



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Republique Algerienne Democratique Et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة العربي التبسي - تبسة

Université Larbi Tébessi- Tébessa –

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de GENIE ÉLECTRIQUE.



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de Master Académique

En : Génie électrique

Spécialité : Electrotechnique industrielle

PAR:

MAHALLEM Nour elhouda

MENASSEL Wafa

Sujet

Commande vectorielle d'une machine asynchrone associée à un onduleur multi- niveaux

Présenté et soutenu publiquement, le 20/06/2021, devant le jury composé de :

M/ OUNNAS Djamel	MCB	Président
Mme/BOUGUERNE Abla	MCB	Rapporteur
M/ BENDAKIR Abdelhakim	MAA	Examineur

Promotion : 2020/2021

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciment

À la fin de cet humble travail, nous remercions d'abord le Dieu Tout-Puissant de lui avoir donné le courage, la volonté et la patience d'achever ce travail.

Tout d'abord, nous tenons à remercier très chaleureusement notre directeur de recherche "**Mme BOUGUERNE Abla** " nous a donné le privilège d'accepter la direction de ce travail, sa gentillesse, son humilité et sa riche expérience, ainsi que ses opinions directrices pour mener à bien ce travail.

Nous adressons également nos sincères remerciements à tous **les membres du jury**, qui nous ont accordé un temps précieux pour évaluer ce travail, et ont pris le temps de lire ce travail ainsi que leurs commentaires et critiques.

Nous remercions également tous **les professeurs du département** de génie électrique de l'Université Al-Arabi AlTebssi Tébessa Depuis que nous sommes entrés à l'université, vous avez soutenu tous leurs efforts

Nous sommes profondément reconnaissants à nos **parents** pour leurs encouragements, leur soutien et leurs sacrifices.

Nous tenons également à exprimer notre gratitude à tous nos **amis**, qui ont créé une atmosphère de travail parfaite avec leur amitié et un bon sens de l'humour.



Dédicace

Mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse,

leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

A mes chères sœurs pour leurs encouragements permanents,

et leur soutien moral

A mes chers frères, pour leur appui et leur encouragement

A tout ma famille pour leur soutien tout au long de

mon parcours universitaire

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués,

et le fruit de votre soutien infaillible

Merci d'être toujours là pour moi

MENASSEL Wafa



Dédicace

*Tout d'abord, je remercie Allah Taalla Tout-Puissant de
m'avoir donné le courage et la patience de mener à bien ce
travail malgré toutes les difficultés.*

Je m'engage dans cet humble travail:

*Pour mes chers **parents**, que **Dieu** les bénisse et les protège pour
obtenir leur soutien moral et financier, leurs encouragements
et leurs sacrifices.*

*À mes frères: **Abdallah, Oussama***

*À ma sœur: **Asma***

*Pour ma grande famille : **Mahalle***

*Pour ma deuxième famille : **Haouam***

*Montrez tout le respect que je dois à mon fiancé **Badis**.*

*Chers amis: **Abir, Sara, Halima, Nora,** ...*

*À tous les amis (es) d'études surtout ceux
d'électrotechnique*

MAHALLEM Nour elhouda

Sujet

Commande vectorielle d'une machine asynchrone associée à un onduleur multi-niveaux

ملخص

يتطلب استخدام آلات كهربائية ذات طاقة عالية وجود فولتية عالية، ولهذا الغرض، تستخدم المعكوسات المتعددة على نطاق واسع في ربط هذا النوع من الآلات بينها وهذه الخصائص لتشغيل طاقة عالية وفولتية عالية. هذه الذاكرة مكرسة للدراسة مع مقارنة بين مستويين وثلاثة معكوسات مرتبطة بألة غير متزامنة. ويتم محاكاة ومناقشة الأداء الثابت والديناميكي للآلات وكذلك التحليل الطيفي للتيارات والتوترات في ناتج المقلوب من حيث معدل النمو العالي من أجل التحقق من كفاءة وأداء المقاربات. **الكلمات المفتاحية:** مغالطات متعددة المستويات، آلة غير متزامنة، تحكم، محاكاة، أداء ثابتو ديناميكي.

Résumé

L'utilisation des machines électriques de forte puissance exigent une forte tension d'alimentation, à cet effet les onduleurs multi-niveaux sont largement utilisés dans l'association de ce type des machines à cause de sa construction et ces propriétés au fonctionnement à forte puissance et à haute tension. Ce mémoire est consacré à l'étude avec comparaison des onduleurs deux et à trois niveaux associé à une machine asynchrone. Les performances statiques et dynamiques de la machines ainsi que l'analyse spectrale des courants et des tensions à la sortie de l'onduleur en termes de THD sont simulé et discuté afin de valider l'efficacité et les performances des onduleurs.

Mots clés : Onduleurs multi-niveaux, machine asynchrone, commande, simulation, performances statiques et dynamiques.

Abstract

The use of high power electrical machines require a high supply voltage, for this purpose multi-level inverters are widely used in the association of this type of box machines of its construction and these properties with high power operation and high voltage. This thesis is devoted to the study with a comparison of two and three-level inverters associated with an asynchronous machine. The static and dynamic performance of the machine as well as the spectral analysis of the currents and voltages at the output of the inverter in terms of THD are simulated and discussed in order to validate the efficiency and performance of the inverters.

Keywords: Multi-level inverters, asynchronous machine, control, simulation, static and dynamic performances.

Liste de Figures

Chapitre I		
Figure.1.1	différents éléments d'un moteur à rotor à bagues	8
Figure.1.2	différents éléments d'un moteur à cage d'écureuil	8
Figure.1.3	Représentation des enroulements de la machine asynchrone triphasée dans le repère (abc)	9
Figure.1.4	Représentation du passage d'un système triphasé à celui biphasé	12
Figure.1.5	schéma bloc de machine asynchrone	15
Figure.1.6	tensions du réseau d'alimentation	16
Figure.1.7	Courants (i_d , i_q) du stator (Marche à vide : $C_r=0$)	16
Figure.1.8	Couple électromagnétique (Marche à vide : $C_r=0\text{Nm}$)	16
Figure.1.9	Vitesse de rotation de la machine (Marche à vide : $C_r=0\text{Nm}$)	17
Figure.1.10	Courants (i_d , i_q) du stator (Marche en charge : $C_r=10$ à 1s)	17
Figure.1.11	Couple électromagnétique (Marche en charge $C_r=10\text{Nm}$ à 1s)	18
Figure.1.12	Vitesse de rotation de la machine (Marche en charge $C_r=10\text{Nm}$ à 1s)	18
Chapitre II		
Figure.2.1	Schéma de principe de la conversion Continu - Alternative (DC – AC)	20
Figure.2.2	Onduleur de courant triphasé à deux niveaux	21
Figure.2.3	Onduleur de tension triphasée à deux niveaux	22
Figure.2.4	Structure d'un onduleur à deux niveaux	23
Figure.2.5	Schéma de principe de la MLI sinus-triangle	25
Figure.2.6	Simulation de la porteuse et la modulante	25
Figure.2.7	Schéma bloc de la simulation d'un onduleur à deux niveaux avec charge RL	26
Figure.2.8	Tension simple de sortie d'un onduleur à deux niveaux	26
Figure.2.9	Spectre harmonique de la tension de sortie simple d'un onduleur à deux niveaux	27
Figure.2.10	Tension composée de sortie d'un onduleur à deux niveaux	27
Figure.2.11	Courant de sortie d'un onduleur à deux niveaux pour une charge RL	28
Figure.2.12	Spectre harmonique du courant de sortie d'un onduleur à deux niveaux pour une charge RL	28
Figure.2.13	Structure de l'onduleur triphasé à trois niveaux	29
Figure.2.14	Structure d'un bras d'onduleur triphasé à trois niveaux	30
Figure.2.15	Interrupteur bidirectionnel équivalent de la paire diode-transistor	30
Figure.2.16	Les différentes configurations possibles pour un bras d'onduleur à trois niveaux	31
Figure.2.17	Le schéma bloc de la technique de commande à MLI d'un seul bras d'un onduleur à trois niveaux	32
Figure.2.18	Simulation des deux porteuses et la modulante	32
Figure.2.19	Schéma bloc de la simulation d'un onduleur à trois niveaux avec charge RL	33
Figure.2.20	Tension simple de sortie d'un onduleur à trois niveaux	33

Figure.2.21	Spectre harmonique de la tension simple de sortie d'un onduleur à trois niveaux	34
Figure.2.22	Tension composée de sortie d'un onduleur à trois niveaux	34
Figure.2.23	Courant de sortie d'un onduleur à trois niveaux pour une charge RL	35
Figure.2.24	Spectre harmonique du courant de sortie d'un onduleur à trois niveaux pour une charge RL	35
Figure.2.25	Structure de l'onduleur triphasé à cinq niveaux à diodes flottantes	36
Figure.2.26	Les différentes configurations possibles pour un bras k de l'onduleur à cinq niveaux à diodes flottantes	37
Figure.2.27	Un bras de l'onduleur à cinq niveaux à diodes flottantes	38
Figure.2.28	Le schéma bloc de la technique de commande à MLI d'un seul bras d'un onduleur à cinq niveaux	38
Figure.2.29	Simulation des deux porteuses et la modulante	39
Figure.2.30	Schéma bloc de la simulation d'un onduleur à cinq niveaux avec charge RL	39
Figure.2.31	Tension simple de sortie d'un onduleur à cinq niveaux	40
Figure.2.32	Spectre harmonique de la tension simple de sortie d'un onduleur à cinq niveaux	40
Figure.2.33	Tension composée de sortie d'un onduleur à cinq niveaux	41
Figure.2.34	Courant de sortie d'un onduleur à cinq niveaux pour une charge RL	41
Figure.2.35	Spectre harmonique du courant de sortie d'un onduleur à cinq niveaux pour une charge RL	41
Chapitre III		
Figure. 3.1	Structure de commande vectorielle	43
Figure. 3.2	Reconstitution des tensions V_{sd} et V_{sq}	45
Figure. 3.3	Commande découplé de isq et isd	45
Figure. 3.4	Commande découplé de φ_r et C_{em}	45
Figure. 3.5	Schéma de la régulation de la vitesse	47
Figure. 3.6	Schéma de régulation du couple	48
Figure. 3.7	Schéma fonctionnel de la régulation du flux	49
Figure. 3.8	Schéma bloc de la simulation d'un onduleur à deux niveaux avec machine asynchrone	50
Figure. 3.9	Courants statoriques de la machine pour un onduleur à deux niveaux	50
Figure.3.10	Courants rotoriques de la machine pour un onduleur à deux niveaux	51
Figure.3.11	Vitesse de rotation de la machine pour un onduleur à deux niveaux	51
Figure.3.12	Couple électromagnétique de la machine pour un onduleur à deux niveaux	51
Figure.3.13	Schéma bloc de la simulation d'un onduleur à trois niveaux avec machine asynchrone	52
Figure.3.14	Courants statoriques de la machine pour un onduleur à trois niveaux	53
Figure.3.15	Courants rotoriques de la machine pour un onduleur à trois niveaux	53
Figure.3.16	Vitesse de rotation de la machine pour un onduleur à trois niveaux	53

Figure.3.17	Couple électromagnétique de la machine pour un onduleur à trois niveaux	54
Figure.3.18	Modèle de simulation de la commande vectorielle	55
Figure.3.19	La vitesse de rotation	56
Figure.3.20	Le couple électromagnétique	56
Figure.3.21	Le courant statorique de repère q	57
Figure.3.22	Le courant statorique de repère d	57
Figure.3.23	Le flux rotorique de repère q	57
Figure.3.24	Le flux rotorique de repère d	58

Liste des tableaux

Chapitre II		
Tab (2.1)	Grandeurs électriques correspondantes pour chacune des configurations d'un bras k.	31
Tab (2.2)	Grandeurs électriques correspondantes pour chacune des configurations d'un brask	37
Chapitre II		
Tab (3.1)	Tableau de comparaison entre un onduleur à deux, trois et cinq niveaux	55

ABREVIATIONS

R_s	Resistance statorique
R_r	Resistance rotorique
L_s	Inductance statorique
L_r	Inductance rotorique
$[L_{ss}]$	matrice des inductances propres et mutuelles entre phases statoriques
$[L_{rr}]$	matrice des inductances propres et mutuelles entre phases rotoriques
L_m	Inductance mutuelle propre
M_{sr}	Inductance mutuelle entre le stator et rotor
M_{rs}	Inductance mutuelle entre le stator et rotor
M	Inductance cyclique mutuelle stator rotor
M_r	L'inductance mutuelle au rotor
M_s	l'inductance mutuelle au stator
V	tension
I	Courant
C_e	Couple électromagnétique
[P]	La matrice de transformation de Park
F	Coefficient de frottement
J	Moment d'inertie
P	Nombre de paire de pole
d et q	Axes direct et quadrature
α et β	Axes alpha et beta
ϕ	Flux
ϕ_s	vecteur flux statorique
ϕ_r	vecteur flux rotorique
ϕ^*	flux de référence
w_s	pulsation électrique statorique
w_r	pulsation électrique rotorique
w_{sl}	glissement de vitesse angulaire électrique
Ω	vitesse mécanique
Ω^*	vitesse de référence
θ_s	position angulaire du stator
θ_r	position angulaire du rotor
C_{em}	couple électromagnétique
C_r	couple résistant
V	Tension
I	courant
S	operateur de Laplace
K_p et K_I	Action proportionnelle et intégrale
T_r	constant du temps rotorique
$V_{s,a,b,c}$ et $V_{r,a,b,c}$	Tension de phase (stator rotor)
$I_{s,a,b,c}$ et $I_{r,a,b,c}$	courants statorique et rotorique de phase
Σ	coefficient de dispersion
T	Temps continu

ABREVIATIONS

MAS	machine asynchrone
MCC	machine à courant continue
MLI	modulation de largeur d'impulsion
PI	régulateur proportionnel intégrale
M	L'indice de modulation
R	Le coefficient de réglage en tension
K	Le gain
THD	Le taux de distorsion harmonique
THDV	Le réglage du taux de distorsion tension
THDI	Le réglage du taux de distorsioncourant

SOMMAIRE

Sommaire

Résumé

Liste des figures

Liste des Tableaux

Symboles

Introduction générale

CHAPITRE I :MODELISATION ET SIMULATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE

1.1 Introduction.....	7
1.2 Constitution de la machine asynchrone.....	7
1.2.1 Stator.....	7
1.2.2 Rotor.....	7
1.2.2.1 Moteur asynchrone à rotor bobiné.....	7
1.2.2.2 Moteur asynchrone à cage d'écureuil.....	8
1.3 Modélisation de la machine asynchrone.....	9
1.3.1 Hypothèses simplificatrices.....	9
1.3.2 Modélisation de la machine asynchrone dans le repère triphasé (abc).....	9
1.3.2.1 Equations de la machine asynchrone	10
1.3.2.1.1 Equations électriques.....	10
1.3.2.1.2 Équations magnétiques.....	10
1.3.2.1.3 Équations mécaniques.....	11
1.3.3 Modélisation dans le repère de Park (dq).....	11
1.3.3.1 Équations électriques dans le modèle de Park.....	12
1.3.3.2 Equations magnétiques dans le modèle de Park.....	12
1.3.3.3 Équations mécaniques dans le modèle de Park.....	13
1.3.3.4 Choix du repère de référence.....	13
1.3.4 Expression en modèle d'état.....	14
1.4 Simulation de la machine asynchrone.....	15
1.5 Conclusion.....	18

CHAPITRE II :MODELISATION ET SIMULATION DES ONDULEURS DE TENSION

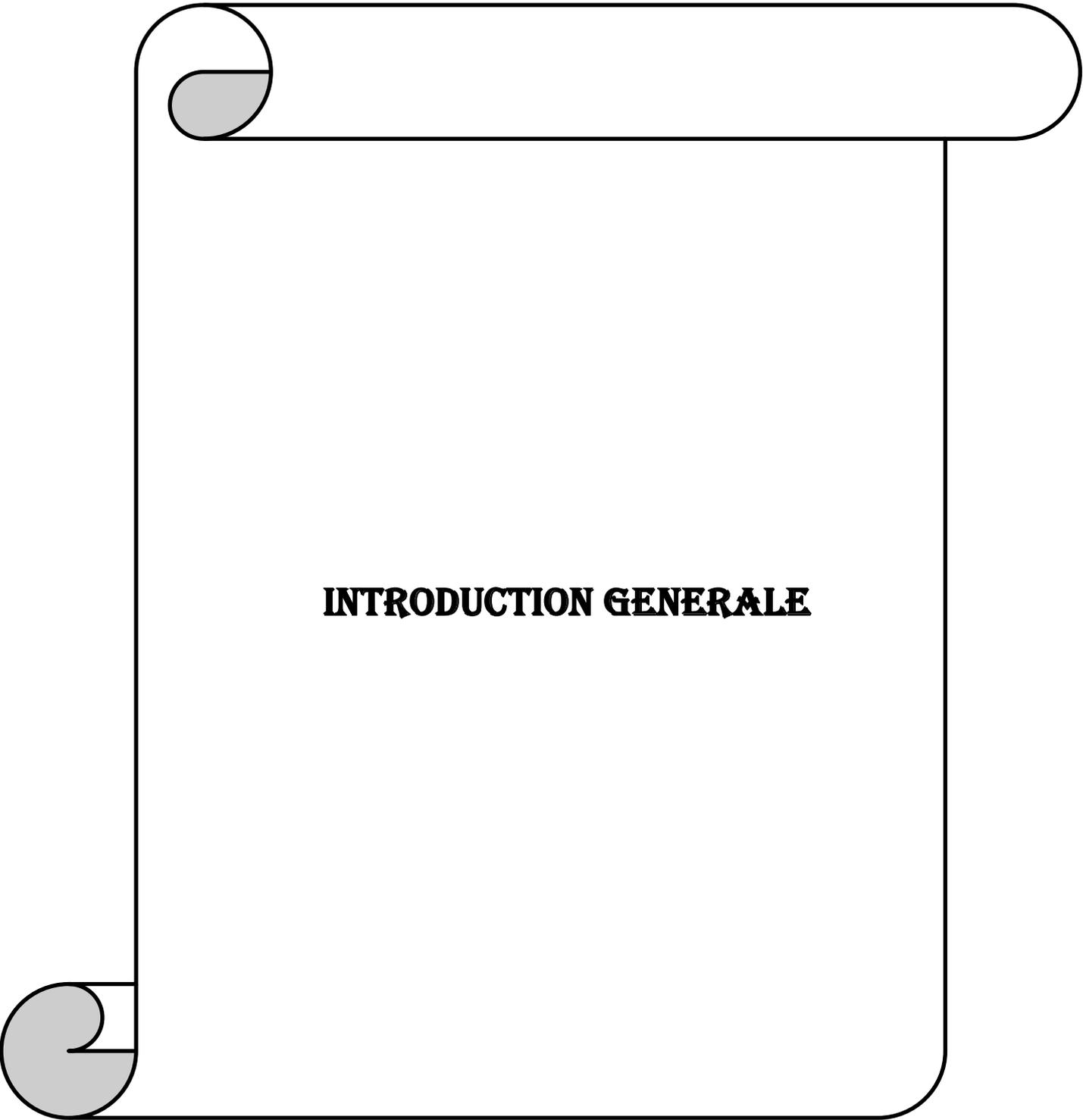
2.1 Introduction.....	20
2.2 définition de l'onduleur.....	20
2.3 Classification des onduleurs.....	20
2.3.1 Onduleur autonome.....	20
2.3.2 Onduleur non autonome.....	21
2.4 Type des onduleurs.....	21
2.4.1 Un onduleur de courant.....	21
2.4.2 Un onduleur de tension.....	21
2.5 Différentes topologie des onduleurs multi-niveau.....	22
2.6 Avantages des onduleurs multi-niveaux.....	22
2.7 Inconvénients des onduleurs multi-niveaux.....	22
2.8 Modélisation de l'onduleur de tension à deux niveaux.....	23
2.8.1 Stratégies de commande d'un onduleur à deux niveaux par MLI.....	24
2.8.2 Simulation de l'onduleur à deux niveaux avec charge RL.....	25
2.9 Onduleur triphasé a trois niveaux.....	29
2.9.1 Structure et modélisation d'un onduleur à trois niveaux.....	29
2.9.1.1 Modélisation du fonctionnement d'un bras de l'onduleur à trois niveaux.....	30
2.9.1.2 Les différentes configurations d'un bras d'onduleur à trois niveaux.....	30
2.9.1.3 Stratégie de commande de l'onduleur à trois niveaux par MLI à deux porteuses.....	32
2.9.2 Simulation de l'onduleur à trois niveaux avec une charge RL.....	33
2.10 Structure d'un onduleur à cinq niveaux à diodes flottantes.....	36
2.10.1 Différentes configurations de l'onduleur à cinq niveaux à diodes flottantes.....	36
2.10.2 Types de configuration d'un onduleur à cinq niveaux.....	37
2.10.3 Modélisation d'un bras d'onduleur à cinq niveaux à diodes flottantes.....	38
2.10.4 Commande de l'onduleur à cinq niveaux.....	38
2.10.5 Simulation de l'onduleur à cinq niveaux avec une charge RL.....	39
2.8 Conclusion.....	42
CHAPITRE III : ETUDE D'UNE ASSOCIATION ONDULEUR MACHINE ASYNCHRONE	
3.1 Introduction.....	43
3.2 La commande vectorielle de la machine asynchrone.....	43
3.2.1 La structure principale de la commande vectorielle.....	43
3.2.2 Principe de découplage.....	44
3.2.3 Calcul des grandeurs.....	46

3.2.4 Calcule des régulateurs.....	46
3.2.4.1 Régulateur de vitesse.....	46
3.2.4.2 Régulateur de couple.....	47
3.2.4.3 Régulateur de flux.....	49
3.3 association machine asynchrone avec onduleur multi-niveaux.....	50
3.3.1 Simulation de l'onduleur à deux niveaux avec machine asynchrone.....	50
3.3.2 Simulation de l'onduleur à trois niveaux avec une machine asynchrone.....	52
3.3.3 Comparaison entre un onduleur à deux niveaux et un à trois onduleurs niveaux	54
3.4 Commande vectorielle de la MAS.....	55
3.5 Conclusion	58

CONCLUSION GENERALE

ANNEXE

Bibliographique



INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Les machines électriques jouent un rôle important dans le domaine d'entraînement électrique. Actuellement, l'étude des machines asynchrones alimentées par des convertisseurs statiques constitue un vaste thème de recherche scientifique. Ces travaux de recherche ont conduit à l'apparition des nouvelles structures des convertisseurs de puissance destinées pour les applications de haute tension et forte puissance appelées convertisseurs multi-niveaux.

Grâce à structure topologique, les onduleurs multi-niveaux permettent une association série de plusieurs cellules de commutation, ce qui permet une augmentation du niveau de tension appliqué et aussi la puissance transmise. Cette structure permet aussi d'avoir une tension de sortie proche de la sinusoïde; grâce aux plusieurs niveaux de tension fournis par ce convertisseur. Alors l'utilisation de ce type de convertisseur dans les domaines de forte puissance/ou haute tension permet de résoudre simultanément les difficultés relatives à l'encombrement et à la commande des groupements d'onduleurs à deux niveaux généralement utilisés dans ce type d'applications.

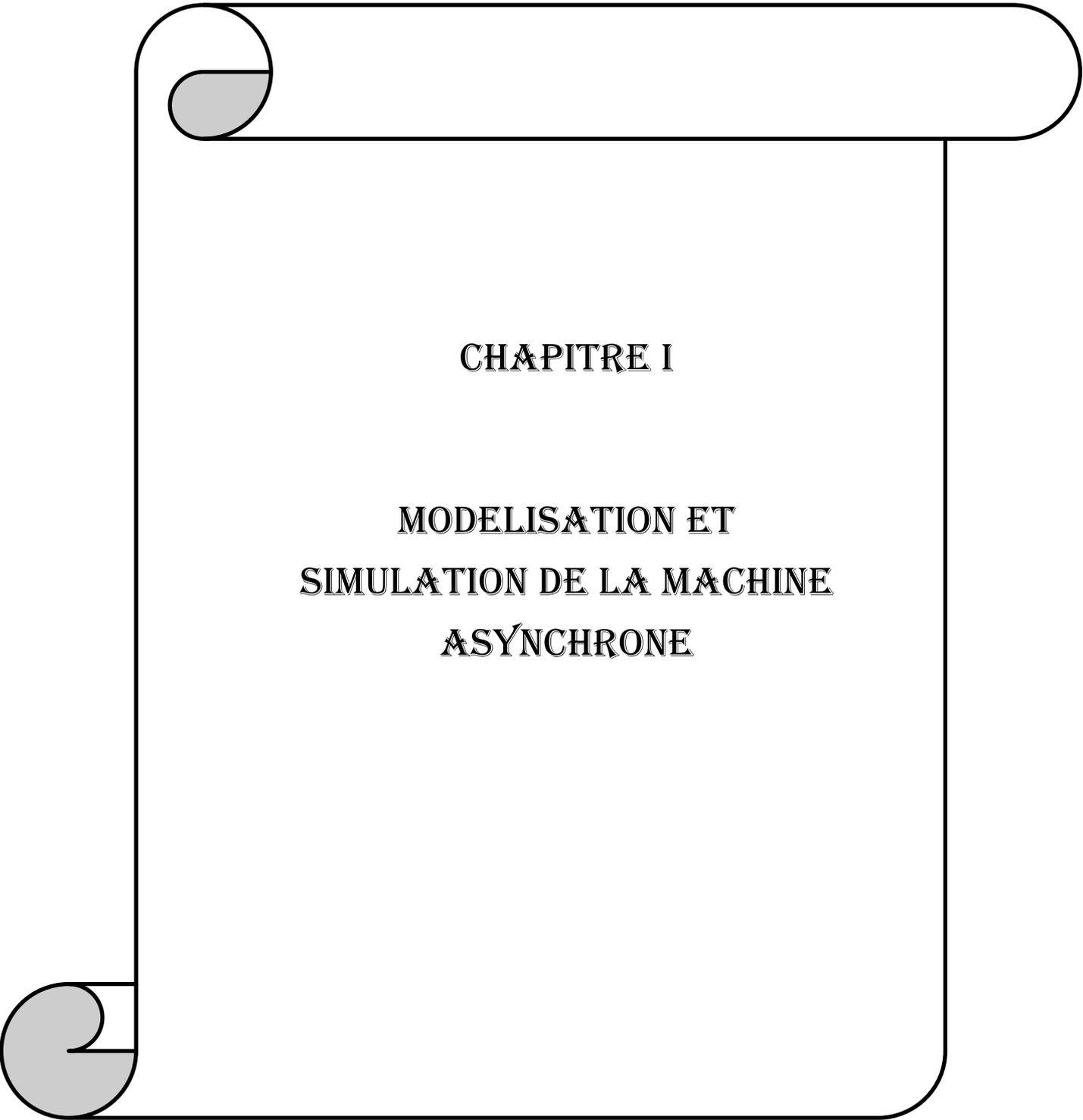
Afin de satisfaire certains critères d'optimisation à savoir la réduction des harmoniques, plusieurs types de commande sont développés sur ces types des onduleurs, poussés par le besoin et les progrès technologiques. Dans ce contexte le travail présenté dans ce mémoire s'intéresse à l'étude de la modélisation et la simulation d'un onduleur à deux/multi-niveaux associée à une machine asynchrone. Ce travail sera réparti en trois chapitres :

Le premier chapitre sera consacré à l'étude et la modélisation de moteur à induction. Nous commençons par une description générale du moteur asynchrone puis nous présentons le modèle mathématique du moteur établi dans un référentiel de park. Ensuite la réalisation du modèle de simulation du moteur asynchrone à cage dans l'environnement MATLAB/SIMULINK. On terminera par la présentation des résultats obtenus par simulation.

Le deuxième chapitre sera consacré à l'étude des différentes topologies des onduleurs deux et multi-niveaux ainsi que ces stratégies de commande.

Le dernier chapitre réservé à l'association de la machine asynchrone à commande vectorielle avec un onduleur multi-niveaux. Nous présentons dans ce chapitre des résultats de simulations pour les différents niveaux des onduleurs.

Nous terminerons notre travail par une conclusion générale.



CHAPITRE I

**MODELISATION ET
SIMULATION DE LA MACHINE
ASYNCHRONE**

1.1 Introduction

La machine asynchrone triphasée transforme l'énergie électrique en énergie mécanique. Grâce à sa robustesse et sa simplicité de commande, la machine asynchrone dont le fonctionnement moteur est la machine la plus utilisée dans les applications industrielles, dans ce chapitre nous présentons une étude détaillée sur la constitution de cette machine, sa modélisation et simulation dont le fonctionnement à vide et en charge.

1.2 Constitution de la machine asynchrone

La machine asynchrone est constituée de deux parties :

1.2.1 Stator

Représente la partie fixe du moteur. Il est constitué d'une carcasse sur laquelle est fixée une couronne de tôle d'acier, de qualité spéciale ; munie d'encoches. Des trois bobinages de section appropriée sont repartis dans ces derniers et forment un ensemble d'enroulement qui comporte autant de circuits qu'il y a de phases sur le réseau d'alimentation [1] [2].

1.2.2 Rotor

Représente la partie mobile du moteur, il est placé à l'intérieur du stator et constitué d'un empilage de tôle d'acier formant un cylindre callé sur l'arbre du moteur. On distingue deux types du rotor de la machine asynchrone.

- *moteur asynchrone à rotor bobiné.*
- *moteur asynchrone à rotor à cage d'écureuil (rotor en court-circuit).*

1.2.2.1 Moteur asynchrone à rotor bobiné

Les enroulements rotoriques sont bobinés de manière à obtenir un enroulement triphasé à « p » paires de pôle. Les bobinages rotoriques sont toujours couplés en étoile, et les trois bornes accessibles sont reliées à la carcasse du stator à l'aide d'un système constitué de trois bagues tournantes et de trois balais fixes, la figure 1.1 représente les différents éléments de la machine asynchrone à rotor bobiné [3].

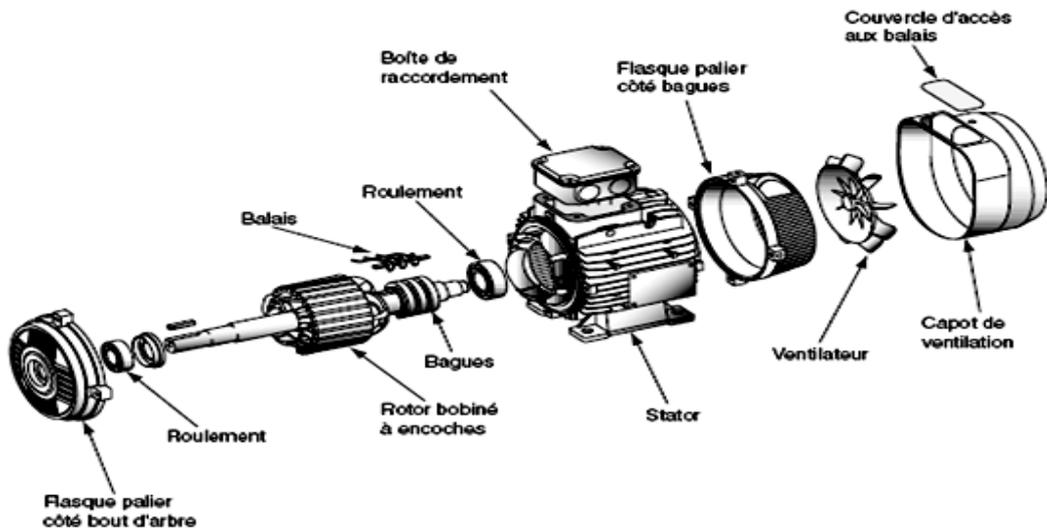


Figure.1.1différents éléments d'un moteur à rotor à bagues

1.2.2.2 Moteur asynchrone à cage d'écureuil

La plus part des moteurs asynchrone utilisé dans le secteur industriel sont à cages d'écureuil, supérieur de 80% des machines électriques. Dans ce type de la chine, chaque encoche rotorique est placée une barre. Ces barres sont en cuivre pour les moteurs de forte puissance, et en alliage d'aluminium pour les machines de faible et moyenne puissance. Ces barres sont réunies à chaque extrémité du rotor par des anneaux réalisant le court-circuit. La figure 1.2, illustre les différents éléments de la machine asynchrone à cage d'écureuil.

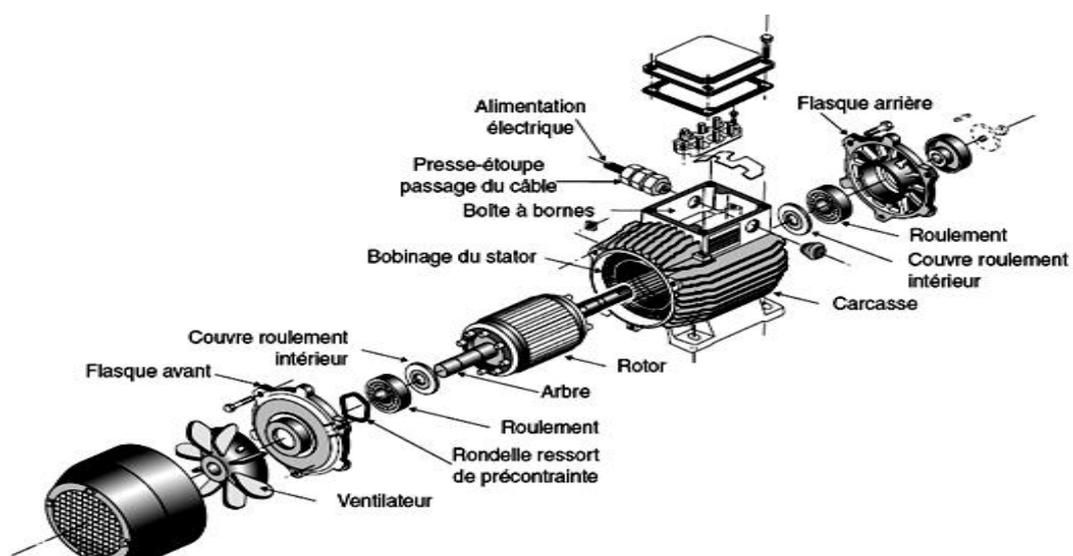


Figure.1.2 différents éléments d'un moteur à cage d'écureuil

Dans notre travail, nous avons choisi la machine asynchrone à cage d'écureuil, pour l'association avec un onduleur de tension multi niveaux.

1.3 Modélisation de la machine asynchrone

La modélisation de la machine asynchrone nécessite à trouver les équations différentielles des grandeurs (tensions, courants, couple et vitesse) qui caractérisent cette machine.

1.3.1 Hypothèses simplificatrices

Pour la modélisation de la machine asynchrone, on a les hypothèses suivantes :

- ✓ La machine est non saturée
- ✓ La machine asynchrone triphasée comporte un stator fixe et un rotor mobile autour de l'axe de symétrie de la machine asynchrone. Dans des encoches régulièrement réparties sur la face interne du stator sont logés trois enroulements identiques. Leurs axes sont distants entre eux d'un angle égal à $(\frac{2\pi}{3})$.
- ✓ Les enroulements du stator sont alimentés par un réseau triphasé de tensions sinusoïdales, à fréquence et amplitude constantes au par un onduleur de tension ou courant à fréquence et amplitude réglables. Les enroulements du rotor sont court-circuités.

1.3.2 Modélisation de la machine asynchrone dans le repère triphasé (abc)

La figure 1.3 présente les trois enroulements statoriques et les trois enroulements rotoriques de la machine asynchrone triphasée dans le repère (abc).

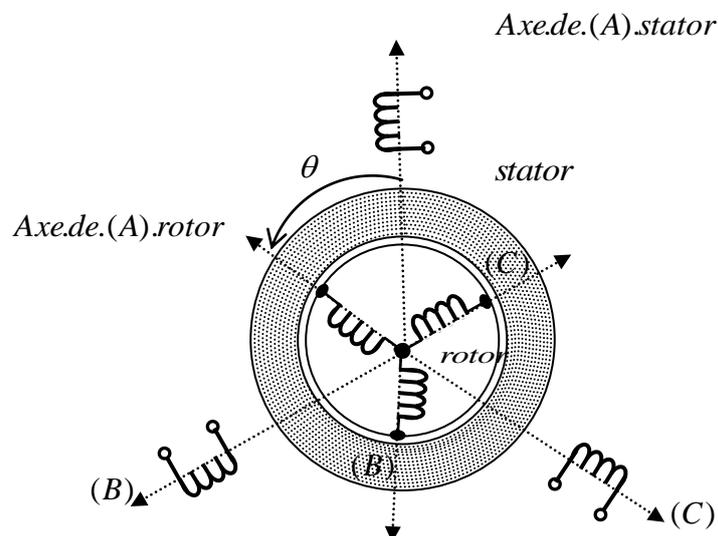


Figure 1.3 Représentation des enroulements de la machine asynchrone triphasée dans le repère (abc)

1.3.2.1 Equations de la machine asynchrone

Les deux comportements statique et dynamique de la machine asynchrone sont entièrement définis par les trois types d'équations suivantes :

- ✓ Les équations électriques (tensions, courants);
- ✓ Les équations magnétiques (flux);
- ✓ Les équations mécaniques (couple, vitesse) ;

1.3.2.1.1 Equations électriques

Les équations électriques des tensions du stator (V_{sabc}) et des tensions du rotor (V_{rabc}) sous la forme matricielle sont données par :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \\ V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \\ i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \\ \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

Ou sous la forme suivante :

$$[V_{sabc}] = [R_s][i_{sabc}] + (d/dt)[\Phi_{sabc}] \quad (1.2)$$

$$[V_{rabc}] = [R_r][i_{rabc}] + (d/dt)[\Phi_{rabc}] \quad (1.3)$$

1.3.2.1.2 Équations magnétiques

Les grandeurs magnétiques du flux dans le stator et le flux dans le rotor définis par la matrice suivante:

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \\ \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s & M_1 & M_3 & M_2 \\ M_s & l_s & M_s & M_2 & M_1 & M_3 \\ M_s & M_s & l_s & M_3 & M_2 & M_1 \\ M_1 & M_3 & M_2 & l_r & M_r & M_r \\ M_2 & M_1 & M_3 & M_r & l_r & M_r \\ M_3 & M_2 & M_1 & M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \\ i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

On peut définir les inductances au stator :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

L_s : est l'inductance propre du stator

M_s : l'inductance mutuelle au stator

De la même manière, les inductances au rotor sont données par :

$$[L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

L_r : est l'inductance propre du rotor

M_r : l'inductance mutuelle au rotor

Et pour les inductances mutuelles entre stator et rotor M_{sr} et entre rotor et stator M_{rs} , on peut écrire :

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \cos(\alpha + 2\pi/3) & \cos(\alpha - 2\pi/3) \\ \cos(\alpha - 2\pi/3) & \cos(\alpha) & \cos(\alpha + 2\pi/3) \\ \cos(\alpha + 2\pi/3) & \cos(\alpha - 2\pi/3) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

Finalement, nous avons :

$$[V_{sabc}] = [R_s][i_{sabc}] + (d/dt)([L_{ss}][i_{sabc}] + [M_{sr}][i_{rabc}]) \quad (1.8)$$

$$[V_{rabc}] = [R_r][i_{rabc}] + (d/dt)([L_{rr}][i_{rabc}] + [M_{rs}][i_{sabc}]) \quad (1.9)$$

1.3.2.1.3 Équations mécaniques

L'équation électromécanique qui lie le couple électromagnétique avec la vitesse rotorique est donnée par le système d'équations différentielles suivante :

$$J \cdot \frac{d\Omega_r}{dt} = C_e - C_r - f \cdot \Omega_r \quad (1.10)$$

Avec :

$$\omega_r = p \cdot \Omega_r \quad (1.11)$$

ω_r est la pulsation du vitesse électrique du rotor,

1.3.3 Modélisation dans le repère de Park (dq)

La transformation de Park est la transformation d'un système triphasé dans le repère abc en système biphasé dans le repère dq. Nous avons classiquement le choix entre trois repères. Dans cette transformation, les équations de phase en un système équivalent biphasé sont effectuées grâce à la matrice de transformation de Park [4]. Dans la transformation de Park, on utilise la matrice suivante

$$[P] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (1.12)$$

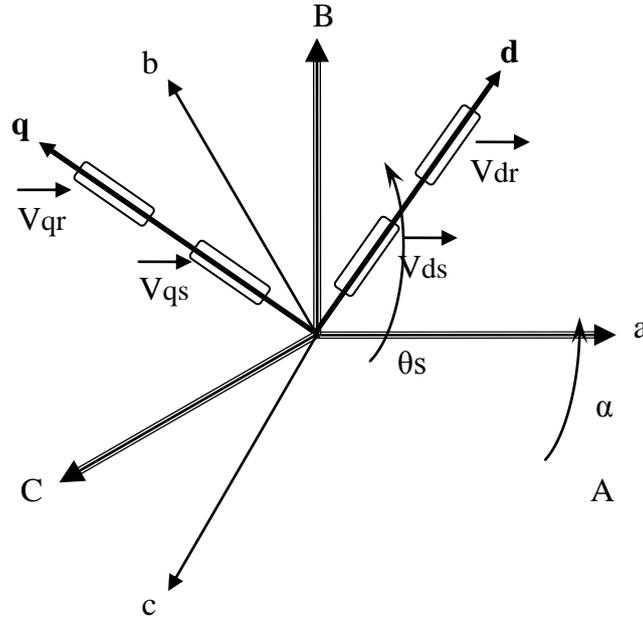


Figure 1.4 Représentation du passage d'un système triphasé à celui biphasé

1.3.3.1 Équations électriques dans le modèle de Park

$$V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \omega_s \cdot \Phi_{qs} \quad (1.13)$$

$$V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + \omega_s \cdot \Phi_{ds} \quad (1.14)$$

$$V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \cdot \Phi_{qr} = 0 \quad (1.15)$$

$$V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \cdot \Phi_{dr} = 0 \quad (1.16)$$

1.3.3.2 Equations magnétiques dans le modèle de Park

$$\Phi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + M \cdot i_{dr} \quad (1.17)$$

$$\Phi_{dr} = L_r \cdot i_{dr} + M \cdot i_{ds} \quad (1.18)$$

$$\Phi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + M \cdot i_{qr} \quad (1.19)$$

$$\Phi_{qr} = L_r \cdot i_{qr} + M \cdot i_{qs} \quad (1.20)$$

1.3.3.3 Equationsmécaniques dans le modèle de Park

$$J \cdot \frac{d\Omega_r}{dt} = C_e - C_r - f \cdot \Omega_r$$

$$C_e = (3/2) \cdot p \cdot M \cdot (i_{rd} \cdot i_{sq} - i_{sd} \cdot i_{rq}) \quad (1.21)$$

$$\omega_r = p \cdot \Omega_r.$$

1.3.3.4 Choix du repère de référence

Il existe donc, trois choix important concernant l'orientation du repère d'axes (d-q) qui dépendent de l'objectif de l'application, et de la commande.

❖ Référentiel (d-q) lié au stator (α - β):

Caractérisé $\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s = 0$, et par conséquence $\frac{d\theta_r}{dt} = -\omega$. Ce référentiel est immobile par rapport au stator, ce référentiel est utilisé pour l'étude du démarrage et freinage des machines à courant alternatif ainsi que l'observation et la commande non linéaire, le système d'équations est donné par :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_s \phi_{ds} \end{cases} \quad (1.22)$$

❖ Référentiel (d-q) lié au rotor

Caractérisé par $\omega_r = 0$ donc $\omega_s = \omega$, Ce référentiel est utilisé pour l'étude des régimes transitoires dans les machines asynchrones et synchrones. Le système d'équations (1.22) est donné par :

$$\begin{cases} V_{dr} = 0 = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - p\omega) \phi_{qr} \\ V_{qr} = 0 = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - p\omega) \phi_{dr} \end{cases} \quad (1.23)$$

❖ Référentiel (d-q) lié au champ tournant

Dans ce cas, la vitesse de repère (d-q) est la vitesse du synchronisme ($\omega = \omega_s$), est utilisé pour réaliser le contrôle vectoriel du fait que les grandeurs de réglage deviennent continues.

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s$$

$$\omega = \omega_s - \omega_r = \omega_s - p\Omega \quad (1.24)$$

1.3.4 Expression en modèle d'état :

Les équations de la machine en modèle d'état en vue de sa commande en variable d'état.

Les courant rotorique:

$$\begin{cases} I_{dr} = \frac{1}{L_r}(\phi_{dr} - MI_{ds}) \\ I_{qr} = \frac{1}{L_r}(\phi_{qr} - MI_{qs}) \end{cases} \quad (1.25)$$

Le courant dans une phase statorique calcule en fonction des courant I_{ds}, I_{qs} a partir de la transformée de Park de la façon suivant :

$$I_{as} = \sqrt{\frac{2}{3}}(I_{ds} \cos(\theta_s) - I_{qs} \sin(\theta_s)) \quad (1.26)$$

Les flux statorique :

$$\begin{cases} \phi_{ds} = \frac{M}{L_r} \cdot \phi_{dr} - \left(L_s - \frac{M^2}{L_r}\right) \cdot I_{ds} \\ \phi_{qs} = \left(L_s - \frac{M^2}{L_r}\right) \cdot I_{qs} + \frac{M}{L_r} \cdot \phi_{qr} \end{cases} \quad (1.27)$$

En rapportant ces dernières relations dans (1.21) et (1.22), on aboutira aux systèmes d'équations d'états suivant :

$$\begin{cases} \frac{dI_{ds}}{dt} = -\frac{1}{\delta L_s} \left[-\left(R_s + \left(\frac{M}{L_r}\right)^2 \cdot R_r\right) I_{ds} + \delta L_s I_{qs} \omega_s + \frac{R_r M}{L_r^2} \cdot \phi_{dr} + \frac{M}{L_r} + \omega_r \phi_{qr} + V_{ds} \right] \\ \frac{dI_{qs}}{dt} = -\frac{1}{\delta L_s} \left[-\delta L_s I_{ds} \omega_s - \left(R_s + \left(\frac{M}{L_r}\right)^2 \cdot R_r\right) I_{qs} + \frac{R_r M}{L_r^2} \cdot \phi_{qr} + \frac{M}{L_r} + \omega_r \phi_{dr} + V_{qs} \right] \\ \frac{d\phi_{dr}}{dt} = \frac{MR_r}{L_r} I_{ds} - \frac{R_r}{L_r} \phi_{dr} + (\omega_s - \omega_r) \phi_{qr} \\ \frac{d\phi_{qr}}{dt} = \frac{MR_r}{L_r} I_{qs} - \frac{R_r}{L_r} \phi_{qr} + (\omega_s - \omega_r) \phi_{dr} \end{cases} \quad (1.28)$$

$$\frac{d}{dt} \omega_r = \frac{1}{jL_r} \cdot P^2 M (I_{qs} \phi_{dr} - I_{qr} \phi_{ds}) - \frac{f_v}{j} \omega_r - P \frac{C_r}{j}$$

Sachant que : $\delta = 1 - \frac{M^2}{L_r L_s}$: est le coefficient de dispersion (1.29)

Le flux rotorique calcule comme suit :

$$\phi_r = \sqrt{\phi_{dr}^2 + \phi_{qr}^2} \quad (1.30)$$

En identifiant le système (I.30) à la forme

$$\frac{dx}{dt} = AX + BU \tag{1.31}$$

Avec :

$$X = \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix}; U = \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{\delta L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\delta L_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\delta L_s} \left(R_s + \frac{M^2}{T_r L_r} \right) & \omega_s & \frac{1}{\delta L_s} \cdot \frac{M}{T_r L_r} & \frac{1}{\delta L_s} \frac{M}{L_r} \omega \\ -\omega_s & -\frac{1}{\delta L_s} \left(R_s + \frac{M^2}{T_r L_r} \right) & -\frac{1}{\delta L_s} \frac{M}{L_r} \omega & \frac{1}{\delta L_s} \cdot \frac{M}{T_r L_r} \\ \frac{M}{T_r} & 0 & -\frac{1}{T_r} & \omega_s - \omega \\ 0 & \frac{M}{T_r} & -(\omega_s - \omega) & -\frac{1}{T_r} \end{bmatrix}$$

Avec :

$T_r = \frac{L_r}{R_r}$: est la constant de temps rotorique[5]:

1.4. Simulation de la machine asynchrone

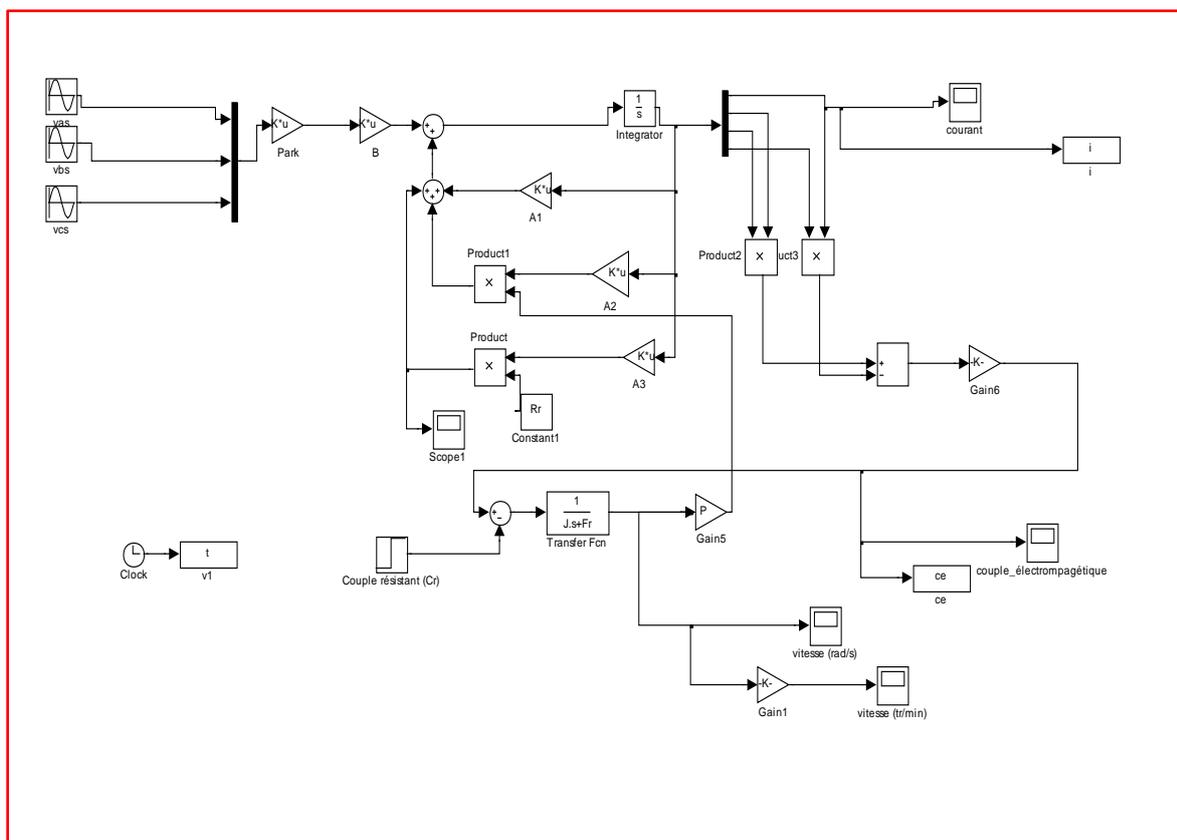


Figure 1.5 schéma bloc de machine asynchrone

- **Fonctionnement à vide ($C_r=0$ N.m)**

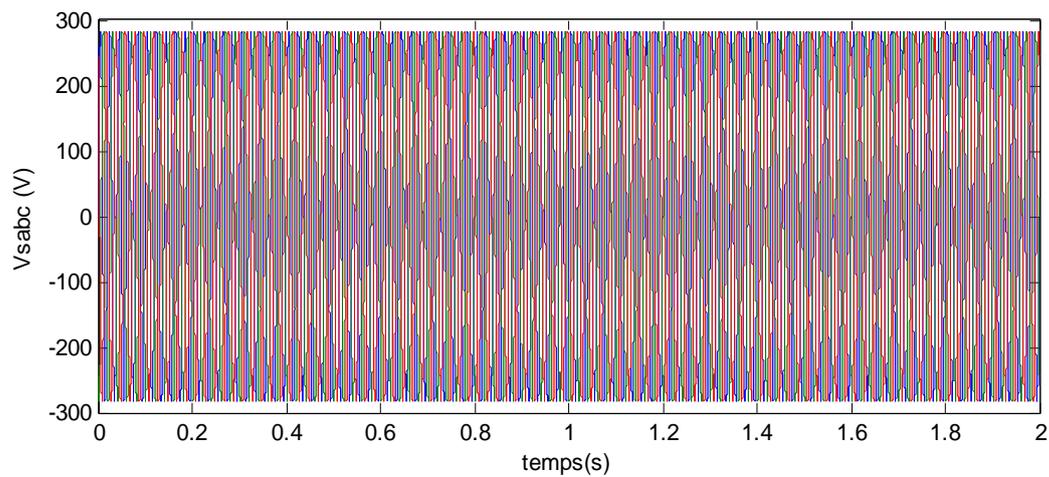
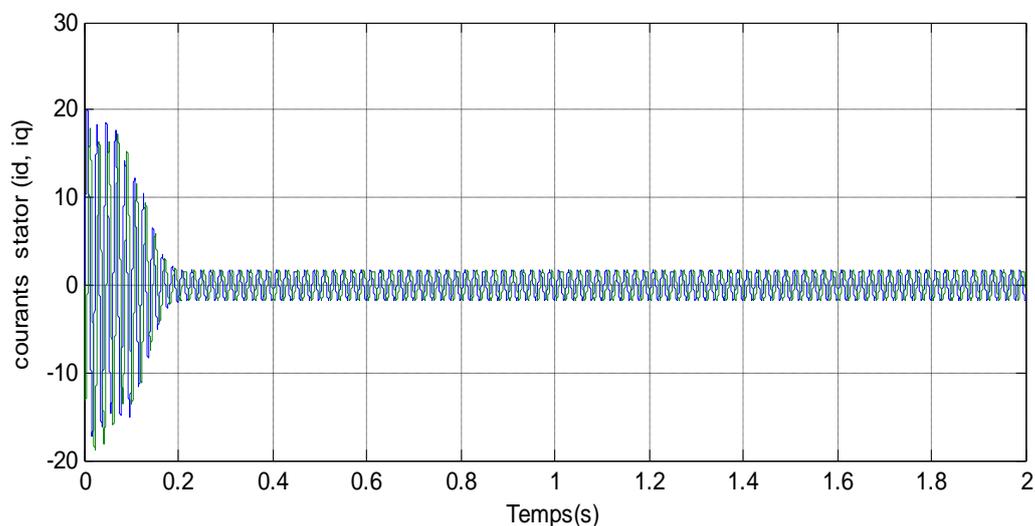
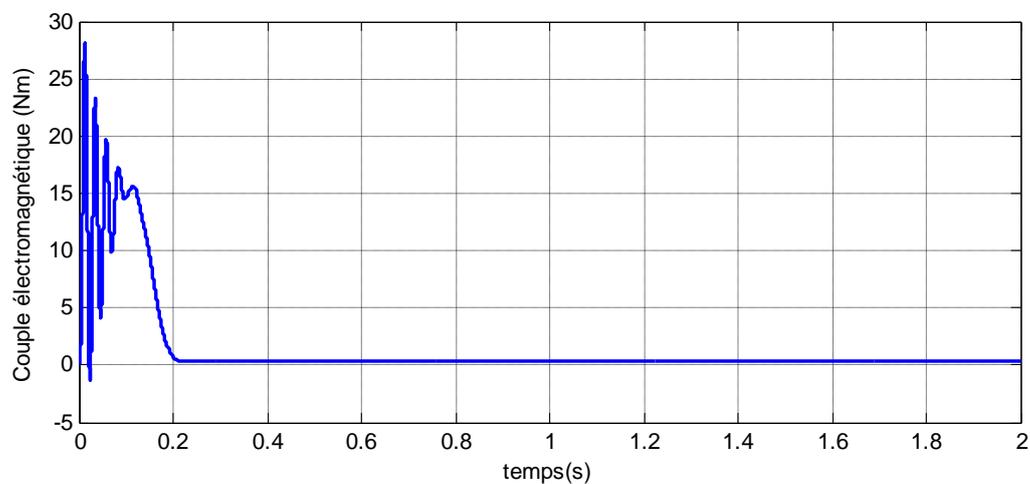


Figure 1.6 tensions du réseau d'alimentation

Figure 1.7 Courants (i_d, i_q) du stator (Marche à vide : $C_r=0$)Figure 1.8 Couple électromagnétique (Marche à vide : $C_r=0$ Nm)

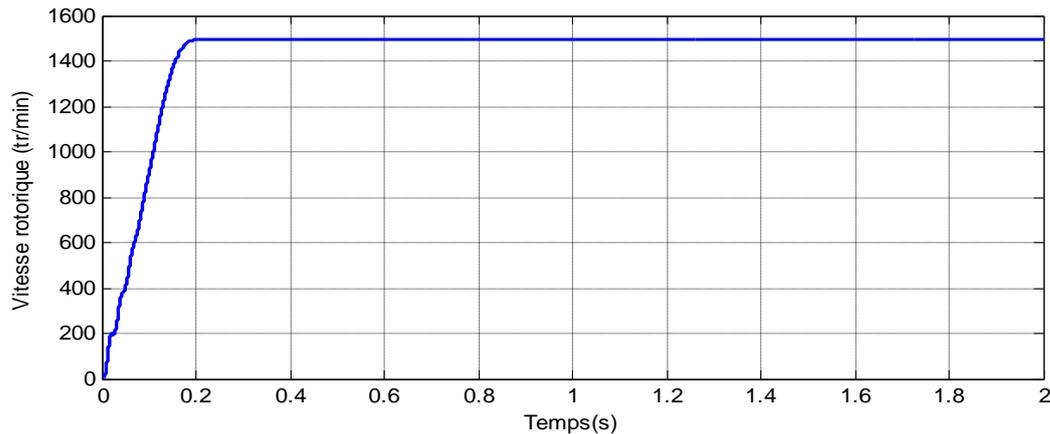


Figure 1.9 Vitesse de rotation de la machine (Marche à vide : $C_r=0\text{Nm}$)

Lors du démarrage de la machine asynchrone à vide, les courants statoriques atteignent une valeur crête de 20 A, cela est dû au fort appel du courant de démarrage afin de générer un couple suffisant pour vaincre l'inertie de la machine, puis les courants restent sinusoïdaux et constantes après le régime transitoire de 0,2s. On constate aussi, un régime transitoire du couple atteint la valeur supérieure de 25 N.m. cela est justifié par le bruit engendré lors des démarrages des machines asynchrones ainsi que l'inertie importante que la machine doit vaincre pour démarrer. Après 0,2s la machine atteint le régime permanent et le couple électromagnétique à une valeur nulle, la vitesse croît d'une manière quasi linéaire, après 0,2 s la machine atteint son régime permanent et la vitesse se stabilise à la vitesse de synchronisme (1500 tr/min).

- **Fonctionnement en charge**

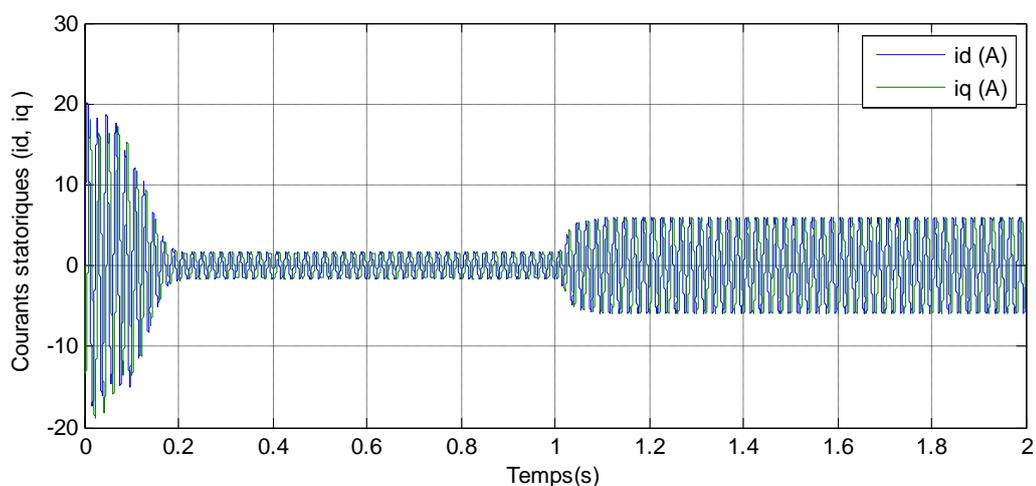


Figure 1.10 Courants (i_d , i_q) du stator (Marche en charge : $C_r=10$ à 1s)

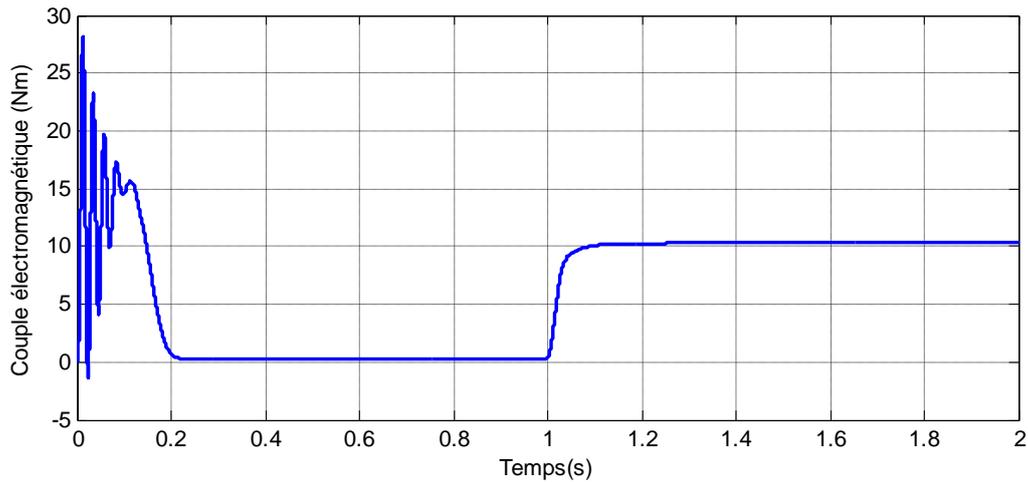


Figure 1.11 Couple électromagnétique (Marche en charge $C_r=10\text{Nm}$ à 1s)

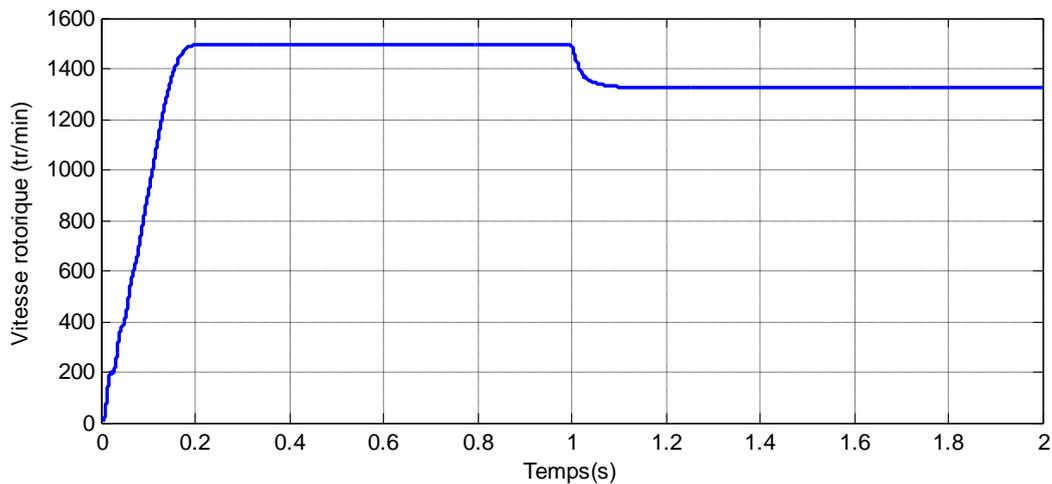
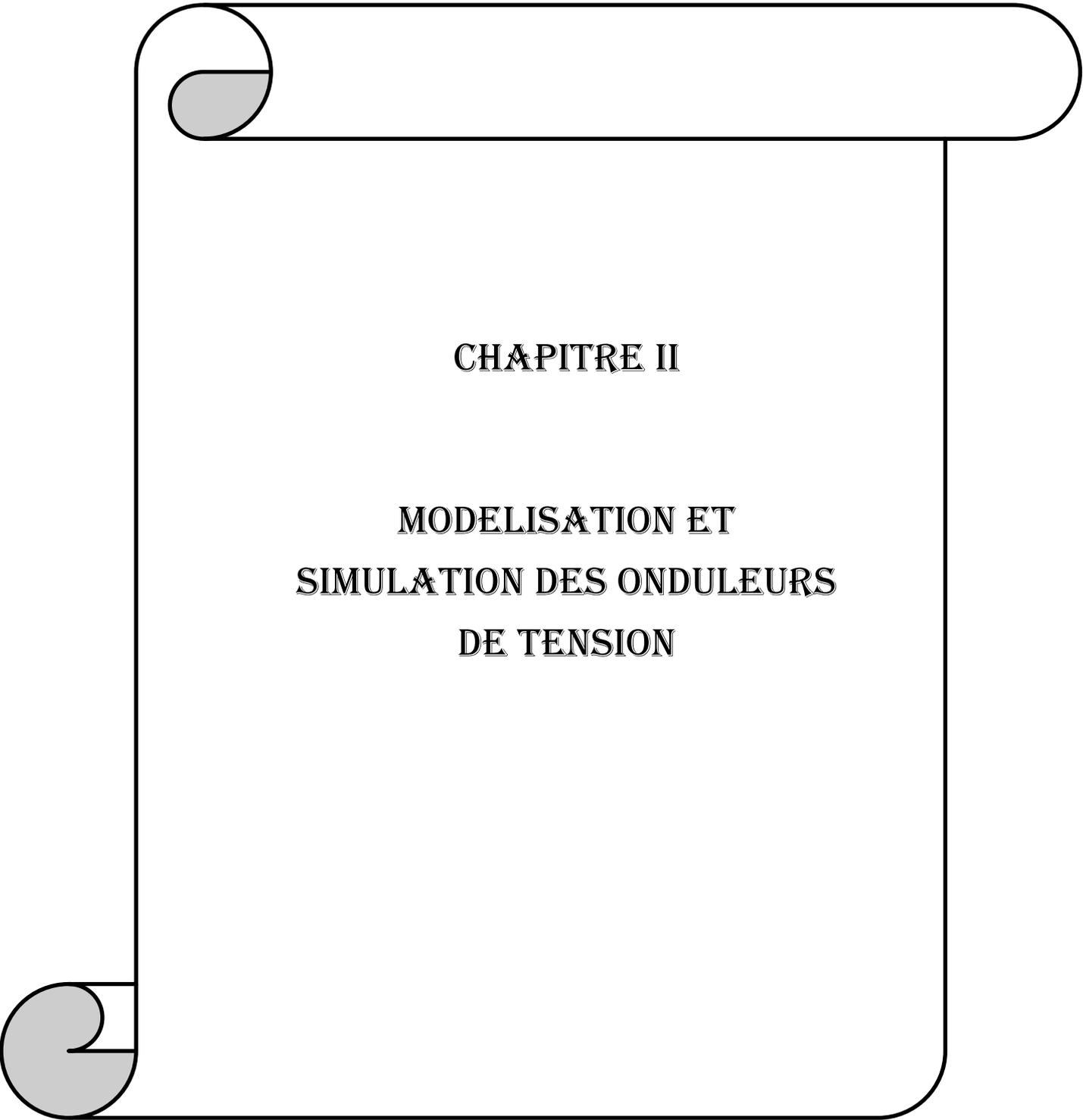


Figure 1.12 Vitesse de rotation de la machine (Marche en charge $C_r=10\text{Nm}$ à 1s)

On impose un couple de charge d'une valeur $C_r=10\text{Nm}$ à l'instant de 1s des, ce qui nous permettra de visualiser les résultats de simulation en charge. On constate à l'instant de 1s que les courants statoriques augmentent et oscillent en sinusoïdaux, cette augmentation peut être expliquée par l'augmentation de l'appel de la machine en fonction du couple résistant de 10Nm appliqué à la machine. La vitesse chute et elle se stabilise à une valeur inférieure de 1400 tr/min, par conséquent, le couple électromagnétique C_{em} augmente à 10 N.m.

1.5 Conclusion

Ce chapitre présente la modélisation et la simulation d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil en utilisant le logiciel MATLAB/SIMULINK. Ce type de moteur s'est imposé dans l'industrie grâce à sa robustesse et sa simplicité de construction et de commande. Dans ce chapitre, le processus de démarrage du moteur, suivi de l'application d'une charge entraînée a été modélisé et simulé. Les résultats de simulation obtenus montrent l'efficacité et la performance de cette machine.



CHAPITRE II

MODELISATION ET SIMULATION DES ONDULEURS DE TENSION

2.1 Introduction

L'onduleur de tension est le convertisseur statique le plus utilisé pour l'alimentation des machines alternatives dans les entraînements à vitesse variable. Leur fonctionnement vise à modifier séquentiellement les liaisons entre l'alimentation et la charge. Cette modification dite commutation est réalisée par un circuit de commande adaptée qui fournit des ordres temporels de déclenchement des interrupteurs.

Dans ce chapitre nous commençons par présenter les structures et les différents modèles des onduleurs à deux niveaux et multi-niveaux, les onduleurs multi niveaux considérés dans ce travail sont à diodes flottantes, avec des différentes configurations possibles. Une simulation pour chaque type d'onduleur alimentant une charge RL sera présentée à la fin de ce chapitre.

2.2 Définition de l'onduleur

Un onduleur comme principe est un convertisseur statique assurant la conversion d'énergie électrique de la forme continue (DC) à la forme alternative (AC) de tension réglable en fréquence et en valeur efficaces. La figure 2.1 montre le schéma de principe d'un onduleur.

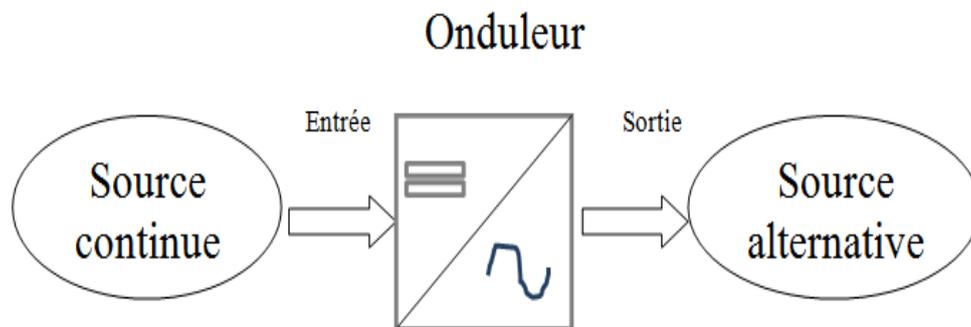


Figure 2.1 Schéma de principe de la conversion (DC-AC) d'un onduleur

2.3 Classification des onduleurs

Les onduleurs sont en général classés selon les modes de commutation de leurs interrupteurs :

2.3.1 Onduleur autonome

C'est un système qui nécessite des composants commandés à la fois à la fermeture et à l'ouverture, de fréquence variable, dont les instants de commutations sont imposés par des circuits externes la charge est quelconque cet onduleur n'est pas réversible [6].

2.3.2 Onduleur non autonome

Dans ce cas, les composants utilisés peuvent être de simples thyristors commandés uniquement à la fermeture et la commutation est « naturelle » contrairement à l'onduleur autonome. L'application principale de ce type d'onduleur se trouve dans les variateurs pour des moteurs synchrones de très forte puissance où les thyristors sont souvent les seuls composants utilisables [7].

2.4 Type des onduleurs

2.4.1 Un onduleur de courant

Un onduleur de courant est alimenté par un générateur à courant continu du type source de courant, la source de courant du générateur est obtenue en plaçant en série avec ses bornes d'accès une inductance de forte valeur, figure (2.2).

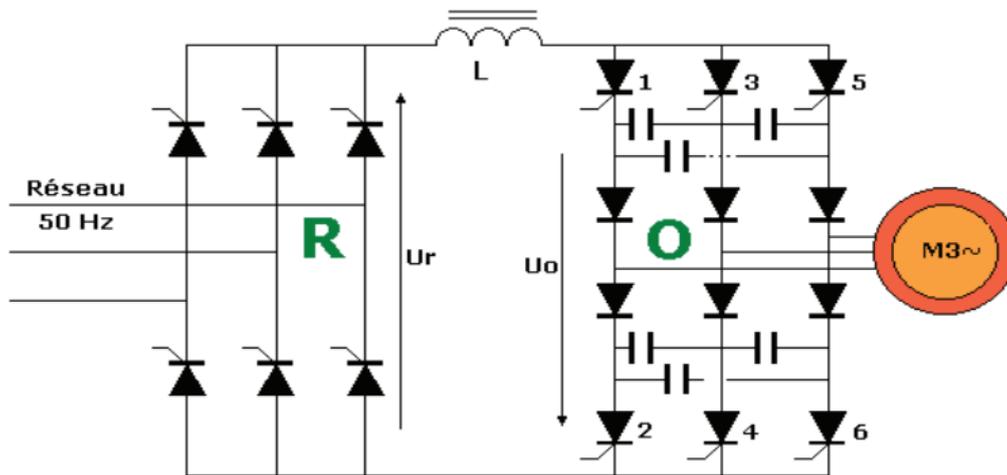


Figure 2.2 onduleur de courant triphasé à deux niveaux

2.4.2 Un onduleur de tension

Un onduleur de tension est alimenté par un générateur à courant continu du type source de tension, la source de tension du générateur est obtenue en plaçant en parallèle avec ses bornes d'accès un condensateur C de forte valeur ou un filtre L-C, figure (2.3)[8].

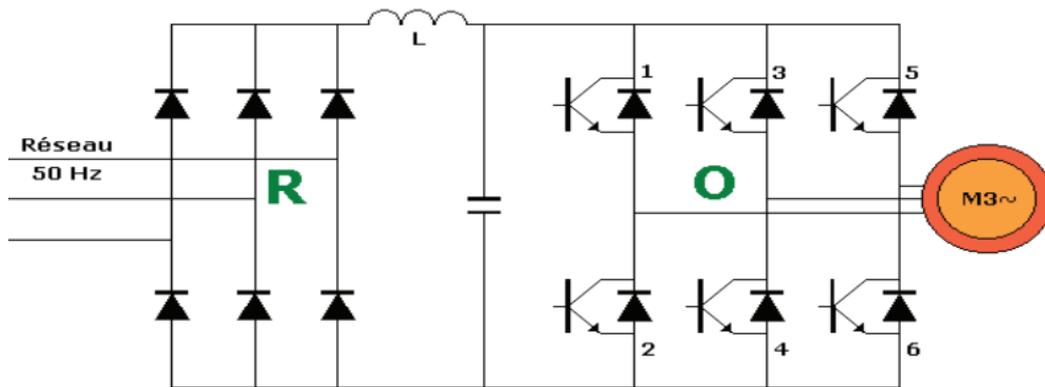


Figure 2.3 onduleur de tension triphasé à deux niveaux

2.5 Différentes topologie des onduleurs multi-niveaux

Les topologies les plus sollicitées et qui attirent les plus d'intérêt sont actuellement inscrit et proposées dans la littérature, sous trois groupes d'onduleur principaux[20].

- 1) Les onduleurs à sources séparées (cascadé ou multiple H-bridge Converter)
- 2) Les onduleurs à capacités flottantes FC (Flying Capacitor Converter)
- 3) Les onduleurs à diodes de bouclage connues sous deux types de topologies, à savoir la structure NPC (Neutral Point Clamped) et la structure MPC (Multiple Point Clamped), appelée aussi onduleur à diodes flottantes.

La structure opter pour notre cas, le long de ce travail, est celle à diodes flottantes.

2.6 Avantages des onduleurs multi-niveaux

- L'augmentation du nombre de niveaux de l'onduleur fait diminuer forcément la distorsion harmonique totale.
- L'augmentation de tension de sortie permet d'augmenter la puissance de convertisseurs sans augmenter le courant.
- A conséquence de l'augmentation des niveaux, les éléments de filtrages sont plus réduit et moins couteux.

2.7 Inconvénients des onduleurs multi-niveaux

- L'augmentation des niveaux de tension grandis la structure de contrôle et devient plus complexe.
- Les problèmes de déséquilibre de tension des condensateurs.
- La réalisation des multi-niveaux nécessite de grands nombres des composants, ce qui influesur le coût de l'onduleur.

2.8 Modélisation de l'onduleur de tension à deux niveaux

On considère que l'onduleur est un convertisseur idéal figure (2.4).

Chaque transistor K_i est modélisé par un interrupteur idéal K_i associé à une diode D_i montée en antiparallèle.

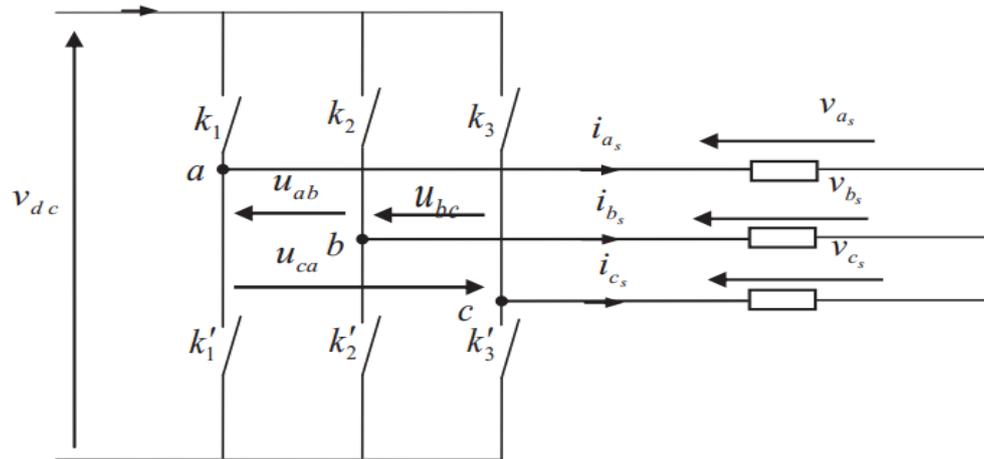


Figure 2.4 Structure d'un onduleur à deux niveaux

Cependant :

L'état $S_i = 1$ représente le mode passant de K_i ($i=a, b, c$)

L'état $S_i = 0$ représente le mode bloqué de K_i ($i=a, b, c$).

$$S = \begin{cases} 1 & \text{si } K_i \text{ est fermé} \\ 0 & \text{si } K_i \text{ est ouvert} \end{cases} \quad (2.1)$$

Pour simplifier l'étude, on supposera que :

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

Les tensions composées, et U_{ca} sont obtenues à partir de ces relations :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{a0} - V_{b0} \\ U_{bc} = V_{b0} - V_{c0} \\ U_{ca} = V_{c0} - V_{a0} \end{cases} \quad (2.2)$$

Tel que, et V_{c0} sont les tensions d'entrée de l'onduleur. Elles sont référencées par rapport à un point milieu « o » d'un diviseur fictif d'entrée.

$$\begin{cases} V_{a0} = V_{an} + V_{n0} \\ V_{b0} = V_{bn} + V_{n0} \\ V_{c0} = V_{cn} + V_{n0} \end{cases} \quad (2.3)$$

V_{an}, V_{bn}, V_{cn} sont les tensions simple de la machine. Et V_{n0} est la tension fictive entre le neutre de la MAS et le point fictif « o ».

$$V_{jo} = V_{jo} - V_o = \begin{cases} \frac{U_{dc}}{2} \text{si } Kf \text{ fermé} (S_j = 1) \\ -\frac{U_{dc}}{2} \text{si } Kf \text{ ouvert} (S_j = 0) \end{cases} \quad j = a ; b ; c \quad (2.4)$$

Après redressement, la tension continue filtrée U_{dc} est la appliquée à l'onduleur.

Le système V_{an}, V_{bn} et V_{cn} étant équilibré, donc : $V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0$

On peut écrire :

$$V_{n0} = \frac{1}{3}(V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \quad (2.5)$$

On obtient :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{2}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{bn} = -\frac{1}{3}V_{ao} + \frac{2}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{cn} = -\frac{1}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} + \frac{2}{3}V_{co} \end{cases} \quad (2.6)$$

Nous avons exprimés V_{an}, V_{bn} et V_{cn} considérées comme des tensions de sortie de l'onduleur en fonction de V_{ao} , comme tensions d'entrée, et par conséquent la modélisation de l'onduleur par la matrice [T].

On obtient les tensions aux bornes de la charge en fonction des valeurs booléennes des états des interrupteurs :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = U_{dc} \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} ; [V_{jn}] = U_{dc}[T][S_j] \quad (2.7)$$

2.8.1 Stratégies de commande d'un onduleur à deux niveaux par MLI

La modulation de largeur d'impulsions (MLI) consiste à adopter une fréquence de commutation supérieure à la fréquence des grandeurs de sortie et à former une succession de créneaux de largeurs convenables [11].

La MLI utilise le principe d'intersection entre une référence sinusoïdale de fréquence f_m appelé modulante, et un signal triangulaire de haute fréquence f_p appelé la porteuse, afin de déterminer les instants de commutation [12].

Les paramètres essentiels de la MLI sont :

- **L'indice de modulation (m)** égal au rapport de la fréquence de la porteuse à la fréquence du modulante.

$$m = f_p / f_m \quad (2.8)$$

- **Le coefficient de réglage en tension (r)** égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence (V_m) à la valeur crête de l'onde de la porteuse V_p . $r = V_m / V_p$ (2.9)

Le schéma de principe et les signaux de commande sont donnés par les figures suivantes :

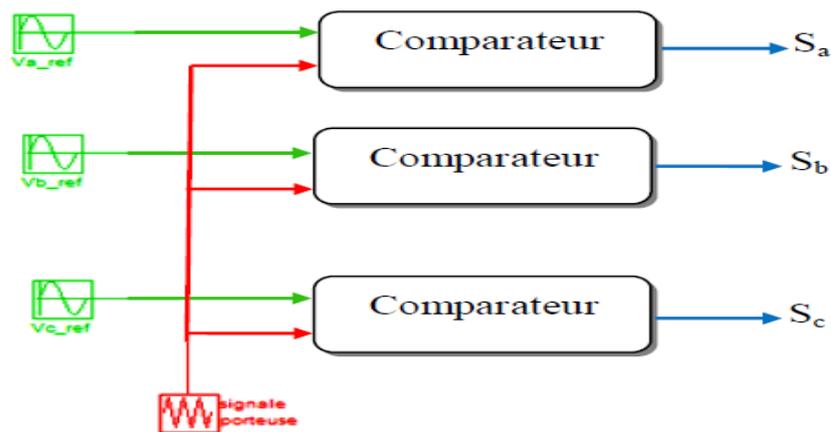


Figure 2.5 schéma de principe de la MLI sinus-triangle

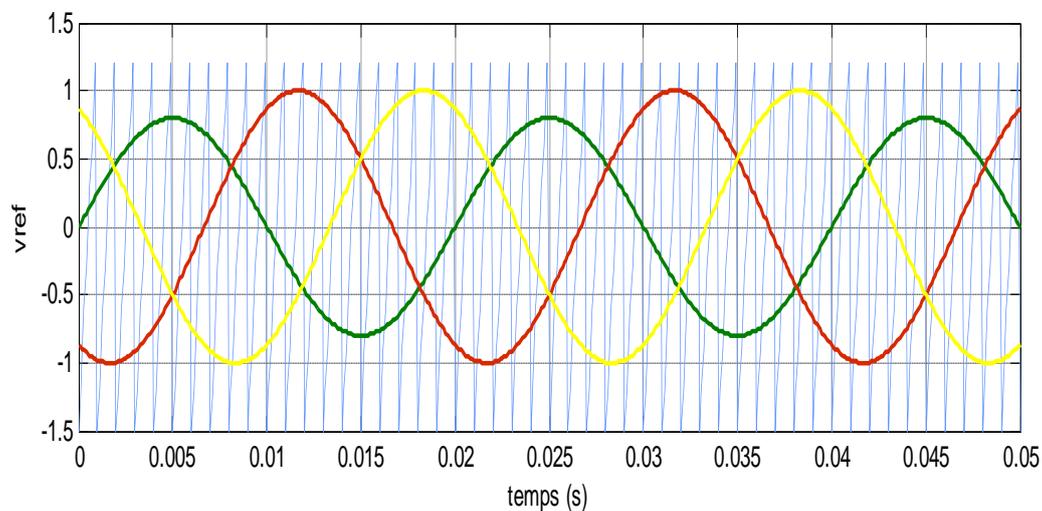


Figure 2.6 Simulation de la porteuse et la modulante

2.8.2 Simulation de l'onduleur à deux niveaux avec charge RL

Dans ce cas, on associe l'onduleur de tension à deux niveaux avec une charge RL, comme montre la figure 2.7.

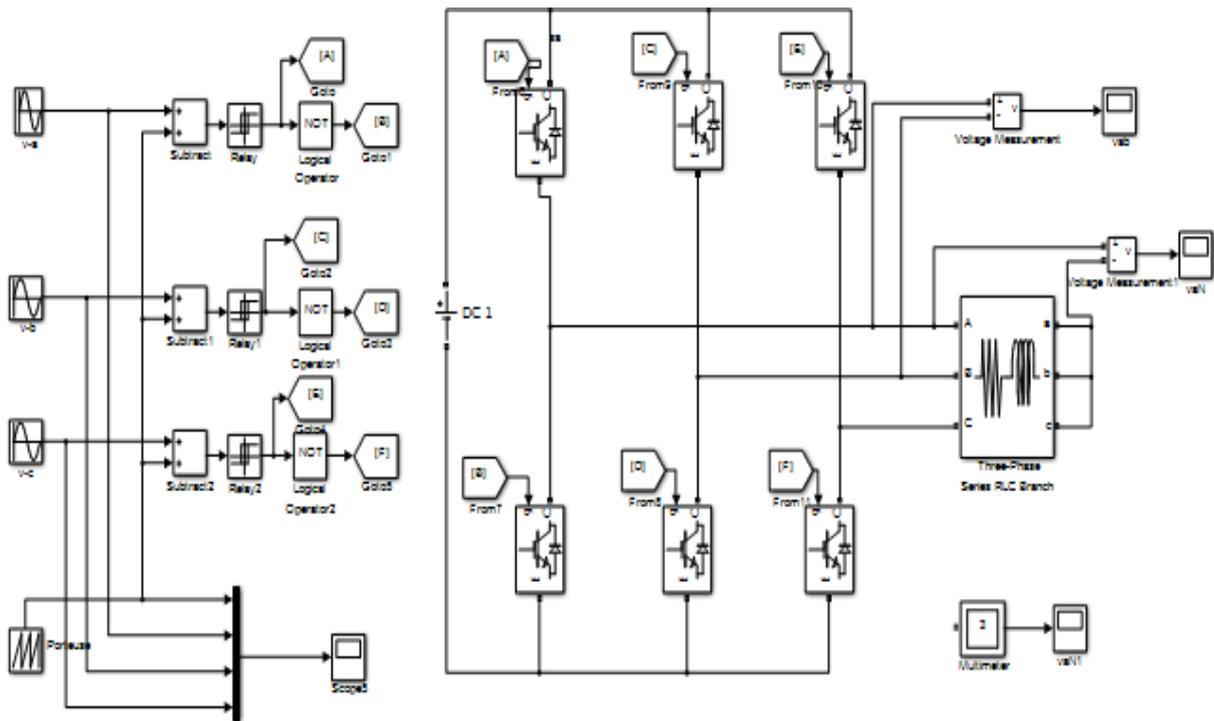


Figure 2.7 Schéma bloc de la simulation d'un onduleur à deux niveaux avec charge RL

Les figures 2.8 et 2.9 présentent l'allure de la tension simple à la sortie de l'onduleur et son spectre harmonique. On remarque que la forme de la tension est sinusoïdale et l'analyse spectral des harmoniques donne un THD d'une valeur de 108.41.

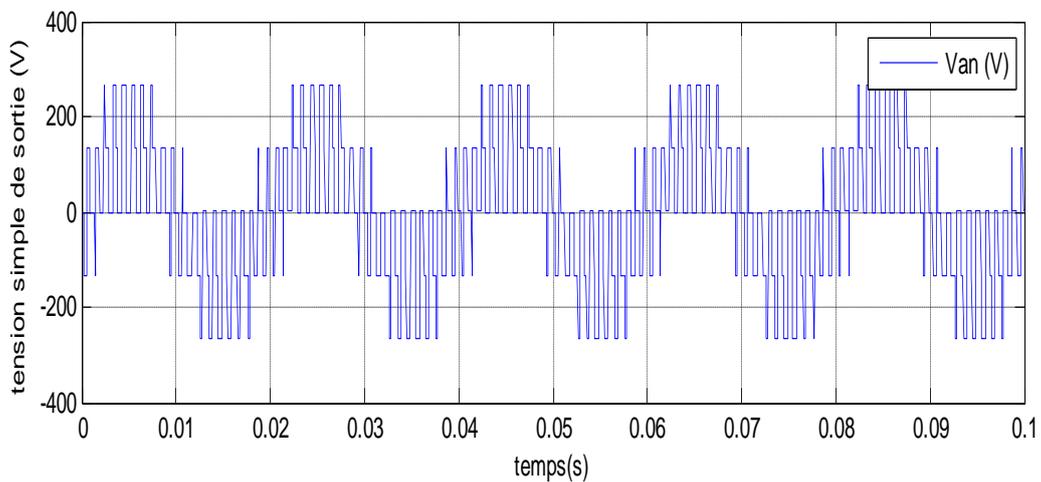


Figure 2.8 Tension simple de sortie d'un onduleur à deux niveaux

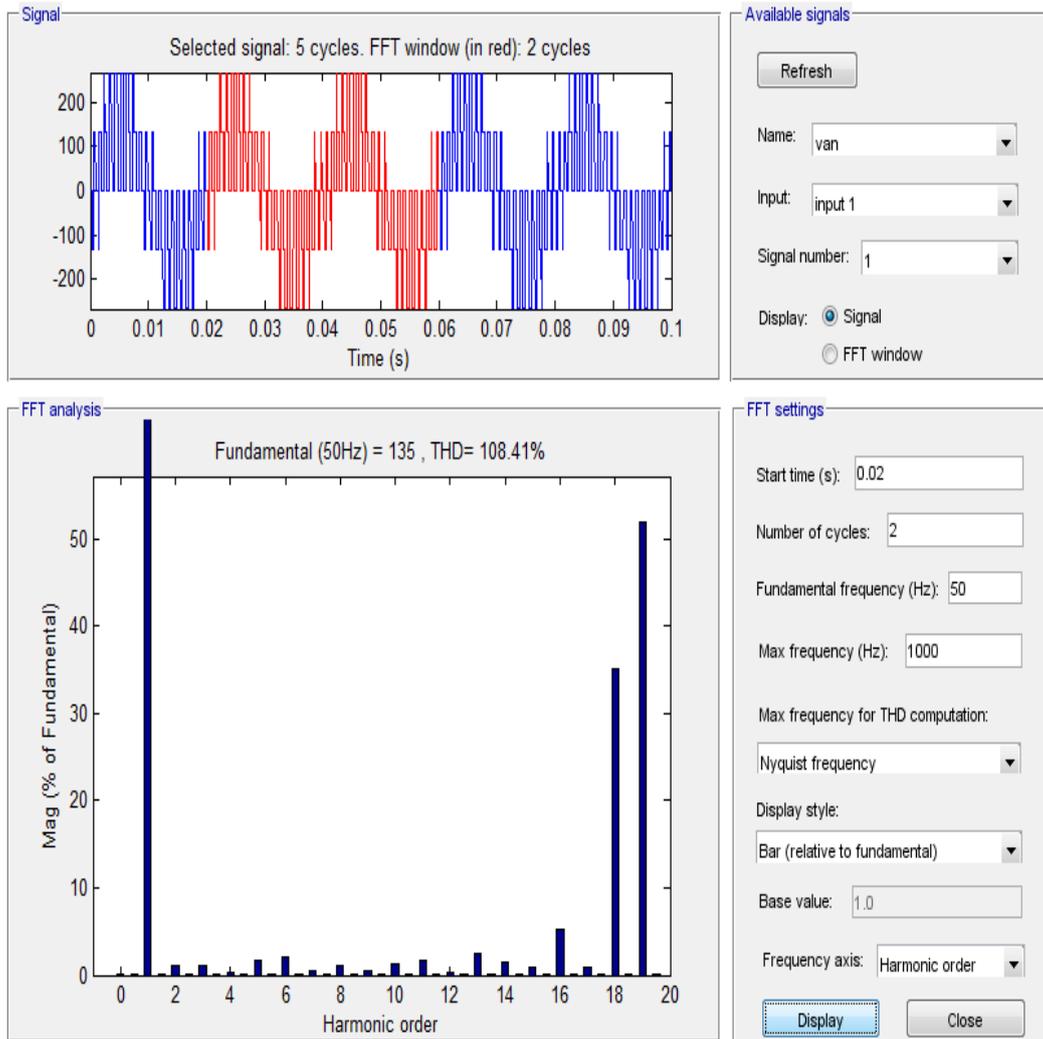


Figure 2.9 Spectre harmonique de la tension de sortie simple d'un onduleur à deux niveaux

La figure 2.10 illustre l'allure de la tension composée, on remarque que la forme de tension est à deux niveaux, et à une forme symétrique.

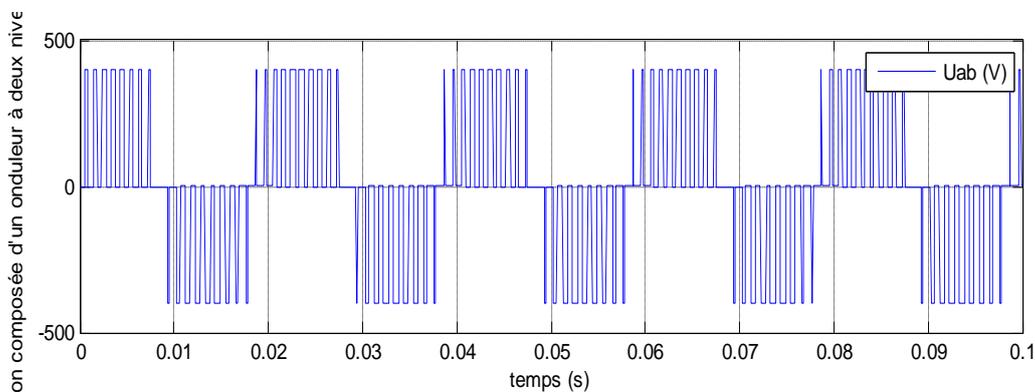


Figure 2.10 Tension composée de sortie d'un onduleur à deux niveaux

Les deux figures 2.11, 2.12 présentent la forme du courant de sortie de la phase à du convertisseur pour une charge RL ainsi que son spectre harmonique. Et remarque que le THD à une valeur de 6.90.

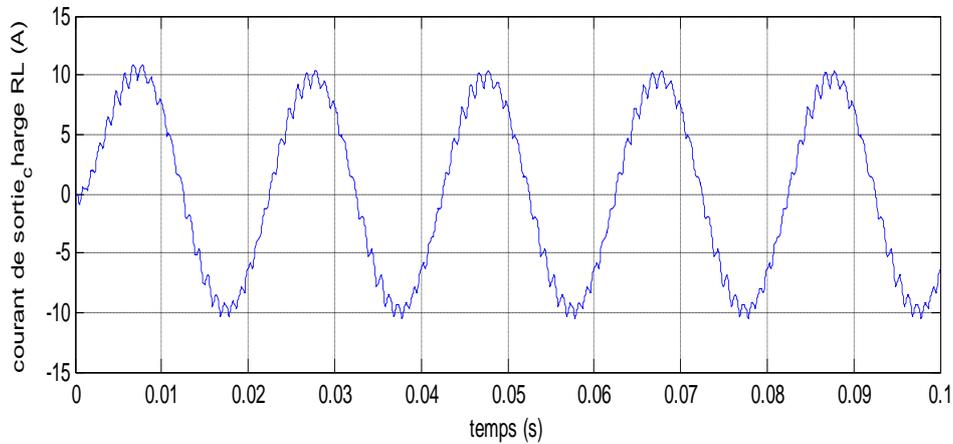


Figure 2.11 Courant de sortie d'un onduleur à deux niveaux pour une charge RL

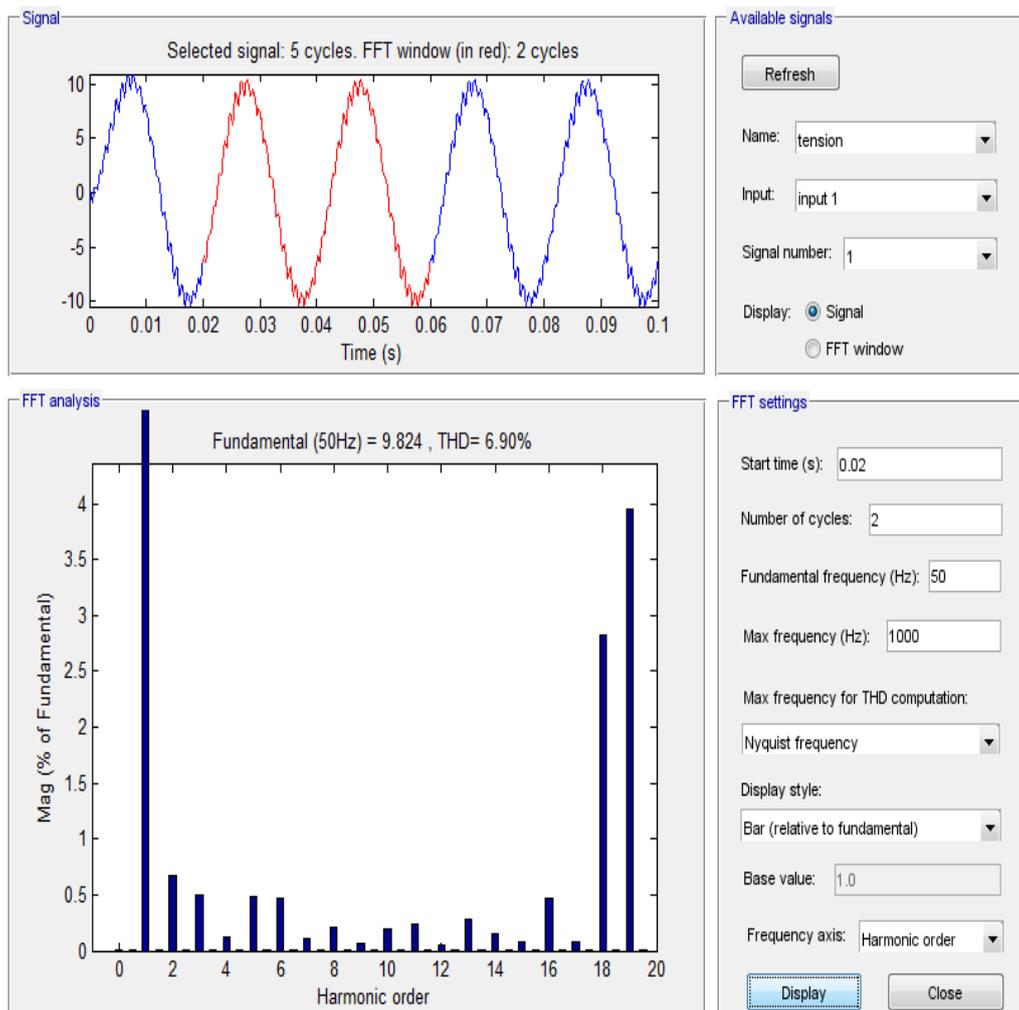


Figure 2.12 Spectre harmonique du courant de sortie d'un onduleur à deux niveaux pour une charge RL

2.9 Onduleur triphasé à trois niveaux

L'onduleur de tension à trois niveaux est une nouvelle structure utilisée pour l'alimentation en tension moyenne, fonctionnant en vitesse variable des machines synchrones et asynchrones de forte puissance. Ce type d'onduleur est utilisé en mode commandables. Le problème majeur reste encore la stabilisation du potentiel du diviseur capacitif, limitant leur développement industriel. Pour améliorer les performances du dispositif de commande de ce convertisseur, il faut trouver une stratégie de modulation à fréquence de modulation fixe et évaluer ses avantages dans le cadre d'une application industrielle [13].

2.9.1 Structure et modélisation d'un onduleur à trois niveaux

La structure d'un onduleur de tension à trois niveaux est présentée sur la figure (2.13). Cette structure consiste à créer sur l'étage continu entre la source continue et l'onduleur un point milieu de tension, permettant de générer des créneaux d'amplitude $(+U_c, 0, -U_c)$. Elle est constituée principalement de trois bras symétriques, chaque bras de l'onduleur est constitué de quatre paires (diode-transistor) en séries et deux diodes médianes permettant d'avoir le niveau zéro de la tension de sortie de l'onduleur. Une diode en inverse sur chaque interrupteur assure la circulation du courant pendant la phase de roue libre.

L'amplitude de la tension aux bornes de chaque semi-conducteur est limitée à la demi-tension de la source majorée de la surtension due à la commutation des interrupteurs. Les potentiels des bornes A, B, C peuvent prendre les trois valeurs $(+U_c, 0, -U_c)$, d'où l'appellation onduleur triphasé à trois niveaux [13].

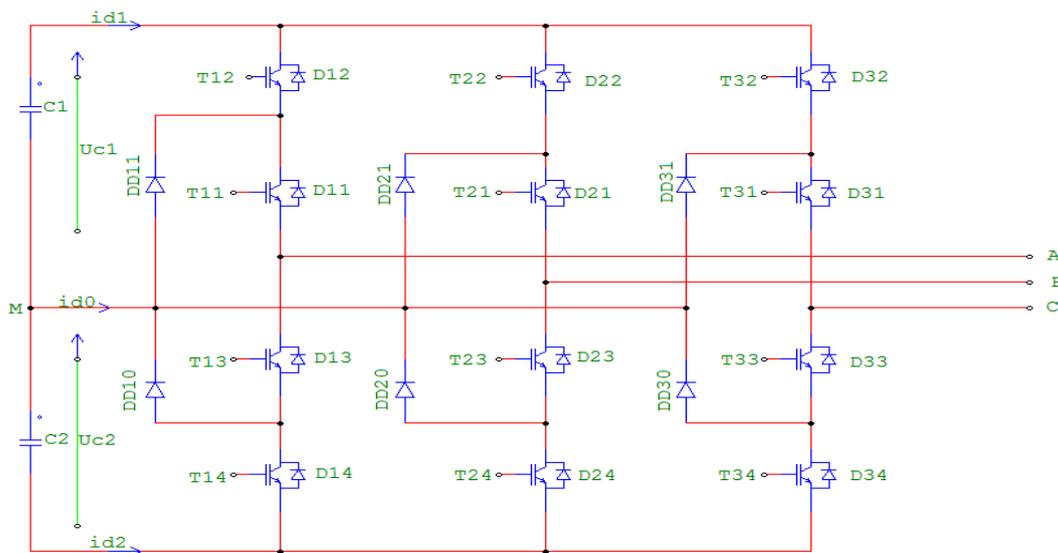


Figure 2.13 Structure de l'onduleur triphasé à trois niveaux

2.9.1.1 Modélisation du fonctionnement d'un bras de l'onduleur à trois niveaux

L'onduleur à trois niveaux a une structure symétrique. Donc on procède par bras, figure (2.14), ainsi, on définit en premier lieu un modèle global d'un bras sans a priori sur la commande.

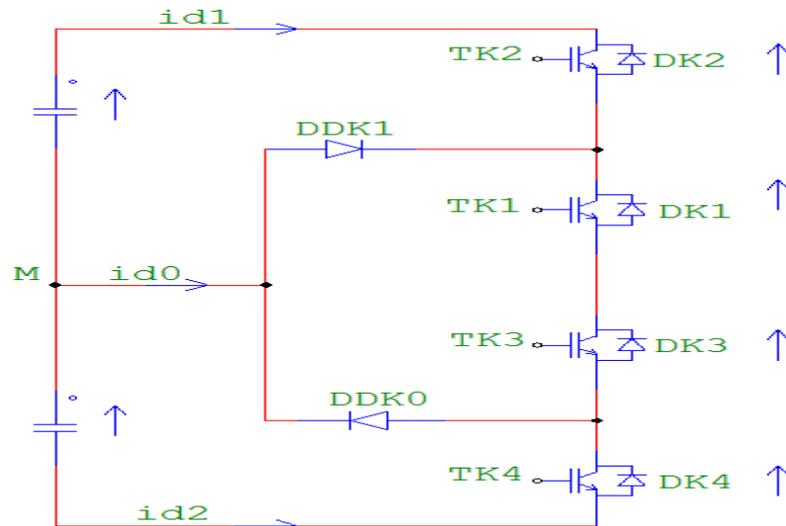


Figure 2.14 Structure d'un bras d'onduleur triphasé à trois niveaux

2.9.1.2 Les différentes configurations d'un bras d'onduleur à trois niveaux

Afin d'élaborer un modèle du fonctionnement de l'onduleur à trois niveaux sans a priori sur la commande; on représente chaque paire transistor diode par un seul interrupteur bidirectionnel figure (2.15) et on procède par bras (grâce à la symétrie de l'onduleur triphasé).

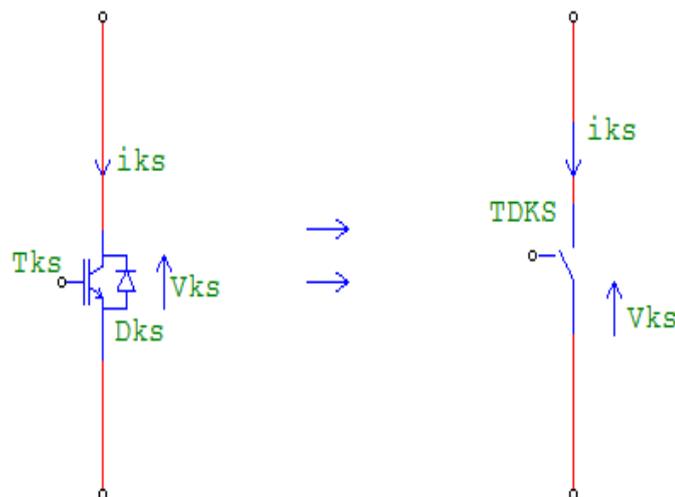


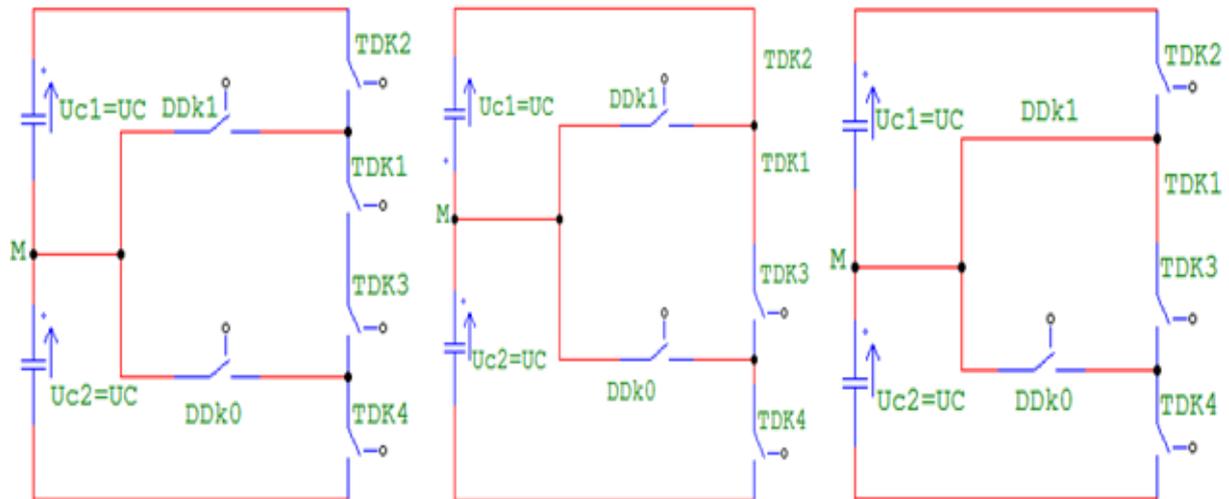
Figure 2.15 Interrupteur bidirectionnel équivalent de la paire diode-transistor

Une analyse topologique d'un bras montre cinq configurations possibles pour ce dernier. Ces différentes configurations sont présentées à la figure (2.15).

Les grandeurs électriques caractérisant chacune de ces configurations sont données dans le tableau (2.1) (avec M origine des potentiels et V_k le potentiel du nœud k du bras k). Pour les configurations E0 le potentiel V_k dépend de la source d'énergie alternative [15].

Tab (2.1) Grandeurs électriques correspondantes pour chacune des configurations d'un bras k.

La configuration	La grandeur électrique
E0	$i_k=0$
E1	$V_k=+U_{c1}=U_c/2$
E2	$V_k=0$
E3	$V_k=-U_{c2}=-U_c/2$
E4	$V_k=0$



a configuration E0 b configuration E1 c configuration E2



d configuration E3

e configuration E4

Figure 2.16 Les différentes configurations possibles pour un bras d'onduleur à trois niveaux

2.9.1.3 Stratégie de commande de l'onduleur à trois niveaux par MLI à deux porteuses

Afin de trouver des résultats comparatifs, la technique de commande de l'onduleur à trois niveaux que nous avons proposée et lala mémé que au chapitre deux, qu'il s'agit de la technique de commande de modulation de largeur d'impulsion à deux porteuses [15][16].

Le schéma bloc de la technique de commande à MLI d'un seul bras d'un onduleur à trois niveaux est illustré par la figure suivante :

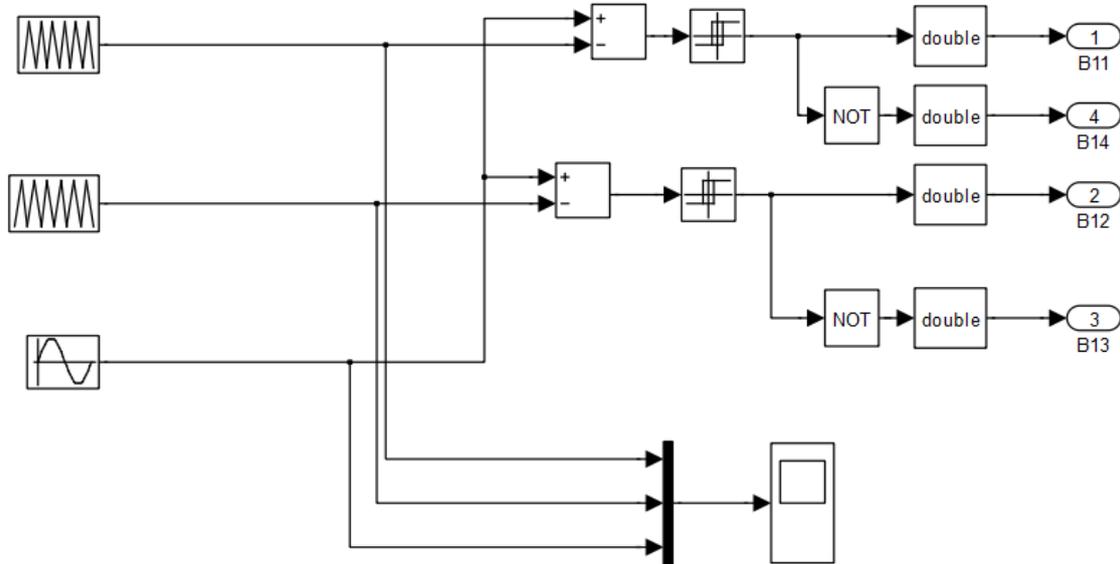


Figure 2.17Le schéma bloc de la technique de commande à MLI d'un seul bras d'un onduleur à trois niveaux

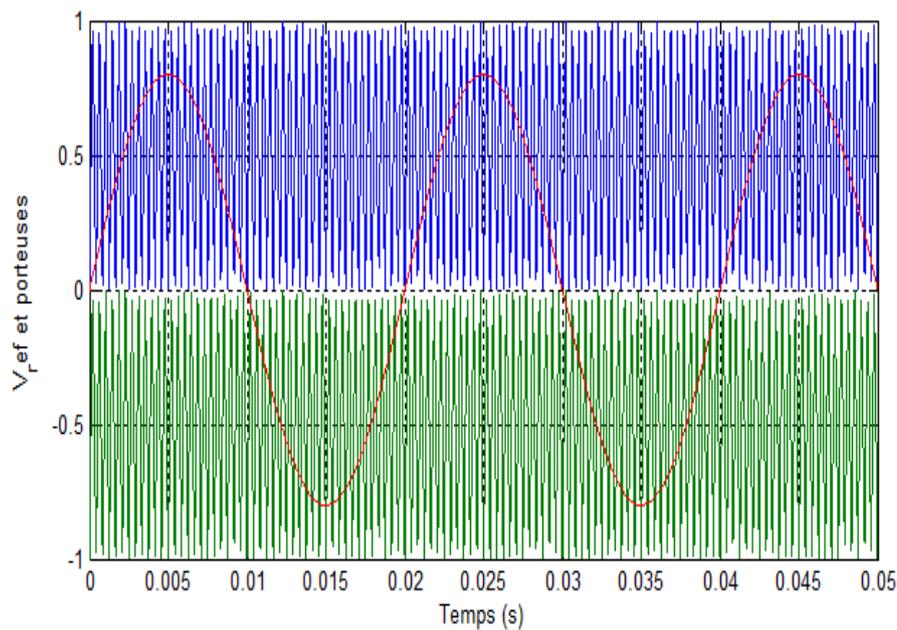


Figure 2.18Simulation des deux porteuses et la modulante

2.9.2 Simulation de l'onduleur à trois niveaux avec une charge RL

Dans ce cas, on associé l'onduleur de tension à trois niveaux avec charge RL, comme montre la figure 2.19

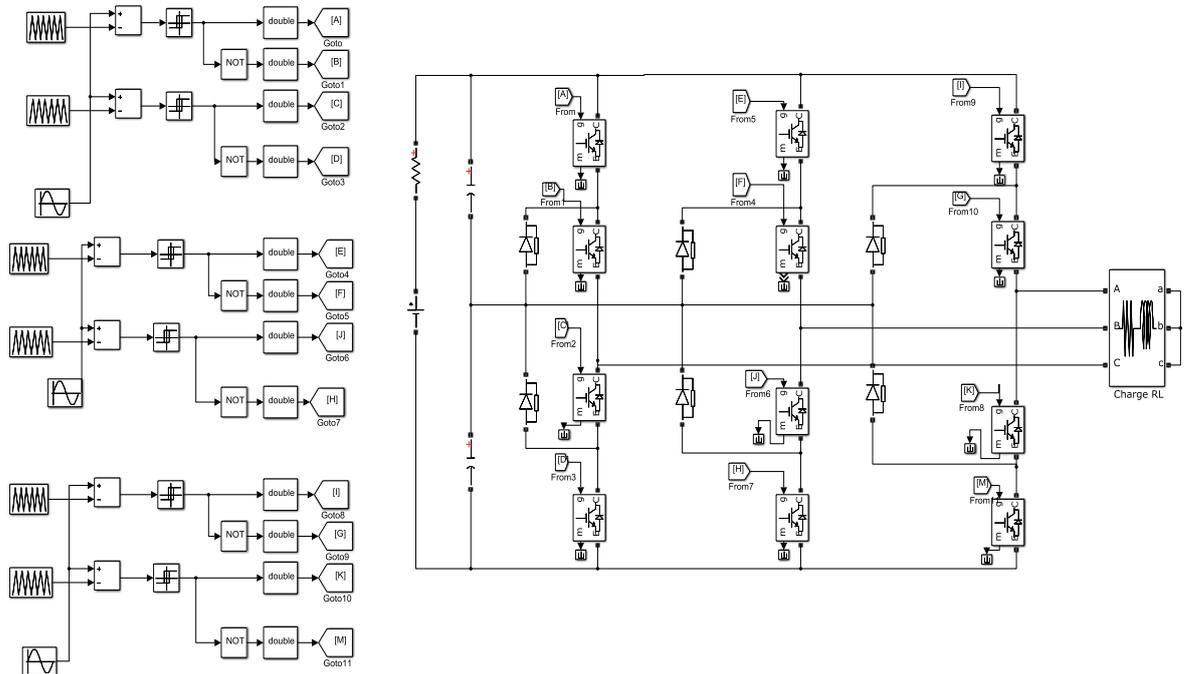


Figure 2.19 Schéma bloc de la simulation d'un onduleur à trois niveaux avec charge RL

Les figures 2.20 et 2.21. Présentent l'allure de la tension simple à la sortie de la phase a du convertisseur ainsi que son spectre harmonique. On remarque que la forme de la tension est sinusoïdale et que son spectre harmonique est de 40.19.

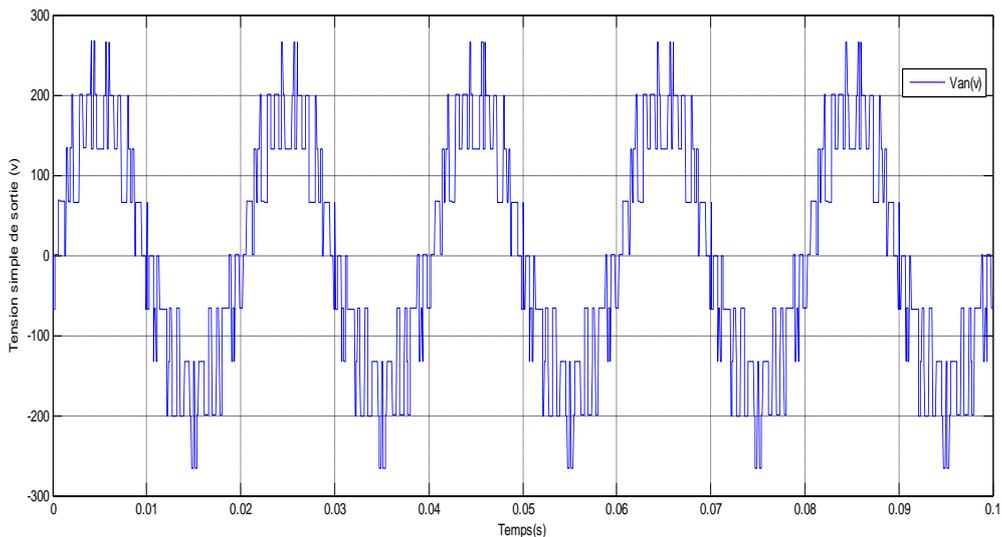


Figure 2.20 Tension simple de sortie d'un onduleur à trois niveaux

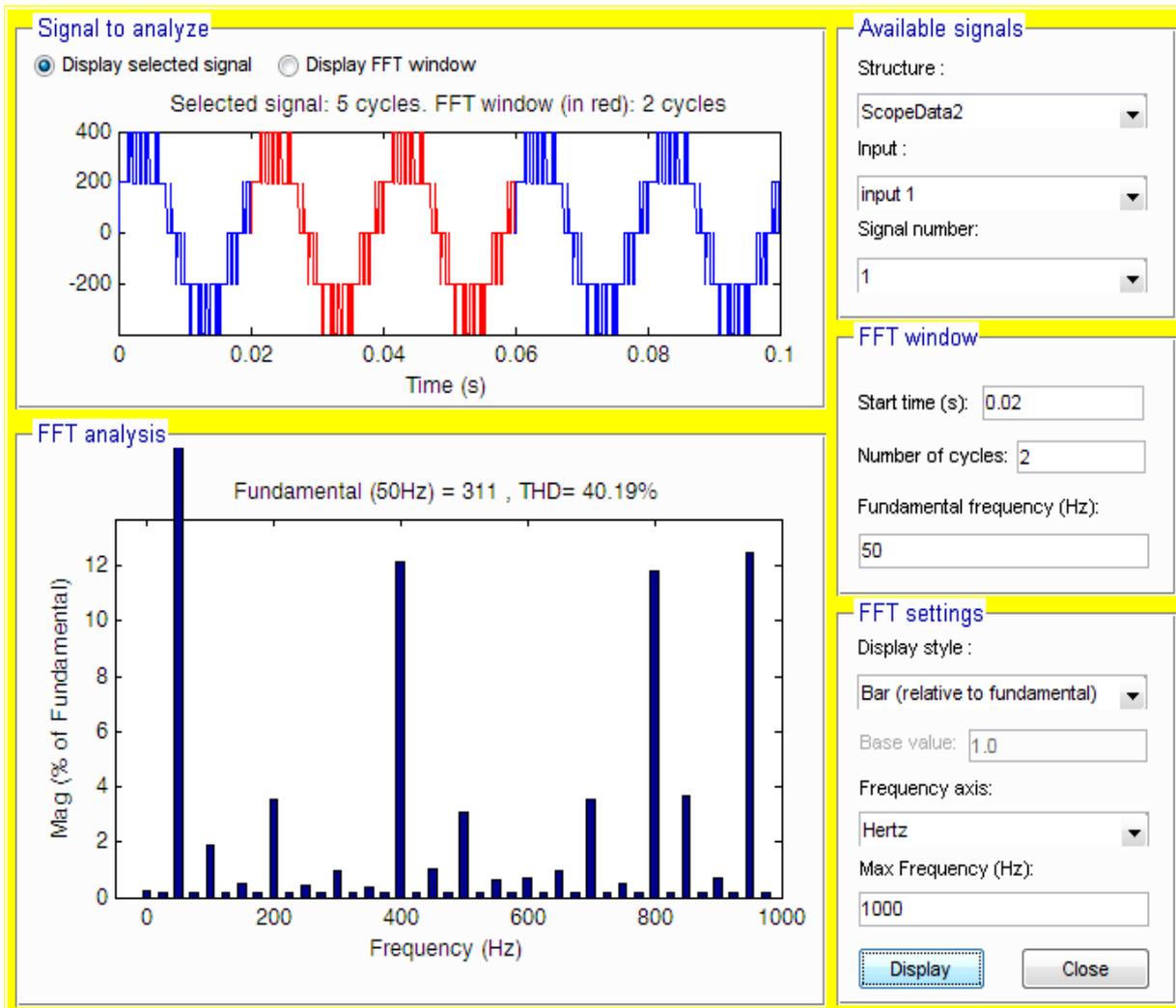


Figure 2.21 Spectre harmonique de la tension simple de sortie d'un onduleur à trois niveaux

La figure 2.22 illustre l'allure de la tension composée, on remarque que la forme de tension est à trois niveaux, et à une forme sinusoïdale symétrique.

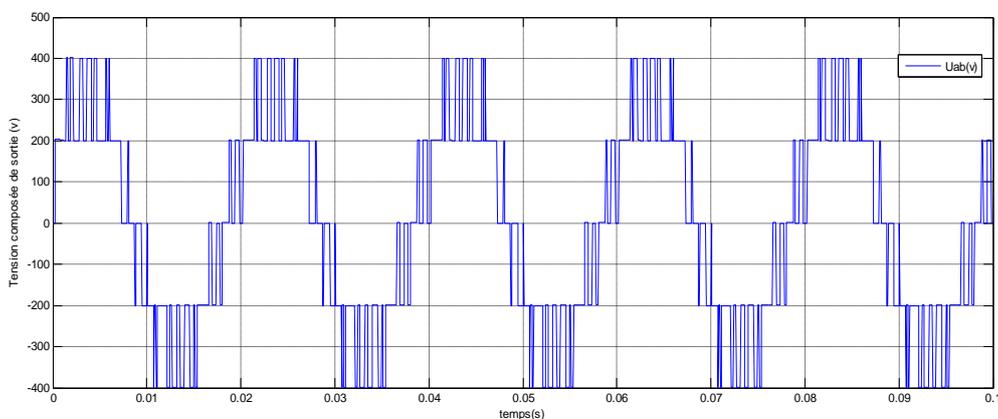


Figure 2.22 Tension composée de sortie d'un onduleur à trois niveaux

Les deux figures(2.23) et (2.24) présentent la forme du courant de sortie de la phase à du convertisseur pour une charge RL ainsi que son spectre harmonique. On remarque que le THD est d'une valeur de 3.59.

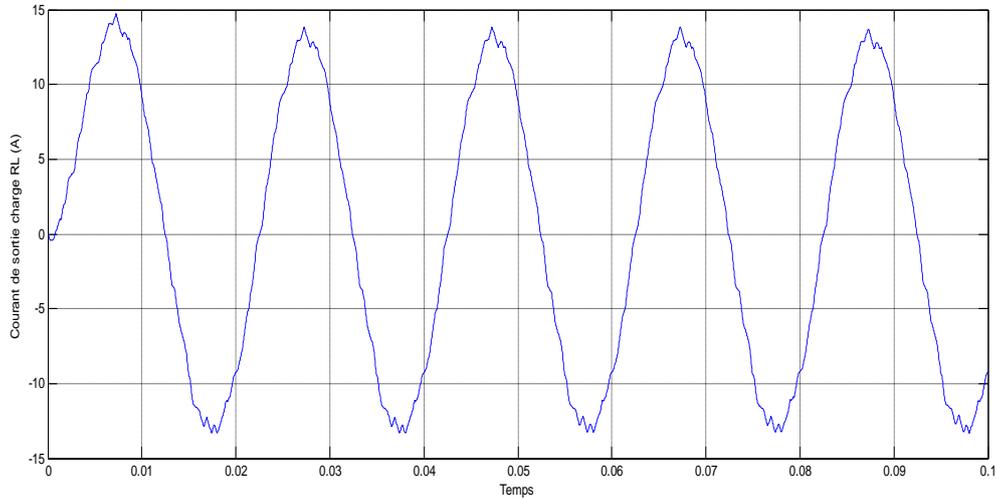


Figure 2.23 Courant de sortie d'un onduleur à trois niveaux pour une charge RL

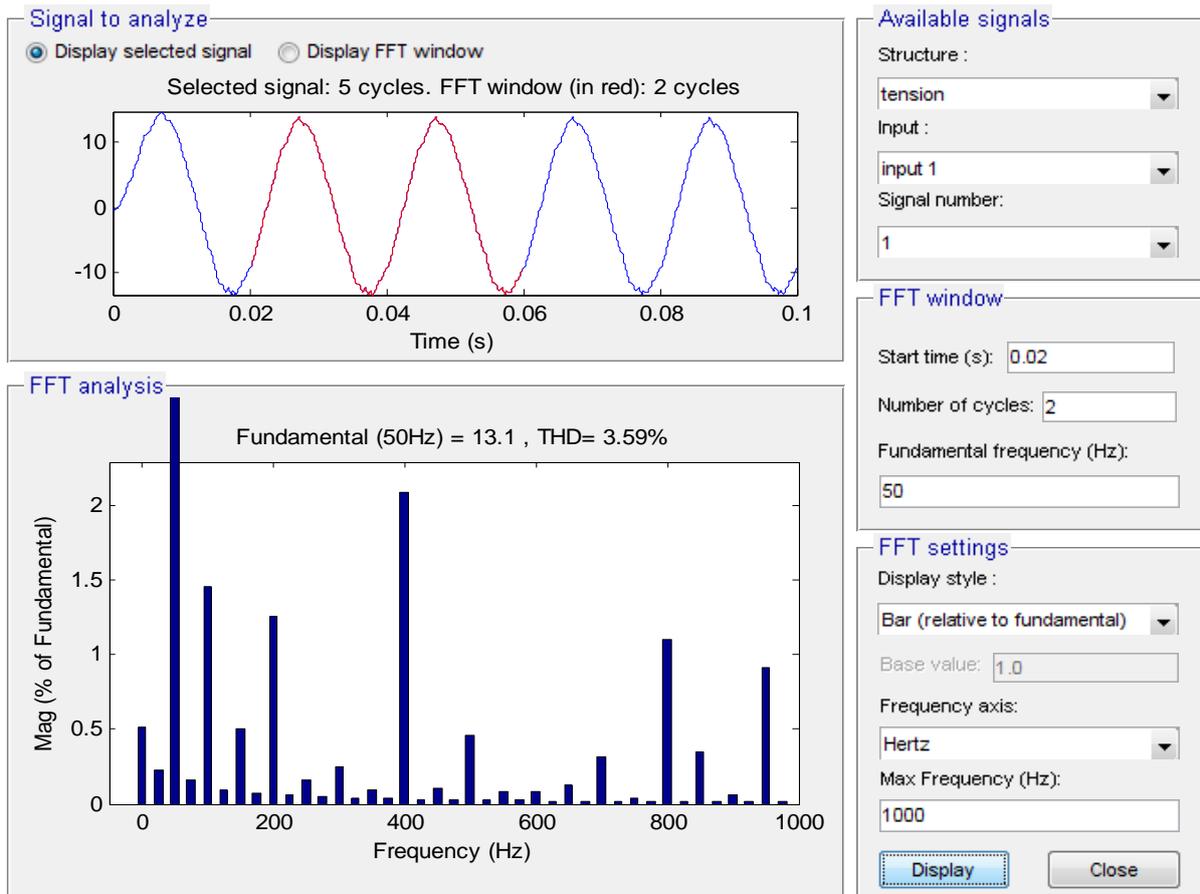


Figure 2.24 Spectre harmonique du courant de sortie d'un onduleur à trois niveaux pour une charge

2.10 Structure d'un onduleur à cinq niveaux à diodes flottantes

L'onduleur à cinq niveaux à diodes flottantes est constitué de trois bras et quatre sources de tension continue. Chaque bras comporte huit interrupteurs en série et six diodes. Chaque interrupteur est composé d'un transistor et d'une diode montée en tête bêche.(antiparallèle) . Le circuit de puissance de l'onduleur à cinq niveaux à structure diodes flottantes est présenté par la figure (2.25). La source de tension continue est divisée par l'association en série de quatre condensateurs, chaque condensateur à une tension au quart de la tension d'entrée [17].

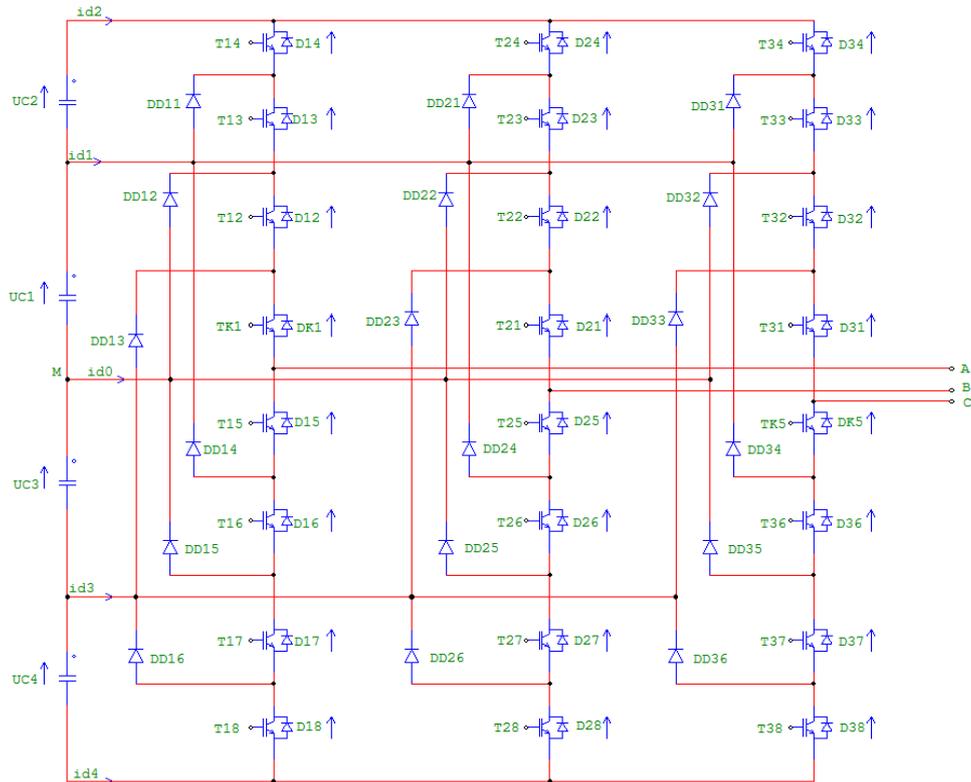


Figure 2.25 Structure de l'onduleur triphasé à cinq niveaux à diodes flottantes

2.10.1 Différentes configurations de l'onduleur à cinq niveaux à diodes flottantes

L'analyse topologique du bras montre cinq configurations possibles, qui permettent de définir la séquence de fonctionnement de l'onduleur: Tout d'abord, définir les différents états que peut prendre la tension phase neutre (tension neutre relative) (Par exemple, la tension entre le bras de l'onduleur et le point médian virtuel).

La tension phase-terre V_{ao} est définie par les états de huit quadrilatères. Les états des huit quadrilatères peuvent être des transistors, des GTO ou des IGBT à diodes antiparallèles. Les états possibles d'un seul bras de Commutation sont $2^5 = 32$ états, qui peuvent être représentés par quatre fois 0 et 1.

2.10.2 Types de configuration d'un onduleur à cinq niveaux

L'analyse topologique d'un bras de l'onduleur montre sept configurations possibles. Ces différentes configurations sont présentées par la Figure (2.26) et le tableau (2.2) [18].

Tab (2.2) Grandeurs électriques correspondantes pour chacune des configurations d'un bras *k*

La configuration	La grandeur électrique
E0	$I_k = 0$
E1	$V_k = U_{c1} + U_{c2} = 2U_c$
E2	$V_k = U_{c1} = U_c$
E3	$V_k = 0$
E4	$V_k = -U_{c3} = -U_c$
E5	$V_k = -U_{c3} - U_{c4} = -2U_c$
E6	$V_k = 0$

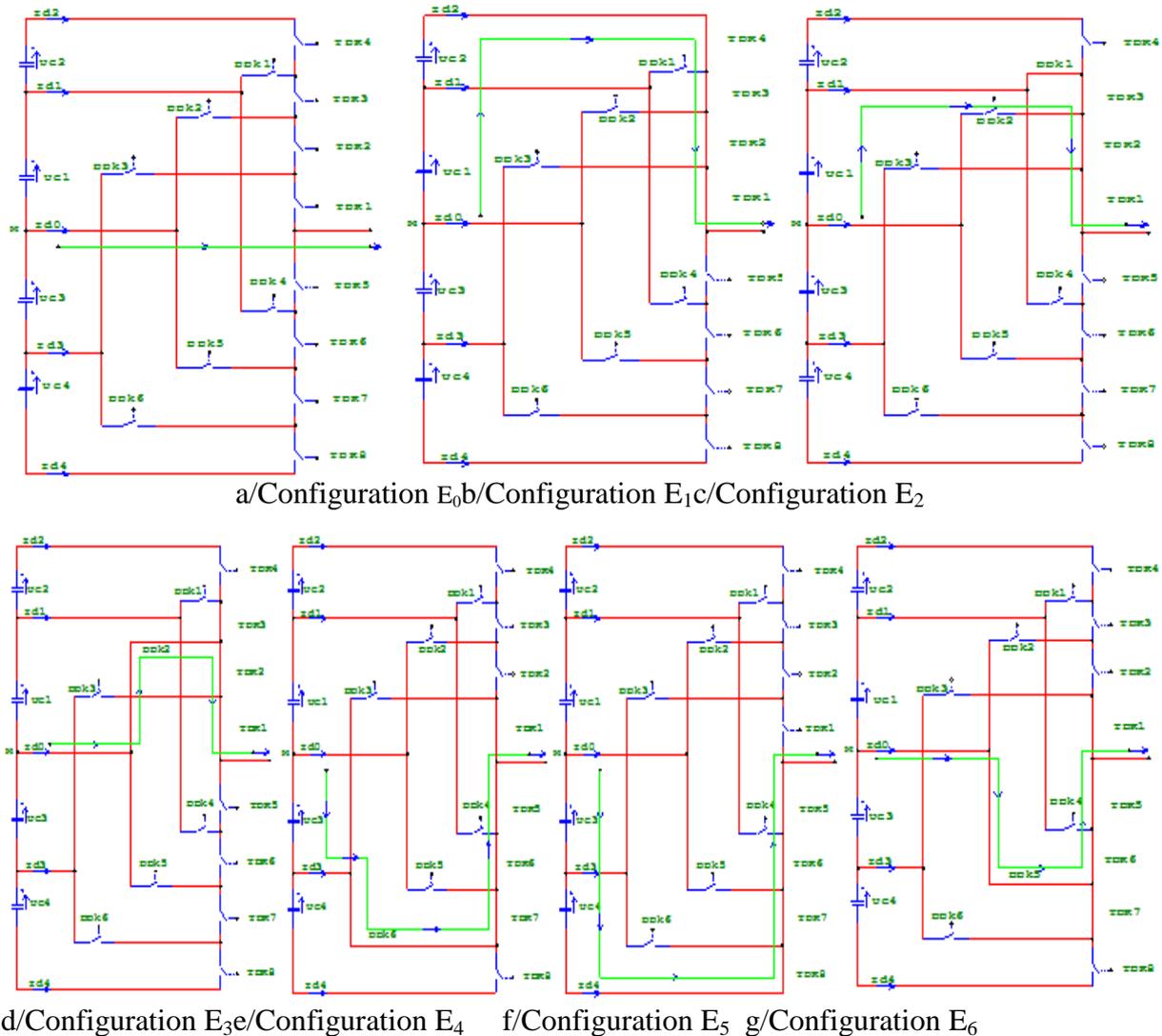


Figure 2.26 Les différentes configurations possibles pour un bras *k* de l'onduleur à cinq niveaux à diodes flottantes

2.10.3 Modélisation d'un bras d'onduleur à cinq niveaux à diodes flottantes

La symétrie de l'onduleur triphasé à cinq niveaux par rapport au point milieu M de chaque phase nous permet de modéliser ce dernier par bras.

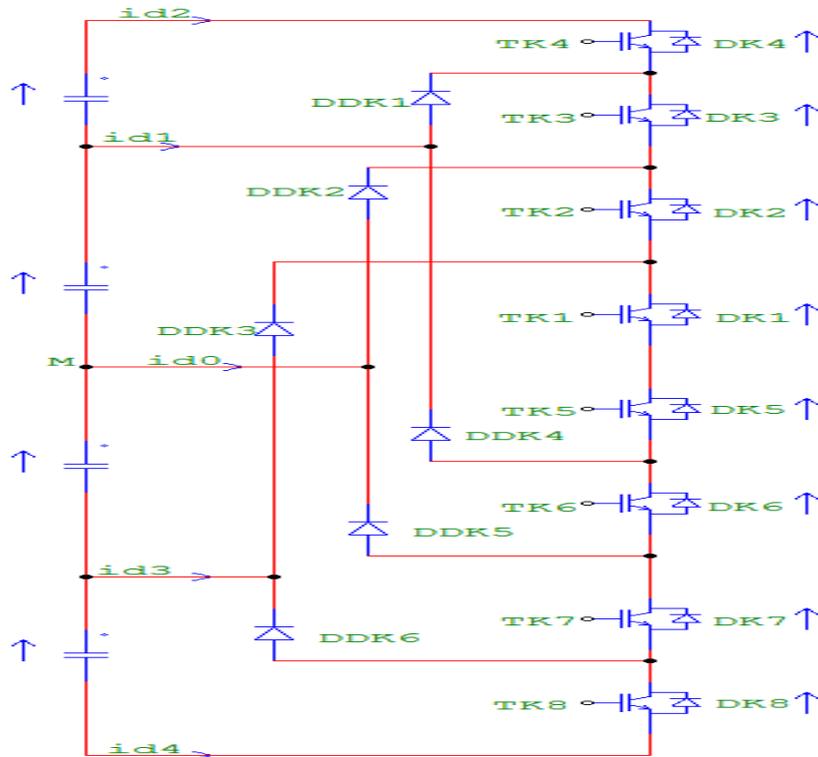


Figure 2.27 Un bras de l'onduleur à cinq niveaux à diodes flottantes

2.10.4 Commande de l'onduleur à cinq niveaux

La figure (2.28) illustre le principe de la commande de l'onduleur à cinq niveaux

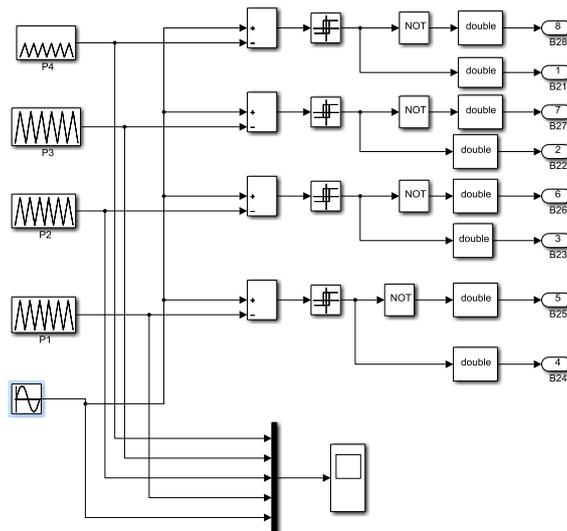


Figure 2.28 Le schéma bloc de la technique de commande à MLI d'un seul bras d'un onduleur à cinq niveaux

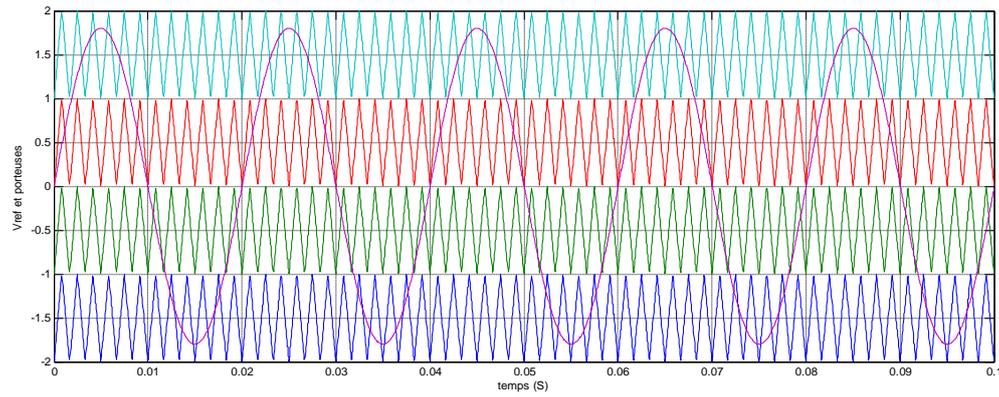


Figure 2.29 Simulation des deux portuses et la modulante

2.10.5 Simulation de l'onduleur à cinq niveaux avec une charge RL

Dans ce cas, on associe l'onduleur de tension à cinq niveaux avec charge RL, comme montre la figure 2.30

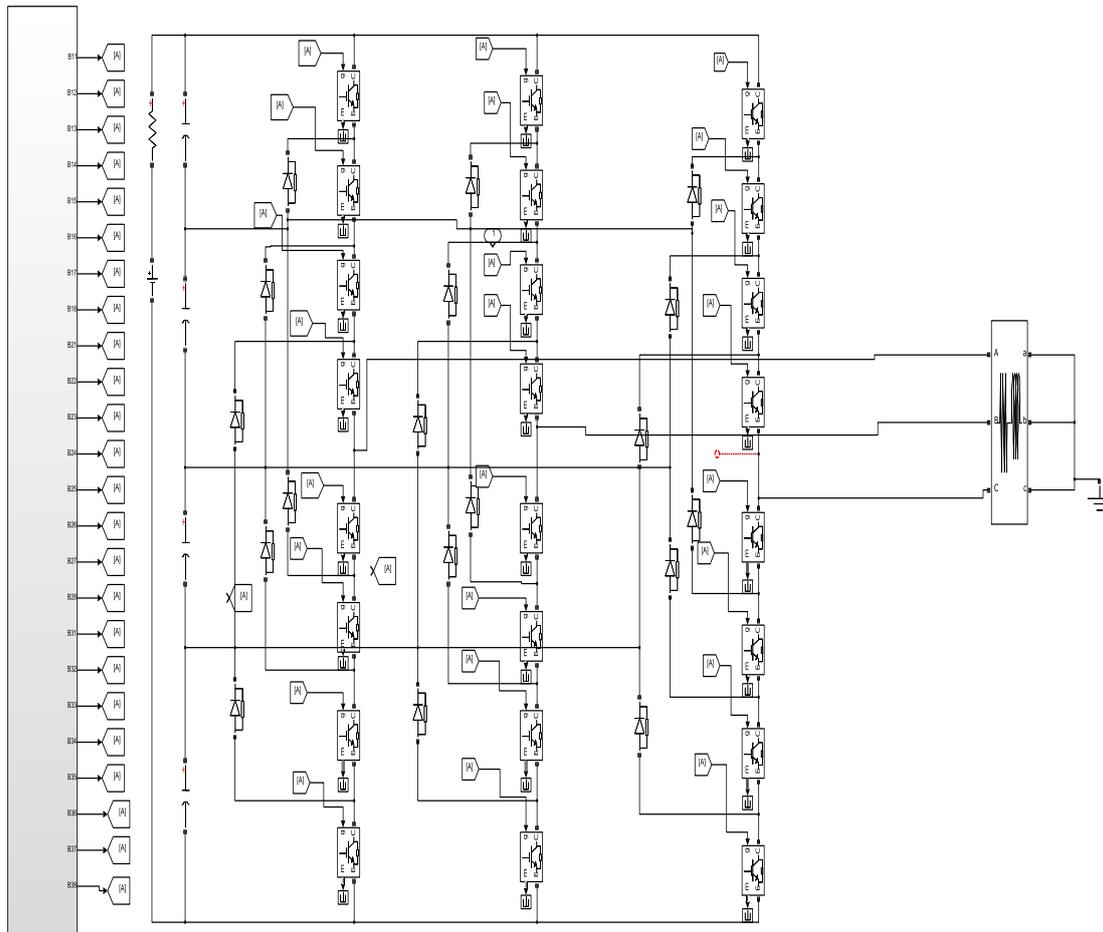


Figure 2.30 Schéma bloc de la simulation d'un onduleur à cinq niveaux avec charge RL

Les figures 2.31 et 2.32 présentent l’allure de la tension simple à la sortie de la phase a du convertisseur ainsi que son spectre harmonique. On remarque que la forme de la tension est sinusoïdale et que son spectre harmonique est de 40.19.

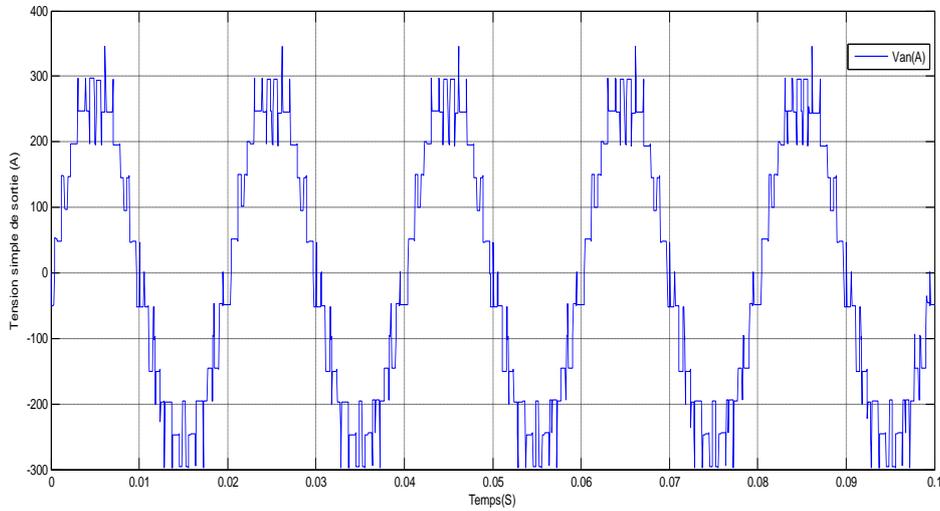


Figure 2.31 Tension simple de sortie d’un onduleur à cinq niveaux

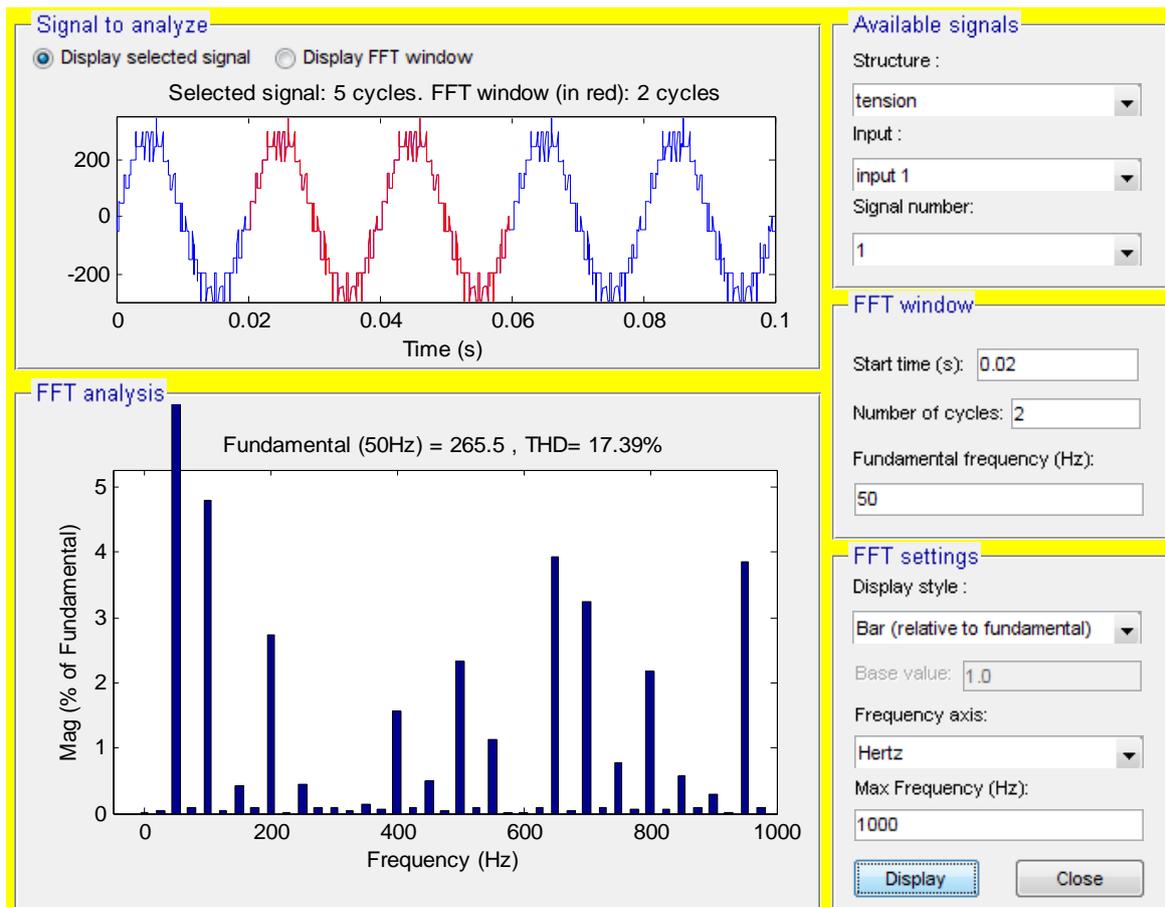


Figure 2.32 Spectre harmonique de la tension simple de sortie d’un onduleur à cinq niveaux

La figure 2.33 illustre l'allure de la tension composée, on remarque aussi que la forme de tension est à cinq niveaux, et à une forme sinusoïdale symétrique.

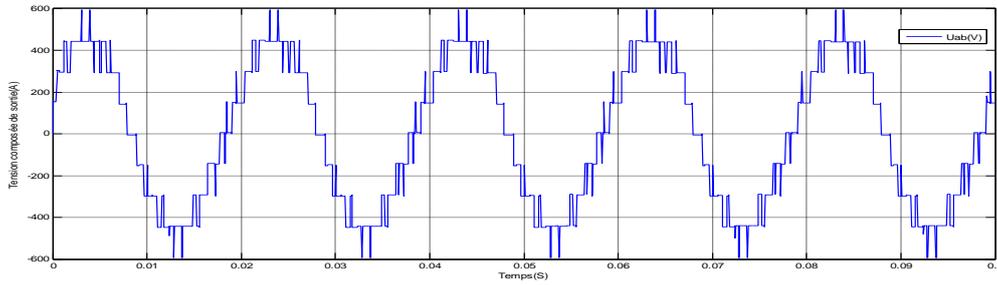


Figure 2.33 Tension composée de sortie d'un onduleur à cinq niveaux

Les deux figures (2.34) et (2.35) présentent la forme du courant de sortie de la phase à du convertisseur pour une charge RL ainsi que son spectre harmonique. On remarque que le THD est d'une valeur de 3.35.

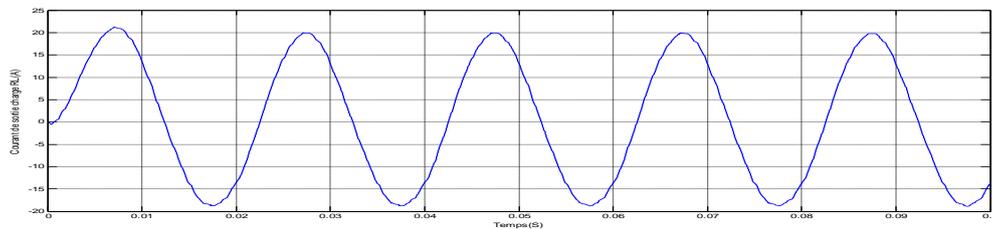


Figure 2.34 Courant de sortie d'un onduleur à cinq niveaux pour une charge RL

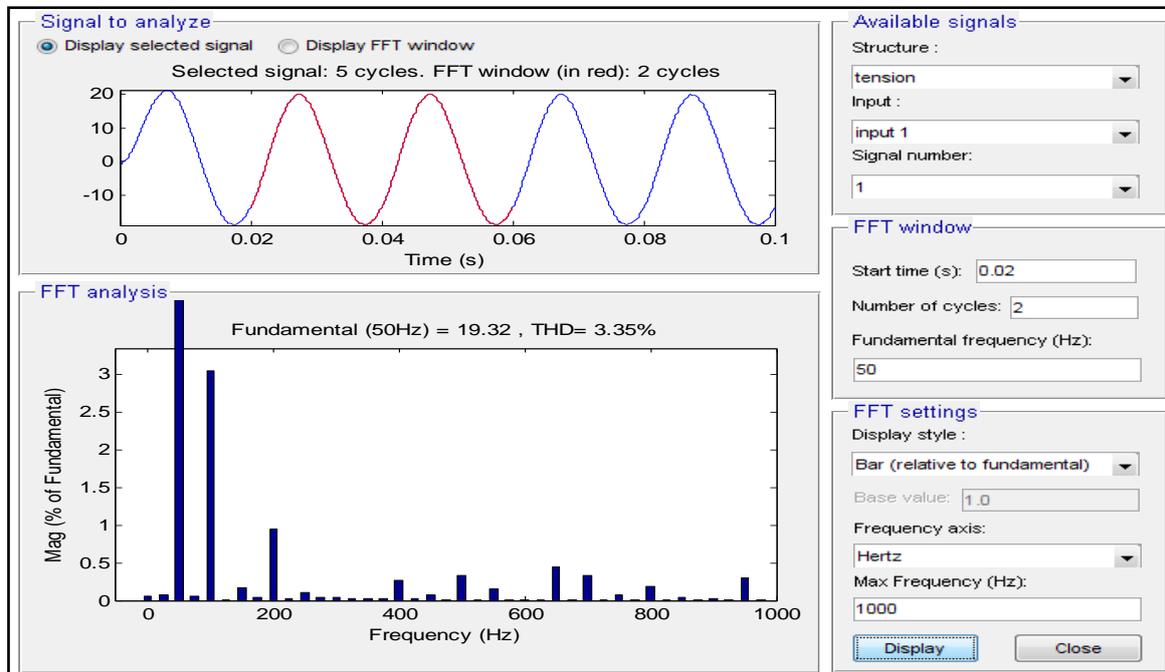
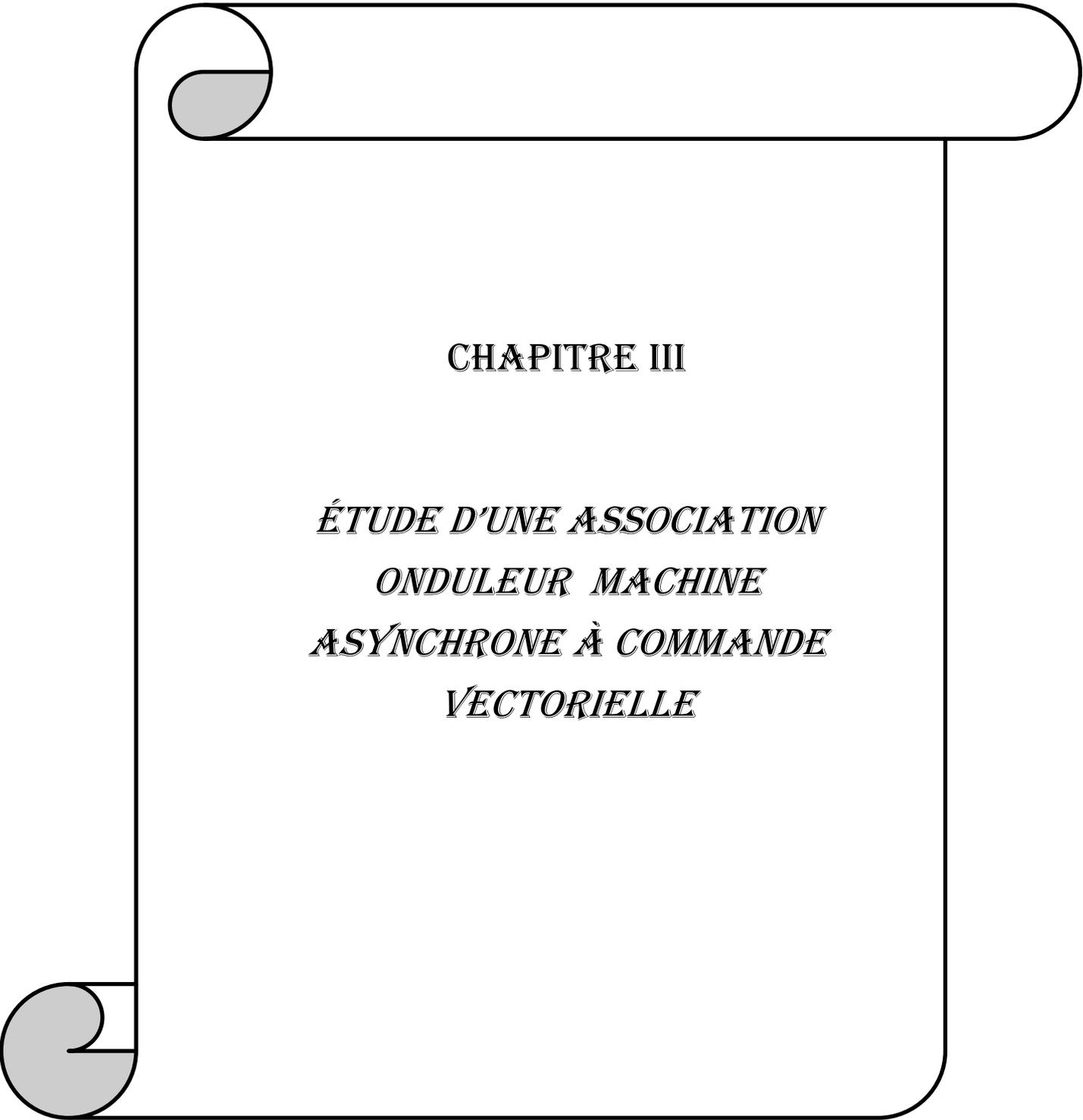


Figure 2.35 Spectre harmonique du courant de sortie d'un onduleur à cinq niveaux pour une charge RL

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié la modélisation et la simulation des trois types des onduleurs de tension à deux niveaux, trois niveaux et cinq niveaux avec une charge RL. Les résultats obtenus montrent la validité des différents modèles, mettent en évidence la qualité de la forme des courant et des tensions à la sortie de l'onduleur en terme de THD. Seulement la commande MLI est considérée pour la commande des onduleurs, les résultats obtenus confirment les performances de l'augmentation de niveau de tension des onduleurs.



CHAPITRE III

ÉTUDE D'UNE ASSOCIATION ONDULEUR MACHINE ASYNCHRONNE À COMMANDE VECTORIELLE

❖ Bloc de régulateur de vitesse

Dans ce bloc de réglage, les grandeurs d'entrées sont la vitesse de référence et la vitesse mesurée, pour avoir à la sortie un couple de référence.

❖ Bloc de régulateur de courant i_{qs}

Il prend en entrée le courant i_{qs}

* la valeur de référence et sa mesure. Il agit sur la tension de référence v_{qs}

* pour ajuster le courant i_{qs} . Si l'on regarde de plus près le schéma, on remarque qu'il y a un coefficient entre le couple de référence et le courant de référence i_{qs} dépend à la transformation triphasée – biphasé choisie.

❖ Bloc de régulateur de courant i_{ds}

Il prend en entrée le courant i_{ds}

* la valeur de référence et sa mesure. Il agit sur la tension de référence v_{ds} .

* Réguler ce courant à une valeur constante, c'est garantir un flux rotorique constant car :

$$\varphi_r = \frac{M}{1+p\tau_r} (3.2)$$

Où

$$\tau_r = \frac{L_r}{R_s} (3.3)$$

3.2.2 Principe de découplage

Nous avons choisis le découplage par compensation car nous définissons deux nouvelles variables de commande V_{sd1} et V_{sq1} ou [36]

$$\begin{cases} V_{sd} = V_{sd1} - e_{sd} \\ V_{sq} = V_{sq1} - e_{sq} \end{cases} (3.4)$$

Où

$$\begin{cases} e_{sd} = \omega_s \sigma L_s i_{sq} + \frac{L_m}{L_r^2} R_r \varphi_r \\ e_{sq} = -\omega_s \sigma L_s i_{sd} - \frac{L_m}{L_r} \omega_s \varphi_r + \frac{L_m^2}{L_r T_r} i_{sq} \end{cases} (3.5)$$

Ces équations sont illustre dans a figure (3.2) suivant :

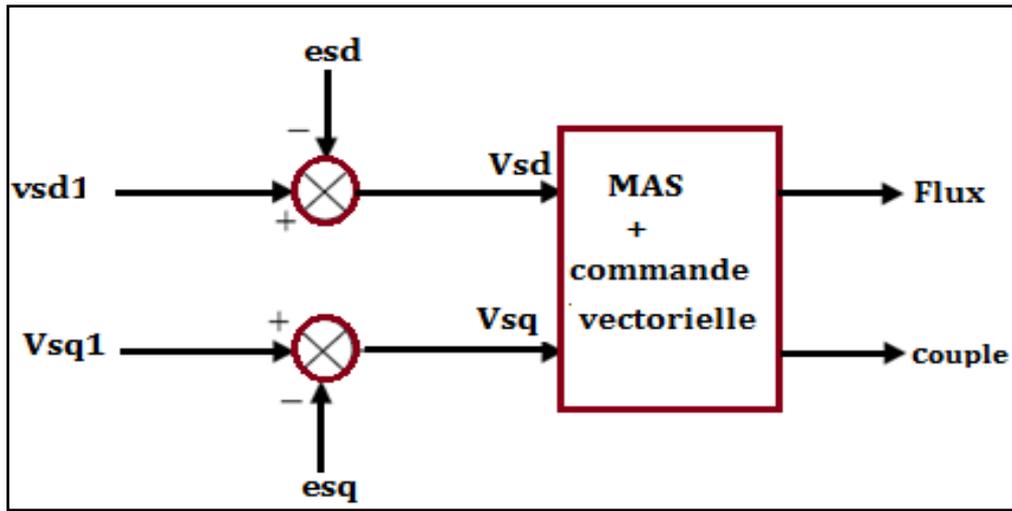


Figure 3.2 Reconstitution des tensions V_{sd} et V_{sqr}

Les actions sur les axes d et q sont donc découplées :

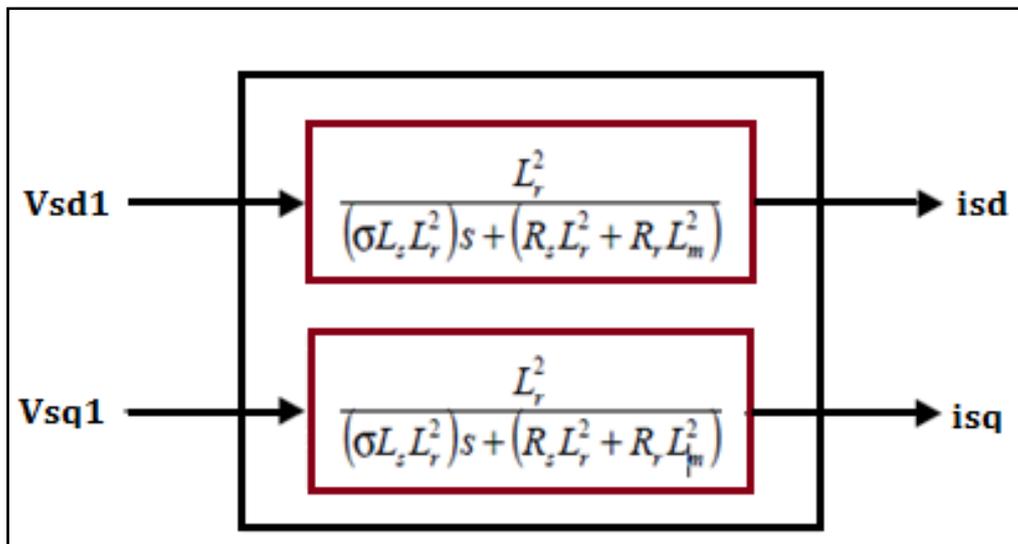


Figure 3.3 Commande découplée de i_{sd} et i_{sqr}

Pour le flux et le couple on obtiens :

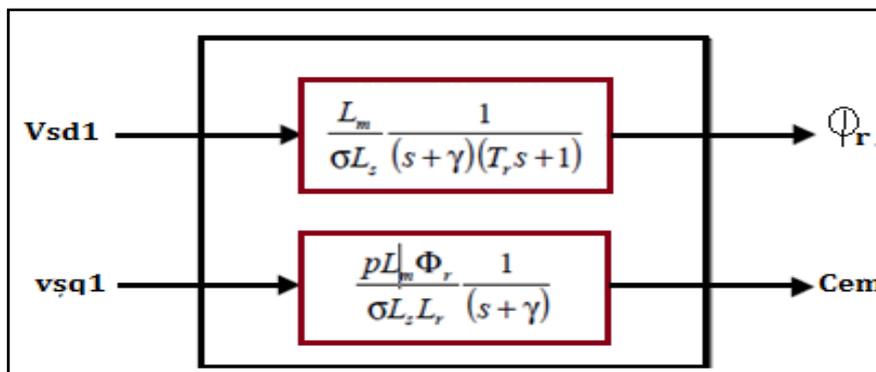


Figure 3.4 Commande découplée de ϕ_r et C_{em}

3.2.3 Calcul des grandeurs

❖ Calcul $\widehat{\varphi}_r$

Le flux reconstituée par :

- Des estimateurs utilisés en boucle ouverte
- Des observateurs corrigeant en boucle fermé pour les variables estimées

$$\widehat{\varphi}_r = \frac{L_m}{1+T_r s} i_{ds} \quad (3.6)$$

❖ Calcul ω_s

La pulsation satorique s'écrit par

$$\omega_s = p\Omega + \frac{L_m}{T_r} \frac{i_{qs}}{\widehat{\varphi}_r} \quad (3.7)$$

Pour le démarrage de moteur $\widehat{\varphi}_r$ est nul Nous utilisons l'implantation est donne par ma relation suivant :

$$\omega_s = p\Omega + \frac{L_m}{T_r} \frac{i_{qs}}{\widehat{\varphi}_r + \varepsilon} \quad (3.8)$$

Avec : $\varepsilon=0.01$

❖ Calcul s

$$s = \frac{1}{\omega_s} \quad (3.9)$$

3.2.4 Calcule des régulateurs

Les régulateurs à action proportionnelle-intégrale PI sont très répandus dans le domaine de la commande des machines électriques :

- l'action du régulateur proportionnelle P assure la rapidité de la réponse dynamique,
- l'action du régulateur intégral élimine l'erreur statique en régime permanent [16].

Dans notre commande, on a utilisé trois régulateurs PI, le premier pour la régulation de vitesse, le deuxième pour le couple, et le troisième pour le flux (courants).

Les détails de calculs des paramètres des régulateurs sont donnés comme suit:

3.2.4.1 Régulateur de vitesse

La vitesse peut être contrôlée au moyen d'un régulateur *PI* dont les paramètres peuvent être calculés à partir de la figure (3.5) suivante :

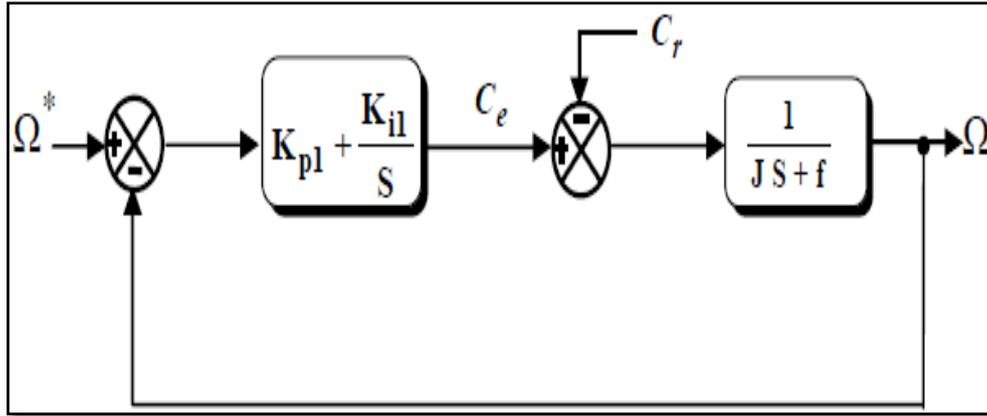


Figure 3.5 Schéma de la régulation de la vitesse

La fonction de transfert du système en boucle fermée est donnée par :

$$\Omega = \frac{1}{Js+f} (C_e - C_r) \quad (3.10)$$

$$\Omega = \frac{1}{Js+f} \frac{(K_{pl}S + K_{il})}{S} (\Omega_{ref} - \Omega) - \frac{1}{Js+f} C_r \quad (3.11)$$

$$\Omega = \left[1 + \frac{1}{Js+f} \left(\frac{K_{pl}S + K_{il}}{S} \right) \right] = \frac{1}{Js+f} \frac{(K_{pl}S + K_{il})}{S} \Omega_{ref} - \frac{1}{Js+f} C_r \quad (3.12)$$

$$\Omega = \left[\frac{S(JS+f) + (K_{pl}S + K_{il})}{S(JS+f)} \right] = \frac{(K_{pl}S + K_{il})}{S(JS+f)} \Omega_{ref} - \frac{1}{Js+f} C_r \quad (3.13)$$

Cette fonction de transfert possède une dynamique de deuxième ordre.

En identifiant le dénominateur à la forme canonique suivante :

$$1 + \frac{2\xi}{\omega_n} s + \frac{1}{\omega_n^2} s^2,$$

On peut donc résoudre le système d'équation suivant :

$$\begin{cases} \frac{J}{K_{il}} = \frac{1}{\omega_n^2} \\ \frac{2\xi}{\omega_n} = \frac{f + K_{pl}}{K_{il}} \end{cases} \quad (3.14)$$

Pour un amortissement critique $\zeta=1$ on obtient les paramètres du régulateur suivants:

$$\begin{cases} K_{il} = J \cdot \omega_n^2 \\ K_{pl} = \frac{2\xi K_{il}}{\omega_n} - f \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} K_{il} = J \frac{(t_{rep} \cdot \omega_n)^2}{t_{rep}} \\ K_{pl} = J \frac{t_{rep} \omega_n \cdot 2\xi}{t_{rep}} - f \end{cases} \quad (3.15)$$

3.2.4.2 Régulateur de couple

La relation de découplage définie par la figure (3.6) nous permet d'écrire :

$$\frac{C_e}{V_{scl}} = \frac{p M_{sr} \varphi_r}{\sigma L_s L_r} \cdot \frac{1}{s+\gamma} = \frac{K_2}{s+\gamma} \quad (3.16)$$

Tel que

$$K_2 = \frac{p M_{sr} \varphi_r}{\sigma L_s L_r} \quad (3.17)$$

Nous utilisons un régulateur proportionnel-intégral **PI** représenté par la figure suivante :

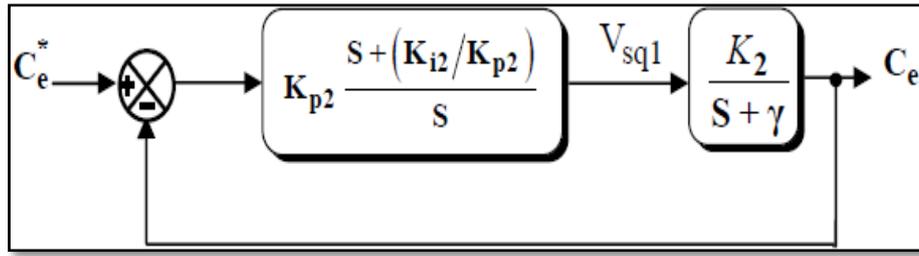


Figure.3.6 Schéma de régulation du couple

La compensation du pôle $(s + \gamma)$ par $\left(s + \frac{K_{i2}}{K_{p2}}\right)$ se traduit par la relation suivant :

$$s + \gamma = s + \frac{K_{i2}}{K_{p2}} \quad (3.18)$$

Ce qui donne :

$$\gamma = \frac{K_{i2}}{K_{p2}} \quad (3.19)$$

La fonction de transfert en boucle ouverte est donnée par :

$$\frac{C_e}{C_e^*} = \frac{K_{p2}K_2}{s} \quad (3.20)$$

La fonction de transfert en boucle fermée est donnée par :

$$\frac{C_e}{C_e^*} = \frac{K_{p2}K_2}{s + K_{p2}K_2} = \frac{1}{\left(\frac{1}{K_{p2}K_2}\right)s + 1} \quad (3.21)$$

Tel que la constante du temps associée au régulateur est donnée par :

$$\tau_2 = \frac{1}{K_{p2}K_2} \quad (3.22)$$

Pour un temps de réponse imposé t_{rep2} (5%) nous obtenons la condition suivante :

$$\tau_2 = \frac{t_{rep2}(5\%)}{3} \quad (3.23)$$

A partir des relations (3.19) et (3.21) nous obtenons les paramètres du régulateur de couple comme suit :

Le gain K_{p2} est donné par :

$$K_{p2} = \frac{1}{K_2\tau_2} \quad (3.24)$$

Le gain K_{i2} est donné à partir la relation suivante :

$$K_{i2} = \frac{K_{p2}}{T_r} \quad (3.25)$$

3.2.4.3 Régulateur de flux

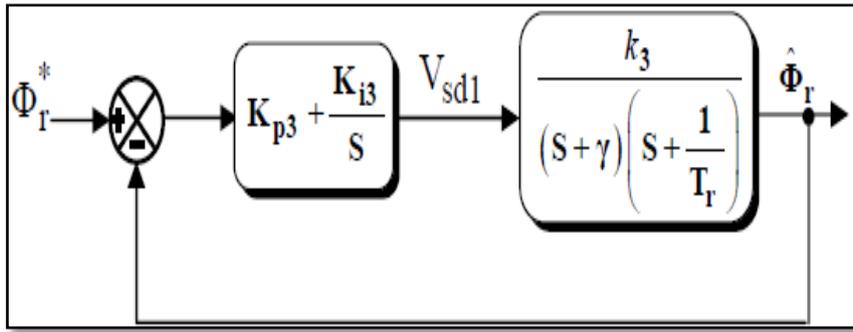


Figure.3.7 Schéma fonctionnel de la régulation du flux

On peut écrire :

$$\varphi_r = \frac{K_3}{s+\gamma\left(s+\frac{1}{T_r}\right)} V_{sd} \quad (3.26)$$

Avec :

$$K_3 = \frac{M_{sr}}{\sigma L_s T_r} \quad (3.27)$$

Pour obtenir en boucle fermée une réponse de type 2nd ordre. Soit un régulateur proportionnel-intégral classique de type :

$$PI = K_3 + \frac{K_i}{s} \quad (3.28)$$

Compensons le pole le plus lent par le numérateur de la fonction de transfert de notre régulateur soit

$\left(s + \frac{1}{T_r}\right)$ par $\left(s + \frac{K_{i3}}{K_3}\right)$, ce qui traduit par la condition

$$\frac{K_{i3}}{K_3} = \frac{1}{T_r} \quad (3.29)$$

On peut écrire la fonction de transfert comme suivant :

$$BO(s) = \frac{K_{p3}K_3}{s(s+\gamma)} \quad (3.30)$$

Pour boucle fermée on donne l'équation caractéristique du ce système :

$$BF(s) = 1 + \frac{\gamma}{K_{p3}K_3} s + \frac{s^2}{K_{p3}K_3} \quad (3.31)$$

Que nous cherchons à identifier à la forme canonique du 2^{eme} ordre nous avons donc résoudre le système suivant :

$$\begin{cases} \frac{1}{K_{p3}K_3} = \frac{1}{\omega_n^2} \\ \frac{\gamma}{K_{p3}K_3} = \frac{2\xi}{\omega_n} \end{cases} \quad (3.32)$$

Où

$$K_{p3} = \frac{\gamma^2}{K_3(2\xi)^2} \quad (3.33)$$

A partir l'équation (3.29) permet déduire :

$$K_{i3} = \frac{1}{T_r} K_{p3} \quad (3.34)$$

3.3 association machine asynchrone avec onduleur multi-niveaux

3.3.1 Simulation de l'onduleur à deux niveaux avec machine asynchrone

Dans ce cas, nous avons associe la machine asynchrone (MAS) avec un onduleur de tension à deux niveaux, pour cela nous avons appliqué un couple de charge à l'instant $t=1.5$ de valeur $C_r=20$ N.m. comme montre la figure 3.8 ;

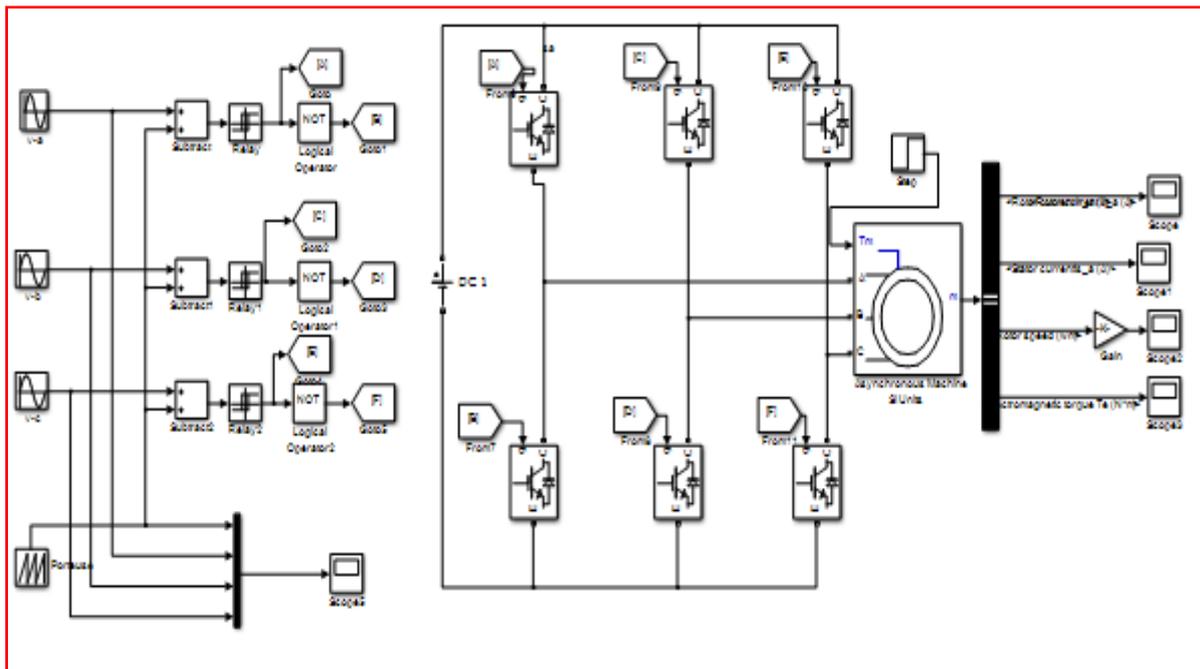


Figure 3.8 Schéma bloc de la simulation d'un onduleur à deux niveaux avec machine asynchrone

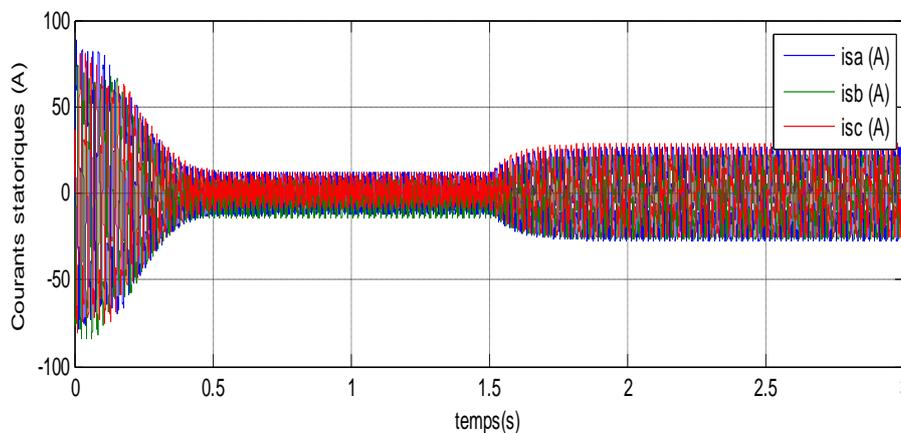


Figure 3.9 courants statoriques de la machine pour un onduleur à deux niveaux

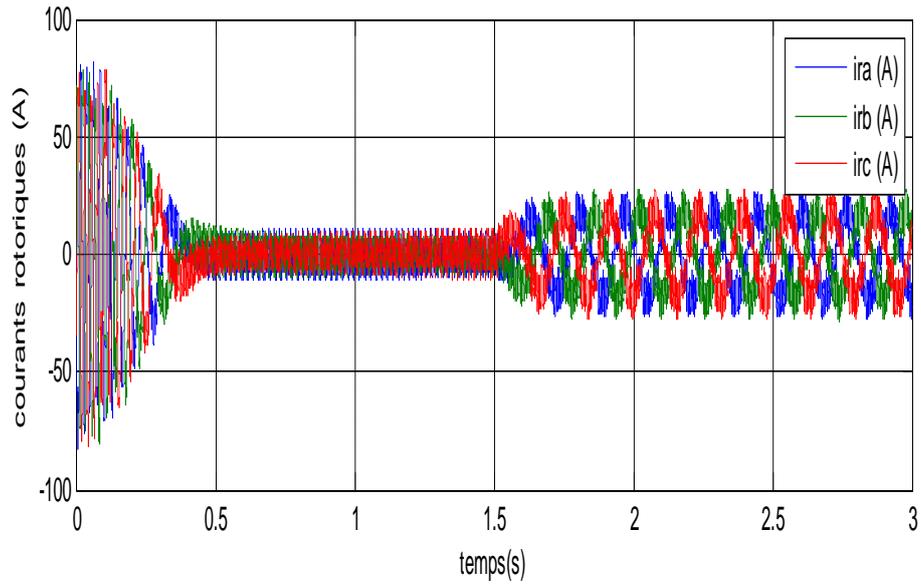


Figure 3.10 courants rotoriques de la machine pour un onduleur à deux niveaux

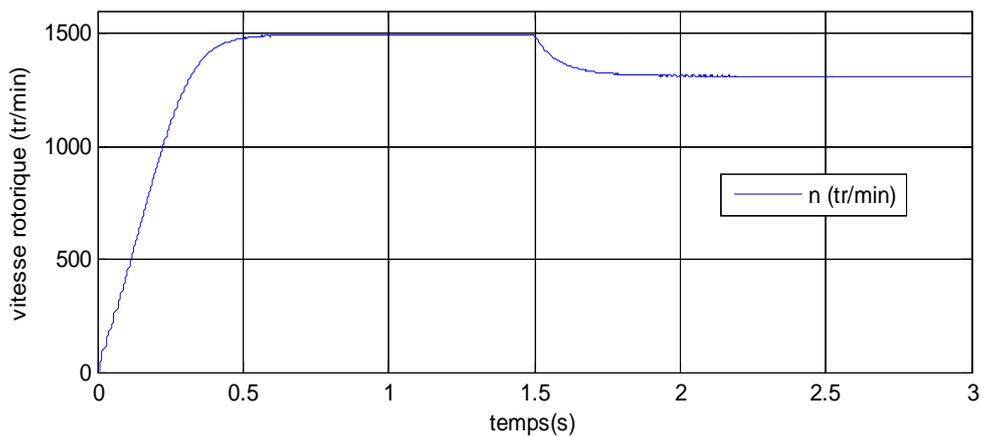


Figure 3.11 Vitesse de rotation de la machine pour un onduleur à deux niveaux

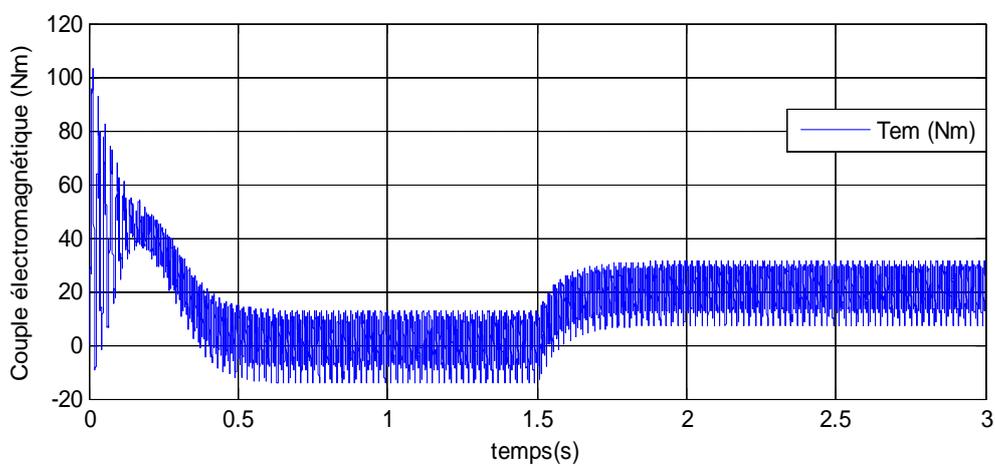


Figure 3.12 Couple électromagnétique de la machine pour un onduleur à deux niveaux

Dans les figures ci-dessous, on remarque que les grandeurs électriques de la machines dans la présence d'un onduleur à deux niveaux sont des bonnes performances, les courants statoriques ainsi que les courants rotoriques sont purement sinusoïdales après un régime transitoire et fonctionnement à vide entre l'instant 0 et 1.5s. L'introduction d'un couple de charge de 20Nm à partir de 1.5s, les grandeurs électriques restent sinusoïdaux avec une augmentation de leurs amplitudes. Les mêmes remarques enregistrés pour les grandeurs couple et vitesse, la vitesse se stabilise à 1500 pour un fonctionnement à vide et elle va diminuer lorsque la machine est chargée à l'instant 1.5s due à la présence du couple de charge. Le couple électromagnétique est nul lorsque la machine fonctionne à vide puis il est égale le couple de charge de 10Nm, dont le fonctionnement en charge.

3.3.2 Simulation de l'onduleur à trois niveaux avec une machine asynchrone

Dans ce cas, nous avons associé la machine asynchrone (MAS) avec un onduleur de tension à trois niveaux, pour cela nous avons appliqué un couple de charge à l'instant $t=1.5$ de valeur $C_r=10$ N.m. comme montre la figure 3.13 ;

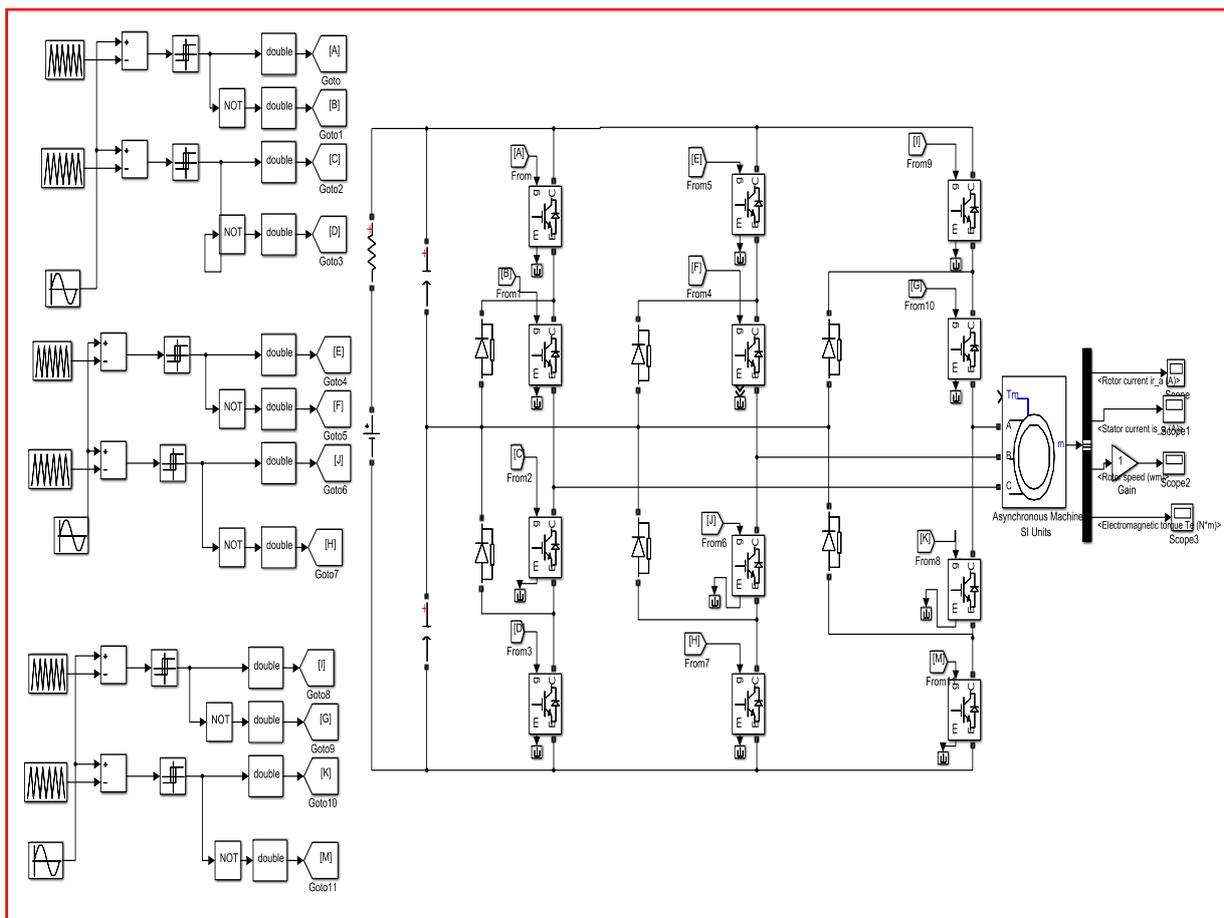


Fig.3.13 Schéma bloc de la simulation d'un onduleur à trois niveaux avec machine asynchrone

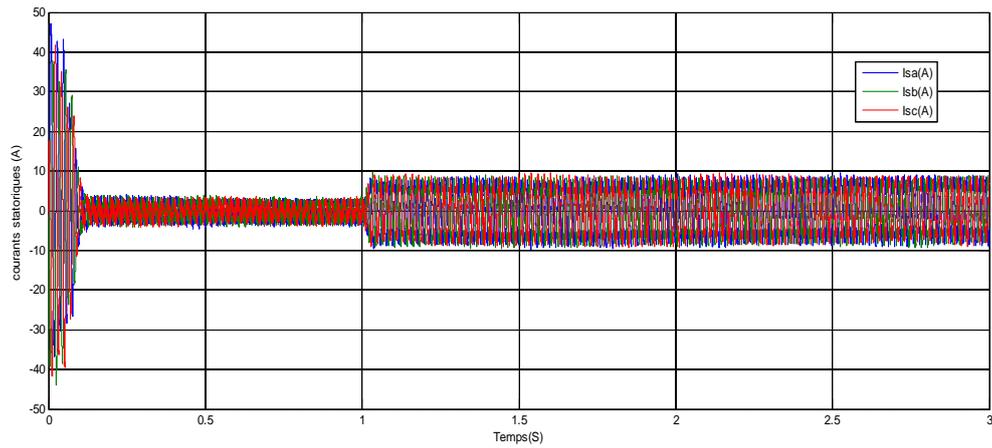


Fig.3.14 Courants statoriques de la machine pour un onduleur à trois niveaux

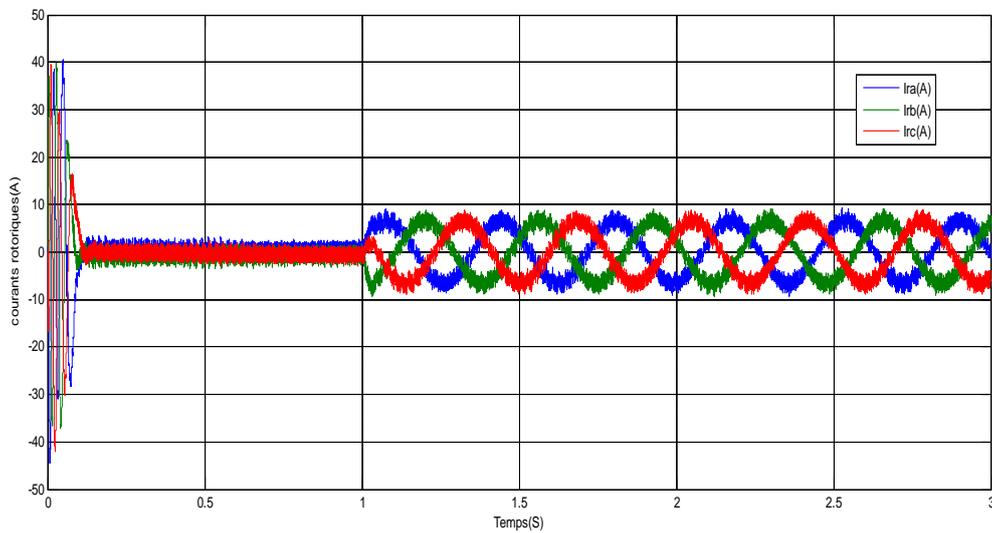


Fig.3.15 Courants rotoriques de la machine pour un onduleur à trois niveaux

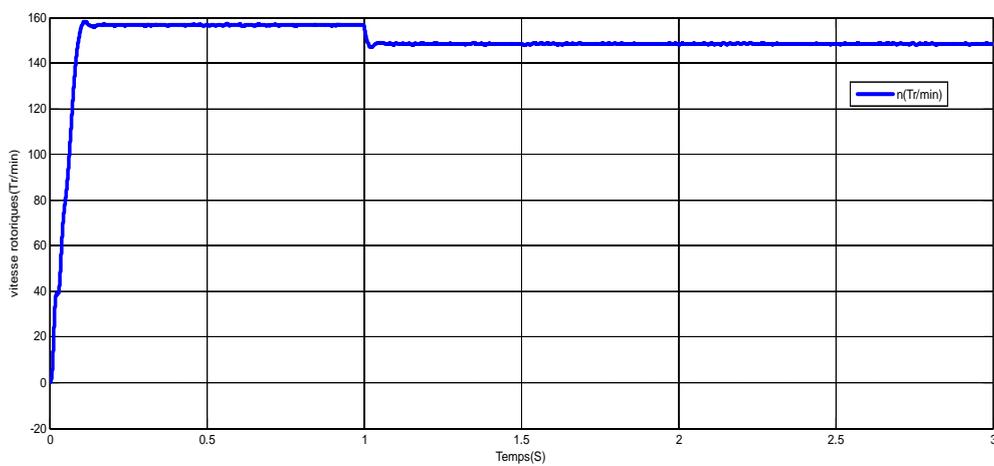


Fig.3.16 Vitesse de rotation de la machine pour un onduleur à trois niveaux

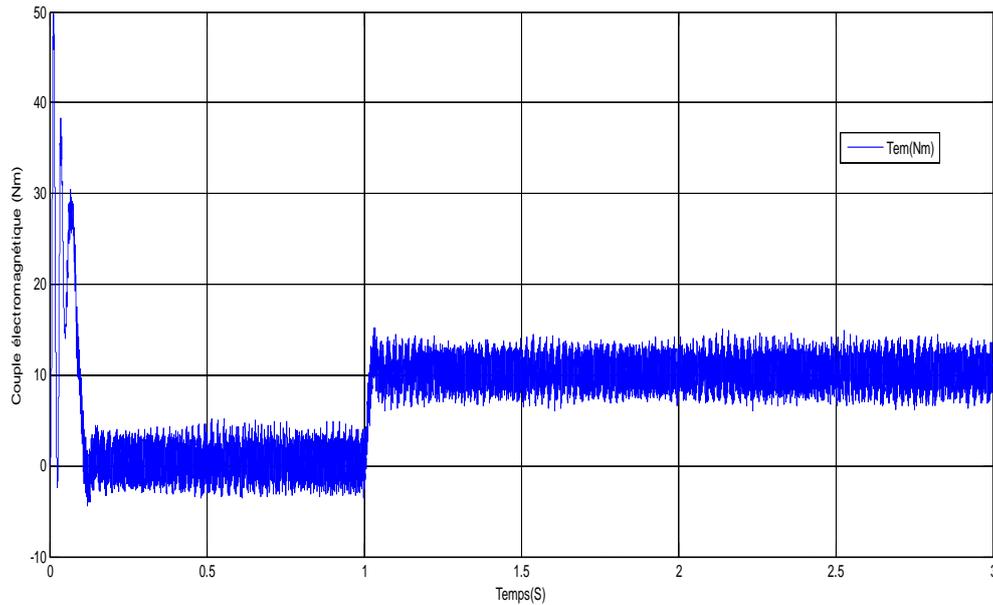


Fig.3.17 Couple électromagnétique de la machine pour un onduleur à trois niveaux

Les mêmes figures sont obtenus pour le cas d'un onduleur à trois niveaux associée à une machine asynchrone, on remarque donc que les grandeurs électriques de la machines dans la présence d'un onduleur à trois niveaux sont des bonnes performances, les courants statoriques ainsi que les courants rotoriques sont sinusoïdaux après un régime transitoire et fonctionnement à vide entre l'instant 0 et 1s. L'introduction d'un couple de charge de 20Nm à partir de 1s, les grandeurs électriques restent sinusoïdales avec une augmentation de leurs amplitudes. Les mêmes remarques enregistrés pour les grandeurs couple et vitesse, la vitesse se stabilise à 1500 (157 rad/s) pour un fonctionnement à vide et elle va diminuer lorsque la machine est chargée à l'instant 1s due à la présence du couple de charge. Le couple électromagnétique est nul lorsque la machine fonctionne à vide puis il est égale le couple de charge de 10Nm, dont le fonctionnement en charge.

3.3.3 Comparaison entre un onduleur à deux niveaux et un à trois onduleurs niveaux

Malgré que le nombre des composants électroniques d'un onduleur à multi niveaux soient multiple qu'à celles d'un onduleur à deux niveaux, les résultats obtenus montrent la bonne qualité des grandeurs électriques d'un onduleur multi-niveaux par rapport à un onduleur à deux niveaux au niveau de la chute de tension ainsi que la forme sinusoïdale du courant et le THD

Tab (3.1) Tableau de comparaison entre un onduleur à deux, trois et cinq niveaux

	Nombre des composants dans chaque bras	Chute de tension aux bornes d'un interrupteur	THD de la tension simple à la sortie de l'onduleur	THD du courant de sortie de la charge RL
Onduleur à deux niveaux	6	E	108.41	6.9
Onduleur à trois niveaux	12	E/2	40.19	3.59
Onduleur à cinq niveaux	32	E/4	17.39	3.35

3.4 Commande vectorielle de la MAS

La modèle que nous avons étudiée pour la commande vectorielle de la MAS avec l'onduleur à trois niveaux est illustrée par la figure (4.46)

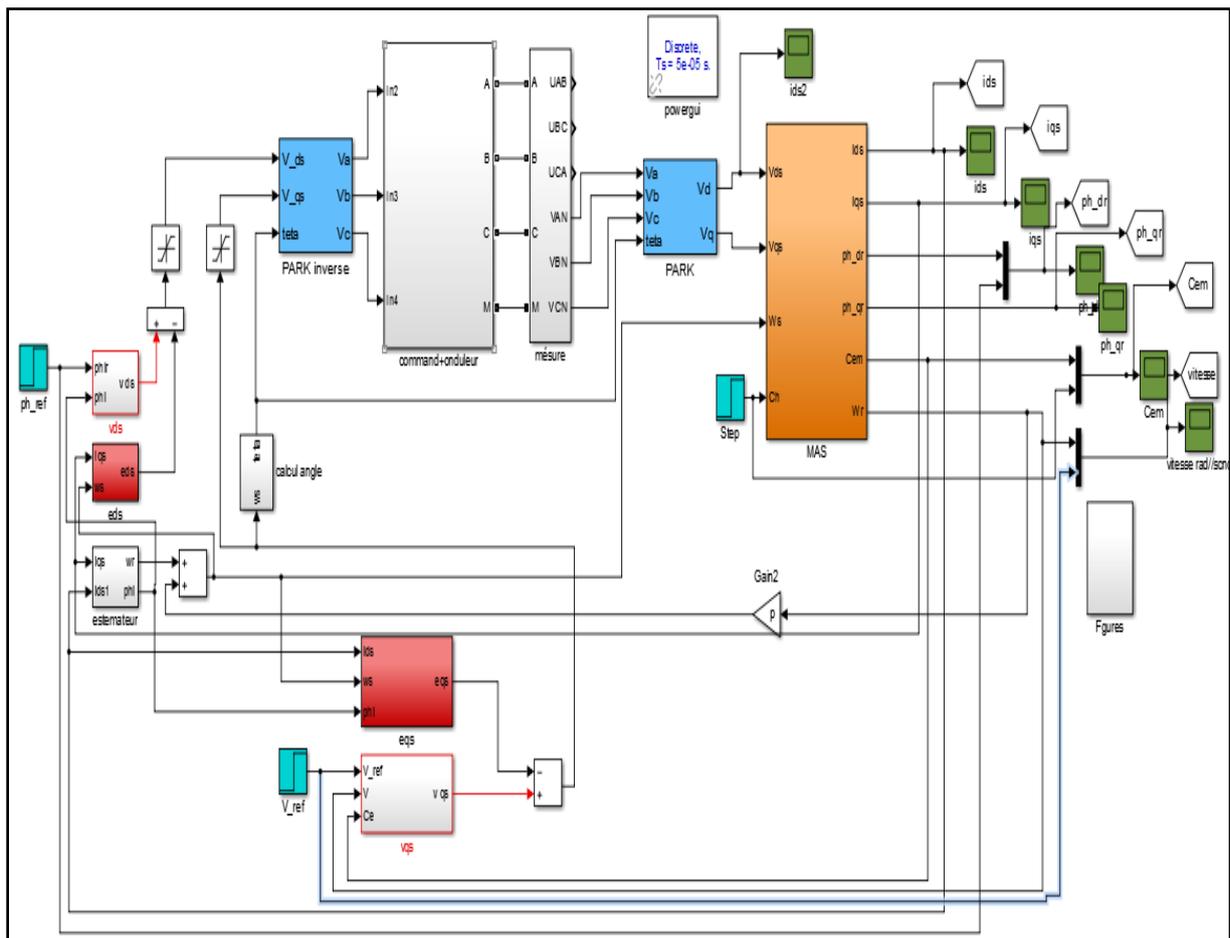


Figure 3.18 Modèle de simulation de la commande vectorielle

Les figures ci-dessous montrent les résultats obtenus de l'association d'une machine asynchrone à commande vectorielle alimentée par un onduleur à trois niveaux.

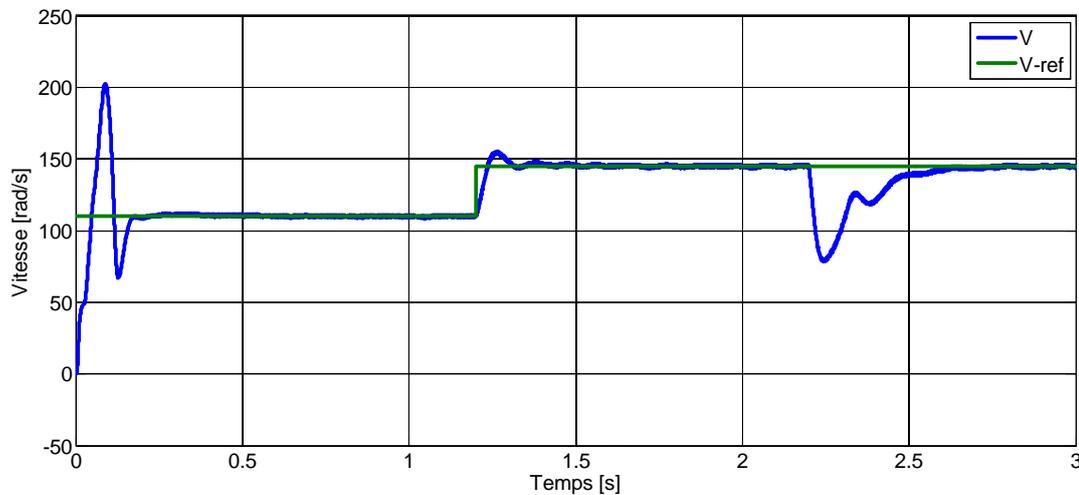


Figure 3.19 La vitesse de rotation

En régime transitoire on remarque un croisement linéaire de vitesse avant la stabilisation en régime permanent. Nous avons choisis une vitesse de référence de 110 rad/s et on varier cette vitesse à 145 rad/s à l'instant 1.2s. On remarque que la valeur mesurée suit sa référence quel que soit le changement. On remarque aussi une petite chute dans l'allure de vitesse dans l'introduction du couple de charge à l'instant de 2.2s. La vitesse rendre à sa valeur rapidement après sa chute due à la présence du régulateur PI.

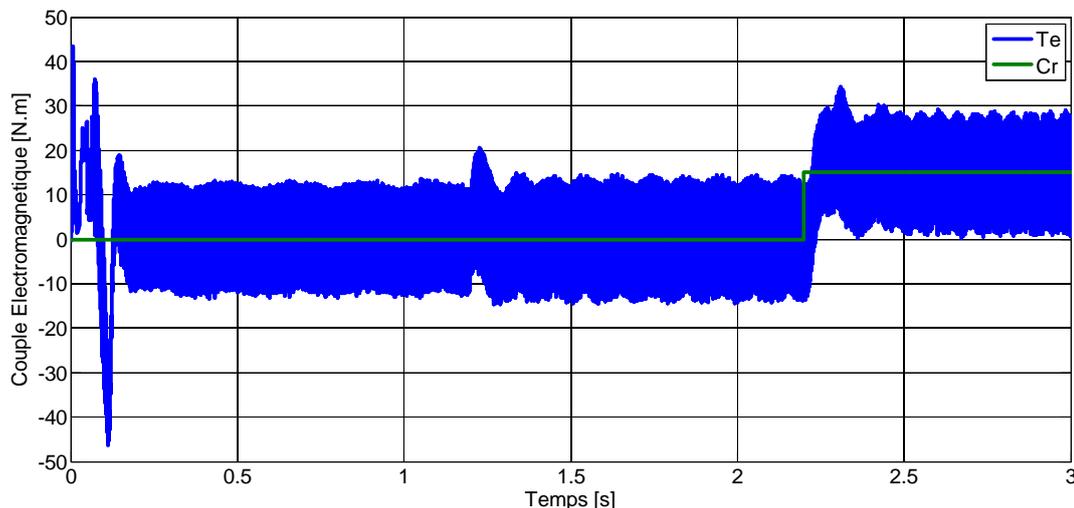


Figure 3.20 Le couple électromagnétique

L'évolution du couple présente une pulsation en régime transitoire puis se stabilise en régime permanent, on constate que le couple à une valeur moyenne nulle pour un fonctionnement à vide et augmenter avec l'introduction de la charge.

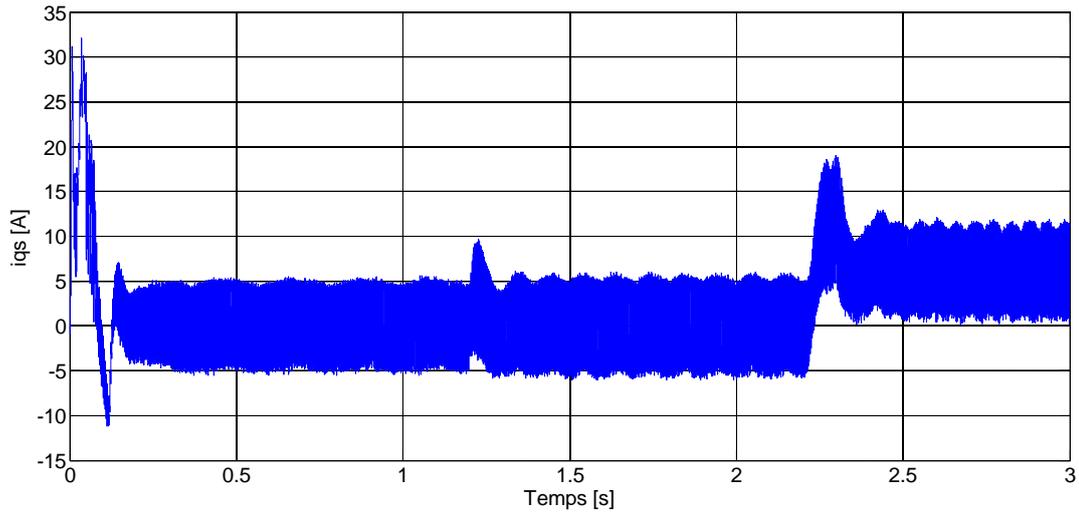


Figure 3.21 Le courant statorique de repère q

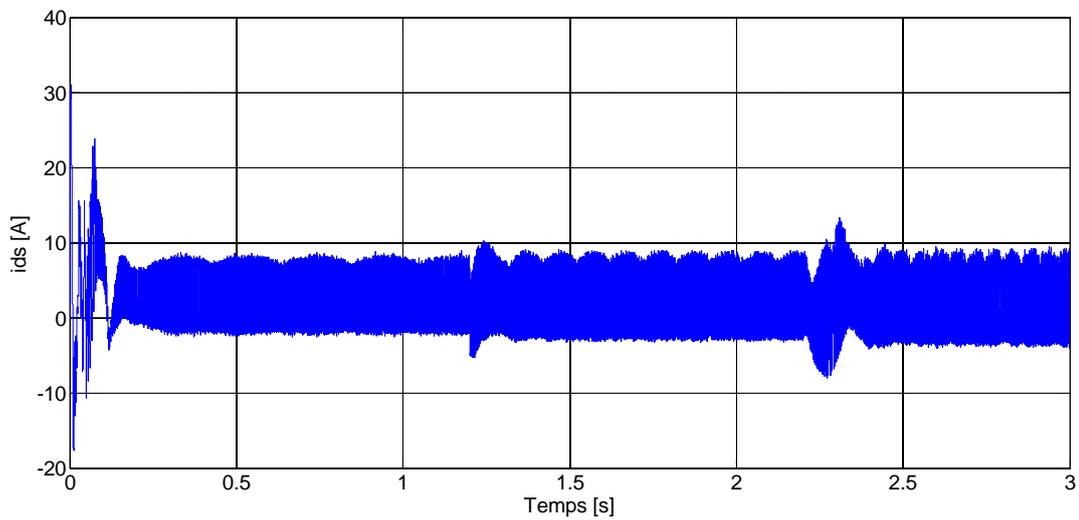


Figure 3.22 Le courant statorique de repère d

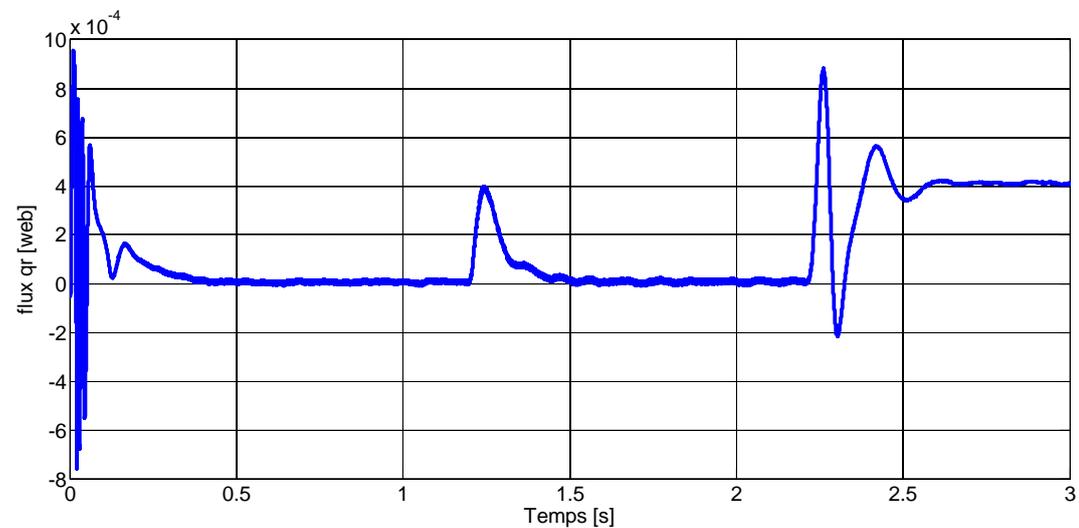


Figure 3.23 Le flux rotorique de repère q

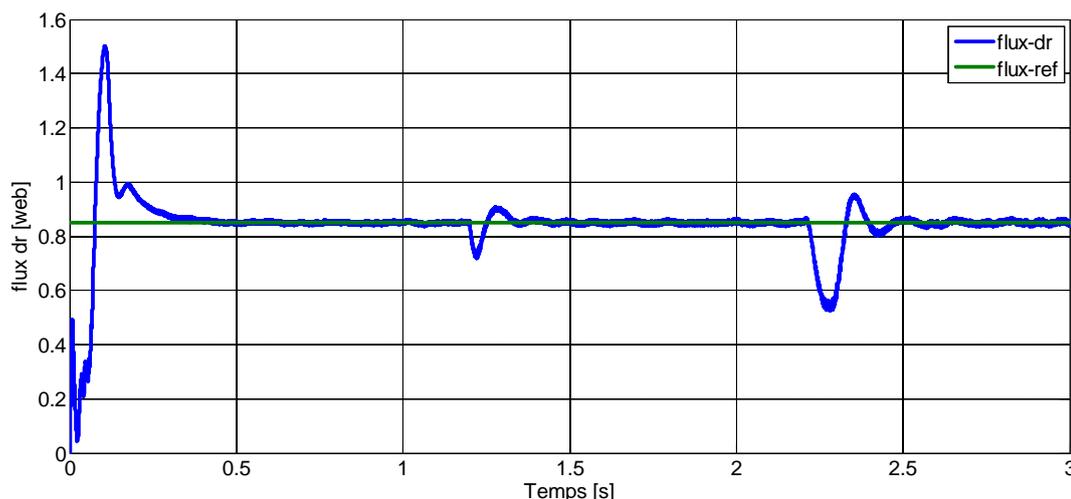
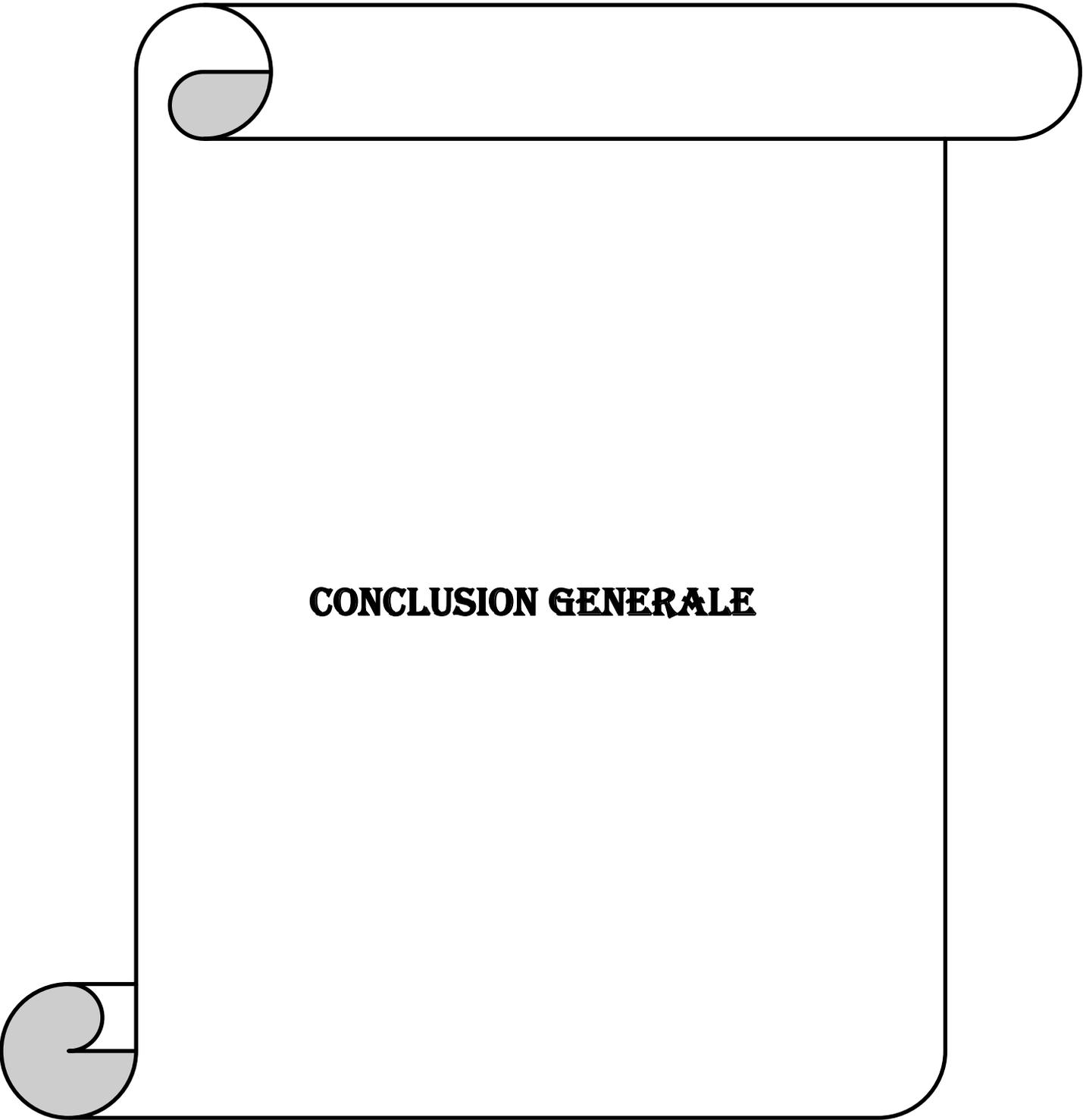


Figure 3.24 Le flux rotorique de repère d

Dans les figures ci-dessus, on remarque que l'allure de la composante du courant dans l'axe q est nulle et la même chose pour la composante du flux, par contre ces deux grandeurs présentent des valeurs constantes semblables au couple dans l'axe d. on observe aussi que l'allure du flux dans l'axe d suit parfaitement sa référence qui égale à 0.85 weber. On observe aussi que les courants statoriques présentent des ondulations dans les deux axes, la présence de ces ondulations (harmoniques) est une conséquence de la commutation des bras de l'onduleur à commande MLI.

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié le comportement des grandeurs électriques et mécaniques de la machine asynchrone associée à des onduleurs deux et multi-niveaux. Les résultats obtenus par simulation montrent que l'alimentation de la MAS par un onduleur d'un niveau inférieur tel que, le deux niveaux présente des perturbations. Mais il est clairement constaté que l'augmentation de nombre de niveau de l'onduleur associé à la machine permet la réduction de ces perturbations et diminuer la valeur du THD et améliore la qualité des signaux courant tension et couple.



CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

La conversion de l'énergie continue vers l'énergie alternative et la variation de vitesse des machines électriques sont possibles avec l'association des onduleurs.

Les onduleurs de tension triphasée à deux et multi-niveaux jouent un rôle incontournable dans des applications de forte puissances et haute tension.

Plusieurs avantages des onduleurs multi-niveaux montrent sont présences et leurs importances dans divers application, d'une part la réduction des tensions de blocage des semi-conducteurs et, d'autre part l'augmentation de la tension de sortie au-delà des limites des semi-conducteurs avec moins d'harmoniques.

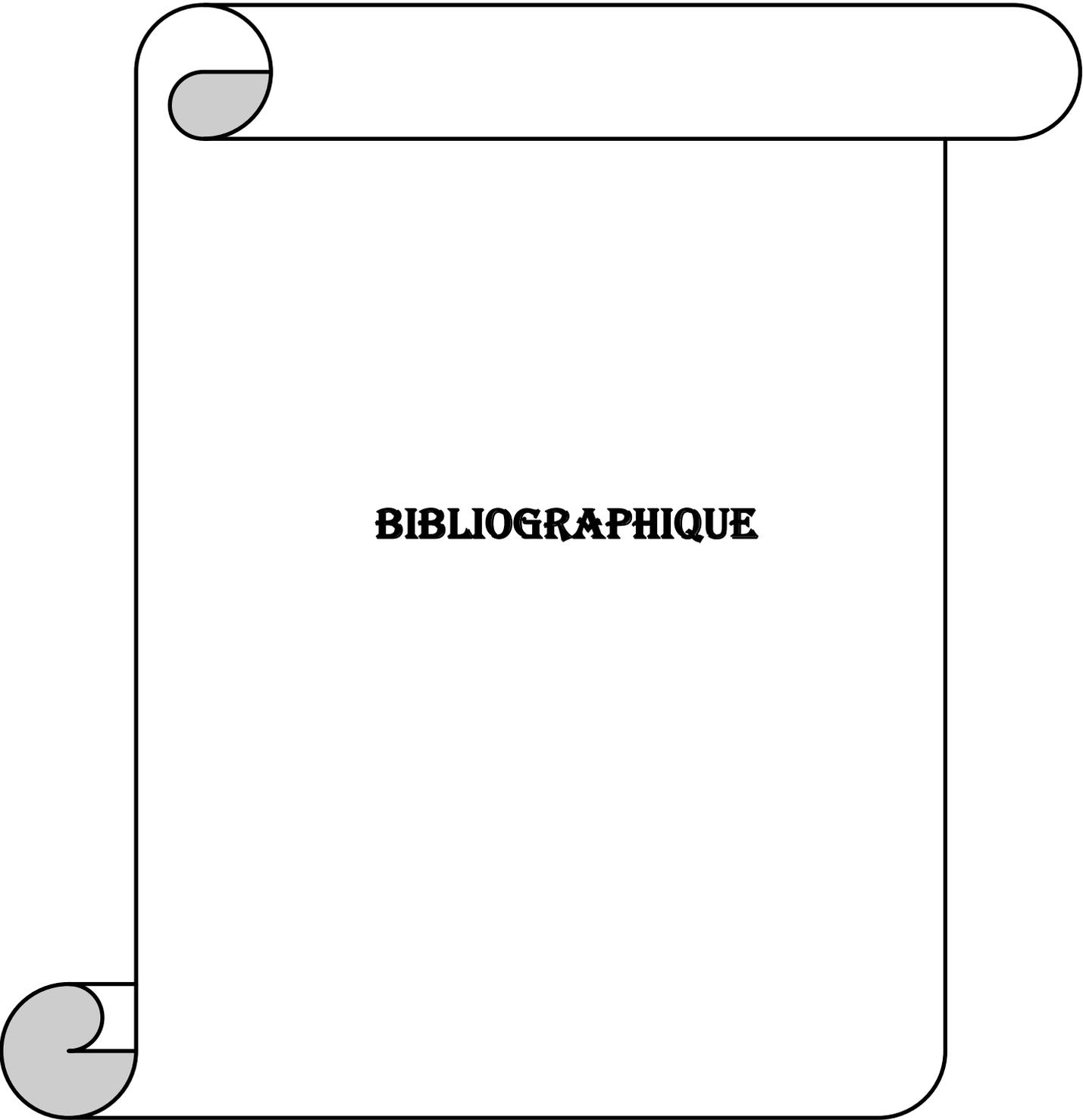
Dans le cadre de notre travail, nous avons modélisé et simulé la machine asynchrone triphasée à cage alimentée directement par le réseau dont le fonctionnement à vide et en charge, ensuite nous avons modélisé les deux types d'onduleur à deux niveau et à trois niveaux à structure NPC. Puis nous avons étudié les différentes stratégies de commande de ces derniers, des résultats de simulation pour chaque type d'onduleur alimentant une charge RL sont obtenus et interprétés

Une modélisation et simulation de la machine asynchrone à commande vectorielle a été faite, des hypothèses simplificatrices concernant la machine asynchrone devient une étape vraiment nécessaire qu'on ne peut pas s'en passer. Grâce à la transformation de Park, nous avons réduit le nombre des équations. Les résultats que nous avons présentés sont performants.

Nous avons appliqué la commande vectorielle à flux rotorique orienté après avoir maitriser son principe de fonctionnement dans la commande de la machine asynchrone à cage associée à un onduleur à trois niveaux. Les régulateurs intégrés dans cette commande sont les régulateurs PI classiques. Les résultats montrent bien ses performances en régulation et en poursuite, mais ils exposent aussi les problèmes majores et les inconvénients des régulateurs classiques qui réside dans le régime transitoire surtout dans le temps de réponse et le dépassement.

Des perspectives relatives à notre travail :

- ❖ utilisation des régulateurs basés sur l'intelligence artificielle à base de la commande vectorielle.
- ❖ Amélioration de la commande des convertisseurs
- ❖ Application dans des systèmes de conversion de l'énergie renouvelable
- ❖ Application dans les systèmes de compensation et le filtrage des harmoniques

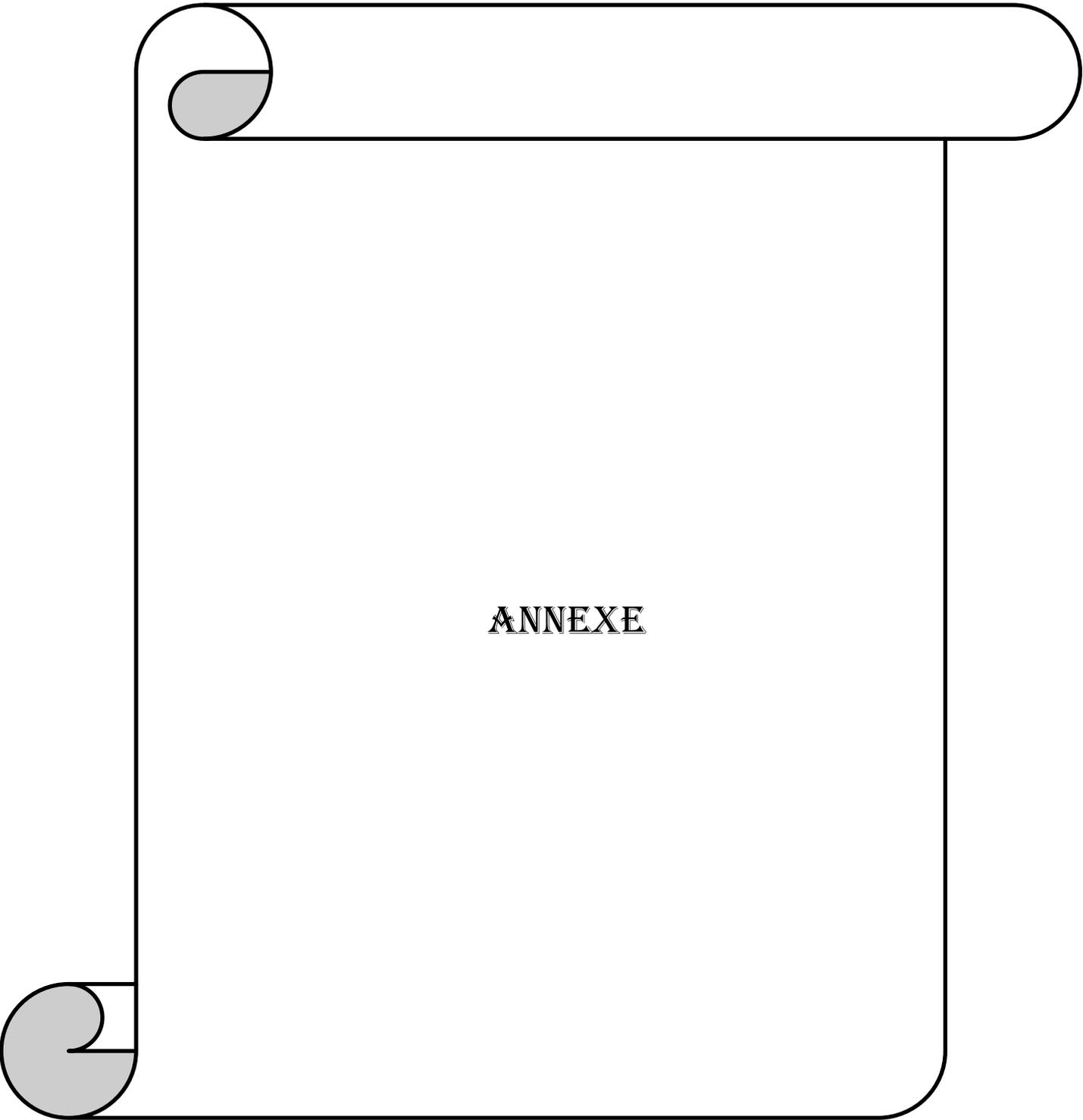


BIBLIOGRAPHIQUE

Bibliographique

- [1] Grelet G. Clerc G. ‘ ‘ Actionneurs électriques, principes modèles command ‘ ‘, Editions Eyrolle, 1997.
- [2] B.de Fornel, ‘ ‘ machines asynchrones (alimentation et caractéristique) ‘ ‘, technique d’ingénieur D3620, Toulouse 2008.
- [3] J.Chatelin, ‘ ‘ machine électrique tom1 ‘ ‘, Edition Dunod, paris 1983.
- [4] Bousseksou Radouian, ‘ ‘ Modélisation analytique des machines Asynchrone application au diagnostic, ‘ ‘ Thèse Magister, Université Mentouri Constantine Algérie, 2007.
- [5] L.baghli, ‘ ‘ modélisation et commande de la machine asynchrone ‘ ‘ IUFM de Lorraine.
- [6] S. Guy, B. Robert, Labrique Francis, ‘ ‘ Les convertisseurs de l’électronique de puissance la conversion alternatif (volume 4) ‘ ‘. Edition tec&doc, 1995
- [7] Onduleur de tension: mise en œuvre et Structures-principes-applications. Techniques d’ingénieur, Traité de génie électrique D.3176-3177.
- [8] A. Khoudir, ‘ ‘Techniques de commande avancées appliquées aux machines de type asynchrone ‘ ‘, Thèse de doctorat en Sciences en Electrotechnique de l’université de Constantine, 2010
- [9] Zhou KZ and Wang D, ‘ ‘Relationship between space vector modulation and three-phase carrier based PWM: A comprehensive analysis ‘ ‘, IEEE Transact, Indus, Elect, 2002.
- [10] Li L. Czarkowski D, Liu Y. Pillay P. ‘ ‘Multilevel space vector PWM technique based on phase-shifted harmonic suppression ‘ ‘, in Conf. Rec. IEEE APEC.
- [11] H. Denoun, N. Benamrouche, S. Haddad, S. Meziani, S. Ait mamar, ‘ ‘ADSP (TMS320LF2407), based implementation of PWM for single phase AC/DC bipolar converter with unity power factor ‘ ‘, WSEAS Transactions en circuits, Issue 4, Vol.5, pp 354-360 June 2011.
- [12] S.Benrabia; A.Bendib, ‘ ‘Simulation numérique d’un moteur asynchrone à double étoile commande par onduleur multi niveaux ‘ ‘Mémoire d’ingénieur de l’Université Mohamed Boudiaf de Msila, Algérie Juin 2005.

- [13] J.P.Plateau, "Sur la conception d'un redresseur triphasé à modulation de largeur d'impulsion à faible pollution harmonique", Mémoire CNAM, Paris 1994.
- [14] B.KHALIFA, "Réalisation d'un banc d'essai pour la Commande et l'Observation des Convertisseurs Multicellulaires Série : Approche Hybride", Grade de docteur Université de Cergy-pontoise, 2009
- [15] Y. KHADIDJA "Réduction des effets de la tension homopolaire dans l'association onduleur multi niveaux-moteur à induction " Ingénieur d'état en électrotechnique, Ouargla 2005.
- [16] Jean-Paul Louis, "Modélisation des machines électriques en vue de leur commande"
- [17] L .BAGHLI, "modélisation et commande de la machine asynchrone " ,2005
- [18] Berkouk.E.M, "Contribution à la conduite des machines asynchrones monophasées et triphasées alimentées par des convertisseurs directe et indirectes. Application aux gradateurs et onduleur multi niveaux", Thèse de doctorat, CNAM 1995.
- [19] Brosselard P, " Conception, réalisation et caractérisation d'interrupteurs (thyristors et JFETs) haute tension (5 kV) en Carbure de Silicium " , Thèse de doctorat, Lyon 2004.
- [20] Ameer R. Lourci N. Berkouk E M. Manesse G, " Commande de la machine asynchrone alimenter par un onduleur NPC à cinq niveaux " ,SNAPSEA, Annaba 1998.



ANNEXE

Annexe A

Les paramètres de la machine asynchrone :

Paramètres électrique

$$R_s=1.405 \text{ [ohm]}$$

$$R_r=1.395 \text{ [ohm]}$$

$$L_s=0.005839 \text{ [H]}$$

$$L_r=0.005839 \text{ [H]}$$

$$M=0.1722 \text{ [H]}$$

Paramètres électromagnétique

$$J=0.0131 \text{ [kg.m}^2\text{]}$$

$$f=0.002985 \text{ [N.m.s]}$$

Plaque signalétique

$$P=2$$

$$V= 400 \text{ [v]}$$

$$\Omega =1500 \text{ [tr/min]}$$

$$f =50 \text{ [HZ]}$$

Les paramètres de la charge RL :

$$R=10 \text{ [ohm]}$$

$$L=30.10^{-3} \text{ [H]}$$