triangle consiste à comparer une onde modulante basse fréquence dite « tension de référence » à une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire [1].

**a) L'onde modulante**

Il suffit juste de changer «  $2\pi ft$  » des équations régissant l'étoile 1 par «  $2\pi ft - \alpha$  » dans le système d'équations régissant l'étoile 2.

$$\begin{cases} V_{\text{refa1}} = v_m \sin(2\pi ft) \\ V_{\text{refb1}} = v_m \sin\left(2\pi ft - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_{\text{refc1}} = v_m \sin\left(2\pi ft - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} V_{\text{refa2}} = v_m \sin\left(2\pi ft - \frac{\pi}{6}\right) \\ V_{\text{refb2}} = v_m \sin\left(2\pi ft - \frac{5\pi}{6}\right) \\ V_{\text{refc2}} = v_m \sin\left(2\pi ft - \frac{3\pi}{2}\right) \end{cases}$$

### b) La porteuse

L'équation de la porteuse est donnée par : [1, 3]

$$V_p(t) = \begin{cases} V_{pm} \left( \frac{4t}{T_p} - 1 \right) & \text{si } 0 \leq t \leq \frac{T_p}{2} \\ V_{pm} \left( \frac{-4t}{T_p} + 3 \right) & \text{si } \frac{T_p}{2} \leq t \leq T_p \end{cases}$$

Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante [1, 2, 3].

### c) L'indice de modulation

C'est le rapport entre la fréquence de modulation  $f_p$  et la fréquence de la tension de référence  $f_s$ .

$$m = \frac{f_p}{f_s} \quad (\text{II.18})$$

Il est préférable d'opter pour un rapport  $m = \frac{f_p}{f_s} = 3 + 6k$  doit être un multiple de trois pour avoir des tensions identiques à appliquer aux différentes phases.

### d) Le coefficient de réglage en tension

Appelé « coefficient de réglage de tension », c'est le rapport de l'amplitude de la tension de référence et la valeur crête de l'onde de modulation [1, 2, 3].

$$r = \frac{v_m}{v_{pm}} \quad (\text{II.19})$$

A titre d'exemple un indice de modulation  $m=21$  et un coefficient de réglage de tension  $r = 0.8$ .

## II.5 Conclusion

Les transformées de Park directe et inverse offrent un très bon outil dans l'élaboration d'un système de deux axes où les interactions entre les bobines fictives des enroulements directes et en quadratures sont éliminées.

L'obligation industrielle à utiliser des onduleurs de tension pour l'alimentation de la MASDE au lieu du réseau montre les avantages et les inconvénients de ce genre de fonctionnement. Les onduleurs sont commandés par la technique de modulation de largeurs d'impulsions sinus – triangle.

## Chapitre III

### Simulation numérique de la MASDE et interprétation des résultats

#### III.1 Introduction

Pour connaître le comportement de la machine asynchrone à double étoile, une simulation numérique est réalisée grâce au logiciel MATLAB SIMULINK.

En effet, la simulation est d'abord réalisée par l'alimentation de la machine asynchrone double étoile par une double source de tensions triphasées puis par une alimentation par des onduleurs de tensions.

#### III.2 Simulation numérique de la MASDE alimentée par le réseau électrique

Il est intéressant d'alimenter la machine via le réseau électrique, pour pouvoir étudier son comportement. En effet deux sources de tensions triphasées équilibrées décalées entre elles d'un angle «  $\alpha = 30^\circ$  », sont utilisées pour alimenter les deux étoiles de la machine.

##### III.2.1 Sources de tension alimentant les deux étoiles de la machine

Deux sources de tensions triphasées décalées de  $30^\circ$  alimentent les deux étoiles du stator.

###### III.2.1.1 Source de tension alimentant la première étoile

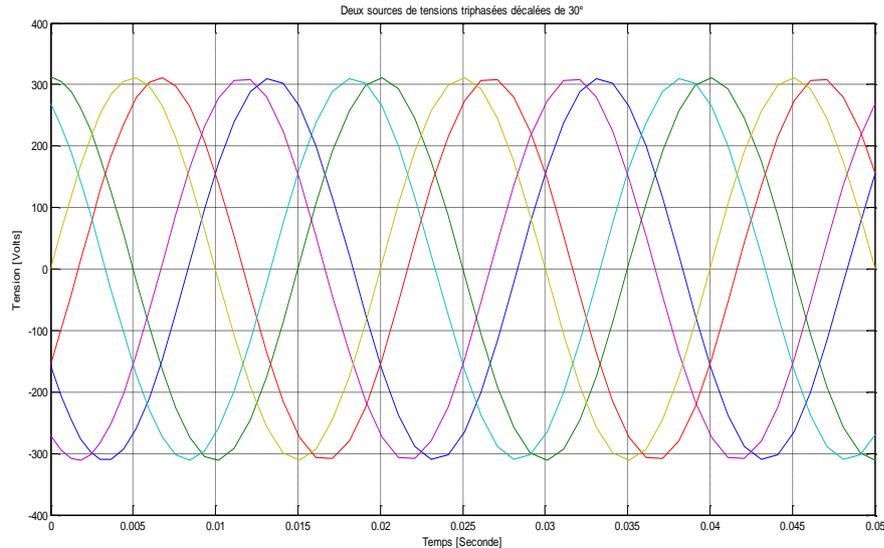
C'est tout simplement une source de tension triphasée équilibrée.

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{a1} = V \times \sqrt{2} \times \sin(\omega_s \times t) \\ v_{b1} = V \times \sqrt{2} \times \sin(\omega_s \times t - \frac{2\pi}{3}) \\ v_{c1} = V \times \sqrt{2} \times \sin(\omega_s \times t - \frac{4\pi}{3}) \end{array} \right. \quad (\text{III.1})$$

###### III.2.1.2 Source de tension alimentant la deuxième étoile

C'est une source triphasée décalée du même angle «  $\alpha = 30^\circ$  ».

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{a2} = V \times \sqrt{2} \times \sin\left(\omega_s \times t - \frac{\pi}{6}\right) \\ v_{b2} = V \times \sqrt{2} \times \sin\left(\omega_s \times t - \frac{5\pi}{6}\right) \\ v_{c2} = V \times \sqrt{2} \times \sin\left(\omega_s \times t - \frac{3\pi}{2}\right) \end{array} \right. \quad (\text{III.2})$$

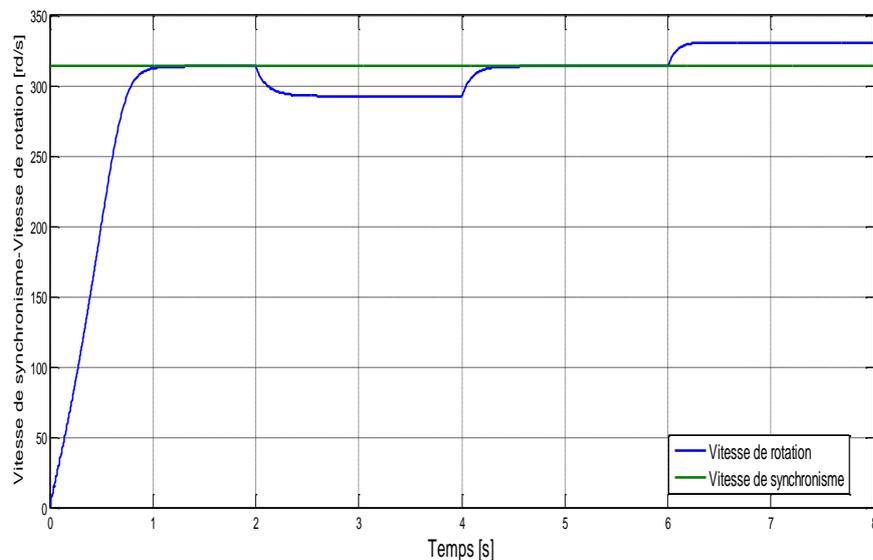


**Figure (III.1) :** Allure des deux sources de tensions triphasées décalées de  $30^\circ$

Les tensions sont illustrées par la figure (III.1) où nous pouvons remarquer ces deux sources triphasées mais décalées d'un angle de  $30^\circ$ .

Dans ce qui suit, la machine tourne à vide, puis en charge avec l'application d'un couple résistant égale à 12 Nm dans l'intervalle de temps [2s, 4s], ensuite, la machine est déchargée lors de l'intervalle [4s, 6s] et finalement de l'intervalle [6s, 8s], un couple résistant négative de -12 Nm lui est appliquée.

### III.2.2 Vitesse de rotation et vitesse de synchronisme



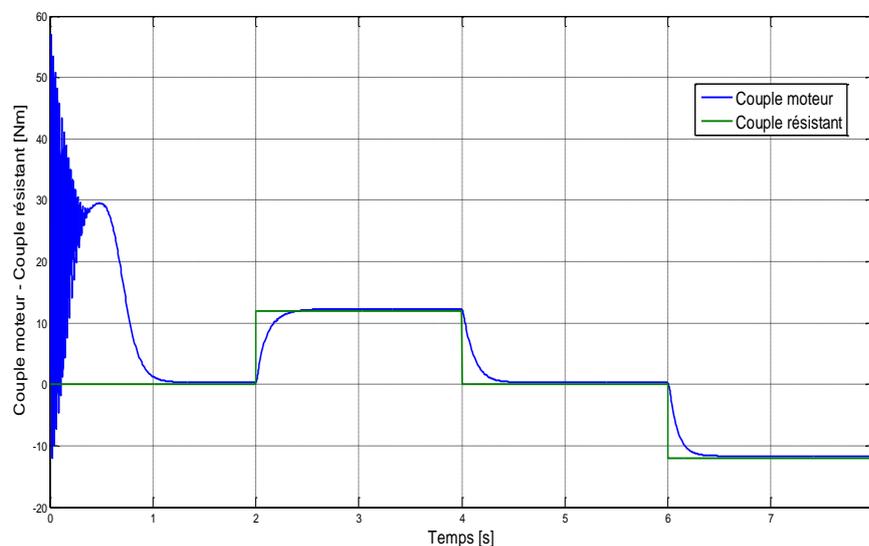
**Figure (III.2) :** Vitesse de rotation [rd/s] et Vitesse de synchronisme [rd/s]

La figure (III.2) montre l'allure de la vitesse de rotation en rd/s en. Au démarrage, la vitesse augmente et atteint 313.83 rd/s très proche de la vitesse de synchronisme 314.16 rd/s parce que la machine fonctionne à vide.

A  $t=2\text{sec}$ , la machine fonctionne comme moteur avec un couple résistant de 12 Nm et la vitesse de rotation est  $N = 298\text{ rd/s}$  et à  $t=4\text{s}$  le moteur est à vide et la vitesse reprend la valeur de 313.83rd/.

A  $t=6\text{s}$ , un couple résistant de -12Nm est appliqué et la machine fonctionne comme génératrice, l'arbre de la machine est entraîné à une vitesse de rotation de « 327.35 rd/s ».

### III.2.3 Couple électromagnétique



**Figure (III.3) :** Couple électromagnétique [Nm] et Couple résistant [Nm]

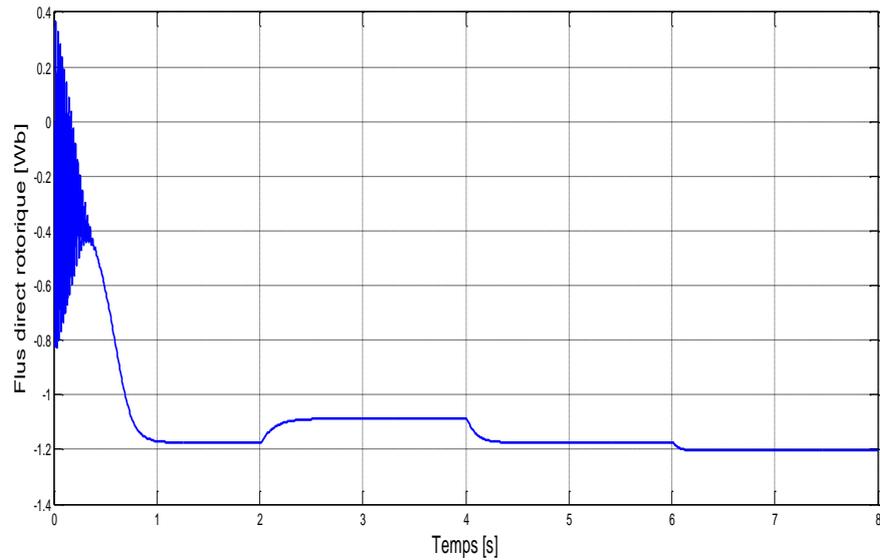
Au démarrage, le couple prend une forme vibratoire et atteint des valeurs de 50 Nm avant d'atteindre une valeur à vide de 0.32 Nm correspond aux pertes mécaniques par frottement et par ventilation.

A  $t=2\text{sec}$ , le couple électromagnétique passe en 0.3seconde de 0.32 Nm à 12.3 Nm suivant la consigne du couple résistant. A  $t=4\text{sec}$ , la charge est déconnectée et le couple électromagnétique chute et reprend sa valeur à vide de 0.32 Nm.

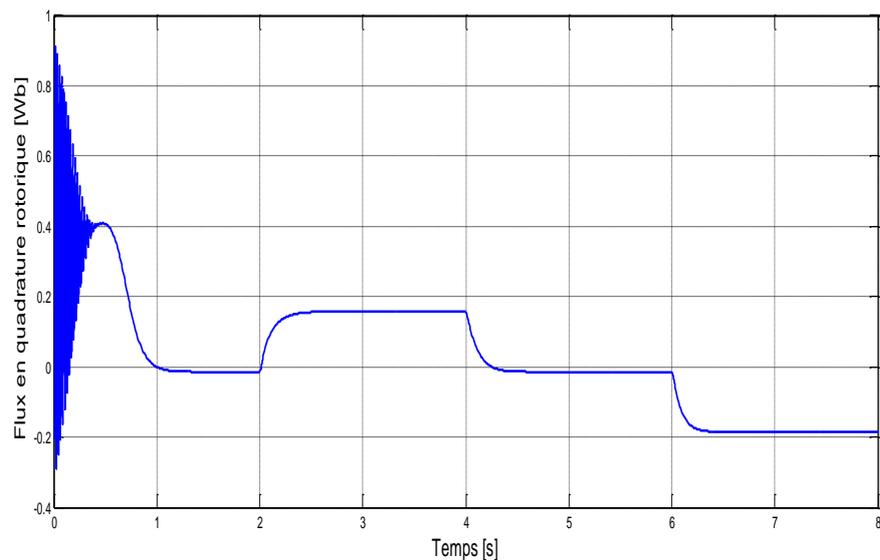
A  $t=6\text{sec}$ , la machine est entraînée à une vitesse supérieure à la vitesse de synchronisme, la machine fonctionne comme génératrice et le couple électromagnétique atteint -11.7 Nm.

### III.2.4 Flux rotorique

L'allure du flux rotorique direct et du flux rotorique en quadrature figures (III.4) et (III.5), ressemblent à l'allure du couple électromagnétique figure (III.3).



**Figure (III.4) : Flux direct rotorique [Wb]**



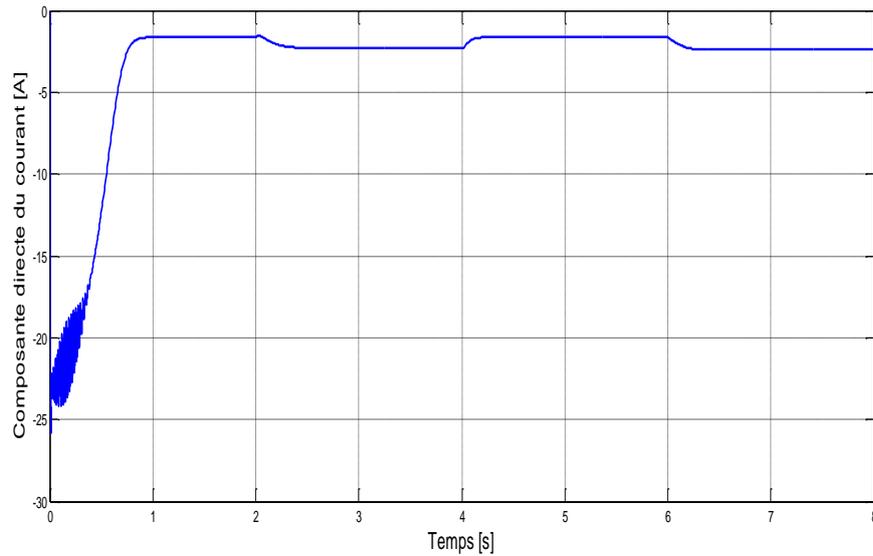
**Figure (III.5) : Flux en quadrature rotorique [Wb]**

Le flux rotorique direct et en quadrature ont respectivement les valeurs, à vide (-1.1745) et (-0.014), en fonctionnement moteur de (-1.088) et (0.1579) et comme générateur de (-1.2046) et de (-0.1855).

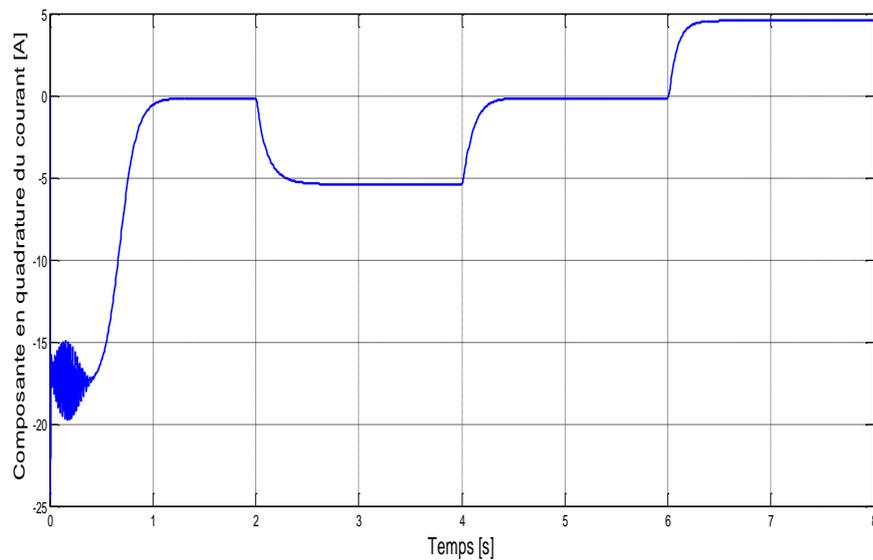
### III.2.5 Courants direct et en quadrature

Les composantes directes et en quadrature du courant évoluent de la même manière que celle de la vitesse de rotation de la machine (figure III.2).

Au démarrage de la machine, quelques vibrations sont enregistrées pendant près de 0.4 seconde avant que les courants ne prennent des valeurs finales.



**Figure (III.6) :** Composante directe du courant  $I_{d1}$  &  $I_{d2}$

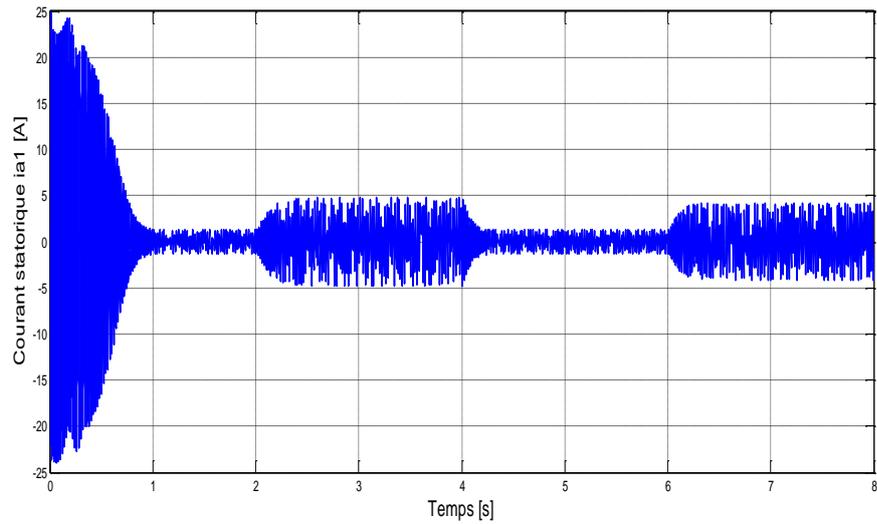


**Figure (III.7) :** Composante en quadrature du courant  $I_{q1}$  &  $I_{q2}$

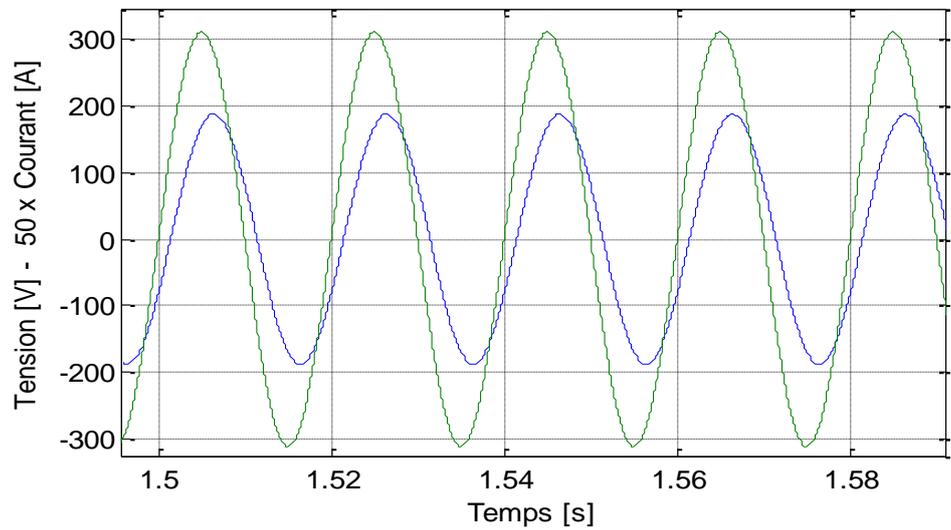
Le courant direct et le courant en quadrature ont respectivement les valeurs, à vide (-1.62A) et (-0.15), en fonctionnement moteur de (-2.3) et (-5.4) et comme générateur de (-2.4A) et de (4.5A).

### III.2.6 Courants statoriques

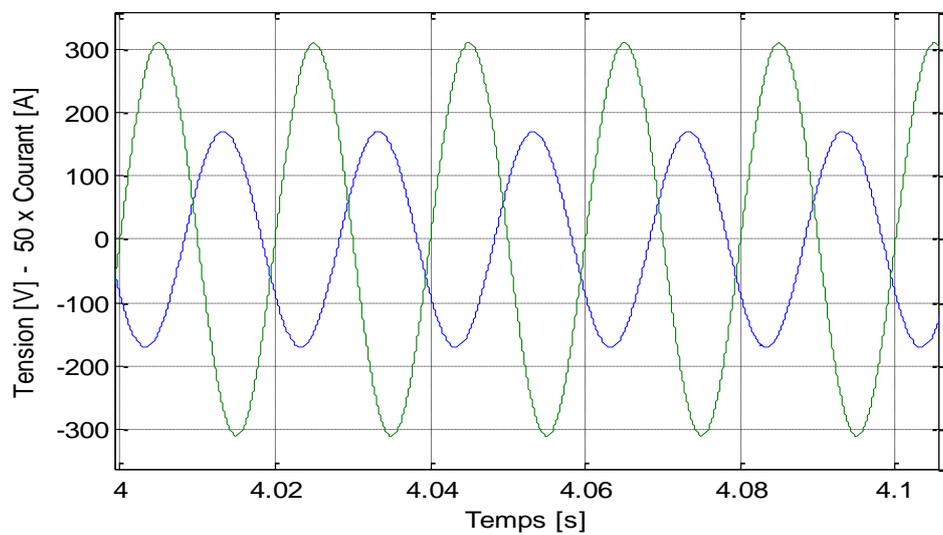
Au démarrage, les courants absorbés par les deux étoiles du stator atteignent presque quatre fois le courant nominal soit « 24A ». Le régime permanent est atteint après une période de « 0.6 seconde » et la machine absorbe un courant d'une valeur « 1.33A » à vide. Avec un couple de 12 Nm, la machine est en mode moteur et absorbe un courant de « 3.7A », par contre si le couple est négatif, la machine est en mode générateur et le courant débité est de « 3.4A ».



**Figure (III.8) :** Courant statorique  $i_{a1}$



**Figure (III.9) :** Allure du courant et de la tension en fonctionnement 'Moteur'



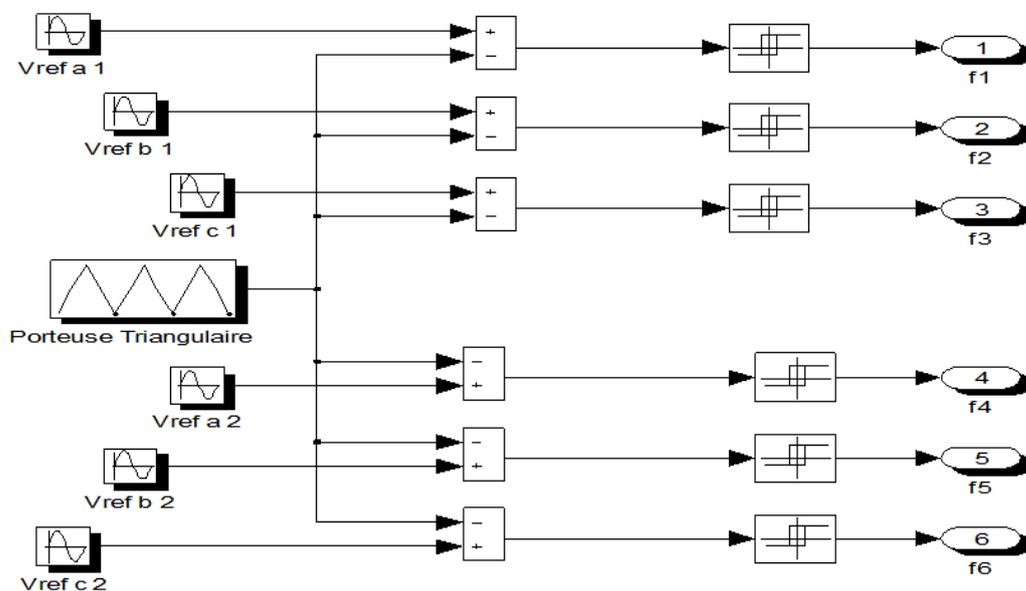
**Figure (III.10) :** Allure du courant et de la tension en fonctionnement 'Générateur'

L'effet inductif de la machine explique le déphasage en arrière du courant statorique  $i_{a1}$ , par rapport, à la tension d'alimentation  $V_{a1}$ . D'où le sens de transition de la puissance est positif de fait que les deux grandeurs sont de même signe, cela veut dire que la machine absorbe de l'énergie active et réactive nécessaire pour l'alimentation de la charge et pour sa magnétisation.

En mode générateur, le fait que la tension  $V_{a1}$  et le courant  $i_{a1}$  sont presque déphasés de  $\pi$ , la puissance produite est de signe négatif, cela veut dire que la machine fournit de l'énergie active à la source et absorbe une certaine portion de l'énergie réactive nécessaire pour sa magnétisation.

### II.3 Alimentation de la MASDE par des onduleurs de tension

#### II.3.1 Commande par modulation des largeurs d'impulsions sinus-triangle



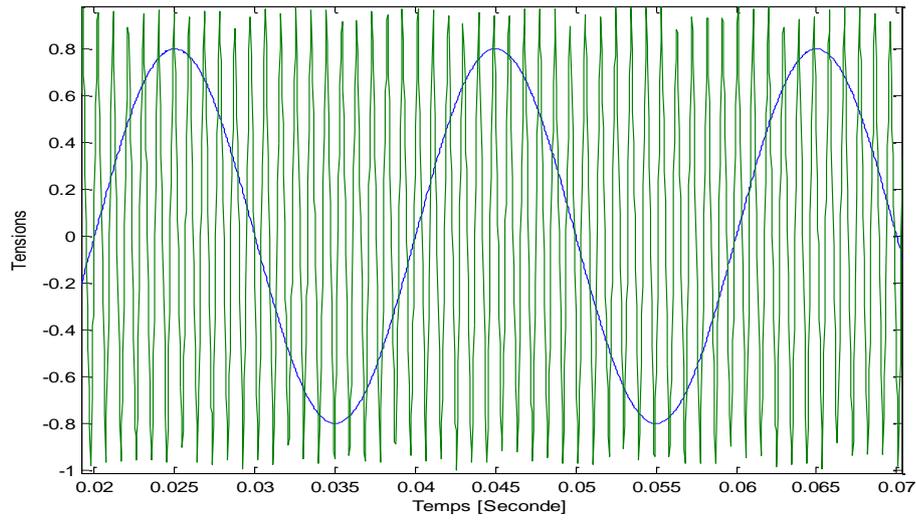
*Figure (III.11) : Principe de modulation de largeurs d'impulsions sinus-triangle*

#### II.3.2 Association « Onduleurs – MASDE »

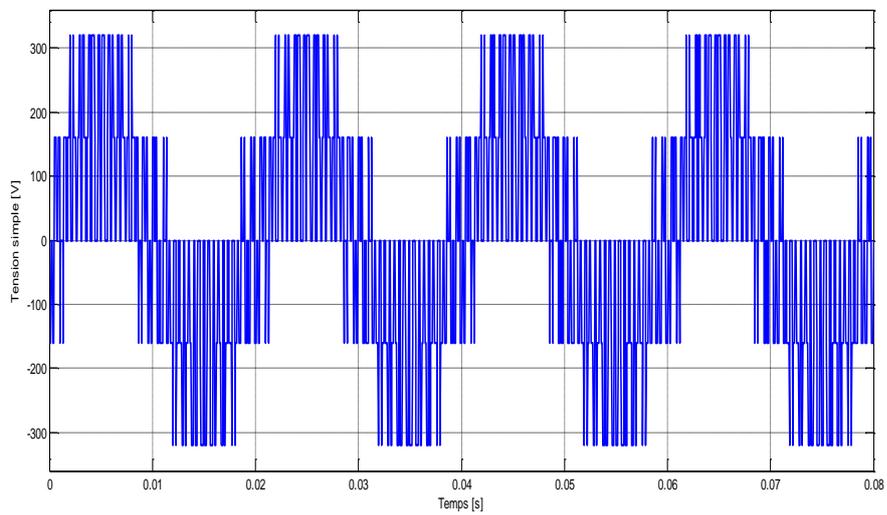
La « MLI » sinus-triangle utilisée a pour un indice de modulation «  $m = 21$  » et un coefficient de réglage de tension «  $r = 0.8$  ».

Pour les besoins industriels, les deux stators de la machine sont alimentés par deux onduleurs triphasés commandés par « modulation de largeurs d'impulsions sinus triangle ».

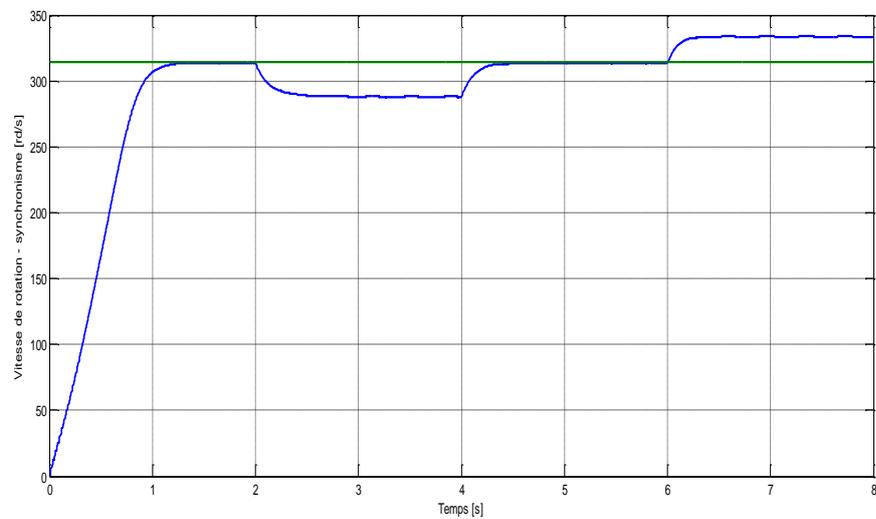
Les mêmes consignes sont reprises pour cette simulation avec un démarrage à vide puis l'application d'un couple résistant égale à «  $12 \text{ Nm}$  » dans un laps de temps entre [2sec, 4sec]. De [4, 6] la charge est déconnectée et après  $t=6$  secondes, une charge de «  $-12 \text{ Nm}$  » est appliquée.



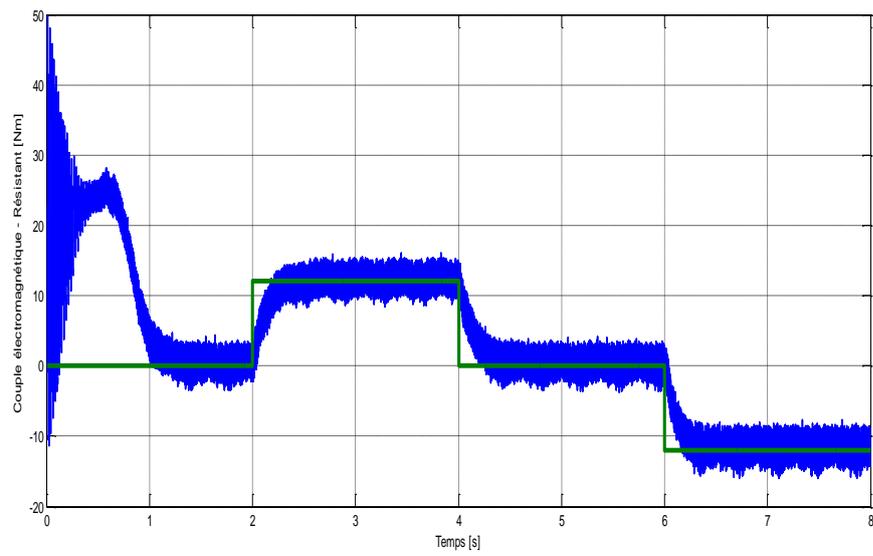
*Figure (III.12) : Les fonctions sinus-triangle*



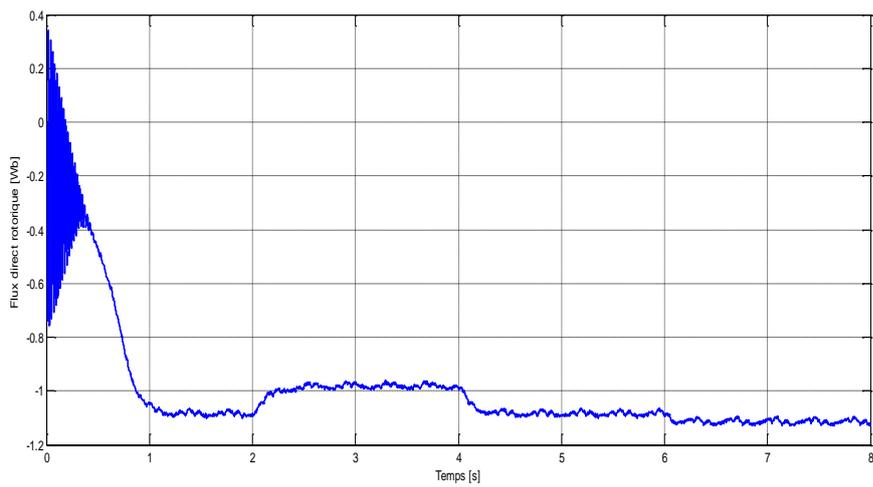
*Figure (III.13) : Tension simple  $V_{an1}$*



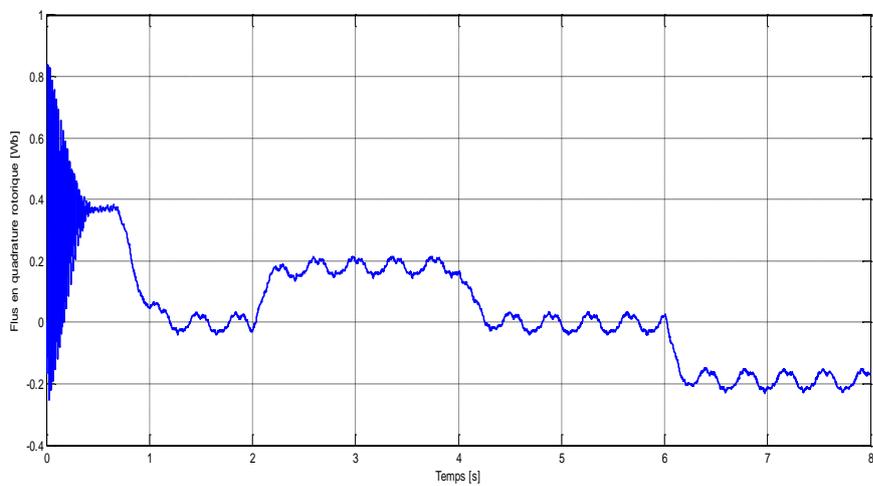
*Figure (III.14) : Vitesse de rotation  $\Omega$  [rad/s] & Vitesse de synchronisme  $\Omega_s$  [rad/s]*



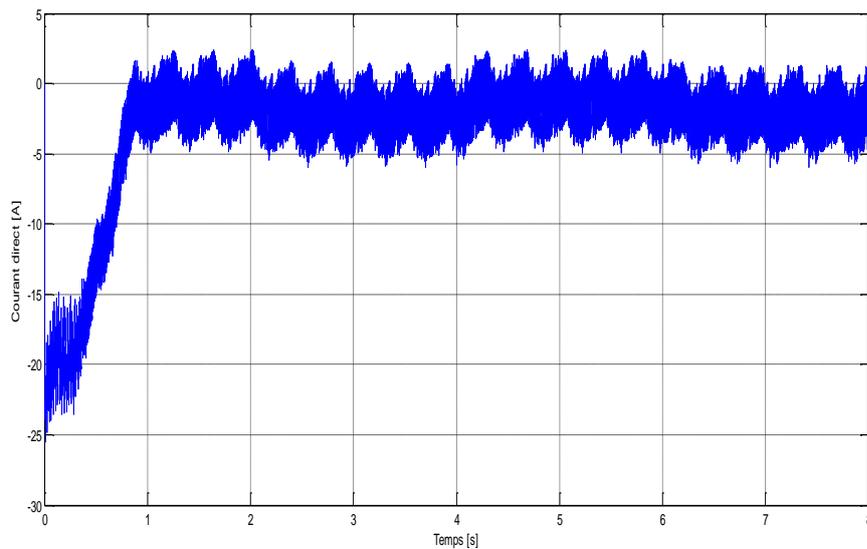
**Figure (III.15) :** Couple électromagnétique [Nm] & Couple résistant [Nm]



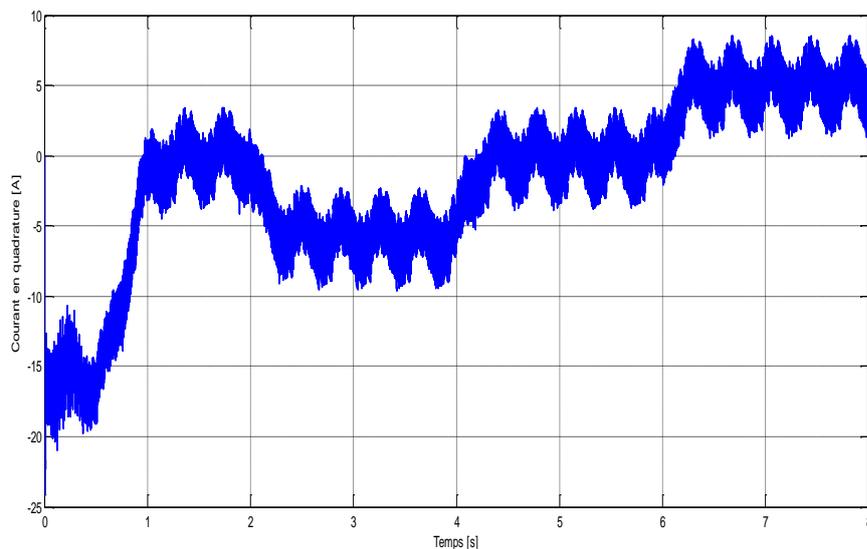
**Figure (III.16) :** Flux direct rotorique [Wb]



**Figure (III.17) :** Flux en quadrature rotorique [Wb]



*Figure (III.18) : Courants directs*



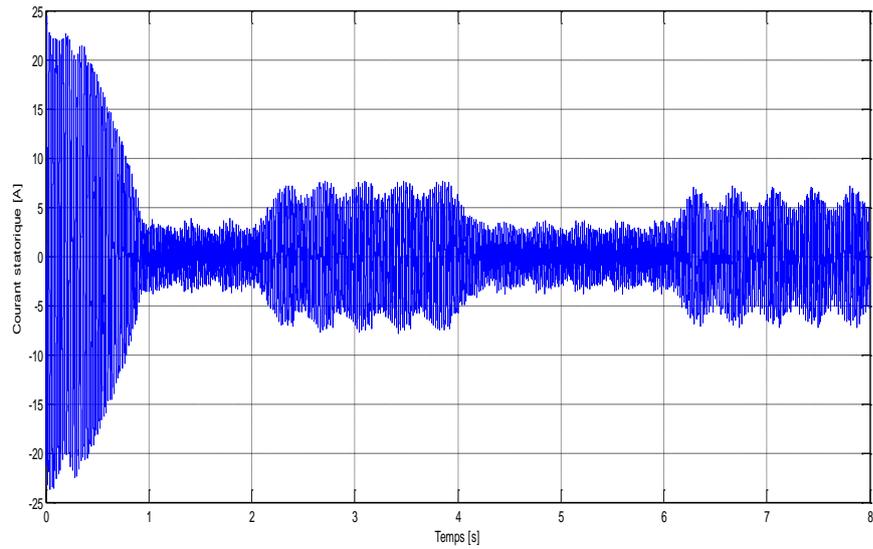
*Figure (III.19) : Courants en quadratures*

### II.3.3 Vitesse de rotation

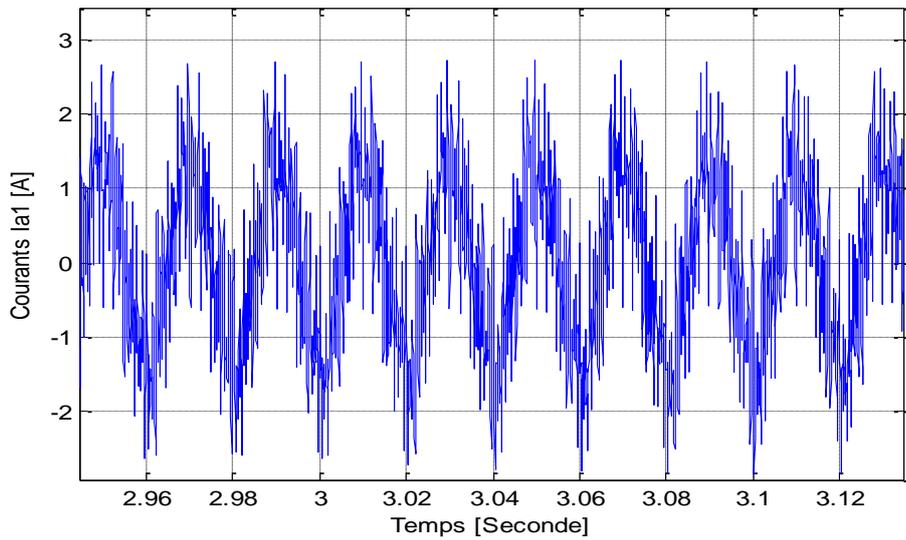
La vitesse a la même allure que pour l'essai effectué avec la machine alimentée directement par les sources de tension.

A partir de la figure (III.14), la vitesse atteint « 313.5 rd/s » au démarrage puis elle diminue à «  $N = 298$  rd/s » en fonctionnement moteur, puis revient à sa valeur à vide, puis en mode générateur, le rotor est entraîné à la vitesse de rotation de 327.35 rd/s.

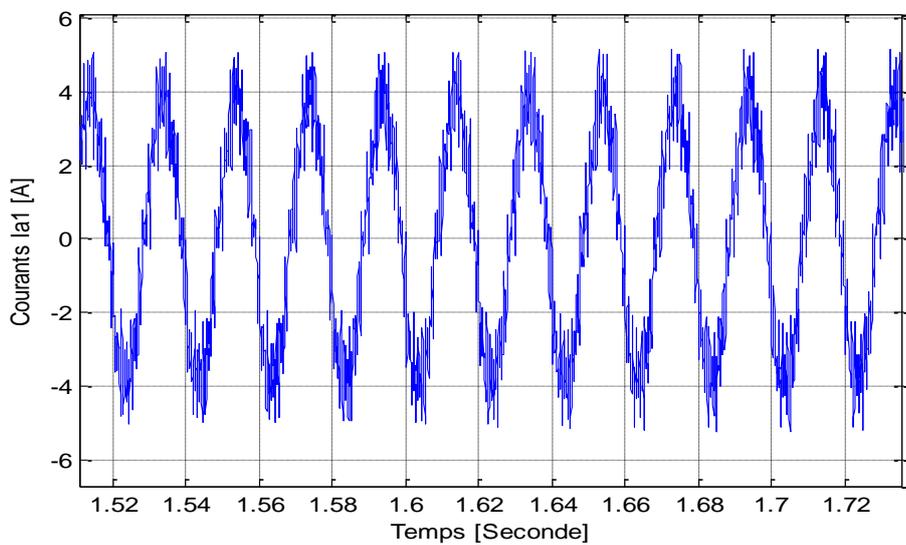
A noter que les ondulations enregistrées sur l'évolution de l'allure de la vitesse sont dues, essentiellement, aux harmoniques délivrés par les onduleurs.



**Figure (III.20) :** Courant statorique  $i_{a1}$



**Figure (III.21) :** Courant statorique  $i_{a1}$  'à vide'



**Figure (III.22) :** Courant statorique  $i_{a1}$  'en charge'

### II.3.4 Couple électromagnétique

Le couple présente des ondulations autour de la valeur consignée par la charge comprises entre '-4 Nm' et '4 Nm'. La présence d'harmoniques créées par les onduleurs de tension sont responsables de ces ondulations (figure III.15).

### II.3.5 Flux rotorique

Selon les figures (III.16) et (III.17), le flux rotorique direct et le flux rotorique en quadrature concordent de très près avec l'allure du couple électromagnétique figure (III.15).

### II.3.6 Courants directs et en quadrature

Les courants directs et en quadrature évoluent d'une manière semblable à celle de la vitesse de rotation. Les figures (III.18) et (III.19) montrent d'une manière très claire les ondulations autour de la 'consigne'.

### II.3.7 Courants statoriques

Au démarrage, les courants absorbés par la machine arrivent à quatre ou cinq fois les valeurs nominales. Le régime permanent est rapidement atteint et les valeurs obtenues lors de cet essai sont un peu plus grandes que celles trouvées lors de l'alimentation directement par le réseau électrique. A vide, la machine absorbe un courant de presque « 2 A » figure (III.21) et en charge, le courant absorbé est de « 4 A » figure (III.22).

Comme pour les autres grandeurs obtenues lors de cet essai, les courants statoriques présentent des ondulations autour d'une valeur moyenne mesurée lors de l'application avec alimentation directement par le réseau électrique.

## II.4 Conclusion

Lors de l'alimentation de la machine par le réseau électrique, les différentes grandeurs caractérisant la machine caractérisent le comportement de la machine lors des différents fonctionnements, soit à vide, soit en mode moteur ou bien en mode générateur.

L'utilisation des onduleurs de tension pour l'alimentation du MASDE, commandés par la technique MLI sinus-triangle, permet le contrôle de la vitesse de rotation.

Les ondulations observées sur le couple, la vitesse, les flux rotoriques et les courants de la machine fictive sont dues, essentiellement, à la présence d'harmoniques engendrés par les onduleurs.

## Conclusion Générale

Le moteur multiphasé surplombe tous les autres moteurs, avec ses qualités de haute fiabilité, d'une segmentation de puissance, d'un pouvoir d'élimination d'harmoniques d'espace, de minimisation des ondulations du couple et des pertes rotoriques.

Le moteur asynchrone à double étoile est identique au moteur asynchrone triphasé, avec la particularité de posséder une étoile supplémentaire au stator, décalée d'un angle de trente degrés par rapport à la première étoile.

Les avantages que ce moteur offre, étendent le domaine de son utilisation aux secteurs sensibles de la marine, l'armée, l'avionique, la traction ferroviaire et automobile, l'aérospatial et l'industrie pétrochimique...etc.

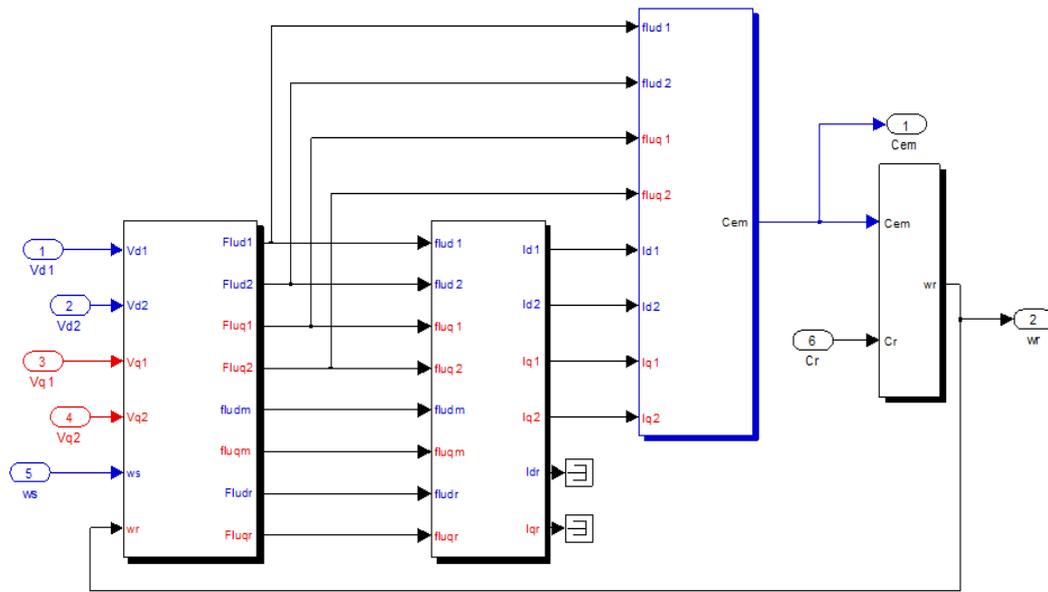
L'alimentation, via des onduleurs de tensions, est une obligation dans le milieu industriel. La commande, par modulation de largueurs d'impulsions sinus-triangle, est responsable des ondulations qui surviennent sur le couple, la vitesse, les flux rotoriques et les courants du moteurs.

## BIBLIOGRAPHIE

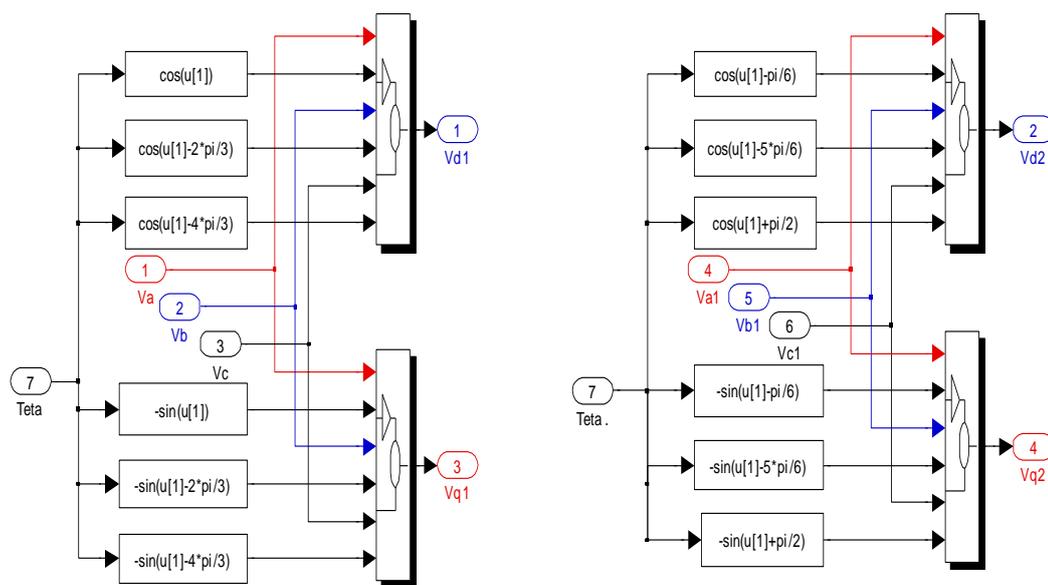
- [01] : A.Adjati, « Etude des machines asynchrones à double étoile en pompage », Thèse de Magister de l'université A. Mira Bejaia, systèmes électro-énergétique, 2012.
- [02] : L. Benalia, « Commande en tension des moteurs à induction double alimentés », Doctorat en sciences en électrotechnique option : Electricité Industrielle, Université de BATNA, 2010.
- [03] : D.Hadiouche, « Contribution à l'étude de la machine asynchrone double étoile : modélisation, alimentation et structure », Thèse de Doctorat de l'Université Henri Poincaré de Nancy I, faculté des sciences et technique, 2001.
- [04] : E. A. Klingshirn, « High Phase Order Induction Motors-Part II – Experimental Results», IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-102, n°1, pp.54-59, Jan.1983.
- [05] : J.Belhadj, I.Slama-Belkhodja, M.Pietrzak-David, B.de Fornel, «A multi machine multi-inverter DTC strategy», Electrimacs, 18-21. Electric Drives 1, aout 2002.
- [06] : N.Moubayed, « Alimentation par onduleur de tension des machines multi-étoiles», Thèse de Doctorat de l'INP de Lorraine, 1999.
- [07] : T.H.Liu, J.R.Fu and T.A. Lipo, «A Strategy for Improving the Reliability of Field-Oriented Controlled Induction Motor Drives», IEEE Trans. Ind. Appl., Vol.29, No. 5, pp. 910-917, Sept./Oct. 1993.
- [08]: J.P.Martin, F.Meibody-Tabar,; B.Davat, «Multiple-phase Permanent Magnet Synchronous Machine supplied by VSIs, Working Under Fault Conditions», Conf. Record of 2000 IEEE IAS Annual Meeting (CD-ROM), , Roma, Italy,october 2000.
- [09] : H.A. Toliyat, T. A. Lipo, W. Coleman, «Analysis of a Concentrated Winding Induction Machine for Adjustable Speed Drive Applications. Part 2 (Motor Design and Performance) », IEEE Trans. Energ. Conv., Vol. 6, No. 4, pp. 684-692, 1991.
- [10]: E.A.Klingshirn, «High phase order induction motors-part ii – experimental results», IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-102, no. 1, pp.54-59, Jan.1983.
- [11] : G.Segquier, F.Notelet, «Electrotechnique industrielle, technique et documentation», page 484, édition Lavoisier, Paris, 1994.
- [12]: M.A.Abbas, R.Christen, T.M.Jahns, «Six-phase voltage source inverter driven induction motor», IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. IA-20, No. 5, pp. 1251-1259, 1984.
- [13] : B.Fornel, « Machines asynchrones : commande par contrôle direct de couple», Technique de l'Ingénieur D3623, 2003.
- [14] : H.Hammache, « Etude et réalisation d'une machine asynchrone double étoile : conception, alimentation et commande », Mémoire de Magister de l'Ecole Militaire Polytechnique, Alger, Algérie, Janvier 2007.
- [15]: Z.Oudjebour, E.M.Berkouk, N.Sami, S.Belkacemi, S.Arezki, I.Messaif, « indirect space vector control of a double start induction fed by two five levels NPCVSI», International conference on Electric Machine, ICEM'04, Poland, 2004.
- [16]: A.Kalantari, M.Mirsalim, H.Rastegar, « Adjustable peed drive based on fuzzy logic for a dual Three- Phase Induction machine », Amirkabir University of Technology, Tehran- Iran, Proceedings in Electrimacs, Electric Drives II, 18-21 August 2002.

## Annexes : Présentation des blocs de simulation

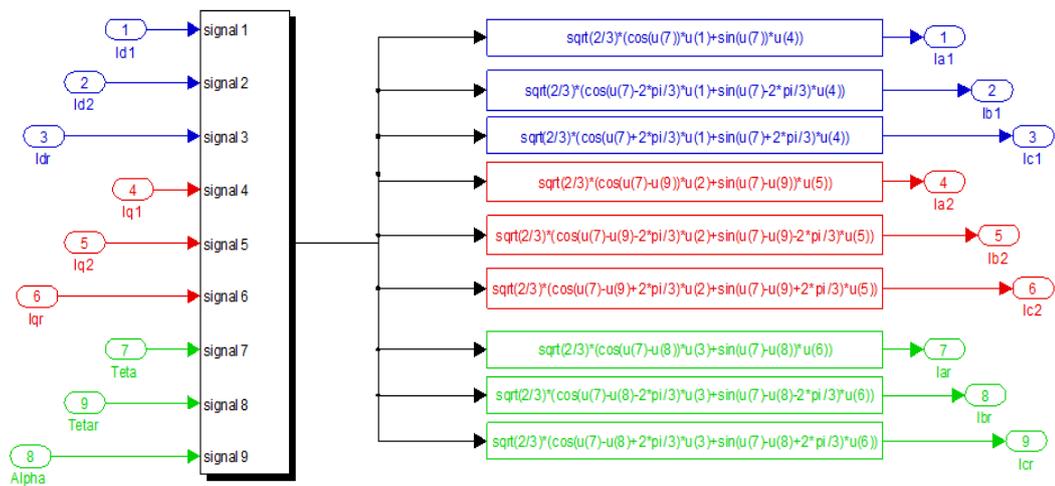
### A1 : Bloc de Simulation de la Machine asynchrone double étoile



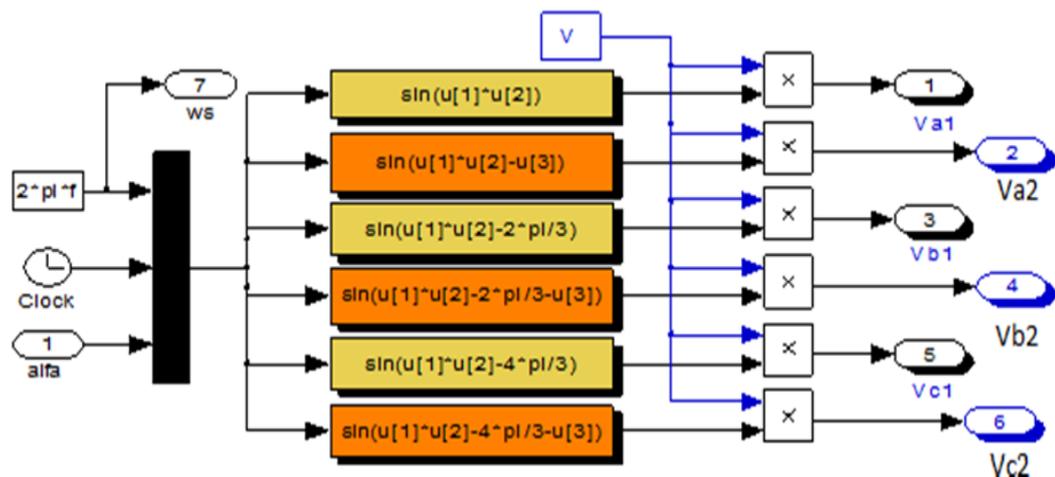
### A2 : Bloc de simulation de la Transformée de PARK



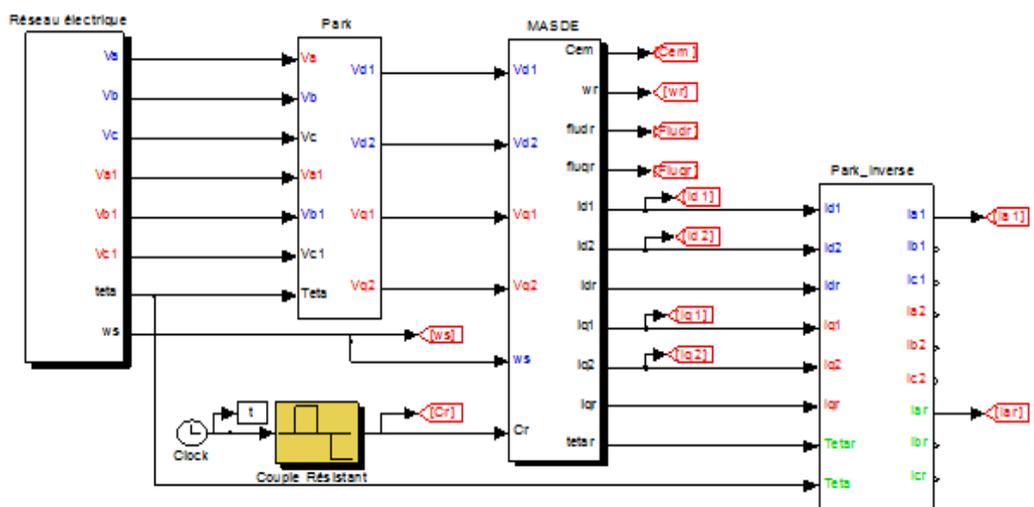
**A3 : Bloc de simulation de la Transformée de PARK inverse**



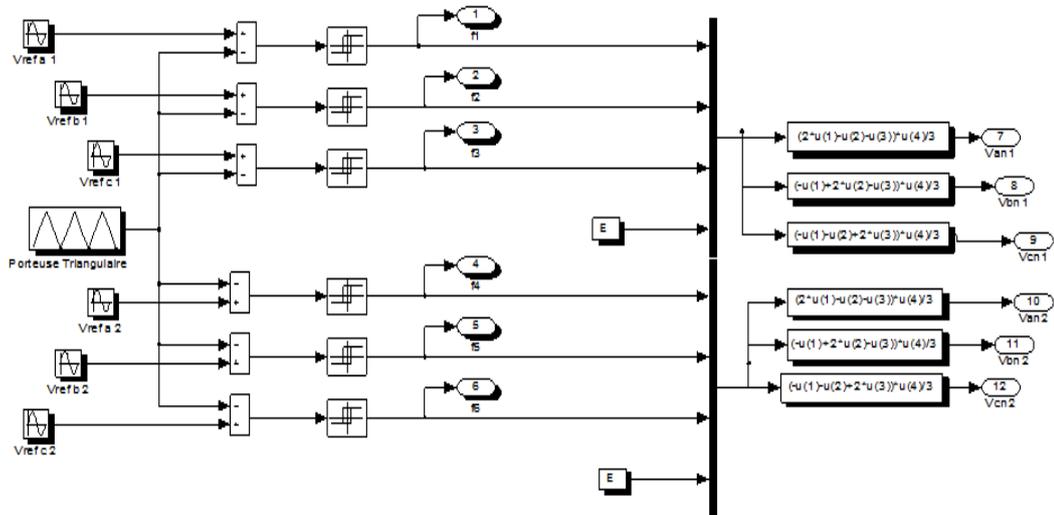
**A4 : Bloc de simulation du réseau électrique**



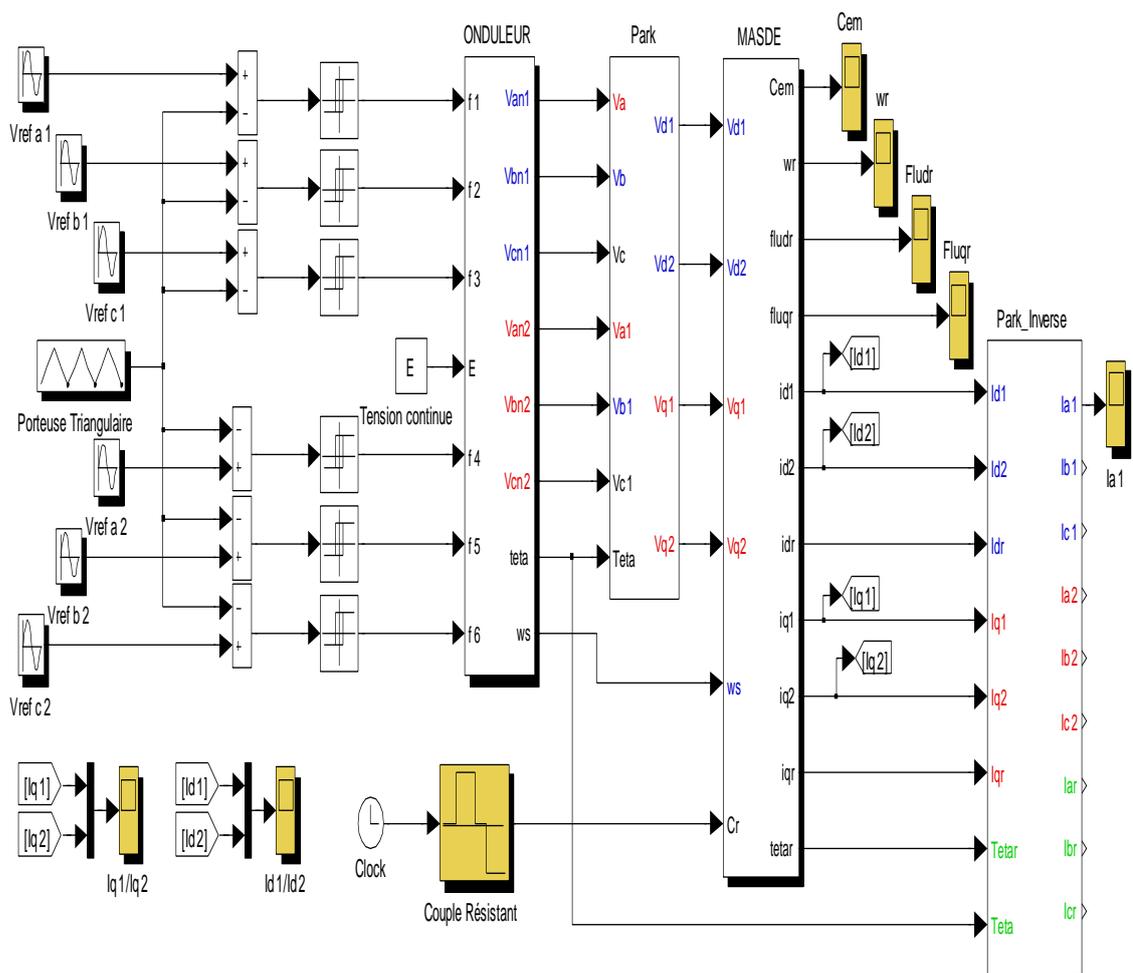
**A5 : Bloc de simulation global de la MASDE alimentée directement par le réseau**



**A6 : Bloc de simulation des onduleurs à commande MLI**



**A7 : Bloc de simulation global de la MASDE alimentée par onduleurs**



## PARAMETRES DE LA MACHINE ASYNCHRONE à DOUBLE ETOILE

Puissance nominale	$P_n = 4,5 \text{ kW}$	Résistance rotorique	$R_r = 2,12 \Omega$
Tension nominale	$V_n = 220 \text{ V}$	Résistance des enroulements de la première étoile statorique	$R_{s1} = 3,72 \Omega$
Courant nominale	$I_n = 6,5 \text{ A}$	Résistance des enroulements de la deuxième étoile statorique	$R_{s2} = 3,72 \Omega$
Nombre de paires de pôles	$p = 1$	Inductance des enroulements de la première étoile statorique	$L_{s1} = 0,022 \text{ H}$
Moment d'inertie	$J = 0,0625 \text{ kg.m}^2$	Inductance des enroulements de la deuxième étoile statorique	$L_{s2} = 0,022 \text{ H}$
Coefficient de frottement	$K_f = 0,001 \text{ Nms/rd}$	Inductance rotorique	$L_r = 0,006 \text{ H}$
Fréquence nominale	$F = 50 \text{ Hz}$	Inductance mutuelle	$L_m = 0,3672 \text{ H}$

**الملخص:**

المحرك الغير متزامن ثلاثي الأطوار المغذى بواسطة موج التوتر عبارة عن نظام دوار ذو مزايا متعددة و لكن محدود لمستويات معينة من الإستطاعة، بسبب الإجهادات الكهربائية المحتملة من طرف أشباه النواقل و كذا تواترها الضعيف في التبديل. من أجل مستويات عالية من الإستطاعة، يستحسن استعمال آلات ذات عدد أطوار أكبر من ثلاثة. المحرك الغير متزامن ذو ملفين ثابتين يقدم استطاعة مجزئة حيث يستعمل أشباه نواقل ذو توترات عالية، الشيء الذي يسمح بتقليص الترددات خاصة تلك الناتجة في العزم الكهرومغناطيسي. في هذا البحث قمنا بدراسة المحرك الغير متزامن ذو ملفين ثابتين المغذى أولاً مباشرة من طرف الشبكة ثم بواسطة موج للتوتر. ثقة هذا المنفذ تبرز في امكانية التشغيل في حالة خلل أو انقطاع إحدى أطوار التغذية.

**كلمات مفتاحية:**

محرك غير متزامن ذو ملفين ثابتين، موج، المحرك ذو عدد كبير من الأطوار.

**Résumé :**

Le moteur asynchrone triphasé, alimenté par onduleur de tensions, est un système d'entraînement possédant de nombreux avantages. , mais, limité à une certaine gamme de puissance, à cause, des contraintes électriques subies par les semi-conducteurs et de leurs faibles fréquences de commutation.

Pour des applications de fortes puissances, des machines ayant un nombre de phases supérieur à trois sont utilisées. La machine asynchrone à double étoile offre une segmentation de la puissance mise en jeu ainsi que l'utilisation de composants ayant une haute fréquence de commutation, ce qui réduit, considérablement, le taux d'harmoniques, notamment, celui du couple.

Dans cet essai, la MASDE est alimentée par le réseau électrique, puis par des onduleurs de tensions. La fiabilité est assurée par la possibilité de fonctionnement en mode dégradé.

**Mots clés :**

Machine asynchrone à double étoile, onduleur MLI, machine multiphasée.

**Summary :**

The three-phase asynchronous motor, powered by a voltage inverter, is a drive system with many advantages. , but limited to a certain range of power because of the electrical stresses experienced by semiconductors and their low switching frequencies.

To insure systems of motorization for applications of strong capacities, the use of machines, having an upper number of phases for three, is an inevitable solution. The asynchronous machine with double star is the alternative, which offers a segmentation of the power as well as the use of components having a high frequency of switching, what reduces, considerably, the rate of harmonious, in particular, that of the torque.

This theme presents a study of the DSIM fed, directly, by the electricity network, then, by the inverters of tensions. The reliability of this kind of engine is insured by the fact that functioning in degraded mode is possible, where, one or several phases of the engine are disconnected.

**Keywords:**

Dual stator induction motor (DSIM), control in degraded mode, inverter MLI, multiphase engine.