

الشعبية الديمقراطية الجزائرية الجمهورية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

كلية العلوم و التكنولوجيا

Département Electronique

قسم الإلكترونيك

# Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de

## MASTER

Département : Electronique

Filière : Electronique

Spécialité : Industries électroniques

Présentée par :

- BENHALILOU Mayar
- MOKHBI Leila

Intitulé :

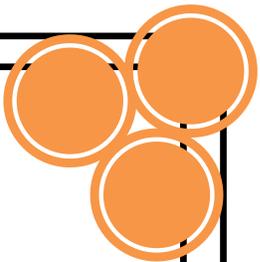
*Étude de la commande linéaire avec et sans capteur mécanique d'un actionneur électrique alimenté par des onduleurs multi niveaux*

*Soutenu le : 25/06/2024*

*Devant le jury composé de :*

<i>Nom &amp; Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>Mr. TALBI Billel</i>	<i>MCA</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>Mr. ZAIDI Elyazid</i>	<i>MCB</i>	<i>Encadrant</i>	<i>ENSH-BLIDA</i>
<i>Mr. BENTOUHAMI Larafi</i>	<i>MCB</i>	<i>Co-Encadrant</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>Mr. MERABET Elkheir</i>	<i>Pr</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

*Année Universitaire 2023/2024*



---

# Remerciements

*Ce document présente les travaux effectués dans le cadre de notre projet de fin d'étude de master de Département d'Electronique de la Faculté des Sciences et de la Technologie d'Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi Bordj Bou Arreridj.*

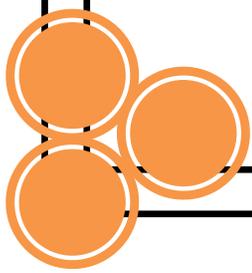
*On remercie dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.*

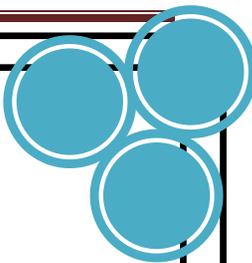
*Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de **Dr. Zaidi Elyazid, MCB**, on le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.*

*Nous adressons nos remerciements à notre encadreur **Dr. L. Bentouhami, MCB** de l'Université de Bordj Bou Arreridj, pour sa disponibilité à l'élaboration de ce travail.*

*Aussi mes collègues et tous les étudiants de Promotion MCIL 2019/2024.*

*Notre remerciement s'adresse également à tous nos professeurs pour leurs générosités et la grande patience dont ils ont su faire preuve malgré leurs charges académiques et professionnelles.*





# Dédicace

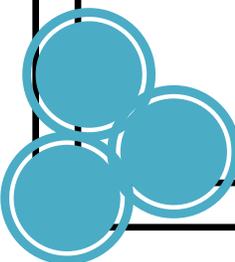
وَأَخِرُ دَعْوَاهُمْ أَنْ الْحَمْدُ لِلَّهِ رَبِّ الْعَالَمِينَ

Avec l'expression de ma reconnaissance, Je dédie ce modeste travail à ceux qui, quels soient les termes embrassés, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère

- ✦ A **moi-même**, je suis fière de moi et fière de la personne que je devienne.
- ✦ A mon ange gardien, mon précieux offre du dieu, qui doit ma vie, ma réussite et tout mon respect : Papa **Chaouki**.
- ✦ A la femme qui a souffre sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non âmes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureuse : mon trésor **Mama Soriya**
- ✦ A mes chères sœurs : **Chams El-Assil** , **Ayat-Errahmane**, **Douaa-Errahmane**
- ✦ A mes adorables frères : **Abderrahmane**, **Anouar** et **Ghaith**
- ✦ A mon Encadrant **Dr. Zaidi Elyazid** cela je tiens à le remercier chaleureusement.
- ✦ mon grand-père **Lhambli** « Allah yerhmou »
- ✦ A mes grandes mère **Houriya** et **Rahima** et mon grand-père **Said** , mes oncles spécialement **MOUSTAPHA** et mes tantes que dieu leur donne une longue et joyeuse vie .
- ✦ mes collègues : **Soulef** , **Wafa** , **Ibtissem** , **Rayane Nezzar**, **Wassim**

Sans oublier mon binôme **Leila Mokhbi** pour son soutien moral et sa compréhension tout au long de les années universitaires

*Mayar BENHALILOU*



# Dédicace

وَمَا تَوْفِيقِي إِلَّا بِاللَّهِ

**J**e dédie ma réussite avec toute ma considération à moi-même, et quelques personnes que je respecte, aime et qui ont contribué à cette réussite

A l'homme, qui a été et restera toujours mon idole, mon cadeau magique que Dieu m'a donnée dans la vie : **Kamal**, je vous remercie pour tes principes, et je t'aime infiniment

A la femme qui a consentir les efforts pour me rendre heureuse et je peux dire que cette réussite est de lui mon adorable mère **Fatiha**. Aucune dédicace ne saurait exprimer tout le respect et l'amour que je vous porte.

- ✚ A mes chers frères **Bassem**, **Aissa**, **Mouhammed** et sa femme **Asma**.
- ✚ A mes chères sœurs **Basma** et **Malak**.
- ✚ À L'encadrant **Mr. Z. Elyazid** pour son soutien et pour son aide.
- ✚ A mes amis qui m'ont toujours encouragée : **Nour**, **Soulef**, **Wafa** et **Ibtissem**.
- ✚ A mon binôme **Mayar** pour tout : son soutien, son amitié...

*Leila Mokhbi*

---

---

## Table des matières

<i>Table des matières</i> .....	<i>ii</i>
<i>Liste des tableaux</i> .....	<i>iv</i>
<i>Liste des figures</i> .....	<i>v</i>
<i>Introduction Générale</i> .....	<i>1</i>
<b>Chapitre 1 : Etat de l'art sur les actionneurs électrique</b> .....	<b>3</b>
1.1 Introduction .....	3
1.2 Actionneurs .....	3
1.2.1 Définition .....	3
1.2.2 Nature des actionneurs .....	4
1.2.3 Actionneurs électriques linéaire .....	4
1.3 Actionneurs électriques statiques linéaires .....	4
1.3.1 Moteur à induction linéaire .....	4
1.3.2 Moteurs linéaires synchrones .....	5
1.3.3 Moteurs linéaires homopolaires .....	5
1.3.4 Moteurs linéaires piézoélectriques .....	6
1.4 Actionneurs électriques dynamiques .....	6
1.4.1 Moteur pas à pas .....	6
1.4.2 Machine asynchrone triphasée .....	7
1.4.3 Machine asynchrone double étoile .....	7
1.4.4 Machine asynchrone multi phases .....	8
1.5 Application des machines multi-phases .....	9
1.5.1 Traction ferroviaire et automobile .....	9
1.5.2 Marine .....	10
1.5.3 Avionique et aérospatial .....	10
1.5.4 Industrielles .....	10
1.6 Choix de notre structure étudié .....	11
1.7 Conclusion .....	11

---

## **Chapitre 2 : Modélisation de l'association machine asynchrone double Etoile /onduleur à deux niveaux .....21**

2.1. Introduction.....	21
2.2. Modèle de la machine asynchrone triphasée à double étoile.....	21
2.2.1 Représentation de la machine.....	21
2.3. Choix du système d'axes .....	25
2.4. Modélisation de l'onduleur .....	25
2.5. Simulation de l'association MASDE/Onduleur en boucle ouverte .....	28
2.6. Conclusion .....	31

## **Chapitre 3 : Étude comparative entre la commande vectorielle indirecte et directe pour la commande d'une MASDE .....38**

3.1. Introduction.....	38
3.2. Commande vectorielle .....	38
3.2.1 L'objectif de la commande vectorielle .....	38
3.3 Orientation du flux .....	40
3.4 Méthodes de la commande vectorielle .....	40
3.4.1 Commande vectorielle indirecte de la MASDE .....	40
3.4.2 Commande vectorielle directe de la MASDE.....	46
3.4.2.1 Transformation de Concordia.....	47
3.4.2.3 Estimation du flux statorique .....	48
3.4.2.4 Résultats de simulation et interprétations.....	49
3.5. Étude comparative .....	51
3.6 Conclusion .....	52
Conclusion générale .....	54
Annexe A : Synthèse des régulateurs de la commande vectorielle.....	55
Annexe B : Paramètres du système .....	60

---

---

## Liste des tableaux

Table C.1 Paramètres de la MASDE.....	60
---------------------------------------	----

---

## Liste des figures

Figure 1-1 Principe de fonctionnement d'un actionneur.....	3
Figure 1-2 Moteur à induction linéaire. ....	5
Figure 1-3 Moteurs linéaires synchrones. ....	5
Figure 1-4 Moteurs linéaires homopolaires. ....	5
Figure 1-5 Moteurs linéaires piézoélectriques. ....	6
Figure 1-6 Moteur pas à pas.....	7
Figure 1-7 Moteur asynchrone triphasée.....	7
Figure 1-8 Machine asynchrone double étoile. ....	8
Figure 1-9 Moteur asynchrone multi-phases.....	8
Figure 1-10 Système locomotive.....	9
Figure 1-11 Système de propulsion navale. ....	10
Figure 1-12 Démarreur d'avion.....	10
Figure 1-13 Secteurs Industrielles.....	11
Figure 1-14 Choix de structure étudié.....	11
Figure 2-1 Modèle mathématique de la MASDE.....	21
Figure 2-2 Système d'entraînement électrique basé sur la MASDE alimenté par de deux onduleurs. ....	25
Figure 2-3 Principe de la commande par la modulation de largeur d'impulsion sinus-triangle. ....	27
Figure 2-4 Principe de la commande par Hystérésis.....	27
Figure 2-5 Principe de la MLI-V.....	28
Figure 2-6 Block de simulation du système. ....	29
Figure 2-7 Allures des courants des phases de deux étoiles de la MASDE.....	29
Figure 2-8 Allures des tensions de deux étoiles aux bornes de la MASDE.....	30
Figure 2-9 Allures des grandeurs mécaniques de la MASDE.....	30
Figure 3-1 Principe de la commande découplée entre MCC et MASDE.....	39
Figure 3-2 Modèle équivalent de la MASDE dans le repère de Park (d-q). ....	41
Figure 3-3 Commande vectorielle de la MASDE. ....	43
Figure 3-4 Block de simulation du système par l'IFOC. ....	44

---

Figure 3-5 Résultats de simulation des grandeurs mécaniques obtenues par commande vectorielle indirecte de la MASDE contrôlée par la technique de MLI-ST.....	45
Figure 3-6 Résultats de simulation des courants mesures obtenues par la commande vectorielle indirecte de la MASDE contrôlée par la technique de MLI-ST.....	45
Figure 3-7 Résultats de simulation des courants des phases de deux étoiles obtenues par la commande vectorielle indirecte de la MASDE contrôlée par la technique de MLI-ST. ....	45
Figure 3-8 Résultats de simulation des courants de chaque phase de deux étoiles obtenues par la commande vectorielle indirecte de la MASDE contrôlée par la technique de MLI-ST. ....	46
Figure 3-11 Résultats de simulation des grandeurs mécaniques obtenues par la commande vectorielle directe de la MASDE contrôlée par la technique de MLI-ST.....	49
Figure 3-12 Résultats de simulation des courants directe et quadrature obtenu par la commande vectorielle directe de la MASDE contrôlée par la technique de MLI-ST. ....	50
Figure 3-13 Résultats de simulation des courants des phases de deux étoiles obtenues par la commande vectorielle indirecte de la MASDE contrôlée par la technique de MLI-ST. ....	50
Figure 3-14 Résultats de simulation des courants de chaque phase de deux étoiles obtenues par la commande vectorielle indirecte de la MASDE contrôlée par la technique de MLI-ST.	50
Figure 3-15 Résultats de simulation des courants de chaque phase de deux étoiles obtenues par la commande vectorielle indirecte de la MASDE contrôlée par la technique de MLI-ST.	51
Figure 3-16 Résultats de simulation du couple électromagnétique obtenus par les deux commandes vectorielles directe et indirecte de la MASDE.....	51
Figure 3-17 Résultats de simulation des courants des phases obtenus par la commande vectorielle indirecte et directe de la MASDE.....	51



---

## Liste des symboles et des abréviations

<b>I FOC :</b>	Indirect Commande à flux orienté
<b>DFOC :</b>	Direct Commande à flux orienté
<b>MAS:</b>	Machine asynchrone triphasée
<b>SV-PWM:</b>	Space vector pulse width modulation
<b>MLI-V :</b>	Modulation de largeur d'impulsion vectorielle
<b>PI :</b>	Proportionnelle Intégrateur
<b>IGBT:</b>	Insulated Gate Bipolar Transistor
<b>GTO :</b>	Gate Turn-off-Thyristor
<b>MLI :</b>	Modulation de largeur d'impulsion
$I_{ds}$ :	Composante du courant statoriques suivant l'axe (d)
$I_{qs}$ :	Composante du courant statoriques suivant l'axe (q)
$V_{ds}$ :	Composante de tension rotorique suivant l'axe (d)
$V_{qs}$ :	Composante de tension rotorique suivant l'axe (q)
$K_i$ et $K_p$ :	Coefficients du régulateur conventionnel de la vitesse
$L_s$ :	Inductance cyclique propre d'une phase statorique
$L_r$ :	Inductance cyclique propre d'une phase rotorique
$R_r$ :	Résistance d'une phase de l'enroulement rotorique
$R_s$ :	Résistance d'une phase de l'enroulement statoriques
$V_{sabc}$ :	Tensions instantanées des phases statoriques
$V_{rabc}$ :	Tensions instantanées des phases rotoriques
$\varphi_{sabc}$ :	Flux des phases statoriques
$\varphi_{rabc}$ :	Flux des phases rotoriques
$\varphi_{ds}$ :	Composante du flux statorique suivant l'axe (d)
$\varphi_{qs}$ :	Composante du flux statorique suivant l'axe (q)
$\varphi_{dr}$ :	Composante du flux rotorique suivant l'axe (d)
$\varphi_{qr}$ :	Composante du flux rotorique suivant l'axe (q)
<b>J :</b>	Moment d'inertie du rotor
<b><math>\Omega</math> :</b>	Vitesse angulaire mécanique du rotor

---

<b>f:</b>	Coefficient de frottement visqueux
<b><math>C_{em}</math>:</b>	Couple électromagnétique délivré par le moteur
<b><math>C_r</math>:</b>	Couple résistant, ou de charge
<b><math>\omega</math> :</b>	Vitesse angulaire électrique du rotor
<b><math>\theta</math>:</b>	Angle de rotation du rotor par rapport au stator
<b><math>\theta_{obs}</math>:</b>	Angle de rotation de <b>(d,q)</b> par rapport au stator
<b><math>\theta_r</math>:</b>	Angle de rotation de <b>(d,q)</b> par rapport au rotor
<b><math>T_r = \frac{L_r}{R_r}</math> :</b>	Constante de temps rot

## Introduction Générale

Dans tous les secteurs, qu'ils soient civils ou militaires, d'importants progrès ont été réalisés afin de réduire la taille et le poids des systèmes électriques. Cette évolution a favorisé une intégration croissante de solutions électriques dans les navires. Parmi ces solutions, la machine asynchrone double étoile (**MASDE**) émerge progressivement comme une option viable pour de nombreux navires, soutenant ainsi les avancées dans les domaines des machines électriques, de l'électronique de puissance et des microprocesseurs. Cette combinaison de progrès technologiques a permis le développement d'architectures d'entraînement électrique plus robustes, performantes et économiques.

La **MASDE** présente plusieurs avantages et a fait l'objet d'une attention croissante ces dernières années. Comparée aux machines triphasées, la machine à six phases permet notamment de réduire la taille de l'électronique de puissance utilisée, améliorant ainsi la fiabilité du système en cas de défaillance. Les applications de cette technologie sont multiples et variées, couvrant des domaines tels que l'alternateur automobile, la propulsion navale et automobile, la traction des locomotives, les systèmes d'alimentation d'urgence aéronautique ainsi que les générateurs pour éoliennes, entre autres.

Cette étude se concentre spécifiquement sur l'application de la technique de modulation de largeur d'impulsion sinus-triangle (**MLI-ST**) pour la commande d'un système d'entraînement électrique basé sur une **MASDE**, alimentée par deux onduleurs de tension. En outre, la **MASDE**, utilisée également en tant que moteur, représente une variante intéressante de la machine asynchrone classique en termes de performances et de robustesse.

*Ce mémoire consiste à étude et commande sans et avec capteur mécanique d'un actionneur électrique alimenté par de deux onduleurs de tension a deux niveaux. Dans le cadre de notre étude, nous nous concentrerons sur une analyse approfondie des actionneurs électriques. Ce type d'actionneur se distingue par son couple électromagnétique élevé, lui permettant d'entraîner efficacement des charges importantes. Cette caractéristique essentielle élargit considérablement leur champ d'application, notamment pour des charges présentant une résistance élevée.*

*Ce travail se subdivise en trois chapitres :*

Le premier chapitre examine l'état de l'art des actionneurs électriques, ainsi que leurs applications, avantages et inconvénients.

Le deuxième chapitre est dédié à la modélisation mathématique de la machine asynchrone double étoile et de l'onduleur de tension à deux niveaux. Nous simulerons l'association de la machine avec les onduleurs pour observer l'impact de ces derniers sur la machine.

Le troisième chapitre aborde les principes fondamentaux des deux types de commandes vectorielles : la commande vectorielle indirecte et la commande vectorielle directe par orientation du flux rotorique appliquée à la MASDE. Nous présenterons également les résultats de la commande vectorielle indirecte par rapport à la commande vectorielle directe et analyserons les performances globales du système.

En conclusion, ce travail vise à mener une étude comparative entre la commande vectorielle indirecte et directe d'une MASDE alimentée par des onduleurs à deux niveaux.

## **Chapitre 1 :**

# **Etat de l'art sur les actionneurs électriques**

## Chapitre 1 : Etat de l'art sur les actionneurs électrique

### 1.1 Introduction

Un actionneur est un dispositif qui reçoit un apport d'énergie et le convertit en mouvement ou en force. Il s'agit d'un composant essentiel dans de nombreuses technologies modernes et de nombreux domaines de l'ingénierie. De la robotique aux énergies renouvelables, les actionneurs jouent un rôle essentiel dans le contrôle et l'automatisation de divers processus et systèmes. Ils se présentent sous de nombreuses formes et types différents, chacun ayant des capacités et une utilisation uniques, par exemple un volant un simple cylindre pneumatique ou un moteur électrique complexe.

Dans ce chapitre, nous allons dresser un état de l'art des actionneurs électriques. Tout d'abord, nous présenterons les différents types d'actionneurs. Ensuite, nous détaillerons les divers types d'actionneurs électriques, ainsi que leurs applications, avantages, inconvénients et principes de fonctionnement. Enfin, nous présenterons l'architecture du système d'entraînement électrique que nous avons choisi pour débiter notre étude.

### 1.2 Actionneurs

#### 1.2.1 Définition

Un actionneur est un dispositif qui convertit l'énergie qu'il reçoit en un effet physique (chaleur, champ magnétique, lumière, mouvement, position, pression) capable d'accomplir un travail (Figure 1-1) [1] [2].

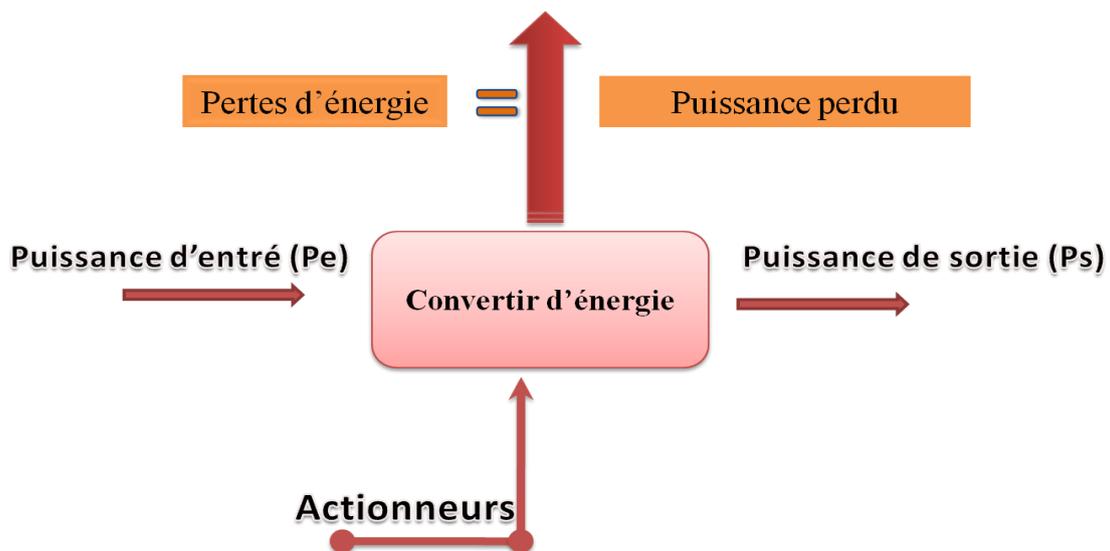


Figure 1-1 Principe de fonctionnement d'un actionneur.

### 1.2.2 Nature des actionneurs

Les actionneurs est composants essentiels des systèmes qui assure une actions, ainsi que assurent la mise en mouvement de leurs différents organes. Ces dispositifs, principalement représentés par les moteurs et les vérins, convertissent divers types d'énergie (électrique, hydraulique ou pneumatique) en énergie mécanique, permettant ainsi l'accomplissement de tâches spécifiques. Dans la plupart des cas, le contrôle précis de ces actionneurs s'effectue via des signaux de commande électriques [1] [2].

### 1.2.3 Actionneurs électriques linéaire

Un actionneur linéaire est un moteur électrique qui ne génère pas un mouvement de rotation mais un mouvement linéaire. Contrairement aux moteurs rotatifs, un moteur linéaire déplace l'élément le long d'un chemin linéaire ou courbe [3]. De plus, on distingue deux grandes catégories de moteurs linéaires :

- ✚ **Moteurs linéaires à faible accélération** : Ces moteurs sont principalement utilisés dans les applications de transport, comme les trains à sustentation magnétique et les systèmes de manutention. Ils se caractérisent par leur capacité à générer des mouvements précis et fluides sur de longues distances.
- ✚ **Moteurs linéaires à haute accélération** : Ce type de moteur est employé dans des applications où une accélération rapide est requise, telles que les armes à feu électromagnétiques (canons à rails) et certains équipements spatiaux. Ils se distinguent par leur puissance élevée et leur capacité à générer des forces importantes sur de courtes distances.

## 1.3 Actionneurs électriques statiques linéaires

### 1.3.1 Moteur à induction linéaire

Dans les moteurs à induction linéaire, la force est générée par le déplacement d'un champ magnétique linéaire qui interagit avec des conducteurs immergés dans ce champ. Ce mouvement induit des courants de Foucault dans chaque conducteur présent dans la zone d'influence du champ magnétique [3] [4].

Les conducteurs peuvent être, par exemple, un enroulement, une boucle ou simplement un morceau de métal. Ces courants de Foucault créent un champ magnétique opposé, tel que déterminé par la loi de Lenz. Les deux champs magnétiques opposés se repoussent, créant un mouvement lorsque le champ magnétique balaie le métal (Figure 1-2) [3].



Figure 1-1 Moteur à induction linéaire.

### 1.3.2 Moteurs linéaires synchrones

Les moteurs linéaires synchrones utilisent rarement des commutateurs afin de réduire les coûts. Pour cette raison, le rotor contient souvent des aimants permanents ou un noyau en fer doux (Figure 1-3) [3].



Figure 1-2 Moteurs linéaires synchrones.

### 1.3.3 Moteurs linéaires homopolaires

Dans les moteurs linéaires homopolaires, un courant élevé traverse un sabot métallique par des contacts glissants. Ces contacts sont alimentés par deux rails. Cette action produit un champ magnétique qui fait projeter le métal sur les rails (Figure 1-4) [4].

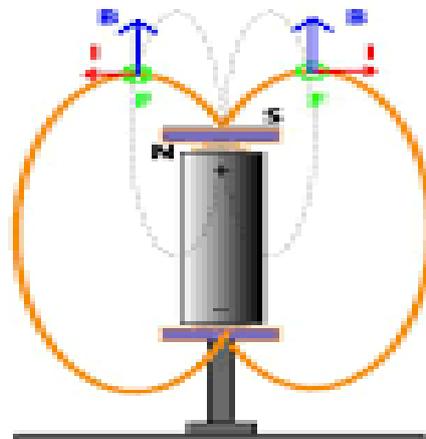


Figure 1-3 Moteurs linéaires homopolaires.

### 1.3.4 Moteurs linéaires piézoélectriques

Un moteur piézoélectrique est un type courant de moteur qui utilise de l'électricité pour produire des vibrations d'une manière qui produit un mouvement linéaire ou rotatif [5]. Un mobile recrée un effet similaire lorsqu'il se déplace en raison des vibrations lors de la réception d'un appel.

Les moteurs piézoélectriques ont beaucoup de force dans les mouvements lents, mais ils peuvent aussi être très rapides, avoir très peu de pièces, n'ont pas besoin de lubrification et sont très économes en énergie. L'inconvénient est qu'ils ne peuvent pas tourner librement à l'arrêt (Figure 1-5).

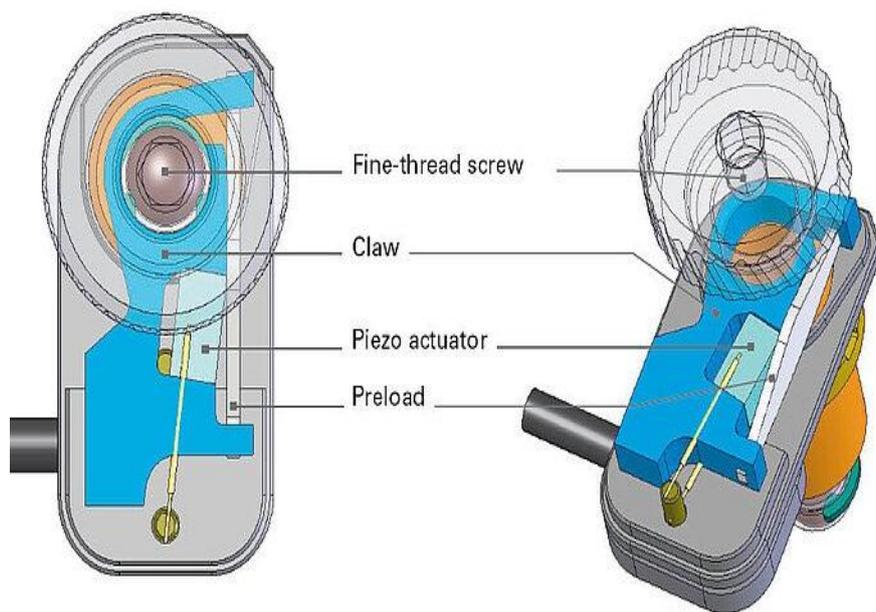


Figure 1-5 Moteurs linéaires piézoélectriques.

## 1.4 Actionneurs électriques dynamiques

### 1.4.1 Moteur pas à pas

Le moteur pas à pas est un dispositif électromécanique sans balais qui convertit une série d'impulsions électriques en une rotation angulaire précise de son arbre, par paliers définis. Chaque impulsion reçue par le moteur lui fait tourner son arbre d'un angle fixe, appelé angle de pas, généralement exprimé en degrés [6]. Ce mode de fonctionnement permet un contrôle précis de la vitesse, de la rotation, de la direction et de la position angulaire du moteur, ce qui le rend particulièrement utile dans les systèmes de contrôle des processus industriels, les machines CNC, la robotique, l'automatisation de la fabrication et l'instrumentation (Figure 1-6).



Figure 1-6 Moteur pas à pas.

### 1.4.2 Machine asynchrone triphasée

Une machine asynchrone triphasée est un type de machine électrique à courant alternatif dont la vitesse de rotation du rotor est toujours inférieure à la vitesse du champ magnétique généré par le stator. Ce décalage de vitesse, appelé glissement, est à l'origine du nom asynchrone [7] [8]. L'énergie électrique est transférée du stator au rotor par induction électromagnétique, ce qui permet à la machine asynchrone de convertir l'énergie électrique en énergie mécanique de rotation (Figure 1-7). Elle est utilisée dans de nombreuses applications industrielles et domestiques, telles que les pompes, les ventilateurs, les compresseurs et les climatiseurs [8].



Figure 1-7 Moteur asynchrone triphasée.

### 1.4.3 Machine asynchrone double étoile

La machine asynchrone double étoile se distingue par la présence de deux systèmes de bobinages triphasés dans le stator, décalés d'un angle électrique de  $30^\circ$ . Le rotor, quant à lui, peut-être de type bobiné ou à cage d'écureuil [9] [10] [11]. La structure électrique du rotor à cage, constituée de barres conductrices en aluminium et de tôles ferromagnétiques, est

privilegiée pour son faible coût, sa robustesse, sa simplicité d'utilisation et son faible entretien (Figure 1-8).



Figure 1-8 Machine asynchrone double étoile.

#### 1.4.4 Machine asynchrone multi phases

Les machines multi phases se distinguent en deux catégories selon le nombre de phases statorique : celles dont le nombre de phases sont un multiple de trois et les autres [11]. Pour un nombre de phases donné, différentes configurations sont possibles en fonction du décalage angulaire entre deux bobines adjacentes, appelé décalage entre les étoiles. Par exemple, une machine double étoile (6 phases) avec un angle de décalage de  $0^\circ$  aura des caractéristiques différentes d'une machine double étoile avec un angle de  $30^\circ$  (Figure 1-9).



Figure 1-9 Moteur asynchrone multi-phases.

##### a) Avantages [10] [11] :

- Durabilité mécanique : La machine asynchrone est robuste et peut supporter des conditions de fonctionnement difficiles.
- Faible coût : Elle est moins chère que les autres types de machines électriques, notamment les machines synchrones.
- Faible maintenance : Elle ne nécessite que peu d'entretien, ce qui réduit les coûts d'exploitation.

- Large gamme d'applications : Elle peut être utilisée dans une grande variété d'applications, des ventilateurs aux pompes en passant par les machines-outils.

**b) Inconvénients [11] :**

- Glissement : Le rotor ne tourne pas à la même vitesse que le champ magnétique, ce qui entraîne une perte de puissance et d'efficacité.
- Courant de démarrage élevé : Le courant de démarrage peut être 5 à 8 fois supérieur au courant nominal, ce qui peut solliciter le réseau électrique.
- Difficulté à contrôler la vitesse : La vitesse de rotation est difficile à contrôler, en particulier à basse vitesse.

## 1.5 Application des machines multi-phases

Les machines multi-phases se révèlent être des solutions remarquables pour les applications de puissance élevée, notamment dans les domaines de la propulsion navale, de la ventilation et de la compression, ainsi que du broyage. Leurs performances supérieures en termes de densité de puissance, de rendement énergétique, de fonctionnement fluide et de contrôle accru en font des choix incontournables pour les industries qui recherchent l'efficacité, la fiabilité et la durabilité [11].

### 1.5.1 Traction ferroviaire et automobile

Dans le secteur des transports, les machines multi-phases apportent une solution performante et fiable pour la traction ferroviaire et automobile. Elles offrent une meilleure efficacité énergétique, une réduction des émissions polluantes et un fonctionnement plus silencieux (Figure 1-10).

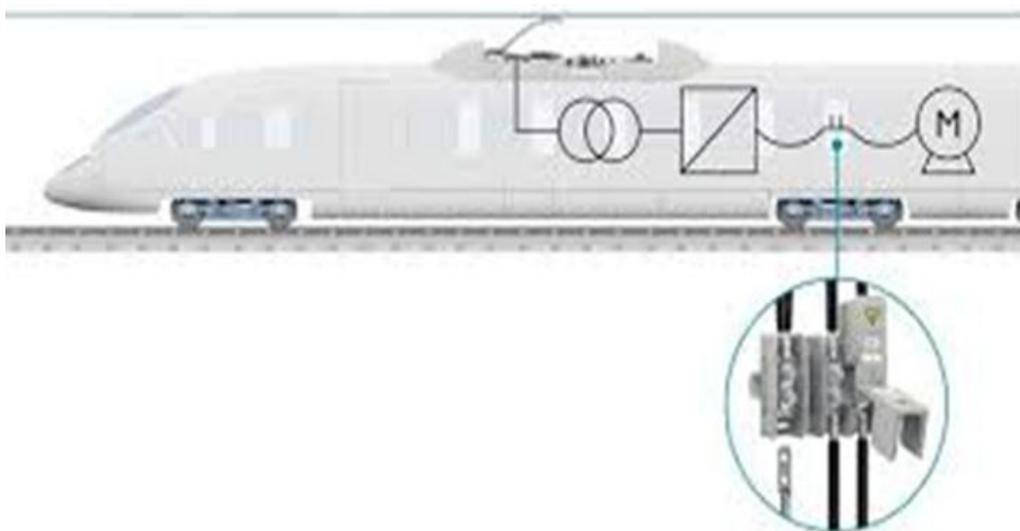


Figure 1-10 Système locomotive.

### 1.5.2 Marine

La propulsion navale bénéficie également des avantages des machines multi-phases. Elles permettent d'améliorer la maniabilité des navires, d'augmenter leur capacité de charge et de réduire les coûts d'exploitation (Figure 1-11) [12].



Figure 1-11 Système de propulsion navale.

### 1.5.3 Avionique et aérospatial

Dans l'industrie aéronautique et spatiale, les machines multi-phases sont appréciées pour leur légèreté, leur compacité et leur haute densité de puissance. Elles contribuent à l'optimisation des performances des avions et des engins spatiaux (Figure 1-12) [11].



Figure 1-12 Démarreur d'avion.

### 1.5.4 Industrielles

Les machines multi-phases trouvent également leur place dans divers secteurs industriels, tels que la ventilation, la compression, le broyage et le pompage. Elles offrent un rendement énergétique élevé, un fonctionnement stable et une réduction des vibrations (Figure 1-13) [12].



Figure 1-13 Secteurs Industrielles.

## 1.6 Choix de notre structure étudié

Dans cette disposition nous avons choisis la structure qui montre sur la Figure 1-14. Cette structure basée sur une machine asynchrone double étoile alimentée par de deux onduleurs de tension a deux niveaux.

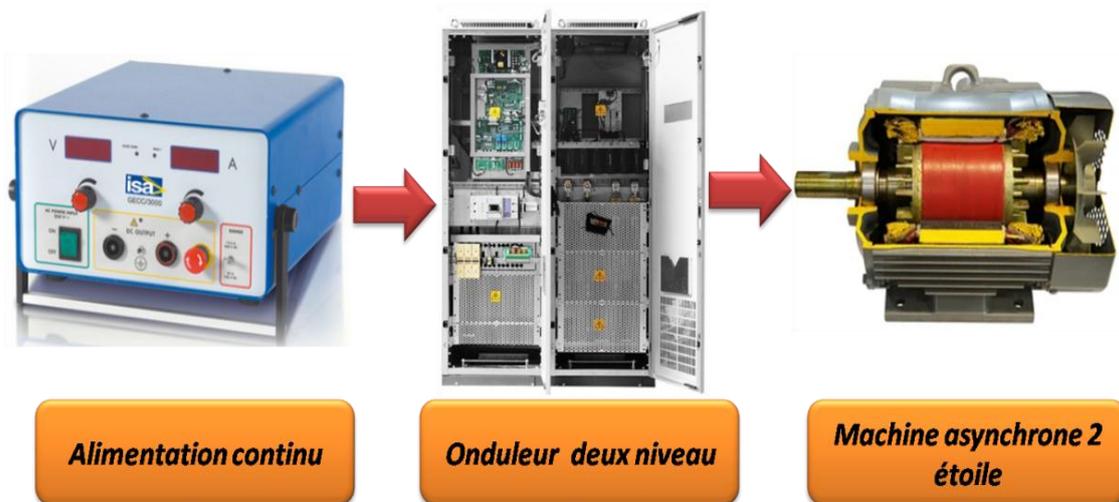


Figure 1-14 Choix de structure étudié.

## 1.7 Conclusion

Ce chapitre présente un état de l'art des actionneurs électriques, suivi d'une présentation des différents types d'actionneurs électriques en mettant en avant leurs avantages et inconvénients respectifs. Enfin, les applications des actionneurs électriques sont également discutées.

*Dans le chapitre suivant nous présentent la modélisation de la machine asynchrone double étoile (MASDE).*

---

*Référence bibliographique*

- [1] P. Rajesh and F. A. Shajin, "Multi-objective hybrid algorithm for planning electrical distribution system," *Eur. J. Electr. Eng.*, vol. 22, no. 1, pp. 224–509, 2020.
- [2] L. Tolbert, J. Chiasson, Z. Du, and K. McKenzie, "Elimination of harmonics in a multilevel converter With Non equal DC sources," *IEEE Trans. Industry Appl.*, vol. 41, pp. 75–82, 2005.
- [3] P. E. Cavarec, H. B. Ahmed, and B. Multon, "Force density improvements from increasing the number of airgap surfaces in synchronous linear actuators", *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, vol. 150, no. 1, 106-116, 2003.
- [4] Z. Ferkovaet, "Electromagnetic design of ironless permanent magnet synchronous linear motor", *2008 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion. IEEE*, 2008.
- [5] X. Gao, J. Yang, J. Wu, X. Xin, Z. Li, X. Yuan, and S. Dong, "Piezoelectric actuators and motors: materials, designs, and applications", *Advanced Materials Technologies*, vol. 5, no. 1, 2020.
- [6] P. Boatwright, J. Cagan, D. Kapur, and A. Saltiel, "A step by step process to build valued brands", *Journal of Product & Brand Management*, vol. 18, no. 1, pp. 38-49, 2009.
- [7] K. Horváth, M. Kuslits, "Dynamic performance of estimator-based speed sens or less control of induction machines using extended and unscented Kalman Filters. *Power Electronics and Drives*, vol. 3, no. 1, pp.129-144, 2018.
- [8] W. Kim, C. Yang, and C. C. Chung, "Design and implementation of simple field-oriented control for permanent magnet stepper motors without DQ transformation", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 47, no.10, pp. 4231-4234, 2011.
- [9] E. Zaidi, K. Marouani, A. E Mabrek, E. Merabet and L. Bentouhami, "Fuzzy Logic Control of Multi-Phase Induction Machine Drives Based on Cascaded Hybrid Multi-level Inverters," *In IEEE the International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb CISTEM 2018, USTHB-Algiers, Algeria, 29-31 October 2018.*
- [10] 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, France, décembre 2001..
- [11] E. Zaidi, "Etude de la commande d'un entraînement électrique de puissance à base d'une architecture segmentée, Thèse de Doctorat de l'Ecole Militaire Polytechnique, Algérie, 2021.
- [12] T. U Rehman, M. Sultan, A. Chang, and K. Young, "Current and future applications of statistical machine learning algorithms for agricultural machine vision systems. *Computers and electronics in agriculture*, vol. 156, p. 585-605, 2019.



## **Chapitre 2 :**

# **Modélisation de l'association machine asynchrone doble étoile/onduleur à deux niveaux**

## Chapitre 2 : Modélisation de l'association machine asynchrone double Etoile /onduleur à deux niveaux

### 2.1. Introduction

Actuellement, avec le développement de l'électronique de puissance et des composants à semi-conducteurs, la technique des onduleurs multi-niveaux représente un domaine de recherche important, également lié à l'obtention de tensions plus élevées. Parallèlement, l'objectif est d'obtenir des grandeurs de sortie de meilleure définition, c'est-à-dire présentant un contenu harmonique réduit. Il existe plusieurs topologies de conversion multi-niveaux. La première topologie a été initialement proposée par **A. Nabae en 1981** pour la génération de plusieurs niveaux de tension [1].

Dans ce chapitre, nous présentons la modélisation destinée à la commande de l'association machine asynchrone double étoile / onduleurs de tension à deux niveaux, afin d'améliorer la compréhension du sujet. Ce chapitre est structuré en deux parties distinctes principales : La première partie expose le modèle mathématique de la machine asynchrone double étoile. La deuxième partie présente les résultats de simulations où une machine asynchrone double étoile est contrôlée par deux onduleurs de tension à deux niveaux en boucle ouverte. Ces résultats sont ensuite analysés en détail.

### 2.2. Modèle de la machine asynchrone triphasée à double étoile

#### 2.2.1 Représentation de la machine

Le modèle mathématique de la machine asynchrone à double étoile est donné par la Figure 2-1 [2] [3] [4].

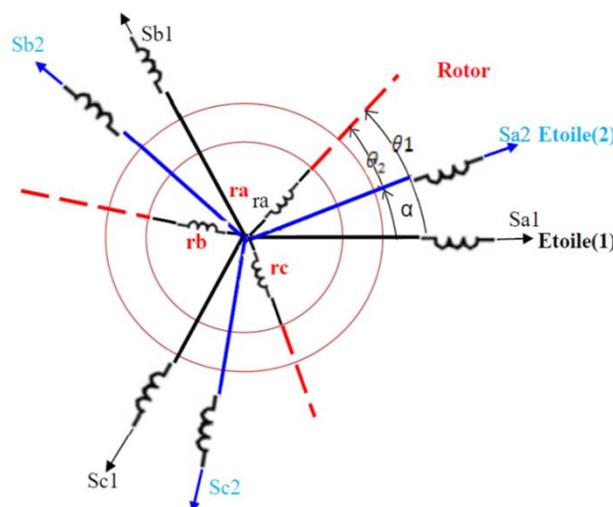


Figure 2-1 Modèle mathématique de la MASDE

➤ **Equations électriques**

Dans les équations des tensions de la machine asynchrone à double étoile, la tension appliquée à chaque enroulement est égale à la somme de la chute ohmique et de la chute inductive engendrées par le flux magnétique [3] [4] [5].

✚ Pour l'étoile 1 :

$$\begin{cases} v_{sa1} = R_{sa1}i_{sa1} + \frac{d\varphi_{sa1}}{dt} \\ v_{sb1} = R_{sb1}i_{sb1} + \frac{d\varphi_{sb1}}{dt} \\ v_{sc1} = R_{sc1}i_{sc1} + \frac{d\varphi_{sc1}}{dt} \end{cases} \quad (2.1)$$

✚ Pour l'étoile 2 :

$$\begin{cases} v_{sa2} = R_{sa2}i_{sa2} + \frac{d\varphi_{sa2}}{dt} \\ v_{sb2} = R_{sb2}i_{sb2} + \frac{d\varphi_{sb2}}{dt} \\ v_{sc2} = R_{sc2}i_{sc2} + \frac{d\varphi_{sc2}}{dt} \end{cases} \quad (2.2)$$

✚ Pour l'étoile deux:

$$\begin{cases} [V_{s1.2}] = [v_{as1.2} \ v_{bs1.2} \ v_{cs1.2}]^T \\ [I_{s1.2}] = [i_{as1.2} \ i_{bs1.2} \ i_{cs1.2}]^T \\ [\varphi_{s1.2}] = [\varphi_{as1.2} \ \varphi_{bs1.2} \ \varphi_{cs1.2}]^T \end{cases} \quad (2.3)$$

✚ Equations du rotor sont :

$$\begin{cases} [V_r] = [v_{ar} \ v_{br} \ v_{cr}]^T \\ [I_r] = [i_{ar} \ i_{br} \ i_{cr}]^T \\ [\varphi_r] = [\varphi_{ar} \ \varphi_{br} \ \varphi_{cr}]^T \end{cases} \quad (2.4)$$

➤ **Forme matricielle est la suivante**

✚ Pour l'étoile 1 :

$$[V_{sa1}] = R_{s1}i_{sa1} + \frac{d}{dt}\varphi_{sa1} \quad (2.5)$$

✚ Pour l'étoile 2 :

$$[V_{sa2}] = R_{s2}i_{sa2} + \frac{d}{dt}\varphi_{sa2} \quad (2.6)$$

On pose :

$$\begin{cases} R_{sa1} = R_{sb1} = R_{sc1} = R_{s1} \\ R_{sa2} = R_{sb2} = R_{sc2} = R_{s2} \end{cases} \quad (2.7)$$

$$\begin{cases} [R_{sa1}] = R_{s1}[ID]_{3 \times 3} \\ [R_{sa2}] = R_{s2}[ID]_{3 \times 3} \\ [R_r] = R_r[ID]_{3 \times 3} \end{cases} \quad (2.8)$$

Avec :

- $R_{s1}$ : Résistance d'une phase de l'étoile 1,
- $R_{s2}$ : Résistance d'une phase de l'étoile 2,
- $R_r$ : Résistance d'une phase du rotor.

#### ➤ Equations magnétiques

Les hypothèses simplificatrices citées précédemment donnent des relations linéaires entre les flux et les courants de la **MASDE**, qui s'écrivent sous forme matricielle [1].

$$\begin{cases} [\Phi_{sa1}] = [L_{s1,s1}][I_{sa1}] + [M_{s1,s2}][I_{sa2}] + [M_{s1,r}][I_r] \\ [\Phi_{sa2}] = [L_{s2,s2}][I_{sa2}] + [M_{s2,s1}][I_{sa1}] + [M_{s2,r}][I_r] \\ [\Phi_r] = [L_{r,r}][I_r] + [M_{r,s1}][I_{sa1}] + [M_{r,s2}][I_{sa2}] \end{cases} \quad (2.9)$$

Les sous matrices de la matrice des inductances sont :

$$[L_{s1,s1}] = \begin{bmatrix} L_{s1} + L_{ms} & -\frac{L_{ms}}{2} & -\frac{L_{ms}}{2} \\ -\frac{L_{ms}}{2} & L_{s1} + L_{ms} & -\frac{L_{ms}}{2} \\ -\frac{L_{ms}}{2} & -\frac{L_{ms}}{2} & L_{s1} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$[L_{s2,s2}] = \begin{bmatrix} L_{s2} + L_{ms} & -\frac{L_{ms}}{2} & -\frac{L_{ms}}{2} \\ -\frac{L_{ms}}{2} & L_{s2} + L_{ms} & -\frac{L_{ms}}{2} \\ -\frac{L_{ms}}{2} & -\frac{L_{ms}}{2} & L_{s2} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$$[L_{r,r}] = \begin{bmatrix} L_r + L_{mr} & -\frac{L_{mr}}{2} & -\frac{L_{mr}}{2} \\ -\frac{L_{mr}}{2} & L_r + L_{mr} & -\frac{L_{mr}}{2} \\ -\frac{L_{mr}}{2} & -\frac{L_{mr}}{2} & L_r + L_{mr} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$[M_{s1,s2}] = L_{ms} \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\alpha + \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\alpha + \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(\alpha) & \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\alpha + \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

$$[M_{s1,r}] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r + \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r + \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

$$[M_{s2,r}] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r - \alpha) & \cos\left(\theta_r - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \alpha + \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r - \alpha + \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r - \alpha) & \cos\left(\theta_r - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \alpha + \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r - \alpha) \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Les sous matrices :  $[M_{s2,s1}] = [M_{s1,s2}]^T$ ,  $[M_{r,s1}] = [M_{s1,r}]^T$ ,  $[M_{r,s2}] = [M_{s2,r}]^T$  ;

Avec :

- \*  $L_{s1}$  et  $L_{s2}$  : Inductance propre cyclique de la 1<sup>ère</sup> étoile, et celle de la 2<sup>ème</sup> étoile ;
- \*  $L_r$  : Inductance propre cyclique du rotor ;
- \*  $L_{ms}$  : Valeur maximale de coefficients d'inductance mutuelle statoriques et rotorique ;
- \*  $M_{sr}$  : Valeur maximale de coefficients d'inductance mutuelle entre une étoile et le rotor.

### ➤ Equations mécaniques

L'étude des qualités de la machine non convergente présente la variété des limites électriques (tension, flux, courant) mais en plus des limites mécaniques (couple, vitesse) [5] [6] :

$$C_{em} = p [I_{sabc}]^T \frac{d}{dt} [M_{sr}] [I_{rabc}] \quad (2.16)$$

L'équation du mouvement de la machine est :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - f\Omega \quad (2.17)$$

Ou :

$$\Omega = \frac{\omega}{p}$$

Avec :

- \* **J** : Moment d'inertie du rotor ;
- \*  **$\Omega$** :Vitesse angulaire mécanique du rotor;
- \* **f**: Coefficient de frottement visqueux;
- \*  **$C_{em}$**  : Couple électromagnétique délivré par le moteur ;
- \*  **$C_r$**  : Couple résistant, ou de charge ;
- \*  **$\omega$**  : Vitesse angulaire électrique du rotor.

### 2.3. Choix du système d'axes

Pour notre travail nous choisissons : un système d'axe « **d, q** » ce axe dernier est immobile par rapport au champ électromagnétique créé par les enroulements statoriques d'où [1]:

$$\omega_{coor} = \omega_s \rightarrow \theta = \int_0^t \omega_s dt$$

### 2.4. Modélisation de l'onduleur

Un onduleur de tension est un convertisseur statique qui permet de transformer l'énergie électrique continue d'une source en une énergie électrique alternative, dont la fréquence peut être fixe ou variable .En effet, le contrôle de la vitesse et du couple d'une MASDE s'effectue par action simultanée sur la fréquence et l'amplitude de la tension statorique, grâce à l'utilisation d'onduleurs de tension à fréquence variable [7].

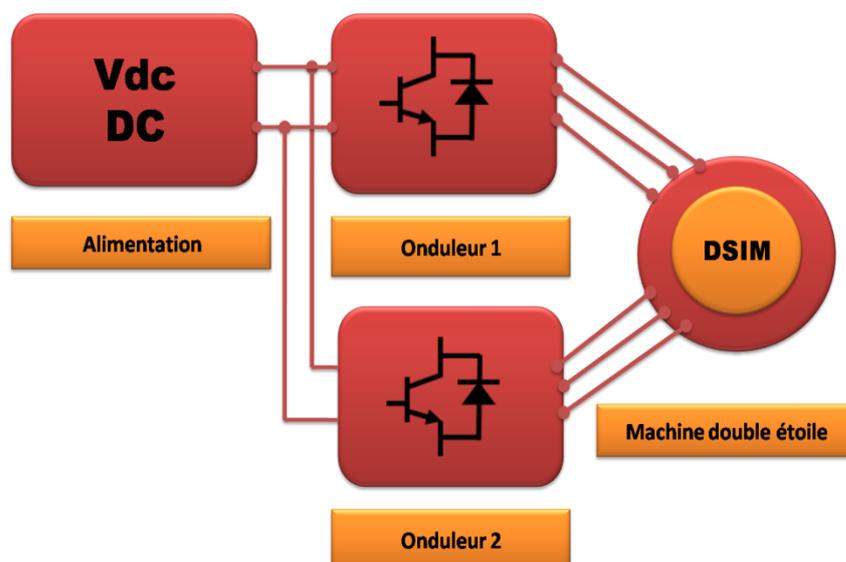


Figure 2-2 Système d'entraînement électrique basé sur la MASDE alimenté par de deux onduleurs.

Un onduleur à deux niveaux contrôle la forme d'onde de tension de sortie du convertisseur en utilisant deux potentiels électriques, tandis qu'un onduleur à trois niveaux en utilise trois. La forme d'onde de sortie d'un onduleur à trois niveaux étant plus proche d'une sinusoïde, une réduction de la taille du filtre LC et des pertes de commutation est attendue.

Chaque étoile de la **MASDE** est connectée à un onduleur triphasé à commutations commandées. Ce dernier est constitué de trois branches, chacune composée de deux paires d'interrupteurs supposés parfaits et dont les commandes sont disjointes et complémentaires. Chaque interrupteur est représenté par une paire transistor-diode, La Figure 2-2 représente le schéma de l'onduleur tension triphasé à deux niveaux [2].

#### **2.4.1 Différentes stratégies de modulation pour la commande d'un IGBT**

Les onduleurs de tension peuvent être commandés selon différentes stratégies, dans le but de générer une tension de sortie proche de la forme sinusoïdale, Nous utilisons les stratégies suivantes [1] [2] [3] [4] :

- \* *Commande en pleine onde ;*
- \* *Commande par modulation de largeur d'Impulsion (MLI) ;*
- \* *Commande par modulation de largeur d'Impulsion Sinus-Triangle (MLI-ST) ;*
- \* *Commande par hystérésis ;*
- \* *Commande par modulation de largeur d'Impulsion vectorielle (MLI-V).*

##### **2.4.1.1 Commande en pleine onde**

Pour mieux comprendre le fonctionnement de l'onduleur, il est crucial d'analyser son comportement en pleine onde ( $180^\circ$ ). Cette technique de commande est également appelée commande à six étapes. Dans ce mode de commande, chaque transistor est conducteur pendant une durée de  $180^\circ$ . Au cours d'un cycle, six modes de fonctionnement distincts se succèdent, chacun d'une durée de  $60^\circ$ . Les transistors sont numérotés selon l'ordre dans lequel les séquences de commutation les activent et les désactivent [1].

##### **2.4.1.2 Commande par la modulation de largeur d'Impulsion Sinus-Triangle**

La modulation de largeur d'impulsion sinus-triangle (**MLI-ST**) consiste à comparer une onde modulée basse fréquence (**tension de référence**) à une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire. Les instants de commutation des interrupteurs sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante, et la fréquence de commutation est fixée par la porteuse. En triphasé, on utilise trois références sinusoïdales déphasées de  $120^\circ$  à la même fréquence  $f$ . Cependant, la tension de sortie de l'onduleur n'est pas purement sinusoïdale car elle contient des harmoniques, responsables des parasites et générant des pertes supplémentaires. La

technique de commande MLI permet de remédier à ces problèmes et présente les avantages suivants [1]:

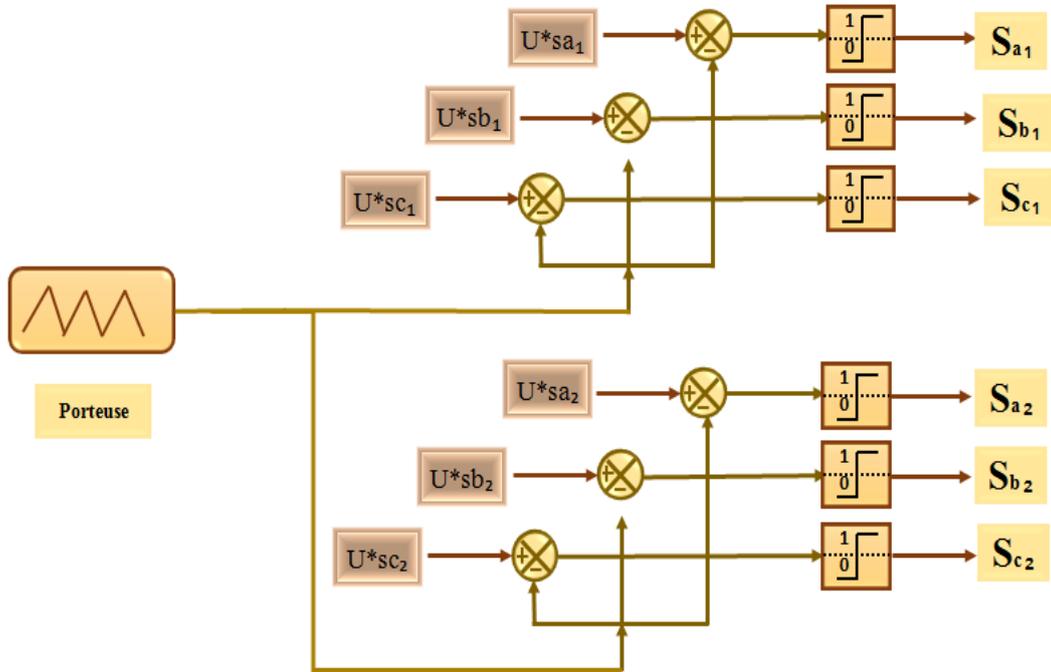


Figure 2-3 Principe de la commande par la modulation de largeur d'impulsion sinus-triangle.

### 2.4.1.3 Commande par Hystérésis

La commande par **Hystérésis**, elle appelle commande en tout ou rien, est une commande non linéaire qui utilise l'erreur existante entre le courant de référence et le courant produit par l'onduleur, cette erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'**Hystérésis** [1].

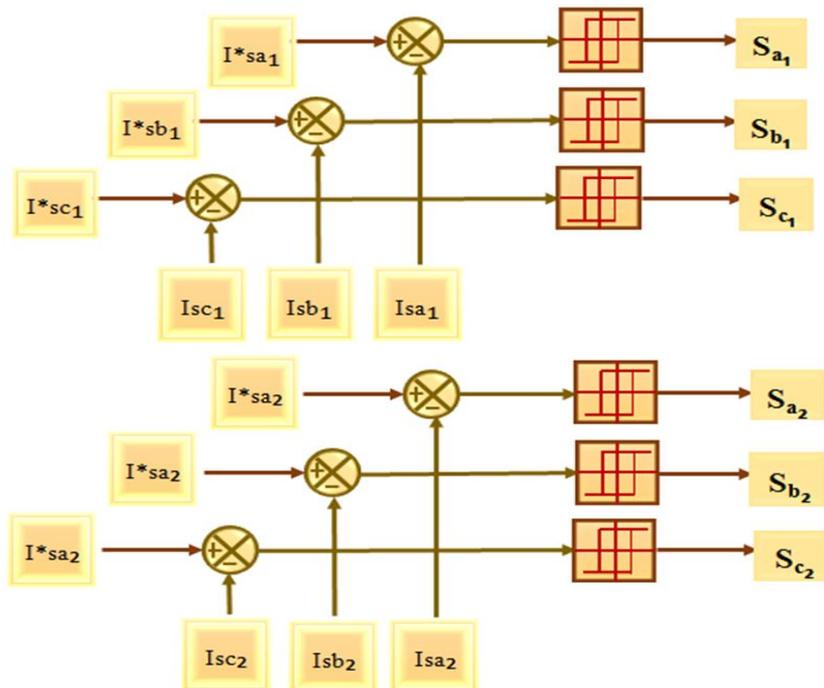


Figure 2-4 Principe de la commande par Hystérésis.

L'approche la plus simple utilisée pour cette fin, est la stratégie de contrôle qui réalise la comparaison entre le courant de phase mesuré et le courant de référence, à l'aide d'un comparateur à **Hystérésis**. Celui-ci, produit des impulsions d'amorçage et de blocage des interrupteurs de l'onduleur, de façon à limiter le courant de phase dans une bande d'hystérésis autour du courant de référence [1].

#### 2.4.1.4 Commande par modulation de largeur d'Impulsion vectorielle

La modulation des vecteurs spatiaux **SVM** pour un onduleur de tension est basée sur la représentation vectorielle des tensions triphasées dans un plan bidimensionnelle ( $\alpha, \beta$ ). Où l'on trouve quatre algorithmes de modulation de la **MLI-Vectorielle** (**MLI-V** ou **SV-PWM**) sont considérés, à savoir [1]:

- Séquence alignée à droite (**Right-Aligned-Séquencée**) ;
- Séquence symétrique (**Symmetric-Sequence**) ;
- Séquence alternante de vecteur nul (**Alternations-Zéros-Vector- Sequence**)
- Séquence non commuté de courant le plus élevé (**Highest-Current-Not-witched Sequence**).

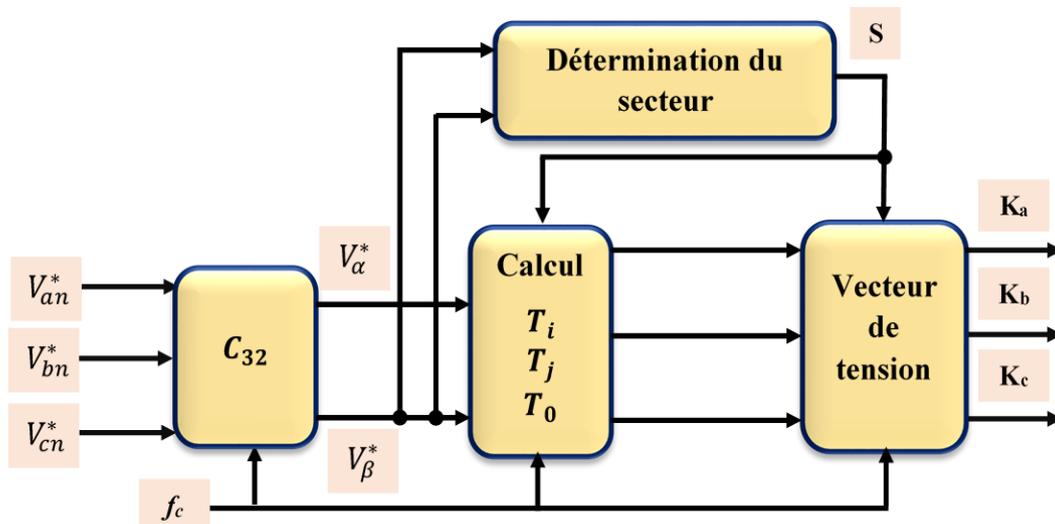


Figure 2-5 Principe de la MLI-V.

## 2.5. Simulation de l'association MASDE/Onduleur en boucle ouverte

Cette partie est dédiée à présenter des résultats de simulation en boucle ouverte de la **MASDE** alimentée par deux onduleurs de tension à deux niveaux, spécifiquement avec la technique de commande **MLI-ST**. Nous nous concentrons exclusivement sur les résultats associés à la **MLI-ST**. Pour simuler les réponses du système réel, nous avons développé un modèle de commande de la **MASDE** alimentée par deux onduleurs de tension à deux niveaux sous forme de schéma-blocs, intégré dans l'environnement du logiciel **Matlab/Simulink**.

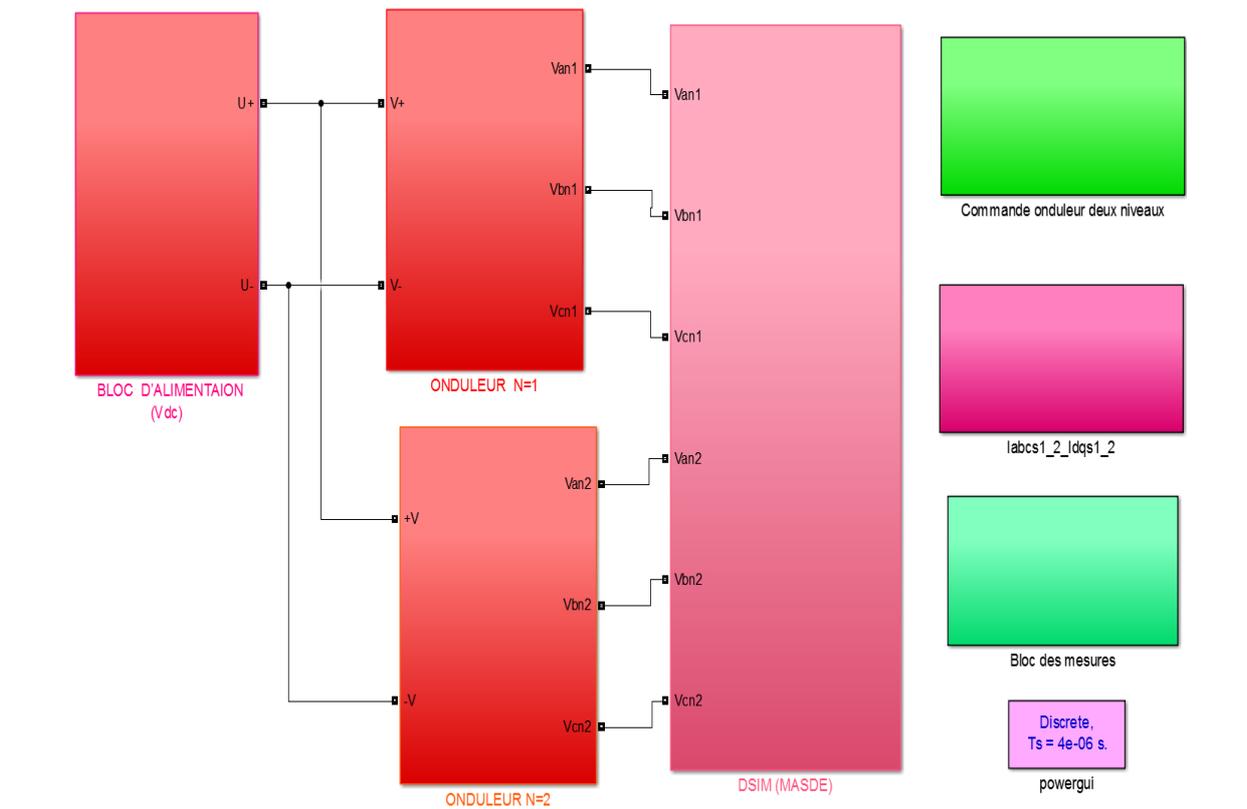


Figure 2-6 Block de simulation du système.

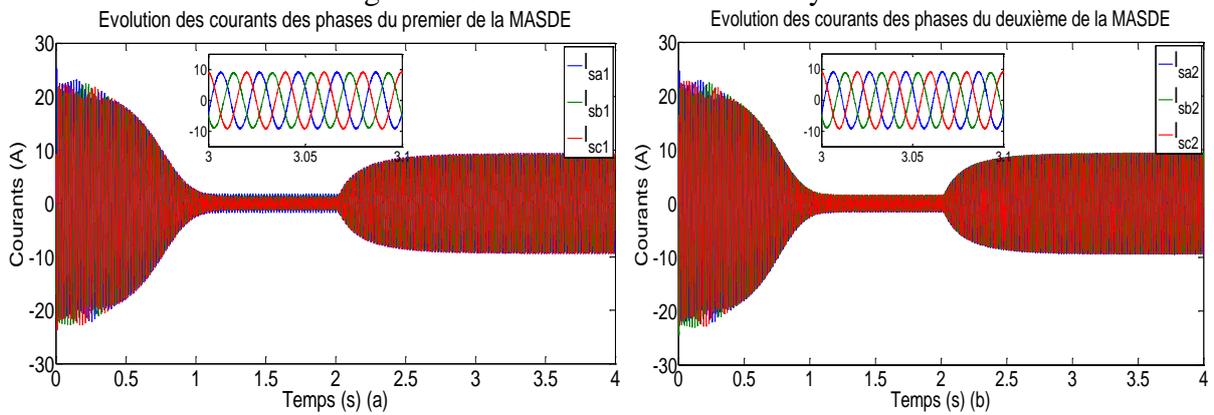
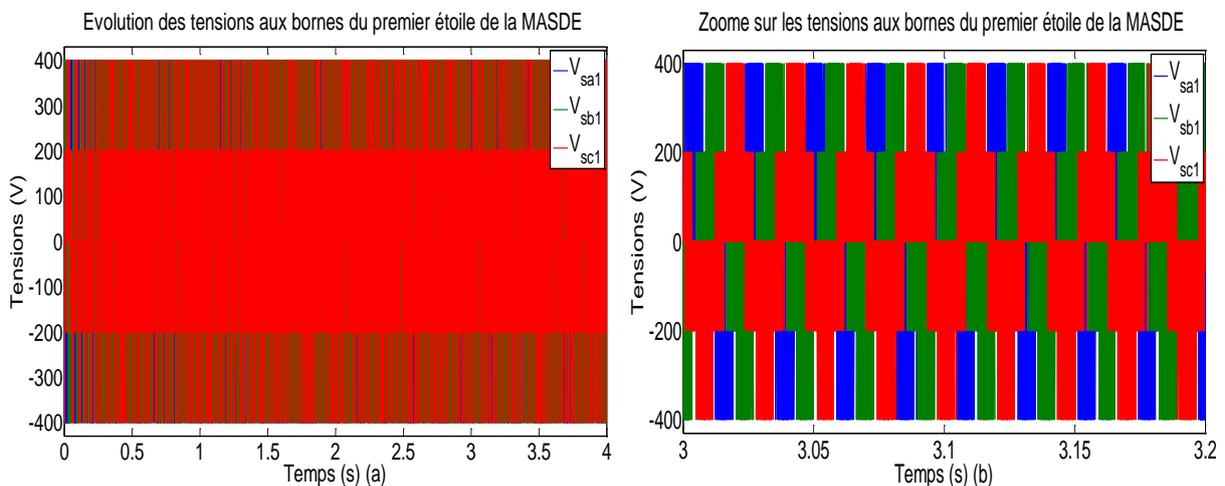


Figure 2-7 Allures des courants des phases de deux étoiles de la MASDE.



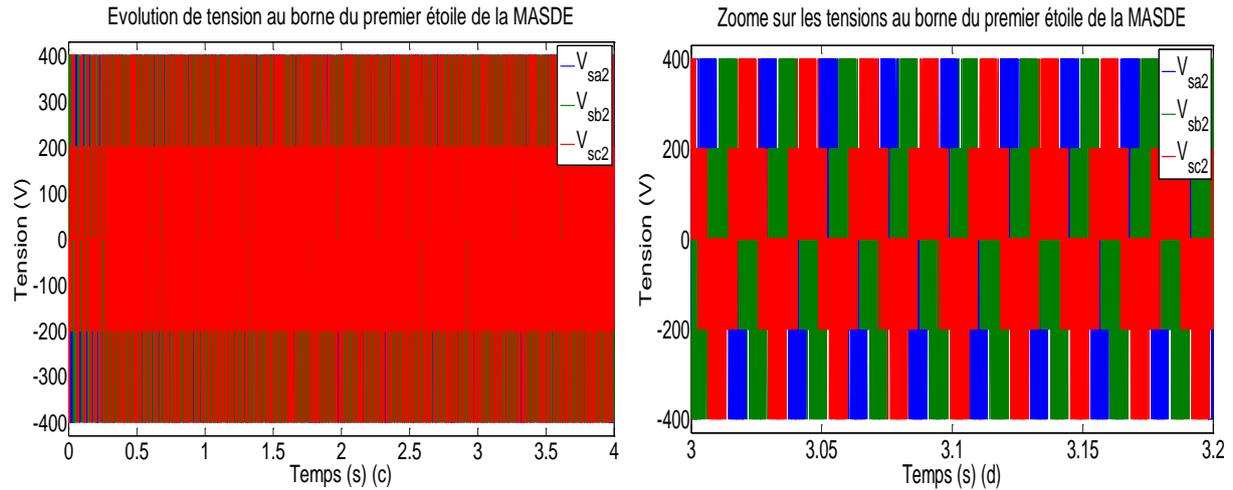


Figure 2-8 Allures des tensions de deux étoiles aux bornes de la MASDE.

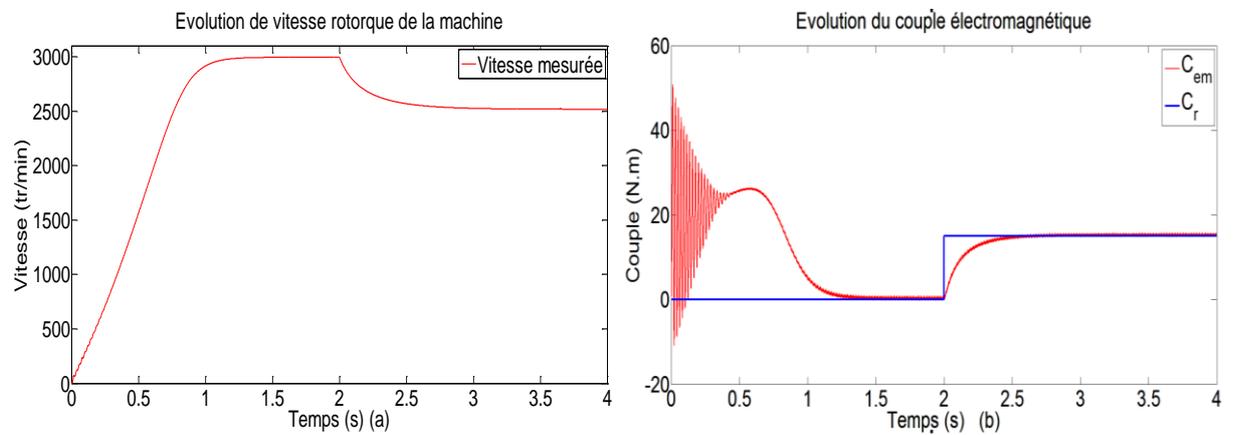


Figure 2-9 Allures des grandeurs mécaniques de la MASDE

Les deux étoiles statoriques partagent les mêmes valeurs de  $R_{S1}$  et  $R_{S2}$  pour les tensions  $V_{sa1}, V_{sa2}$  et les courants  $i_{as1}, i_{as2}$

Les courants statoriques  $i_{as1}$  et  $i_{as2}$  prennent une forme sinusoïdale avec la même amplitude, même lorsque les deux courants statoriques partagent les mêmes paramètres  $R_{S1}$  et  $R_{S2}$ . Dans l'état de transition, la machine a besoin de courants importants dont l'amplitude atteint  $i_{as1} = i_{as2} = 25A$ . En régime permanent, ces courants constants diminuent jusqu'à atteindre une valeur minimale de 1,3 A.

Les tensions composées  $V_{sa1}$  et  $V_{sa2}$  de l'onduleur à deux niveaux ont une forme sinusoïdale, avec une amplitude atteignant presque 400 V. On observe que les tensions de sortie sont très proches de la tension de référence. Le signal de sortie de l'onduleur triphasé est un signal carré alternatif, en phase avec la tension de référence.

La vitesse de rotation augmente progressivement, presque de manière linéaire, jusqu'à atteindre 3000 tr/min à  $t=1$  s, presque égale à celle du synchronisme. Cette augmentation se

produit jusqu'à  $t=2$  s, marquant le début du régime permanent, où la vitesse se stabilise près de 2500 tr/min.

Le couple électromagnétique atteint un grand pic avec des oscillations allant jusqu'à 58 Nm, puis diminue à partir de  $t=1$ s à une valeur minimale presque égale 0 Nm, tan que le dernier stabilisé.

## **2.6. Conclusion**

Dans ce chapitre, notre attention s'est portée sur la modélisation de la machine MASDE et sur l'onduleur de tension à deux niveaux. Nous avons établi un modèle mathématique de la MASDE, ainsi que de l'onduleur à deux niveaux contrôlé par la stratégie de MLI-ST. Ces modèles ont été validés par simulation numérique sous *Matlab/Simulink* en boucle ouverte. Les résultats obtenus ont été interprétés et analysés pour fournir une compréhension approfondie des performances du système.

*Dans le prochain chapitre, nous allons étudier la commande vectorielle indirecte et direct de la MASDE alimentée par de deux onduleurs de tension à deux niveaux.*

## Référence Bibliographique

- [1] E. Zaidi "Etude de la commande d'un entraînement électrique de puissance à base d'une architecture segmentée, Thèse de Doctorat de l'Ecole Militaire Polytechnique, Algérie, 2021.
- [2] E. Zaidi, K. Marouani, L. Bentouhami, and A. E. Mabrek, "Non-linear speed control of multi-phase induction machine fed by two cascaded H-bridge multi-level inverter", *International conference on electronics and electrical engineering (IC3E'18)*, 12-13 November 2018. Bouira, Algiers, Algeria, 2018.
- [3] E. Zaidi, K. Marouani, H. Bouadi<sup>1</sup>, K. Nounou, and M. Becherif, "Circulating current reduction-based hybrid controller of an electrical drive system fed by two parallel inverters", *Electrical Engineering*, vol. 103, no. 1, pp. 205-216, 2021.
- [4] K. Marouani, "Contribution à la commande d'un entraînement électrique à base de moteur asynchrone double étoile ", Thèse de Doctorat de l'Ecole Militaire Polytechnique, Algérie, 2010.
- [5] E. Zaidi, K. Marouani, A. E Mabrek, E. Merabet and L. Bentouhami, "Fuzzy Logic Control of Multi-Phase Induction Machine Drives Based on Cascaded Hybrid Multi-level Inverters," In *IEEE the International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb CISTEM 2018, USTHB-Algiers, Algeria, 29-31 October 2018*.
- [6] 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, France, décembre 2001.
- [7] A. Martin, " Evaluation et Optimisation de la Bande Passante des Convertisseurs Statiques (Application aux Nouvelles Structures Multicellulaires)," Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2003.
- [8] E. Zaidi, K. Marouani, and E. Merabet, "A new approach based on neuro-fuzzy controller of a dual star induction machine supplied by multi-level inverters", *Second International Conference on Electrical Engineering "ICEEB'18"*, 2-3 December 2018, Biskra University, Algeria, 2018.

**Chapitre 3 :**  
**Étude comparative entre la commande vectorielle  
indirecte et directe pour la commande d'une MASDE**

## **Chapitre 3 : Étude comparative entre la commande vectorielle indirecte et directe pour la commande d'une MASDE**

### **3.1. Introduction**

Dans le domaine des systèmes électromécaniques, la **MASDE** occupe une place prépondérante grâce à sa polyvalence et son efficacité énergétique. Utilisée notamment dans les applications d'énergie éolienne et industrielle, la **MASDE** nécessite des techniques de commande sophistiquées pour optimiser ses performances. Deux approches principales se distinguent dans ce contexte : la commande indirecte et la commande directe.

Dans ce chapitre, nous avons mené une étude comparative visant à analyser et évaluer les performances de deux techniques de commande vectorielles (**indirecte et directe**) pour une **MASDE**. En examinant attentivement les avantages et les inconvénients de chaque méthode, notre objectif est de déterminer celle qui offre le meilleur compromis en termes de précision, de rapidité de réponse et de robustesse face aux perturbations. L'objectif final de cette analyse est de contribuer à l'optimisation des systèmes de commande d'une **MASDE**, en fournissant des recommandations basées sur des analyses rigoureuses et les résultats de simulations obtenus.

### **3.2. Commande vectorielle**

La commande vectorielle permet de transformer un moteur asynchrone triphasé, système complexe et non linéaire, en deux sous-systèmes linéaires indépendants. Cette approche offre un contrôle séparé du flux magnétique et du couple électromagnétique, procurant ainsi une flexibilité et une précision accrues. Les progrès en électronique de puissance et en micro-informatique ont favorisé l'adoption de cette technique en temps réel pour une large gamme d'applications, couvrant un éventail de puissances [2] [3] [4].

#### **3.2.1 L'objectif de la commande vectorielle**

L'objectif principal de la commande vectorielle d'une machine asynchrone est de reproduire le comportement dynamique d'une machine à courant continu à excitation séparée, reconnue pour ses performances remarquables en termes de précision et de contrôle [1] [2]. En effet, la machine à courant continu offre un découplage naturel entre le flux magnétique et le couple électromagnétique, ce qui facilite sa commande. En revanche, la machine asynchrone présente un couplage inhérent entre ces deux grandeurs, rendant son pilotage plus complexe. Parmi les techniques de commande vectorielle, la commande vectorielle à flux orienté (**Field**

Oriented Control FOC) s'impose comme une référence, offrant des performances comparables à celles de la machine à courant continu [2] [3] [4]. .

### 3.2.2 Principe de la commande vectorielle

Le principe de la commande vectorielle implique d'orienter l'une des composantes du flux (stator, rotor ou entrefer) le long de l'axe d'un référentiel tournant synchronisé. L'objectif est de simuler le comportement d'un moteur asynchrone double étoile pour qu'il ressemble à un moteur à courant continu à excitation séparée, selon deux aspects distincts [5] [6] [7].

- Couple et le flux de la machine sont gérés de manière autonome.
- Conditions idéales pour la production de couple sont assurées à la fois en régime permanent et en régime transitoire.

Dans un moteur à courant continu, le couple est contrôlé par le courant d'induit ( $I_a$ ), tandis que le courant d'excitation ( $I_f$ ) gère le flux ( $\varphi_f$ ) [2]. La relation mathématique du couple électromagnétique est exprimée comme suit [7] :

$$C_{em} = \Phi_f I_a = k I_f I_a \quad (3.1)$$

Avec :

- $\varphi$ : Flux imposé par le courant d'excitation  $I_f$ ;
- $I_a$ : Courant d'induit ;
- $k$ : Constantes.

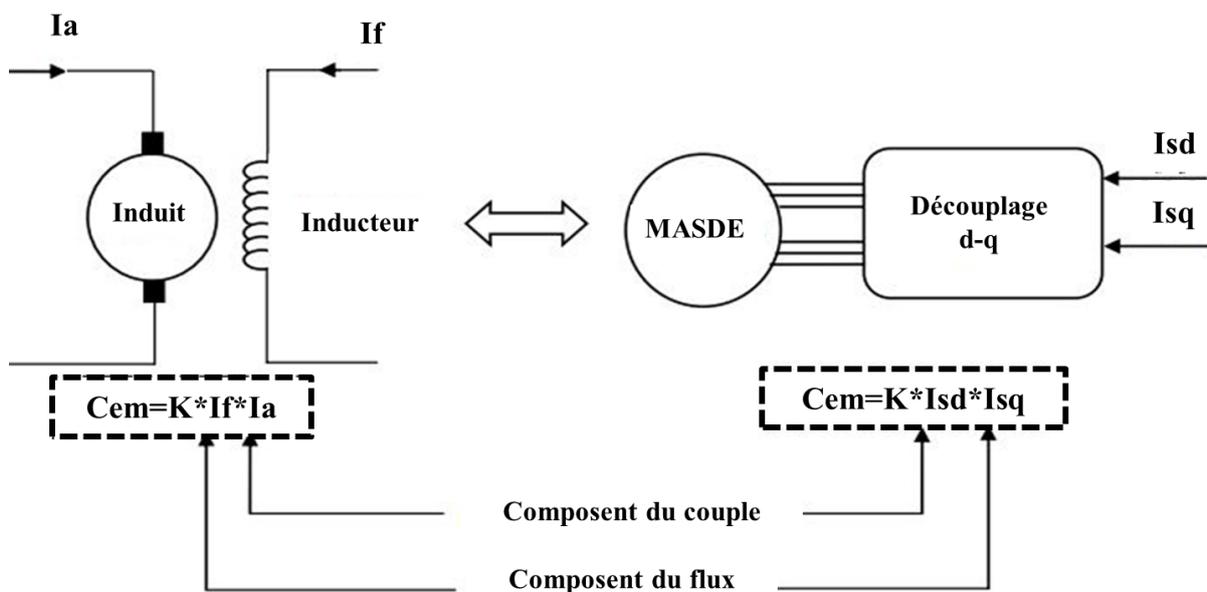


Figure 3-1 Principe de la commande découplée entre MCC et MASDE.

Le concept de pilotage vectoriel de la MASDE peut être assimilé à celui du MCC avec une excitation séparée. Illustrons ce principe en représentant le schéma du pilotage vectoriel du MCC et de la MASDE, tel qu'indiqué dans la Figure 3-1.

### 3.3 Orientation du flux

La commande vectorielle implique de séparer les paramètres du couple électromagnétique et du flux dans un système de contrôle, en utilisant une loi de commande et un système d'axes spécifiques pour cette séparation. Lors de la modélisation d'une machine asynchrone double étoile dans un référentiel biphasé  $(d,q)$  lié au champ tournant, en introduisant les coordonnées de champ, différents types d'orientation de flux sont identifiés afin que l'axe "d" coïncide avec la direction souhaitée du flux [1] [2].

➤ *Orientation de flux rotorique :*

$$\varphi_{dr} = \varphi_r \text{ et } \varphi_{qr} = 0$$

➤ *Orientation de flux statorique :*

$$\varphi_{ds} = \varphi_s \text{ et } \varphi_{qs} = 0$$

➤ *Orientation de flux d'entrefer :*

$$\varphi_{md} = \varphi_m \text{ et } \varphi_{mq} = 0$$

Dans le cadre de la modélisation de la MASDE, nous choisissons d'orienter le flux rotorique ( $\varphi_{dr} = \varphi_r$  et  $\varphi_{qr} = 0$ ), car cela conduit à un variateur de vitesse où le flux et le couple électromagnétique sont contrôlés de manière indépendante via les courants statoriques [4].

### 3.4 Méthodes de la commande vectorielle

#### 3.4.1 Commande vectorielle indirecte de la MASDE

Au cœur de cette méthode réside l'idée d'exploiter uniquement la position du flux rotorique, plutôt que son amplitude, pour simplifier le système de commande. Cette approche, qualifiée de "méthode indirecte", se distingue par l'élimination d'un estimateur de flux, réduisant ainsi la complexité du système. Un avantage supplémentaire réside dans son adaptabilité aux variations des paramètres de la machine, comme le mentionne la référence [1] [2] [6].

##### 3.4.1.1 Référence au champ rotatif

Dans cette référence, la vitesse du répertoire  $(d,q)$  est égale à la vitesse du champ de rotation ( $\omega_{\text{cor}} = \omega_s$ ). Puisque les augmentations dans cette référence ont une forme continue, il

est généralement utilisé pour permettre l'application d'une vitesse, couple, ou autre commande [1] [2] [6] .

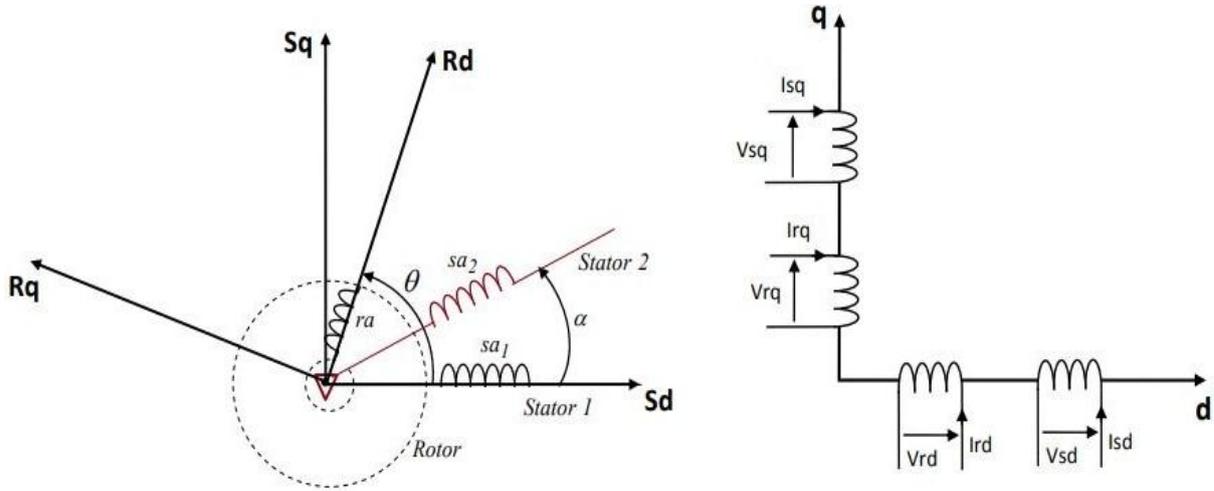


Figure 3-2 Modèle équivalent de la MASDE dans le repère de Park (d-q).

### 3.4.1.2 Régulation de la vitesse par la méthode indirecte

En appliquant l'orientation du flux rotorique au modèle mathématique de la MASDE, on obtient (voir chapitre 2) [1] [2] [6] :

$$\begin{cases} I_{dr} = \frac{1}{L_m + L_r} [\varphi_r - L_m(I_{ds1} + I_{ds2})] \\ I_{qr} = \frac{-L_m}{L_m + L_r} (I_{qs1} + I_{qs2}) \end{cases} \quad (3.2)$$

En remplaçant l'équation (3.2) dans l'équation (3.3) on trouve :

$$\begin{cases} \varphi_{ds1} = \lambda_1 I_{ds1} + L_r \eta I_{ds2} + \eta \varphi_r^* \\ \varphi_{qs1} = \lambda_1 I_{qs1} + L_r \eta I_{qs2} \\ \varphi_{ds2} = \lambda_2 I_{ds2} + L_r \eta I_{ds1} + \eta \varphi_r^* \\ \varphi_{qs2} = \lambda_2 I_{qs2} + L_r \eta I_{qs1} \end{cases} \quad (3.3)$$

Avec :

$$\eta = \frac{L_m}{L_m + L_r} \lambda_{1,2} = L_{1,2} + \eta L_r$$

et on a :

$$\varphi_r^* = L_m (I_{ds1} + I_{ds2}) \quad (3.4)$$

$$I_{qr} = - \frac{\omega_{gl}^* \varphi_r^*}{R_r} \quad (3.5)$$

En remplaçant les équations (3.3), (3.4) et (3.2) dans le modèle mathématique de la MASDE (voir chapitre 2) on trouve :

$$\begin{cases} U_{ds1}^* = R_{s1}I_{ds1} + L_{s1}\frac{d}{dt}i_{ds1} - \omega_s^*(L_{s1}I_{qs1} + T_r w_{gl}^* \varphi_r^*) \\ U_{qs1}^* = R_{s1}I_{qs1} + L_{s1}\frac{d}{dt}I_{qs1} + \omega_s^*(L_{s1}I_{ds1} + \varphi_r^*) \\ U_{ds2}^* = R_{s2}I_{ds2} + L_{s2}\frac{d}{dt}I_{ds2} - \omega_s^*(L_{s2}i_{qs2} + T_r w_{gl}^* \varphi_r^*) \\ U_{qs2}^* = R_{s2}I_{qs2} + L_{s2}\frac{d}{dt}I_{qs2} \mp (L_{s2}I_{ds2} + \varphi_r^*) \end{cases} \quad (3.6)$$

On a:

$$I_{qs1}^* + I_{qs2}^* = \frac{L_m + L_r}{pL_m\varphi_r^*} C_{em}^* \quad (3.7)$$

$$w_{gl}^* = \frac{R_r L_m}{(L_m + L_r)\varphi_r^*} (I_{qs1}^* + I_{qs2}^*) \quad (3.8)$$

Les premières parties linéaires d'équations (3.9) sont ajoutées au système d'équations (3.6) avec les barres de contrôle des courants du stator pour obtenir le découplage idéal.

$$\begin{cases} U_{ds1l} = R_{s1}I_{ds1} + L_{s1}\frac{d}{dt}I_{ds1} \\ U_{qs1l} = R_{s1}I_{qs1} + L_{s1}\frac{d}{dt}I_{qs1} \\ U_{ds2l} = R_{s2}I_{ds2} + L_{s2}\frac{d}{dt}I_{ds2} \\ U_{qs2l} = R_{s2}I_{qs2} + L_{s2}\frac{d}{dt}I_{qs2} \end{cases} \quad (3.9)$$

Le système d'équation (3.9) qui présenté précédemment montre que les tensions statiques ( $U_{ds1l}, U_{qs1l}, U_{ds2l}$ ) et  $U_{qs2l}$ ) sont directement reliées aux courants statoriques ( $I_{ds1}, I_{qs1}, I_{ds2}$  et  $I_{qs2}$ ), pour compenser l'erreur introduite lors du découplage, les tensions statiques de références ( $U_{ds1}^*, U_{qs1}^*, U_{ds2}^*$  et  $U_{qs2}^*$ ) à flux constant sont données par :

$$\begin{cases} U_{ds1}^* = U_{ds1l} - U_{ds1c} \\ U_{qs1}^* = U_{qs1l} + U_{qs1c} \\ U_{qs2}^* = U_{qs2l} + U_{qs2c} \\ U_{ds2}^* = U_{ds2l} - U_{ds2c} \end{cases} \quad (3.10)$$

Avec :

$$\begin{cases} U_{ds1c} = \omega_s^*(L_{s1}I_{qs1} + T_r w_{gl}^* \varphi_r^*) \\ U_{qs1c} = \omega_s^*(L_{s1}I_{ds1} + \varphi_r^*) \\ U_{ds2c} = \omega_s^*(L_{s2}I_{qs2} + T_r w_{gl}^* \varphi_r^*) \\ U_{qs2c} = \omega_s^*(L_{s2}I_{ds2} + \varphi_r^*) \end{cases} \quad (3.11)$$

Les régulateurs de courant utilisés sont des régulateurs classiques de type PI dont la synthèse est au [Annexe C](#).

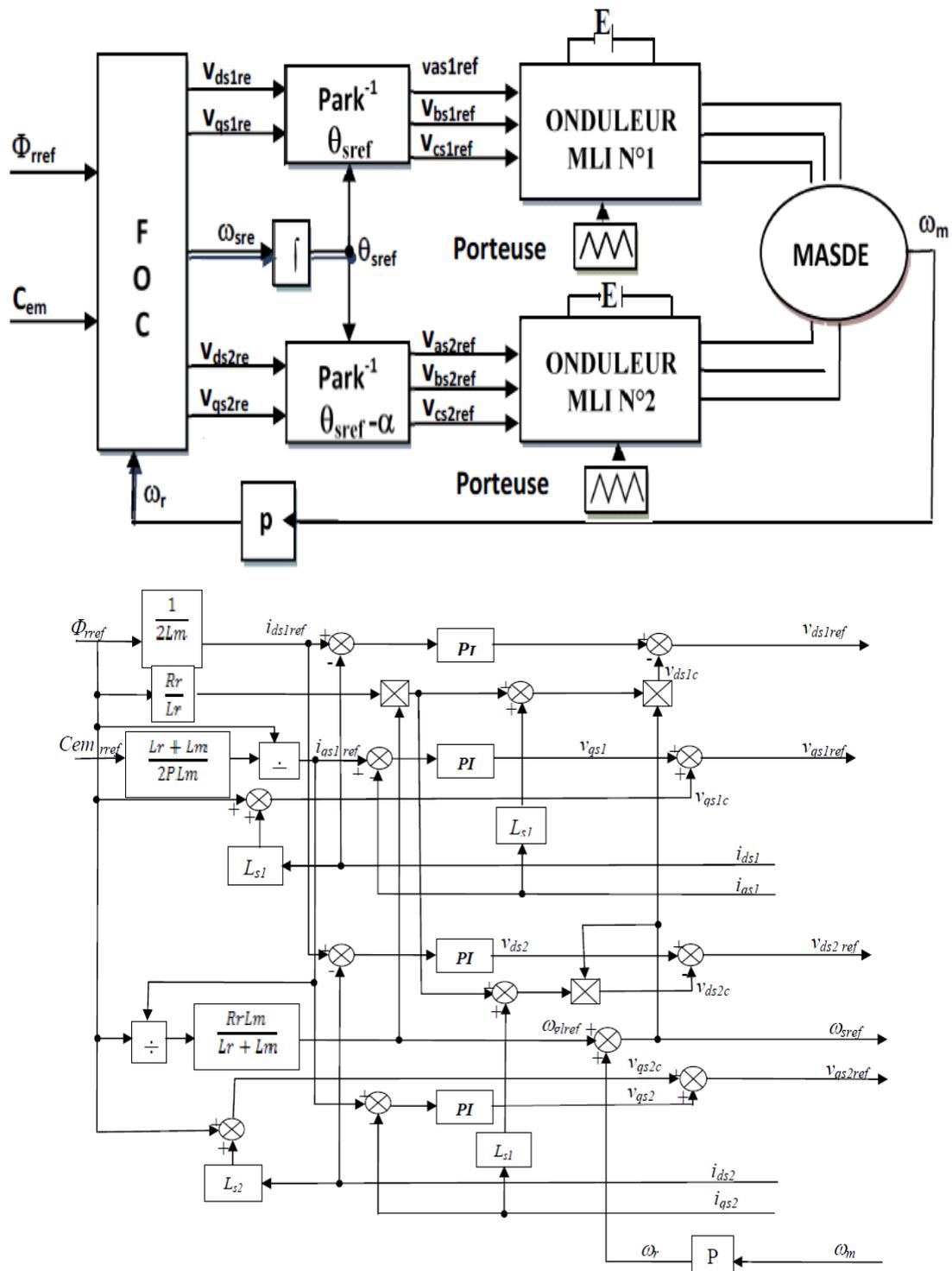


Figure 3-3 Schéma bloc de découplage IFOC de la MASDE.

Le schéma de régulation de la vitesse de la MASDE par la commande vectorielle présenté sur la [Figure 3.3](#) est constitué de boucles de régulation en cascade et d'un bloc de calcul de l'angle  $\theta_s$ . Les boucles internes sont celles des courants  $I_{ds}$  et  $I_{qs}$  et la boucle externe

est celle de la vitesse  $\Omega$ . La sortie du régulateur de vitesse donne la référence du couple électromagnétique ou du courant  $I_{qs}$ . Pareillement, la boucle du flux donne la référence du courant  $I_{ds}$ . Enfin, les deux tensions de référence  $V_{ds}$  et  $V_{qs}$  obtenues à la sortie des régulateurs des courants sont transformées dans le repère lié au stator en utilisant l'angle  $\theta_s$  et serviront de références au bloc MLI-ST. Le détail sur le calcul des différents régulateurs est donné en annexe E. Les références en tension  $V_{ds}$  et  $V_{qs}$  peuvent inclure les termes de découplage statiques qu'on rajoute à la sortie des régulateurs de courant afin de gagner en dynamique [1].

### 3.4.1.3 Simulation de la commande vectorielle indirecte

Dans le troisième chapitre, nous avons établi un modèle hexa-phase de la MASDE dont les équations exprimées dans le plan ( $d-q$ ) sont exactement similaires à celles d'une MAS triphasée. Par conséquent, la méthode de la commande vectorielle indirecte développée pour la MAS triphasée, dont le schéma de principe est donné par la figure 5.2, peut être généralisée à la MASDE [1].

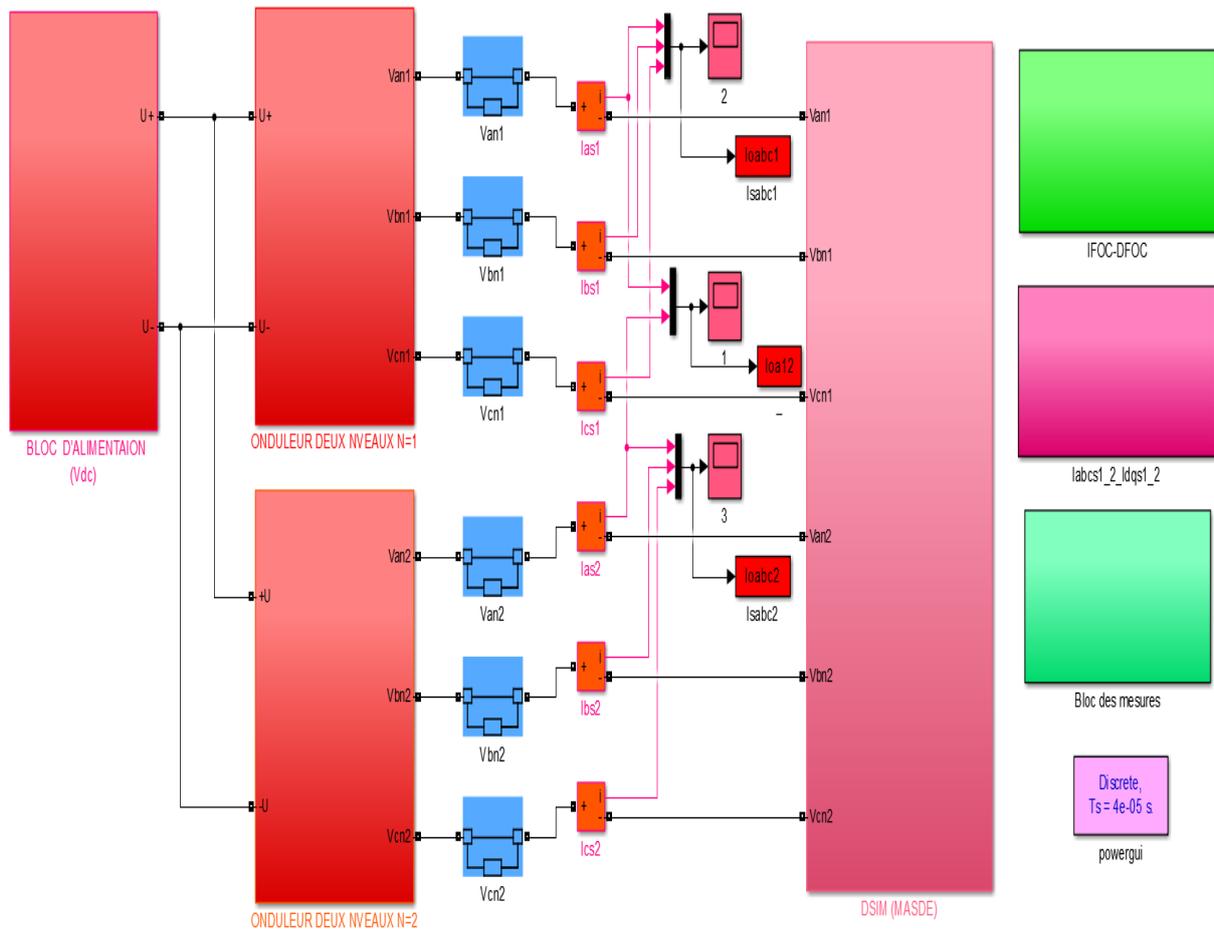


Figure 3-4 Block de simulation du système par l'IFOC.

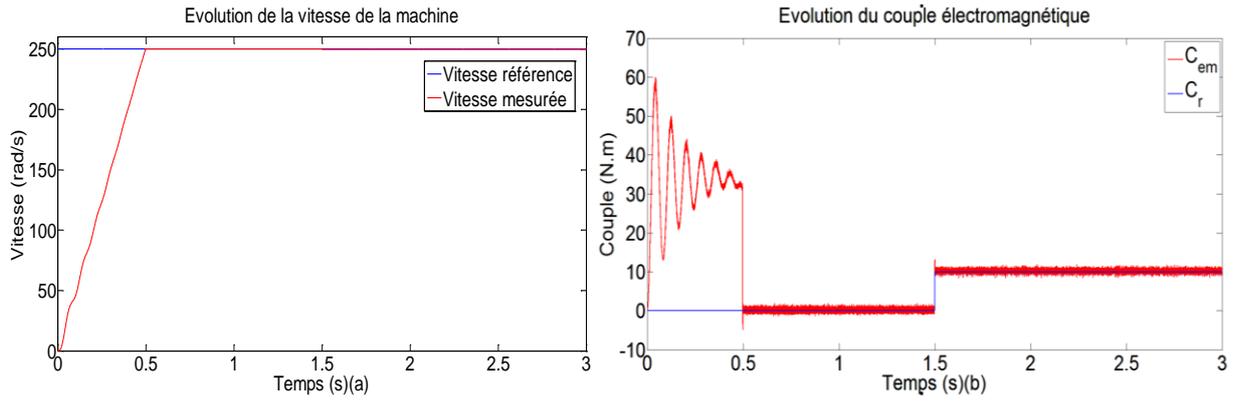


Figure 3-5 Résultats de simulation des grandeurs mécaniques obtenues par commande vectorielle indirecte de la MASDE contrôlée par la technique de MLI-ST.

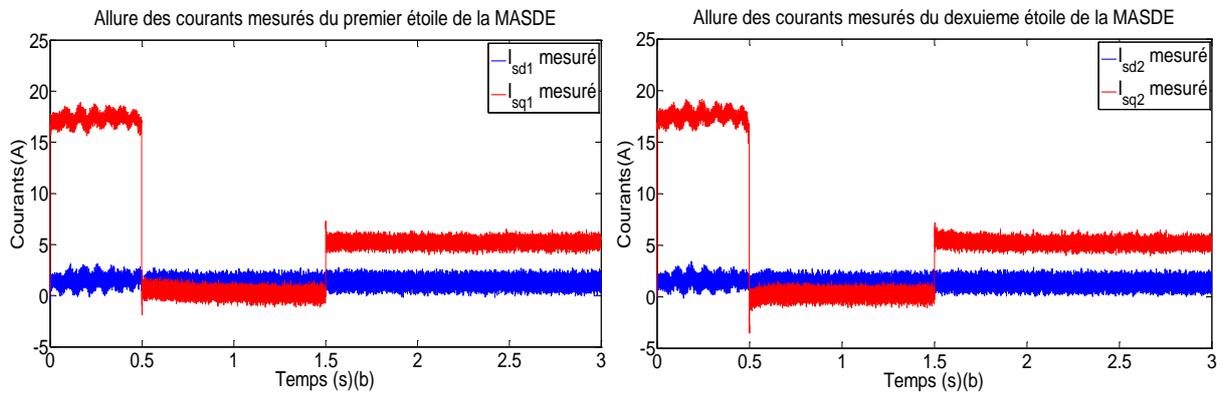


Figure 3-6 Résultats de simulation des courants mesures obtenues par la commande vectorielle indirecte de la MASDE contrôlée par la technique de MLI-ST.

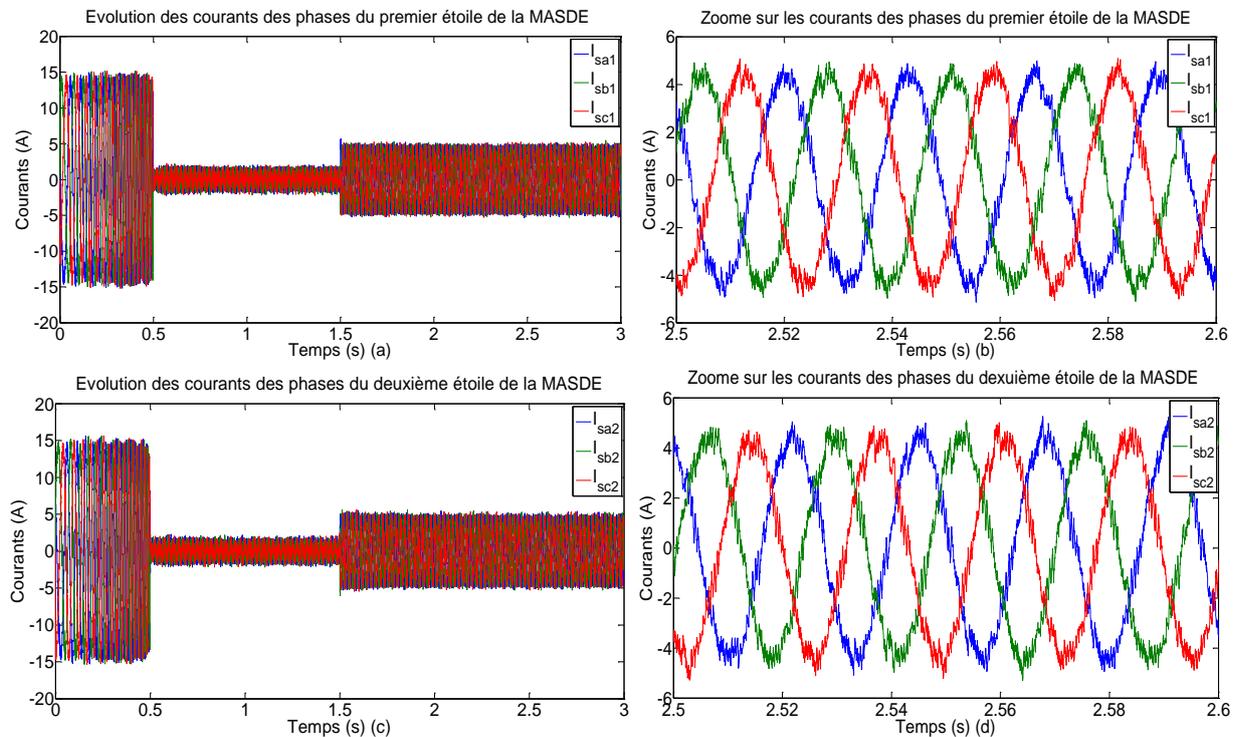


Figure 3-7 Résultats de simulation des courants des phases de deux étoiles obtenues par la commande vectorielle indirecte de la MASDE contrôlée par la technique de MLI-ST.

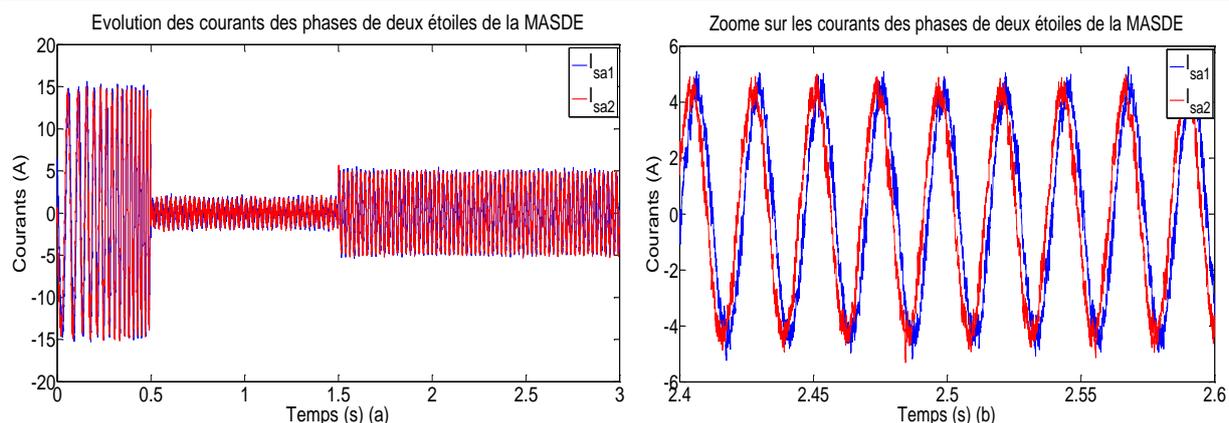


Figure 3-8 Résultats de simulation des courants de chaque phase de deux étoiles obtenus par la commande vectorielle indirecte de la MASDE contrôlée par la technique de MLI-ST.

L'ensemble des résultats de simulation réalisés reproduit le comportement réel du système d'entraînement électrique basé sur la MASDE. Le modèle établi a permis de tester les performances de la commande vectorielle indirecte combiné avec la techniques de MLI-ST et particulièrement celles proposées dans le chapitre II. Il constitue donc une base de discussion pour l'analyse et la prédiction du comportement d'un système de forte puissance. Les résultats obtenus, en conservant la structure d'origine de la commande vectorielle indirecte appliquée à une machine asynchrone triphasée, sont très probants. D'autre part, le modèle hexa-phase de la MASDE a permis de réduire le nombre de régulateurs de courant (deux régulateurs au lieu de quatre) et la seule différence réside dans l'algorithme de commande rapprochée de l'onduleur.

Cependant le point faible de cette commande est sa faible robustesse vis-à-vis des variations paramétriques, et en particulier la variation de la constante de temps rotorique  $\tau_r$  avec la température et la saturation. Il est possible d'améliorer la robustesse de cette commande en faisant appel à des estimateurs d'état déterministes ou stochastiques (estimateurs du flux et du couple) dont les grandeurs estimées sont peu sensibles aux variations paramétriques.

### 3.4.2 Commande vectorielle directe de la MASDE

Ce type de surveillance requiert une compréhension précise du module et de la phase du flux (rotorique dans notre contexte) à tout moment. Une approche initiale implique la mesure directe du flux de la machine à l'aide de capteurs positionnés dans l'entrefer, permettant ainsi de déterminer son amplitude et sa phase [9]. Cependant, ces capteurs sont exposés à des conditions extrêmes telles que la température et les vibrations, et les mesures sont également affectées par des bruits liés à la vitesse générés par les encoches. Malgré ces défis, ce mode de surveillance assure un découplage correct entre le flux et le couple, quel que soit le point de fonctionnement [2] [9].

### 3.4.2.1 Transformation de Concordia

La métamorphose de *Concordia* représente un exemple spécifique de la métamorphose de *Park*, où l'angle  $\theta_p$  est nul. Ainsi, il s'agit d'une transformation statique définie par la relation suivante [2] [8] [9]:

$$X_c = Cx \quad (3.12)$$

$$C = P(0) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} & -\sqrt{\frac{3}{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Avec :  $X_c = \begin{bmatrix} Xd \\ Xq \\ X0 \end{bmatrix}$ ,  $X = \begin{bmatrix} X1 \\ X2 \\ X3 \end{bmatrix}$

La transformation de *Concordia* est définie pour un système triphasé équilibré comme :

$$\begin{bmatrix} Xd \\ Xq \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{3} \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{\frac{1}{2}} & -\sqrt{\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X1 \\ X2 \\ X3 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

La relation pour la transformation inverse est établie comme suit :

$$\begin{bmatrix} X1 \\ X2 \\ X3 \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Xd \\ Xq \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Cette transformation également implique le principe d'équivalence entre une machine dont les enroulements sont décalés de  $120^\circ$  et une machine fictive ayant deux enroulements perpendiculaires (Figure 3-9).

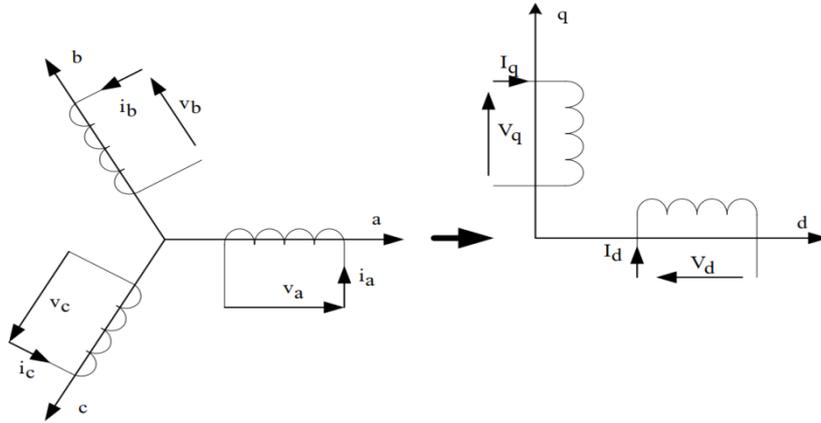


Figure 3-9 Transformation de Concordia.

### 3.4.2.2 Estimateur du flux rotorique

La direction du flux du rotor est généralement déterminée indirectement en raison de la difficulté pratique de mettre en place des capteurs spécifiques. Dans la plupart des cas, ces capteurs sont évités et des techniques d'estimation ou d'observation du flux sont utilisées à partir de grandeurs mesurables telles que la tension, le courant et la vitesse. Un estimateur du vecteur de flux rotorique, calculé dans le repère  $(d, q)$  en utilisant le système d'équations, est représenté par le schéma bloc figurant dans la Figure 3-10 [2] [9].

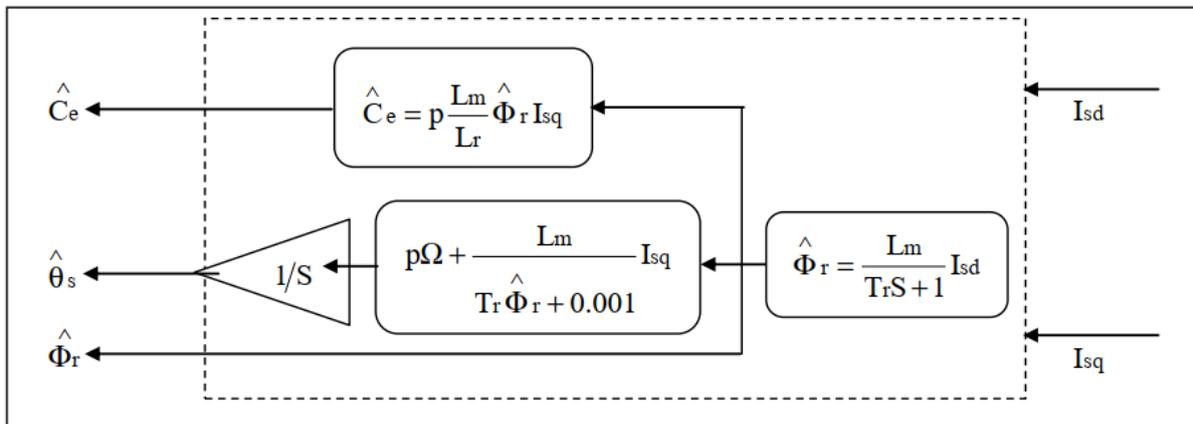


Figure 3-10 Estimateur des grandeurs mécaniques

### 3.4.2.3 Estimation du flux statorique

L'estimation du flux statorique peut être réalisée à partir des mesures des courants des phases et des tensions statoriques de deux étoiles de la MASDE. En effet, à partir de l'équation

$$\varphi_s = \int_0^T (V_s - R_s I_s) dt \quad (3.16)$$

On obtient les composantes  $\alpha$  et  $\beta$  du flux mesuré  $\varphi_s$  :

$$\begin{cases} \varphi_{s\alpha} = \int_0^T (V_{s\alpha} - R_s I_{s\alpha}) dt \\ \varphi_{s\beta} = \int_0^T (V_{s\beta} - R_s I_{s\beta}) dt \end{cases} \quad (3.17)$$

Ces équations représentent les étapes de calcul nécessaire à l'estimation de l'amplitude du flux statorique.

On obtient les composantes  $I_{s\alpha}$  et  $I_{s\beta}$ , après l'application de la transformation de *Concordia* sur les courants des phases des entrées mesurées de deux étoiles de la MASDE, sont également obtenus à partir des courants réels :

$$\begin{cases} I_{s\alpha} = I_{s\alpha 1} + I_{s\alpha 2} \\ I_{s\beta} = I_{s\beta 1} + I_{s\beta 2} \end{cases} \quad (3.18)$$

On obtient les composantes  $V_{s\alpha}$  et  $V_{s\beta}$ , après l'application de la transformation de *Concordia* sur les tensions des entrées mesurées de deux étoiles de la MASDE, sont également obtenus à partir des tensions réels :

$$\begin{cases} V_{s\alpha} = V_{s\alpha 1} + V_{s\alpha 2} \\ V_{s\beta} = V_{s\beta 1} + V_{s\beta 2} \end{cases} \quad (3.19)$$

L'amplitude du flux statorique est estimée à partir de ses composantes  $\varphi_{s\alpha}$  et  $\varphi_{s\beta}$  est :

Donc :

$$\varphi_{s\_estm} = \sqrt{\varphi_{s\alpha}^2 + \varphi_{s\beta}^2} \quad (3.20)$$

#### 3.4.2.4 Résultats de simulation et interprétations

Les Figures suivantes représentant les résultats de simulation sous *Matlab/Simulink* de la commande vectorielle directe par orientation du flux statorique d'une MASDE alimentée par les onduleurs.

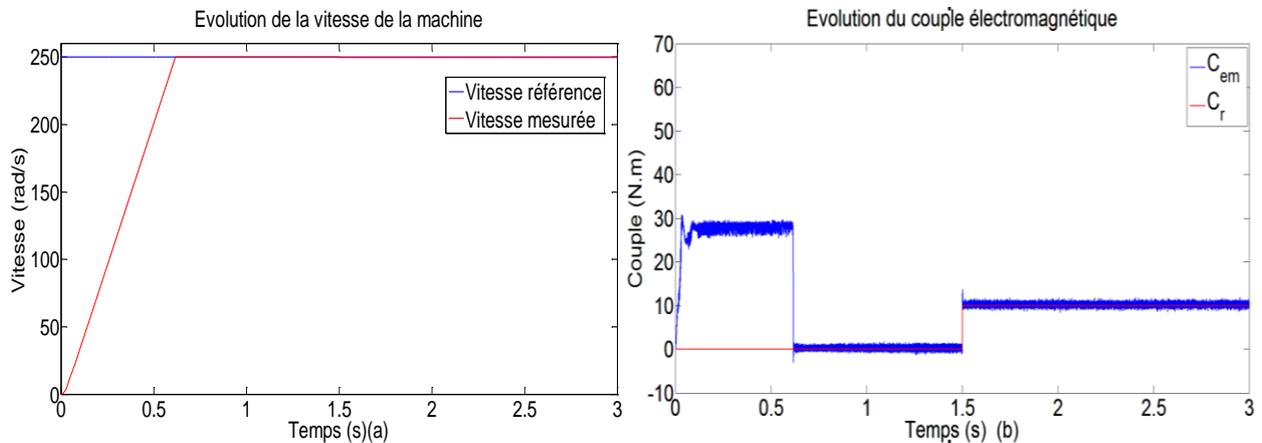


Figure 3-11 Résultats de simulation des grandeurs mécaniques obtenues par la commande vectorielle directe de la MASDE contrôlée par la technique de MLI-ST.

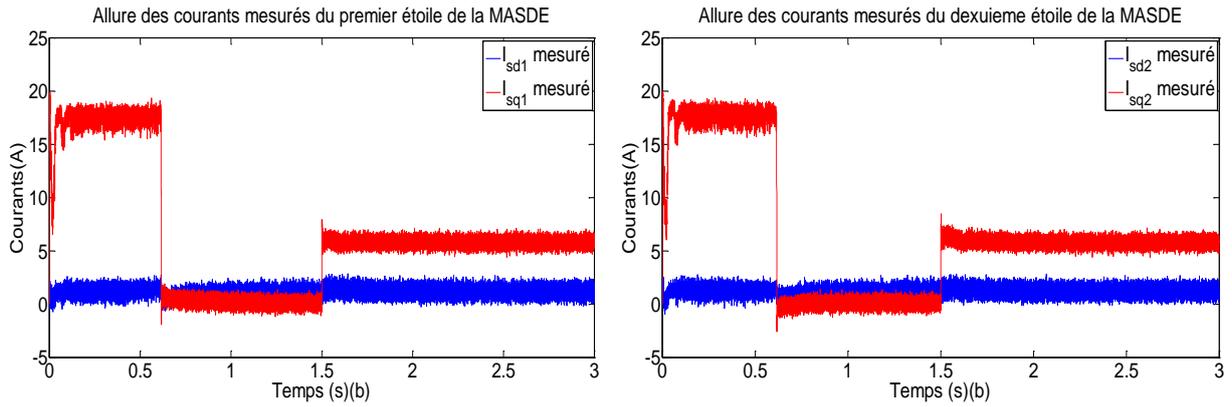


Figure 3-12 Résultats de simulation des courants directe et quadrature obtenu par la commande vectorielle directe de la MASDE contrôlée par la technique de MLI-ST.

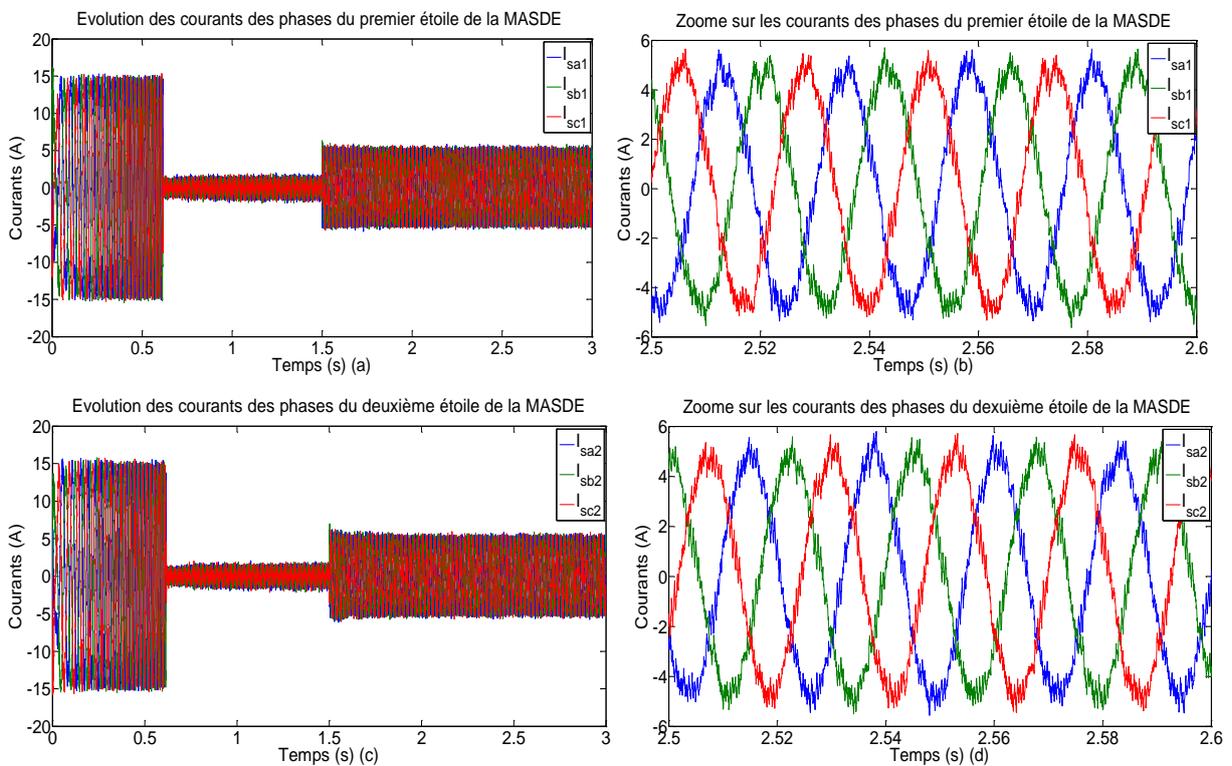


Figure 3-13 Résultats de simulation des courants des phases de deux étoiles obtenues par la commande vectorielle indirecte de la MASDE contrôlée par la technique de MLI-ST.

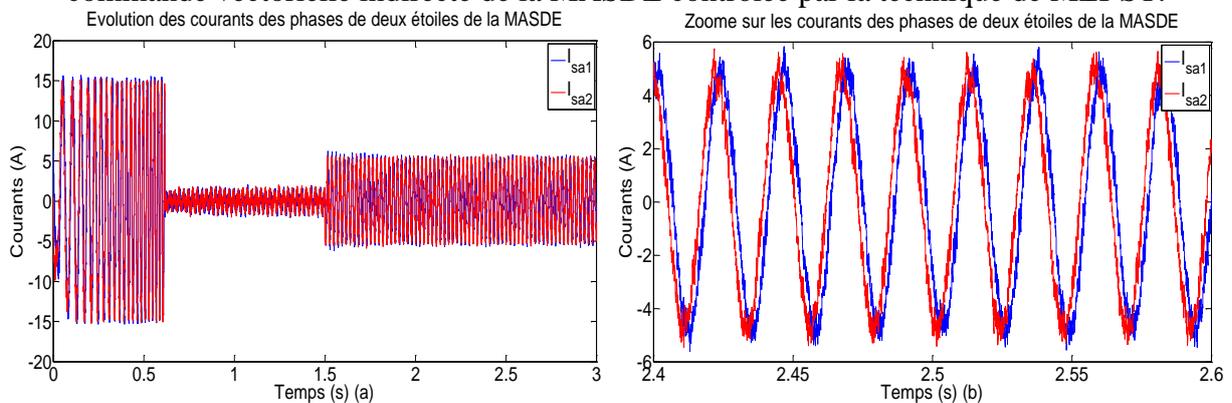


Figure 3-14 Résultats de simulation des courants de chaque phase de deux étoiles obtenues par la commande vectorielle indirecte de la MASDE contrôlée par la technique de MLI-ST.

L'ensemble des résultats de simulation réalisés reproduit le comportement réel du système d'entraînement électrique basé sur la MASDE. Le modèle établi a permis de tester les performances de la commande vectorielle directe combiné avec la technique MLI-ST. Il constitue donc une base de discussion pour l'analyse et la prédiction du comportement d'un système de forte puissance. D'après l'analyse des résultats de simulation la commande vectorielle directe offre les meilleures performances de distorsion oscillations par rapport au la commande vectorielle indirecte. De même, les formes d'onde de courant et de tension présentent des harmoniques inférieures dans le cas la commande vectorielle directe.

### 3.5. Étude comparative

L'étude comparative concernant les deux techniques de commande vectorielle (indirecte et directe) de la MASDE, la méthode directe avec capteur basée sur la régulation du flux statorique est introduite par une boucle de contre réaction nécessitant la mesure ou l'estimation du flux statorique. Outre coute, la méthode indirecte sans capteurs basée sur contrôlé du flux statorique est introduite par une boucle ouverte, mais seulement sa position.

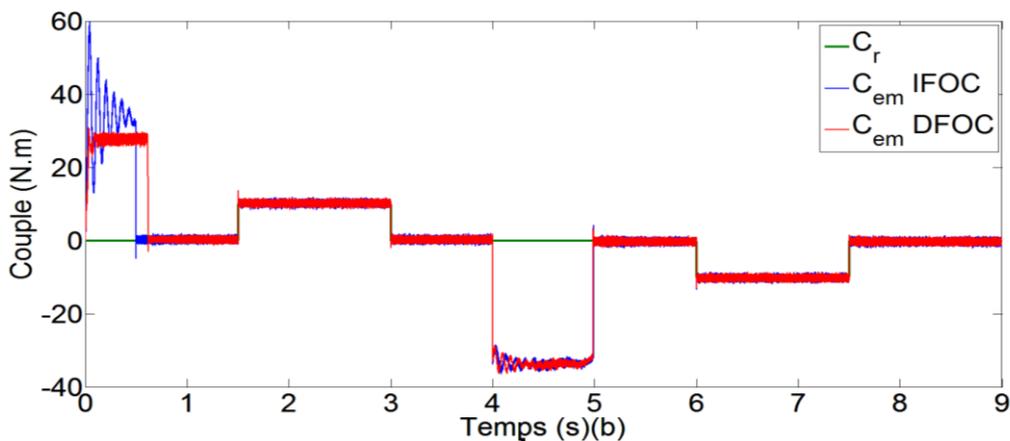


Figure 3-15 Résultats de simulation du couple électromagnétique obtenus par les deux commandes vectorielles directe et indirecte de la MASDE.

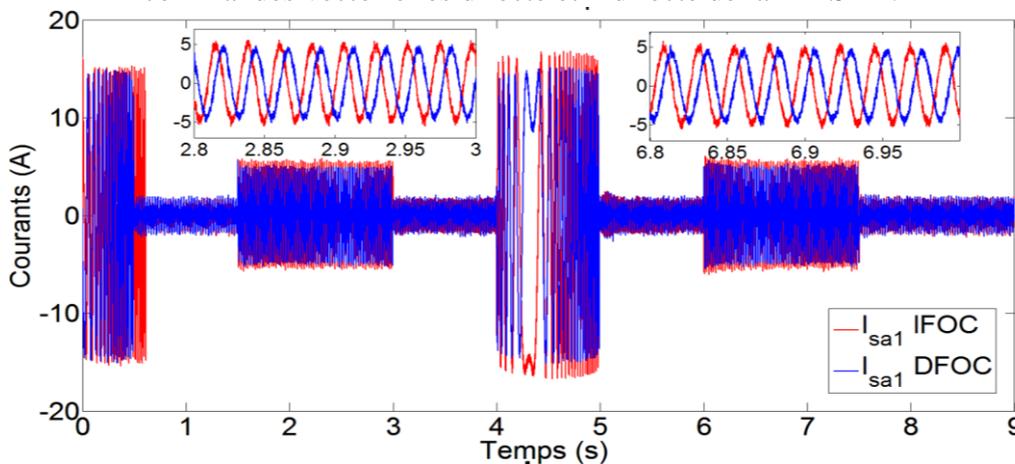


Figure 3-16 Résultats de simulation des courants des phases obtenus par la commande vectorielle indirecte et directe de la MASDE.

D'après les résultats des Figures 3-15 et 3-116 le couple électromagnétique obtenu par la commande vectorielle directe offre les meilleures performances de distorsion d'oscillation par rapport à la commande vectorielle indirecte.

### **3.6 Conclusion**

Ce chapitre traite de la modélisation et du contrôle d'une MASDE alimentée par deux onduleurs de tension à deux niveaux, utilisant deux stratégies de commande vectorielle de flux rotorique basées sur un régulateur classique PI. Pour ce faire, les techniques de commande vectorielle indirecte et directe sont appliquées à une MASDE afin d'évaluer leurs performances respectives. Les résultats obtenus montrent une nette amélioration de la qualité des ondes de sortie avec la commande vectorielle directe par rapport à la commande vectorielle indirecte pour les deux onduleurs à deux niveaux. La commande vectorielle directe présente ainsi un avantage significatif en optimisant la réponse du couple de la MASDE et en améliorant le moment de démarrage. Cette étude met en lumière les bénéfices substantiels de la commande vectorielle directe dans le contexte spécifique de l'alimentation d'une MASDE par des onduleurs à deux niveaux, notamment en termes de performance électrique et de dynamique de contrôle.

### Référence bibliographies

- [1] E. Zaidi "Etude de la commande d'un entraînement électrique de puissance à base d'une architecture segmentée, Thèse de Doctorat de l'Ecole Militaire Polytechnique, Algérie, 2021.
- [2] Abbas Nacer Eddine, "Etude comparative de la commande vectorielle directe et indirecte", Mémoire de master de école supérieur d'application de Tlemcen, Algérie 2021/2022
- [3] E. Zaidi, K. Marouani, L. Bentouhami, and A. E. Mabrek, "Non-linear speed control of multi-phase induction machine fed by two cascaded H-bridge multi-level inverter", International conference on electronics and electrical engineering (IC3E'18), 12-13 November 2018. Bouira, Algiers, Algeria, 2018.
- [4] Mesbahi Nadhir, "Etude comparative de la commande vectorielle directe et indirecte d'une machine asynchrone", Mémoire de magister de l'Université de Badji Mokhtar- Annaba, Algérie 2007.
- [5] E. Zaidi, K. Marouani, H. Bouadi1, K. Nounou, and M. Becherif, "Circulating current reduction-based hybrid controller of an electrical drive system fed by two parallel inverters", Electrical Engineering, vol. 103, no. 1, pp. 205-216, 2021.
- [6] K. Marouani, "Contribution à la commande d'un entraînement électrique à base de moteur asynchrone double étoile ", Thèse de Doctorat de l'Ecole Militaire Polytechnique, Algérie, 2010.
- [7] E. Zaidi, K. Marouani, A. E Mabrek, E. Merabet and L. Bentouhami, "Fuzzy Logic Control of Multi-Phase Induction Machine Drives Based on Cascaded Hybrid Multi-level Inverters," In IEEE the International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb CISTEM 2018, USTHB-Algiers, Algeria, 29-31 October 2018.
- [8] L. Youb, "Commande directe du couple et commande vectorielle de la machine asynchrone", Rev. Roum. Sci. Techn. Électrotechn. et Énerg, vol. 53, no. 1, pp-87-98, 2008.
- [9] I. Y. Öneland and M. E. H. Benbouzid, "Induction motor bearing failure detection and diagnosis: Park and Concordia transform approaches comparative study", IEEE/ASME Transactions on mechatronics, vol. 13, no. 2, pp. 257-262, 2008.

## Conclusion générale

Le travail que nous avons présenté dans ce mémoire porte sur l'étude et la commande sans et avec capteur mécanique d'un actionneur électrique (*machine asynchrone double étoile "MASDE"*) alimenté par deux onduleurs à deux niveaux.

En plus il a été procédé à une étude comparative entre la commande vectorielle directe et indirecte pour juger les performances de chacune et le choix de la meilleure technique de commande tout en compte des résultats de simulation obtenus dans les deux méthodes, celle *directe DFOC* présentée un avantage en ce qui concerne la qualité du couple électromagnétique qui présente moins d'ondulation que celui de la *méthode indirecte IFOC*.

Nous informons les membres du jury que notre travail a pris beaucoup de temps dans la phase de simulation du moteur asynchrone double étoile *MASDE* association à l'onduleur à deux niveaux en application de la commande directe, à cette effet ne nous avons pas pu simuler le cas de l'association avec des onduleurs multi-niveaux.

Mise en œuvre expérimentale des différentes techniques de commande. En conclusion, la technique de commande *DFOC* a démontré une performance significativement supérieure à celle de la commande *IFOC*.

Le travail accompli dans ce mémoire a ouvert la voie à plusieurs perspectives, résumées comme suit :

- Réalisation d'expériences pour mettre en pratique les diverses techniques de commande.
- Exploration d'autres approches de commande non linéaires, telles que les, la logique floue, la commande adaptative et les réseaux de neurones
- Commande d'association onduleur multi-niveaux /Machine asynchrone suite à un défaut.
- Mise en œuvre expérimentale des différentes techniques de commande.

## Annexe A : Synthèse des régulateurs de la commande vectorielle indirecte avec régulation de vitesse

Le principe de cette méthode, consiste à déterminer directement la composante du flux rotorique à partir de la vitesse mécanique de rotation du rotor en utilisant un capteur de vitesse, cela réalisable par un bloc de défluxage défini par la fonction non linéaire suivante [Zai21]

$$\begin{cases} \varphi_r^* = \varphi_n \text{ si } |\Omega| \leq \Omega_n \\ \varphi_r^* = \frac{\varphi_n \Omega_n}{|\Omega|} \text{ si } |\Omega| > \Omega_n \end{cases} \quad (A.1)$$

Schématisé par la Figure A.1 :

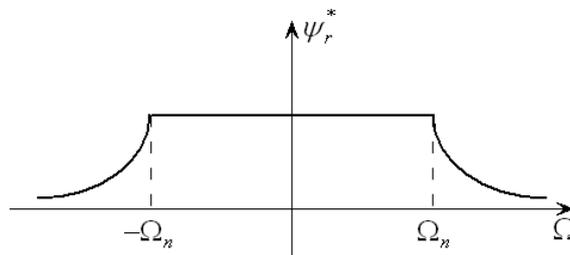


Figure A.1 Schéma de défluxage.

### ➤ Identification des paramètres de la régulation de vitesse

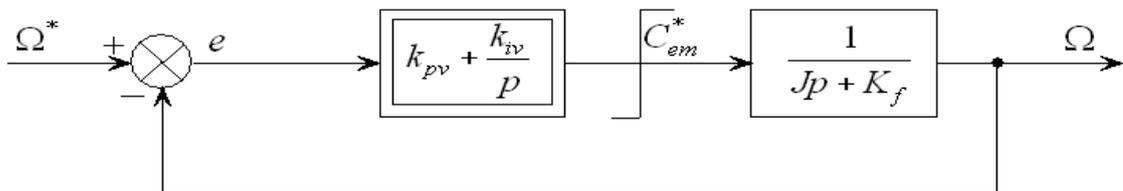


Figure A.2 Boucle de régulation de vitesse.

Identification de coefficients de  $k_{pv}$  et  $k_{iv}$  donné par : (On prend  $T = T_r$ )

$$\begin{cases} k_{pv} = \frac{J}{T} \\ k_{iv} = \frac{K_f}{T} \end{cases} \quad (A.2)$$

La commande doit être limitée par un dispositif de saturation défini par:

$$C_{em}^*(Lim) = \begin{cases} C_{em}^* \text{ si } |C_{em}^*| \leq C_{em}^{max} \\ C_{em}^{max} \text{ sign}(C_{em}^*) \text{ si } |C_{em}^*| \geq C_{em}^{max} \end{cases} \quad (A.3)$$

[Zai21] E. Zaidi "Etude de la commande d'un entraînement électrique de puissance à base d'une architecture segmentée, Thèse de Doctorat à l'Ecole Militaire Polytechnique, Algérie, 2021.

## Annexe B : Commande vectorielle directe

### ➤ Régulateur de vitesse [Mes07] :

La dynamique des machines peut être modélisée en termes de vitesse par une équation mécanique. Donc, La régulation de vitesse peut être expliquée par le schéma fonctionnel suivant :

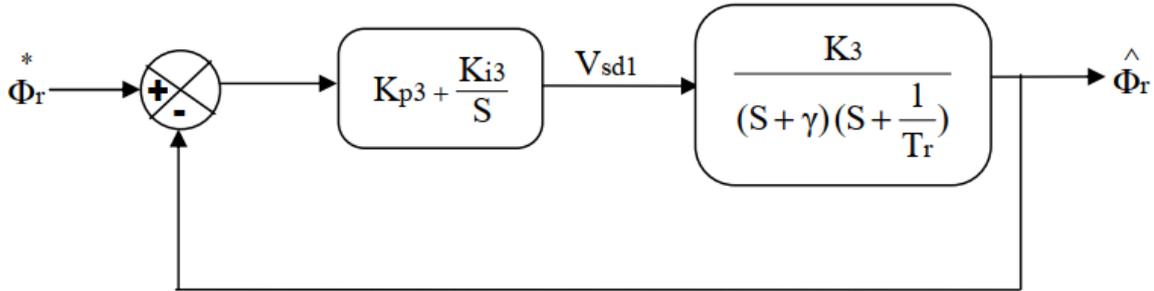


Figure B.1 Schéma fonctionnel de la régulation de vitesse.

La fonction de transfert en boucle fermée :

$$\frac{\Omega(s)}{\Omega^*(s)} = \frac{\left(\frac{1}{Js+f}\right)\left(K_{p1} + \frac{K_{i1}}{s}\right)}{1 + \left(\frac{1}{Js+f}\right)\left(K_{p1} + \frac{K_{i1}}{s}\right)} = \frac{1 + \tau_1 s}{1 + \left(\tau_1 + \frac{f}{K_{i1}}\right)s + \frac{J}{K_{i1}}s^2} \quad (B.1)$$

Avec :

$$\tau_1 = \frac{K_{p1}}{K_{i1}} \quad (B.2)$$

En identifiant le dénominateur sous sa forme canonique, nous devons résoudre le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} \frac{J}{K_{i1}} = \frac{1}{W_0^2} \\ \frac{2\zeta}{W_0} = \tau_1 + \frac{f}{K_{i1}} \end{cases} \quad (B.3)$$

Si  $\zeta = 1$  on obtient :

$$\begin{cases} K_{p1} = \tau_1 K_{i1} \\ K_{i1} = \frac{4J}{\tau_1^2} \end{cases} \quad (B.4)$$

➤ Régulateur de couple

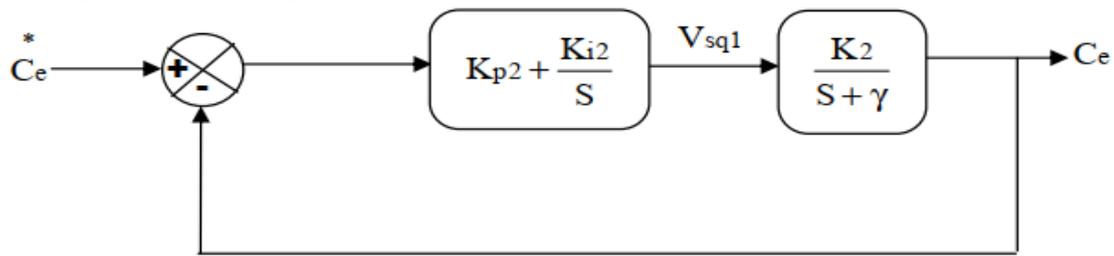


Figure B.2 Schéma fonctionnel de la régulation de couple.

On a :

$$C_e = \frac{K_2}{S + \gamma} V_{sq1} \quad (B.5)$$

De manière à ce que :

$$K_2 = \frac{PL_m \phi_r^*}{\sigma L_s L_r} \quad (B.6)$$

Pour compenser le pôle  $S + \gamma$  par  $S + \frac{K_{i2}}{K_{p2}}$  cela se traduit par la condition suivante :

$$\frac{K_{i2}}{K_{p2}} = \gamma \quad (B.7)$$

La fonction de transfert en boucle ouverte s'exprime par :

$$\frac{C_e}{C_e^*} = \frac{k_{p2} K_2}{S} \quad (B.8)$$

La fonction de transfert en boucle fermée s'exprime par :

$$\frac{C_e}{C_e^*} = \frac{k_{p2} K_2}{S + k_{p2} K_2} = \frac{1}{\frac{1}{k_{p2} K_2} S + 1} \quad (B.9)$$

De sorte que la constante de temps associée au régulateur est définie par :

$$\tau_2 = \frac{1}{k_{p2} K_2} \quad (B.10)$$

Donc d'après les équations les paramètres du régulateur de couple donnée par :

$$\begin{cases} K_{p2} = \frac{1}{K_2\tau_2} \\ K_{i2} = \gamma K_{p2} \end{cases} \quad (B.11)$$

➤ Régulateur du flux [Mes07]

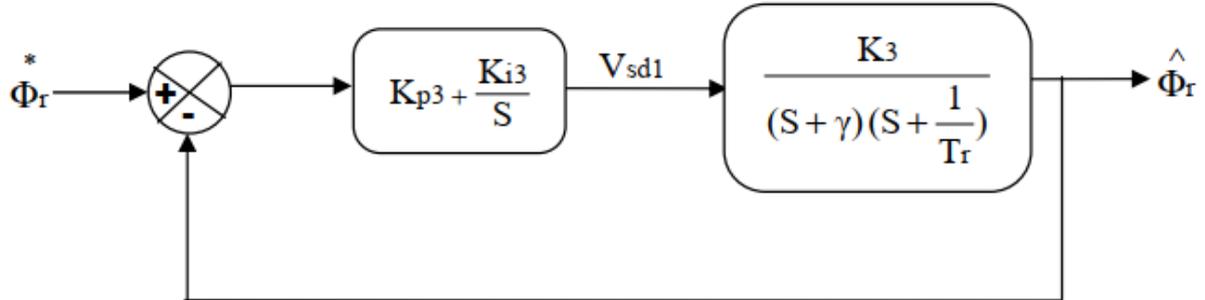


Figure B.3 Schéma fonctionnel de la régulation du flux.

On a :

$$\Phi_r = \frac{K_3}{(S + \gamma) \left( S + \frac{1}{T_r} \right)} V_{sd1} \quad (B.12)$$

Avec :

$$K_3 = \frac{L_m}{\sigma L_s T_r} \quad (B.13)$$

La compensation des pôles conduit à :

$$\frac{K_{i3}}{K_{p3}} = \frac{1}{T_r} \quad (B.14)$$

La fonction du transfert en boucle ouverte s'exprime par :

$$BO(S) = \frac{K_{p3}K_3}{S(S + \gamma)} \quad (B.15)$$

L'équation caractéristique en boucle fermée s'exprime par :

$$\frac{1}{K_{p3}K_3} S^2 + \frac{\gamma}{K_{p3}K_3} S + 1 \quad (B.16)$$

En identifiant le dénominateur sous sa forme canonique, nous devons résoudre le système d'équations suivant :

---

$$\begin{cases} \frac{1}{K_{p3}K_3} = \frac{1}{W_0^2} \\ \frac{\gamma}{K_{p3}K_3} = \frac{2\zeta}{W_0} \end{cases} \quad (B.17)$$

Donc, les paramètres du régulateur du flux sont :

$$\begin{cases} K_{p3} = \frac{\gamma^2}{K_3(2\zeta)^2} \\ K_{i3} = \frac{K_{p3}}{T_r} \end{cases} \quad (B.18)$$

*[Mes07] N. Mesbahi, " Etude comparative de la commande vectorielle directe et indirecte d'une machine asynchrone", Mémoire de magister de l'Université de Badji Mokhtar- Annaba, Algérie 2007.*

## Annexe C : Paramètres du système

Tableau C.1 Paramètres de la MASDE.

<i>Puissance nominale</i>	$P_n = 4.5kW$
<i>Tension nominale</i>	$V_n = 220V$
<i>Courant nominal</i>	$I_n = 6.5A$
<i>Vitesse nominale</i>	$v_n = 2838tr/mn$
<i>Fréquence nominale</i>	$f_s = 50Hz$
<i>Résistance d'une phase statorique (étoiles 1 et 2)</i>	$R_{s1} = R_{s2} = 3.72\Omega$
<i>Résistance d'une phase rotorique</i>	$R_r = 2.12\Omega$
<i>Inductance propre cyclique d'une phase statorique (étoiles 1 et 2)</i>	$L_1 = L_2 = 0.022H$
<i>Inductance propre cyclique d'une phase rotorique</i>	$L_r = 0.006H$
<i>Inductance mutuelle cyclique stators-rotor</i>	$L_m = 0.3672H$
<i>Moment d'inertie</i>	$J = 0.0625kg.m^2$
<i>Coefficient de frottement</i>	$K_f = 0.001N.m.s/rd$

**ملخص:**

يندرج العمل المقدم من خلال هذه المذكرة في إطار الدراسات حول أنظمة الدفع الكهربائي عالية القدرة. الهدف المنشود هو إنجاز نظام كهربائي يعتمد على التحكم في محرك باستخدام آلة حث ذات نجمتين تغذى بواسطة محولين ثنائيين المستوى. الهدف هو تحسين أداء هذا الجهاز عن طريق تقليل التموجات الموجودة في عزم التدوير عندي تشغيل الآلة والحصول على استجابة ذات جودة أفضل ويحقق التحكم الشعاعي المباشر هذا الهدف. نقدم من خلال هذا العمل تحكماً ودراسة معمقة للآلة غير المتزامنة ذات النجمتين مع استخدام نوعين من المتحكم الشعاعي المباشر و الغير المباشر مدمج مع تقنية PWM للتحكم في العاكسين التي تقدم كفاءة عالية من خلال تقليل التشوهات والتوافقيات. إن نتائج المحاكاة التي تم إجراؤها لتقييم أداء نظام القيادة بناءً على الآلة غير المتزامنة ذات النجمتين والتحكم في PWM توضح النتائج أن نهج التحكم المباشر يحقق الأداء الأمثل من حيث كفاءة الطاقة واستقرار النظام بمقارنة مع المتحكم الشعاعي الغير مباشر كما تُوضحه نتائج المحاكاة.

**كلمات مفتاحية:** أنظمة الدفع الكهربائي، آلة غير متزامنة ذات نجمتين، المتحكم الشعاعي المباشر و الغير المباشر.

**Abstract:**

The work presented in this thesis falls within the scope of studies on high-power electric propulsion systems. The objective is to develop an electrical system based on controlling a motor using a double star asynchronous machine powered by two-level inverters. The main goal is to enhance the performance of this setup by reducing torque ripple during machine operation and achieving better response quality through the implementation of direct vector control. We thus propose a comprehensive study and control of the double star asynchronous machine using two types of control strategies: direct and indirect, integrated with pulse width modulation (PWM) for inverter control, which offers high efficiency by reducing distortions and harmonics. Simulation results evaluating the performance of the control system based on the double star asynchronous machine and PWM control demonstrate that the direct control approach optimizes energy efficiency and system stability compared to indirect vector control, as illustrated by the simulation outcomes.

**Keywords:** Electric propulsion systems, double star asynchronous machine, direct and indirect vector controller.

**Résumé :**

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre des études sur les systèmes de propulsion électrique à haute puissance. L'objectif est de développer un système électrique basé sur le contrôle d'un moteur utilisant une machine asynchrone double étoile alimentée par deux onduleurs à deux niveaux. L'objectif principal est d'améliorer les performances de ce dispositif en réduisant les ondulations de couple pendant le fonctionnement de la machine et en obtenant une réponse de meilleure qualité grâce à la mise en œuvre du contrôle vectoriel direct. Nous proposons ainsi une étude approfondie et un contrôle de la machine asynchrone double étoile en utilisant deux types de commandes : directe et indirecte, intégrées avec une modulation de largeur d'impulsion (PWM) pour le contrôle des inverseurs, ce qui offre une haute efficacité en réduisant les distorsions et les harmoniques. Les résultats des simulations effectuées pour évaluer les performances du système de commande basé sur la machine asynchrone double étoile et le contrôle PWM démontre que l'approche de contrôle directe optimise l'efficacité énergétique et la stabilité du système par rapport à la commande vectorielle indirecte, comme illustré par les résultats des simulations.

**Mots-clés :** Systèmes de propulsion électrique, machine asynchrone double étoile, commande vectoriel direct et indirect.