

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة  
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك  
Département d'Électronique



## Mémoire de Projet de Fin d'Études

présenté par

Boudiar Aicha

&

Echiker Randa

pour l'obtention du diplôme Master 2 en Électronique

option Instrumentation

---

Thème

---

# Etude et simulation de la commande des onduleurs Multi- niveaux par MLI sinusoïdale

---

Proposé par : Mme KHMISSE Latifa

Année Universitaire 2019-2020

## Remerciements

---

*Je remercie tout d'abord Dieu qui m'a donné le courage de  
reprendre mes  
études universitaires et d'arriver jusqu'au Master.*

*Je tiens à remercier chaleureusement et respectivement toutes les  
personnes qui sans leur aide et leur bienveillance ce travail  
n'aurait pu être réalisé.*

*Je remercie ma directrice de recherche, Mme. khmissi, pour la  
qualité de son encadrement, ses précieuses orientations, ses, sa  
simplicité et sa patience envers nous dans nos recherches et dans  
nos travaux pratiques.*

*Je remercie, également, les membres de jury d'avoir accepté  
d'examiner et d'évaluer ce modeste travail de recherche. Je  
remercie, également, MR O. Khelifi ainsi que Mr R. Braday r  
pour leurs conseils précieux et fructueux.*

*Nous devons un remerciement à tous les enseignants de l'université  
SAAD DAHLEB pour leurs qualités scientifiques et  
pédagogiques.*

*Je dédie ce mémoire à : Mes parents : Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude. Mon père, qui trouve ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit. Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.*

*Mon frère et mes sœurs qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité.*

*A tout ma famille chacun son nom et spécialement ma grand-mère qui a été toujours présente pour m'encourager*

*A mes meilleures amies qui ont été toujours à mes côtés surtout dans les moments difficiles, spécialement à Mohamed Abdelwahab.*

*A tous ceux qui, par un mot, m'ont donné la force de continuer.*

*Et tous ceux qui j'aime et qui m'aiment. A mes collègues de promotion 2020.*

*ACHA*

*Au nom d'Allah, Je dédie ce travail :*

*A mes chers parents Que nous les souhaites*

*La bonne santé et longue vie, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,*

*Mon très chère frère Ahmed pour leur appui et leur encouragement, et leur soutien moral,*

*A toute ma famille ECHKER pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,*

*Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infailible,*

*À tous nos chers amis, spécialement à Mohamed Abdelwahab, Raina et Yousra qui ont été toujours à mes côtés surtout dans les moments difficiles.*

*A mes collègues de l'Université de Saad Dahleb de promotion 2020.*

*Je ne saurai oublier de remercier toute personne qui, d'une manière ou d'une autre, m'a aidé dans l'élaboration de ce travail.*

*Merci d'être toujours là pour moi.*

*Randa*

---

## ملخص:

يتناول هذا العمل دراسة العواكس الكهريائية من نوع نقطة محايدة مثبتة (NPC) متعددة المستويات التي تزود آلة غير متزامنة و عرض تقديمي لاستراتيجيات التحكم في الموجة الكاملة وتعديل عرض النبض الجيبي (MLI)، حيث الهدف الرئيسي من هذا العمل هو:

مقارنة بين هيكليين عاكس ثلاثي الطور؛ العاكس NPC ذو المستويين (نقطة محايدة مثبتة)؛ والعاكس ثلاثي المستويات مع استراتيجيتين (الموجة الكاملة وتعديل عرض النبض الجيبي).

تقليل معدل التشويه التوافقي.

تحسين أداء المحرك الحصول على جهد جيبي (أو تيار) عند خرج هذه المحولات.

تم تصميم ومحاكاة جميع الدوائر باستخدام برنامج Matlab 2013.

**كلمات المفاتيح:** آلة غير متزامنة، الموجة الكاملة، عاكس متعدد المستويات، تعديل عرض النبض الجيبي، معدل التشويه التوافقي.

---

## Résumé :

Ce travail traite de l'étude des onduleurs multi-niveaux de type npc alimentant une machine asynchrone et d'une présentation des stratégies de commande 'pleine onde et Modulation de largeur d'impulsion sinusoïdale MLI ', où l'objectif principal de ce travail est :

comparaison entre deux structures d'onduleurs triphasés ; l'onduleur NPC à deux niveaux (Point neutre serré) ; et l'onduleur à trois niveaux avec deux stratégies (pleine onde et MLI)

Réduire le taux de distorsion harmonique THD.

Amélioration des performances du moteur.

Obtenir une tension (ou courant) sinusoïdale à la sortie de ces onduleurs.

Tous les circuits sont modélisés et simulés à l'aide du programme Matlab 2013.

**Mots clés :** Machine asynchrone, Plein onde, Onduleur multi-niveaux, Modulation de largeur d'impulsion sinusoïdale, Taux de distorsion harmonique.

---

## Abstract :

This work study the multi-level Inverter npc type supplying asynchronous machine and presentation of control strategies for full wave and Sinusoidal Pulse Width Modulation PMW, where the main objective of this work is:

Comparison of two three-phase inverter structures ; Two-level NPC inverter (fixed neutral point) ; A three-level inverter with two strategies (full wave and PMW)

Reducing Harmonic distortion.

Improved engine performance.

Get a sinusoidal voltage (or current) at the output of these transformers.

All circuits are designed and simulated using progame Matlab 2013.

**Keywords :** Asynchronous machine, Full wave, Multi-level inverter, Sinusoidal pulse width modulation Harmonic distortion rate.

---

## Listes des acronymes et abréviations

**NPC** : Neutral Point Clamped.

$\Theta$  : l'angle électrique entre l'axe de la phase  $a_s$  statorique et la phase  $a_r$  rotorique.

**V<sub>sa</sub>, V<sub>sb</sub>, V<sub>sc</sub>** : Tensions appliquées aux trois phases statoriques.

**I<sub>sa</sub>, I<sub>sb</sub>, I<sub>sc</sub>** : Courants qui traversent les trois phases statoriques.

**$\varphi_{sa}$ ,  $\varphi_{sb}$ ,  $\varphi_{sc}$**  : Flux totaux à travers ces enroulements.

**V<sub>ra</sub>, V<sub>rb</sub>, V<sub>rc</sub>** : Tensions rotoriques

**I<sub>ra</sub>, I<sub>rb</sub>, I<sub>rc</sub>** : Courants rotoriques

**$\varphi_{ra}$ ,  $\varphi_{rb}$ ,  $\varphi_{rc}$**  : Flux rotoriques

**R<sub>s</sub>** : Résistance d'une phase statorique.

**R<sub>r</sub>** : Résistance d'une phase rotorique

**L<sub>s</sub>** : L'inductance propre d'une phase statorique.

**L<sub>r</sub>** : L'inductance propre d'une phase rotorique.

**M<sub>ss</sub>** : L'inductance mutuelle entre phase statorique.

**M<sub>rr</sub>** : L'inductance mutuelle entre phase rotorique.

**M<sub>sr</sub>** : Valeur maximale de l'inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique.

**J** : Moment d'inertie des masses tournantes.

$\Omega$  : Vitesse rotorique.

**C<sub>em</sub>** : Couple électromagnétique.

**K<sub>f</sub>** : Coefficient de frottement visqueux.

$\omega_s$  : vitesse angulaire des axes (d, q) par rapport au stator.

$\omega_r$  : vitesse angulaire des axes (d, q) par rapport au rotor.

$L_s$  : Inductance cyclique statorique.

$L_r$  : Inductance cyclique rotorique.

**NPC** : la topologie à diode de bouclage.

**MOSFET** : Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor

**GTO** : Gate Turn-Off Thyristor

**IGBT** : Insulated Gate Bipolaire Transistor

**CC** : Courant continu.

**SPWM** : Modulation de largeur d'impulsion simple.

**MPWM** : Modulation de largeur d'impulsion multiple.

**SPWM** : Modulation de largeur d'impulsion sinusoïdale.

**MAS** : machine asynchrone

**Vao** : tension de sortie.

**MLI** : stratégies de modulation.

**THD** : le taux global de distorsion harmonique.

$\overline{B_{K1}}, \overline{B_{K2}}, \overline{B_{K3}}, \overline{B_{K4}}$  : Commande complémentaire.

**Tikg** : l'interrupteur.

**M** : L'indice de modulation.

**Fp** : La fréquence de la porteuse.

**Fm** : La fréquence de la référence.

**AP** : L'amplitude crête de la porteuse.

**Ias** : le courant statorique dans un enroulement d'une phase.

## Table des matières

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

### **Chapitre 1 Modélisation de la machine asynchrone triphasée (MSA)**

1.1	Introduction .....	4
1.2	Définition de la machine asynchrone .....	4
1.3	Modélisation de la machine asynchrone triphasée (MAS).....	5
1.4	Equations de la machine asynchrone .....	6
1.5	Modèle biphasé de la machine asynchrone .....	12
1.6	Modélisation de la machine asynchrone dans le repère de Park.....	13
1.7	Conclusion.....	15

### **Chapitre 2 Etudes les différentes topologies des onduleurs multi niveaux**

2.1	Introduction .....	16
2.2	Etat de l'art .....	16
2.3	Définition d'un onduleur .....	16
2.4	Les onduleurs multi-niveaux.....	19
2.5	Différentes topologies d'onduleurs multi niveaux .....	21
2.6	Propriétés des principales structures .....	31
2.7	Comparaison entre les trois topologies de base des convertisseurs multi-niveaux.....	32
2.8	Autre topologie.....	33
2.9	Domaines d'application d'onduleur multi-niveaux .....	33
2.10	Conclusion.....	33

### **Chapitre 3 Modélisation des onduleurs multi niveaux de type NPC et les différentes stratégies de la commande des onduleurs**

3.1	Introduction .....	34
-----	--------------------	----



3.2	Onduleur classique à deux niveaux de tensions .....	34
3.3	Onduleur à trois niveaux de type NPC .....	37
3.4	Onduleur à cinq niveaux de types NPC .....	43
3.5	Onduleur à sept niveaux de type NPC .....	49
3.6	Modélisation de l'onduleur de tension à trois niveaux de type NPC .....	58
3.7	Techniques de commandes .....	65
3.8	Conclusion .....	72

## **Chapitre 4 Simulations et interprétation des résultats**

4.1	Introduction .....	74
4.2	Le programme utilisé .....	74
4.3	Commande en pleine onde (180°) .....	75
4.4	Commande MLI sinusoidale .....	86
4.5	Comparaison entre les deux topologies d'onduleur .....	104
4.6	Conclusion .....	104
	Conclusion generale.....	106

## **Bibliographie**

## Liste des figures

<b>Figure1. 1:</b> Les éléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écurueil.	6
<b>Figure1. 2:</b> Représentation des enroulements de la machine asynchrone triphasée .	7
<b>Figure1. 3:</b> Transformation de Park	12
<b>Figure 2. 1:</b> schéma de la conversion alternée continue (DC-AC).	18
<b>Figure 2. 2 :</b> Onduleur à niveaux multiples.	20
<b>Figure 2. 3 :</b> Différentes topologies d'onduleurs multi niveaux.	22
<b>Figure 2. 4:</b> Topologie avec condensateurs flottants NPC de niveau trois (a) et de niveau cinq (b).	23
<b>Figure 2. 5:</b> configuration possible d'un bras d'onduleur trois niveaux à condensateur flottant.	24
<b>Figure 2. 6 :</b> Onduleur en cascade à 3 niveaux.	26
<b>Figure 2. 7:</b> onduleur multi niveau en cascade à cinq niveaux.	26
<b>Figure 2. 8:</b> Onduleur en cascade à 7 niveaux.	27
<b>Figure 2. 9:</b> Onduleur NPC à trois niveaux.	29
<b>Figure 2. 10:</b> Onduleur NPC à cinq niveaux.	30
<b>Figure 3. 1:</b> shema d'un onduleur usuel à 2 niveaux.	35
<b>Figure 3. 2a :</b> Séquences 1 de fonctionnement d'un bras de l'onduleur à deux niveaux.	35
<b>Figure 3. 2b :</b> Séquences 2 de fonctionnement d'un bras de l'onduleur à deux niveaux.	36
<b>Figure 3. 3:</b> forme d'onde de la tension de sortie $V_a$ et le signal de commande de chaque commutateur.	36
<b>Figure 3. 4:</b> Structure d'un onduleur triphasé à trois niveaux de type NPC.	38
<b>Figure 3. 5:</b> bras d'onduleur triphasé à trois niveaux.	38
<b>Figure 3. 6:</b> Bras d'un onduleur NPC à trois niveaux.	39
<b>Figure 3. 7:</b> 1 <sup>ère</sup> configuration du 1 <sup>er</sup> bras.	40
<b>Figure 3. 8:</b> 2 <sup>ème</sup> configuration du 1 <sup>er</sup> bras.	41
<b>Figure 3. 9:</b> 3 <sup>ème</sup> configuration du 1 <sup>er</sup> bras.	41
<b>Figure 3. 10 :</b> Formes d'ondes d'un bras d'onduleur triphasé trois niveau de type NPC.	42
<b>Figure 3. 11 :</b> Schéma d'un onduleur NPC à cinq niveaux.	43

<b>Figure 3. 12 :</b> 1ere configuration du <b>1er</b> bras.....	44
<b>Figure 3. 13:</b> 2ème configuration du <b>1er</b> bras.....	45
<b>Figure 3. 14:</b> 3eme configuration du <b>1er</b> bras.....	46
<b>Figure 3. 15:</b> 4eme configuration du <b>1er</b> bras.....	47
<b>Figure 3. 16:</b> représente 5eme configuration du <b>1er</b> bras.....	47
<b>Figure 3. 17 :</b> Forme d’onde de la tension de sortie d’un bras d’onduleur à cinq niveaux de type NPC.....	48
<b>Figure 3. 18:</b> l'onduleur NPC à sept niveaux.....	50
<b>Figure 3. 19:</b> 1ere configuration du <b>1er</b> bras.....	51
<b>Figure 3. 21:</b> 3eme configuration du <b>1er</b> bras.....	53
<b>Figure 3. 22:</b> 4eme configuration du <b>1er</b> bras.....	54
<b>Figure 3. 23:</b> 5eme configuration du <b>1er</b> bras.....	55
<b>Figure 3. 24:</b> 6eme configuration du <b>1er</b> bras.....	56
<b>Figure 3. 25:</b> 7eme configuration du <b>1er</b> bras.....	57
<b>Figure 3. 26:</b> Tensions simples d’un onduleur triphasé de type NPC à sept niveaux.....	58
<b>Figure 3. 27:</b> Onduleur triphasé à trois niveaux de tension de type NPC.....	59
<b>Figure 3. 28:</b> Interrupteur bidirectionnel équivalent de la paire transistor-diode.....	59
<b>Figure 3. 29:</b> Différentes techniques de commande MLI.....	65
<b>Figure 3. 32 :</b> Schéma de principe de la technique sinus-triangle [64]. .....	67
<b>Figure 3. 33 :</b> Principe de la modulation MLI sinusoïdale classique[27]. .....	69
<b>Figure 3. 34 :</b> Principe de la MLI à doubles triangles [27]. .....	70
<b>Figure 3. 35 :</b> Schéma de principe de la MLI vectorielle [68]. .....	71
<b>Figure 3. 36 :</b> Représentation dans le plan ( $\alpha$ , $\beta$ ) des vecteurs de tension de l’onduleur à trois niveaux de tension .....	72
<b>Figure 4. 1 :</b> schéma bloc de la commande en plein onde d'un onduleur NPC à deux niveaux.....	75
<b>Figure 4. 2:</b> Tension composé entre deux phase c et b à la sortie de l’onduleur de deux niveaux commande plein onde.....	76
<b>Figure 4. 3:</b> Zoom sur la tension d’alimentation du MAS commande plein onde. ....	76
<b>Figure 4. 4:</b> Courant statorique de MAS commande plein onde.....	77
<b>Figure 4. 5:</b> Zoom sur courant statorique $I_{as}$ de MAS commande plein onde. ....	77

<b>Figure 4. 6:</b> spectre d'harmonique du courant statorique de l'onduleur deux niveaux commande plein onde. ....	78
<b>Figure 4. 7:</b> Couple électromagnétique de MAS commande plein onde. ....	78
<b>Figure 4. 8:</b> le fonctionnement à vide de la machine (MAS) commande plein onde. ....	79
<b>Figure 4. 9 :</b> les ondulations du Cem de MAS commande plein onde. ....	80
<b>Figure 4. 10:</b> vitesse de rotation de MAS commande plein onde. ....	80
<b>Figure 4. 11:</b> schéma bloc de la commande en pleine onde d'un onduleur NPC trois niveaux. ....	81
<b>Figure 4. 12:</b> Tension composé entre deux phase c et b à la sortie de l'onduleur de trois niveaux commande plein onde. ....	81
<b>Figure 4. 13:</b> Zoom sur la tension d'alimentation du MAS commande plein onde. ....	82
<b>Figure 4. 14:</b> Courant statorique de MAS commande plein onde. ....	82
<b>Figure 4. 15:</b> Zoom sur courant statorique las de MAS commande plein onde. ....	83
<b>Figure 4. 16:</b> spectre d'harmonique de courant statorique plein onde à trois niveaux commande plein onde. ....	84
<b>Figure 4. 17:</b> Couple électromagnétique de MAS commande plein onde. ....	84
<b>Figure 4. 18:</b> le fonctionnement à vide de la machine (MAS) commande plein onde. ....	85
<b>Figure 4. 19:</b> les ondulations du Cem de MAS commande plein onde. ....	85
<b>Figure 4. 20:</b> Vitesse de rotation de MAS commande plein onde. ....	86
<b>Figure 4. 21:</b> schéma bloc de l'onduleur NPC à deux niveaux avec la commande MLI sinusoïdale. ....	86
<b>Figure 4. 22:</b> Le schéma bloc de la commande MLI sinusoïdale de l'onduleur NPC à deux niveaux. ....	87
<b>Figure 4. 23:</b> Tension composé entre deux phase c et b à la sortie de l'onduleur de deux niveaux commande MLI. ....	87
<b>Figure 4. 24:</b> Zoom sur la tension d'alimentation du MAS commande MLI. ....	88
<b>Figure 4. 25:</b> Courant statorique de MAS commande MLI. ....	88
<b>Figure 4. 26:</b> Zoom sur courant statorique las de MAS commande MLI. ....	89
<b>Figure 4. 27:</b> spectre d'harmonique de courant statorique commande MLI. ....	89
<b>Figure 4. 28:</b> Couple électromagnétique de MAS commande MLI. ....	90
<b>Figure 4. 29:</b> le fonctionnement à vide de la machine (MAS) commande MLI. ....	90
<b>Figure 4. 30:</b> les ondulations du Cem de MAS commande MLI. ....	91

<b>Figure 4. 31:</b> vitesse de rotation de MAS commande MLI. ....	91
<b>Figure 4. 32 :</b> schéma bloc de l'onduleur NPC à trois niveaux avec la commande MLI sinusoïdale. ....	93
<b>Figure 4. 33:</b> schéma bloc de la commande MLI sinusoïdale de l'onduleur NPC trois niveaux.....	94
<b>Figure 4. 34:</b> Principe de la modulation d'un onduleur triphasé à MLI à deux porteuses pour $m=21$ .....	94
<b>Figure 4. 35:</b> Tension composé entre deux phase c et b à la sortie de l'onduleur de trois niveaux commande MLI ( $m=21$ ). ....	95
<b>Figure 4. 36 :</b> Zoom sur la tension d'alimentation du MAS commande MLI ( $m=21$ ). ....	95
<b>Figure 4. 37:</b> Courant statorique las de MAS commande MLI ( $m=21$ ).....	96
<b>Figure 4. 38:</b> Zoom sur courant statorique las de MAS commande MLI ( $m=21$ ). ....	96
<b>Figure 4. 39:</b> spectre d'harmonique de courant statorique commande MLI ( $m=21$ ). ...	97
<b>Figure 4. 40:</b> Couple électromagnétique de MAS commande MLI ( $m=21$ ).....	97
<b>Figure 4. 41:</b> le fonctionnement à vide de la machine (MAS) commande MLI ( $m=21$ ). ...	98
<b>Figure 4. 42 :</b> les ondulations du $C_{em}$ de MAS commande MLI ( $m=21$ ).....	98
<b>Figure 4. 43:</b> vitesse de rotation de MAS commande MLI ( $m=21$ ).....	99
<b>Figure 4. 44:</b> Tension composé entre deux phase c et b à la sortie de l'onduleur de trois niveaux commande MLI ( $m=42$ ). ....	99
<b>Figure 4. 45:</b> Zoom sur la tension d'alimentation du MAS commande MLI ( $m=42$ ). ...	100
<b>Figure 4. 46:</b> Courant statorique las de MAS commande MLI ( $m=42$ ).....	100
<b>Figure 4. 47:</b> Zoom sur courant statorique las de MAS commande MLI ( $m=42$ ). ....	101
<b>Figure 4. 48:</b> spectre d'harmonique de courant MLI-sinusoïdale ( $m=42$ ).....	101
<b>Figure 4. 49:</b> Couple électromagnétique de MAS commande MLI ( $m=42$ ).....	102
<b>Figure 4. 50:</b> le fonctionnement à vide de la machine (MAS) commande MLI ( $m=42$ ). .....	102
<b>Figure 4. 51:</b> les ondulations du $C_{em}$ de MAS commande MLI ( $m=42$ ).....	103
<b>Figure 4. 52:</b> vitesse de rotation de MAS commande MLI ( $m=42$ ).....	103

## Liste des tableaux

<b>Tableau 2. 1:</b> répertorie les trois niveaux de tension de sortie ( $V_{ao}$ ) et les états de commutation possibles.....	24
<b>Tableau 2.2:</b> Onduleur cascade à trois niveaux.....	27
<b>Tableau 2. 3:</b> états de commutation et les tensions de sortie pour Diode NPC. ....	29
<b>Tableau 2. 4:</b> comparaison entre les trois topologies de base.....	32
<b>Tableau 3. 1:</b> Table de commutation du convertisseur NPC 2 niveaux. ....	37
<b>Tableau 3. 2:</b> commutation du convertisseur NPC 3 niveaux .....	42
<b>Tableau 3. 3:</b> Table de commutation de l'onduleur NPC à 5 niveaux. ....	48
<b>Tableau 3. 4:</b> Table de la commutation de l'onduleur NPC à 7 niveaux. ....	57
<b>Tableau 3. 5:</b> La table logique correspondante à la ccommande N°1. ....	60
<b>Tableau 3. 6:</b> La table logique correspondante à la commande N°2. ....	61
<b>Tableau 3. 7 :</b> La table logique correspondante à la commande N°3. ....	61
<b>Ttableau 4. 1:</b> Comparaison entre les deux topologies d'onduleur avec deux techniques.....	104

# Introduction générale

---

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

L'entraînement à vitesse variable des machines électriques était l'objectif de plusieurs études dans ces dernières années grâce à l'évolution technologique des convertisseurs statiques. Les onduleurs de tension sont largement utilisés pour la commande des moteurs asynchrones.

Un onduleur est un dispositif d'électronique de puissance qui sert à générer des tensions et des courants alternatifs à partir d'une source d'énergie électrique de tension ou de fréquence différente, et la conversion d'énergie électrique de la forme continue DC à la forme alternative AC [1]. Il provoque une dégradation du système d'exploitation à certaines charges, notamment les machines électriques, du fait de sa réception de tension non sinusoïdale à sa sortie. Ces tensions résultantes sont très riches en harmoniques, d'où la nécessité de les réduire.

Dans le cadre de la recherche des méthodes de réduction des harmoniques, plusieurs travaux ont été réalisés sur deux axes. Le premier est l'utilisation des topologies multiniveaux de l'onduleur, alors que le second porte sur la commande de l'ouverture et la fermeture des semi-conducteurs formant l'onduleur (Modulation de largeur d'impulsion).

Dans ce travail, nous étudierons l'onduleur multi-niveaux NPC (point neutre fixe), un onduleur triphasé avec trois niveaux de tension et deux niveaux pour voir l'effet du nombre des niveaux sur les performances des convertisseurs, et la

comparaison entre les deux stratégies pleine onde et modulation de largeur d'impulsion.

Le problème soulevé ici est la validité des deux méthodes (multi-niveaux dans les onduleurs NPC et stratégie de modulation sinusoïdale) sur la diminution du taux d'harmoniques.

Pour y parvenir, nous prévoyons de développer un algorithme de commande d'onduleur basé sur cette technologie de modulation. Cet algorithme est testé sur un moteur asynchrone à cage d'écureuil.

Nous étudierons également l'effet de l'utilisation de la technologie de modulation sinusoïdale MLI sur la réduction des ondulations du couple électromagnétiques. Il s'agira également de déterminer le taux de distorsion harmonique (THD) afin de démontrer l'efficacité de cet algorithme et donc l'efficacité de la technique MLI sinusoïdale appliquée aux onduleurs trois niveaux de tension.

Ce mémoire est organisé autour de quatre chapitres qu'on décrit comme suit :

Le premier chapitre sera consacré à la modélisation de la machine asynchrone triphasée (MSA).

Dans le deuxième chapitre, nous présentons une description détaillée des différentes topologies des onduleurs multi niveaux : Topologie à condensateur flottant, topologie en cascade et la Topologie à diode en boucle NPC, leurs structures, leurs avantages, leurs inconvénients et domaine d'application et leur principe fonctionnements de chacune une avec.

Dans le troisième chapitre nous traiterons la modélisation des onduleurs multi niveaux de type NPC et les différentes stratégies de la commande des onduleurs.

Le dernier chapitre s'intéresse à la simulation des onduleurs à deux et à trois niveaux commandés par la technique MLI triangulo-sinusoïdale et pleine onde.

Nous étudierons aussi les courants et les tensions de sortie, puis nous analyserons leurs taux harmoniques et nous terminerons par une comparaison entre les deux techniques.



À la fin une conclusion générale ou on a présenté une synthèse des résultats obtenus

# Chapitre 1 Modélisation de la machine asynchrone

## triphasee (MSA)

---

### 1.1 Introduction

Les moteurs asynchrones triphasés représentent plus de 80 % du parc moteur électrique. Ils sont utilisés pour transformer l'énergie électrique en énergie mécanique grâce à des phénomènes électromagnétiques [2].

Dans ce chapitre, nous fournissons une définition et une description du moteur asynchrones triphasés et modélisation des machines asynchrones selon différentes méthodes, en fonction des objectifs recherchés. Ci-après les modèles suivants qui peuvent être élaborés :

- Le modèle triphasé en abc, découlant des équations différentielles à coefficients périodiques régissant le fonctionnement de la machine ; il est utilisé essentiellement pour l'étude des régimes permanents [3].
- Le modèle issu de la transformation triphasée – biphasée (park), utilisé couramment pour l'étude des régimes transitoires et l'élaboration des lois de commande [3].

### 1.2 Définition de la machine asynchrone

On appelle machine asynchrone toute machine, qui, ayant  $(2 p)$  pôles et étant reliée à un réseau de fréquence  $f_s$ , ne tourne pas exactement à la vitesse synchrone  $(\frac{60 f_s}{\pi})$ . On parle généralement de moteurs asynchrones car ces machines sont destinées à fournir de la puissance mécanique à partir du réseau

électrique.

Parmi les machines asynchrones, on peut distinguer deux types :

- *Les machines d'induction.*
- *Les machines à collecteur.*

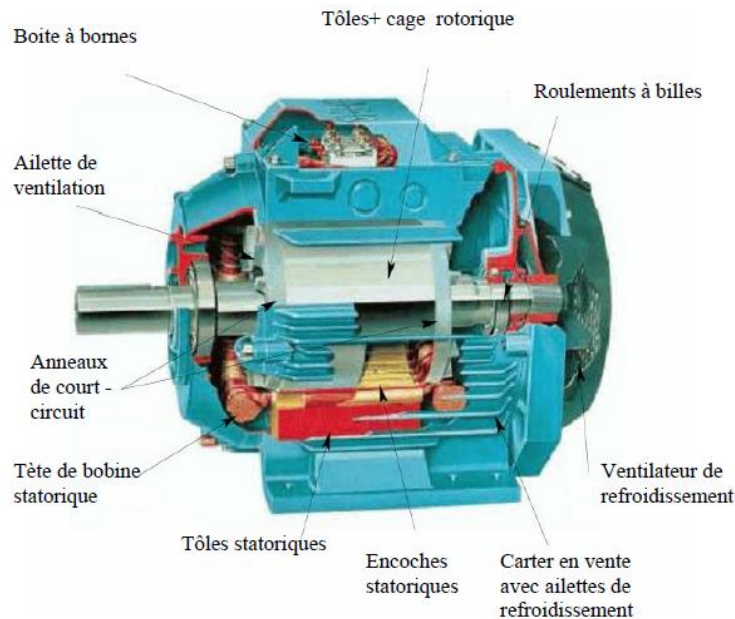
Le moteur d'induction est tellement plus utilisé que les autres que lorsqu'on parle de moteur asynchrone on sous-entend d'induction. La machine d'induction est caractérisée par une armature non alimentée (rotor), parcourue par des courants induits par l'autre armature qui est alimentée à partir d'un réseau de fréquence  $f_s$  (stator) [3],[4],[6].

## **1.3 Modélisation de la machine asynchrone triphasée (MAS)**

### **1.3.1 Description de la machine asynchrone triphasée**

Les machines asynchrones triphasées peuvent se décomposer, du point de vue mécanique, en trois parties distinctes (*Figure 1.1*) :

- Le stator, partie fixe de la machine où est connectée l'alimentation électrique. Les phases du stator sont alimentées par un système triphasé de tensions sinusoïdales à fréquence et à amplitude réglables. Le stator contient également des encoches régulièrement réparties sur la face interne du stator sont logés trois enroulements identiques déphasés de  $2\pi/3$ .
- le rotor, partie tournante qui permet de mettre en rotation la charge mécanique [6] ;
- les paliers, partie mécanique qui permet la mise en rotation de l'arbre moteur [5].



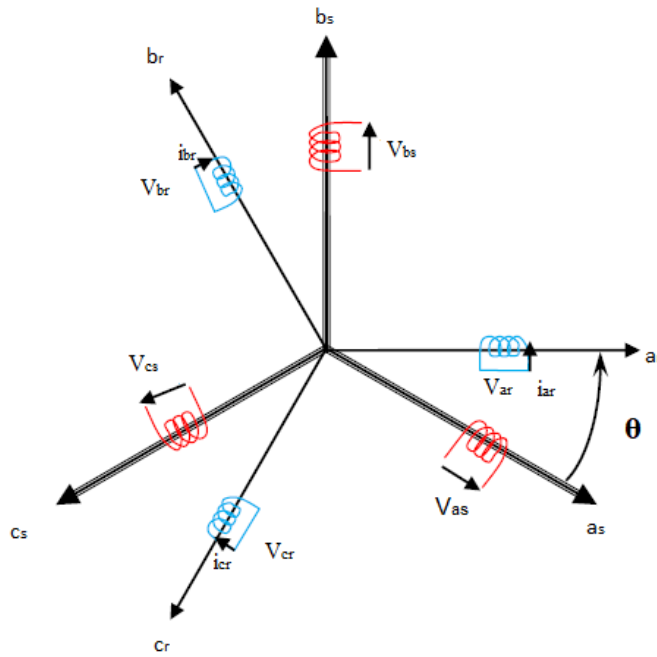
**Figure1. 1:** Les éléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écurieil [6].

## 1.4 Equations de la machine asynchrone

### 1.4.1 Hypothèses simplificatrices

La modélisation de la machine asynchrone s'appuie sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices [7], [8], [9], [10] qui sont :

- Circuit magnétique est saturé, ce qui permet d'exprimer les flux comme fonctions linéaire des courants ;
- Les pertes (par hystérésis et courant de Foucault) sont négligées ;
- Les forces magnétomotrices créés par chacun des phases des deux armatures sont à répartition sinusoïdale d'où résulte du fait que l'entrefer est constant, que les inductances propres sont des constantes et que les inductances mutuelles entre deux enroulements sont fonction sinusoïdale de l'angle entre leurs axes magnétique.
- Les résistances ne varient pas avec la température.
- Effet de peau négligé
- La machine est de constitution symétrique.



**Figure1. 2:** Représentation des enroulements de la machine asynchrone triphasée [11].

Les enroulements des trois phases statoriques et des trois phases rotoriques dans l'espace peuvent être représentés comme indiqué en (Figure 1.2). Les phases rotoriques sont court-circuitées sur elles-mêmes.  $\theta$  est l'angle électrique entre l'axe de la phase  $a_s$  statorique et la phase  $a_r$  rotorique.

La loi de Faraday permet d'écrire :

$$V = Ri + \frac{d\phi}{dt}$$

Pour les détails de la mise en équation et comment les extraire, nous demandons aux lecteurs de visiter les références suivantes [12], [13], [14], [15], [16].

### 1.4.2 Mise en équations

Dans le cadre de ces hypothèses et pour une machine équilibrée, et couplée en étoile, les équations de la machine asynchrone sont :

#### **a** Equations électriques de la machine

Les équations de tension des trois phases statoriques et des trois phases rotoriques sont données par [11] :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{sa} = R_s I_{sa} + \frac{d\varphi_{sa}}{dt} \\ V_{sb} = R_s I_{sb} + \frac{d\varphi_{sb}}{dt} \\ V_{sc} = R_s I_{sc} + \frac{d\varphi_{sc}}{dt} \end{array} \right. \quad (1.1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ra} = R_r I_{ra} + \frac{d\varphi_{ra}}{dt} \\ V_{rb} = R_r I_{rb} + \frac{d\varphi_{rb}}{dt} \\ V_{rc} = R_r I_{rc} + \frac{d\varphi_{rc}}{dt} \end{array} \right. \quad (1.2)$$

En désignant par:

$V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}$  : Tensions appliquées aux trois phases statoriques.

$I_{sa}, I_{sb}, I_{sc}$  : Courants qui traversent les trois phases statoriques.

$\varphi_{sa}, \varphi_{sb}, \varphi_{sc}$  : Flux totaux à travers ces enroulements.

$V_{ra}, V_{rb}, V_{rc}$ : Tensions rotoriques

$I_{ra}, I_{rb}, I_{rc}$ : Courants rotoriques

$\varphi_{ra}, \varphi_{rb}, \varphi_{rc}$  : Flux rotoriques

$R_s$  : Résistance d'une phase statorique.

$R_r$ : Résistance d'une phase rotorique

Les équations (1.1) et (1.2) se présentent naturellement sous forme matricielle :

➤ **Pour le stator**

$$[V_{sabc}] = [R_s] [I_{sabc}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{sabc}] \quad (1.3)$$

Ou

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

➤ **Pour le rotor**

Le rotor étant en court-circuit, ses tensions sont nulles.

Donc

$$[V_{rabc}] = [R_r] [I_{rabc}] + d/dt [\varphi_{rabc}]$$

Ou

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

On pose :

$$R_{sa} = R_{sb} = R_{sc}$$

$$R_{ra} = R_{rb} = R_{rc}$$

Donc la matrice de résistance d'une phase statorique  $[R_s]$  et rotorique  $[R_r]$  respectivement devient :

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}, \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

La Matrice de tension de stator  $[V_s]$

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix}$$

la matrice de courant de stator  $[I_s]$  et de rotor  $[I_r]$  respectivement devient :

$$[I_s] = \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix}, \quad [I_r] = \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix}$$

Matrice de flux de stator  $[\varphi_s]$  et  $[\varphi_r]$

$$[\varphi_s] = \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix}, \quad [\varphi_r] = \begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix}$$

### **b Equations magnétiques**

Les équations des flux en fonction des courants s'obtiennent à partir de la matrice des inductances, qui comporte 36 coefficients non nuls, dont la moitié dépend du temps par l'intermédiaire de l'angle électrique  $\theta$  [12, 13].

Exemple de la phase a statorique :

$$V_{sa} = l_s I_{sa} + m_s I_{sb} + m_s I_{sc} + M_1 I_{ra} + M_3 I_{rb} + M_2 I_{rc} \quad (1.6)$$

$$\begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \\ \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s & M_1 & M_3 & M_2 \\ M_s & l_s & M_s & M_2 & M_1 & M_3 \\ M_s & M_s & l_s & M_3 & M_2 & M_1 \\ M_1 & M_2 & M_3 & l_r & M_r & M_r \\ M_3 & M_2 & M_2 & M_r & l_r & M_r \\ M_2 & M_3 & M_1 & M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \\ I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

Tel que :

$l_s$  : L'inductance propre d'une phase statorique.

$l_r$  : L'inductance propre d'une phase rotorique.

$M_s$  : L'inductance mutuelle entre phase statorique.

$M_r$  : L'inductance mutuelle entre phase rotorique

Avec :

$$M_1 = M_{sr} \cos(\theta)$$

$$M_2 = M_{sr} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3})$$

$$M_3 = M_{sr} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3})$$

Où :

$M_{sr}$  : Valeur maximale de l'inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique.

La matrice d'inductance fait apparaître quatre sous matrices d'inductances

L'écriture matricielle qui résume les équations des flux statiques et rotoriques.

$$\begin{cases} [\varphi_s] = [L_s][I_s] + [M_{sr}][I_r] \\ [\varphi_r] = [L_r][I_r] + [M_{rs}][I_s] \end{cases} \quad (1.8)$$

Avec :



- [L<sub>s</sub>]: La matrice des inductances statoriques :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix}$$

- [L<sub>r</sub>]: La matrice des inductances rotoriques

$$[L_r] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_{rr} & M_r & l_r \end{bmatrix}$$

- [M<sub>sr</sub>]: La matrice des inductances mutuelles stator rotor.

- [M<sub>rs</sub>] : La matrice des inductances mutuelles rotor stator

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

### ***c Equation mécanique***

L'équation mécanique est donnée par l'équation [16] :

$$J \, d\Omega/dt = C_{em} - C_r - K_f \Omega \quad (1.10)$$

Le couple est donné par l'expression suivante issue de considérations sur la conversion électromécanique de l'énergie.

$$C_{em} = P [I_s]^T \frac{d}{d\theta} ([M_{sr}] [I_r]) \quad (1.11)$$

Avec :

J : Moment d'inertie des masses tournantes.

C<sub>r</sub>: Couple résistant imposé à l'arbre de la machine.

Ω: Vitesse rotorique.

C<sub>em</sub>: Couple électromagnétique.

K<sub>f</sub> : Coefficient de frottement visqueux.

Les équations (1.2) ainsi obtenus sont à coefficients variables entraînant la complexité de résolution du modèle défini par (1.1). Cela conduira à l'usage de la transformation de Park qui permettra de rendre constant ces paramètres.

## 1.5 Modèle biphasé de la machine asynchrone

### 1.5.1 Transformation de Park

Les équations précédentes permettent la modélisation de la machine dans le plan "abc". Vu la complexité de ces équations non linéaires et multi-variables, il est très difficile d'en tirer des stratégies de commande. Pour cette raison, on fait appel à la transformation de PARK qui consiste à imaginer de remplacer le rotor tournant par un rotor fictif équivalent fixe (d, q) (Figure 1.3). A condition de conserver la force magnétomotrice et la puissance instantanée.

Pour transformer un système triphasé [a,b,c] en un système biphasé [d,q] avec une composante homopolaire comme indique dans l'équations suivante [13],[14],[15] :

$$X_{dq} = [P(\theta)]X_{abc}.$$

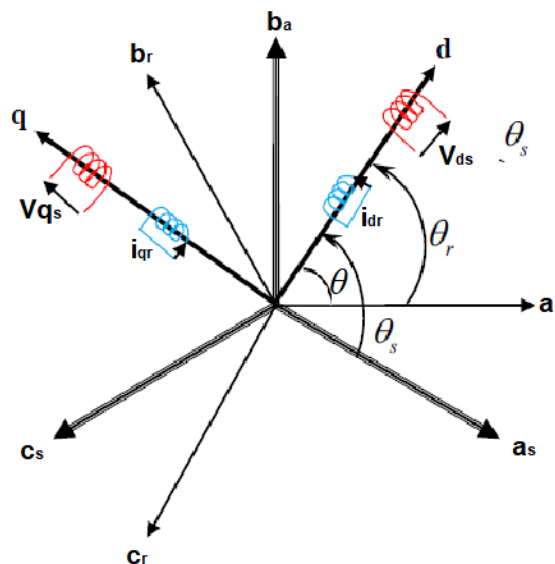


Figure1. 3: Transformation de Park [11].

Tel que :

X : Peut-être la tension ou courant ou flux.

$[P(\theta)]$  : est la matrice de la transformation de Park définie par :

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

$[P(\theta)]^{-1}$  : Est la matrice inverse de Parck définie par :

$$[p(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (1.13)$$

Avec :

L'angle  $\theta$  correspond à la position du repère choisi pour la transformation.

$\theta = \theta_s$  angle électrique pour le stator (angle entre  $\vec{e}_{sa}$  et  $\vec{e}_{Od}$ ).

$\theta = \theta_r$  angle électrique pour le rotor (angle entre  $\vec{e}_{ra}$  et  $\vec{e}_{Od}$ ).

## 1.6 Modélisation de la machine asynchrone dans le repère de Park

La composante homopolaire est de valeur nulle, si on considère que le système [abc] est équilibré et symétrique (pas de perturbation). Dans ces conditions les équations électriques, magnétiques et mécaniques deviennent [13] [14] :

### 1.6.1 Equations électriques

En application la transformation de PARK sur les équations électriques (1.3) en admettant que le rotor étant en court-circuit il en résulte [15] :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ds} = R_s I_{sd} + \frac{d\varphi}{dt}_{ds} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{sb} + \frac{d\varphi}{dt}_{ds} + \omega_s \varphi_{ds} \\ V_{qr} = 0 = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi}{dt}_{dr} - (\omega_s - \omega) \varphi_{qr} \\ V_{dr} = 0 = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi}{dt}_{qr} - (\omega_s - \omega) \varphi_{dr} \end{array} \right. \quad (1.14)$$

Avec :

$\omega_s = (d\theta_s)/dt$  : vitesse angulaire des axes (d, q) par rapport au stator.

$\omega_r = (d\theta_r)/dt$  : vitesse angulaire des axes (d, q) par rapport au rotor

$\omega = P\Omega$  : Vitesse angulaire électrique [rad/s]

### 1.6.2 Equations magnétiques

L'application de la transformation de Park sur l'équation (1.8) donne : [15], [16]

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{ds} \\ \varphi_{qs} = L_s I_{qs} + M I_{qs} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \varphi_{dr} = L_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r I_{qr} + M I_{qs} \end{array} \right.$$

Le nombre des paramètres électromagnétiques est réduit, tel que :

$L_s = l_s - M_s$  : Inductance cyclique statorique ;

$L_r = l_r - M_r$  : Inductance cyclique rotorique ;

M : Inductance mutuelle cyclique entre rotor stator.

### 1.6.3 Equation mécanique

Nous reprenant ci-dessous l'équation du couple électromagnétique dans le plan (d, q), issue de modèle idéalisé de la machine asynchrone [16].

$$P_m = C_{em}\Omega = \omega_s I_{qs} - (\varphi_{sd} - I_{sd} - \varphi_{sq} I_{sd}) \quad (1.16)$$

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - K_f \Omega$$

## 1.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons créé un modèle mathématique pour une machine asynchrone triphasée dont la complexité a été réduite en utilisant un certain nombre d'hypothèses simplifiées. Nous sommes passés d'un système triphasé vers le système biphasé avec l'application de transformation Park.

Le modèle Park nous a permis de connaître les différentes contraintes des grandeurs électriques que la machine asynchrone peut supporter le mélange de transformateurs de tension triphasés, qui sera le siège du deuxième chapitre

Le chapitre suivant sera consacré à les onduleurs multi niveaux de type NPC et leurs modélisation.

# Chapitre 2 Etudes les différentes topologies des onduleurs multi niveaux

---

## 2.1 Introduction

La technologie de conversion de l'énergie du continu vers l'alternatif en utilisant les convertisseurs statiques est une partie de l'électronique de puissance en pleine croissance. Cela tient essentiellement à deux raisons [17] :

- Tout d'abord, l'étendue de ses domaines d'application ;
- La deuxième raison est l'amélioration des performances des semi-conducteurs de puissance et l'émergence de nouveaux composants, qui permettent la mise en œuvre de stratégies de commande nouvelles et plus efficaces.

Un onduleur est dit "multi-niveaux" lorsqu'il génère une tension découpée de sortie composée d'au moins trois niveaux.

Pour un réseau moyen tension, il est difficile de connecter directement un seul commutateur à semi-conducteur de puissance. En conséquence, les onduleurs multi-niveaux ont été introduits comme alternative dans les applications à haute puissance et moyenne tension car ils proposent plusieurs avantages [18].

## 2.2 Etat de l'art

Lorsque les convertisseurs statiques permettent de commuter chaque entrée en sortie entre deux niveaux de tension ou de courant, on parle alors de convertisseur à deux

niveaux, les critères de contrôle de transfert d'énergie en règle générale, dépendent de la nature des sources et des contraintes imposées par l'application.

De très nombreuses investigations ont été faites sur un convertisseur à deux niveaux, dont l'entrée est une source de tension continue et la sortie est une machine électrique à courant alternatif. L'analyse du courant et de la tension des machines électriques alimentées.

Les convertisseurs à deux niveaux ont montré plusieurs limitations, notamment des brusques changements de tension ( $dv/dt$ ) Mais aussi l'existence des harmoniques excessifs pour le système, occasionnant des pertes dans la charge et le convertisseur (surtout des pertes joules dans la charge et dans le convertisseur).

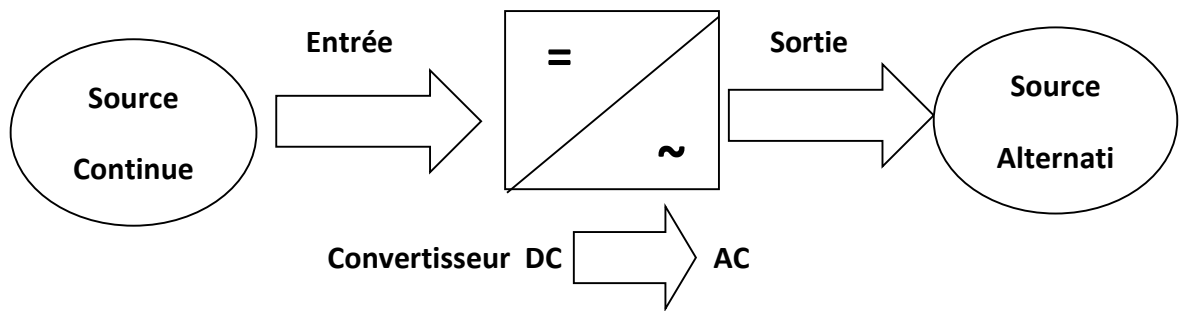
C'est pour pallier à ces inconvénients que certains chercheurs ont introduit des convertisseurs ayant trois niveaux ou plus, de tension et qui génèrent moins d'harmoniques

D'un autre côté, la naissance des applications nécessitant une alimentation moyenne tension et facilement réglable a poussé la communauté d'électroniciens de puissance à chercher de nouvelles structures de convertisseurs, qui contournent la limitation en tension de blocage des principaux semi-conducteurs de puissance. Ces nouvelles structures furent une extension des convertisseurs à trois niveaux existants. C'est ainsi qu'il a été possible d'obtenir plusieurs niveaux de tension à la sortie des convertisseurs, réduisant par la même occasion le ( $dv/dt$ ) lors des commutations.

Un convertisseur multi niveaux peut commuter chaque entrée en sortie au moins entre trois niveaux de tension ou de courant. De manière générale plus le nombre de niveaux de la tension générée par le convertisseur est grand, plus faible sera son taux de distorsion harmonique.

### **2.3 Définition d'un onduleur**

Un onduleur est un dispositif électronique de puissance pour générer des tensions et des courants alternatifs à partir d'une source d'énergie électrique de tension ou de fréquence différente, et la conversion d'énergie électrique de la forme continue DC à la forme alternative AC [22] (*Figure 2.1*).



**Figure 2. 1:** schéma de la conversion alternée continue (DC-AC).

### 2.3.1 Classification des onduleurs [23]

Les onduleurs peuvent être classés en plusieurs types en fonction de la sortie, de la source, du type de charge, etc. Voici la classification complète des circuits de des onduleurs :

#### **a Selon la caractéristique de sortie**

1. Onduleur à onde carrée.
2. Onduleur à onde sinusoïdale.
3. Onduleur à onde sinusoïdale modifiée.

#### **b Selon la source de l'onduleur :**

1. Onduleur de source de tension : L'onduleur de source de tension a une tension de source CC rigide, c'est-à-dire que la tension CC a une impédance limitée ou nulle aux bornes de l'entrée de l'onduleur.
2. Onduleur de source de courant : Un onduleur de source de courant est alimenté en courant variable par une source CC à haute impédance. Les ondes de courant résultantes ne sont pas influencées par la charge

#### **c Selon le type de charge**

Onduleur monophasé :

1. Onduleur demi-pont
2. Onduleur à pont complet

Onduleur triphasé :



1. Mode 180 degrés
2. Mode 120degrés

***d Selon différentes techniques MLI***

1. Modulation de largeur d'impulsion simple (SPWM).
2. Modulation de largeur d'impulsion multiple (MPWM).
3. Modulation de largeur d'impulsion sinusoïdale (SPWM).
4. Modulation sinusoïdale modifiée de la largeur d'impulsion (MSPWM).

***e Selon le nombre de niveau de sortie***

1. Onduleur ordinaire à deux niveaux.
2. Onduleur à plusieurs niveaux.

## **2.4 Les onduleurs multi-niveaux**

Un onduleur à plusieurs niveaux est un dispositif électronique de puissance qui est capable de fournir le niveau de tension alternative souhaité à la sortie en utilisant plusieurs tensions CC de niveau inférieur comme entrée. La plupart du temps, un onduleur à deux niveaux est employé pour entraîner la tension alternative à partir de la tension continue. Parce que l'onduleur peut fonctionner à une tension de sortie plus élevée, tout en générant des composants harmoniques plus élevés dans la tension de sortie de commutation, l'onduleur est très populaire et a été de plus en plus utilisé dans les entreprises industrielles et les applications de systèmes électriques [18], [19].

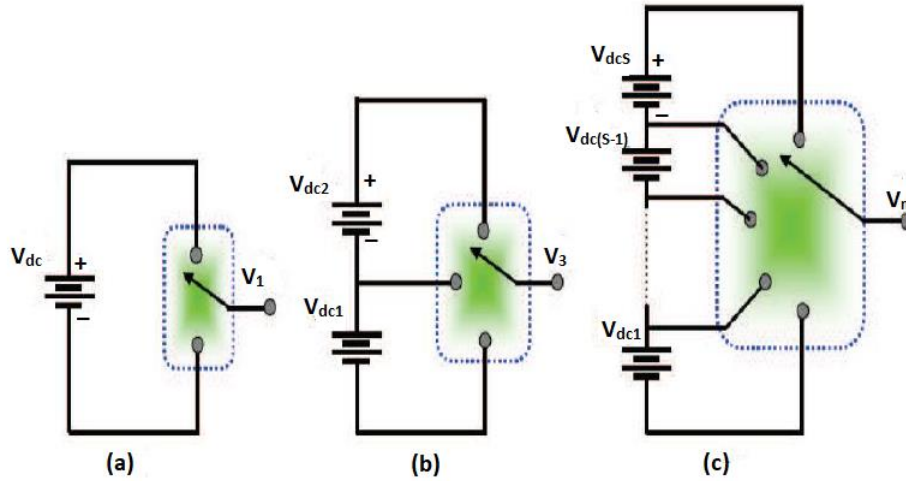
Fondamentalement, l'utilisation d'onduleurs à plusieurs niveaux a la capacité de produire une tension de bonne qualité avec une faible fréquence de commutation, ce qui réduit les Pertes d'énergie et les contraintes sur les composants statiques [18].

### **2.4.1 Principe de l'onduleur multi-niveaux**

Le principe général du comportement à plusieurs niveaux est illustré sur la (Figure 2.2). [24], [25].

La Figure 2.2.a présente le transducteur à deux niveaux. Dans cette figure les commutateurs à semi-conducteurs ont été remplacés par un commutateur idéal. La

tension de sortie ne peut prendre que deux valeurs : 0 ou  $V_{dc1}$ . Pour la *Figure 2.2.b*, la tension de sortie de trois niveaux peut prendre trois valeurs : 0,  $V_{dc1}$  ou  $V_{dc1} + V_{dc2}$ . Enfin, la *Figure 2.2c* montre le cas général des  $m$  niveaux [26].



**Figure 2. 2 : Onduleur à niveaux multiples [24].**

(a) : Onduleur à niveaux multiples à deux

(b) : Onduleur à niveaux multiples à trois

(c) : Onduleur à niveaux multiples à  $m$  niveaux

## 2.4.2 L'intérêt des onduleurs multi-niveaux

L'onduleur multi-niveaux est un convertisseur statique qui génère une tension de sortie de coupure composée d'au moins trois niveaux. Ce convertisseur présente plus particulièrement deux avantages :

D'un côté, la structure à plusieurs niveaux peut limiter la limite de tension prise en charge par l'interrupteur d'alimentation : lorsque chaque élément est dans un état verrouillé, le pourcentage de la tension totale du bus pris en charge est encore plus faible. Le nombre de niveaux est élevé. D'un autre côté, la tension de sortie fournie par le convertisseur multi-niveaux a une qualité spectrale intéressante. Le produit du nombre de niveaux intermédiaires réduit l'amplitude de chaque front montant ou descendant de la tension de sortie. Par conséquent, l'amplitude est donc plus faible. Dans le cas de la modulation de largeur d'impulsion, l'utilisation de convertisseurs multi-niveaux liés à un contrôle judicieux des composants de puissance peut également éliminer certains circuits harmoniques [27].

### **2.4.3 Avantage des onduleurs multi niveaux**

Les onduleurs multi niveaux ont été introduits comme produits alternatifs dans des conditions de haute puissance et de moyenne tension. Comparés aux onduleurs à deux niveaux, les onduleurs à plusieurs niveaux présentent d'énormes avantages. Ces avantages sont visibles du point de vue technique d'une part et du point de vue fonctionnel d'une autre part [28], [29] :

#### ***a Les avantages technologiques***

Dans un onduleur à plusieurs niveaux, la distribution de tension peut être obtenue dans un état stable, ce qui permet à chaque semi-conducteur d'être commuté indépendamment des autres semi-conducteurs. Cela rend le convertisseur plus puissant et efficace pendant le processus de commutation. L'amplitude de la tension du commutateur est réduite, ce qui facilite la gestion du commutateur.

#### ***b Les Avantages fonctionnels pour le convertisseur***

Un meilleur compromis est obtenu entre performances statiques (tension de saturation) et performances dynamiques (temps de commutation, perte de commutation, fréquence de commutation) et la capacité élevée d'accéder aux applications sont plus puissantes et largement utilisées

#### ***c Les Avantages fonctionnels pour les machines tournantes***

Les onduleurs à plusieurs niveaux produisent plus de tension que les onduleurs à deux tensions, ce qui améliore la qualité de la forme d'onde et réduit sa distorsion. Cela peut apporter de grands avantages, tels que la réduction de la perte de fer, l'augmentation de la durée de vie de l'isolateur ou la réduction du rayonnement électromagnétique des enroulements du moteur.

## **2.5 Différentes topologies d'onduleurs multi niveaux**

Les onduleurs multi niveaux conviennent pour les applications à haute tension en raison de leur capacité à synthétiser la tension de sortie formes d'onde avec un meilleur

spectre harmonique et atteindre des tensions plus élevées avec une capacité maximale limitée de l'appareil.

Les trois topologies de base des onduleurs multi niveaux sont présentées sur la (Figure 2.3) [28], [29].

- **Topologie à condensateur flottant**
- **Topologie en cascade**
- **Topologie à diode en boucle 'NPC'**

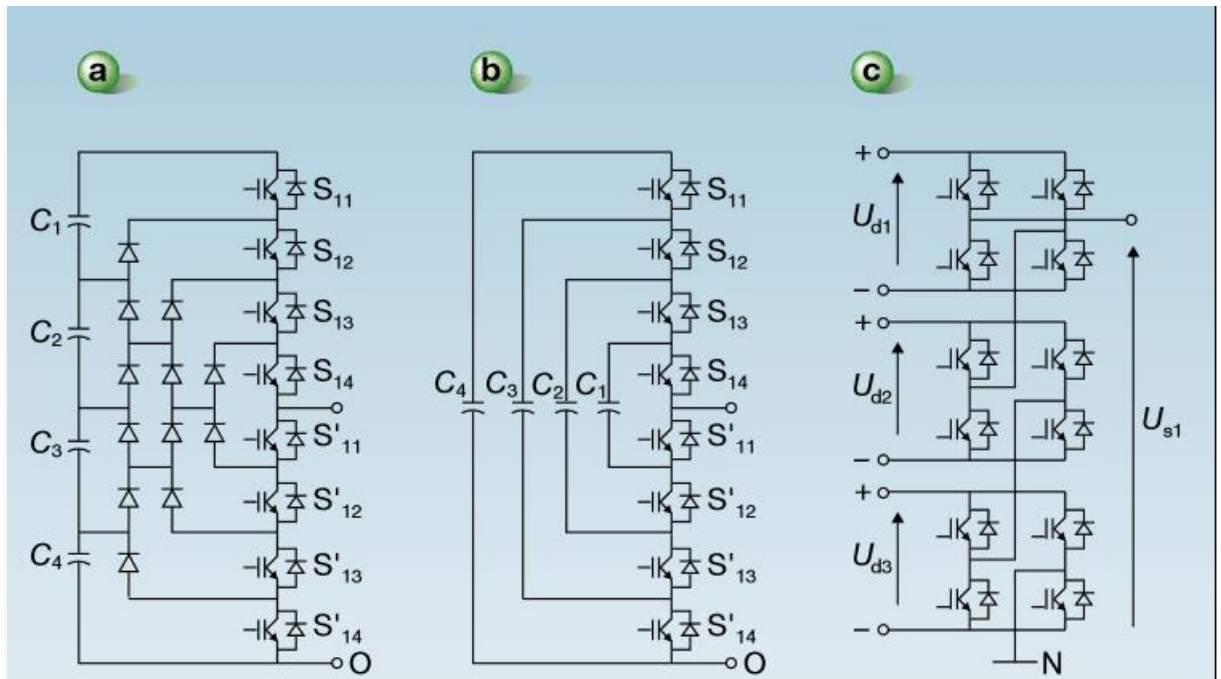


Figure 2. 3 : Différentes topologies d'onduleurs multi niveaux.

Avec :

- (a) : Onduleur NPC
- (b) : Onduleur multi niveaux à cellules imbriquées
- (c) : Onduleur multi niveaux à convertisseurs cascades.

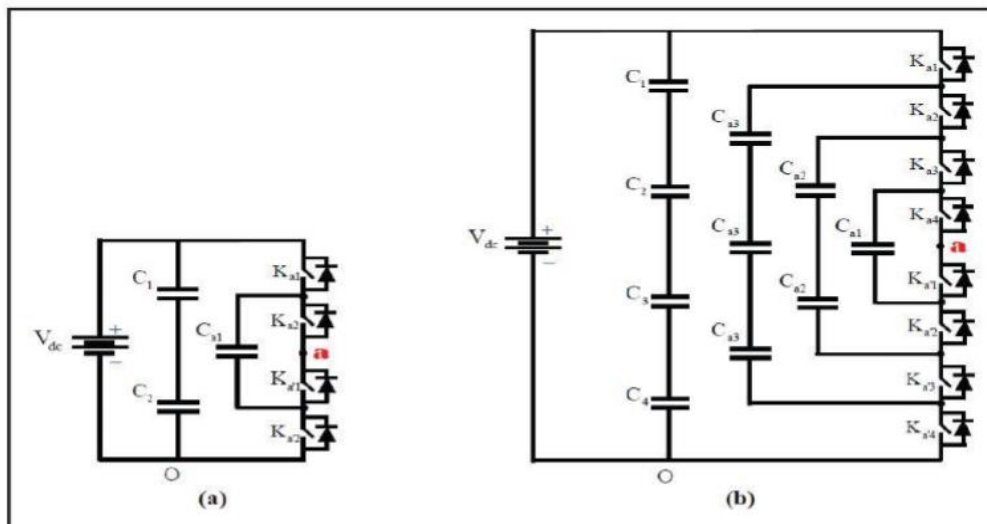
### 2.5.1 Topologie à condensateur flottant

La topologie à cellules imbriquées a été proposée par Meynard et Foch en 1992 [30]. La structure du convertisseur est similaire à la structure d'une diode de bouclage, sauf qu'il n'utilise pas de diodes de blocage, Chaque phase se compose d'une paire de commutateurs de puissance connectés en parallèle aux bornes du condensateur. Ils

sont généralement commandés de manière complémentaire de sorte que la tension de sortie de la branche est connectée à la borne positive ou négative du condensateur. L'onduleur utilise des condensateurs à sa place. Par conséquent, le nom est "onduleur à condensateur flottant". Cette structure est proposée pour résoudre le problème de l'équilibre de tension d'une part et des diodes excessives d'autre part [31].

### a Principe de fonctionnement

Pour un onduleur à trois niveaux, chaque branche possède quatre commutateurs contrôlables, quatre diodes et trois condensateurs ; deux condensateurs sont connectés en parallèle avec la tension d'entrée  $V_{dc}$ , et le troisième condensateur remplace deux diodes d'isolement [32] (Figure 2.4).

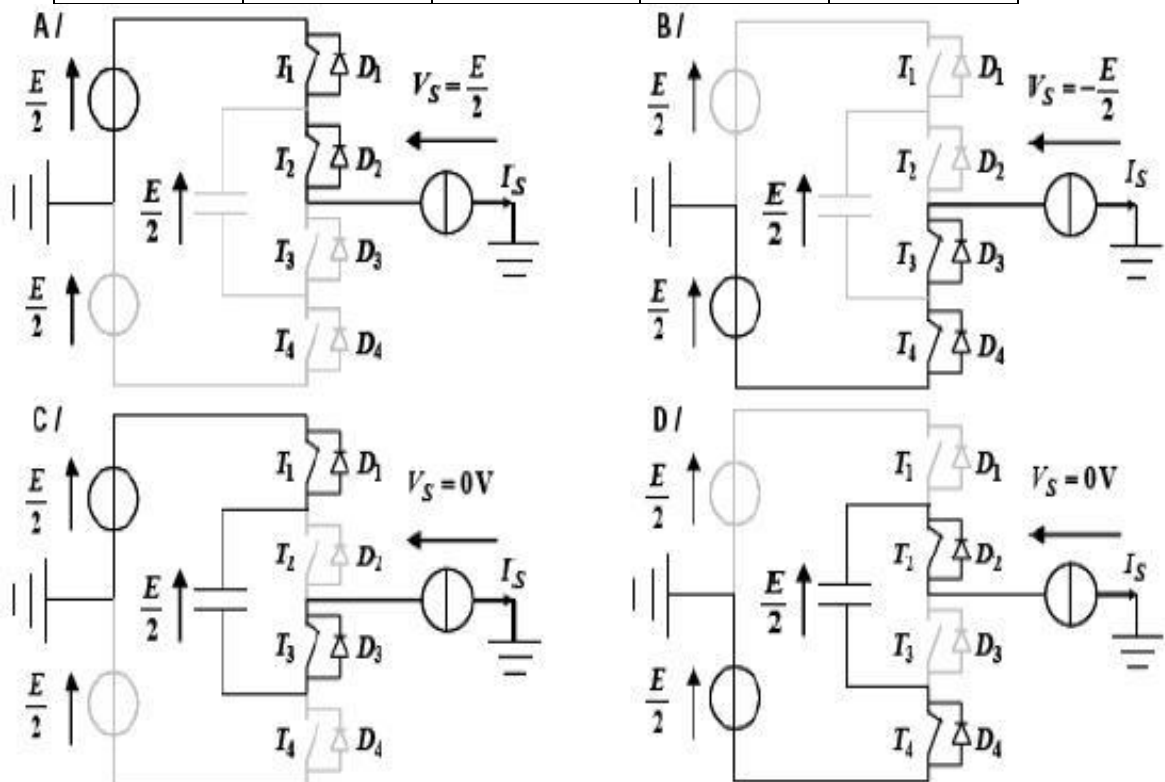


**Figure 2. 4:** Topologie avec condensateurs flottants NPC de niveau trois (a) et de niveau cinq (b).

Pour un convertisseur à condensateur flottant avec un niveau de tension  $N$ , nous avons  $2N + 1$  séquences de fonctionnement possibles qui peuvent générer un niveau de tension  $N$ . Surtout pour les convertisseurs à condensateurs flottants à trois étages, il existe quatre séquences fonctionnelles (voir le tableau 1.1 et la (Figure 2.5)) [31], [32].

**Tableau 2. 1:** répertorie les trois niveaux de tension de sortie ( $V_{ao}$ ) et les états de commutation possibles.

Ka1	Ka2	Ka1'	Ka2'	$V_{ao}$
1	1	0	0	$V_{dc} / 2$
0	0	1	1	$-V_{dc} / 2$
1	0	1	0	0
0	1	0	1	0



**Figure 2. 5:** configuration possible d'un bras d'onduleur trois niveaux à condensateur flottant.

### **b Les avantages**

1. Le concept de condensateurs cellules imbriquées peut être appliqué à de nombreux types de convertisseurs DC / AC ou AC / DC la plupart des stratégies de modulation sont facilement applicables à cette topologie.
2. La tension sur le condensateur est automatiquement équilibrée par cette stratégie de modulation conventionnelle. Si nécessaire, la tension du

condensateur peut être activement contrôlée en modifiant de manière appropriée le signal de commande.

3. Le concept peut être facilement appliqué à d'autres types de convertisseurs pour la transmission de puissance unidirectionnelle et bidirectionnelle.
4. Sa modularité permet à la stratégie de contrôle d'être facilement étendue et ajustée à un grand nombre de niveaux.
5. Comme les condensateurs ne seront jamais connectés en série entre différents niveaux, il n'y a plus de problème de déséquilibre de tension [33].

### ***c Inconvénients***

1. La topologie nécessite de nombreux condensateurs haute tension, bien plus que les autres topologies. Ces condensateurs doivent conduire le courant à pleine charge pendant au moins une partie du cycle de commutation. Heureusement, si la fréquence de commutation est élevée, la capacité de ces condensateurs est généralement relativement faible.
2. La topologie en est de nature non tolérante aux pannes.
3. Contrairement au premier cas où seule la capacité  $(N-1)$  est requise. De plus, il est clair qu'une grande valeur efficace de courant circulera à travers ces condensateurs [27].

## **2.5.2 Topologie en cascade**

En 1975, un convertisseur en cascade a été proposé, qui comprenait une connexion en série de plusieurs ponts avec deux niveaux monophasés. Ces ponts sont connectés à des sources d'alimentation CC distinctes, et l'onduleur en cascade à plusieurs niveaux introduit l'idée d'utiliser des sources d'alimentation CC distinctes pour générer des ondes de tension CA. Chaque onduleur monophasé est connecté à sa propre alimentation CC. La sortie de chaque onduleur monophasé est une onde de tension alternative. Les (*Figure 2.6, 2.7, 2.8*) présentent les onduleurs à trois, cinq et sept niveaux [34].

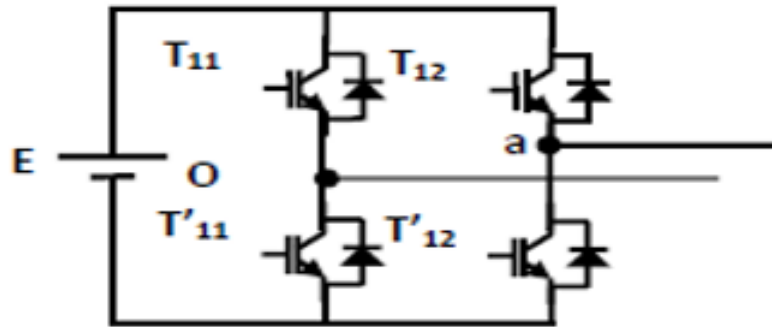


Figure 2. 6 : Onduleur en cascade à 3 niveaux.

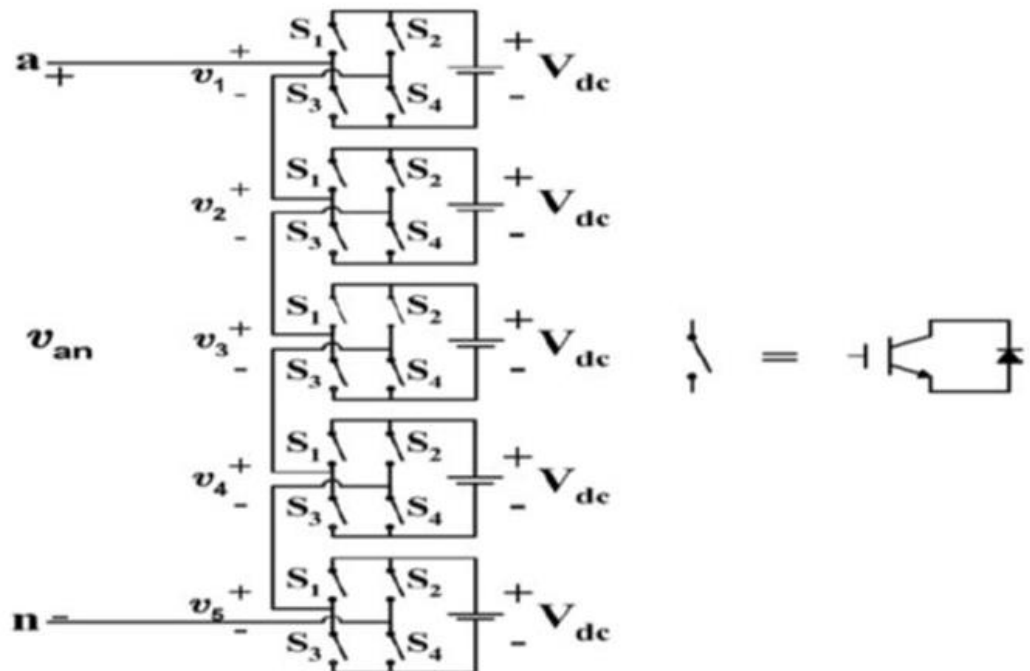


Figure 2. 7: onduleur multi niveau en cascade à cinq niveaux.



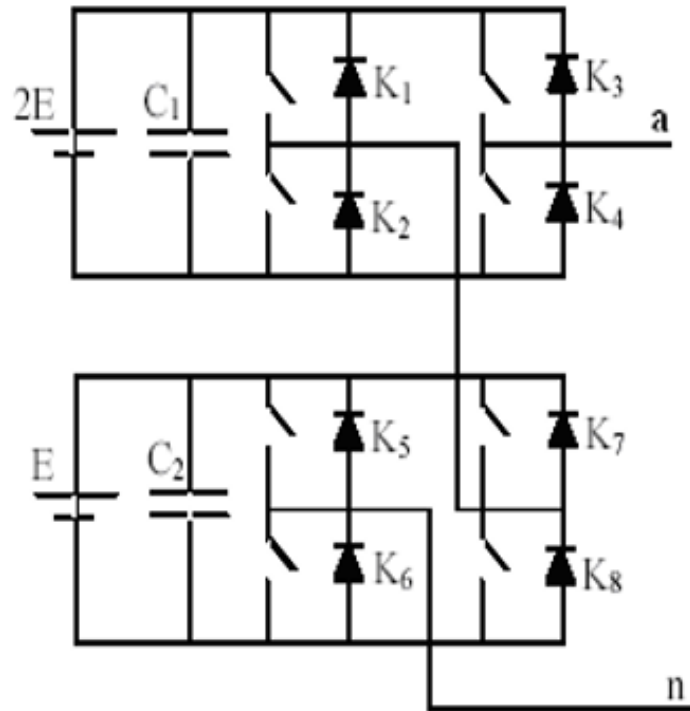


Figure 2. 8: Onduleur en cascade à 7 niveaux.

**a Principe de fonctionnement**

La structure de l'onduleur en cascade à 3 niveaux est la même que celle de l'onduleur monophasé traditionnel dans le pont complet (voir le *tableau 2.2*) Cependant, la technique de contrôle est différente, ce qui permettra trois niveaux de tension [35].

Tableau 2.2: Onduleur cascade à trois niveaux.

T11	T12	T'11	T'12	Vao
1	0	0	1	Vdc
0	1	1	0	-Vdc
0	0	1	1	0

**b Les avantages**

1. Afin d'obtenir le même nombre de niveaux de tension, ce type de convertisseur nécessite moins de composants.

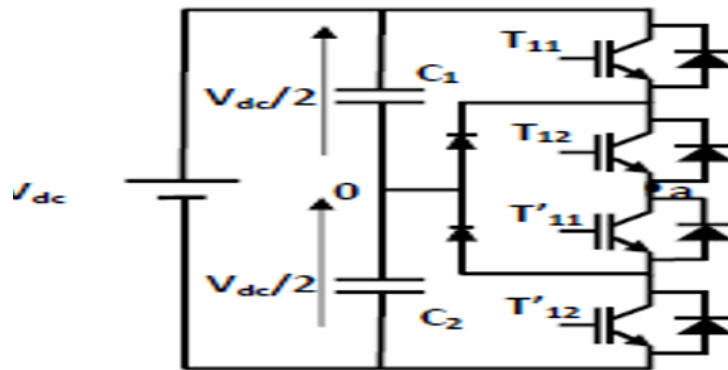
2. Ce type d'onduleur est non seulement facile à entretenir, mais fournit également une méthode très pratique pour augmenter le nombre d'étages dans le système
3. Le nombre de niveaux de tension de sortie possibles est plus du double du nombre d'alimentations CC ( $N = 2s + 1$ ).
4. Comme tout pont monophasé, la construction modulaire a la même structure.
5. Contrairement aux diodes de bouclage et aux onduleurs à condensateur flottant, aucune autre diode n'est requise [35].

**c Inconvénients**

1. L'alimentation CC doit être équilibrée entre différents niveaux.
2. Plus de connecteurs / câbles sont nécessaires pour connecter l'alimentation CC.
3. Chaque pont nécessite une grande quantité de tension continue isolée [27].

**2.5.3 Topologie à diode en boucle ' NPC' (Neutral-Point Clamped)**

« NPC » qui a été présenté par 'Nabae en 1981 et al' [27]. Cette topologie est la plus pratique d'onduleur de tension multi niveaux. Le but est de réduire l'amplitude des harmoniques injectées dans la charge par l'onduleur pour des applications telles que la puissance du moteur. Le premier onduleur NPC a été développé en superposant deux commutateurs de base pour trois niveaux de tension de sortie, chaque commutateur de base étant alimenté par une source de tension CC distincte. Les (Figure 2.9, 2.10) suivantes présentent les onduleurs NPC à trois et cinq niveaux [36].



**Figure 2. 9:** Onduleur NPC à trois niveaux.

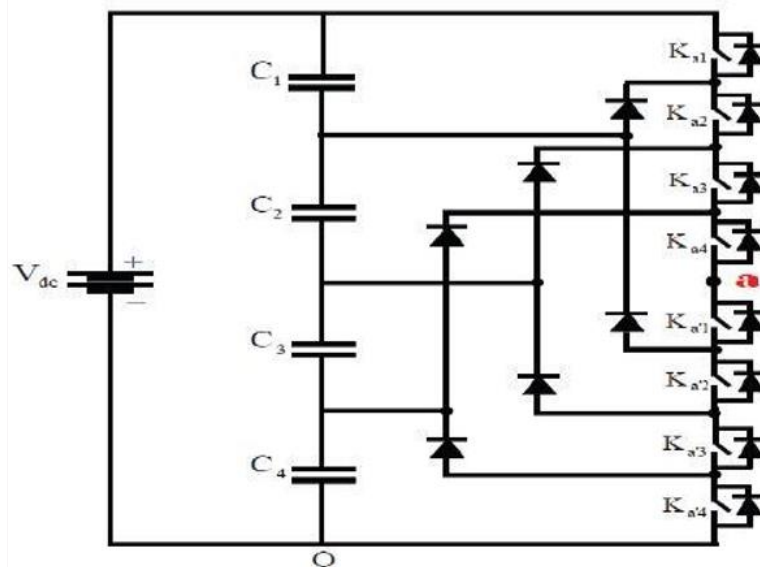
**a Principe de fonctionnement**

Chaque branche de cet onduleur comporte quatre : interrupteurs contrôlables et six diodes, et deux condensateurs branchés en parallèle avec la tension d'entrée  $V_{dc}$  comme représenté à (la Figure 2.10). Les interrupteurs sont complémentaires :

Les tensions de sortie sont indiquées dans le (tableau 2.3) [28],[29].

**Tableau 2. 3:** états de commutation et les tensions de sortie pour Diode NPC.

T11	T12	T'11	T'12	Vao
1	1	0	0	$V_{dc}/2$
0	0	1	1	$-V_{dc}/2$
0	1	1	0	0



**Figure 2. 10:** Onduleur NPC à cinq niveaux.

**b Les avantages de la topologie NPC présente plusieurs avantages**

1. Les composants de puissance à semi-conducteur bloquent la tension inverse, qui n'est que la moitié de la tension d'alimentation CC.
2. Cette topologie peut être généralisée et les principes utilisés dans la topologie de l'onduleur à trois niveaux peuvent être étendus pour les topologies de tout niveau.
3. Tous les étages partagent le même bus continu.
4. La fréquence fondamentale garantit un rendement élevé.
5. La méthode de contrôle est relativement simple.
6. Par rapport aux onduleurs triphasés traditionnels, les formes d'onde à trois niveaux offrent une meilleure qualité spectrale, ce qui rend les filtres passifs moins volumineux [37].

**c Les difficultés techniques dans cette topologie**

1. Pour les topologies à plus de trois niveaux, la diode de bouclage peut augmenter la contrainte de tension à une valeur égale à  $E(N-1)/N$ . Par conséquent, une connexion en diode en série peut être requise, ce qui complique la conception et cause des problèmes de fiabilité et de coût de mise en œuvre.

2. Cette topologie nécessite des diodes en anneau avec des vitesses de commutation élevées, et ces diodes doivent pouvoir supporter le courant à pleine charge [38].
3. En raison de la conduction périodique du dispositif de commutation, des dispositifs de commutation de différentes tailles sont nécessaire

## **2.6 Propriétés des principales structures**

### **2.6.1 Classification des topologies selon leur alimentation**

Les topologies telles que les onduleurs NPC et les onduleurs unitaires imbriqués divisent leurs tensions d'alimentation : la tension de sortie est inférieure ou égale à la tension d'entrée DC. Ils peuvent être exploités à partir d'une seule alimentation continue. En revanche, des structures telles que les onduleurs en cascade augmentent leur tension d'alimentation : la tension de sortie maximale est supérieure à chaque tension d'alimentation, qui est inférieure ou égale à la somme des tensions d'alimentation [35].

### **2.6.2 Nombres de composants nécessaires**

De point de vue du nombre de composants, les onduleurs à cellules cascadiées se montrent être le dénouement multi niveaux le plus avantageux, surtout quand le nombre de niveaux devient important. C'est effectivement le cas pour les applications monophasées telles que le filtrage actif ou la compensation statique, quand le convertisseur n'a pas besoin de fournir d'énergie au système. Pour les applications triphasées et pour un petit nombre de niveaux, les onduleurs NPC sont intéressants, car les condensateurs sont partagés par les différentes branches, ce qui permet un équilibrage de la puissance circulant entre les phases. Cet équilibrage permet une diminution notable de la taille des condensateurs intermédiaires [39].

## 2.7 Comparaison entre les trois topologies de base des convertisseurs multi-niveaux

Dans la littérature vous pouvez trouver des descriptions intéressantes de ces trois topologies de base dans la littérature, ainsi que leurs avantages et inconvénients, tels que ceux fournis par [Lai] et [Peng] ou Shakwek et Lewis. En résumé, le tableau 1.4 donne les principales caractéristiques des trois topologies de base à plusieurs niveaux des convertisseurs de niveau  $m$ . Il n'est pas évident de choisir la topologie à plusieurs niveaux la plus appropriée pour chaque application. Jusqu'à présent, dans la littérature il s'agit d'un défi non résolu du point de vue du nombre d'éléments, l'onduleur en cascade semble être la solution multi-niveaux la plus avantageuse, notamment lorsque le nombre de niveaux devient significatif. Nous utiliserons cette topologie plus tard dans notre étude [40], [41].

**Tableau 2. 4:** comparaison entre les trois topologies de base.

Configuration	Diode de bouclage	Condensateurs Flotteurs	En cascade
principaux de commutation	$2(m-1)$	$2(m-1)$	$2(m-1)$
Diode antiparallèle	$2(m-1)$	$2(m-1)$	$2(m-1)$
Diode de bouclage	$(m-1)(m-2)$	0	0
Condensateur de bus continu	$(m-1)$	$(m-1)$	$(m-1)/2$
Condensateur d'équilibrage	0	$(m-1)(m-2)/2$	0
Total	$m^2 + 2m - 3$	$(m^2 + 8m - 8)/2$	$(9/2)(m-1)$

### Remarque

En remarque que :selon le nombre de composants, l'onduleur en cascade semble être la solution multi-niveaux la plus avantageuse car le nombre de niveaux est important.

## 2.8 Autre topologie

Le convertisseur asymétrique hybride, Le convertisseur avec des ponts en cascade et sources CC/CC avec isolement, Le convertisseur avec commutation douce, Les convertisseurs reliés par transformateur, Le convertisseur Diode/Capacitor-Clamped : variante de l'onduleur NPC, Le convertisseur multi niveaux généralisé [34].

## 2.9 Domaines d'application d'onduleur multi-niveaux

1. Démarrage de machine haute puissance
2. Application dans le domaine de la traction ferroviaire et urbaine (France TGV).
3. Application aux navires marins et à la fourniture de systèmes de propulsion.
4. Application dans le domaine du réseau électrique
5. Réglage de la vitesse en changeant la fréquence de l'onduleur
6. Réglage de la vitesse via la tension de sortie de l'onduleur
7. Système de lavage [42].

## 2.10 Conclusion

Dans ce chapitre Nous avons vu les onduleurs multi-niveaux qui Représentent d'importants domaines de recherche. Nous avons présenté aussi les topologies principales de la conversion à plusieurs niveaux et leurs avantages et inconvénients. Ces topologies incluent principalement la technologie d'onduleur NPC à potentiel distribué, qui Sont : Topologie à condensateur flottant, Topologie en cascade, Topologie à diode en boucle ' NPC'. Une étude d'onduleurs à cinq et à huit niveaux est également présentée.

Le chapitre suivant sera consacré aux onduleurs multi niveaux de type NPC et leurs modélisation.

# Chapitre 3 Modélisation des onduleurs multi niveaux de type NPC et les différentes stratégies de la commande des onduleurs

---

## 3.1 Introduction

Les onduleurs multi-niveaux permettent de véhiculer des puissances élevées sans que les composants qui les constituent ne subissent des contraintes considérables lors de leur commande à l'ouverture ainsi qu'à la fermeture. La première structure d'onduleurs multi niveaux apparus est le NPC (*Neutral Point Clamped*) à trois niveaux, proposés par *Nabea*. Dans ce chapitre, nous allons étudier en détail l'onduleur de tension à trois niveaux de type NPC (structure et principe de fonctionnement). Nous présenterons aussi brièvement l'onduleur à cinq et à sept niveaux de type NPC.

Dans le cadre de cette étude nous établissons le modèle mathématique de l'onduleur à trois niveaux de tension de type NPC en mode commandable, en utilisant la notion de fonctions de connexion des interrupteurs et des demi-bras. Dans la deuxième partie de ce chapitre on expliquera les deux stratégies de modulation (i) pleine onde de type 180 degrés et (ii) la command MLI.

## 3.2 Onduleur classique à deux niveaux de tensions

Un onduleur classique à deux niveaux de tension est illustré sur la *Figure 3.1*. Il se compose de trois bras de commutation à transistors. Chaque bras est composé de deux unités, et chaque unité comprend une diode et un transistor qui fonctionnent dans un interrupteur forcé. Tous ces éléments sont considérés comme des



commutateurs idéaux. En mode contrôlable, le bras de l'onduleur est un interrupteur à deux positions qui fournit deux niveaux de tension à la sortie [43], [44].

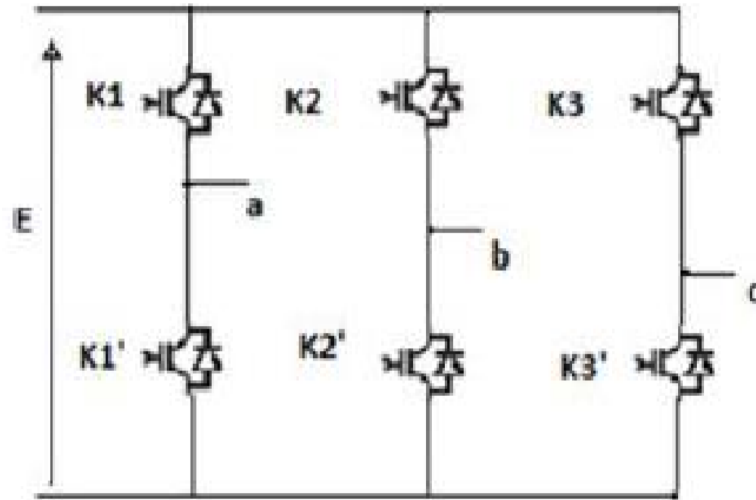


Figure 3. 1 : schéma d'un onduleur usuel à 2 niveaux.

### 3.2.1 Séquences 1 : Génération du niveau maximum

Utilisé pour un convertisseur de tension à 2 niveaux. Nous avons deux séquences de fonctionnement possibles qui peuvent produire deux niveaux de tension :

Dans ce cas, comme illustré sur la (Figure 3.2a) l'interrupteur K1 est passante et K1' est bloqué La tension de sortie  $V_a$  est :

$$V_a = + E. \tag{3.1}$$

La tension inverse appliquée au commutateur K1' est :

$$V_{K1'} = E \tag{3.2}$$

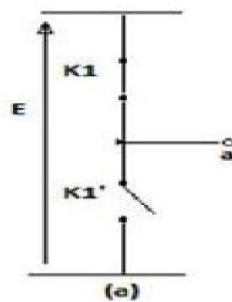


Figure 3. 2a : Séquences 1 de fonctionnement d'un bras de l'onduleur à deux niveaux.

### 3.2.2 Séquences 2 : Génération du niveau minimum

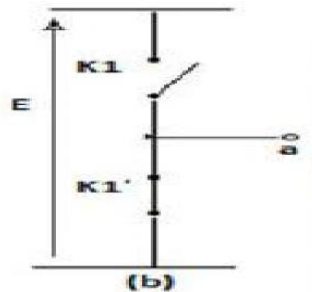
Dans ce cas, l'interrupteur K1 est bloquée et K1' est passante, comme illustré sur la (Figure 3.2b).

La tension de sortie  $V_a$  est :

$$V_a = 0 \quad (3.3)$$

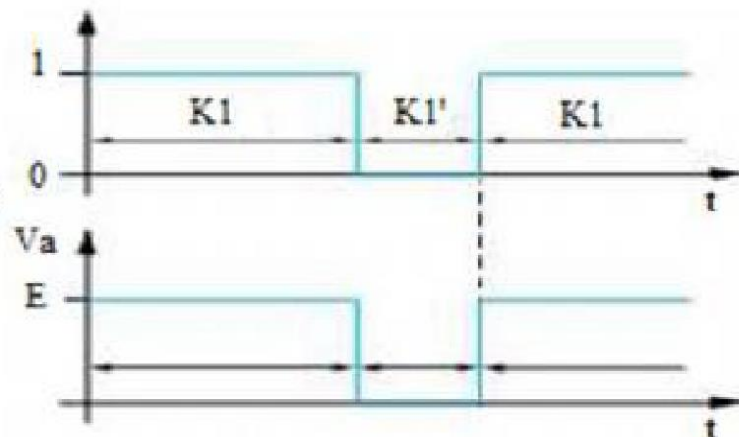
La tension inverse appliquée à l'interrupteur K1 vaut :

$$V_{K1} = +E. \quad (3.4)$$



**Figure 3. 2b** : Séquences 2 de fonctionnement d'un bras de l'onduleur à deux niveaux.

La figure ci-dessous illustre la forme d'onde de la tension de sortie  $V_a$  et le signal de commande de chaque commutateur :



**Figure3. 3**: forme d'onde de la tension de sortie  $V_a$  et le signal de commande de chaque commutateur.

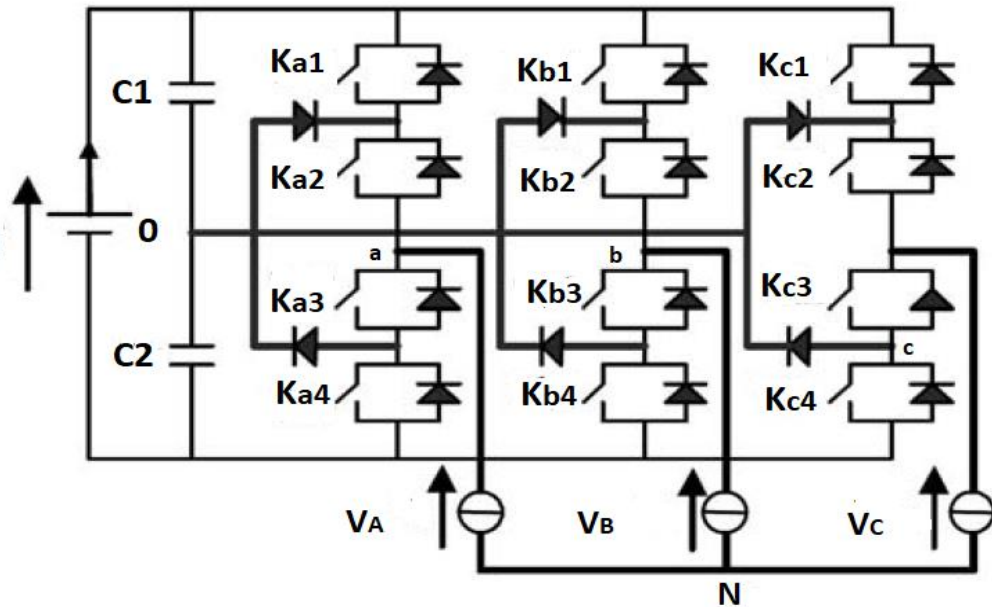
**Tableau 3. 1:** Table de commutation du convertisseur NPC 2 niveaux.

Ka1	Ka'	Va
1	0	E
0	1	0

### 3.3 Onduleur à trois niveaux de type NPC

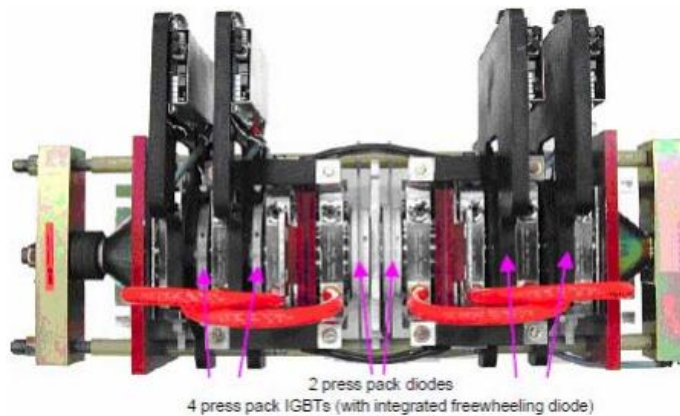
#### 3.3.1 La structure

L'idée de base de l'onduleur NPC est d'obtenir trois niveaux de tension de sortie en superposant deux interrupteurs de base, chaque interrupteur de base étant fourni par une source de tension CC distincte [45]. L'onduleur triphasé utilisé se compose de trois bras et de deux sources de tension continue. Chaque bras possède quatre interrupteurs en série et deux diodes intermédiaires. Chaque interrupteur est composé d'un transistor et d'une diode montée du début à la fin [46],[47], l'état de chaque interrupteur d'alimentation est contrôlé par le signal de porte correspondant. Lorsque le signal de porte est 1 (niveau haut), l'interrupteur d'alimentation est activé; lorsque le signal de porte est 0 (niveau bas), l'interrupteur d'alimentation est désactivé. Le milieu de chaque bras est connecté à une force électromotrice continue (E), En utilisant le diviseur de tension de condensateur formé par les condensateurs de filtrage de même capacité  $C1$  et  $C2$ , deux alimentations secondaires avec tension continue peuvent être obtenues, et chaque alimentation secondaire fournit une demi-tension ( $E / 2$ ). Connectez-vous les uns aux autres au point neutre noté o. Ce sont les mêmes pour éviter le déséquilibre de charge ( $C1 = C2$ , c'est-à-dire  $U_{c1} = U_{c2}$ ). Cet onduleur aurait trois niveaux car il fournit trois niveaux Tension ( $+ U_c$ ,  $0$ ,  $-U_c$ ). La structure est comme Indiqué dans la (Figure 3.4) [48], [49].



**Figure 3. 4:** Structure d'un onduleur triphasé à trois niveaux de type NPC.

Ainsi la (Figure 3.5) présente un bras d'onduleur triphasé à trois niveaux :



**Figure 3. 5:** bras d'onduleur triphasé à trois niveaux.

### 3.3.2 Principe de fonctionnement

La (Figure 3.4) qui représente le schéma structure d'un onduleur triphasé à trois niveaux de type NPC Le but est de réduire l'amplitude des harmoniques injectées dans la charge par l'onduleur pour des applications telles que la puissance du moteur. Cette structure est appelée convertisseur à clampé par neutre, n'utilise pas de transformateur d'isolement, et assure une distribution de tension d'entrée continue en série avec ces différents interrupteurs par une diode (pince) reliée au point milieu capacitif , (Figure 3.6) montre un bras d'onduleur triphasé à trois niveaux [50],[21] :

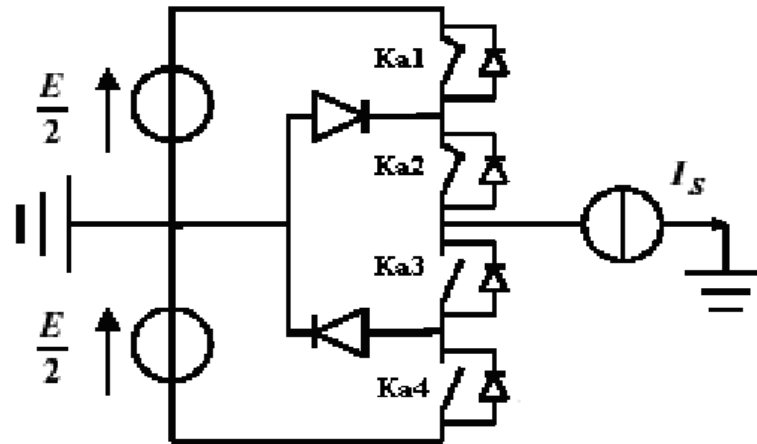


Figure 3. 6: Bras d'un onduleur NPC à trois niveaux.

### a Configurations d'un bras de l'onduleur à trois niveaux

Il est nécessaire de déterminer la valeur de la tension simple  $V_{ao}$  pouvant être utilisée entre la borne (a) de la charge et le point neutre O. Cette tension est complètement définie par les états (0 ou 1) des quatre interrupteurs  $K_{a1}$ ,  $K_{a2}$ ,  $K_{a3}$  et  $K_{a4}$  du bras.

Sur les  $2^4 = 16$  configurations possibles, seules trois configurations sont implémentées. Toutes les autres séquences n'ont aucun effet et doivent être évitées. En effet, ils provoquent un court-circuit de la source de tension continue ou provoquent la déconnexion de la charge.

L'onduleur à trois niveaux étant symétrique, l'étude peut se limiter au fonctionnement d'un seul bras, (où on distingue trois configurations possibles).

On donne ci-dessous le tableau récapitulatif (*tableau 2.2*) représente la tension de sortie  $V_{ao}$  d'un onduleur NPC à trois niveaux en fonction de l'état des interrupteurs, la tension au borne des interrupteurs de puissance n'excède jamais la moitié du bus d'entrée.

A la différence de l'onduleur à deux niveaux, chaque demi-bas de l'onduleur à trois niveaux utilisée non pas un interrupteur bidirectionnel mais deux, ce qui permet d'effectuer une commande décalée [51].

Pour ce type d'onduleur, seules trois configuration sont fonctionnelles. Elles sont décrites comme suit:

- **1ere Configuration {1100}**

Ka1, Ka2 sont passants et Ka3 et Ka4 sont bloqués alors :

-la tension de sortie est :

$$V_{ao} = +E/2. \quad (3.5)$$

- La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est:

$$V_{Ka3} = V_{Ka4} = +E/2 \quad (3.6)$$

La (Figure 3.7) résume la 1ere configuration du d'un bras :

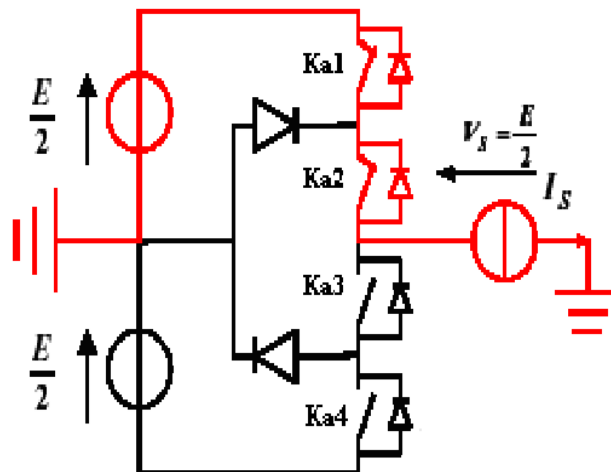


Figure 3. 7: 1ère configuration du 1er bras.

- **2ème Configuration {0110}**

- Ka2, Ka3 sont passants et Ka1 et Ka4 sont bloqués comme c'est illustré dans la (Figure 3.7).

La charge est court-circuitée via un interrupteur Ka2 ou Ka3 et une diode de bouclage (roue libre). Par conséquent, le point "a" est directement connecté au point neutre O.

La sortie  $V_{ao}$  est nulle:

$$V_{ao} = 0 \quad (3.7)$$

- La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{ka1} = V_{ka4} = +E/2 \quad (3.8)$$

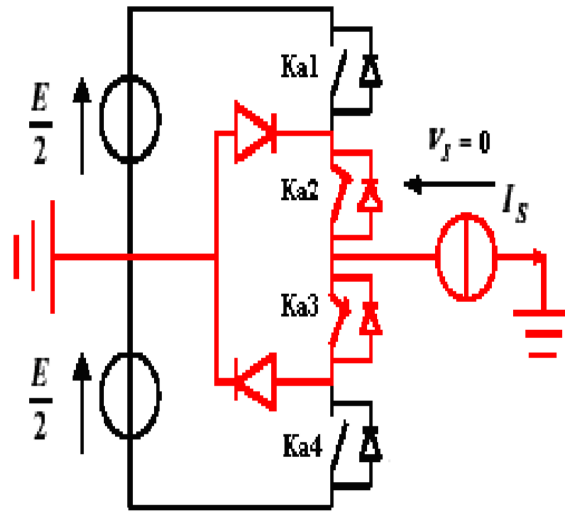


Figure 3. 8: 2<sup>ème</sup> configuration du 1<sup>er</sup> bras.

- 3<sup>ème</sup> Configuration : {0011}

-Ka3, Ka4 sont passants et Ka1 et Ka2 sont bloqués (Figure 3.9) la valeur de tension de sortie est :

$$V_{ao} = -E/2. \quad (3.9)$$

- la tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{ka1} = V_{ka2} = +E/2. \quad (3.10)$$

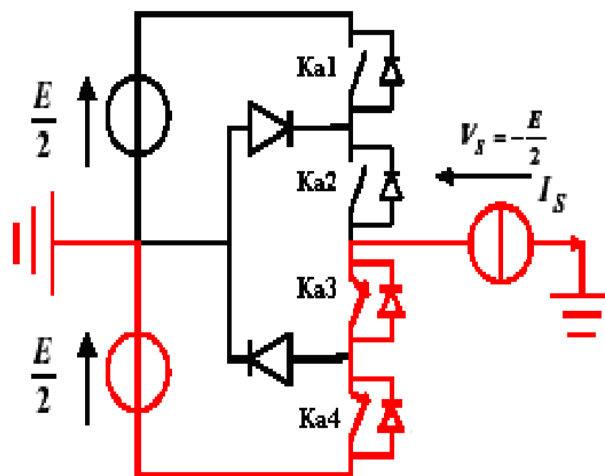
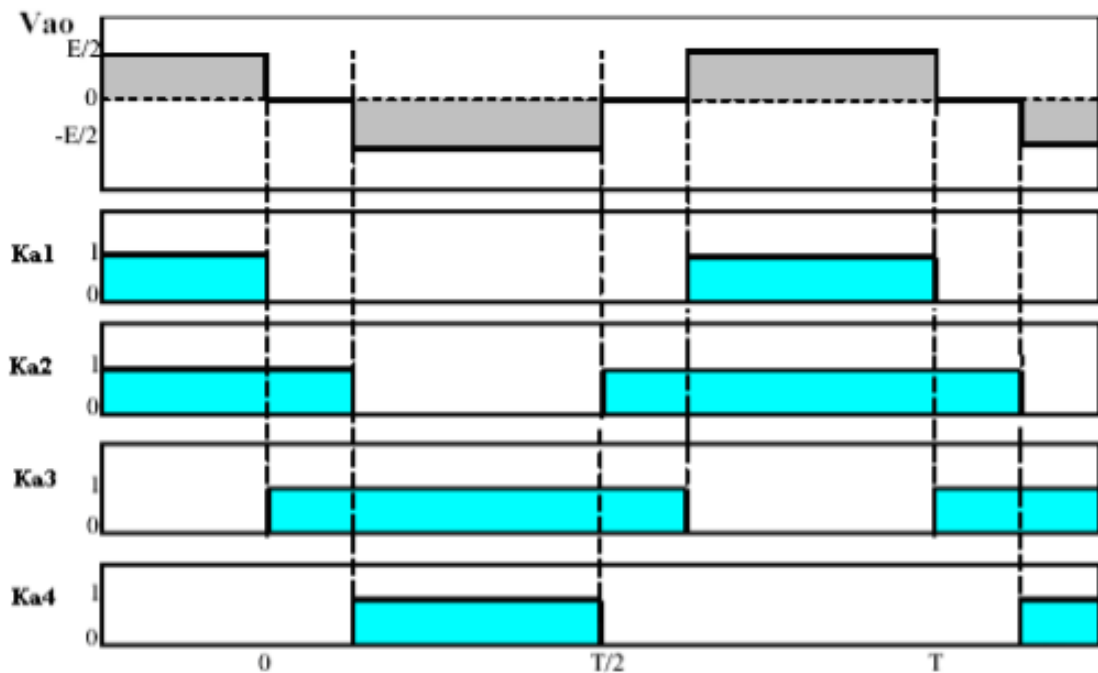


Figure 3. 9: 3<sup>ème</sup> configuration du 1<sup>er</sup> bras.

**Tableau 3. 2:** commutation du convertisseur NPC 3 niveaux [52],[53].

Etat des interrupteurs				Tension de sortie Vao
Ka1	Ka2	Ka3	Ka4	
1	1	0	0	$E/2$
0	1	1	0	0
0	0	1	1	$-E/2$

La figure ci-dessous illustre la forme d'onde de la tension de sortie Vao et le signal de commande de chaque commutateur :



**Figure 3. 10 :** Formes d'ondes d'un bras d'onduleur triphasé trois niveau de type NPC.

On remarque sur cette figure que la structure de l'onduleur à trois niveaux réduit  $E/2$  et la tension imposée à chaque interrupteur lorsqu'il est bloqué, alors dans la structure classique d'un onduleur à deux niveaux, la tension est égale à la tension continue complète  $E$ .



Cette caractéristique de l'onduleur à trois niveaux qui permet d'augmenter la tension et la puissance en cas d'applications à haute puissance.

La tension de sortie augmente sous forme d'escaliers possède plusieurs paliers en augmentant le nombre de niveaux.

### 3.4 Onduleur à cinq niveaux de types NPC

#### 3.4.1 La structure

La (Figure 3.11) représente la structure d'onduleur de tension à cinq niveaux de type NPC. L'onduleur triphasé étudié est constitué de trois bras et quatre sources de tension continue. Chaque bras comporte huit interrupteurs, plus deux diodes (IGBT). Chaque interrupteur est composé d'un transistor et une diode montés en tête bêche [54],[55],[56].

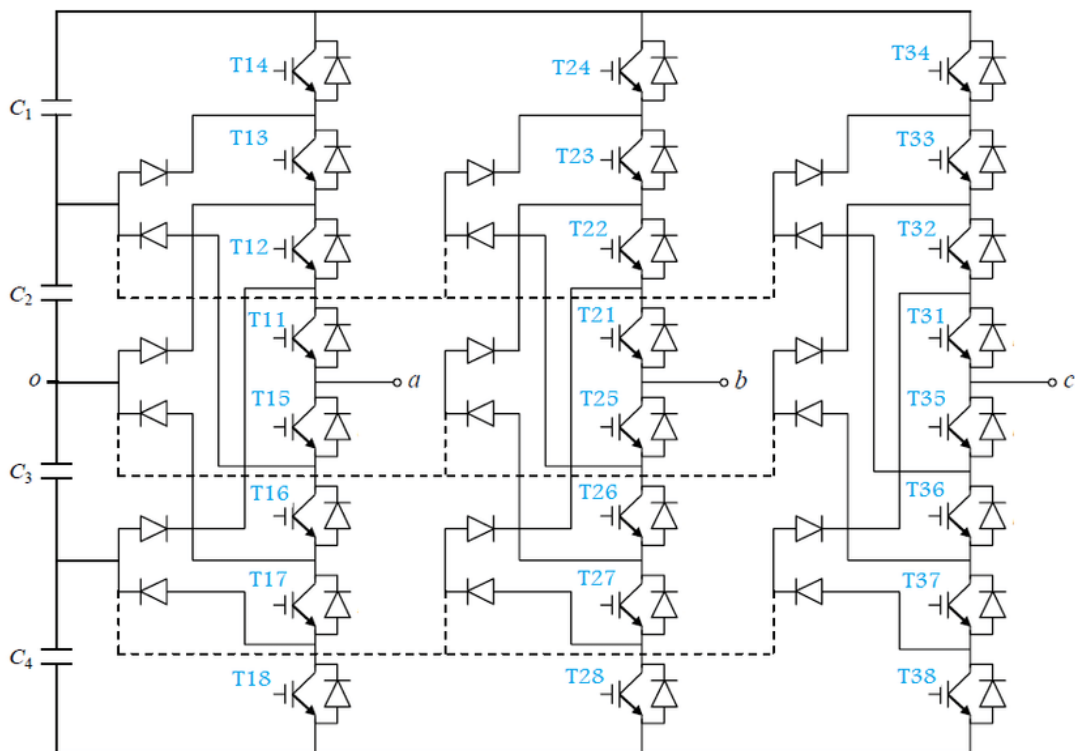


Figure 3. 11 : Schéma d'un onduleur NPC à cinq niveaux.

### 3.4.2 Principe de fonctionnement

Pour Définir la séquence de fonctionnement de l'onduleur, il faut définir d'abord les différents états que peut prendre la tension simple, Les états possibles d'un seul bras de commutation sont  $2^4 = 16$  états, qui peuvent être représentés par un quadruplet de 0 et 1. Seuls les cinq états suivants sont possibles [54], nous avons les cinq configurations suivantes :

- **1ere Configuration : {11110000}**

Ka1, Ka2, Ka3 et Ka4 sont passants et Ka5, Ka6, Ka7 et Ka8 sont bloqués (Figure 3.12).

La tension simple de sortie est :

$$V_{ao} = +E/2 \quad (3.11)$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est

$$V_{ka5} = V_{ka6} = V_{ka7} = V_{ka8} = +E/4 \quad (3.12)$$

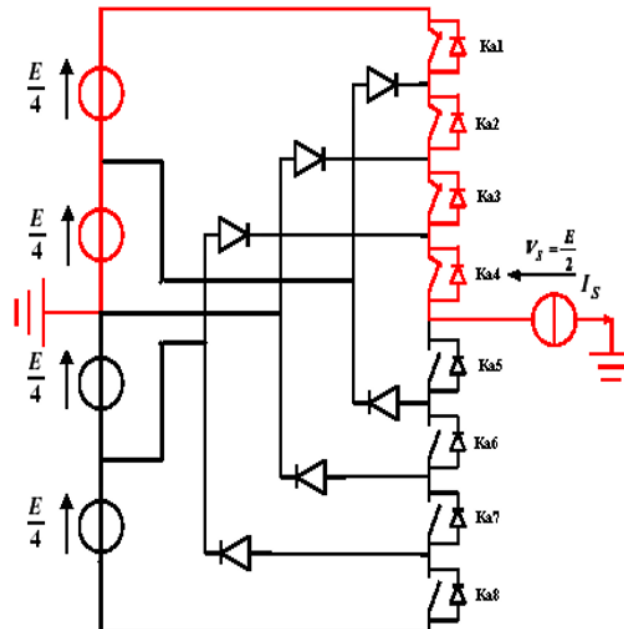


Figure 3. 22 : 1ere configuration du 1er bras.

- **2ième configuration {01111000}**

Ka2, Ka3, Ka4 et Ka5 sont passants et Ka6, Ka7, Ka8 et Ka1 sont bloqués (Figure 3.13)

La tension de sortie :

$$V_{ao} = +E/4 \quad (3.12)$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{ka1} = V_{ka6} = V_{ka7} = V_{ka8} = +E/4. \quad (3.13)$$

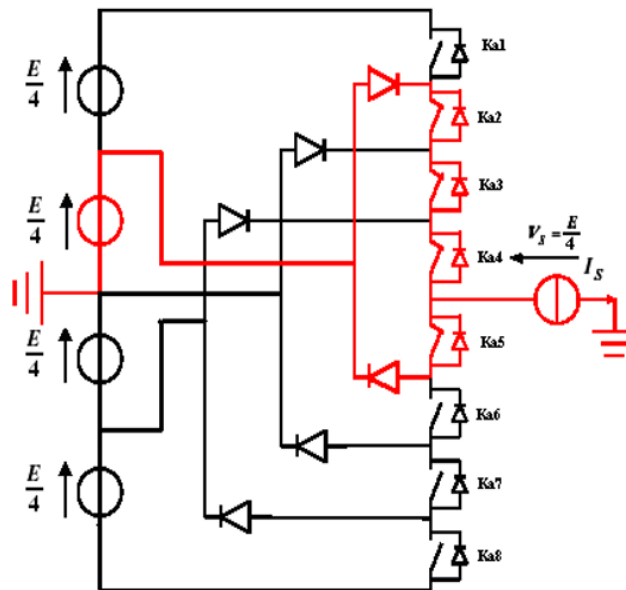


Figure 3. 33: 2ème configuration du 1er bras.

- 3ème configuration {00111100}

Ka3, Ka4, Ka5 et Ka6 sont passants et Ka7, Ka8, Ka1 et Ka2 sont bloqués comme c'est illustré dans la (Figure 3.14)

La tension de sortie :

$$V_{ao} = 0 \quad (3.14)$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{ka1} = V_{ka2} = V_{ka7} = V_{ka8} = +E/4 \quad (3.15)$$

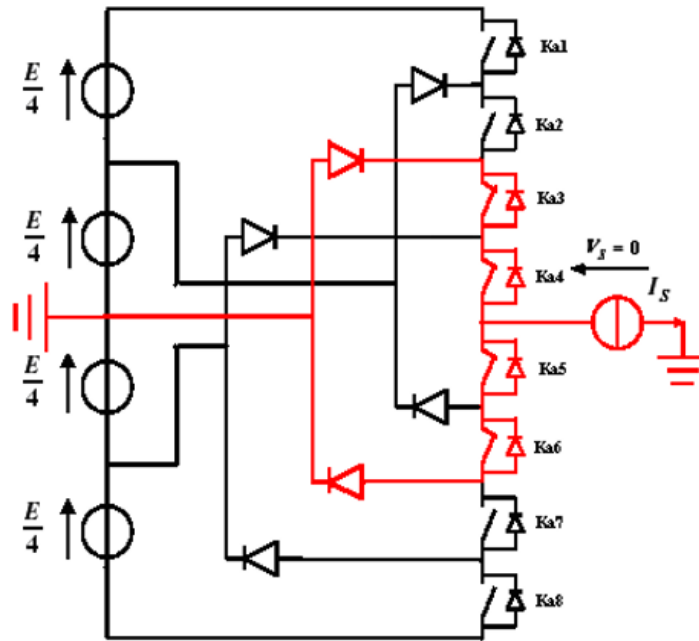


Figure 3. 44: 3eme configuration du 1er bras.

- 4ème configuration {00011110}

Ka4, Ka5, Ka6 et Ka7 sont passants et Ka8, Ka1, Ka2 et Ka3 sont bloqués

La tension de sortie :

$$V_{ao} = -E/4 \quad (3.16)$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{ka1} = V_{ka2} = V_{ka3} = V_{ka8} = +E/4 \quad (3.17)$$

La (Figure 3.15) résume la 3eme configuration :

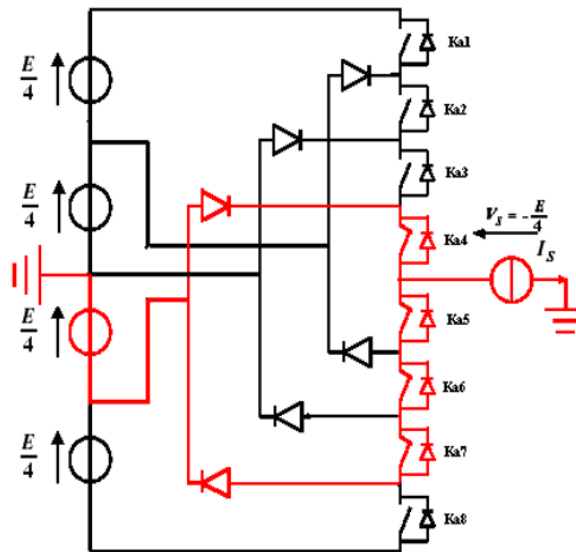


Figure 3. 55: 4eme configuration du 1er bras.

- **5ième configuration {00001111}**

Ka5, Ka6, Ka7 et Ka8 sont passants et Ka1, Ka2, Ka3 et Ka4 sont bloqués (Figure 3.16) la valeur de tension de sortie est :

$$V_{ao} = -E/2 \tag{3.18}$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{ka1} = V_{ka2} = V_{ka3} = V_{ka4} = +E/4 \tag{3.19}$$

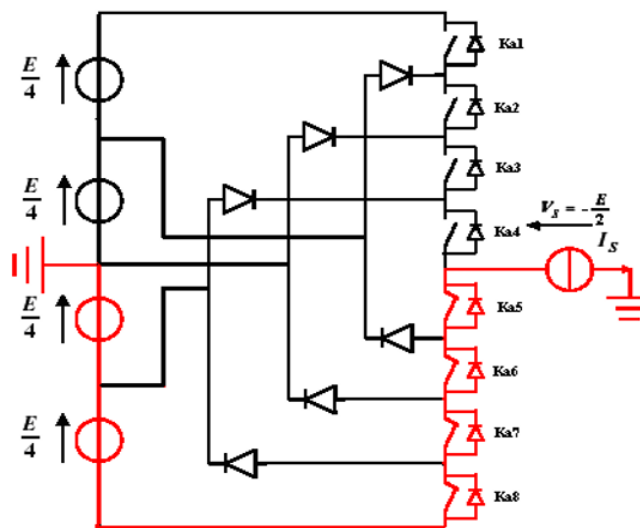
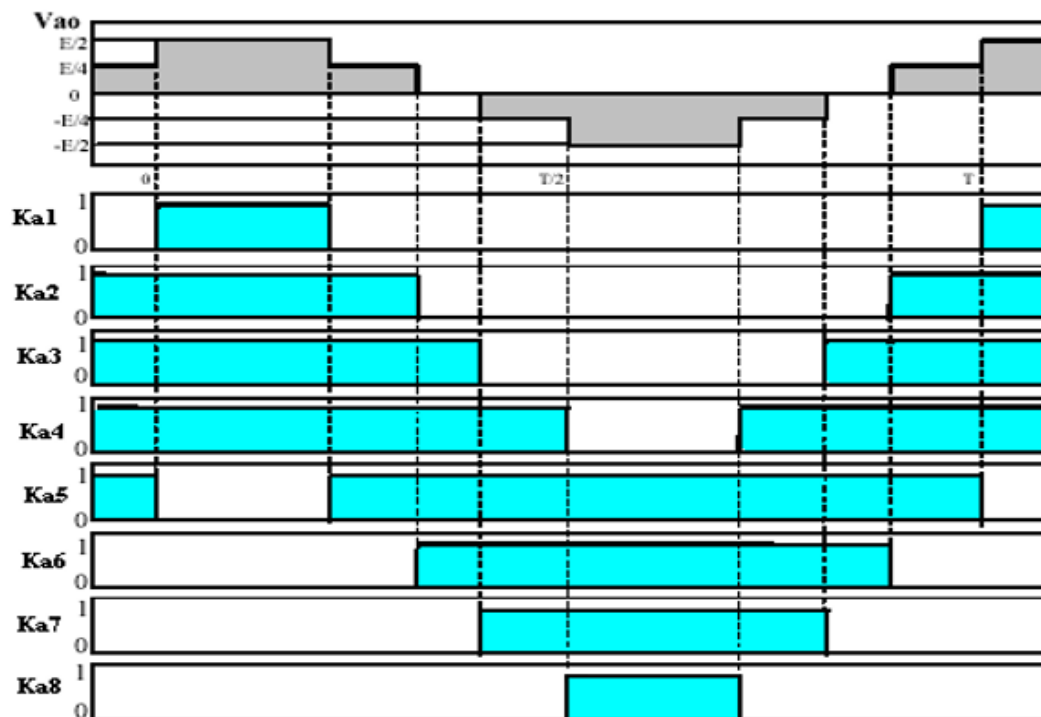


Figure 3. 66: représente 5eme configuration du 1er bras.

**Tableau 3. 3:** Table de commutation de l'onduleur NPC à 5 niveaux.

Etat des interrupteurs								Tension de sortie Vao
K a1	K a2	K a3	K a4	K a5	K a6	K a7	K a8	
1	1	1	1	0	0	0	0	E/2
0	1	1	1	1	0	0	0	E/4
0	0	1	1	1	1	0	0	0
0	0	0	1	1	1	1	0	-E/4
0	0	0	0	1	1	1	1	-E/2

La figure ci-dessous montre la forme d'onde de la tension de sortie Vao et le signal de commande de chaque interrupteur :



**Figure 3. 77 :** Forme d'onde de la tension de sortie d'un bras d'onduleur à cinq niveaux de type NPC.

## 3.5 Onduleur à sept niveaux de type NPC

### 3.5.1 La structure

L'onduleur triphasé à sept niveaux avec structure NPC est une nouvelle structure de conversion pour alimenter les moteurs à courant alternatif haute tension à tension et fréquence variables. Il se compose de trois bras et de six sources de tension continue. Chaque bras possède douze commutateurs, huit en série, quatre en parallèle et deux diodes. Chaque interrupteur Chaque interrupteur est composé d'un interrupteur bicommandable "transistors, GTO, IGBT, et une diode montée en tête bêche. La structure de l'onduleur NPC à sept niveaux est illustrée à la (*Figure 3.18*) [21], [56], [57] [58].

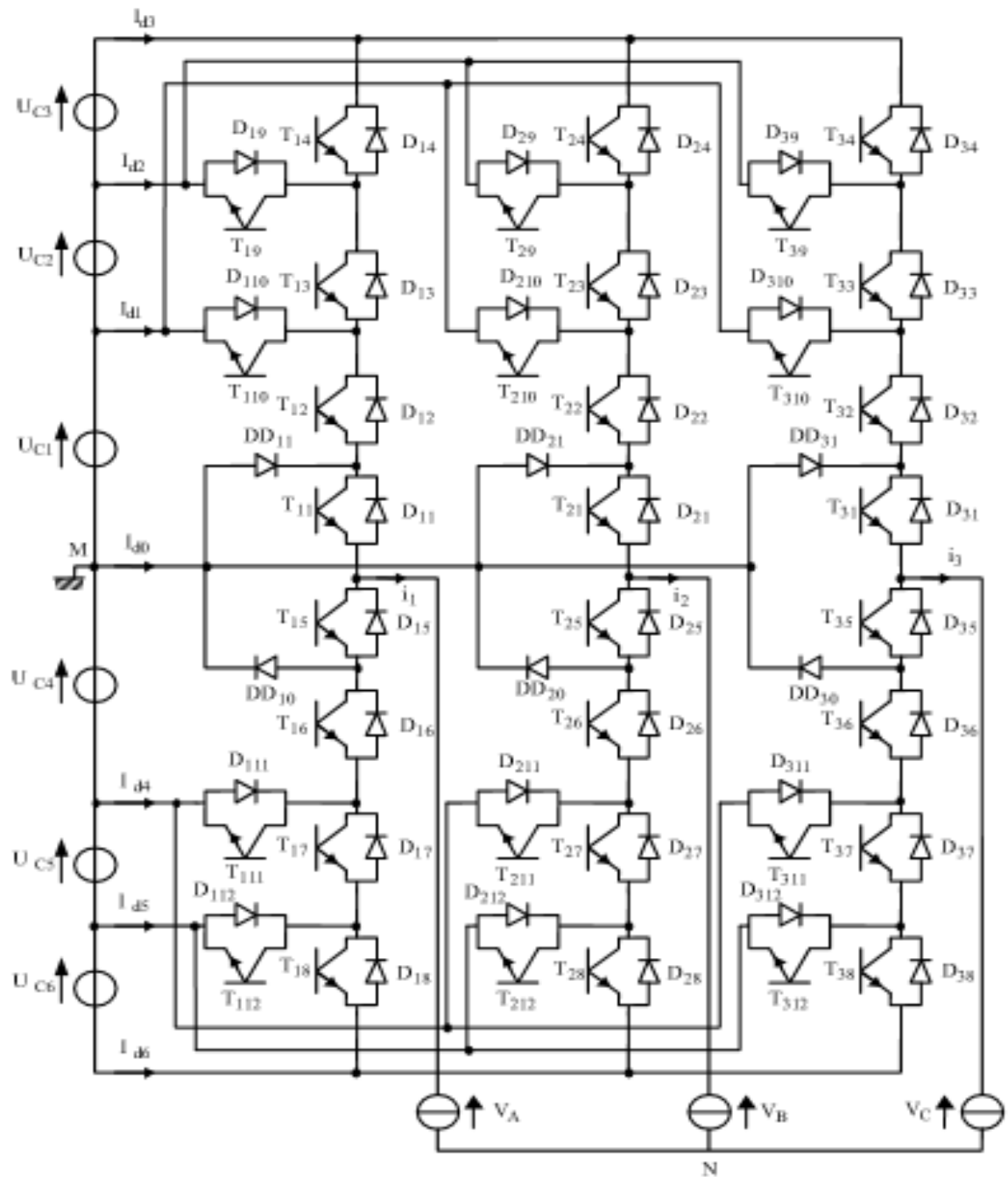


Figure 3. 88: l'onduleur NPC à sept niveaux.

### 3.5.2 Principe de fonctionnement

L'analyse topologique d'un bras de l'onduleur triphasé à sept niveaux à structure NPC montre qu'il existe sept configurations possibles Sant :



- **1 ère configuration {111111000000}**

Ka1, Ka2, Ka3, Ka4, Ka5 et Ka6 sont passants et Ka7, Ka8, Ka9, Ka10, Ka11 et Ka12 sont bloqué comme c'est illustré dans la (Figure 3.19) La tension simple de sortie est :

$$V_{ao} = +E/2 \quad (3.20)$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{Ka7} = V_{Ka8} = V_{Ka9} = V_{Ka10} = V_{Ka11} = V_{Ka12} = +E/6 \quad (3.21)$$

Pour bien comprendre la 1ere configuration nous avons la (Figure 3.20) représente 1ere configuration du **1er** bras :

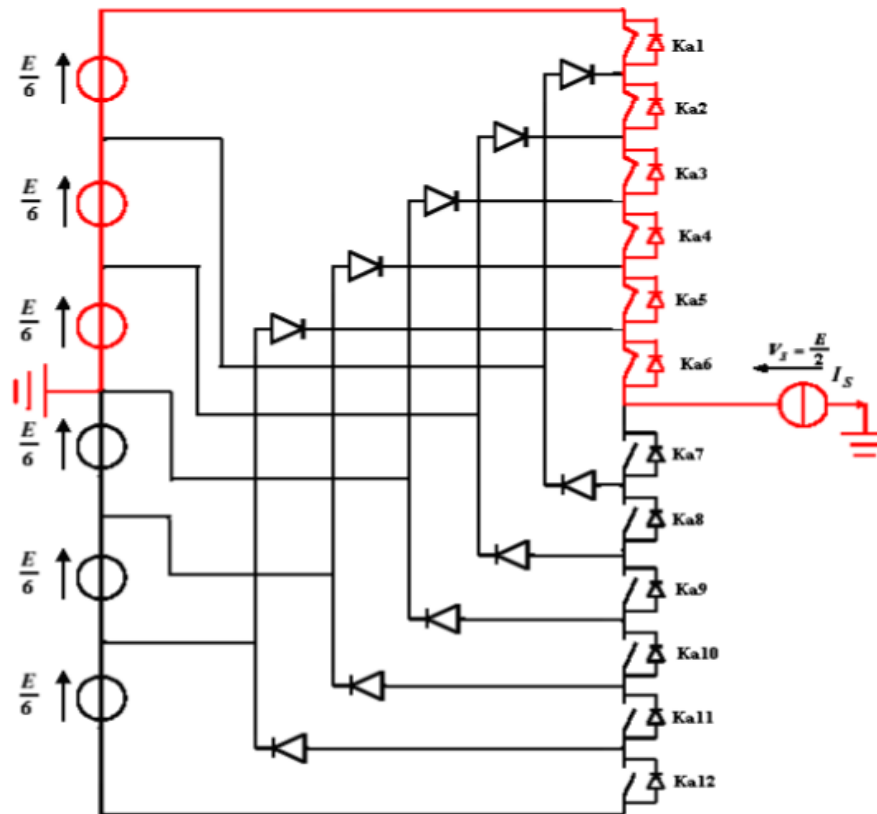


Figure 3. 99:1ere configuration du **1er** bras.

- **2ème configuration {011111100000}**

Ka2, Ka3, Ka4, Ka5, Ka6 et Ka7 sont passants et Ka8, Ka9, Ka10, Ka11, Ka12 et Ka1 sont bloqués (Figure 3.20) .La tension simple de sortie est :

$$V_{ao} = +E/3 \quad (3.22)$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{Ka1} = V_{Ka8} = V_{Ka9} = V_{Ka10} = V_{Ka11} = V_{Ka12} = +E/6V \quad (3.23)$$

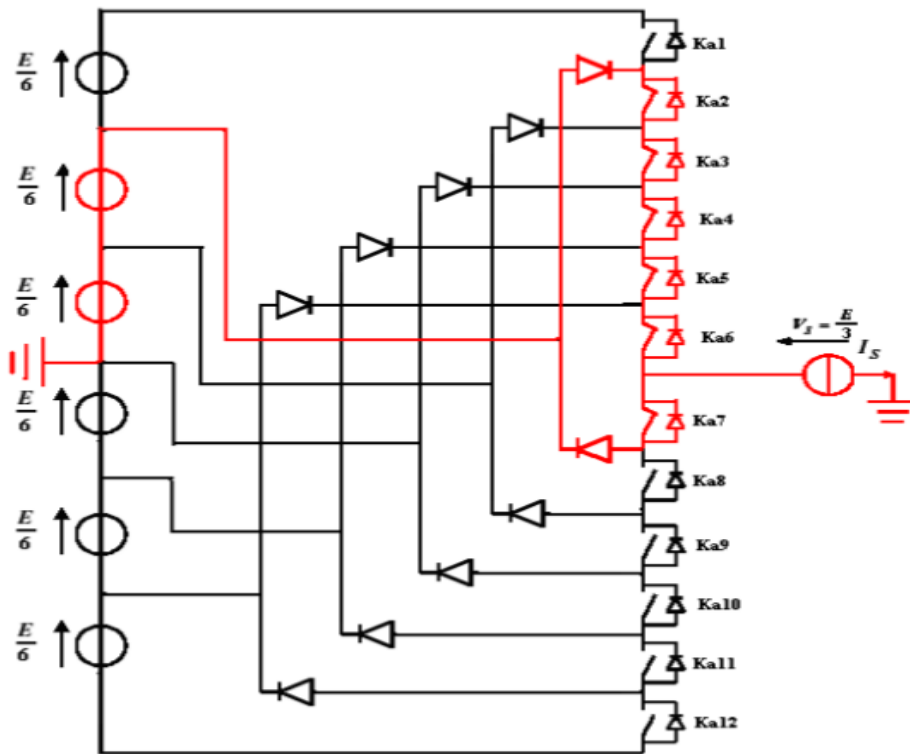


Figure 3. 20: 2eme configuration du 1er bras.

- 3ème configuration {00111110000}

Ka3, Ka4, Ka5, Ka6, Ka7 et Ka8 sont passants et Ka9, Ka10, Ka11, Ka12, Ka1 et Ka2 sont bloqués comme c'est illustré dans la (Figure3.21). La tension simple de sortie est :

$$V_{ao} = +E/6 \quad (3.24)$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{Ka1} = V_{Ka2} = V_{Ka9} = V_{Ka10} = V_{Ka11} = V_{Ka12} = +\frac{E}{6} \quad (3.25)$$

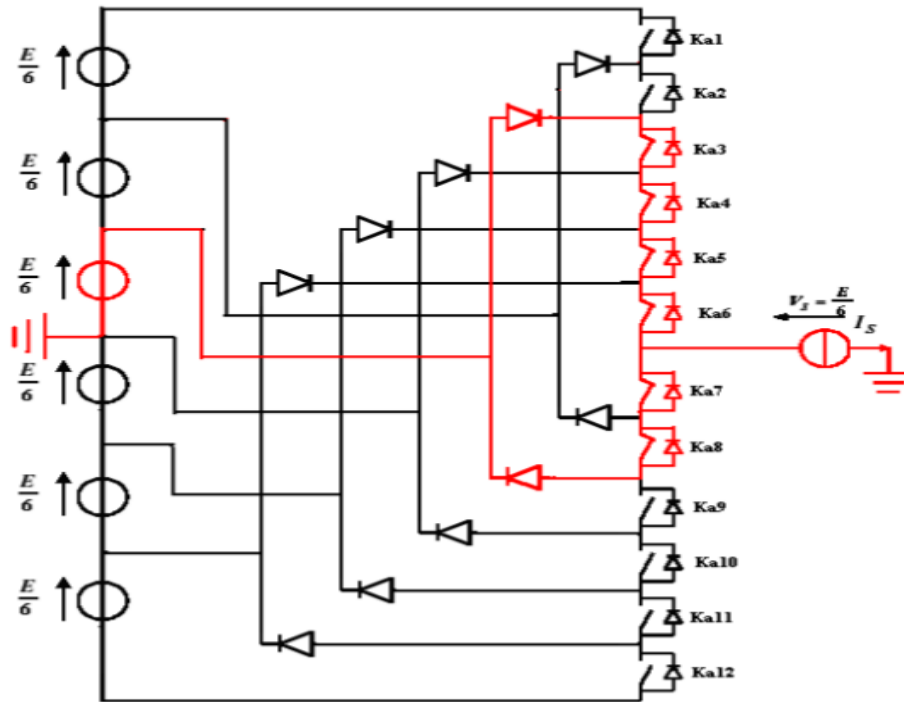


Figure 3. 101: 3eme configuration du 1er bras.

- 4ième configuration {00011111000}

Ka4, Ka5, Ka6, Ka7, Ka8 et Ka9 sont passants et Ka10, Ka11, Ka12, Ka1, Ka2 et Ka3 sont bloqués comme c'est illustré dans la (Figure 3.22) .La tension simple de sortie est :

$$V_{ao} = 0 \quad (3.26)$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$VKa1 = VKa2 = VKa3 = VKa4 = VKa11 = VKa12 = +E/6 \quad (3.27)$$

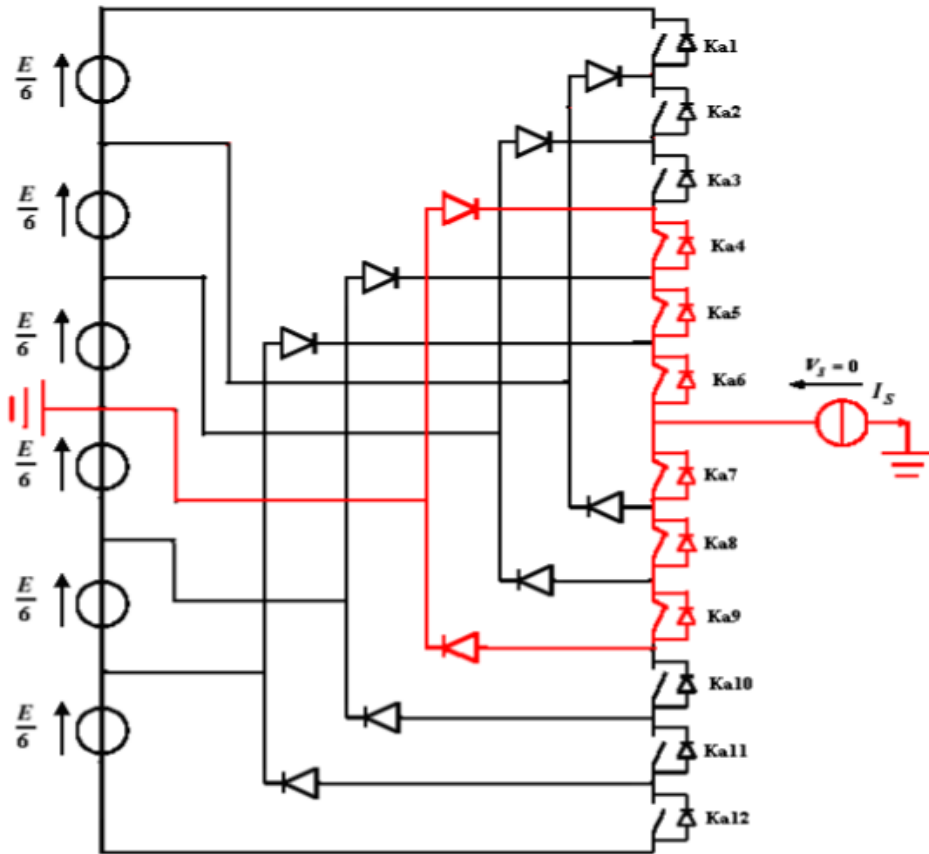


Figure 3. 112: 4eme configuration du 1er bras.

- 5ème configuration {000011111100}

Ka5, Ka6, Ka7, Ka8, Ka9 et Ka10 sont passants et Ka11, Ka12, Ka1, Ka2, Ka3 et Ka4 sont bloqués comme c'est illustré dans la (Figure 3.23). La tension simple de sortie est :

$$V_{ao} = -E/3 \tag{3.28}$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$VKa1 = VKa2 = VKa3 = VKa4 = VKa11 = VKa12 = +E/6 \tag{3.29}$$

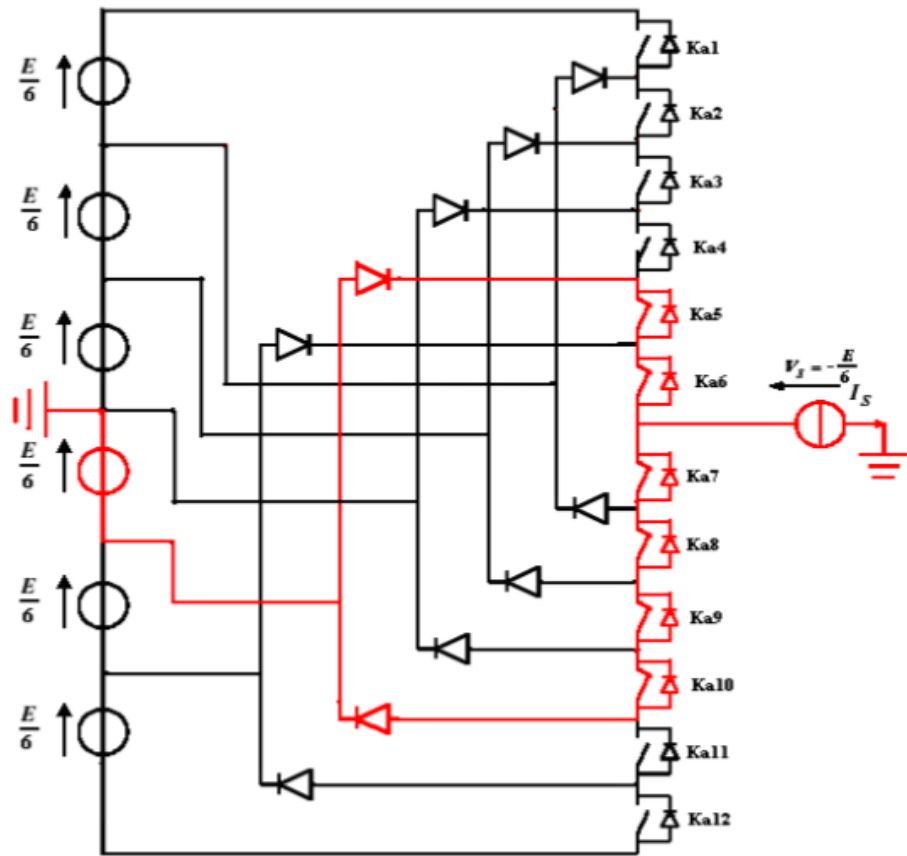


Figure 3. 123: 5eme configuration du 1er bras.

- 6ème configuration {000001111110}

Ka6, Ka7, Ka8, Ka9, Ka10 et Ka11 sont passants et Ka12, Ka1, Ka2, Ka3, Ka4 et Ka5 sont bloqués (Figure 3.24).la tension simple de sortie est :

$$V_{ao} = -E/3 \tag{3.30}$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$VKa1 = VKa2 = VKa3 = VKa4 = VKa5 = VKa12 = +E/6 \tag{3.31}$$

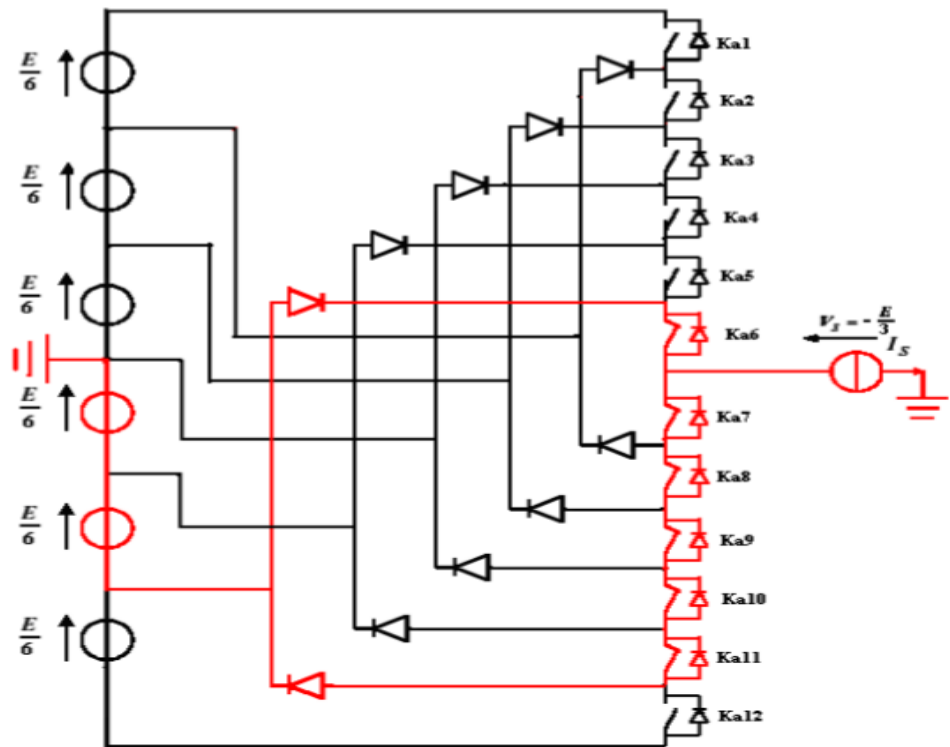


Figure 3. 134: 6eme configuration du 1er bras.

- 7ième configuration {000000111111}

Ka7, Ka8, Ka9, Ka10, Ka11 et Ka12 sont passants et Ka1, Ka2, Ka3, Ka4, Ka5 et Ka6 sont bloqués (Figure 3.25). la tension simple de sortie est :

$$V_{ao} = -E/2 \quad (3.32)$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :  $V_{Ka1} =$

$$V_{Ka2} = V_{Ka3} = V_{Ka4} = V_{Ka5} = V_{Ka6} = +E/6 \quad (3.33)$$

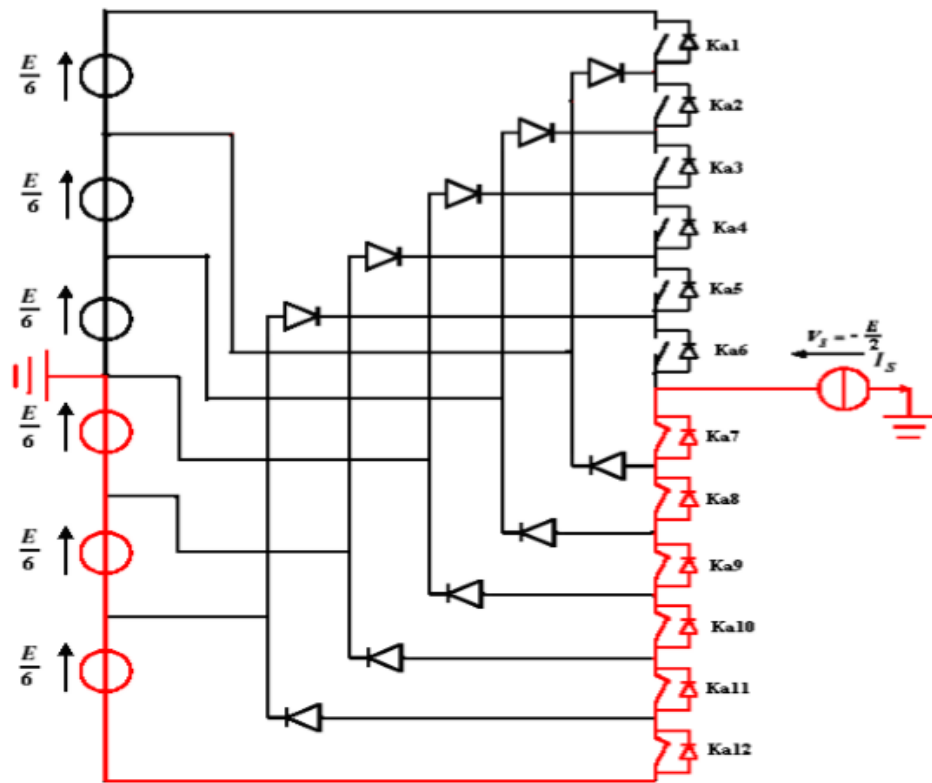


Figure 3. 145: 7eme configuration du 1er bras.

Tableau 3. 4: Table de la commutation de l'onduleur NPC à 7 niveaux.

Etat des interrupteurs												Tension de sortie Vao
Ka1	Ka2	Ka3	Ka4	Ka5	Ka6	Ka7	Ka8	Ka9	Ka10	Ka11	Ka12	
1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	E/2
0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	E/3
0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	E/6
0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	-E/6
0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	-E/3
0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	-E/2

La (Figure 3.26) ci-dessous les formes d'ondes des tensions simples  $V_{ao}$ ,  $V_{bo}$  et  $V_{co}$  à la sortie de l'onduleur.

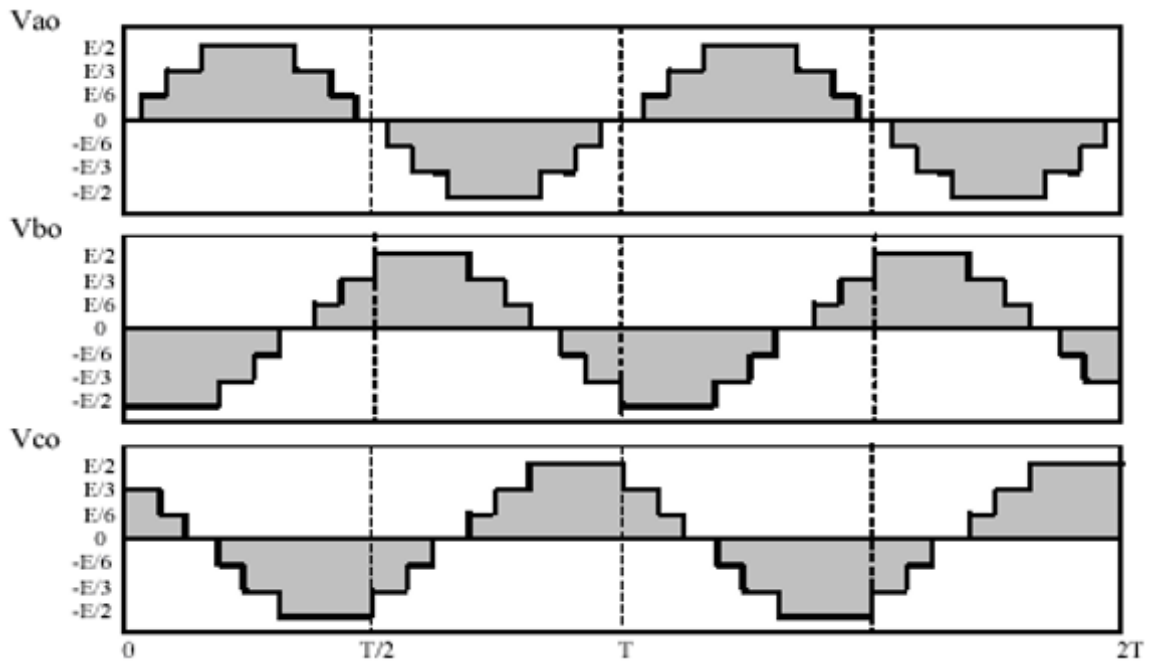


Figure 3. 156: Tensions simples d'un onduleur triphasé de type NPC à sept niveaux.

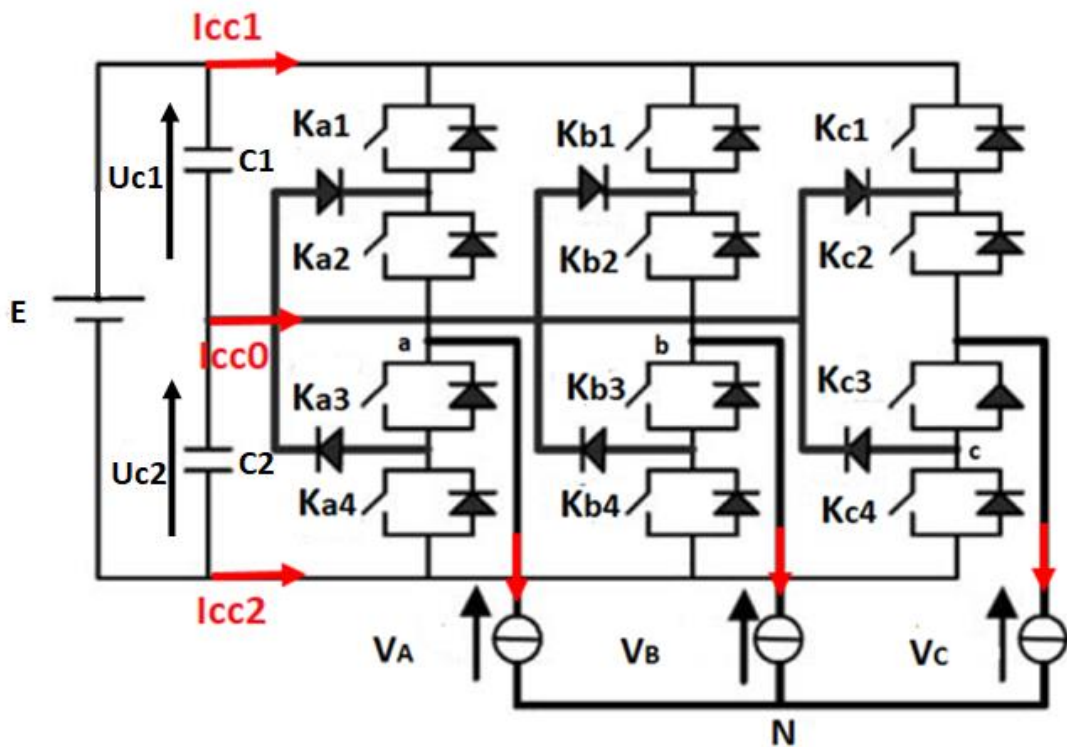
## 3.6 Modélisation de l'onduleur de tension à trois niveaux de type NPC

### 3.6.1 Commandabilité des convertisseurs statiques

Un convertisseur statique est dit en mode commandable, si les transistors entre différentes configurations dépendent uniquement de la commande externe et non plus des commandes internes. Nous supposerons dans la suite que cette condition est toujours vérifiée.

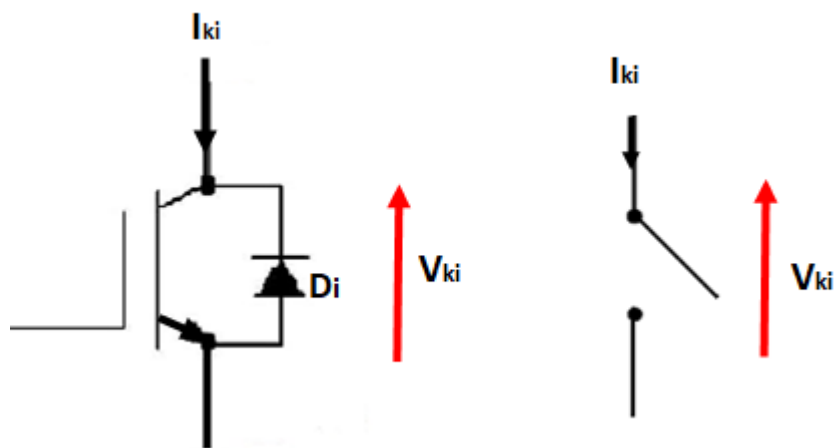
Dans ces conditions, on peut définir la notion de fonction de connexion [59].





**Figure 3. 167:** Onduleur triphasé à trois niveaux de tension de type NPC.

Nous simplifions la complexité de la structure de l'onduleur à trois niveaux, en fournissant à chaque paire (deux transistors) un interrupteur à deux voies  $K_i$  (Figure 3.28), et vue la symétrie de la structure de l'onduleur à trois niveaux nous présentons une configuration d'un seul bras [59], [60], [61].



**Figure 3. 178:** Interrupteur bidirectionnel équivalent de la paire transistor-diode.

L'ouverture et la fermeture des interrupteurs dépend de :

La commande externe du bras (l'ordre d'amorçage ou de blocage du semi-conducteur Bidirectionnel Ti).

Une commande interne définie par les signes du courant du bras.

Lors de la mise en conduction simultanée des quatre interrupteurs d'un seul bras, elle provoque un court-circuit aux extrémités des sources DC et ainsi les condensateurs et composants semi-conducteurs peuvent être détruits par les surintensités qui peuvent provoquer la destruction par surtension des interrupteurs lors de l'ouverture simultanée de ces dernières pour éviter ces risques On doit réaliser une commande complémentaire des différents interrupteurs d'un même bras de l'onduleur [27].

### 3.6.2 Commande complémentaire

Pour éviter le court-circuit des sources de tension par conduction de plusieurs interrupteurs, et pour que le convertisseur soit totalement commandable, non adopte une commande complémentaire [27].

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

$$\left\{ \begin{array}{l} B_{K1} = \overline{B_{K2}} \\ B_{K3} = \overline{B_{K4}} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} B_{K1} = \overline{B_{K3}} \\ B_{K2} = \overline{B_{K4}} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} B_{K2} = \overline{B_{K4}} \\ B_{K1} = \overline{B_{K3}} \end{array} \right. \quad (3.34)$$

#### a Commande N° 1

Soit la commande complémentaire suivante :  $\left\{ \begin{array}{l} B_{K1} = \overline{B_{K2}} \\ B_{K3} = \overline{B_{K4}} \end{array} \right.$

$B_{Kg}$ : Commande du transistor  $T_{Kg}$  du bras K.

**Tableau 3. 5:** La table logique correspondante à la ccommande N°1.

Bk1	Bk2	Bk3	Bk4	Tension de sortie du bras K (Vao)
Off	on	off	on	Inconnue (dépond de la charge)
off	on	on	off	V=0
on	off	off	on	V=0 ou I=0 (inconnue)
on	of	on	off	V=0

Cette commande rend le système pratiquement incommandable.

**b Commande N°2**

Soit la commande complémentaire suivante :  $\begin{cases} B_{K1} = \overline{B_{K3}} \\ B_{K2} = \overline{B_{K4}} \end{cases}$

**Tableau 3. 6:** La table logique correspondante à la commande N°2.

Bk1	Bk2	Bk3	Bk4	Tension de sortie du bras K (Vao)
Off	off	on	on	-Uc2 =-E/2
off	on	on	off	V=0
on	off	off	on	(inconnue)
on	on	off	off	Uc1 =E/2

Cette commande complémentaire rend le système totalement commandable à trois niveaux.

**c Commande N°3**

Soit la commande complémentaire suivante :  $\begin{cases} B_{K2} = \overline{B_{K4}} \\ B_{K1} = \overline{B_{K3}} \end{cases}$

**Tableau 3. 7 :** La table logique correspondante à la commande N°3.

Bk1	Bk2	Bk3	Bk4	Tension de sortie du bras K (Vao)
Off	off	on	on	-Uc2 =-E/2
off	on	off	on	(inconnue)
on	off	on	off	(inconnue)
on	on	off	off	Uc1 =E/2

C'est cette commande qui va être adopté pour la modélisation de l'onduleur à trois niveaux.

**Remarque**

La commande N°2 est la seule qui permet d'exploiter les trois niveaux de tension de sortie possible pour un bras (UC1, 0, -UC2), avec UC1 = UC2 = E/2.

La commande dans ce cas n'est possible qu'à deux niveaux.

### 3.6.3 Fonctions de connexion

La fonction de connexion  $F_{kg}$  traduit l'état ouvert ou fermé de l'interrupteur  $Ti_{kg}$ .

Chaque interrupteur  $k_{kg}$  supposé idéal introduit une fonction de connexion  $F_{kg}$ .

Avec :

$k = a, b, c$  : indicateur du bras.

$g = 1, 2, 3, 4$  : numéro de l'interrupteur du bras  $k$ .

$$F_{kg} = \begin{cases} 1 & \text{si l'interrupteur } K_{kg} \text{ est fermé} \\ 0 & \text{si l'interrupteur } K_{kg} \text{ est ouvert} \end{cases}$$

#### a Relation entre les fonctions de connexion

Ainsi les fonctions de connexions des interrupteurs du bras  $i$  sont liées par les relations suivantes :

$$\begin{cases} F_{k1} = 1 - F_{k3} \\ F_{k2} = 1 - F_{k4} \end{cases} \quad (3.35)$$

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

On définit la fonction de connexion du demi-bras qu'on notera  $F^{db}_{Kz}$  [59].

avec

$K$  : numéro du bras et  $z = 1$  pour le demi-bras du haut et  $z = 0$  pour le demi-bras du bas.

Pour un bras  $K$ , les fonctions de connexions des demi-bras s'expriment au moyen des fonctions de connexion des interrupteurs comme suit :

$$\begin{cases} F^{db}_{K1} = F_{K1} \cdot F_{K2} \\ F^{db}_{K0} = F_{K3} \cdot F_{K4} \end{cases} \quad (3.36)$$

$F^{db}_{K1}$  est associé au demi-bras du haut [59], [62].

$F^{db}_{K0}$  est associé au demi-bras du bas.

### 3.6.4 Modélisation des valeurs instantanées

Cette modélisation sera effectuée en considérant l'association de l'onduleur de tension triphasé avec une charge triphasé équilibrée.

Charge triphasée équilibrée couplée en étoile.

Tension simple aux bornes de chaque phase de la charge :  $V_a, V_b, V_c$  ; tension entre le point milieu «  $k$  » de chaque bras de l'onduleur et le point neutre «  $o$  » de l'alimentation continue de l'onduleur :  $V_{ao}, V_{bo}, V_{co}$  [59] ,[62];

### **a Les potentiels $V_{ko}$**

Les potentiels des noeuds  $a, b$  et  $c$  de l'onduleur triphasé à trois niveaux par rapport au pointmilieu «  $o$  », sont donnés par le système suivant

$$\begin{cases} V_{ao} = F_{11}.F_{12}.U_{c1} - F_{13}.F_{14}.U_{c2} = (F_{11}.F_{12} - F_{13}.F_{14}).\frac{E}{2} \\ V_{bo} = F_{21}.F_{22}.U_{c1} - F_{23}.F_{24}.U_{c2} = (F_{21}.F_{22} - F_{23}.F_{24}).\frac{E}{2} \\ V_{co} = F_{31}.F_{32}.U_{c1} - F_{33}.F_{34}.U_{c2} = (F_{31}.F_{32} - F_{33}.F_{34}).\frac{E}{2} \end{cases} \quad (3.37)$$

Pour l'onduleur triphasé à trois niveaux, les fonctions de connexions des demi-bras sont définies selon les relations suivantes :

$$\begin{cases} F^{db}_{11} = F_{11}.F_{12} & F^{db}_{21} = F_{21}.F_{22} & F^{db}_{31} = F_{31}.F_{32} \\ F^{db}_{10} = F_{13}.F_{14} & F^{db}_{20} = F_{23}.F_{24} & F^{db}_{30} = F_{33}.F_{34} \end{cases} \quad (3.38)$$

En traduisant ces fonctions de connexions des demis bras dans le système (3.37) on aboutit à

$$\begin{cases} V_{ao} = F^{db}_{11}.U_{c1} - F^{db}_{10}.U_{c2} = (F^{db}_{11} - F^{db}_{10}).\frac{E}{2} \\ V_{bo} = F^{db}_{21}.U_{c1} - F^{db}_{20}.U_{c2} = (F^{db}_{21} - F^{db}_{20}).\frac{E}{2} \\ V_{co} = F^{db}_{31}.U_{c1} - F^{db}_{30}.U_{c2} = (F^{db}_{31} - F^{db}_{30}).\frac{E}{2} \end{cases} \quad (3.39)$$

### **b Tensions de sorties**

Le système d'équation (3.39) nous permet d'avoir les tensions de sortie de l'onduleur à trois niveaux qui s'expriment en fonction des deux tensions d'entrées  $U_{c1}$  et  $U_{c2}$ .

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

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

### c Tensions composées

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

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{ao} - V_{bo} = (F_{11}.F_{12} - F_{21}.F_{22}).U_{c1} - (F_{13}.F_{14} - F_{23}.F_{24}).U_{c2} \\ V_{bc} = V_{co} - V_{bo} = (F_{21}.F_{22} - F_{31}.F_{32}).U_{c1} - (F_{23}.F_{24} - F_{33}.F_{34}).U_{c2} \\ V_{ca} = V_{co} - V_{ao} = (F_{31}.F_{32} - F_{11}.F_{12}).U_{c1} - (F_{33}.F_{34} - F_{13}.F_{14}).U_{c2} \end{cases} \quad (3.40)$$

Dans le cas où  $U_{c1} = U_{c2} = E/2$  le système (3.40) devient :

$$\begin{aligned} V_{ab} &= [(F_{11}.F_{12} - F_{21}.F_{22}) - (F_{13}.F_{14} - F_{23}.F_{24})].\frac{E}{2} \\ V_{bc} &= [(F_{21}.F_{22} - F_{31}.F_{32}) - (F_{23}.F_{24} - F_{33}.F_{34})].\frac{E}{2} \\ V_{ca} &= [(F_{31}.F_{32} - F_{11}.F_{12}) - (F_{33}.F_{34} - F_{13}.F_{14})].\frac{E}{2} \end{aligned} \quad (3.41)$$

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

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \left\{ \begin{bmatrix} F_{11}^{db} \\ F_{21}^{db} \\ F_{31}^{db} \end{bmatrix} U_{c1} \begin{bmatrix} F_{10}^{db} \\ F_{20}^{db} \\ F_{30}^{db} \end{bmatrix} U_{c2} \right\} \quad (3.42)$$

Dans le cas où  $U_{c1} = U_{c2}$ , cette relation se réduit à :

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11}^{db} & F_{10}^{db} \\ F_{21}^{db} & F_{20}^{db} \\ F_{31}^{db} & F_{30}^{db} \end{bmatrix} \cdot \frac{E}{2} \quad (3.43)$$

### d Tensions simples

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

$$V_a + V_b + V_c = 0 \quad (3.44)$$

$$\begin{cases} V_a = (2V_{ao} - V_{bo} - V_{co})/3 \\ V_b = (-V_{ao} + 2V_{bo} - V_{co})/3 \\ V_c = (-V_{ao} - V_{bo} + 2V_{co})/3 \end{cases} \quad (3.45)$$

Sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{b11} & F_{b10} \\ F_{b21} & F_{b20} \\ F_{b31} & F_{b30} \end{bmatrix} \cdot \frac{E}{2} \quad (3.46)$$

### 3.7 Techniques de commandes

Nous distinguons plusieurs types de techniques de MLI, dont on peut citer (Figure 3.29).

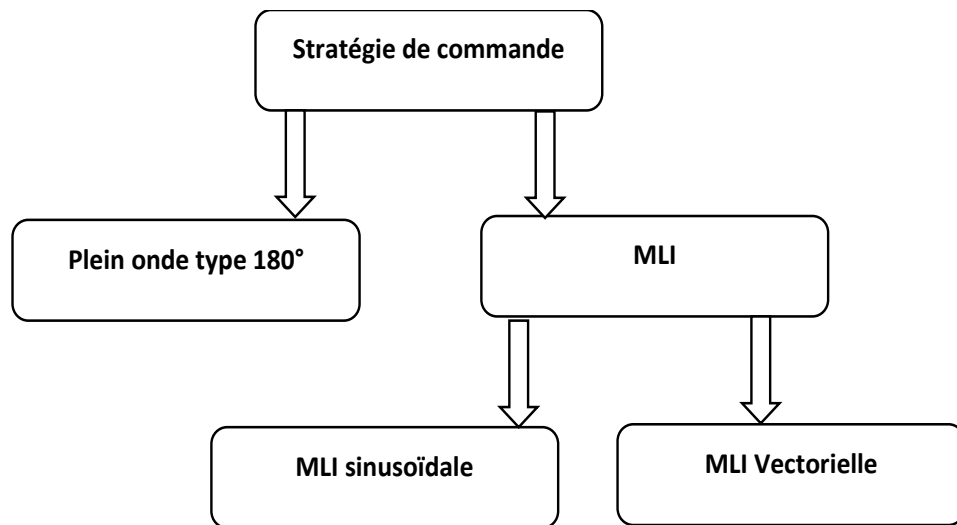
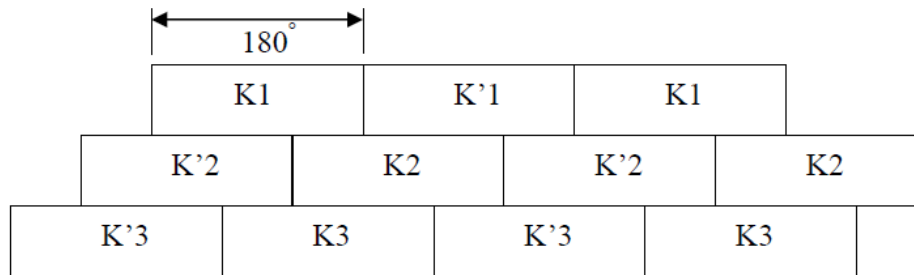


Figure 3. 189: Différentes techniques de commande MLI.

#### 3.7.1 Commande en pleine onde de type 180

Lorsque la séquence de commande de fermeture d'un interrupteur coïncide avec la commutation d'ouverture de l'interrupteur situé sur le même bras, on parle dans ce cas, d'un onduleur de type 180°, (Figure 3.30).

Pour le premier bras de l'onduleur, l'interrupteur K1 est fermé pendant une demi-période (180°), et K'1 est fermé pendant l'autre demi de la période. Pour les deux autres bras de l'onduleur, on applique la même procédure, mais avec un décalage de  $2\pi/3$  et  $4\pi/3$  par rapport au premier bras [63], [64].



**Figure 3.30** : Commande plain onde (180°).

La tension générée par la stratégie de la commande pleine onde à une forme rectangulaire, sa décomposition en série de Fourier a montré que cette forme d'onde est riche en harmoniques. Ce type de commande convient pour les onduleurs à deux niveaux [64].

### 3.7.2 Modulation sinusoïdale (ou sinus-triangle)

Le MLI sinusoïdal est une technique typique de MLI. Dans cette technique MLI, la référence de tension alternative sinusoïdale est comparée à l'onde porteuse triangulaire haute fréquence en temps réel pour déterminer les états de commutation de chaque pôle de l'onduleur. Après comparaison, la commutation les états de chaque pôle peuvent être déterminés en fonction de la règle suivante [65] :

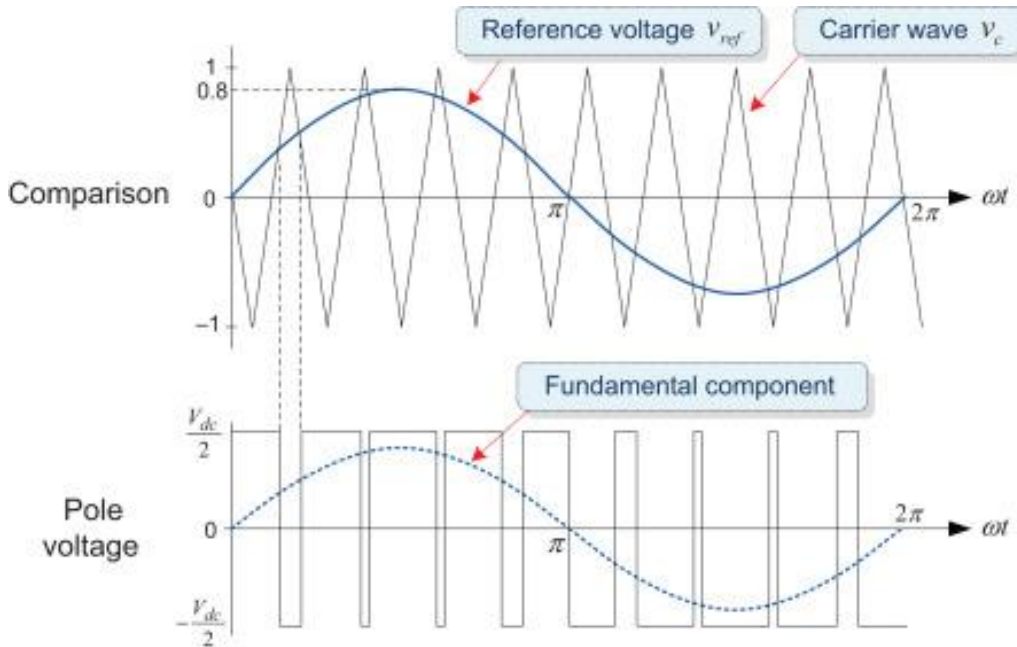
Référence de tension  $U_{ref} >$  Porteuse triangulaire  $V_c$  l'interrupteur supérieur est activé (tension des pôles =  $V_{dc}/2$ ).

Référence de tension  $U_{ref} <$  Porteuse triangulaire  $V_c$  l'interrupteur inférieur est activé (tension des pôles =  $-V_{dc}/2$ )

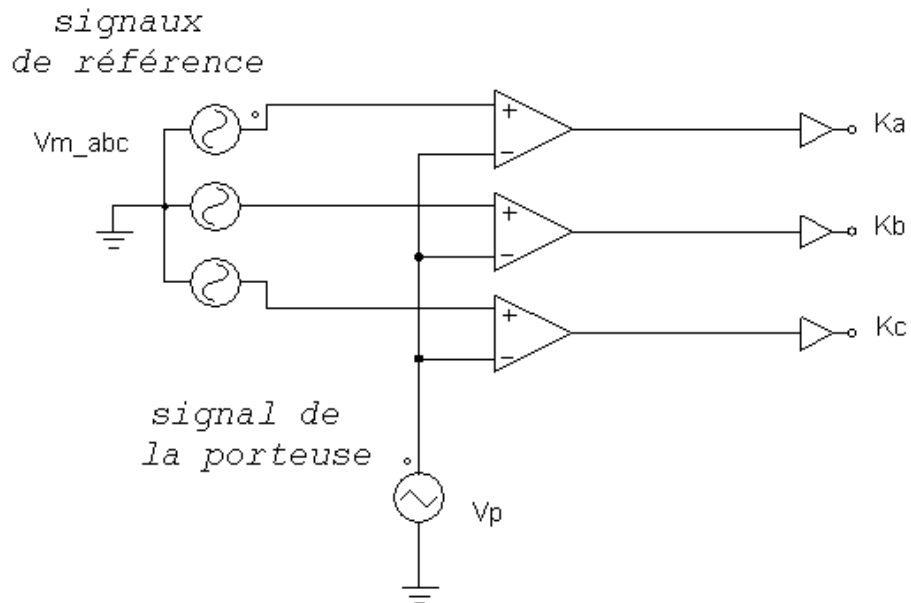
Ici, la valeur crête à crête de l'onde porteuse triangulaire est donnée comme tension du circuit intermédiaire  $V_{dc}$ . Dans cette technique MLI, la condition nécessaire pour la modulation linéaire est que l'amplitude de la référence de tension doit rester en dessous du pic de la porteuse triangulaire  $V_c$ , par exemple  $U_{ref} \leq V_{dc}/2$  Étant donné que cette technique MLI utilise une onde porteuse haute fréquence pour la modulation de tension, ce type de technique MLI est appelé technique MLI basée sur la porteuse. Surtout, cette technique basée sur la porteuse est appelée MLI puisque la



référence est donnée sous la forme d'une onde sinusoïdale. Ceci est également appelé la technique MLI de comparaison de triangles car elle utilise le porteur d'une onde triangulaire. La (Figure 3.31) représente la technique MLI sinusoïdale pour une phase [64],[65].



**Figure 3. 31 :** Schéma de principe de la technique sinus-triangle [65].



**Figure 3. 192 :** Schéma de principe de la technique sinus-triangle [64].

La (figure 3.32) illustre comment construire un MLI sinusoïdal

Dans le cas d'une référence sinusoïdale, les caractéristiques sont :

1. L'indice de modulation  $m$  égal au rapport de la fréquence  $f_p$  de la porteuse à la fréquence  $f_m$  de la référence :  $m = f_p/f_m$ .
2. Le coefficient de réglage  $r$  égal au rapport de l'amplitude  $A_m$  de la référence à l'amplitude crête  $A_p$  de la porteuse :  $r = A_m / A_p$
3. Le facteur d'évaluation des performances de la MLI qui est la distorsion facteur de total des harmoniques de la tension de sortie (THD), défini par le rapport de la somme quadratique des harmoniques de tension à la valeur de la somme quadratique du fondamental et des harmoniques de la tension.

$$\text{THD} = \frac{\sum_{i=2}^n (V_i^2)^1 / 2}{\sum_{i=1}^n (V_i^2)^1 / 2} \quad (3.47)$$

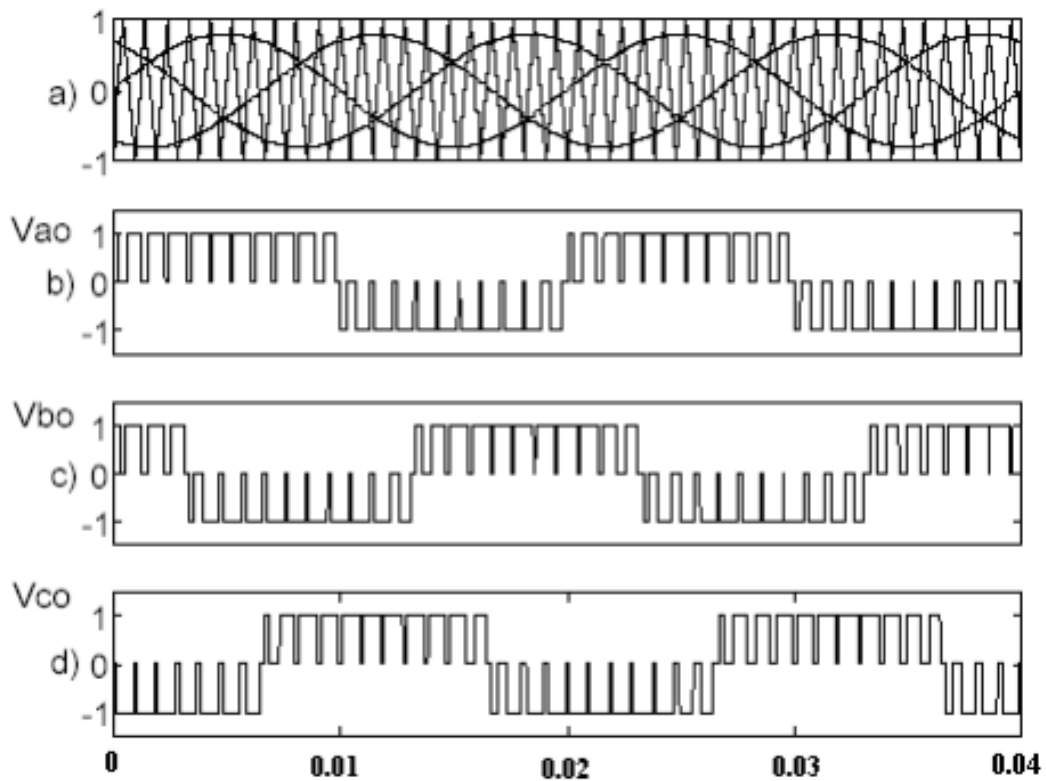
#### **a Modulation sinusoïdale naturelle ou classique mono-porteuse**

La technique de modulation de largeur d'impulsions (MLI ; en anglais : Pulse Width Modulation, soit PWM), est la plus utilisée pour la commande des onduleurs classiques (deux Niveaux) [27]. C'est aussi la stratégie de modulation la plus utilisée dans les onduleurs multiniveaux dite à modulation sinusoïdale.

Elle consiste à comparer d'une onde de référence ou modulante, généralement Sinusoïdale (le signal à synthétiser) à une porteuse généralement triangulaire (*Figure 3.33*).

Le signal de sortie change d'état à chaque intersection de la modulante et de la porteuse (*Figure 3.33a*). La (*Figure 3.33*) montre le principe de la technique MLI sinusoïdale naturelle utilisée pour un onduleur deux niveaux.

Les formes d'ondes des tensions de sortie par rapport au point milieu (O) de la source continue  $V_{ao}$ ,  $V_{bo}$ ,  $V_{co}$ , sont représentées par les (*Figures 3-33 b, 3.33 c et 3.33d*) respectivement [66],[67].



**Figure 3.203** : Principe de la modulation MLI sinusoidale classique[27].

### **b Modulation sinusoidale à double triangles ou multi-porteuse classique**

Dans cette technique de modulation nous utilisons les différentes porteuses afin de pouvoir construire toutes les commandes nécessaires à tous les interrupteurs. Dans cette technique, la référence est comparée en permanence avec chacun des signaux triangulaires. Si la référence est supérieure à un signal triangulaire, le signal de sortie vaut 1, donc l'interrupteur correspond à cette modulation est actif, si la référence est inférieure à un signal triangulaire, le signal de sortie change donc d'état [67],[27].

A titre d'exemple, pour un onduleur à trois niveaux, les deux signaux triangulaires ont même fréquence et même amplitude, c'est la modulation sinusoidale à double triangle. (La Figure 3.33) représente le principe de la modulation sinusoidale à double triangle d'onduleur à trois niveaux. Deux porteuses sont utilisées, avec trois signaux de référence, pour générer la commande de chaque phase comme il est illustré sur la (Figure 3.34a).

(Les Figures 3.34b, 3.34c et 3.34d) montrent les formes d'ondes des tensions  $V_{ao}$ ,  $V_{bo}$ ,  $V_{co}$ , rapportées au point milieu de la source continue à l'entrée de l'onduleur [68].

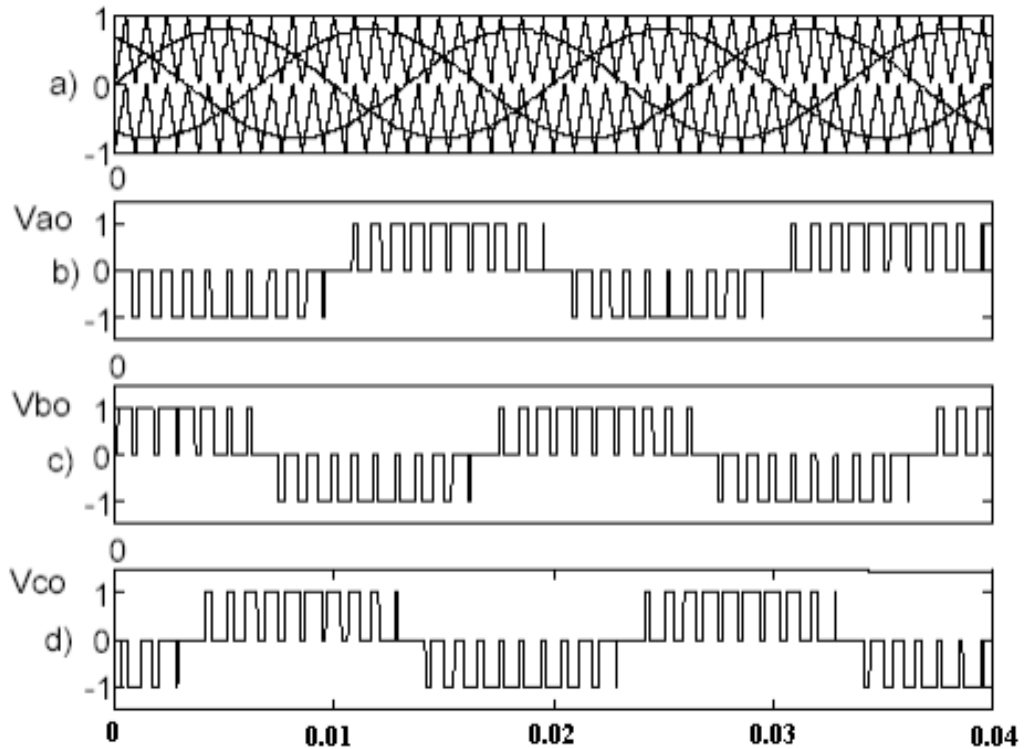


Figure 3. 214 : Principe de la MLI à doubles triangles [27].

### 3.7.3 Modulation vectorielle

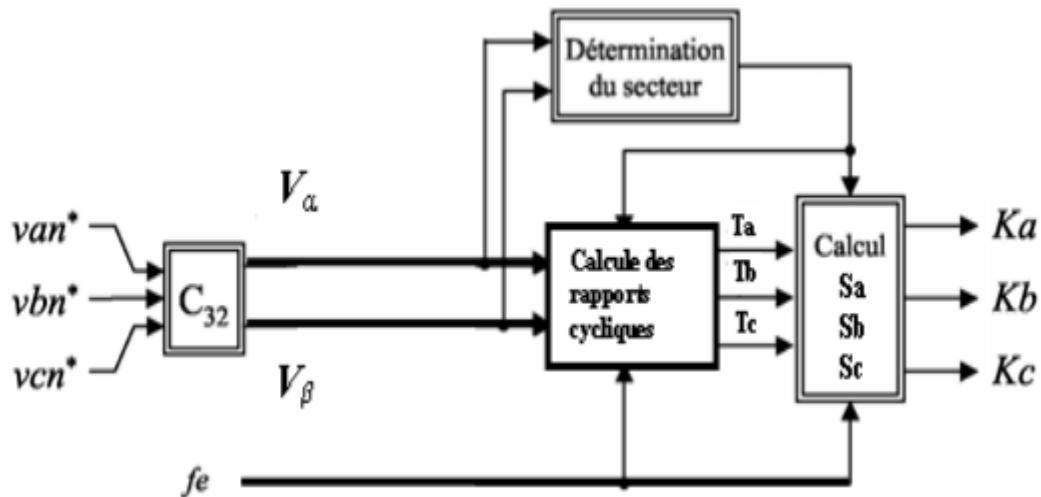
La modulation vectorielle, dite "*Space Vector Modulation*", est une modulation en temps réel. Elle utilise le fait qu'un vecteur peut représenter les trois tensions d'un système triphasé de somme nulle. Elle est conduite en synchronisme sur les trois phases [1].

Cette technique de MLI suit les principes suivants :

1. Le signal de référence est échantillonné à intervalles réguliers  $T$  (MLI régulière),
2. Pour chaque phase, réalisation d'une impulsion de largeur  $T$  centrée sur la période (MLI symétrique) dont la valeur moyenne est égale à la valeur de la tension de référence à l'instant d'échantillonnage.
3. Tous les interrupteurs d'un même demi-pont ont un état identique au centre et aux deux extrémités de la période.

#### $\alpha$ Principe de la modulation vectorielle

Le schéma de principe de la MLI vectorielle est présenté par la (Figure 3.35) :



**Figure 3. 225 :** Schéma de principe de la MLI vectorielle [68].

Le principe de la modélisation vectorielle (SVM) consiste à reconstruire le vecteur  $V_{ref}$  tension à partir de huit vecteurs de tensions, chacun correspond à une combinaison des états des interrupteurs d'un onduleur de tension triphasé.

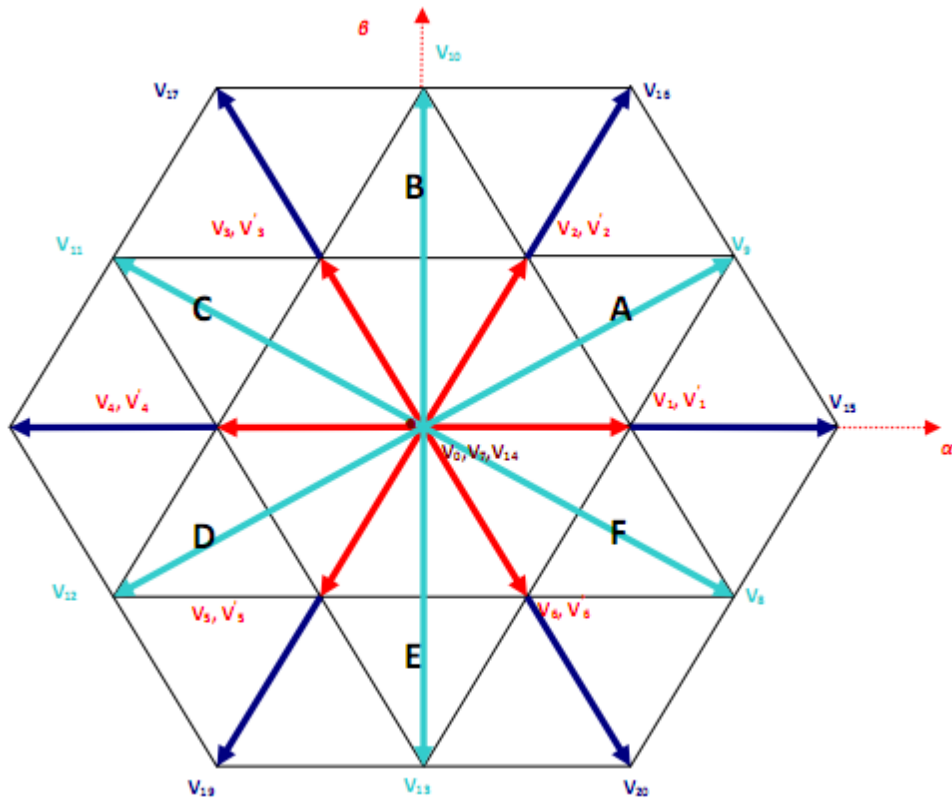
La MLI vectorielle est la méthode récemment la mieux adaptée au contrôle des moteurs asynchrones contrairement à d'autres méthodes [68], [27].

Elle consiste à considérer globalement le système triphasé et à lui appliquer une transformée de Concordia pour se ramener dans le plan  $(V_\alpha, V_\beta)$ . Le système triphasé des tensions à générer pour la durée d'échantillonnage en cours peut alors être représenté comme un unique vecteur dans ce plan.

Ce vecteur n'est pas directement réalisable par les interrupteurs du variateur, mais on peut chercher les trois configurations les plus proches (situées sur les sommets et au centre de l'hexagone) et les appliquer successivement pendant une fraction adéquate de la période d'échantillonnage, de façon à obtenir en valeur moyenne le vecteur recherché [27].

La modulation vectorielle traite donc, les signaux triphasés comme un tout. L'onduleur triphasé à trois niveaux de tension ayant trois bras et trois configurations, possède  $3^3 = 27$  modes de commutations possibles. Il peut donc générer 27 vecteurs différents de la tension de sortie.

La représentation sur le plan  $(\alpha, \beta)$  de ces 27 vecteurs est donnée par la (Figure 3.36)



*Figure 3. 236 : Représentation dans le plan  $(\alpha, \beta)$  des vecteurs de tension de l'onduleur à trois niveaux de tension [27].*

### 3.8 Conclusion

Dans ce chapitre, dans un premier lieu nous avons développé une structure topologique d'un onduleur multi niveaux de tension triphasé de type NPC (Neutral Point Clamp Converter), onduleur à cinq et à sept niveaux, ainsi que l'onduleur à trois niveaux : leur principe de fonctionnement est la détermination de son modèle mathématique en mode commandable, nous accommodons son modèle de connaissance en utilisant les fonctions de connexion des interrupteurs et celles des demi-bas. La structure NPC à trois niveaux est plus avantageuse que l'onduleur à deux niveaux, elle 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. Dans un deuxième lieu, nous avons présenté, les différentes stratégies de commande de l'onduleur, on plein onde de type degree, MLI sinusoidale, et aussi la M.L.I vectorielle. La commande M.L.I vectorielle engendre des signaux d'impulsions

simultanément avec la rotation du vecteur de référence, par contre la M.L.I sinusoïdale demande la détermination des instants de commutations des interrupteurs de chaque bras de l'onduleur séparément. par contre la méthode de plein onde ; la conversion continue alternative est assurée par les commutations des interrupteurs de l'onduleur qui vont ainsi effectuer des connexions temporaires entre les bornes de la source d'alimentation continue et les lignes de la charge triphasée alternative.

# Chapitre 4 simulation et interprétation des

## résultats

---

### 4.1 Introduction

Les onduleurs de tension triphasé à trois niveaux à structure NPC jouent un rôle incontournable dans des applications de forte puissances et haute tension

Ce chapitre est consacré à la simulation sous MATLAB de cet onduleur à structure NPC à deux et trois niveaux. Associé à un moteur asynchrone, la simulation a été réalisée avec la commande plein onde et avec une commande MLI.

Pour montrer l'avantage de l'onduleur trois étages (trois niveaux), une simulation est élaborée sous MATLAB/SIMULINK de la machine asynchrone à cage alimentée par cet onduleur.

### 4.2 Le programme utilisé

MATLAB est un langage de développement informatique et est un logiciel destiné principalement au calcul scientifique ; à la modélisation et à la simulation.

Matlab est utilisé pour développer des solutions nécessitant une très grande puissance de calcul. Le noyau de calcul est associé à l'environnement SIMULINK, permettant une modélisation basée sur des schémas-blocs.

Simulink® est un environnement de diagramme pour la simulation multi domaine et la conception basée sur un modèle. Il prend en charge la conception au niveau du système, la simulation, la génération automatique de code et les tests et vérifications continus des systèmes embarqués. Simulink fournit un éditeur graphique, des bibliothèques de blocs personnalisables et des solveurs pour la modélisation et la simulation de systèmes dynamiques. Il est intégré à MATLAB®, vous permettant



d'incorporer des algorithmes MATLAB dans des modèles et d'exporter les résultats de simulation vers MATLAB pour une analyse plus approfondie.

Nous avons utilisé Matlab pour simuler l'onduleur de tension à deux puis à trois niveaux de type NPC commandé par la technique MLI sinusoïdale, ainsi que la commande en pleine onde.

### 4.3 Commande en pleine onde (180°)

#### 4.3.1 Onduleur a deux niveaux triphasé

La (Figure 4.1) présente schéma bloc d'un onduleur triphasé à deux niveaux de tension. Il se compose de trois bras de commutation à transistors associé à moteur asynchrone à cage, cet onduleur est Commander en pleine onde

La tension de la source continue qui alimente notre onduleur est fixé de valeur **400 V**.

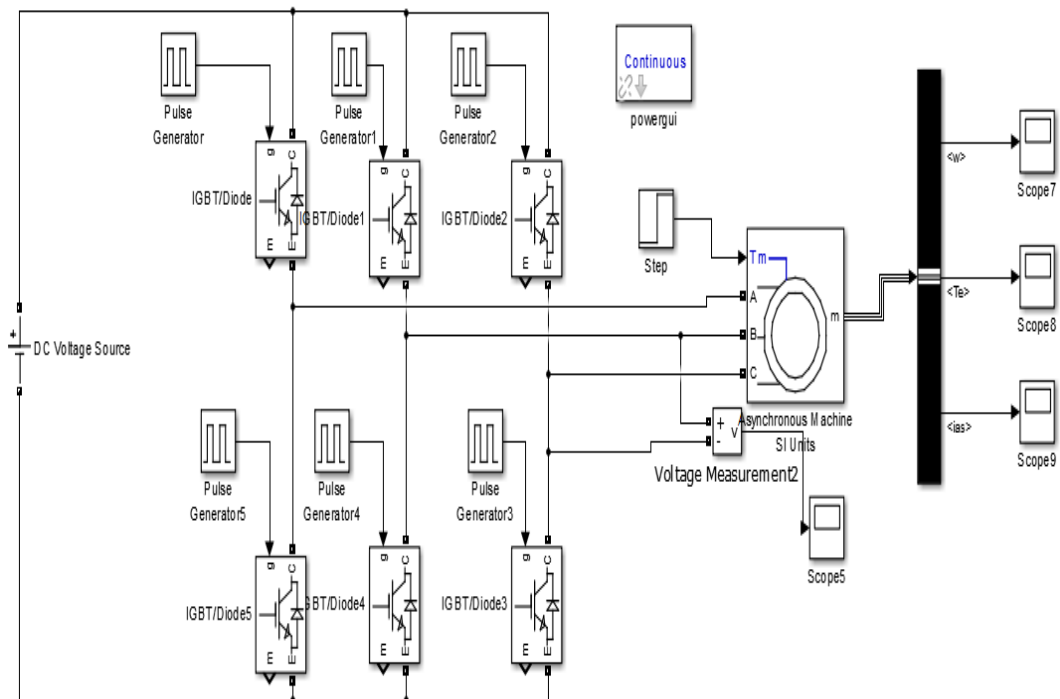
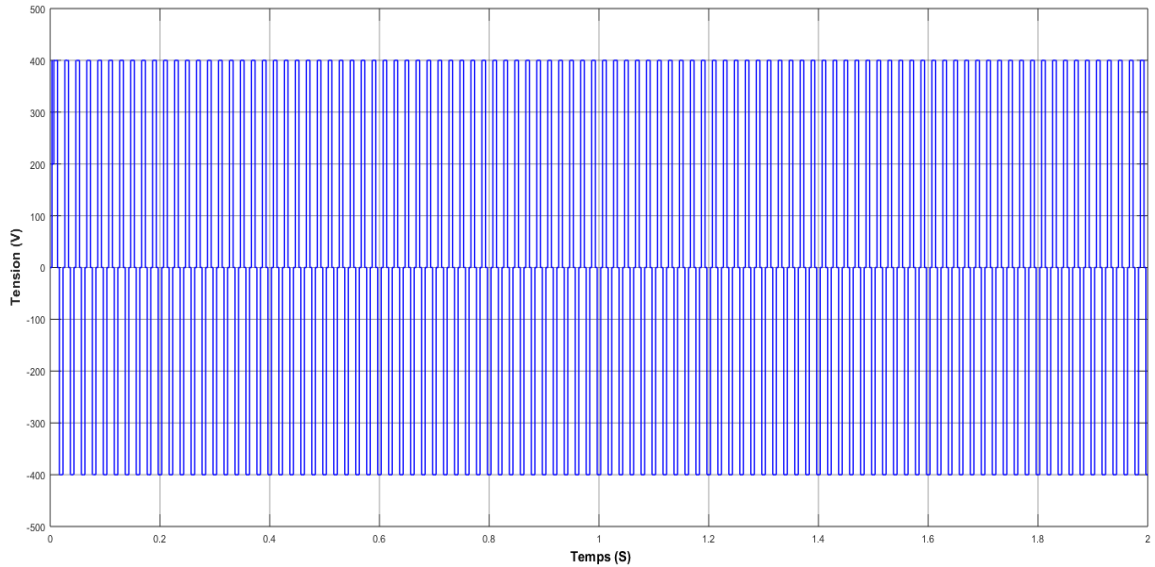


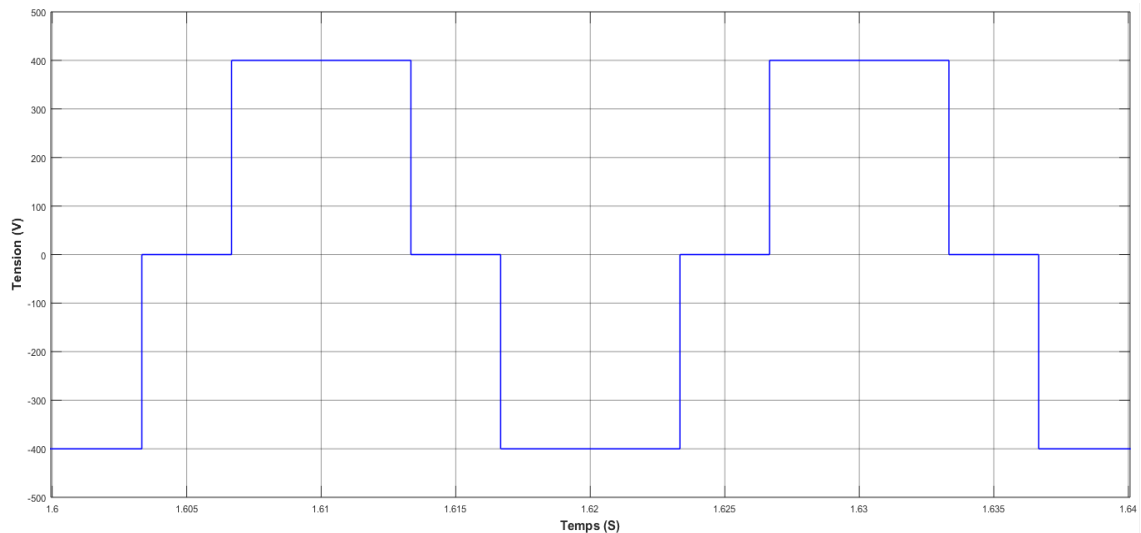
Figure 4. 1 : schéma bloc de la commande en plein onde d'un onduleur NPC à deux niveaux.

➤ **Tension composé**



**Figure 4. 2:** Tension composé entre deux phase c et b à la sortie de l'onduleur de deux niveaux commande plein onde.

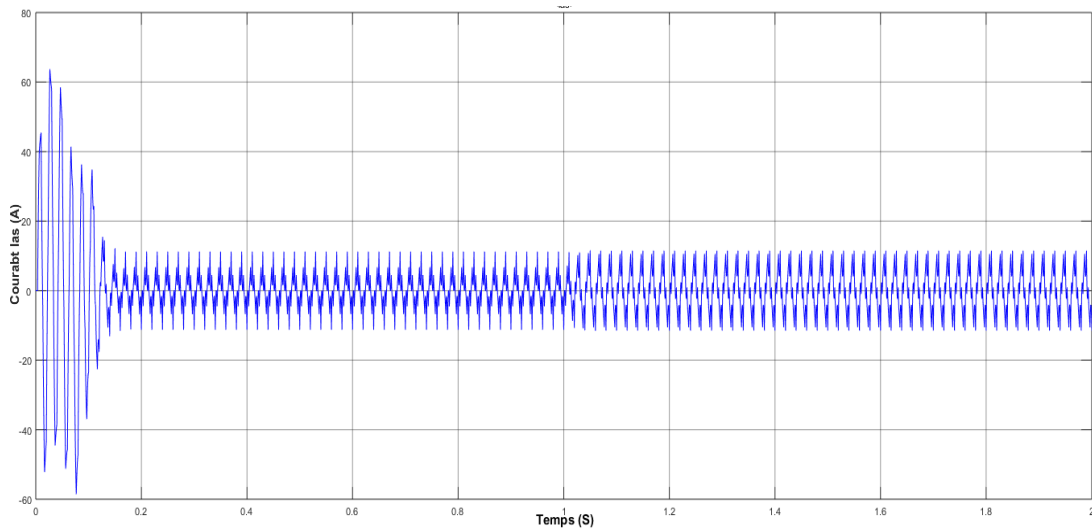
La (Figure 4.2) représente Tension composé à la sortie de l'onduleur commande plein onde au bien tension d'alimentation du MAS



**Figure 4. 3:** Zoom sur la tension d'alimentation du MAS commande plein onde.

Nous zoomons la tension d'alimentation du MAS commande plein onde avec deux périodes de temps, on remarque que le signal est périodique et prend une forme de signal de tension carrée, la valeur maximale est égale à la valeur de la source d'alimentation 400v comme le montre la (Figure 4.3).

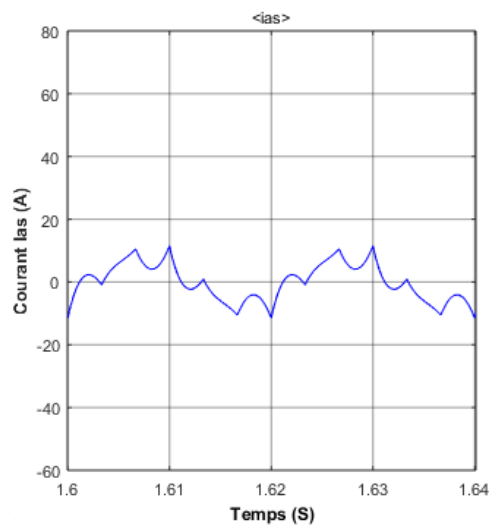
➤ **Courant statorique**



**Figure 4. 4:** Courant statorique de MAS commande plein onde.

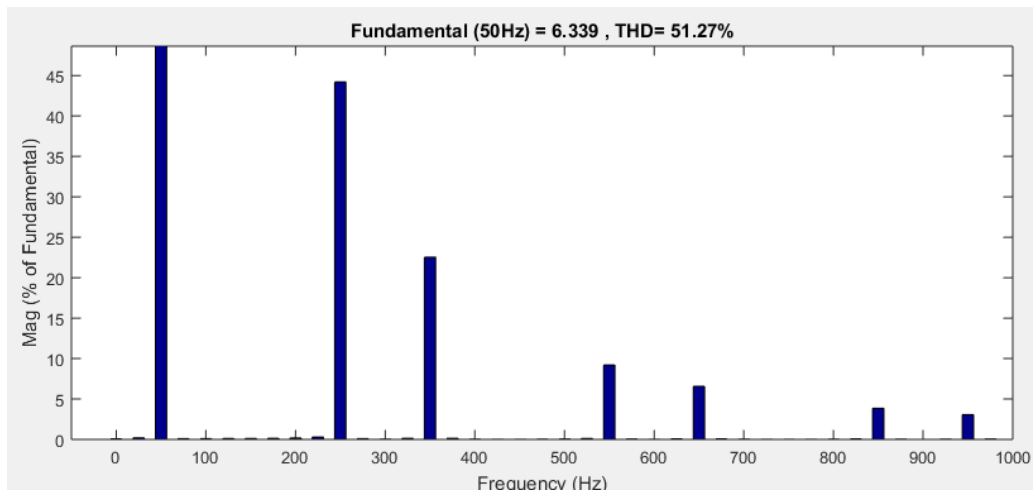
La figure au-dessus montre le courant statorique dans un enroulement d'une phase ( $I_{as}$ ), au démarrage de la machine il y a une forte appelle de courant ( $I = 63.7$  A). Après ce régime transitoire à l' instant  $t = 0,16$  s'il se stabilise à une valeur efficace est égale 11.3A.

A l'instant  $t = 1.15$  s, on va appliquer une charge mécanique sur l'arbre du moteur représentée par un couple résistant d'une valeur  $C_r = 10$  N.m, dans ce cas, On remarque qu'il y a une petite augmentation sur le courant statorique mais presque négligeable à cause de l'influence des harmoniques (Figure 4.5).



**Figure 4. 5:** Zoom sur courant statorique  $I_{as}$  de MAS commande plein onde.

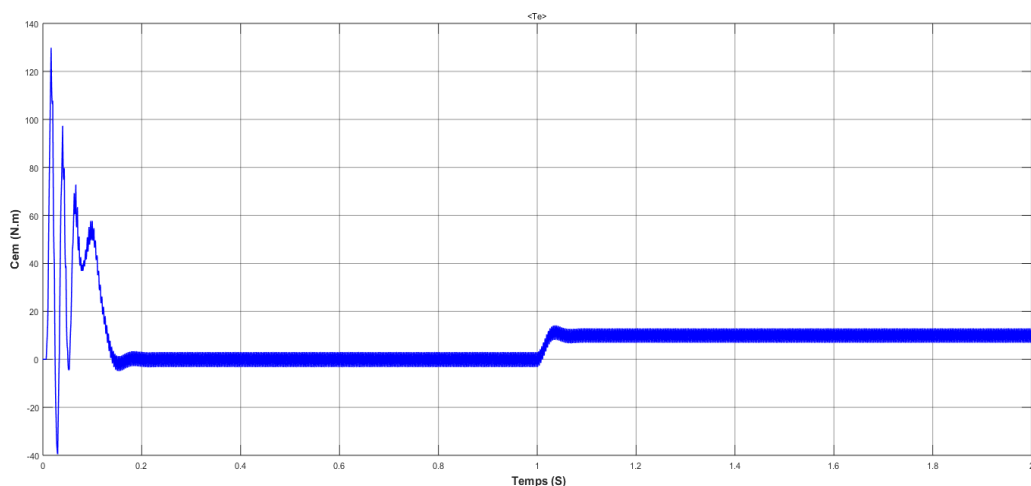
➤ **Spectre d'harmonique du courant statorique THD = 51.27%**



**Figure 4. 6:** spectre d'harmonique du courant statorique de l'onduleur deux niveaux commande plein onde.

La (Figure 4.6) représente l'analyse spectrale d'harmonique du courant statorique  $I_{as}$ , nous avons obtenus un **THD = 51.27%**, on remarque que le taux d'harmonique est assez élevés.

➤ **Couple électromagnétique**

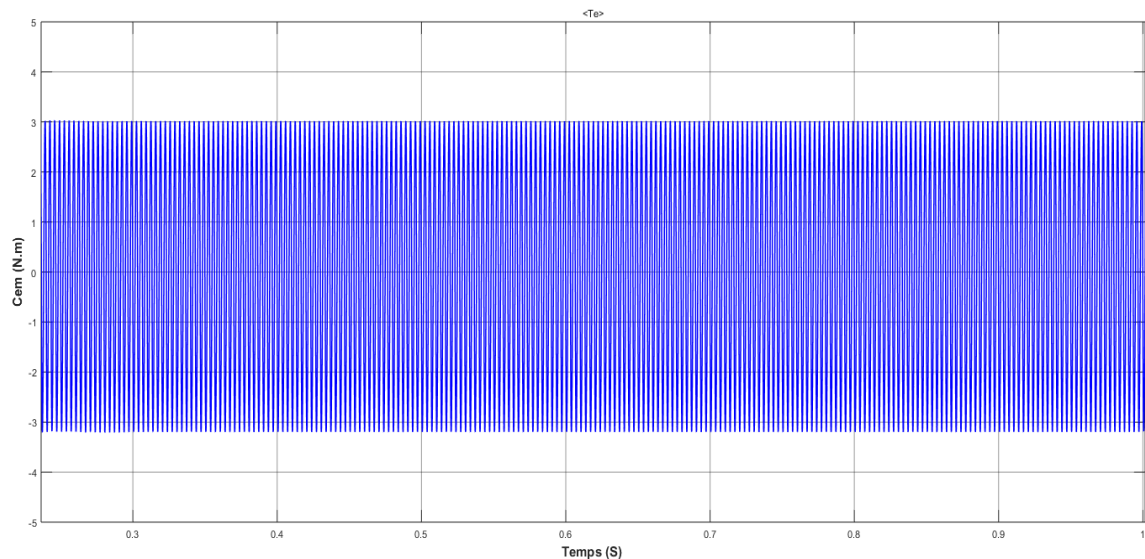


**Figure 4. 7:** Couple électromagnétique de MAS commande plein onde.

La (Figure 4.7) montre la variation du couple électromagnétique pour des différents modes de fonctionnement, on observe que :

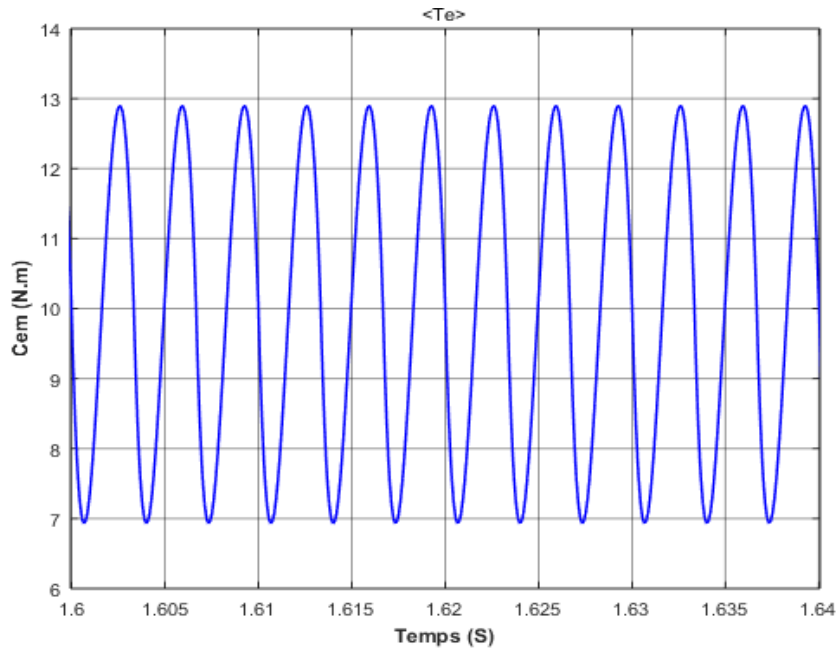
Lorsque  $t \in [0, 0.23 \text{ s}]$ , au démarrage, le couple atteint une valeur maximale qu'est égal à 130 N.m. Pendant cet interval on remarque qu'il ya des oscillations ce qui implique le régime transitoire.

Lorsque  $t \in [0.23, 1 \text{ s}]$ , le couple électromagnétique se stabilise vers une valeur moyenne qu'est égale 0 N.m, ce qui implique le fonctionnement à vide de la machine Comme le montre la (Figure 4.8).



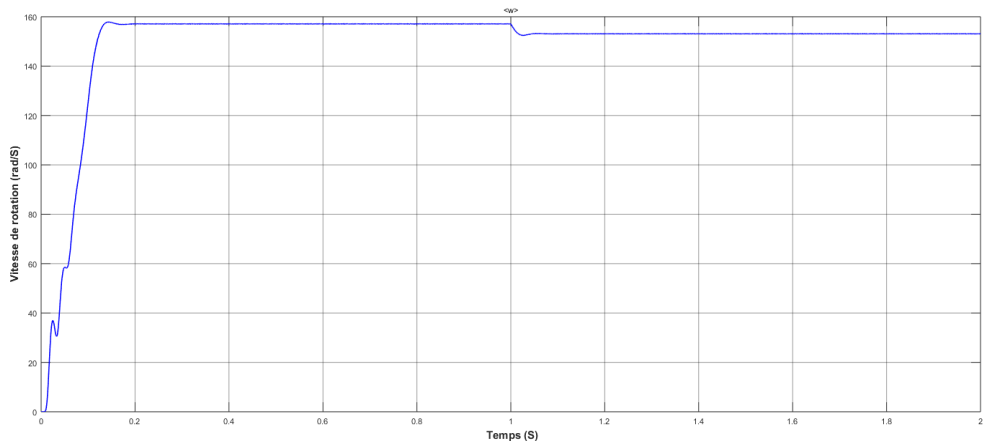
**Figure 4. 8:** le fonctionnement à vide de la machine (MAS) commande plein onde.

A l'instant  $t = 1 \text{ s}$ , on applique une charge mécanique d'une valeur 10 N.m, dans ce cas la machine prend cette valeur, bien sure après un temps de réponse avec des ondulations (ou oscillations) qui comprennent entre  $[6.9 \div 12.9 \text{ N.m}]$  Comme le montre la (Figure 4.9).



**Figure 4. 9 :** les ondulations du  $Cem$  de MAS commande plein onde.

➤ **Vitesse de rotation**



**Figure 4. 10:** vitesse de rotation de MAS commande plein onde.

La (Figure 4.10) montre qu'au démarrage et pendant le régime transitoire la vitesse est presque linéaire puis elle atteint sa valeur nominal à vide de 157 rad /s. lorsque la MAS fonctionne en charge, on remarque qu'il y a une diminution de cette valeur  $\Omega = 153$  rad/s.

### 4.3.2 Onduleur a trois niveaux triphasés

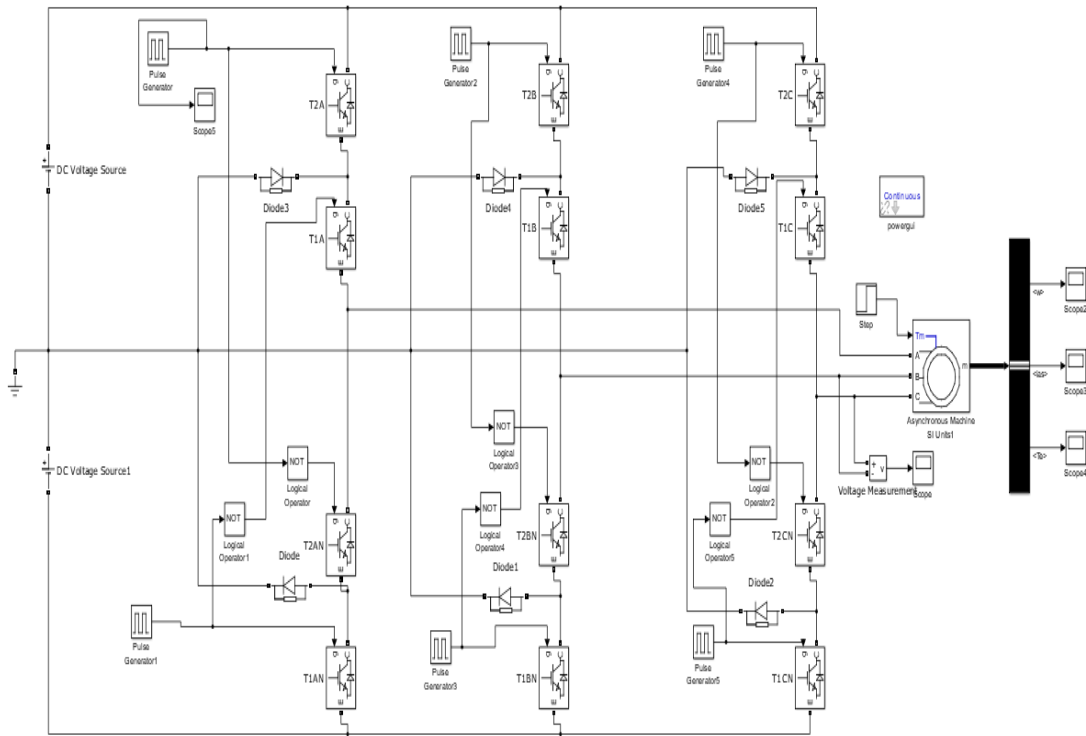


Figure 4. 11: schéma bloc de la commande en pleine onde d'un onduleur NPC trois niveaux.

#### ➤ Tension composé

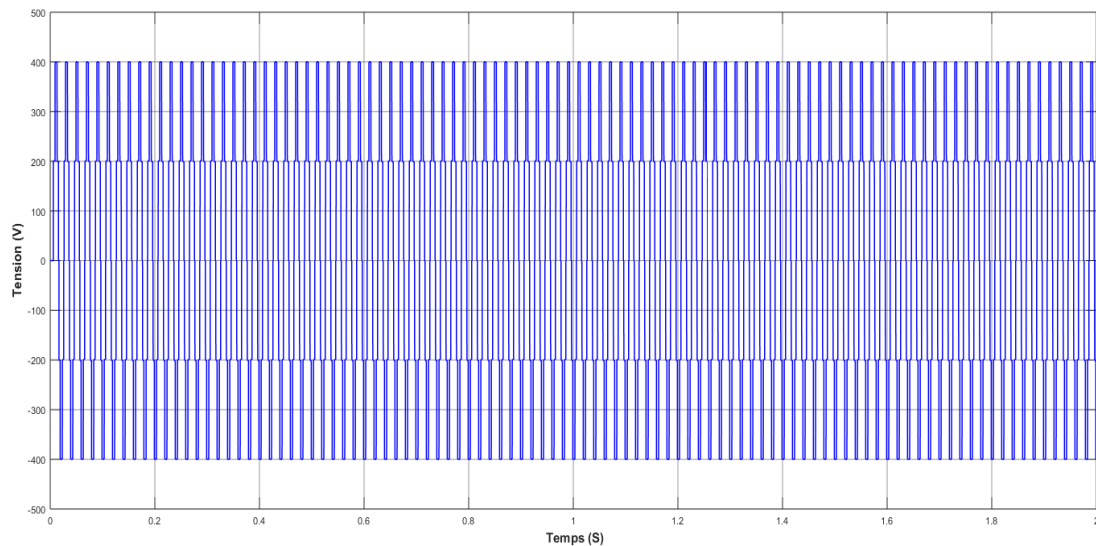
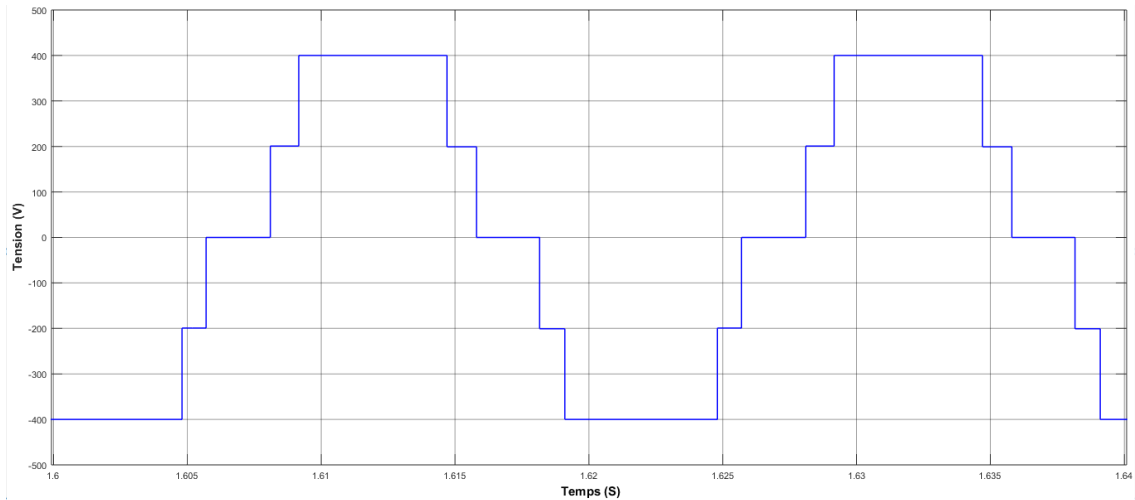


Figure 4. 12: Tension composé entre deux phase c et b à la sortie de l'onduleur de trois niveaux commande plein onde.

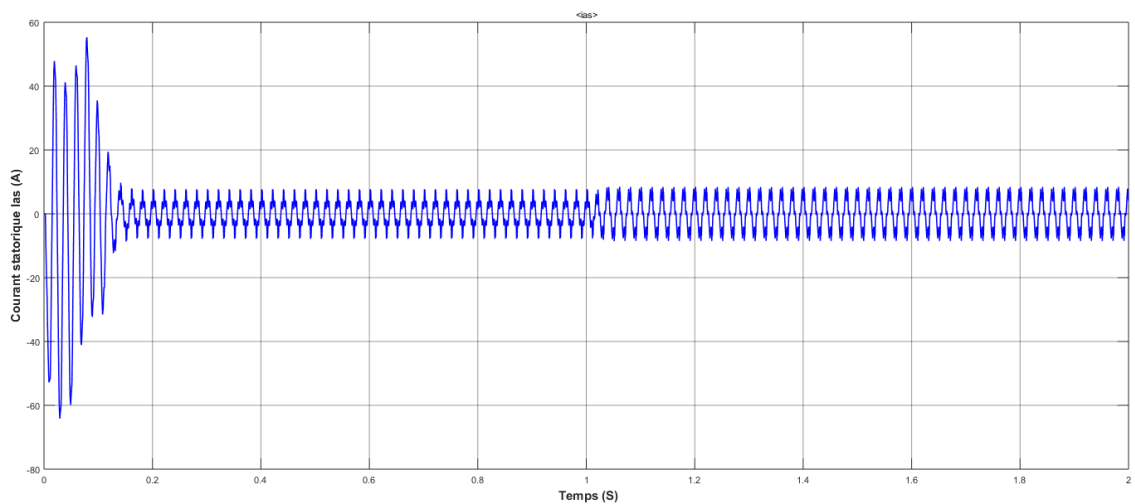
La (Figure 4.12) représente Tension composé à la sortie de l'onduleur commande plein onde au bien tension d'alimentation du MAS



**Figure 4. 13:** Zoom sur la tension d'alimentation du MAS commande plein onde.

Nous zoomons la tension d'alimentation du MAS avec deux périodes de temps, on remarque que cette forme de tension prend un signal escalier est périodique, la valeur maximale est égale à la valeur de la source d'alimentation 400v comme le montre la (Figure 4.13).

➤ **Courant statorique**



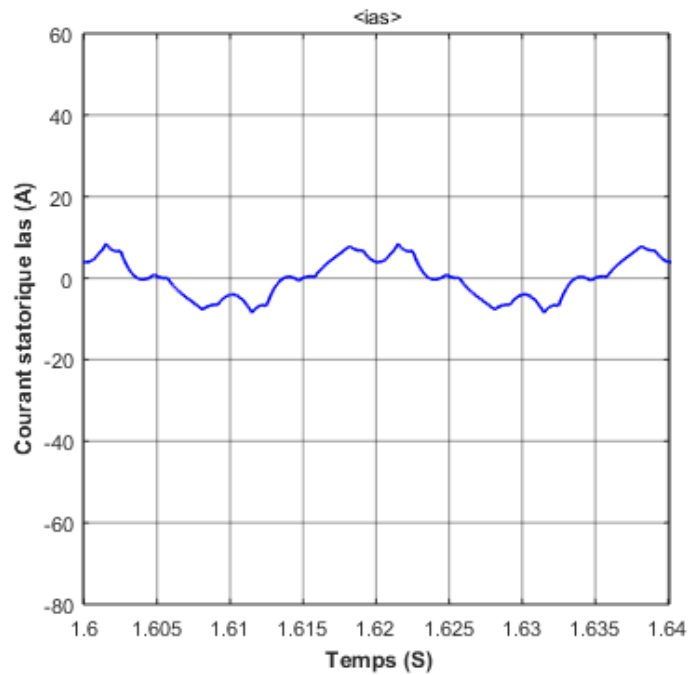
**Figure 4. 14:** Courant statorique de MAS commande plein onde.

La figure au-dessus montre le courant statorique dans un enroulement d'une phase ( $I_{as}$ ), au démarrage de la machine il y a une forte appelle de courant ( $I = 55.3 \text{ A}$ ). Après



ce régime transitoire à l' instant  $t = 0,16$  s'il se stabilise à une valeur efficace est égale 7.2A.

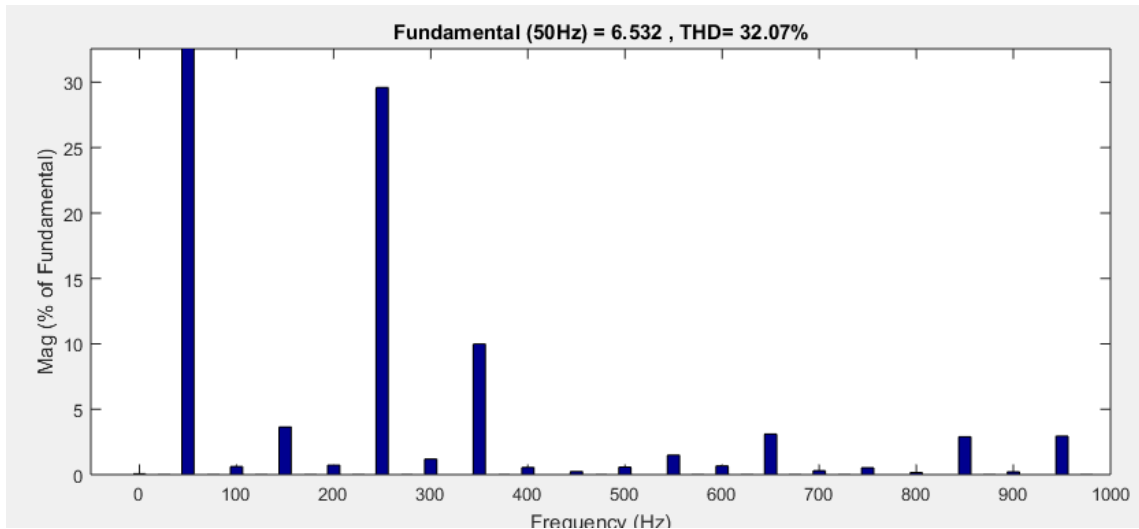
A l'instant  $t = 1.01$  s, on va appliquer une charge mécanique sur l'arbre du moteur représentée par un couple résistant d'une valeur  $C_r = 10$  N.m, dans ce cas, On remarque qu'il y a une augmentation sur le courant statorique ( $I_{as}$ ) 8.4 A.



**Figure 4. 15:** Zoom sur courant statorique  $I_{as}$  de MAS commande pleine onde.

La (Figure 4.15) montre le Zoom du courant statorique d'une phase du moteur, on remarque qu'il y a une petite amélioration, les harmoniques mieux par rapport à celui de la pleine onde à deux niveaux.

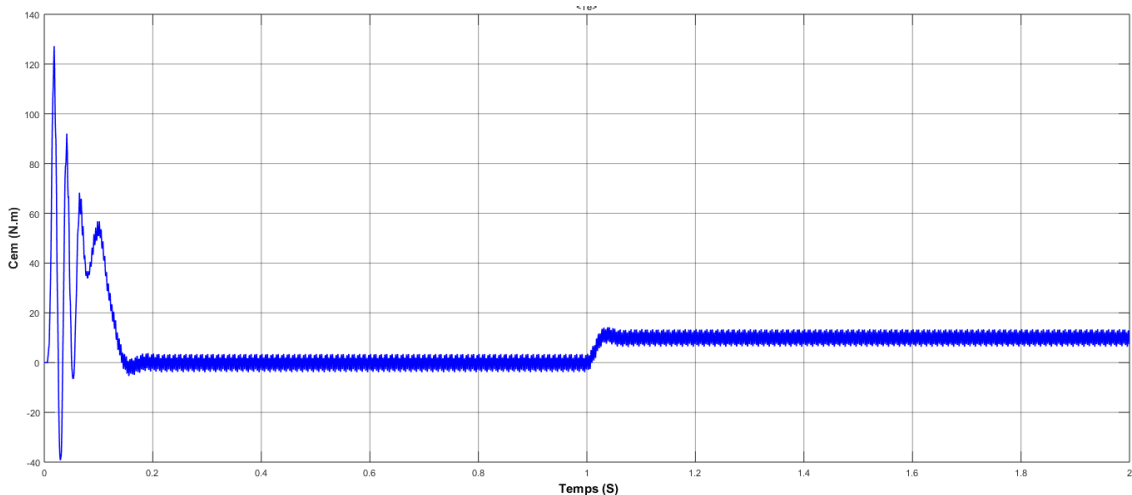
➤ **Spectre d'harmonique du courant THD=32.07% :**



**Figure 4.16:** spectre d'harmonique de courant statorique plein onde à trois niveaux commande plein onde.

La (Figure 4.16) représente l'analyse spectrale d'harmonique du courant statorique  $I_{as}$ , nous avons obtenus un **THD** = 32.07%, on remarque qu'il y a une diminution presque la moitié de THD de la pleine onde à deux niveaux.

➤ **Couple électromagnétique**

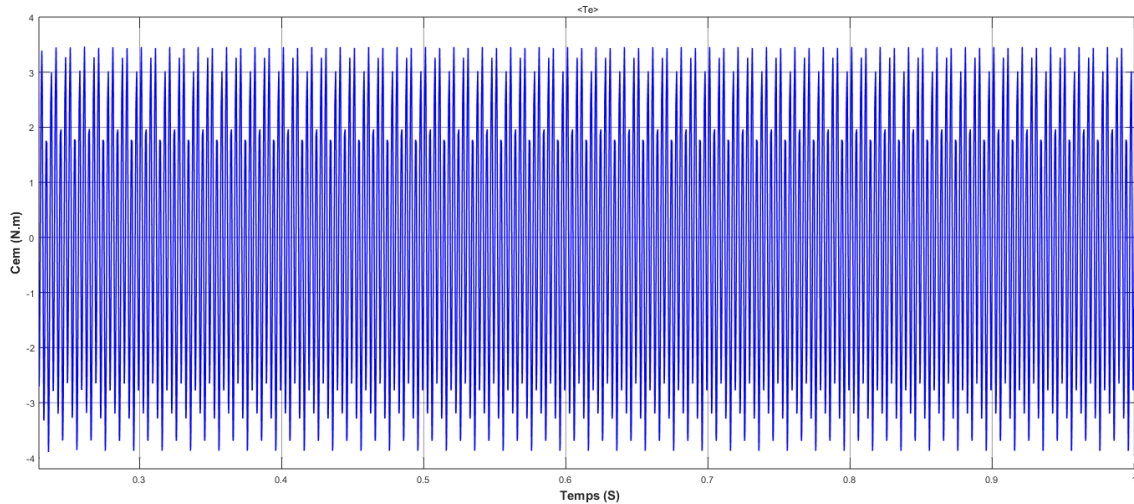


**Figure 4.17:** Couple électromagnétique de MAS commande plein onde.

La (Figure 4.17) montre la variation du couple électromagnétique pour des différents modes de fonctionnement, on observe que :

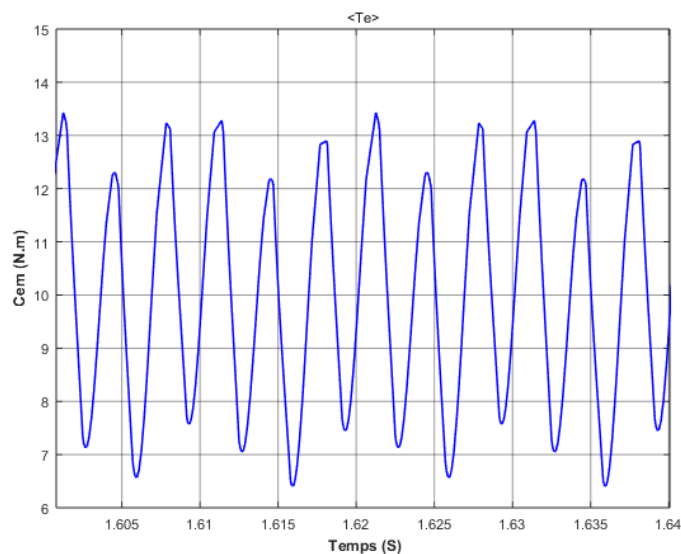
Lorsque  $t \in [0, 0.23 \text{ s}]$ , au démarrage, le couple atteint une valeur maximale qu'est égal à 127 N.m. Pendant cet interval on remarque qu'il ya des oscillations ce qui implique le regime transitoire.

lorsque  $t \in [0.23, 1 \text{ s}]$ , le couple électromagnétique se stabilise vers une valeur moyenne qu'est égale 0 N.m, ce qui implique le fonctionnement à vide de la machine Comme le montre la (Figure 4.18).



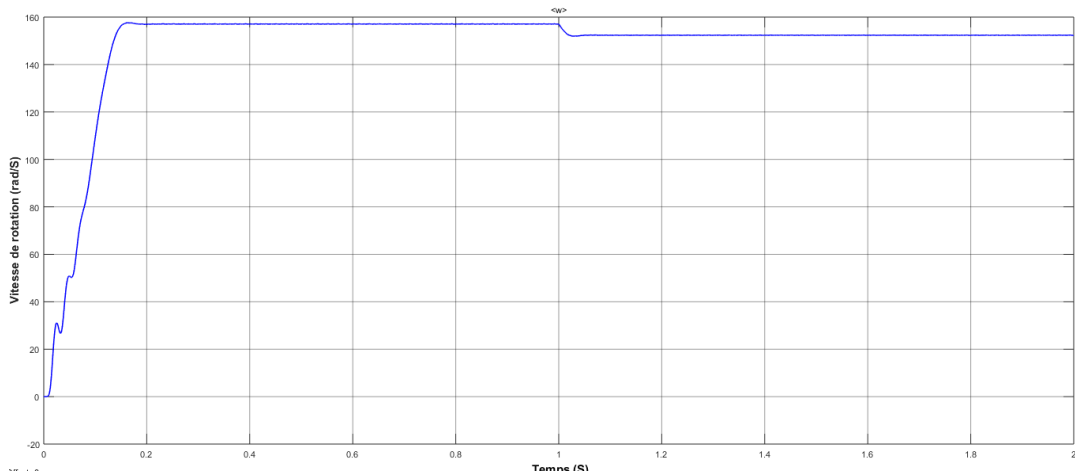
**Figure 4. 18:** le fonctionnement à vide de la machine (MAS) commande plein onde.

A l'instant  $t = 1 \text{ s}$ , on applique une charge mécanique d'une valeur 10 N.m, dans ce cas la machine prend cette valeur, biensure après un temps de réponse avec des ondulations (ou oscillations) qui comprennent entre  $[6.5 \div 13.4 \text{ N.m}]$  Comme le montre la (Figure 4.19.)



**Figure 4. 19:** les ondulations du Cem de MAS commande plein onde.

## ➤ Vitesse de rotation

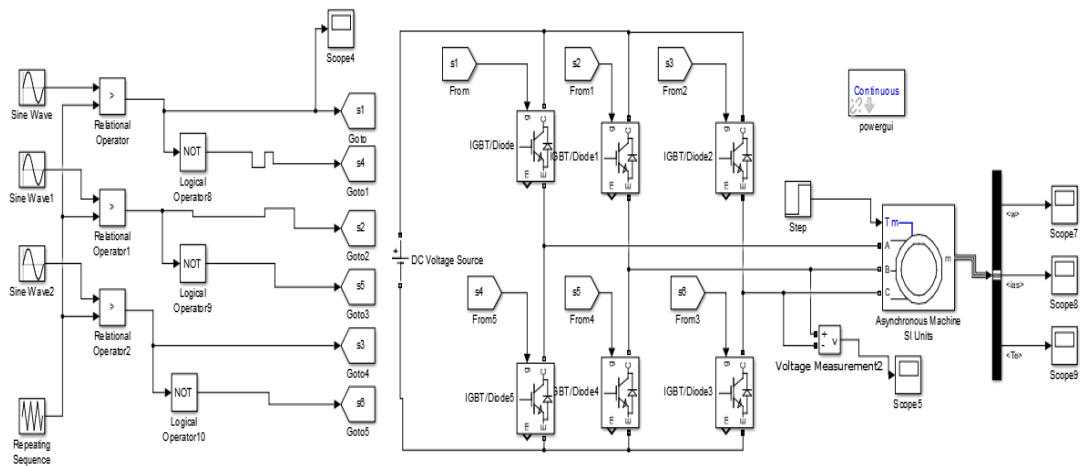


**Figure 4. 20:** Vitesse de rotation de MAS commande plein onde.

La (Figure 4.20) montre qu'au démarrage et pendant le régime transitoire la vitesse est presque linéaire puis elle atteint sa valeur nominal à vide de 157 rad /s. lorsque la MAS fonctionne en charge, on remarque qu'il y a une diminution de cette valeur  $\Omega = 153$  rad/s.

## 4.4 Commande MLI sinusoidale

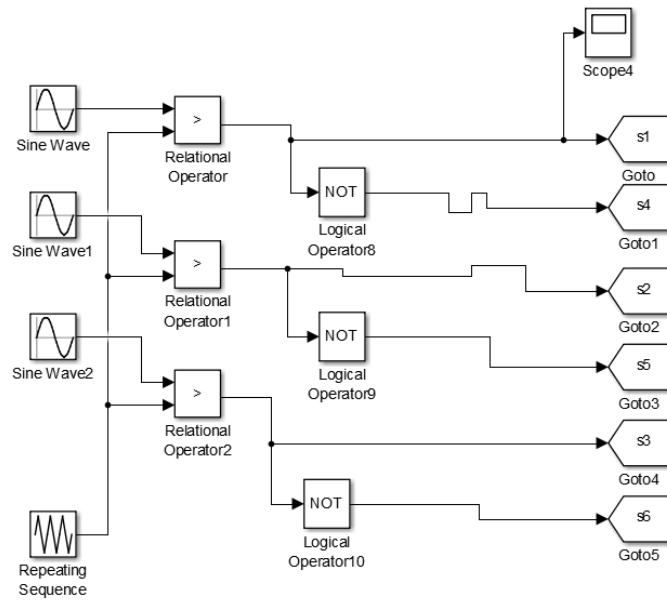
### 4.4.1 Onduleur a deux niveaux triphasés



**Figure 4. 21:** schéma bloc de l'onduleur NPC à deux niveaux avec la commande MLI sinusoidale.

La (Figure 4.21) représente le schéma bloc de de l'onduleur NPC à deux niveaux avec la commande MLI sinusoidale.

La tension de la source continue qui alimente notre onduleur est fixé de valeur 400 V.

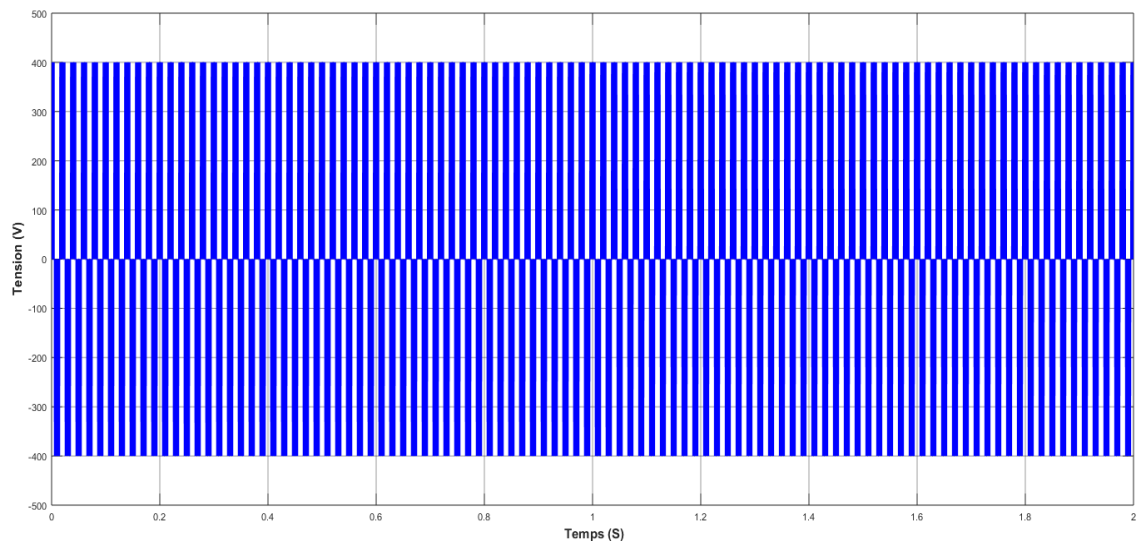


**Figure 4. 22:** Le schéma bloc de la commande MLI sinusoidale de l'onduleur NPC à deux niveaux.

La (Figure 4.22) représente le schéma bloc de la commande MLI sinusoidale de l'onduleur NPC à deux niveaux

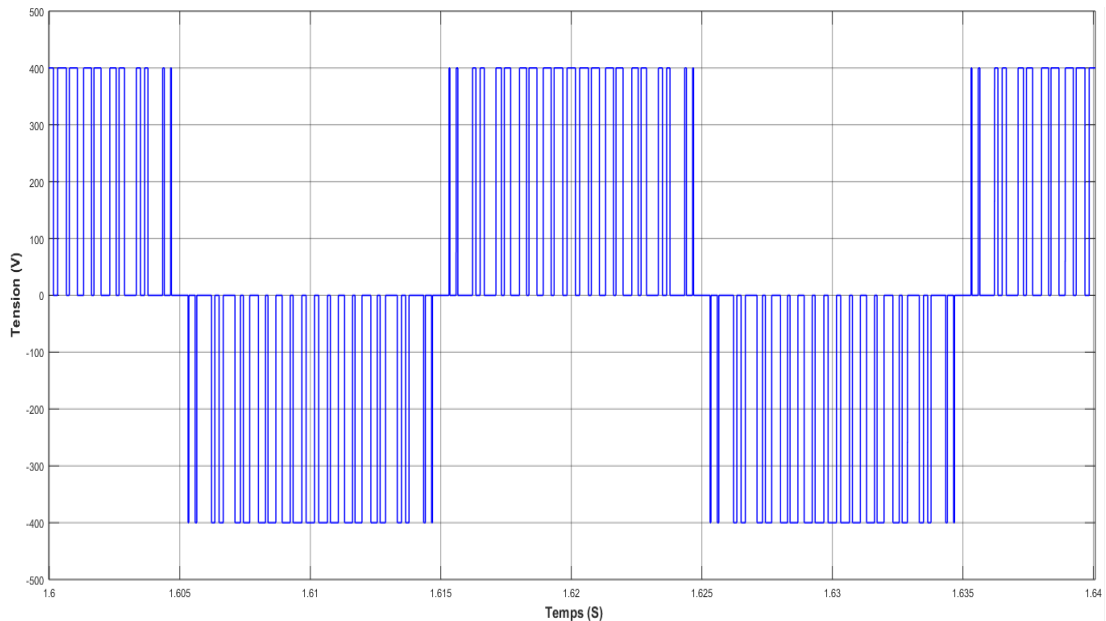
Une seule porteuse pour un onduleur à deux niveaux.

La fréquence de modulation est égale à 1050 Hz.



**Figure 4. 23:** Tension composé entre deux phase c et b à la sortie de l'onduleur de deux niveaux commande MLI.

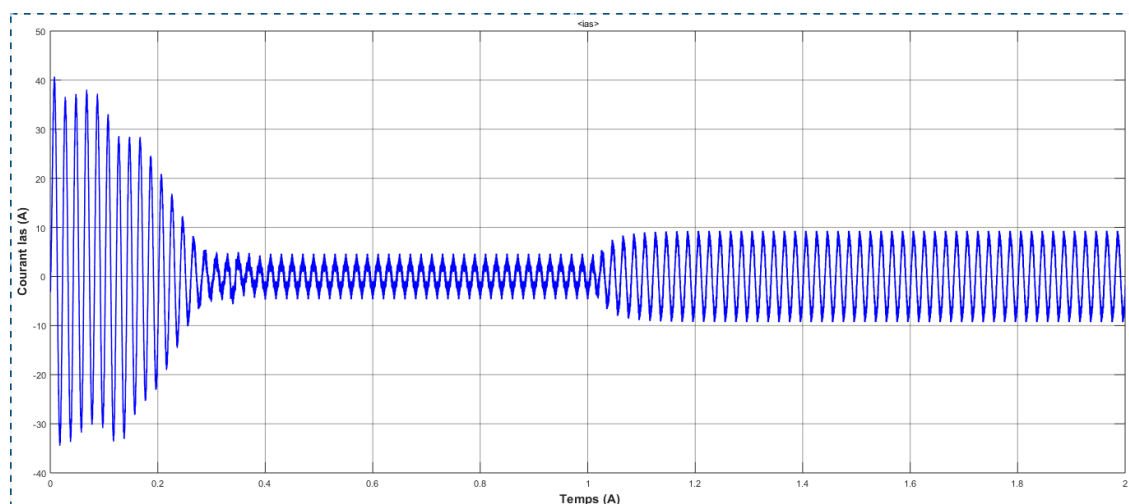
La (Figure 4.23) représente la tension composée à la sortie de l'onduleur commande par MLI sinusoidale au bien tension d'alimentation du MAS.



**Figure 4. 24:** Zoom sur la tension d'alimentation du MAS commande MLI.

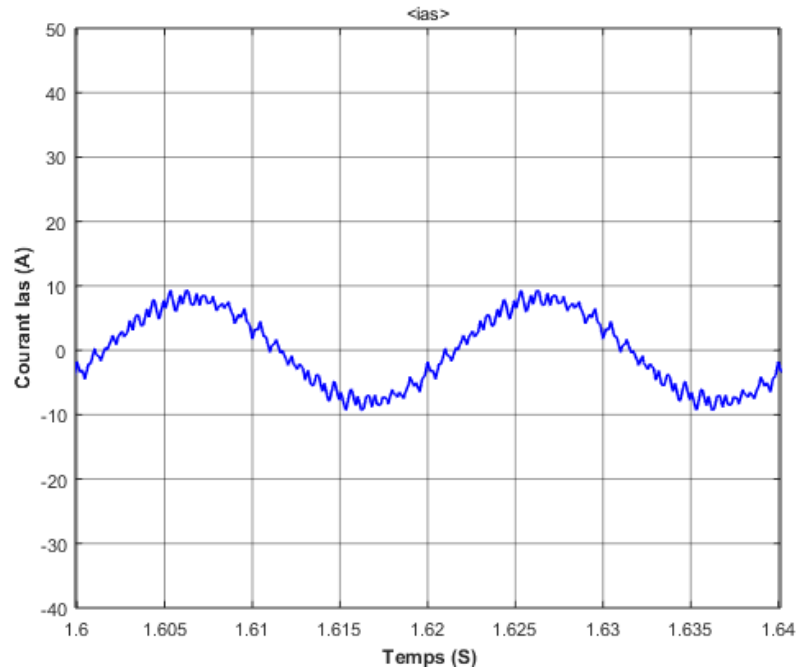
Nous zoomons la tension d'alimentation du MAS avec deux périodes de temps, On remarque que le signal est périodique et prend un signal carrée. La valeur maximale est égale à la valeur de la source d'alimentation 400v comme le montre la (Figure 4.24).

#### ➤ **Courant statorique**



**Figure 4. 25:** Courant statorique de MAS commande MLI.

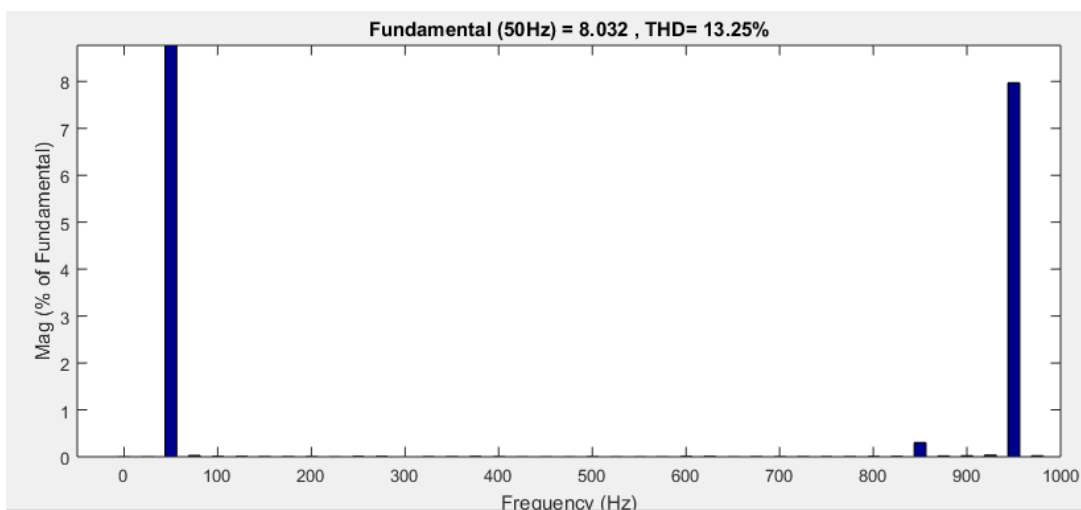
La (Figure 4.25) montre le courant statorique dans un enroulement d'une phase ( $I_a$ ), au démarrage de la machine il y a une forte appelle de courant ( $I = 40.7 \text{ A}$ ). Puis une stabilité en marche à vide ( $I = 4.6 \text{ A}$ ), ensuite un courant en charge ( $I = 9.3 \text{ A}$ ).



**Figure 4. 26:** Zoom sur courant statorique  $I_{as}$  de MAS commande MLI.

La (Figure 4.26) représente le Zoom du courant statorique, on remarque qu'il y a une nette amélioration du point de vue ondulation par rapport à celui de la pleine onde.

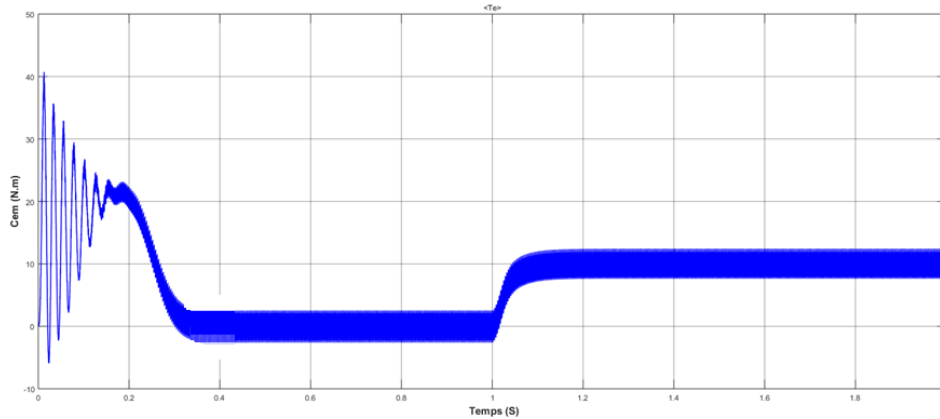
➤ **Spectre d'harmonique du courant THD=13.26%**



**Figure 4. 27:** spectre d'harmonique de courant statorique commande MLI.

La (Figure 4.27) représente l'analyse spectrale d'harmonique du courant de la commande MLI-sinusoidale et nous avons obtenus le **THD** = 13.25%. On remarque qu'il y a une grande diminution de **THD** par rapport à celui de la pleine onde à deux niveaux.

➤ **Couple électromagnétique**

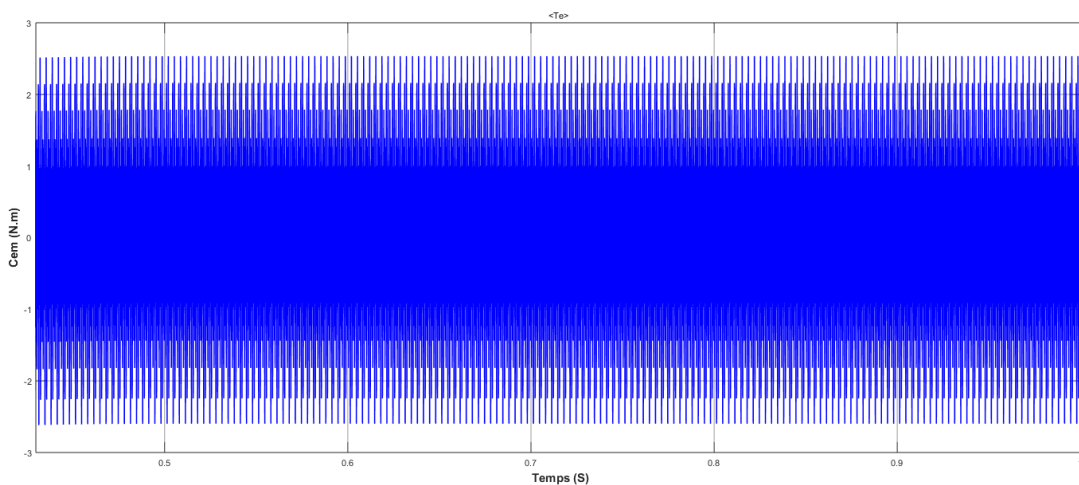


**Figure 4. 28:** Couple électromagnétique de MAS commande MLI.

La (Figure 4.28) montre la variation du couple électromagnétique pour des différents modes de fonctionnement, on observe que :

Lorsque  $t \in [0, 0.4 \text{ s}]$ , au démarrage, le couple atteint une valeur maximale qu'est égal à 40.7 N.m. Pendant cet interval on remarque qu'il ya des oscillations ce qui implique le regime transitoire.

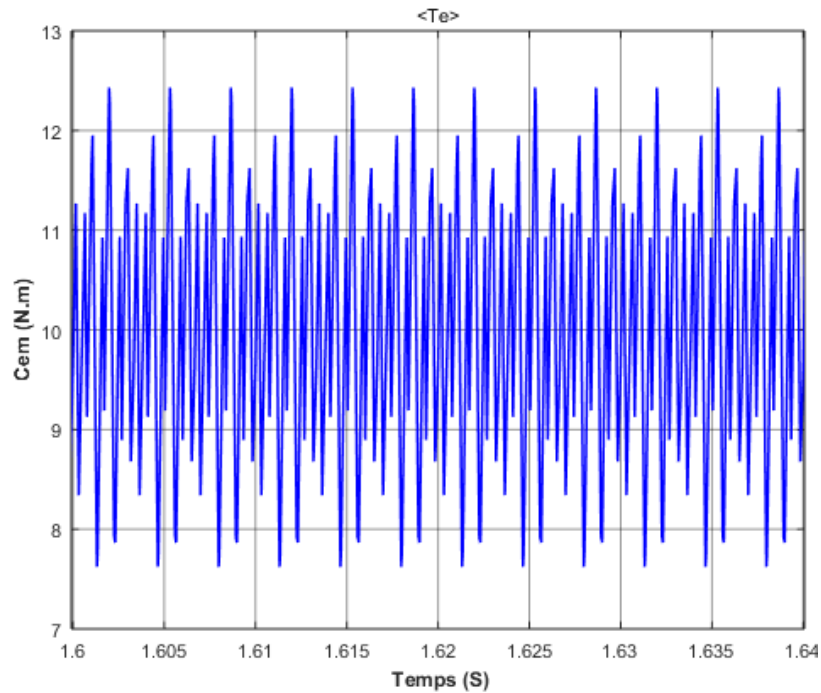
Lorsque  $t \in [0.4, 1 \text{ s}]$ , le couple électromagnétique se stabilise vers une valeur moyenne qu'est égale 0 N.m, ce qui implique le fonctionnement à vide de la machine Comme le montre la (Figure 4.29).



**Figure 4. 29:** le fonctionnement à vide de la machine (MAS) commande MLI.

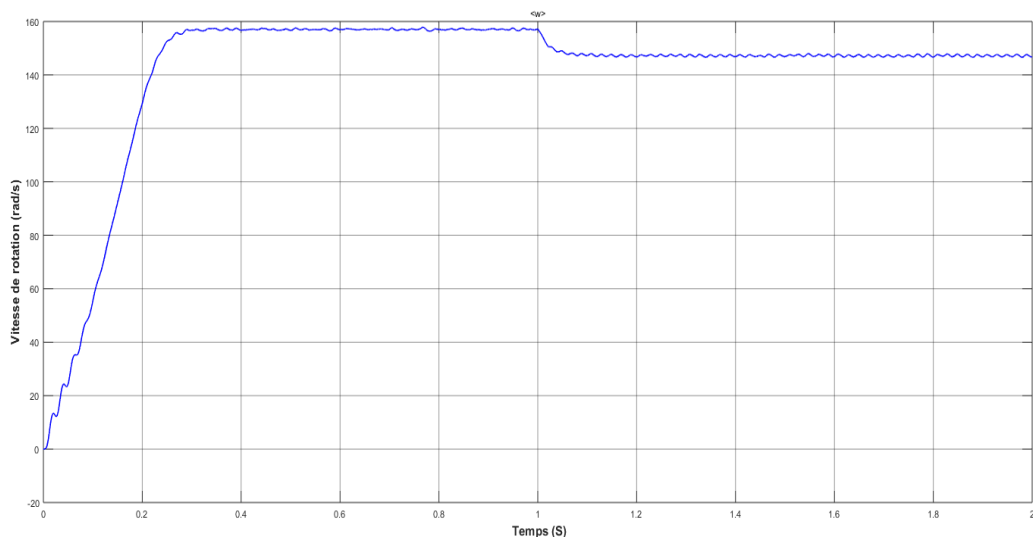


A l'instant  $t = 1$  s, on applique une charge mécanique d'une valeur 10 N.m, dans ce cas la machine prend cette valeur, bien sure après un temps de réponse avec des ondulations (ou oscillations) qui comprennent entre  $[7.60 \div 12.35\text{N.m}]$  Comme le montre la (Figure 4.30).



**Figure 4. 30:** les ondulations du Cem de MAS commande MLI.

### ➤ Vitesse de rotation



**Figure 4. 31:** vitesse de rotation de MAS commande MLI.

La (Figure 4.31) montre qu'au démarrage et pendant le régime transitoire la vitesse est presque linéaire puis elle atteint sa valeur nominale à vide de 157 rad /s. lorsque la MAS

fonctionne en charge, on remarque qu'il y a une diminution de cette valeur  $\Omega = 147.5$  rad/s.

#### 4.4.2 Onduleur a trois niveaux triphasés

##### a Commande MLI sinusoïdale ( $m=21$ )

Dans notre projet l'onduleur à trois niveaux, il est commandé par une modulation sinusoïdale à double triangle. La (Figure 4.32) représente schéma bloc de l'onduleur NPC à trois niveaux avec la commande MLI sinusoïdale.

La (Figure 4.33) représente le schéma bloc de la commande MLI sinusoïdale de l'onduleur NPC trois niveaux qui est basée, dans son principe, sur la modulation sinusoïdale naturelle, elle est recommandée d'utiliser deux signaux triangulaires de même fréquence  $f_c$  et de même amplitude  $A_c$ . Ces signaux trigonométriques sont comparés, pour chaque phase, à un signal de référence d'amplitude  $A_m$  et de fréquence  $F_m$ . Il s'agit d'une modulation sinusoïdale à double triangle au bien deux porteuses comme représente la (Figure 4.34) Principe de la MLI à deux porteuses pour un bras  $i$  de l'onduleur à trois niveaux), L'indice de modulation  $m=21$ ,  $f_c=1050$  Hz  
 Tout cela peut être résumé selon l'algorithme suivant :

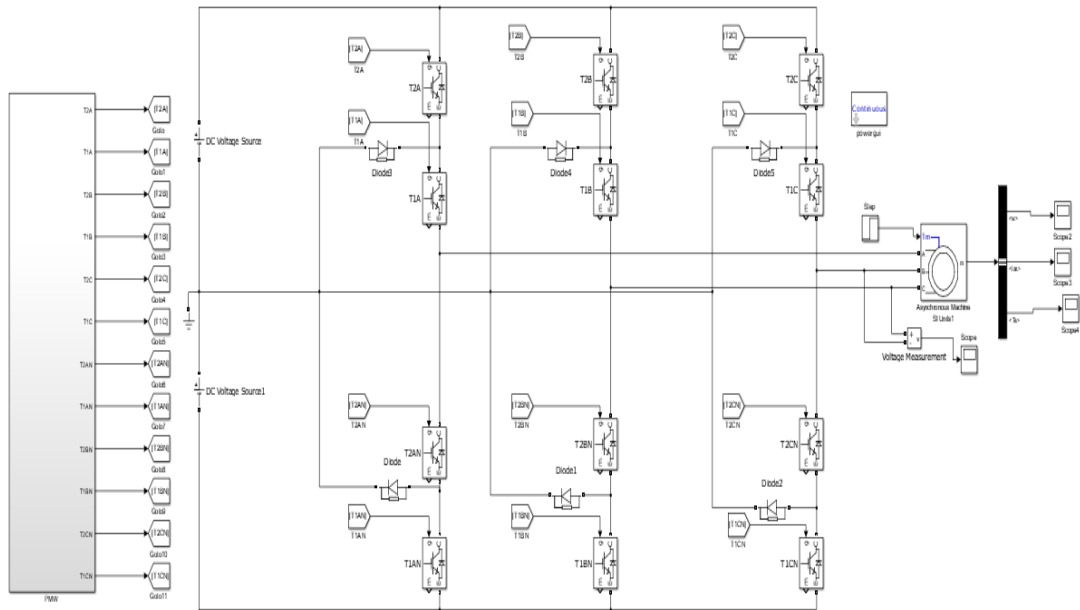
$$\begin{aligned}
 (V_{refi} \geq Up1) &\implies B_{ki1} = 1 \ \& \ B_{ki2} = 1 \\
 (V_{refi} \geq Up2) &\implies B_{ki1} = 0 \ \& \ B_{ki2} = 0 \quad \text{Avec} \quad \begin{cases} B_{ki3} = \overline{B_{ki1}} \\ B_{ki4} = \overline{B_{ki2}} \end{cases} \quad (4.1) \\
 (V_{refi} \geq Up1) \ \& \ (V_{refi} \geq Up2) &\implies B_{ki1} = 0 \ \& \ B_{ki2} = 1
 \end{aligned}$$

Avec :

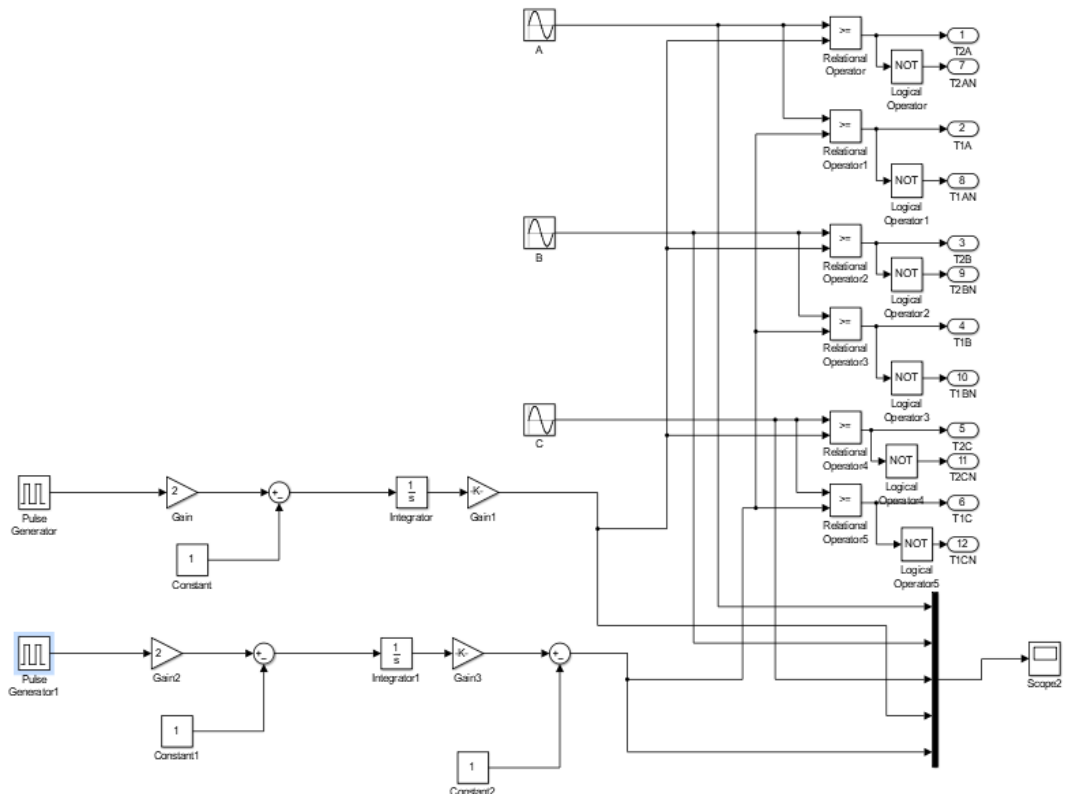
$Up1$  : représente la variation de l'amplitude de l'onde de la porteuse en haut.

$Up2$  : représente la variation de l'amplitude de l'onde de la porteuse en bas.

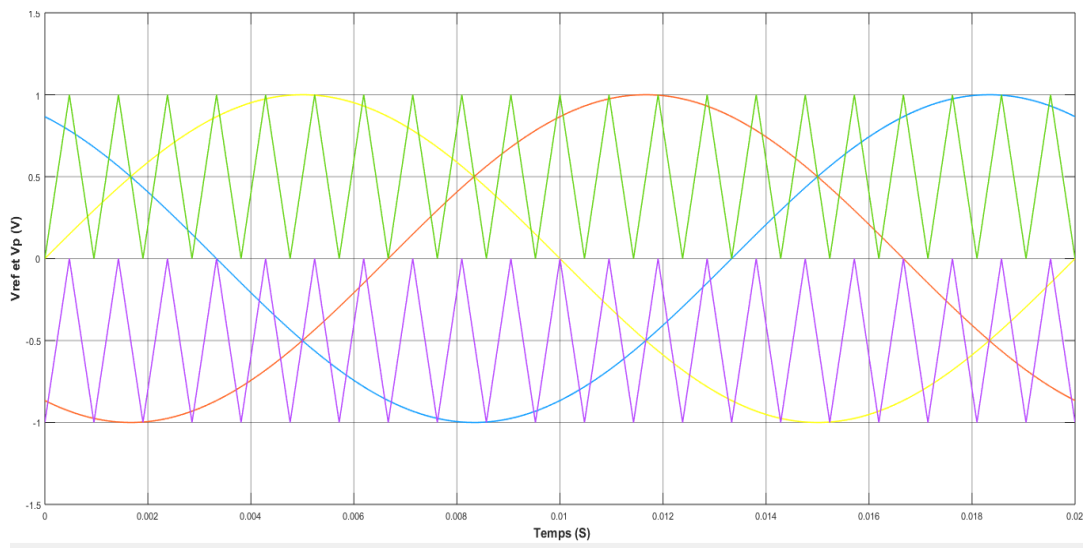
Pour les onduleurs avec un nombre de niveaux  $n$  supérieur à trois, la technique sinusoïdale naturelle avec son signal triangulaire unique, ne permet pas la génération de tous les signaux de commande requis. Alors, Cette technique nécessite  $(n-1)$  signaux triangulaires de même fréquence  $f_c$  et de même amplitude  $A_c$



**Figure 4. 32 :** schéma bloc de l'onduleur NPC à trois niveaux avec la commande MLI sinusoïdale.

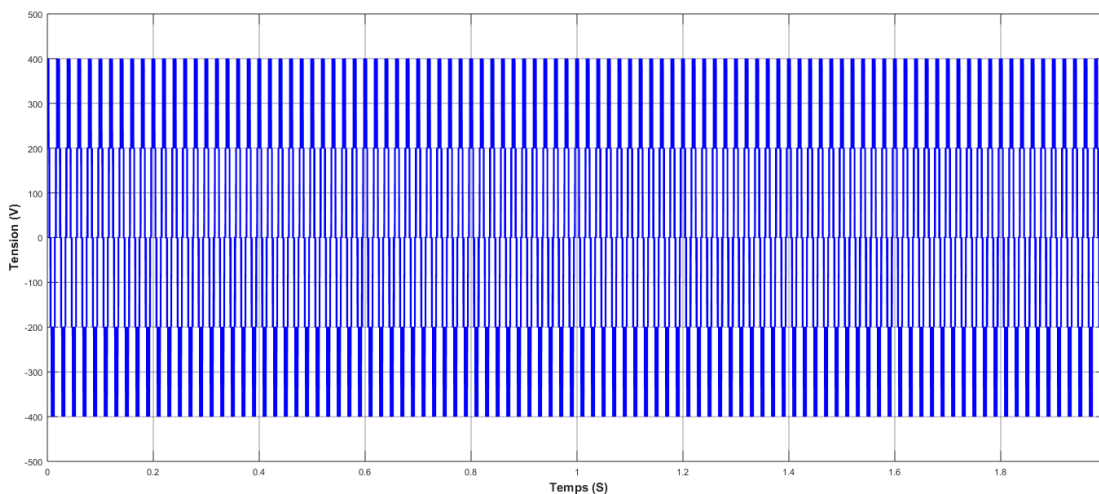


**Figure 4. 33:** schéma bloc de la commande MLI sinusoidale de l'onduleur NPC trois niveaux.



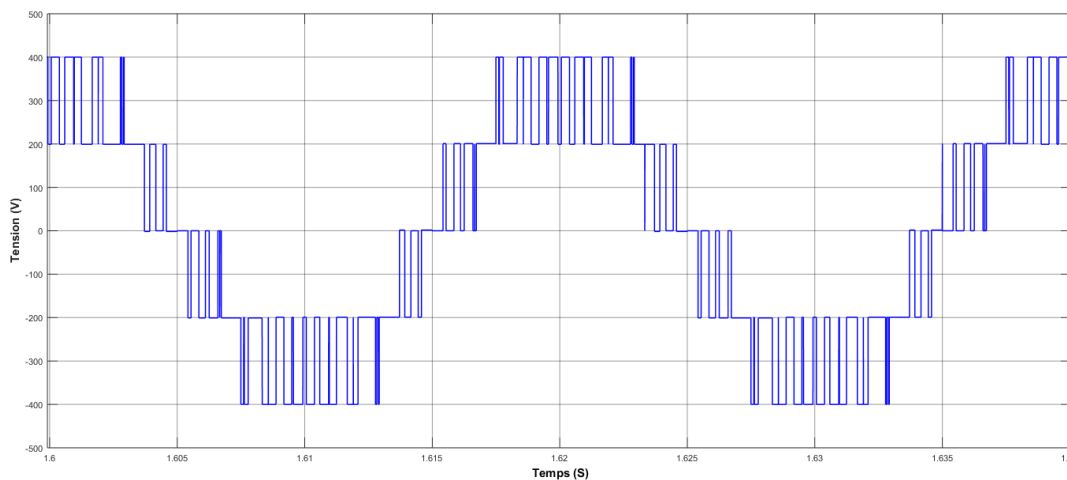
**Figure 4. 34:** Principe de la modulation d'un onduleur triphasé à MLI à deux porteuses pour  $m=21$ .

➤ **Tension composé**



**Figure 4. 35:** Tension composé entre deux phase c et b à la sortie de l'onduleur de trois niveaux commande MLI ( $m=21$ ).

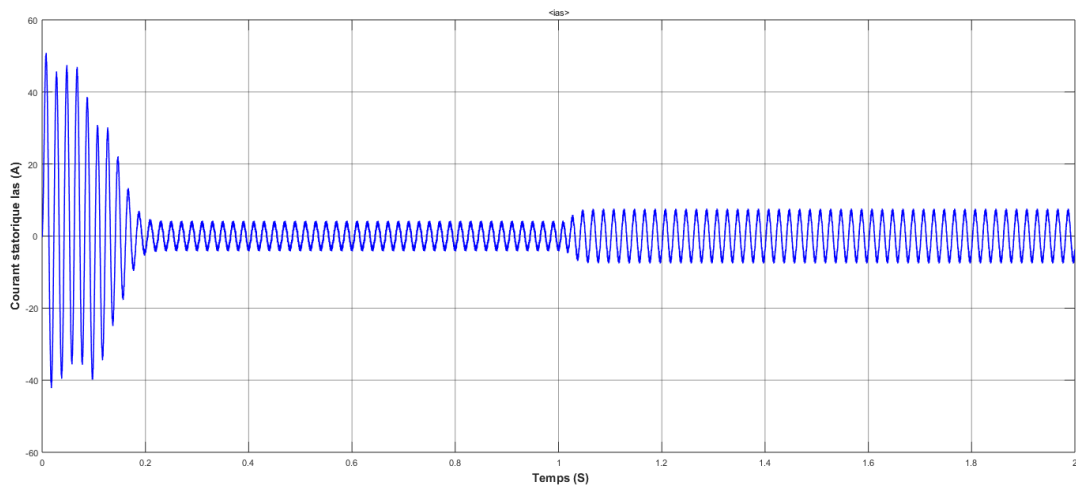
La (Figure 4.35) représente la tension composé à la sortie de l'onduleur à trois niveaux commande par MLI sinusoïdale au bien tension d'alimentation du MAS



**Figure 4. 36 :** Zoom sur la tension d'alimentation du MAS commande MLI ( $m=21$ ).

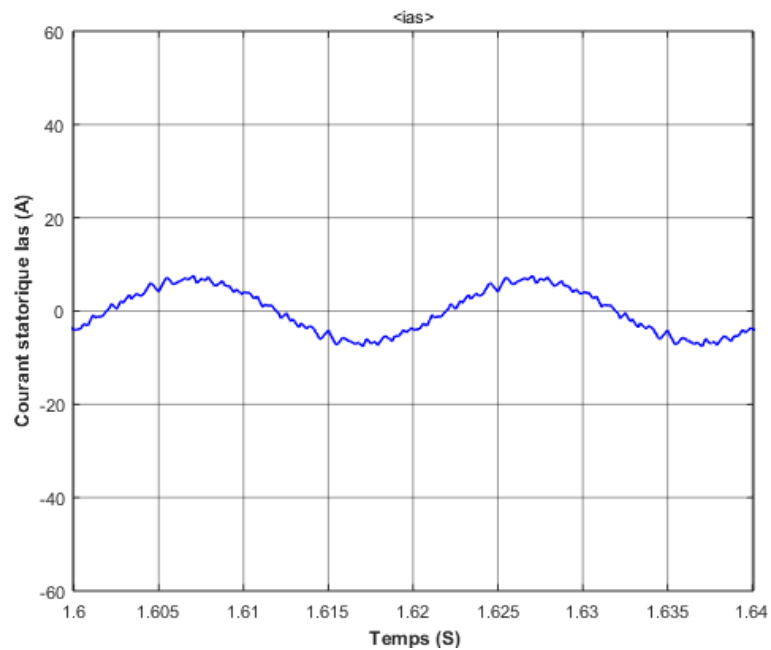
Nous zoomons la tension d'alimentation du MAS avec deux périodes de temps, On remarque que le signal est périodique et il prend une forme d'escalier. La valeur maximale est égale à la valeur de la source d'alimentation 400v comme le montre la (Figure4.36).

### ➤ Courant statorique



**Figure 4. 37:** Courant statorique  $I_{as}$  de MAS commande MLI ( $m=21$ ).

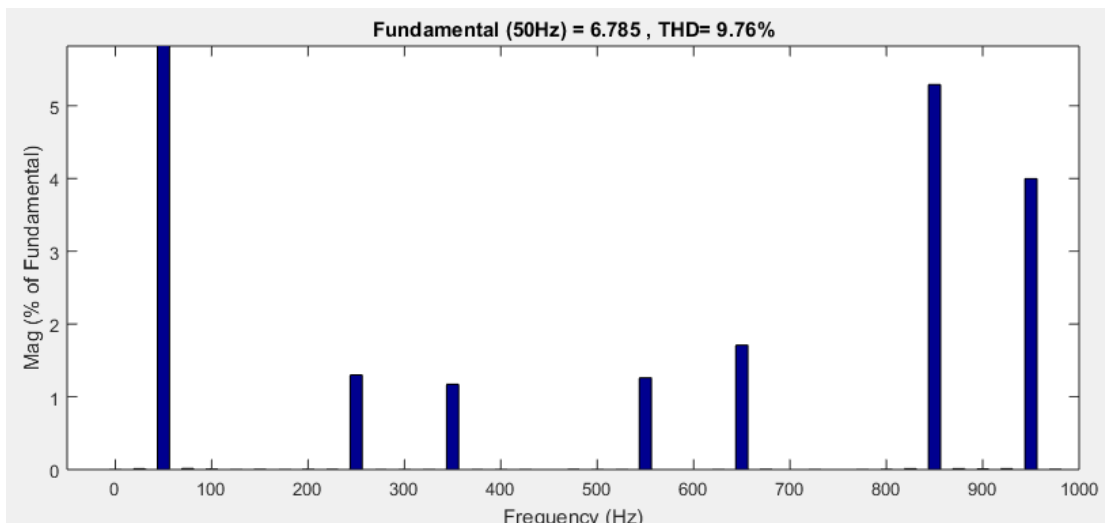
La (Figure 4.37) montre le courant statorique dans un enroulement d'une phase ( $I_{as}$ ), au démarrage de la machine il y a une forte appelle de courant ( $I = 51 \text{ A}$ ). Puis une stabilité en marche à vide ( $I = 4.2 \text{ A}$ ), ensuite un courant en charge ( $I = 7.6 \text{ A}$ ).



**Figure 4. 38:** Zoom sur courant statorique  $I_{as}$  de MAS commande MLI ( $m=21$ ).

La (Figure 4.38) représente le Zoom du courant statorique, on remarque on remarque qu'il y a une petite amélioration, les harmoniques mieux par rapport à celui de la pleine onde à deux niveaux.

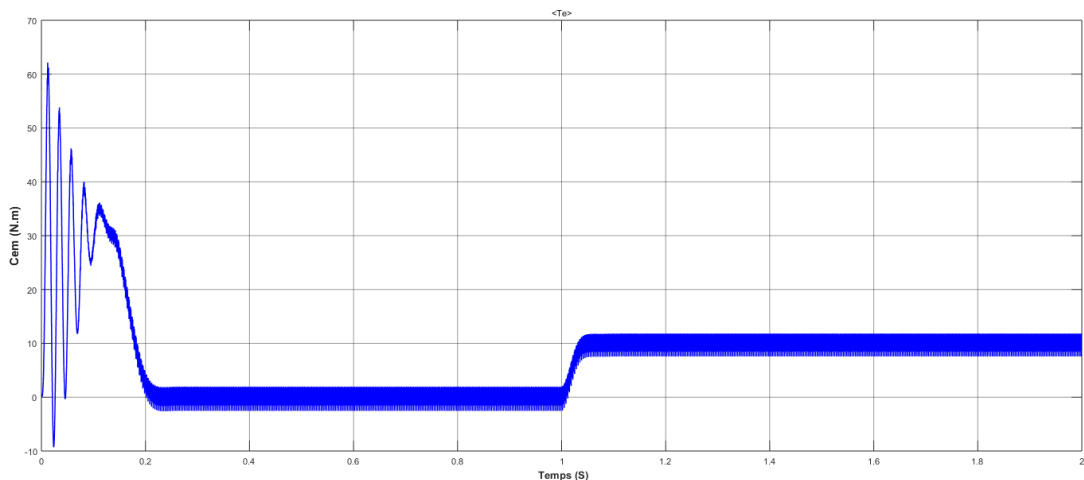
➤ **Spectre d'harmonique du courant THD =9.76%**



**Figure 4. 39:** spectre d'harmonique de courant statorique commande MLI ( $m=21$ ).

La (Figure 4.39) représente l'analyse spectrale d'harmonique du courant de la commande MLI-sinusoidale et nous avons obtenus le **THD** = 9.76%. On remarque qu'il y a une grande diminution de **THD** par rapport à celui de la pleine onde à deux niveaux.

➤ **Couple électromagnétique**

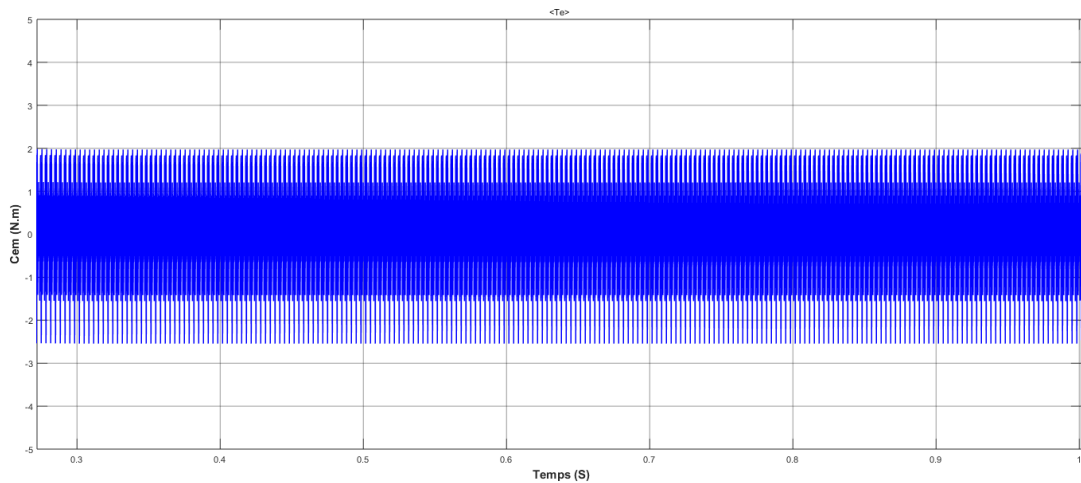


**Figure 4. 40:** Couple électromagnétique de MAS commande MLI ( $m=21$ ).

La (Figure 4.40) montre la variation du couple électromagnétique pour des différents modes de fonctionnement, on observe que :

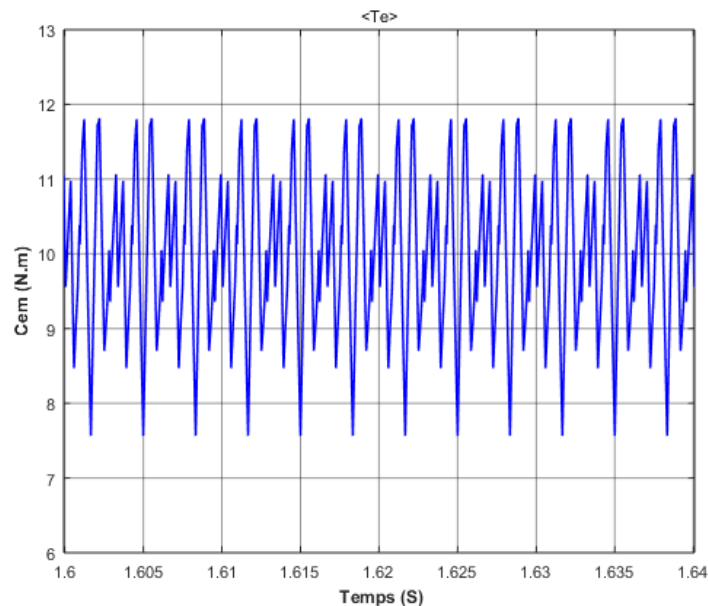
Lorsque  $t \in [0, 0.24 \text{ s}]$ , au démarrage, le couple atteint une valeur maximale qu'est égal à 62 N.m. Pendant cet interval on remarque qu'il ya des oscillations ce qui implique le régime transitoire.

Lorsque  $t \in [0.24, 1 \text{ s}]$ , le couple électromagnétique se stabilise vers une valeur moyenne qu'est égale 0 N.m, ce qui implique le fonctionnement à vide de la machine Comme le montre la (Figure 4.41).



**Figure 4. 41:** le fonctionnement à vide de la machine (MAS) commande MLI ( $m=21$ ).

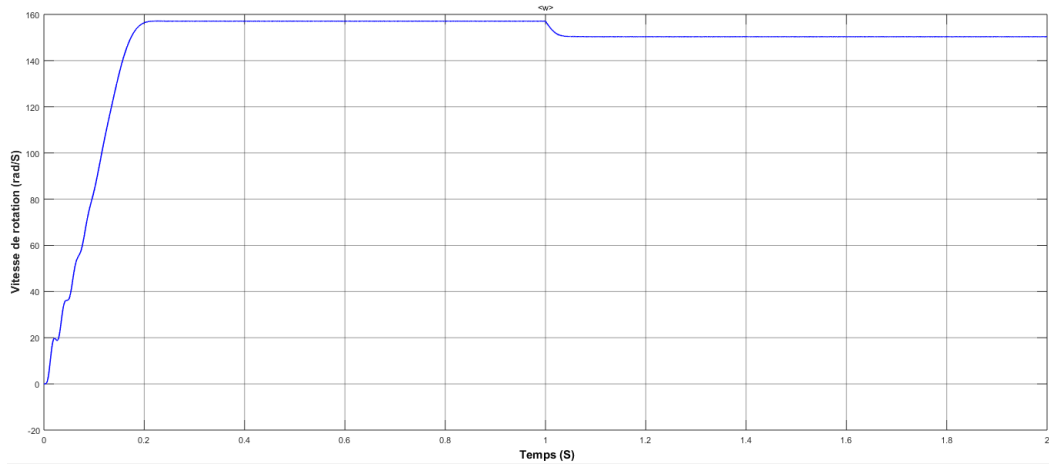
A l'instant  $t = 1 \text{ s}$ , on applique une charge mécanique d'une valeur 10 N.m, dans ce cas la machine prend cette valeur, biensure après un temps de réponse avec des ondulations (ou oscillations) qui comprennent entre  $[7.56 \div 11.80 \text{ N.m}]$  Comme le montre la (Figure 4.42).



**Figure 4. 42 :** les ondulations du  $Cem$  de MAS commande MLI ( $m=21$ ).



➤ **Vitesse de rotation**

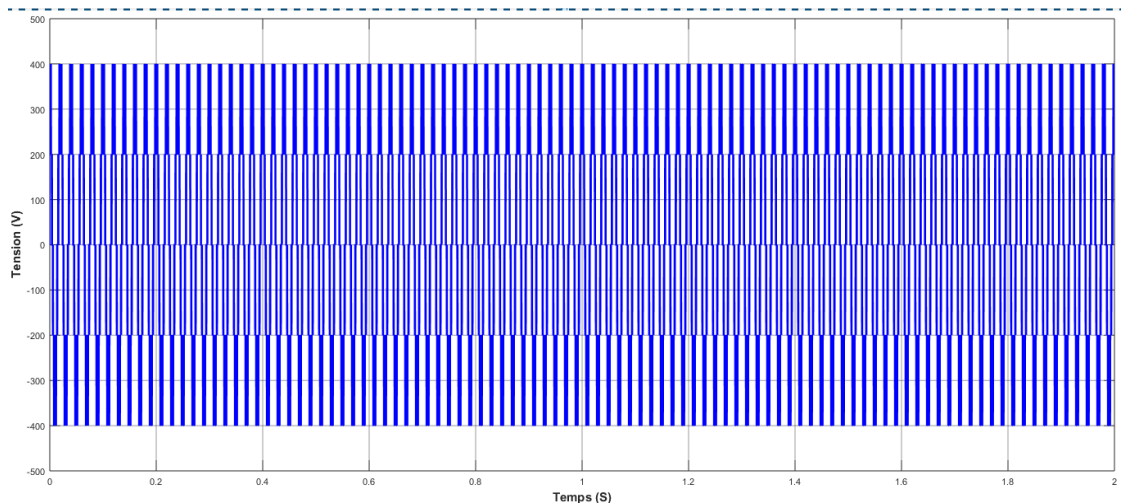


**Figure 4. 43:** vitesse de rotation de MAS commande MLI ( $m=21$ ).

La (Figure 4.31) montre qu'au démarrage et pendant le régime transitoire la vitesse est presque linéaire puis elle atteint sa valeur nominal à vide de 157 rad /s. lorsque la MAS fonctionne en charge, on remarque qu'il y a une diminution de cette valeur  $\Omega = 150$  rad/s.

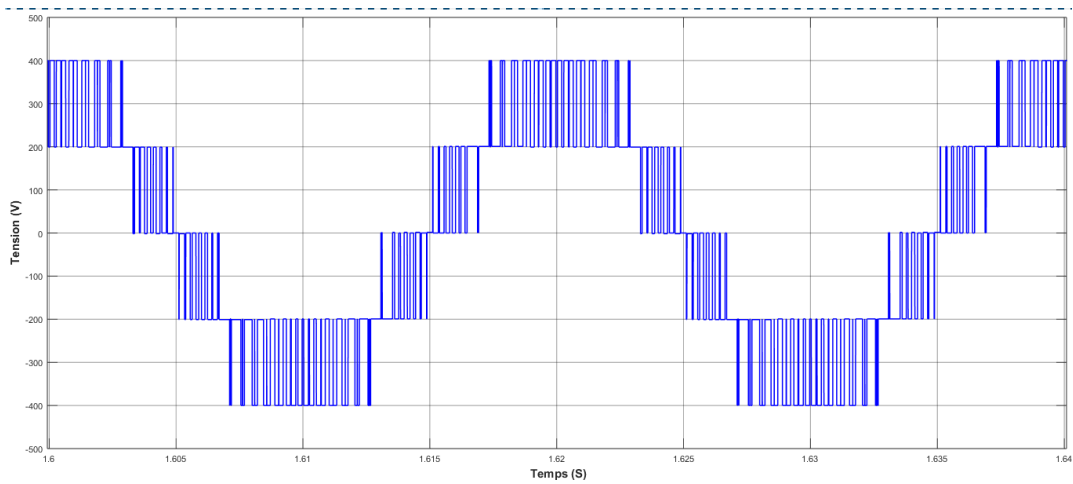
**b Commande MLI sinusoïdale ( $m=42$ )**

➤ **Tension composé**



**Figure 4. 44:** Tension composé entre deux phase c et b à la sortie de l'onduleur de trois niveaux commande MLI ( $m=42$ ).

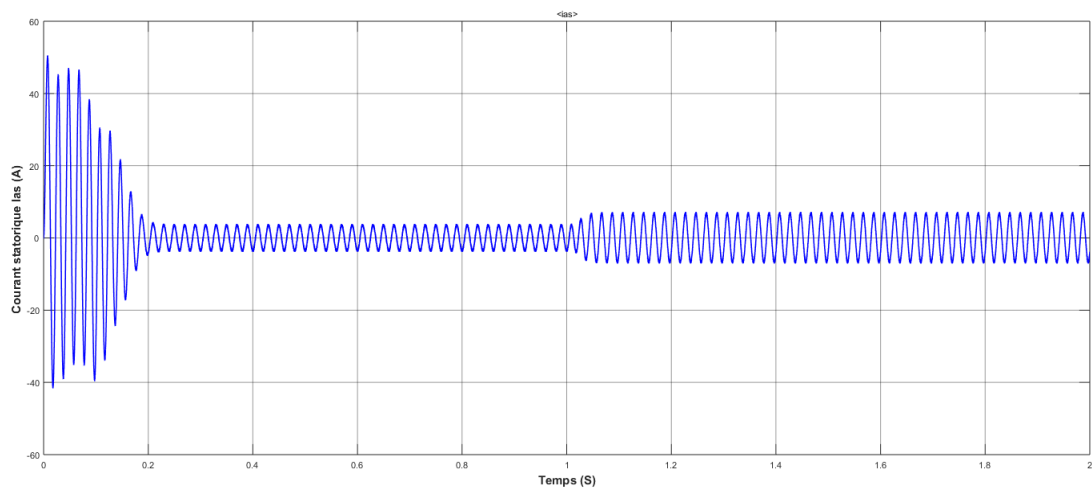
La (Figure 4.44) représente la tension composé à la sortie de l'onduleur à trois niveaux commande par MLI sinusoïdale au bien tension d'alimentation du MAS



**Figure 4. 45:** Zoom sur la tension d'alimentation du MAS commande MLI ( $m=42$ ).

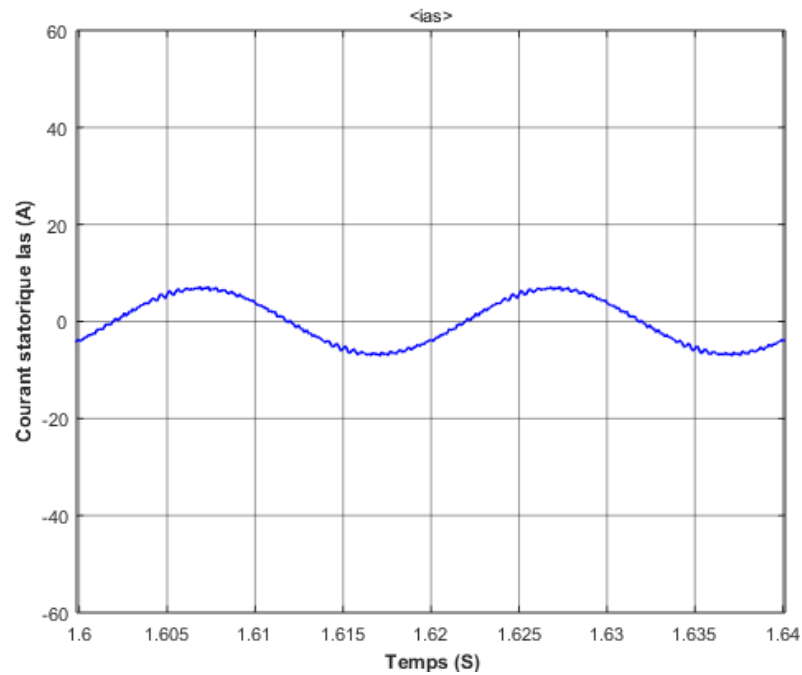
Nous zoomons la tension d'alimentation du MAS avec deux périodes de temps, On remarque que le signal est périodique et il prend une forme d'escalier mieux par rapport à celui MLI sinusoidale ( $m = 21$ ). La valeur maximale est égale à la valeur de la source d'alimentation 400v comme le montre la (Figure 4.45).

#### ➤ Courant statorique



**Figure 4. 46:** Courant statorique Ias de MAS commande MLI ( $m=42$ ).

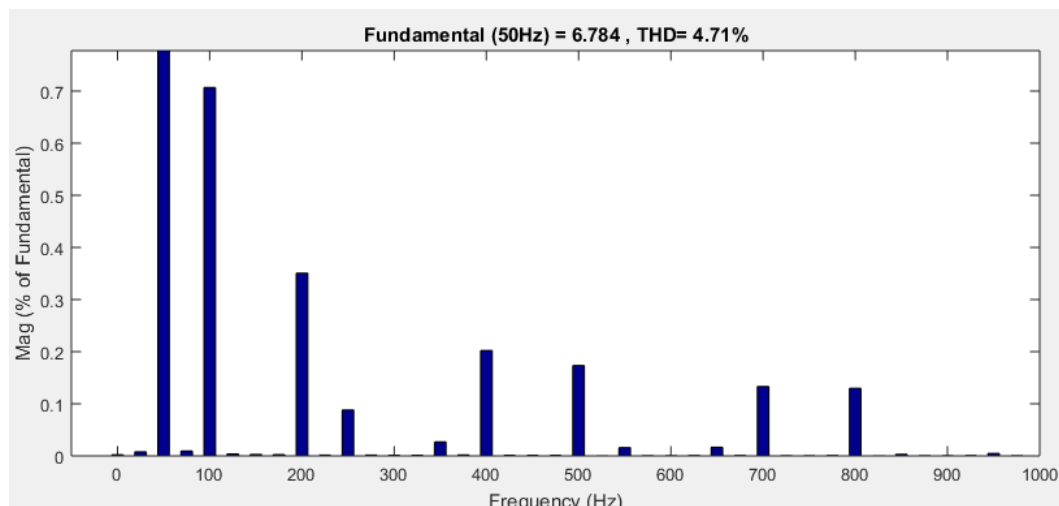
La (Figure 4.46) montre le courant statorique dans un enroulement d'une phase ( $I_{as}$ ), au démarrage de la machine il y a une forte appelle de courant ( $I = 50.5$  A). Puis une stabilité en marche à vide ( $I = 3.9$  A), on applique une charge de  $C_r = 10$  N.m, a l'instant  $t = 1$  s, on remarque il y a une augmentation de courant ( $I = 7.2$  A)



**Figure 4. 47:** Zoom sur courant statorique las de MAS commande MLI ( $m=42$ ).

La (Figure 4.47) représente le Zoom du courant statorique, on remarque le courant prend sa forme sinusoïdal, les harmonique sont réduites par rapport à celui de la pleine onde à deux niveaux et trois niveaux.

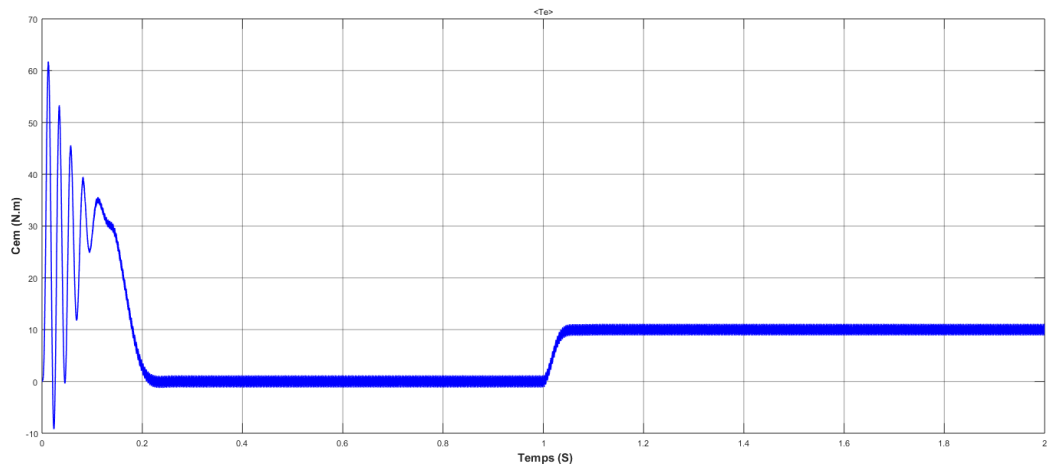
➤ **Spectre d'harmonique du courant THD =4.71%**



**Figure 4. 48:** spectre d'harmonique de courant MLI-sinusoïdale ( $m=42$ ).

La (Figure 4.48) représente l'analyse spectrale d'harmonique du courant de la commande MLI-sinusoïdale ( $m = 42$ ) et nous avons obtenus le **THD = 4.71%**. On remarque qu'il y a une diminution la moitié de **THD** par rapport à celui MLI-sinusoïdale ( $m = 21$ ) à trois niveaux.

### ➤ Couple électromagnétique

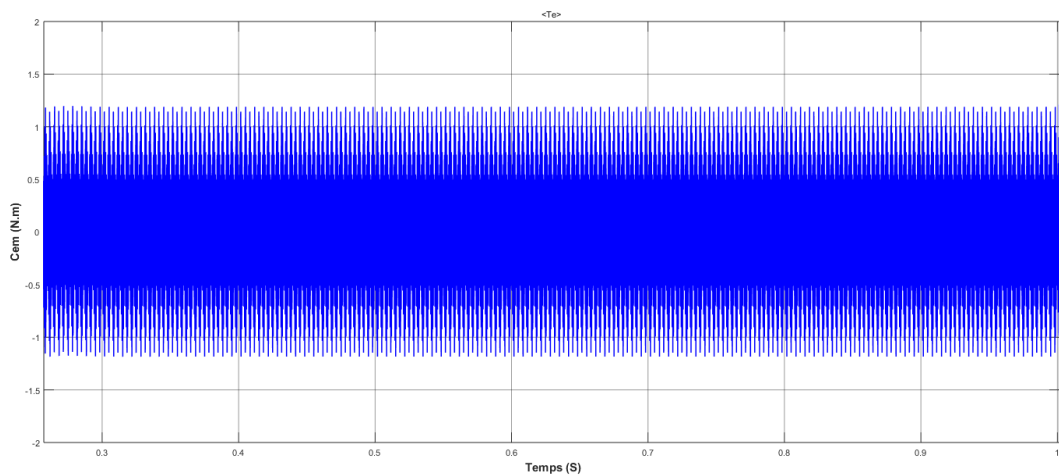


**Figure 4. 49:** Couple électromagnétique de MAS commande MLI ( $m=42$ ).

La (Figure 4.49) montre la variation du couple électromagnétique pour des différents modes de fonctionnement, on observe que :

Lorsque  $t \in [0, 0.23 \text{ s}]$ , au démarrage, le couple atteint une valeur maximale qu'est égal à 61.76 N.m. Pendant cet interval on remarque qu'il ya des oscillations ce qui implique le regime transitoire.

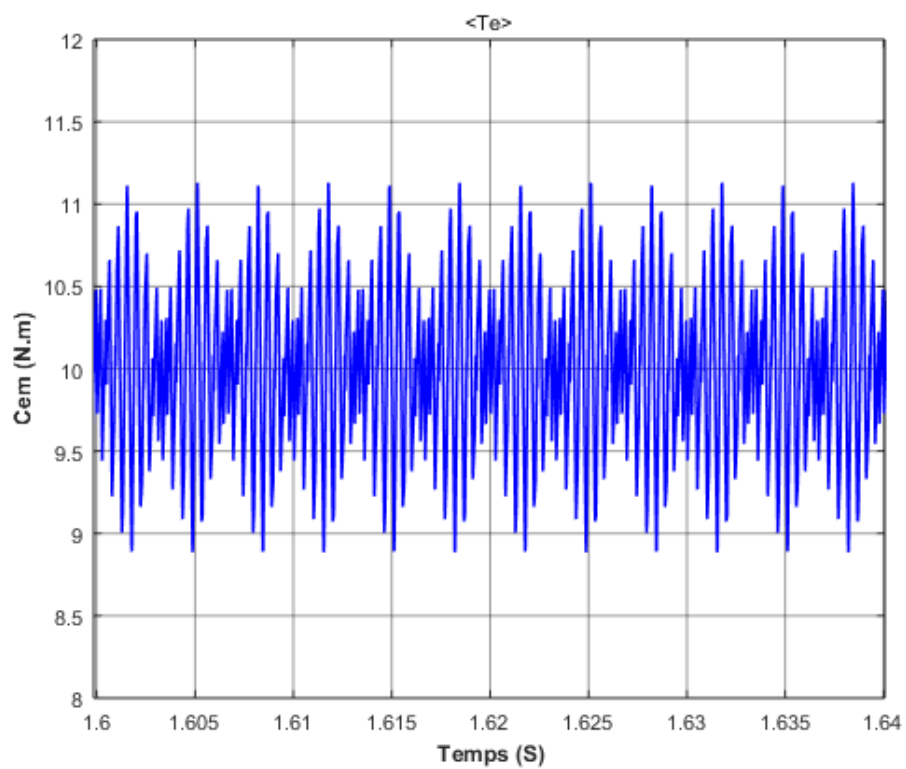
Lorsque  $t \in [0.23, 1 \text{ s}]$ , le couple électromagnétique se stabilise vers une valeur moyenne qu'est égale 0 N.m, ce qui implique le fonctionnement à vide de la machine Comme le montre la (Figure 4.50).



**Figure 4. 50:** le fonctionnement à vide de la machine (MAS) commande MLI ( $m=42$ ).

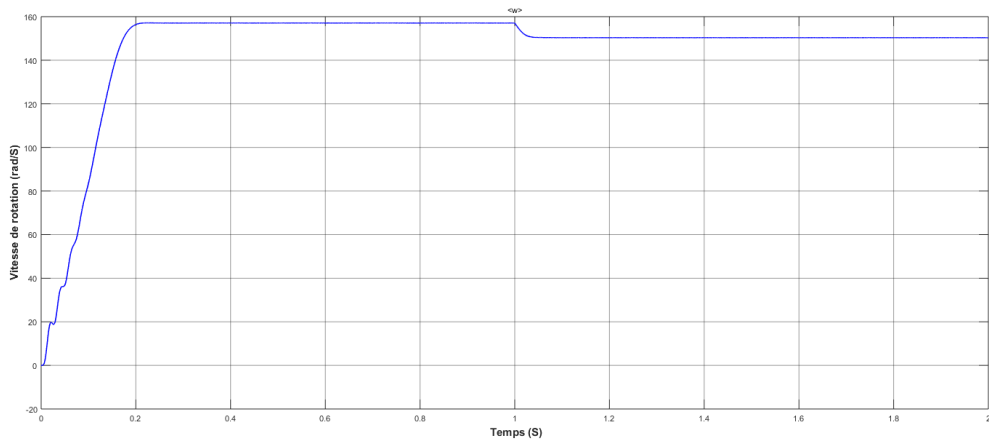
A l'instant  $t = 1 \text{ s}$ , on applique une charge mécanique d'une valeur 10 N.m, dans ce cas la machine prend cette valeur, bien sûr après un temps de réponse avec des

ondulations (ou oscillations) qui comprennent entre  $[8.88 \div 11.13 \text{ N.m}]$  Comme le montre la (Figure 4.51).



**Figure 4. 51:** les ondulations du Cem de MAS commande MLI ( $m=42$ ).

➤ **Vitesse de rotation**



**Figure 4. 52:** vitesse de rotation de MAS commande MLI ( $m=42$ ).

La (Figure 4.52) montre qu'au démarrage et pendant le régime transitoire la vitesse est presque linéaire puis elle atteint sa valeur nominale à vide de  $157.1 \text{ rad/s}$ . lorsque la MAS fonctionne en charge, on remarque qu'il y a une diminution de cette valeur  $\Omega=150.36 \text{ rad/s}$ .

## 4.5 Comparaison entre les deux topologies d'onduleur

**Tableau 4. 1:** Comparaison de THD entre les deux topologies d'onduleur avec deux techniques.

Topologies	Techniques		Les ondulations de couple	
	Plein onde	MLI		
<b>2 Niveaux</b>	51.27%	13.25%	[7.65 ÷ 12.4 N.m]	
<b>3 Niveaux</b>	26.82%	M=21 (1050 Hz)	9.76%	[7.56 ÷ 11.81 N.m]
		M=42 (2100Hz)	4.71%	[8.88 ÷ 11.13 N.m]

Dans le (Tableau 4.1) On remarque que, lorsqu'on augmente le nombre de niveaux de l'onduleur, le **THD** se diminuait dans deux techniques.

Les résultats de THD obtenus dans la technique MLI sont inférieurs aux résultats obtenus dans la technique pleine onde, Cela signifie que la technologie MLI est meilleure. Et en remarque aussi qu'il Ya une réduction des ondulations de couple surtout lorsqu'on augmente la fréquence de modulation au bien l'indice de modulation m. c-à-d, que la forme du courant proche à la sinusoïde, avec une grande stabilité du couple électromagnétique.

## 4.6 Conclusion

L'amélioration des performances d'un système d'entraînement de machine asynchrone dépend du choix de la bonne stratégie de commande de l'onduleur d'alimentation.

Dans ce travail, nous avons montré, par simulation, que la stratégie MLI sinusoïdale donne de meilleures performances par rapport à la stratégie pleine onde (180 °) ; Surtout lorsque nous avons augmenté l'indice de modulation m dans la stratégie MLI, nous avons observé une diminution du THD, c'est-à-dire la forme du courant proche de la sinusoïdale, avec une grande stabilité du couple électromagnétique.

En fait, il permet de garantir une meilleure qualité de couple électromagnétique et d'éliminer les harmoniques. Cela a l'avantage d'augmenter leur durée de vie, d'où le choix de cette stratégie dans la commande d'un onduleur multi-niveaux alimentant une machine asynchrone de forte puissance.

## Conclusion générale

---

Le but de notre étude est d'étudier et de simuler la commande de l'onduleur à deux et à trois niveaux (plein onde et MLI). Avant de commencer l'étude, il est nécessaire de connaître la modélisation de la machine asynchrone triphasée et les études des différentes topologies d'onduleur multi-niveaux comme indiqué dans le premier et deuxième chapitre.

Dans le chapitre trois, nous avons dû faire deux types d'études pour la réduction des harmoniques : la première est la modélisation des onduleurs multi-niveaux NPC et la connaissance du principe de fonctionnement et de la structure de chaque niveau, tandis que la seconde consiste à faire des recherches sur différentes stratégies de commande des onduleurs

Dans le quatrième et dernier chapitre, nous avons présenté les résultats qui ont été traités par le programme Matlab Simulink, les résultats obtenus démontrent l'efficacité de la topologie multiniveaux de l'onduleur NPC et la stratégie de modulation sinusoïdale dans la réduction des harmoniques et de l'ondulation de couple électromagnétique.

Les résultats sont les suivants :

En comparant les résultats d'un onduleur à deux niveaux avec un onduleur à trois niveaux, nous avons remarqué dans la technique de commande plein onde que la forme du courant à la sortie de l'onduleur de tension triphasé à trois niveaux de type NPC commandé en onde pleine n'est pas complètement sinusoïdale. Elle est très riche en harmoniques mais elle est meilleure que la forme de courant à Onduleur à deux niveaux, le rapport d'harmoniques de l'onduleur à deux niveaux était deux fois plus élevé que celui de l'onduleur à trois niveaux.



Dans la commande MLI sinusoïdale, la forme du courant était plus sinusoïdale que la commande plein onde dans l'onduleur à deux niveaux et l'onduleur à trois niveaux. Le rapport d'harmoniques de l'onduleur à deux niveaux était presque deux fois plus élevé que celui de l'onduleur à trois niveaux

Le rapport harmonique à la commande sinusoïdale était très faible avec la commande plein onde dans un onduleur à deux niveaux et un onduleur à trois niveaux.

L'onduleur à trois niveaux commandés par MLI sinusoïdal nous a donné le signal de courant plus proche de la sinusoïdale, et avait des harmoniques inférieurs (THD = 4,71% pour  $m = 41$ ).

Les résultats obtenus nous montrent l'efficacité de l'algorithme de commande MLI sinusoïdal utilisé, et nous dirons que la MLI sinusoïdale s'adapte mieux aux entraînements à vitesse variable avec un moteur à courant alternatif, car elle s'intègre de façon naturelle dans le système de régulation.

# Bibliographie

---

[1] Boukaroura Abdelkader « Modélisation et diagnostic d'un onduleur triphasé par l'approche Bon-graph » mémoire magister Farhat Abbas de setif 2009".

[2] Moteur asynchrone; [En ligne]. Disponible : [http://lycees.acrouen.fr/maupassant/Melec/co/Techno/Syst\\_indust/co/08a\\_Sysind\\_grain\\_moteur\\_Intro.html](http://lycees.acrouen.fr/maupassant/Melec/co/Techno/Syst_indust/co/08a_Sysind_grain_moteur_Intro.html). [Accédé 06 10 2020].

[3] L Baghli, 'Modélisation et commande des machines asynchrone ', Commande IUFM De lorrain UHP, 03/04.

[3] Abdelli, R, « Perturbations singulières appliquées au modèle de machine asynchrone avec défauts au stator et au rotor », mémoire de magister, école nationale polytechnique d'Alger, 2007.

[5] Jean claude, T, « Diagnostic des machines électriques », 2011.

[6] Medoued, A, « Surveillance et diagnostic des défauts des machines électriques : applications aux moteur asynchrones », Thèse de Doctorat, Université du 20 Août 1955-Skikda, 2012.

[7] Carlos canudas de Witt. Commande des moteurs asynchrones . Volume 1  
« Modélisation, contrôle vectoriel et DTC » Hermès science publication 2000

[8] F. Rahima, A. Nassima, "Modélisation et Identification de la Machine Asynchrone", Mémoire d'ingénieur, Université de sétif, 2000.

[9] M.Marty, "Principe d'électrotechnique", Tome I, Editions Dunod, Paris, 2005.

[10] Ph. LE BRUN, " Technologie, choix et Alimentation des Machines Asynchrones",  
Lycée Louis ARMAND 173 Bd de Strasbourg 94736 NOGENT.

[11] Yocefa, A, « Commande non linéaire d'une machine a induction avec observateur d'état», mémoire de master, Université de Mohamed Boudiaf-M'sila , 2012.

[12] Lesenne, J.; Notelet, F.; Segulier, G., Introduction à l'électrotechnique approfondie, Technique et Documentation, 1981, 247p.

- [13] Caron, J. P.; Hautier, J. P., Modélisation et commande de la machine asynchrone, Ed Technip, 1995, 279p.
- [14] Bose, B. K., Power electronics and AC drives, Prentice Hall, 1986, 402p.
- [15] Leonhard, W., Control of electrical drives, 2nd ed. Springer-Verlag, 1996, 420p.
- [16] Vas, P., Vector control of AC machines, Ed. Oxford University Press, 1990, 332p.
- [17] E. Florin "Mogo production décentralisée dans les réseaux de distribution. Etude pluridisciplinaire de la modélisation pour le contrôle des sources". Docteur Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Lille 2005.
- [18] Zergoune M A et Hideb A, "Commande d'onduleur multiniveaux à structure en Cascade par stratégie d'élimination d'harmonique sélective," Université Kasdi Merbah d'Ouargla, 2017.
- [19] Anne Marie LIENHARDT, « Etude de la Commande et de L'Observation d'une Nouvelle Structure de Conversion d'Energie de Type SMC (Convertisseurs Multicellulaire Superposé) », Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2006.
- [20] B. K. Bose, « Power Electronics and AC Drives », Edition Practice Hall, 1986.
- [21] L. M. Tolbert, « Multilevel Converters for Large Electric Drives », IEEE Transactions on Industry Application, Vol. 35, pp. 36-44, January/February 1999.
- [22]-Boukaroura Abdelkader « Modélisation et diagnostic d'un onduleur triphasé par l'approche Bon-graph » mémoire magister Farhat Abbas de setif 2009
- [23] M. Pinard, convertisseurs et électronique de puissance et puissance de commande, description, mise en œuvre Dunode, Paris, ISBN 978-10-049674-7, p116.
- [24] J-P. Louis, "Modélisation des machines électriques en vue de leur commande"
- [25] L. BAGHLI, "Modélisation et commande de la machine asynchrone", 2005.
- [26] B. KHALIFA, "Réalisation d'un banc d'essai pour la Commande et l'Observation des Convertisseur Multicellulaires Série", Approche Hybride. Grade de docteur Université de cergy-pontoise 2009.
- [27] Houria Ben Zemammouch « Application de la MLI Vectorielle aux Onduleurs Multi niveaux à base de GTO et d'IGBT », Mémoire Présenté en vue d'obtention du diplôme de Magister, Université Badji Mokhtar Annaba.2010.
- [28] Xavier del toro garcia, Antoni arias, Marcel g. jayne, phil A. witting, vicens m. sala and Jose luis romeral, New DTC Control Scheme for Induction Motors fed with a Three-level Inverter, Automatika, pp. 73-81,2005.

[29] X. Hu and L. Zhang, A predictive direct torque control scheme for a threelevel VSI fed induction motor drive, Electrical Machines and Drives, 1999.Ninth International Conference on, pp.334-338, Conf. Publ. No. 468, 1999.

[30] Surin Khomfoi, Leon M. Tolbert, «Multilevel Power Converters », the University of Tennessee USA, Department of Electrical and Computer Engineering, August 2007.

[31] Kambiz Arab Tehrani, Conception, Synthèse et Application d'une Nouvelle

Commande Robuste par PID Fractionnaire pour Les Onduleurs Multiniveaux,

Pour obtenir le grade de Docteur de l'INPL, Université de Lorraine-Institut

National Polytechnique de Lorraine (INPL), 2010.

[32] condensateur flottant ; [En ligne]. Disponible :

<http://electronique1.blogspot.com/2011/02/onduleur-point-milieu-fonctionnement.html>.

[Accédé 06 10 2020].

[33] Faïçal Mnif « Etude et Réalisation des lois de commande par mode de Glissement et par approche Géométrique : Application à un Onduleur De Tension Monophasés », Thèse présentée à l'université du Québec a Trois-Rivières Comme Exigence Pour l'obtention du Déplume de maîtrise sciences appliquées en électronique industrielle, Université du Québec.1991.

[34] Ammiche Abd ennour «Commande des onduleurs multiniveaux de tension à diode flottante » mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du Diplôme de master en génie électrique. Université de m'sila 2012/2013.

[35] MANSOURI Abdallah «Commande des Onduleurs Multiniveaux», Mémoire Présenté en vue d'obtention du diplôme de MASTER, UNIVERSITE DE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA.2016.

[36] E.M.Berkouk « coterbution à la conduite des machin monophsées et triphasée Almentées par des convertisseurs directs et Indirects appelécation du gradateuron de leurs multi niveaux »thèse de doctorat CNAM 1995.

[37] Roberto Rojas, Tokuo Ohnishi, Takayuki Suzuki, « An Improved Voltage Vector Control Method for Neutral Point Clamped Inverters », IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 10, N°6, pp. 666-672, November 1995.

[38] Jean-Sébastien MARIÉTHOZ, « Etude Formelle pour la Synthèse de Convertisseurs Multiniveaux Asymétriques: Topologies, Modulation et Commande », Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2005.

[39] BRIGHEN Haroun et HALAIMIA Safouane ,«Etude et analyse de la commande des onduleurs Multi-niveaux par MLI sinusoïdale», MEMOIRE Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master, UNIVERSITE LARBI TEBSSI-TEBESSA-Faculté des Sciences et de la Technologie Département de Génie des Mines, 2016.

- [40] J-S. MARIETHOZ, "Etude Formelle pour la Synthèse de convertisseurs Multiniveaux asymétriques : Topologies, Modulation et Commande", Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne, 2005.
- [41] B. OUAHID, "Contribution à l'Analyse des Onduleurs Multi-niveaux Fonctionnement Symétrique et asymétrique", Mémoire d'ingénieur d'état, Département d'électrotechnique, université de Batna, 2005.
- [42] MARIETHOZ, S. et VEENSTRA, M. Alimentation d'onduleurs multiniveaux asymétriques : Analyse des possibilités de réalisation et méthodes de répartition de lapuissance. Revue internationale de génie électrique (RIGE), 2004, vol. 7, no ARTICLE, p. 263-278.
- [43] S.Fernandez, "Comparaison des performances électriques d'un onduleur triphasé deux niveaux à commandes directes.et indirectes connecté au réseau," Thèse de doctorat, Université Lille 1, Nord de France, 2013
- [44] Ch.Krishna kantha, P.Deepthi Sree, "Analysis, Simulation & Comparison of Various Multilevel Inverters Using Different.PWM Strategies," IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering, Vol. 9, no. 2, PP 54-65, 2014.
- [45] KAHIA Bille Thème « Commande MLI Vectorielle d'un Redress Triphasé Trois Niveaux »mémoire master UNIVERSITE FERHAT ABBAS DE SETIF 2013
- [46] Siriroj Sirisukprasert, "Optimized Harmonic Stepped-Waveform for Multilevel Inverter", Thesis for the Degree of Master of Science in Electrical Engineering, Virginia Polytechnic Institute, September 1999.
- [47] Analog Devices «Implementing Space Vector Modulation with the ADMC (AN331-17)» Analog Devices Inc. Jan 2000
- [48] B.KHALIFA ; Réalisation d'un banc d'essai pour la Commande et l'Observation des Convertisseur Multicellulaires Série : Approche Hybride. Grade de docteur Université de cergy-pontoise 2009
- [49] P. Purkait, R.S. Sriramakavacham, « A New Generalized Space Vector Modulation Algorithm for Neutral Point Clamped Multilevel Converters », Progress in Electromagnetics Research Symposium, Cambridge, pp. 330-335, March 2006.
- [50] B. K. Bose, "Power Electronics and AC Drives", Edition Practice Hall, 1986.
- [51] Kelaiaia Mounia Samira, « Amélioration de la Qualité d'Energie Délivrée Par Un Onduleur Multiniveaux Alimentant Une Machine Asynchrone A Cage » Thèse De Doctorat, Département d'Electrotechnique, 2007.
- [52] Subrata K. Mondal, Joao O. P. Pinto, and Bimal K. Bose, « A Neural Network Based Space Vector PWM Controller for a Three Level Voltage Fed Inverter Induction Motor Drive », IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.38, N°3, pp.660-669, May/Junel 2002.

- [53] Yo Han Lee, Bum Seok Suh and Dong Seok Hyun, « A Novel PWM Scheme for a Three Level Voltage Source Inverter With GTO Thyristors », IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.32, N°2, pp.260-268, March/April 1996.
- [54] BOUAKAZ OUAHID, "Contribution à l'Analyse des Onduleurs Multiniveaux Fonctionnement Symétrique et asymétrique ", Mémoire d'ingénieur d'état, Département d'électrotechnique, université de Batna, 2005
- [55] Z. Ait wali, "Application des FPGA à la commande d'un moteur asynchrone", Mémoire de magister UMMTO Tizi-Ouzou.
- [56] L.M. Tolbert, F.Z. Peng and T.G. Habelter, "Multilevel PWM methods at Low Modulation indices," in Proceedings of 1999 Applied Power Electronics Conference and exposition (APEC), pp. 1032-1039
- [57] Berkouk, E. M.; and al.: Knowledge and control models for three-level voltage inverters. International Journal Systems Analysis Modelling Simulation (1995), published by "Gordon and Breach Science Publishers", No. 18-19, pp. 511-521
- [58] Ben Romdhane, Y.; and al.: Elaboration and comparison of different methods for neutral point voltage control of NPC inverter. IEEE Conference, Stockholm/Sweden 1995, Proc. pp. 207-213
- [59] J. P. Caron, J. P. Hautier, « Convertisseurs Statiques – Méthodologie Causale de Modélisation et de Commande », Editions Technip, Paris 1999.
- [60] B.KHALIFA ; Réalisation d'un banc d'essai pour la Commande et l'Observation des Convertisseur Multicellulaires Série : Approche Hybride. Grade de docteur Université de cergy-pontoise 2009.
- [61] Y. KHADIDJA ; Réduction des effets de la tension homopolaire dans l'association onduleur multiniveaux-moteur à induction ; Ingénieur d'état en électrotechnique. Ouargla 2005.
- [62] H. Gheraia, E.M. Berkouk, G. Manesse, « Modelling and Control of a Seven Level NPC Voltage Source Inverter, Application to High Power Induction Machine Drive », the European Physical Journal, AP 15, pp. 105-115, 2001.
- [63] Yaichi Mohammed « analyse de la technique de modulation vectorielle SVM (space vector modulation) appliquée aux onduleurs multi niveaux» mémoire magister Université Djilali liabes de Sidi-Bel-Abbès 2006
- [64] Boukaroura Abdelkader « Modélisation et diagnostic d'un onduleur triphasé par l'approche Bon-graph »mémoire magister Farhat Abbas de setif 2009"
- [65] [sciencedirect.com/topics/engineering/sinusoidal-pulse-width-modulation](https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/sinusoidal-pulse-width-modulation)
- [66] Berrezzek Farid « Etude des différentes Techniques des commande des onduleurs à MLI Associés à une Machine Asynchrone » mémoire magister BADJI Mokhtar-ANNABA 2006

[67] S. Guy, B. Robert, Labrique Francis, « Les convertisseurs de l'électronique de puissance la conversion alternatif » (volume 4). Edition tec &doc, 1995.

[68] Rezgui Salah Eddine « COMMANDE DE MACHINE ELECTRIQUE EN ENVIRONNEMEN (Matlab/Simulink et Temps Réel) Application à la machine asynchrone : Commande Vectorielle Sans Capteur Mécaniques SVPWM, Mode Glissant » mémoire magister MRAS 2009 Université Mentouri de Constantin