

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université A.MIRA Bejaïa  
Faculté de Technologie  
Département de Génie Electrique



## Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de Master en électromécanique  
*Spécialité : électromécanique*

*Thème*

---

**Etude des performances d'une MADA alimentée par  
deux onduleurs à trois niveaux**

---

**Présenté par:**

**M<sup>r</sup> : BOUSEKKINE Yacine**  
**M<sup>r</sup> : BAKOUCHE Yacine**

**Dirigé par:**

**D<sup>r</sup> : R.BABOURI**

**Président du jury :**

**Pr: F.Idjedaren**

**Examineur :**

**Pr: H.Amimer**

*Année universitaire 2017/2018*

# *Remerciements*

Nous tenons à remercier tout d'abord le Dieu tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a données durant toutes ces longues années.

Nous tenons à remercier vivement D<sup>r</sup> BABOURI Rabah, pour nous avoir honorés par son encadrement, ses orientations, ses précieux conseils et ses encouragements qui nous ont permis de mener à bien ce travail.

Un énorme merci à nos familles et amis pour leurs éternel soutien et la confiance qu'ils ont en nos capacités.

S'il y a des personnes à ne pas oublier, c'est bien tous nos amis étudiants du Master II en électromécanique, promotion 2017/2018.

Nous tenons à exprimer notre gratitude aux membres de jury pour avoir accepté de juger ce travail.

# *Dédicaces*

On dédie ce modeste travail :

A nos chers parents que nous remercions énormément pour leurs aides et leurs patiences ;

A nos sœurs et frères qui nous souhaitent un avenir prospère ;

A nos familles sans exception ;

A nos enseignants ;

A toutes les personnes qui nous ont apporté de l'aide surtout notre cher ami Mr DIALL  
Maham Amadou.

# Table des matières

Dédicace .....	I
Table des matières .....	II
Liste des figures .....	VI
Nomenclature .....	IX
Introduction générale.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
<b>Chapitre I : Généralités sur les convertisseurs multi-niveaux et la MADA.</b>	
I.1 Introduction.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
I.2 Les convertisseurs statiques.....	3
I.2.1 Définition et principe de conversion d'énergie d'un onduleur :	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
<b>défini.</b>	
I.2.2 Onduleur à deux niveaux .....	4
I.3 Principales topologies d'onduleurs multiniveaux .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
I.2.3.1 Les convertisseurs à cellules imbriquées (Multicellulaires) « flying capacitors multi level inverter».....	6
I.2.3.1.1 Principe de base .....	6
I.2.3.1.2 Avantages et inconvénients.....	7
I.2.3.2 les convertisseurs en cascade (symétrique) « <i>cascade multilevel inverter</i> » .....	7
I.2.3.2.1 Pont en H (H-bridge) .....	7
I.2.3.3 Onduleurs multiniveaux asymétriques.....	9
I.2.3.4 les convertisseurs multiniveaux a structure NPC.....	9
I.2.3.4.1 Onduleurs à 3 niveaux .....	9
I.2.3.4.1.1 Commande complémentaire .....	11
I.2.3.4.2 Avantages et inconvénients .....	13
I.2.3.5 Domaines d'application des convertisseurs multi-niveaux .....	13
I.3 Généralités sur la MADA .....	14

I.3.1 Description de la MADA .....	14
I.3.2 Principe de fonctionnement de la MADA .....	15
I.3.3 Fonctionnement en alternateur.....	15
I.3.4 Fonctionnement en moteur .....	16
I.3.5. Régime de fonctionnement de la MADA .....	18
I.3.5.1 Régime de fonctionnement synchrone.....	18
I.3.5.2 Régime de fonctionnement asynchrone .....	19
I.3.6 Fonctionnement dans les quatre quadrants .....	19
I.3.6.1. Fonctionnement en moteur hypo synchrone .....	19
I.3.6.2 Fonctionnement en moteur hyper synchrone.....	19
I.3.6.3 Fonctionnement en génératrice hypo synchrone.....	19
I.3.6.4 Fonctionnement en génération hyper synchrone .....	20
I.3.7 Domaines d'applications.....	20
I.3.8 Avantages et inconvénients de la MADA.....	21
I.3.8.1 Avantages.....	21
I.3.8.2 Inconvénients .....	21
I.4 Conclusion .....	21

## **Chapitre II : Modélisation de la MADA et de l'onduleur à trois niveaux.**

II.1 Introduction .....	22
II.2 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation .....	22
II.2.1 Hypothèses simplificatrices .....	22
II.3 Modélisation de la MADA .....	23
II.3.1 Équations électriques de la MADA .....	23
II.3.2 Équations mécaniques de la MADA.....	25
II.4 Transformation de Park .....	25
II.5 Application de la transformation de Park à la MADA .....	26
II.6 Choix du référentiel .....	28

II.6.1 Référentiel lié au stator .....	28
II.6.2 Référentiel lié au rotor .....	28
II.6.3 Référentiel lié au champ tournant.....	29
II.7 Simulation de la machine asynchrone à rotor court-circuité en boucle ouverte.....	29
II.7.1 Résultats de simulation .....	29
II.8 Modélisation du l'onduleur à trois niveaux .....	31
II.8.1 Fonctions de connexion .....	32
II.9 Stratégie de commande des onduleurs.....	34
II.9.1 La commande MLI triangulo- sinusoïdale .....	35
II.10 Caractéristique de la modulation .....	35
II.11 Modulation sinusoïdale à doubles triangles.....	36
III.12 Conclusion.....	37
 <b>Chapitre III : Commande vectorielle de la MADA alimentée par deux onduleurs à trois niveaux.</b>	
III.1 Introduction .....	38
III.2 Commande Vectorielle de la MADA.....	38
III.2.1 Principe de la commande vectorielle .....	38
III.2.2 Commande vectorielle par orientation du flux statorique .....	39
III.2.3 Schéma explicatif de la commande vectorielle de la MADA .....	41
III.3 Modèle de la MADA en vue de la commande .....	43
III.4 Représentation du système à étudier .....	44
III.5 Simulation du système .....	44
III.6 Résultats de simulation.....	44
III.6.1 Fonctionnement moteur à vitesse variable et charge fixe .....	44
III.6.1.1 Analyse harmonique.....	47
III.6.2 Fonctionnement génératrice à vitesse variable et charge fixe.....	50
III.6.2.1 Analyse harmonique.....	53
III.6.3 Fonctionnement moteur à vitesse fixe et à couple variable .....	56

III.6.4 Fonctionnement génératrice à vitesse fixe et à couple variable .....	59
III.7 Conclusion.....	62
Conclusion générale .....	63
Bibliographie.....	XI
Annexes.....	XIII
Résumé	

## Liste des figures

<b>Figure I.1:</b> Les convertisseurs statiques. ....	4
<b>Figure I.2 :</b> Symbole d'un onduleur. ....	4
<b>Figure I.3 :</b> Schéma d'un onduleur triphasé a deux niveaux.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
<b>Figure I.4:</b> Topologies des convertisseurs multi-niveaux. ....	6
<b>Figure I.5:</b> Bras d'un convertisseur multicellulaire à niveaux trois et cinq .....	7
<b>Figure I.6 :</b> pont en H (H-bridge). ....	8
<b>Figure I.7:</b> bras d'un onduleur en cascade à N niveaux. ....	8
<b>Figure I.8:</b> Forme d'onde de signal de sortie d'un onduleur en cascade à neuf niveaux .....	8
<b>Figure I.9 :</b> Exemple de topologies hybrides. ....	9
<b>Figure I.10:</b> Schéma d'un onduleur triphasé à trois niveaux à structure NPC. ....	10
<b>Figure I.11:</b> Bras d'un onduleur NPC à trois niveaux .....	10
<b>Figure I.12 :</b> Schéma fonctionnel de l'onduleur à trois niveaux. ....	10
<b>Figure I.13:</b> Séquences de fonctionnement d'un bras d'onduleur NPC à trois niveaux. ....	11
<b>Figure I.14 :</b> Symbole d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation. ....	14
<b>Figure I.15</b> représentation des structures du stator et du rotor bobiné de la MADA. ....	14
<b>Figure I.16 :</b> MADA utilisée en alternateur. ....	15
<b>Figure I.17 :</b> MADA alimentée par le réseau de côté statorique et par un convertisseur AC/DC/AC de côté rotorique. ....	16
<b>Figure I.18 :</b> MADA alimentée par le réseau de côté statorique et par un convertisseur matriciel .....	17
<b>Figure I.19:</b> MADA alimentée par deux convertisseurs matriciels .....	17
<b>Figure I.20:</b> MADA alimentée par deux convertisseurs AC/DC/AC .....	18
<b>Figure I.21:</b> MADA alimentée par deux onduleurs alimentés par un redresseur commun. ...	18
<b>Figure I.22 :</b> Fonctionnement d'une MADA en moteur hypo synchrone. ....	19
<b>Figure I.23:</b> Fonctionnement d'une MADA en moteur hyper synchrone. ....	19
<b>Figure I.24 :</b> Fonctionnement d'une MADA en génératrice hypo synchrone. ....	20
<b>Figure I.25:</b> Fonctionnement d'une MADA en génératrice hyper synchrone. ....	20
<b>Figure II.1:</b> Représentation schématique de la MADA. ....	22
<b>Figure II.2:</b> Passage du triphasé au biphasé. ....	26
<b>Figure II.3:</b> Allures de la vitesse de rotation et du couple électromagnétique. ....	30
<b>Figure II.4:</b> Allures de la vitesse et du couple. ....	31
<b>Figure II.5:</b> Onduleur triphasé à trois niveaux NPC .....	32

<b>Figure II.6:</b> Principe de la commande MLI. ....	35
<b>Figure II.7:</b> Exemple de la technique MLI à doubles triangles. ....	36
<b>Figure II.8 :</b> Tensions de sortie des trois bras de l'onduleur à trois niveaux commandé par la stratégie triangulo-sinusoidale à doubles triangles.....	37
<b>Figure III.1 :</b> Schéma de principe du découplage pour le MADA par analogie avec la machine. ....	38
<b>Figure III.3 :</b> Schéma explicatif de contrôle de la MADA. ....	41
<b>Figure III.4 :</b> Schéma de régulation des courants. ....	42
<b>Figure III.5 :</b> Régulation de vitesse avec régulateur PI. ....	43
<b>Figure III.6:</b> Représentation du système à étudier.....	44
<b>Figure III.7:</b> allure de la vitesse de rotation et la référence. ....	45
<b>Figure III.8 :</b> Allures du couple électromagnétique et couple de charge.....	45
<b>Figure III.9 :</b> Allures des courants et des flux statoriques et rotoriques. ....	46
<b>Figure III.10 :</b> Allures des puissances actives et réactive statoriques et rotoriques. ....	46
<b>Figure III.11 :</b> Allures des pulsations statoriques et rotoriques.....	47
<b>Figure III.12:</b> Allures des tensions statoriques et rotoriques à la vitesse 1500tr/min.....	47
<b>Figure III.13:</b> Spectres d'harmoniques des tensions statoriques et rotoriques à la vitesse 1500tr/min. ....	48
<b>Figure III.14:</b> Zooms des courants statoriques et rotoriques à la vitesse 1500tr/min.....	48
<b>Figure III.15:</b> Spectres d'harmoniques des courants statoriques et rotoriques à la vitesse 1500tr/min. ....	48
<b>Figure III.16:</b> Allures des tensions statoriques e et rotoriques à la vitesse 3000tr/min.....	49
<b>Figure III.17:</b> Spectres d'harmoniques des tensions statoriques et rotoriques à la vitesse 3000tr/min. ....	49
<b>Figure III.18:</b> Zooms des courants statoriques et rotoriques à la vitesse 3000 tr/min.....	49
<b>Figure III.19:</b> Spectres d'harmoniques des courants statoriques et rotoriques à la vitesse 3000tr/min. ....	50
<b>Figure III.20:</b> Allure de la vitesse de rotation de la MADA en mode moteur.....	51
<b>Figure III.21:</b> Allures de couple électromagnétique et de charge.....	51
<b>Figure III.22 :</b> Allures des puissances actives et réactive statoriques et rotoriques. ....	52
<b>Figure III.23 :</b> Allures des courants et des flux statoriques et rotoriques. ....	52
<b>Figure III.24:</b> Allures des pulsations statoriques et rotoriques.....	53
<b>Figure III.25:</b> allures des tensions statoriques et rotoriques à la vitesse 1500 tr/min.....	53

<b>Figure III.26:</b> Spectres d'harmoniques des courants statoriques et rotoriques à la vitesse 1500 tr/min. ....	53
<b>Figure III.27:</b> Zooms des courants statoriques et rotoriques à la vitesse 1500 tr/min.....	54
<b>Figure III.28:</b> Spectres d'harmoniques des courants statoriques et rotoriques à la vitesse 1500 tr/min. ....	54
<b>Figure III.29:</b> allures des tensions statoriques et rotoriques à la vitesse 3000 tr/min.....	54
<b>Figure III.30:</b> Spectres d'harmoniques des courants statoriques et rotoriques à la vitesse 3000 tr/min. ....	55
<b>Figure III.31:</b> Zooms des courants statoriques et rotoriques à la vitesse 3000 tr/min.....	55
<b>Figure III.32:</b> Spectres d'harmoniques des courants statoriques et rotoriques à la vitesse 3000 tr/min. ....	55
<b>Figure III.33:</b> Allures de couple électromagnétique et de charge.....	56
<b>Figure III.34:</b> Allures de la vitesse de rotation de la MADA et de la vitesse de référence. ...	57
<b>Figure III.35:</b> allures des courants statoriques et rotoriques.....	57
<b>Figure III.36:</b> Allures des pulsations statoriques et rotoriques.....	58
<b>Figure III.37:</b> Allures des flux statoriques et rotoriques.....	58
<b>Figure III.38:</b> Allures des puissances statoriques et rotoriques.....	59
<b>Figure III.39 :</b> Allures de couple électromagnétique et de charge.....	59
<b>Figure III.40 :</b> Allures de la vitesse de rotation de la MADA et de la vitesse de référence...	60
<b>Figure III.41:</b> Allures des courants statoriques et rotoriques.....	60
<b>Figure III.42:</b> Allures des pulsations statoriques et rotoriques.....	61
<b>Figure III.43:</b> Allures des flux statoriques et rotoriques.....	61
<b>Figure III.44:</b> Allures des puissances statoriques et rotoriques.....	62

## Nomenclature

IGBT: Insulated Gate Bipolaire Transistor

NPC: Neutral Point Clamping

MLI: Modulation de Largeur d'Impulsion

FTBO: Fonction de Transfert Boucle Ouverte

FTBF: Fonction de Transfert Boucle Fermé

MADA: Machine Asynchrone à Double Alimentation

$E$  : Tension continue de l'onduleur.

$P$  : Nombre de pair de pole.

$\omega$  : Pulsation électrique du rotor

$\omega_s$  : Pulsation de champs statorique

$\omega_r$  : Pulsation de champs rotorique

$\Omega$  : Vitesse mécanique du rotor

$\Omega^*$  : Vitesse de référence

$g$  : Le glissement

$j$  : Moment d'inertie

$f_s$  : Fréquence statorique

$f_r$  : Fréquence rotorique

$C_{em}$  : Couple électromagnétique

$C_r$  : Couple résistant (charge)

$P_s$  : Puissance active statorique

$P_r$  : Puissance active rotorique

$Q_s$  : Puissance réactive statorique

$Q_r$  : Puissance réactive rotorique

$F_{mm}$  : Force magnétomotrice

$f_p$  : Fréquence de la porteuse

$f_{réf}$  : Fréquence de l'onde de référence

$A_p$  : Amplitude de la porteuse

$A_{réf}$  : Amplitude de l'onde de référence

$P_1, P_2, P_3, P_4$  : Termes de couplage

$[v_s], [v_r]$  : Vecteurs de tensions statorique et rotorique

$[i_s]$  ,  $[i_r]$  : Vecteurs de courants statorique et rotorique

$[\Phi_s]$ ,  $[\Phi_r]$ : Vecteurs de flux statorique et rotorique

$[R_s]$ ,  $[R_r]$ : Vecteurs de résistances statorique et rotorique

$[L_{ss}]$ ,  $[L_{rr}]$ : Vecteurs d'inductances statorique et rotorique

$[M_{sr}]$ : Matrice des inductances mutuelles,  $[[M_{sr}]^t]$   $[M_{rs}]$

$R_s$ ,  $R_r$ : Résistances statorique et rotorique par phase

$l_s$ ,  $l_r$ : Inductances propres d'une phase statorique et rotorique

$M_s$ ,  $M_r$ : Inductances mutuelles entre deux phases respectivement statorique et rotorique

$M$  : Maximum d'inductance mutuelle entre une phase statorique et rotorique (les axes des deux phases coïncident)

$s$ : opérateur de Laplace

$\theta$  : Écart angulaire entre deux phases, statorique et rotorique correspondant.

# Introduction Générale

Les convertisseurs électromécaniques sont la base des progrès technologiques et industriels actuels, pratiquement on les trouve dans des domaines différents. En effet, par définition un convertisseur électromécanique est un convertisseur qui convertit l'énergie électrique en énergie mécanique (moteur) ou l'énergie mécanique en énergie électrique (générateur), le cœur de ces convertisseurs est la machine électrique qui produit de l'énergie mécanique dans le cas de la traction ou de l'énergie électrique dans le cas de la génération [1].

La technologie moderne des systèmes d'entraînement exige de plus en plus un contrôle précis et continu de la vitesse, du couple et de la position, tout en garantissant la stabilité, la rapidité et le rendement le plus élevé possible [2].

Le moteur à courant continu, a satisfait une partie de ces exigences mais à cause de système balais-collecteur qui augmente le coût de maintenance et les dangers de son utilisation dans les milieux explosifs aujourd'hui son domaine d'utilisation est restreint. Pour toutes ces raisons, l'orientation vers les recherches aboutissant à des meilleures exploitations d'un robuste actionneur, est très justifiée, à savoir, le moteur asynchrone à cage et le moteur synchrone à aimants permanents, qui sont robustes et ont une construction simple qui limite le coût et augmente le rapport de puissance massique. C'est pourquoi les machines à courant alternatif remplacent de plus en plus les moteurs à courant continu dans de nombreux domaines [1] [2].

Avec le développement fulgurant de l'électronique de puissance ces dernières années, dû essentiellement aux progrès des composantes semi-conducteurs, l'association de ces derniers permettent la construction des différentes structures de convertisseurs. Ces derniers étant de plus en plus élaborés avec des possibilités de contrôle de plus en plus sophistiqués assurent une maîtrise progressive de toutes machines électriques telle que la machine asynchrone à double alimentation. Ces dernières années un intérêt particulier est accordé à cette machine pour diverses applications, en tant que génératrice pour les énergies éoliennes et hydraulique ou en tant que moteur pour certaines applications industrielles comme le laminage, la traction ferroviaire ou encore la propulsion maritime [2].

Afin d'obtenir une machine asynchrone à double alimentation dont les performances sont semblables à une machine à courant continu, il est nécessaire d'assurer le découplage entre le flux et le couple électromagnétique. C'est l'idée de l'apparition de la technique de la commande vectorielle, le but de cette technique est d'arriver à commander la machine asynchrone comme une machine à courant continu à excitation indépendante où il y a un

découplage naturel entre la grandeur commandant le flux (le courant d'excitation) et celle liée au couple (le courant d'induit). Par cette technique (la commande vectorielle), et pour la machine asynchrone à double alimentation (MADA) le courant rotorique produisant le couple est maintenu en quadrature avec le flux statorique. L'application de cette dernière à la machine asynchrone à double alimentation présente une solution attractive pour réaliser de meilleures performances pour les applications de la production d'énergie et des entraînements électriques à vitesse variable [2]

L'objectif de notre travail est l'application de la commande vectorielle à la machine asynchrone à double alimentation (MADA) alimentée par deux onduleurs trois niveaux l'un associé au rotor et l'autre au stator.

Notre mémoire est composé de 3 chapitres :

Le premier chapitre présente des généralités sur les convertisseurs multiniveaux et des généralités sur la machine asynchrone à double alimentation (MADA) concernant son principe de fonctionnement et ses avantages et inconvénients.

Le deuxième chapitre est dédié à la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation, et à la modélisation et la commande de l'onduleur trois niveaux.

Le troisième chapitre présente la commande vectorielle appliquée à notre système (MADA alimentée par deux onduleurs trois niveaux), ensuite une simulation sur le logiciel MATLAB (Simulink) a été faite accompagnée des figures et d'interprétations des résultats obtenues.

# Chapitre I

- Généralités sur les convertisseurs multi-niveaux et la MADA.

## I.1 Introduction

La robustesse, le faible cout, et la facilité d'entretien font l'intérêt de l'utilisation du moteur asynchrone dans de nombreuses applications industrielles. Depuis plusieurs années, l'étude des performances des moteurs asynchrones alimentés par des onduleurs fait l'objet d'innombrable publication scientifique. L'apparition des structures de conversion multi-niveaux apporte des solutions par la mise en série de semi-conducteurs de puissance. Ces structures assurent la répartition de la contrainte en tension sur différents interrupteurs moyenne ou basse tension tout en améliorant les formes d'onde et le spectre d'harmoniques des grandeurs de sortie [3].

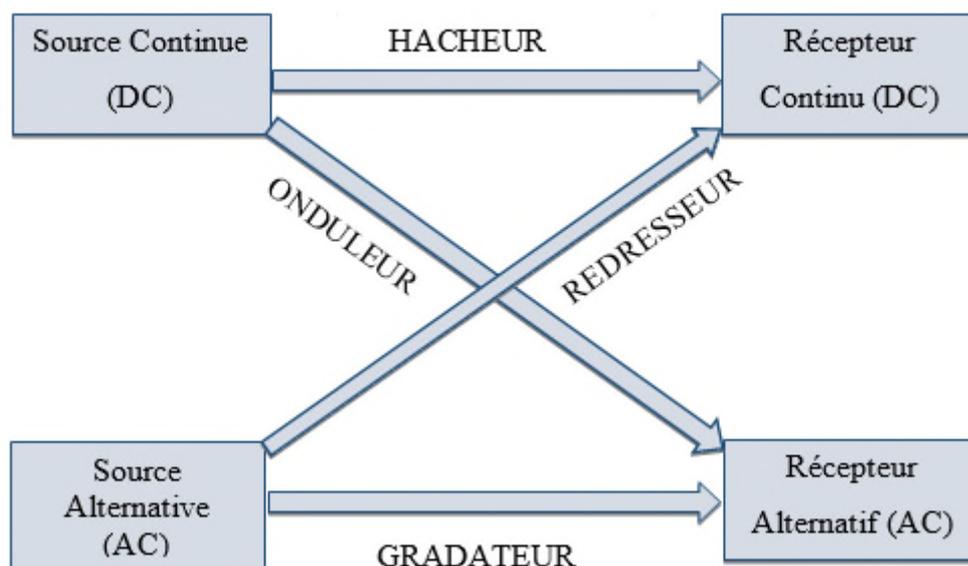
L'augmentation du nombre de niveaux des convertisseurs se révèle actuellement comme une solution de plus en plus réalisable pour l'alimentation des machines de fortes puissances, permis elles on trouve la machine asynchrone à double alimentation qui fait l'objet de vastes recherches ses dernières année notamment dans les applications à vitesse variable afin d'améliorer ses performances.

Dans la première partie de ce chapitre nous présenterons les structures des convertisseurs multiniveaux tel que, les convertisseurs multi-niveaux en cascade (symétrique), les convertisseurs multicellulaires (à cellules imbriqués), les convertisseurs multiniveaux a structure NPC (Neutral point Clamped) et une nouvelle structure qui s'appelle asymétrique ou hybride, leurs avantages et inconvénients et domaines d'applications.

Dans la deuxième partie de ce chapitre nous allons présenter des généralités sur la machine asynchrone à double alimentation (MADA) en se basant sur des articles et des contenus d'ouvrages que nous avons choisis afin d'étudier son principe de fonctionnement, les différents domaines d'applications et d'évaluer leurs avantages et leurs inconvénients. En plus, une classification et une comparaison des différents types de cette machine seront présentées.

## I.2 Les convertisseurs statiques

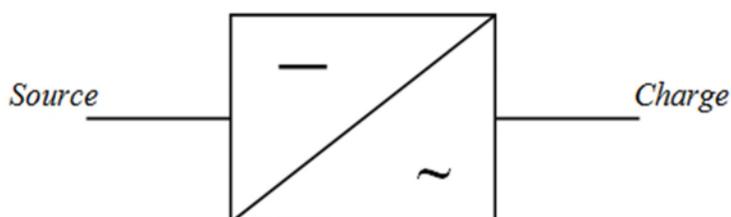
Les convertisseurs statiques sont des circuits électriques utilisant des semi-conducteurs de puissance (diodes, thyristors, transistors ...) utilisés comme des interrupteurs, dans le but de transformer le spectre du signal (amplitudes, fréquences, phases) pour adapter la source à la charge. L'étude et la conception de ces dispositifs est souvent appelée électronique de puissance [3]. La figure I.1 illustre les différents convertisseurs:



**Figure I.1:** Convertisseurs statiques.

### I.2.1 Définition et principe de conversion d'énergie d'un onduleur :

Un onduleur est un dispositif d'électronique de puissance permettant de générer des tensions et des courants alternatifs à partir d'une source d'énergie électrique de tension continue, c'est la fonction inverse d'un redresseur.



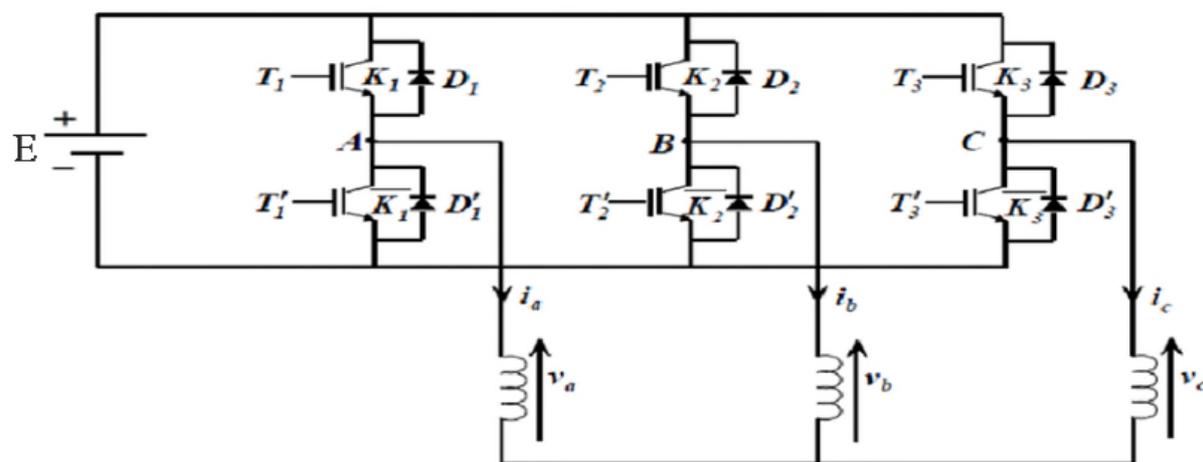
**Figure I.2 :** Symbole d'un onduleur.

### I.2.2 Onduleur à deux niveaux:

Les onduleurs sont des convertisseurs statiques de type continu ou alternatif, un onduleur se définit comme un appareil électronique de puissance. Il est capable de fournir des courants alternatifs. Ils sont « statiques » car ils ne font intervenir aucun mouvement mécanique (contrairement aux moteurs).

La figure II.3 donne le schéma de principe de l'onduleur de tension triphasé. Il est placé entre une source de tension continue supposée parfaite, donc de tension  $E$  constante, et une

source de courant alternatif triphasé supposée elle aussi parfaite, donc des courants  $i_a$ ,  $i_b$  et  $i_c$  formant un système triphasé sinusoïdal équilibré [4].



**Figure I.3 :** Schéma d'un onduleur triphasé à deux niveaux.

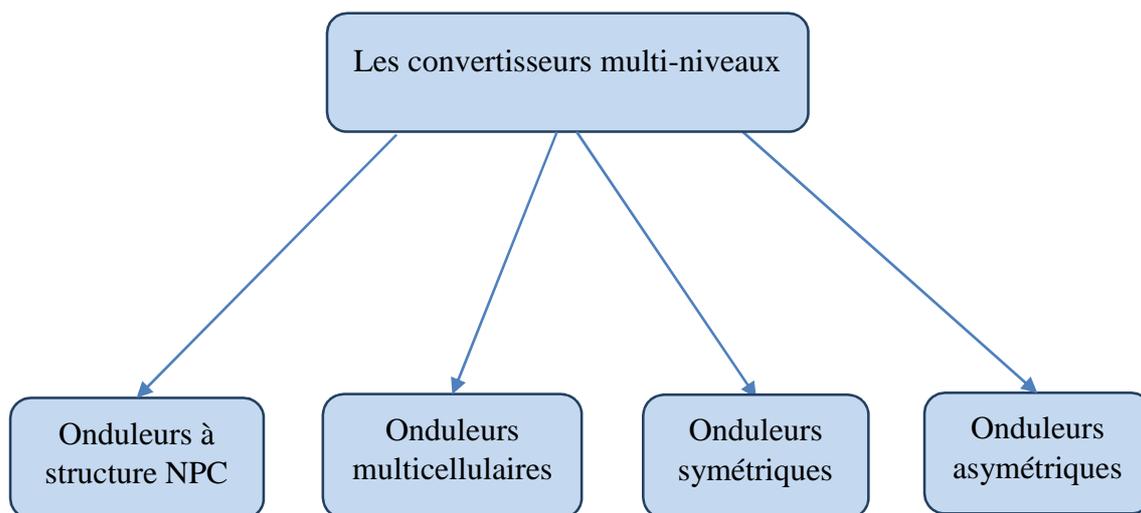
### I.2.3 Principales topologies d'onduleurs multiniveaux:

Actuellement, l'industrie exige des équipements de puissance de plus en plus élevée, de l'ordre du mégawatt. L'évolution rapide des techniques de fabrication des dispositifs à conducteurs et l'orientation des concepteurs vers la technologie des composants hybrides tels que l'IGBT ont permis le développement de nouvelles structures de convertisseurs d'une grande performance par rapport à la structure classique (deux niveaux). Ils sont mieux adaptés aux applications de grande puissance par ce qu'ils réduisent les contraintes dues aux phénomènes de commutation (pertes par commutation) sollicitant les interrupteurs et permet aussi la réduction du taux de distorsion des harmoniques. La première structure d'onduleurs multi-niveaux à apparaître est le NPC (Neutral Point Clamping) à trois niveaux, l'extension de cette topologie aux niveaux supérieurs, a permis l'apparition de différentes structures multi-niveaux [5].

On distingue quatre topologies:

- Des onduleurs multi-niveaux à structure NPC; qui seront étudiés dans la suite de ce travail. ;
- Des onduleurs multi-niveaux à cellules imbriquée ou multicellulaires.
- Des onduleurs multi-niveaux en cascade ou symétrique.
- Des onduleurs multi-niveaux à asymétrique ou hybride.

Le schéma ci dessous résume les différentes structures des convertisseurs multiniveaux :



**Figure I.4:** Topologies des convertisseurs multi-niveaux.

### I.2.3.1 Les convertisseurs à cellules imbriquées (Multicellulaires) « flying capacitors multi level inverter » :

La topologie de l'onduleur multi niveau à cellule imbriquées ou à condensateurs flottant (flying capacitor multilevel inverter), a été proposée par Meynard et Foch en 1992. Cette structure est proposée pour résoudre d'une part le problème de l'équilibre des tensions, et d'autre part pour réduire le nombre excessif de diodes. Dans cette topologie, les capacités remplacent les diodes de blocage, d'où l'appellation « onduleur à condensateur flottants » [6].

#### I.2.3.1.1 Principe de base :

Dans cette topologie, chaque branche de cet onduleur, dans le cas d'un onduleur à onduleur à trois niveaux, comporte quatre interrupteurs contrôlables et quatre diodes, et trois condensateurs ; deux sont branchés en parallèle avec la tension d'entrée  $V_{dc}$  et la troisième capacité remplace les deux diodes de blocage. Comme représenté à la Figure I.4 (a).

Pour un convertisseur à condensateurs flottants à N niveaux de tensions, nous avons  $2^{N-1}$  séquences de fonctionnement possible permettant de générer les N niveaux de tensions.

Et en particulier pour un convertisseur à condensateurs flottants à trois niveaux on a quatre séquences de fonctionnement [6]:

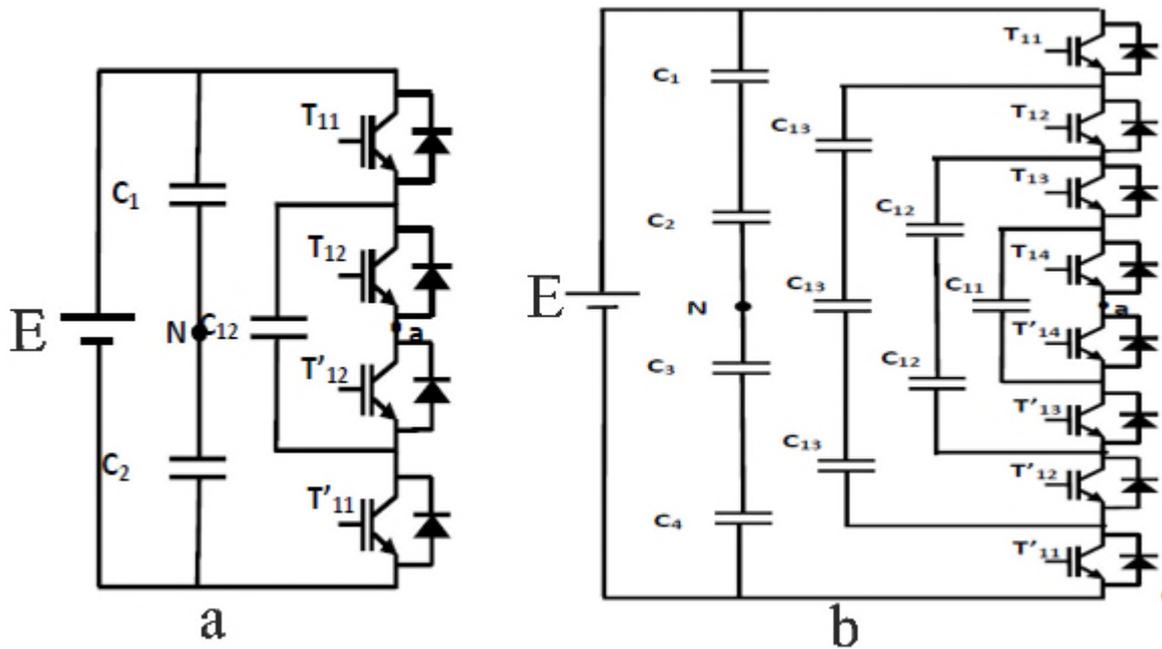


Figure I.5: Bras d'un convertisseur multicellulaire à :

- a) trois niveaux.
- b) cinq niveaux

### I.2.3.1.2 Avantages et inconvénients :

Cette topologie présente plusieurs avantages, notamment :

- La tension de blocage des interrupteurs est partout la même.
- Puisqu'elle est modulaire l'existence pour un nombre de niveaux élevé est facile.
- Les condensateurs n'étant jamais mis en série entre niveaux différents, le problème du déséquilibre de leur tension n'existe plus.

La contrainte de cette topologie est la nécessité d'un grand nombre de condensateur, notamment pour une configuration triphasée ce qui augmente le volume de l'onduleur [6].

### I.2.3.2 les convertisseurs en cascade (symétrique) «*cascade multilevel inverter*»:

#### I.2.3.2.1 Pont en H (H-bridge):

Le premier modèle d'onduleur était l'onduleur en pont en H (en anglais H-bridge), apparu en 1975. Un progrès des onduleurs multiniveaux a été dû au modèle en pont en H cascadié en série. La première application d'onduleur en pont en H était pour la stabilisation des plasmas en 1988. Les sorties des onduleurs en pont sont connectées en série de telle sorte que l'onde de la tension synthétisée soit la somme des tensions de sortie. L'avantage majeur de cette

approche est que le nombre de paliers sur le motif de la tension de sortie peut être augmenté sans aucun ajout de nouveaux composants. L'utilisation de cellules de conversion de puissance en série permet d'accroître le nombre de niveau de tension et de puissance du convertisseur. Mais l'inconvénient majeur de cette topologie est le grand nombre de tensions continues isolées exigées pour chaque pont [7].

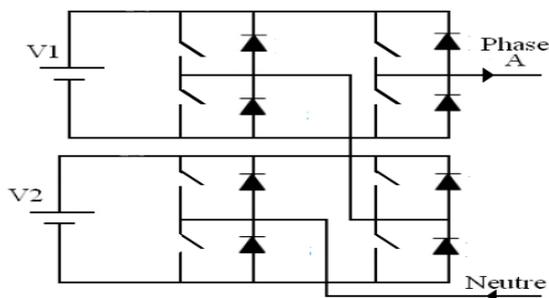


Figure I.6 : pont en H (H-bridge).

Les auteurs R.H Bakker et L.H Bannister ont proposé un convertisseur multiniveaux en cascade qui consistait en la mise en série de plusieurs ponts à deux niveaux monophasés; ces ponts étant connectés à des sources de tension continues séparées. La figure I.7 montre le schéma de base d'un convertisseur à N niveaux en cascade formée par l'association en série de m ponts à m-1 niveaux. La tension en sortie d'une telle structure est donnée par la somme des tensions en sortie de ces ponts [7].

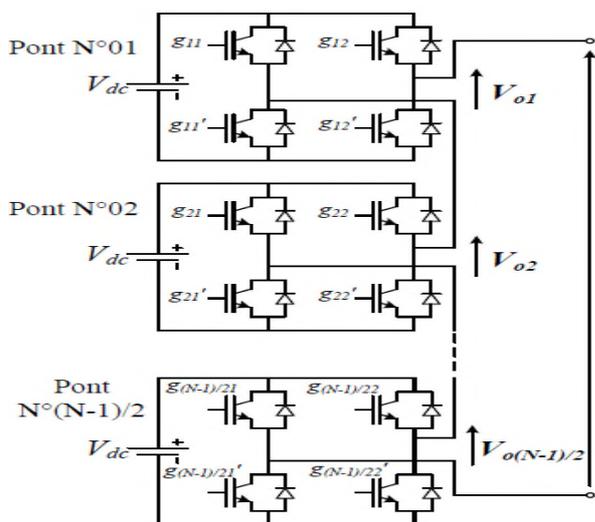


Figure I.7 : Bras d'un onduleur en cascade à N niveaux.

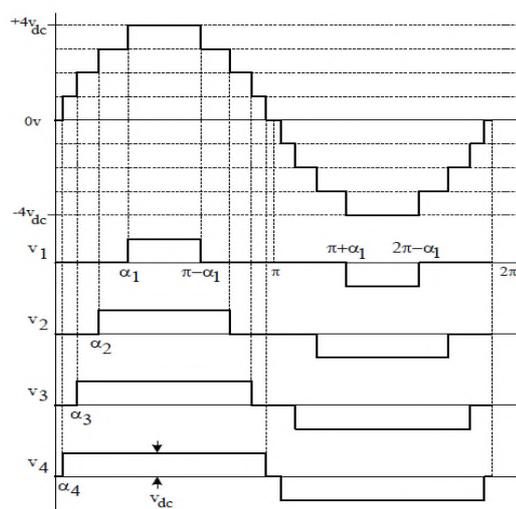


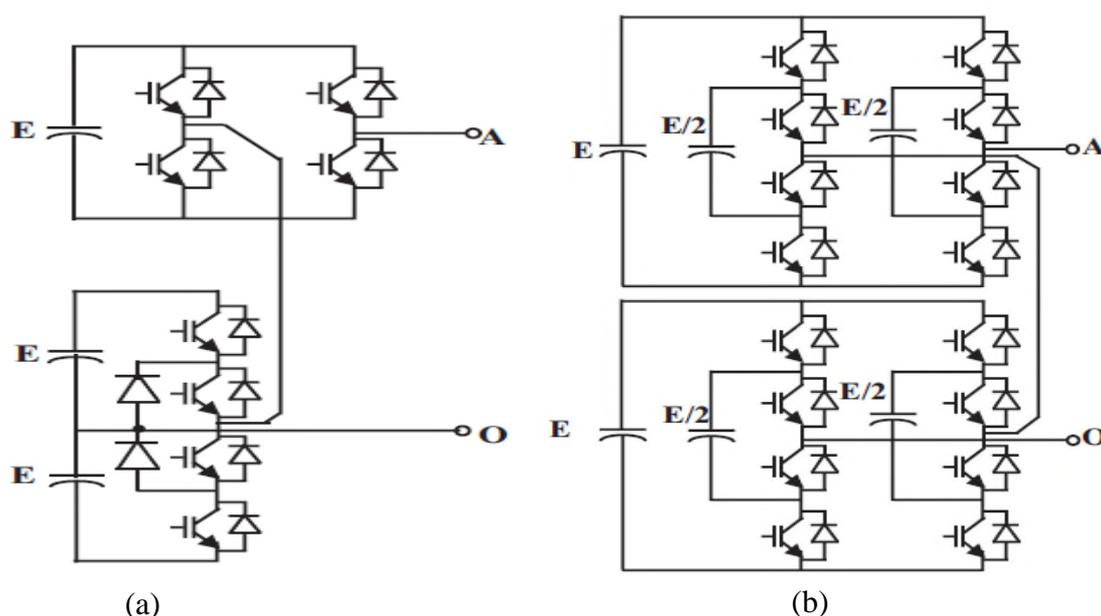
Figure I.8 : forme d'onde de signal de sortie d'un onduleur en cascade à neuf niveaux.

### I.2.3.3 Onduleurs multiniveaux asymétriques :

Ce type de structure est aussi appelé à juste titre « *onduleur hybride* ». Dans cette topologie dérivée de la précédente, le principe de mise en série de cellules de conversion est généralisé.

Par degré d'hybridation croissant, on distingue trois types d'associations :

- la mise en série de pont en H alimentés avec des tensions de différentes Valeurs.
- la mise en série d'onduleurs de topologies différentes (par exemple un onduleur NPC triphasé combiné avec des ponts en H monophasés.
- la mise en série de cellules de conversion de topologie et de nature différentes (par exemple pont en H et amplificateur linéaire) [8].



**Figure I.9 :** Exemple de topologies hybrides : a)-Mise en série d'un NPC et d'un pont en H.  
b)-Mise en série de deux convertisseurs à cellules imbriquées.

### I.2.4 les convertisseurs multiniveaux a structure NPC :

#### I.2.4.1 Onduleurs à 3 niveaux :

L'onduleur triphasé à trois niveaux à structure NPC (Neutral Point Clamping) Présenté dans la figure I.10, se compose de trois bras symétriques constitués chacun de quatre interrupteurs en série, plus deux diodes permettant l'obtention du zéro de la tension  $U_c$ . Chaque interrupteur est composé d'un interrupteur commandable "transistors, GTO, IGBT, ..." et d'une diode montée en tête bêche.

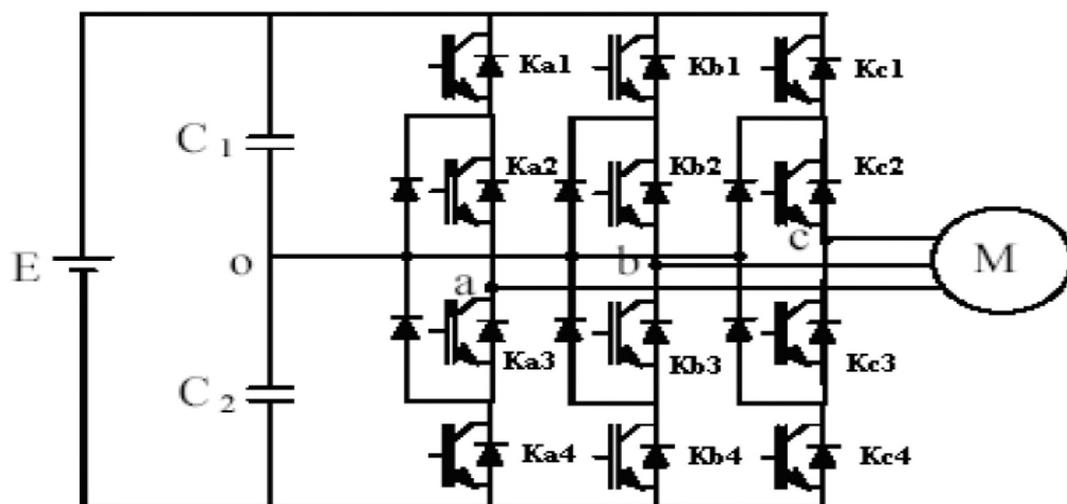


Figure I.10: Schéma d'un onduleur triphasé à trois niveaux à structure NPC.

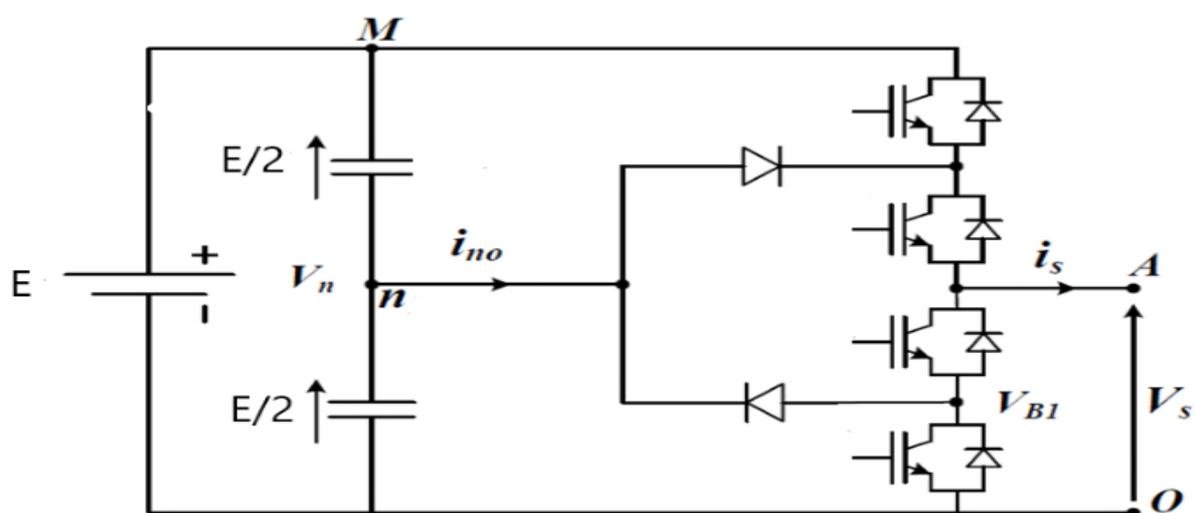


Figure I.11: Bras d'un onduleur NPC à trois niveaux [6].

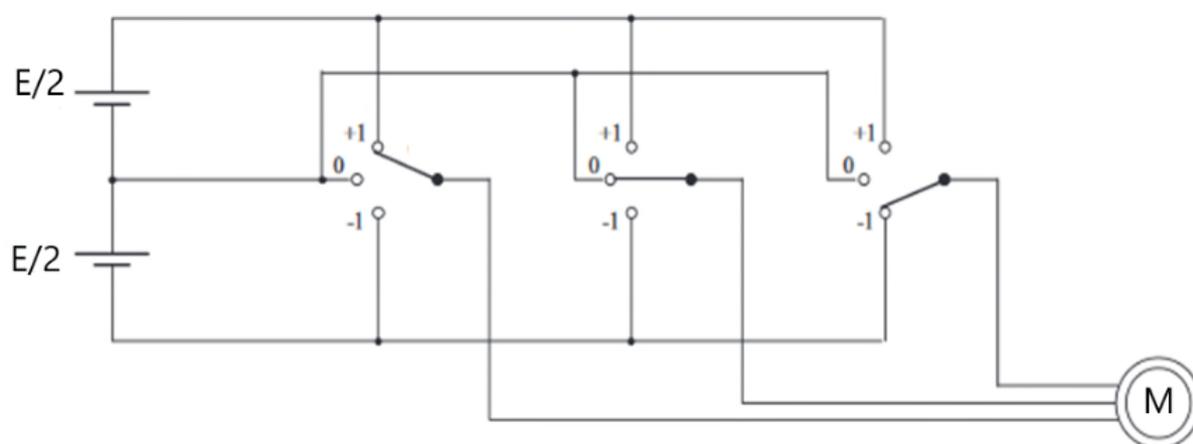


Figure I.12 : Schéma fonctionnel de l'onduleur à trois niveaux

### I.2.4.1.1 Commande complémentaire :

Un convertisseur statique est dit en mode commandable, si les transistors entre différentes Configurations dépendent uniquement de la commande externe et non plus des commandes internes [9].

Pour éviter le court-circuit des sources de tension par conduction de plusieurs interrupteurs, et pour que le convertisseur soit totalement commandable, nous adoptons une commande complémentaire [3].

Pour un bras K de l'onduleur triphasé à trois niveaux, et en mode commandable, on définit les trois commandes complémentaires comme suit :

$$\text{A. Commande N°1 : } \begin{cases} B_{K1} = \bar{B}_{K2} ; \\ B_{K3} = \bar{B}_{K4} ; \end{cases}$$

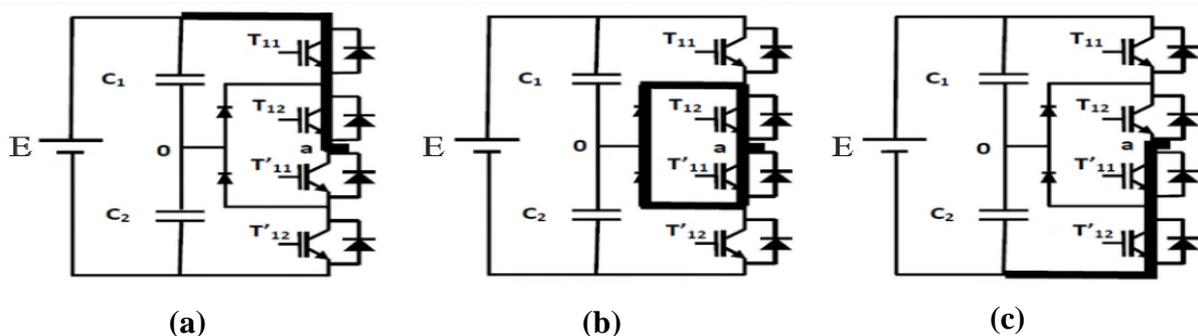
$$\text{B. Commande N°2 : } \begin{cases} B_{K1} = \bar{B}_{K3} ; \\ B_{K2} = \bar{B}_{K4} ; \end{cases}$$

$$\text{C. Commande N°3 : } \begin{cases} B_{K1} = \bar{B}_{K4} ; \\ B_{K2} = \bar{B}_{K3} ; \end{cases}$$

La commande N°3 est la seule qui permet d'exploiter les trois niveaux de tension de sortie possible pour un bras ( $U_{C1}$ , 0,  $-U_{C2}$ ), avec  $U_{C1} = U_{C2} = E/2$ .

C'est cette commande qui va être adopté pour la modélisation de l'onduleur à trois niveaux [3]. Dans le cas d'une utilisation de cette structure en onduleur, les niveaux de tensions en sortie réalisables sont au nombre de 3 :  $-E/2$ , 0 et  $E/2$ .

Les possibilités pour réaliser les différents niveaux sont résumées dans le Tableau I-1.



**Figure I.13:** Séquences de fonctionnement d'un bras d'onduleur NPC à trois niveaux.

K1	K2	K3	K4	Vao
1	1	0	0	$E/2$
0	1	1	0	0
0	0	1	1	$-E/2$
1	0	0	1	indéfini

**Tableau I.1 :** Réalisation des différents niveaux pour l'onduleur NPC 3N.

Tel que : K1, K2, K3, K4 représentent l'ensemble transistors-diodes.

Les interrupteurs K1 et K3 (respectivement K2 et K4) sont commandés de manière complémentaire. Tous les interrupteurs ne sont pas actifs pendant la totalité de la période de modulation : 2 interrupteurs sur 4 sont dans un état bloqué :

- Si la modulante est positive, alors l'interrupteur K2 est toujours passant et K4 bloqué.
- Si K1 est amorcé alors l'interrupteur K3 doit être bloqué, la tension en sortie est alors  $E/2$ . Au contraire si K1 est à l'état OFF et K3 est ON, la tension de sortie est égale à 0V.
- De même si le signal modulant est négatif, les interrupteurs figés sont K1 à l'état bloqué et K3 à l'état passant. Si K2 est amorcé et K4 bloqué alors la tension de sortie est fixée 0V et si K2 est à l'état OFF et K4 est ON, la tension de sortie est égale à  $-E/2$ .
- La commande complémentaire de l'état intermédiaire conduit à lier la sortie  $V_s$  au niveau  $M$  pour un courant rentrant et au niveau  $O$  pour un courant sortant. Cet état est donc indéfini et par conséquent interdit dans le fonctionnement normal de l'onduleur [5].

**I.2.4.3.2 Avantages et inconvénients :**

Les topologies NPC présentent plusieurs avantages dont quelques-uns sont énumérés ci-dessous:

- Amélioration de la forme d'onde de la tension de sortie. Ainsi, le contenu harmonique de la forme d'onde de sortie sera plus faible.
- Réduction de la contrainte de tension sur les interrupteurs (ceci est proportionnel au nombre de niveaux) et donc adapté pour les applications haute tension.
- Toutes les phases partagent le même bus continu.
- La méthode de contrôle est relativement simple.
- N'utilise pas des transformateurs [6].

Par contre les inconvénients de cette structure est :

- Déséquilibre de la tension des condensateurs. Dans certaines conditions de fonctionnement, la tension du point milieu capacitif peut avoir des variations très importantes. Afin d'assurer le bon fonctionnement, il faut prévoir une stratégie de commande pour assurer la stabilité de cette tension. Ce problème devient plus complexe lorsque le nombre de niveaux est plus important.
- L'exigence des diodes à fréquence de commutations élevée et qui doivent supporter le courant maximal circulant dans le circuit.
- L'inégalité des tensions inverses supportées par les diodes [6].

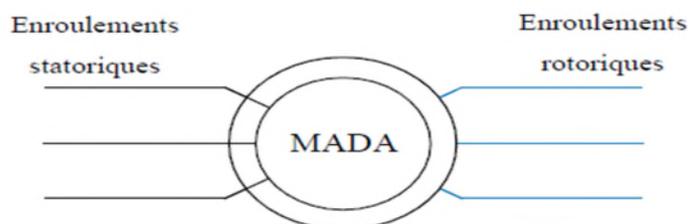
**I.2.3.5 Domaines d'application des convertisseurs multi-niveaux :**

- ❖ Démarrage de machine d'une grande puissance.
- ❖ Système de lavage.
- ❖ Réglage de la vitesse par la tension de sortie de l'onduleur.
- ❖ Réglage de la vitesse par la variation de la fréquence de l'onduleur.
- ❖ Application dans le domaine de la traction ferroviaire et urbaine (TGV France).
- ❖ Application dans l'alimentation des réseaux de bord et de propulsion des bâtiments maritimes.
- ❖ Application dans le domaine de réseaux électrique.
- ❖ Application dans le domaine de l'énergie renouvelable (photovoltaïque, éolienne...etc.).

### I.3 Généralités sur la MADA:

#### I.3.1 Description de la MADA

La machine asynchrone à double alimentation, est une machine asynchrone à rotor bobiné, avec deux enroulements triphasés accessibles, dans lesquels la puissance peut être fournie ou extraite.

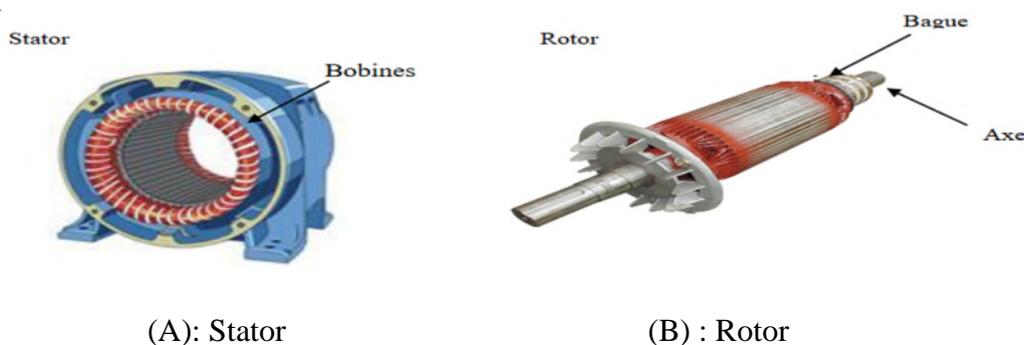


**Figure I.14 :** Symbole d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation.

La machine asynchrone à double alimentation se compose principalement de deux parties. Le stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classique (A), et le rotor (B) tourne à l'intérieur de la cavité de la machine et est séparé du stator par un entrefer. En principe les circuits électriques du stator sont constitués de trois enroulements identiques couplés en étoile (ou en triangle) à la seule différence est que celui du rotor est relié aux bagues sur lesquelles glissent des balais. Cette machine peut fonctionner comme générateur ou moteur. On distingue deux configurations de l'association MADA/convertisseur de puissance :

- MADA avec un convertisseur associé au rotor.
- MADA avec deux convertisseurs, l'un associé au rotor et l'autre au stator.

Ce type de machine nécessite une seule source d'alimentation alternative qui peut alimenter les deux côtés de la machine [10] [11].



**Figure I.15 :** représentation des structures (A) :du stator et (B) :du rotor bobiné de la MADA.

### I.3.2 Principe de fonctionnement de la MADA

Pour le fonctionnement de la machine en régime établi, il est nécessaire que les vecteurs magnétomotrices  $F_{mm}$  du stator et du rotor soient immobiles dans l'espace l'un par rapport à l'autre. Du moment que le vecteur résultant de la  $F_{mm}$  de l'enroulement statorique tourne dans l'espace à une vitesse angulaire  $\omega_s$ , et que le rotor tourne à la vitesse  $\omega_r$ ; par conséquent, pour satisfaire à cette condition, il faut que le vecteur  $F_{mm}$  de l'enroulement statorique tourne par rapport au rotor avec la vitesse.

$$\omega_s \cdot g = \omega_s - \omega_r = \omega_s - \omega_s(1 - g) \quad (\text{I.1})$$

Proportionnellement au glissement  $g$ , si la vitesse du moteur est inférieure à la vitesse de synchronisme, les sens de rotation sont identiques, dans le cas contraire, quand la vitesse est supérieure à celle du synchronisme les sens seront opposés.

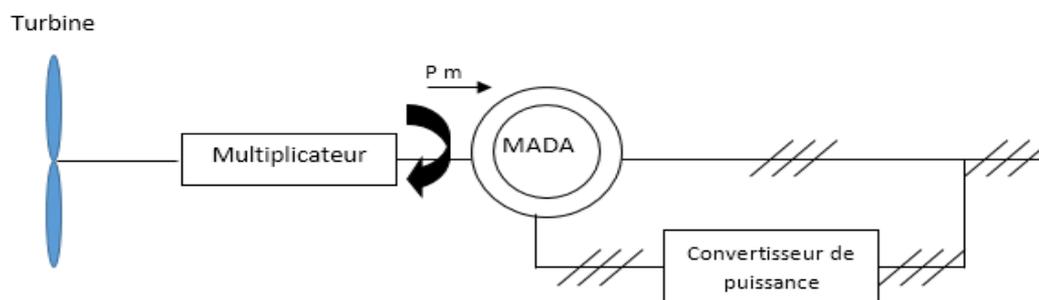
Pour que la rotation du vecteur  $F_{mm}$  par rapport au rotor se réalise, le courant dans l'enroulement doit avoir une fréquence  $f_r$ , définie à partir de  $\omega_s \cdot g = 2 \cdot \pi \cdot f_r$

$$f_r = f_s \cdot g \quad (\text{I.2})$$

Dans les machines synchrones dont l'excitation est assurée par une source continue, le courant dans l'enroulement possède une fréquence  $f_r = 0$ . À partir de (I.1) et (I.2), on voit qu'il n'y a qu'une seule vitesse synchrone  $\omega_s(g = 0)$  [10].

### I.3.3 Fonctionnement en alternateur :

Dans ce type de fonctionnement, le stator est relié au réseau et un convertisseur alimente le rotor comme nous le montre la figure (I.2.1). Cette solution permet de fournir une tension et une fréquence fixe même lors d'une fluctuation de la vitesse [10].



**Figure I.16 :** MADA utilisée en alternateur.

Pour les différentes configurations rencontrées pour application de la MADA en alternateur on trouve :

- Première configuration : énergie rotorique dissipée.

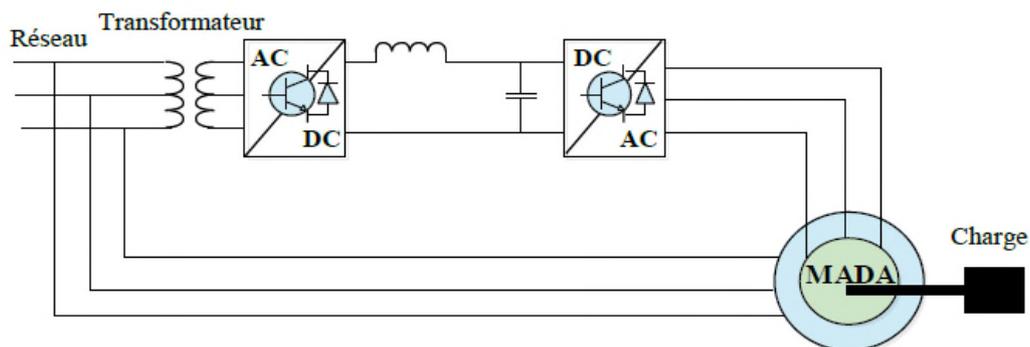
- Deuxième configuration : structure de Kramer.
- Troisième configuration : structure de Scherbius avec cycloconvertisseur [1].

### I.3.4 Fonctionnement en moteur :

Pour application moteur, on trouve la MADA utilisée dans les systèmes d'entraînement à vitesse variable, et grâce à ces nombreux avantages par rapport au moteur asynchrone ordinaire et moteur synchrone, surtout en ce qui concerne la gamme de la vitesse opérationnelle et la puissance d'entraînement. De plus elle a un comportement souple à la commande, Pour les différentes configurations rencontrées pour application moteur de la MADA, on trouve :

- **Stator alimenté par le réseau et le rotor relié à un convertisseur indirect.**

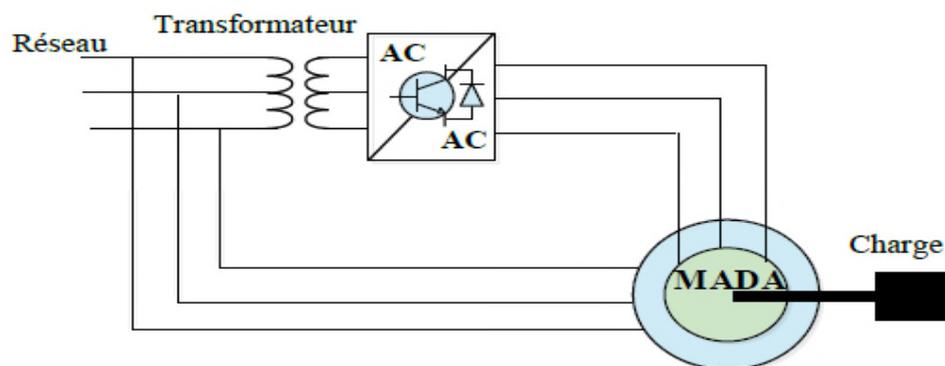
Cette classe est dite MADA simple. Le stator alimenté directement au réseau, tandis que le rotor est alimenté par un convertisseur AC/DC/AC, figure (I.21).



**Figure I.17** : MADA alimentée par le réseau de côté statorique et par un convertisseur AC/DC/AC de côté rotorique [1].

- **Stator alimenté par le réseau et le rotor relié à un convertisseur direct.**

A la place de convertisseur indirect on place un convertisseur direct de puissance ; comme le montre la figure I.18. Le convertisseur direct est un convertisseur qui permet d'obtenir à partir d'une source de tension alternative à fréquence et amplitude fixe, une tension de sortie alternative à amplitude et fréquence variable. Il existe deux types des convertisseurs directe ; les cyclo-convertisseurs et les convertisseurs matriciels [1].



**Figure I.18 :** MADA alimentée par le réseau de côté statorique et par un convertisseur matriciel [1].

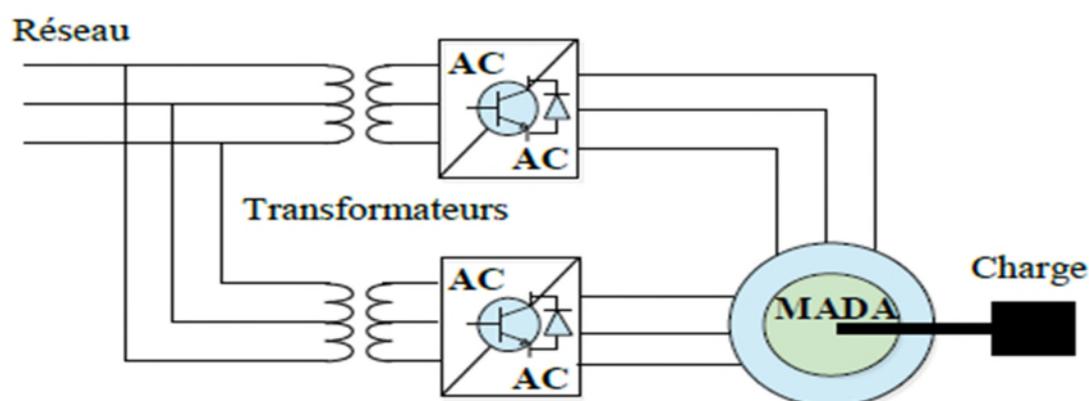
- **MADA alimentée par deux convertisseurs indépendants :**

Ce type de fonctionnement est dit synchro-duo, ces deux convertisseurs seront toutefois identiques mais peuvent être de puissances différentes. L'originalité de ce principe est aussi d'optimiser la charge conférer aux deux convertisseurs, dans ce cas le rapport de transformation de la machine sera de 1 et la machine sera alimentée de façon symétrique par son stator et son rotor : mêmes valeurs de tension, de courant et de fréquence.

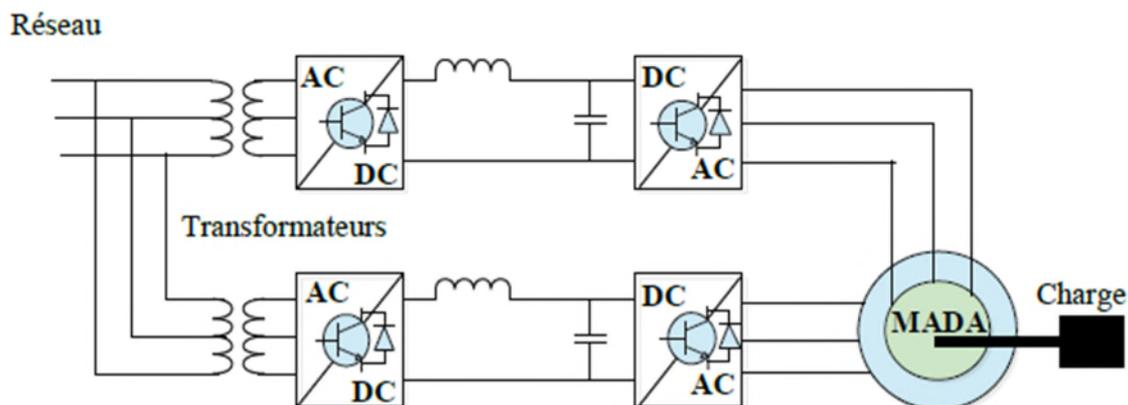
Cette solution permet une variation de la vitesse, elle permet en outre un fonctionnement à couple constant et un fonctionnement à puissance constante.

Pour ce type de configuration, la MADA peut être alimentée par :

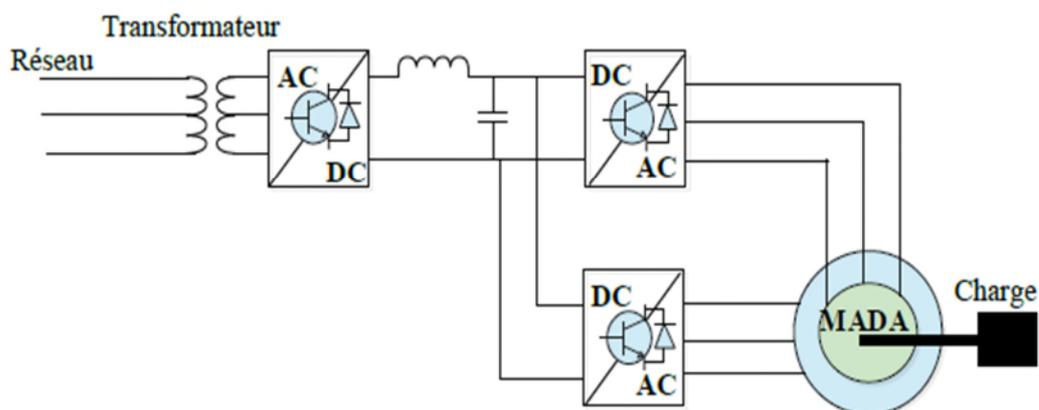
- Deux convertisseurs matriciels comme le montre la figure (I.19).
  - Deux onduleurs alimentés par leurs propres redresseurs conformément à la figure (I.20).
  - Deux onduleurs alimentés par un redresseur commun comme le montre la figure (I.21)
- [1].



**Figure I.19:** MADA alimentée par deux convertisseurs matriciels [1].



**Figure I.20:** MADA alimentée par deux convertisseurs AC/DC/AC [1].



**Figure I.21:** MADA alimentée par deux onduleurs alimentés par un redresseur commun [1].

### I.3.5 Régime de fonctionnement de la MADA

Dans le moteur à double alimentation, l'enroulement rotorique est couplé à une source de tension de fréquence variable. En fonction du type de régulation de fréquence, on distingue deux régimes de fonctionnement : synchrone et asynchrone [10].

#### I.3.5.1 Régime de fonctionnement synchrone

Dans ce régime de fonctionnement la fréquence du glissement est donnée indépendamment de la vitesse angulaire. Alors à chaque signal de commande correspondant une fréquence déterminée  $f_r$  et une vitesse de fonctionnement  $\omega_r$  qui ne dépend pas de la charge [10].

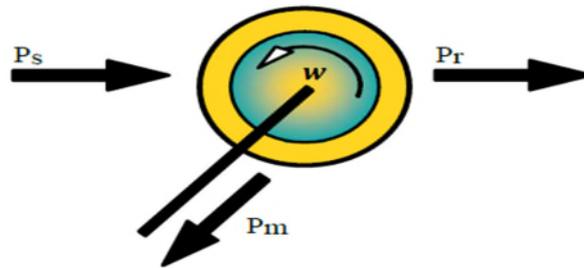
### I.3.5.2 Régime de fonctionnement asynchrone

La fréquence  $f_r$  de la tension du réseau appliquée à l'enroulement rotorique de la machine à travers le système de régulation est toujours constante et égale à la fréquence du glissement  $f_s .g$ . Pour cela, on ne régule que la valeur et la phase de la tension du réseau [10].

### I.3.6 Fonctionnement dans les quatre quadrants

#### I.3.6.1. Fonctionnement en moteur hypo synchrone

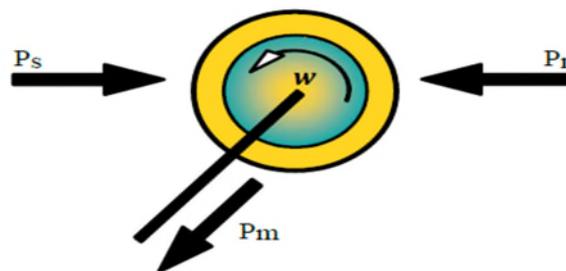
La puissance du stator est constante et la puissance du glissement transite par le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement moteur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone a cage classique peut fonctionner ainsi mais la puissance de glissement est alors dissipée en pertes joules dans le rotor. Ici la fréquence de glissement dans le rotor crée un champ tournant dans le même sens que celui du stator et la vitesse du rotor [10]. La figure ci-dessous représente le fonctionnement moteur hypo synchrone.



**Figure I.22 :** Fonctionnement d'une MADA en moteur hypo synchrone.

#### I.3.6.2 Fonctionnement en moteur hyper synchrone

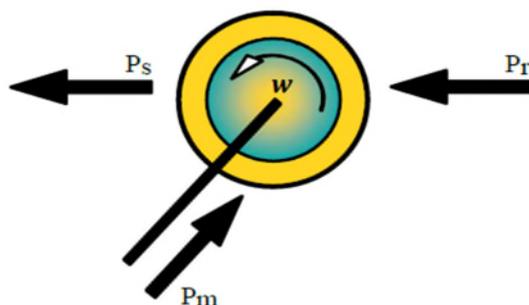
Le glissement devient négatif lorsqu'on augmente la vitesse, la puissance est fournie par le réseau au stator et également fournie par le réseau au rotor. Pour qu'en puisse réaliser ce mode, on inverse l'ordre de phase de sorte que le champ tournant induit par la fréquence du glissement soit en opposition de phase avec celui du stator [10]. La figure ci-dessous représente le fonctionnement moteur hyper synchrone.



**Figure I.23 :** Fonctionnement d'une MADA en moteur hyper synchrone.

### I.3.6.3 Fonctionnement en génératrice hypo synchrone

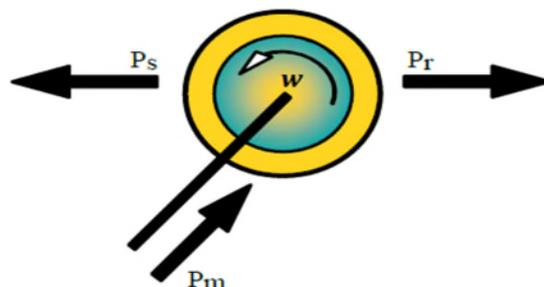
Lors d'un freinage, le rotor reste entraîné par la charge et l'énergie mécanique est convertie en énergie électrique. Le stator fournira de l'énergie électrique au réseau dans la gamme hypo synchrone de vitesse, le rotor absorbe la puissance du glissement et la direction du champ magnétique est identique à celle du champ du stator. On a donc un fonctionnement générateur en dessous de la vitesse de synchronisme [10].



**Figure I.24 :** Fonctionnement d'une MADA en génératrice hypo synchrone.

### I.3.6.4 Fonctionnement en génératrice hyper synchrone

La puissance est fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être injectée au réseau. On a donc un fonctionnement générateur au-dessus de la vitesse de synchronisme [10].



**Figure I.25 :** Fonctionnement d'une MADA en génératrice hyper synchrone.

### I.3.7 Domaines d'applications

La MADA peut être utilisée dans des applications spécifiques, comme dans les systèmes de génération de l'énergie électrique à partir des puissances éoliennes et hydraulique, ainsi que dans les applications aérospatiales, l'entraînement des ventilateurs et des pompes d'eau, en tant que moteur pour certaines applications industrielles comme le laminage, la traction ferroviaire ou encore la propulsion maritime [1].

### **I.3.8 Avantages et inconvénients de la MADA**

Après l'étude faite sur la MADA nous pouvons tirer les principaux avantages et inconvénients de celle-ci.

#### **I.3.8.1 Avantages**

- L'accessibilité au rotor et au stator rend la mesure des courants possible, ce qui offre une grande flexibilité et précision au contrôle de flux et de couple électromagnétique.
- Elle offre plusieurs possibilités de reconfiguration ce qui permet un large domaine d'application
- Fonctionnement possible à couple constant au-delà de la vitesse de nominale ;
- Elle présente un couple massique légèrement plus élevé que les autres machines de même puissance [11].

#### **I.3.8.2 Inconvénients**

- Machine plus volumineuse et plus longue à cause de système balais-bagues ;
- Elle est moins robuste que la machine à cage à cause de la présence de système balais-bagues et le bobinage du rotor ;
- Elle nécessite une maintenance périodique, ce qui va augmenter le coût [11].

### **I.4 Conclusion**

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté des généralités sur les convertisseurs multiniveaux ainsi que la machine à double alimentation.

Dans la première partie, des différentes topologies des convertisseurs multiniveaux ont été illustré ainsi leurs domaines d'application et leurs avantages et inconvénients. La commande complémentaire des interrupteurs qui constitue les onduleurs de type NPC à trois niveaux permet d'avoir les trois niveaux de tension. Enfin nous constatons que les convertisseurs multiniveaux sont mieux adaptés aux applications de forte puissance.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous avons effectué une présentation des différentes configurations de la machine asynchrone à double alimentation et les différents types de convertisseur de puissance associé à cette dernière.

D'après cette étude, nous constatons que la machine à double alimentation offre des avantages remarquables, ce qui permet à cette dernière de trouver un domaine d'application très vaste, notamment dans les systèmes de génération de l'énergie électrique.

# Chapitre II

- Modélisation de la MADA et de l'onduleur à trois niveaux.

## **II.1 Introduction**

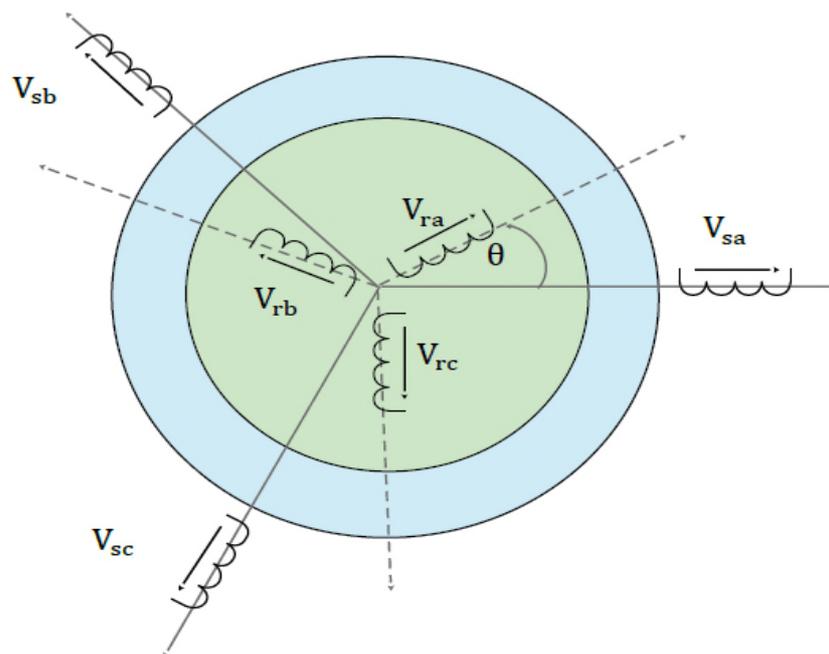
La modélisation d'une machine asynchrone était basée sur l'élaboration de schémas équivalents dérivés de la théorie du champ tournant. La simplicité de conception et d'entretien de cette machine à la faveur des industries, s'accompagne toutefois d'une grande complexité physique, liée aux interactions électromagnétiques entre le stator et le rotor. Les méthodes matricielles sont développées et sont devenues les bases pour une approche de modélisation, de simulation, d'identification et de commande.

Les techniques d'alimentations de la MADA sont devenues un axe de recherche dans ces dernières années dans le but d'améliorer les performances. L'utilisation des onduleurs à trois niveaux montre des avantages remarquables.

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser à la modélisation et la simulation de la machine asynchrone à double alimentation ainsi qu'à la modélisation, la commande de l'onduleur à trois niveaux.

## **II.2 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation**

Une machine asynchrone à double alimentation est une machine à courant alternatif, elle se compose comme une machine asynchrone d'un primaire dit stator qui est fixe, et d'un secondaire qui est le rotor qui est mobile.



**Figure II.1** Représentation schématique de la MADA.

Le stator a trois (03) enroulements couplés en étoile ou en triangle qui sont alimentés par un système triphasé de tension. Il en résulte la création d'un champ magnétique glissant dans l'entrefer de la machine, où sa vitesse est  $\Omega_s = \frac{\omega_s}{P}$ , où  $\omega_s$  désigne la pulsation du réseau d'alimentation triphasé, et P est le nombre de pair de pôles du champ magnétique qui apparaît au niveau du stator.

Le rotor qui est exécuté comme le stator, supporte un bobinage triphasé avec un même nombre de pôle, couplé en étoile. Le rotor tourne à la vitesse  $\Omega_r = \frac{d\theta}{dt}$  par rapport au stator, avec  $\theta$  est l'angle entre le repère statorique et le repère rotorique. La représentation schématique de la machine asynchrone à double alimentation est montrée sur la figure II.1 [12].

### **II.2.1 Hypothèses simplificatrices :**

Pour notre étude, nous considérons les hypothèses simplificatrices suivantes :

- Le circuit magnétique n'est pas saturé, ce qui permet d'exprimer les flux comme fonctions linéaires des courants ;
- Les pertes (par hystérésis et courant de Foucault) sont négligées ;
- Les forces magnétomotrices créées par chacune des phases des deux armatures sont à répartition sinusoïdales d'où résulte du fait que l'entrefer est constant, et que les inductances mutuelles entre deux enroulements varient sinusoïdalement en fonction de l'angle entre leurs axes magnétiques;
- Les résistances ne varient pas avec la température et l'effet de peau négligé.

De ce fait, tous les coefficients d'inductance propre sont constants et les coefficients d'inductance mutuelle ne dépendent que de la position des enroulements.

### **II.3 Modèle de la MADA :**

#### **II.3.1 Equations électriques de la MADA :**

La loi de Faraday et la loi d'Ohm permettent de relier les tensions sur les enroulements aux flux totalisés et aux courants dans ces bobinages. Avec les conventions utilisées, les deux équations matricielles suivantes expriment les tensions sur les différents enroulements

$$\begin{cases} [v_s] = [R_s][i_s] + \frac{d}{dt}[\Phi_s] \\ [v_r] = [R_r][i_r] + \frac{d}{dt}[\Phi_r] \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

Les flux sont donnés par:

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \\ \Phi_{dr} = L_s i_{dr} + M i_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_s i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

D'où on peut tirer les expressions des courants suivantes :

$$\begin{cases} i_{ds} = \frac{\Phi_{ds}}{L_s} - \frac{M}{L_s} i_{dr} \\ i_{qs} = \frac{\Phi_{qs}}{L_s} - \frac{M}{L_s} i_{qr} \\ i_{dr} = \frac{\Phi_{dr}}{L_s} - \frac{M}{L_s} i_{ds} \\ i_{qr} = \frac{\Phi_{qr}}{L_s} - \frac{M}{L_s} i_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

En appliquant la transformée de Laplace, et en remplaçant (II.2) dans (II.1), on obtient:

$$\begin{cases} [v_s] = [R_s][i_s] + P([L_{ss}][i_s] + [M_{sr}][i_r]) \\ [v_r] = [R_r][i_r] + P([L_{rr}][i_r] + [M_{sr}][i_s]) \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

Avec:

$$\begin{aligned} [v_s] &= \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix}; [i_s] = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix}; [\Phi_s] = \begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \end{bmatrix} \\ [v_r] &= \begin{bmatrix} v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix}; [i_r] = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix}; [\Phi_r] = \begin{bmatrix} \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \\ \Phi_{cr} \end{bmatrix} \\ [R_s] &= \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}; [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \\ [L_{ss}] &= \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix}; [L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \\ [M_{sr}] &= M \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

### II.3.2 Equations mécaniques de la MADA

La loi fondamentale de la dynamique permet d'écrire l'équation mécanique de la machine comme suit :

$$J \frac{d}{dt} \Omega = C_e - C_r - K_f \Omega \quad (\text{II.5})$$

La résolution analytique dans le repère (abc) est très difficile car le système d'équations est à coefficients variables en fonction de  $\theta$  (angle de rotation de la machine), ce problème se simplifie en adaptant une transformation qui permet le passage d'un système triphasé à un système biphase.

### II.4 Transformation de Park

La transformation de Park est un outil mathématique qui a permis la simplification des équations des machines électriques triphasées. Elle permet de passer d'un système triphasé alternatif à un système diphasé (repère d, q, o) continu, donc elle permet d'obtenir un système d'équation à coefficients constants ce qui simplifie sa résolution.

Les grandeurs statoriques et rotoriques seront alors exprimées dans un même repère (axe direct d et axe en quadrature q).

La transformation de Park définie par la matrice de rotation  $[P(\theta)]$  est donnée sous la forme suivante :

$$[x_{dqo}] = [P(\theta)] [x_{abc}] \quad (\text{II.6})$$

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

$$[P(\theta)]^{-1} = [P(\theta)]^T \quad (\text{II.8})$$

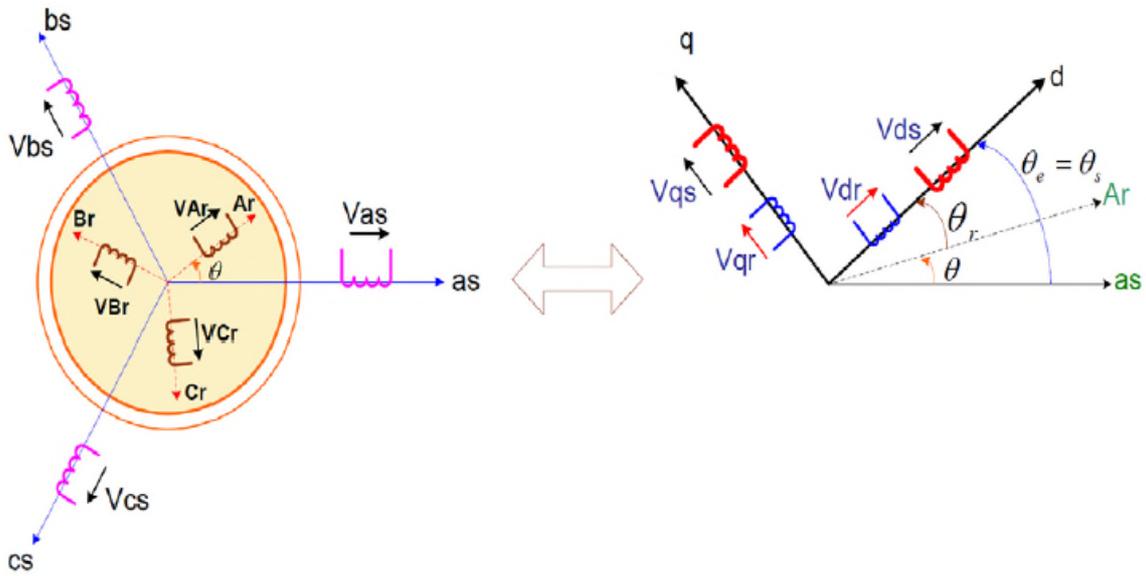


Figure II.2: Passage du triphasé au biphasé

### II.5 Application de la transformation de Park à la MADA

En appliquant la transformée de Park pour chaque vecteur défini précédemment (tension, courant, flux), en remplaçant dans la matrice de Park  $\theta$  par  $\theta_s$  pour les équations du stator et  $\theta$  par  $\theta_r$  pour celles du rotor, on obtient :

✚ Pour le stator :

$$[i_{dqo}]_s = [P(\theta)_s][i_s]; [i_s] = [P(\theta)_s]^{-1}[i_{dqo}]_s \quad (\text{II.9})$$

$$[v_{dqo}]_s = [P(\theta)_s][v_s]; [v_s] = [P(\theta)_s]^{-1}[v_{dqo}]_s \quad (\text{II.10})$$

$$[\Phi_{dqo}]_s = [P(\theta)_s][\Phi_s]; [\Phi_s] = [P(\theta)_s]^{-1}[\Phi_{dqo}]_s \quad (\text{II.11})$$

✚ Pour le rotor :

$$[i_{dqo}]_r = [P(\theta)_r][i_r]; [i_r] = [P(\theta)_r]^{-1}[i_{dqo}]_r \quad (\text{II.12})$$

$$[v_{dqo}]_r = [P(\theta)_r][v_r]; [v_r] = [P(\theta)_r]^{-1}[v_{dqo}]_r \quad (\text{II.13})$$

$$[\Phi_{dqo}]_r = [P(\theta)]_r [\Phi_r] ; [\Phi_r] = [P(\theta)]_r^{-1} [\Phi_{dqo}]_r \quad (\text{II.14})$$

Avec :

$$[i_{dqo}]_s = [i_{ds} \ i_{qs} \ i_{os}]^T ; [i_{dqo}]_r = [i_{dr} \ i_{qr} \ i_{or}]^T \quad (\text{II.15})$$

$$[v_{dqo}]_s = [v_{ds} \ v_{qs} \ v_{os}]^T ; [v_{dqo}]_r = [v_{dr} \ i_{qr} \ i_{or}]^T \quad (\text{II.16})$$

$$[\Phi_{dqo}]_s = [\Phi_{ds} \ \Phi_{qs} \ \Phi_{os}]^T ; [\Phi_{dqo}]_r = [\Phi_{dr} \ \Phi_{qr} \ \Phi_{or}]^T$$

### a) Equation des tensions

$$[v_s] = [R_s] [i_s] + \frac{d[\Phi_s]}{dt} \quad (\text{II.17})$$

En introduisant les équations (II.9), (II.10), et (II.11), on obtient :

$$[P(\theta)]_s^{-1} [v_{dqo}]_s = [R_s] [P(\theta)]_s^{-1} [i_{dqo}]_s + \frac{d}{dt} ([P(\theta)]_s^{-1} [\Phi_{dqo}]_s) \quad (\text{II.18})$$

D'où:

$$[v_{dqo}]_s = [R_s] [i_{dqo}]_s + [P(\theta)]_s \frac{d}{dt} ([P(\theta)]_s^{-1} [\Phi_{dqo}]_s) + [P(\theta)]_s \frac{d}{dt} ([P(\theta)]_s^{-1} [\Phi_{dqo}]_s) \quad (\text{II.19})$$

Avec:

$$[P(\theta)]_s \frac{d}{dt} ([P(\theta)]_s^{-1}) = \left( \frac{d\theta_s}{dt} \right) \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.20})$$

On écrit:

$$\begin{cases} v_{ds} = [R_s][i_{ds}] + \frac{d}{dt}(\Phi_{ds}) - \omega_s \Phi_{qs} \\ v_{qs} = [R_s][i_{qs}] + \frac{d}{dt}(\Phi_{qs}) + \omega_s \Phi_{ds} \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

Par analogie, on obtient pour les grandeurs rotoriques les tensions suivantes:

$$\begin{cases} v_{dr} = [R_r][i_{dr}] + \frac{d}{dt}(\Phi_{dr}) - (\omega_s - \omega) \Phi_{qr} \\ v_{qr} = [R_r][i_{qr}] + \frac{d}{dt}(\Phi_{qr}) + (\omega_s - \omega) \Phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

Les deux systèmes d'équation (II.21) et (II.22) s'écrivent sous la forme matricielle comme suit:

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ v_{dr} \\ v_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + PL_s & -L_s \omega_s & PM & -\omega_s M \\ L_s \omega_s & R_s + PL_s & \omega_s M & PM \\ PM & -\omega_r M & R_r + PL_r & -L_r \omega_r \\ L_r \omega_r & PM & L_r \omega_r & R_r + PL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.23})$$

### b) Equation du couple électromagnétique

Après qu'on a effectué le changement de variable, l'expression du couple électromagnétique peut s'exprimer sous différentes formes, on trouve celles-ci:

$$C_{em} = P(\Phi_{ds}i_{qs} - \Phi_{qs}i_{ds}) \quad (II.24)$$

$$C_{em} = P(\Phi_{qr}i_{dr} - \Phi_{dr}i_{qr}) \quad (II.25)$$

$$C_{em} = PM(i_{qs}i_{dr} - i_{ds}i_{qr}) \quad (II.26)$$

$$C_{em} = P \frac{M}{L_r} (\Phi_{dr}i_{qs} - \Phi_{qr}i_{ds}) \quad (II.27)$$

### c) Equations des puissances actives et réactives :

$$\begin{cases} P_s = (v_{ds}i_{ds} + v_{qs}i_{qs}) \\ Q_s = (v_{qs}i_{ds} - v_{ds}i_{qs}) \end{cases} \quad (II.28)$$

$$\begin{cases} P_r = (v_{dr}i_{dr} + v_{qr}i_{qr}) \\ Q_r = (v_{qr}i_{dr} - v_{dr}i_{qr}) \end{cases} \quad (II.29)$$

## II.6 Choix du référentiel :

Les équations de la machine asynchrone triphasée peuvent être exprimées dans différents référentiels, il existe trois systèmes d'axes de coordonnées, le choix d'un référentiel se fait selon le problème étudié.

### II.6.1 Référentiel lié au stator :

Il se traduit par les relations suivantes :  $\frac{d\theta_r}{dt} = -\omega$  ;  $\frac{d\theta_s}{dt} = 0$

On aura le système d'équation suivant :

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ v_{dr} \\ v_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + PL_s & 0 & PM & 0 \\ 0 & R_s + PL_s & 0 & PM \\ PM & -\omega M & R_r + PL_r & -L_r\omega \\ L_r\omega & PM & L_r\omega & R_r + PL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (II.27)$$

Ce référentiel est le mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées. Il est utilisé en vue d'étudier les variations importantes de la vitesse de rotation.

### II.6.2 Référentiel lié au rotor :

Dans ce référentiel, on aura :  $\frac{d\theta_s}{dt} = \omega$  ;  $\frac{d\theta_r}{dt} = 0$

Avec :  $\theta_s = \theta_r + \theta \implies \omega_s = \omega$

Le système d'équation devient :

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ v_{dr} \\ v_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + PL_s & -L_s\omega & PM & -\omega M \\ L_s\omega & R_s + PL_s & \omega M & PM \\ PM & 0 & R_r + PL_r & 0 \\ 0 & PM & 0 & R_r + PL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.28})$$

Ce référentiel est intéressant pour les problèmes des régimes transitoires où la vitesse de rotation est considérée comme constante.

### II.6.3 Référentiel lié au champ tournant :

Il se traduit par les relations suivantes :  $\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s$  ;  $\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - \omega = g\omega_s = \omega_r$ .

On aura le système d'équation suivant :

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ v_{dr} \\ v_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + PL_s & -L_s\omega_s & PM & -\omega_s M \\ L_s\omega_s & R_s + PL_s & \omega_s M & PM \\ PM & -\omega_r M & R_r + PL_r & -L_r\omega_r \\ L_r\omega_r & PM & L_r\omega_r & R_r + PL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.29})$$

Ce type de référentiel est recommandé généralement dans l'étude de l'alimentation des moteurs à fréquence variable (machines asynchrones) en particulier celles qui sont commandées par des convertisseurs de fréquence. Son modèle permet d'avoir des grandeurs constantes en régime permanent d'où la facilité de régulation.

## II.7 Simulation de la machine asynchrone à rotor court-circuité en boucle ouverte :

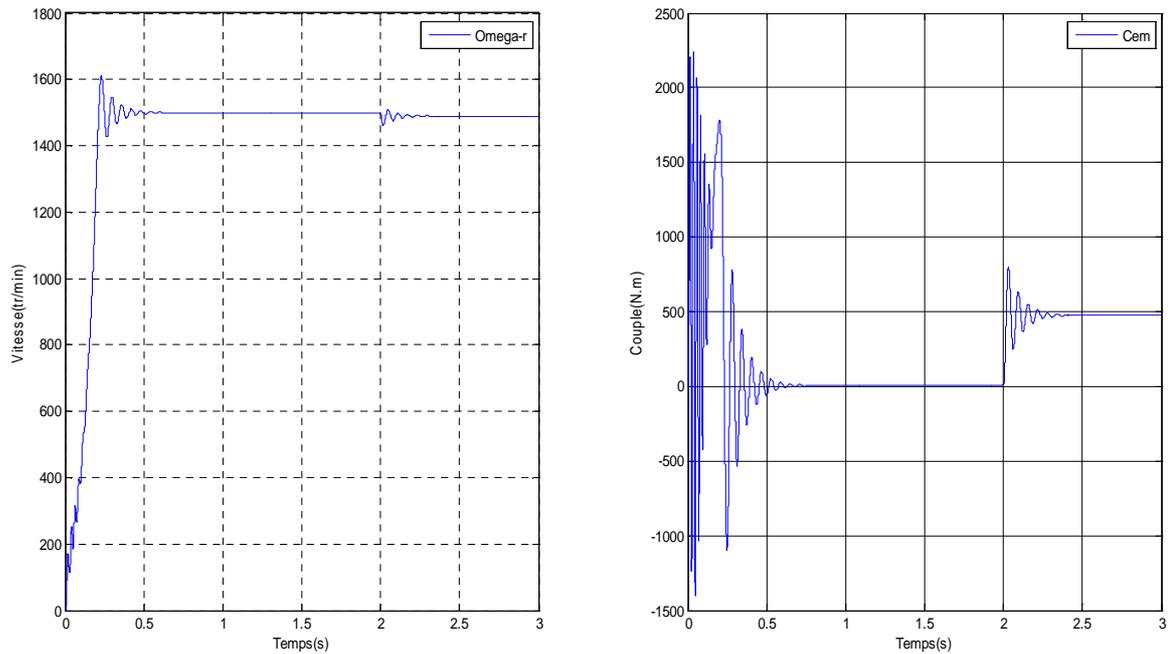
On réalise la simulation de la machine à l'aide de logiciel MATLAB/SIMULINK, un modèle lié au champ tournant été élaboré, les paramètres de la machine sont donnés au annexe.

### II.7.1 Résultats de simulation :

La simulation de la machine asynchrone à rotor court-circuité nous a permet de relever les caractéristiques suivantes :

#### a) Fonctionnement moteur :

On démarre la machine à vide, puis à  $t = 2$  s on impose un couple résistant égale au couple nominale (470 N.m). On démarre la simulation et on relève la caractéristique de couple et de la vitesse en fonction du temps.



**Figure II.3:** Allures de la vitesse de rotation et du couple électromagnétique.

❖ **Interprétations:**

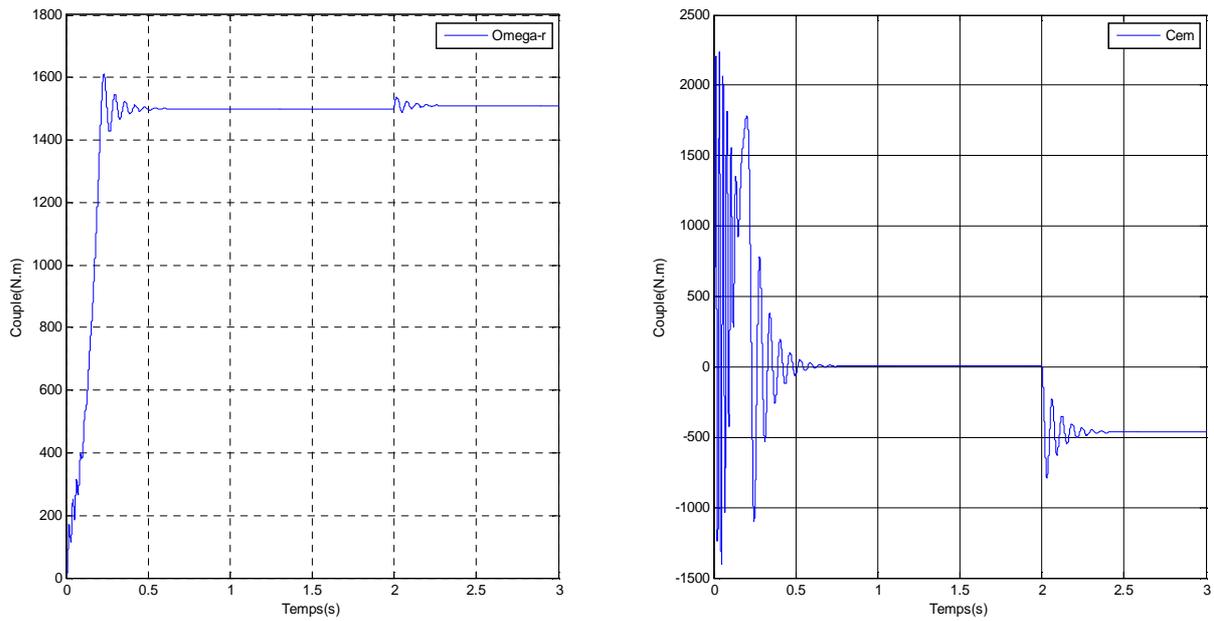
La machine étant alimentée par un réseau triphasé équilibré (400V, 50Hz).

On démarre la machine à vide, pendant le régime transitoire, le couple électromagnétique est fortement pulsatoire ce qui explique le bruit engendré par la partie mécanique. Après la disparition du régime transitoire, il tend vers la valeur correspondante à la charge nulle et la vitesse se stabilise autour de la vitesse de synchronisme (1500tr/min).

La machine subie un couple de charge de 470 N.m à  $t = 2$  s. On constate que la vitesse diminue et s'établit après 0.25 s à la valeur 1489 tr/min et le couple devient égal au couple résistant imposé.

**b) Fonctionnement générateur :**

On démarre la machine à vide, puis à l'instant  $t = 2$  s on applique un couple moteur égale au couple nominale. On démarre la simulation et on relève les caractéristiques de couple et de la vitesse en fonction du temps.



**Figure II.4:** Allures de la vitesse et du couple.

❖ **Interprétations :**

Nous remarquons d’après les résultats obtenus que la vitesse de rotation égale à la vitesse de synchronisme lorsque la machine fonctionne à vide, et supérieur à la vitesse de synchronisme (1510 tr/min) lorsqu’on applique un couple moteur.

Donc pour les deux valeurs du couple, on peut déduire que cette machine a deux modes de fonctionnement, fonctionnement moteur hypo-synchrone et fonctionnement générateur hyper-synchrone et que la variation de couple engendre la variation de la vitesse.

**II.8 Modélisation du l’onduleur à trois niveaux :**

La figure II.1 montre la structure d’un onduleur de tension triphasé à trois niveaux à structure NPC. On commence par définir la fonction de connexion  $F_{K1}$  de l’interrupteur. Elle vaut 1 si l’interrupteur est fermé et 0 dans le cas contraire. En mode commandable, les fonctions de connexion de l’onduleur sont liées par la relation (II.30).

$$\begin{cases} F_{K1} = 1 - F_{K4} \\ F_{K2} = 1 - F_{K3} \end{cases} \quad (II.30)$$

Avec,  $k = 1, 2$  ou  $3$ , représente le numéro du bras.

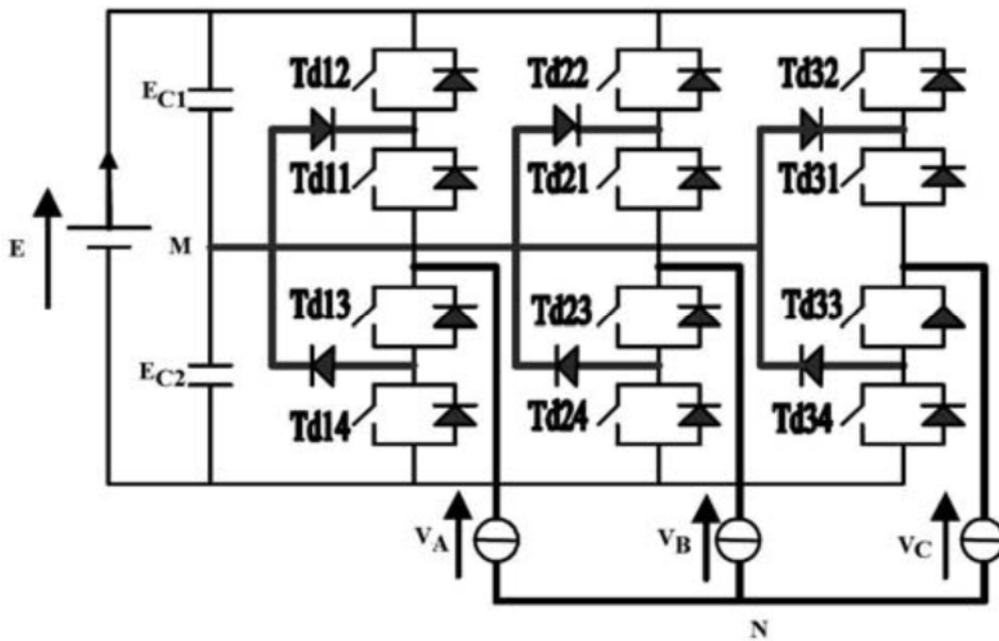


Figure II.5 Onduleur triphasé à trois niveaux NPC

### II.8.1 Fonctions de connexion :

La fonction de connexion  $F_{KS}$  traduit l'état ouvert ou fermé de l'interrupteur  $T_{DKS}$ .

Chaque interrupteur  $K_{KS}$  ( $K \in (1, 2, 3)$ ,  $S \in (1, 2, 3)$ ), supposé idéal introduit une fonction de connexion  $F_{KS}$ .

$$F_{KS} = \begin{cases} 1 & \text{si l'interrupteur } K_{KS} \text{ est fermé} \\ 0 & \text{si l'interrupteur } K_{KS} \text{ est ouvert} \end{cases} \quad (\text{II.31})$$

#### a) Relation entre les fonctions de connexion :

Ainsi les fonctions de connexion des interrupteurs du bras K sont liées par les relations suivantes :

$$\begin{cases} F_{K1} = 1 - F_{K4} \\ F_{K2} = 1 - F_{K3} \end{cases} \quad (\text{II.32})$$

#### b) Relation entre les fonctions des demi-bras :

On définit la fonction de connexion  $F_{Km}^b$  du demi-bras comme suit:

$$\begin{cases} F_{11}^b = F_{11} \times F_{12} \\ F_{10}^b = F_{13} \times F_{14} \end{cases} ; \begin{cases} F_{21}^b = F_{21} \times F_{22} \\ F_{20}^b = F_{23} \times F_{24} \end{cases} ; \begin{cases} F_{31}^b = F_{31} \times F_{32} \\ F_{30}^b = F_{33} \times F_{34} \end{cases} \quad (\text{II.33})$$

Les interrupteurs de chaque bras sont complémentaires deux à deux :

On désigne par:  $m = 1$ : le demi-bras du haut et  $m = 0$  : le demi-bras du bas. Les potentiels des nœuds A, B et C de l'onduleur triphasé à trois niveaux, par rapport au point M s'expriment comme suit:

**c) Les potentiels  $V_{iM}$  :**

$$\begin{cases} V_{AM} = F_{11}^b \times E_{C1} - F_{10}^b \times E_{C2} = (F_{11} \cdot F_{12} - F_{13} \times F_{14}) \frac{E}{2} \\ V_{BM} = F_{21}^b \times E_{C1} - F_{20}^b \times E_{C2} = (F_{21} \cdot F_{22} - F_{23} \times F_{24}) \frac{E}{2} \\ V_{CM} = F_{31}^b \times E_{C1} - F_{30}^b \times E_{C2} = (F_{31} \cdot F_{32} - F_{33} \times F_{34}) \frac{E}{2} \end{cases} \quad (II.34)$$

En traduisant ces fonctions de connexions des demis bras dans le système (II.35) on aboutit à :

$$\begin{cases} V_{AM} = F_{11}^b \times E_{C1} - F_{10}^b \times E_{C2} = (F_{11}^b - F_{10}^b) \frac{E}{2} \\ V_{BM} = F_{21}^b \times E_{C1} - F_{20}^b \times E_{C2} = (F_{21}^b - F_{20}^b) \frac{E}{2} \\ V_{CM} = F_{31}^b \times E_{C1} - F_{30}^b \times E_{C2} = (F_{31}^b - F_{30}^b) \frac{E}{2} \end{cases} \quad (II.35)$$

**b- Tensions de sorties :**

Le système d'équation (II.35) nous permet d'avoir les tensions de sortie de l'onduleur à trois niveaux qui s'expriment en fonction des deux tensions d'entrées  $E_{C1}$  et  $E_{C2}$ .

On peut considérer l'onduleur à trois niveaux comme étant l'association en série de deux onduleurs à deux niveaux et chaque bras de l'un de ces onduleurs sera un demi-bras de l'onduleur à trois niveaux.

Dans ces conditions, nous pourrions définir le modèle liant les fonctions des demi-bras et les tensions aux bornes de la charge  $V_A, V_B, V_C$

**d) Tensions composées :**

Les différentes tensions composées de l'onduleur triphasé à trois niveaux s'expriment à l'aide des fonctions de connexions des interrupteurs comme suit :

$$\begin{cases} V_{AB} = V_{AM} - V_{BM} = (F_{11} \cdot F_{12} - F_{21} \times F_{22})E_{C1} - (F_{13} \cdot F_{14} - F_{23} \times F_{24})E_{C2} \\ V_{BC} = V_{CM} - V_{BM} = (F_{21} \cdot F_{22} - F_{31} \times F_{32})E_{C1} - (F_{23} \cdot F_{24} - F_{33} \times F_{34})E_{C2} \\ V_{CA} = V_{CM} - V_{AM} = (F_{31} \cdot F_{32} - F_{11} \times F_{12})E_{C1} - (F_{33} \cdot F_{34} - F_{13} \times F_{14})E_{C2} \end{cases} \quad (II.36)$$

Dans le cas où  $E_{C1}=E_{C2} = E/2$  le système (II.36) devient :

$$\begin{cases} V_{AB} = [(F_{11} \cdot F_{12} - F_{21} \cdot F_{22}) - (F_{11} \cdot F_{12} - F_{21} \cdot F_{22})] \cdot \frac{E}{2} \\ V_{BC} = [(F_{21} \cdot F_{22} - F_{31} \cdot F_{32}) - (F_{23} \cdot F_{24} - F_{33} \cdot F_{34})] \cdot \frac{E}{2} \\ V_{CA} = [(F_{31} \cdot F_{32} - F_{11} \cdot F_{12}) - (F_{33} \cdot F_{34} - F_{13} \cdot F_{14})] \cdot \frac{E}{2} \end{cases} \quad (\text{II.37})$$

Les différentes tensions composées de l'onduleur triphasé à trois niveaux s'expriment à l'aide des fonctions des demi-bras comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_{AB} \\ V_{BC} \\ V_{CA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{11}^b \\ F_{21}^b \\ F_{31}^b \end{bmatrix} E_{C1} - \begin{bmatrix} F_{10}^b \\ F_{20}^b \\ F_{30}^b \end{bmatrix} E_{C2} \quad (\text{II.38})$$

Dans le cas où  $U_{C1} = U_{C2}$ , cette relation se réduit à :

$$\begin{bmatrix} V_{AB} \\ V_{BC} \\ V_{CA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{11}^b - F_{10}^b \\ F_{21}^b - F_{20}^b \\ F_{31}^b - F_{30}^b \end{bmatrix} \frac{E}{2} \quad (\text{II.39})$$

#### **d- Tensions simples :**

Les tensions simples de sorties de l'onduleur se déduisent en fonction des potentiels des neuds par rapport au point milieu par la relation suivante [3]:

$$V_A + V_B + V_C = 0 \quad (\text{II.40})$$

$$\begin{cases} V_A = (2V_{AM} - V_{BM} - V_{CM})/3 \\ V_B = (2V_{BM} - V_{AM} - V_{CM})/3 \\ V_C = (2V_{CM} - V_{AM} - V_{BM})/3 \end{cases} \quad (\text{II.41})$$

Sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{11}^b - F_{10}^b \\ F_{21}^b - F_{20}^b \\ F_{31}^b - F_{30}^b \end{bmatrix} \frac{E}{2} \quad (\text{II.42})$$

### **II.9 Stratégie de commande des onduleurs :**

Pour assurer la détermination en temps réel des instants de fermeture et d'ouverture des interrupteurs, on distingue trois techniques de modulation de largeur d'impulsion [4]:

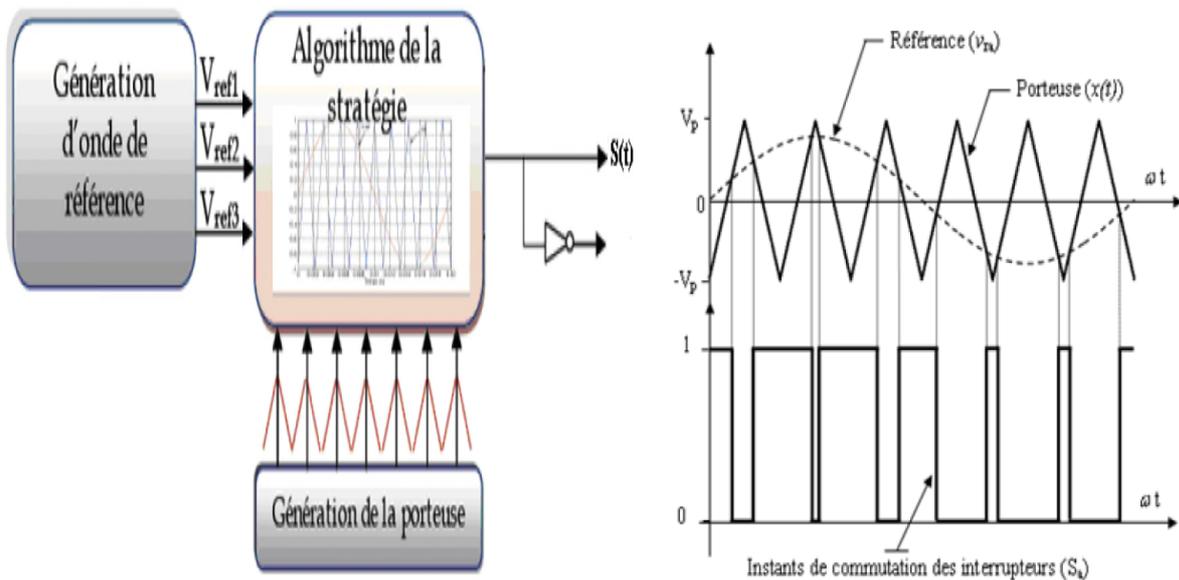
1. la modulation sinusoïdale.
2. la modulation par hystérésis.
3. la modulation vectorielle.

Dans notre travail nous allons s'intéresser à la modulation triangulo- sinusoïdale

**II.9.1 La commande MLI triangulo- sinusoïdale:**

Le but principal de cette technique est de régler l’amplitude et la fréquence du terme fondamentale et de rejeter les harmoniques indésirables vers les fréquences élevées, leurs amplitudes devenant alors négligeables.

Les signaux de commande des interrupteurs statiques de l’onduleur sont générés par comparaison entre un signal appelé onde porteuse à haute fréquence de forme triangulaire et une onde modulante ; celle-ci a la forme de la tension désirée au bornes de la charge. Les points d’intersection entre les deux signaux déterminent les instants de commutation [13], la figure II.6 montre le principe de la commande MLI.



**Figure II.6:** Principe de la commande MLI.

Le principe de cette stratégie peut être résumé par l’algorithme suivant :

$$V_{ref} \geq V_p \implies S(t)=1 \text{ si non } s(t)=0$$

Avec :

$V_{ref}$  : Tension de référence.

$V_p$  : Tension de la porteuse

$S(t)$  : Le signale MLI résultant.

### **II.10 Caractéristique de la modulation :**

- Indice de modulation  $m$  égale au rapport de la fréquence  $F_p$  de la porteuse à la fréquence  $F_{réf}$  de la référence  $m = \frac{F_p}{F_{réf}}$
- Taux de modulation ou coefficient de réglage de tension  $r$  égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence  $A_m$  à celle de la porteuse  $A_c$  :  $r = \frac{A_{réf}}{A_p}$

Après avoir modélisé l'onduleur servant à alimenter la MADA, on va à présent s'intéresser à la manière avec laquelle les signaux de commande de cet onduleur sont élaborés pour avoir les trois niveaux de tensions désirés :  $\frac{E}{2}$ ,  $0$ ,  $\frac{-E}{2}$

Pour ce faire et afin d'améliorer les performances de l'onduleur de tension, on utilise la modulation de largeur d'impulsion (MLI) à deux porteuses ou à doubles triangles qui est une technique de découpage de tension ou de courant permettant de générer des formes d'ondes quasi sinusoïdales [13].

### **II.11 Modulation sinusoïdale à doubles triangles :**

Cette stratégie est basée, dans son principe, sur la modulation sinusoïdale naturelle. Pour un onduleur à trois niveaux, elle recommande l'utilisation de deux signaux triangulaires de même fréquence  $f_p$  et de même amplitude  $A_p$ . Ces signaux triangulaires sont comparés, pour chaque phase, avec un signal de référence d'amplitude  $A_m$  et de fréquence  $f_{réf}$ . C'est la modulation sinusoïdale à double triangle. Pour les onduleurs avec un nombre de niveaux  $n$  supérieur à trois, la technique sinusoïdale naturelle avec son signal triangulaire unique, ne permet pas la génération de tous les signaux de commande requis. Alors, Cette technique nécessite  $(n-1)$  signaux triangulaires de même fréquence [13]. La figure II.7 représente un exemple de la technique MLI à doubles triangles.

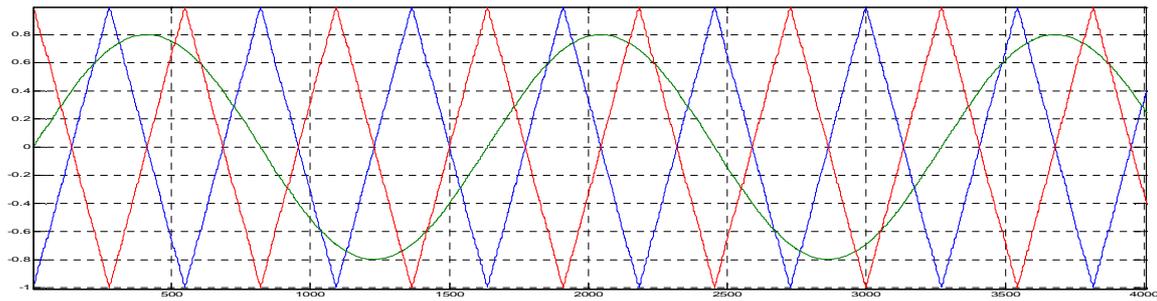


Figure II.7 : Exemple de la technique MLI à doubles triangles.

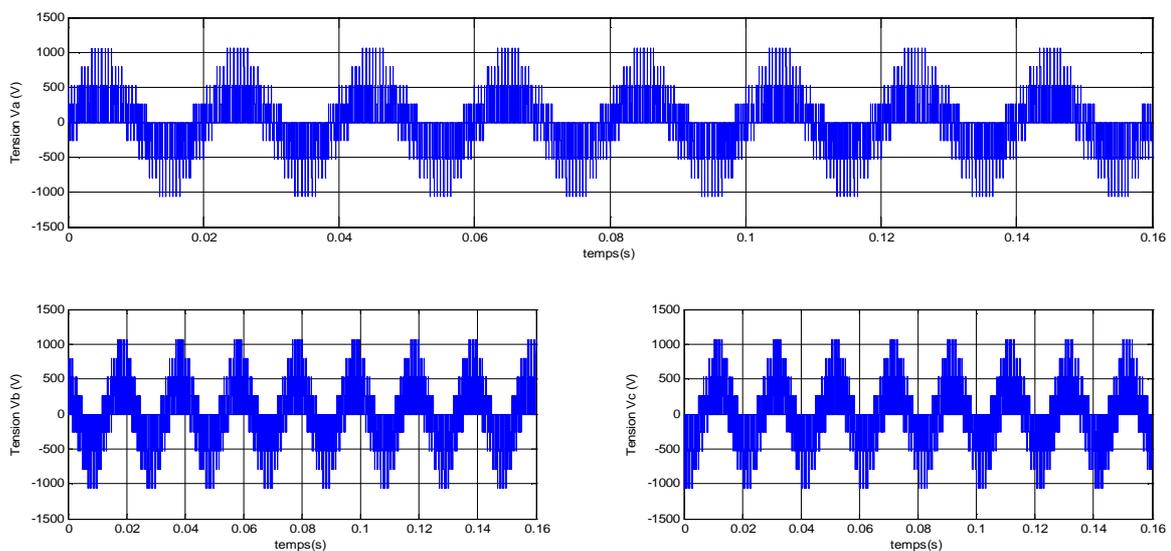


Figure II.8: Tensions de sortie des trois bras de l'onduleur à trois niveaux commandé par la stratégie triangulo-sinusoidale à doubles triangles.

## II.12 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons d'abord étudié la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation dont la complexité a été réduite en se basant sur quelques hypothèses simplificatrices, un modèle mathématique a été établi, L'application de la transformation de Park nous a permis de convertir le système triphasé  $(a, b, c)$  au biphasé  $(d, q)$ . Ce modèle a été simulé. Les résultats de simulation sont satisfaisants.

Dans la deuxième partie de ce chapitre nous avons présenté la modélisation de l'onduleur à trois niveaux de type NPC ainsi que la stratégie de commande MLI triangulo-sinusoidale à double triangles que nous avons choisie pour la partie commande. La modélisation de l'onduleur a permis de montrer que ce dernier est équivalent à deux onduleurs à deux niveaux.



# Chapitre III

- **Commande vectorielle de la MADA alimentée par deux onduleurs à trois niveaux.**

### III.1 Introduction :

L'intérêt porté à la MADA ne cesse de croître surtout dans le domaine des énergies renouvelables. En effet, dans le domaine éolien, la MADA présente bien des avantages : le convertisseur lié à l'armature rotorique est dimensionné au tiers de la puissance nominale du rotor, les pertes dans les semi-conducteurs sont faibles, etc. Pour des applications moteur, la machine asynchrone à cage occupe certes la première place, néanmoins la MADA alimentée par deux convertisseurs présente, notamment pour des applications de grandes puissances, de bonnes performances : fonctionnement en survitesse (jusqu'à deux fois la vitesse nominale) sans démagnétisation, bonnes performances à très basse vitesse pour un fonctionnement sans capteur de vitesse, etc. Par ailleurs, la MADA grâce à sa double alimentation offre plusieurs possibilités de reconfiguration du mode de fonctionnement de la machine.

### III.2 Commande vectorielle de la MADA :

#### III.2.1 Principe de la commande vectorielle :

L'objectif de la commande vectorielle est d'obtenir de la machine asynchrone des performances semblables à celle de la machine à courant continu à excitation séparée où il y a un découplage naturel du couple et du flux magnétique. Pour cela il faut choisir un système d'axe  $(d, q)$  et une loi de commande qui assure ce découplage [1]. La figure III.1 montre le but recherché par cette commande.

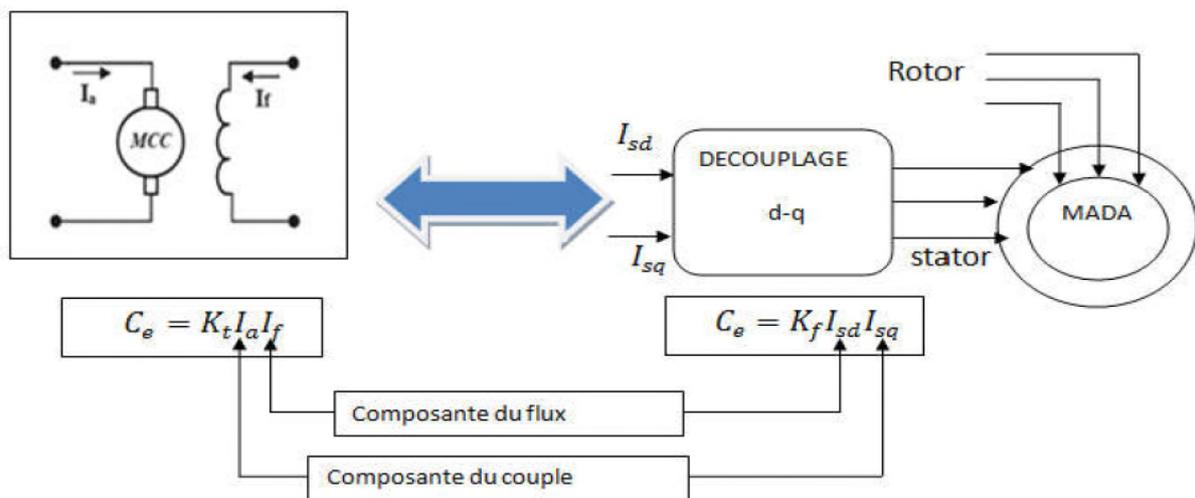


Figure III.1 : Schéma de principe du découplage pour le MADA par analogie avec la machine.

#### III.2.1.1 Orientation du flux :

Il existe trois types d'orientation du flux :

- Orientation du flux rotorique.
- Orientation du flux statorique.
- Orientation du flux d'entrefer.

Dans notre cas l'orientation du flux statorique est la méthode choisie.

### III.2.2 Commande vectorielle par orientation du flux statorique :

La commande vectorielle de la machine asynchrone consiste à orienter l'un des flux de la machine suivant l'axe d ou q.

Dans notre cas on choisit l'orientation de repère  $(d, q)$  suivant le vecteur flux statorique directe  $\Phi_{ds}$ ; ainsi le modèle de la MADA sera simplifié et le dispositif de commande qui en résulte l'est également [1].

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = \Phi_s \\ \Phi_{qs} = 0 \end{cases}$$

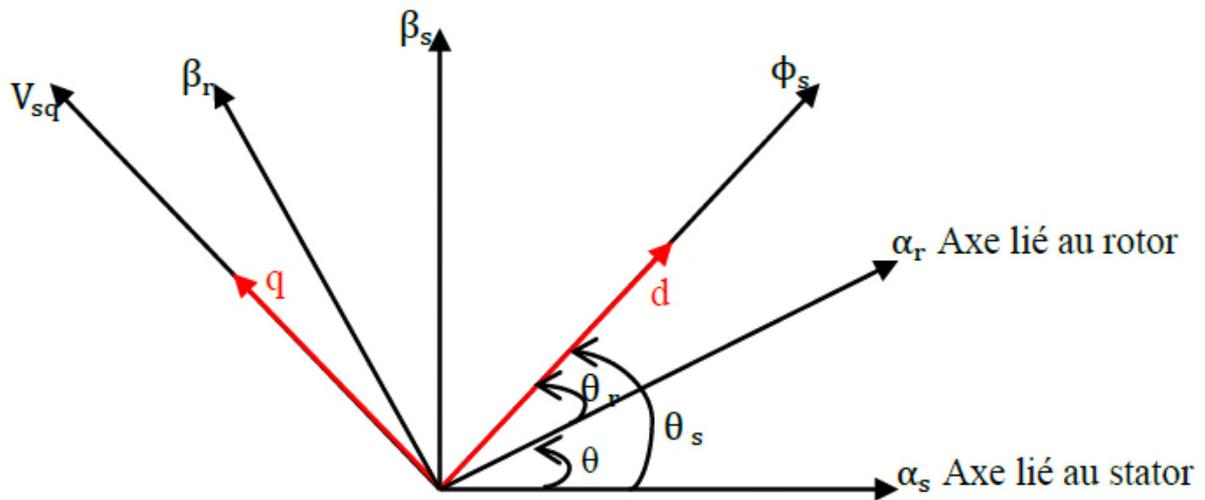


Figure III.2 : Vecteur flux dans le système d'axes choisi.

Avec ce choix d'orientation du flux, les expressions de système d'équations des tensions statoriques et rotoriques lié au champ tournant deviennent :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_s \Phi_{ds} \\ v_{dr} = R_r i_{dr} - \omega \Phi_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \omega \Phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

Telle que :

$$\omega = \omega_s - \omega_r \quad (\text{III.2})$$

Avec ce choix d'orientation du flux, les références des courants en quadrature peuvent être déterminées directement à partir de l'expression de couple électromagnétique et de la relation de proportionnalité qui existe entre les deux courants :

$$i_{qs}^* = \frac{C_{em}^*}{P\Phi_s^*}; i_{qr}^* = \frac{-L_s}{M} i_{qs}^* \quad (\text{III.3})$$

La magnétisation de la MADA est assurée par les courants de l'axe direct d, plusieurs choix peuvent être faits, dans ce travail nous avons choisi de la répartir à égalité, donc les courants statoriques et rotoriques de l'axe direct ont la même expression [1].

$$i_{ds}^* = i_{dr}^* = \frac{\Phi_s^*}{M+L_s} \quad (\text{III.4})$$

La répartition des puissances actives entre le stator et le rotor est une exigence dans la stratégie de contrôle à adopter, en effet dans notre travail on a choisi de faire fonctionner la MADA avec un glissement égal à  $-1$ , donc en négligeant les termes résistifs de la machine [1] :

$$\frac{P_s}{P_r} = \frac{\omega_s}{-\omega_r} = 1 \Rightarrow \omega_s = -\omega_r : \text{la loi de la répartition des pulsations.} \quad (\text{III.5})$$

Et d'après la loi d'autopilotage :

$$\omega = \omega_s - \omega_r = 2\omega_s = -2\omega_r \quad (\text{III.6})$$

La relation (III.5) montre que la loi de répartition des puissances actives permet de faire fonctionner la MADA avec une vitesse de rotation mécanique égale à deux fois la valeur absolue des pulsations des courants statoriques ou rotoriques [1].

Dans le but d'obtenir un bon découplage entre les axes d et q, nous définissons des tensions intermédiaires comme suite :

$$\begin{cases} v_{ds} - \frac{M}{L_r} v_{dr} = v_{tds} \\ v_{dr} - \frac{M}{L_s} v_{ds} = v_{tdr} \end{cases} ; \quad \begin{cases} v_{qs} - \frac{M}{L_r} v_{qr} = v_{tqs} \\ v_{qr} - \frac{M}{L_s} v_{qs} = v_{tqr} \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

Des termes de couplage a compensé apparaissent,  $P_1, P_2, P_3, P_4$ , ces expressions nous permettent d'obtenir des relations entre les tensions intermédiaires et les courant statoriques et rotoriques dans les axes d ou q.

Il vient :

$$\begin{cases} v_{tds} = R_s(1 + ST_s\sigma) + P_1 \\ v_{tqs} = R_s(1 + ST_s\sigma) + P_2 \\ v_{tdr} = R_r(1 + ST_r\sigma) + P_3 \\ v_{tqr} = R_r(1 + ST_r\sigma) + P_4 \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

Avec :

$T_s = \frac{L_s}{R_s}$  ; Constante de temps électrique statorique.

$T_r = \frac{L_r}{R_r}$  ; Constante de temps électrique rotorique.

$\sigma = (1 - \frac{M^2}{L_s L_r})$  ; Coefficient de dispersion.

Des termes de couplage témoignent de l'interaction entre les axes et les côtés de la machine apparaissent. Afin qu'on puisse définir les fonctions de transfert de chaque grandeur, il est indispensable de procéder à la compensation de ces termes :

$$\begin{cases} P_1 = -R_r \frac{M}{L_r} i_{dr} - \omega_s \Phi_{qs} + \omega_r \frac{M}{L_r} \Phi_{qr} \\ P_2 = -R_r \frac{M}{L_r} i_{qr} + \omega_s \Phi_{ds} - \omega_r \frac{M}{L_r} \Phi_{dr} \\ P_3 = -R_s \frac{M}{L_r} i_{ds} - \omega_r \Phi_{qr} + \omega_s \frac{M}{L_r} \Phi_{qs} \\ P_4 = -R_s \frac{M}{L_r} i_{qs} + \omega_r \Phi_{dr} - \omega_s \frac{M}{L_r} \Phi_{ds} \end{cases} \quad (III.9)$$

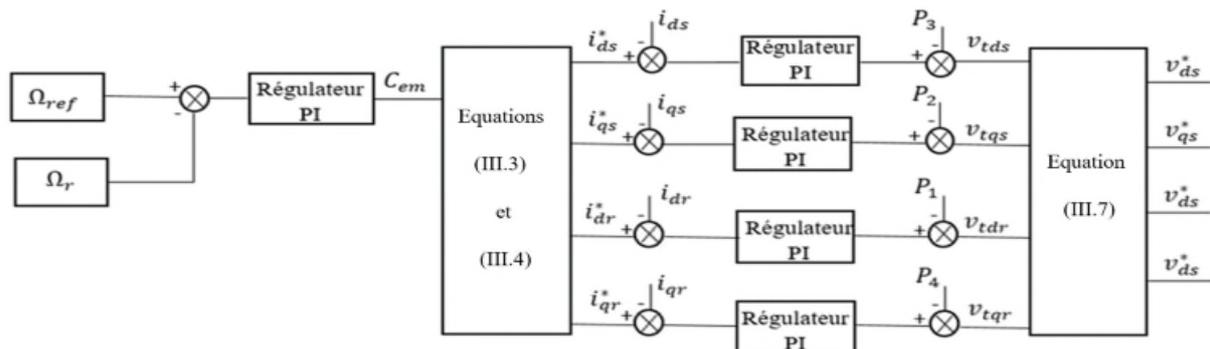
Des fonctions de transfert entre les courants et les tensions d'un même axe au stator ainsi qu'au rotor peuvent être définies. Ces fonctions sont communes du côté de la machine.

$$\begin{cases} T_{ds} = \frac{i_{ds}}{v_{tds}-P_1} = \frac{1/R_s}{1-ST_s\sigma} \\ T_{qs} = \frac{i_{qs}}{v_{tqs}-P_2} = \frac{1/R_s}{1-ST_s\sigma} \\ T_{dr} = \frac{i_{dr}}{v_{tdr}-P_3} = \frac{1/R_r}{1-ST_r\sigma} \\ T_{qr} = \frac{i_{qr}}{v_{tqr}-P_4} = \frac{1/R_r}{1-ST_r\sigma} \end{cases} \quad (III.10)$$

### III.2.3 Schéma explicatif de la commande vectorielle de la MADA:

Le contrôle de la MADA est assuré par deux boucles, une boucle interne de régulation des courants et une boucle externe de régulation de vitesse de rotation de la machine fournit le couple électromagnétique de référence servant à calculer les courants de références. Les boucles de régulation des courants, délivrent les tensions de références servant à la commande MLI triangulo-sinusoïdale des deux onduleurs trois niveaux qui alimentent la MADA. La régulation de la vitesse et des courants de la MADA est assurée par des régulateurs PI [14].

Le schéma de la figure III.3 montre l'indépendance qui existe entre les deux axes de commande et mis en évidence le couplage du côté de la machine, stator et rotor, sur un même axe par le biais des tensions intermédiaires.



**Figure III.3 :** Schéma explicatif de contrôle de la MADA.

a) Dimensionnement des régulateurs du courant :

Le but essentiel d'utilisation des régulateurs est d'avoir un système stable et bien amorti, pour cela on utilise un régulateur proportionnel intégral, simple et rapide à mettre en œuvre.

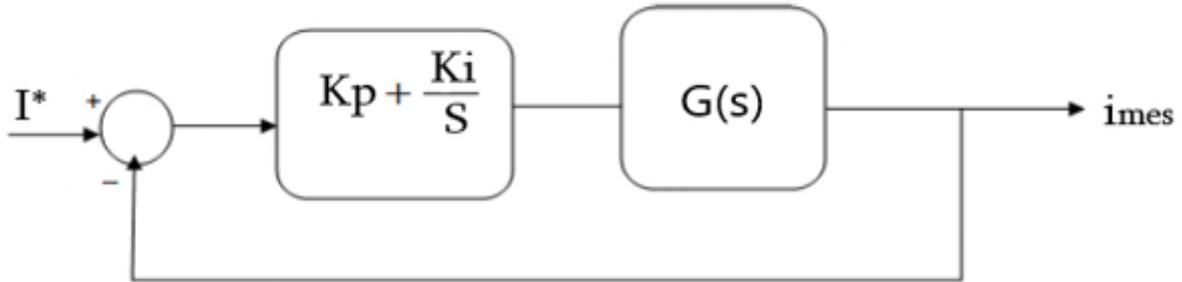


Figure III.4 : Schéma de régulation des courants.

Le régulateur mis en œuvre est de type Proportionnel-Intégral (PI), la fonction de transfert classique du régulateur est donnée par l'expression suivante :

$$C(S) = k_p + \frac{k_i}{S}$$

Tel que  $k_p$  et  $k_i$  sont respectivement les gains proportionnel et intégral du régulateur PI.

$$G(S) = \frac{1/R}{1 + TS}$$

La fonction de transfert en boucle ouverte s'écrit :

$$FTBO = FTCD * FTCR$$

$$FTBO = C(S) * G(S)$$

On a: 
$$C(S) = \frac{S + \frac{k_i}{k_p}}{S} \quad \text{et} \quad G(S) = \frac{\frac{1}{L_j \sigma}}{S + \frac{R_j}{L_j \sigma}}$$

$$FTBO = \frac{\frac{1}{L_j \sigma}}{S + \frac{R_j}{L_j \sigma}} \times \frac{S + \frac{k_i}{k_p}}{S}$$

Afin d'éliminer le zéro de la fonction G(s) :

$$\frac{k_i}{k_p} = \frac{R_j}{L_j \sigma}$$

D'où : 
$$FTBO = \frac{k_p}{\sigma L_j S}$$

La fonction de transfert en boucle fermée s'écrit :

$$FTBF = \frac{FTBO}{1 + FTBO} = \frac{\frac{k_p}{\sigma L_j S}}{1 + \frac{k_p}{\sigma L_j S}}$$

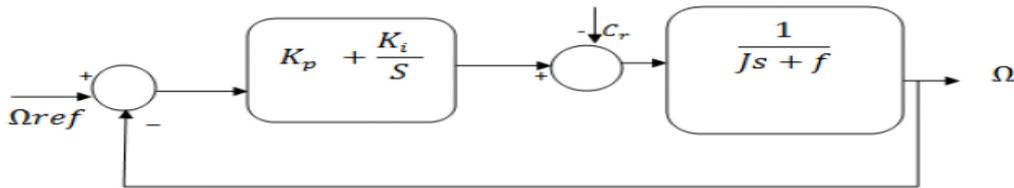
$$FTBF = \frac{1}{1 + \frac{L_j \sigma}{k_p S}} \quad \text{Donc : } \tau_j = \frac{L_j \sigma}{k_p}$$

$$k_p = \frac{\sigma L_j}{\tau_j} \quad k_i = \frac{R_j}{\tau_j}$$

Tel que  $j = s$  ou  $r$ .

$\tau_j$ : représente le temps de réponse du système qui doit être inférieur à la plus petite constante du temps électrique [20].

**b) Dimensionnement du régulateur de la vitesse :**



**Figure III.5 :** Régulation de vitesse avec régulateur PI

L'identification nous donne :

$$\begin{cases} k_i = \frac{f}{\tau} \\ k_p = \frac{j}{\tau} \end{cases}$$

**III.3 Modèle de la MADA en vue de la commande :**

Nous avons défini au chapitre II, les équations de la MADA dans le repère  $(d, q)$  lié au champ tournant. Si on exprime les équations du système (II-21) et (II.22) en utilisant la transformation de Laplace on obtient :

$$\begin{cases} v_{ds}(S) = R_s i_{ds}(S) + S\Phi_{ds}(S) - \omega_s \Phi_{qs}(S) \\ v_{qs}(S) = R_s i_{qs}(S) + S\Phi_{qs}(S) + \omega_s \Phi_{ds}(S) \\ v_{dr}(S) = R_r i_{dr}(S) + S\Phi_{dr}(S) - (\omega_s - \omega) \Phi_{qr}(S) \\ v_{qr}(S) = R_r i_{qr}(S) + S\Phi_{qr}(S) + (\omega_s - \omega) \Phi_{dr}(S) \end{cases} \quad (III.11)$$

On remplaçant les expressions des flux statoriques et rotoriques donner par le système d'équations (II.2) dans le système d'équations précédent (III.11) on aboutit :

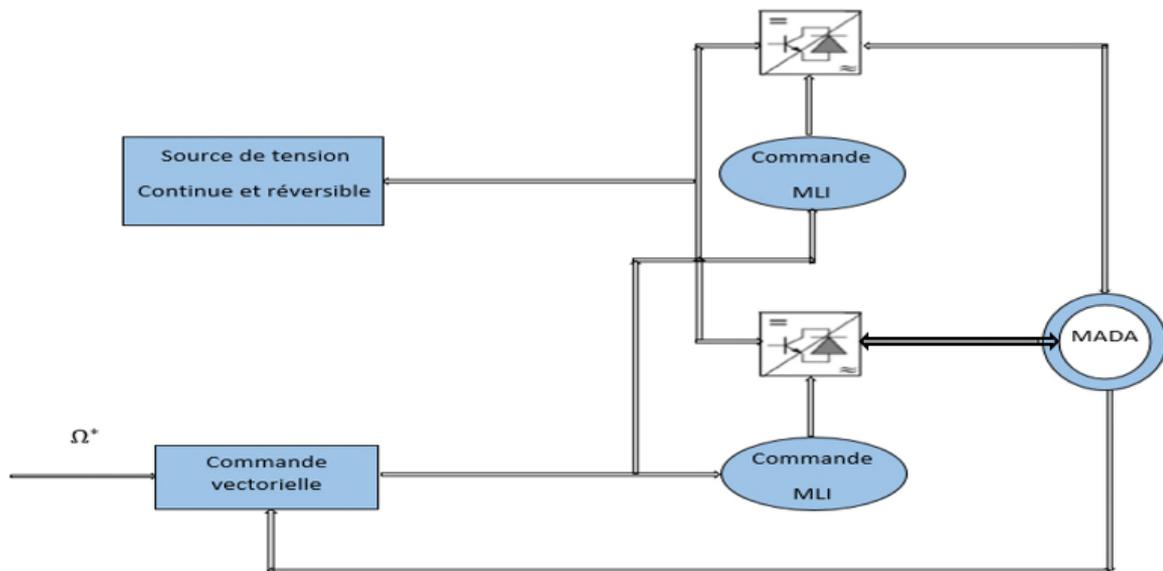
$$\begin{cases} v_{ds}(S) = R_s i_{ds} + l_s \frac{d}{dt} i_{ds} + M \frac{d}{dt} i_{dr} - \omega_s (l_s i_{qs} + M i_{qr}) \\ v_{qs}(S) = R_s i_{qs} + l_s \frac{d}{dt} i_{qs} + M \frac{d}{dt} i_{qr} + \omega_s (l_s i_{ds} + M i_{dr}) \\ v_{dr}(S) = R_r i_{dr} + l_r \frac{d}{dt} i_{dr} + M \frac{d}{dt} i_{ds} - (\omega_s - \omega) (l_r i_{qr} + M i_{qs}) \\ v_{qr}(S) = R_r i_{qr} + l_r \frac{d}{dt} i_{qr} + M \frac{d}{dt} i_{qs} + (\omega_s - \omega) (l_r i_{dr} + M i_{ds}) \end{cases} \quad (III.12)$$

D'où on peut tirer les expressions différentielles des courants :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i_{ds} = \frac{1}{l_s} (v_{ds} - R_s i_{ds} - M \frac{d}{dt} i_{dr} + \omega_s (l_s i_{qs} + M i_{qr})) \\ \frac{d}{dt} i_{qs} = \frac{1}{l_s} (v_{qs} - R_s i_{qs} - M \frac{d}{dt} i_{qr} - \omega_s (l_s i_{qs} + M i_{qr})) \\ \frac{d}{dt} i_{dr} = \frac{1}{l_r} (v_{dr} - R_r i_{dr} - M \frac{d}{dt} i_{ds} + (\omega_s - \omega) l_r i_{qr} + (\omega_s - \omega) M i_{qs}) \\ \frac{d}{dt} i_{qr} = \frac{1}{l_r} (v_{qr} - R_r i_{qr} - M \frac{d}{dt} i_{qs} - (\omega_s - \omega) l_r i_{dr} - (\omega_s - \omega) M i_{ds}) \end{cases} \quad (III.13)$$

### III.4 Représentation de système à étudier :

Notre système est constitué d'une MADA dont le stator et le rotor sont alimenté par deux convertisseurs à trois niveaux à commande MLI sinus triangle, ces deux convertisseurs sont alimentés par une source de tension continue.



**Figure III.6 :** Représentation du système à étudier.

### III.5 Simulation du système

Nous allons étudier les performances de cette machine à travers des différents modes de fonctionnement, fonctionnement en moteur et génératrice en vitesse variable-charge fixe et en vitesse fixe-charge variable, en analysant le spectre harmonique des différentes grandeurs (tension, courant).

La simulation est réalisée sur le logiciel MATLAB SIMULINK, les paramètres de simulation sont donnés à l'annexe.

### III.6 Résultats de simulation

#### III.6.1 Fonctionnement moteur à vitesse variable et charge fixe:

Nous appliquons à la MADA des vitesses de référence réparties sur des intervalles de temps comme suit :

[0 2.2] s:  $\Omega^* = 1000 \text{ tr/m}$

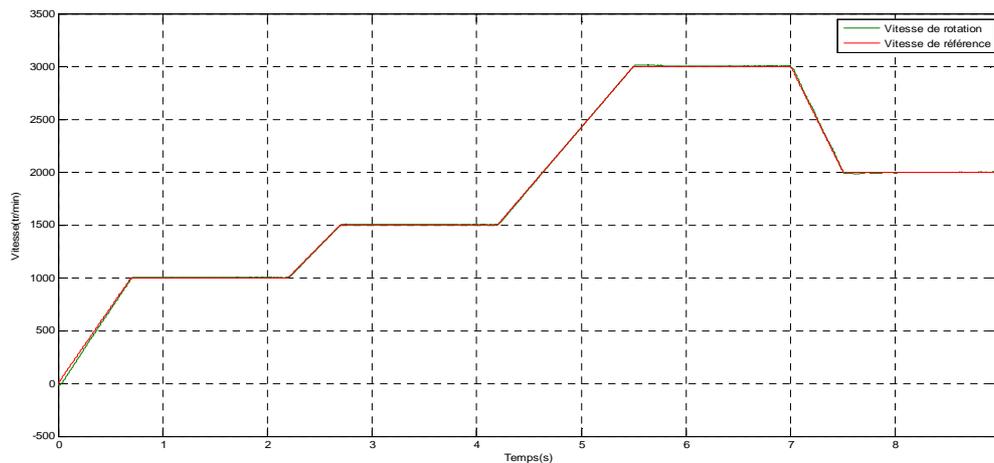
[2.2 4.2] s:  $\Omega^* = 1500 \text{ tr/m}$

[4.2 7] s:  $\Omega^* = 3000 \text{ tr/m}$

[7 9] s:  $\Omega^* = 2000 \text{ tr/m}$

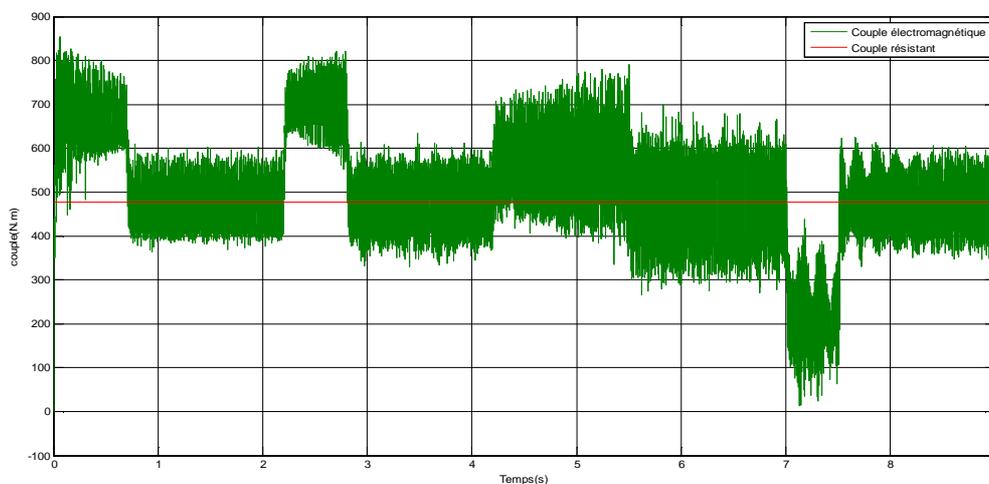
Le couple résistant égale au couple nominal  $C_r = 477 \text{ N.m}$ .

On lance la simulation sur un intervalle de temps de 9s, puis on relève les différents paramètres de la MADA comme illustré sur les figures ci-dessous :



**Figure III.7:** Allure de la vitesse.

- D'après la figure ci-dessus, nous constatons que la variation de la vitesse de rotation suit la vitesse de référence avec de bonnes performances statiques et dynamiques dues au bon dimensionnement des régulateurs de vitesse et de courants. Cette variation nous permet d'atteindre deux fois la vitesse nominale.



**Figure III.8 :** Allure du couple électromagnétique.

- Le couple électromagnétique obtenu est fortement oscillant et présente des perturbations à chaque fois que la vitesse de rotation change de valeur, cependant, il revient toujours à la valeur du couple résistant en régime permanent.

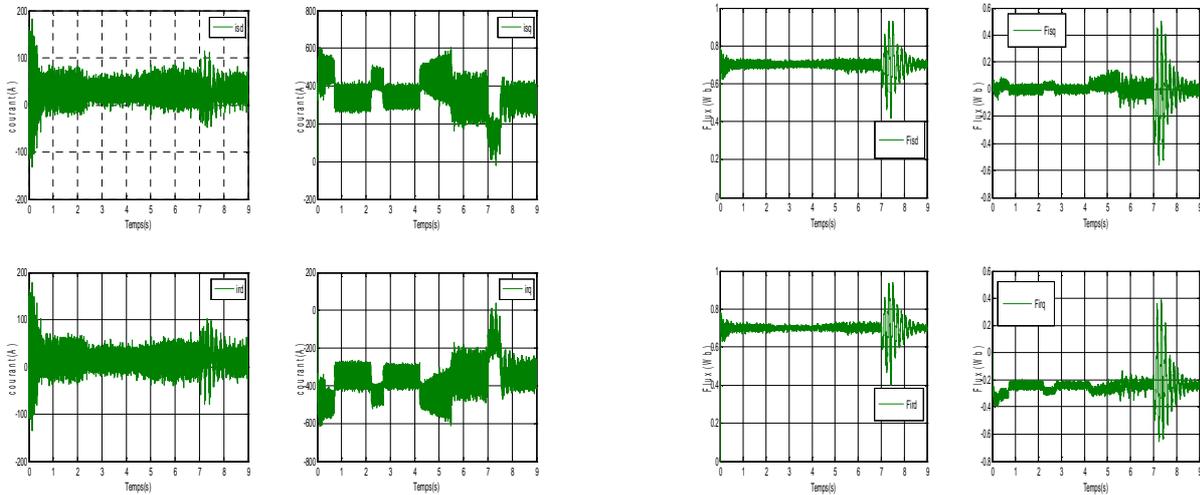


Figure III.9 : Allures des courants et des flux statoriques et rotoriques.

- Les courants statoriques et rotoriques sont symétriques par rapport à l'axe du temps. Le courant statorique quadratique varie aussi en fonction de couple et atteint au démarrage les 600 A et le courant rotorique quadratique égale à l'inverse du courant statorique.
- La figure des flux ci-dessus montre que la commande vectorielle à orientation du champ statorique selon l'axe directe est justifiée.

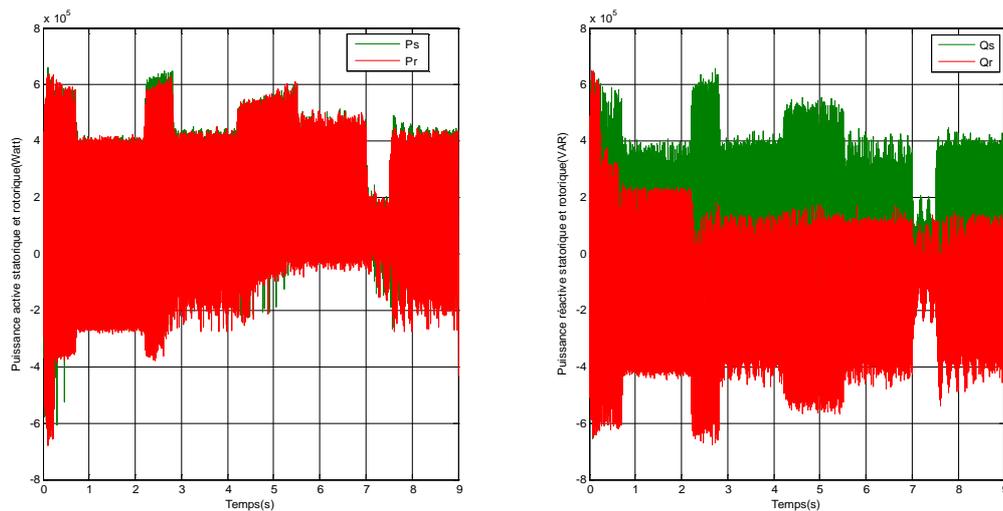


Figure III.10 : Allures des puissances actives et réactive statorique et rotorique.

- Lorsqu'on impose une vitesse positive et un couple résistant, les puissances actives statoriques et rotoriques varient en fonction du couple électromagnétique.

- Nous constatons que le stator et le rotor de la MADA génèrent pratiquement la même puissance active. La légère différence est due aux résistances des enroulements rotoriques qui ne sont pas égales.

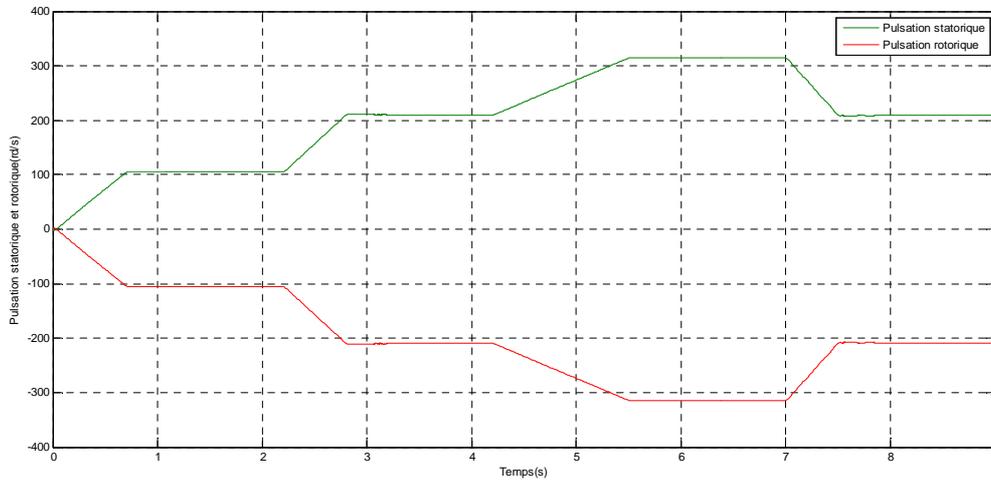


Figure III.11 : Allures des pulsations statorique et rotorique.

- Les pulsations statoriques et rotoriques sont symétriques par rapport à l'axe du temps car nous travaillons avec un glissement  $g=-1$ , donc les pulsations statoriques et rotoriques sont déterminées à partir de la vitesse de référence et de la loi de répartition des pulsations de la machine.

### III.6.1.1 Analyse harmonique

Les figures ci-dessous illustrent l'analyse harmonique des tensions statoriques, rotoriques et des courants statoriques et rotoriques en mode moteur pour les vitesses 1500 tr/min et 3000 tr/min.

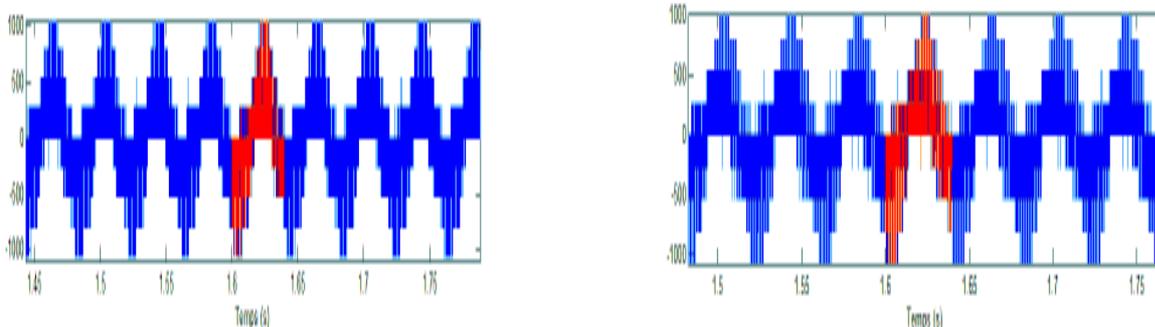


Figure III.12: Allures des tensions statoriques à gauche et rotoriques à droite à la vitesse 1500tr/min.

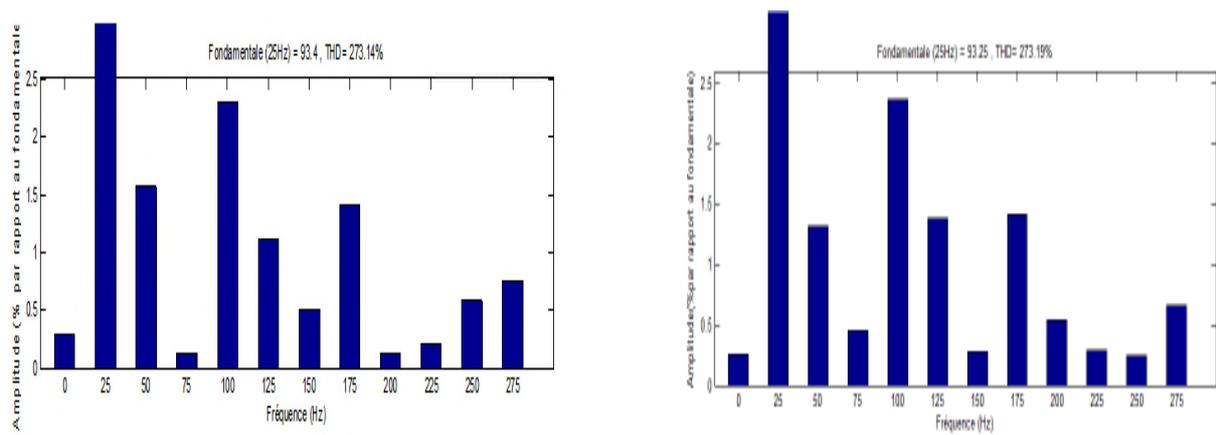


Figure III.13: Spectres d'harmoniques des tensions statoriques à gauche et rotoriques à droite à la vitesse 1500tr/min.

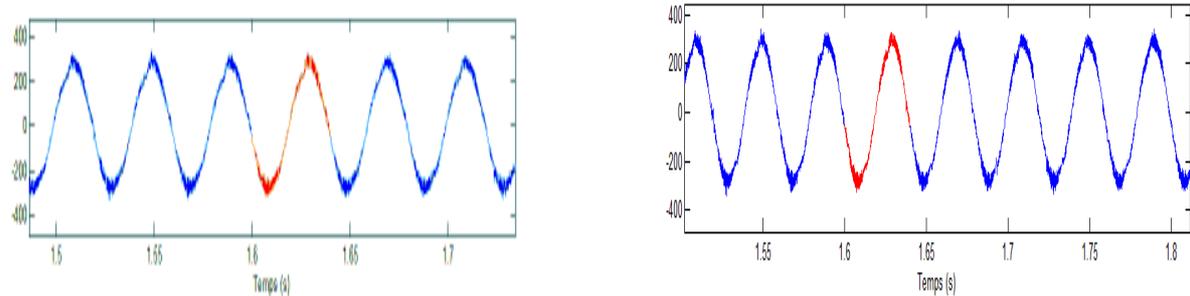


Figure III.14: Zooms des courants statoriques à gauche et rotoriques à droite à la vitesse 1500tr/min.

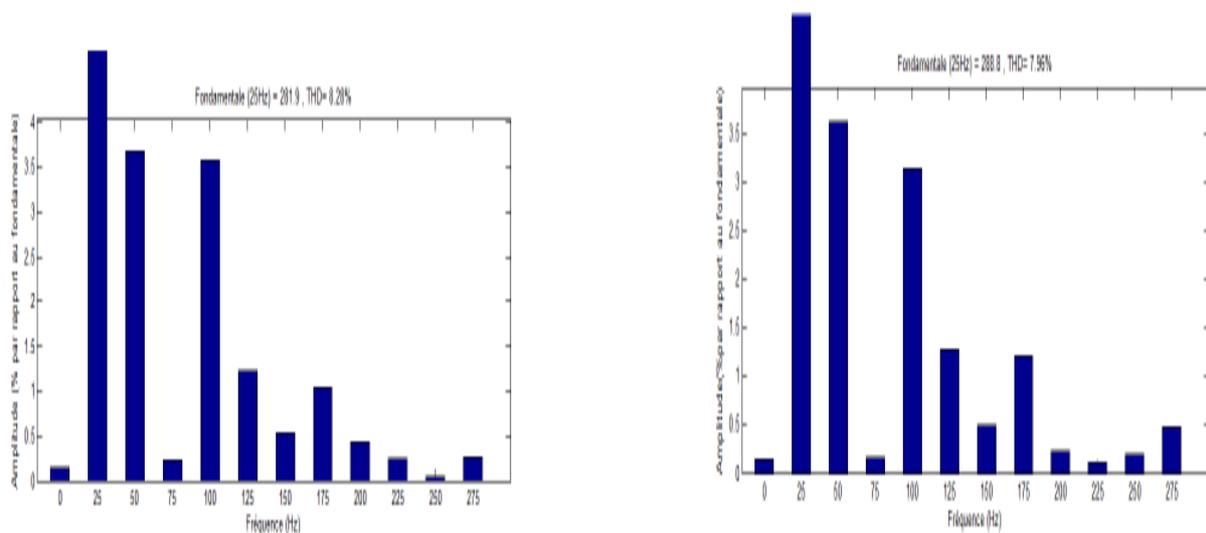
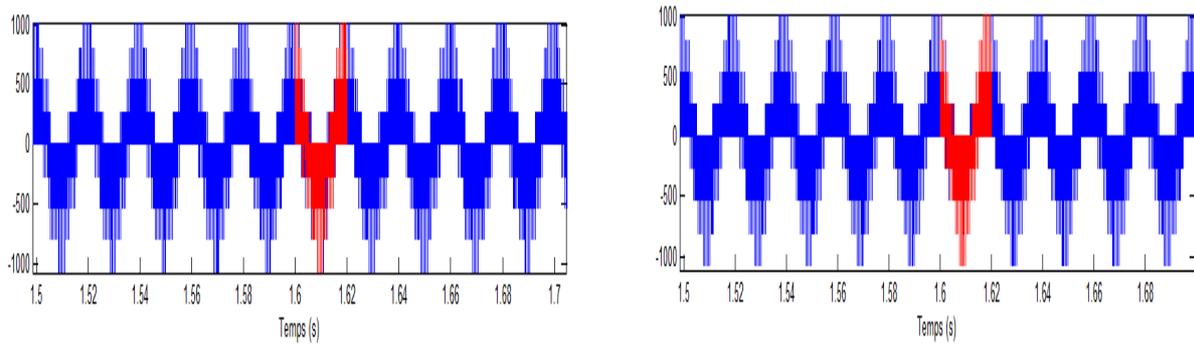
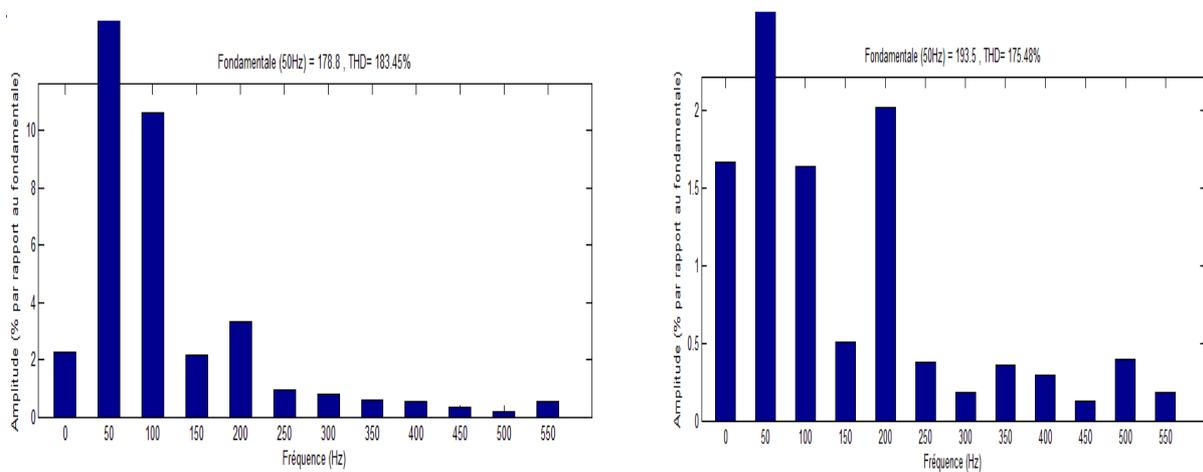


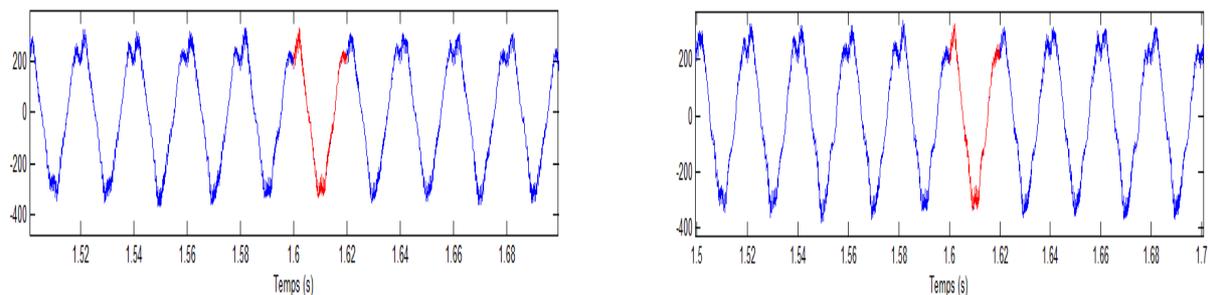
Figure III.15: Spectres d'harmoniques des courants statoriques à gauche et rotoriques à droite à la vitesse 1500tr/min.



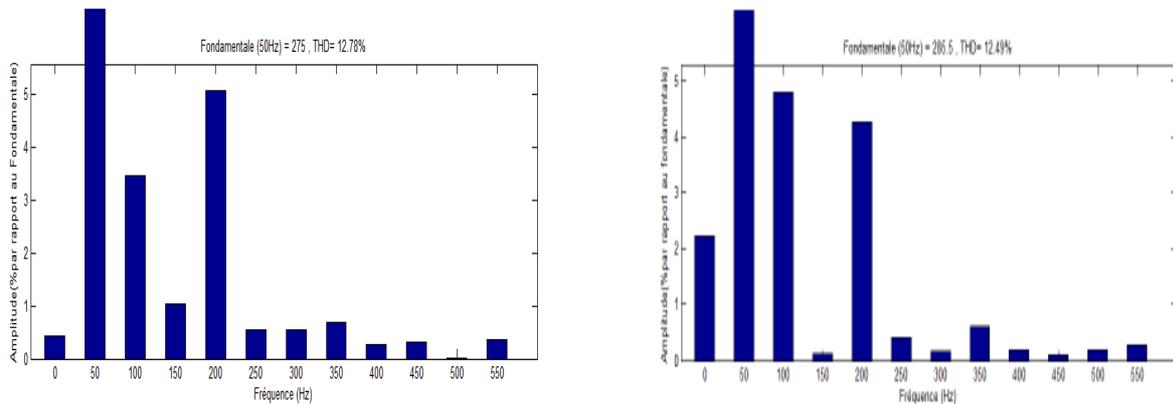
**Figure III.16:** Allures des tensions statoriques à gauche et rotoriques à droite à la vitesse 3000tr/min.



**Figure III.17:** Spectres d'harmoniques des tensions statoriques à gauche et rotoriques à droite à la vitesse 3000tr/min.



**Figure III.18:** Zooms des courants statoriques à gauche et rotoriques à droite à la vitesse 3000tr/min.



**Figure III.19:** Spectres d'harmoniques des courants statoriques à gauche et rotoriques à droite à la vitesse 3000tr/min.

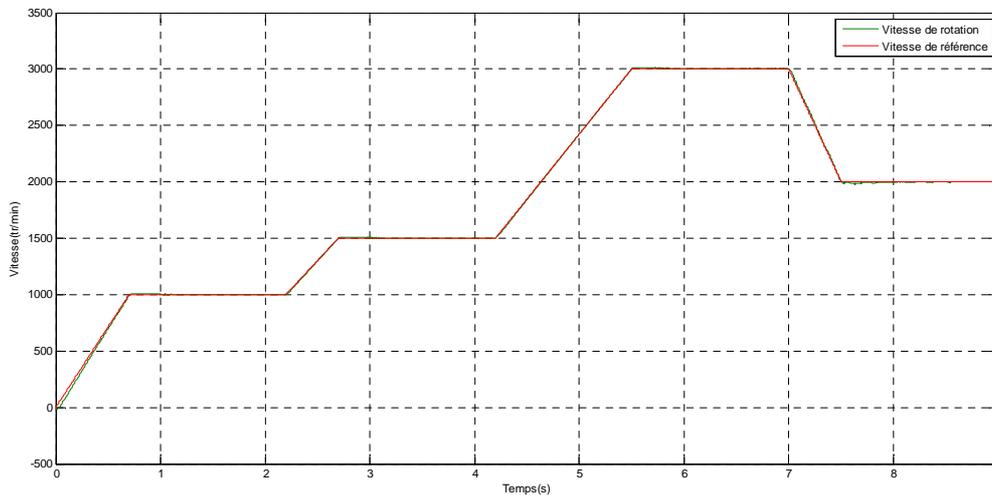
- D'après les résultats obtenus par l'analyse harmonique des tensions et les courants servants pour l'alimentation de la MADA, on remarque que le THD des tensions diminue en fonction de l'augmentation de la vitesse de rotation. Tandis que le THD des courants varie en fonction de la vitesse. Pour une vitesse égale à 1500 tr/min, le THD des tensions statorique et rotorique égale à 273%, 273.19% respectivement. Le THD des courants statorique et rotorique égale à 8.28%, 7.96% respectivement. Pour une vitesse égale à 3000 tr/min, le THD des tensions statorique et rotorique égale à 183.45%, 175.48% respectivement, Le THD des courants statorique et rotorique égale à 12.78%, 12.49% respectivement. Les amplitudes des grandeurs rotoriques sont légèrement supérieures aux amplitudes des grandeurs statoriques.
- D'après les zooms des allures des tensions statorique est rotorique pour les deux vitesses, Nous constatons que la qualité du signal fourni par l'onduleur à trois niveaux est meilleure pour une vitesse égale à deux fois la vitesse nominale de la machine.
- Les figures (III.13), (III.15), (III.17), (III.19), (III.17), montre la présence des harmoniques du rang 4 cela peut augmenter les pertes et influencer sur le facteur de puissance de la machine.

### III.6.2 Fonctionnement génératrice à vitesse variable-charge constante:

Pour ce mode de fonctionnement, on garde les mêmes vitesses de référence appliquées pour le mode de fonctionnement moteur. La machine doit fonctionner sur une large plage de variation de vitesse de rotation jusqu'à deux fois la vitesse nominale (3000tr/min). Nous

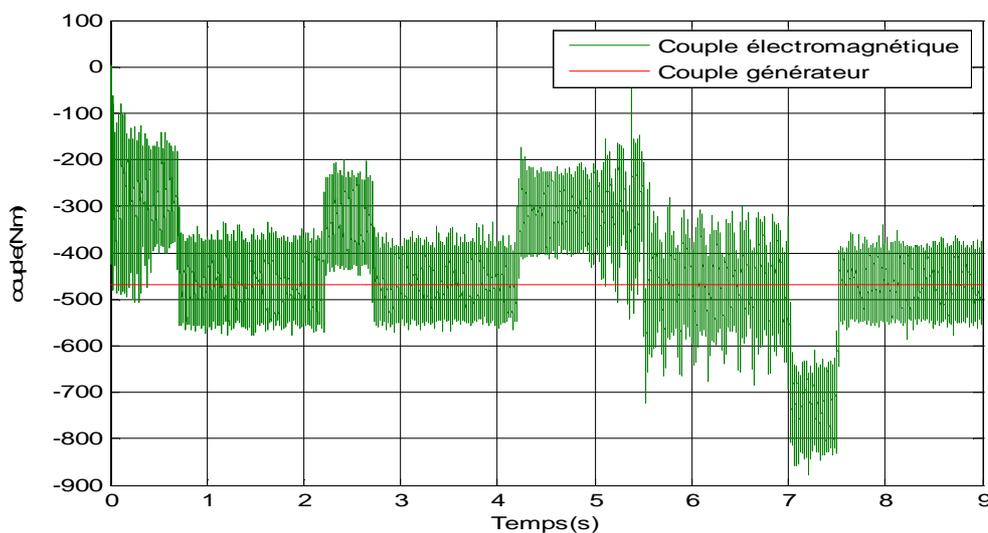
appliquons un couple générateur au démarrage, la valeur de ce couple générateur correspond au couple nominal de la MADA,  $C_g = C_n = 477N.m$ .

Nous lançons la simulation sur un intervalle de temps de 9s puis on relève les différents paramètres de la MADA comme la montre les figures ci-dessous :



**Figure III.20:** Allure de la vitesse de rotation de la MADA en mode moteur.

- Nous remarquons d’après la figure III.20 que la vitesse de la machine suit aussi la référence.



**Figure III.21 :** Allure du couple électromagnétique.

- Le couple électromagnétique obtenu est fortement oscillant et présente des perturbations à chaque fois que la vitesse de rotation change de valeur. Toutefois, il maintient toujours sa valeur en régime permanent.

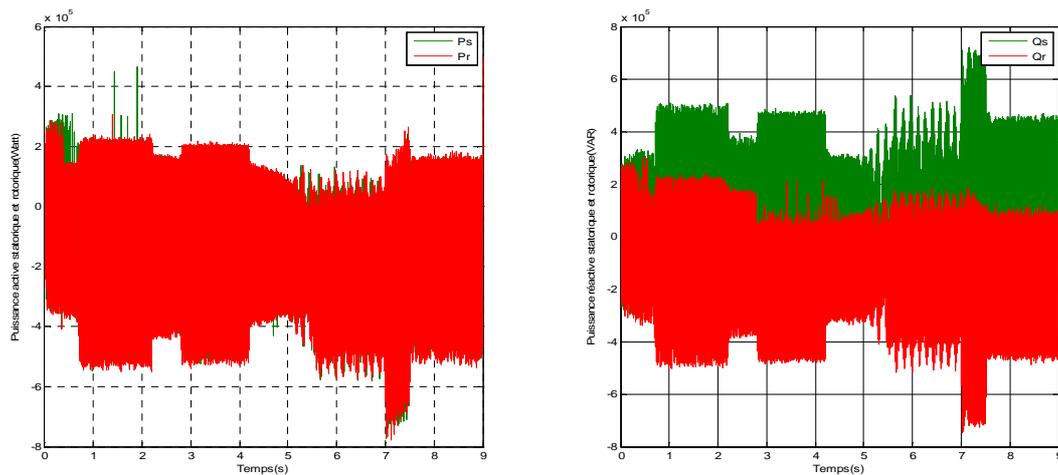


Figure III.22 : Allures des puissances actives et réactives statorique et rotorique.

- Lorsqu'on impose une vitesse positive et un couple négatif (générateur), les puissances actives statoriques et rotoriques varient en fonction du couple électromagnétique.
- On constate que le stator et le rotor de la MADA génèrent pratiquement la même puissance active. La légère différence est due aux résistances des enroulements rotoriques qui ne sont pas égales.

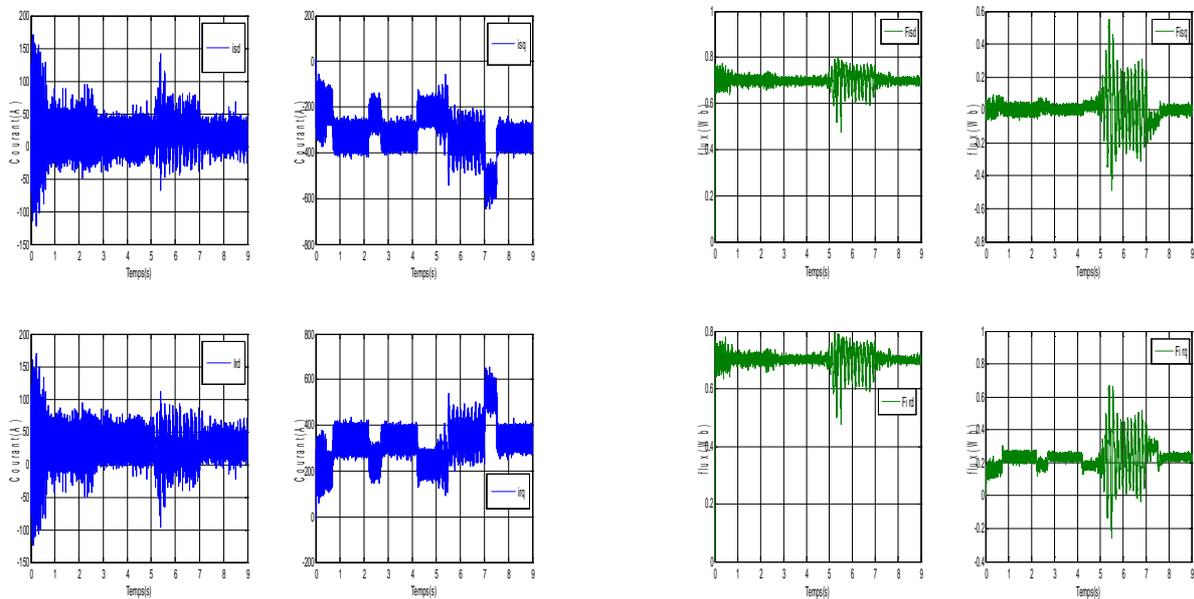
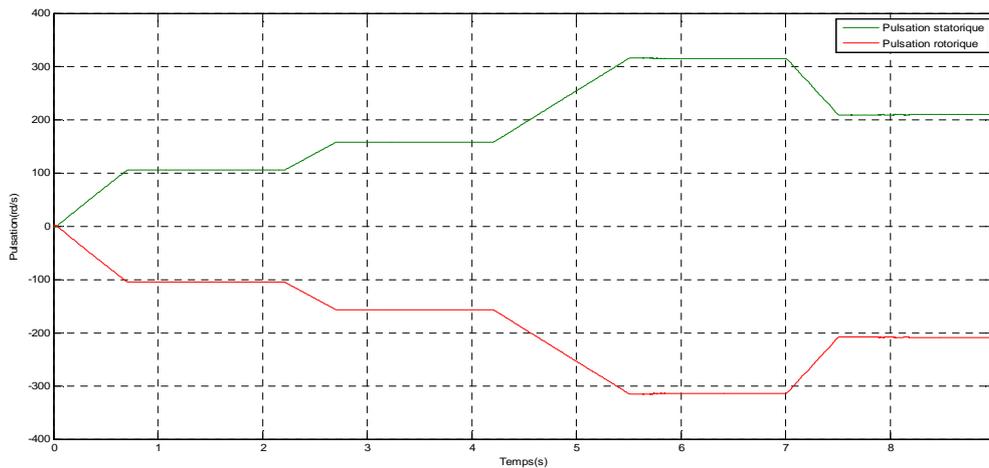


Figure III.23 : Allures des courants et des flux statoriques et rotoriques.

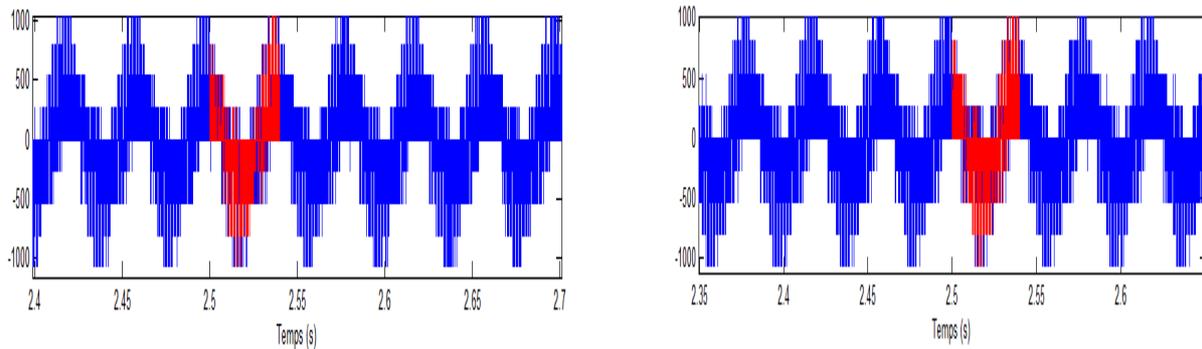
- Les courants statoriques et rotoriques sont symétriques par rapport à l'axe du temps. Le courant statorique quadratique varie aussi en fonction du couple et atteint au démarrage les 400 A et le courant rotorique quadratique égale à l'inverse de courant statorique.



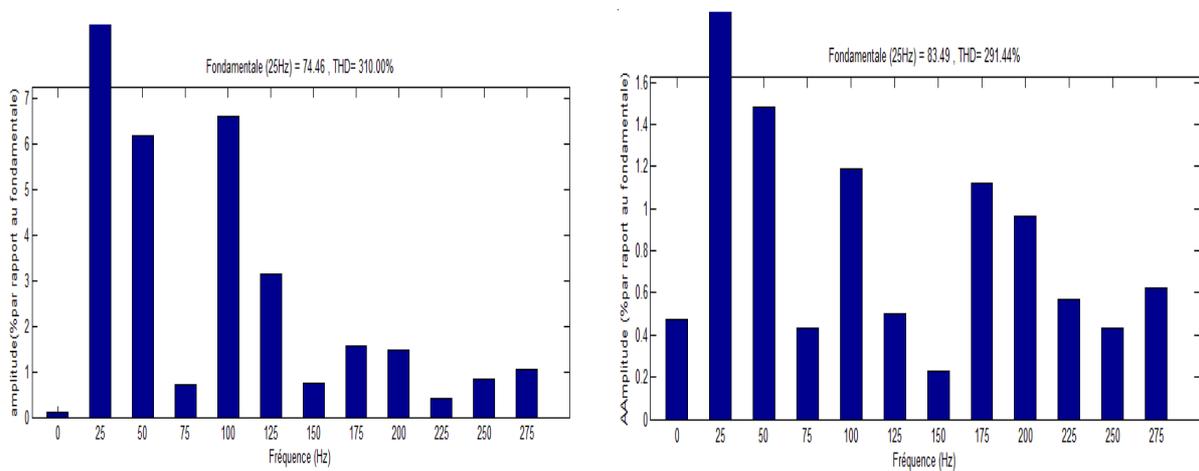
**Figure III.24:** Allures des pulsations statoriques et rotoriques.

- Les pulsations statoriques et rotoriques sont symétriques, ce qui justifie la loi de la répartition des pulsations.

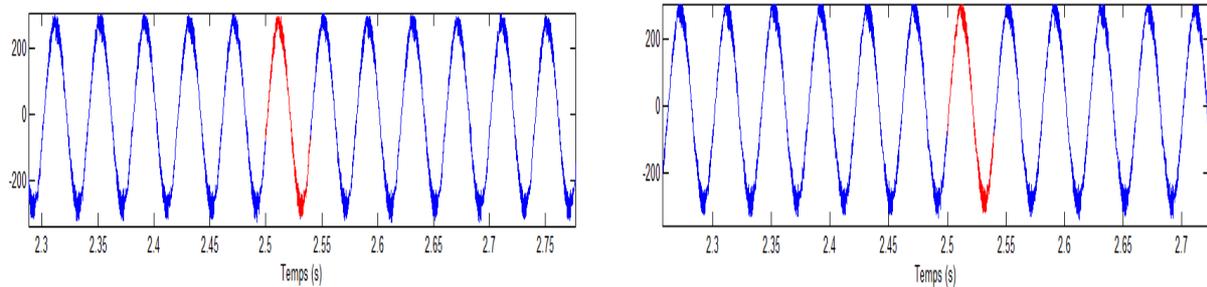
### III.6.2.1 Analyse harmoniques :



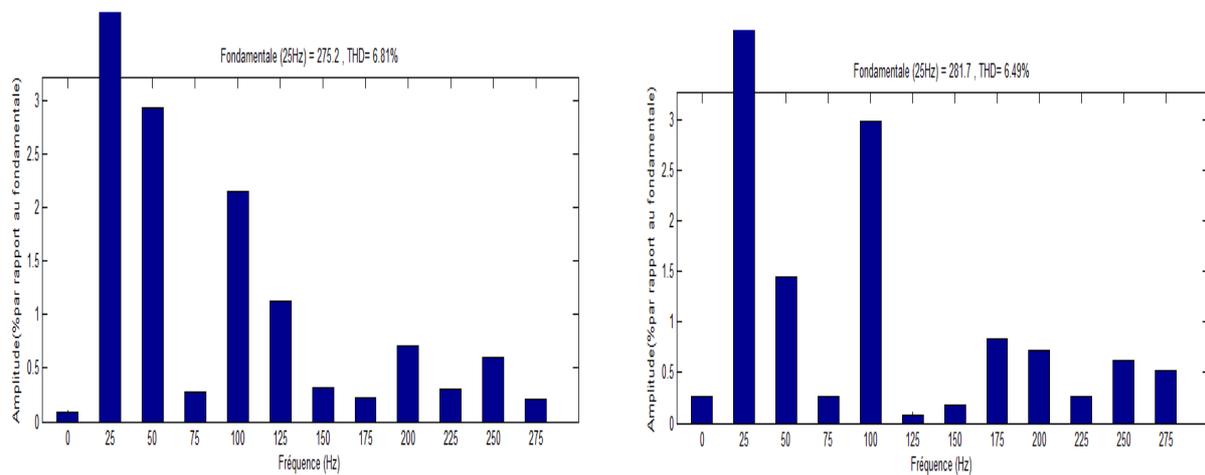
**Figure III.25:** Allures des tensions statoriques à gauche et rotoriques à droite à la vitesse 1500tr/min.



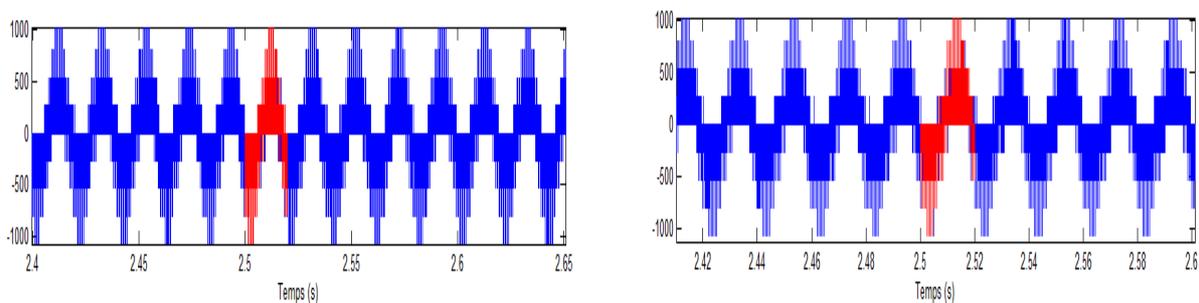
**Figure III.26:** Spectres d'harmoniques des tensions statoriques à gauche et rotoriques à droite à la vitesse 1500tr/min.



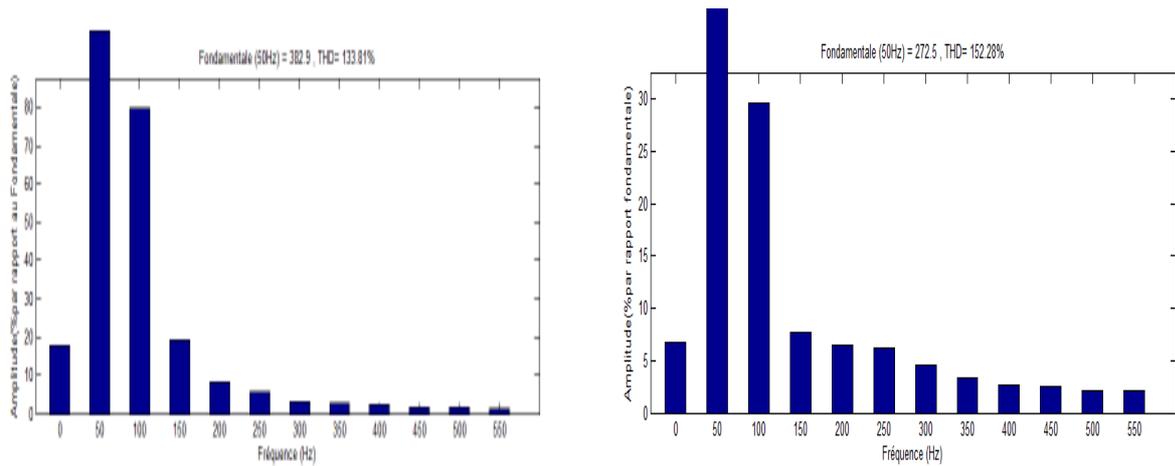
**Figure III.27:** Zooms des courants statoriques à gauche et rotoriques à droite à la vitesse 1500tr/min.



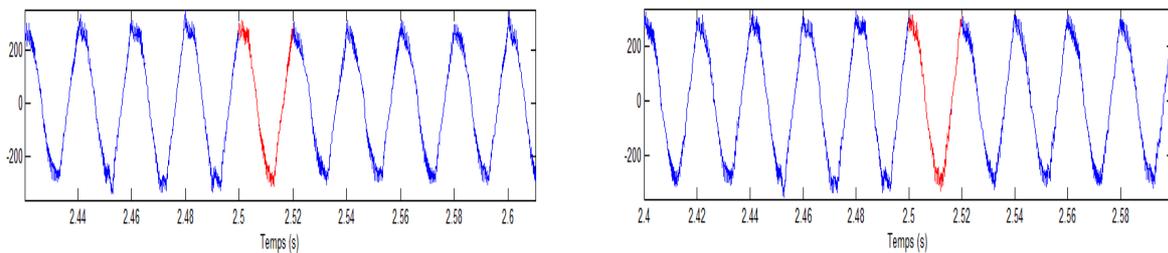
**Figure III.28:** Spectres d'harmoniques des courants statoriques à gauche et rotoriques à droite à la vitesse 1500tr/min.



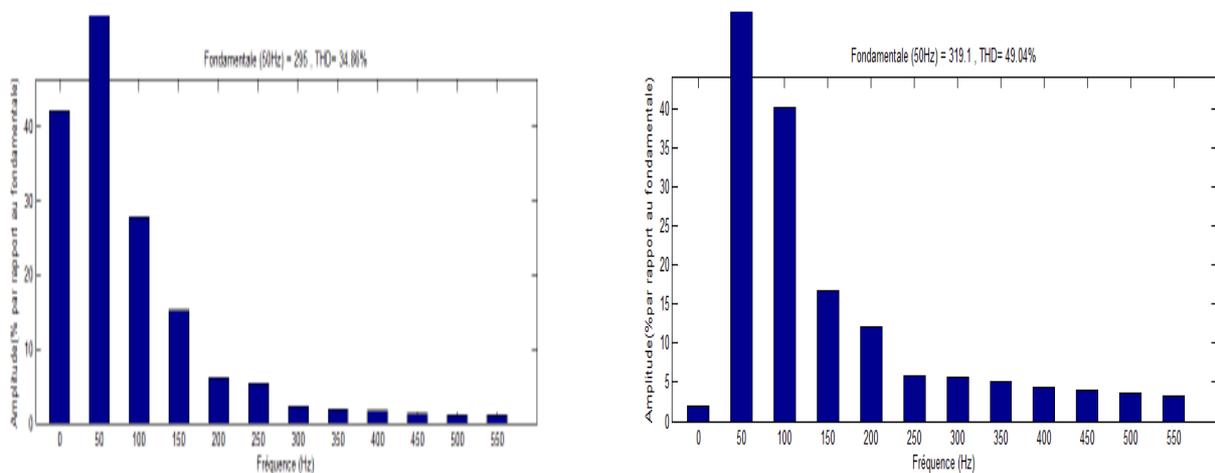
**Figure III.29:** allures des tensions statoriques à gauche et rotoriques à droite à la vitesse 3000tr/min.



**Figure III.30:** Spectres harmoniques des tensions statoriques à gauche et rotoriques à droite à la vitesse 3000tr/min.



**Figure III.31:** Zooms des courants statoriques à gauche et rotoriques à droite à la vitesse 3000tr/min.



**Figure III.32:** Spectres d'harmoniques des courants statoriques à gauche et rotoriques à droite à la vitesse 3000tr/min.

- Pour ce mode de fonctionnement, on remarque que le THD des tensions diminue en fonction de l'augmentation de la vitesse de rotation. Tandis que le THD des courants varie aussi en fonction de la vitesse. Pour une vitesse égale à 1500 tr/min, le THD des tensions statorique et rotorique égale à 310% et 291.44% respectivement. Le THD des courants statorique et rotorique égale à 6.81% et

6.49% respectivement. Les amplitudes des grandeurs rotoriques sont légèrement supérieures aux amplitudes des grandeurs statoriques. Pour une vitesse égale à 3000 tr/min, le THD des tensions statorique et rotorique égale à 133.81%, 152.28% respectivement, Le THD des courants statorique et rotorique égale à 34.86%, 49.04% respectivement.

- D'après les zooms des allures de tension statorique et rotorique pour les deux vitesses, nous constatons que la qualité du signal fournie par l'onduleur à trois niveaux est meilleure pour une vitesse égale à deux fois la vitesse nominale de la machine, cela du fait de la diminution de THD à cette vitesse.

### III.6.3 Fonctionnement moteur à vitesse fixe et à couple variable

Nous fixons la vitesse de rotation de la MADA à deux fois sa vitesse nominale (3000 tr/min) et nous appliquons un couple de charge positif (moteur) variable à l'instant 2 (s), 2.5 (s) et 3 (s) comme le montre la figure suivante:

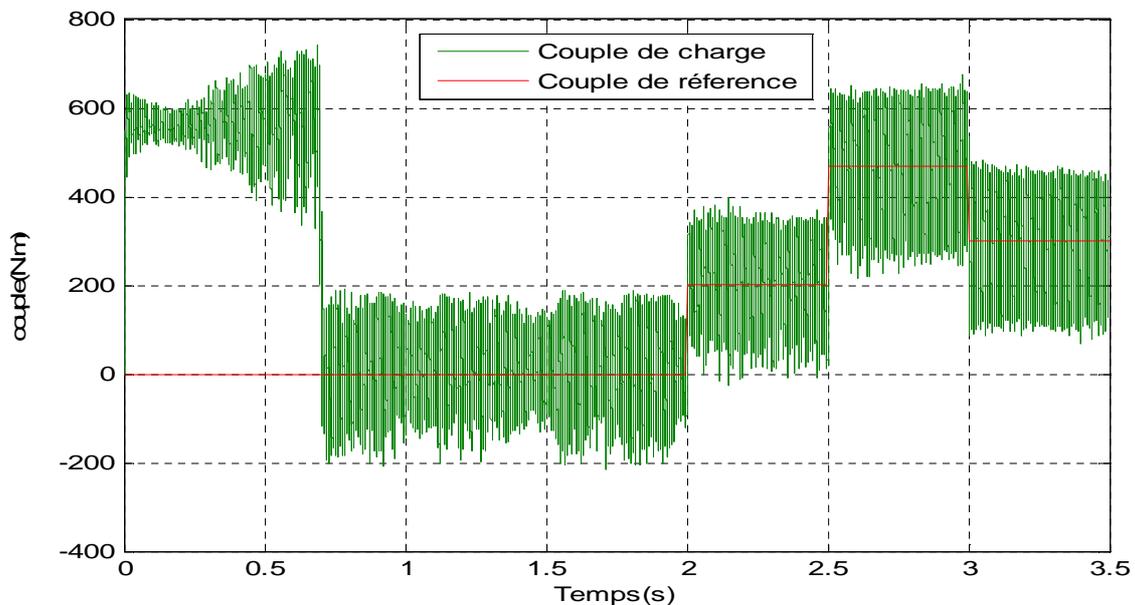
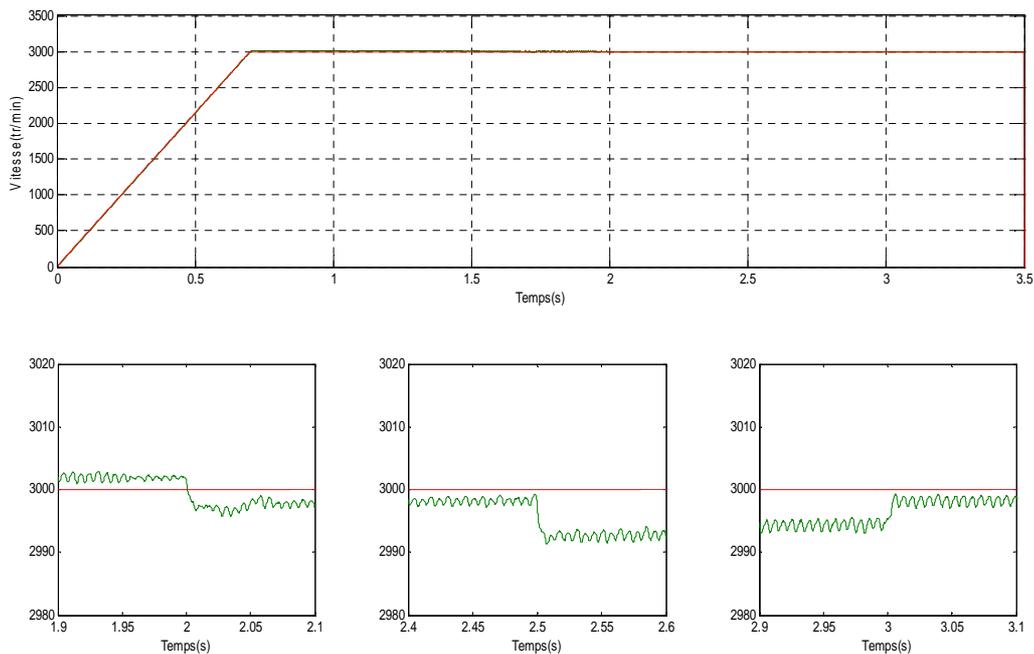
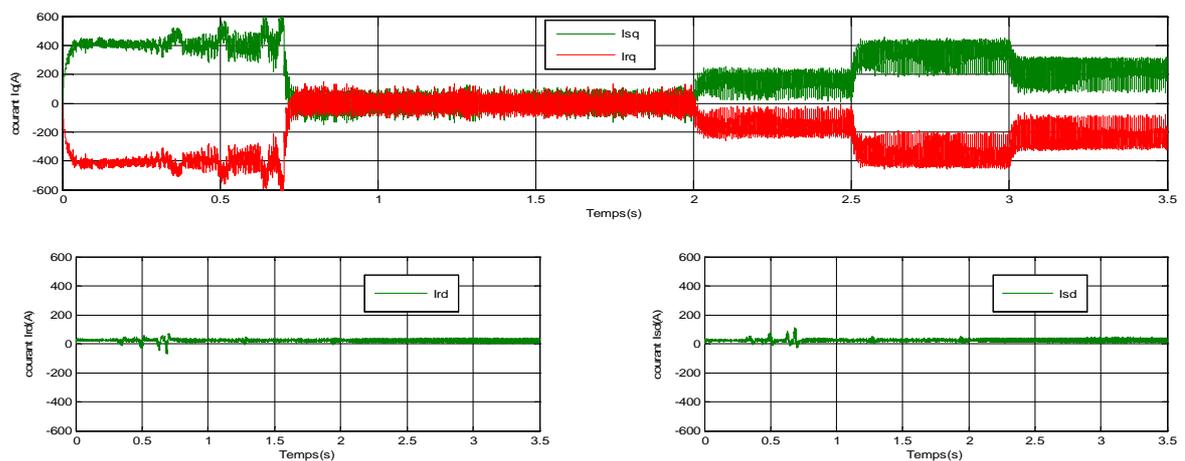


Figure III.33: Allures de couple de Charge électromagnétique et couple de référence.



**Figure III.34:** Allures de la vitesse de rotation de la MADA et de la vitesse de référence.

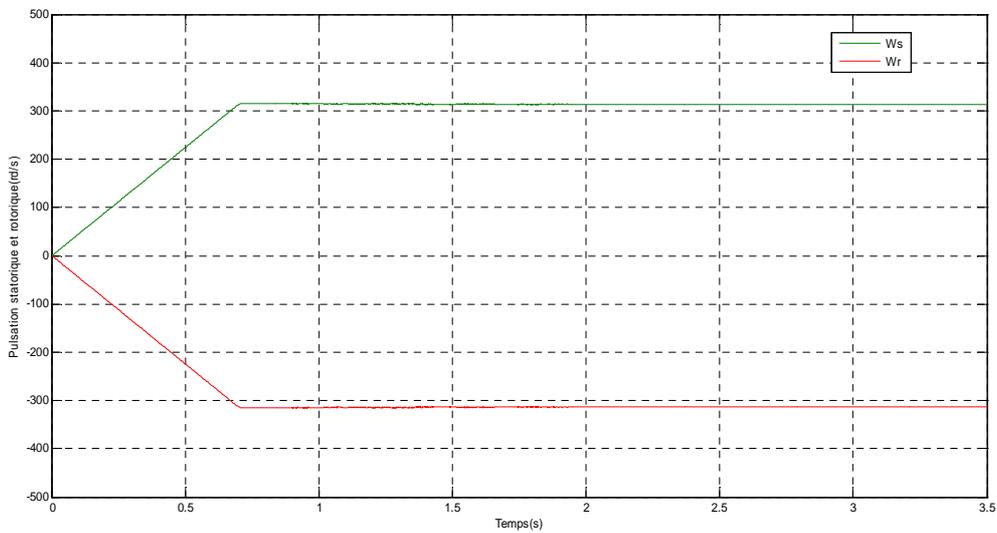
- La figure (III.34) montre l'allure de la vitesse de rotation de la MADA et la vitesse de référence, nous remarquons que la variation du couple de charge engendre des petites perturbations sur la vitesse de rotation ses perturbation sont éliminées après peu de temps par les régulateurs.



**Figure III.35:** Allures des courants statoriques et rotoriques.

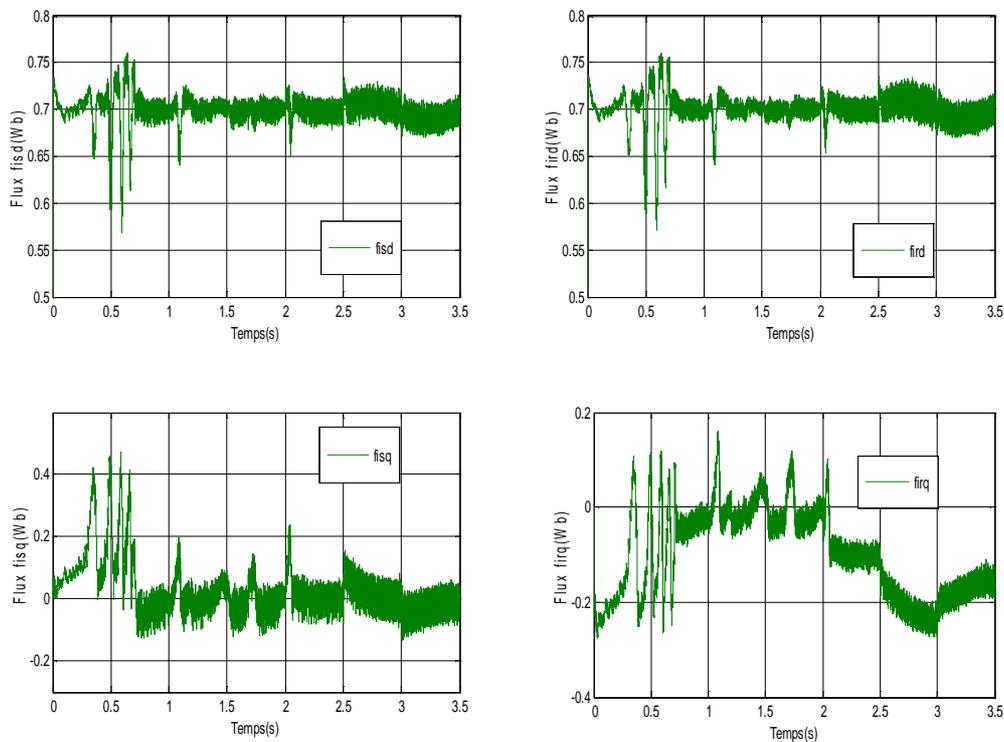
- Nous remarquons sur la figure (III.35) que les allures des courants ( $I_{qs}$  et  $I_{qr}$ ) varient en fonction de la variation du couple de charge, tel que les courants diminues et

augmente en fonction de l'augmentation ou de la diminution de couple de charge respectivement.



**Figure III.36:** Allures des pulsations statoriques et rotoriques.

- D'après la figure III.36 nous remarquons que les pulsations statoriques et rotoriques sont toujours symétriques par rapport à l'axe du temps.



**Figure III.37:** Allures des flux statoriques et rotoriques.

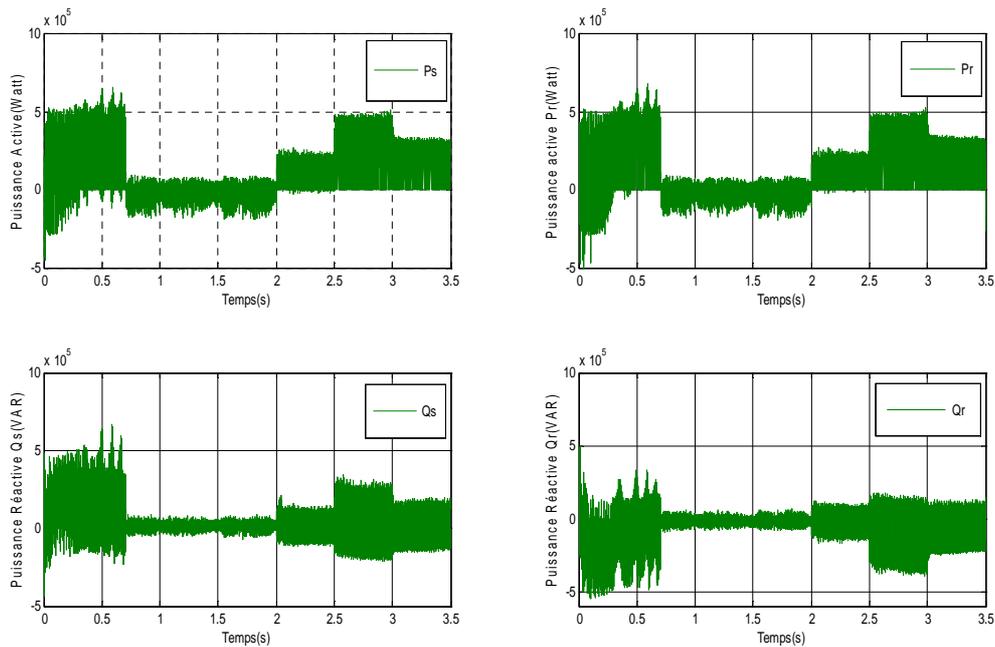


Figure III.38: Allures des puissances statoriques et rotoriques.

### III.6.4 Fonctionnement génératrice à vitesse fixe et à charge variable :

Nous fixons la vitesse de rotation de la MADA a deux fois sa vitesse nominale (3000 tr/min) et on applique un couple de charge négatif (générateur) variable a l’instant 2 (s) , 2.5 (s) et 3 (s) comme le montre la figure suivante :

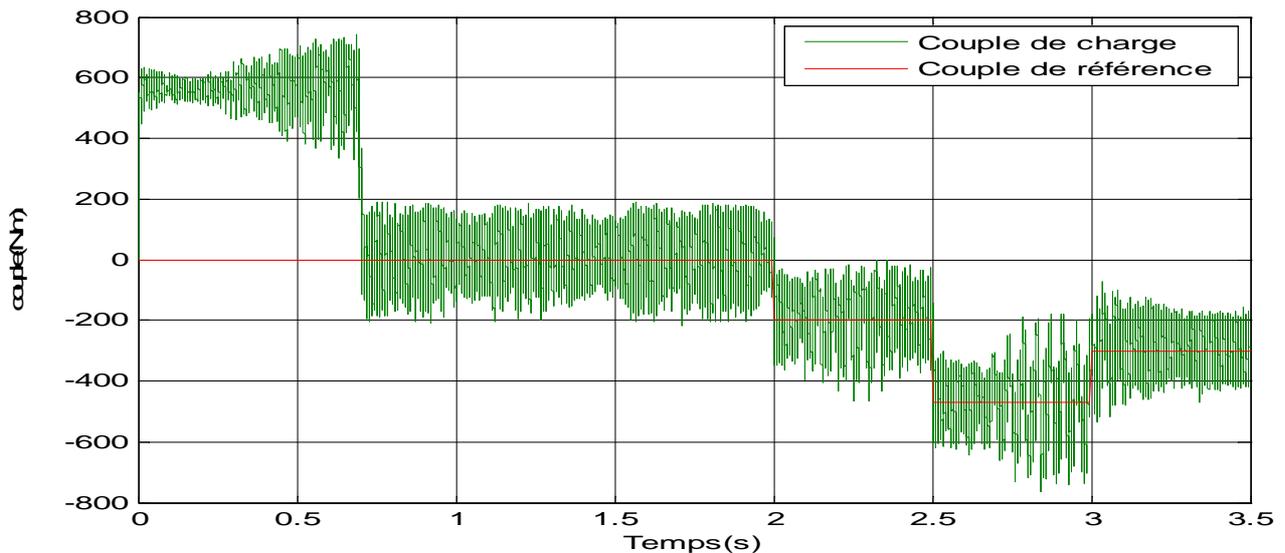


Figure III.39 : Allures de couple de Charge électromagnétique et couple de référence.

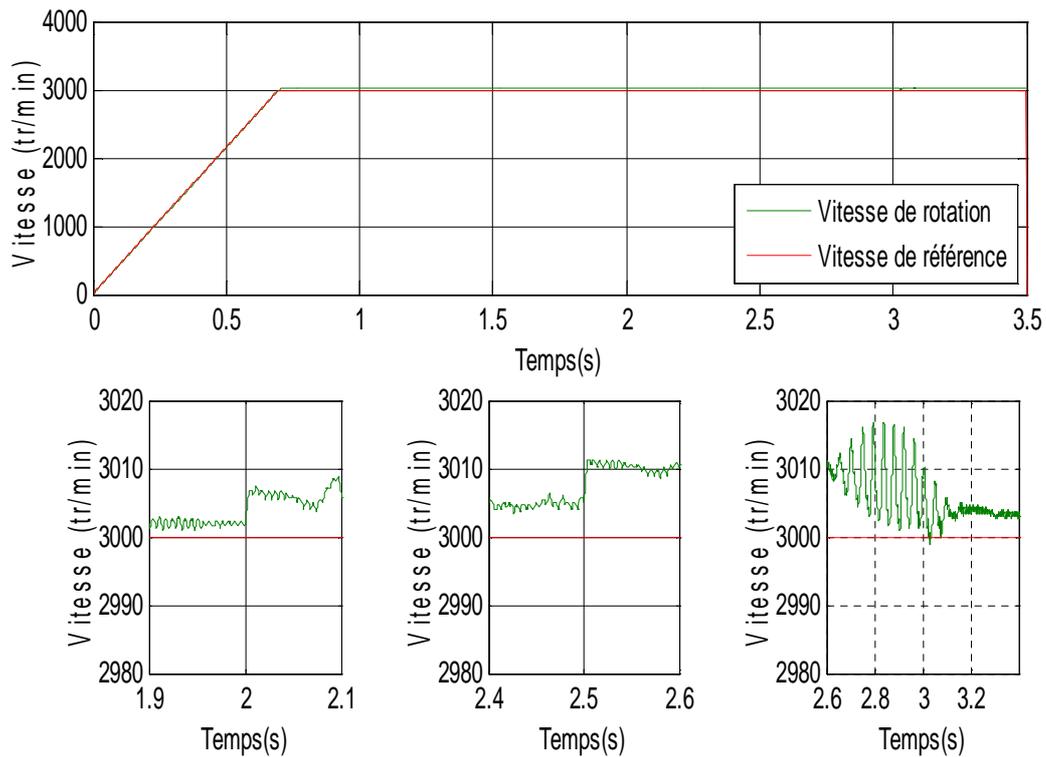


Figure III.40 : Allures de la vitesse de rotation de la MADA et de la vitesse de référence.

- La figure (III.40) montre l'allure de la vitesse de rotation de la MADA et la vitesse de référence, on remarque que la variation du couple de charge engendre des petites perturbations sur la vitesse de rotation ses perturbation sont éliminées après peu de temps par les régulateurs.

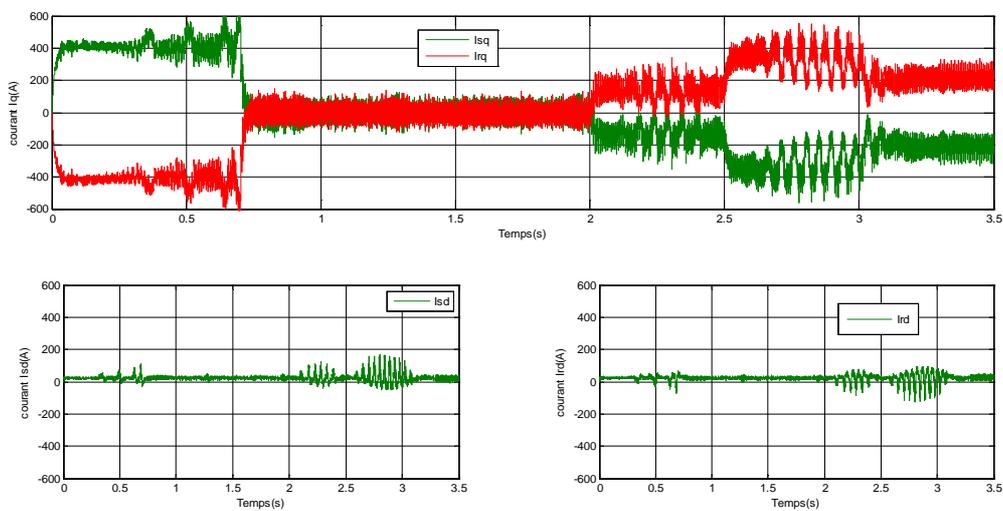


Figure III.41: Allures des courants statoriques et rotoriques.

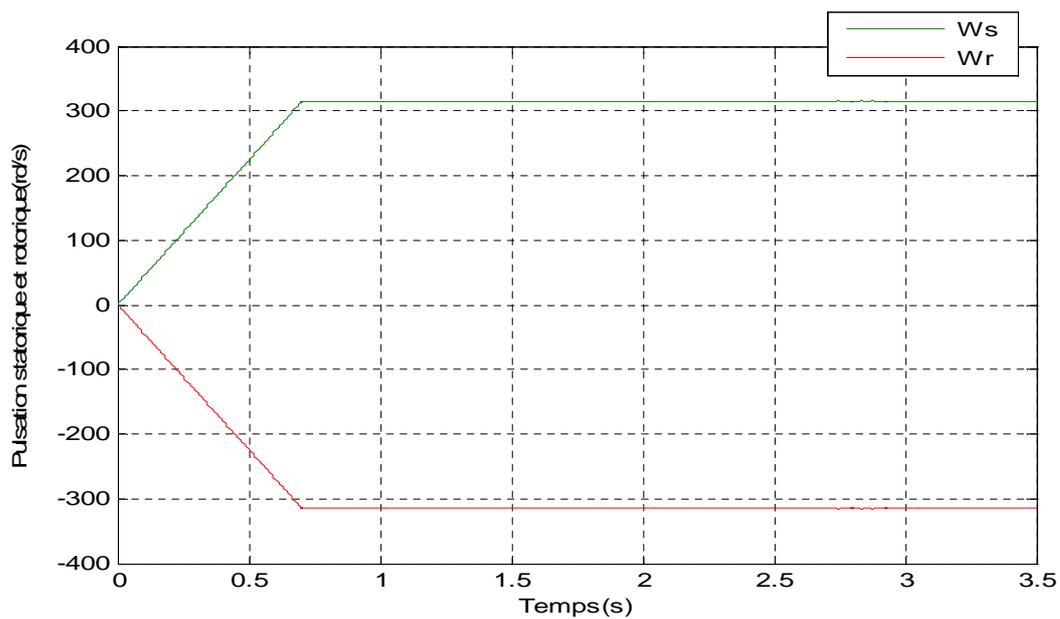


Figure III.42: Allures des pulsations statoriques et rotoriques

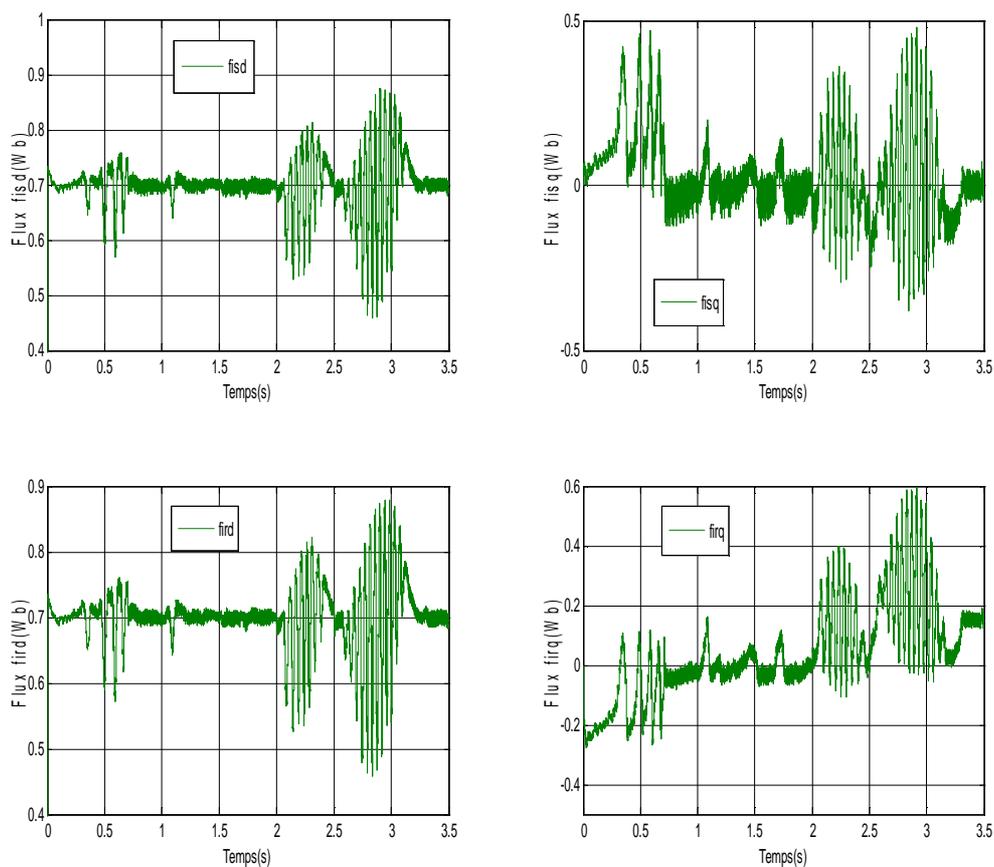


Figure III.43: Allures des flux statoriques et rotoriques.

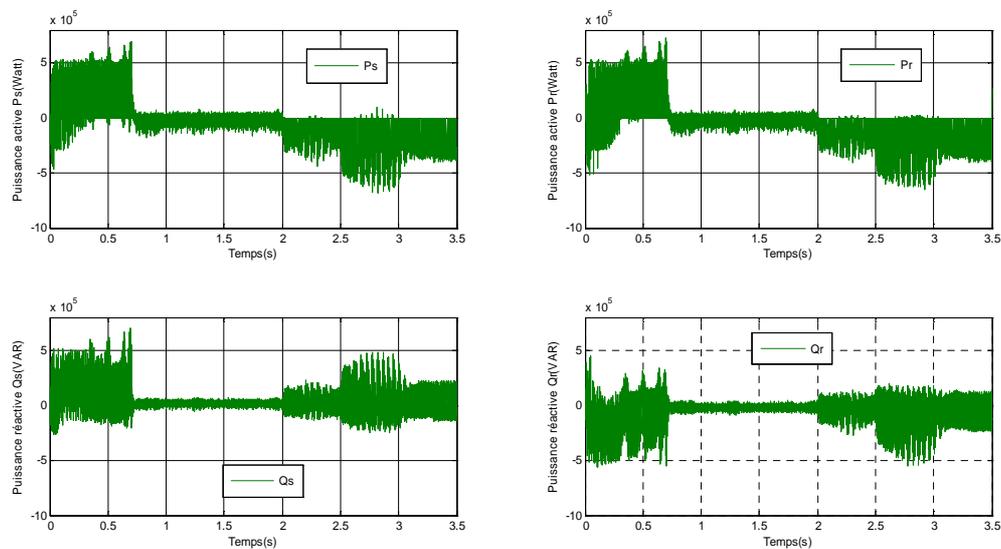


Figure III.44: Allures des puissances statoriques et rotoriques.

### III.7 Conclusion

Au cours de ce chapitre nous avons présenté la commande vectorielle à flux statorique orienté selon l'axe direct, le contrôle de vitesse et de courants est assuré par des régulateurs PI. Cette commande a été intégrée dans notre système qui se constitue de deux onduleurs à trois niveaux et la MADA que nous avons modélisé dans le chapitre précédent. D'après l'analyse des résultats obtenus pour les différents modes de fonctionnements, on constate que la loi de répartition des pulsations statoriques et rotoriques nous a permis de faire fonctionner la machine dans une large plage de variation de vitesse jusqu'à deux fois la vitesse nominale ainsi que pour les vitesses inférieures à celle-ci, avec de bonnes performances statiques et dynamiques. L'analyse des spectres harmoniques pour la tension fournie par l'onduleur, nous confirme que les onduleurs de tension sont une source d'harmoniques. La commande MLI sinus triangle a pour but de rejeter les harmoniques indésirables vers les fréquences élevées.

D'après les allures de tensions statoriques et rotoriques pour les deux vitesses, on constate que la qualité du signal fournie par l'onduleur à trois niveaux est meilleure pour une vitesse égale à deux fois la vitesse nominale de la machine, cela dû au fait de la diminution de THD de la vitesse.

# Conclusion Générale

L'objectif principal de ce mémoire est de réaliser la commande vectorielle d'une machine asynchrone à double alimentation, alimentée à travers deux onduleurs à trois niveaux, l'un alimente le stator et l'autre alimente le rotor en utilisant l'environnement SIMULINK du logiciel MATLAB, cela afin d'étudier les performances de la MADA dans ce cas.

Le premier chapitre de ce travail a été consacré à la présentation d'une étude théorique sur la machine asynchrone à double alimentation concernant ses modes de fonctionnement, ses avantages et inconvénients et évaluer les performances apportées par cette machine.

A partir de premier chapitres on a conclu que la machine à double alimentation trouve un domaine d'application très vaste, soit dans les systèmes de génération a vitesse variable comme la génération de l'énergie électrique à partir des puissances éoliennes et hydraulique, ou dans les systèmes d'entraînement a vitesse variable tel que l'entraînement des ventilateurs et des pompes d'eau, en tant que moteur pour certaines applications industrielles comme le laminage, la traction ferroviaire ou encore la propulsion maritime. Cela grâce aux nombreux avantages par rapport au moteur asynchrone et synchrone surtout en ce qui concerne la capacité de fonctionner en vitesses élevées avec des fortes puissances.

Dans le deuxième chapitre on a modélisé la machine asynchrone à double alimentation, un modèle de la machine asynchrone dans le repère de Park à l'aide de logiciel MATLAB Simulink a été réalisé, après on a présenté la modélisation de l'onduleur à trois niveaux de type NPC ainsi que la stratégie de commande MLI sinus triangle à double triangles, comme on a simulé le modèle réalisé

D'après Les résultats des deux simulations de chapitre deux on a conclu que le modèle de la machine asynchrone fonctionne en mode moteur ainsi qu'en mode générateur. Les résultats obtenus par le modèle de l'onduleur trois niveaux commandé par la technique choisie vue la simplicité de modélisation étaient satisfaisants.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation de la commande vectorielle et la simulation de la machine asynchrone à double alimentation alimentée par deux onduleurs trois niveaux sur le logiciel MATLAB(Simulink), les résultats de cette simulation et leurs interprétations sont donnés.

D'après les résultats de simulation de chapitre trois on a conclu que la loi de répartition des pulsations statoriques et rotoriques nous a permis de faire fonctionner la machine dans une large plage de variation de vitesse jusqu'à deux fois la vitesse nominale ainsi que pour les vitesses inférieures à celle-ci, avec de bonnes performances statiques et dynamiques. L'analyse des spectres harmoniques pour la tension fournie par l'onduleur, nous confirme que les onduleurs de tension sont une source d'harmoniques. La commande MLI sinus triangle a rejeté les harmoniques indésirables vers les fréquences élevées.

Enfin, comme perspectives à ce travail, il convient de proposer des solutions afin d'améliorer les performances de la machine :

Les résultats obtenus sont acceptables dans la mesure de la simulation. Comme perspective pour ce travail afin d'améliorer les résultats, une étude plus poussée en effectuant:

- La réalisation de l'onduleur à trois niveaux commandé par la commande vectorielle.
- La Régulation par logique floue de la vitesse de la MADA
- Contribution à un système de filtrage.
- Pour améliorer les performances du dispositif de commande de l'onduleur, il faut trouver une stratégie de modulation à fréquence de modulation fixe.
- La réalisation de l'onduleur de tension à N niveaux commandé par la technique MLI vectorielle, en implémentant cet algorithme dans un DSP.

### Bibliographie

- [1] : R.Babouri, Amélioration des performances des convertisseurs électromécaniques basés sur les machines asynchrones doublement alimentées » Thèse doctorat, 2016, Université de Béjaïa, Algérie.
- [2] : Y.Bekakra, Étude et commande du moteur asynchrone à double alimentation (MADA) par différentes technique avancées » thèse doctorat, 2010 université d'El-oued, Algérie
- [3] : H.BEN ZEMAMOUCHE, Application de la MLI Vectorielle aux onduleurs multiniveaux à base de GTO et d'IGBT, Mémoire Magister, 2010, Université de Annaba, Algérie.
- [4] : H.BRIGHEN et S.HALAIMIA, Étude et analyse de la commande des onduleurs Multi-niveaux par MLI sinusoïdale, Mémoire Master, 2016, Université de Tébessa, Algérie.
- [5] : A.BOUKANDOUL, Étude et réalisation d'un onduleur multiniveaux à topologie cascadée, Mémoire Magister, 2013, Université de Bejaïa, Algérie.
- [6] : B.REBAOUI, Étude du déséquilibre de l'alimentation d'un onduleur multi niveaux, Mémoire Magister, 2014 Université d'Oran, Algérie.
- [7] : K.BENMANSOUR, Réalisation d'un banc d'essai pour la Commande et l'Observation des Convertisseurs Multicellulaires Série: Approche Hybride, Thèse de Doctorat, 2010, Université de Cergy Pontoise, France.
- [8] : J.MARIÉTHOZ Étude formelle pour la synthèse de convertisseurs multiniveaux asymétrique : Topologies, Modulation et commande », Thèse NO 3188, 2005.
- [9] : JP.Caron, JP.Hautier, Convertisseurs Statiques- Méthodologie Causale de Modélisation et de Commande Éditions Technip,1999 , Université de Paris, France.
- [10] : H. IDJOUADIEN, S.IRBAH. Commande non linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation. Mémoire de fine d'étude, 2007, Université de bejaia, Algérie.
- [11] : A.Dendouga, Contrôle des puissances active et réactive de la machine à double alimentation. Thèse de doctorat, 2009, Université de Batna, Algérie.
- [12] : F.MERRAHI, Alimentation et Commande d'une machine asynchrone à Double Alimentation (Application à l'énergie éolienne), Mémoire de Magister, 2007, université de Bejaia, Algérie.
- [13] R.Azaizia, Études et commande d'une machine asynchrone à double alimentation alimentée par un convertisseur multiniveaux, Mémoire Magister 2008, Boumerdas, Algérie.

[14] R.Babouri, Contrôle commande de la machine asynchrone la machine à double alimentation dans les quatres quadrants couple-vitesse, Mémoire Master, 2010 Université de Bejaïa, Algérie.

## Annexes

### Paramètres de la MADA :

$$P_n = 75 \text{ kW}$$

$$V_n = 400 \text{ V}$$

$$C_n = 477 \text{ N.m}$$

$$\Omega_n = 1500 \text{ tr/min}$$

$$R_s = 0.03552 \ \Omega$$

$$R_r = 0.02092 \ \Omega$$

$$L_s = 0.01545 \text{ H}$$

$$L_r = 0.01545 \text{ H}$$

$$M = 0.0151 \text{ H}$$

$$j = 1.25 \text{ kg.m}^2$$

$$K_f = 0.0394 \text{ N.m.s/rd}$$

$$p = 2$$

- **Paramètre de simulation:**

$$E = 800 \text{ V}$$

$$f_{p1} = f_{p2} = 2000 \text{ Hz}$$

$$A_{p1} = A_{p2} = 2000 \text{ V}$$

$$\Phi_s^* = \frac{V_{eff}}{2.\pi.f} = \frac{220}{2.\pi.50} = 0.7 \text{ Wb}$$

- **Calcule des gains pour les régulateurs de courants :**

a) Pour le stator :

$$k_i = 1.8695 \text{ et } k_p = 0.1067$$

b) Pour le rotor :

$$k_i = 1.1011 \text{ et } k_p = 0.0364$$

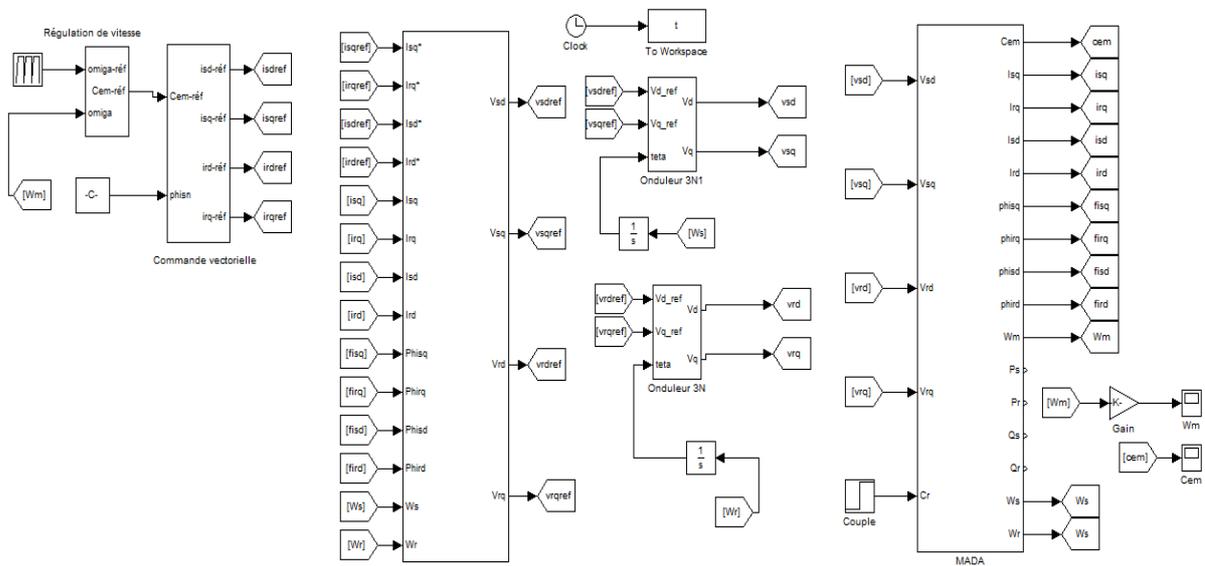
- **Calcul des gains pour le régulateur de vitesse :**

On prend :  $\tau = 0.019 \text{ s}$

$$k_i = \frac{K_f}{\tau} = \frac{0.0394}{0.019} = 2.0737$$

$$k_p = \frac{j}{\tau} = \frac{1.25}{0.019} = 65.7895$$

- **Présentation du système étudié sur MATLAB SIMULINK :**





## **Résumé**

Ce mémoire port sur l'étude des performances d'une machine asynchrone à double alimentations (MADA), alimenté par deux convertisseurs à trois niveaux, l'un alimente le stator et l'autre le rotor. Pour ce faire nous avons d'abord présenté des généralités sur les convertisseurs multiniveaux ainsi que la MADA, ensuite nous avons présenté un modèle mathématique de la MADA que nous avons simulé en utilisant MATLAB ainsi que le modèle de connaissance et la stratégie de commande sinus triangle de l'onduleur servant à alimenter notre machine. Enfin La commande vectorielle à orientation de flux statorique a été également étudié, elle permet le découplage entre le flux et le couple, les résultats de simulation montre que l'objective assigné a été atteint.

## **Abstract**

This memory concerns the study of the performances of a dual power induction machine (MADA) powered by two converters with three levels, one supplying the stator and the other the rotor. To do this we first presented generalities on multilevel converters and MADA, then we presented a mathematical model of the MADA that we simulated using MATLAB as well as the knowledge model and the control strategy sinus triangle of the inverter used to power our machine. Finally the vector control with stator flux orientation was also studied, it allows the decoupling between the flux and the torque, the simulation results shows that the assigned objective has been reached.

**Mots-clés** : MADA ; MLI ; Commande vectorielle ; Convertisseurs ; Performances ; Robustesse.