



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
People s Democratic Republic of Algeria  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministry of Higher Education and Scientific Research  
جامعة العربي التبسي - تبسة  
Larbi Tebessi University – Tébessa  
معهد المناجم  
Mining Institute  
قسم أإلأكترومأكانأك  
Electromechanical Département



## *MEMOIRE*

*Présenté en vue de l'obtention d'un diplôme de Master*

*Filière : Electromécanique*

*Option : Electromécanique*

# **Etude et simulation d'un onduleur de tension pont en H multi-niveaux en cascade**

Par

**ABDELKRIM Abdellatif**

**Devant le jury :**

<b>HOUAM Ala</b>	<b>MAA</b>	<b>Président</b>	<b>Université Larbi Tebessi Tébessa</b>
<b>MORGHANI Radhouane</b>	<b>MAA</b>	<b>Encadreur</b>	<b>Université Larbi Tebessi Tébessa</b>
<b>SOUDANI Mouhamed Saleh</b>	<b>MAA</b>	<b>Examineur</b>	<b>Université Larbi Tebessi Tébessa</b>

*Promotion 2020-2021*

# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail*

*A mes chers parents : Que dieu les garde en bon  
santé...*

*A mon petit cœur d'amour, ma dulcinée la seule et  
l'unique Nadjla, je t'aime à la folie...*

*A ma famille*

*A mes amis...*

*A tous les gens que j'aime...*

*ABDELKRIM Abdellatif*

## REMERCIEMENTS

*Je tiens à remercier tout premièrement Allah le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il m'a donné durant toutes ces longues années.*

*Ainsi, je tiens également à exprimer mes vifs remerciements à mon encadreur **MOUGHFRANI Radhouane** pour avoir d'abord proposée ce thème, pour le suivi continué tout le long de la réalisation de ce mémoire, celui qui n'a pas cessé de me donner ses conseils.*

*Je tiens à remercier vivement toutes personnes qui m'ont aidées à élaborer et réaliser ce mémoire, ainsi à tous ceux qui m'ont aidés de près ou de loin à accomplir ce travail.*

*Mes remerciements vont aussi à tous les enseignants et le chef de département d'**électromécanique** qui ont contribué à ma formation. Par ailleurs, mes remerciements vont à tous les membres du jury qui ont acceptés de juger notre travail.*

*En fin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos amis et collègues pour le soutien moral et matériel...*

# Table des matières

Table des figures

Liste des tableaux

Nomenclatures

Introduction générale

## Chapitre I

<b>I.1</b>	<b>Introduction</b> .....	1
<b>I.2</b>	<b>Généralités sur les machines asynchrones triphasées</b> .....	1
I.2.1	Définition.....	1
I.2.2	Description de la machine asynchrone triphasée.....	1
I.2.3	Les différents éléments constituant la machine asynchrone.....	2
I.2.3.1	Stator .....	3
I.2.3.2	Rotor .....	3
I.2.3.3	Enroulements.....	4
I.2.3.4	Balais .....	5
I.2.3.5	Carcasse.....	5
<b>I.3</b>	<b>Modèle schématique de la machine asynchrone triphasée</b> .....	5
<b>I.3.1</b>	<b>Hypothèses simplificatrices</b> .....	6
<b>I.3.2</b>	<b>Equations générales</b> .....	7
I.3.2.1	Equations électriques.....	7
I.3.2.2	Équations magnétiques.....	8
I.3.2.3	Équations mécaniques .....	8
<b>I.3.3</b>	<b>Modèle biphasé de la machine asynchrone</b> .....	9
<b>I.4</b>	<b>Simulation et interprétation</b> .....	11
<b>I.5</b>	<b>Interprétations des résultats de simulation</b> .....	20
<b>I.2</b>	<b>Conclusion</b> .....	20

## Chapitre II

<b>II.1</b>	<b>Introduction</b> .....	22
<b>II.2</b>	<b>Principe de fonctionnement d'un onduleur</b> .....	22
<b>II.3.1</b>	<b>L'onduleur monophasé :</b> .....	22
<b>II.3.2</b>	<b>L'onduleur triphasé</b> .....	23
<b>II.3.3</b>	<b>Onduleur multi-niveaux</b> .....	24

<b>II.4 Les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux .....</b>	<b>25</b>
II.4.1 Onduleur multi niveaux à diode de bouclage .....	25
II.4.2 Onduleur multi niveaux à condensateurs flottants.....	26
II.4.3 Onduleurs multi niveaux en cascade .....	28
□ Avantage.....	29
□ Inconvénients.....	29
II.5 Domaines d'application d'onduleur multiniveau.....	29
II.6 Avantages d'onduleur multiniveaux.....	30
II.6.1 Avantages technologiques .....	30
II.6.2 Avantages fonctionnels de convertisseur.....	30
II.7 Conclusion .....	30
<b>Chapitre III</b>	
<b>III.1 Introduction.....</b>	<b>32</b>
<b>III.2 Onduleur à trois niveaux de type Cascade en pont H .....</b>	<b>32</b>
<b>III.2.1 Structure.....</b>	<b>32</b>
III.2.2 Principe de fonctionnement.....	33
<b>III.3 Onduleur à cinq niveaux de type Cascade en pont H.....</b>	<b>35</b>
III.3.1 Structure .....	35
III.3.2 Principe de fonctionnement.....	35
<b>III.4 Généralisation de la structure cascade en pont H à N niveaux de tension .....</b>	<b>38</b>
III.4.1 Structure .....	38
III.4.2 Principe de fonctionnement.....	39
III.5 Stratégies de commande .....	40
III.5.1 Modulation sinusoïdale classique mono porteuse .....	40
III.5.2 Modulation sinusoïdale à doubles triangles.....	41
III.5.3 La modulation par hystérésis (commande en fourchette).....	42
III.5.4 La modulation vectorielle.....	43
<b>III.6 Conclusion .....</b>	<b>45</b>
<b>Chapitre IV</b>	
<b>IV.1 Les paramètres de simulation .....</b>	<b>46</b>
<b>IV.2 Onduleur monophasé trois niveaux.....</b>	<b>46</b>
<b>IV.3 Onduleur triphasé trois niveaux.....</b>	<b>49</b>
<b>IV.4 Onduleur monophasé cinq niveaux .....</b>	<b>55</b>
<b>IV.5 Onduleur triphasé cinq niveaux .....</b>	<b>58</b>
<b>IV.6 Onduleur monophasé sept niveaux .....</b>	<b>64</b>
<b>IV.7 Onduleur triphasé sept niveaux.....</b>	<b>67</b>
<b>IV.8 Interprétation et résultats .....</b>	<b>73</b>

IV.8.1 Comparaison des résultats de simulation des onduleurs étudiés.....	73
IV.9 Conclusion .....	74

## Liste des figures

N° figure	Titre de figure	N° page
<b>Chapitre I</b>		
Figure (1.1)	Représentation des enroulements de la machine asynchrone Triphasée dans l'espace électrique	2
Figure (1.2)	Les différents éléments d'une machine asynchrone	2
Figure (1.3)	Bobinage triphasé d'un stator.	3
Figure (1.4.a)	Schéma du rotor à pôles saillants.	4
Figure (1.4.b)	Schéma du rotor à pôles lisses.	4
Figure (1.5)	Schéma de la carcasse avec le stator d'un alternateur.	5
Figure (1.6)	Modèle d'une machine asynchrone triphasée.	6
Figure (1.7)	Représentation de la MAS dans l'espace électrique et dans le repère de Park.	9
Figure (1.8)	Repérage angulaire des systèmes d'axes dans l'espace électrique.	10
Figure (1.9)	Schéma de simulation d'une machine asynchrone alimentée en tension.	12
Figure (1.10)	l'alimentation de tension triphasé.	13
Figure (1.11)	vitesse de rotation.	13
Figure (1.12)	couple électromagnétique.	14
Figure (1.13)	courant statorique Ids.	14
Figure (1.14)	courant statorique Iqs.	15
Figure (1.15)	amplitude de flux rotorique.	15
Figure (1.16)	amplitude de flux statorique.	16
Figure (1.17)	courant statorique Ias,Ibs,Ics.	16
Figure (1.18)	la position tetha (rad).	17
Figure (1.19)	vitesse de rotation.	17
Figure (1.20)	couple électromagnétique.	18
Figure (1.21)	courant Ids.	18
Figure (1.22)	courant Iqs.	19
Figure (1.23)	amplitude de flux statorique.	19
Figure (1.24)	amplitude de flux rotorique.	20
Figure (1.25)	courant statorique Isa,Isb,Isc.	20
<b>Chapitre II</b>		
Figure (2.1)	Onduleur monophasé : Symbole et structure de montage d'un onduleur en pont complet.	22

Figure (2.2)	Symbole et structure de montage d'un onduleur triphasé	23
Figure (2.3)	Les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux	24
Figure (2.4)	Topologies d'onduleurs NPC	25
Figure (2.5)	Topologies d'onduleurs NPC à condensateur Flottant	27
Figure (2.6)	Structure d'un convertisseur N niveaux en cascade	28
<b>Chapitre III</b>		
Figure (3.1)	Onduleur H- bridge à 5 niveaux, monophasé et triphasé	32
Figure (3.2)	schéma triphasé d'un onduleur cascade en pont H à 3 niveaux	32
Figure (3.3)	Bras d'onduleur cascade en pont H à trois niveaux.	33
Figure (3.4)	séquence de commande d'onduleur monophasée trois niveaux (K1..., K4).	34
Figure (3.5)	tension de sortie 3 niveaux	35
Figure (3.6)	schéma triphasé d'un onduleur cascade pont en H à 5 niveaux	35
Figure (3.7)	Séquence de commande d'un onduleur cinq niveaux monophasée (K1...K8)	37
Figure (3.8)	tension de sortie 5 niveaux	38
Figure (3.9)	schéma d'un onduleur pont H en cascade N niveaux	39
Figure (3.10)	Schéma de principe de la technique triangulo-sinusoidale	40
Figure (3.11)	principe de la modulation MLI sinusoidale	41
Figure (3.12)	principe de la modulation MLI à double triangles	42
Figure (3.13)	Principe de la commande en fourchette	43
Figure (3.14)	Schéma fonctionnel d'une commande par hystérésis (en fourchette)	43
Figure (3.15)	Représentation dans le plan ( $\alpha, \beta$ ) des vecteurs de tension de L'onduleur à trois niveaux de tension V18	44
Figure (3.16)	Le schéma de principe de la M.L.I Vectorielle	44
<b>Chapitre IV</b>		
Figure (4.1)	Schéma bloc d'un onduleur monophasée trois niveaux	46
Figure (4.2)	Principe MLI double porteuse pour onduleur monophasée trois niveaux	46
Figure (4.3)	Allure de tension Vs	47
Figure (4.4)	Spectre d'harmonique de tension Vs	47
Figure (4.5)	Allure de courant Is	48
Figure (4.6)	Spectre d'harmonique de courant Is	48
Figure (4.7)	Schéma bloc d'un onduleur triphasée trois niveaux	49
Figure (4.8)	Principe de la MLI double porteuse pour onduleur triphasée trois niveaux	49
Figure (4.9)	Allure de tension simple Vao	50
Figure (4.10)	Spectre d'harmonique de tension Vao	50
Figure (4.11)	Allure de tension Composée Vab	51
Figure (4.12)	Spectre d'harmonique de tension Vab	51
Figure (4.13)	Allure de tension de phase Van	52

Figure (4.14)	Spectre d'harmonique de tension $V_{an}$	52
Figure (4.15)	Allure de vitesse	53
Figure (4.16)	Allure de courant statorique $I_{sa}$	53
Figure (4.17)	Spectre d'harmonique de courant $I_{sa}$	54
Figure (4.18)	Schéma bloc d'un onduleur monophasée cinq niveaux	54
Figure (4.19)	Principe de la MLI à double porteuse pour onduleur monophasée Cinq niveaux	55
Figure (4.20)	Allure de tension $V_s$	55
Figure (4.21)	Spectre d'harmonique de tension $V_s$	56
Figure (4.22)	Allure de courant $I_s$	56
Figure (4.23)	Spectre d'harmonique de courant $I_s$	57
Figure (4.24)	Schéma bloc d'un onduleur triphasée cinq niveaux	57
Figure (4.25)	Principe de la MLI à double porteuse pour un onduleur triphasé cinq niveaux	58
Figure (4.26)	Allure de tension simple $V_{ao}$	58
Figure (4.27)	Spectre d'harmonique de tension $V_{ao}$	59
Figure (4.28)	Allure de tension Composée $V_{ab}$	59
Figure (4.29)	Spectre d'harmonique de tension $V_{ab}$	60
Figure (4.30)	Allure de tension de phase $V_{an}$	60
Figure (4.31)	Spectre d'harmonique de tension $V_{an}$	61
Figure (4.32)	Allure de vitesse	61
Figure (4.33)	Allure de courant statorique $I_{sa}$	62
Figure (4.34)	Spectre d'harmonique de courant $I_{sa}$	62
Figure (4.35)	Schéma bloc d'un onduleur monophasée sept niveaux	63
Figure (4.36)	Principe de la MLI à double porteuse pour un onduleur monophasée sept niveaux	63
Figure (4.37)	Allure de tension $V_s$	64
Figure (4.38)	Spectre d'harmonique de tension $V_s$	64
Figure (4.39)	Allure de courant $I_s$	65
Figure (4.40)	Spectre d'harmonique de courant $I_s$	65
Figure (4.41)	Schéma bloc d'un onduleur triphasée sept niveaux	66
Figure (4.42)	Principe de la MLI double porteuse pour onduleur triphasée sept niveaux	66
Figure (4.43)	Allure de tension simple $V_{ao}$	67
Figure (4.44)	Spectre d'harmonique de tension $V_{ao}$	67
Figure (4.45)	Allure de tension Composée $V_{ab}$	68
Figure (4.46)	Spectre d'harmonique de tension $V_{ab}$	68
Figure (4.47)	Allure de tension de phase $V_{an}$	69
Figure (4.48)	Spectre d'harmonique de tension $V_{an}$	69
Figure (4.49)	Allure de vitesse	70
Figure (4.50)	Allure de courant statorique $I_{sa}$	70
Figure (4.51)	Spectre d'harmonique de courant $I_{sa}$	71



## Liste des tableaux

N° tableau	Titre de tableau	N° page
<b>Chapitre III</b>		
Tableau (3.1)	États possibles de l'onduleur Cascade à 3 niveaux	27
Tableau (3.2)	États possibles de l'onduleur Cascade à 5 niveaux	29
<b>Chapitre IV</b>		
Tableau (4.1)	Facteurs de distorsion de chaque type d'onduleur monophasée	73
Tableau (4.2)	Facteurs de distorsion de chaque type d'onduleur triphasée	73

# Nomenclatures

$A_p$	L'amplitude de porteuse
$A_r$	L'amplitude de référence
a, b, c	Indices correspondants aux trois phases
$C_e$	Couple électromagnétique
$C_{em}$	couple électromécanique
$C_r$	couple résistant
d	Axe d du repère tournant (d, q)
FC	Flying capacitor
$f_p$	La fréquence de porteuse
$f_r$	La fréquence de référence
$f_{réf}$	fréquence de la tension de référence
$f_p$	fréquence de la porteuse triangulaire
f	fréquence de réseau
f	coefficient de frottement
H	Pont H (H-Bridge)
$I_{ds}$	courant statorique instantanée dans l'axe d
$I_{qs}$	courant statorique instantanée dans l'axe q
J	moment d'inertie
K	Nombre de pont complet
$L_m$	inductance magnétisante
$L_s$	inductance cyclique statorique
$L_r$	inductance cyclique rotorique
MAS	machine asynchrone

MLI	Modulation de Largeur d'Impulsions
MPC	Multiple Point Clamped
Ma	La modulation d'amplitude
MLIS	MLI sinusoïdale
MLIV	MLI vectoriel
m	Indice de modulation
mf	Le rapport de fréquence
N	Nombre de niveau
NPC	Neutral Point Clamped
Nmin	Le nombre de niveaux minimum
Nmax	Le nombre maximum
Np	Le nombre de triangulaires
P	nombre de pair de pole
PWM	Pulse Width Modulation
q	Axe q du repère tournant (d, q)
r	Taux de modulation
r	grandeur rotor ou de repère rotor (R)
R <sub>s</sub>	Résistance statorique
R <sub>r</sub>	Résistance rotorique
S=d/dt	opérateur de laplace
s	grandeur stator ou de repère stator (S)
THD	Taux de distorsion harmonique
T <sub>r</sub>	constante de temps rotorique
T <sub>s</sub>	constante de temps statorique
U <sub>s</sub>	Tension de sortie du convertisseur
V	La tension
V <sub>ao</sub> , V <sub>bo</sub> et V <sub>co</sub>	Les tensions simples entre les bornes du moteur et le point milieu
V <sub>a</sub> , V <sub>b</sub> , V <sub>c</sub>	Tensions des références
V <sub>réf</sub>	123 Tension de références 1, 2 ou 3 (sinusoïdal)

$V_p$	Porteuse triangulaire
$V_{ab}, V_{bc}$ et $V_{ca}$	Les tensions composées aux bornes de la machine
$V_{ds}$	tension statorique instantanée dans l'axe d
$V_{qs}$	tension statorique instantanée dans l'axe q
$W_r$	Vitesse rotorique
$\alpha$	Axe $\alpha$ du repère stator $(S) = (\alpha, \beta)$
$\beta$	Axe $\beta$ du repère stator $(S) = (\alpha, \beta)$
$\theta$	position du rotor
$\theta_s$	angle électrique entre l'axe d du référentiel tournant et le référentiel fixe
$\theta_{sl}$	Angle de glissement
$\Phi$	flux
$\Phi_r$	flux rotorique
$\Phi_s$	flux statorique
$\Phi_m$	flux magnétique
$\Omega$	vitesse de rotation mécanique
$\omega_s$	pulsation statorique

Dans cette époque l'énergie est devenue l'une des choses importantes dans la vie quotidienne de l'homme. Dans le domaine de l'électricité, l'électronique de puissance est un domaine vital qui touche plusieurs activités tel que le réseau électrique, le transport, l'énergie renouvelable et l'industrie. Alors est devenu nécessaire d'améliorer les performances des dispositifs de l'électronique de puissance. [1]

Les convertisseurs de puissance sont des dispositifs électroniques comprenant des éléments semi-conducteurs (interrupteurs, diodes) et des éléments passifs et actifs d'électroniques (résistances, capacités et inductances). Ces convertisseurs sont des structures qui permettent de convertir le courant électrique d'une forme à une autre. [1]

Des nouvelles structures de convertisseurs ont été développées telles que les "Convertisseurs multiniveaux". Tout convertisseur possédant au moins trois niveaux de tension par bras fait partie des familles des convertisseurs multiniveaux, c'est à dire que la tension de sortie peut prendre au moins trois valeurs différentes au lieu des deux traditionnellement utilisés. Ils consistent à mettre en série les interrupteurs de puissance on role d'accroître la tension commutée et d'assurer la répartition de la contrainte en tension sur différents interrupteurs. Ils permettent aussi d'utiliser des composants de faibles calibres qui sont donc moins coûteux et plus performants.

Les avantages de ces structures multiniveaux résident dans leurs capacités à améliorer les formes d'onde et les spectres harmoniques des grandeurs de sortie.

Dans ce travail nous nous intéressons à l'étude des convertisseurs multiniveaux et les différents types de commande. Parmi les méthodes utilisées pour améliorer les performances de sorties d'onduleur c'est le nombre de niveau de tension et la stratégie de commande. Nous allons étudier l'onduleur multiniveaux mise en cascade pour voir l'influence de nombre des niveaux sur la performances de convertisseur.

Le but de notre étude théorique par simulations est de choisir le niveau désiré qui donne le meilleur résultat pour notre stratégie. Nous allons nous consacré à l'étude de l'onduleur de tension mise en cascade, cas d'onduleur monophasé et triphasé à trois, cinq et sept niveaux.

Le première chapitre sera consacré la modélisation du moteur asynchrone avec l'observation et l'interprétation des résultats obtenus selon les commandes appliquées.

Le deuxième chapitre sera consacré à la revue de la littérature concernant les différentes topologies multi-niveaux, leurs avantage et inconvénients dans plusieurs domaines d'applications.

Le troisième chapitre est à consacré l'étude de l'onduleur multi-niveaux pont en H de structure cascadié trois, cinq et sept niveaux ainsi que les différentes stratégies de commande de l'onduleur, MLI sinusoïdale, hystérésis ainsi que la M.L.I vectorielle.

Quatrième chapitre présente l'analyse par simulation et les résultats obtenue.  
Finalement, on termine notre travail par une conclusion général.

# Chapitre I

### I.1 Introduction

La modélisation des machines électriques est une phase indispensable pour l'élaboration de la loi de commande. En effet, aborder la commande des machines électriques nécessite l'emploi d'une méthode de modélisation adaptée à la commande. Il doit s'agir d'une méthode simple pour modéliser des machines asynchrones qui ont leurs propres caractéristiques, il est donc clair que cette étape de modélisation est une étape obligatoire pour étudier le comportement de la machine dans toutes les conditions de fonctionnement. [2]

Dans ce chapitre nous avons présenté le modèle mathématique de la machine asynchrone à cage d'écureuil, en utilisant la transformation de Park, ce qui permet de réduire la complexité du modèle de la machine, aussi cette transformation est la plus adaptée à l'élaboration d'algorithmes de commande puisqu'elle consiste à transformer une machine triphasée (trois axes (a, b, c) à une machine biphasée (deux axes (d, q) équivalente suivant l'alimentation appliquée.

Pour cela, le point de départ considéré pour la modélisation de la machine asynchrone est la machine généralisée et ses équations d'état associées.

Ces équations seront traduites sous forme de schéma-blocs de manière à être simulés à l'aide (du logiciel MATLAB (SIMULINK sous MATLAB).

La simulation de la machine asynchrone triphasée à diverses alimentations nous permettra de retrouver des résultats classiques et de valider nos modèles du type schéma blocs.

### I.2 Généralités sur les machines asynchrones triphasées

#### I.2.1 Définition

La machine asynchrone est une machine à courant alternatif dont la vitesse du rotor et la vitesse du champ magnétique tournant ne sont pas égales c'est-à-dire que il y' aura un glissement "g". Alors, dans ce cas le rotor est toujours en retard par rapport à la vitesse du champ statorique .La machine asynchrone est dite machine à induction car l'énergie transférée du stator au rotor ou inversement se fait à induction électromagnétique (champ magnétique). [2]

#### I.2.2 Description de la machine asynchrone triphasée

La machine asynchrone triphasée comporte partie fixe dite stator et une partie tournant autour de l'axe de la machine dite rotor. Le stator sera composé de trois bobines identiques (A, B et C) régulièrement déphasées de  $2\pi/3$  radians électriques, chaque bobinage crée un champ magnétique. Les phases du stator sont alimentées par un système triphasé de tensions sinusoïdales à fréquence et à amplitude réglables. [2]



## Chapitre I : Modélisation d'une machine asynchrone à cage d'écureuil

Le rotor sera considéré comme équivalent à trois bobines identiques (a, b et c) court-circuitées sur elles- mêmes également régulièrement déphasées de  $2\pi/3$  radians électriques. [2]

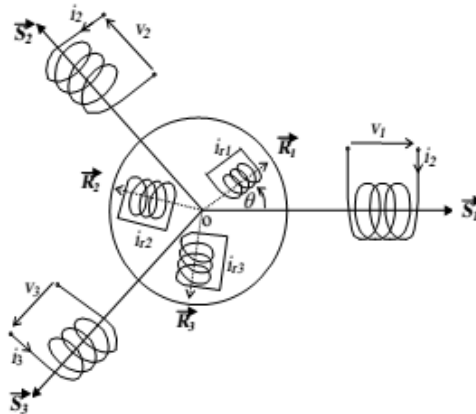
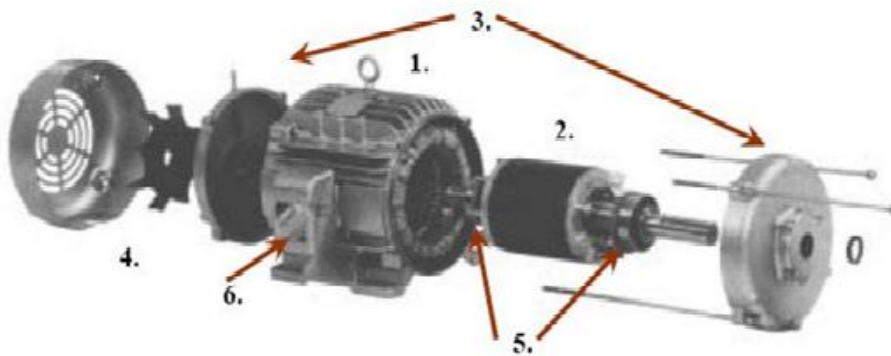


Figure (1-1) : Représentation des enroulements de la machine asynchrone Triphasée dans l'espace électrique [3]

### I.2.3 Les différents éléments constituant la machine asynchrone

On distingue essentiellement trois parties principales (Figure 1.2) [4] :

- Partie électrique : qui serve à la canalisation du courant électrique à l'intérieur de l'alternateur et à la connexion de cette dernière avec le circuit électrique extérieur.
- Partie mécanique : qui serve de support pour les différents éléments de l'alternateur en assurant sa protection et sa liaison avec l'extérieur.
- Partie magnétique : serve à la canalisation et au transport des lignes de champ magnétique, du lieu de production au lieu d'utilisation.



(1) le stator, (2) le rotor, (3) flasques, (4) ventilateur de refroidissement, (5) roulements à billes (6) boîte à bornes, plus les tiges de montage et le capot de ventilation.

Figure (1.2) : Les différents éléments d'une machine asynchrone [5]

### I.2.3.1 Stator

Le stator est toujours soigneusement feuilleté, il est formé par un empilage de disques de tôles magnétiques isolées entre elle. L'ensemble forme un cylindre solidaire de la carcasse qui constitue l'extérieur de la machine [6].

- L'intérieur de ce cylindre est encoché et port un bobinage triphasé (Figure 1.3) l'enroulement est toujours raccordé en étoile et le neutre est accessible pour permettre sa mise à la terre. On préfère la connexion en étoile à celle en triangle pour les raisons suivantes :
- La tension par phase étant seulement 58 % de celle entre les lignes, on peut réduire l'épaisseur de l'isolant dans les encoches. Cela permet de grossir la section des conducteurs et par conséquent la puissance de la machine.
- Lorsque l'alternateur est en charge, la tension induit par phase se déforme de sorte que la forme d'onde n'est plus sinusoïdale. Cette distorsion est due à la présence d'une tension ayant une fréquence triple de la tension fondamentale [7].

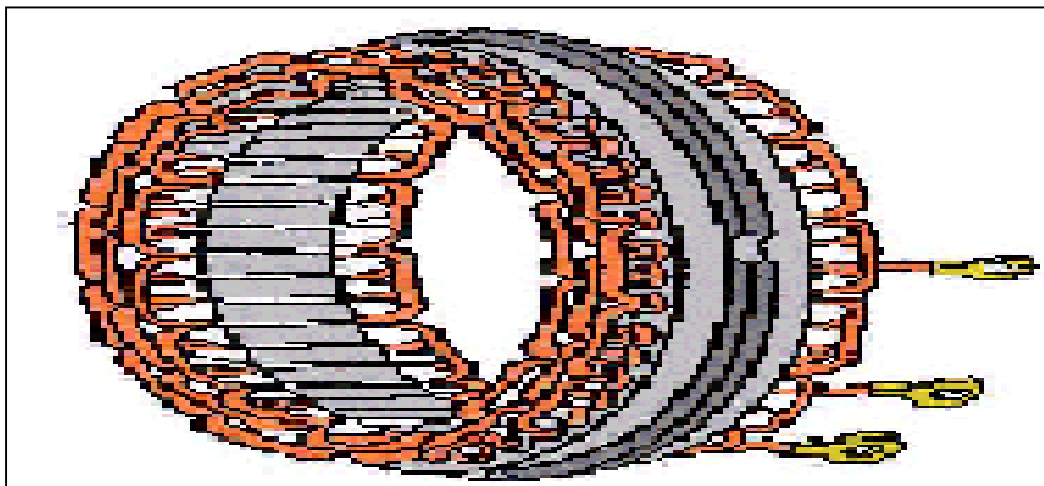


Figure (1.3) : Bobinage triphasé d'un stator. [6]

### I.2.3.2 Rotor

Le rotor porte deux pôles successivement nord et sud, dont les bobines inductrices sont alimentées en courant continu. Il est soit à pôles saillants (Figure 1.4.a), soit à pôles lisses (Figure 1.4.b) selon qu'ils sont entraînés à basse vitesse par des turbines hydrauliques ou à haute vitesse par des turbines à vapeur [6].

On rencontre les rotors à pôles saillants dans les générateurs hydrauliques, car les turbines hydrauliques tournent à une vitesse relativement basse et ont un grand nombre de pôles, ce qui leur permet de produire la fréquence désirée. Dans ces machines, le rotor est constitué d'une roue en acier montée sur un arbre vertical et sur laquelle sont fixées les pièces polaires. Les

## Chapitre I : Modélisation d'une machine asynchrone à cage d'écureuil

bobinages d'excitation placés sur les pièces polaires sont constitués de barres de cuivre ordinairement nues mais isolées entre elles par des bandes de mica. L'emploi de conducteur nus favorise leur refroidissement. Les bobines sont reliées en série de façon que deux pôles voisins soient de polarités contraires [7].

On rencontre les rotors à pôles lisses dans les turbo-alternateurs qui sont généralement entraînés par des turbines à vapeur ou à gaz, qui tournent à une vitesse relativement élevée. Notons que les rotors des turbo-alternateurs sont fabriqués d'un acier forgé [7].

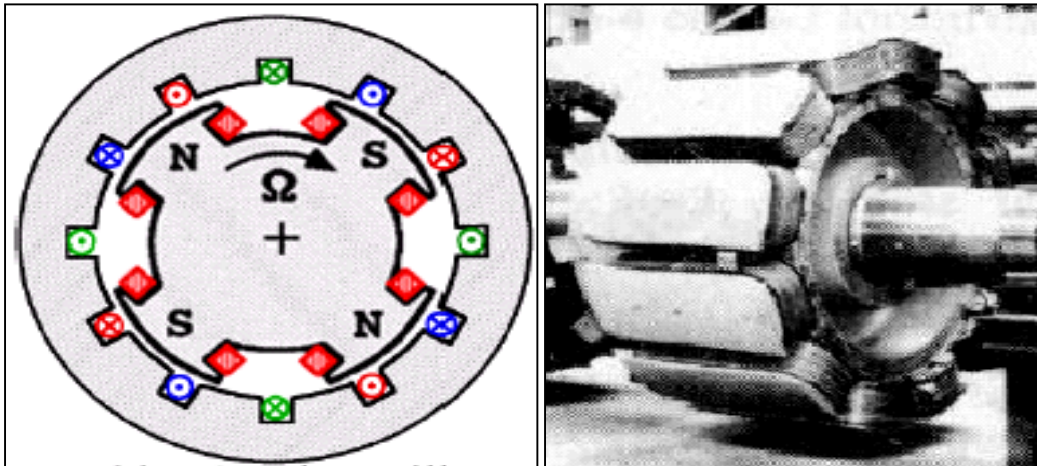


Figure (1.4.a) : Schéma du rotor à pôles saillants. [6]

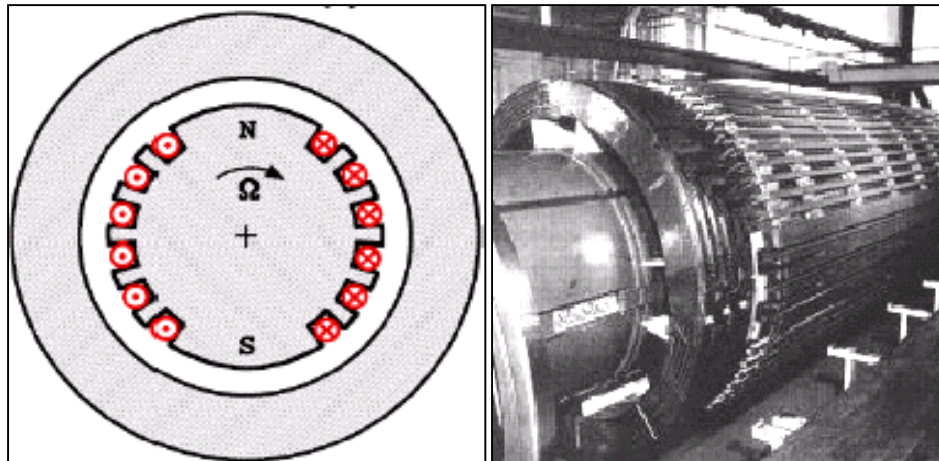


Figure (1.4.b) : Schéma du rotor à pôles lisses. [6]

### I.2.3.3 Enroulements

Tous les alternateurs comportent deux enroulements principaux :

- Enroulement producteur du champ électromagnétique, c'est l'enroulement «INDUCTEUR » sont placés sur les encoche du stator pour créer un champ tournant.
- Enroulement subissant l'effet du champ électromagnétique, c'est l'enroulement «INDUIT» qui est le siège des F.é.m. induites. Ils sont logés dans les encoches du rotor.

### I.2.3.4 Balais

Pièce conductrice généralement fixe, destinée à assurer par contact glissant la liaison électrique entre un organe mobile et un organe fixe. [6]

### I.2.3.5 Carcasse

Partie sur laquelle est fixé le circuit magnétique statorique. Elle assure l'assemblage des différentes parties ainsi que la protection et le refroidissement de la machine. Elle est en acier ou en fonte avec des formes diverses, (Figure 1.5). [6]



Figure (1.5) : Schéma de la carcasse avec le stator d'un alternateur. [6]

## I.3 Modèle schématique de la machine asynchrone triphasée

Le modèle de la machine à induction triphasé est illustré par le schéma de la Figure (1.6) avec les parties statoriques et rotoriques sont munies chacune d'un enroulement triphasé, sont trois enroulements du stator :  $S_A$ ,  $S_B$  et  $S_C$ , et pour les trois enroulements rotoriques :  $R_a$ ,  $R_b$  et  $R_c$ , et  $\theta$  : Angle entre l'axe de la phase statorique et la phase rotorique. [6]

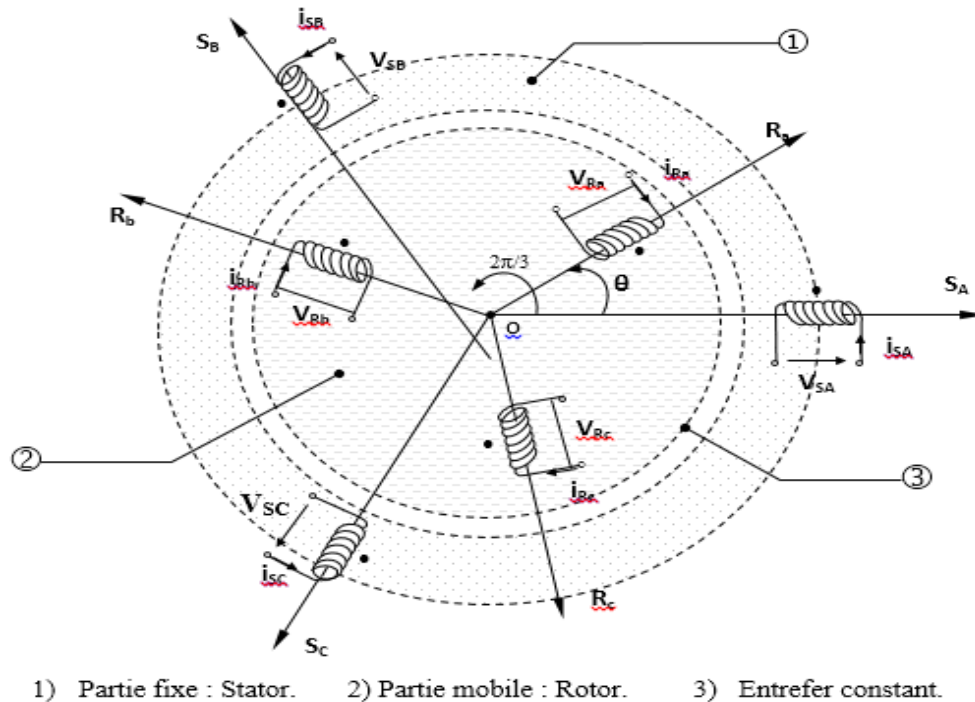


Figure (1.6) : Modèle d'une machine asynchrone triphasée. [6]

### I.3.1 Hypothèses simplificatrices

L'étude de la machine asynchrone traduit les lois de l'électromagnétisme dans le contexte habituel d'hypothèses simplificatrices suivantes : [8]

- ✓ Entrefer constant.
- ✓ Distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer.
- ✓ Circuit magnétique non saturé et à perméabilité constante.
- ✓ Pertes ferromagnétiques négligeables.
- ✓ L'influence de l'effet de peau et de l'échauffement sur les caractéristiques n'est pas prise en compte.

Parmi les conséquences importantes de ces hypothèses, on peut citer :

- ✓ L'additivité des flux.
- ✓ La constance des inductances propres
- ✓ La loi de variation des inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques en fonction de l'angle électrique de leurs axes magnétiques sont sinusoïdales

Le comportement de la machine asynchrone est entièrement défini par trois types d'équations à savoir les équations électriques, les équations magnétiques et les équations mécaniques.

### I.3.2 Equations générales

Dans les conditions précédentes, les équations des circuits électriques statoriques et rotoriques se présentent sous forme matricielle donnée ci-après, voir Figure (1.6).

#### I.3.2.1 Equations électriques

Nous pouvons à présent écrire le système matriciel électrique suivant dans le repère a, b, c : [8]

$$\begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} RS & 0 & 0 \\ 0 & RS & 0 \\ 0 & 0 & RS \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

$$\begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Rr & 0 & 0 \\ 0 & Rr & 0 \\ 0 & 0 & Rr \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

Avec :

$$[VS] = \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix}; [Vr] = \begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix} = 0; [IS] = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix}; [Ir] = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix}$$

$$[\phi_S] = \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix}; [\phi_r] = \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix}$$

Donc les équations des tensions des phases statoriques et rotoriques qui décrivent le fonctionnement de la machine s'écrivent comme suit :

$$\left[ VS = [RS] \times [IS] + \frac{d}{dt} [\phi_S] \right] \quad (1.3)$$

$$\left[ Vr = [Rr] \times [Ir] + \frac{d}{dt} [\phi_r] = 0 \right] \quad (1.4)$$

### I.3.2.2 Équations magnétiques

Maintenant, nous devons exprimer les grandeurs magnétiques au stator et au rotor, toujours dans le repère a, b, c : [8]

$$\begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

$$\begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

Pour l'écriture condensée, on met :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix}; [L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

La matrice des inductances mutuelles (matrice de couplage rotor-stator) s'écrit :

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

On aura finalement :

$$[V_s] = [R_s] \times [I_s] + \frac{d}{dt} ([L_{ss}] \cdot [I_s] + [M_{sr}] \cdot [I_r]) \quad (1.9)$$

$$[V_r] = [R_r] \times [I_r] + \frac{d}{dt} ([L_{rr}] \cdot [I_r] + [M_{sr}] \cdot [I_s]) = 0 \quad (1.10)$$

### I.3.2.3 Équations mécaniques

Pour étudier les phénomènes transitoires électromécaniques avec une vitesse rotorique variable il faut ajouter l'équation de mouvement au système d'équations différentielles. [8]

$$J \cdot \frac{d\Omega_r}{dt} = C_e - C_r - f \cdot \Omega_r \quad (1.11)$$

La vitesse électrique du rotor est donnée par l'expression suivante :

$$\omega_r = p \cdot \Omega_r \quad (1.12)$$



**Remarque**

Les matrices  $[M_{sr}]$  et  $[M_{rs}]$  dépendent de l'angle de rotation mécanique, et nécessitent donc d'être recalculées à chaque pas d'échantillonnage.

**I.3.3 Modèle biphasé de la machine asynchrone**

La transformation de la machine triphasée en une machine biphasée consiste à remplacer tout enroulement triphasé (a, b, c) par deux enroulements, l'un sur l'axe direct (d) et l'autre sur l'axe en quadrature (q) (figure I.7). La transformation qui traduit ce passage du système triphasé au système biphasé est dite de Park [9].

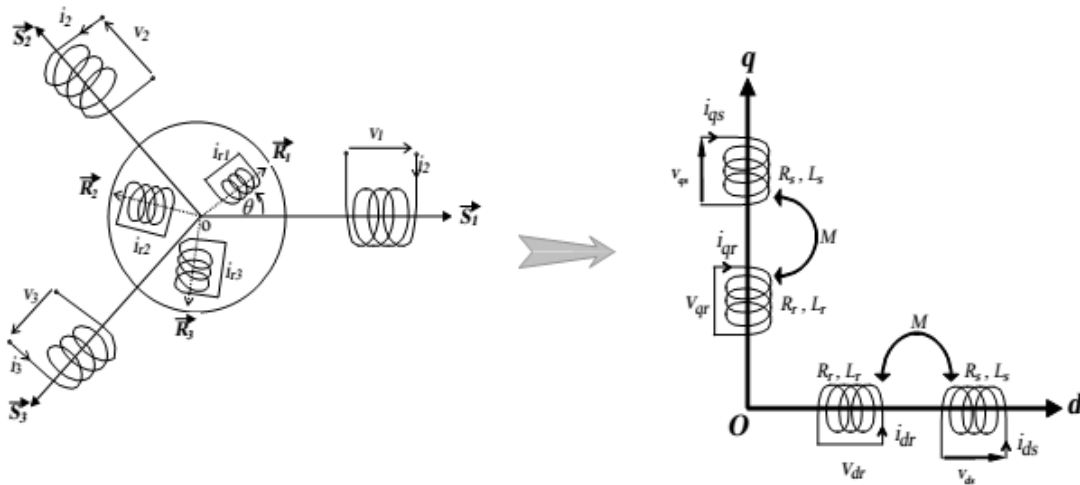


Figure (1.7) : Représentation de la MAS dans l'espace électrique et dans le repère de Park. [9]

Les matrices de passage directe  $[P(\theta)]$  et inverse  $[P(\theta)]^{-1}$  sont données par [7] :

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

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (1.14)$$

Et on a :

$$[Xd; Xq; X0]t = [P(\theta)][X1; X2; X3]t, [X1; X2; X3]t = [P(\theta)]^{-1}[Xd; Xq; X0]t$$

Le vecteur X peut être le vecteur de tension, de courant, ou de flux.



### Conventions

$$\theta = \theta_p - \theta_r \quad (1.15)$$

Avec :

$\theta_p$  : Angle électrique entre  $\vec{S}_1$  et  $\vec{d}$ .

$\theta_r$  : Angle électrique entre  $\vec{R}_1$  et  $\vec{d}$ .

$\omega_p = \frac{d\theta_p}{dt}$  : vitesse angulaire des axes (d, q) par rapport au stator.

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

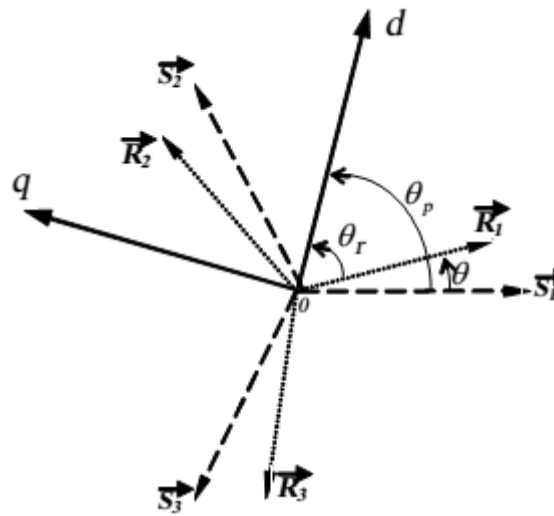


Figure (1.8) : Repérage angulaire des systèmes d'axes dans l'espace électrique.

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

Dans le repère de Park (d,q) tournant à la vitesse angulaire  $\omega_p$ , les équations (1.1) et (1.2) s'écrivent :

#### Équations électriques

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_p \phi_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} - \omega_p \phi_{ds} \end{cases} \begin{cases} v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_p - \omega) \phi_{qr} = 0 \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} - (\omega_p - \omega) \phi_{dr} = 0 \end{cases} \quad (1.16)$$

#### Equations magnétiques

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \end{cases} \begin{cases} \phi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad (1.17)$$

#### Équations mécaniques

$$J \cdot \frac{d\Omega_r}{dt} = C_e - C_r - f \cdot \Omega_r \quad (1.18)$$

## Chapitre I : Modélisation d'une machine asynchrone à cage d'écureuil

$$C_e = \left(\frac{3}{2}\right) \cdot p \cdot M \cdot (i_{rd}i_{sq} - i_{sd}i_{rq}) \quad (1.19)$$

$$\omega_r = p \cdot \Omega_r \quad (1.20)$$

pour notre étude, nous avons choisi le référentiel lié au stator parce qu'il est mieux adapté à notre étude. Le modèle de la machine asynchrone triphasée s'écrit alors comme suit :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} \end{cases} \begin{cases} v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} + \omega \phi_{qr} = 0 \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + \omega \phi_{dr} = 0 \end{cases} \quad (1.21)$$

$$\begin{cases} C_{em} = \left(\frac{M}{L_r}\right) \cdot p \cdot (\phi_{dr}i_{sq} - \phi_{qr}i_{sd}) \\ J \cdot \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - K_f \cdot \Omega \end{cases} \quad (1.22)$$

### I.4 Simulation et interprétation

La simulation a été effectuée par le logiciel «simulink» sous «Matlab».

Dans cette partie on présentera la simulation numérique d'une machine asynchrone triphasée alimentée directement par un réseau standard, on alimente la machine par une source de tension sinusoïdale de valeur efficace 220V et de fréquence 50HZ. La figure (1.9) représente le schéma bloc de simulation d'une machine asynchrone.

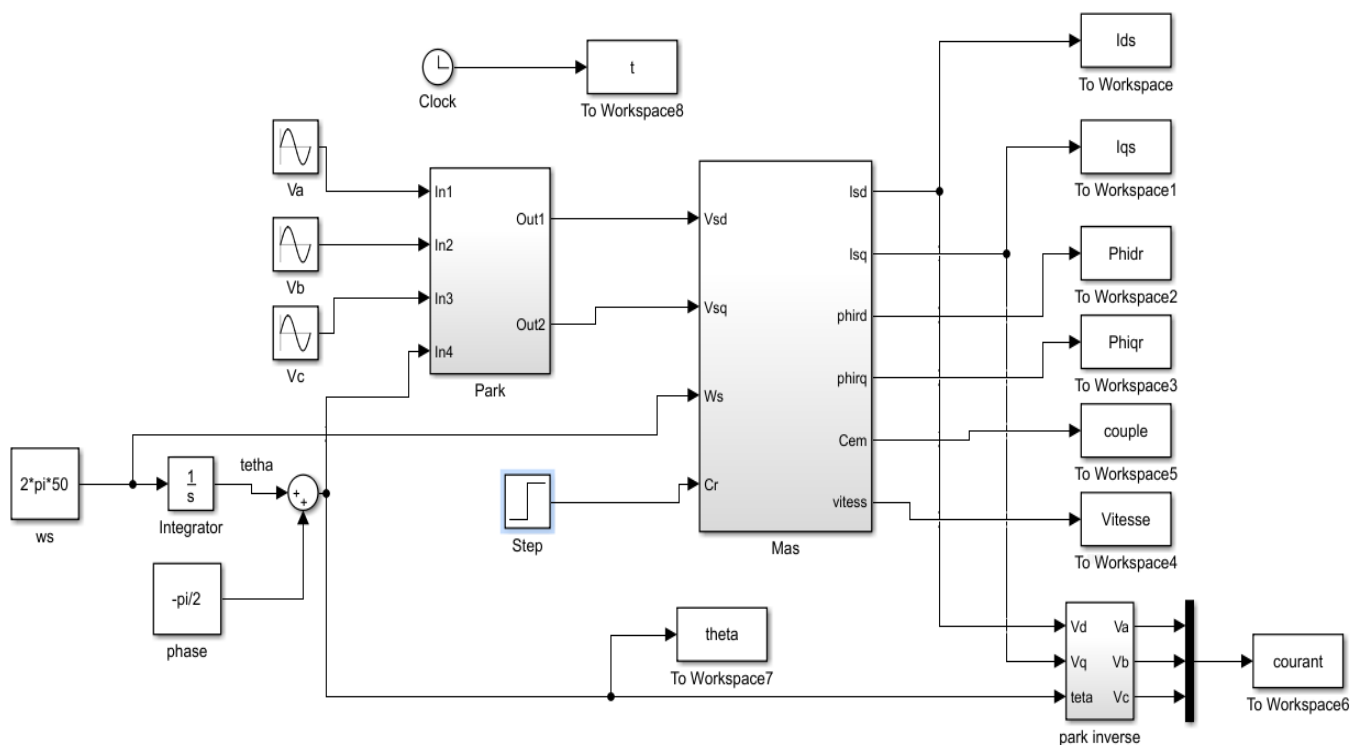


Figure (1.9.a) : Schéma de simulation d'une machine asynchrone alimentée en tension.

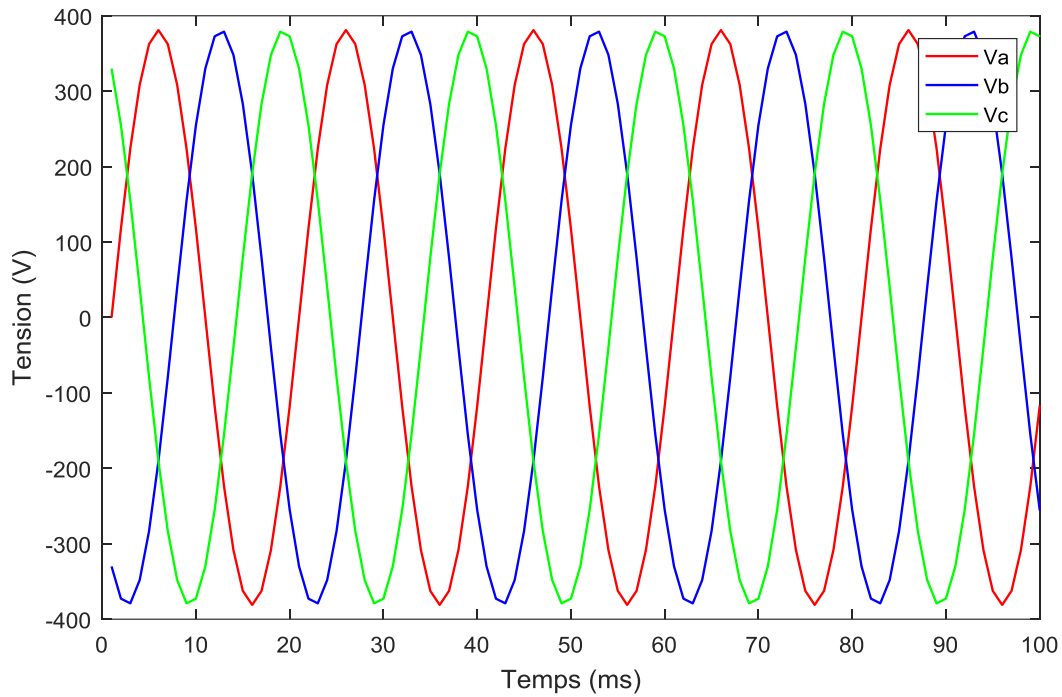


Figure (1.10) : l'alimentation de tension triphasé.

➤ **A vide :**

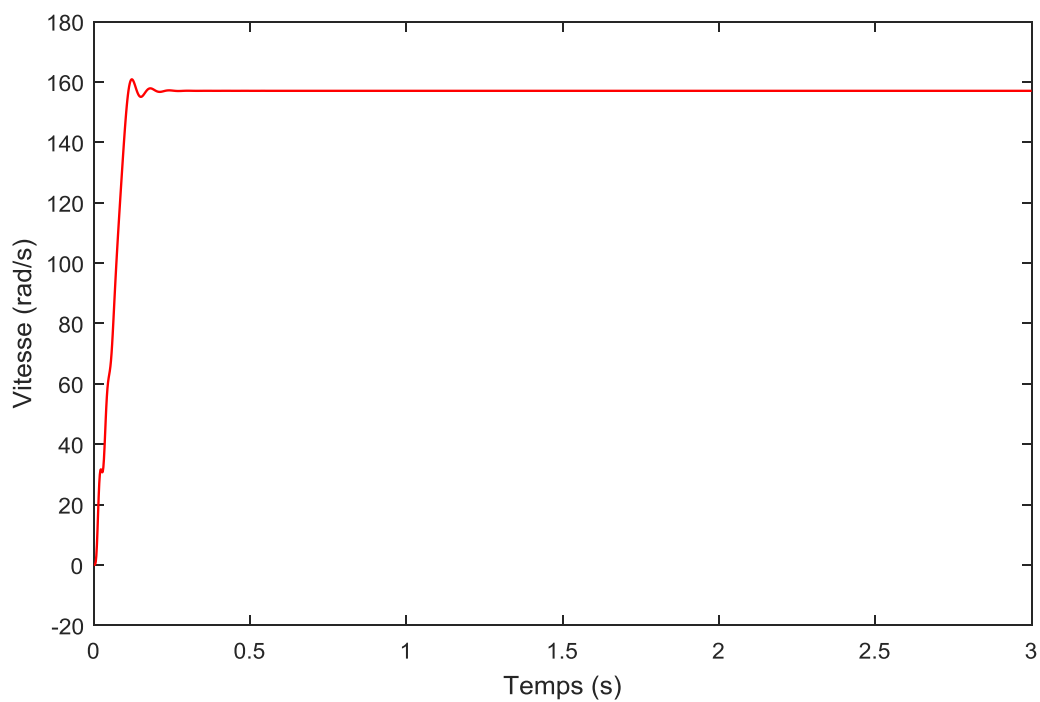


Figure (1.11) : vitesse de rotation.

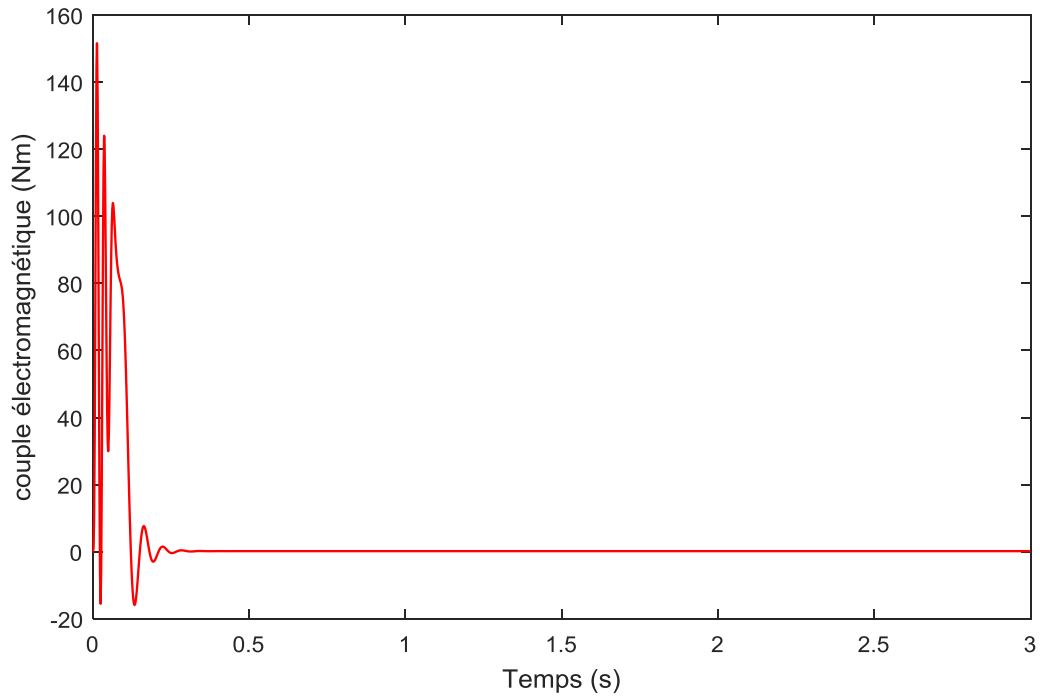


Figure (1.12) : couple électromagnétique.

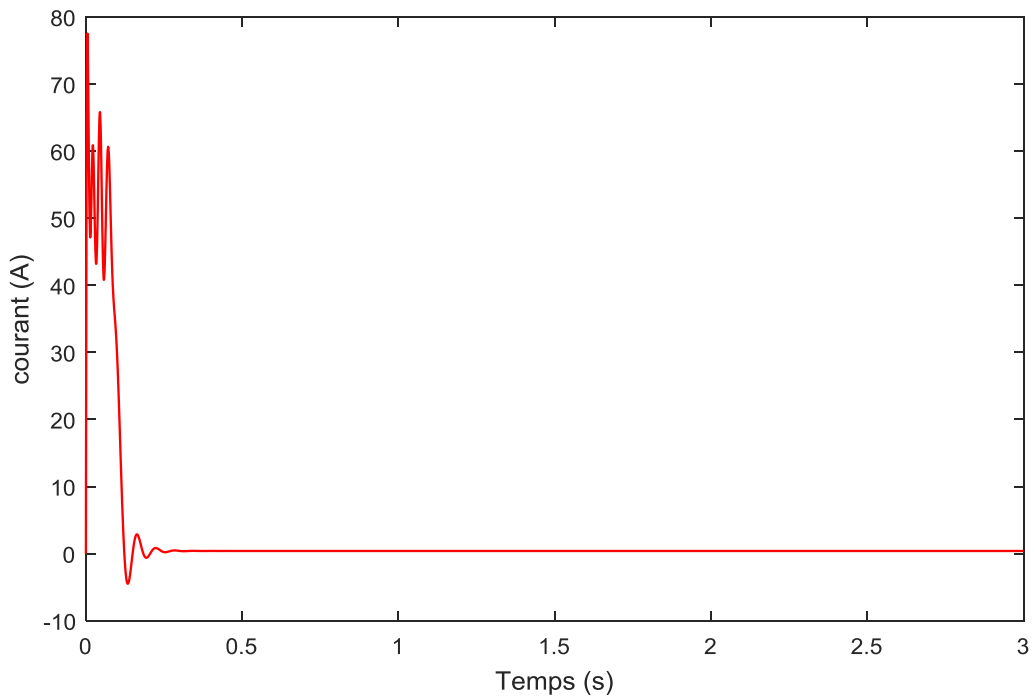


Figure (1.13) : courant statorique  $I_{ds}$ .

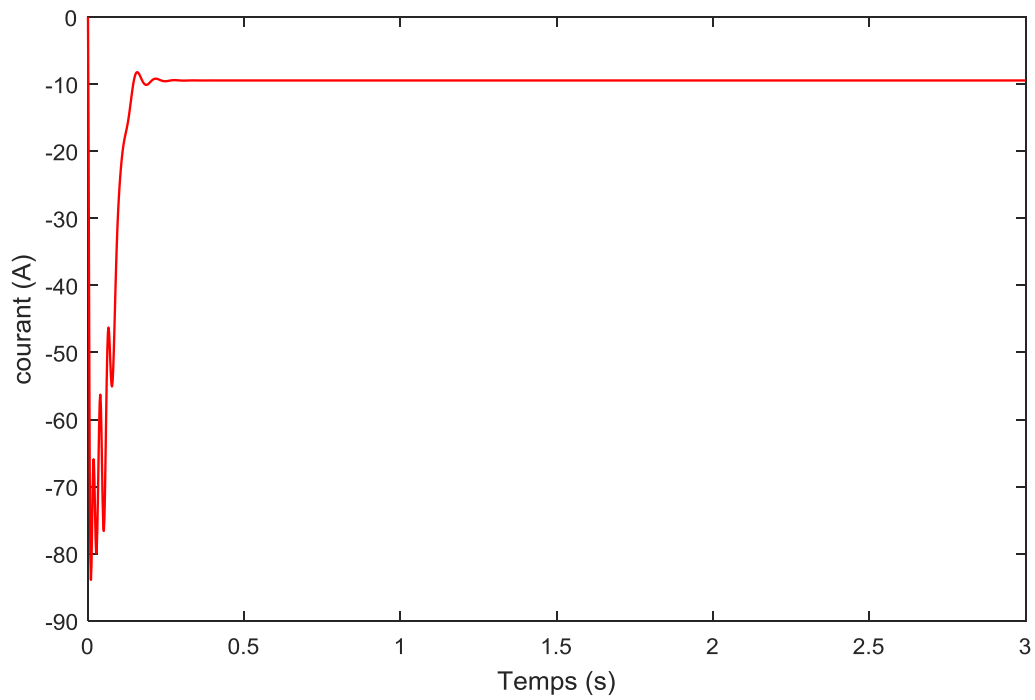


Figure (1.14) : courant statorique  $I_{qs}$ .

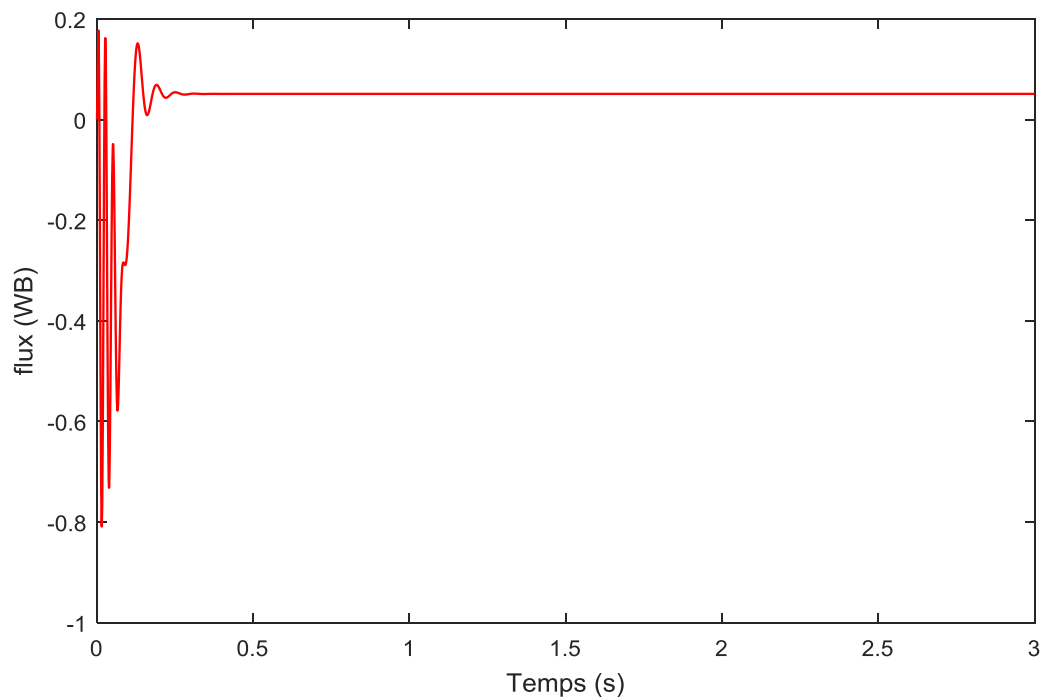


Figure (1.15) : amplitude de flux rotorique.

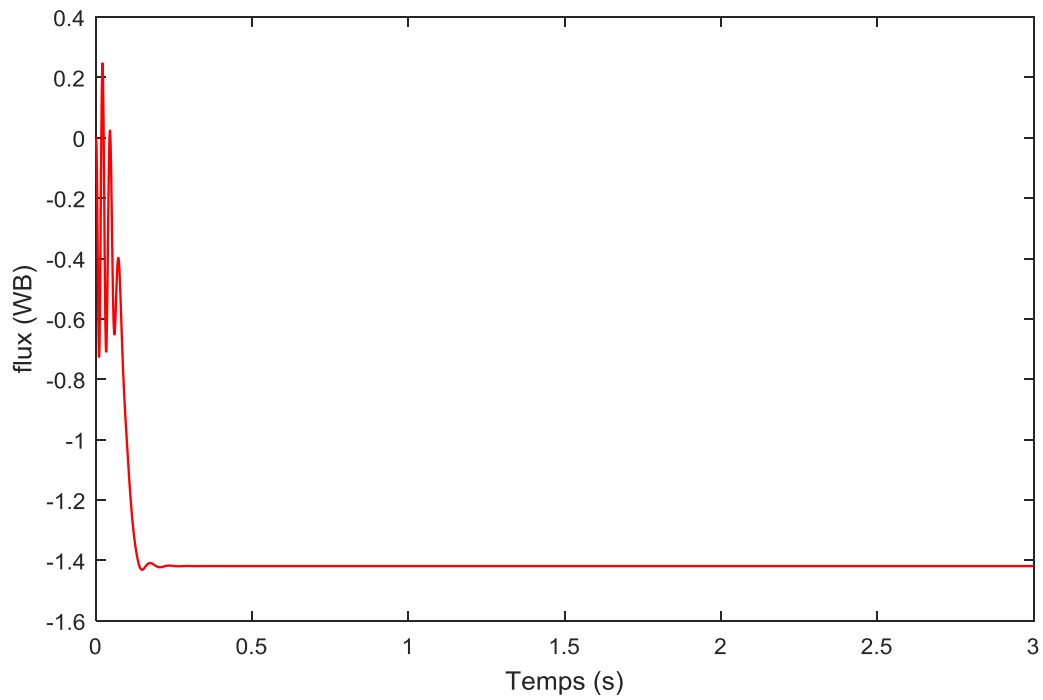


Figure (1.16) : amplitude de flux statorique.

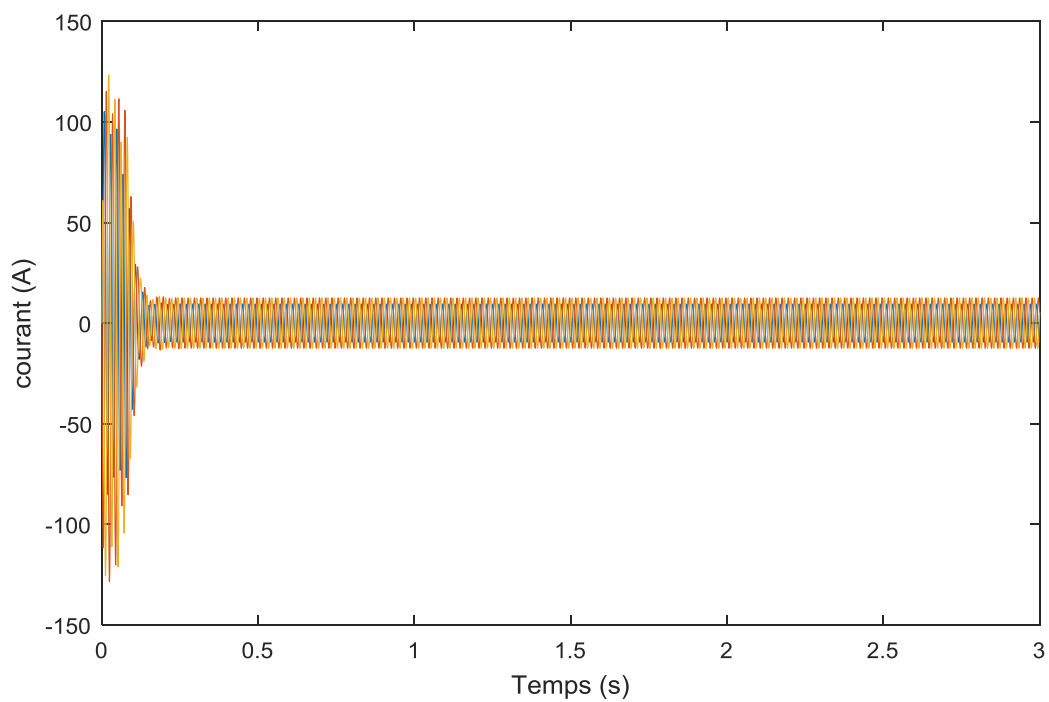


Figure (1.17) : courant statorique  $I_{as}, I_{bs}, I_{cs}$ .

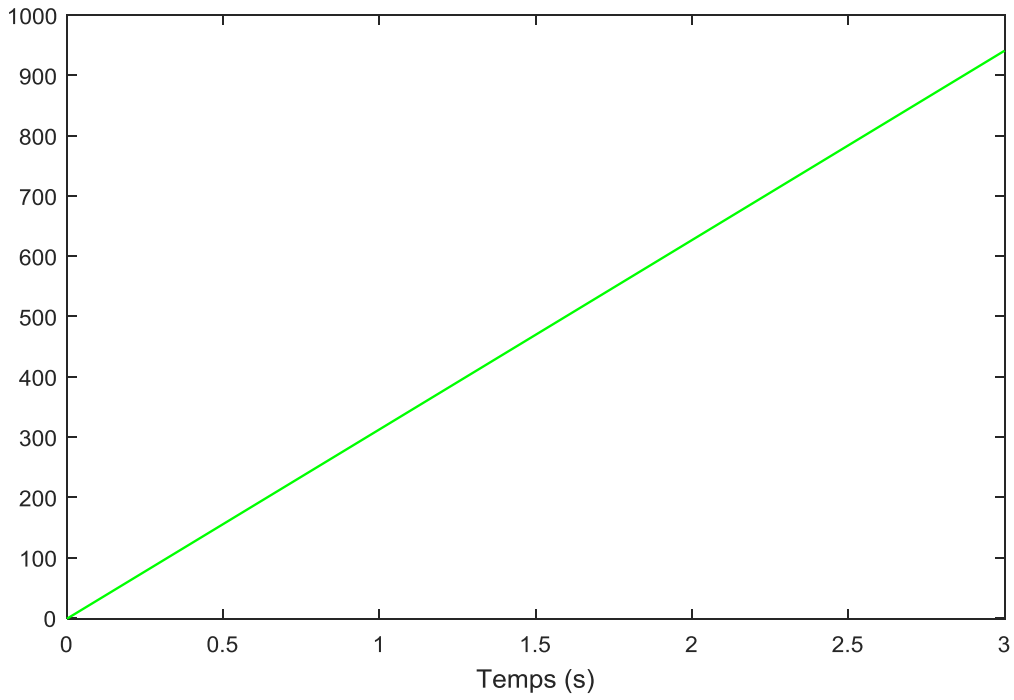


Figure (1.18) : la position tetha (rad).

➤ **En charge :**

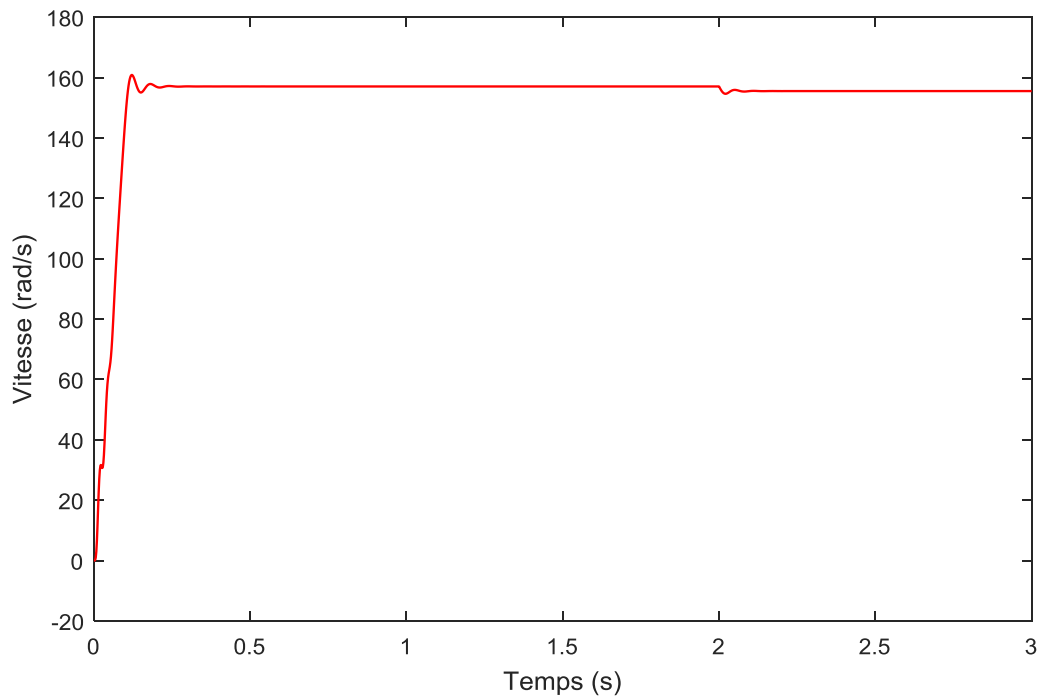


Figure (1.19) : vitesse de rotation.

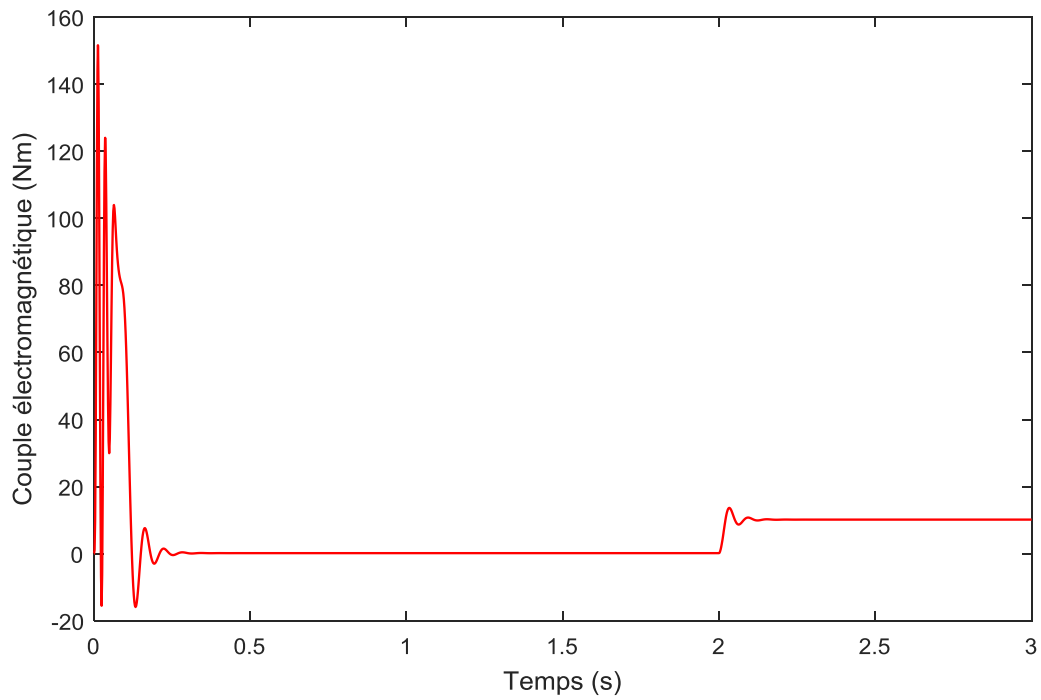


Figure (1.20) : couple électromagnétique.

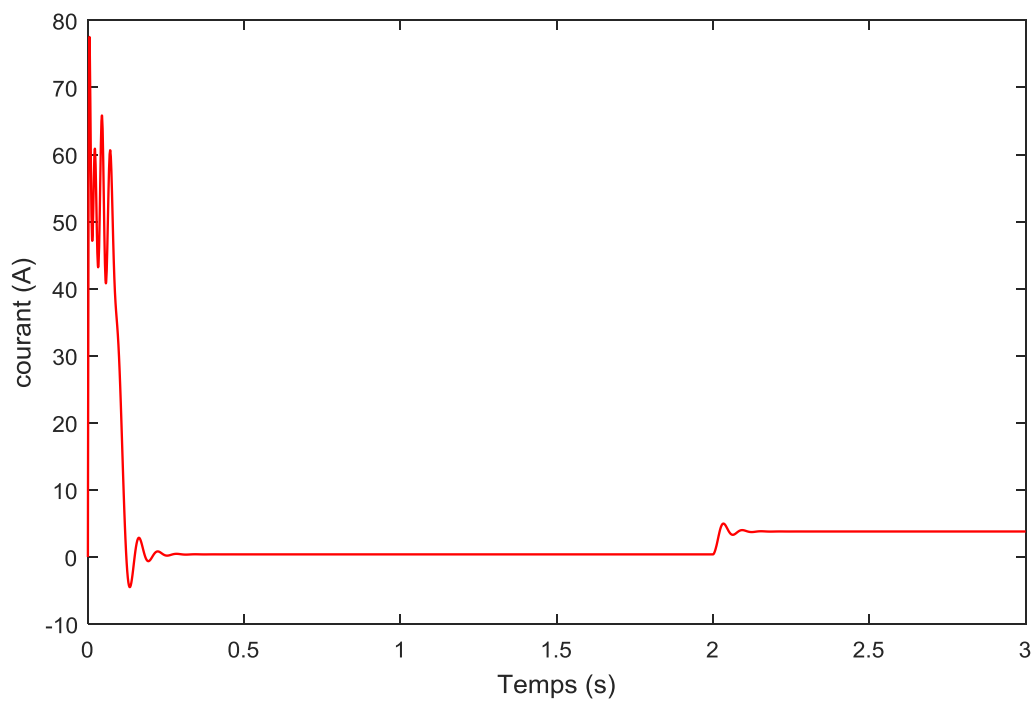


Figure (1.21) : courant Ids.



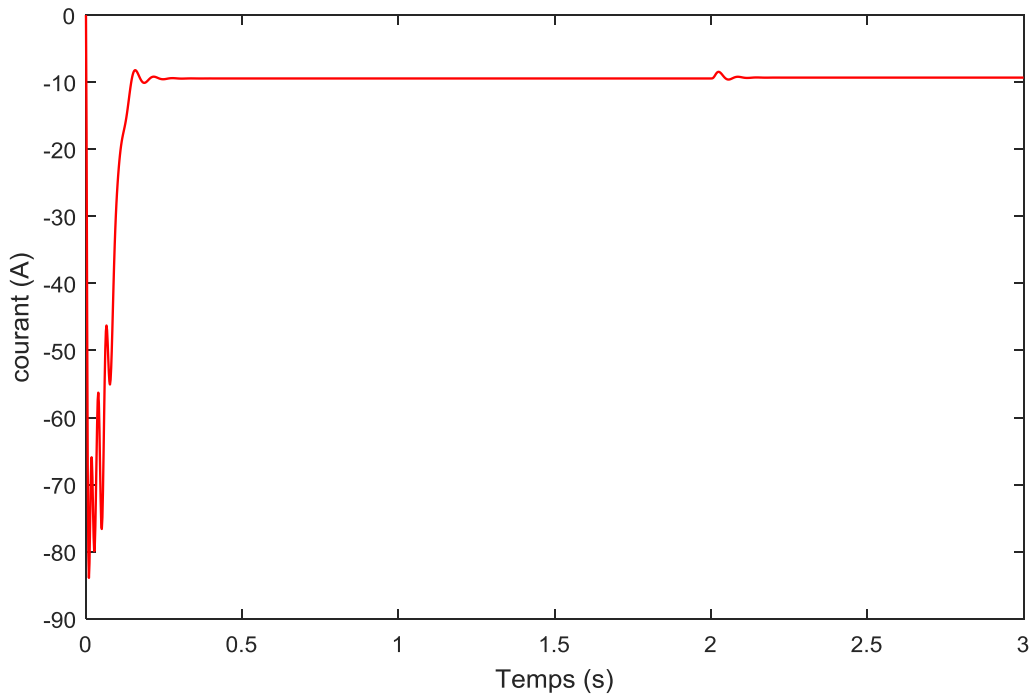


Figure (1.22) : courant  $I_{qs}$ .

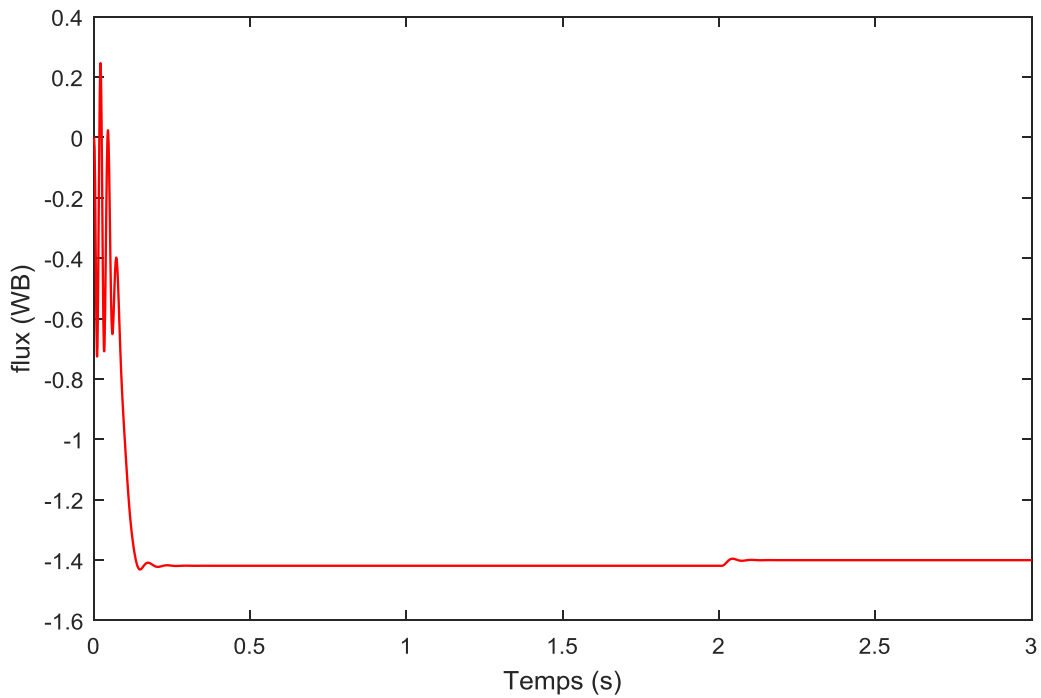


Figure (1.23) : amplitude de flux statorique.

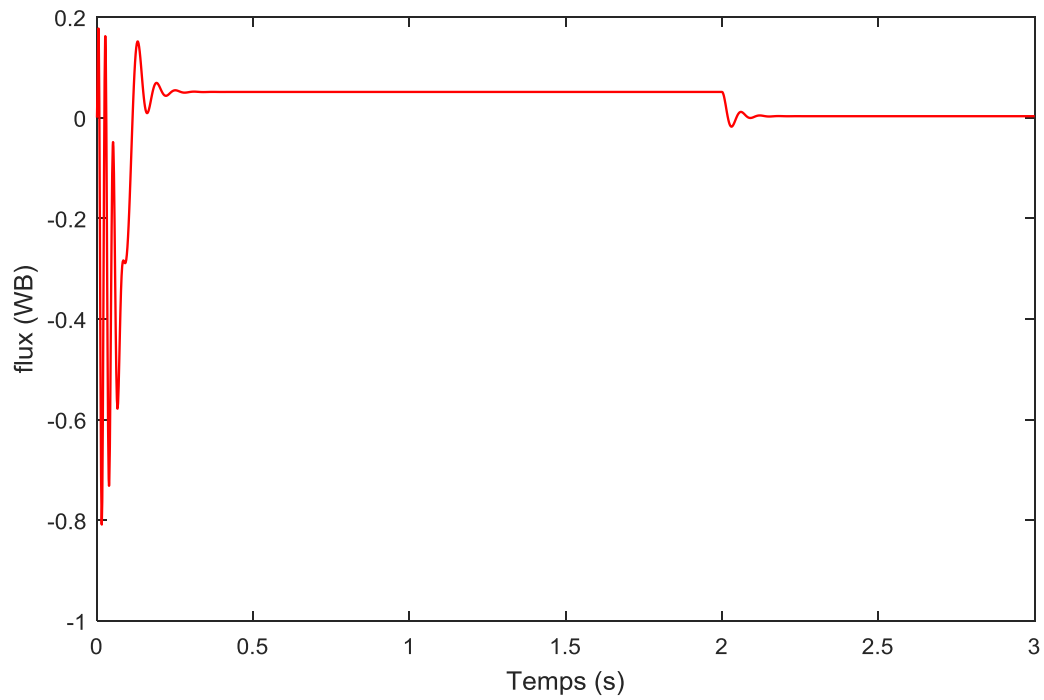


Figure (1.24) : amplitude de flux rotorique phidr.

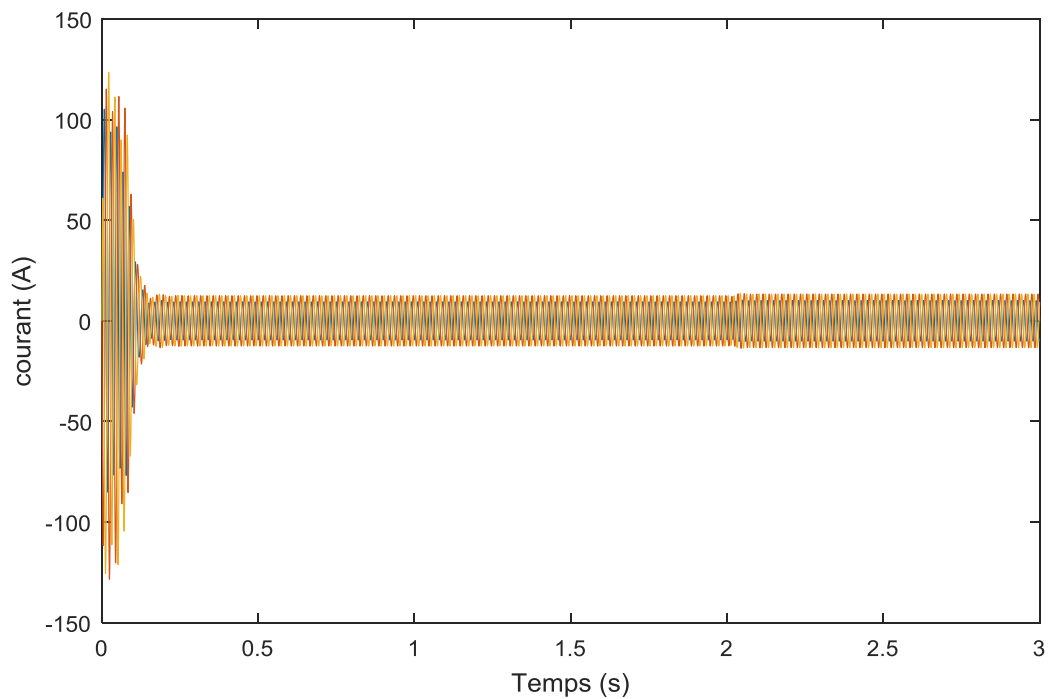


Figure (1.25) : courant statorique  $I_{sa}, I_{sb}, I_{sc}$ .

### I.5 Interprétations des résultats de simulation

Dans ce premier chapitre, on a simulé la machine asynchrone modèle (d,q) dans le référentiel statorique, alimentée par un réseau triphasé équilibré 220/380 V,  $f=50$  Hz, à vide et à charge sous le logiciel simulink/matlab. Voir les paramètres de la machine asynchrone (annexe1).

Sur Les figures de (1.11) jusqu'à (1.18) donne les résultats de la simulation de la MAS à vide, c'est-à-dire le couple résistant est nul  $C_r=0$ , si on voit bien la courbe de couple électromagnétique au démarrage à vide. Le régime transitoire est fortement pulsatoire, et aussi un fort appel de courant bref, mais très important, engendrant un bruit dans la partie mécanique à cause de CEM très important au démarrage, et le bruit disparaîtra quand le CEM devient nul, le régime permanent est atteint dans un délai très bref, la vitesse de rotation de rotor stabilisera à 156 [rad/s]. Sur Les figures (1.19) jusqu'à (1.25) donne les résultats de la simulation de la MAS avec une charge  $C_r= -10$ (Nm).

### I.2 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation mathématique de la machine asynchrone alimentée par une source de tension sinusoïdale triphasée. Pour simplifier le modèle de cette machine, nous appliquons la transformation de Park pour afin d'éviter la complexité des équations différentielles. Cette transformation permet le changement du système triphasé réel au système biphasé linéaire équivalent de cette machine ce qui signifie une facilité de résolution et de simulation. A la fin du chapitre, des résultats de simulations présentent les grandeurs (caractéristiques) de cette machine.



# **Chapitre II**

### II.1 Introduction

Un onduleur (DC-AC) est un dispositif permettant de transformer en alternatif une énergie électrique de type continue. Ils sont utilisés en électrotechnique pour :

- fournir des tensions ou courants alternatifs de fréquence et amplitudes variables.
- fournir une ou des tensions alternatives de fréquence et d'amplitude fixes.

On distingue les onduleurs de tension et les onduleurs de courant, en fonction de la source d'entrée continue : source de tension ou source de courant. Les onduleurs de tension est la plus maîtrisée est présente dans la plupart des systèmes industriels, dans toutes les gammes de puissance. Les onduleurs sont classés selon le mode de commutation. [10]

### II.2 Principe de fonctionnement d'un onduleur

Un onduleur est un dispositif électronique assurant la conversion statique d'une tension/courant continu en tension /courant alternatif. Il est dit autonome s'il assure de lui-même sa fréquence et sa forme d'onde .Deux types d'onduleurs sont donc utilisés pour assurer une telle conversion l'onduleur monophasé et l'onduleur triphasé.

#### II.3.1 L'onduleur monophasé

L'onduleur permettant de fabriquer un échange d'énergie entre une source de tension continue fournie par une batterie ou un redresseur, et une source de tension alternative pour alimenter des charges en courant alternatif. Cette fonction est schématisée sur la Figure (2.1). [11]

La forte évolution de cette fonction s'est appuyée, d'une part sur le développement des composants à semi-conducteur entièrement commandables, puissants, robuste et rapides. D'autre part, sur l'utilisation quasi généralisée des techniques dites de modulation de largeur d'impulsion, ainsi que le progrès réalisé dans le domaine de la micro-informatique. [11]

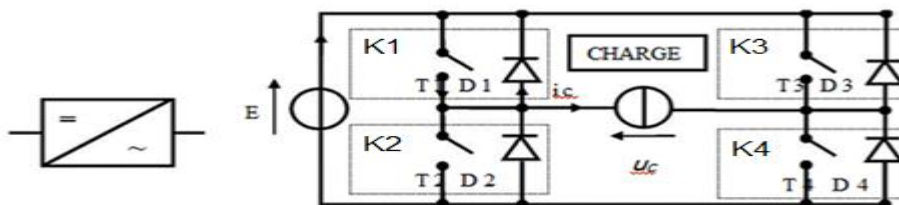


Figure (2.1) : Onduleur monophasé : Symbole et structure de montage d'un onduleur en pont complet.

[11]

On notera que :

T1, T2, T3, T4 : Transistors de puissance.

D1, D2, D3, D4 : Diodes de puissance.

K1, K2, K3, K4 : Transistors avec une diode antiparallèle.

E : Tension continue.

$u_c, i_c$  : La tension et le courant de la charge.

La Figure (2.1) rappelle le schéma symbolique de l'onduleur et le montage d'un onduleur en pont complet. L'onduleur monophasé est constitué de deux bras chaque bras est composé de deux étages d'interrupteurs. Chaque étage comporte deux composants semi-conducteurs avec une diode en antiparallèle (IGBT ou MOSFET). Le rôle des diodes antiparallèles sur les transistors est pour s'assurer que les courants ne sont pas inversés dans la charge. À partir de la source principale de tension continue, l'onduleur permet d'avoir une tension plus proche de la sinusoïde à la sortie.

### II.3.2 L'onduleur triphasé

On peut réaliser un onduleur triphasé en regroupant trois onduleurs monophasés (en pont ou en demi-pont) en parallèle et commander les interrupteurs de chacun pour obtenir à la sortie trois phases de tension. En fait, en regroupant trois demi ponts monophasés, on obtient un onduleur en pont triphasé à six interrupteurs représenté par la Figure (2.2) dont les interrupteurs du même bras de l'onduleur doivent être complémentaires pour que la tension continue E ne soit jamais en court-circuit et pour que les circuits des courants  $i_a, i_b$  et  $i_c$  ne soient jamais ouverts. Afin que les interrupteurs puissent imposer les tensions de sortie, quelques soient les courants de charge, il faut que ces derniers soient bidirectionnels en courant. Chacun d'eux est formé d'un semi-conducteur à ouverture et à fermeture commandées et d'une diode montée en antiparallèle. Ces interrupteurs peuvent être réalisées, suivant la puissance à contrôler, avec des IGBT'S ou des GTO'S associés à des diodes en antiparallèle. [12] [13] [14]

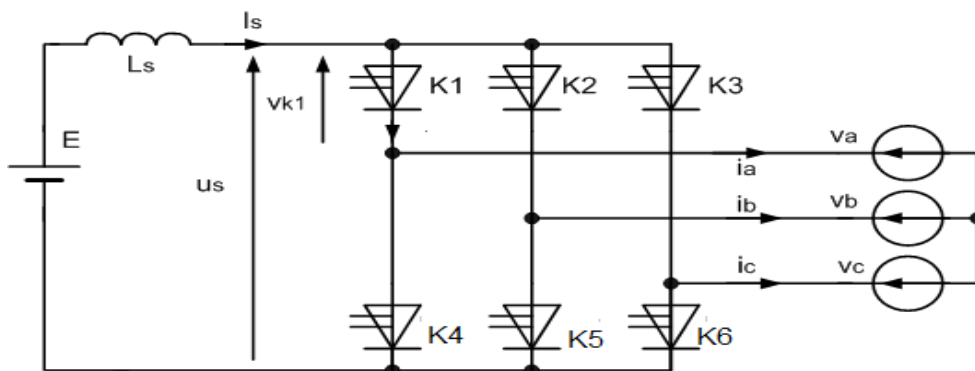


Figure (2.2) : Symbole et structure de montage d'un onduleur triphasé

Les principes des méthodes de commande appliquées à ce type d'onduleurs sont les mêmes que ceux des onduleurs monophasés en demi-pont. N'est à noter que les couples d'interrupteurs (K1 et K4), (K2 et K5), (K3 et K6) sont complémentaires.

Les onduleurs triphasés sinusoïdaux sont très utilisés pour l'alimentation à tension et fréquence variables des récepteurs triphasés-équilibrés.

### II.3.3 Onduleur multi-niveaux

Un convertisseur statique est dit « multi-niveaux » lorsqu'il génère une tension de sortie composée d'au moins trois niveaux. Ce type de convertisseur présente essentiellement deux avantages. D'une part ces structures permettent de limiter les contraintes en tension subies par les interrupteurs de puissance : chaque composant à l'état bloqué supporte une fraction plus faible de la pleine tension de bus continu que le nombre de niveaux est élevé. D'autre part, la tension de sortie fournie par le convertisseur multiniveau présente des qualités spectrales intéressantes. La multiplication du nombre de niveaux intermédiaires réduit la capacité de chaque quantité vers le haut ou vers le bas dans la tension de sortie. Alors l'amplitude des raies harmoniques est par conséquent moins élevée. Dans le cas de modulation de largeur d'impulsion, le recours à un convertisseur multi-niveaux associé à une commande judicieuse des composants de puissance permet en outre de supprimer certaines familles de raies harmoniques. [15]

En général, les onduleurs de tension multi-niveaux peuvent être vu comme des synthétiseurs de tension, dans lesquels la tension de sortie est synthétisée de plusieurs niveaux de tension discrets . La figure (2.3) représente les trois topologies principales des onduleurs multi-niveaux les plus récentes.

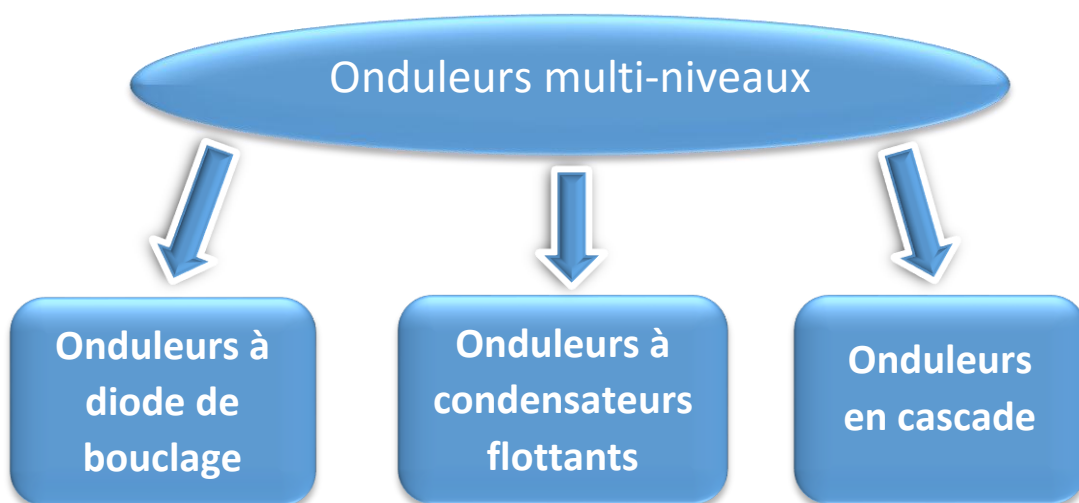


Figure (2.3) : Les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux [15]



## II.4 Les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux

L'onduleur de tension multi-niveaux possède trois ou plusieurs niveaux. Le but de cette Partie est de donner une vue générale des trois topologies de base des onduleurs multiniveaux :

1. La topologie à diode de bouclage (NPC).
2. La topologie au condensateur flotteur (à cellules imbriquées).
3. La topologie en cascade.

### II.4.1 Onduleur multi niveaux à diode de bouclage

La première topologie la plus pratique d'onduleur de tension multi niveaux est le NPC (Neutral Point Clamped). Cette topologie a été initialement proposé par A. Nabac en 1981 pour la génération de N niveaux de tension. La figure (2.4) représente la structure d'un convertisseur triphasé à potentiel distribué, dans laquelle les diodes sont utilisés pour réaliser la connexion avec le point de référence 0. afin d'avoir une tension de 220 V, cependant ces diodes non seulement augmentent le cout de ce type du convertisseur mais créent un problème d'encombrement.

Pour l'obtention d'une tension de N niveaux, N-1 capacités. Les tensions aux bornes des condensateurs sont toutes égales à  $E/(N-1)$ , E est la tension totale du bus continu. Chaque couple d'interrupteur (STD, STD') forme une cellule de commutation, les deux interrupteurs sont donc commandés de façon complémentaire. [15]

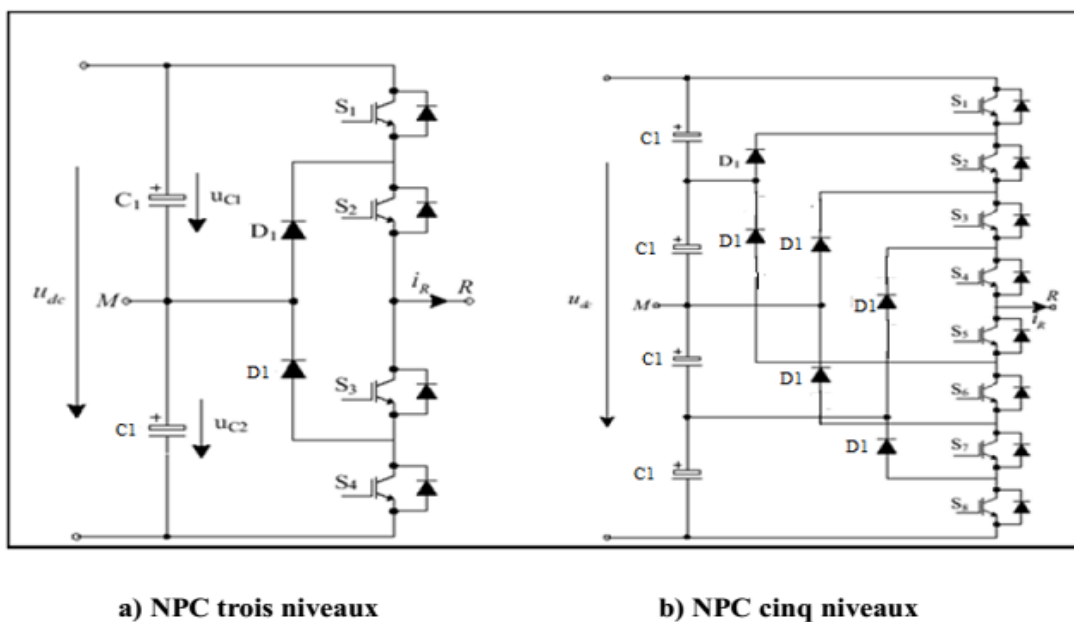


Figure (2.4) : Topologies d'onduleurs NPC [15]

## Chapitre II : Les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux

Cette topologie présente plusieurs avantages dont quelques-uns sont énumérés ci-dessous :

- Les composants de puissance à semi-conducteur bloquent une tension inverse égale seulement à la moitié de la tension de la source continue.
- avec n'importe quel nombre de niveaux.
- Toutes les phases partagent le même bus continu.
- la fréquence fondamentale assure un haut rendement.
- La méthode de contrôle est relativement simple.
- La forme d'onde de trois niveaux résulte dans une meilleure qualité spectrale par rapport à celle d'un onduleur triphasé classique, ce qui rend les filtres passifs peu volumineux.

Par contre, cette topologie présente plusieurs difficultés techniques dans les cas de grande puissance tel que :

- Pour les topologies avec plus de trois niveaux, les diodes de bouclage peuvent augmenter les contraintes en tension jusqu'à une valeur égale à  $E (N-1)/N$ . Donc, les connexions des diodes en série pourraient être exigées et cela complique la conception et soulève des questions de fiabilité et du coût de réalisation.
- Cette topologie exige des diodes de bouclage à vitesse de commutation élevée qui doivent être capable de supporter le courant de la pleine charge.
- Différents calibres pour les appareils de commutation sont nécessaires en raison de leur conduction cyclique.

Le maintien de l'équilibre de la charge des condensateurs demeure toujours une question ouverte pour les topologies des onduleurs NPC avec plus de trois niveaux. Bien que le l'onduleur NPC à trois niveaux fonctionne avec un facteur de puissance élevé, il est employé surtout dans les circuits de compensation. Cela est dû au problème d'équilibrage des capacités. [15]

### II.4.2 Onduleur multi niveaux à condensateurs flottants

Dans la topologie multi niveaux proposée par T. Meynard et H. Foch en 1992. La structure de ce transformateur est similaire à celle d'un onduleur à diodes de bouclage, sauf qu'au lieu d'utiliser des diodes bouclages, l'onduleur utilise des condensateurs à leur place. D'où l'appellation «Onduleur à Condensateurs Flottants ». Cette structure est proposée pour résoudre d'une part le problème de balancement de tension, et d'autre part le nombre excessif des diodes.

Dans la topologie suivante, figure (2.5), on représente l'onduleur à condensateur flottant à trois et cinq niveau.

Ce type de convertisseur présente plusieurs avantages :

- Le concept de condensateur Flottant peut être appliquée à un certain nombre de convertisseurs de différents types, DC /AC ou AC/ DC
- La plupart des stratégies de modulation sont facilement appliquée à cette topologie

## Chapitre II : Les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux

- Les tensions sur les condensateurs sont automatiquement équilibrées par cette stratégie de modulation conventionnelle. Si désiré, les tensions de condensateur peuvent être activement contrôlées par une modification appropriée des signaux de commande.

Le concept peut être facilement appliqué à d'autres types de convertisseurs, aussi bien pour un transfert unidirectionnel de la puissance que bidirectionnel.

- Sa modularité permet une extension et une adaptation aisées des stratégies de commande à un nombre élevé de niveaux.
- Les condensateurs n'étant jamais mis en série entre niveaux différents, le problème du déséquilibre de leur tension n'existe plus. [16]

Cette topologie présente quelque inconvénients, tel que:

- La topologie exige beaucoup de condensateurs à haute tension-beaucoup plus nombreux que d'autres topologies. Ces condensateurs doivent conduire le courant à pleine charge pendant au moins une partie du cycle de commutation. Heureusement, si la fréquence de commutation est élevée, ces condensateurs peuvent généralement avoir une capacité relativement faible.
- La topologie n'est pas intrinsèquement tolérante aux pannes. [14]
- Contrairement au premier cas qui ne nécessite que  $(N-1)$  capacité. De plus, il est clair que des courants avec de grandes valeurs efficaces traverseront ces condensateurs.
- Il y a un potentiel de résonance parasite entre les condensateurs découplés. [16]

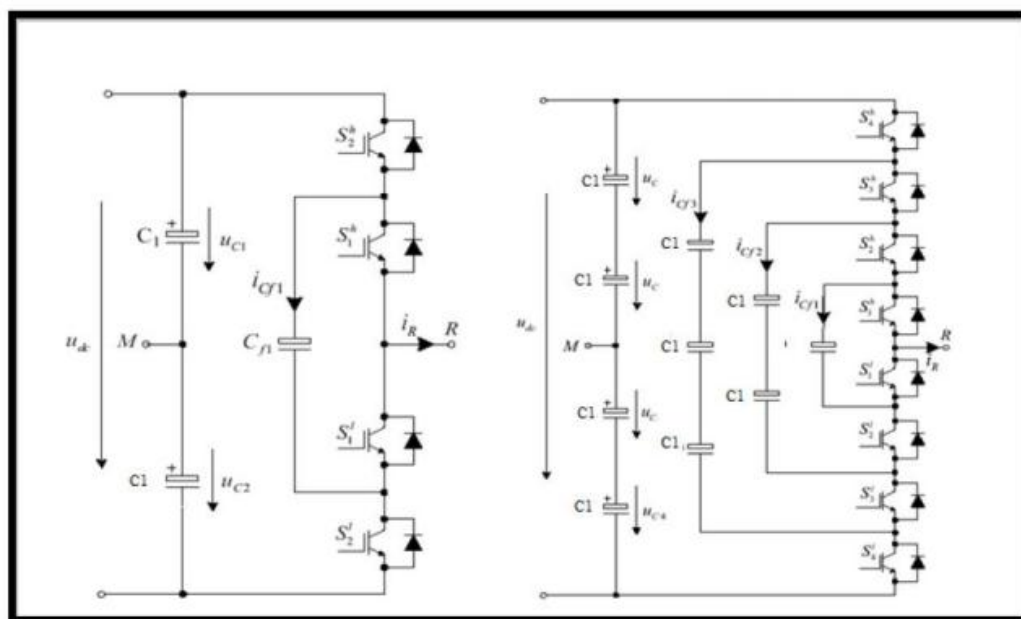


Figure (2.5) : Topologies d'onduleurs NPC à condensateur Flottant [15]

### II.4.3 Onduleurs multi niveaux en cascade

En 1975, les auteurs ont proposé un convertisseur multi niveaux en cascade qui consistait en la mise en série de plusieurs ponts à deux niveaux monophasé ; Ces ponts sont connectés à des sources de tension continue séparées. La figure (2.6) Montre le schéma de base d'un convertisseur N niveaux en cascade formé par l'association en série de  $N-1/2$  ponts à deux niveaux. La tension en sortie d'une telle structure est donnée par la somme des  $N-1/2$  tensions en sortie de ces ponts.

Une autre alternative consiste à envisager de mettre en série plusieurs ponts monophasé alimentés par une même source de tension continue  $E_c$ . Cette structure est appelée polygonale et l'utilisation d'un transformateur d'isolement à la sortie de chaque pont est obligatoire pour connecter les sortie alternative de chaque pont. [17]

Les complications et le coût des sources isolées par pont ne sont pas un inconvénient sérieux car ils sont contrebalancés par les avantages de la construction modulaire.

Le principal avantage de cette approche est que la topologie de ce type d'onduleur facilite la maintenance tout en offrant un moyen très pratique d'augmenter le nombre de niveaux [18]. Pour améliorer la résolution de ces convertisseurs sans augmenter le nombre de cellules, il est possible d'alimenter les cellules par des tensions d'entrées différentes. [15]

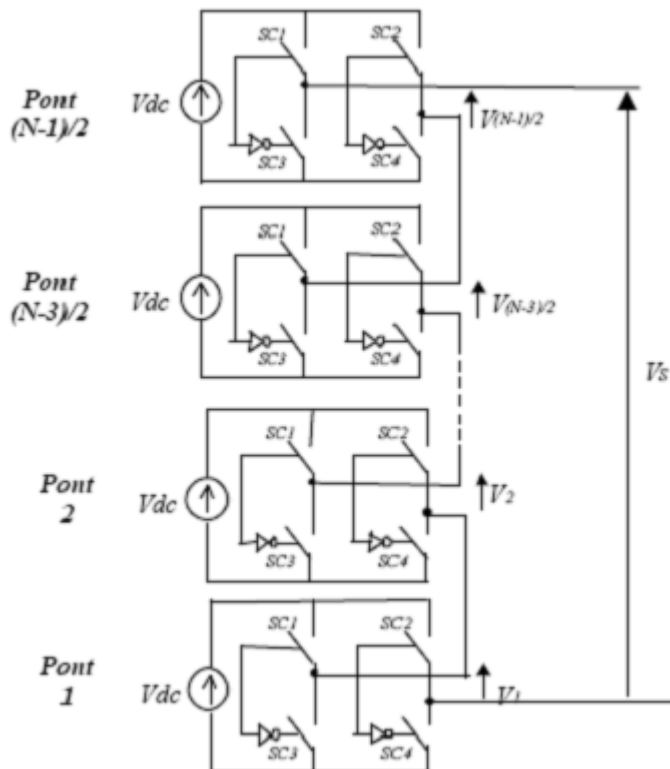


Figure (2.6) : Structure d'un convertisseur N niveaux en cascade [17]

## Chapitre II : Les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux

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

### • **Avantage**

L'onduleur multi niveaux en cascade est une structure de convertisseurs d'énergie, il présente l'idée d'employer des sources séparées à courant continu pour produire une forme d'onde d'une tension alternative.

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

### • **Inconvénients**

- Pour un système à trois phases, il faudra plus de commutateurs que dans un onduleur Traditionnel.
- Nécessité d'équilibrer les sources DC entre les différents niveaux.
- Besoin de plusieurs connecteurs/câbles pour connecter les sources DC. [14]

## II.5 Domaines d'application d'onduleur multiniveau

Les convertisseurs multiniveaux développée à la base pour résoudre certains problèmes ou des inconvénients, qui apparue dans les convertisseurs de deux niveaux monophasés au triphasée. Ils ont bénéficié à ces technologies et rentrer à plusieurs applications, on a mentionné quelques domaines que touche par cette technologie :

- Démarrage de machine d'une grande puissance.
- Système de lavage.
- Réglage de la vitesse par la tension de sortie de l'onduleur.
- Réglage de la vitesse par la variation de la fréquence de l'onduleur. [19]
- Application dans le domaine de la traction ferroviaire et urbaine (TGV France).

## Chapitre II : Les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux

- Application dans l'alimentation des réseaux de bord et de propulsion des bâtiments maritimes.
- Application dans le domaine de réseaux électrique.
- Application dans le domaine de l'énergie renouvelable (photovoltaïque, éolienne...etc.).

### II.6 Avantages d'onduleur multiniveaux

Les onduleurs multi-niveaux offrent d'énormes avantages par rapport aux Onduleurs deux niveaux. Ces avantages sont visibles, d'une part d'un point de vue technologique et d'autre part d'un point de vue fonctionnel. [20]

#### II.6.1 Avantages technologiques

Dans les onduleurs multi niveaux, la répartition de la tension est obtenue de manière naturelle en régime établi, ce qui permet de commuter chaque semi-conducteur indépendamment des autres. Ceci rend le convertisseur plus robuste et plus performant pendant les commutations. La tension commutée est d'amplitude réduite et la commutation est donc plus simple à gérer. [20]

#### II.6.2 Avantages fonctionnels de convertisseur

Possibilité d'accéder à des applications de plus forte puissance. Possèdent de meilleurs compromis entre performances statiques (tension de saturation) et performances dynamiques (temps de commutation, pertes par commutation, fréquence de découpage). [21]

### II.7 Conclusion

Il existe plusieurs topologies d'onduleur, dont chacun correspond à un type d'application déterminer ou permettent d'atteindre des performances recherchées. Dans ce chapitre, nous avons différentes Les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux ou nous avons donné leurs avantages et leurs inconvénients.

Le chapitre suivant sera consacré à l'étude de l'onduleur de tension mise en cascade. L'étude d'un cas d'onduleur monophasé et triphasé à deux, trois et cinq niveaux (pont H en cascade) sera exposée.



# **Chapitre III**





### III.1 Introduction

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

Le principal avantage de cette approche est que le nombre d'étapes peut être augmenté, sur le modèle de la tension de sortie, sans ajouter de nouveaux composants.

L'utilisation de cellules de conversion de puissance en série permet d'accroître le nombre de niveau de tension et de puissance du convertisseur. Mais l'inconvénient de cette structure est le grand nombre de tensions continues isolées nécessaires pour chaque pont. [11]

La Figure (3.1) présente un exemple d'un onduleur en pont H en cascade à cinq niveaux monophasé (à gauche) et triphasé (à droite).

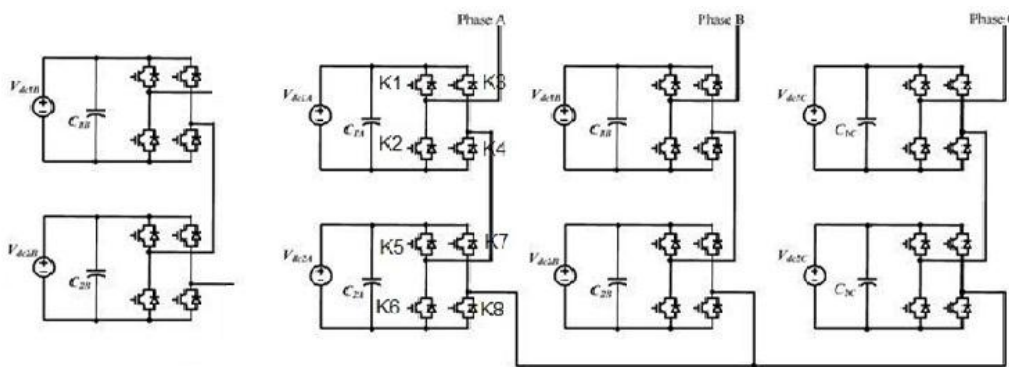


Figure (3.1) : Onduleur H-bridge à 5 niveaux, monophasé (à gauche) et triphasé (à droite)

### III.2 Onduleur à trois niveaux de type Cascade en pont H

#### III.2.1 Structure

La structure d'un convertisseur multiniveaux basée sur la mise en série d'onduleurs monophasés (ou pont en H, ou cellule partielle) est montrée sur la figure (3.2).

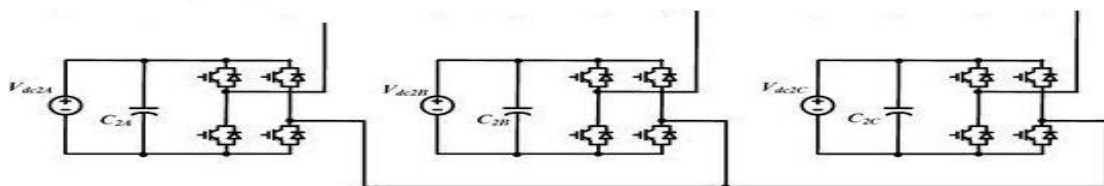


Figure (3.2) : schéma triphasé d'un onduleur cascade en pont H à 3 niveaux

Les cellules  $y$  sont connectées en étoile, cependant il est également possible de les connecter en triangle [18]. Chaque cellule de l'onduleur est alimentée par une source continue  $E$  et est composée de quatre interrupteurs qui sont unidirectionnels en tension et bidirectionnels en courant : il s'agit d'associations classiques d'un transistor et d'une diode en antiparallèle. Les sources doivent être galvaniquement isolées les unes des autres, afin d'éviter un court-circuit lors de leur mise en série [18].

### III.2.2 Principe de fonctionnement

Pour mieux comprendre le fonctionnement de la structure cascade en pont H à trois niveaux de tension, nous allons nous limiter notre étude à sa structure monophasée, figure (3.2).

La structure d'un bras d'onduleur trois niveaux de type cascade en pont H est identique à celui d'un onduleur classique monophasé en pont complet voir figure (3.3). Cependant la technique de commande est différente ce qui permettra d'avoir les trois niveaux de tension.

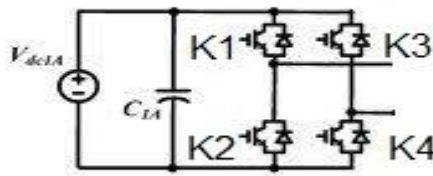


Figure (3.3) : Bras d'onduleur cascade en pont H à trois niveaux.

L'objectif visé est donc de déterminer les valeurs que peut prendre la tension  $V_{oa}$  pour les différents états possibles des interrupteurs, de montrer les séquences de conductions des interrupteurs.

Séquences 1 : Génération du niveau maximum

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

La tension inverse appliquée aux interrupteurs  $K_2$ ,  $K_3$  vaut :

$$V_{K3} = V_{K2} = +E.$$

Séquences 2 : Génération du niveau intermédiaire

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

### Chapitre III : les onduleurs multi-niveaux pont H en cascade et leur modélisation

La tension inverse appliquée aux interrupteurs  $K_1, K_3$  est :

$$V_{k1} = V_{K3} = +E.$$

Séquences 3 : Génération du niveau minimum

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

La tension inverse appliquée aux interrupteurs  $K_1, K_4$  est :

$$V_{K1} = V_{K4} = +E.$$

Les trois séquences de fonctionnement possibles résumé au tableau 1.

Tableau (3.1) : États possibles de l'onduleur Cascade à 3 niveaux

	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$V_{oa}$
Séquence1	1	0	0	1	+E
Séquence2	0	1	0	1	0
Séquence3	0	1	1	0	-E

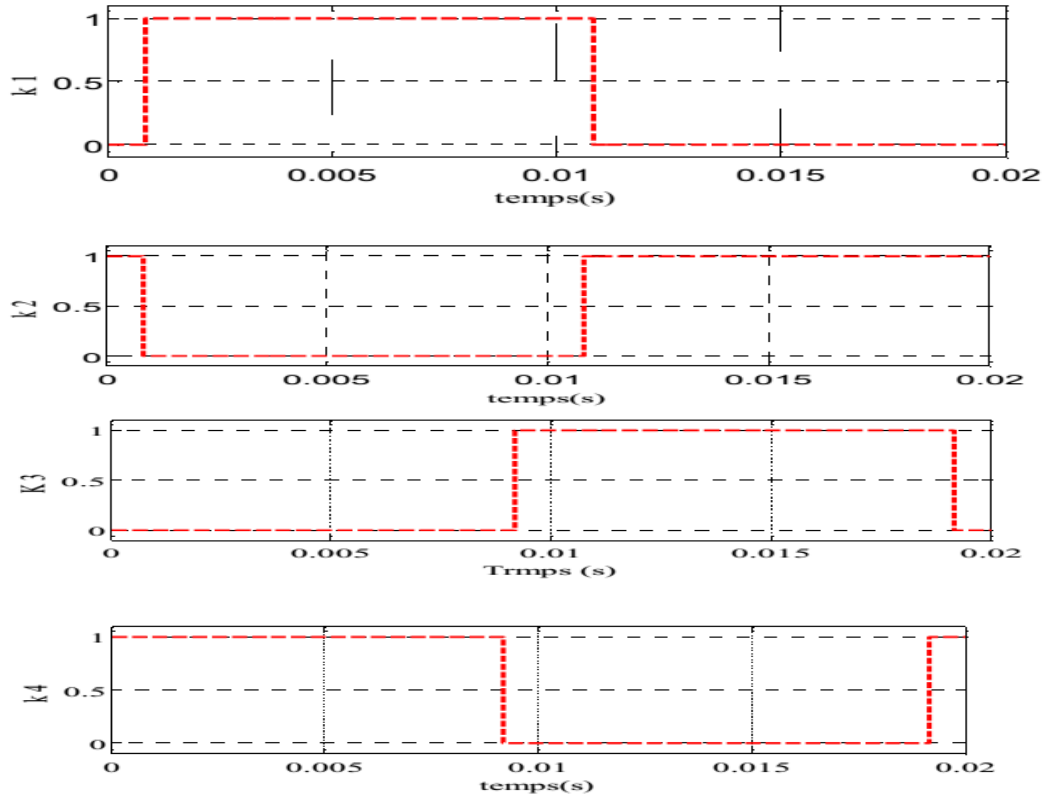


Figure (3.4) : séquence de commande d'onduleur monophasée trois niveaux ( $K_1, \dots, K_4$ ).

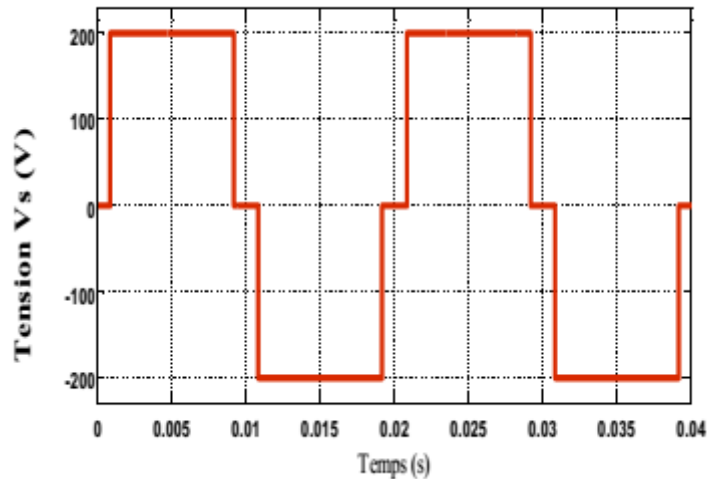


Figure (3.5) : tension de sortie 3 niveaux.

### III.3 Onduleur à cinq niveaux de type Cascade en pont H

#### III.3.1 Structure

La structure d'un convertisseur multiniveaux basée sur la mise en série d'onduleurs monophasés (ou pont en H, ou cellule partielle) est montrée sur la figure (3.6).

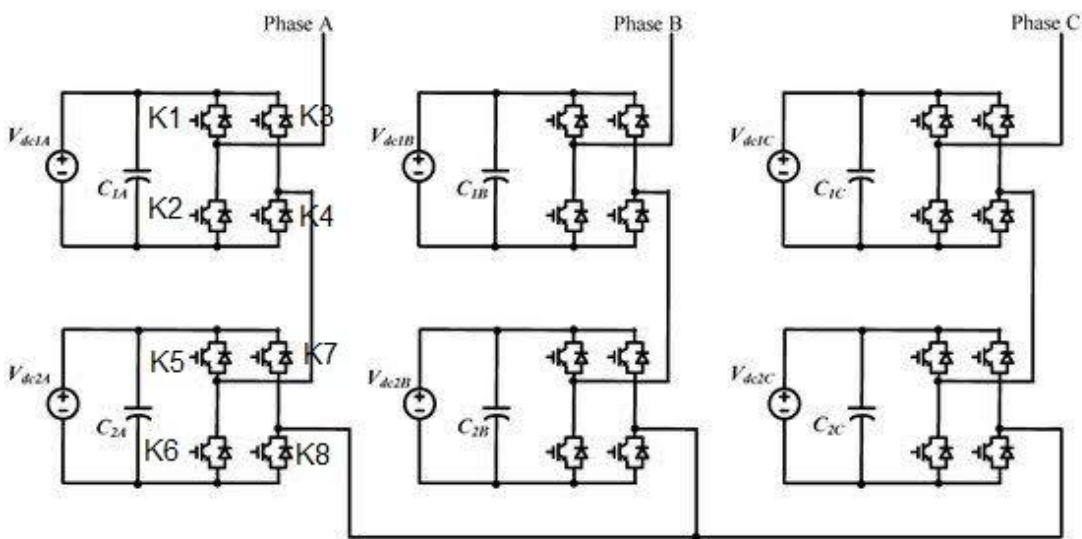


Figure (3.6) : schéma triphasé d'un onduleur cascade pont en H à 5 niveaux

#### III.3.2 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement du convertisseur cascade en pont H à cinq niveaux de tension, sera illustré par sa structure monophasée, figure (3.6). La structure d'un bras d'onduleur cinq niveaux de type cascade en pont H est l'association en cascade de deux onduleurs

### Chapitre III : les onduleurs multi-niveaux pont H en cascade et leur modélisation

classiques monophasés en pont complet. De telle sorte que la tension à la sortie de l'onduleur obtenue est la somme des tensions de sortie des deux onduleurs classiques.

Comme pour le cas NPC, nous avons les cinq séquences de fonctionnements suivantes pour le convertisseur cascade en pont H à cinq niveaux de tensions :

- Séquence 1 :  $K_1, K_4, K_5,$  et  $K_8$  sont passants et  $K_2, K_3, K_6$  et  $K_7$  sont bloqués

Dans ce cas le premier pont monophasé (celui du haut) donne une tension de sortie  $E$  et second pont monophasé (celui du bas) donne également  $E$  comme tension de sortie. D'où la tension de sortie du convertisseur en cascadié H à cinq niveaux de tensions :  $V_{oa}=E+E=2E$

Séquence 2 :  $K_1, K_4, K_5,$  et  $K_6$  sont passants et  $K_2, K_3, K_7$  et  $K_8$  sont bloqués, On a toujours  $E$  à la sortie du premier pont, mais cette fois ci 0 à la sortie du second pont. D'où la tension

$$V_{oa} = E$$

- Séquence 3 :  $K_2, K_4, K_7,$  et  $K_8$  sont passants et  $K_5, K_6, K_1$  et  $K_3$ , sont bloqués, On a alors 0 comme tension de sortie dans les deux ponts monophasés montés en cascade. Et la tension de sortie du pont en H obtenue est :  $V_{oa}= 0$

- Séquence 4 :  $K_2, K_3, K_6,$  et  $K_7$  sont passants et  $K_1, K_4, K_5,$  et  $K_8$  sont bloqués, Dans ce cas, la tension de sortie est :  $V_{oa}=-E$

- Séquence 5 :  $K_2, K_4, K_5,$  et  $K_6$  sont passants et  $K_1, K_3, K_7$  et  $K_8$ , sont bloqués, On a alors la tension de sortie  $V_{oa}= -E - E = -2E$

Les cinq états ou séquences de commutation possibles sont résumés au tableau 2.

Tableau (3.2) : États possibles de l'onduleur Cascade à 5 niveaux

K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	V <sub>oa</sub>
1	0	0	1	1	0	0	1	2E
1	0	0	1	0	1	0	1	E
0	1	0	1	0	1	0	1	0
0	1	1	0	0	1	0	1	-E
0	1	1	0	0	1	1	0	-2E

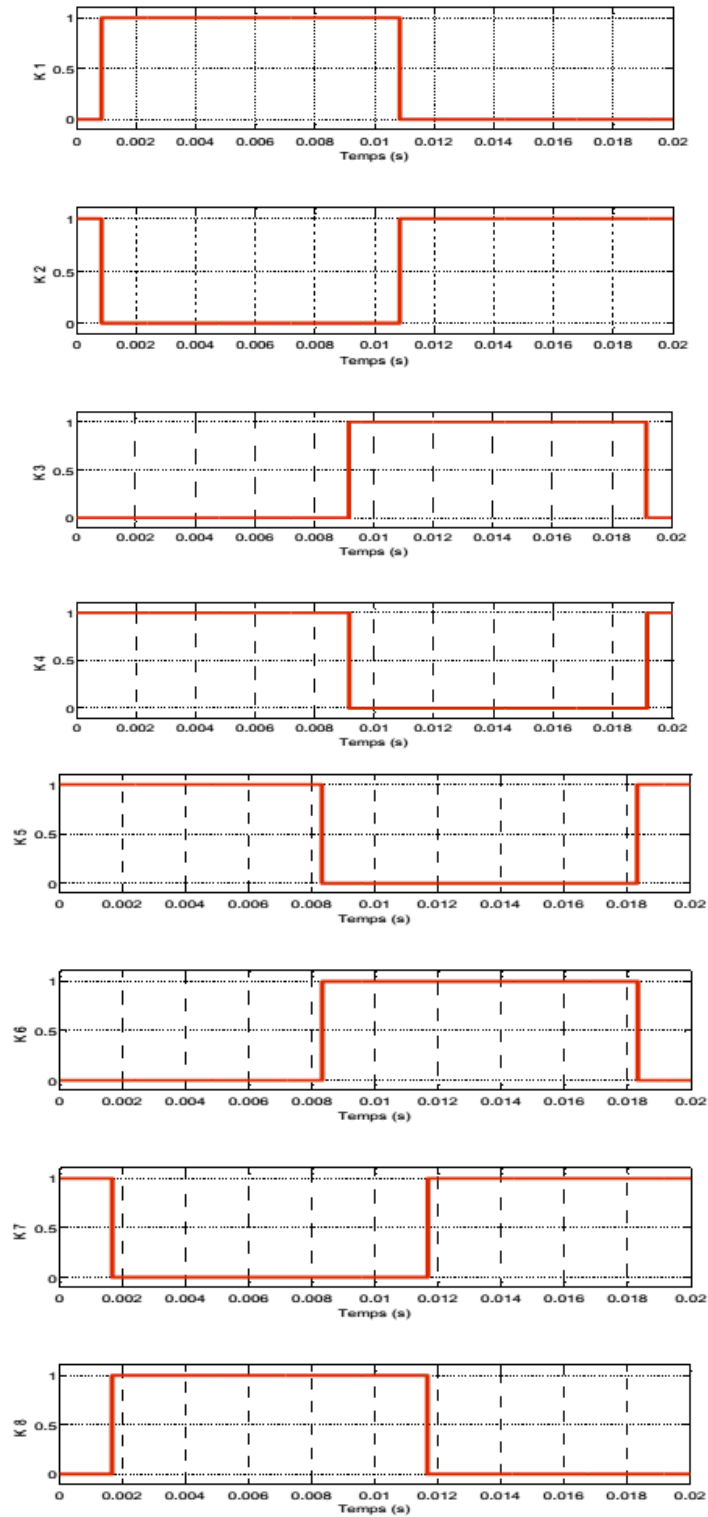


Figure (3.7) : Séquence de commande d'un onduleur cinq niveaux monophasée (K1...K8).

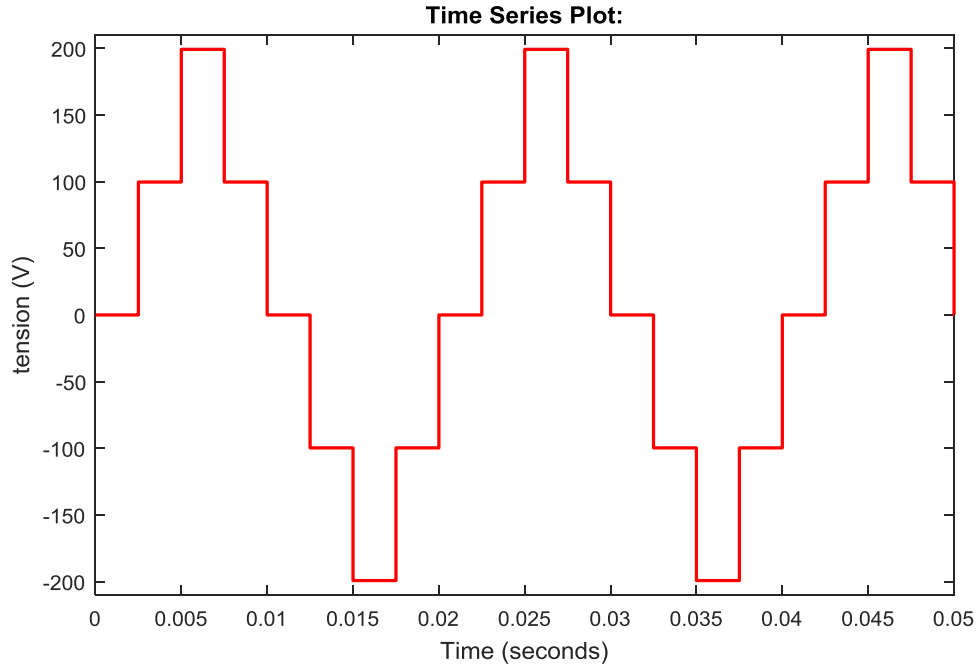


Figure (3.8) : tension de sortie 5 niveaux

### III.4 Généralisation de la structure cascade en pont H à N niveaux de tension

#### III.4.1 Structure

La structure triphasée d'un convertisseur de type cascadié à N niveaux de tension est présentée à la figure (3.9). Chaque phase du convertisseur est constituée de  $(N - 1) / 2$  étages de ponts monophasés classiques, ces ponts sont montés en cascade de telle sorte que la tension de sortie de notre onduleur cascadié en pont H est la somme des tensions de sorties de chaque pont monophasé. Aussi, par phase nous avons  $2(N - 1)$  interrupteurs Commandés  $\frac{N-1}{2}$  et sources continues.



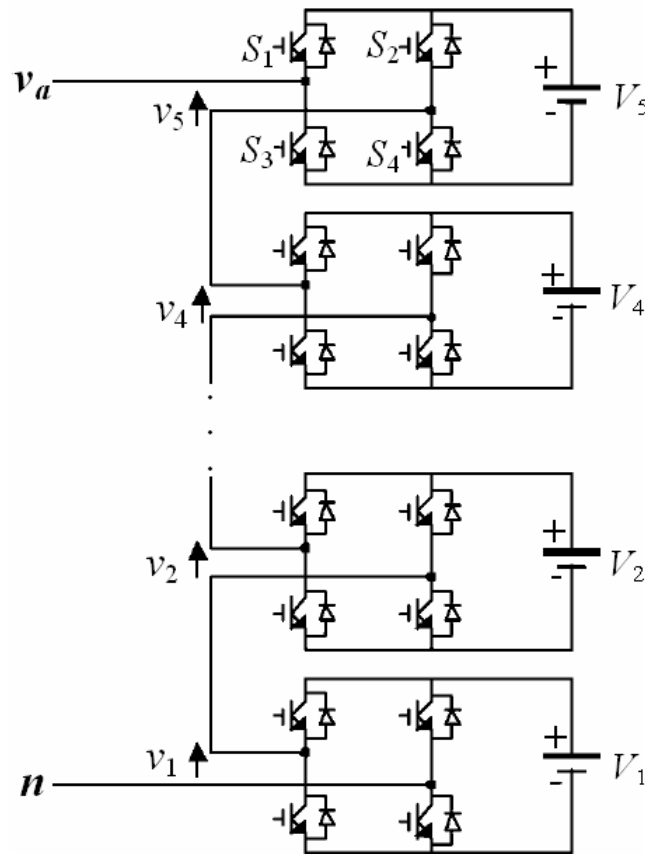


Figure (3.9) : schéma d'un onduleur pont H en cascade N niveaux

### III.4.2 Principe de fonctionnement

Dans chaque pont monophasé, nous avons deux interrupteurs commandés en complémentaire. Ainsi, le choix des interrupteurs à fermer ou à ouvrir dépendra de la valeur de la tension de sortie escomptée. Pour obtenir le niveau  $E$  de chaque étage, les interrupteurs  $K_1$  et  $K_4$  doivent être fermés et les interrupteurs  $K_2$  et  $K_3$  ouverts. Ce qui donnera à la sortie du convertisseur cascadié en H une tension de  $\frac{N-1}{2} E$ . Pour le niveau  $-E$  de chaque étage  $K_1$  et  $K_4$  sont ouverts et  $K_2$  et  $K_3$  sont fermés. Pour le niveau  $0$  de chaque étage, on ferme deux interrupteurs voisins de bras différent (par exemple  $K_2$  et  $K_3$ ) et les deux autres restent ouverts.

Et pour les  $N$  niveaux de tensions du convertisseur cascadié en pont H, nous combinerons différents états de la tension de sortie de chaque étage. Le premier niveau de tension correspond à  $V_{oa} = \frac{N-1}{2} E$  et le dernier niveau sera  $V_{oa} = -\frac{N-1}{2} E$

### III.5 Stratégies de commande

#### III.5.1 Modulation sinusoidale classique mono porteuse

La technique de modulation de largeur d'impulsions (MLI ; en anglais : Pulse Width Modulation, soit PWM), est la stratégie de modulation la plus utilisée dans les onduleurs multiniveaux dite à modulation sinusoidale. Elle consiste à comparer d'une onde de référence ou modulante, généralement sinusoidale à une porteuse généralement triangulaire. Le signal de sortie change d'état à chaque intersection de la modulante et de la porteuse. [22]

La figure ci-dessous illustre le principe de base de cette technique.

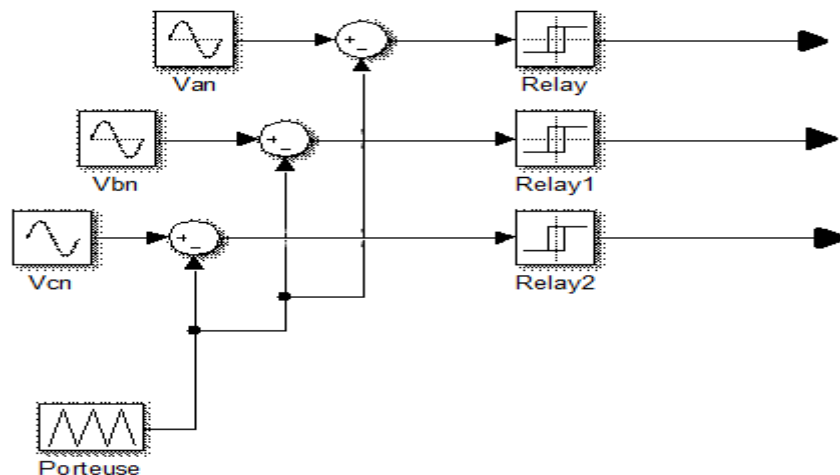


Figure (3.10) : Schéma de principe de la technique triangulo-sinusoidale [22]

Les caractéristiques de la modulation sinusoidale sont :

- ✓ L'indice de modulation  $m$  égal au rapport de la fréquence  $f_c$  de la porteuse à la fréquence  $f_m$  de la référence :  $m = f_c/f_m$
- ✓ Le coefficient de réglage  $r$  égale au rapport de l'amplitude  $A_m$  de la référence à l'amplitude crête  $A_c$  de la porteuse :  $r = A_m/A_c$
- ✓ Le facteur d'évaluation des performances de la MLI, le facteur de distorsion totale des harmoniques de la tension de sortie THD, définit 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 [23]:

$$TDH = \frac{(\sum_{i=2}^n V_i^2)^{1/2}}{(\sum_{i=1}^n V_i^2)^{1/2}}$$

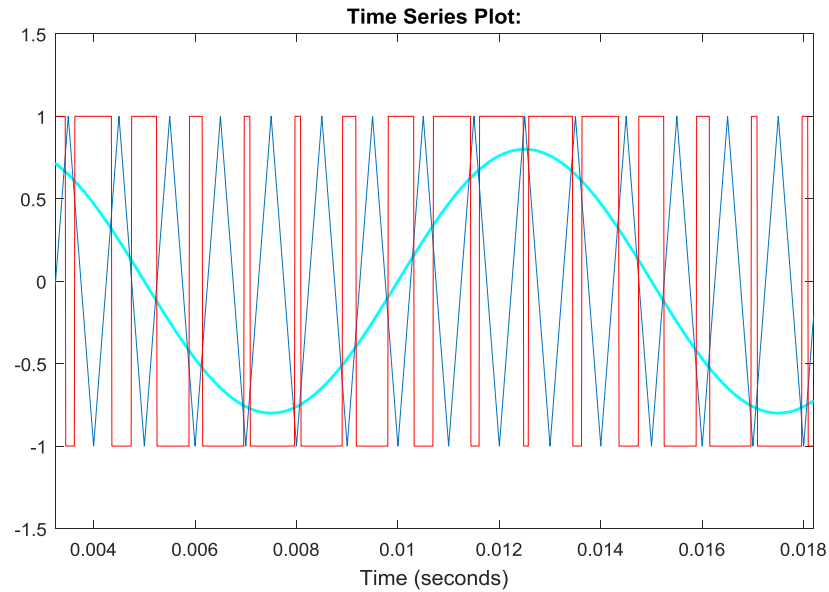


Figure (3.11) : principe de la modulation MLI sinusoïdale

### III.5.2 Modulation sinusoïdale à doubles triangles

Cette stratégie est basée, dans son principe sur la modulation sinusoïdale naturelle. Pour un onduleur à trois niveaux, elle recommande l'utilisation de deux signaux triangulaires de même fréquence  $f_c$  et de même amplitude  $A_c$ . Ces signaux triangulaires sont comparés, pour chaque phase avec un signal de référence d'amplitude  $A_m$  et de fréquence  $f_m$ . C'est la modulation sinusoïdale à double triangle.

Pour les onduleurs multi-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 c'est la modulation sinusoïdale à triangles multiples qui le permet. Cette technique nécessite  $(n-1)$  signaux triangulaires de même fréquence  $f_c$  et de même amplitude  $A_c$ , [24]. La figure (3.12) représente le principe de la modulation sinusoïdale à double triangle. Deux porteuses sont utilisées, avec trois signaux de référence, pour générer commande de chaque phase. [14]

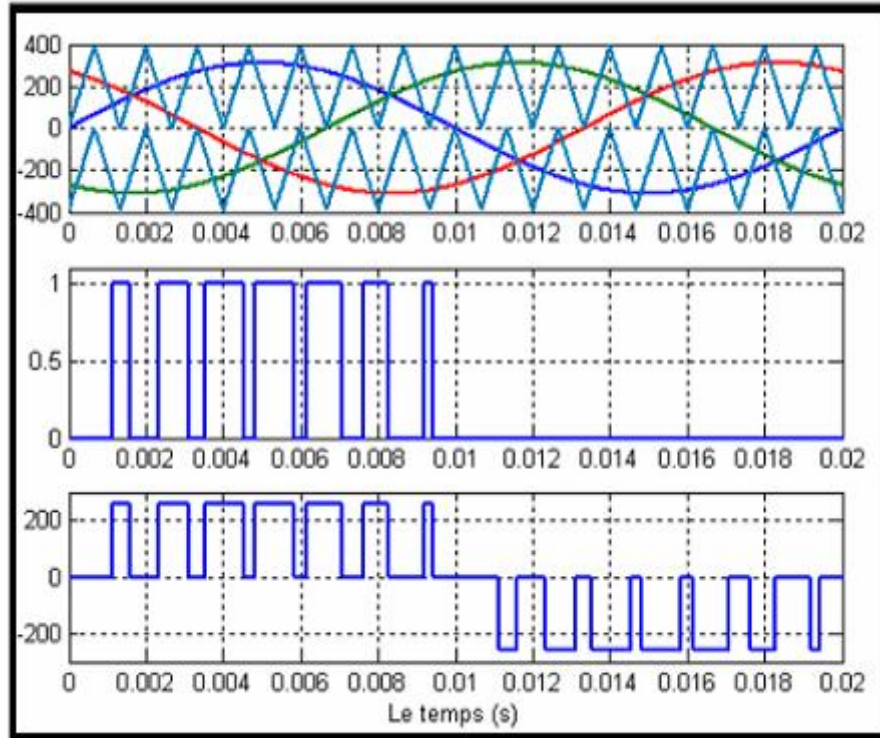


Figure (3.12) : principe de la modulation MLI à double triangles

### III.5.3 La modulation par hystérésis (commande en fourchette)

La commande par hystérésis, connue aussi sous le nom de commande en fourchette, est une commande non linéaire qui utilise l'erreur qui existe entre le courant de référence et le courant de sortie de l'onduleur, et cette erreur est comparée à un modèle appelé plage d'hystérésis. L'approche la plus simple utilisée pour cette fin, est la stratégie de contrôle qui réalise la comparaison entre le courant de phase mesuré et le courant de référence, à l'aide d'un comparateur à hystérésis. Celui-ci produit des impulsions de démarrage et de blocage des interrupteurs de l'onduleur, de manière à limiter le courant de phase dans une plage d'hystérésis autour du courant de référence. La figure (3.13) donne le schéma de principe de cette commande [25].

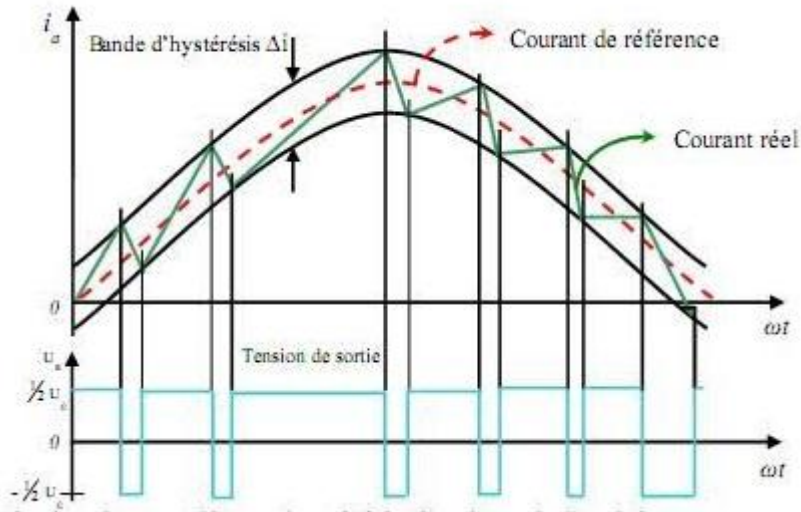


Figure (3.13) : Principe de la commande en fourchette [25]

Si le courant mesuré  $i$  est inférieur à la référence  $i_{ref}$  augmentée de la plage  $F$  (connue aussi sous le nom de demi-largeur de bande), la tension de sortie est forcée à sa valeur maximale pour que le courant croisse le plus vite possible et s'il est supérieur à cette même référence diminuée de la fourchette, alors la tension de sortie est forcée à sa valeur minimale pour que le courant décroisse le plus vite possible. La figure (3.14) présente le schéma fonctionnel d'une commande par hystérésis [26].

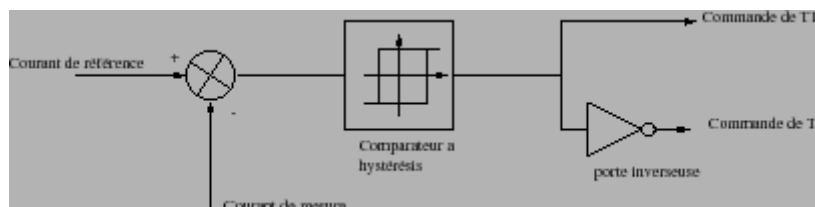


Figure (3.14) : Schéma fonctionnel d'une commande par hystérésis (en fourchette) [26]

### III.5.4 La modulation vectorielle

La modulation vectorielle, dite "Space Vector PWM", 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.

Cette technique de MLI suit les principes suivants :

- ✓ Le signal de référence est échantillonné à intervalles réguliers  $T$  (MLI régulière),
- ✓ 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 [27].

### Chapitre III : les onduleurs multi-niveaux pont H en cascade et leur modélisation

Le vecteur PWM traite directement les signaux au niveau biphasé de la transformation Concordia. Il traite donc des signaux triphasés dans leur ensemble. L'onduleur triphasé à trois niveaux de tension ayant trois bras et trois configurations, donc, il possède  $3^3=27$  modes de commutations possibles. Il peut donc générer 27 vecteurs différents de tension de sortie ( $V_{an}$ ,  $V_{bn}$  et  $V_{cn}$ ).

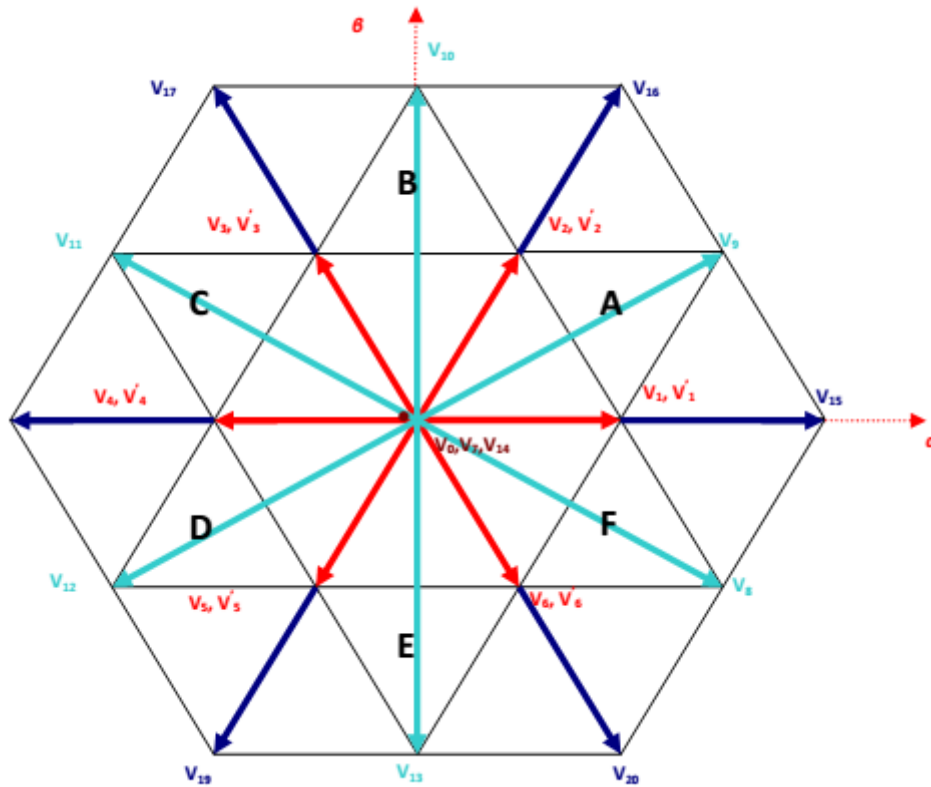


Figure (3.15) : Représentation dans le plan ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) des vecteurs de tension de l'onduleur à trois niveaux de tension [27]

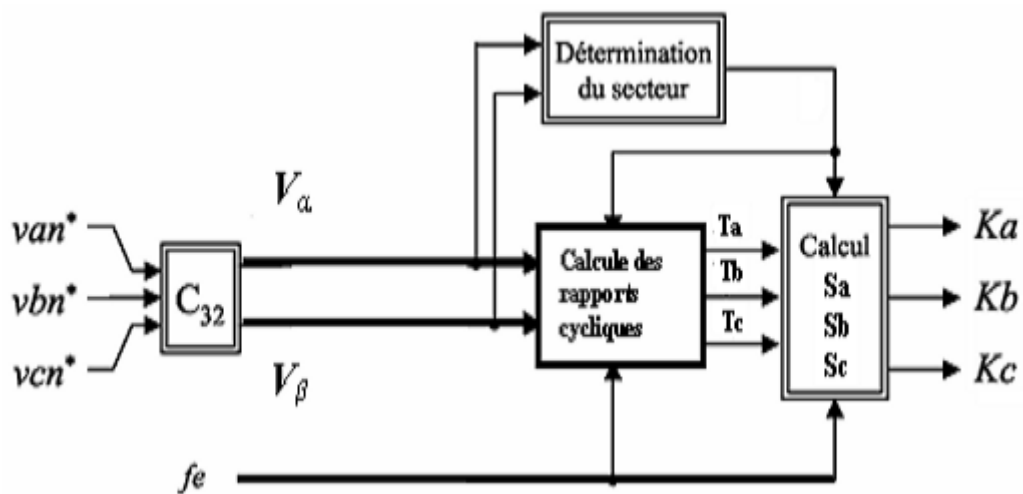


Figure (3.16) : Le schéma de principe de la M.L.I Vectorielle [27]

### III.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous étudions l'onduleur pont en H en cascade trois, cinq et N niveaux avec leurs structures et leurs principes de fonctionnement.

Nous avons aussi présenté, les différentes stratégies de commande de l'onduleur, MLI sinusoïdale, hystérésis ainsi que la M.L.I vectorielle.

La commande par hystérésis est très simple et très rapides mais sa fréquence instantanée des commutations n'est pas contrôlable.

La M.L.I vectorielle génère les signaux d'impulsions simultanément avec la rotation du vecteur de référence, par contre la M.L.I sinusoïdale demande de déterminer les instants de commutations des interrupteurs de chaque bras de l'onduleur séparément.

Dans le prochain chapitre on va traiter la modulation MLI sinusoïdale de l'onduleur trois, cinq et sept niveaux de type pont H en cascade et on conclues par des résultats de simulations auxquels nous avons abouti.

# **Chapitre IV**





## Chapitre IV : simulations et résultats

### IV.1 Introduction

MATLAB est un logiciel destiné principalement au calcul scientifique, à la modélisation et à la simulation. Le noyau de calcul est associé à l'environnement SIMULINK, permettant une modélisation basée sur des schémas-blocs.

Des bibliothèques spécialisées sont disponibles (les "Toolboxes") pour la plupart des domaines scientifiques nécessitant des moyens importants : automatique, traitement de signal, mathématiques appliquées, télécommunications, etc.

Dans ce chapitre, on va traiter la modulation MLI sinusoïdale de l'onduleur trois, cinq et sept niveaux de type pont H en cascade et on conclues par des résultats de simulations auxquels nous avons abouti.

### IV.2 Onduleur monophasé trois niveaux

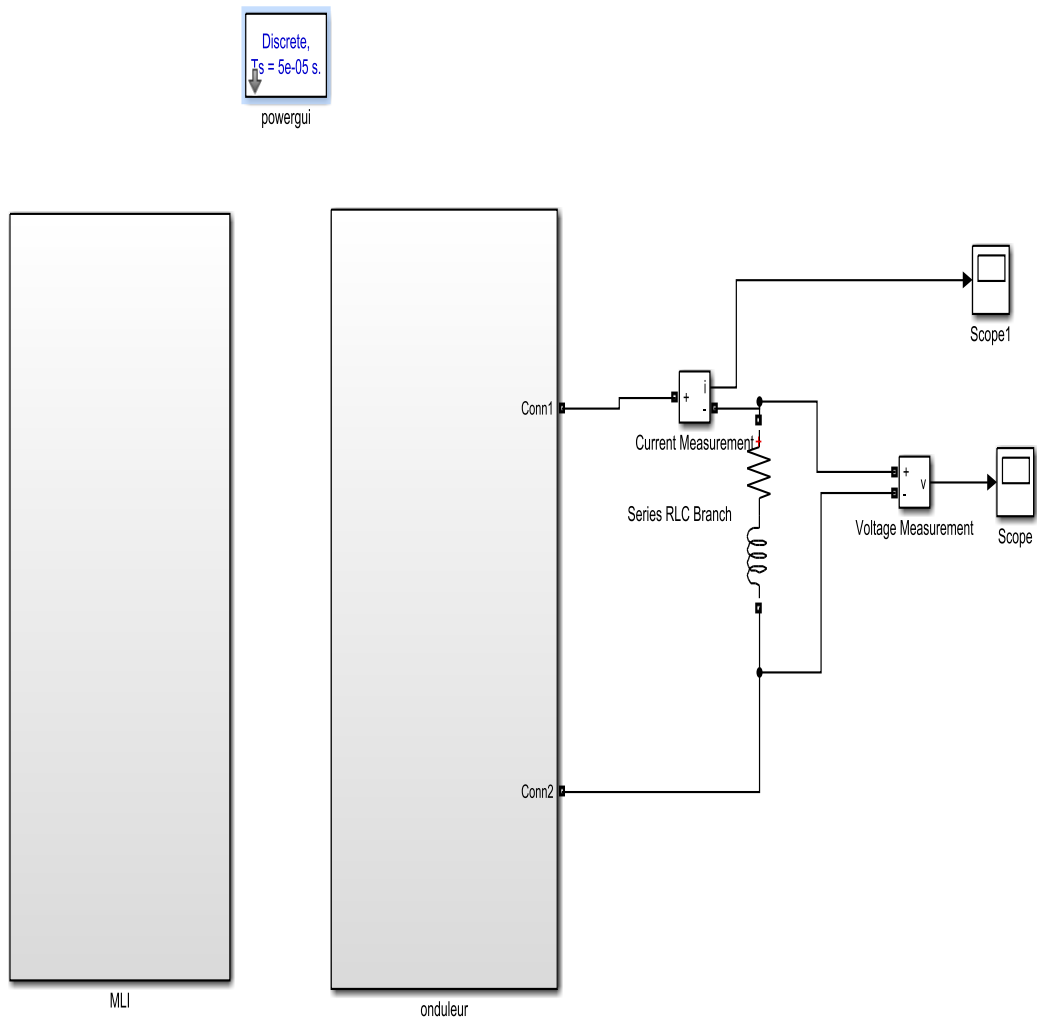


Figure (4.1) : Schéma bloc d'un onduleur monophasée trois niveaux.

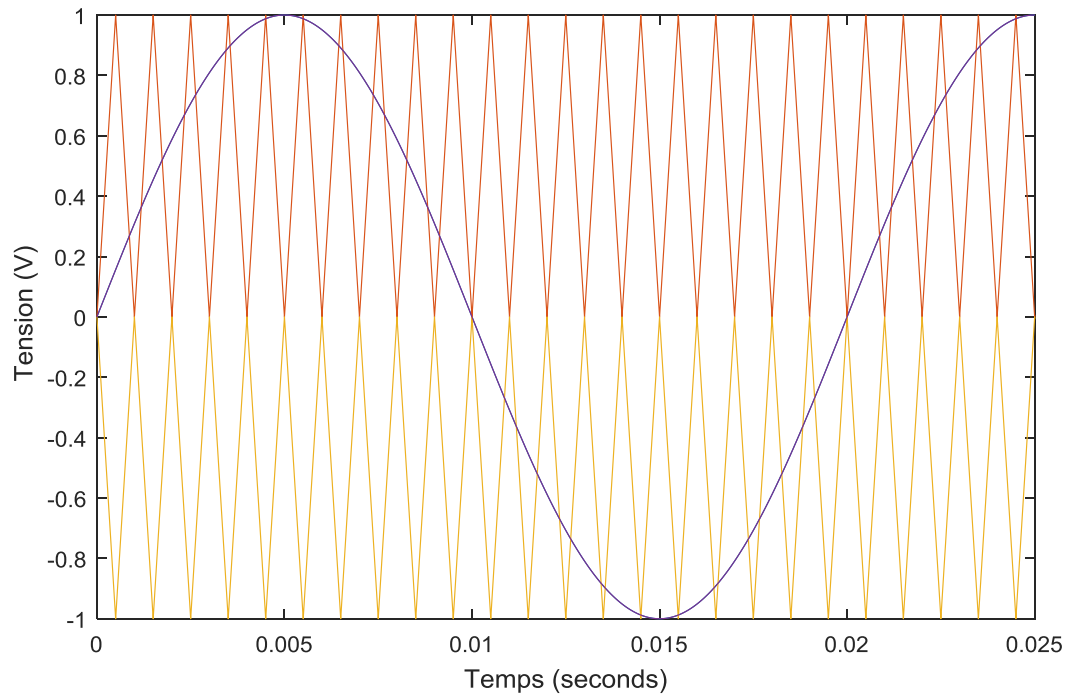


Figure (4.2) : Principe MLI double porteuse pour onduleur monophasée trois niveaux

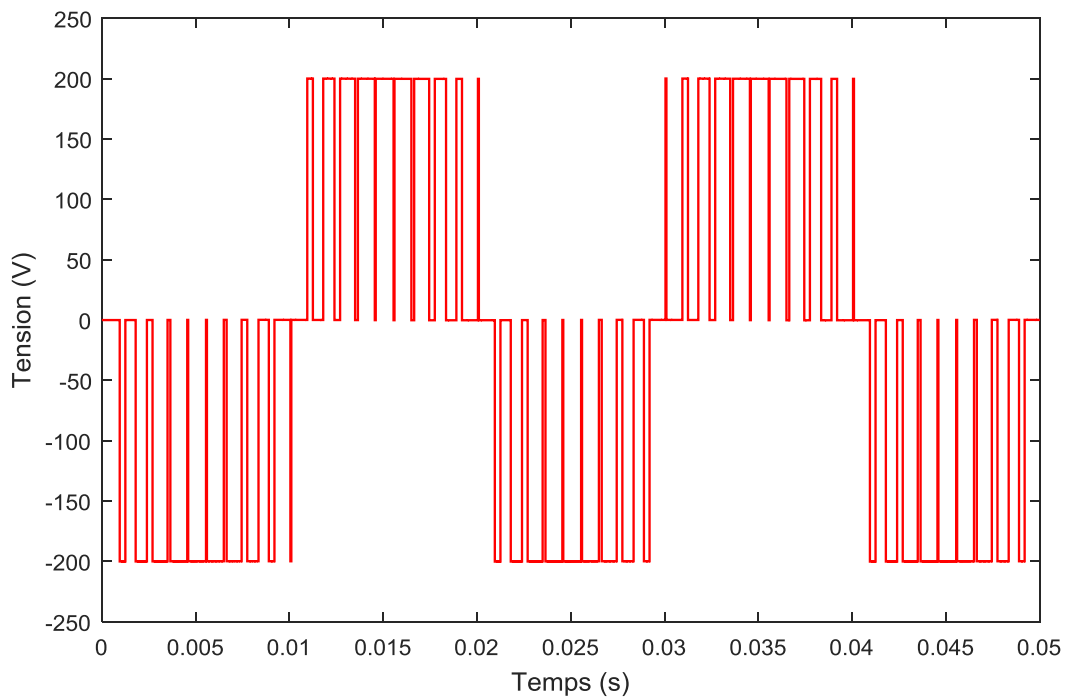


Figure (4.3) : Allure de tension  $V_s$ .

## Chapitre IV : simulations et résultats

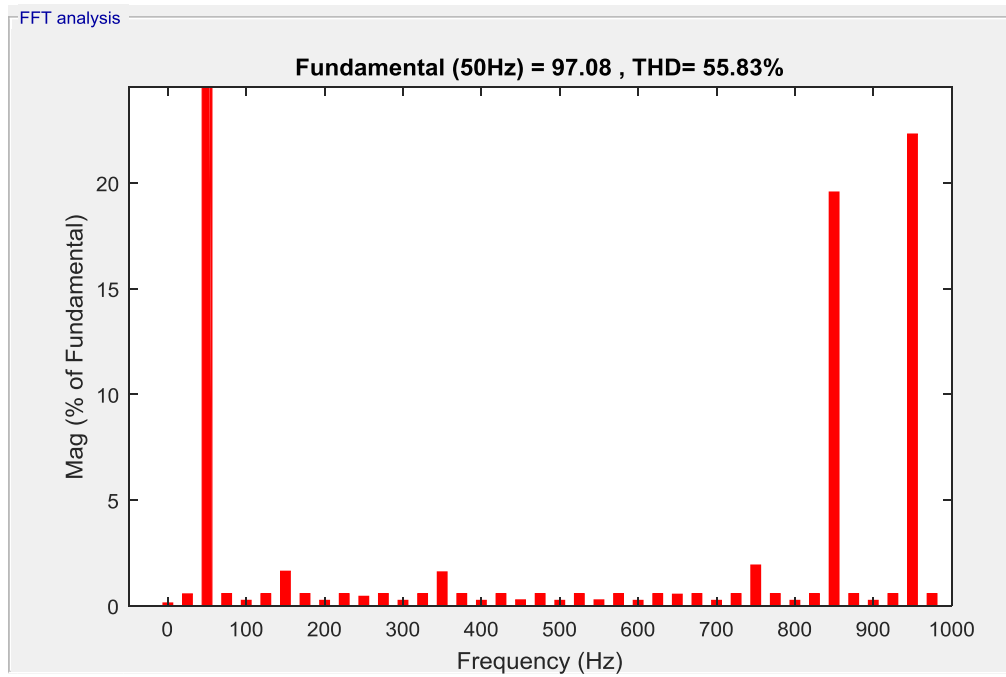


Figure (4.4) : Spectre d'harmonique de tension Vs.

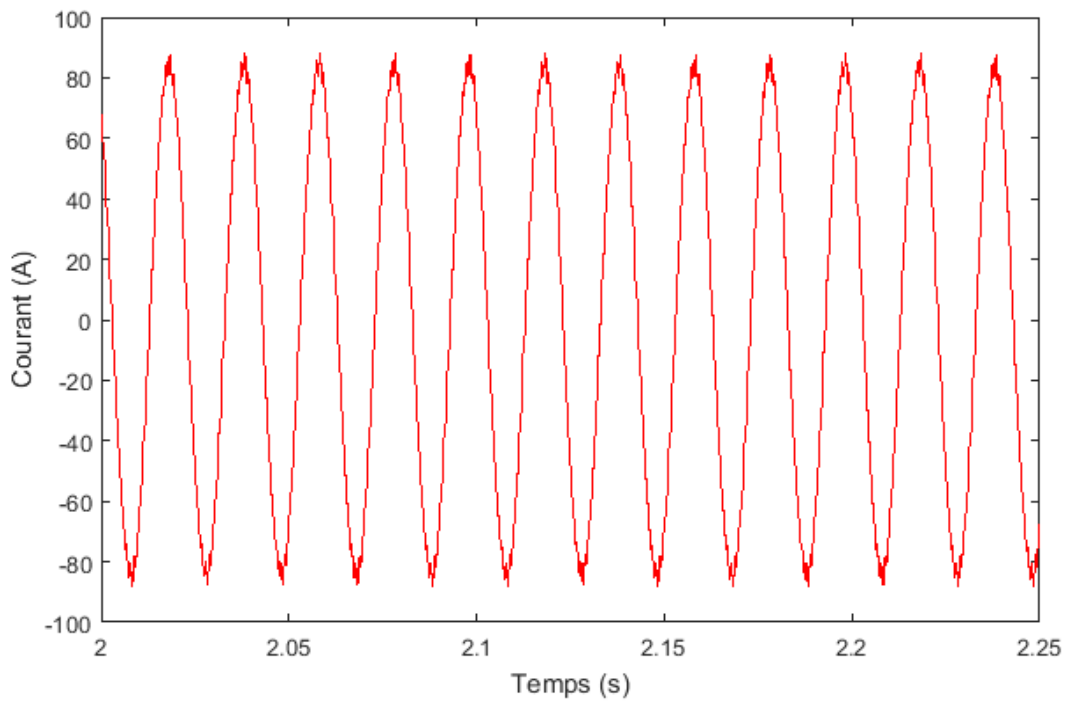


Figure (4.5) : Allure de courant Is.

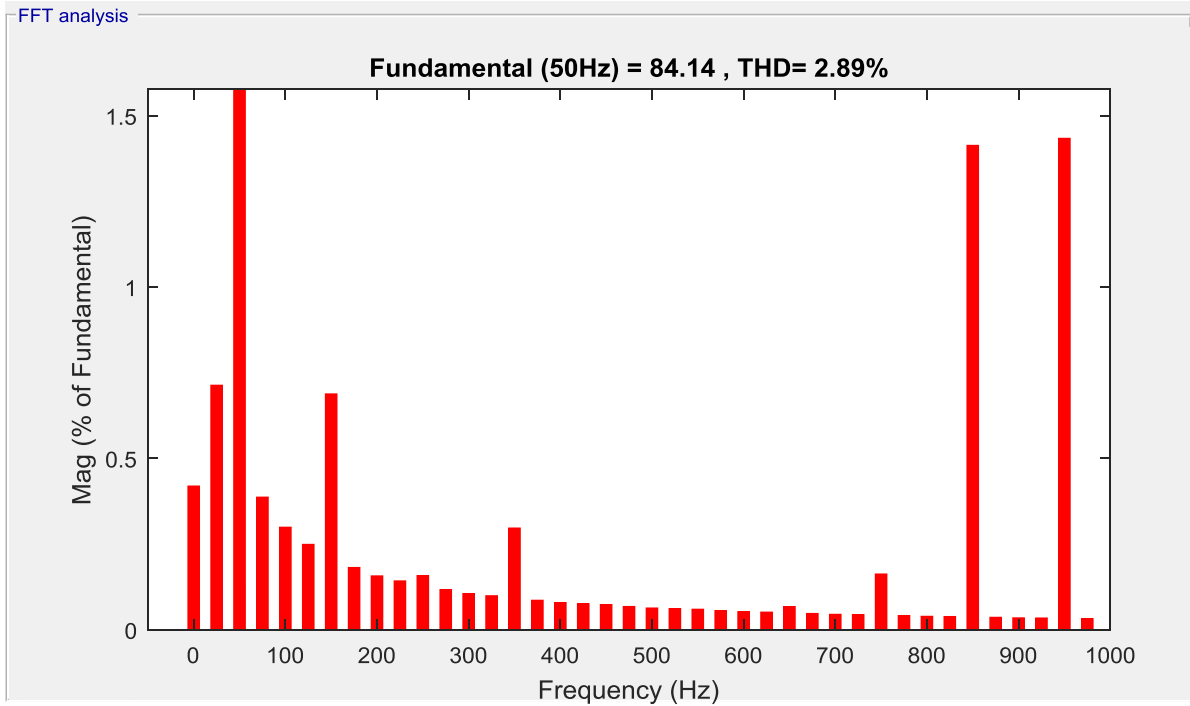


Figure (4.6) : Spectre d'harmonique de courant  $I_s$ .

## IV.3 Onduleur triphasé trois niveaux

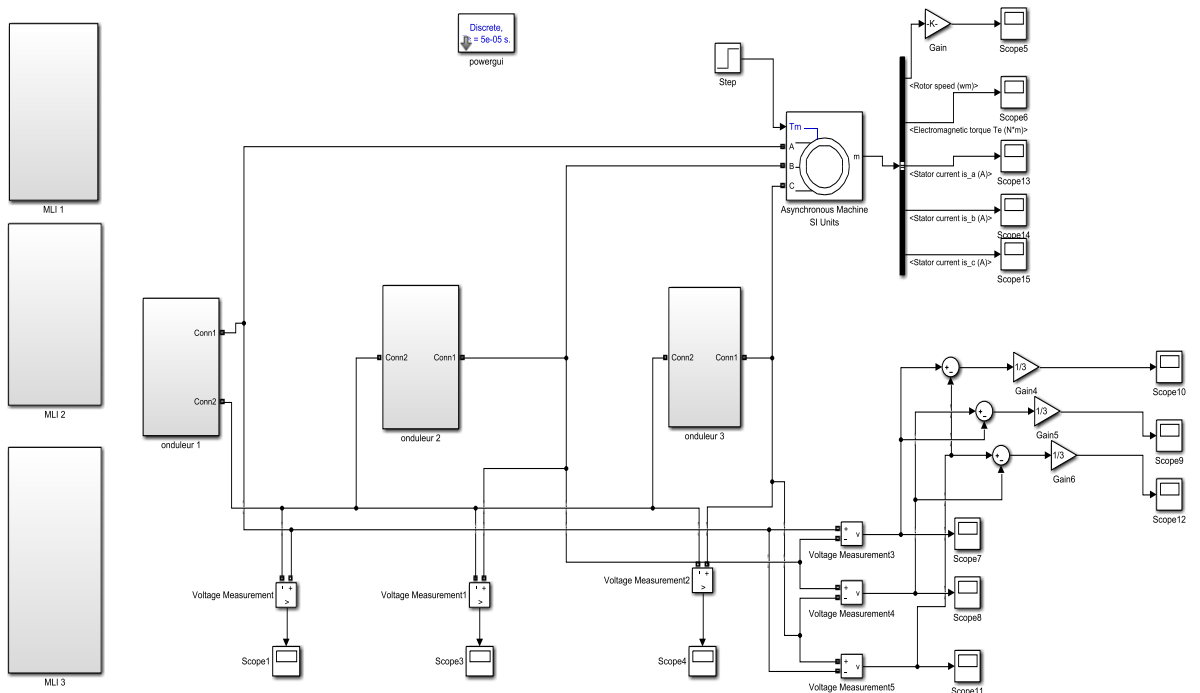


Figure (4.7) : Schéma bloc d'un onduleur triphasé trois niveaux.

## Chapitre IV : simulations et résultats

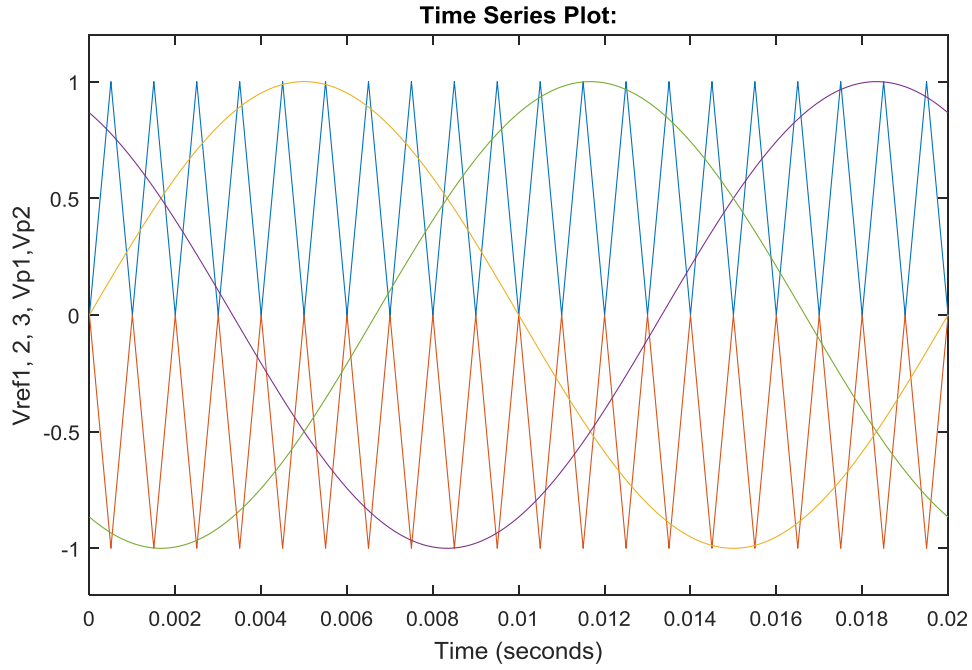


Figure (4.8) : Principe de la MLI double porteuse pour onduleur triphasée trois niveaux.

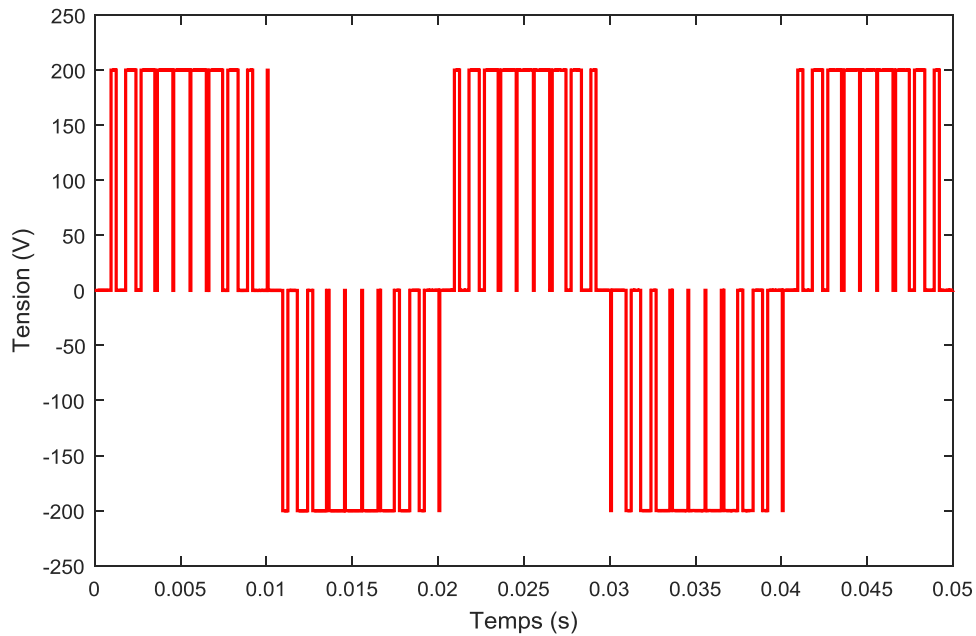


Figure (4.9) : Allure de la tension simple  $V_{ao}$ .

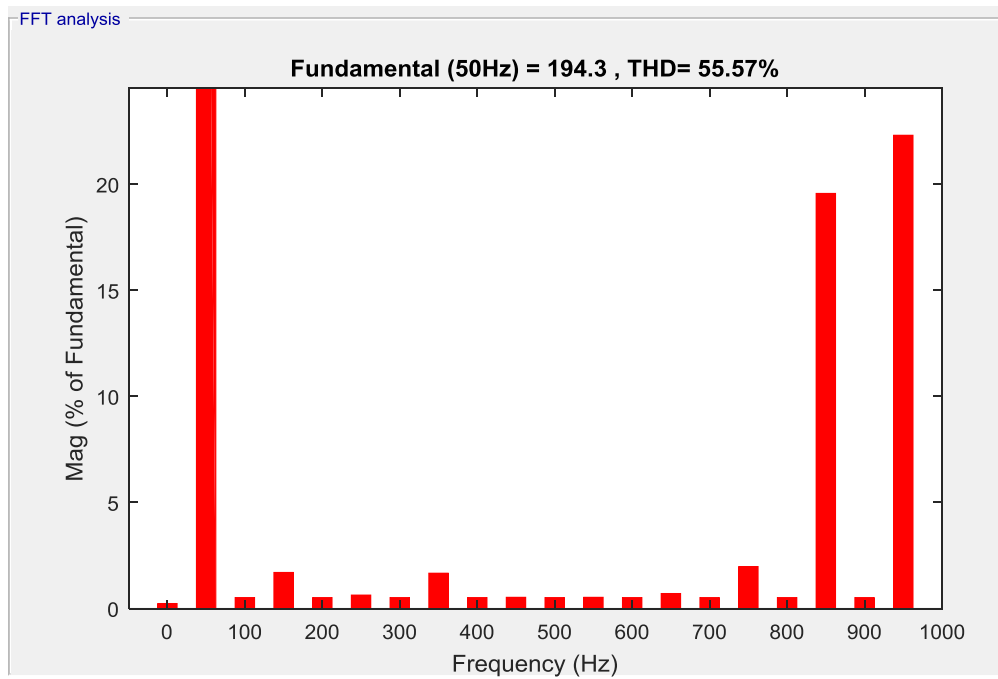


Figure (4.10) : Spectre d'harmonique de tension Vao.

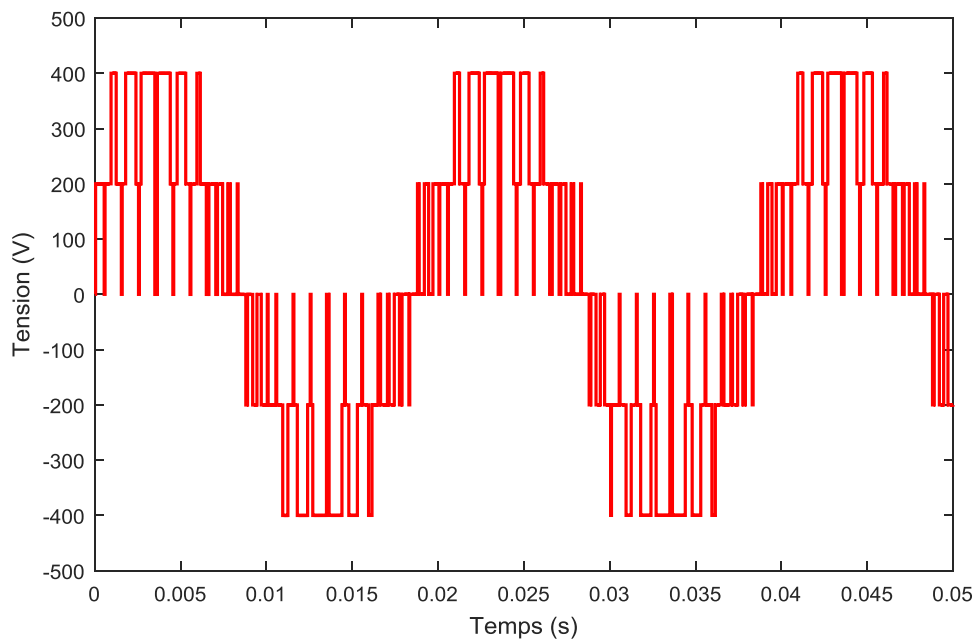


Figure (4.11) : Allure de tension Composée Vab.

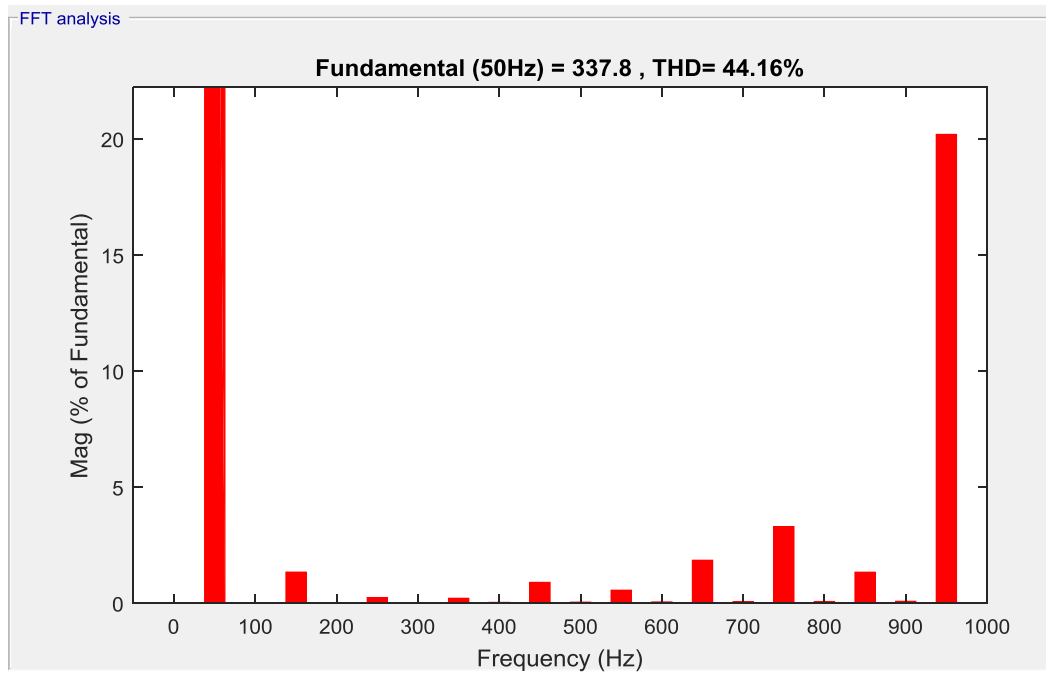


Figure (4.12) : Spectre d'harmonique de tension Vab.

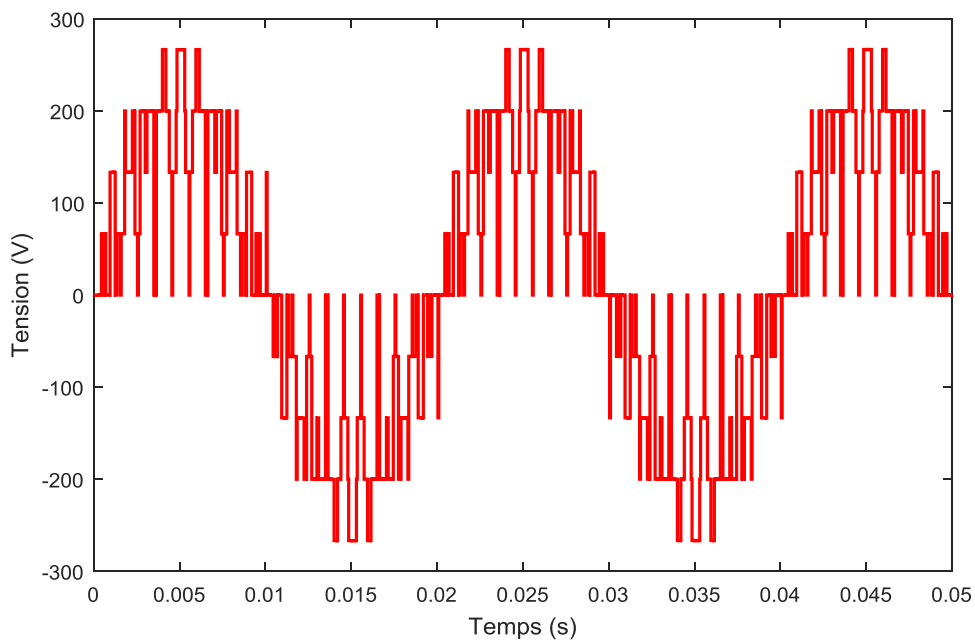


Figure (4.13) : Allure de tension de phase Van.



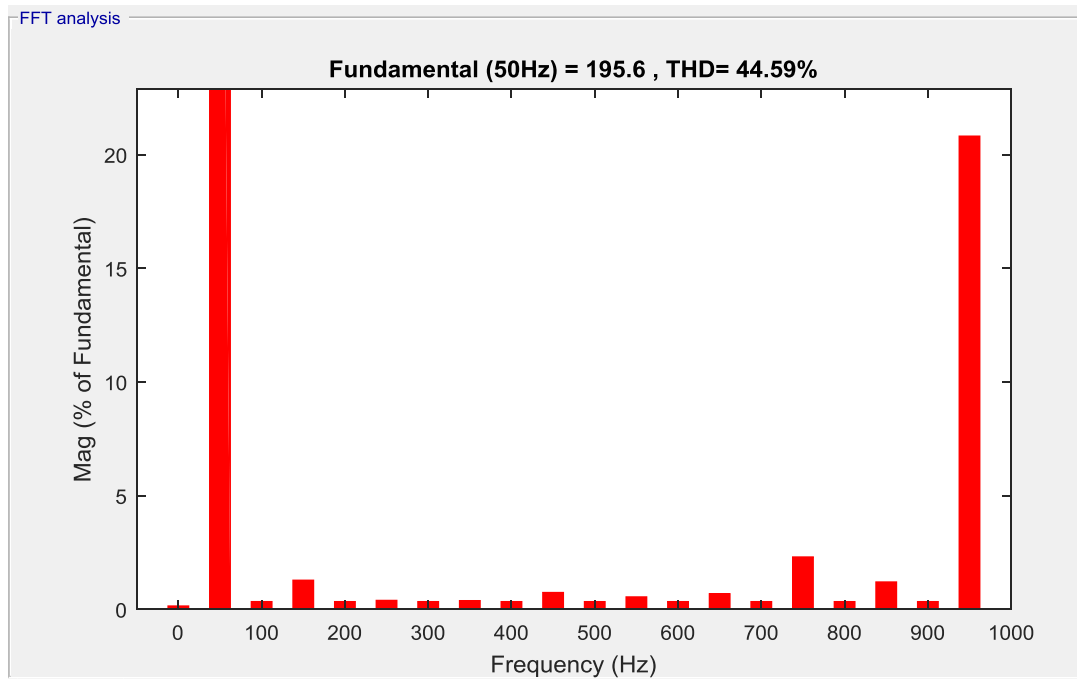


Figure (4.14) : Spectre d'harmonique de tension Van.

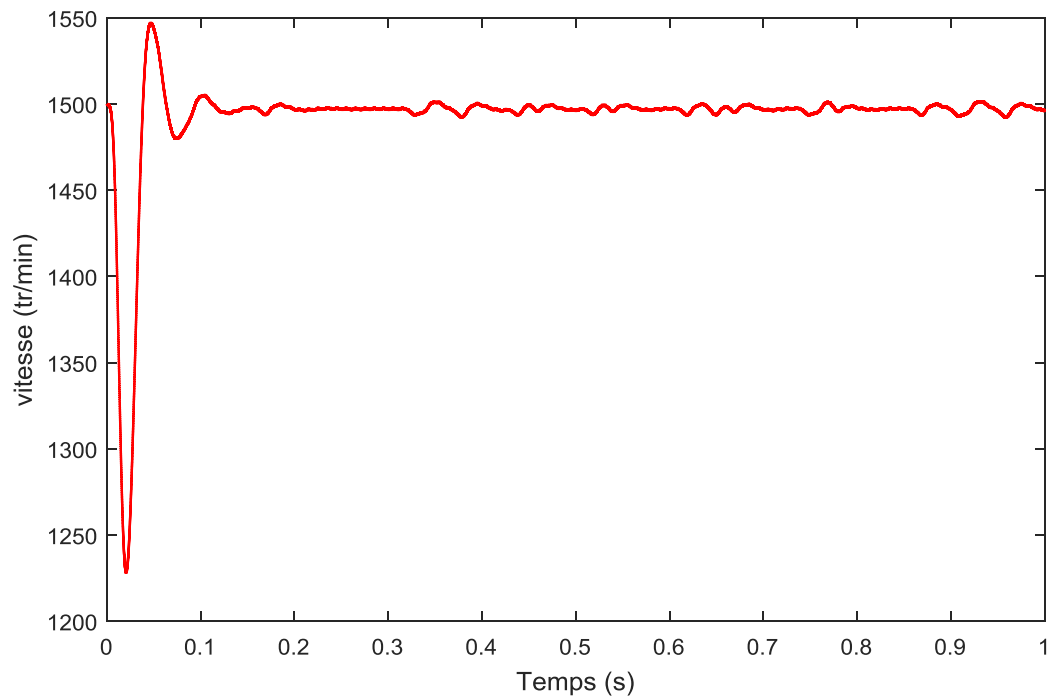


Figure (4.15) : Allure de vitesse (tr/min).

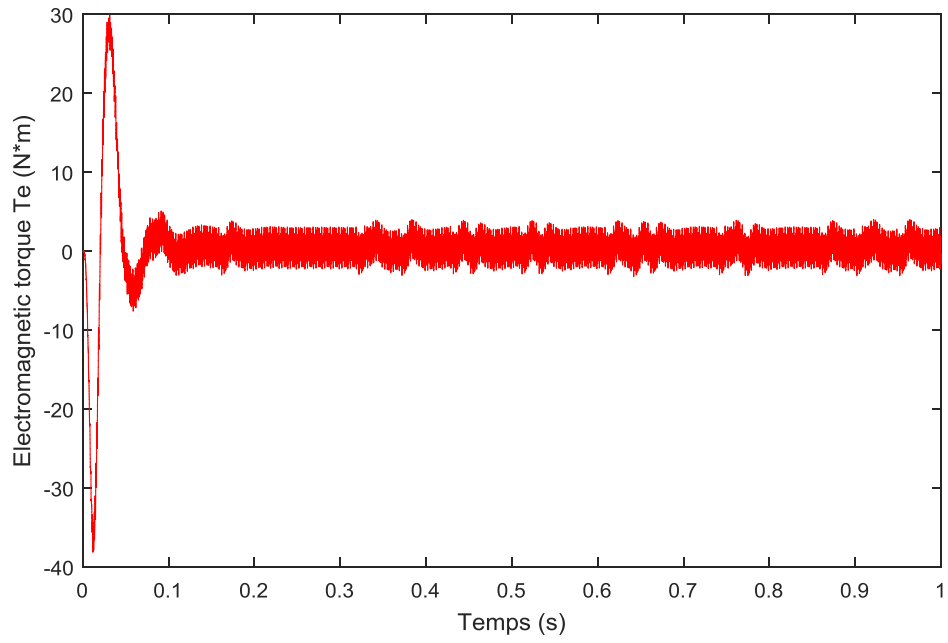


Figure (4.16) : Allure de couple  $C_e$ .

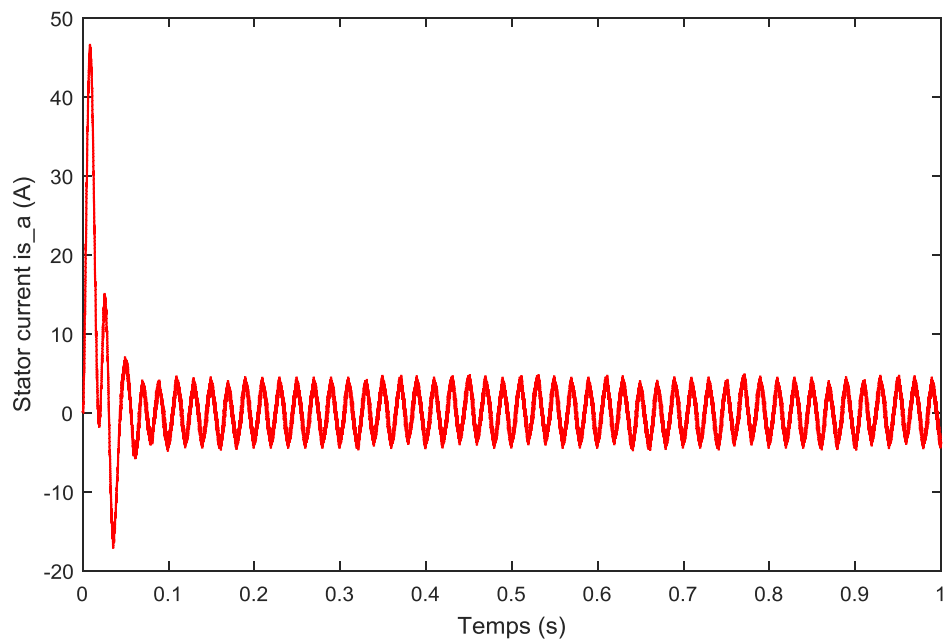
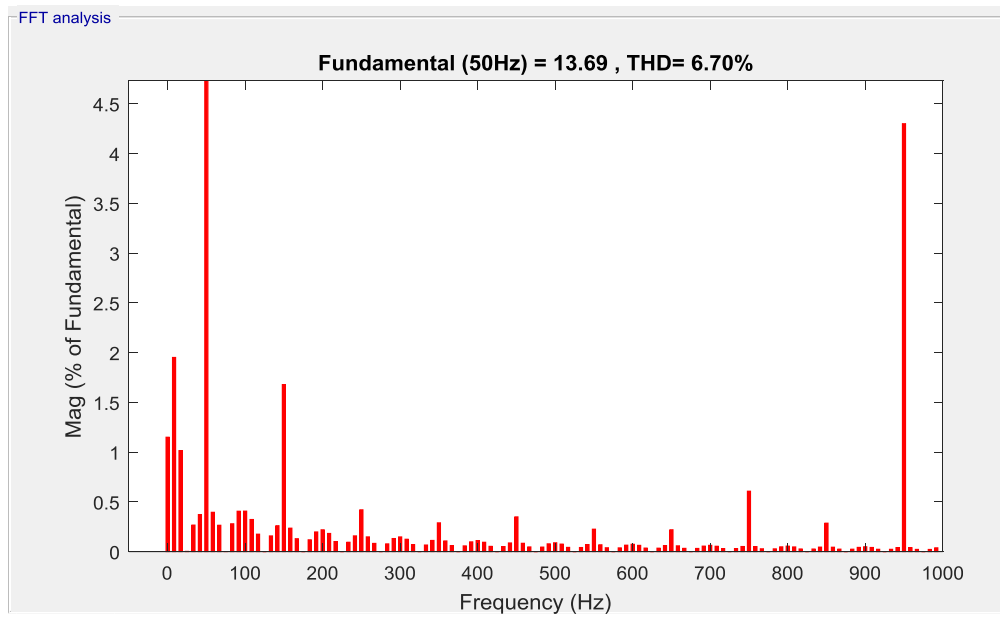
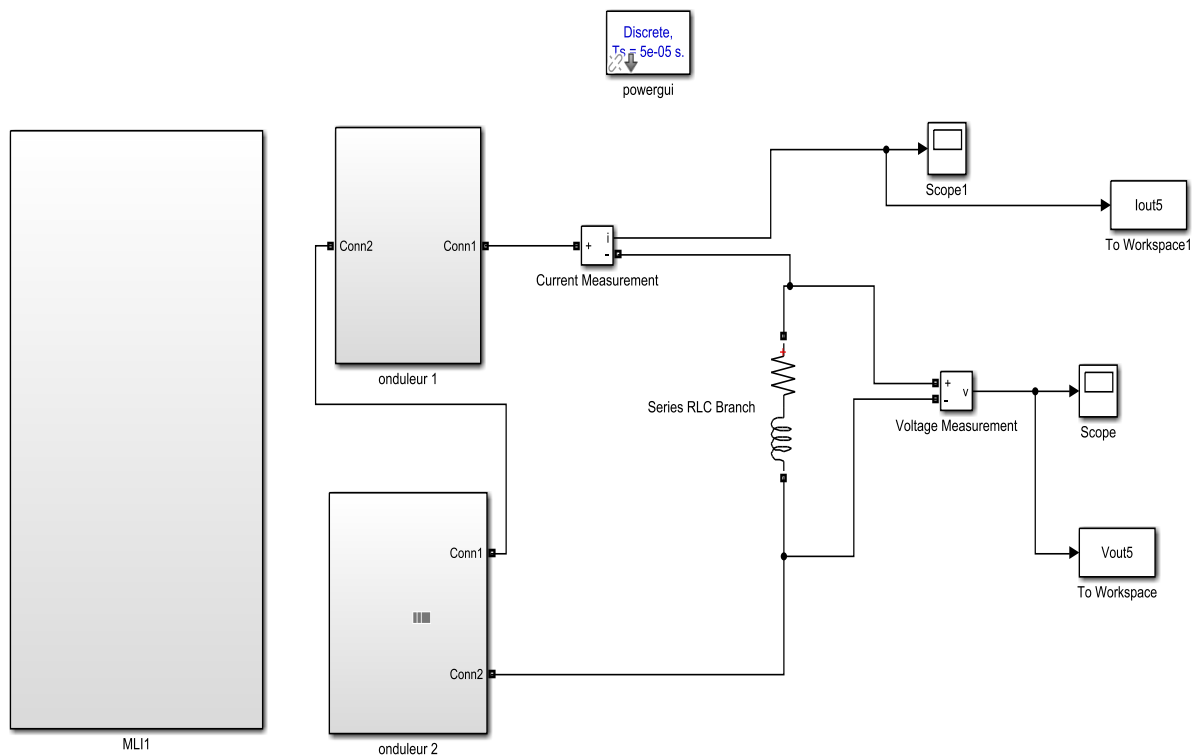


Figure (4.17) : Allure de courant statorique  $I_{sa}$ .



## IV.4 Onduleur monophasé cinq niveaux



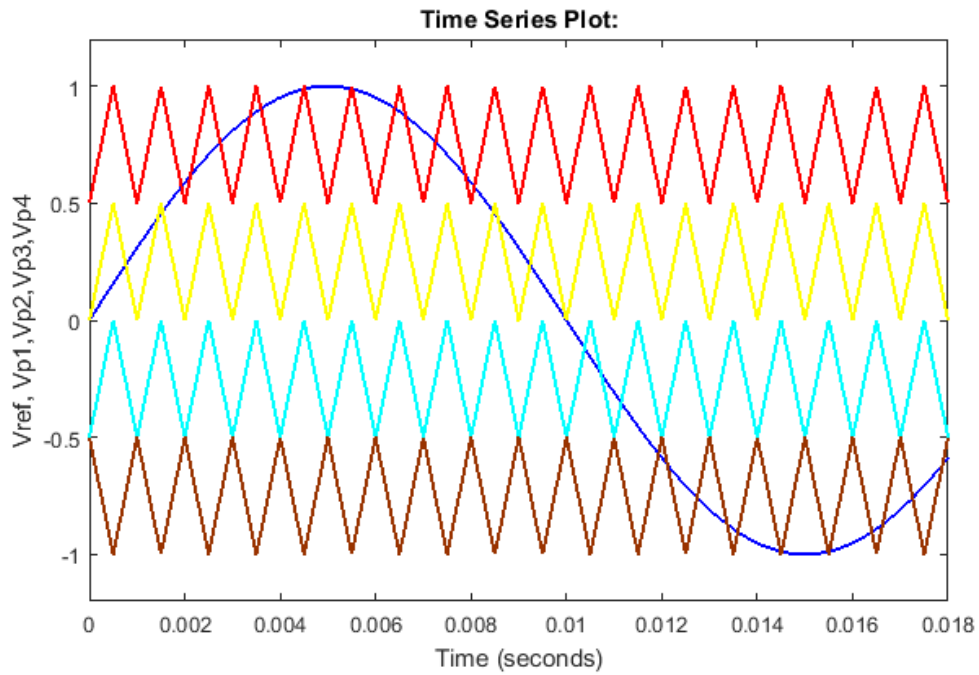


Figure (4.20) : Principe de le MLI a double porteuse pour onduleur monophasé cinq niveaux.

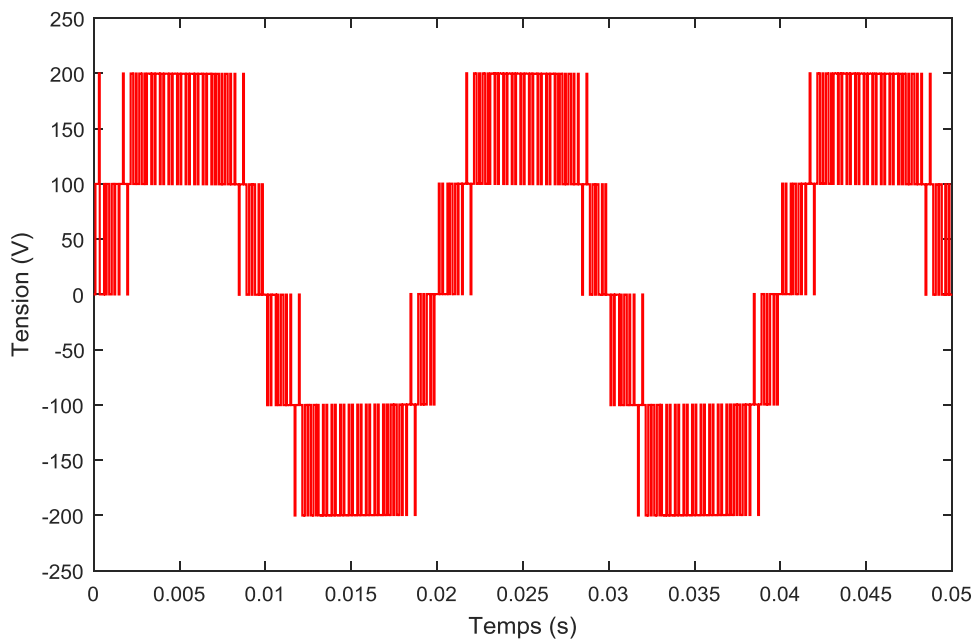


Figure (4.21) : Allure de tension simple  $V_s$ .

## Chapitre IV : simulations et résultats

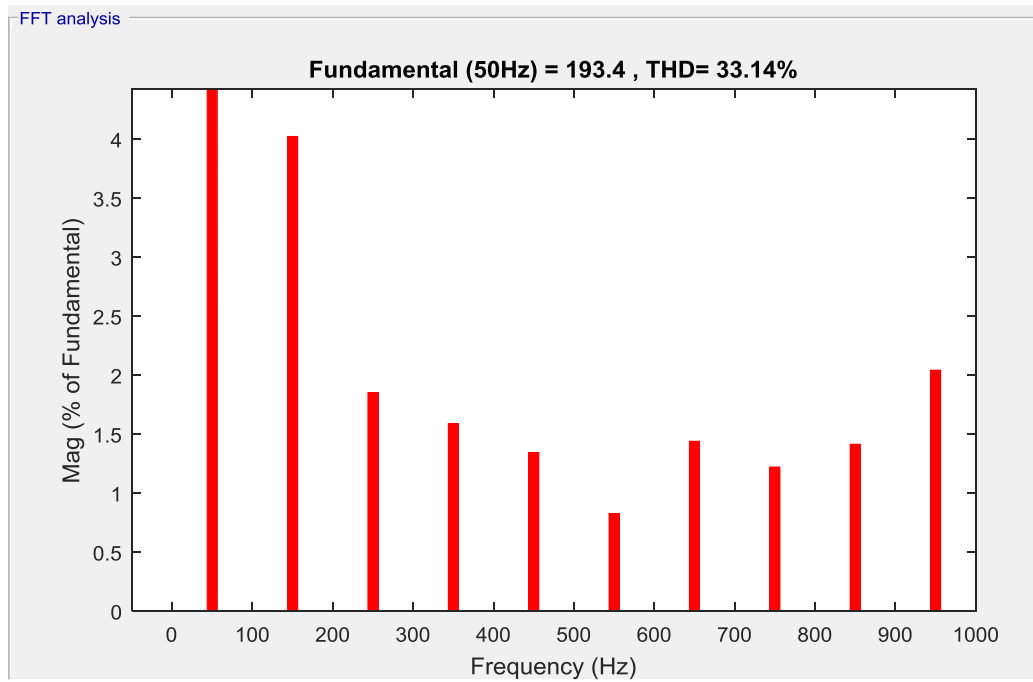


Figure (4.22) : Spectre d'harmonique de tension Vs.

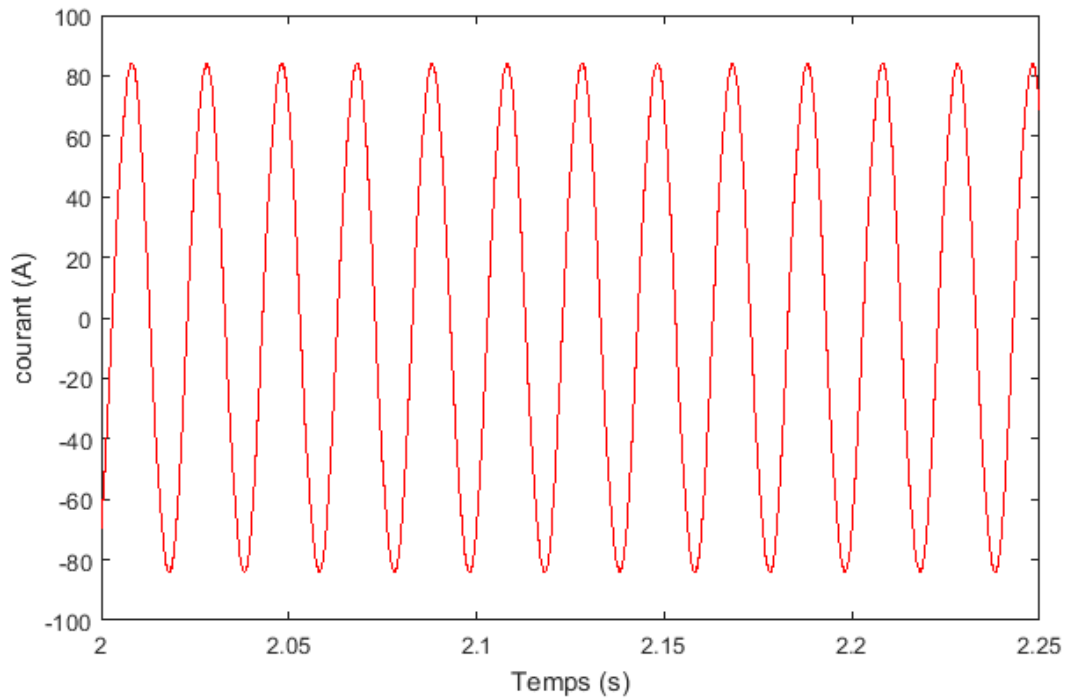


Figure (4.23) : Allure de courant Is

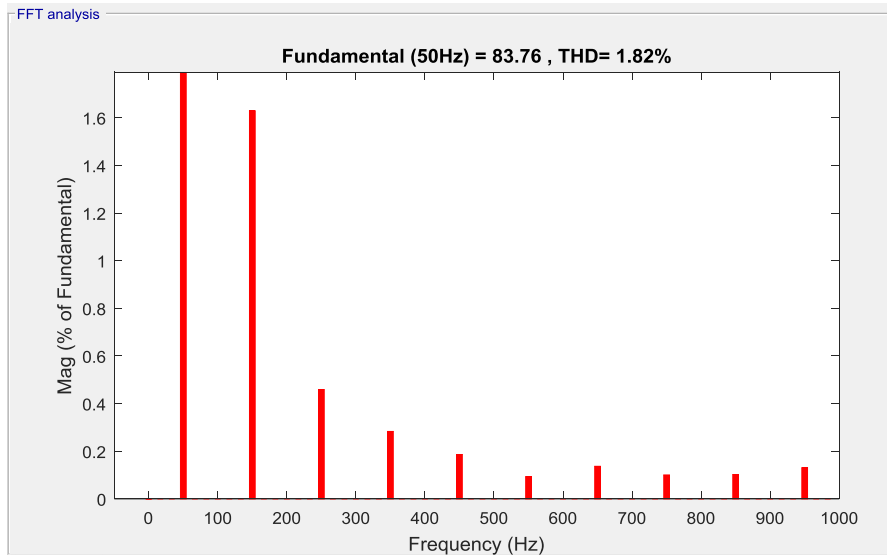


Figure (4.24) : Spectre d'harmonique de courant  $I_s$ .

## IV.5 Onduleur triphasé cinq niveaux

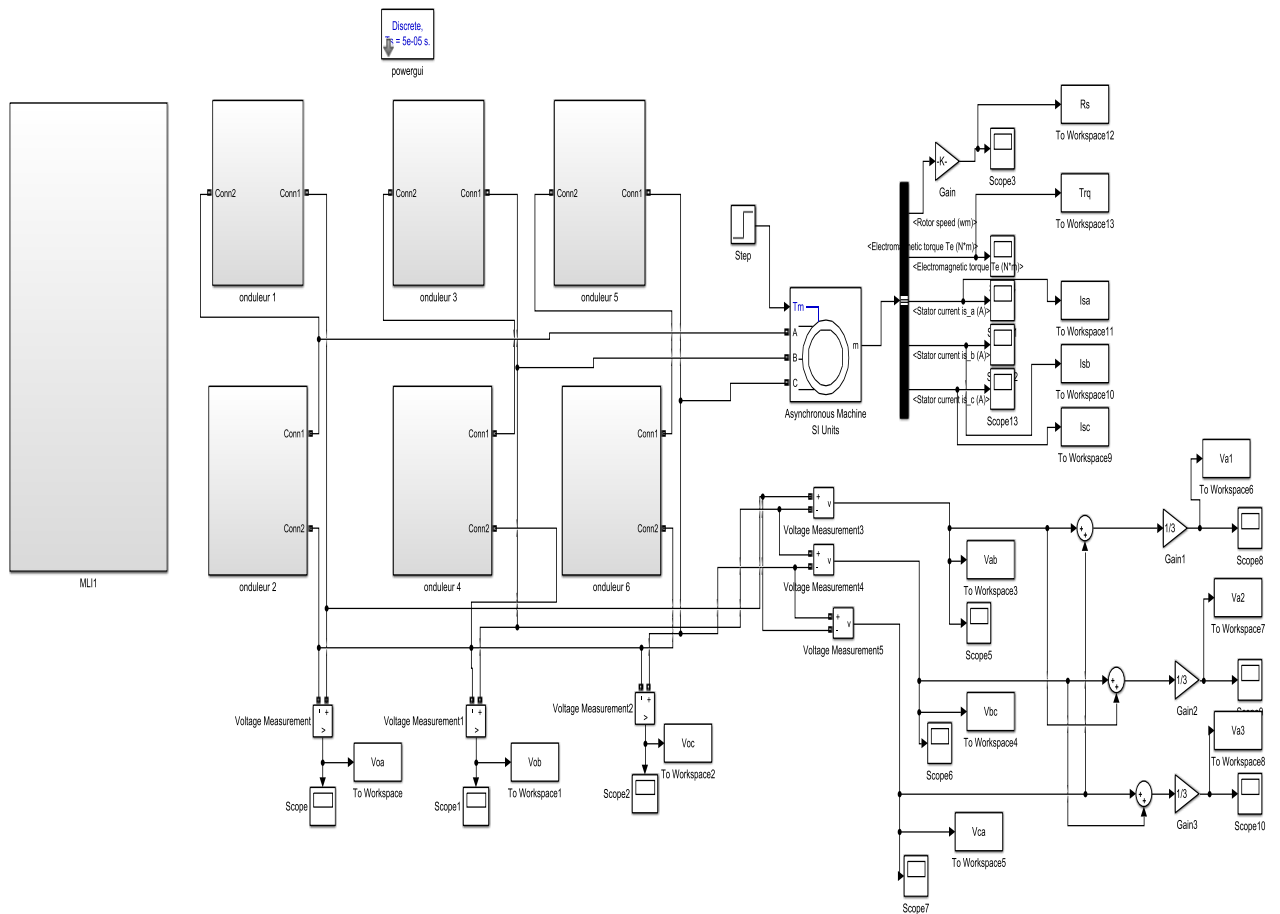


Figure (4.25) : Schéma bloc d'un onduleur triphasé cinq niveaux.

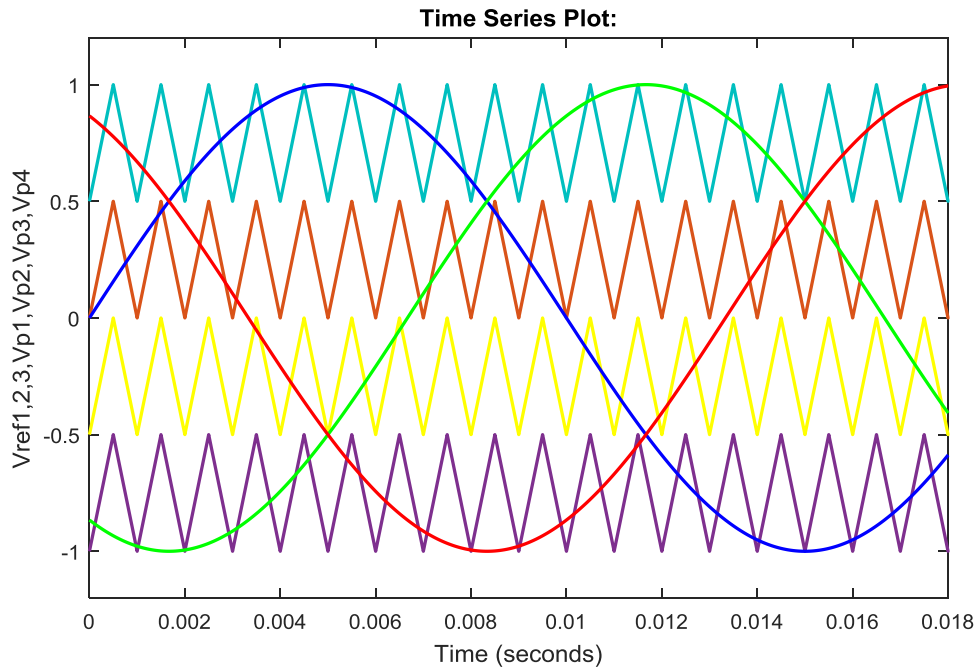


Figure (4.26) : Principe de la MLI a double porteuse pour un onduleur triphasé cinq niveaux.

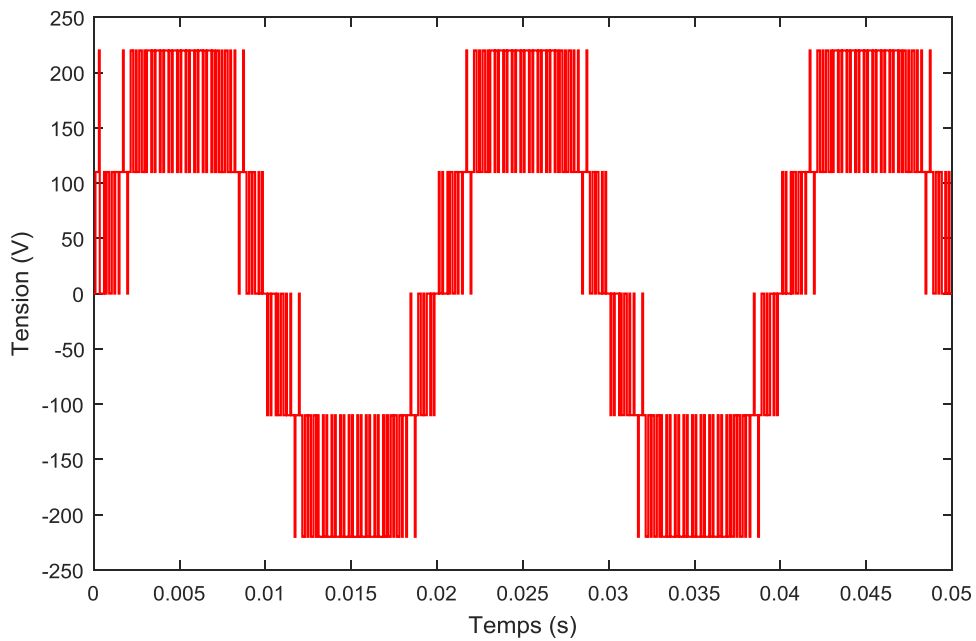


Figure (4.27) : Allure de tension simple  $V_{ao}$ .

## Chapitre IV : simulations et résultats

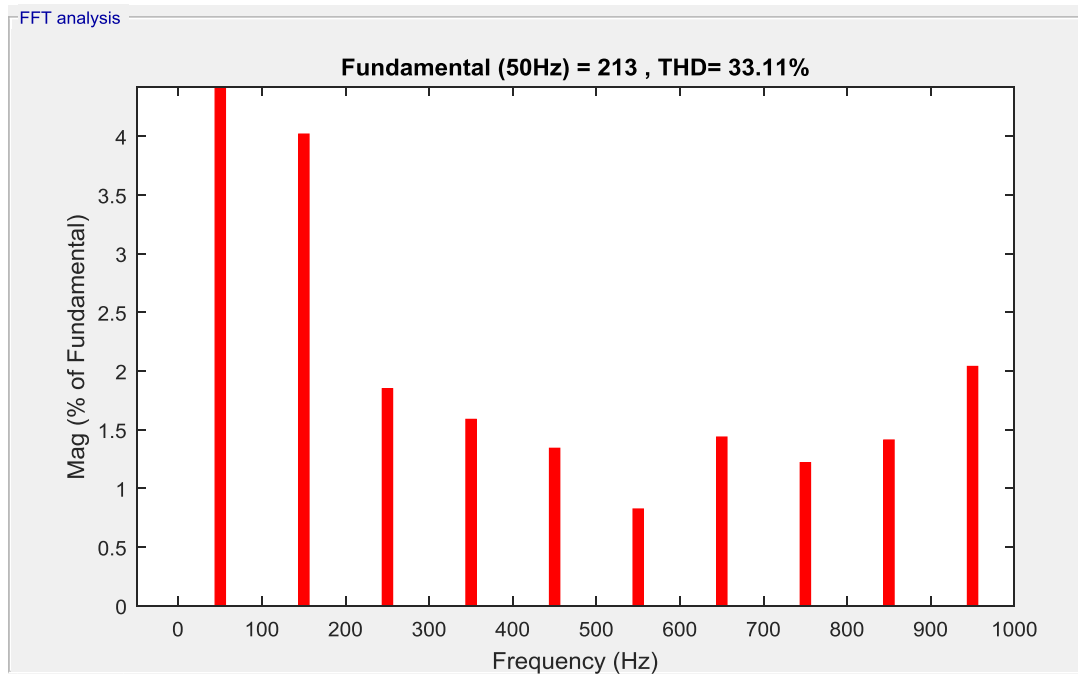


Figure (4.28) : Spectre d'harmonique de tension simple  $V_{ao}$ .

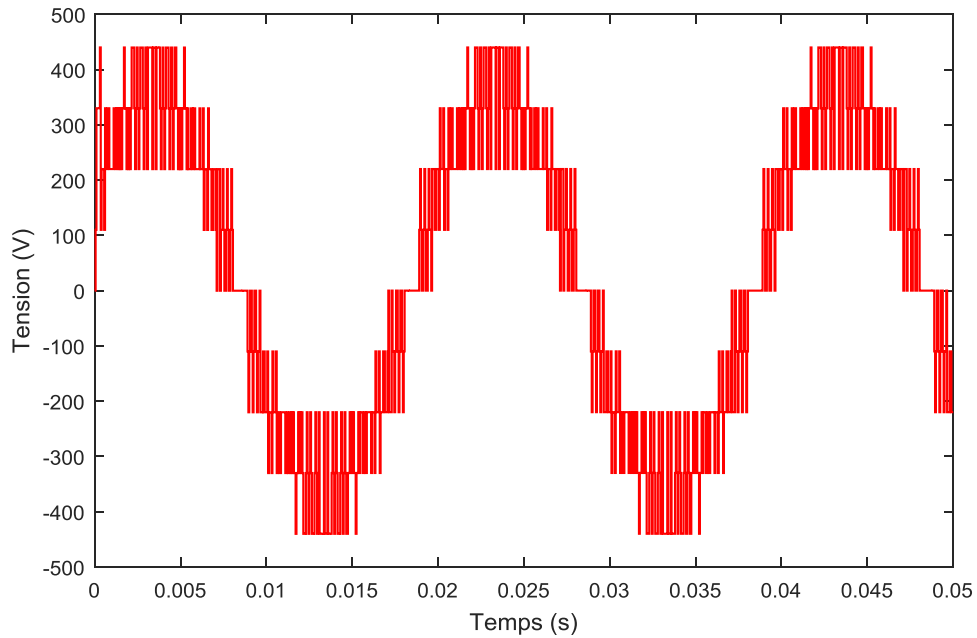


Figure (4.29) : Allure de tension composée  $V_{ab}$ .



## Chapitre IV : simulations et résultats

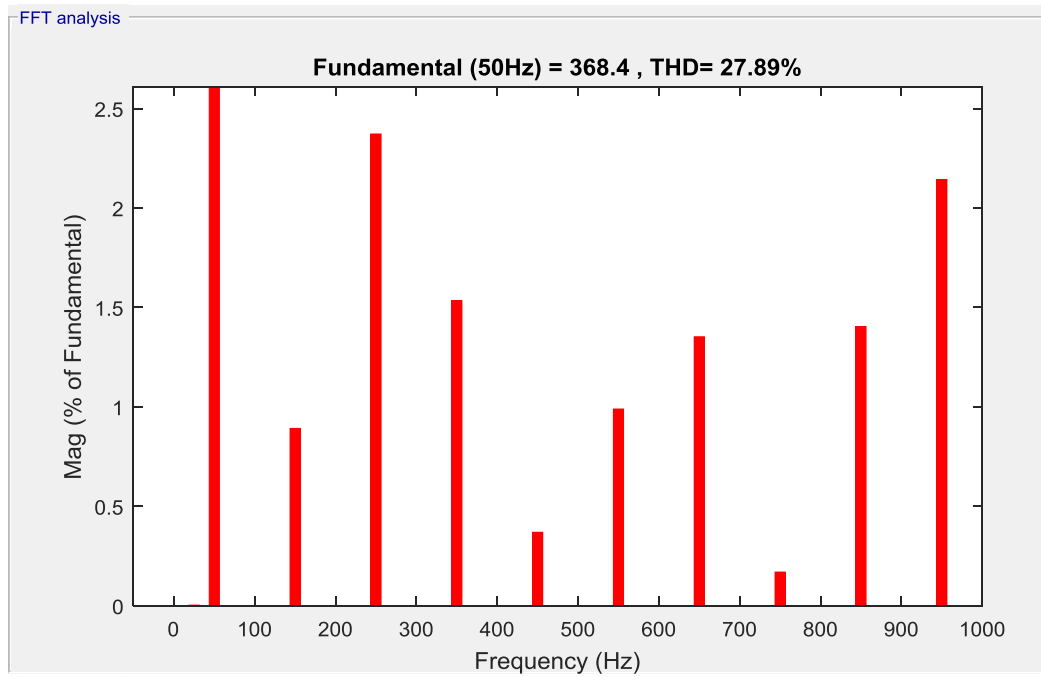


Figure (4.30) : Spectre d'harmonique de tension Composée Vab.

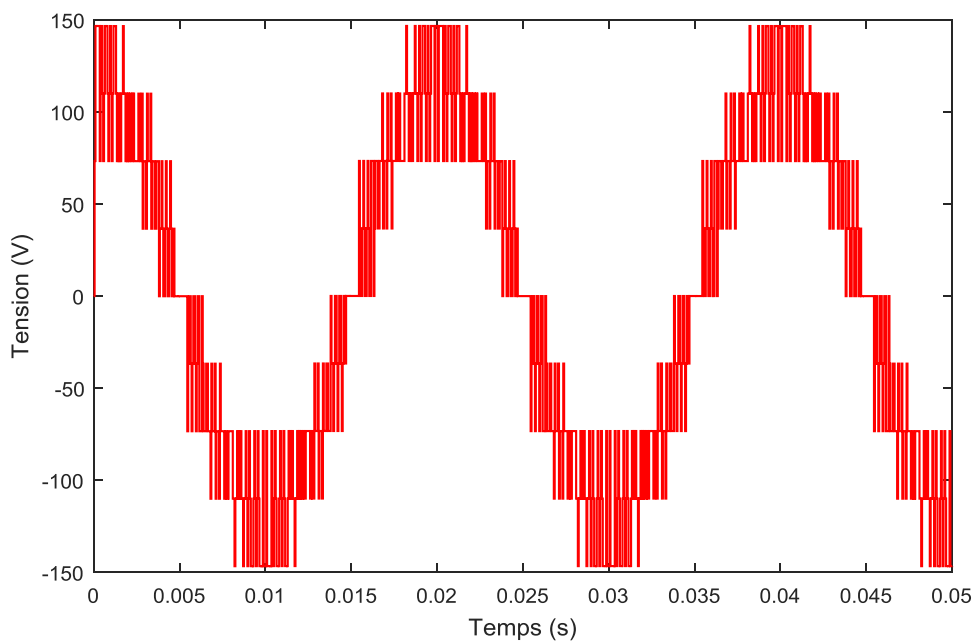


Figure (4.31) : Allure de tension de phase Van.

## Chapitre IV : simulations et résultats

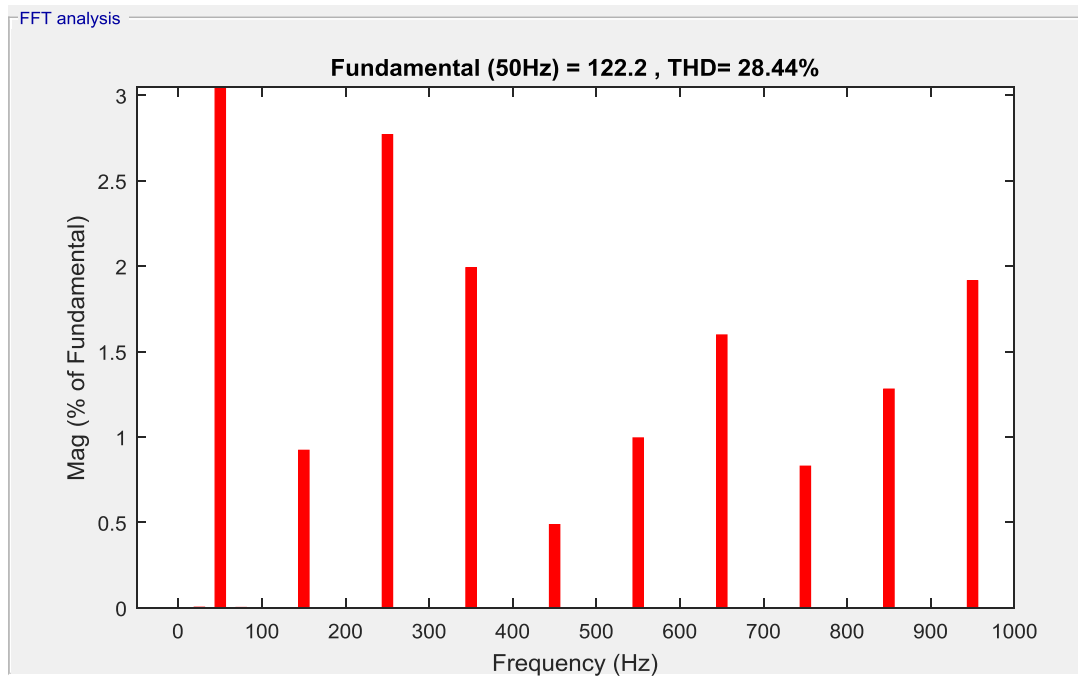


Figure (4.32) : Spectre d'harmonique de tension Van.

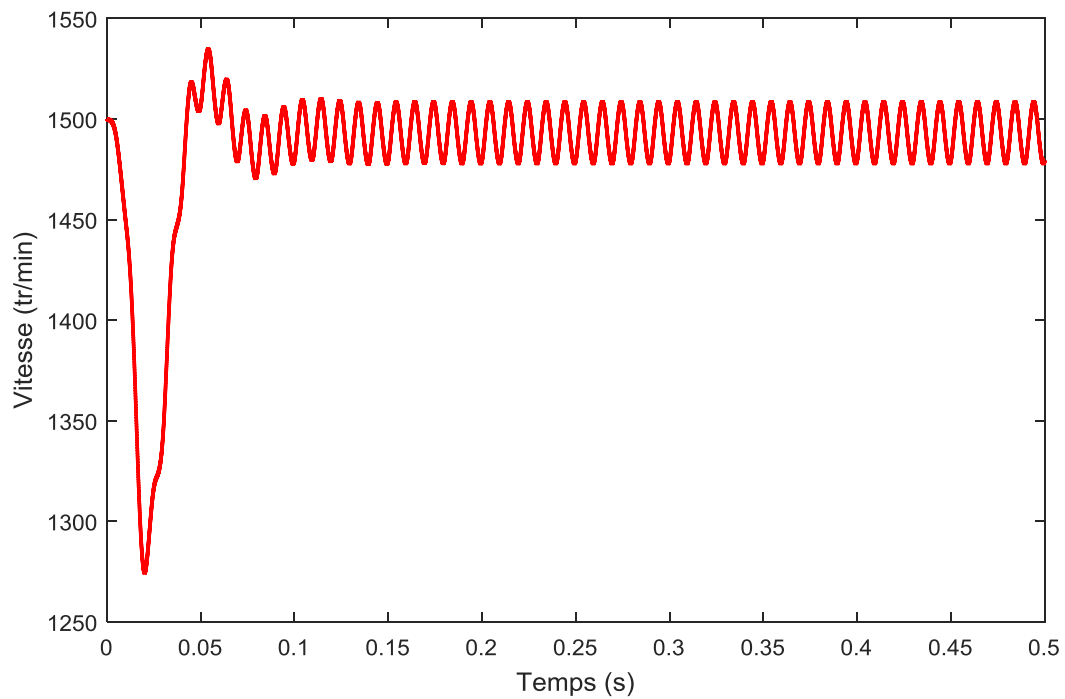


Figure (4 .33) : Allure de vitesse.

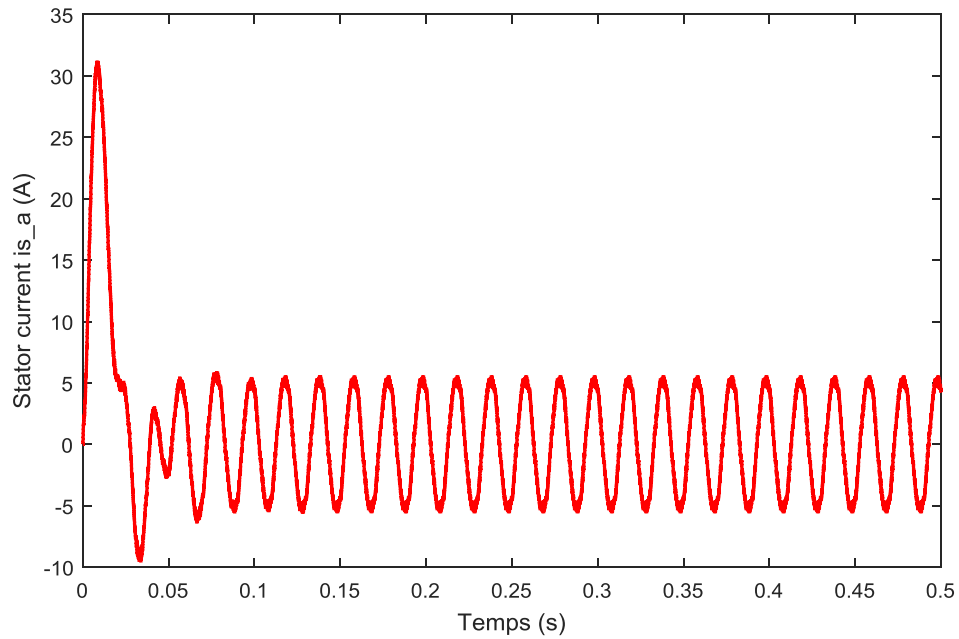


Figure (4.34) : Allure de courant statorique  $I_{sa}$ .

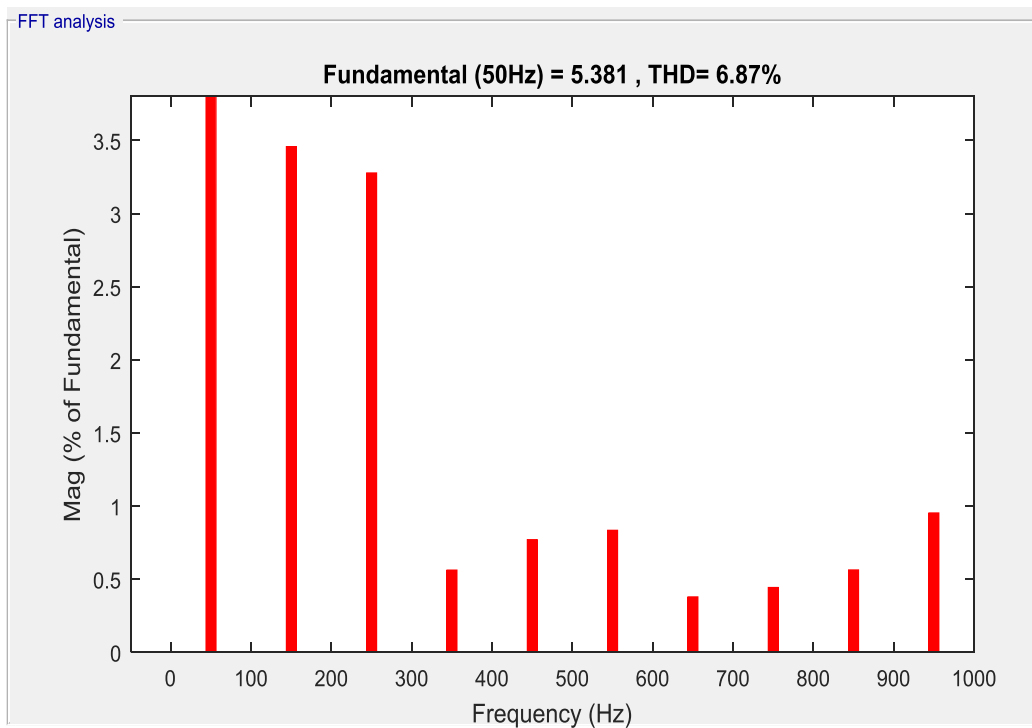


Figure (4.35) : Spectre d'harmonique de courant  $I_{sa}$ .

## IV.6 Onduleur monophasé sept niveaux

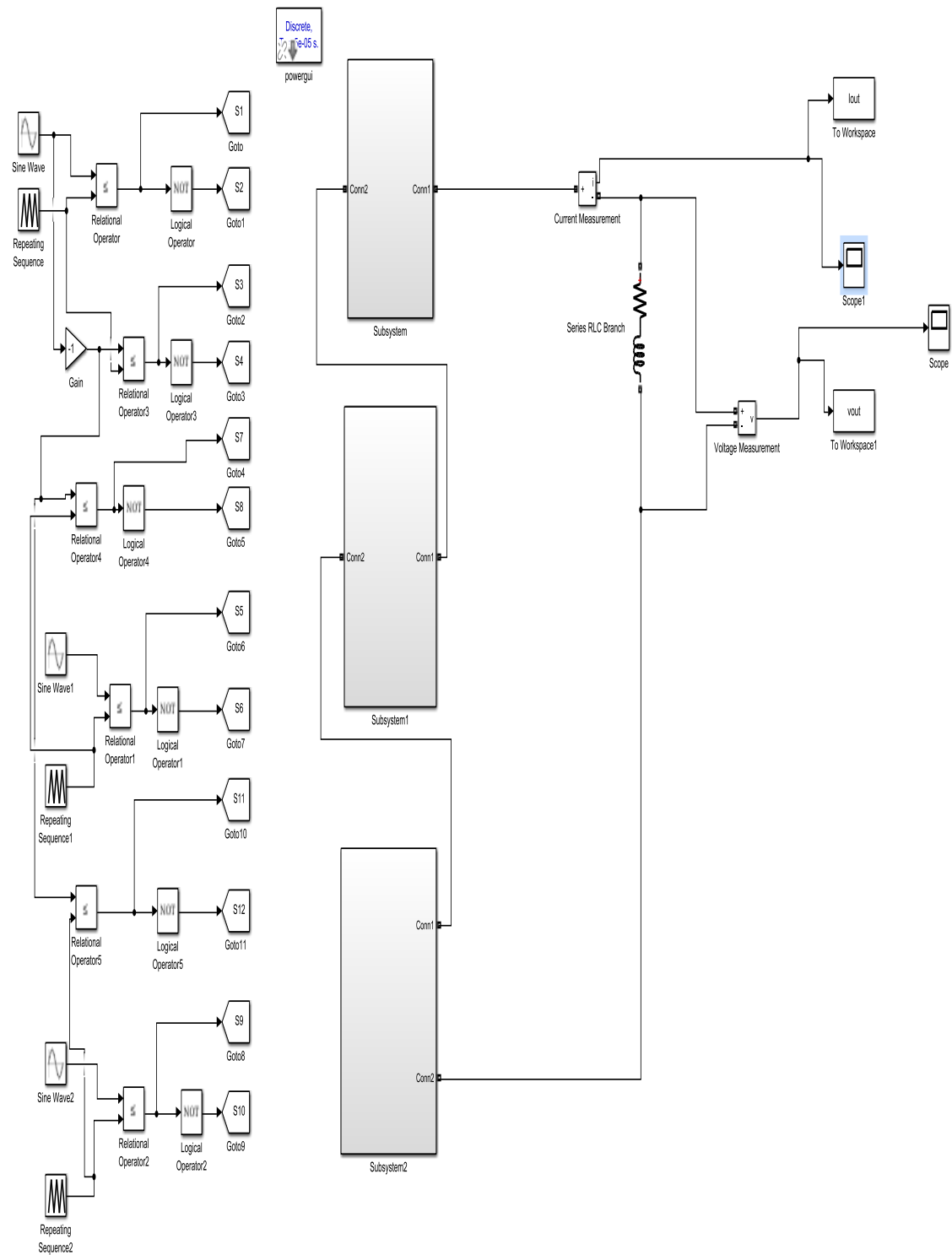


Figure (4.36) : Schéma bloc d'un onduleur monophasée sept niveaux.

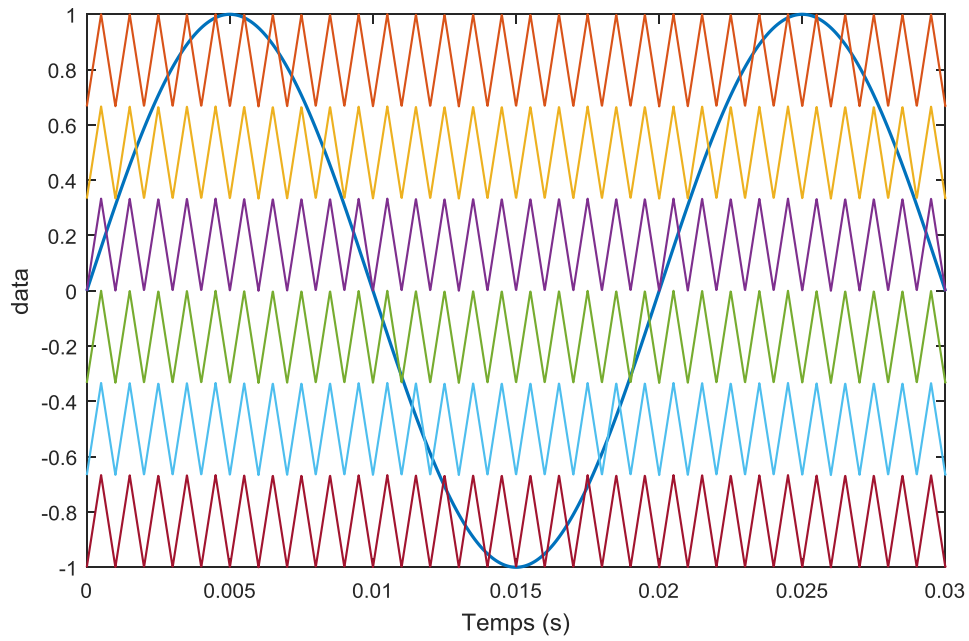


Figure (4.37) : Principe de la MLI a double porteuse pour un onduleur monophasée sept niveaux.

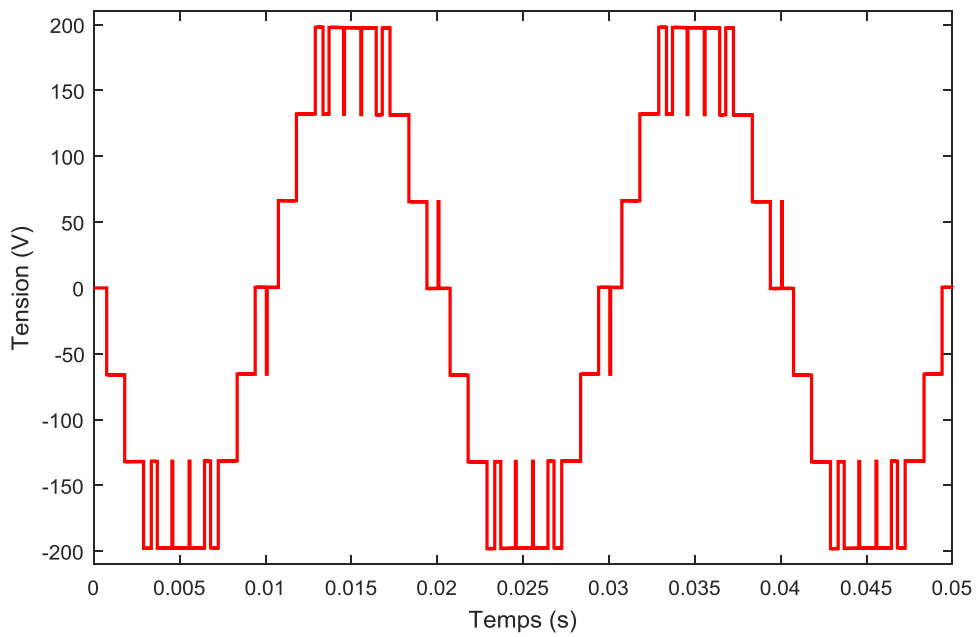


Figure (4.38) : Allure de tension simple  $V_s$ .

## Chapitre IV : simulations et résultats

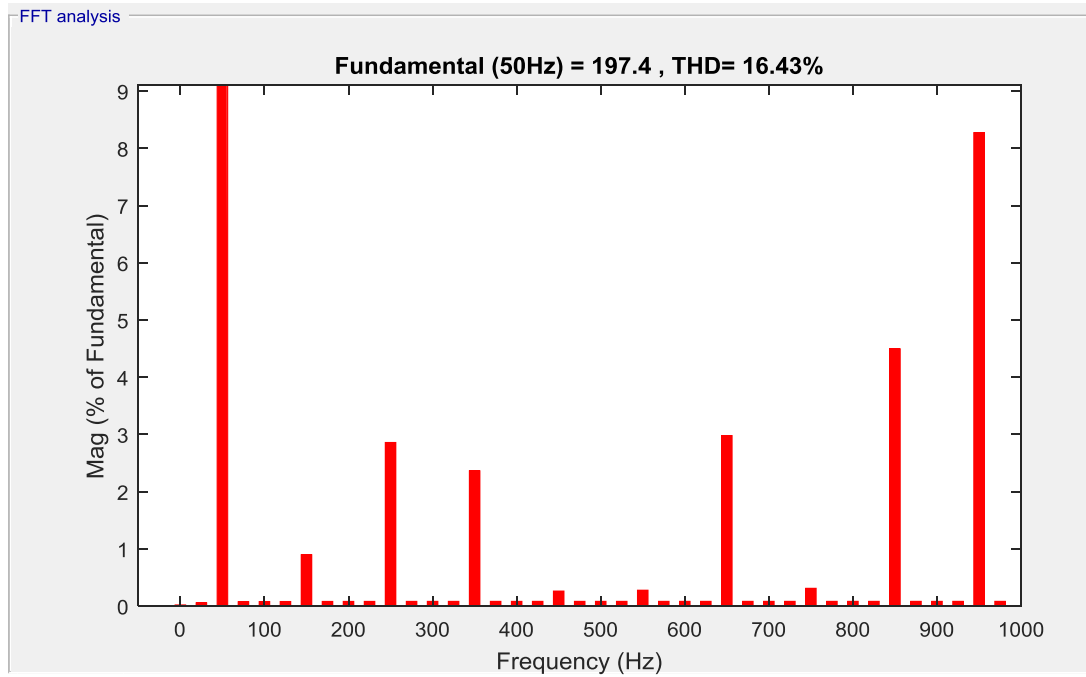


Figure (4.39) : Spectre d'harmonique de tension  $V_s$ .

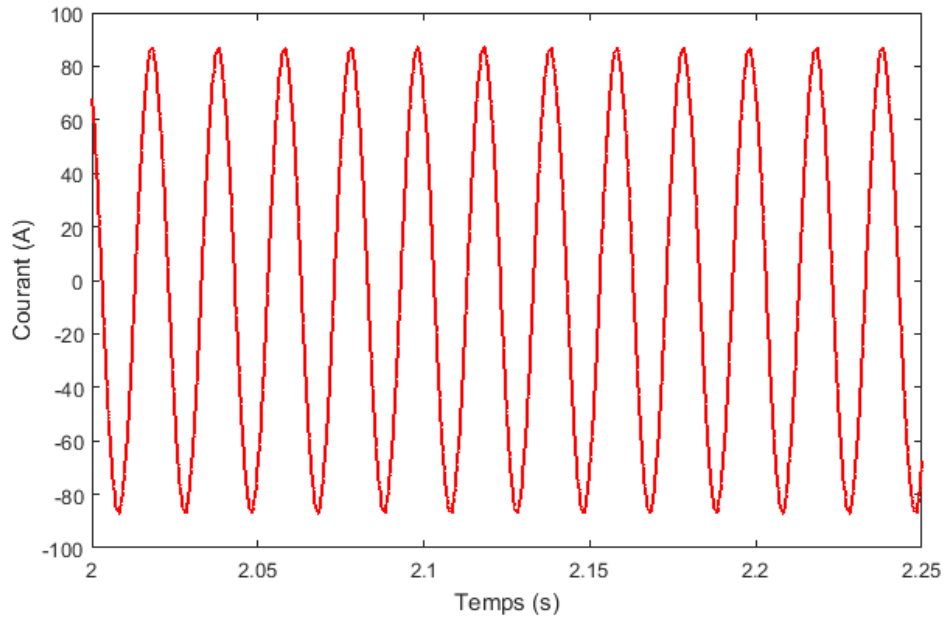


Figure (4.40) : Allure de courant  $I_s$ .

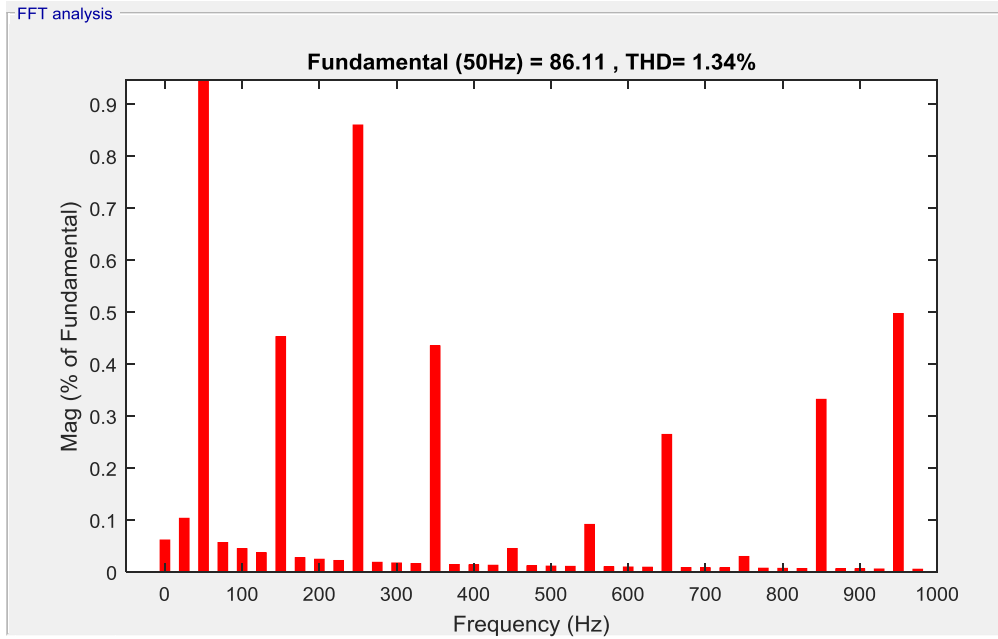


Figure (4.41) : Spectre d'harmonique de courant  $I_s$ .

## IV.7 Onduleur triphasé sept niveaux

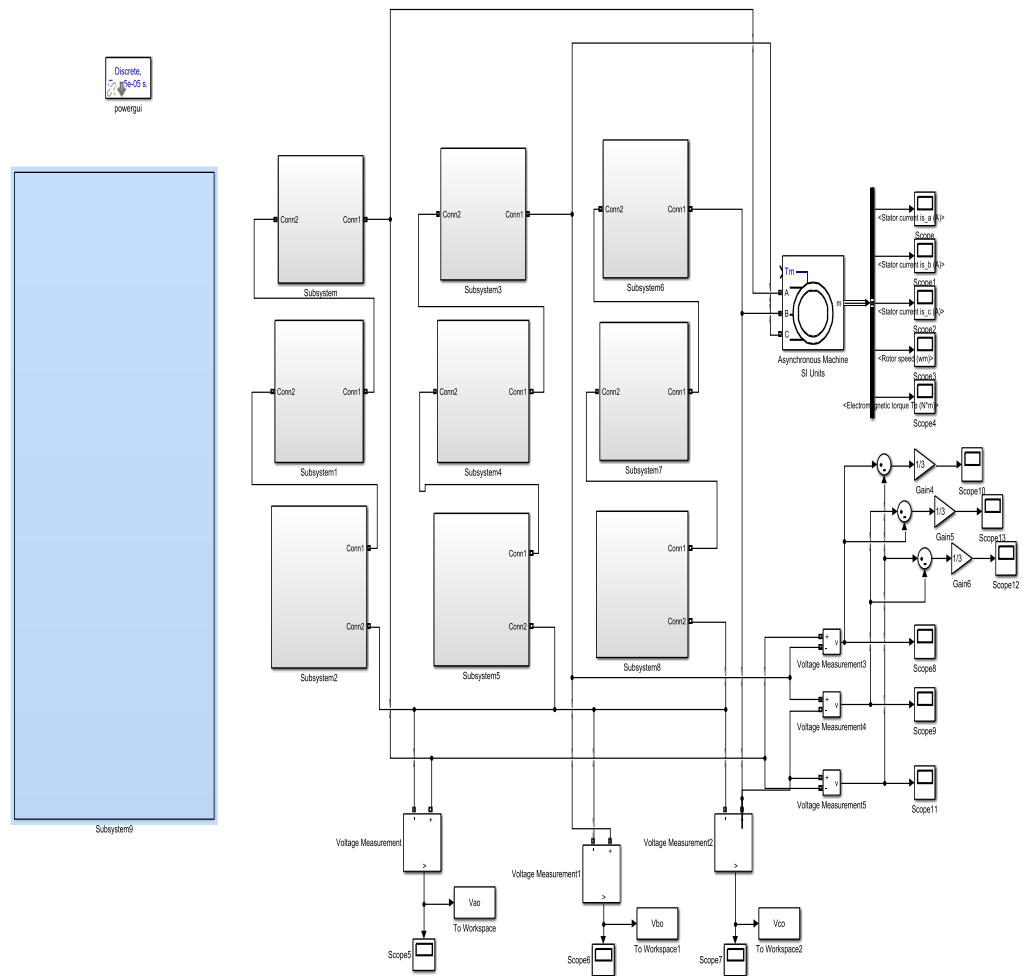


Figure (4.42) : Schéma bloc d'un onduleur triphasé sept niveaux.

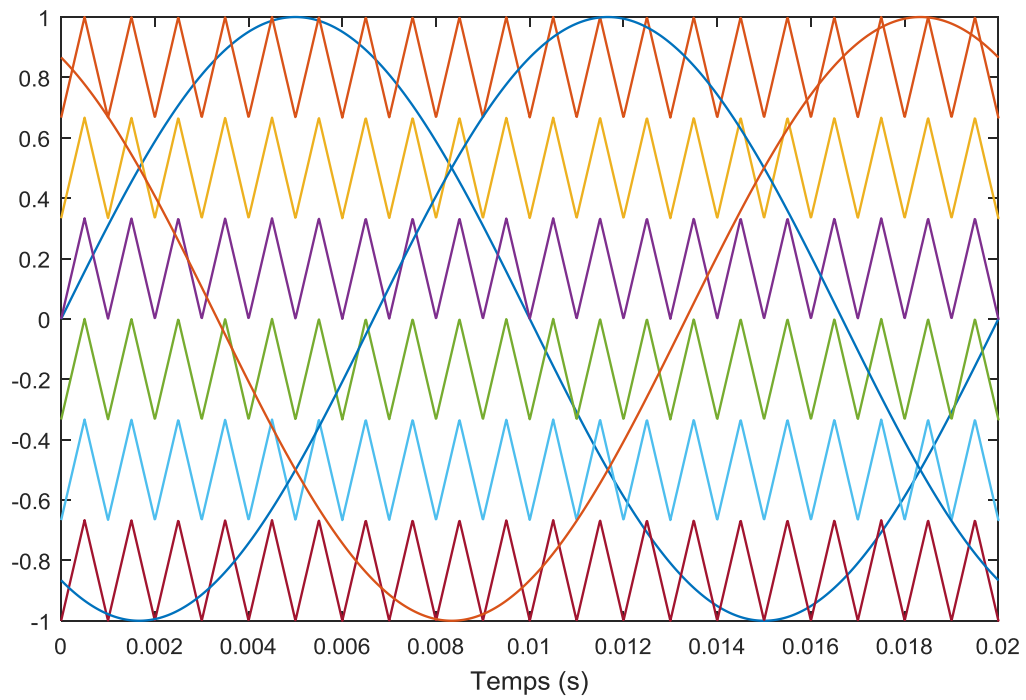


Figure (4.43) : Principe de la MLI double porteuse pour onduleur triphasée sept niveaux.

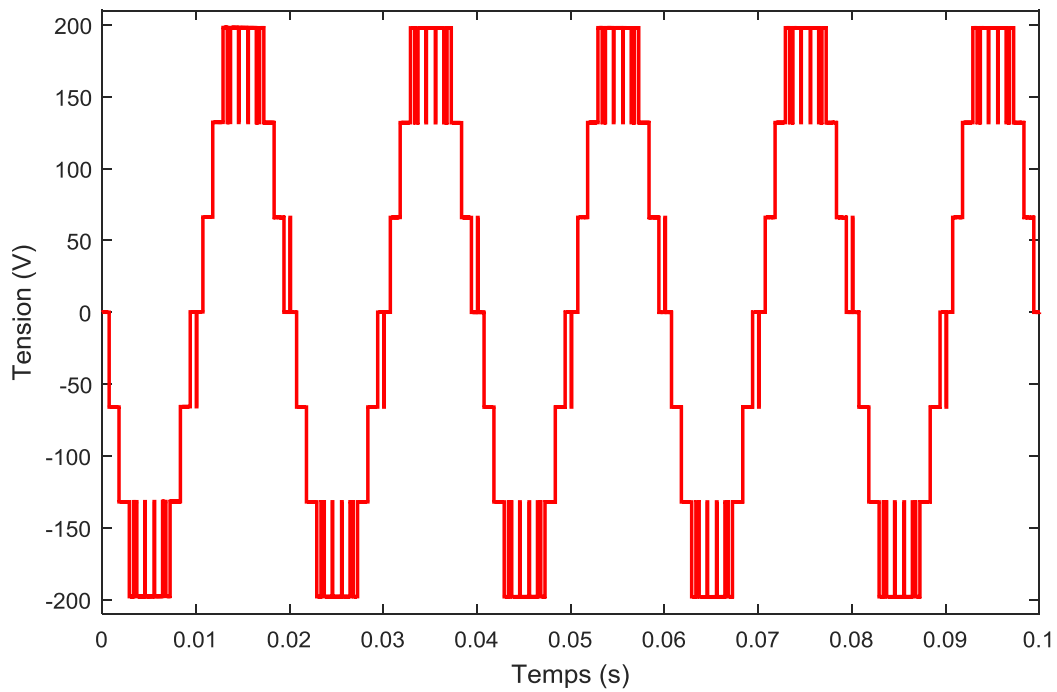


Figure (4.44) : Allure de tension simple Vao.



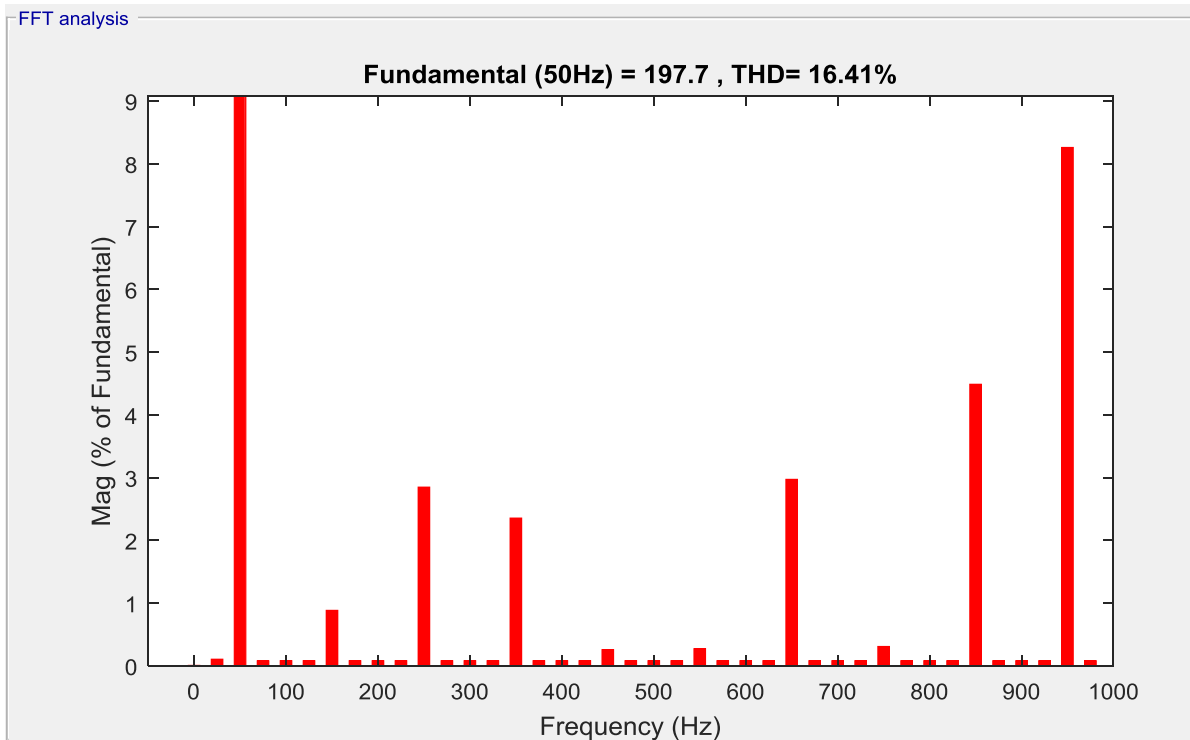


Figure (4.45) : Spectre d'harmonique de tension  $V_{ao}$ .

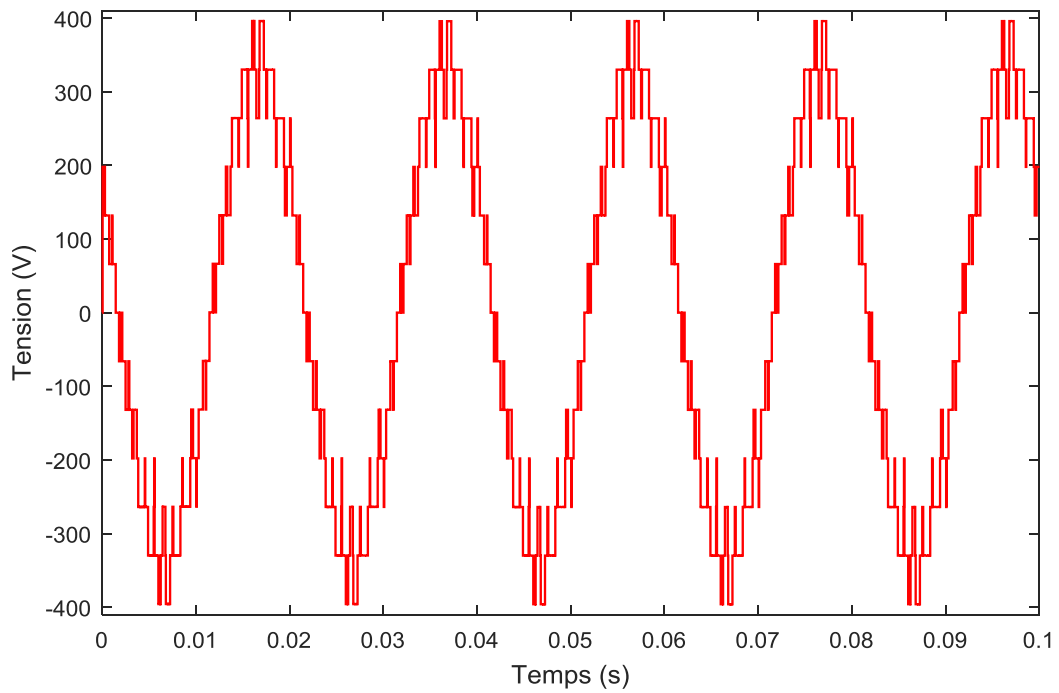


Figure (4.46) : Allure de tension Composée  $V_{ab}$ .

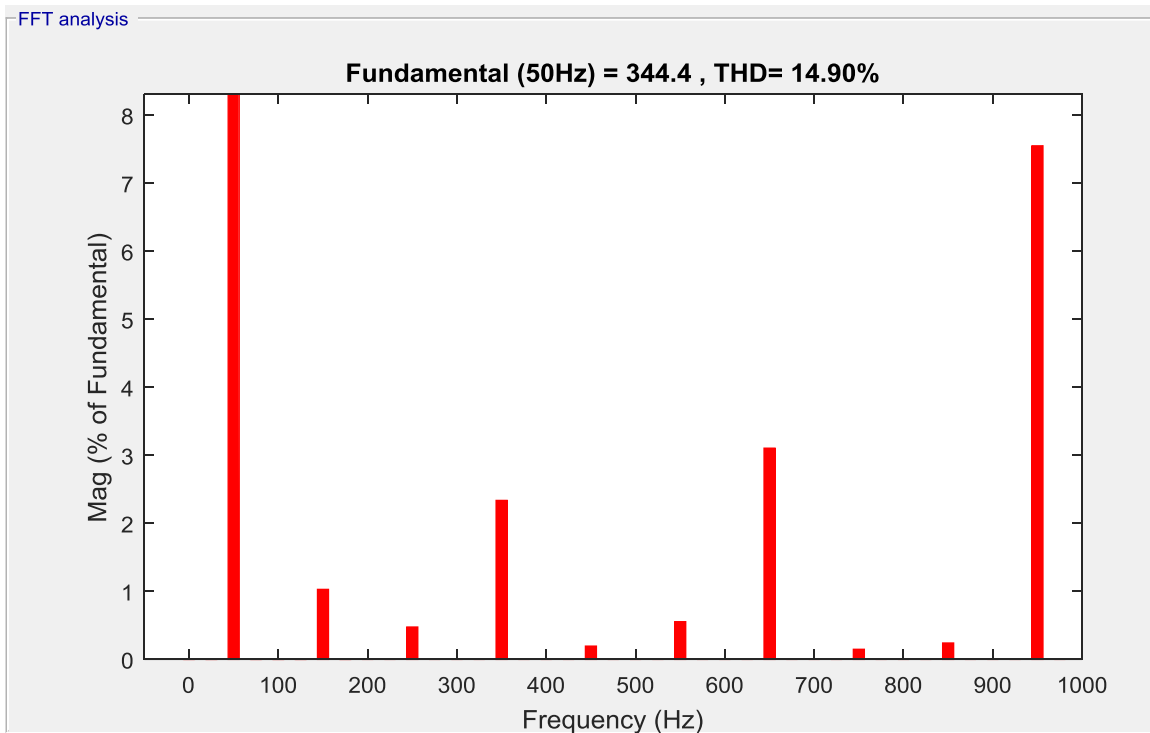


Figure (4.47) : Spectre d'harmonique de tension Vab.

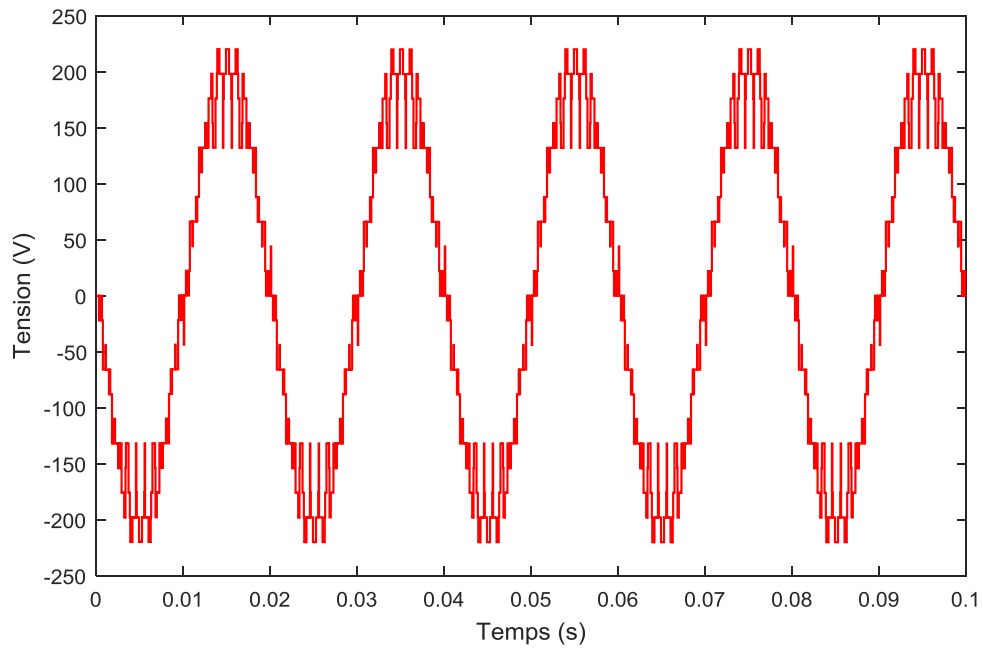


Figure (4.48) : Allure de tension de phase Van.

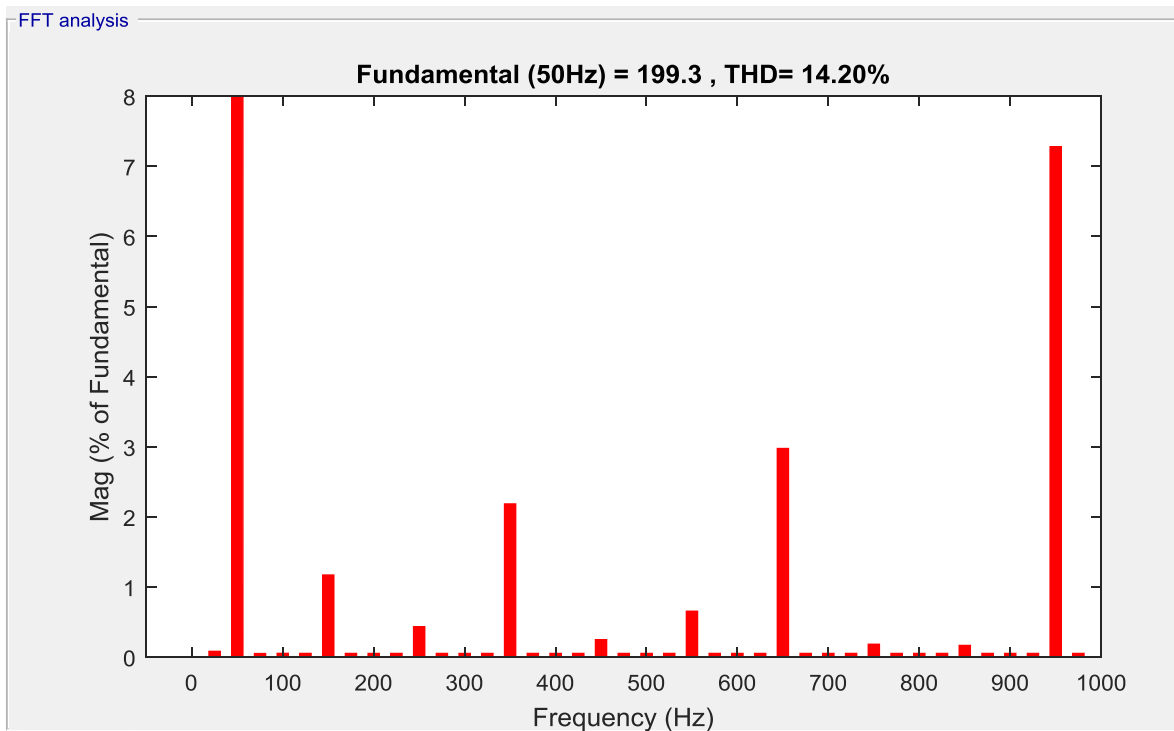


Figure (4.49) : Spectre d'harmonique de tension Van.

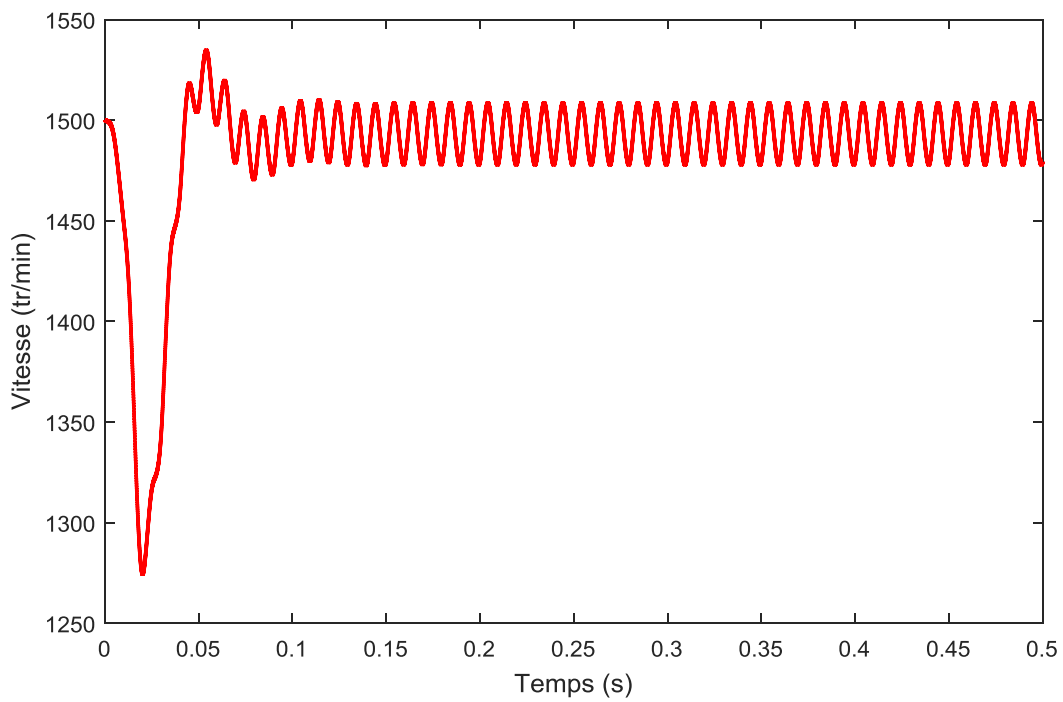


Figure (4.50) : Allure de vitesse.

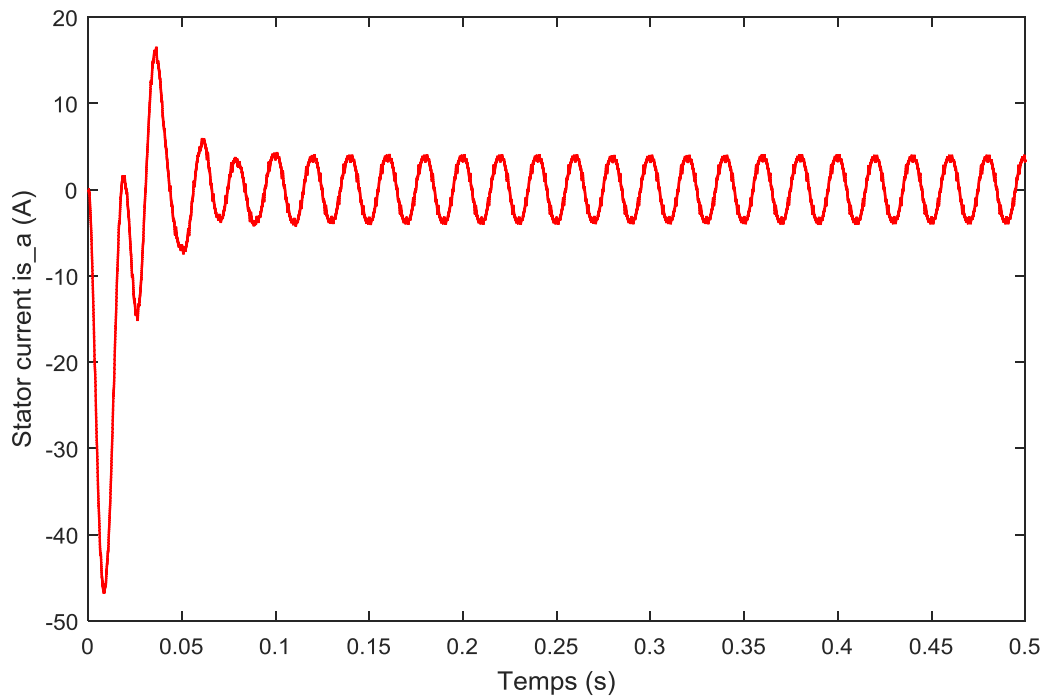


Figure (4.51) : Allure de courant statorique  $i_{s_a}$ .

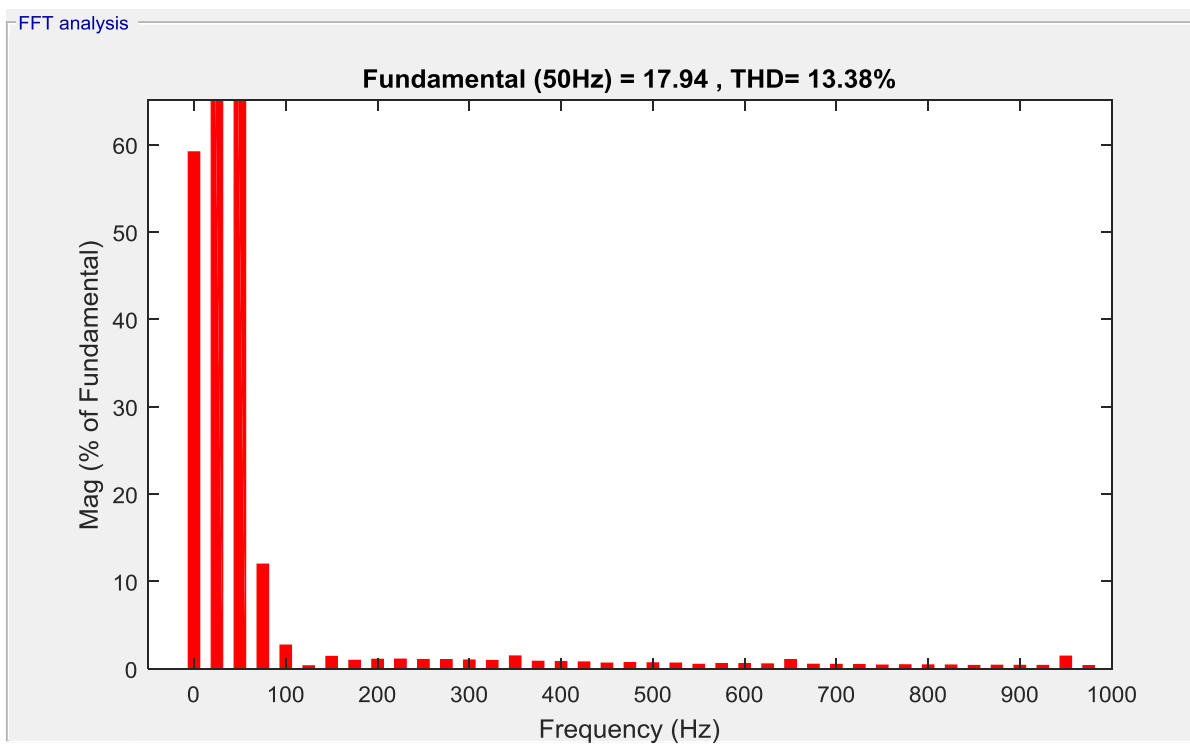


Figure (4.52) : Spectre d'harmonique de courant  $i_{s_a}$ .

## Chapitre IV : simulations et résultats

### IV.8 Interprétation et résultats

Pour les structure de monophasée on a remarqué, que les performances de cet onduleur améliorer chaque fois que nous sommes allés dans le nombre de niveaux, Nous voyons que le signal se rapproche de plus en plus de sinusoïdale. Le même chose pour les structure triphasée et spécialement les performances de machine asynchrone, telle que les trois courants statoriques, les trois courants rotoriques, le couple électromagnétique, ainsi que la vitesse de rotation, pour un fonctionnement à vide de la machine. On note que la machine asynchrone est alimentée par les tensions de la sortie de nos onduleurs.

La stratégie de commande triangle sinusoïdale augmente le THD de la tension de sortie et bien diminue le THD du courant de sortie et rends plus facile le choix de filtre.

#### IV.8.1 Comparaison des résultats de simulation des onduleurs étudiés

Tableau (4-1) : Facteurs de distorsion de chaque type d'onduleur monophasée.

N=° de niveau	Trois niveaux		Cinq niveaux		Sept niveaux	
	Tension	courant	Tension	courant	tension	courant
Le THD%	55.83	2.89	33.14	1.82	16.43	1.34

Tableau (4-2) : Facteurs de distorsion de chaque type d'onduleur triphasée.

N=° de niveau	Trois niveaux				Cinq niveaux				Sept niveaux			
	tension Vao	tension Vab	tension Van	courant Isa	tension Vao	tension Vab	tension Van	courant Isa	tension Vao	tension Vab	tension Van	courant Isa
Le THD%	55.57	44.16	44.59	26.57	33.11	27.89	28.44	6.87	16.41	14.07	14.20	13.38

Les tableaux (4-1) et (4-2) montrent bien et donne une idée générale sur la qualité de forme d'onde réelle avec sa composante fondamentale. Le facteur de distorsion [THD (%)] montre bien l'avantage du niveau. On remarque aussi que l'augmentation du niveau de l'onduleur permet d'améliorer le signal de sortie de l'onduleur.

### IV.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons représenté les simulations des onduleurs multi-niveaux de type pont H en cascade trois, cinq et sept niveaux. Nous avons remarqué que lorsque le niveau d'onduleur va augmenter; le THD du signal de sortie va diminuer et donne une bonne performance. Pour prendre un résultat parfait dans les normes nationaux il faut augmenter le niveau d'onduleur jusqu'au dix-septième.

## Conclusion générale

Dans ce travail, nous avons modélisé la machine asynchrone triphasée alimentée depuis le réseau. Nous avons aussi étudié les différentes topologies de structure de base de la conversion multiniveaux. Ce mémoire lève le voile sur les différentes stratégies de commande des onduleurs et le dimensionnement d'un onduleur en pont en H à trois, cinq et a sept niveaux, aussi, une conduite de la machine où les résultats de simulation pour vérifier les performances du signal de sortie.

Nous avons utilisé la commande MLI triangle sinusoïdale en conversion monophasée et triphasée. Nous a permis de confirmer que Cette stratégie de commande est la meilleure stratégie de commande des onduleurs multi-niveaux. Cette suprématie est due à la réduction des harmoniques et des ondulations du couple électromagnétique.

D'après les résultats obtenus après plusieurs essais de simulation sous MATLAB, Nous avons remarqué que Lorsque le niveau d'onduleur va augmenter le THD de signale de sortie va diminuer et donne une bonne performance. Nous avons également montré l'efficacité de l'algorithme de commande à MLI sinusoïdale utilisé.

L'onduleur à sept niveaux commandé par MLI sinusoïdale nous a donné un signal du courant plus proche de la sinusoïde, il contient moins d'harmoniques. Avec cette méthode de commande, nous obtenons une meilleure réponse dynamique du moteur asynchrone.

Ce travail nous a permis d'élargir nos connaissances dans le domaine de l'électronique de puissance, tel que : comportement des semi-conducteurs, les différentes topologies des convertisseurs multi-niveaux, les différentes stratégies de commande des convertisseurs ainsi que la maîtrise de l'outil de simulation sous MATLAB/Simulink.

# Bibliographie

- [1] Mohamed Talel CHEBBAH « Étude et simulation d'un convertisseur multiniveaux type PUC », École de technologie supérieure université du QUÉBEC, 2014.
- [2] Jean-Paul Louis : Modélisation des machines électriques en vue de leur commande
- [3] NABTI KHALIL « Contribution à la commande de la machine asynchrone par DTC et logique floue », Université Mentouri de Constantine, 2006.
- [4] : F.MILSANT, Cours d'électrotechnique à l'usage de l'enseignement supérieur, 1993.
- [5] Wildi;Telectrical Machines,Drives and power systems,prentice hall in,1997.
- [6] : G.SEGUIER et F.NOTELEL, Electrotechnique industrielle, 1985, P.P.297-302.
- [7] : A.FAROUK et B.MOHAMED, Réglage d'un alternateur à l'aide d'un micro-ordinateur, Mémoire de fin d'étude, Promotion 1998, Université de Sétif.
- [8] Caron. J.P, Hautier. J.P « Modelisation et commande de la machine asynchrone », édition technip 1995.
- [9] Chauvet. Jp « Conception d'une commande rapprochée pour onduleur de tension à cinq niveaux », mémoire CNAM ,Paris 1990.
- [10] Violaine Didier «Les Onduleurs pour Systèmes Photovoltaïques Fonctionnement, Etat de l'Art et Etude des Performances » rapport de HESPUL, 2007.
- [11] S. MECHERI, << Réalisation d'un onduleur de tension monophasé centrale par carte ARDUINE >>, Université de Constantine I, 2013/2014.
- [12] Onduleur de tension : mise en œuvre et Structures-principes-applications. Techniques d'ingénieur, Traité de génie électrique D.3176-3177.
- [13] Onduleurs et harmoniques, Cahiers techniques Merlin Gerin N°159.
- [14] T. Wildi : Electrotechnique, 3eme édition, éditions de Boeck université (1999).
- [15] 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.
- [16] MANSOURI Abdallah «Commande des Onduleurs Multiniveaux», Mémoire Présenté en vue d'obtention du diplôme de MASTER, UNIVERSITE DE MOHAMED BOUDIAFM'SILA.2016.



- [17] 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.
- [18] B. K. Bose, "Power Electronics and AC Drives", Edition Practice Hall, 1986.
- [19] Kelaiaia Mounia Samira, Amelioration De La Qualite De L'energie Delivree Par Un Onduleur Multi Niveaux Alimentant Une Machine Asynchrone A Cage, mémoire de doctorat, université annaba,2007.
- [20] Nekkar Djamel, Contribution à l'étude des Stratégies de Commande des Filtres ActifsTriphasés Mémoire de Magister, université de Souk-Ahras, 2014.
- [21] Saifi Imane, Alimentation d'onduleurs multiniveaux : analyse des possibilités de réalisation et méthodes de répartition de la puissance, mémoire de master, université de ouargla,2016.
- [22] Alexandre Leredde , Etude, Commande et Mise en Oeuvre de Nouvelles Structures Multiniveaux, mémoire de doctorat, université de Toulouse, 2011.
- [23] Hind Djeghloud, Hocine Benalla, «Space Vector Pulse Width Modulation Applied to the Three-Level Voltage Inverter», Electrotechnic's Laboratory of Constantine, Mentouri Constantine University.
- [24] Said .Bentouba, Aek.Slimani, Med.Seghir.Boucherit, Stratégies de Commande et Modélisation de l'Onduleur à Cinq Niveaux, Université Bechar, 2010.
- [25] Mohamad Alaa Eddin Alali, « Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension - Automatisation des systèmes de puissance électriques », Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur – Strasbourg I, Discipline: Génie électrique, Septembre 2002.
- [26] M.W. Naouar, I. Slama. Belkhodja, E. Monmasson, « Développement d'une Maquette Expérimentale a But Pédagogique pour la Commande d'une Machine Asynchrone », J3ea – Vol. 5 – Hors série N°2, 2006.
- [27] Jean Bonal, Guy Séguier, « Entraînements Electriques a Vitesse Variable», Technique et Documentation, Vol. 2, Décembre 1998

# Annexe

## **Paramètres et caractéristiques de la machine asynchrone utilisée en simulation :**

### **Les caractéristiques :**

$P = 4\text{kW}$   
 $V=220/380$   
 $i_{Sn} = 15/8.6 \text{ A}$   
 $\Omega = 1440 \text{ tr/mn}$

### **Les Paramètres :**

$R_s=4.58 \Omega$   
 $R_r=3.805 \Omega$   
 $L_s=0.274\text{H}$   
 $L_r=0.274\text{H}$   
 $J=0.031 \text{ Kg.m}^2$   
 $f=0.001136$   
 $M=0.258\text{H}$   
 $P=2$