

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie Electrique



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et technologies

Filière : Génie électrique

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

Présenté par :

HOUICHI Abdelhak

Thème:

# DIMENSIONNEMENT ET COMMANDE DES ONDULEURS MULTI-NIVEAUX ASYMETRIQUES

Soutenu publiquement

Le 07/06/2015

Devant le jury :

M<sup>r</sup> SADAOUI Fares

MA ( B )

Président

UKM Ouargla

M<sup>r</sup> BOUAKAZ Ouahid

MA ( A )

Encadreur/rapporteur

UKM Ouargla

M<sup>r</sup> BOUHAFS Ali

MA ( A )

Examineur

UKM Ouargla

Année universitaire 2014/2015

# **REMERCIEMENTS**

*Au terme de ce travail, de six mois, je suis heureux de pouvoir exprimer ma gratitude sincère envers toutes personnes du Département de génie électrique/Université Kasdi Merbah–Ouargla qui m'ont encouragé à l'aboutissement de ce mémoire. Les mots ci-dessous ne peuvent en aucun cas être suffisants. Au-delà des mots, il en reste leurs faits...*

*Je tiens ainsi à remercier:*

*Monsieur; **BOUAKAZ Ouahid**, maître assistant chargé de cours à l'université d'Ouargla, pour m'avoir proposé cette thèse, pour l'honneur qu'il me fait en acceptant d'être mon encadreur, pour le soutien scientifique, les remarques, les encouragements qu'il a su m'adresser, et Je lui en suis redevable de sa disponibilité pour toujours suivre d'au plus près les différentes étapes de ce travail, sa patience et son aide constante qu'il m'a apporté tout au long de ce modeste mémoire. Enfin, je n'oublierai pas son sens de l'organisation, la clarté de ses idées et les réflexions d'orientation technique.*

*Je remercie également tout les membres de jury pour l'honneur qu'ils me font en acceptant de participer au jury, en l'occurrence: Mr. SADAoui Fares maître assistant B, président de jury, Mr. BOUHAFs Ali maître assistant A, examinateur,*

*Monsieur; TAYBI Djamel, maître assistant chargé de cours à l'université d'Ouargla, pour ses conseils et son encouragement.*

*Monsieur; **BOUREK Yacine**, maître assistant chargé de cours à l'université d'Ouargla, pour ses conseils, aides et son encouragement.*

*Finalement, il m'est difficile d'exprimer tout ce que je dois à ma famille et aux mes collègues, particulièrement A.Khaled, T.Mustapha, L.Halim et F.Abbes pour l'incalculable soutien moral et logistique et les nombreux encouragements que j'ai toujours reçus de leur part. Je remercie de tout mon cœur mon grand frère El-Hadj Djamel, mes enfants et ma femme.*

*H.Abdelhak*

## **DEDICACES**

*A la mémoire de mon père, que dieu le bénisse;*

*A ma mère, pour sa patience sans limite, son sacrifice de tous les instants;*

*A toute ma famille;*

*A tous mes amis(e);*

*Je dédie ce modeste travail.*

Introduction générale

**Chapitre 01 : Etat de l'art des onduleurs multi-niveaux**

1-1 Introduction .....	1
1-2 Les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux.....	2
1-2-1 Onduleurs de tension type NPC Clampé par les diodes.....	2
1-2-2 Onduleurs multi-niveau cascade en pont H.....	4
1-2-3 Onduleurs de tension à cellules imbriquées.....	6
1-2-4 Autres topologies.....	7
1-3 Comparaison entre les trois structures.....	8
1-4 Avantages des onduleurs multi-niveaux.....	8
1-4-1 Les avantages technologiques.....	8
1-4-2 Les avantages fonctionnelles pour le convertisseur.....	9
1-4-3 Les avantages fonctionnelles pour les machines tournantes.....	9
1-5 Domaine des applications des onduleurs multi-niveaux.....	9
1-6 Intérêts des onduleurs multi-niveaux.....	9
1-7 Conclusion.....	10

**Chapitre 02 : Etude d'un onduleur multi-niveaux symétriques**

2-1 Introduction.....	11
2-2 Topologie d'un onduleur classique à deux niveaux.....	11
2-2-1 Avantages et Inconvénients de la topologie à deux niveaux.....	11
2-3 Dimensionnement d'un onduleur de type NPC clampé par les diodes.....	11
2-3-1 Onduleur de type NPC clampé par les diodes à trois niveaux.....	12
a- Structure.....	12
b- Principe de fonctionnement.....	12
2-3-1-1. Conduite de la MAS alimenté par un onduleur à trois niveaux.....	14
a- La stratégie de commande en pleine onde.....	14
b- La stratégie de la modulation de largeur d'impulsions.....	18
2-3-2 Onduleur de type NPC clampé par les diodes à cinq niveaux.....	22
a- Structure.....	22
b- Principe de fonctionnement.....	22
2-3-2.1 Conduite de la MAS alimenté par un onduleur à cinq niveaux.....	24
a- La stratégie de commande en pleine onde.....	24

b-La stratégie de la modulation de largeur d'impulsions.....	28
2-3-3 Généralisation de la structure NPC à N niveaux de tension.....	31
2-3-3-1 Structure.....	31
2-3-3-2 Principe de fonctionnement.....	32
2-4 Conclusion.....	32
<b>Chapitre 03 : Etude d'un onduleur multi-niveaux asymétrique</b>	
3-1 Introduction.....	35
3-2 Terminologie des convertisseurs multiniveaux.....	35
3-2-1 La dissymétrie partielle.....	35
3-2-2 La dissymétrie totale.....	35
3-2-3 Convertisseurs multi-niveaux symétrique.....	35
3-2-4 Convertisseurs multi-niveaux asymétrique.....	36
3-3 Topologies hybrides.....	36
3-4 Stratégies de modulation.....	37
3-4-1 Modulation par gradin.....	37
3-4-2 Modulation hybride.....	38
3-5 Dimensionnement d'un onduleur à trois niveaux en cascade.....	38
3-5-1 Structure.....	38
3-5-2 Principe de fonctionnement.....	39
3-6 Conduite de la MAS alimenté par un onduleur hybride.....	40
3-6-1 Résultats de simulation.....	40
3-6-2 Interprétation des résultats.....	43
3-7 Conclusion.....	43
Conclusion générale	

# **TABLE DES NOTATIONS ET SYMBOLES**

## **1. Machine asynchrone**

a,b,c	Axes liés aux enroulements triphasés.
d,q	Axes de référentiel de Park.
$\alpha$ (rad)	Angle entre le stator et le rotor.
$[P]$	Matrice de Park.

### **Grandeurs électriques et magnétiques au stator**

V abc(V)	Tension statorique phase a, b ou c.
I <sub>a</sub> (A)	Courant statorique.
I <sub>abc</sub> (A)	Courant statorique phase a, b ou c.
R <sub>s</sub> ( $\Omega$ )	Résistance statorique par phase.
L <sub>s</sub> (H)	Inductance propre statorique par phase.
M <sub>s</sub> (H)	Inductance mutuelle entre deux phases statoriques.
L <sub>s</sub> (H) = L <sub>s</sub> - M <sub>s</sub>	Inductance statorique par phase.
$\phi_{sabc}$ (Wb)	Flux statorique phase a, b ou c.
$\phi_{sdq}$ (Wb)	Flux statorique sur l'axe d ou q.

### **Grandeurs électriques et magnétiques au rotor**

V <sub>r</sub> (V)	Tension rotorique.
V <sub>rabc</sub> (V)	Tension rotorique phase a, b ou c.
V <sub>rdq</sub> (V)	Tension rotorique sur l'axe d ou q.
I <sub>r</sub> (A)	Courant rotorique.
I <sub>rabc</sub> (A)	Courant rotorique phase a, b ou c.
I <sub>rdq</sub> (A)	Courant rotorique sur l'axe d ou q.
R <sub>r</sub> (W)	Résistance rotorique par phase.
L <sub>r</sub> (H)	Inductance propre rotorique par phase.
M <sub>r</sub> (H)	Inductance mutuelle entre deux phases rotoriques.
L <sub>r</sub> (H) = L <sub>r</sub> - M <sub>r</sub>	Inductance rotorique par phase.
$\phi_{rdq}$ (Wb)	Flux rotorique sur l'axe d ou q.
P	Nombre de pôles.
W <sub>r</sub> (rad/s)	Vitesse rotorique.
J (kg.m <sup>2</sup> )	Moment d'inertie des parties tournantes.
C <sub>e</sub> (N.m)	Couple électromagnétique.
C <sub>r</sub> (N.m)	Couple résistant.

## 2. Onduleur

MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion.
NPC	Neutral Point Clamping
E (V)	Source de tension continue de l'onduleur.
Vao, Vbo et Vco	Les tensions simples entre les bornes du moteur et le point milieu
Uab, Ubc et Uca	Les tensions composées au bornes du machine
V réf max (V)	Amplitude de la tension de référence.
Vp (V)	Porteuse triangulaire.
Vpmax (V)	Amplitude de la porteuse triangulaire.
$\omega$ (rad / s)	Pulsation électrique.
f réf (Hz)	Fréquence de la tension de référence.
f p (Hz)	Fréquence de la porteuse triangulaire.
m	Indice de modulation.
r	Taux de modulation.
	Angle de commutation
THD	Taux de distorsion harmonique.

## LISTE DES FIGURES

N° Figure	Désignation	Page
Figure (1-1)	Différentes topologies des onduleurs multi-niveaux	2
Figure (1-2)	Onduleur NPC à trois niveaux	3
Figure (1-3)	Onduleur NPC à Cinq niveaux	3
Figure (1-4)	Onduleur cascade en pont H à Trois niveaux	4
Figure (1-5)	Onduleur cascade en pont H à Cinq niveaux	5
Figure (1-6)	Onduleur à condensateurs flottants à Trois niveaux	7
Figure (1-7)	Onduleur à condensateurs flottants à Cinq niveaux	7
Figure (2- 1)	Une phase d'un convertisseur à deux niveaux	11
Figure (2-2 )	Bras d'un onduleur	12
Figure (2-3 )	Séquences de fonctionnement d'un bras d'onduleur NPC à trois niveaux	13
Figure (2-4 )	Schéma bloc de la MAS associée à un onduleur à trois niveaux	14
Figure (2-5 )	signaux de commande	15
Figure (2-6 )	tension simples $V_{ao}$ , $V_{bo}$ et $V_{co}$	15
Figure (2-7)	Spectre harmonique de la tension $V_{ao}$	15
Figure (2-8)	tensions composées $U_{ab}$ , $U_{bc}$ et $U_{ca}$	16
Figure (2-9)	Spectre harmonique de la tension $U_{ab}$	16
Figure (2-10)	tensions de phase $V_{an}$ , $V_{bn}$ et $V_{cn}$	16
Figure (2-11)	Spectre harmonique de la tension $V_{an}$	16
Figure (2-12)	Courant de phase $I_{an}$ , $I_{bn}$ et $I_{cn}$	
Figure (2-13)	Spectre harmonique du courant $I_{an}$	16
Figure (2-12)-a	Courant de phase $I_{an}$ , $I_{bn}$ et $I_{cn}$ à vide	17
Figure (2-12)-b	Courant de phase $I_{an}$ , $I_{bn}$ et $I_{cn}$ en charge	17
Figure (2-14)	Caractéristiques de la MAS	17
Figure (2-15)	Schéma bloc de la MAS associée à un onduleur à trois niveaux	19
Figure (2-16)	Schéma de principe de la commande MLI onduleur à trois niveaux	19
Figure (2-17)	tensions simples $V_{ao}$ , $V_{bo}$ et $V_{co}$	19
Figure (2-18)	Spectre harmonique de la tension simple $V_{ao}$	19
Figure (2-19)	tensions composées $U_{ab}$ , $U_{bc}$ et $U_{ca}$	20
Figure (2-20)	Spectre harmonique de la tension $U_{ab}$	20
Figure (2-21)	tensions de phases $V_{an}$ , $V_{bn}$ et $V_{cn}$	20
Figure (2-22)	Spectre harmonique de la tension $V_{an}$	20
Figure (2-23)	Courant de phase $I_{an}$ , $I_{bn}$ et $I_{cn}$	20
Figure (2-24)	Spectre harmonique du courant de phase	20
Figure (2-23)-a	Courant de phase $I_{an}$ , $I_{bn}$ et $I_{cn}$ à vide	21
Figure (2-23)-b	Courant de phase $I_{an}$ , $I_{bn}$ et $I_{cn}$ en charge	21
Figure (2-25)	Caractéristiques de la MAS	21
Figure (2-26)	Bras d'un onduleur	22
Figure (2-27)	Schéma bloc de la MAS associée à un onduleur à cinq niveaux	27
Figure (2-28)	Signal de commande	25
Figure (2-29)	tensions simple $V_{ao}$ , $V_{bo}$ et $V_{co}$	25
Figure (2-30)	Spectre harmonique de la tension simple $V_{ao}$	25

Figure (2-31)	la tension composée $U_{ab}, U_{bc}$ et $U_{ca}$	26
Figure (2-32)	Spectre harmonique de la tension $U_{ab}$	26
Figure (2-33)	tensions de phases $V_{an}, V_{bn}$ et $V_{cn}$	26
Figure (2-34)	Spectre harmonique de la tension $V_{an}$	26
Figure (2-35)	Courants $I_{an}, I_{bn}$ et $I_{cn}$	26
Figure (2-36)	Spectre harmonique du courant $I_{an}$	26
Figure (2-35)-a	Courant de phase $I_{an}, I_{bn}$ et $I_{cn}$ à vide	27
Figure (2-35)-b	Courant de phase $I_{an}, I_{bn}$ et $I_{cn}$ en charge	27
Figure (2-37)	Caractéristiques de la MAS	27
Figure (2-38)	Schéma bloc de la MAS associée à un onduleur à cinq niveaux	28
Figure (2-39)	Schéma de principe de la commande MLI onduleur à cinq niveaux	28
Figure (2-40)	Principe de la MLI à quatre porteuses pour un onduleur à cinq niveaux	28
Figure (2-41)	tensions simples $V_{ao}, V_{bo}$ et $V_{co}$	29
Figure (2-42)	Spectre harmonique de la tension $V_{ao}$	29
Figure (2-43)	tensions composées $U_{ab}, U_{bc}$ et $U_{ca}$	29
Figure (2-44)	Spectre harmonique de la tension $U_{ab}$	29
Figure (2-45)	tensions de phases $V_{an}, V_{bn}$ et $V_{cn}$	30
Figure (2-46)	Spectre harmonique de la tension $V_{an}$	30
Figure (2-47)	Courants de phases $I_{an}, I_{bn}$ et $I_{cn}$	30
Figure (2-47)-a	Courant $I_{an}, I_{bn}$ et $I_{cn}$ à vide	30
Figure (2-47)-b	Courant $I_{an}, I_{bn}$ et $I_{cn}$ en charge	30
Figure (2-48)	Spectre harmonique du courant $I_{an}$	30
Figure (3-1)	La mise en série d'un onduleur de topologies différentes	37
Figure (3-2)	La mise en série de deux ponts en H alimentés avec des tensions différentes	37
Figure (3-3)	Onduleur cascade en pont en H à trois niveaux	38
Figure (3-4)	Schéma bloc de la MAS associée à un onduleur hybride	40
Figure (3-5)	les tensions de sortie	41
Figure (3-6)	Spectre harmonique de la tension $V_{ao}$	41
Figure (3-7)	tensions composées $U_{ab}, U_{bc}$ et $U_{ca}$	41
Figure (3-8)	Spectre harmonique de la tension $U_{ab}$	41
Figure (3-9)	Tension de la phase $V_{an}, V_{bn}$ et $V_{cn}$	42
Figure (3-10)	Spectre harmonique de la tension $V_{an}$	42
Figure (3-11)	Courant de phase $I_{an}, I_{bn}$ et $I_{cn}$	42
Figure (3-11)-a	Courant de phase $I_{an}, I_{bn}$ et $I_{cn}$ à vide	42
Figure (3-11)-b	Courant de phase $I_{an}, I_{bn}$ et $I_{cn}$ en charge	42
Figure (3-12)	Spectre harmonique du courant $I_{an}$	42
Figure (3-13)	Caractéristiques de la MAS	43

## **LISTE DES TABLEAUX**

<b>N° Figure</b>	<b>Désignation</b>	<b>Page</b>
tableau (1-1)	Comparaison entre les trois topologies des convertisseurs multi-niveaux	8
tableau (2-1)	États possibles de l'onduleur NPC à 3 niveaux	14
tableau (2-2)	États possibles de l'onduleur NPC à 5 niveaux	23
tableau (2-3)	Etat possibles de l'onduleur NPC à cinq niveaux	32
tableau (3-1)	Etat possibles de l'onduleur cascade en H à trois niveaux	39

# Introduction générale

## **INTRODUCTION GENERALE**

L'apparition des structures de conversion multi-niveaux depuis le début des années 1980 apporte des solutions par la mise en série de semi-conducteurs de puissance. Ces structures assurent la répartition de la contrainte en tension sur les différents interrupteurs moyenne ou basse tension tout en améliorant les formes d'onde et le spectre d'harmoniques des grandeurs de sortie.

Les convertisseurs statiques d'énergie électrique représentent le véritable cœur de tout système électrique; à partir d'une source d'énergie brute, ils doivent alimenter les différents circuits en énergie, avec un flux maîtrisé et adapté aux conditions de fonctionnement. Si l'on sait aujourd'hui remplir toutes les fonctions de conversion, les concepteurs s'efforcent d'améliorer continuellement certaines performances. Si la réduction du coût d'exploitation global est bien souvent le critère principal pour l'utilisateur final, cet objectif ultime doit être décomposé en plusieurs objectifs intermédiaires:

- ✓ augmentation du rendement,
- ✓ amélioration de la puissance massique et volumique,
- ✓ augmentation des performances dynamiques,
- ✓ réduction des perturbations,
- ✓ recherche d'une meilleure sûreté de fonctionnement.

L'avènement de l'électronique de puissance à semi-conducteurs et le grand nombre de convertisseurs développés récemment permettent le choix d'une association optimale d'un moteur à courant alternatif et d'un onduleur de tension ou de courant.

Les onduleurs multi-niveaux permettent de délivrer une tension plus élevée et de meilleure qualité que les onduleurs conventionnels. Leur champ d'application est le domaine des moyennes et hautes tensions à fréquences de pulsation élevées.

L'électronique de puissance située à la charnière entre l'électronique et l'électrotechnique a pour ambition la conversion des ondes électriques et la commande de la puissance électrique. L'évolution considérable de l'électronique de puissance et de la micro-informatique permet de nos jours de réaliser des groupes à

vitesse variable avec les machines à courant alternatif et particulièrement la machine asynchrone (MAS).

Ces dernières années, des convertisseurs statiques sont de plus en plus exploités dans des applications diverses. On les retrouve dans des applications domestiques, le transport ferroviaire, urbain ou maritime, et même dans plusieurs industries.

Certaines d'entre elles exigent une alimentation électrique à haute ou moyenne tension, facilement réglable et ayant de bonnes performances spectrales, [1].

Grâce aux progrès récents dans la technologie des composants de puissance à semi-conducteur, les onduleurs multi-niveaux constituent désormais la configuration standard dans la commande des moteurs à courant alternatif de moyennes et de fortes puissances. L'adoption de ce type d'onduleurs dans les installations industrielles a été motivée par des avantages tels que la réduction des harmoniques, l'amélioration du facteur de puissance, la réduction du filtrage et le rendement élevé du système d'entraînement. L'utilisation des onduleurs multi-niveaux permet de générer des tensions très proches de la sinusoïde. Les onduleurs à deux et à trois niveaux sont bien adoptés surtout pour les moteurs à moyenne puissance.

L'utilisation des onduleurs conventionnels ou multi-niveaux commandés par des techniques dites " Modulation de Largeur d'Impulsion " MLI ou " pleine onde ", peuvent présenter des défauts structurels. Ce type de dysfonctionnement induit des contraintes pouvant générer l'endommagement pour les installations industrielles; il est donc évident de voir le comportement de la machine asynchrone lorsque ces onduleurs ont le fonctionnement asymétrique, [15].

Ce mémoire est subdivisé en trois chapitres :

- Le premier chapitre sera consacré à l'état de l'art des onduleurs multi-niveaux, où je présente les différentes topologies de ces onduleurs, aussi leurs intérêts, domaines d'application, avantages et inconvénients et à l'issue, une comparaison entre les trois structures présentées.
- Le deuxième chapitre fera l'objet d'une étude d'un onduleur multi-niveaux clampé par les diodes à trois et à cinq niveaux, ainsi que, la conduite de la MAS alimentée par ces deux topologies, avec les résultats de simulations et leurs interprétations.

- Le troisième chapitre sera l'extension du deuxième, pour cela, nous débuterons par une approche terminologique des convertisseurs multi-niveaux, un dimensionnement d'un onduleur en pont en H, et l'association avec un onduleur de type NPC à trois niveaux, pour arriver à l'idée des onduleurs hybrides. Puis une conduite de la MAS alimentée par cet onduleur hybride, en utilisant aussi l'hybridation en stratégie de commande, des résultats de simulation seront commentés, où nous atteindrons à répondre aux questions posés à la conclusion du deuxième chapitre.

Enfin, ce travail sera clôturé par une conclusion générale à travers laquelle on exposera les principaux résultats obtenus et on donnera les perspectives à envisager suite à ce travail.

# Chapitre 01

Etat de l'art  
des onduleurs multiniveaux

## **1-1. Introduction :**

L' onduleur de tension est un convertisseur statique qui permet de fournir une tension alternative d'amplitude et de fréquence réglables à partir d'une source de tension continue. L' onduleur de tension est constitué de cellule de commutation généralement à transistor ou thyristor pour les grandes puissances.

Un convertisseur à niveaux multiples ou convertisseur multi-niveaux peut commuter chaque entrée ou sortie au moins entre trois niveaux de tension ou de courant [1]. Dans les dernières années, on a vécu l'apparition et le perfectionnement de nouveaux composants de puissance commandables à l'ouverture et à la fermeture, qui on permet la conception de nouveaux convertisseurs fiables, rapides et puissants. Parmi ces convertisseurs on distingue les convertisseurs multi-niveaux à structure NPC (Neutral Point Clamping).

Le concept de convertisseurs multi-niveaux a été mis en place depuis 1975. Le terme multi-niveaux a commencé avec les convertisseurs à trois niveaux. Ultérieurement, plusieurs topologies de convertisseurs multi-niveaux ont été développées.

L'onduleur multi-niveaux présente plusieurs avantages, parmi lesquels on peut mentionner :

- La qualité d'onde : les convertisseurs multi-niveaux peuvent générer des tensions de sortie avec une distorsion très faible et de bonnes qualités.
- Courant d'entrée : les convertisseurs multi-niveaux peuvent tirer un courant d'entrée avec une faible distorsion.
- Fréquence de découpage : les convertisseurs multi-niveaux peuvent fonctionner à la fois à la fréquence fondamentale et à une fréquence de découpage élevée (MLI). Il convient de noter qu'une grande fréquence de commutation signifie généralement des pertes réduites, donc un gain plus élevé dans le rendement du convertisseur.

Malheureusement, les convertisseurs multi-niveaux présentent quelques inconvénients. Un désavantage particulier est un plus grand nombre de semi-conducteurs de puissance nécessaires, par rapport aux convertisseurs classiques.

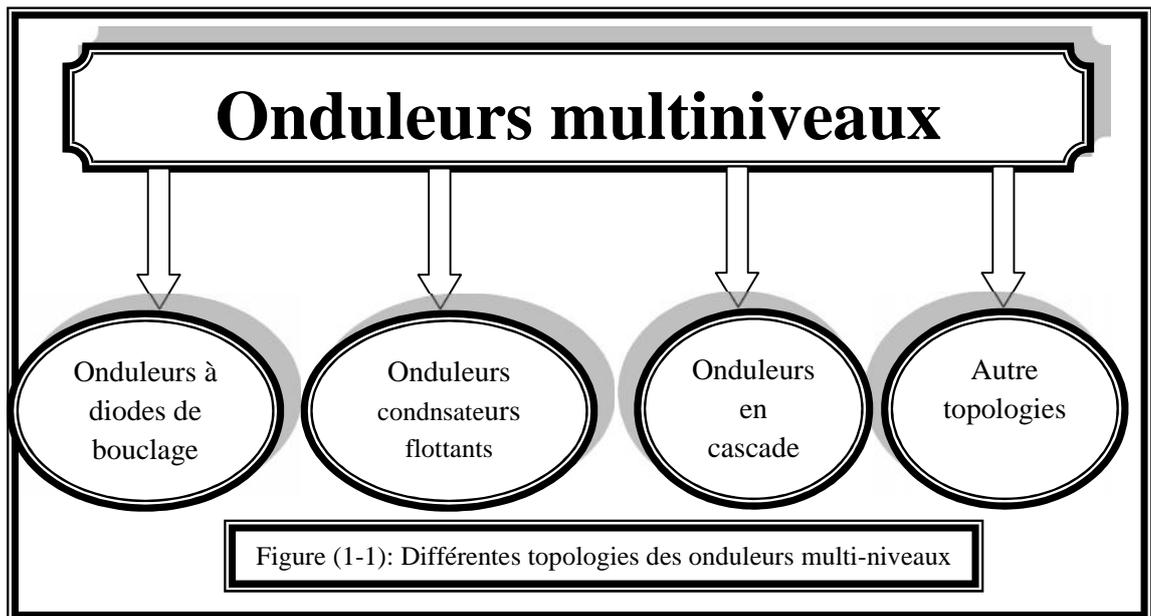
Dans ce chapitre, nous décrirons les principales topologies d'onduleurs multi-niveaux. Nous déduirons leurs champs d'applications par une comparaison structurelle et on cite quelques avantages et inconvénients.

## 1-2. Les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux :

Les principales topologies des onduleurs multi-niveaux sont, [2]:

- La topologie à diode de bouclage (NPC) ;
- La topologie au condensateur flottant (à cellule imbriquées) ;
- La topologie en cascade en pont en H.

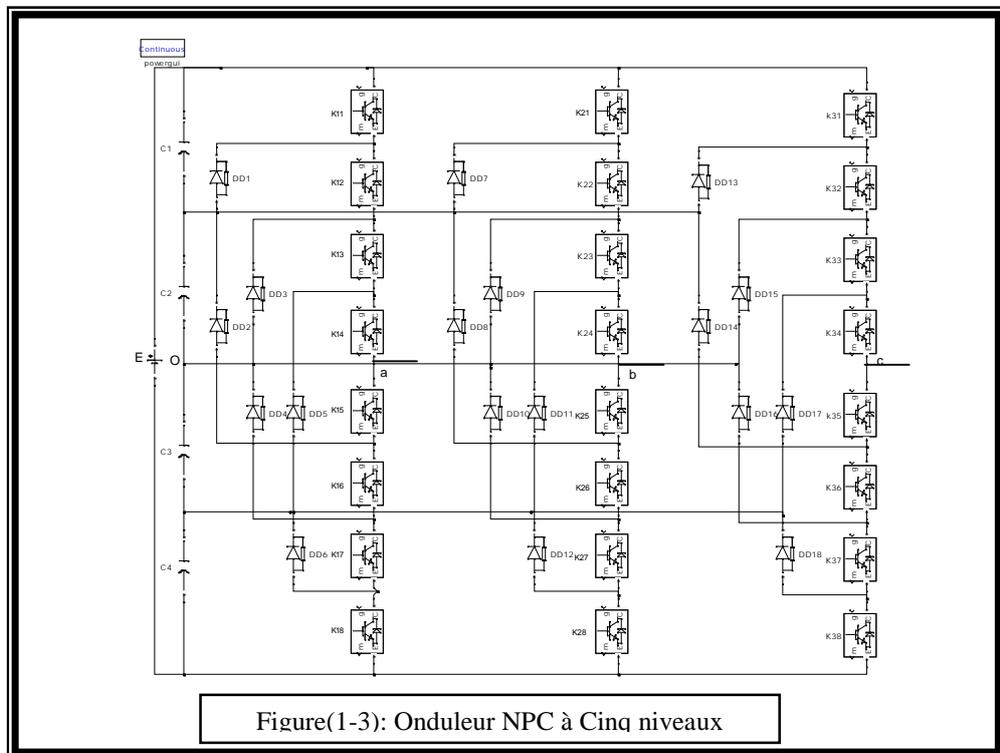
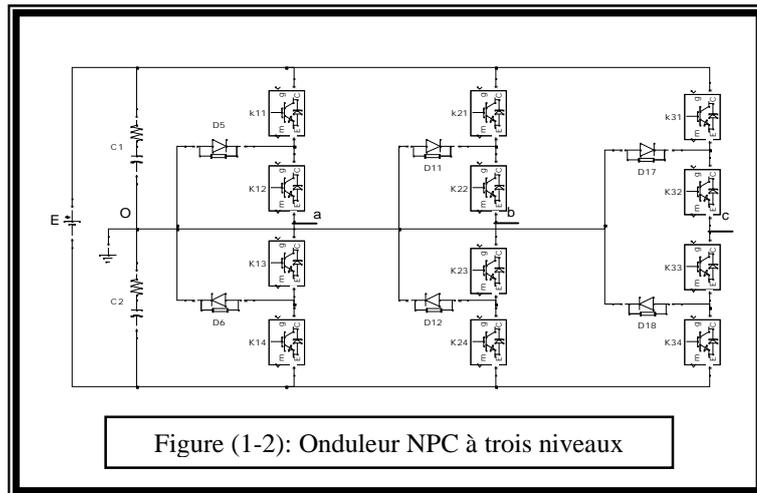
La figure (1-1) représente les topologies des onduleurs multi-niveaux les plus récentes.



### 1-2-1. Onduleurs de tension type NPC Clampé par les diodes :

La première topologie, et la plus pratique, de l'onduleur de tension multi-niveaux est la structure NPC (Neutral-Point-Clamped). Elle est constituée principalement de trois bras symétriques, cette structure d'onduleur multi-niveau a été introduite par A. Nabae et H. Akagi en 1981, [3] dont l'objectif était de réduire l'amplitude des harmoniques injectés par l'onduleur dans la charge pour des applications de type alimentation de moteurs [5].

L'onduleur NPC à trois et à cinq niveaux sont présentés respectivement par la figure (1-2) et la figure (1-3), Les diodes sont utilisées pour réaliser la connexion avec le point de référence O. Pour l'obtention d'une tension de N niveaux, N-1 capacités sont nécessaires. Une série de N-1 condensateurs permet de créer un ensemble de N-2 points milieu capacitifs ayant des potentiels de tension qui vont de :  $E/(N-1)$ ,  $2E/(N-1)$ ,..... jusqu'à  $(N-2)E/(N-1)$ , E étant la tension continue totale appliquée aux bornes de l'onduleur.



Pour la génération de trois niveaux de tension, la topologie NPC présente plusieurs avantages par rapport à la topologie d'onduleur à deux niveaux. [6,7]

- les composants de puissance à semi-conducteur bloquent une tension inverse égale seulement à la moitié de la tension de la source continue.
- cette topologie peut être généralisée et les principes employés dans la topologie d'onduleur à trois niveaux peuvent être étendus pour l'utilisation dans des topologies avec n'importe quel nombre de niveaux.

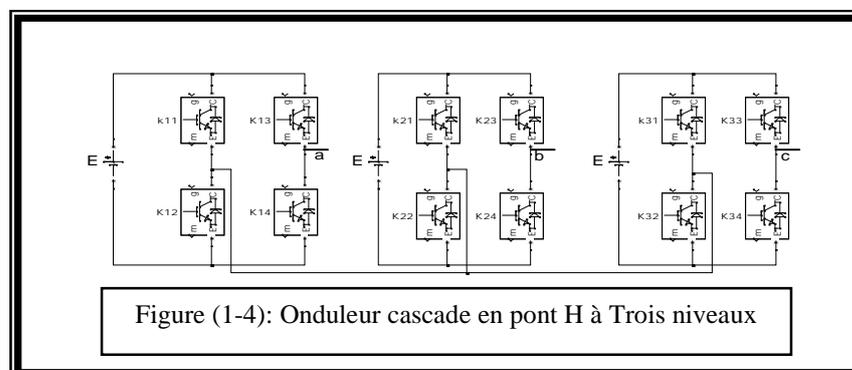
- Toutes les phases partagent le même bus continu.
- la fréquence fondamentale assure un bon rendement.
- La méthode de contrôle est relativement simple.
- La forme d'onde de trois niveaux obtenue a une meilleure qualité spectrale par rapport à celle d'un onduleur triphasé classique, ce qui rend les filtres passifs peu volumineux.

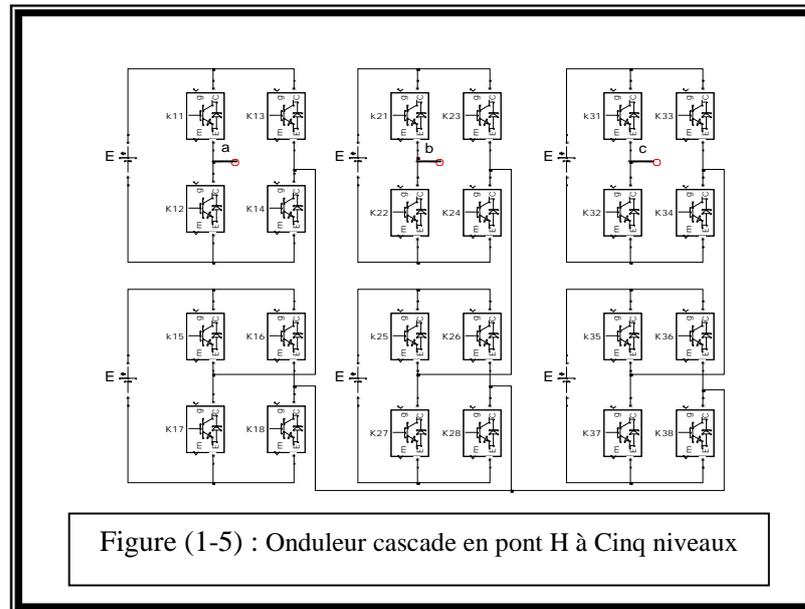
Par contre, cette topologie présente plusieurs difficultés techniques dans le cas des grandes Puissances, tels que :

- Pour les topologies avec plus de trois niveaux, les diodes de bouclage peuvent augmenter les contraintes en tension.
- Donc, les connexions des diodes en série pourraient être exigées et cela complique la conception et soulève des questions de fiabilité et du coût de réalisation.
- Cette topologie exige des diodes de bouclage à vitesse de commutation élevée qui doivent être capable de supporter le courant de la pleine charge.
- Différents calibres pour les appareils de commutation sont nécessaires en raison de leur conduction cyclique.

### 1-2-2. Onduleurs multi-niveau cascade en pont H:

Cette structure a été proposée en 1975, elle consiste à la mise en série de plusieurs ponts à deux niveaux monophasé [8]; ces ponts étant connectés à des sources de tension continues séparées. La figure (1-4) et figure (1-5), montre respectivement le schéma de base d'un convertisseur trois et cinq niveaux en cascade formé par l'association en série de  $(N-1)/2$  ponts à deux niveaux pour chaque bras. La tension  $V_s$  en sortie d'une telle structure est donnée par la somme des  $(N-1)/2$  tensions en sortie des ces ponts.





Comme toutes structures, l'onduleur multi-niveaux en cascade possède des avantages et des inconvénients dont on peut citer:

**Les avantages:**

- Pour atteindre le même nombre de niveaux de tension, ce type de convertisseur nécessite moins de composants.
- Contrairement à l'onduleur à diode de bouclage et en pont en H, aucune diode supplémentaire n'est nécessaire.
- La tension de sortie totale de phase est une sommation des tensions produites par chaque onduleur monophasé.
- Les petites sources à courant continu sont généralement impliquées, ce qui entraîne moins de problèmes de sécurité.
- Le nombre de niveaux possibles de tension de sortie est défini par  $N = 2s + 1$ , avec  $N$  : nombre de niveaux.

$S$  : nombre de source de tension continus.

**Les inconvénients:**

- Pour un système à trois phases, il faudra plus de commutateurs que dans un onduleur traditionnel.
- Nécessité d'équilibrer les sources DC entre les différents niveaux.
- Besoin de plusieurs connecteurs/câbles pour connecter les sources DC. [9,10]

### **1-2-3. Onduleurs de tension à cellules imbriquées (condensateurs flottants) :**

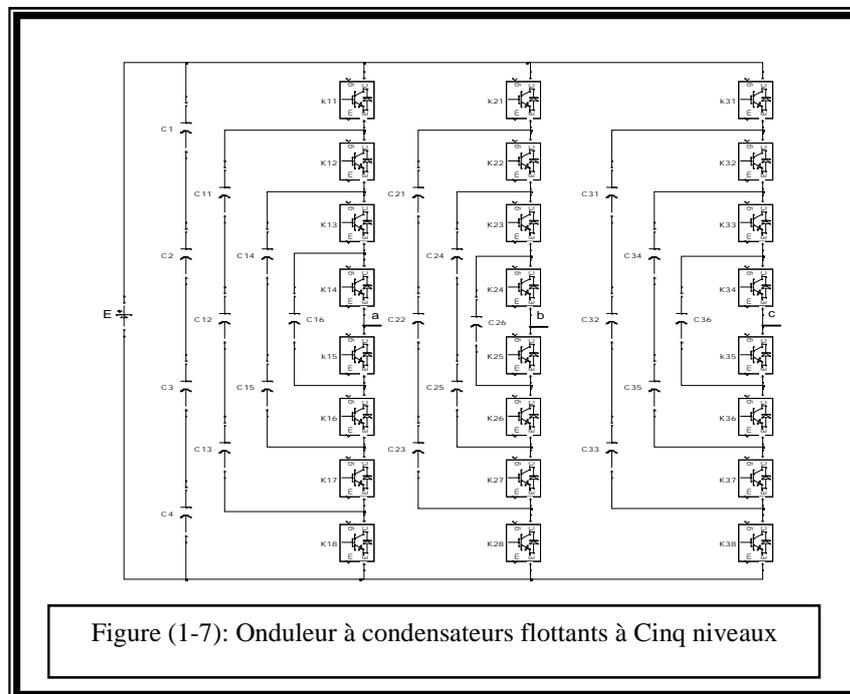
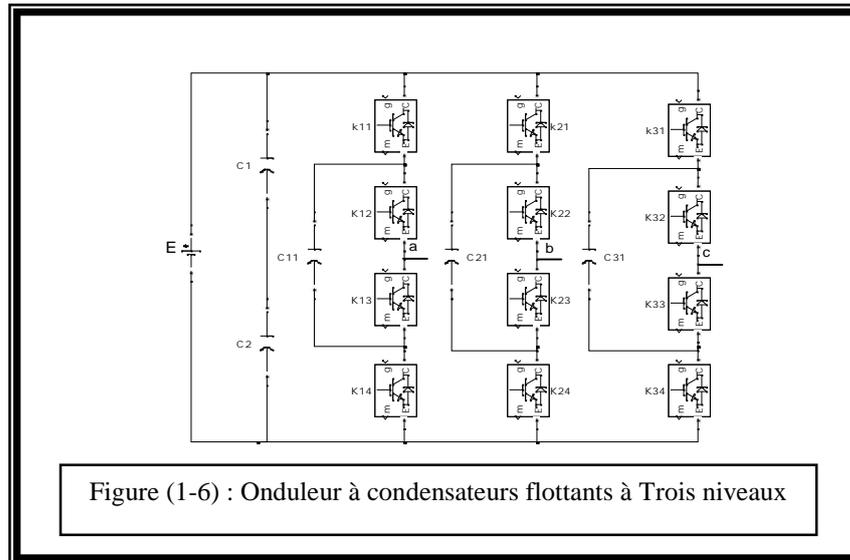
Les figures (1-6) et (1-7), présente respectivement la topologie d'onduleur à trois et à cinq niveaux, cette topologie dite (Flying Capacitor Multilevel Inverter) a été proposée par T.Meynard et H.Foch en 1992, dans le but de résoudre d'une part le problème de l'équilibre des tensions (problème de balancement de tension), et d'autre part pour réduire le nombre excessif de diodes. Cette structure de convertisseur est similaire à celle de l'onduleur à diode de bouclage sauf qu'au lieu d'utiliser des diodes de blocage, l'onduleur utilise des condensateurs à leur place. Dans cette topologie, les condensateurs remplacent les diodes, d'où l'appellation « onduleur à condensateur flottants »; malheureusement dans cette variante un grand nombre de capacités est exigé, contrairement au premier cas qui ne nécessite que (N-1) capacités seulement.

Ce type de convertisseur présente plusieurs avantages : [11]

- Le concept de condensateur Flottant peut être appliquée à un certain nombre de convertisseurs de différents types, DC /AC ou AC/ DC
- La plupart des stratégies de modulation sont facilement appliquée à cette topologie
- Les tensions sur les condensateurs sont automatiquement équilibrées par cette stratégie de modulation conventionnelle. Si désiré, les tensions de condensateur peuvent être Activement contrôlées par une modification appropriée des signaux de commande.
- La charge est par défaut partagé équitablement entre les commutateurs.
- La topologie est modulaire et ne dépend pas d'un transformateur.

**Néanmoins**, cette topologie présente quelque inconvénients, tel que:

- La topologie exige beaucoup de condensateurs à haute tension-beaucoup plus nombreux que d'autres topologies. Ces condensateurs doivent conduire le courant de pleine charge pendant au moins une partie du cycle de commutation. Heureusement, si la fréquence de commutation est élevée, ces condensateurs peuvent généralement être relativement faibles en valeur de la capacité.
- La topologie n'est pas intrinsèquement tolérante aux pannes.



**1-2-4. Autre topologies:**

Outre, les trois topologies discutées précédemment, d'autres topologies de convertisseurs multi-niveaux ont été proposées, mais la plupart d'entre elles sont à base de circuits "hybrides", combinaisons de deux topologies de base ou de légères variations de celles-ci. Ces topologies sont :

- Le convertisseur asymétrique hybride.
- Le convertisseur avec des ponts en cascade et sources CC/CC avec isolement.
- Le convertisseur avec des topologies multi-niveaux en cascade.

- Le convertisseur avec commutation douce.
- Les convertisseurs reliés par transformateur.
- Le convertisseur Diode/Capacitor-Clamped : variante de l'onduleur NPC.
- Le convertisseur New Diode-Clamped : autre variante de l'onduleur NPC.
- Le convertisseur multi-niveaux généralisé.

### 1-3. Comparaison entre les trois structures:

On peut trouver dans la littérature, des descriptions intéressantes des trois topologies de base citées supra, avec leurs avantages et inconvénients, comme celle offerte par Lai et Peng dans ou par Shakwek et Lewis dans. Le tableau (1-1) montre, de manière résumée, les principales caractéristiques des trois topologies multi-niveaux de base pour un convertisseur de N niveaux. La sélection de la topologie multi-niveaux la plus adéquate pour chaque application n'est pas évidente, jusqu'à présent c'est un défi non résolu dans la littérature.

Topologie	Clampé par les diodes	En cascade	Condensateur flottant
Nombre d'interrupteurs	$2 \binom{N}{2} - 1$ par phase	$2 \binom{N}{2} - 1$ par phase	$2 \binom{N}{2} - 1$ par phase
Diode antiparallèle	$2 \binom{N}{2} - 1$ par phase	$2 \binom{N}{2} - 1$ par phase	$2 \binom{N}{2} - 1$ par phase
Diodes de bouclage	$2 \binom{N}{2} - 2$ par phase	0	0
Condensateurs de bus Continu	$\binom{N}{2} - 1$ par phase	$\binom{N}{2} - 1$ / 2 par phase	$\binom{N}{2} - 1$ par phase
Condensateurs d'équilibrage	0	$(N-1)(N-2)/2$ par phase	0

Tableau (1-1): Comparaison entre les trois topologies des convertisseurs multi-niveaux

### 1-4. Avantages des Onduleurs multi-niveaux :

Les onduleurs multi-niveaux offrent d'énormes avantages par rapport aux onduleurs deux niveaux. Ces avantages sont visibles, d'une part d'un point de vue technologique et d'autre part d'un point de vue fonctionnel :

#### 1-4-1. Les Avantages technologiques :

Dans les onduleurs multi niveaux, la répartition de la tension est obtenue de manière naturelle en régime établi, ce qui permet de commuter chaque semi-conducteur indépendamment des autres. Ceci rend le convertisseur plus robuste et plus performant

pendant les commutations. La tension commutée est d'amplitude réduite et la commutation est donc plus simple à gérer.

#### **1-4-2. Les Avantages fonctionnelles pour le convertisseur:**

Possibilité d'accéder à des applications de plus forte puissance. Possèdent de meilleurs compromis entre performances statiques (tension de saturation) et performances dynamiques (temps de commutation, pertes par commutation, fréquence de découpage) [11].

#### **1-4-3 Les Avantages fonctionnelles pour les machines tournantes:**

Le nombre de tension généré par un onduleur multi-niveaux plus élevé que celui d'onduleur deux niveaux de tension, permet d'améliorer la qualité de sa forme d'onde, qui se traduira par une réduction de sa distorsion harmonique. Ceci peut entraîner des avantages considérables comme la diminution des pertes fer, l'augmentation du temps de vie des isolants ou la diminution du rayonnement électromagnétique issu des bobinages de la machine.

#### **1-5. Domaines d'applications des onduleurs multi-niveaux :**

Deux grands domaines d'application classique des onduleurs de tension sont les alimentations de secours et les entraînements à vitesse variable des machines à courants alternatifs, Ils sont également caractéristiques de deux grandes familles, respectivement celle des systèmes à fréquence fixe et celle des systèmes à fréquence variable.

#### **1-6. Intérêt des convertisseurs statiques multi-niveaux**

Un convertisseur statique est dit « multi-niveaux » lorsqu'il génère une tension découpée de sortie composée d'au moins trois niveaux. Ce type de convertisseur présente essentiellement deux avantages. D'une part les structures multi-niveaux permettent de limiter les contraintes en tension subies par les interrupteurs de puissance, chaque composant, lorsqu'il est à l'état bloqué, supporte une fraction d'autant plus faible de la pleine tension de bus continu que le nombre de niveaux est élevé.

D'autre part, la tension de sortie délivrée par les convertisseurs multi-niveaux présente d'intéressantes qualités spectrales. Le fait de multiplier le nombre de niveaux intermédiaires permet de réduire l'amplitude de chaque front montant ou descendant de la tension de sortie.

L'amplitude des raies harmoniques est par conséquent d'autant moins élevée. Dans le cas plus précis d'un fonctionnement en modulation de largeur d'impulsion, le recours à un

convertisseur multi-niveaux associé à une commande judicieuse des composants de puissance permet en outre de supprimer certaines familles de raies harmoniques [12].

### **1-7.conclusion:**

La technique des onduleurs multi-niveaux représente un domaine de recherche important. Recherche liée également à des applications toujours plus performantes et plus puissantes. Dans ce chapitre on a présenté la description des principales topologies de la conversion multi-niveaux avec leurs avantages et inconvénients. Ces topologies comprennent principalement la technique des onduleurs NPC à potentiels distribués, la technique dite des cellules imbriquées, ainsi que la technique des convertisseurs cascades.

Les onduleurs NPC sont intéressants pour les applications triphasées nécessitant peu de niveaux. Les deux structures d'onduleurs NPC et à cellule imbriquée sont avantageuses pour les applications avec échange de puissance active. L'onduleur en cascade est avantageux pour les applications monophasées. Il convient même pour les très grandes tensions.

Le convertisseur de tension NPC à N niveaux permet d'obtenir des performances très intéressantes par rapport à une structure à deux niveaux et ses applications sont diverses de nos jours.

Le chapitre suivant sera consacré à l'étude de l'onduleur de tension clampé par les diodes, L'étude d'un cas d'onduleur triphasé à deux, trois et à cinq niveaux (NPC) et la conduite d'une MAS alimentée par un onduleur à trois et à cinq niveaux, avec les résultats de simulations et leurs interprétations seront exposées.

# Chapitre 02

Etude d'un onduleur  
multi-niveaux  
symétriques

## 2-1. Introduction

Plus, de ce qui est précédemment explicité, dans le présent chapitre, nous avons dimensionné la topologie de l'onduleur multi-niveaux clampé par les diodes à trois et à cinq niveaux, avec un passage sur la topologie d'un onduleur classique à deux niveaux. Aussi, nous allons étudier leurs structures, principe de fonctionnement et la conduite de la MAS alimentée par ces topologies, avec les résultats de simulations et leurs interprétations. Nous allons aboutir sur une généralisation de cette structure à N niveaux.

## 2-2. Topologie d'un onduleur classique à deux niveaux:

Cette topologie, qui est caractérisée par une large gamme de niveaux des puissances. Comme application, elle est utilisée pour compenser la puissance réactive. Pour améliorer la qualité de la production, les interrupteurs sont contrôlés par la modulation de largeur d'impulsion (MLI) et les pertes de commutation sont réduites à un niveau plus bas.

La figure (2-1) ci-dessous montre une phase à deux niveaux.

### 2-2-1. Avantages et Inconvénients de la topologie à deux niveaux:

Parmi les avantages de ce type de topologie, nous citons :

- circuit simple;
- des petits condensateurs à courant continu;
- faible encombrement.

L'inconvénient majeur de cette topologie est la tension de blocage élevée.

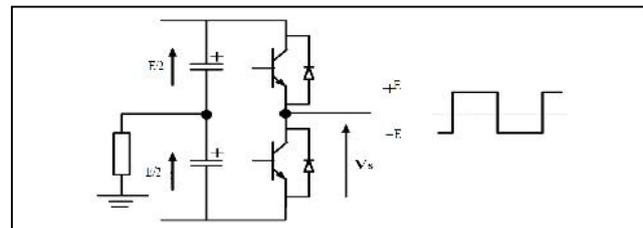


Figure (2-1) : Une phase d'un convertisseur à deux niveaux

## 2-3. Dimensionnement d'un onduleur de type NPC Clampé par les diodes:

Plusieurs études sont faites sur les onduleurs à deux niveaux [8], aussi bien du point de vue modélisation que stratégie de commande, et plusieurs structures sont possibles pour l'onduleur à trois niveaux. J'ai choisi d'étudier la structure NPC clampé par diodes à deux, trois et cinq niveaux avec une généralisation de N niveaux.

### 2-3-1. Onduleur de type NPC Clampé par diodes à trois niveaux:

#### a. Structure:

La structure choisie dans cette étude est celle présentée sur la figure (1-2), Le bus continu d'entrée est composé de deux capacités en série (C1 et C2), formant un point milieu noté (o) qui permet à l'onduleur d'accéder à un niveau de tension supplémentaire par rapport à l'onduleur classique à deux niveaux[13]. La tension totale du bus continu vaut  $E$ ; dans les conditions normales de fonctionnement, celle-ci est uniformément répartie sur les deux capacités qui possèdent alors une tension  $\frac{E}{2}$  à leurs bornes.

Chacun des trois bras (a, b et c) de l'onduleur est composé de quatre interrupteurs commandés ( $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  et  $K_4$ .) pour le bras a) et de deux diodes de maintien connectées au point milieu du bus continu. Les interrupteurs commandés sont unidirectionnels en tension et bidirectionnels en courant.

#### b. Principe de fonctionnement:

Pour des raisons de simplicité, nous limiterons l'étude à un bras d'onduleur NPC à trois niveaux figure (2-2), l'objectif visé est de déterminer les valeurs que peut prendre la tension  $V_{ao}$  pour les différents états possibles des interrupteurs statiques et de montrer les séquences de conductions des interrupteurs.

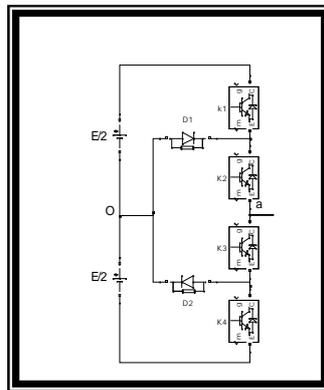


Figure (2-2) : Bras d'onduleur

Le sens positif ou négatif des courants  $I_{d1}$  et  $I_{d2}$  fixe le sens du transfert de l'énergie du convertisseur. Lorsque la source de tension est génératrice et la charge est réceptrice, le courant passe à travers les transistors. Lorsque le transfert d'énergie s'effectue de la charge vers la source d'entrée, ce sont les diodes antiparallèles qui assurent le passage du courant.

Pour un convertisseur NPC à N-niveaux de tensions, nous avons N séquences de fonctionnement possible permettant de générer les N niveaux de tensions. La  $m^{\text{ème}}$  séquence de fonctionnement correspondra à l'état où les interrupteurs du  $K_m$  jusqu'à  $K_{n+m-2}$  sont passants, et les autres sont ouverts.

Et en particulier pour le NPC à trois niveaux on a trois séquences de fonctionnement:

• **Séquences 1** : Génération du niveau maximum

Dans ce cas, les interrupteurs  $K_1, K_2$  sont passants et  $K_3, K_4$ , sont bloqués comme le montre la figure (2-3) -a), et la tension de sortie  $V_{ao}$  est:  $V_{ao} = +\frac{E}{2}$

La tension inverse appliquée aux interrupteurs  $K_3, K_4$  vaut:  $V_{k3} = V_{k4} = +\frac{E}{2}$

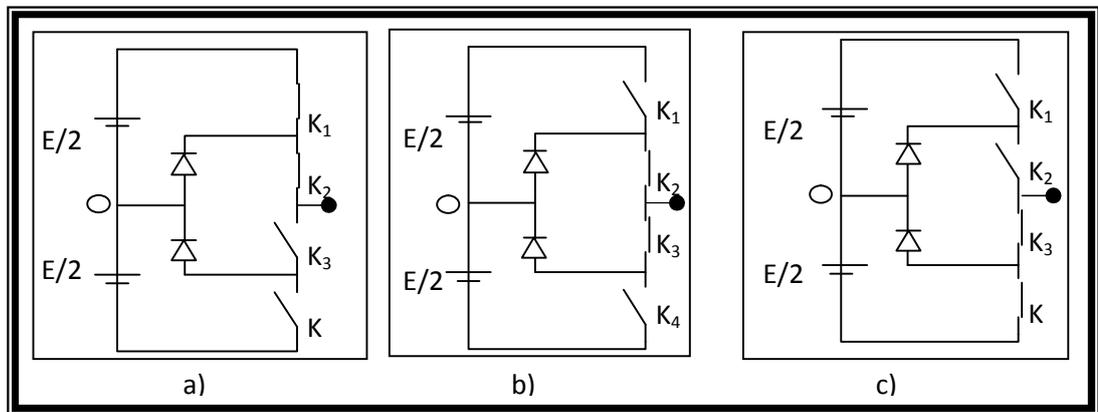


figure (2-3): Séquences de fonctionnement d'un bras d'onduleur NPC à trois niveaux

• **Séquences 2** : Génération du niveau intermédiaire

Les interrupteurs  $K_2, K_3$  sont passants et  $K_1, K_4$  sont bloqués, dans ce cas le point a est relié directement au point o à travers l'une des diodes de maintien, comme le montre la figure (2-3) -b). Et la tension de sortie  $V_{ao}$  est donc nulle,  $V_{ao} = 0$ .

La tension inverse appliquée aux interrupteurs  $K_1, K_4$  vaut:  $V_{K1} = V_{K4} = +\frac{E}{2}$

• **Séquences 3** : Génération du niveau minimum

Dans ce cas, les interrupteurs  $K_1, K_2$  sont bloqués et  $K_3, K_4$  sont passants comme le montre la figure (2-3) -c). Et la tension de sortie  $V_{ao}$  est:  $V_{ao} = -\frac{E}{2}$

La tension inverse appliquée aux interrupteurs  $K_1, K_2$  vaut:  $V_{K1} = V_{K2} = +\frac{E}{2}$ .

Les trois séquences de commutation possibles sont résumés au tableau ( 2-1)

$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$V_{ao}$
1	1	0	0	$+\frac{E}{2}$
0	1	1	0	0
0	0	1	1	$-\frac{E}{2}$

Tableau (2-1): États possibles de l'onduleur NPC à 3 niveaux

**Commentaire :** Nous remarquons que le temps de conduction de chaque interrupteur est réduit par rapport à celui des interrupteurs d'un convertisseur classique à deux niveaux, chaque interrupteur bloque une tension de  $+\frac{E}{2}$  dans le cas NPC à trois niveaux au lieu de E pour l'onduleur classique deux niveaux. A chaque changement de niveau de tension, on a deux interrupteurs qui commutent.

### 2-3-1-1. Conduite de la MAS alimentée par un onduleur de type NPC à trois niveaux :

#### a. La stratégie de commande en pleine onde :

La commande en pleine onde est une commande classique souvent utilisé pour la commande des onduleurs [14]. Plusieurs cas qui se différencient par les manières d'élaborer la séquence de commande des interrupteurs et de régler la valeur de la tension à la sortie de l'onduleur pour alimenter une charge, dans notre cas c'est une MAS.

Plusieurs commandes pleines ondes sont possibles pour ces onduleurs. Cette stratégie consiste à générer un système de tension dont les fondamentaux constituent un système triphasé équilibré. Dans notre cas, on a pris un angle  $=15^\circ$ , [26].

Le schéma bloc de la machine asynchrone est présenté par la figure (2-4)

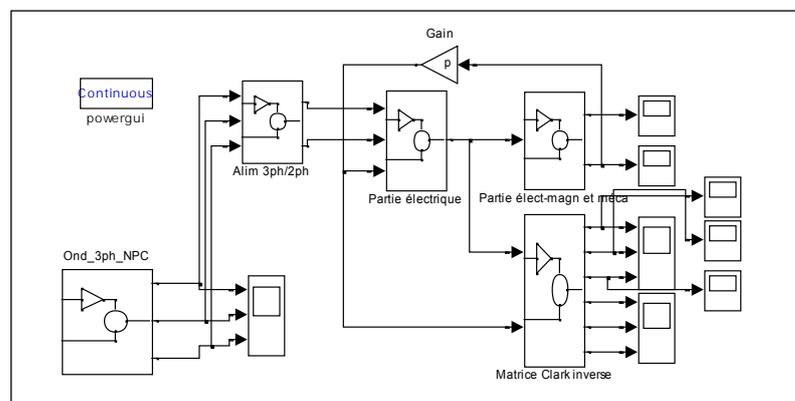
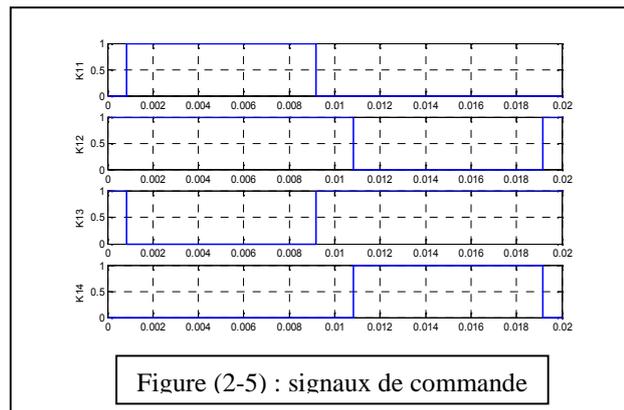


Figure (2-4) : Schéma bloc de la MAS associée à un onduleur NPC à trois niveaux

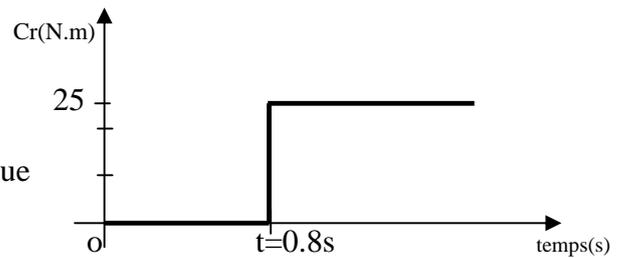
Les signaux de commande sont présentés par la figure (2-5) :



**Résultats de simulation :**

Les figure (2-6, 2-8) illustrent respectivement les tensions simples  $V_{ao}$ ,  $V_{bo}$  et  $V_{co}$  que présentes les trois niveaux 0,  $+E/2$  et  $-E/2$  et les tensions composées  $U_{ab}$ ,  $U_{bc}$  et  $U_{ca}$  qui sont semblable à une forme d'escalier. Les tensions simples aux bornes de la machine ( $V_{an}$ ,  $V_{bn}$  et  $V_{cn}$ ) sont présentées sur la figure (2-10). La figure (2-12) illustre le courant statorique, ayant une forme proche à la sinusoïdale.

A l'instant  $t=0.8$  N.m, on applique un couple de charge de 25N.m, comme indique la figure ci-contre



La figure (2-14) présente les allures de la vitesse  $w_r$ , le couple  $C_e$  et le couple en fonction de la vitesse ( $C_e = f(w_r)$ ), afin de visualiser l'effet de la fréquence de commutation.

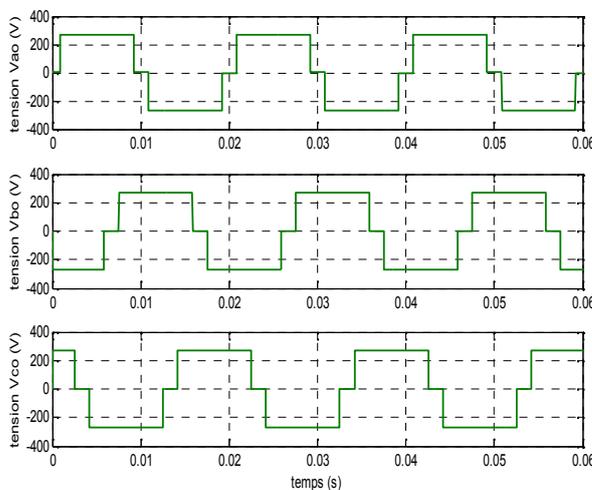


Figure (2-6) : tension simples  $V_{ao}$ ,  $V_{bo}$  et  $V_{co}$

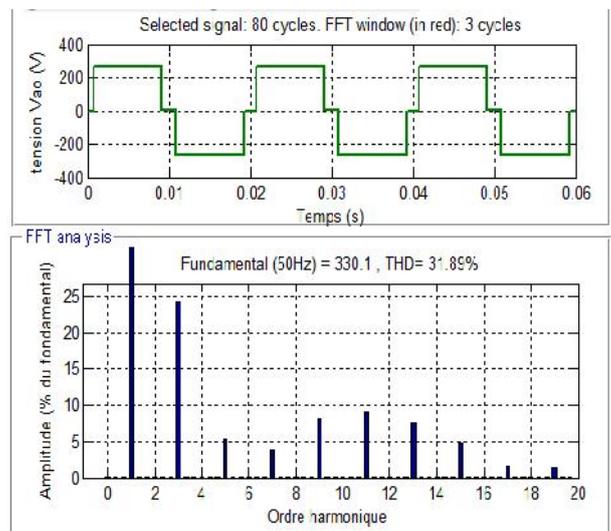


Figure (2-7) : Spectre harmonique de la tension  $V_{ao}$

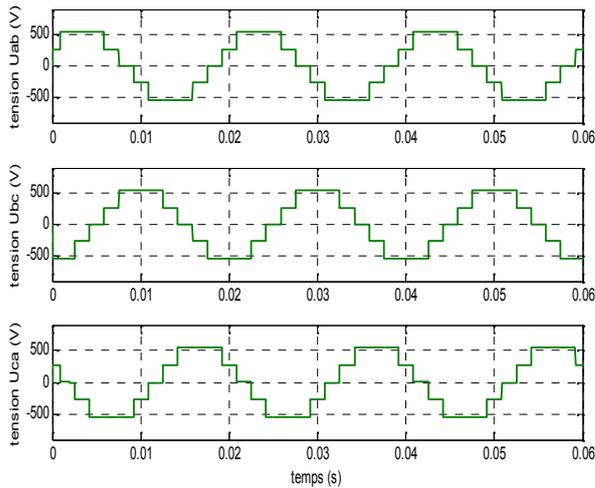


Figure (2-8) : tensions composées Uab, Ubc et Uca

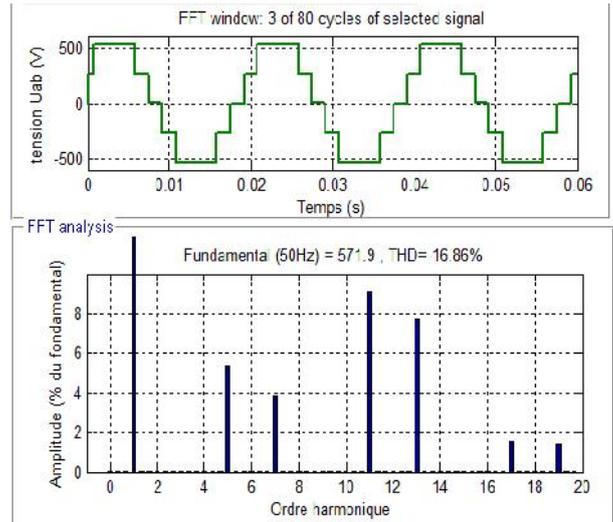


Figure (2-9): Spectre harmonique de la tension Uab

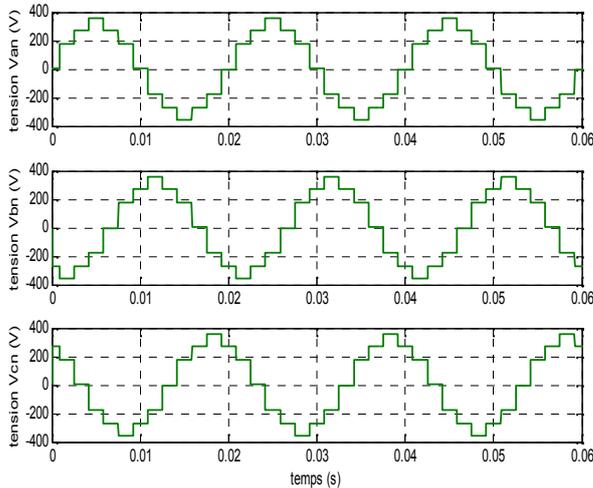


Figure (2-10) : tensions de phase Van, Vbn et Vcn

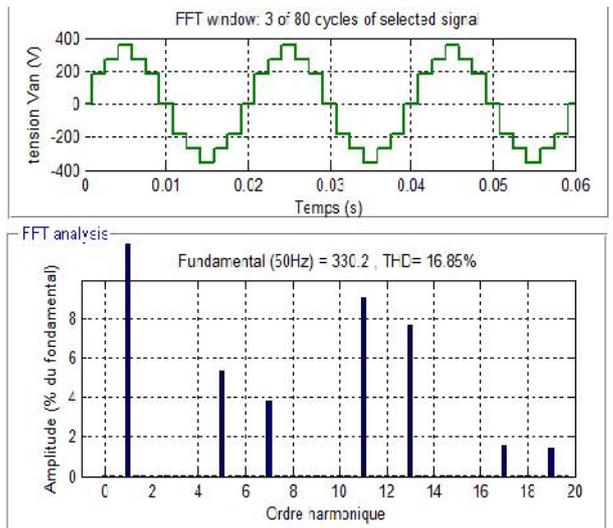


Figure (2-11): Spectre harmonique de la tension Van

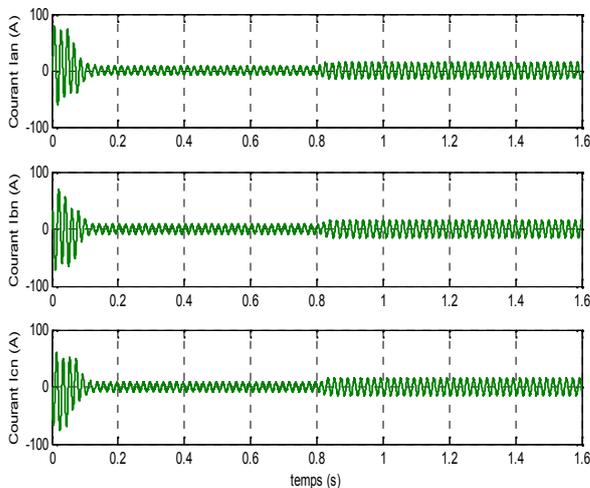


Figure (2-12): Courant de phase Ian, Ibn et Icn

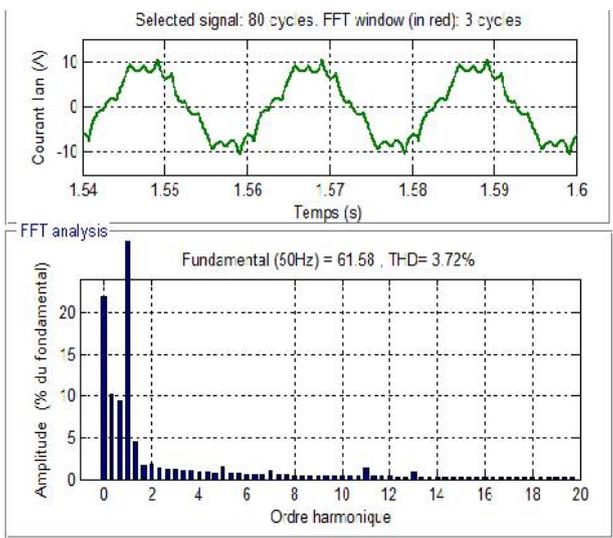


Figure (2-13): Spectre harmonique du courant Ian

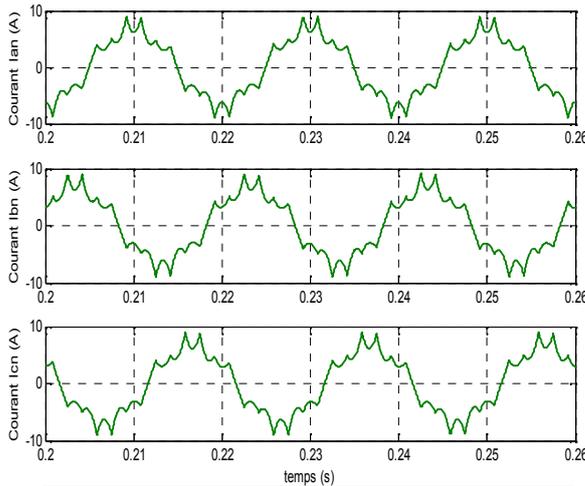


Figure (2-12)-a: Courant de phase Ian, Ibn et Icn à vide

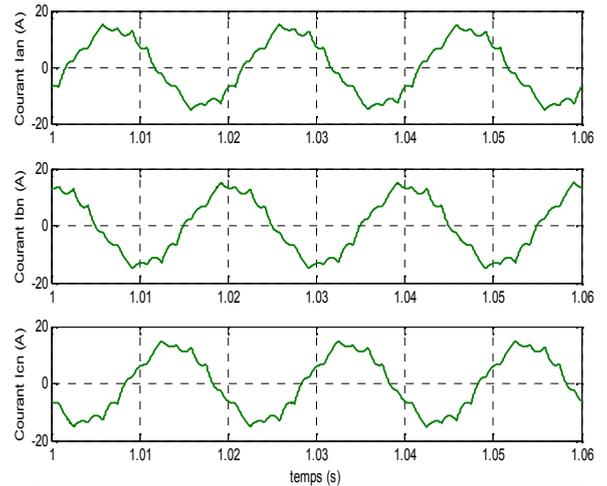


Figure (2-12)-b: Courant de phase Ian, Ibn et Icn en charge

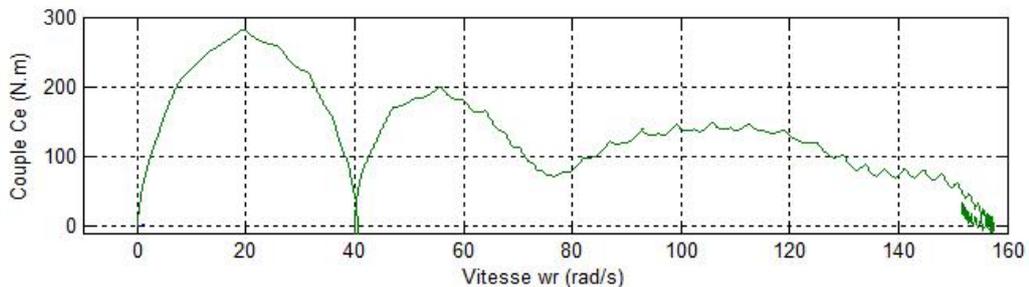
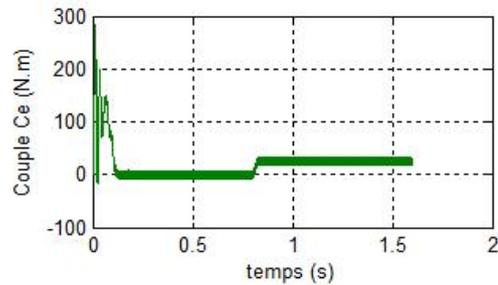
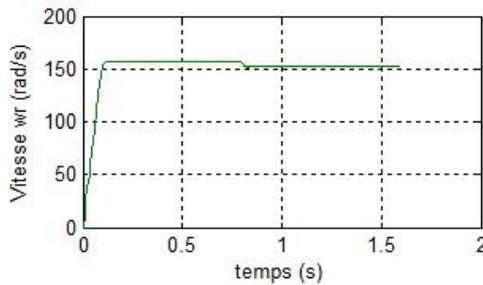


Figure (2-14): Caractéristiques de la MAS

### Interprétation des résultats :

Ici l'angle de commande des interrupteurs de l'onduleur est  $=15^\circ$ . La tension simple  $V_{ao}$  présente les trois niveaux 0, +E et -E et la tension composée  $U_{ab}$  est semblable à une forme d'escalier. A l'instant  $t=0.8s$ , j'ai provoqué un couple de charge de valeur  $C_r = 25 \text{ N.m}$ . J'observe une diminution de la vitesse et le couple oscille autour de la charge appliquée sur l'arbre de la machine, pour les courants un fort appel des courants statoriques au régime transitoire puis se stabilise.

Les figures (2-12-a, b) illustrent un zoom du courant statorique, elles ayant une forme proche à une forme sinusoïdale.

**b. La stratégie de la modulation de largeur d'impulsions:**

L'essor de la modulation de largeur d'impulsions est lié aux progrès de développement des semi-conducteurs de puissance, l'augmentation des nombres des commutations entraînerait des pertes excessives si on n'avait pas réussi à réduire les pertes à chacune des commutations [13].

La multiplication du nombre d'impulsions formant chacune des alternances d'une tension de sortie offre la possibilité de moduler la forme de cette tension de manière à avoir la forme sinusoïdale que possible [15].

Et, pour commuter entre deux niveaux de tension, on applique au convertisseur à des instants bien précis, des signaux de commande issus de la comparaison entre un signal de référence  $U_{ref}$  de fréquence  $f_{ref}$  et une porteuse  $U_p$  de fréquence  $f_p$ . L'intersection de ces deux signaux donne les instants de commutation des interrupteurs. Si la référence est inférieure à la porteuse, la tension à la sortie du convertisseur vaut  $-U_c$ , si non elle vaut  $U_c$ . Le train d'impulsions successives ainsi formé correspond au signal de sortie modulé en largeur [16]. La MLI multi-niveaux est l'extension de la MLI à deux niveaux [17].

Cette méthode de modulation est facilement extensible à la commande des convertisseurs multi-niveaux. Pour commander un convertisseur à  $N$  niveaux de tension,  $(N-1)$  porteuses triangulaires sont générées. Les signaux triangulaires ont la même fréquence  $f_p$ , et la même amplitude  $A_p$  [16].

Cette technique se caractérise par deux paramètres :

- l'indice de modulation ( $m=f_p/f_{ref}$ ), est défini comme étant le rapport de fréquence de la porteuse à celle de la référence.
- le coefficient de réglage en tension( le Taux de modulation)  $r=V_{refmax}/V_{pmax}$ , est défini comme étant le rapport de l'amplitude de la référence à celle de la porteuse.

Le schéma bloc de la machine asynchrone est présenté par la figure (2-15)

La figure (2-16) montre le Schéma de principe de la commande MLI d'un onduleur à trois niveaux.

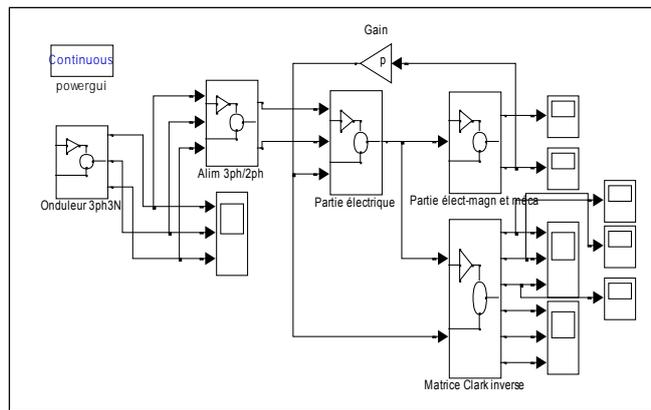
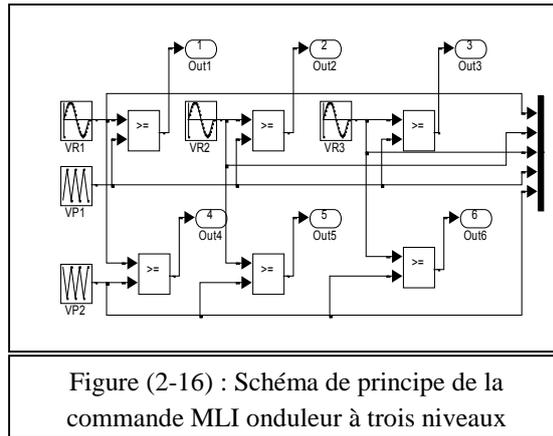


Figure (2-15) : Schéma bloc de la MAS associée à un onduleur NPC à trois niveaux

**Résultats de simulation :**

La figure (2-17, 2-19) respectivement, présente la tension simple  $V_{ao}$  du bras de l'onduleur lié au point milieu O, et la tension composée  $U_{ab}$  entre deux phases de l'onduleur. La figures (2-21) montre les tensions de phase  $V_{an}$ ,  $V_{bn}$  et  $V_{cn}$ , et les courant  $I_{an}$ ,  $I_{bn}$  et  $I_{cn}$  illustrés dans la figure (2.23), Dans ce cas, on utilise la technique MLI à deux porteuses figure (2-16), avec un couple de charge  $C_r = 25N.m$ .

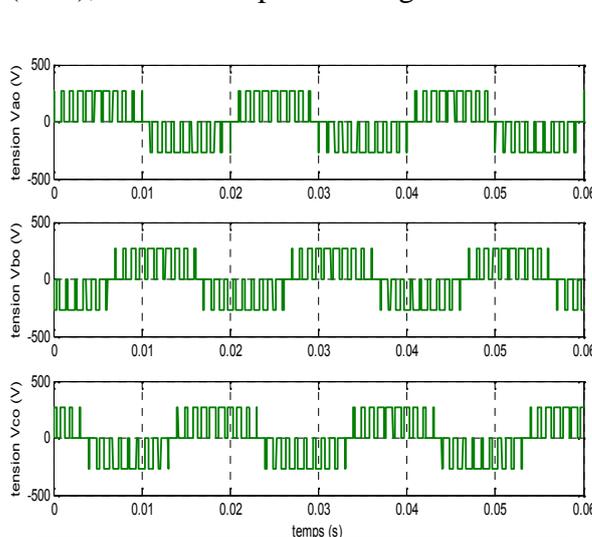


Figure (2-17) : tensions simples  $V_{ao}$ ,  $V_{bo}$  et  $V_{co}$

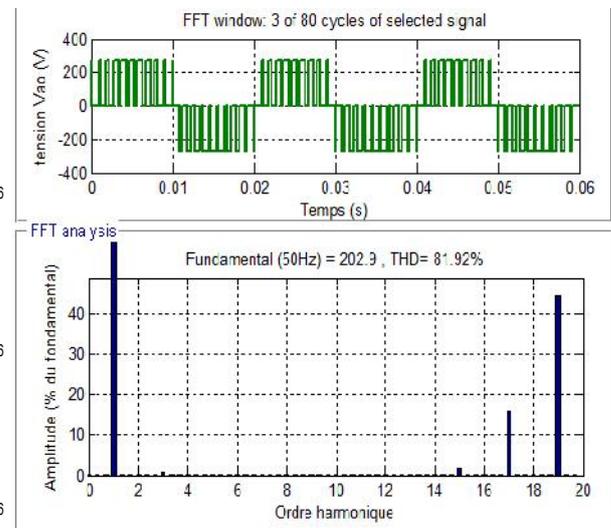


Figure (2-18): Spectre harmonique de la tension simple  $V_{ao}$

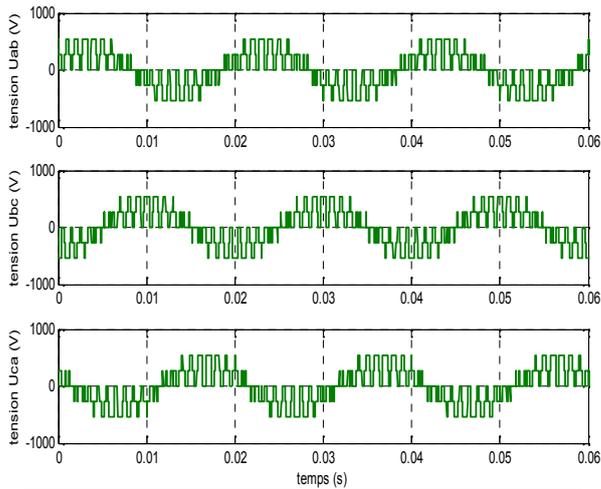


Figure (2-19) : tensions composées Uab, Ubc et Uca

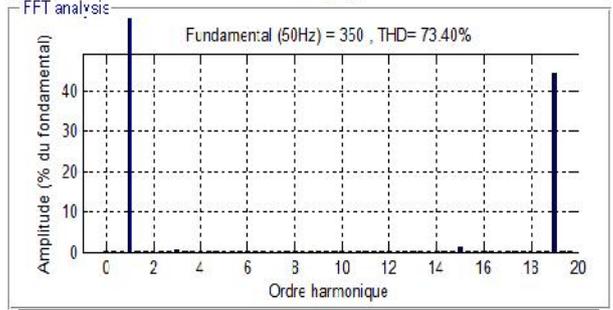
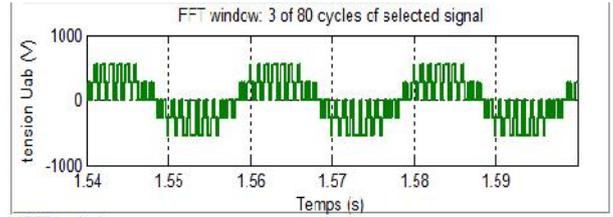


Figure (2-20): Spectre harmonique de la tension Uab

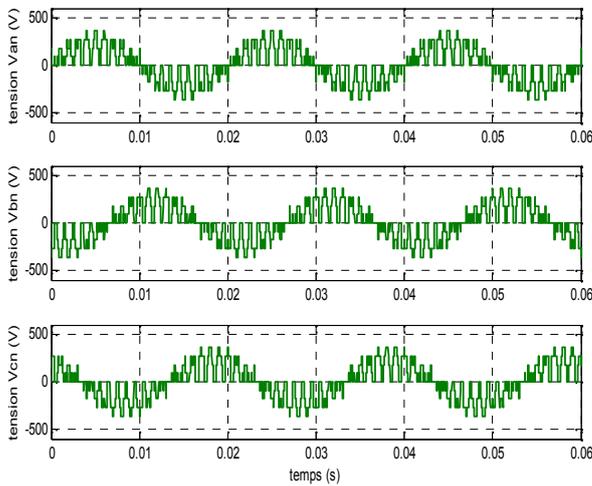


Figure (2-21) : tensions de phases Van, Vbn et Vcn

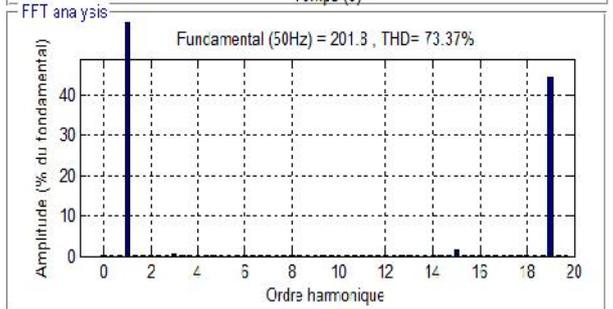
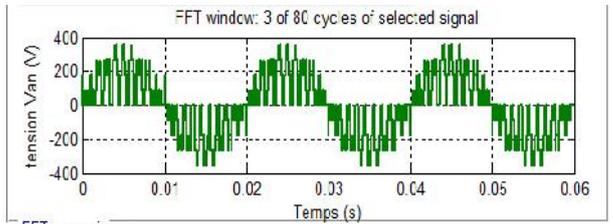


Figure (2-22): Spectre harmonique de la tension Van

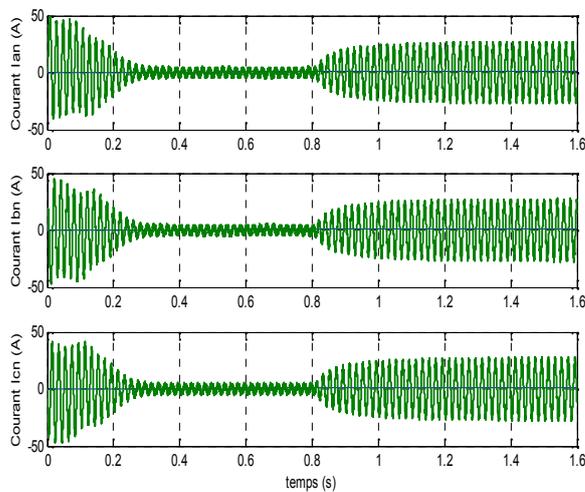


Figure (2-23): Courant de phase Ian, Ibn et Icn

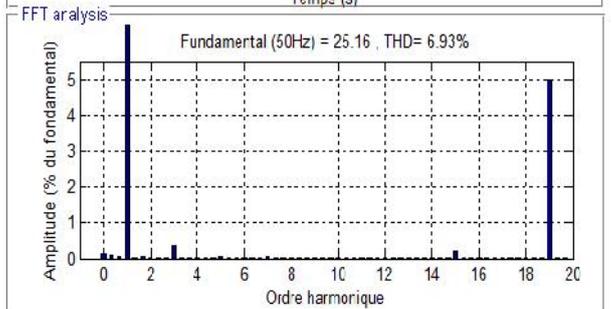
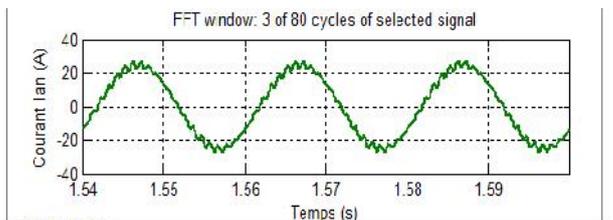


Figure (2-24): Spectre harmonique du courant de phase

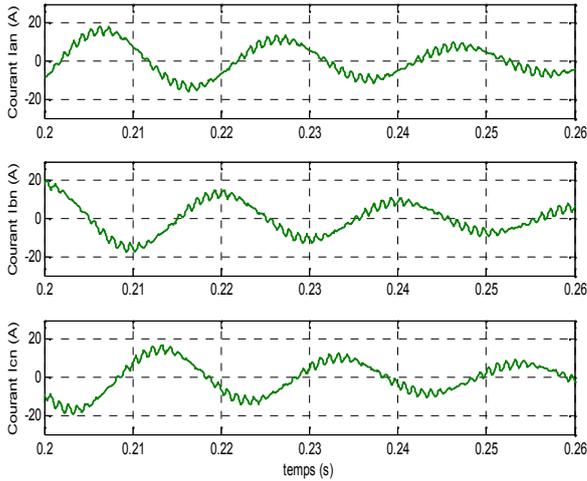


Figure (2-23)-a: Courant de phase  $I_{an}$ ,  $I_{bn}$  et  $I_{cn}$  à vide

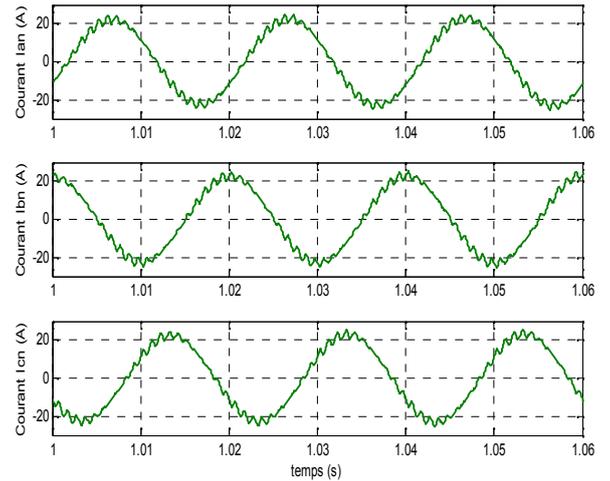


Figure (2-23)-b: Courant de phase  $I_{an}$ ,  $I_{bn}$  et  $I_{cn}$  en charge

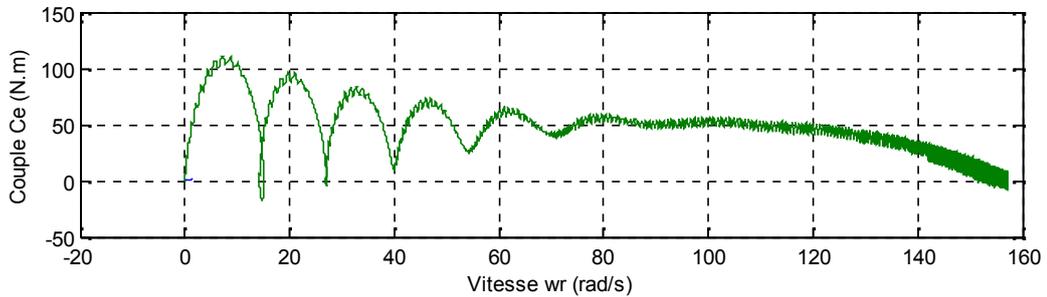
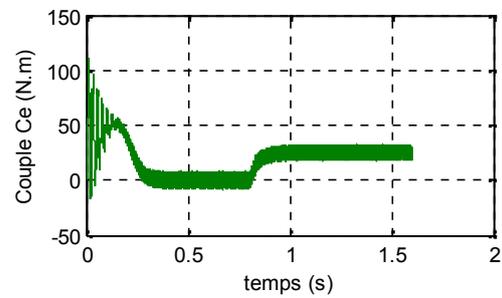
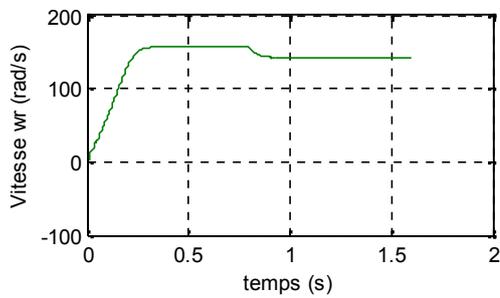


Figure (2-25): Caractéristiques de la MAS

### Interprétation des résultats :

La forme d'onde en escalier des tensions simples et composées, ainsi que la forme du courant  $I_{an}$ , ce qui est traduit par les résultats obtenus du THD, son spectre harmonique est plus grand  $THD=6,93\%$  par rapport à celui de l'onduleur à trois niveaux en pleine onde  $THD=3,72\%$ .

Outre, on remarque que le couple oscille autour de sa référence (nulle) pour la vitesse se stabilise à 157 rad/s, puis se baisse lors de l'application du couple résistant à  $t = 0.8s$  néanmoins, pour le courant, un fort appel des courants statoriques au régime transitoire puis se stabilise avec une forme sinusoïdale possède des oscillations mince que le cas précédent.

### 2-3-2. Onduleur type NPC Clampé par diodes à cinq niveaux:

De même, plusieurs structures sont possibles pour l'onduleur à cinq niveaux.

#### a. Structure

Chaque phase de l'onduleur triphasé NPC à cinq niveaux de tensions est composée de huit interrupteurs commandés qui sont unidirectionnels en tension et bidirectionnels en courant et de six diodes de maintien connectées tout au long du bus continu.

L'onduleur est alimenté par une source de tension continue  $E$ , que quatre condensateurs de valeurs égales se partagent pour donner quatre sources distinctes de tension  $\frac{E}{4}$ .

La structure triphasée de l'onduleur NPC à cinq niveaux de tensions est présentée sur la figure (2-3)

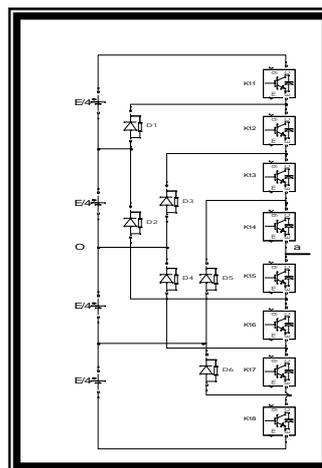


Figure (2-26) : Bras d'un onduleur

#### b. Principe de fonctionnement:

Notre objectif visé est de déterminer les valeurs que peut prendre la tension  $V_{ao}$  pour les différents états possibles des interrupteurs statiques, de montrer les séquences de conductions des interrupteurs.

Dans ce cas, onduleur NPC de cinq niveaux, nous avons cinq séquences de fonctionnement possible :

• **Séquence 1:**

Les interrupteurs  $K_1, K_2, K_3$  et  $K_4$  sont passants et  $K_5, K_6, K_7$  et  $K_8$  sont bloqués. Alors, le point **a** est relié directement à la borne positive du premier étage de tension  $+\frac{E}{4}$  et le point (O) est relié à la borne négative du deuxième étage de tension  $+\frac{E}{4}$  ce qui implique que la tension de sortie vaut:  $V_{ao} = +\frac{E}{2}$

• **Séquence 2:**

Les interrupteurs  $K_2, K_3, K_4$  et  $K_5$  sont passants et  $K_1, K_6, K_7$  et  $K_8$  sont bloqués, on a: la tension de sortie est:  $V_{ao} = +\frac{E}{4}$

• **Séquence 3:**  $K_3, K_4, K_5$  et  $K_6$  sont passants et  $K_1, K_2, K_7$  et  $K_8$ , sont bloqués, on a:

La tension de sortie est:  $V_{ao} = 0$

• **Séquence 4:**  $K_4, K_5, K_6$  et  $K_7$  sont passants et  $K_1, K_2, K_3$  et  $K_8$  sont bloqués, on a:

la tension de sortie est:  $V_{ao} = -\frac{E}{4}$

• **Séquence 5:**  $K_5, K_6, K_7$  et  $K_8$ , sont passants et  $K_1, K_2, K_3$  et  $K_4$ , sont bloqués, on a:

La tension de sortie est :  $V_{ao} = -\frac{E}{2}$

**Remarque :** Les tensions bloquées par les différents interrupteurs au cours des Séquences de fonctionnement valent toutes :  $V_{ki} = +\frac{E}{4}$  avec  $i=1.....8$

Les cinq états de commutation possibles sont résumés au tableau (2-2)

$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$	$K_6$	$K_7$	$K_8$	$V_{ao}$
1	1	1	1	0	0	0	0	$+\frac{E}{2}$
0	1	1	1	1	0	0	0	$+\frac{E}{4}$
0	0	1	1	1	1	0	0	0
0	0	0	1	1	1	1	0	$-\frac{E}{4}$
0	0	0	0	1	1	1	1	$-\frac{E}{2}$

**Tableau (2-2): États possibles de l'onduleur NPC à 5 niveaux**

**Commentaire :** On remarque que plus le nombre de niveaux augmente, la tension de sortie en forme d'escalier possède de paliers. Ceci permet de mieux approcher la sinusoïde. Donc la tension de sortie du convertisseur NPC à cinq niveaux est meilleure du point de vue taux de distorsion harmonique que celle d'un NPC à trois niveaux. Un autre avantage du NPC à cinq niveaux, les interrupteurs commandés bloque une tension  $V_{ki} = + \frac{E}{4}$  deux fois plus faible que celle bloquée par les interrupteurs du convertisseur à trois niveaux  $V_{ki} = + \frac{E}{2}$ . On a deux commutations à chaque changement de niveau de la tension de sortie.

### 2-3-2-1. Conduite de la MAS alimentée par un onduleur de type NPC à cinq niveaux :

#### a. La stratégie de commande en pleine onde :

La même chose pour l'onduleur à cinq niveaux.

Le schéma bloc de la machine asynchrone est présenté par la figure (2-27)

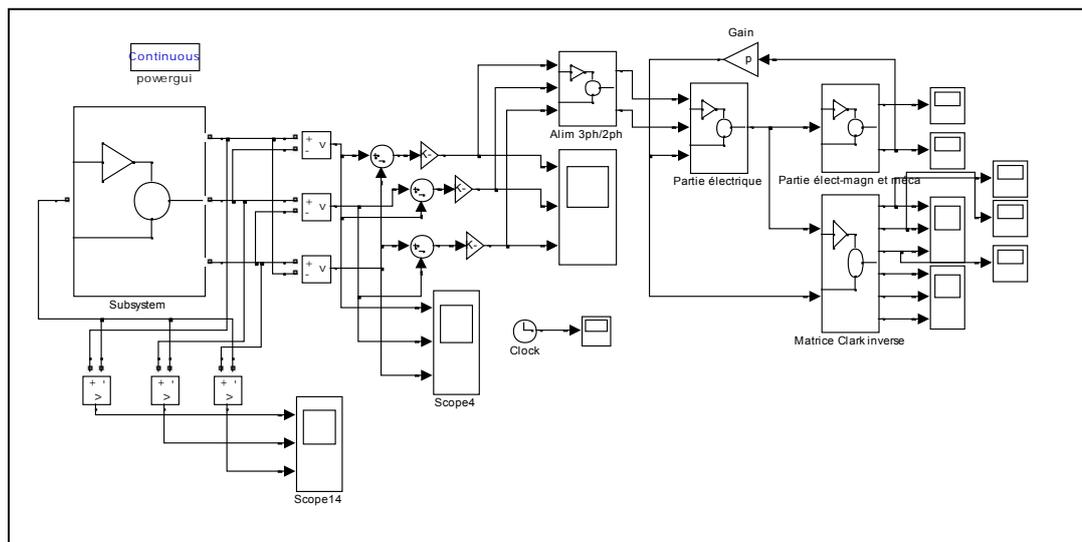


Figure (2-27): Schéma bloc de la MAS associée à un onduleur NPC à cinq niveaux

La figure (2-28) montre le signal de commande des interrupteurs  $K_{11}$ ,  $K_{12}$ ,  $K_{13}$  et  $K_{14}$  de l'onduleur, avec  $K_{15} = \overline{K_{11}}$ ,  $K_{16} = \overline{K_{12}}$ ,  $K_{17} = \overline{K_{13}}$  et  $K_{18} = \overline{K_{14}}$ , où j'ai pris les angles de commutation:  $\alpha_1 = 15^\circ$  et  $\alpha_2 = 30^\circ$ , [26].

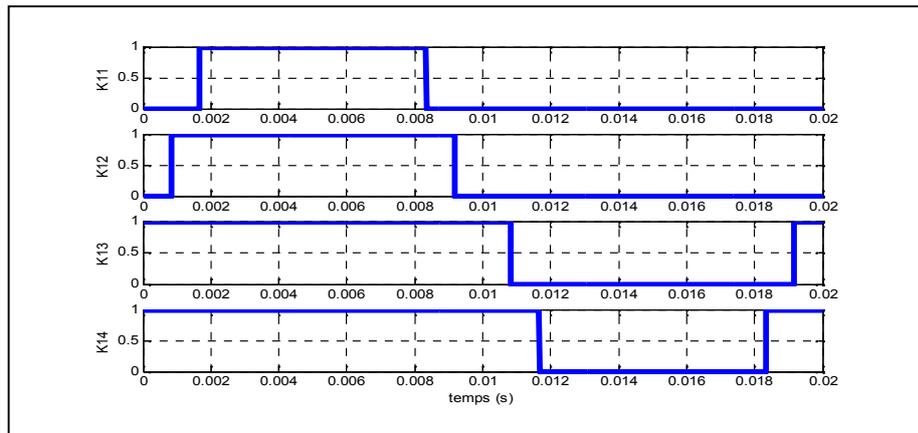


Figure (2-28) : Signal de commande

**Résultats de simulation :**

Les figures (2-29, 2-31) respectivement, montre la tension simple  $V_{ao}$  du bras de l'onduleur lié au point milieu O, et la tension composée  $U_{ab}$  entre deux phase de l'onduleur à cinq niveaux. la figures (2-33) présente les tensions simples  $V_{an}$ ,  $V_{bn}$  et  $V_{cn}$  à la sortie de l'onduleur.

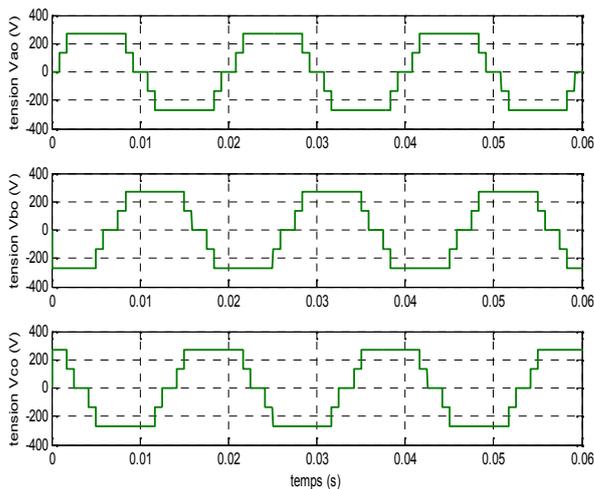


Figure (2-29): tensions simple  $V_{ao}$ ,  $V_{bo}$  et  $V_{co}$

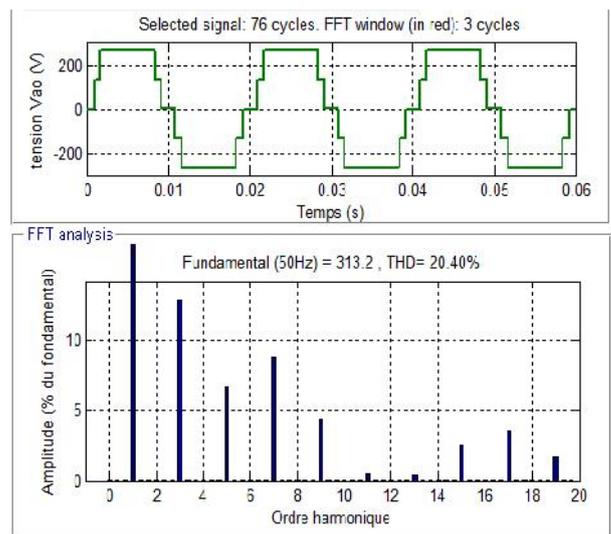


Figure (2-30): Spectre harmonique de la tension simple  $V_{ao}$

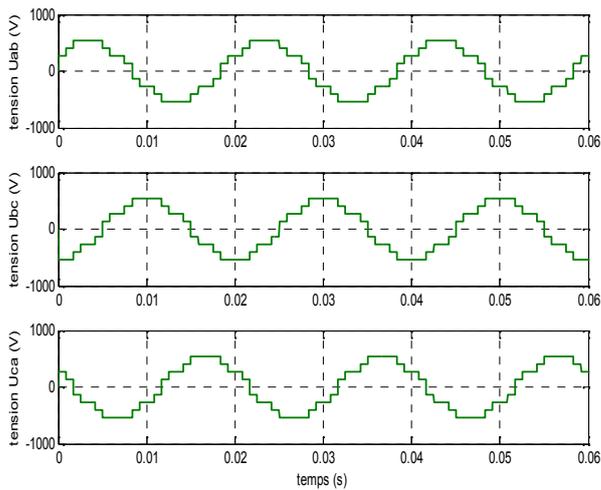


Figure (2-31): la tension composée  $U_{ab}$ ,  $U_{bc}$  et  $U_{ca}$

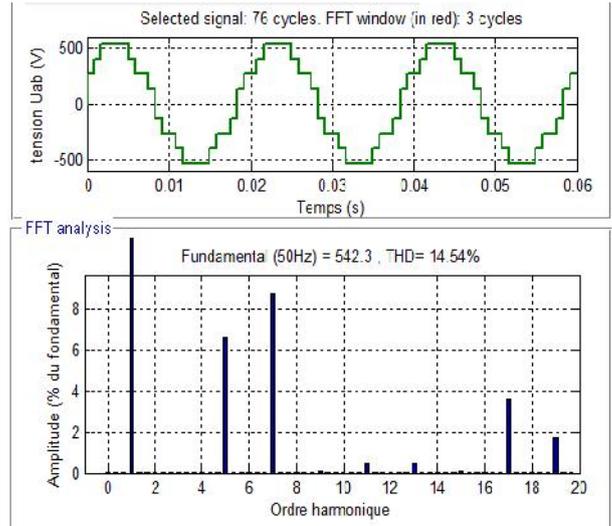


Figure (2-32): Spectre harmonique de la tension  $U_{ab}$

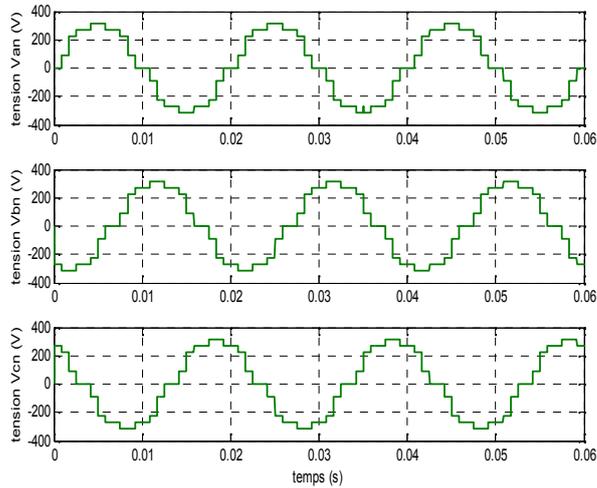


Figure (2-33): tensions de phases  $V_{an}$ ,  $V_{bn}$  et  $V_{cn}$

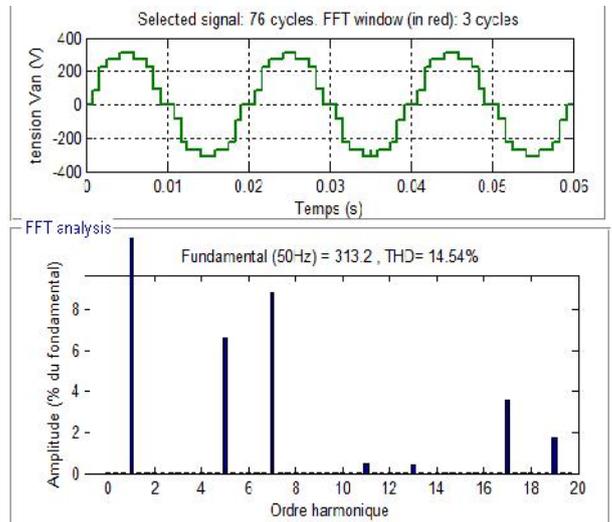


Figure (2-34): Spectre harmonique de la tension  $V_{an}$

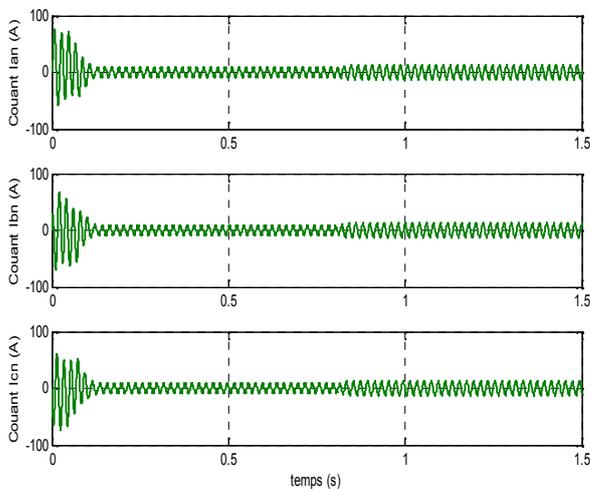


Figure (2-35): Courants  $I_{an}$ ,  $I_{bn}$  et  $I_{cn}$

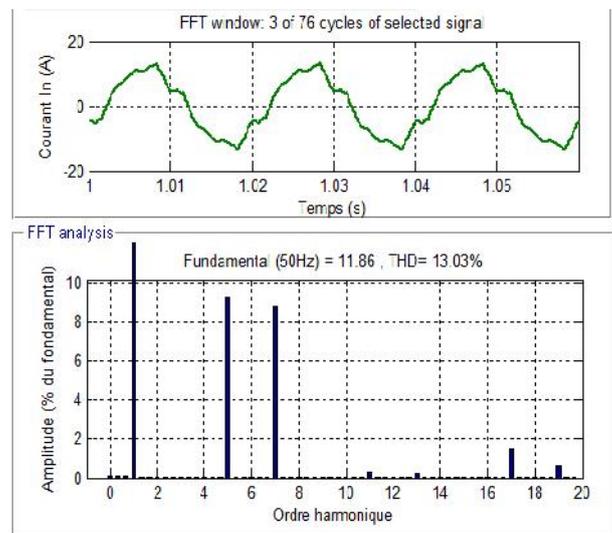


Figure (2-36): Spectre harmonique du courant  $I_{an}$

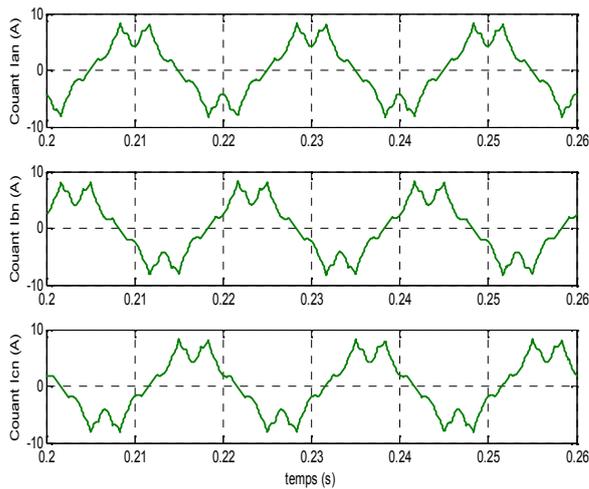


Figure (2-35)-a: Courant de phase Ian, Ibn et Icn à vide

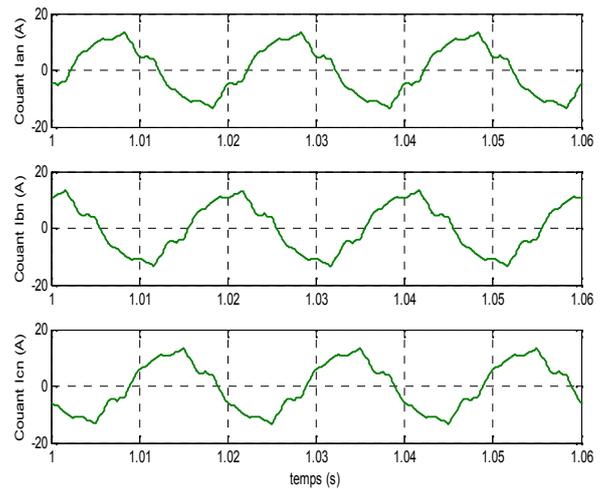


Figure (2-35)-b: Courant de phase Ian, Ibn et Icn en charge

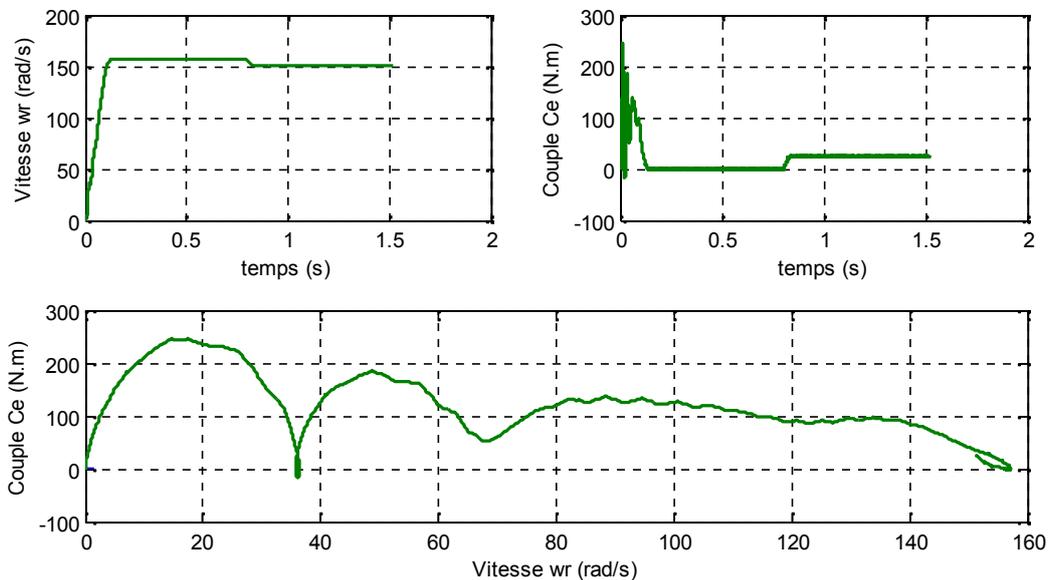


Figure (2-37): Caractéristiques de la MAS

### Interprétation des résultats :

Notre choix des angles de commande offre un degré de liberté plus élevé, ce qui est traduit par la forme d'onde en escalier des tensions simples et composées, et une amélioration remarquable de la forme d'onde du courant.

La figure (2-37) présente les caractéristiques de la machine asynchrone à vide puis l'application d'un couple de charge de  $C_r=25\text{N.m}$  à  $t = 0.8\text{s}$ . Après ces résultats de simulation obtenus on note que : Pour la vitesse elle atteint le régime permanent à  $157\text{ rad/s}$  puis se stabilise, et elle diminue après l'application du couple de charge, pour le couple il suit le couple de charge, et pour le courant statorique une nette amélioration apparaît et montre

bien que si le nombre de niveaux de l'onduleur augmente la forme de courant devient plus proche de la sinusoïde.

De point de vu THD, une nette diminution du THD est remarquable a chaque élévation du niveau ( Deux niveau : THD  $V_{ao}$ =48.31%, THD  $I_{an}$ =60.28% - trois niveaux : THD  $V_{ao}$ =31.89%, THD  $I_{an}$ =3.72% - cinq niveaux :THD  $V_{ao}$ =20.40%, THD  $I_{an}$ = 13.03%).

**b. La stratégie de la modulation de largeur d'impulsions:**

Le schéma bloc de la machine asynchrone est présenté par la figure (2-38)

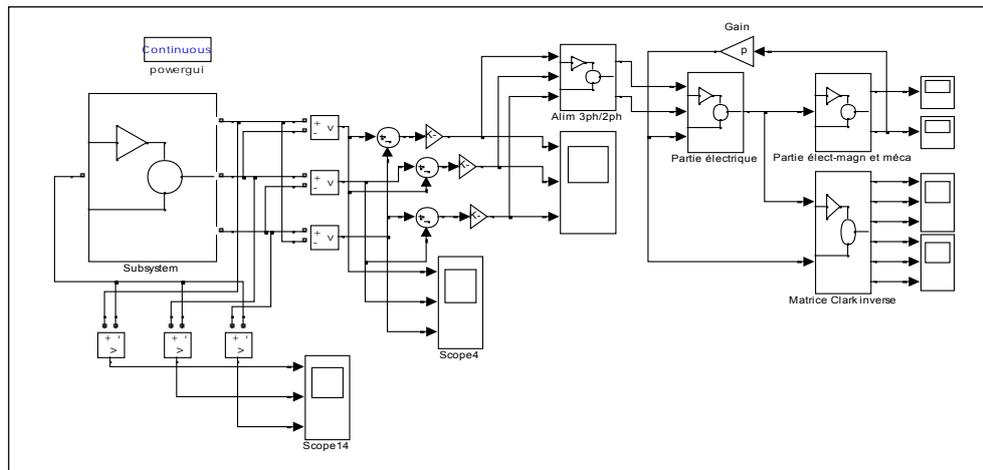


Figure (2-38) : Schéma bloc de la MAS associée à un onduleur NPC à cinq niveaux

De même, le nombre de porteuses est ;  $N - 1 = 4$  porteuses, comme le montre la figure (2-39, 40):

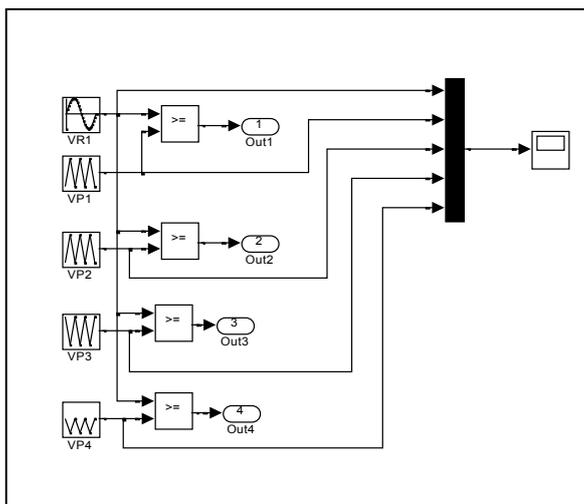


Figure (2-39) : Schéma de principe de la commande MLI onduleur à cinq niveaux

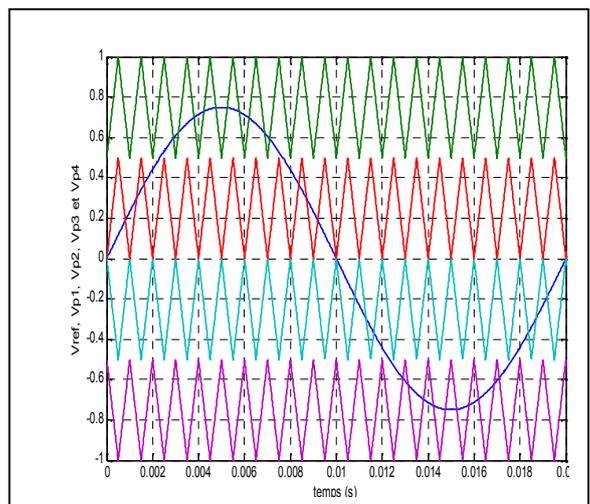


Figure (2-40) : Principe de la MLI à quatre porteuses pour un onduleur à cinq niveaux

**Résultats de simulation :**

La tension simple  $V_{ao}$  du bras de l'onduleur lié au point milieu O et la tension composée  $U_{ab}$  entre deux phases de l'onduleur à cinq niveaux sont présentés respectivement par Les figures (2-41, 2-43), la figure (2-45) montre les tensions de phases  $V_{an}$ ,  $V_{bn}$  et  $V_{cn}$ , et les courant  $I_{an}$ ,  $I_{bn}$  et  $I_{cn}$  illustrés dans la figure (2.47), Dans ce cas, on utilise la technique MLI à quatre porteuses figure (2-39, 40).

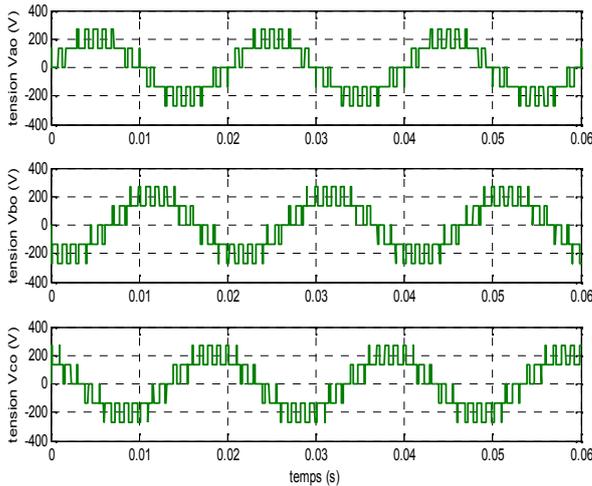


Figure (2-41) : tensions simples  $V_{ao}$ ,  $V_{bo}$  et  $V_{co}$

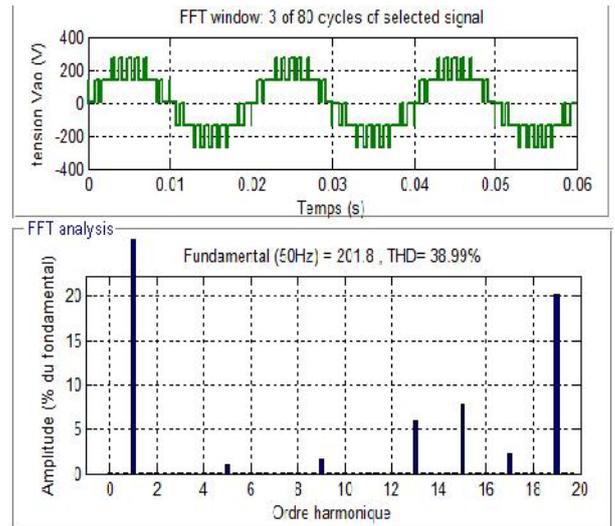


Figure (2-42): Spectre harmonique de la tension  $V_{ao}$

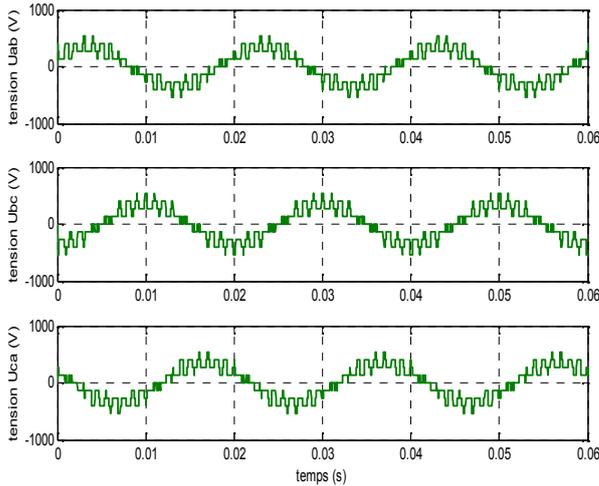


Figure (2-43) : tensions composées  $U_{ab}$ ,  $U_{bc}$  et  $U_{ca}$

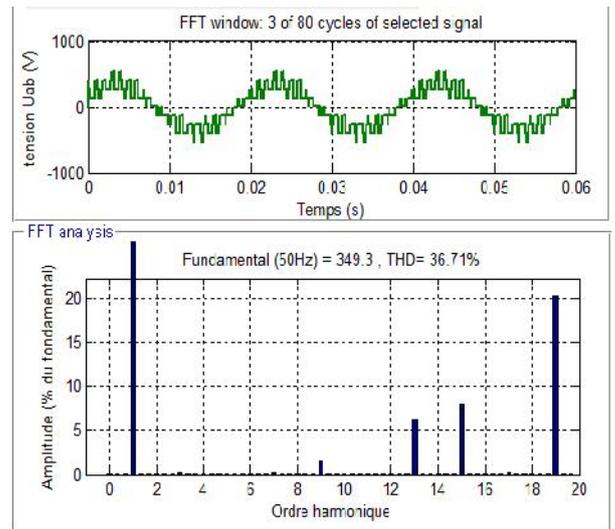


Figure (2-44): Spectre harmonique de la tension  $U_{ab}$

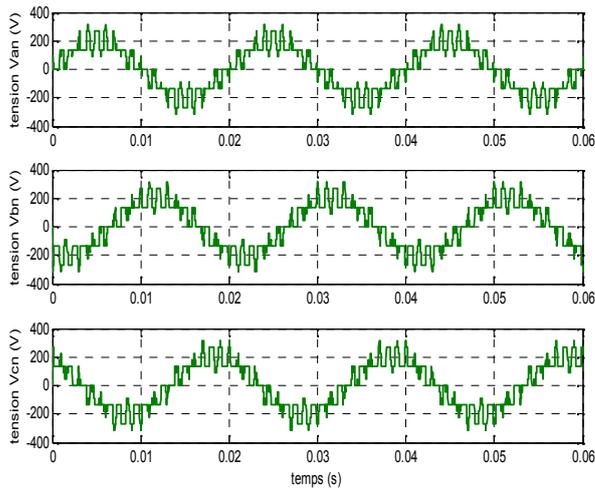


Figure (2-45) : tensions de phases Van, Vbn et Vcn

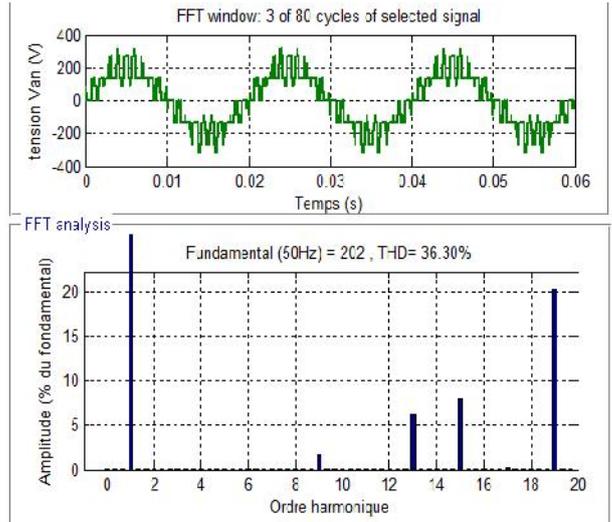


Figure (2-46): Spectre harmonique de la tension Van

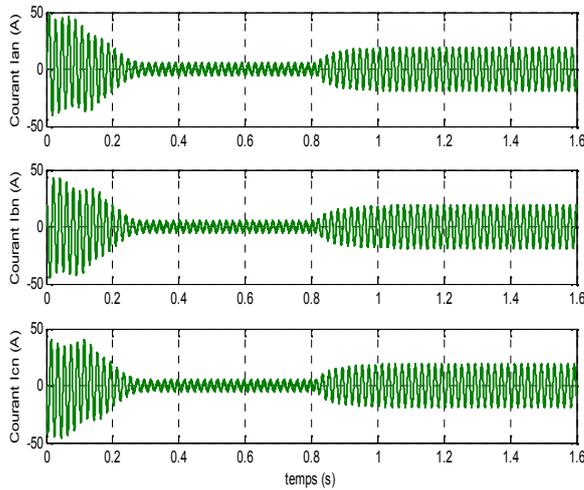


Figure (2-47) : Courants de phases Ian, Ibn et Icn

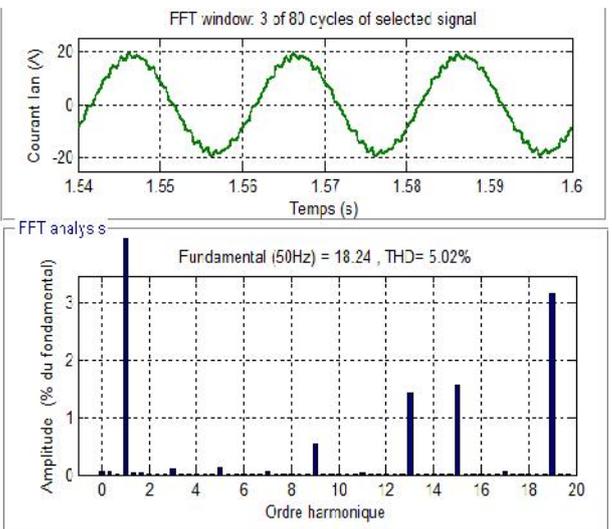


Figure (2-48): Spectre harmonique du courant Ian

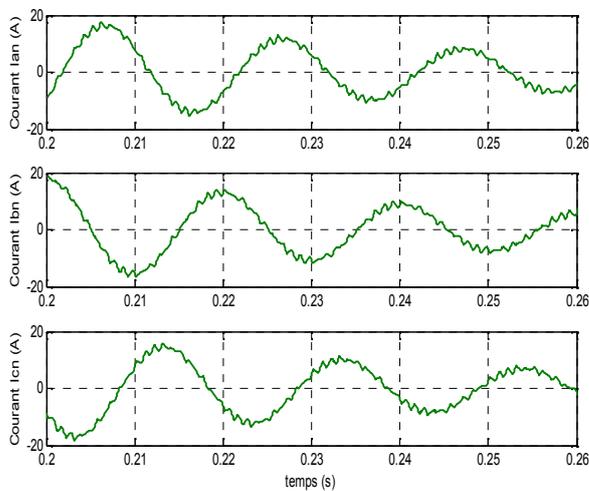


Figure (2-47)-a: Courant Ian, Ibn et Icn à vide

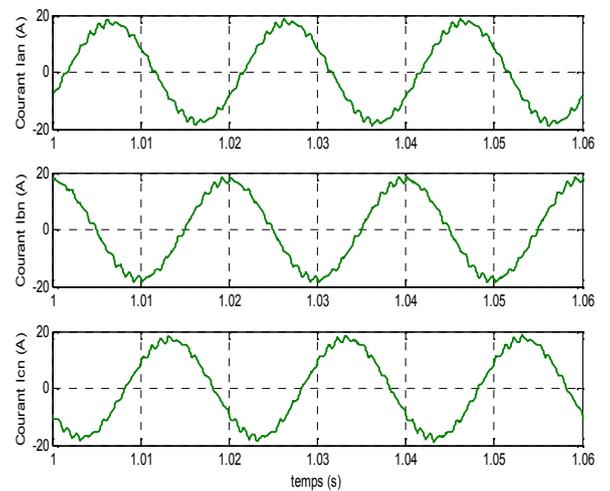


Figure (2-47)-b: Courant Ian, Ibn et Icn en charge

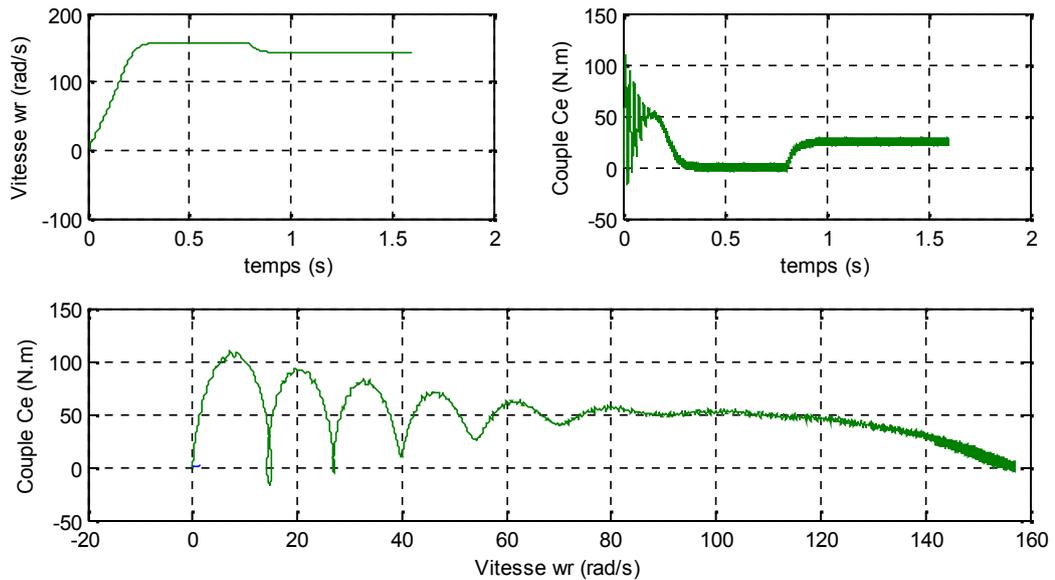


Figure (2-49): Caractéristiques de la MAS

### Interprétation des résultats :

De ce qui est précédemment discuté, on utilise quatre porteuses identiques, les résultats obtenus, nous ont décrit la netteté de la forme d'onde du courant qui est très proche à la sinusoïdale avec des éraflures légères.

Quant aux caractéristiques de la machine, On remarque que le couple oscille toujours autour de sa référence (nulle), et pour la vitesse se stabilise à la valeur de 157 rad/s, puis elle va se diminuer à l'instant de l'application du couple de charge  $C_r=25\text{N.m}$ .

### 2-3-3. Généralisation de la structure NPC à N niveaux de tension :

#### 2-3-3-1. Structure:

D'après l'étude faite sur les onduleurs de tension de type NPC à trois et à cinq niveaux, on peut étendre notre étude à des convertisseurs à N niveaux de tensions de type NPC. Les condensateurs  $C_1$  à  $C_N$  permettent de diviser la tension d'entrée, les interrupteurs  $K_1$  à  $K_N$  font circuler les courants entrant avec les diodes  $D_1$  à  $D_N$ . L'ensemble forme ainsi une cellule de commutation.

Pour un onduleur à N niveaux, le nombre des éléments constituant sa topologie, notamment les condensateurs C, les interrupteurs K (par phases) et les diodes de bouclage ou de maintien D (par phase) sont régis par les relations suivantes:  $C = N - 1$ ,  $K = 2(N - 1)$ ,  $D = 2(N - 2)$ , [14].

**2-3-3-2.Principe de fonctionnement:**

Pour un convertisseur NPC à N niveaux de tension, nous avons N-1 interrupteurs commandés complémentaires par phases. Et nous avons N séquences de fonctionnement possible permettant de générer les N niveaux de tensions comme le montre le tableau (2-3):

$K_1$	$K_2$	....	$K_{(N+1)/2}$	...	$K_{N-1}$	$K_N$	..	$K_{3(N-1)/2}$	...	$K_{2N-3}$	$K_{2(N-1)}$	$V_{ao}$
1	1	...		...	1	0					0	$+\frac{E}{2}$
0	1	...	1		1	1	0				0	$\frac{N-3}{2(N-1)}E$
	0											.....
												$\frac{N-1}{2}E$
		0	1	...	1	...1		1	0		0	0
			0	1	....			1	1	0	0	$-\frac{N-1}{2}E$
												.....
0	...	0			1	1	...	1		1	0	$-\frac{N-3}{2(N-1)}E$
0	...	....			0	1	....	1		....	1	$-\frac{E}{2}$

Tableau (2-3): Etat possibles de l'onduleur NPC à cinq niveaux

La m<sup>eme</sup> séquence de fonctionnement correspondra à l'état où, les interrupteurs  $K_m$  jusqu'à  $K_{N+m-2}$  sont fermés et les autre interrupteurs ouverts, [14].

**2-4. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons étudié la structure topologique d'un onduleur multi niveaux triphasé de type NPC clampé par les diodes, à trois et à cinq niveaux, leurs structure et principe de fonctionnement, La structure NPC à trois niveaux est plus avantageuse que l'onduleur à deux niveaux, il est très utilisée, à cause de sa simplicité à mettre en œuvre et accessible pour les applications envisagées avec les gammes de tension actuelle des semi-conducteurs. Outre j'ai remarqué que **plus** le nombre de niveaux augmente, la tension de sortie en forme d'escalier possède de paliers, ceci permet de mieux approcher la sinusoïde, et les interrupteurs commandés bloque une tension plus faible, donc la tension de sortie est meilleure du point de vue taux de distorsion harmonique. Néanmoins, il est souhaitable d'augmenter le gain de l'onduleur, en passant par la modulation.

Nous avons abordé dans ce chapitre la conduite d'une MAS alimentée par un onduleur à trois et à cinq niveaux, en utilisant deux types de stratégie de commande, la commande en pleine onde et la commande par la modulation de largeur d'impulsion des onduleurs triphasés

multi-niveaux. Ces stratégies sont d'une manière générale des extensions de celles des onduleurs à deux niveaux.

Nous avons aussi présenté les résultats de simulation de ces onduleurs multi-niveaux associés à une machine asynchrone (MAS). L'onduleur à deux niveaux conventionnel à la limitation de la tension continue disponible à son entrée, par contre l'onduleur à trois et à cinq niveaux peut produire une tension à cinq et à sept niveaux entre phases.

Pour la commande en pleine onde j'ai pris  $\alpha = 15^\circ$ , [26] pour avoir un taux de distorsion harmonique minimal. Pour cela on peut dire que l'angle nous offre un degré de liberté pour le choix des performances de l'onduleur de tension à trois niveaux.

L'avantage qui découle de la structure de l'onduleur à cinq niveaux consiste à une meilleure maîtrise de contraintes en tension sur les composants, l'amplitude de la tension aux bornes est limitée à la demi-tension de la source majorée de la surtension due à la commutation des interrupteurs. Cette topologie est en mesure de générer une tension simple à cinq niveaux (entre le bras d'onduleur et le point milieu).

Les résultats obtenus montrent bien la contribution des onduleurs multi-niveaux pour l'amélioration des performances de la machine asynchrone avec un choix adéquat des angles de commande des interrupteurs pour avoir les performances désirés. Aussi, les résultats Les spectres contiennent très peu d'harmoniques et Il est facile par un simple filtre passe-bas, d'éliminer ces harmoniques, également, plus le nombre de niveaux augmente, plus les harmoniques sont de plus en plus faibles.

Néanmoins, Un certain nombre de questions se posent toujours: les onduleurs multi-niveaux symétrique, continueraient-ils à maintenir leur performance notamment en ce qui concerne la réduction des harmoniques quelque soit leurs niveaux?

Aurait-il une limite à partir de laquelle ils ne seront plus efficaces? Si oui pourquoi ?

Pour répondre à ces questions nous avons basé sur une littérature [15] où on a trouvé les résultats ci-après, pour les onduleurs à sept, à neuf et à 11 niveaux, pour voir jusqu'à où irons nous dans l'augmentation de niveaux pour la réduction des harmoniques. Les résultats sont comme suit :

Pour  $n = 3$ , THD=6.93%, (notre simulation)

Pour  $n = 5$ , THD = 5.02% (notre simulation)

Pour  $n = 7$ , THD = 2.87% (d'après la littérature)

Pour  $n = 9$ , THD = 0.85% (d'après la littérature)

Pour  $n = 11$ , THD = 11.13% (d'après la littérature)

On remarque que pour le cas des onduleurs à 11 niveaux, le taux de distorsion harmonique passe de 0.85% (onduleur à 9 niveaux) à 11.13%. Ce qui est assez considérable. Cela est dû au nombre élevé d'interrupteurs sur un onduleur à 11 niveaux. Car pour réaliser ce type d'onduleur, le nombre d'interrupteurs nécessaires (d'après le tableau vu plus haut:  $K=3(N-1)$  par branche), est de 90 interrupteurs. Les pertes joules deviennent importantes et par conséquent le THD devient également plus élevé. Pour la réduction du THD. On remarque une baisse du THD du niveau 3 jusqu'à 9, à partir du niveau 11, on assiste à un changement brusque du: THD, qui nous permettra de conclure qu'à partir d'un certain niveau (11), les onduleurs multi-niveaux symétriques ne sont plus efficaces, Ce qui impose l'idée des onduleurs multi-niveaux asymétriques, qui fera l'objet du prochain chapitre.

# Chapitre 03

Etude d'un onduleur  
multi-niveaux  
asymétriques

### 3-1. Introduction

Additif à de ce qui est explicité plus haut, l'onduleur classique a montré plusieurs limitations, notamment des brusques changements de la tension, surtout lorsque le convertisseur commute à une fréquence élevée, [27]-[28], ce qui entraîne des harmoniques prohibitifs pour le système, occasionnant des pertes dans la charge et le convertisseur.

C'est pour palier à ces inconvénients que certains chercheurs ont introduit des convertisseurs ayant plus de deux niveaux de tension, et qui génèrent un peu moins d'harmoniques, [29], objet du deuxième chapitre, où on a montré que plus le nombre de niveaux de la tension générée par le convertisseur est grand, plus faible sera son taux de distorsion harmonique, avec limite à certains niveaux de tension de sortie (2- 4 ), en parallèle, dans toutes les topologies de convertisseurs multi-niveaux existant, plus ce nombre de niveaux est élevé, plus compliquée dévient la structure du convertisseur, son coût et la complexité de sa commande s'en trouvent augmentés, et sa fiabilité s'en trouve réduite.

Ce chapitre sera consacré à l'étude d'un onduleur hybride dans le but d'obtenir une topologie simplement commandable à un cout non exorbitant et un bon rendement.

### 3-2. Terminologie des convertisseurs multi-niveaux : [30-31-32]

#### 3-2-1. La dissymétrie partielle :

Le concept de la dissymétrie partielle caractérise le rapport entre les tensions qui alimentent deux onduleurs partiel de rang consécutifs [16], notons  $\delta_h$  le coefficient de dissymétrie partielle entre les convertisseurs de rang  $j=h-1$  et  $j=h$ , tels que :

$$\delta_h = U_{dh} / U_{d(h-1)}, \quad \forall h=2 \dots k \quad (3-1)$$

#### 3-2-2. La dissymétrie totale :

Le concept de la dissymétrie totale caractérise le rapport entre la tension contenue  $U_{dj}$  aux bornes d'un onduleur partiel de rang  $j$  ( $j=1 \dots k$ ) sur une phase et la tension totale  $U_e$ , notons  $\delta_j$  le coefficient de dissymétrie totale, tels que ;

$$\delta_j = U_e / U_{dj}, \quad \forall j=1 \dots k, \quad \text{avec } U_e = 2 * \sum_{j=1}^k U_{dj} \quad (3-2)$$

#### 3-2-3. Convertisseurs multi-niveaux symétrique :

Un convertisseur est symétrique, s'y considère des coefficients identiques, tel que :

$$\delta_1 = \delta_2 = \dots = \delta_k = \delta_{n-1} \quad \text{avec } n=(2k+1) \quad (3-3)$$

n: Nombre de niveaux de tension générée par le convertisseur.

$$u_2 = u_3 = \dots = u_k = 1 \quad (3-4)$$

Ces deux équations (2-3) et (2-4) caractérisent un convertisseur multi-niveaux symétriques.

### 3-2-4. Convertisseurs multi-niveaux asymétrique:

Dès lors que l'un au moins des coefficients  $u_j$  est différent des autres, alors le convertisseur est considéré comme étant asymétrique. Dans ce cas, un au moins des coefficients  $u_h$  est différent de 1, ainsi la topologie hybride proposée par M.D.Manjrekar et T.A Lipo, correspond à un convertisseur multi-niveaux asymétrique,[31].

Ce type de structure est aussi appelé à juste titre « onduleur hybride ». Dans cette topologie dérivée de la précédente, le principe de mise en série de cellules de conversion est généralisé. Par degré d'hybridation croissant, on distingue trois types d'associations :

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

(Par exemple pont en H et amplificateur linéaire.

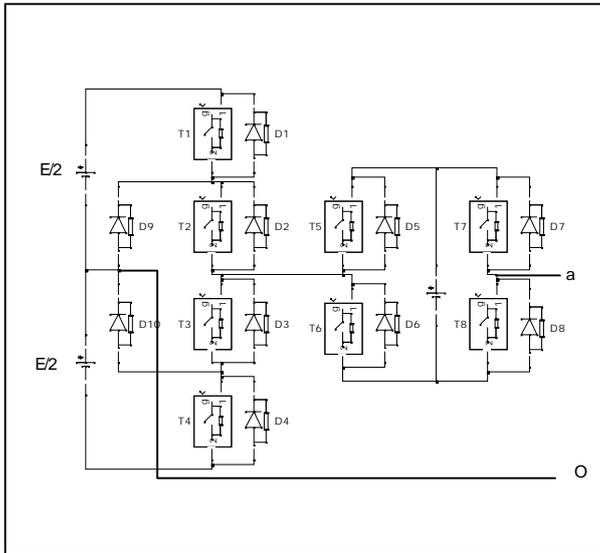
Comme pour la mise en série de ponts en H, la seule contrainte porte sur les alimentations des cellules qui doivent être isolées les unes des autres.

### 3-3.Topologies hybrides :

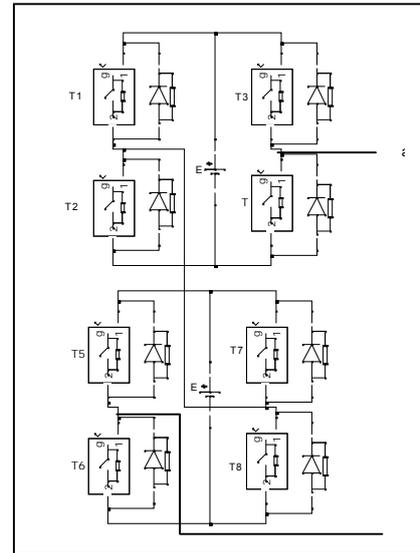
Les trois topologies résumées ci-dessus constituent les structures de base des convertisseurs multi-niveaux. A partir d'elles, des combinaisons sont possibles, afin d'obtenir des topologies hybrides.

Un exemple de structure hybride est montré à la figure (3-1). Deux onduleurs monophasés sont mis en série sur la même phase, l'un est un pont en H et l'autre est un onduleur de type NPC monophasé [8]. Seule la cellule NPC est alimentée, ce qui réduit considérablement le volume de l'alimentation du système global. Il est également possible de connecter en série deux structures à cellules imbriquées, comme le montre la figure (3-2), [33]-[34].

Les topologies hybrides, lorsqu'elles sont utilisées permettent au convertisseur, de générer un nombre de niveaux plus élevés que celles dites homogènes. Ainsi, vue de la charge, le convertisseur génère une tension avec moins d'harmoniques pour un même nombre de semi-conducteurs. Mais elles exigent des stratégies de commande un peu plus complexes et peuvent poser des problèmes aux niveaux des échanges énergétiques entre convertisseurs.



La figure (3-1) : la mise en série d'un onduleur de topologie différente



La figure (3-2) : la mise en série de deux ponts en H alimentés par des tensions différentes

### 3-4.Stratégies de modulation :

Dans cette section, nous rappelons brièvement le principe de deux stratégies de modulations : la modulation par gradins ou par paliers, et la modulation hybride, qui combine la précédente et celle basée sur la modulation à largeur d'impulsions. Le but est d'analyser pour chacune d'entre-elles, les commutations sur chaque cellule partielle du convertisseur. Cette analyse aboutit à l'expression analytique des tensions à la sortie de chaque cellule partielle. Ce qui permettra une analyse précise de l'échange énergétique entrecellules. Ces expressions seront également exploitées pour la détermination du courant dans les bus continus, ainsi qu'une modélisation de l'effet de la tension du mode commun sur le transformateur triphasé multi-enroulement.

#### 3-4-1. Modulation par gradin

Cette méthode de modulation consiste simplement à générer à la sortie du convertisseur multi-niveau, une tension par palier non modulée. Cette tension correspond à la valeur quantifiée de la référence sinusoïdale (image désirée du fondamental).

Si le convertisseur est à pas uniforme, alors on a  $E_1 = E_2 = \dots = E_K = U_{d1}$ .

### 3-4-2. Modulation hybride :

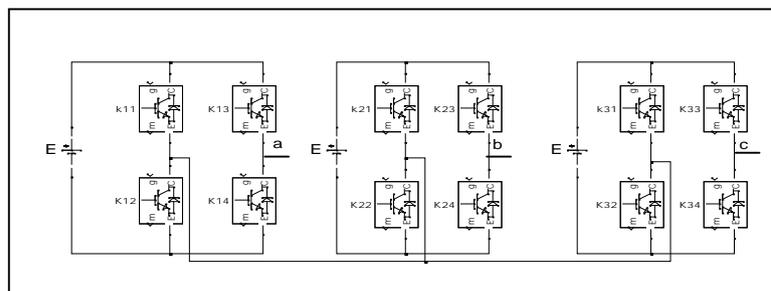
La modulation hybride, proposée dans [35] combine la modulation par gradins et la modulation sinusoïdale par largeur d'impulsions. La cellule ayant la plus grande tension  $u_k$  interviendra si le signal de référence est supérieur à la somme des autres tensions continues. Tant que cette condition n'est pas vérifiée, la tension  $u_{pK}$  restera nulle. Et l'onduleur suivant n'interviendra à son tour que si le signal de référence est supérieur à la somme des autres tensions continues, et ainsi de suite. La dernière référence quant à elle est comparée à un triangle.

Cette façon de procéder revient simplement à utiliser des comparateurs avec un seuil de commutation en amplitude fixé en fonction de l'amplitude souhaitée pour chaque cellule partielle. Le générateur de connexion convertit le signal désiré à la sortie du convertisseur en impulsions de commande des interrupteurs de puissance.

Les tensions d'alimentation sont normalisées par rapport à l'amplitude maximale de la tension d'une phase du convertisseur

### 3-5. Dimensionnement d'un onduleur à trois niveaux en Cascade:

La figure (3-1) montre le schéma de base d'un convertisseur à trois niveaux en cascade formé par l'association en série, [8].



Figure(3-3) : Onduleur cascade en pont en H à trois niveaux

### 3-5-1. Structure :

La structure d'un convertisseur multi niveaux basée sur la mise en série d'onduleurs monophasés (ou pont en H, ou cellule partielle) est montrée sur la figure (3-1).

Les cellules y sont connectées en étoile, cependant il est également possible de les connecter en triangle,[10]. Chaque cellule de l'onduleur est alimentée par une source continue

E et elle est composée de quatre interrupteurs qui sont unidirectionnels en tension et bidirectionnels en courant : il s'agit d'associations classiques d'un transistor et d'une diode en antiparallèle. Les sources doivent être galvaniquement isolées les unes des autres, afin d'éviter un court-circuit lors de leur mise en série [10].

### 3-5-2. Principe de fonctionnement :

Pour bien détaillé le fonctionnement de cet onduleur, nous allons limiter notre étude à sa structure monophasée.

La structure d'un bras d'onduleur trois niveaux de type cascade en pont H est identique à celui d'un onduleur classique monophasé en pont complet. Cependant la technique de commande est différente ce qui permettra d'avoir les trois niveaux de tension.

Nous allons suivre les mêmes étapes que le type d'onduleur précédemment étudié, donc nous avons trois séquences de fonctionnement possibles:

- Séquence 1 : Génération du niveau maximum

Dans ce cas, les interrupteurs  $K_1$ ,  $K_4$  sont passants et  $K_2$ ,  $K_3$  sont bloqués, la tension de sortie  $V_{ao} = +E$ .

La tension inverse appliquée aux interrupteurs  $K_2$ ,  $K_3$  vaut:  $V_{K2} = V_{K3} = +E$

- Séquences 2 : Génération du niveau intermédiaire

Dans ce cas, les interrupteurs  $K_2$ ,  $K_4$  sont passants et  $K_1$ ,  $K_3$  sont bloqués, la tension de sortie  $V_{ao} = 0$ .

La tension inverse appliquée aux interrupteurs  $K_1$ ,  $K_3$  vaut:  $V_{K1} = V_{K3} = +E$ .

- Séquences 3 : Génération du niveau minimum

Dans ce cas, les interrupteurs  $K_1$ ,  $K_4$  sont bloqués et  $K_2$ ,  $K_3$  sont passants, et la tension de sortie  $V_{ao} = -E$ .

La tension inverse appliquée aux interrupteurs  $K_1$ ,  $K_4$  vaut:  $V_{K1} = V_{K4} = +E$ .

Les 3 états ou séquences de commutation possibles sont résumés au tableau (3-1)

$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$V_{oa}$
1	0	0	1	+ E
0	1	0	1	0
0	1	1	0	- E

Tableau (3-1) : États possibles de l'onduleur Cascade en H à 3 niveaux

**Commentaire:** On remarque que le temps de conduction de chaque interrupteur est identique à celui des interrupteurs du bras d'onduleur trois niveaux de type NPC. Donc les interrupteurs de l'onduleur en pont en H sont moins sollicités que ceux d'un onduleur deux niveaux. Un autre point important à chaque changement de niveau de tension, nous avons un seul interrupteur(IGBT) qui change d'état. Ce qui réduit considérablement les pertes par commutations

### 3-6. Conduite de la MAS alimentée par un onduleur hybride :

Le schéma bloc de la machine asynchrone est présenté par la figure (3-4)

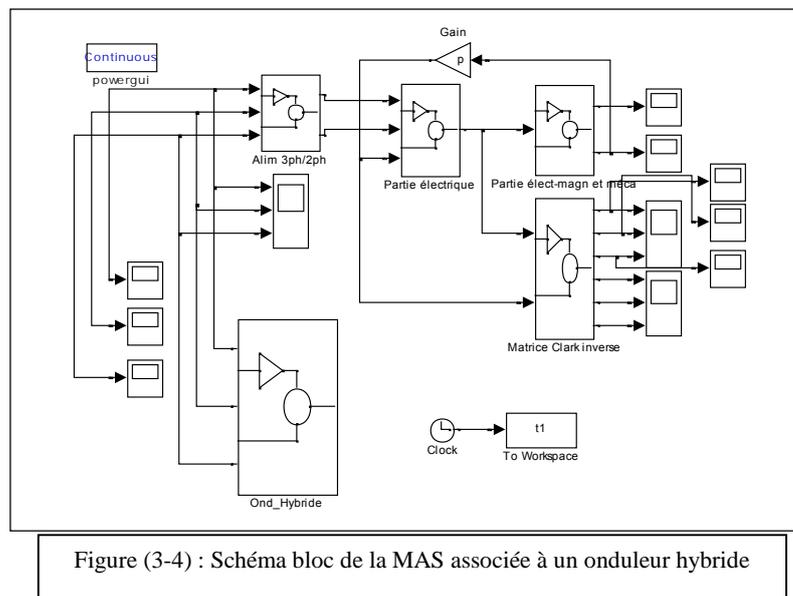


Figure (3-4) : Schéma bloc de la MAS associée à un onduleur hybride

Dans cette partie, on a utilisé une commande hybride, la MLI intersective pour commander la première cellule et la commande par gradin ou par palier pour la deuxième, en appliquant un couple de charge  $C_r=25N.m$

#### 3-6-1. Résultats de simulation :

La figure (3-5) illustre les tensions de sorties, à s'avoir, de l'onduleur NPC à trois niveaux, de l'onduleur en cascade et de l'onduleur hybride, et ce dans le but de vérifier l'augmentation du nombre de niveaux. La figure (3-7) présente les tensions composées  $U_{ab}, U_{bc}$  et  $U_{ca}$  qui sont semblable à une forme d'escalier. Les tensions simples aux bornes de la machine  $V_{an}, V_{bn}$  et  $V_{cn}$  sont présentées sur la figure (3-9). La figure (3-11) illustre le courant statorique, ayant une forme proche à la sinusoïdale

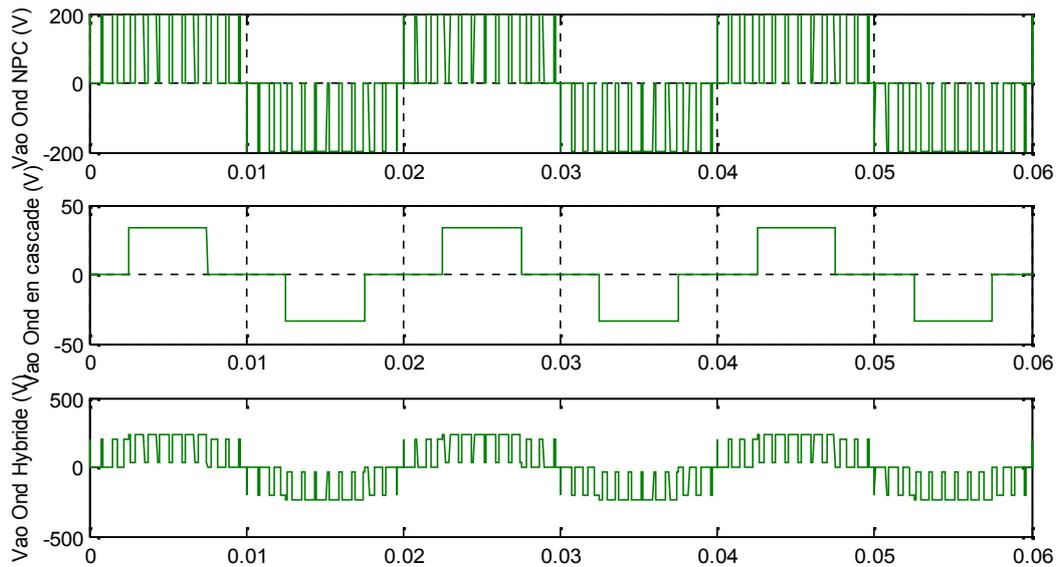


Figure (3-5) : les tensions de sortie

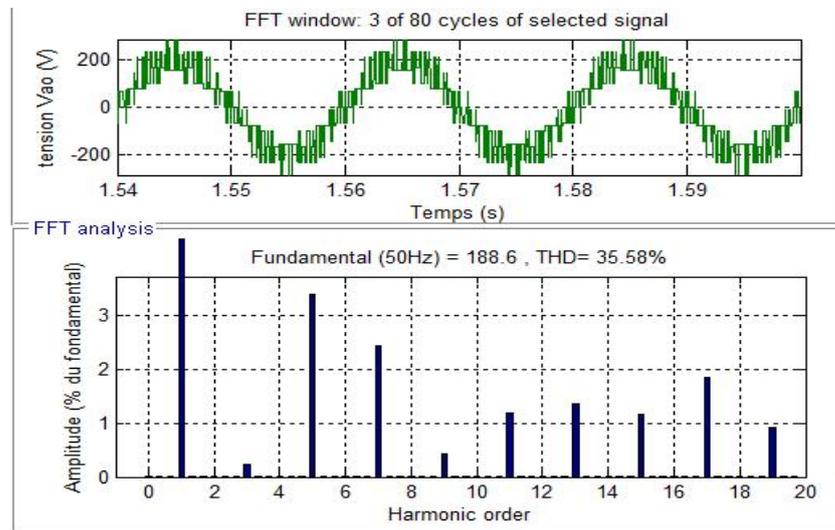


Figure (3-6): Spectre harmonique de la tension Vao

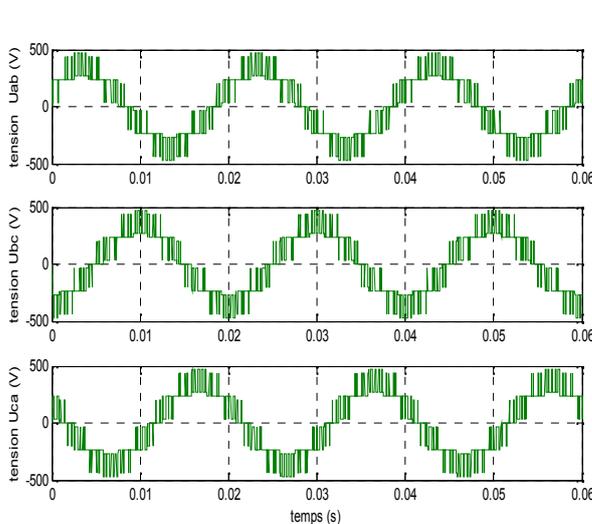


Figure (3-7) : tensions composées Uab, Ubc et Uca

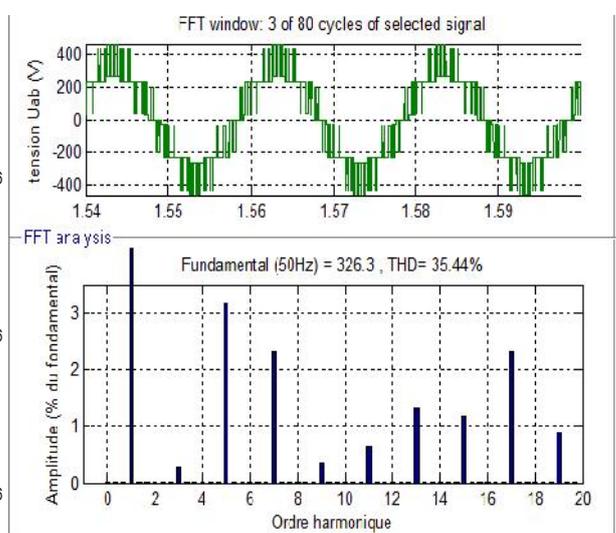


Figure (3-8): Spectre harmonique de la tension Uab

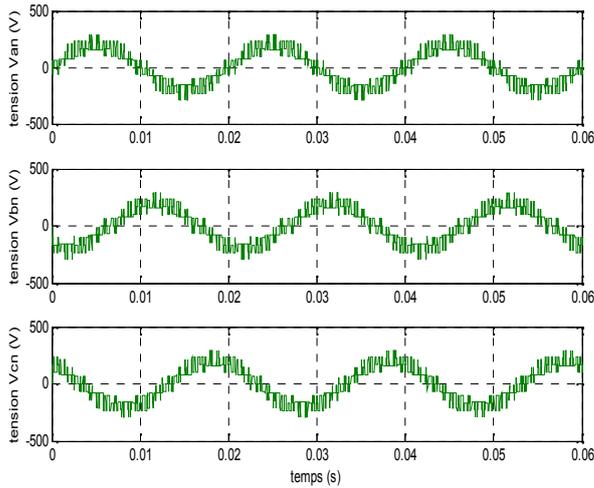


Figure (3-9) : tensions de phase Van, Vbn et Vcn

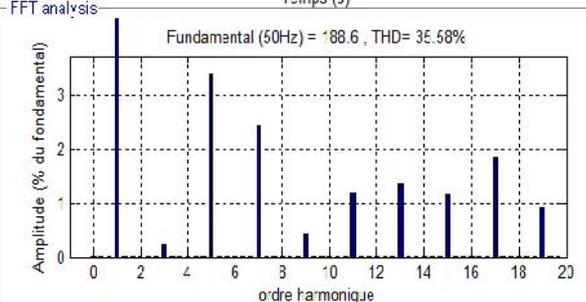
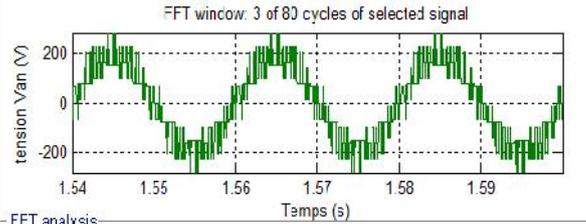


Figure (3-10): Spectre harmonique de la tension Van

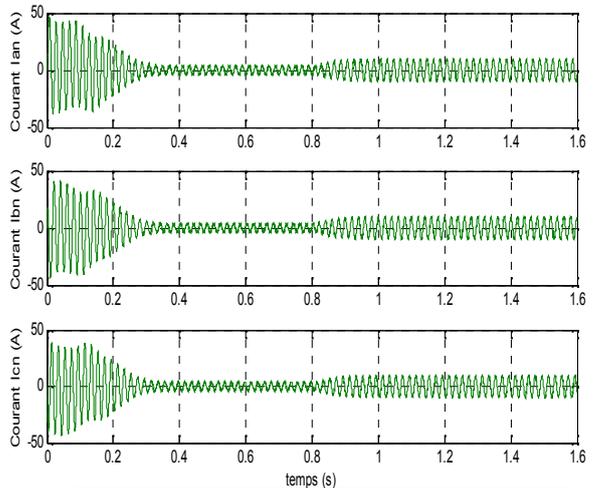


Figure (3-11): Courant de phase Ian, Ibn et Icn

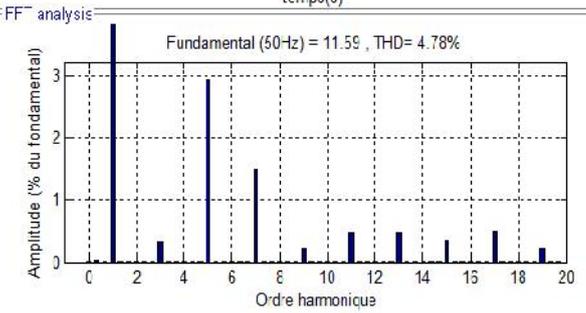
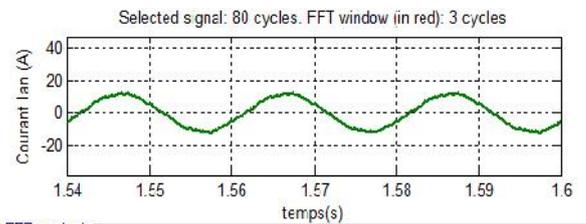


Figure (3-12): Spectre harmonique du courant Ian

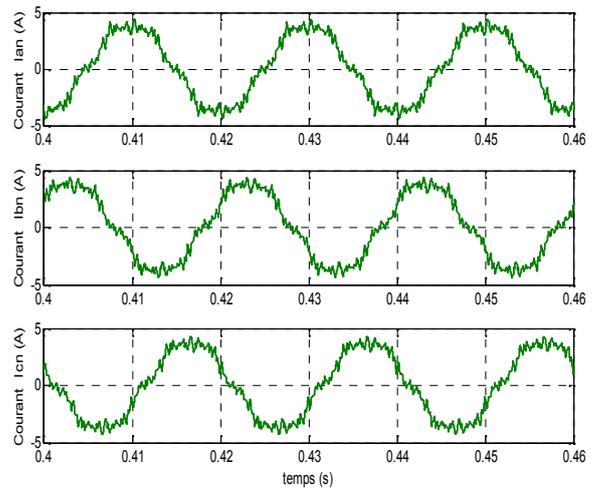


Figure (3-11)-a: Courant de phase Ian, Ibn et Icn à vide

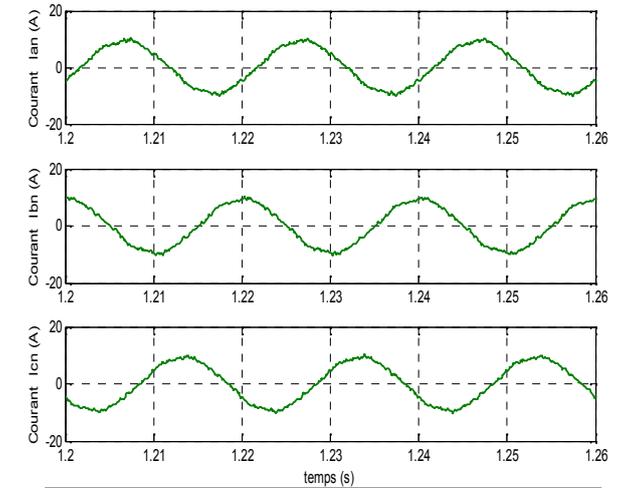


Figure (3-11)-b: Courant de phase Ian, Ibn et Icn en charge

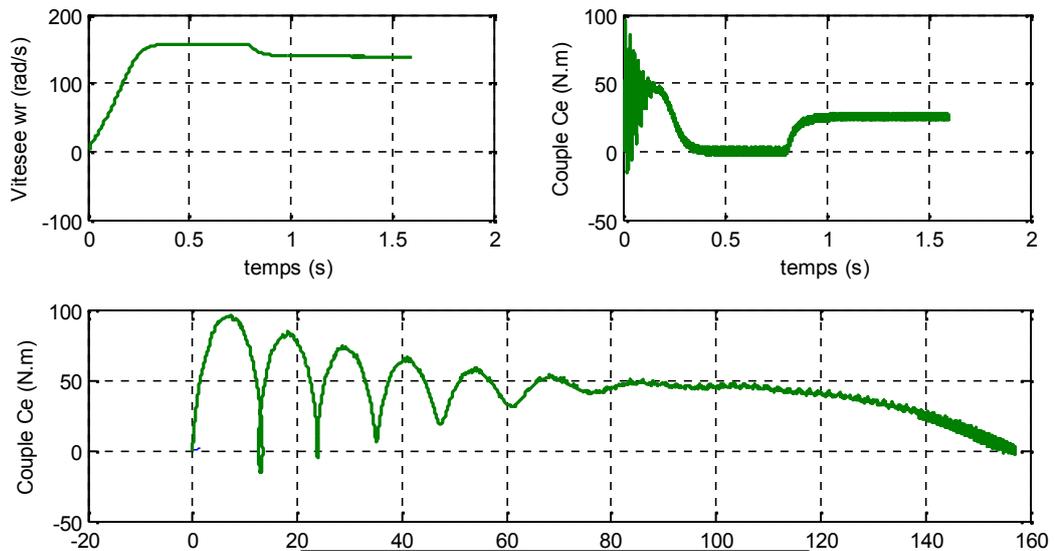


Figure (2-13): Caractéristiques de la MAS

### 3-6-2. Interprétation des résultats :

La forme d'onde des tensions simples et composées est en escalier, ainsi que la forme du courant  $I_{an}$ , ce qui est traduit par les résultats obtenus du  $THD=4.78\%$ , outre, on remarque que le couple oscille autour de sa référence (nulle) avec une diminution du couple choc par rapport aux cas précédent, pour la vitesse se stabilise à 157 rad/s, puis se baisse lors de l'application du couple résistant à  $t=0.8s$ .

### 3-7 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié en premier lieu la structure topologique d'un onduleur en cascade, leur structure et principe de fonctionnement, pour l'exploiter dans le nouveau onduleur dit hybride. Ici on a répondu au question posée à l'issu du deuxième chapitre, en effet, les résultats de simulation de cette nouvelle topologie montre qu'elle est meilleur a tous niveaux, des bonnes formes d'onde à la sortie et un THD minimal avec in cout réduit.

## **Conclusion générale**

L'exploitation des onduleurs dans l'industrie est devenue un champ très vaste, car les équipements industriels utilisent de plus en plus d'entraînement à vitesse variable. Les onduleurs de tension sont largement utilisés pour la commande des moteurs asynchrones.

J'ai commencé par un état de l'art des onduleurs multi-niveaux, où j'ai présenté les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux avec une comparaison de point de vue structurel, on a conclu que l'onduleur NPC à trois niveaux est plus avantageux que l'onduleur à deux niveaux, il est très utilisé, à cause de sa simplicité à mettre en œuvre et accessible pour les applications envisagées avec les gammes de tension actuelle des semi-conducteurs, les onduleurs NPC sont intéressants pour les applications triphasées nécessitant peu de niveaux. Les deux structures d'onduleurs NPC et à cellule imbriquée sont avantageuses pour les applications avec échange de puissance active, puis le dimensionnement d'un onduleur clampé par diodes à trois et à cinq niveaux était l'objet du deuxième chapitre, aussi une conduite de la machine où les résultats de simulation nous confirment que plus le nombre de niveaux augmente, la tension de sortie en forme d'escalier possède de paliers, ceci permet de mieux approcher la sinusoïde, et les interrupteurs commandés bloquent une tension plus faible, donc la tension de sortie est meilleure du point de vue du taux de distorsion harmonique. Toutefois, il est préférable d'améliorer le gain de l'onduleur, en passant par la modulation. Quant à la MAS, plus le nombre de niveaux augmente l'onduleur à trois et à cinq niveaux peut produire une tension à cinq et à sept niveaux entre phases.

Les résultats obtenus montrent que les onduleurs multi-niveaux réalisent des améliorations sur les performances de la machine asynchrone avec un choix adéquat des angles de commande des interrupteurs pour avoir les performances désirées. Aussi, les résultats de simulation du contenu harmonique est très faible et il est facile de les éliminer, également, plus le nombre de niveaux augmente, plus les harmoniques sont de plus en plus faibles.

D'une autre part l'augmentation du nombre de niveaux entraîne une augmentation des composants. et par conséquent les pertes augmentent, chose qui nous pousse à réfléchir aux autres topologies, simple, coût réduit et amélioration des performances, c'est l'onduleur hybride, l'objet du troisième chapitre, où on a constaté qu'avec une simple hybridation (un NPC et un Pont en H) on obtient des tensions de sortie en forme d'escalier possède de paliers mieux approcher la sinusoïde, et un THD du courant de phase vaut 4.78%, qui indique la

bonne netteté du courant avec une forme très proche de la sinusoïdale dans l'industrie est devenue presque inévitable.

Outre, les résultats obtenus nous conduit à prouver qu'à partir du 11<sup>ème</sup> niveaux le taux de distorsion harmonique passe aux valeurs assez considérable, Cela est dû au nombre élevé d'interrupteurs sur un onduleur à 11 niveaux. et Ici l'Exploitation des onduleurs hybride.

En fin, on a utilisé l'onduleur hybride, et on a constater qu'il est parmi les solution pour minimiser le THD, néanmoins restera un immense champ de recherche.

Nous proposons, sauf meilleur avis différent, comme perspectives :

- Faire une étude approfondie des alimentations des différentes cellules de l'onduleur multi-niveaux.
- Commander l'onduleur par SVM(MLI vectorielle).

## Annexe A:

### Paramètres de la MAS utilisées

Symbole	Description	Valeurs	Unités
<b>Rs</b>	Résistance statorique	1.2	
<b>Rr</b>	Résistance rotorique	1.8	
<b>Ls</b>	Inductance statorique	0.1554	H
<b>Lr</b>	Inductance rotorique	0.1568	H
<b>M</b>	Inductance Mutuelle	0.15	H
<b>J</b>	Inertie du moteur	0.07	Kg.m2
<b>f</b>	Coefficient de frottement	0.001	N.m/rad/s
<b>wn</b>	Vitesse nominale	157	rad/s
<b>P</b>	Nombre de paires de pôles	2	
<b>Pn</b>	Puissance nominale	4	Kw
<b>Ce</b>	Couple électromagnétique	25	N.m

#### 1-Les équations électriques :

Tous les enroulements du stator et du rotor obéissent aux équations matricielles suivantes :

$$\begin{aligned} &\text{➤ Pour le stator :} \\ &[V_s] = [R_s] * [I_s] + \frac{d}{dt} [\Phi_s] \\ &\text{➤ Pour le rotor:} \\ &[V_r] = [R_r] * [I_r] + \frac{d}{dt} [\Phi_r] \end{aligned} \Rightarrow$$

Pour le stator :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{as} \\ \psi_{bs} \\ \psi_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix}$$

Pour le rotor

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{ar} \\ \psi_{br} \\ \psi_{cr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix}$$

#### 2-Les équations magnétiques :

$$\psi_s = L_s * I_s + M * I_r$$

$$\psi_s = L_s * I_s + M * I_r$$

$$\psi_r = L_r * I_r + M * I_s$$

$$\psi_r = L_r * I_r + M * I_s$$

#### 3-Le couple électromagnétique :

$$C_e = \frac{3}{2} M_p [I_r \alpha \ I_s \beta - I_s \alpha \ I_r \beta]$$

#### 3-L'équation mécanique :

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

## BIBLIOGRAPHIE

- [1]. **JOSEPH SONG MANGUELLE**, "Convertisseurs Multi-niveaux Asymétriques Alimentés Par Transformateurs Multi-Secondaires Basse-Fréquence: Réactions Au Réseau D'alimentation", thèse de doctorat de Lausanne, 2004.
- [2]. **E.M.BERKOUK**, « Contribution à la Conduite des Machines Monophasées et Triphasées Alimentées par des Convertisseurs Directs et Indirects, Applications aux Gradateurs et Onduleurs Multi-niveaux », Thèse de Doctorat, 1995.
- [3] **A. Nabae and H. Akagi**. « A new neutral-point-clamped PWM inverter. *IEEE Transactions on Industry Applications* » 17(5) :518–523, September 1981.
- [4]. **S. MARIETHOZ**, "Mesure et amélioration des performances des modulateurs multi-niveaux", Conférence JCGE'03, Juin 2003.
- [5]. **A. BENABOUD**, « Convertisseur de fréquence indirect à rapport de tension fixe Interface entre turbo-alternateurs à haut vitesse et réseau électrique », Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2007
- [6]. **T. ZHUOHUI; L. YONGDONG AND L. MIN**, « A Direct Torque Control of Induction Motor Based on Three-Level NP Converter », Power Electronics Specialists Conference, 2001.
- [7]. **XAVIER DEL TORO GARCIA, ANTONI ARIAS, MARCEL G. JAYNE, PHIL A. WITTING, VICENÇ M. SALA AND JOSE LUIS ROMERAL** « New DTC Control Scheme for Induction Motors fed with a Three-level Inverter », 2005.
- [8]. **L. KYO-BEUM; S. JOONG-HO; C. ICK AND Y. JI-YOON** « Torque Ripple Reduction in DTC of Induction Motor Driven by Three-Level Inverter with Low Switching Frequency », 1996
- [9]. **K. JEREMY MCKENZIE**, « Eliminating harmonics in a cascaded H-bridges multilevel inverter using resultant theory, symmetric polynomials, and power sums », Thèse de Master, Université Tennessee, 2004.
- [10]. **H. LIU**, « Design and application of hybrid multilevel inverter for voltage boost », Thèse de Doctorat, Université de Tennessee, 2009.
- [11]. **G. R. WALKER**, « Modulation and control of multilevel converters », Thèse de Doctorat, Université de Queensland, 1999.
- [12]. **P. BARTHOLOMEUS, Ph. LE MOIGNE**. "A simple method for the valuation of the harmonics generated by multilevel converters". ELECTRIMACS'96, Saint Nazaire, 1996.
- [13]. **MOKHTARI BACHIR**, « Implémentation De La DTFC Par Des Techniques De L'intelligence Artificielle Neuronale Et Neuro-Floue : Application A La Machine

Asynchrone Alimentée Par Des Onduleurs De Tension A Deux Et A Trois Niveaux »  
Thèse de Magister En Electrotechnique Batna, 2004..

[14].**MAMADOU BALDÉ** « Etude D'un Compensateur Statique Pour Eoliennes A Vitesse Fixe A Base De Génératrice Asynchrone A Cage » thèse UNIVERSITÉ DU QUÉBEC. 2010

[15] **BOUBACAR HOUSSEINI** « Prototypage Rapide A Base De Fpga D'un Algorithme De Controle Avancé Pour Le Moteur A Induction» thèse UNIVERSITÉ DU QUÉBEC. 2010

[16]. **J. S. MANGUELLE**, Martin VEENSTRA, S.MARIETHOSE ET A. RUFER, «Convertisseurs Multi-niveaux Asymétriques Pour Des Applications de Moyenne et Forte Puissance», Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

[17].**MARTIN VEENSTRA**, « Investigation And Control Of A Hybrid Asymmetric Multi-Level Inverter For Medium-Voltage Applications », thèse de doctorat, institut des science de l'énergie, école polytechnique fédérale de Lausanne 2003.

[18]. **J.-P. CARON, J.-P. HAUTIER**, «Modélisation Et Commande De La Machine Asynchrone», Livre, méthodes et pratiques de l'ingénieur 7 Électrotechnique, Editions TECHNIP.

[19]. **H. FOCH, F. FOREST, T. MEYNARD**, "Onduleurs de tension", Techniques de l'Ingénieur, 1998.

[20].**JOSEPH SONG MANGUELLE**, Convertisseurs multi-niveaux asymétriques alimentés par transformateurs multi-secondaires basse-fréquence: réactions au réseau d'alimentation, Thèse 2004, École Polytechnique Fédérale de LAUSANNE, Suisse.

[21].**FRANCIS LABRIQUE0, GUY SEGUIER**, Robert BAUSIERE, « Les Convertisseurs De L'électronique De Puissance La Conversion Continu-Alternatif», Livre, 2<sup>ème</sup> édition, Lavoisier, Paris, France

[22].**DJAFAR HADIOUCHE** " Contribution à l'Étude de la Machine Asynchrone Double Étoile: Modélisation, Alimentation et Structure ", Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-1 2001.

[23].**YING CHENG, CHANG QIAN, MARIESA L. CROW, STEVE PEKAREK**, « A Compalison of Diode-Clamped and Cascaded Multilevel Converters for a ST A TCOM With Energy Storage» Industrial Electronics, 2006.

[24].**T. CUNNYNGHAM**, «Cascade multilevel inverters for large hybride-Electric vehicle applications with varaint DC sources », Thèse de Master, Université de Tennessee, 2011.

[25].**Y. KHADIDJA**, «Réduction des effets de tension homopolaire dans les associations onduleurs multiniveaux moteur à induction», Mémoire de Magister, Université de Batna, 2005.

[26] **BOUAKAZ OUAHID**, " Contribution A L'analyse Des Onduleurs Multiniveaux Fonctionnement Symétrique Et Asymétrique" , mémoire de magistère en électrotechnique de l'université de Batna, 2005.

[27] **J. M. Erdman, R. J. Kerkman, D. W. Schlegel, G. L. Skibinski** Effect of PWM « inverters on AC motor bearing currents and shaft voltages » IEEE trans. Ind. Appl. 1996

[28] **S. Bell, J. Sung Will** « your motor insulation survive a new adjustable speed drives? » IEEE trans. Ind. Appl. 1997

[29] **A. Nabae, I. Takahashi, H. Akagi** « A new Neutral Clamped PWM Inverte »r IEEE-Ind.Appl. Soc. Conf. Proc. pp.761-766, 1980

[30] **S. MANGUELLE , M VEENSTRA, S. MARIETHOZ ET A.RUFER** « Convertisseurs Multi-niveaux asymétriques pour des Applications de Moyenne et Forte Puissance » lille Francsce 2000.

[31] **J. Song-Manguelle, S. Mariethoz, M. Veenstra, and A. Rufer.** « A generalized design principle of a uniform step asymmetrical multilevel converter for high power conversion ». *EPE'01*, August.

[32] **S. Mariethoz and A. Rufer.** « Dimensionnement et commande des onduleurs multi-niveaux asymétriques. *CIFA 2002*.

[33] **W. A. Hill, C. D. Harbourt** « Performance of medium voltage multilevel inverters », IEEE-IAS'99, Conf., 1999

[34] **J. Rodriguez, J. S. Lai, F. Zheng Peng** « Multilevel inverters : a survey of topologies, control and applications », IEEE,2002.

[35] **M. D. Manjrekar, P. K. Steimer, T. A. Lipo** Hybrid multilevel power conversion system: a competitive solution for high-power applications, IEEE trans. on Ind. Appl. vol.36, No 3, pp.834-841, May-June 2000.

## Résumé

*Ce travail présenté est constitue une contribution à l'amélioration des performances des onduleurs multi-niveaux d'une façon d'obtenir des résultats optimales avec un cout réduit.*

*La principale motivation de ce travail était de montrer d'abord qu'il est possible de réduire le nombre de composants et d'augmenter le nombre de niveaux de tension à la sortie d'un onduleur multi-niveaux, par conséquent un taux de distorsion harmonique minimal dont la topologie est basée sur l'hybridation , soit en structure ou en commande, et ceci, pour un nombre de cellules prédéfini..Notre cas, ou on a pris une topologie hétérogène, en structure (onduleur NPC à trois niveaux et un pont en H) et en stratégies de commande optée (la modulation par gradin et la MLI). Et enfin, de montrer la nécessité des onduleurs hybride.*

هذا العمل عبارة عن مساهمة في تحسين الموجات المتعددة المستويات لفرق الكمون NPC بحيث نتحصل على نتائج جيدة بأقل تكلفة.

إن الهدف الرئيسي من هذا العمل هو إمكانية التقليل من عدد العناصر المكونة للمع رفع عدد مستويات فرق الكمون عند مخرجه وبالتالي التقليل من نسبة الإعوجاج التوافقي، أين تكون البنية الجديدة للموج تعتمد على دمج أكثر من موجتين مختلفتين أو من نفس النوع، من حيث نوع البنية أو نوع تقنية التحكم المعتمدة في النهاية إثبات الحاجة للموجات المختلطة.

## Abstract

*This present work is constitutes a contribution to the improvement of the performance of multi-levels inverters NPC one way obtaining optimal results with minimal cost.*

*The primary motivation of this work was to show first that it is possible to reduce the number of components and to increase the number of levels of a multi-level inverter output voltage, therefore minimum including topology harmonic distortion is based on hybridization, either in structure or in command, and this, for a number of cells predefined... Our case, or a heterogeneous topology structure (NPC inverter at three levels and a H-bridge) was assumed and opted control strategies (grading and the PWM modulation). And finally, show the need hybrid inverters.*