

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



Université de Ghardaïa

N° d'ordre :
N° de série :

Faculté des Sciences et Technologies
Département d'automatique et électromécanique
Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Automatique

Spécialité : Automatique et systèmes

Par: **ZOUATINE Abderrezeq** et **MEZZI Abdelkerim**

Thème

Etude comparative des stratégies de commande des onduleurs

Soutenu publiquement le:

Devant le jury:

Mr.DAOUDI Bahmed	Professeur	Univ. Ghardaïa	Président
Mme. HACHANI Keltoum	Maître Assistant B	Univ. Laghouat	Encadreur
Mr.BEKAR Belgacem	Maître conférence A	Univ. Ghardaïa	Examineur
Mr.MOSBAH Said	Maître conférence B	Univ. Ghardaïa	Examineur

Année universitaire : 2023/2024

RESUME

المخلص:

الهدف من هذا العمل هو إجراء دراسة مقارنة بين الأنواع المختلفة من العاكس باستخدام استراتيجيات التحكم المختلفة. تم إجراء هذه الدراسة عن طريق تفسير نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها باستخدام البرنامج « MATLAB -Simulink- » تتضمن المحاكاة جهد إخراج المراحل العاكسة وأطياف تحليلها .

الكلمات المفتاحية: عاكس، التحكم بالعاكس، MLI، التوافقيات، (THD) معدل التشوه التوافقي، الآلة غير المتزامنة، MATLAB -Simulink- .

Résumé :

Le but de ce travail est de faire une étude comparative entre les différents types d'onduleur en utilisant des différentes stratégies de commande. Cette étude est faite par interprétation des résultats de simulation obtenus à l'aide du logiciel « MATLAB -Simulink- ». La simulation comporte les tensions de sortie des phases des onduleurs et leurs spectres d'analyse.

Mots clés : Onduleur, Commande d'un onduleur, MLI, harmonique, (THD) Taux Distortion Harmonique, Machine asynchrone, MATLAB –Simulink-.

Abstract:

The aim of this work is to make a comparative study between the different types of inverter using different control strategies. This study is made by interpretation of the simulation results obtained using the software « MATLAB -Simulink- ». The simulation includes the output voltages of the inverter phases and their analysis spectra.

Keywords: Inverter, Inverter Control, MLI, harmonic, (THD) Harmonic Distortion Rate, Asynchronous Machine, MATLAB –Simulink-.

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à celles qui auraient dû couvrir la salle

Avec leurs grands you-you si elles étaient avec nous :

L'âmes de mes grandes mère **Djamila** et **Rabia** ainsi que mon grand père

Abderrahmen connu par **DOUHA** que je n'oublierai

Jamais et qui resteront toujours graver dans mon cœur

Avec leurs tendresses et leurs sourires.

A mon grand père maternelle **Kamel**

Que dieu le garde pour moi

A mes chers parents **Mohamed** et **Malika**

Qui sont toujours à mes cotés pour m'encourager

A mes chers frères : **Billel** et **Abd Elkarim** et ma sœur **Oumyma**

A mes petites frangines à Tindouf **Ines** et **Ichrak**

A mon binôme : **MEZI Abdelkarim**

A tous mes amis

A tous mes cousins et cousines chaque' un par sont nom

A tous ceux qui m'ont aidé dans la réalisation de ce travail

ZOUATINE Abderrazaq



Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mon cher père, l'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir.

A ma mère la femme qui m'a mise au monde ; celle qui m'a donnée la raison de vivre et m'a offerte l'amour et l'affection, ma source d'amour et d'honneur, pour son soutien dans ma vie.

A mon cher frère : **Oussama**

A mes chères sœurs

A toutes ma famille : **MEZZI**

A mon binôme : **ZOUATINE Abderrazaq**

A tous mes amis et chers collègues

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin, pour que ce projet soit possible, je vous dis MERCI.



MEZZI Abdelkerim



Remerciement

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.


En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur Mme : **HACHANI Keltoum**, son précieux conseil et son aide durant toute la période du travail.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail Et de l'enrichir par leurs propositions.

Nous remercions aussi tout le corps enseignant et administratif de la faculté des Sciences et de la Technologie qui ont contribué à notre formation universitaire.

Nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Enfin nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos amis pour le tout soutien moral et matériel...



Sommaire

Table des matières

RESUME

Dédicace

REMERCIEMENTS

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Introduction Générale 1

Chapitre 1 : Généralité sur les Onduleurs

1.1 Introduction	3
1.1.1 Les convertisseurs	3
1.2 Définition de l'onduleur	4
1.3 Principe de fonctionnement d'onduleurs	5
1.3.1 Interrupteurs semi-conducteur	5
1.3.2 Cellules de commutation	7
1.3.3 Les onduleurs monophasés	8
1.3.3.1 L'onduleur monophasé en demi pont	9
1.3.3.2 L'onduleur monophasé en pont	10
1.3.4 Les onduleurs triphasés	11
1.4 Les différents types d'onduleurs	12
1.4.1 Onduleur autonome	13

1.4.2 Onduleur non autonome	14
1.4.3 Onduleur a résonance	15
1.5 Choix des composants	15
1.6 Domaine d`application des onduleurs	17
1.6.1 Réglage de la vitesse de rotation des moteurs synchrone	17
1.6.2 Alimentation de secours	17
1.6.3 Transfert d`énergie entre deux réseaux de fréquences différentes	18
1.6.5 La protection des équipements	18
1.6.6 Les installation photovoltaïques	18
1.7 Conclusion	18

Chapitre 2 : Différentes Techniques De commande Des Onduleurs

2.1 Introduction	19
2.2 Techniques de commande des onduleurs	19
2.2.1 Commande plein onde	19
2.2.2 Commande sinus-triangle	21
2.2.3 Commande par hystérésis	22
2.2.4 Commande MLI (modulation de largeur d`impulsion)	23
2.5 Les harmoniques	26
2.6 Les filtres	26
2.6.1 Types de filtres	27
2.7 Conclusion	29

Chapitre 3 : Simulation Et comparaison Des résultats

3.1 Introduction	31
-------------------------	-----------

3.2	Le plateforme utilisé	31
3.3	Simulation de commande onduleur monophasé	31
3.3.1	Commande en plein onde	31
3.3.1.1	Plein onde avec charge R	31
3.3.1.1.1	Résultats de simulation	33
3.3.1.2	Plein onde avec charge RL	34
3.3.1.2.1	Résultats de simulation	35
3.3.1.3	Comparaison des résultats	37
3.3.2	Commande en décalée	38
3.3.2.1	Décalée avec charge R	38
3.3.2.1.1	Résultats de simulation	39
3.3.2.2	Décalée avec charge RL	40
3.3.2.2.1	Résultats de simulation	41
3.3.2.3	Comparaison des résultats	43
3.3.3	Comparaison entre plein onde et décalée	43
3.4	Simulation de commande d'onduleur triphasé	44
3.4.1	Commande en plein onde	44
3.4.1.1	Résultats de simulation	45
3.4.1.2	Description des résultats	48
3.4.2	Simulation de commande MLI : Sinus-triangle et sinus-hystérésis d'un onduleur triphasé	48
3.4.2.1	Sinus-triangle	48
3.4.2.1.1	Sinus-triangle model électrique	49

3.4.2.1.1.1 Résultats de simulation	50
3.4.2.1.1.2 Description des résultats	51
3.4.2.1.2 Sinus-triangle modèle mathématique	51
3.4.2.1.2.1 Résultats de simulation	52
3.4.2.1.2.2 Description des résultats	53
3.4.2.2 Sinus-hystérésis	54
3.4.2.2.1 Simulation de commande sinus-hystérésis	54
3.4.2.2.1.1 Résultats de simulation	55
3.4.2.2.1.2 Description de résultat	56
3.4.2.2.2 Simulation de commande sinus-hystérésis avec filtre	57
3.4.2.2.2.1 Résultats de simulation	57
3.4.2.2.2.2 Description de résultat	59
3.4.3 Comparaison entre les commandes d'onduleurs triphasés	59
3.5 Association d'un moteur asynchrone a base d'un onduleur	59
3.5.1 Commande sinus-triangle	60
3.5.1.1 Résultat de commande sinus-triangle à vide	61
3.5.1.2 Résultat de commande sinus-triangle en charge	62
3.5.2 Commande sinus-hystérésis	64
3.5.2.1 Résultat de commande sinus-hystérésis à vide	64
3.5.2.1 Résultat de commande sinus-hystérésis en charge	66
3.5.3 Commande sinus-hystérésis avec filtrage	67
3.5.3.1 Résultat de commande sinus-hystérésis avec filtrage à vide	68
3.5.3.2 Résultat de commande sinus-hystérésis avec filtrage en charge	69

3.6 Conclusion	71
Conclusion générale	72
<i>BIBLIOGRAPHIE</i>	74

Liste des figures

CHPITRE 1 : *Généralité sur les Onduleurs*

Figure 1.1 : Classification des convertisseurs statiques	3
Figure 1.2 : Schéma symbolique d'un onduleur	5
Figure 1.3 : Cellule de commutation élémentaire d'un convertisseur	8
Figure 1.4 : Onduleur monophasé en demi-point	9
Figure 1.5 : Allure de courant et tension pour l'onduleur monophasé en demi-point	10
Figure 1.6 : Onduleur monophasé en pont	10
Figure 1.7 : Allure de courant et tension pour l'onduleur monophasé en pont	11
Figure 1.8 : Schéma de principe d'un onduleur triphasé de tension	12
Figure 1.9 : Association redresseur/onduleur de courant	13
Figure 1.10 : Association redresseur/onduleur de tension	14
Figure 1.11 : Classification des commutateurs de puissance selon la tension et la fréquence	16
Figure 1.12 : Classification des commutateurs de puissance selon la densité de courant et la rapidité de commutation	16
Figure 1.13 : Principe de réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone	17
Figure 1.14 : Alimentation de secours	17
Figure 1.15 : Transfert de l'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes	18

CHPITRE 2 : *Différente Technique De commande Des Onduleur*

Figure 2.1 : Schéma synoptique de la loi de modulation triangle-sinusoidale	20
Figure 2.2 : Principe de la commande MLI sinus-triangle	21

Figure 2.3 : Schéma de principe du contrôle par hystérésis d'un bras de l'onduleur	22
Figure 2.4 : Schéma synoptique de la commande en MLI-ST (triphase)	24
Figure 2.5 : Technique analogique	25
Figure 2.6 : Technique numérique	25
Figure 2.7 : Technique hybride	27
Figure 2.8 : Schéma électrique d'un filtre passe-haut	27
Figure 2.9 : Schéma électrique d'un filtre passe-bas	28
Figure 2.10 Schéma électrique d'un filtre passe-bande	28
Figure 2.11 : Schéma électrique d'un filtre éjecteur de bande a base d'amplificateur opérationnel	29

CHPITRE 3 : *Simulation Et Comparaison Des résultats*

Figure 3.1 : Schéma bloc d'un onduleur monophasé avec la commande pleine onde avec charge R.	32
Figure 3.2 : La tension de sortie d'onduleur.	33
Figure 3.3 : Le courant de sortie d'onduleur.	33
Figure 3.4 : Spectre d'harmonique de tension sortie commande plein onde avec charge R.	34
Figure 3.5 : Schéma block d'un onduleur monophasé commande pleine onde avec charge RL.	35
Figure 3.6 : La tension de sortie d l'onduleur charge RL.	35
Figure 3.7 : Spectre d'harmonique de tension sortie de la commande plein onde avec charge R.	36
Figure 3.8 : Le courant de sortie d'onduleur charge RL.	37

Figure 3.9 : Schéma bloc d'un onduleur monophasé avec la commande décalée avec charge résistive.	38
Figure 3.10 : Le courant de sortie d'un onduleur avec commande décalée charge R.	39
Figure 3.11 : La tension de sortie d'un onduleur avec commande décalée charge R.	39
Figure 3.12 : Spectre d'harmonique de tension de sortie commande décalée avec charge R.	40
Figure 3.13 : Schéma bloc d'un onduleur monophasé avec la commande décalée avec charge RL.	41
Figure 3.14 : Le courant de sortie d'un onduleur avec commande décalée charge RL.	41
Figure 3.15 : La tension de sortie d'un onduleur avec commande décalée charge RL.	42
Figure 3.16 : Spectre d'harmonique de tension de sortie commande décalée avec charge RL.	42
Figure 3.17 : Schéma bloc d'un onduleur triphasé commande en plein onde.	44
Figure 3.18 : Tension de sortie de 1 phase de l'onduleur triphasé command plein onde.	45
Figure 3.19 : Tension de sortie de 3 phases de l'onduleur triphasé command plein onde.	45
Figure 3.20 : Spectre d'harmonique de la tension de sortie de l'onduleur triphasé commande pleine onde.	46
Figure 3.21 : Courant de sortie de 1 phase de l'onduleur triphasé command plein onde.	47
Figure 3.22 : Courant de sortie de 3 phases de l'onduleur triphasé command plein onde.	47
Figure 3.23 : Tension de sortie entre 3 phases.	48
Figure 3.24 : Schéma bloc de la commande sinus-triangle modèle électrique.	49
Figure 3.25 : Signal de la commande.	50
Figure 3.26 : Signal d'interrupteur S1.	50

Figure 3.27 : Signal de tension de sortie.	51
Figure 3.28 : Schéma bloc de la commande sinus-triangle modèle mathématique.	51
Figure 3.29 : La tension simple de la phase 1 (V).	52
Figure 3.30 : La sortie de tension de trois phases.	52
Figure 3.31 : Spectre d'harmonique de tension de sortie de l'onduleur triphasé commande Sinus-triangle modèle mathématique.	53
Figure 3.32 : Schéma bloc de la commande sinus- hystérésis.	54
Figure 3.33 : La sortie de tension de trois phases.	55
Figure 3.34 : La sortie de signal de commande.	55
Figure 3.35 : Spectre d'harmonique de tension de sortie de l'onduleur triphasé commande sinus- hystérésis.	56
Figure 3.36 : Schéma bloc de la commande sinus-hystérésis avec filtre.	57
Figure 3.37 : Signal de commande.	57
Figure 3.38 : Signal de Sortie de 3 phases.	58
Figure 3.39 : Spectre d'harmonique de tension de sortie de l'onduleur triphasé commande sinus-hystérésis avec filtre.	58
Figure 3.40 : Schéma bloc de MAS a cage d'écureuil	60
Figure 3.41 : Schéma bloc de MAS alimenté par un onduleur sinus-triangle.	60
Figure 3.42 : La vitesse d'une MAS à vide utilise onduleur sinus-triangle.	61
Figure 3.43 : Le courant d'une MAS à vide utilise onduleur sinus-triangle.	61
Figure 3.44 : Le couple d'une MAS à vide utilise onduleur sinus-triangle.	62
Figure 3.45 : La vitesse d'une MAS en charge utilise onduleur sinus-triangle.	62
Figure 3.46 : Le courant d'une MAS en charge utilise onduleur sinus-triangle.	63

Figure 3.47 : Le couple d'une MAS en charge utilise onduleur sinus-triangle.	63
Figure 3.48 : Schéma bloc de MAS alimente par un onduleur commande par sinus-hystérésis.	64
Figure 3.49 : La vitesse d'une MAS à vide utilisent onduleur commande par sinus-hystérésis.	64
Figure 3.50 : Le courant d'une MAS à vide utilisent onduleur commande par sinus-hystérésis.	65
Figure 3.51 : Le couple d'une MAS à vide utilisent onduleur commande par sinus-hystérésis.	65
Figure 3.52 : La vitesse d'une MAS en charge utilisent onduleur commande par sinus-hystérésis.	66
Figure 3.53 : Le courant d'une MAS en charge utilisent onduleur commande par sinus-hystérésis.	66
Figure 3.54 : Le couple d'une MAS en charge utilisent onduleur commande par Sinus-hystérésis.	67
Figure 3.55 : Schéma bloc de MAS alimente par un onduleur commande par sinus hystérésis avec filtrage.	67
Figure 3.56 : La vitesse d'une MAS à vide utilisent onduleur sinus-hystérésis avec filtrage.	68
Figure 3.57 : Le courant d'une MAS à vide utilisent onduleur sinus-hystérésis avec filtrage.	68
Figure 3.58 : Le couple d'une MAS à vide utilisent onduleur sinus-hystérésis avec filtrage.	69

Figure 3.59 : La vitesse d'une MAS en charge utilisent onduleur sinus-hystérésis **69**
avec filtrage.

Figure 3.60 : Le courant d'une MAS en charge utilisent onduleur sinus-hystérésis **70**
avec filtrage.

Figure 3.61 : Le couple d'une MAS en charge utilisent onduleur sinus-hystérésis **70**
avec filtrage.

Liste des tableaux

CHPITRE 1 : Généralité sur les Onduleurs

Tableau 1.1 : Interrupteurs semi-conducteur de base de l'électronique de puissance. **6**

CHPITRE 3 : Simulation Et Comparaison Des résultats

Tableau 3.1 : La valeur des harmoniques (THD) des tensions d'un onduleur **37**
commande avec plein onde.

Tableau 3.2 : La valeur des harmoniques (THD) des tensions d'un onduleur **43**
commande avec Décalée.

Tableau 3.3 : La valeur des harmoniques (THD) des tensions obtenues **43**
par les différentes techniques des commandes (plein onde et décalée).

Tableau 3.4 : La valeur des harmoniques (THD) obtenues d'un onduleur **59**
triphase commande par les différentes techniques de commande.

Liste des abréviations

<i>GSM</i>	Global system for mobile
<i>GPS</i>	Global positioning system
<i>DC</i>	Direct courant
<i>AC</i>	Alternatif courant
<i>IGBT</i>	Insulated-gate bipolar transistor
<i>GTO</i>	Gate Turn Off
<i>BJT</i>	Bipolar Junction Transistor
<i>MOS</i>	Metal-oxide-semiconductor.
<i>MOSFET</i>	Metal-oxide-semiconductor field-effect transistor.
<i>MCTs</i>	Multi cable transit.
<i>MLI</i>	modulation de largeur d'impulsions
<i>THD</i>	total harmonic distortion
<i>D</i>	Le nombre de diodes.
<i>Q</i>	Le nombre d'interrupteur.
<i>TR</i>	Le nombre de Thyristors.
<i>K</i>	Cathode.
<i>G</i>	Gate.
<i>V_{ch}</i>	La tension
<i>I</i>	Source de courant.
<i>E</i>	Tension principale de l'onduleur.
<i>C</i>	Condensateur.
<i>L</i>	Inductance.
<i>KHz</i>	Kilohertz unit de fréquence.
<i>kW</i>	Kilowatt unit de puissance.
<i>MS</i>	Moteur synchrone.
<i>MAS</i>	Moteur Asynchrone.

<i>r</i>	Coefficient de réglage en tension.
<i>Ar</i>	Amplitude de la référence.
<i>AP</i>	Amplitude de la porteuse triangulaire.
<i>m</i>	Indice de modulation.
<i>fp</i>	La fréquence de la modulation.
<i>fr</i>	La fréquence de la référence.
<i>T</i>	La période de modulation.
<i>MLI-ST</i>	Modulation de largeur d'impulsions sinus triangulaire.

Introduction Générale

Dans le domaine de l'électricité, l'électronique de puissance s'impose comme un domaine crucial, influençant une multitude de secteurs clés tels que le réseau électrique, les systèmes de transport électrique et le transport humain par exemple : transport maritime, ferroviaires, urbain, et aussi dans l'énergie renouvelable et l'industrie. Dans une ère où l'énergie est devenue une place prépondérante dans le quotidien de l'homme, l'optimisation des performances des dispositifs d'électronique de puissance devient une nécessité impérieuse. En effet, ces dispositifs détiennent le pouvoir d'améliorer la qualité et l'efficacité du signal électrique, contribuant ainsi à une gestion plus efficace de l'énergie.

Au cœur des systèmes électrique, les convertisseurs électriques jouent un rôle essentiel dans la manipulation et la gestion de l'énergie. Fondés sur des composants semi-conducteurs et des éléments passifs (les résistances, les condensateurs et les inductances) [1], ces dispositifs permettent de transformer la forme du signal électrique, que ce soit la tension ou le courant. Cette capacité de conversion trouve une multitude d'applications dans les domaines industriels actuels. Ce qui nous donne quatre types de convertisseur soit :

- ✓ *Convertisseurs continu-continu (DC/DC) : Hacheur.*
- ✓ *Convertisseur continu-alternatif (DC /AC) : Onduleur.*
- ✓ *Convertisseur alternatif-continu (AC/DC) : Redresseur.*
- ✓ *Convertisseur alternatif-alternatif (AC/AC) : Gradateur.*

Un onduleur est un convertisseur statique, qui assure la conversion de signal électrique continue vers un signal alternatif [2]. Ces dernières années, l'utilisation des convertisseurs statiques s'est considérablement accrue dans une multitude d'applications, dont certaines exigent une alimentation électrique à haute tension, ce convertisseur caractérisé par une régulation facile et ayant de bonnes performances spectrales. Et au milieu de cette évolution est apparu des nouvelles techniques dites « multiniveaux », associées à des topologies de convertisseurs innovantes. Ces approches permettent de générer plusieurs niveaux de tension à la sortie du convertisseur, le nombre de composants semi-conducteurs nécessaires à la réalisation de ces topologies multiniveaux augmente proportionnellement au nombre de niveaux de tension désirés [5].

Les chercheurs ont développé plusieurs stratégies de commande des onduleurs pour trouver la meilleure solution adaptée aux besoins spécifiques d'une application donnée, cette

évolution apparue dans les convertisseurs multiniveaux (2 niveaux, 3 niveaux ... etc.) [18]. Sujet de ce mémoire, cette structure prenait plusieurs avantages et élève l'esprit de recherche

En analysant les performances de différentes stratégies de commande en termes de critères tels que l'efficacité énergétique, la qualité de la tension de sortie, la stabilité du système.

Parmi les méthodes utilisées pour optimiser les performances de sorties d'onduleur est de commande et jeux sur le nombre des niveaux.

Dans ce travail, nous allons examiner les différentes stratégies de commande des onduleurs, on va comparer les stratégies d'entre elles afin d'identifier celle qui offre les meilleures performances.

Cette étude sera basée sur la simulation sous Matlab /Simulink qui a été utilisée pour effectuer les simulations numériques.

L'objectif de notre étude est : de trouver une bonne stratégie de commande optimale pour un onduleur qui donne de meilleur résultat.

Ce mémoire est organisé autour de premier chapitre, sera consacré à la définition d'onduleur et de son principe de fonctionnement avec les différents types d'onduleurs et le choix des composants et à la fin le domaine d'application des onduleurs.

Le deuxième chapitre présente les différentes techniques de commande des onduleurs (plein onde, sinus-triangle, sinus-hystérésis et MLI) et présente les harmoniques et les types de filtre.

La simulation et l'étude de résultats, et la comparaison entre les commandes seront présenté au dernier chapitre.

Finalement, on terminera notre travail par une conclusion générale et quelques perspectives.

PARTIE I

THEORIQUE

CHAPITRE 1 :

Généralité sur les Onduleurs

1.1 Introduction

Dans le domaine de l'électronique de puissance, l'onduleur est un composant essentiel. Il constitue l'élément principal de la plupart des variateurs de vitesse des machines à courant alternatif.

Ce chapitre présente l'onduleur de tension ainsi que son principe de fonctionnement, nous explorerons les différents types d'onduleurs, les choix des composants et le domaine d'application des onduleurs.

1.1.1 Les convertisseurs

L'électronique de puissance, ou plus précisément « l'électronique de conversion d'énergie », est un domaine relativement récent, ayant moins de 50 ans d'existence. Son expansion a été telle qu'aujourd'hui, près de 15 % de l'énergie électrique produite est convertie sous une forme ou une autre grâce à cette technologie. Au cours de ces années, la taille, le poids et le coût des convertisseurs n'ont cessé de diminuer, principalement grâce aux progrès réalisés dans le domaine des interrupteurs électroniques [3].

Les convertisseurs sont des dispositifs ayant pour rôle la conversion du courant et de la tension électrique d'un certain genre en un courant d'un autre genre. Il existe plusieurs types des convertisseurs, représentés comme suit :

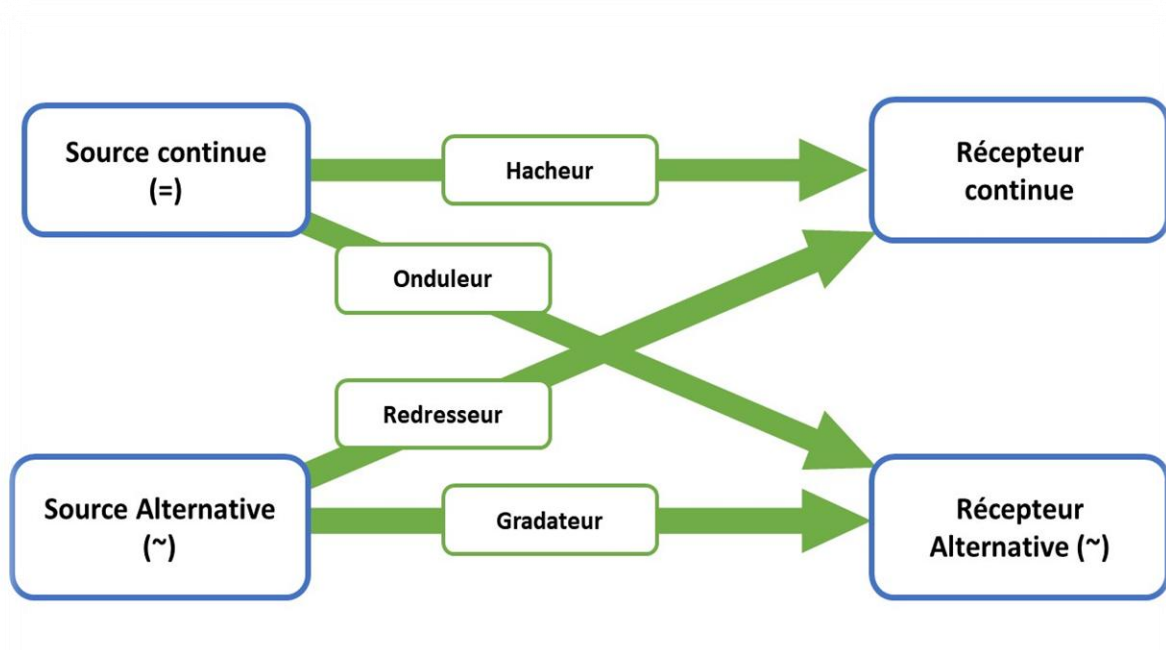


Figure 1.1 : Classification des convertisseurs statiques.

L'électronique de puissance, fondée sur le principe de la commutation, exploite les caractéristiques des interrupteurs idéaux : fermés (résistance nulle, tension aux bornes nulle) ou ouverts (résistance infinie, courant nul traversant) [4].

Ces interrupteurs idéaux ne dissipent aucune énergie, évitant ainsi toute perte. Associés à des éléments de filtrage passifs et purement réactifs (sans résistance interne), ils permettent théoriquement une conversion de tension ou de courant sans aucune perte d'énergie, préservant ainsi l'énergie initiale. Pour ce faire, la tension et/ou le courant sont découpés à une fréquence très élevée par rapport à celle du système, puis lissés pour en extraire la valeur moyenne.

En pratique, des pertes de l'ordre de 2 à 10 % sont à prévoir en raison des imperfections des composants physiques. Toutefois, ces pertes modérées ont contribué à l'essor de cette technologie dans les systèmes à haute puissance, offrant une dissipation thermique efficace sans recours à des solutions coûteuses. Progressivement, l'électronique de puissance s'est répandue dans de nombreux domaines où la minimisation des pertes est cruciale pour prévenir la surchauffe, comme dans les ordinateurs, et où un rendement élevé est nécessaire pour conserver l'énergie source, comme dans les dispositifs alimentés par batteries (tels que les GSM, GPS et ordinateurs portables).

Un convertisseur de puissance idéal, sans pertes, serait constitué uniquement d'interrupteurs parfaits et de dipôles réactifs tels que des condensateurs et des inductances, sans aucune résistance parasite. Ces dipôles réactifs sont des composants de stockage d'énergie dont la taille et le coût sont inversement proportionnels à la fréquence de fonctionnement. Ce chapitre se concentre sur le convertisseur DC-AC, en mettant particulièrement l'accent sur le fonctionnement de l'onduleur monophasé et les diverses techniques de contrôle disponibles.

1.2 Définition de l'onduleur

L'onduleur est un convertisseur statique permettant de faire un échange d'énergie entre une source de tension continue DC fournie par une batterie ou un redresseur, et une source de tension alternative AC pour alimenter des charges en courant alternatif.

L'onduleur de tension permet de fournir une tension alternative d'amplitude et de fréquence réglables à partir d'une source de tension continue. Il est constitué de cellule de commutation généralement à base de transistors ou thyristors pour les grandes puissances [5].

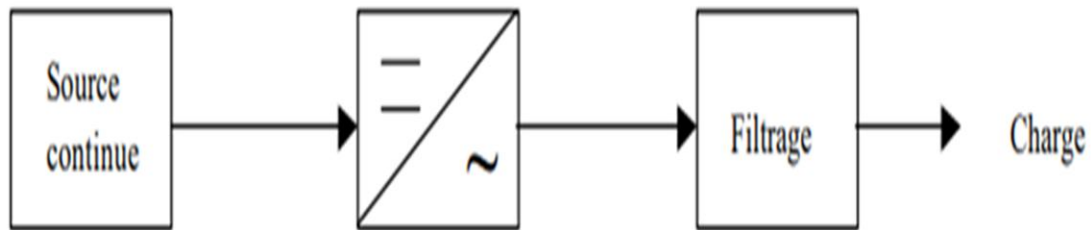


Figure 1.2 : Schéma symbolique d'un onduleur.

1.3 Principe de fonctionnement d'onduleur

1.3.1 Interrupteur semi-conducteur

Lorsque les semi-conducteurs de puissance sont assimilés à des interrupteurs idéaux, l'étude du fonctionnement des convertisseurs de puissance est considérablement simplifiée. Cette méthode permet de se focaliser moins sur les aspects détaillés du fonctionnement des convertisseurs.

Les semi-conducteurs de puissance se répartissent en trois grandes catégories : Diodes, thyristor et interrupteurs commandables à l'ouverture et à la fermeture.

Dans les interrupteurs commandables, il ya des catégories inclus de nombreux types de composants. Trois types d'interrupteurs sont tous unidirectionnels. Le courant ne peut les traverser que dans un sens. Il est envisageable d'agencer et d'associer deux interrupteurs en parallèle pour créer un interrupteur bidirectionnel.

Le Tableau 1.1 est un récapitulative des interrupteurs semi-conducteurs le plus utilisés dans l'électronique de puissance [5].

**CHAPITRE 1:
GÉNÉRALITÉ SUR LES ONDULEURS**


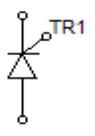
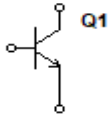
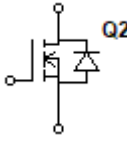
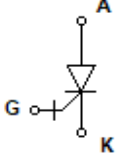
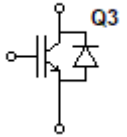
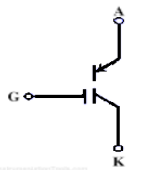
<i>Semi-conductor</i>	<i>Overture /Fermeture</i>	<i>Symbol</i>
Diodes	Etats fermé ou ouvert contrôlés par le circuit de puissance	
Thyristors	Fermé par un signal de commande, mais doit être ouvert par le circuit de puissance.	
Transistors Bipolaires à Jonctions (BJT).	Interrupteurs Commandable à l'ouverture et à la fermeture.	
Transistors à effet de champ (Metal-Oxyde Semi-conducteur Field effet transistor – MOSFETs).		
Thyristors commandés à l'ouverture (Gate-Turn-Off Thyristors–GTO Thyristors).		
Transistors bipolaires à grille isolée (Insulated Gate Bipolaire Transistors – IGBTs).		
Thyristors MOS Commandés(MOS-Controlled Thyristors – MCTs).		

Tableau 1.1 : Interrupteurs semi-conducteur de base de l'électronique de puissance.

Il ya deux états dans un interrupteur : état ouvert ou état fermé. Dans la position ouverte, on dit que l'interrupteur ne fait pas passer le courant ou OFF. Dans la position fermée, on dit que l'interrupteur passant ou ON.

La fermeture d'un interrupteur à semi-conducteur établit une connexion entre les bornes qu'il relie, tandis que son ouverture interrompe cette liaison.

Lorsqu'il se ferme, un interrupteur à semi-conducteur fait en sorte que les potentiels des deux bornes qu'il relie soient égaux, ce qui provoque une discontinuité du potentiel d'au moins l'une de ces bornes, à moins que les potentiels ne soient déjà égaux à ce moment-là, la tension aux bornes de l'interrupteur est nulle.

Lors de son ouverture, la rupture de la liaison entre les deux bornes reliées par l'interrupteur oblige le courant qui circulait d'une borne à l'autre à s'annuler. Ce courant subit une interruption, sauf s'il était nul à ce moment précis.

Ces contraintes sont acceptables si elles sont conformes à la continuité de l'énergie au sein du circuit dans lequel les interrupteurs sont intégrés. En réalisation, cela implique généralement de vérifier que les commutations ne provoquent pas :

- une discontinuité de la tension aux bornes d'un ou plusieurs condensateurs,
- une discontinuité du courant dans une ou plusieurs inductances.

1.3.2 Cellules de commutation

Le convertisseur le plus petit utilise deux interrupteurs comme éléments fondamentaux pour la commutation. L'interrupteur doit opérer de manière opposée pour garantir un fonctionnement correct.

La cellule de commutation représentée ici établit une liaison entre une source de tension et une source de courant. Il est également possible d'inverser cette configuration, en connectant une source de courant à l'entrée et une source de tension à la sortie [6].

On voit que :

$$V_{S2} = V \text{ et } I_{S1} = I \text{ si } S1 \text{ est passant (ON)}$$

$$V_{S1} = V \text{ et } I_{S2} = -I \text{ si } S2 \text{ est passant (ON)}$$

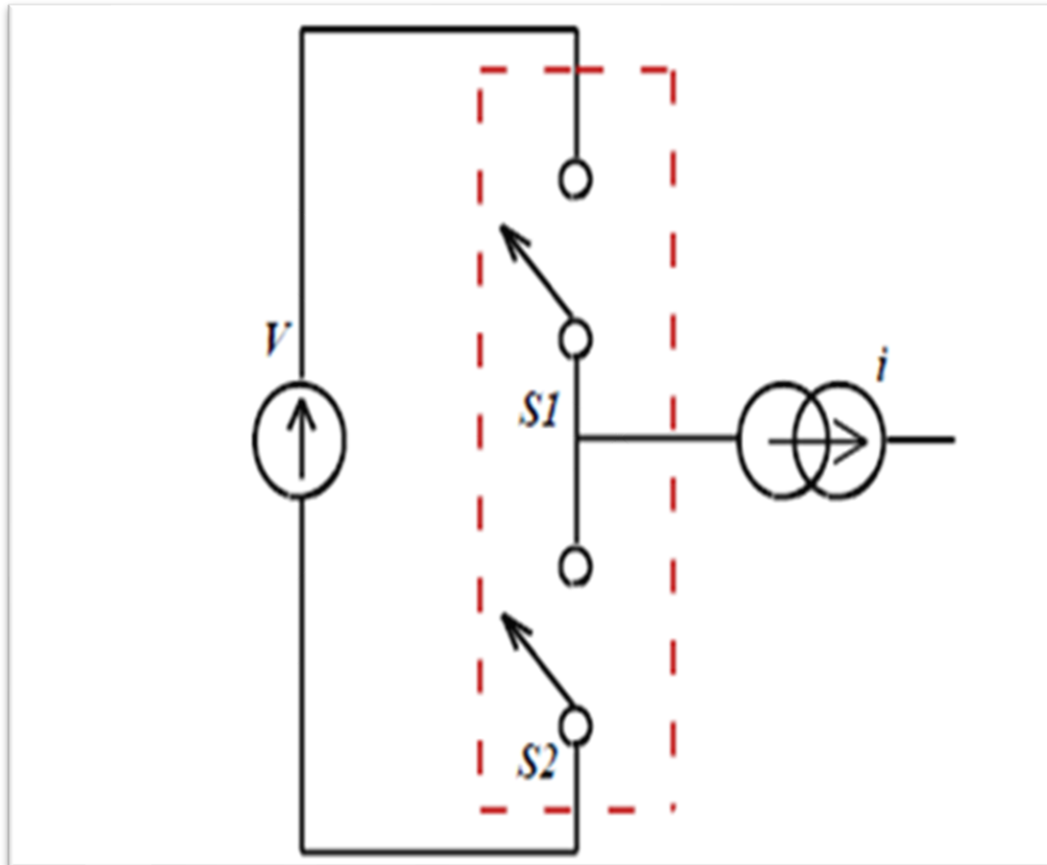


Figure 1.3 : Cellule de commutation élémentaire d'un convertisseur.

Lorsqu'un interrupteur dans une cellule de commutation est bloqué, la tension à ses bornes est identique à celle de la source de tension. Inversement, lorsqu'un interrupteur conduit, le courant qui le traverse est essentiellement le même que celui de la source de courant, à l'exception du signe près.

Si la source de tension peut fournir du courant dans les deux sens (bidirectionnelle), l'interrupteur doit également pouvoir supporter un courant dans les deux sens.

De même, si la source de courant peut fournir de la tension dans les deux sens. L'interrupteur doit également pouvoir supporter une tension dans les deux sens.

En conclusion, la réversibilité des commutateurs dépend de la réversibilité des sources, en tension pour une source de tension et en courant pour une source de courant.

1.3.3 Les onduleurs monophasés

Ce type d'onduleurs est destiné pour alimenter des charges alternatives monophasées, ce sont utilisés pour des applications de faible puissance. On distingue deux configurations de base : en demi-pont ou en pont complet [7].

1.3.3.1 L'onduleur monophasé en demi-pont

Parmi les configurations possibles, celle illustrée à la Figure 1.5 est la plus simple. Elle utilise une cellule de commutation composée de deux interrupteurs complémentaires, Q_1 et Q_2 , et de deux diodes, D_1 et D_2 .

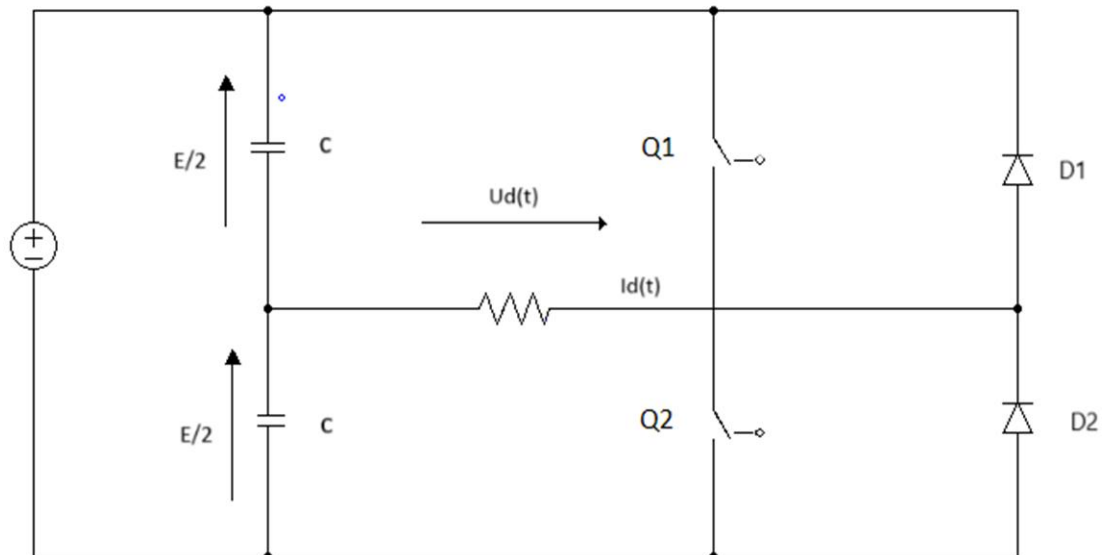


Figure 1.4 : Onduleur monophasé en demi-pont.

Les diodes sont connectées en parallèle avec les transistors afin de garantir la continuité du courant. En effet, après le blocage de Q_1 , le courant I_{ch} continue de circuler via la diode D_2 qui s'active spontanément.

- Quand le transistor Q_1 conduit, La tension est appliquée à la charge $V_{ch} = E/2$. Le courant I_{ch} a augmente exponentiellement selon une constante de temps.
- Quand la désactivation du transistor Q_1 , la diode D_2 prend le relais pour maintenir le flux de courant. Lorsque ce courant atteint 0, un signal de commande est envoyé à la base de Q_2 . La diode D_2 se bloque, et le courant I_{ch} continue d'augmenter dans la direction opposée.
- Quand la diode D_2 bloqué, la diode D_1 prend la relève pour que la charge retrouve une tension $I_{ch} = E/2$.

Au passage du courant par 0, la diode D_1 est activée et le cycle commence. La Figure 1.6 illustre les allures de courant et de tension :

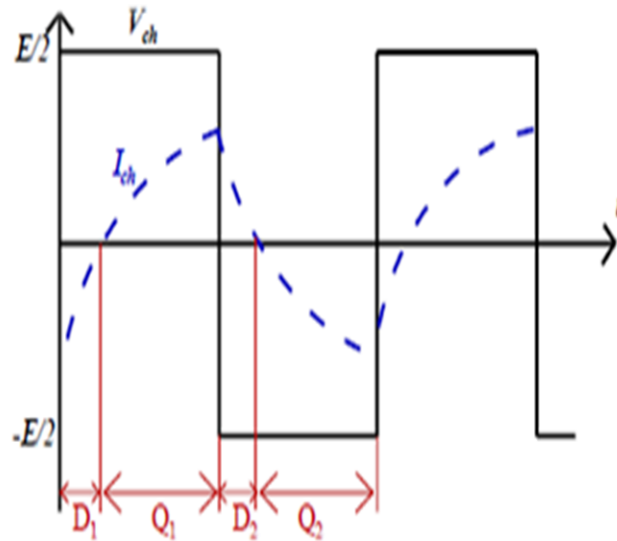


Figure 1.5 : Allure de courant et tension pour l'onduleur monophasé en demi-pont.

1.3.3.2 L'onduleur monophasé en pont

Le montage de ce type d'onduleur comprend quatre transistors qui peuvent être remplacés par des thyristors utilisés comme interrupteurs électroniques ainsi que quatre diodes montées en parallèle inverse aux bornes des transistors. Les circuits d'amorçage ou de blocage des transistors ne sont pas représentés. L'avantage de ce montage en pont réside dans l'utilisation d'une seule source de tension E [8].

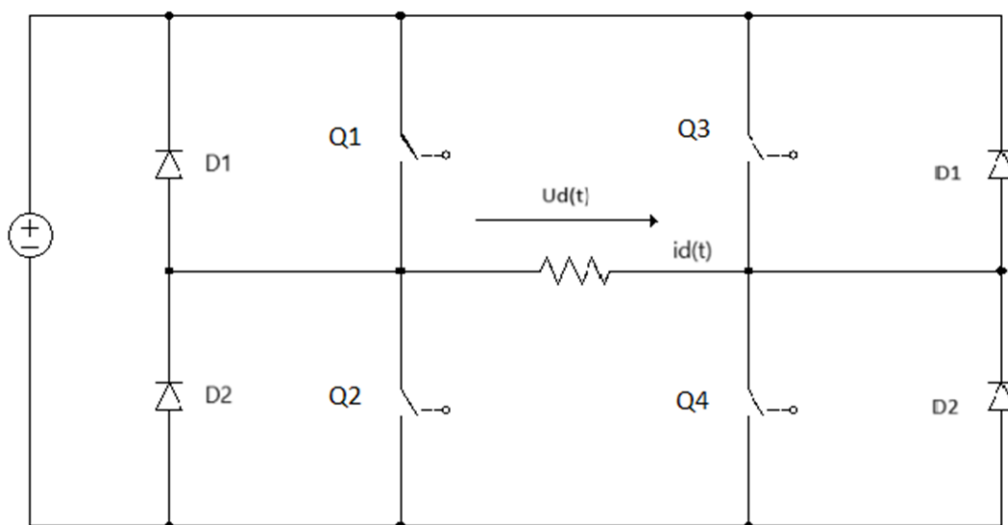


Figure 1.6 : Onduleur monophasé en pont.

Dans le cas d'une commande symétrique, l'amorçage des transistors Q_1 et Q_4 a lieu en même temps, et il en est de même pour Q_2 et Q_3 . La tension de sortie est rectangulaire, et sa valeur efficace est égale E .

Lorsque les transistors Q_1 et Q_4 sont amorcés, la charge voit $V_{ch} = E$ et le courant augmente exponentiellement (Charge RL). En bloquant ces derniers (Circuit de commutation forcée), la continuité de courant sera assurée par les diodes D_2 et D_3 et la charge voit $V_{ch} = -E$.

Au passage du courant par 0, on amorce Q_2 et Q_3 . Le courant continue à circuler dans la charge en sens opposé. En bloquant ces derniers, les diodes D_1 et D_4 conduisent et $V_{ch} = E$. Lorsque le courant passe par 0, on réamorce Q_1 et Q_4 .

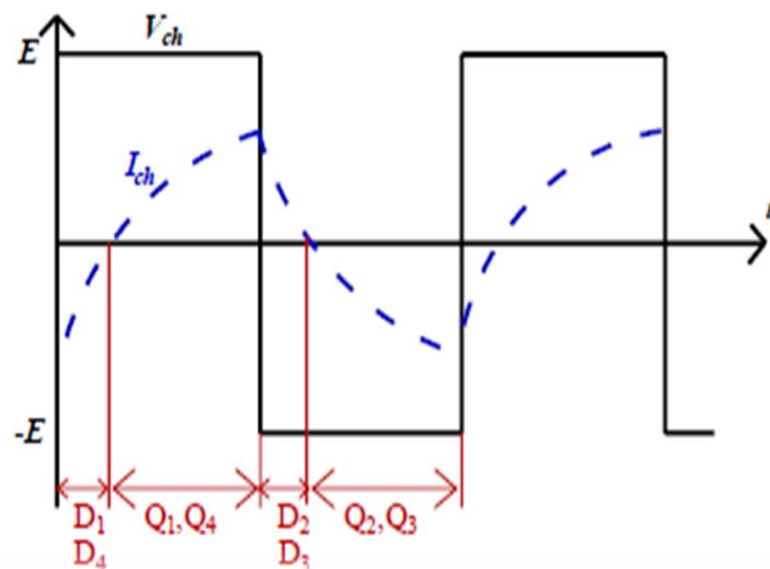


Figure 1.7 : Allure de courant et tension pour l'onduleur monophasé en pont.

1.3.4 Les onduleurs triphasés

Les onduleurs triphasés (Figure 1.9) couvrent la gamme des moyennes et des fortes puissances. L'objectif de cette topologie est de fournir une source de tension triphasée, dont l'amplitude, la phase et la fréquence sont contrôlables [9].

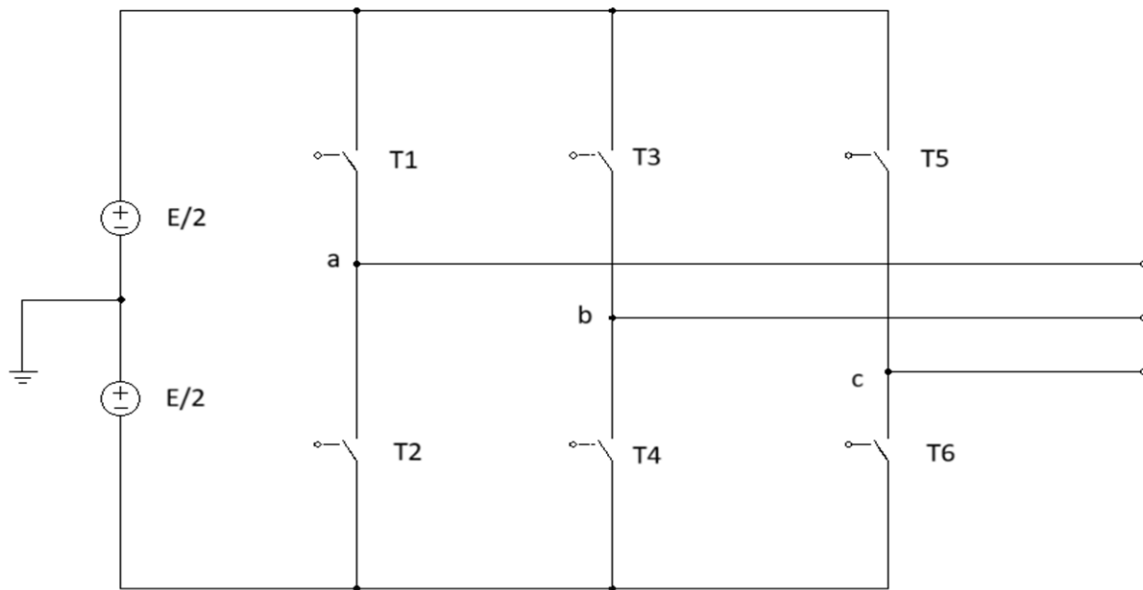


Figure 1.8 : Schéma de principe d'un onduleur triphasé de tension.

L'onduleur de tension triphasé est composé de trois bras. Chaque bras a deux interrupteurs bidirectionnels, qui fonctionnent de manière complémentaire pour éviter le court-circuit de la source de tension continue à l'entrée de l'onduleur, ou l'ouverture de la charge de l'onduleur considérée comme une source de courant.

L'interrupteur bidirectionnel peut être réalisé par un transistor de puissance en antiparallèle avec une diode de puissance. La source de tension continue à l'entrée de l'onduleur peut être obtenue à la sortie d'un redresseur lié à un réseau alternatif, en passant par un filtre capacitif [10].

1.4 Les différents types d'onduleurs

Il existe plusieurs de schémas d'onduleurs, chacun adapté à des applications spécifiques ou permettant d'atteindre des performances recherchées. Les onduleurs sont généralement classés en fonction des modes de commutation de leurs interrupteurs [11].

Il ya trois grandes catégories sont comme suite :

- Onduleur autonome
- Onduleur non autonome
- Onduleur a résonance

1.4.1 Onduleur autonome

C'est un système qui nécessite des composants commandes à la fois à la fermeture et à l'ouverture, de fréquence variable, dont les instants de commutations sont imposés par des circuits externes la charge peut être de n'importe quel type, et cet onduleur n'est pas réversible [12].

Il existe deux catégories d'onduleurs autonomes :

- Les onduleurs de tension alimentée par une source de tension continue.
- Les onduleurs de courant alimentés par une source de courant continue.

➤ **Les Onduleurs de courant :**

Lorsqu'il fonctionne en source de courant, le redresseur fournit un courant constant à l'onduleur, une inductance de lissage l'aide à maintenir le courant constant. La figure qui suit représente un convertisseur avec un onduleur de courant [12].

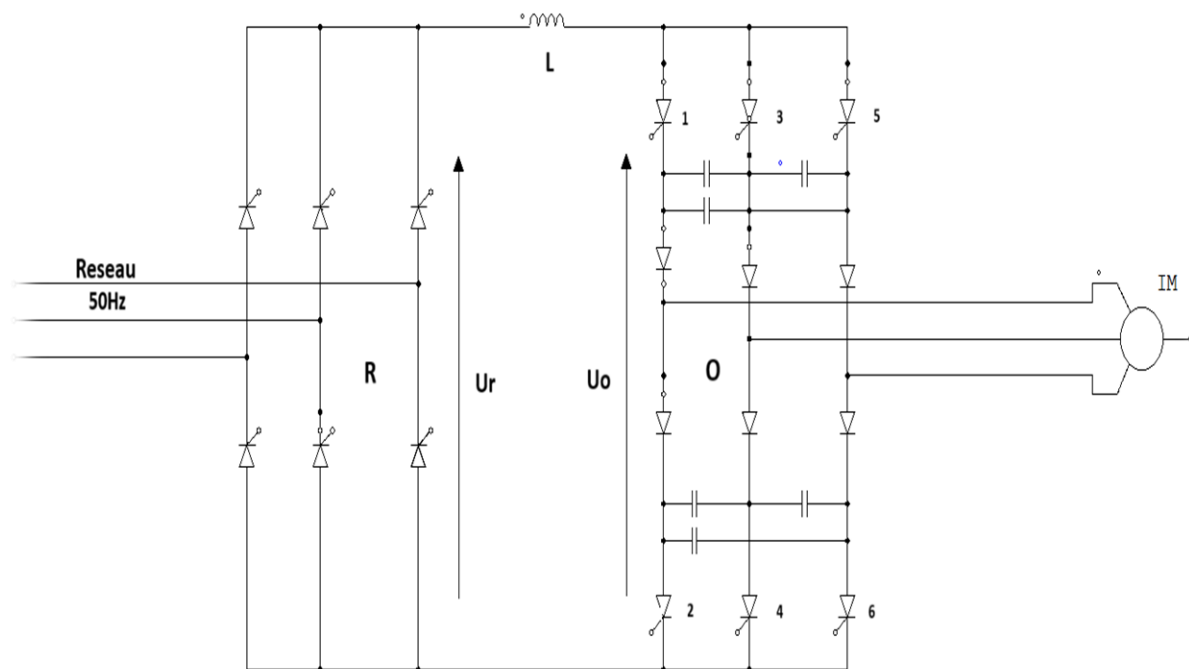


Figure 1.9 : Association redresseur/onduleur de courant.

➤ **Les onduleurs de tension :**

Lorsqu'il fonctionne en source de tension, le redresseur fournit une tension constante à l'onduleur. La présence d'un condensateur dans le circuit de liaison aide alors à maintenir une tension constante à l'entrée de l'onduleur [12].

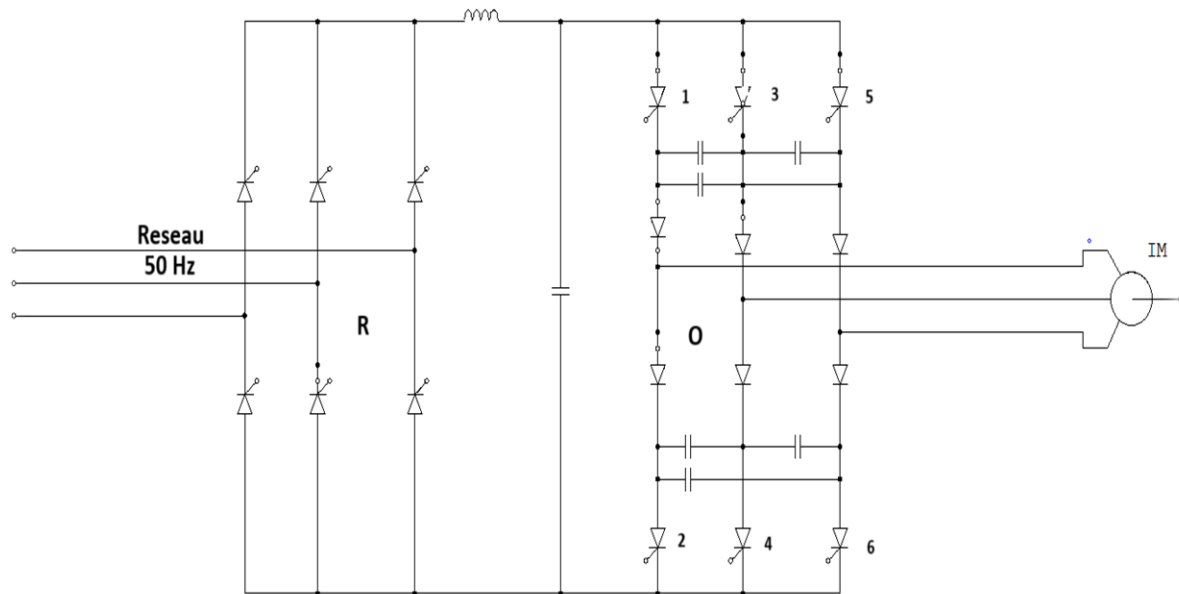


Figure 1.10 : Association redresseur/onduleur de tension.

Pour alimenter une charge ordinaire d'impédance très variable à partir d'un redresseur, on opte généralement pour des onduleurs de tension. Cette décision découle de plusieurs raisons:

- Le fonctionnement de l'onduleur de tension est principalement influencé par les imperfections de la source continue, tandis que celui de l'onduleur de courant est plus affecté par celles de la charge.
- Ni l'onduleur de tension ni celui de courant ne produisent directement une tension de sortie sinusoïdale, nécessitant ainsi l'utilisation d'un filtre de sortie. Toutefois, avec l'onduleur de tension, la tension à filtrer est préalablement déterminée par la source continue, facilitant ainsi le processus de filtration. En revanche, avec l'onduleur de courant, la tension à filtrer dépend de la charge, ce qui peut compliquer le filtrage.

1.4.2 Onduleur non autonome

Dans ce cas, les composants utilisés peuvent être de simples thyristors commandés uniquement à la fermeture et la commutation est « naturelle » contrairement à l'onduleur autonome. L'application principale de ce type d'onduleur se trouve dans les variateurs pour

moteurs synchrones de très forte puissance où les thyristors sont souvent les seuls composants utilisables [13].

1.4.3 Onduleurs à résonance

Les onduleurs à résonance se distinguent par leur fonctionnement à un créneau par alternance, des onduleurs de tension ou de courant. Ils opèrent dans des conditions spécifiques où la charge doit être un circuit oscillant peu amorti. La commande des interrupteurs s'effectue à une fréquence voisine de la fréquence de résonance de la charge. En cas de variation de cette fréquence, il est nécessaire d'ajuster la fréquence de commande en conséquence. Donc l'onduleur doit être piloté par la charge, il n'est plus autonome [14].

1.5 Choix des composants

Les composants de l'électronique de puissances (interrupteurs) sont déterminés par les niveaux de la puissance et la fréquence de commutation. En règle générale, plus les composants sont rapides, plus la puissance commutée est faible et inversement. A titre indicatif, les transistors MOSFET sont considérés comme des composants très rapides mais de puissance relativement faible. Les transistors bipolaires sont moins rapides que les transistors MOSFET mais d'avantage plus puissants (quelques kHz à une dizaine de kW) [15,16].

Les transistors IGBT sont des composants de gamme standard (jusqu'à 20 kHz à des dizaines de kW). Les thyristors GTO commutent les grandes puissances à une vitesse très lente. Ces composants sous indiqués sont du type commandable à l'ouverture et à la fermeture ; ce qui n'est pas le cas pour le thyristor classique [15,16].

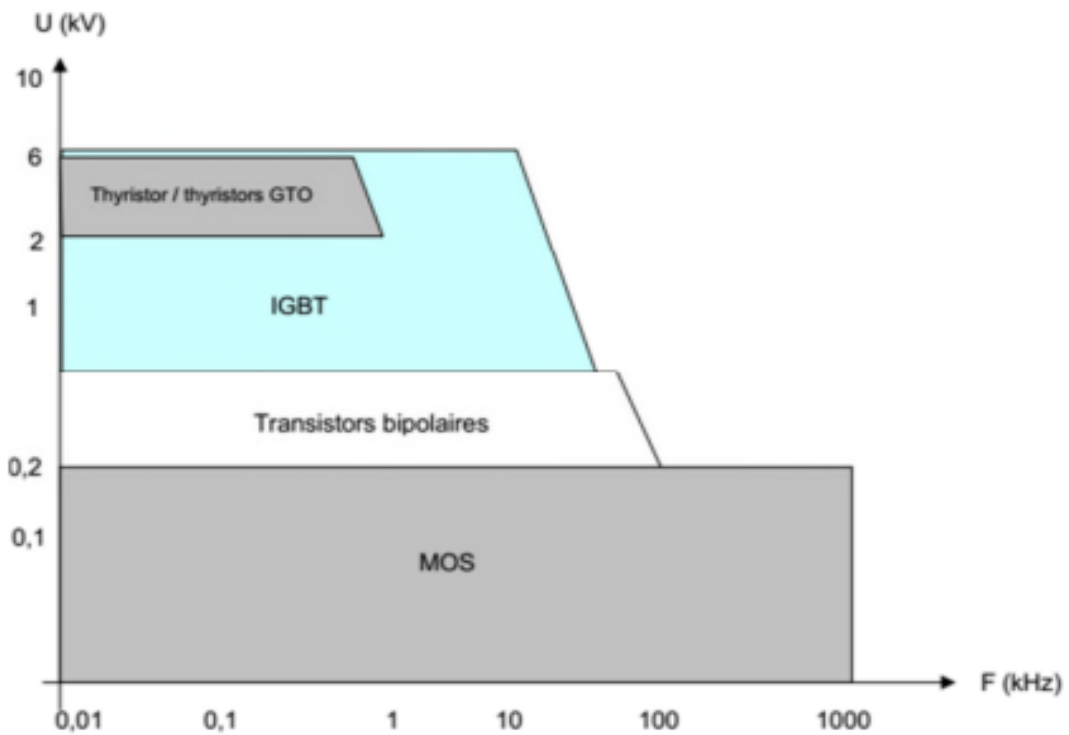


Figure 1.11 : Classification des commutateurs de puissance selon la tension et la fréquence [17].

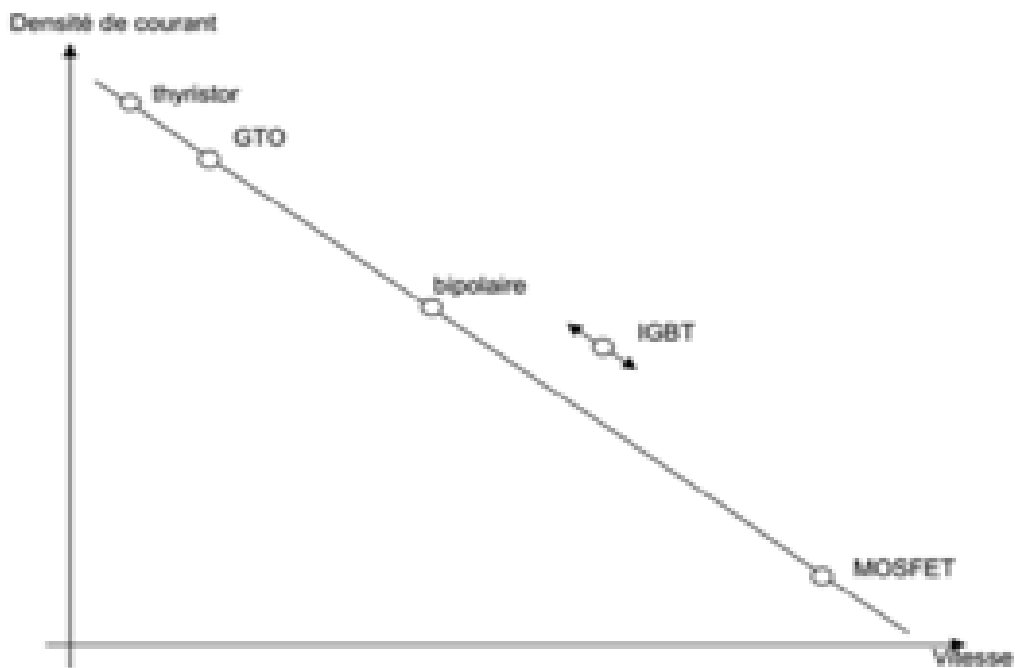


Figure 1.12 : Classification des commutateurs de puissance selon la densité de courant et la rapidité de commutation [17].

1.6 Domaine d'application des onduleurs

1.6.1 Réglage de la vitesse de rotation des moteurs synchrones

La vitesse de rotation d'un moteur synchrone est directement proportionnelle à la fréquence des courants qui le traversent. Pour modifier cette vitesse, il faut donc ajuster la fréquence de la tension qui alimente le moteur [14].

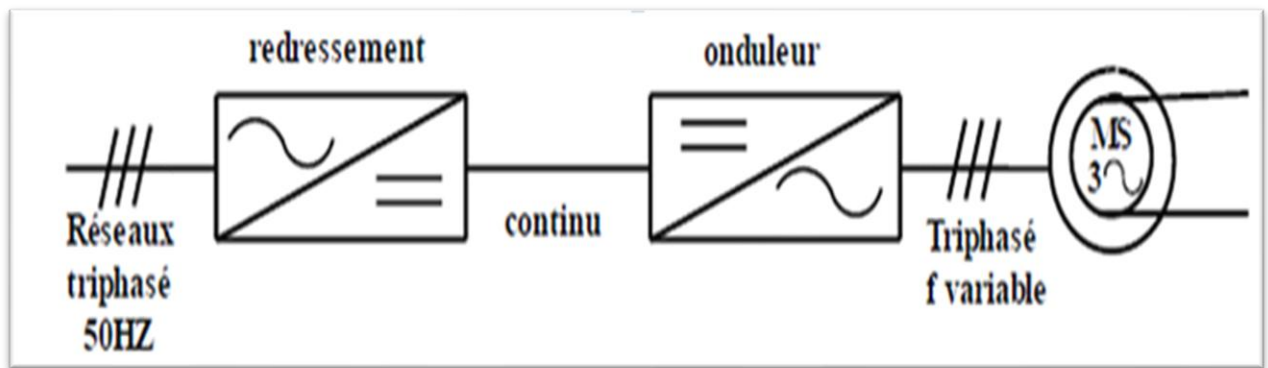


Figure 1.13 : Principe de réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone.

Remarque :

Afin de maintenir la puissance nominale du moteur malgré les variations de fréquence, il est impératif de conserver le rapport (f/V) constant. En d'autres termes, une augmentation de la fréquence doit s'accompagner d'une augmentation proportionnelle de la tension d'alimentation.

1.6.2 Alimentation de secours

Dans la coupure de courant, un onduleur prend le relais en fournissant une alimentation continue aux machines à partir de batteries. Dans le domaine informatique professionnel, l'utilisation d'un onduleur est essentielle pour prévenir la perte de données et d'informations en cas de panne du réseau électrique [14].

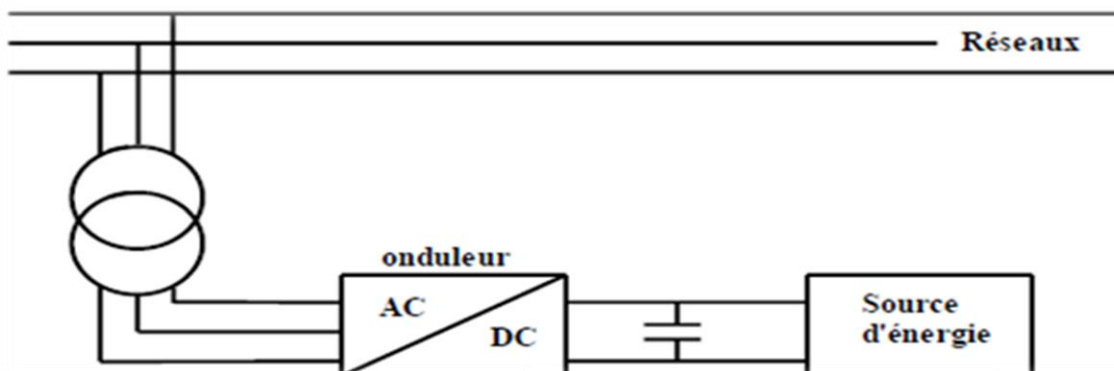


Figure 1.14 : Alimentation de secours.

1.6.3 Transfert d'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes

L'échange d'énergie électrique entre différents pays s'effectue au moyen de redresseurs et d'onduleurs. Ces systèmes permettent de connecter les réseaux électriques de différents pays. Cependant, la différence de fréquence entre les réseaux nécessitent une adaptation afin d'assurer un transfert d'énergie fluide sans pertes [14].

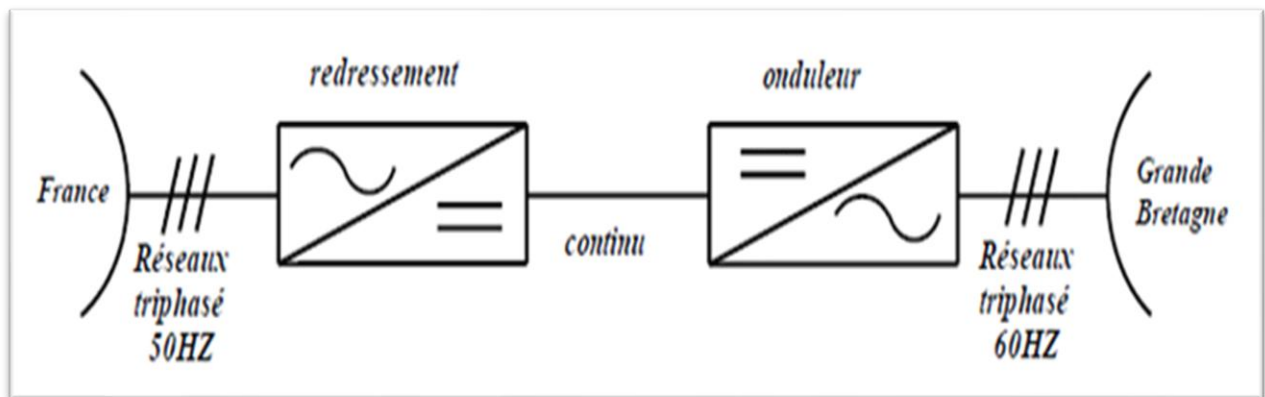


Figure 1.15 : Transfert de l'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes.

1.6.5 La protection des équipements

Les onduleurs ont un rôle crucial dans la protection des équipements électriques dans diverses industries contre les perturbations.

1.6.6 Les installation photovoltaïques

Le raccordement des panneaux photovoltaïques au réseau électrique à travers les onduleurs assurent la conversion du courant continu produit par les panneaux en courant alternatif compatible avec le réseau, tout en optimisant la quantité d'énergie injectée.

1.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté de manière générale les principes fondamentaux d'un onduleur, le choix des composants ainsi que les domaines d'application des onduleurs. Il est essentiel de comprendre les différents types d'onduleurs, leurs principes de fonctionnement et leurs composants associés pour garantir une utilisation et une sélection optimales dans diverses applications.

Chapitre 2 :

*Différentes techniques de
commande des onduleurs*

2.1 Introduction

Les onduleurs sont des dispositifs électroniques qui convertissent un courant continu (DC) en un courant alternatif (AC). Ils sont utilisés dans une large gamme d'applications, notamment les systèmes d'alimentation solaire, les alimentations sans coupure et les véhicules électriques. La commande des onduleurs est un domaine crucial pour garantir leur bon fonctionnement et optimiser leurs performances.

Dans ce chapitre, nous allons examiner les techniques de commande des onduleurs, présenter les harmoniques ainsi que les filtres, et citer les différents types de filtres disponibles.

2.2 Techniques de commande des onduleurs

Les onduleurs de tension peuvent être pilotés selon plusieurs stratégies. À basse fréquence, ils sont pilotés en pleine onde, où le signal de commande est à la fréquence de la tension désirée en sortie, et la source continue doit être réglable. À haute fréquence, ils sont pilotés en modulation de largeur d'impulsion. Cette dernière stratégie permet de régler à la fois l'amplitude et la fréquence tout en maintenant la source continue constante.

Afin de produire une tension de sortie proche de la sinusoïde, différentes stratégies de commande ont été proposées par différents auteurs pour l'onduleur de tension. Nous étudions les stratégies suivantes :

- Commande en pleine onde.
- Commande sinus-triangle.
- Commande par hystérésis.
- Commande à modulation de largeur d'impulsion programmée (MLI) [18].

2.2.1 Commande en pleine onde

Pour illustrer le fonctionnement de l'onduleur, il est intéressant d'étudier le comportement en pleine onde (180°). Ce fonctionnement nous permet de mieux comprendre les autres stratégies de commandes. Cette commande est appelée aussi la commande à six étapes. Dans ce type de commande chaque transistor conduit pendant (180°). Il existe six modes de fonctionnement dans chaque cycle, et chaque mode duré (60°) les transistors sont classés de la manière dans laquelle ils reçoivent les séquences de déplace l'un de l'autre de (60°) [19].

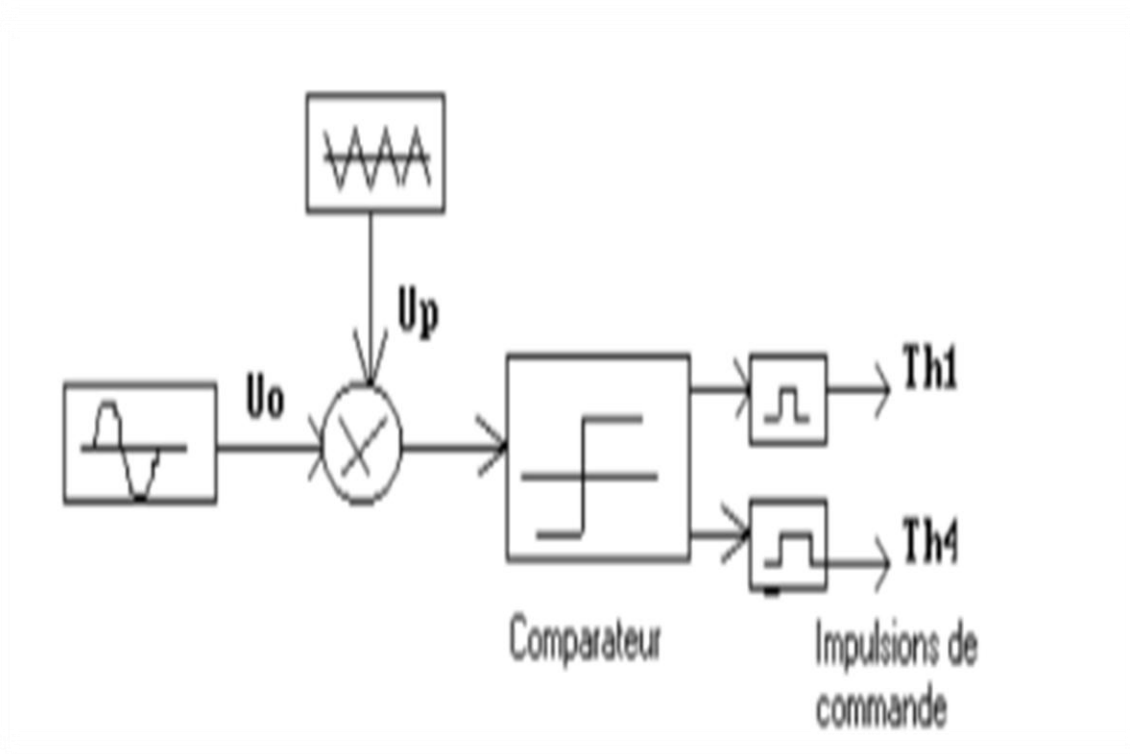


Figure 2.1 : Schéma synoptique de la loi de modulation triangle-sinusoidale.

Dans un onduleur triphasé, les tensions de sortie peuvent être exprimées par les équations suivantes :

Pour la phase A : $V_a(t) = V_m \sin(\omega t)$

Pour la phase B : $V_b(t) = V_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3})$

Pour la phase C : $V_c(t) = V_m \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3})$

Où V_m est l'amplitude maximale de la tension et ω est la fréquence angulaire.

La commande en pleine onde signifie que chaque interrupteur d'un onduleur est activé pendant une demi-période, par exemple, pour un onduleur à deux niveaux, les signaux de commande peuvent être définis comme suit :

- Interrupteur K1 est fermé pour $\omega t \in [0; \pi]$
- Interrupteur K2 est fermé pour $\omega t \in [\frac{2\pi}{3}; \frac{5\pi}{3}]$
- Interrupteur K3 est fermé pour $\omega t \in [0; \frac{\pi}{3}] \cup [\frac{4\pi}{3}; \pi]$

2.2.2 Commande sinus-triangle

La modulation par largeur d'impulsion est effectuée en comparant une onde modulée de basse fréquence (tension de référence) avec une onde porteuse de haute fréquence en forme de triangle. Les moments de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante, la fréquence de commutation des interrupteurs étant définie par la porteuse [20].

En triphasé, trois références sinusoïdales déphasées de $\frac{2\pi}{3}$ à la même fréquence f sont utilisées.

Comme à la sortie de l'onduleur la tension n'est pas purement sinusoïdale, elle contient des harmoniques qui génèrent des parasites et entraînent des pertes supplémentaires. La modulation par largeur d'impulsion (MLI) permet de remédier à ces problèmes et présente les avantages suivants :

- Variation de la fréquence de la tension de sortie.
- Élimination de certaines harmoniques de tension.

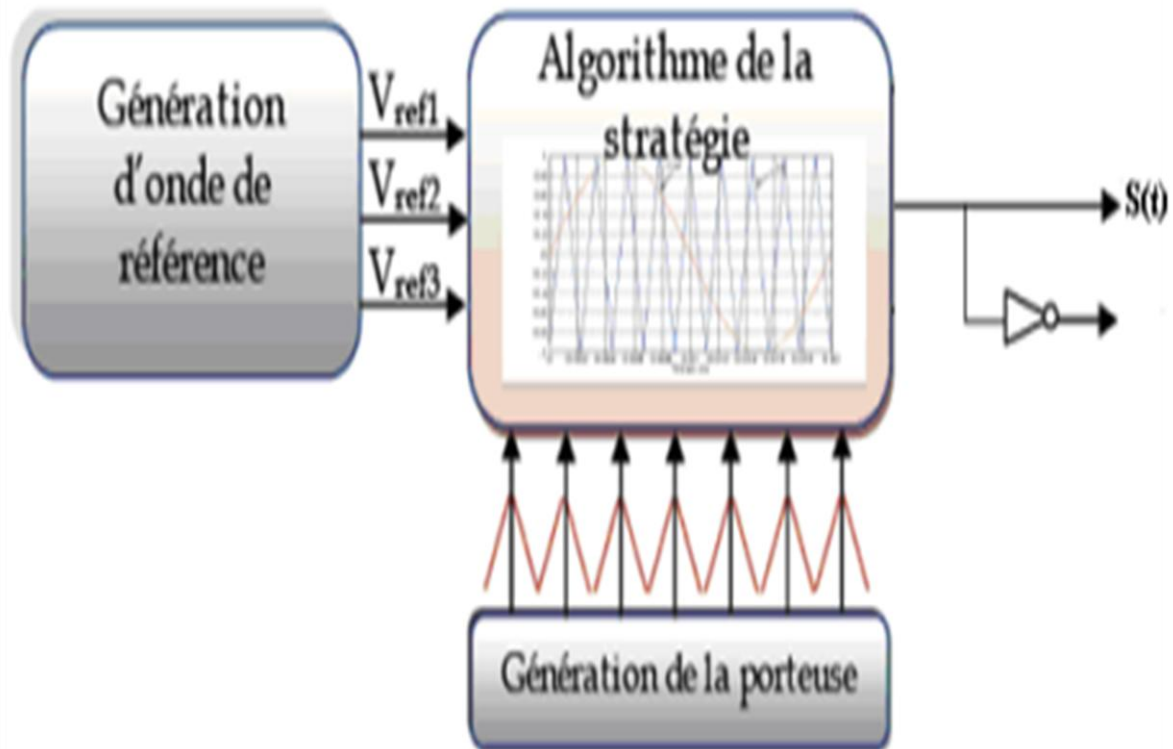


Figure 2.2 : Principe de la commande MLI sinus-triangle.

Les tensions de sortie de l'onduleur triphasé peuvent être exprimées par les équations suivantes:

Pour la phase A : $V_a(t) = V_m \sin(\omega t)$

Pour la phase B : $V_b(t) = V_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3})$

Pour la phase C : $V_c(t) = V_m \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3})$

V_m : est l'amplitude maximale de la tension.

ω : est la fréquence angulaire.

Et la commande des interrupteurs de la commande sinus-triangle implique que chaque interrupteur d'un onduleur est activé pendant une demi-période.

2.2.3 Commande par hystérésis

La commande par hystérésis, appelée aussi commande en tout ou rien, est une commande non linéaire qui utilise l'erreur existante entre le courant de référence et le courant produit par l'onduleur, cette erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis [21].

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 (Figure 2.2), à l'aide d'un comparateur à hystérésis. Celui-ci, produit des impulsions d'amorçage et de blocage des interrupteurs de l'onduleur, de façon à limiter le courant de phase dans une bande d'hystérésis autour du courant de référence (Figure 2.3).

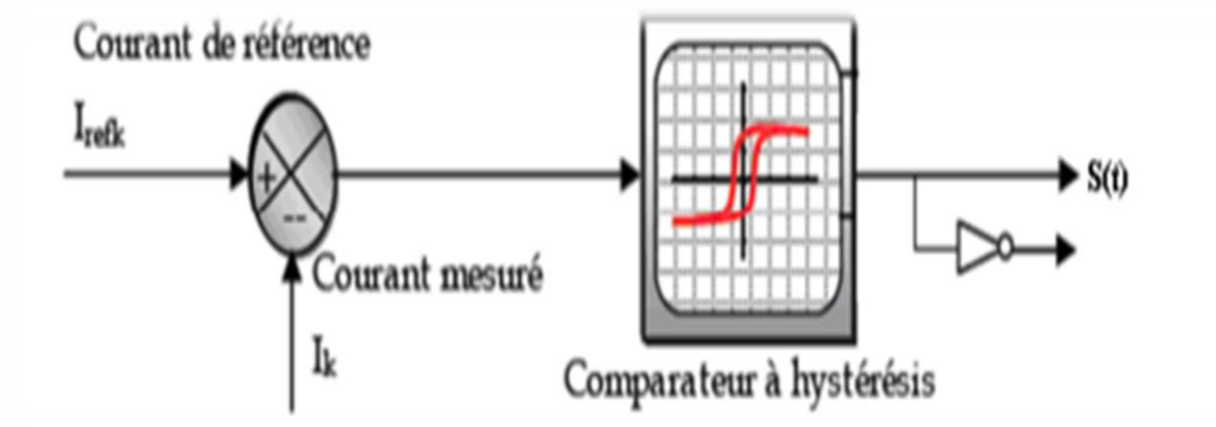


Figure 2.3 : Schéma de principe du contrôle par hystérésis d'un bras de l'onduleur.

2.2.4 Commande MLI (Modulation de largeur d'impulsion)

➤ Principe de base de modulation de largeur d'impulsion :

Cette technique consiste à calculer les instants de commutation des interrupteurs de manière à répondre à certains critères portant sur le spectre fréquentiel de l'onde délivrée par l'onduleur. Ces séquences de fonctionnement sont alors mémorisées et restituées cycliquement pour assurer la commande des interrupteurs. Les critères habituellement retenus sont l'élimination d'harmoniques de rangs spécifiés ou l'élimination des harmoniques dans une bande de fréquences spécifiée [22].

La technique MLI « programmée » est basée sur l'algorithme de Patel et Hoft. Dans cette technique, il est possible d'asservir le fondamental de la tension MLI et d'annuler les amplitudes des $(m-1)$ premiers harmoniques. La tension MLI « programmée » est définie en fonction des angles exacts de commutation $\alpha_1, \dots, \alpha_m$ qui correspondent aux instants de commutation de la tension MLI « programmée » d'une valeur positive $+E/2$ à une valeur négative $-E/2$ ou inversement. Un circuit numérique génère alors la tension MLI « programmée » en fonction du temps. En conclusion, on peut dire que la technique MLI « programmée » présente de nombreux avantages :

- Asservissement de la tension V du fondamental - Variation de la fréquence f du fondamental en utilisant la relation de conversion d'une valeur angulaire en valeur temporelle : $\alpha = 2\pi ft$

- Elimination des $(m-1)$ premiers harmoniques. Ces avantages permettent de remplacer l'alimentation sinusoïdale idéale par une alimentation pratique ayant un taux d'harmoniques que l'on peut réduire à volonté [23].

➤ Caractéristiques de la modulation :

Dans la technique de La MLI il ya deux grandeurs :

- **Le coefficient de réglage**

Défini comme le rapport entre l'amplitude de l'onde modulante et celle de l'onde porteuse, détermine l'amplitude du fondamental de l'onde de modulation de largeur d'impulsion. En d'autres termes, il influence directement l'intensité du signal modulé :

$$r = \frac{A_r}{A_p}$$

A_r : Amplitude de la référence, A_p : Amplitude de la porteuse

- **L'indice de modulation**

Il est défini comme étant le rapport de la fréquence de l'onde porteuse à celle de l'onde modulante [24].

$$m = \frac{f_p}{f_r}$$

f_p : La fréquence de la modulation.

f_r : La fréquence de la référence.

La modulation montre que plus (m) est grand et plus la neutralisation des harmoniques est efficace, d'autre part on cherche à obtenir une valeur de (r) la plus élevée possible. [14]

- ✓ Si (m) est un nombre entier est dite la modulation synchrone, cela conduit à une tension de sortie (U) qui se reproduit identiquement à elle-même tout les $T = \frac{1}{f}$
- ✓ Dans certains cas la modulation est asynchrone, notamment quand à fréquence de modulation f_p donnée, on fait varier de façon continue la fréquence de la référence.
- ✓ Pour le choix de (m), on doit tenir compte des pertes supplémentaires pendant les commutations d'un état à l'autre ces pertes croissent lorsque la fréquence de modulation augmente [25].
- ✓ On ne pourra jamais fonctionner avec un rapport de réglage égal à « 1 », car il faut toujours laisser une marge suffisante aux intervalles de conduction et de blocage des interrupteurs d'un même bras [25].
- ✓ Le schéma synoptique de la commande par modulation triangulaire-sinusoidale triphasé est donnée par la Figure (2.4).

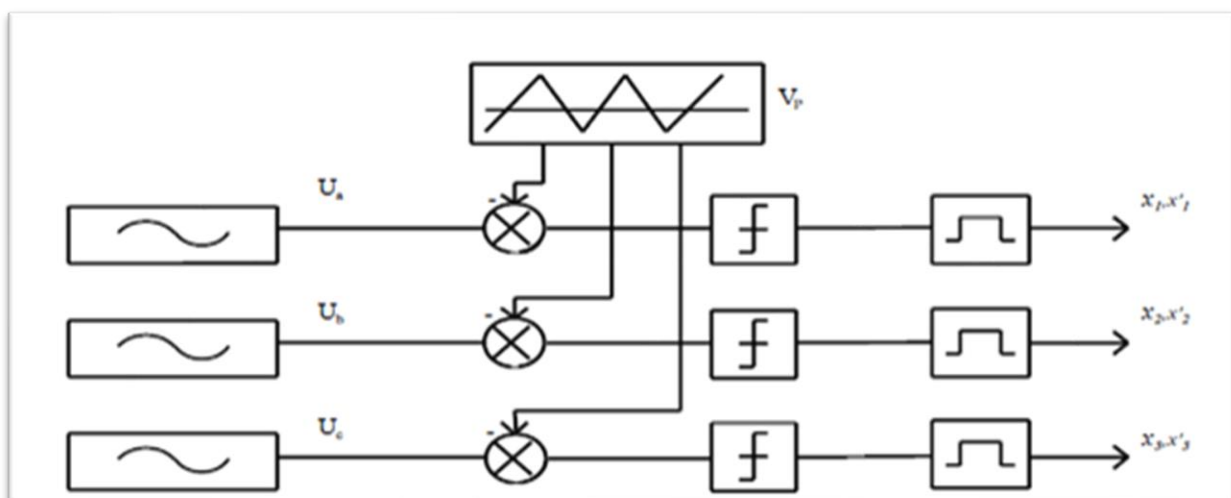


Figure 2.4 : Schéma synoptique de la Commande en MLI-ST (triphase).

Un générateur d'onde délivre l'onde triangulaire aux trois phases (porteuse commune), par contre la référence est propre à chaque phase, les trois références étant déphasées de (120°).

➤ **Technique de production d'onde MLI :**

Dans la commande MLI il ya plusieurs techniques d'obtention d'onde sont utilisées pour générer le signal de sortie de la commande (signal de contrôle) et ou dans le blocage des éléments semi-conducteurs, on utilise des techniques on fait appel la technique analogique, numérique ou en utilise les deux au même temps [26].

1. Technique analogique :

La technique analogique est basée sur la comparaison entre deux générateurs : un porteur triangulaire et l'autre de référence, cette comparaison est réalisée à l'aide d'un amplificateur opérationnel [27].

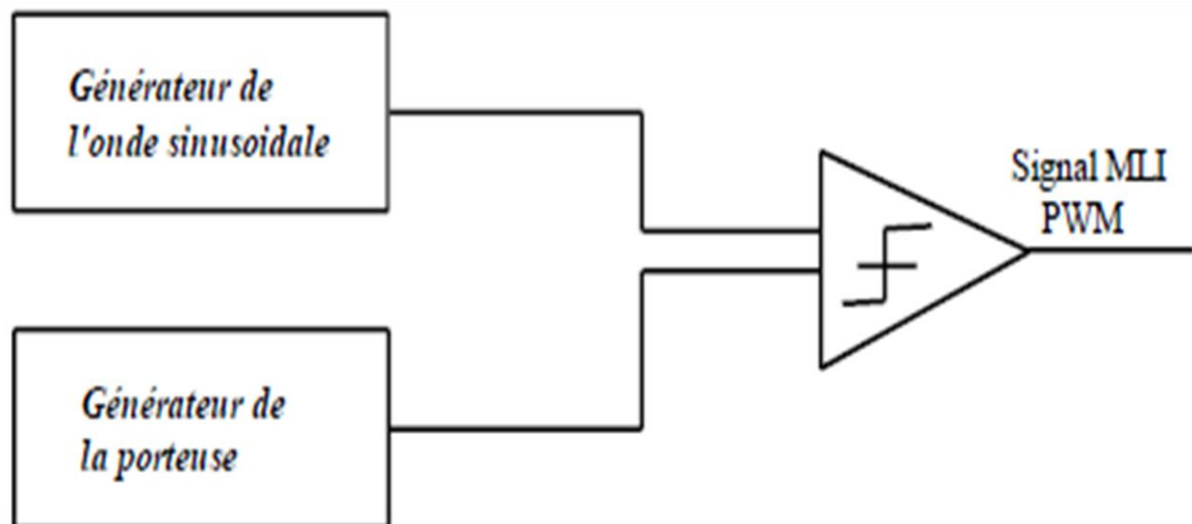


Figure 2.5 : Technique analogique.

2. Technique numérique :

Cette technique est basée sur l'utilisation des microprocesseurs pour générer les impulsions de commande en se servant d'un programme préconfiguré qui détermine les angles d'amplitude calculés au bien préalable. Cette technique approche une grande amélioration dans la simplicité et la performance du circuit de commande [27].

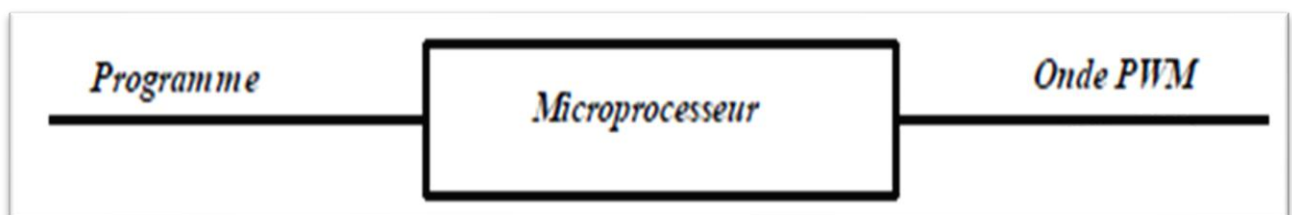


Figure 2.6 : Technique numérique.

3. Technique hybride :

Elle combine les deux techniques approches analogique et numérique. L'onde de référence est générée numériquement, tandis que l'onde porteuse provient d'une source analogique. La comparaison entre ces deux signaux s'effectue au moyen d'un comparateur analogique [27].

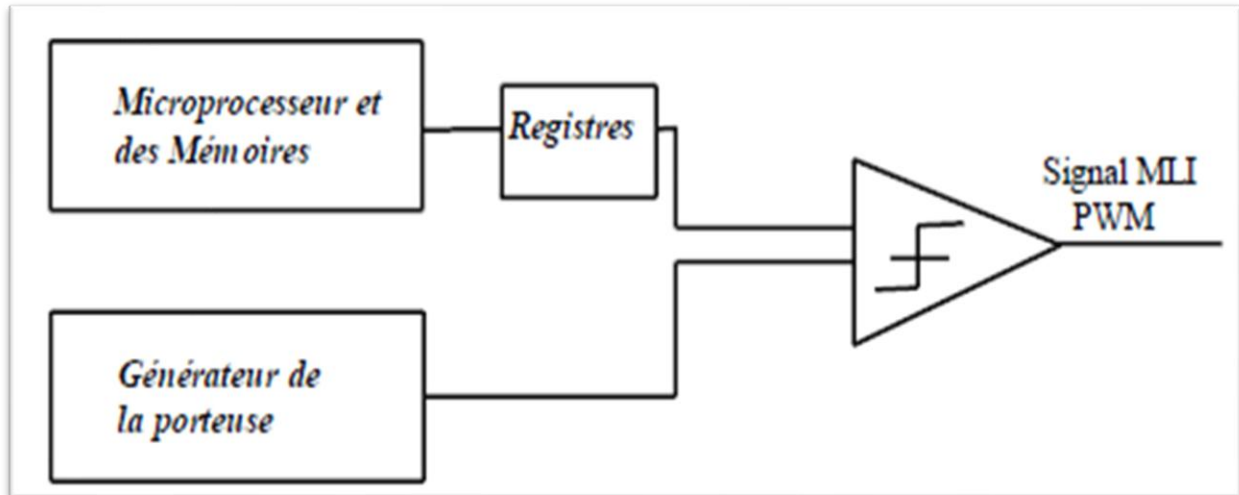


Figure 2.7 : Technique hybride.

2.3 Les harmoniques

Dans les systèmes électriques, les harmoniques représentent des composantes de fréquence supplémentaires, distinctes de la fréquence fondamentale du signal, qui résultent de l'utilisation de charges non linéaires. Ces charges, caractérisées par une consommation de courant non sinusoïdal, engendrent ces harmoniques en raison de leur comportement non linéaire. Parmi les sources d'harmoniques les plus importantes, on trouve actuellement les équipements à base de thyristors. Ces dispositifs, dont les caractéristiques électriques varient en fonction de la valeur de la tension appliquée, présentent une résistance non linéaire qui contribue à la génération d'harmoniques. Des exemples courants d'équipements à base de thyristors générant des harmoniques incluent les appareils d'éclairage fluorescent, les variateurs de vitesse, les redresseurs, les téléviseurs, les ordinateurs et divers appareils électroniques ... etc [28].

2.4 Les filtres

Les filtres sont des dispositifs électroniques qui laissent passer et amplifient un signal en fonction de sa fréquence tout en supprimant les fréquences indésirables. Ils sont constitués de plusieurs caractéristiques, et leur importance réside dans leur capacité à maintenir la linéarité. Les filtres peuvent être classés en plusieurs types [19].

Un filtre est dit actif lorsque des composants actifs tels que des circuits intégrés ou des transistors jouent un rôle dans sa constitution et permettent l'amplification. En revanche, un filtre passif se caractérise par l'usage exclusif de composants passifs tels que des résistances, des condensateurs et des bobines. Par conséquent, leur gain (rapport de puissance entre la sortie et l'entrée) ne peut excéder. En d'autres termes, les filtres passifs peuvent seulement atténuer partiellement des signaux, mais pas les amplifier [19].

2.4.1 Types De filtre

Les filtres sont classés en plusieurs types, parmi les plus utilisés, on retrouve :

➤ Filtre passe-haut :

Ce type de filtre ne laisse passer que les fréquences au-dessus d'une fréquence déterminée, appelée "fréquence de coupure". Il atténue les autres (les basses fréquences). Autrement dit, il « laisse passer ce qui est haut ». C'est un atténuateur de graves pour un signal audio. On pourrait aussi l'appeler coupe-bas.

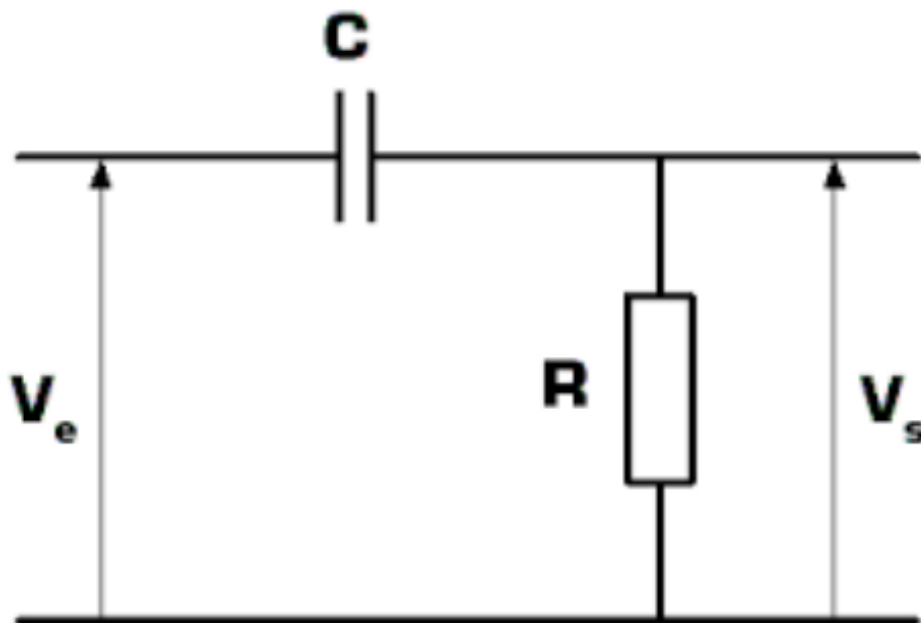


Figure 2.8 : Schéma électrique d'un filtre passe-haut.

➤ Filtre passe-bas :

Ce filtre ne laisse passer que les fréquences au-dessous de sa fréquence de coupure. C'est un atténuateur d'aigus pour un signal audio. On pourrait l'appeler coupe-haut [29].

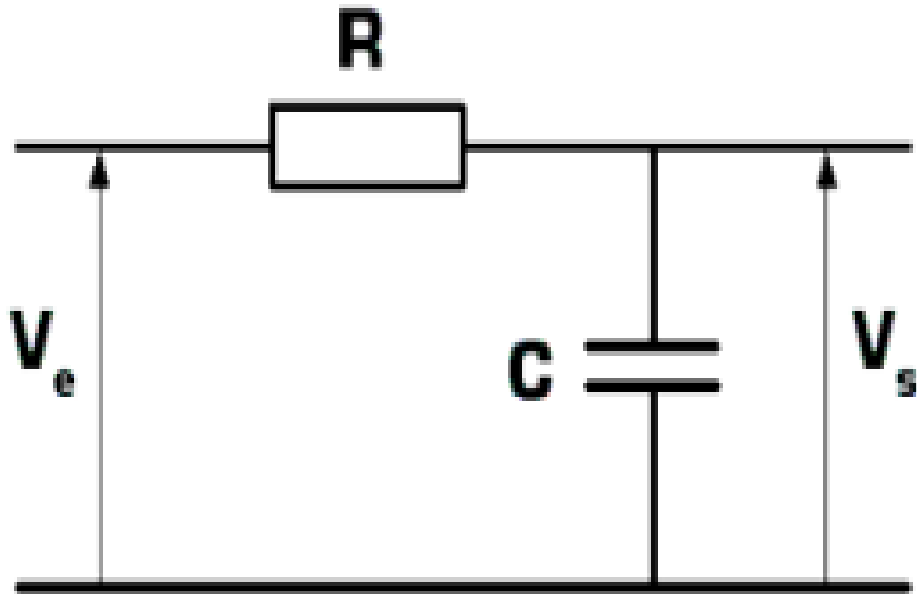


Figure 2.9 : Schéma électrique d'un filtre passe-bas.

➤ **Filtre passe-bande :**

Ce type de filtre ne laisse passer qu'une certaine bande de fréquences (et atténue tout ce qui est au-dessus ou en-dessous). Il est très utilisé dans les récepteurs radio, TV, etc., pour isoler le signal que l'on désire capter [30].

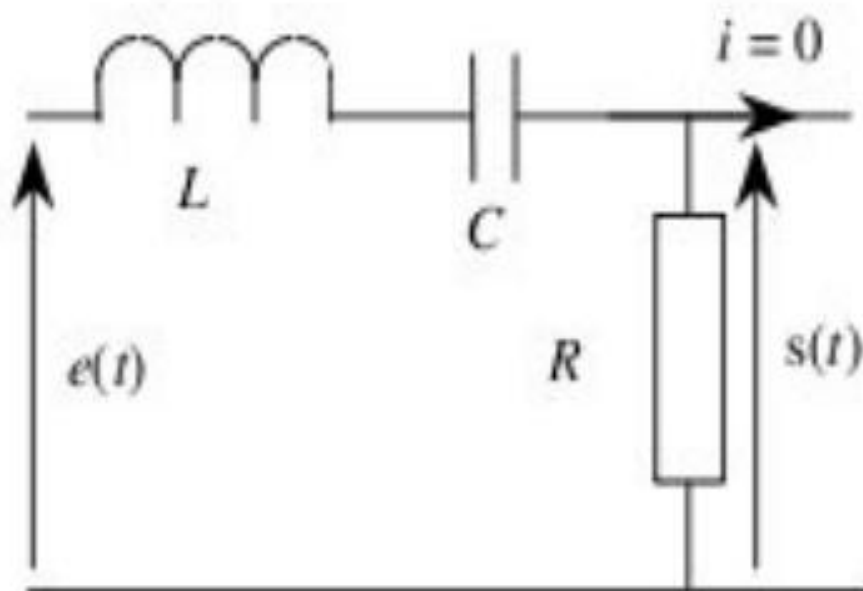


Figure 2.10 : Schéma électrique d'un filtre passe-bande.

➤ **Filtre réjecteur de bande :**

Aussi appelé filtre trappe, cloche ou coupe-bande, il est le complémentaire du passe-bande. Il atténue une plage de fréquences. Cela peut être utile pour diminuer certains parasites.

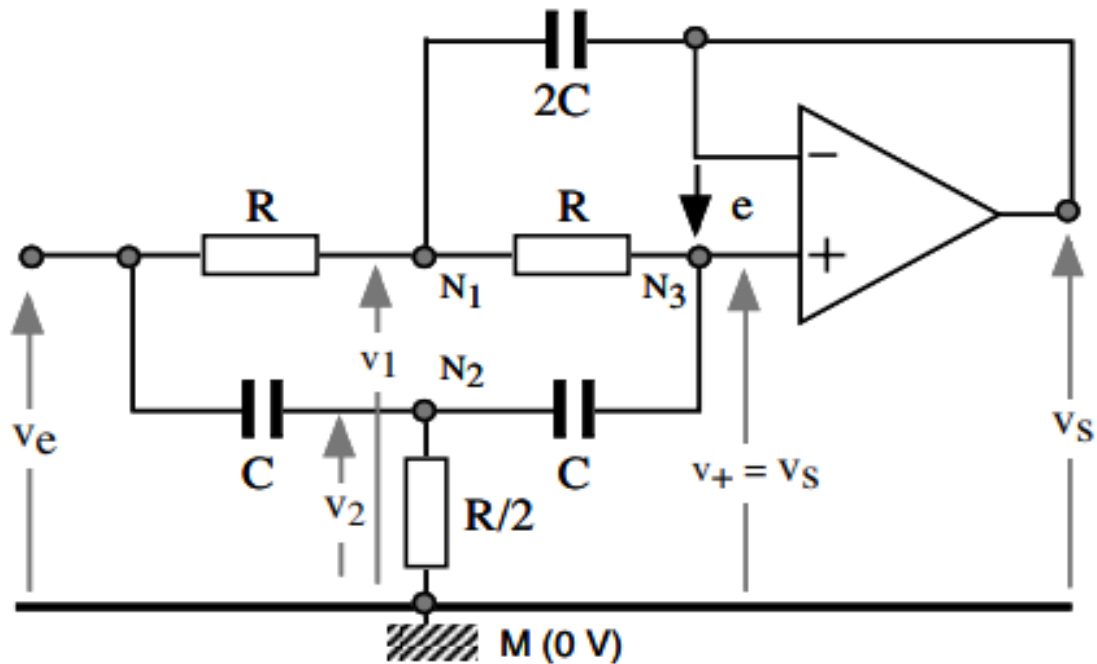


Figure 2.11 : Schéma électrique d'un filtre réjecteur de bande à base d'Amplificateur opérationnel.

2.5 Conclusion

Ce chapitre a proposé une des techniques de commande et des filtres utilisés dans les onduleurs. Nous avons commencé par une définition des diverses stratégies de commande, y compris la commande pleine onde, la commande MLI sinus triangle, la commande MLI sinus hystérésis et la commande MLI.

Par la suite, nous avons défini le concept d'harmoniques et présenté les quatre principales catégories de filtres utilisés pour leur atténuation. Nous avons également mis en évidence l'importance fondamentale des filtres dans la réduction des distorsions harmoniques et l'amélioration de la qualité de l'onde de sortie.

En conclusion, il est évident que la combinaison de techniques de commande avancées, comme la MLI, et de filtres de haute qualité joue un rôle crucial dans l'optimisation des

performances des onduleurs pour diverses applications critiques. Une compréhension approfondie de ces concepts techniques est essentielle pour développer et exploiter des onduleurs robustes, efficaces et conformes aux exigences en matière de qualité de l'énergie électrique.

PARTIE II

SIMULATION

Chapitre 3 :

Simulation Et comparaison

Des résultats

3.1 Introduction

Les onduleurs de tension monophasée et triphasée jouent un rôle incontournable dans des applications de haute tension et forte puissance.

Ce chapitre est consacré à la simulation sous MATLAB de l'onduleur, avec des commandes (plein onde, sinus-hystérésis et aussi la commande sinus-triangle), nous allons simuler la machine asynchrone avec l'association de l'onduleur, commandé par une commande MLI sinus-hystérésis et sinus-triangle.

Pour montrer l'avantage de l'onduleur multiniveaux, une simulation est développée dans MATLAB/SIMULINK [31].

3.2 Le plateforme utilisé

MATLAB est un plateforme de développement informatique et logiciel de pointe conçu spécifiquement pour le calcul scientifique, la modélisation et la simulation utilisé par les scientifiques, les ingénieurs, les chercheurs et les étudiants qui requièrent un environnement puissant et polyvalent.

MATLAB est utilisé pour développer les solutions, analyser les données expérimentales, développer les modèles théoriques, avec une très grande puissance de calcul [31].

Simulink est un environnement de modélisation graphique par blocs intégré au logiciel MATLAB pour la simulation multi-domaine et la conception basée sur un modèle. Il offre aux ingénieurs et aux développeurs un ensemble complet d'outils pour créer, simuler et tester des systèmes complexes dans une variété de domaines [32].

3.3 Simulation de commande onduleur monophasé

3.3.1 Commande en plein onde

3.3.1.1 Plein onde avec charge R

La figure 3.1 présente le schéma bloc d'un onduleur monophasé. Il est composé de deux bras de commutation avec une charge $R = 100\Omega$, cet onduleur est commandé en pleine onde.

La tension de la source continue qui alimente notre onduleur est fixé à la valeur 100V.

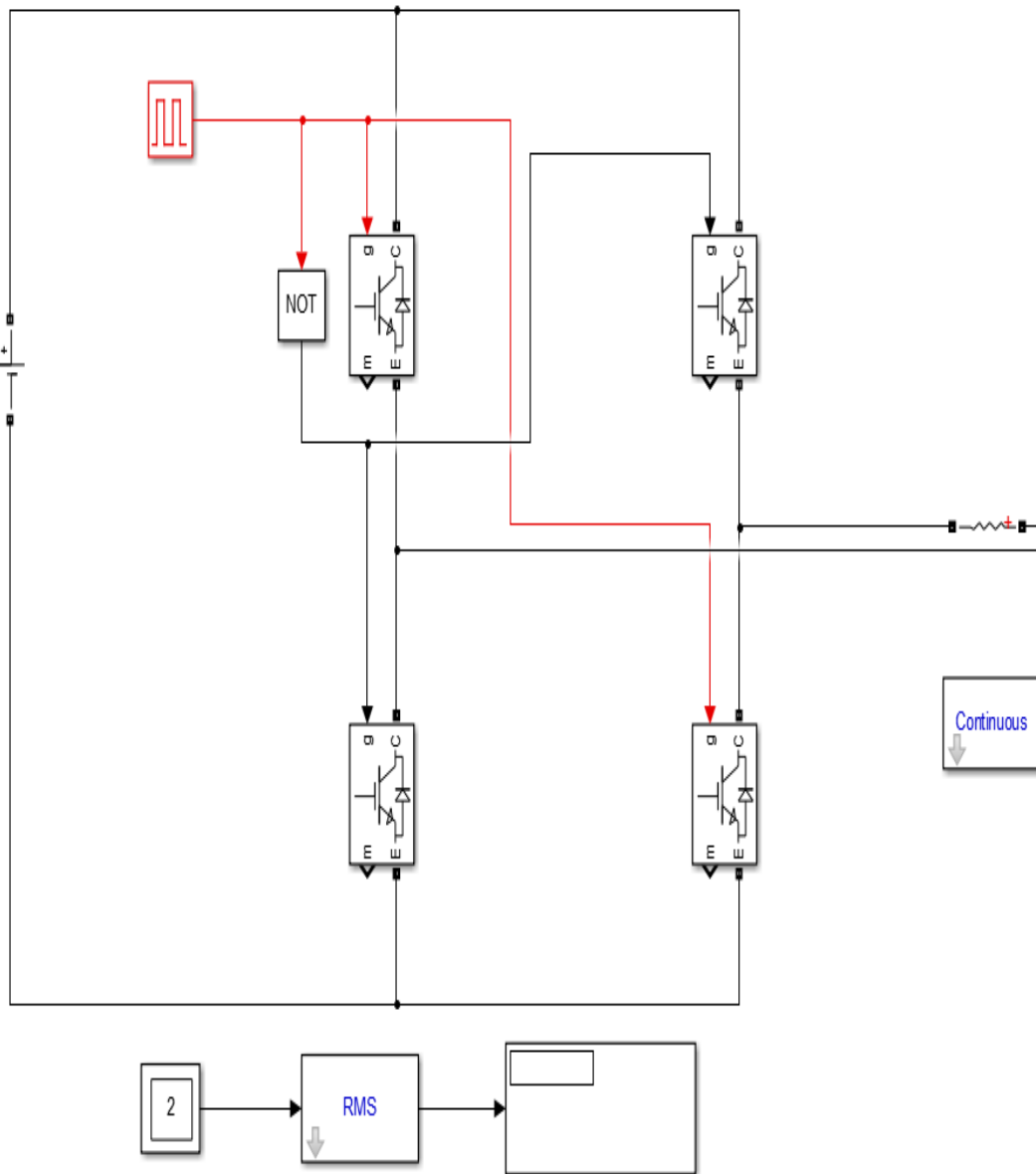


Figure 3.1 : Schéma bloc d'un onduleur monophasé commander par pleine onde avec charge R.

3.3.1.1.1 Résultats de simulation :

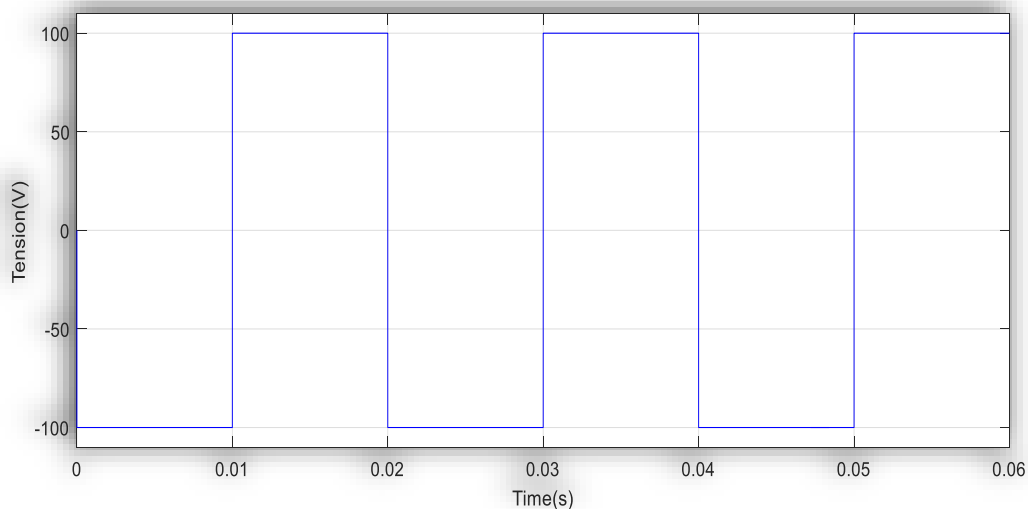


Figure 3.2 : La tension de sortie d'onduleur.

La figure 3.2 représente la tension composée à la sortie de l'onduleur commandé par plein onde avec charge $R = 100\Omega$. Nous remarquons bien que la fréquence est de 50Hz, et le changement de tension est de (+100V à -100V) (forme carrée).

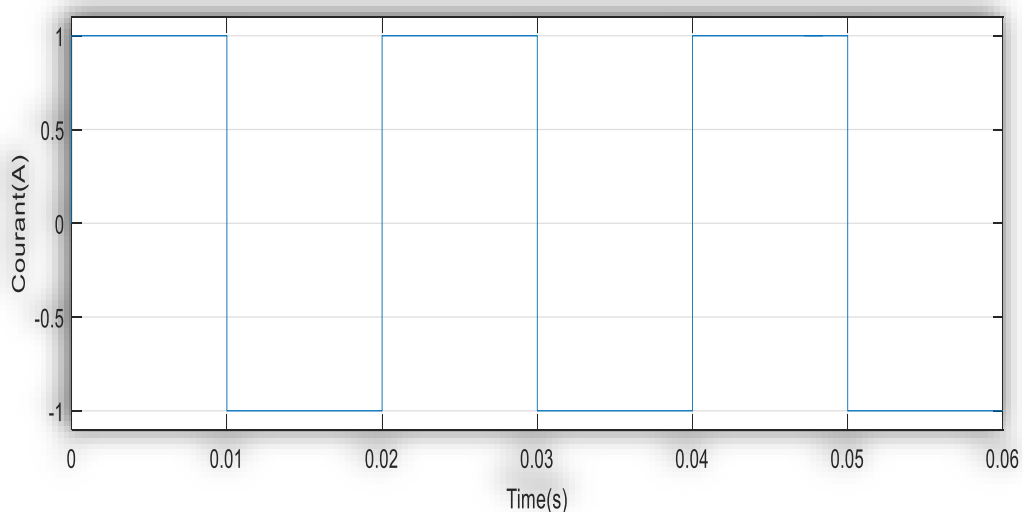


Figure 3.3 : Le courant de sortie d'onduleur.

La figure 3.3 représente le courant de sortie de l'onduleur entre le milieu de ses deux bras. Nous remarquons que le changement de courant est de (+1 à -1) de forme carrée.

- Spectre d'harmonique de la tension :

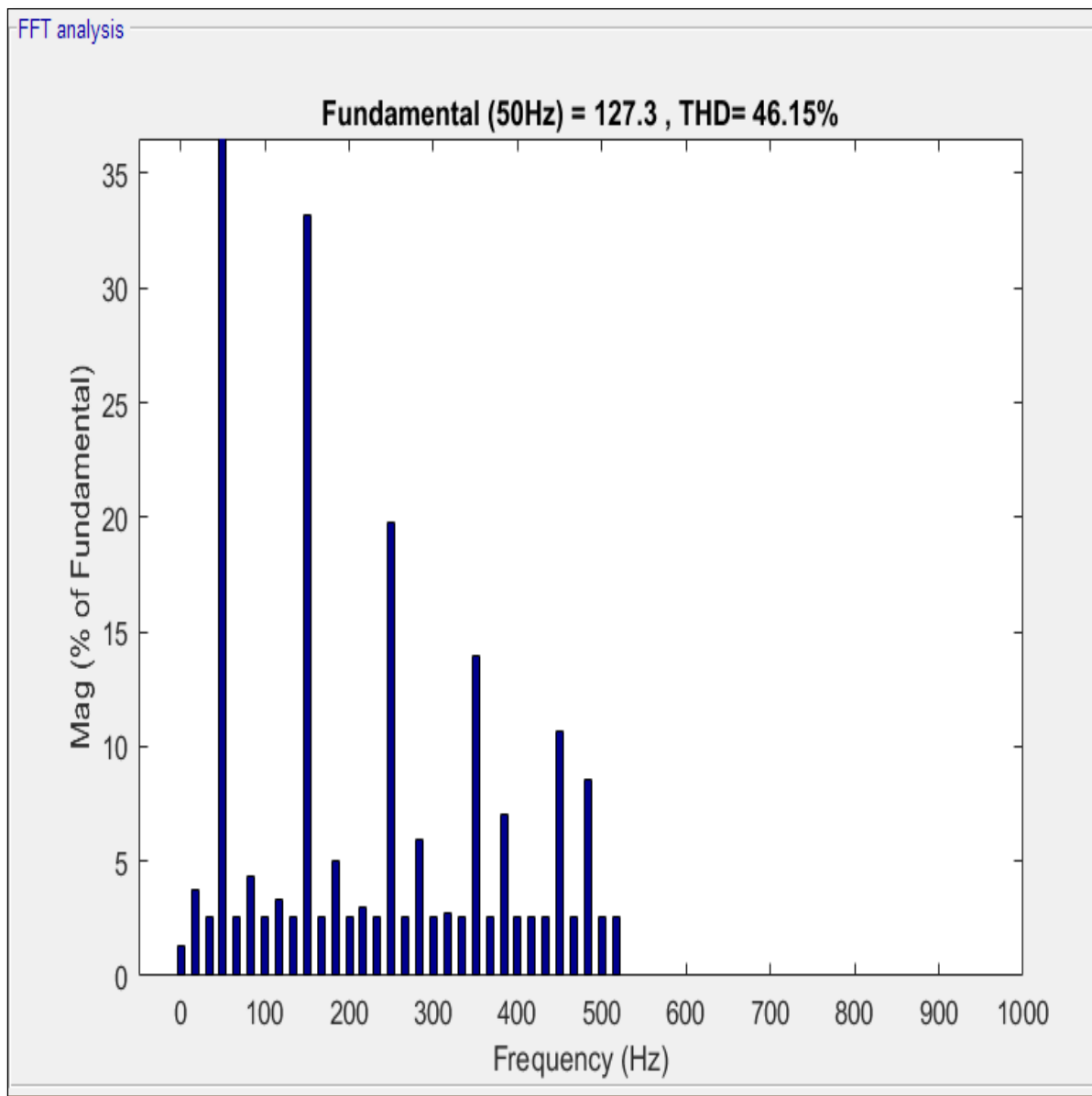


Figure 3.4 : Spectre d'harmonique de tension de sortie d'onduleur commandé par plein onde reliaer avec une charge R.

La figure 3.4 montre un taux de distorsion harmonique significatif pour la tension, nous remarquons la valeur de THD=46.15%, la distorsion très importante de l'onde de tension.

3.3.1.2 Plein onde avec charge RL

La figure 3.5 reprisant le schéma block d'un onduleur monophasé reliaer avec une charge RL ($R = 100\Omega$, $L = 0.5$ H).

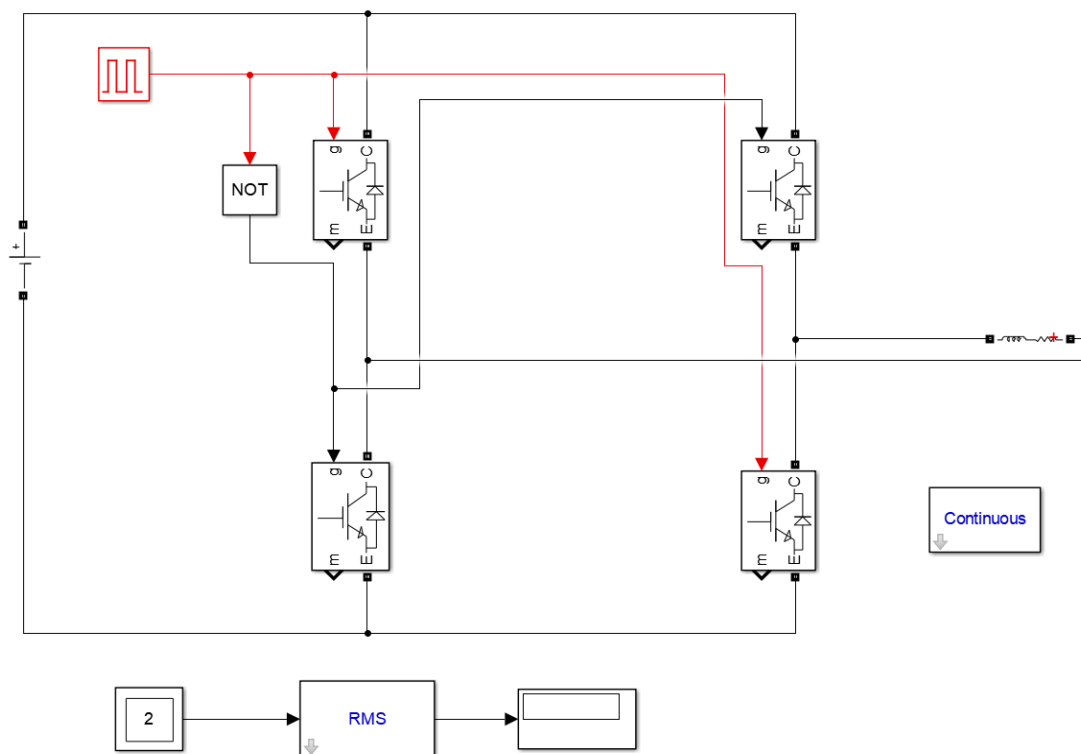


Figure 3.5 : Schéma block d'un onduleur monophasé commandé par pleine onde relie avec charge RL.

3.3.1.2.1 Résultats de simulation

La figure 3.6 représente la tension composée à la sortie de l'onduleur commandé plein onde.

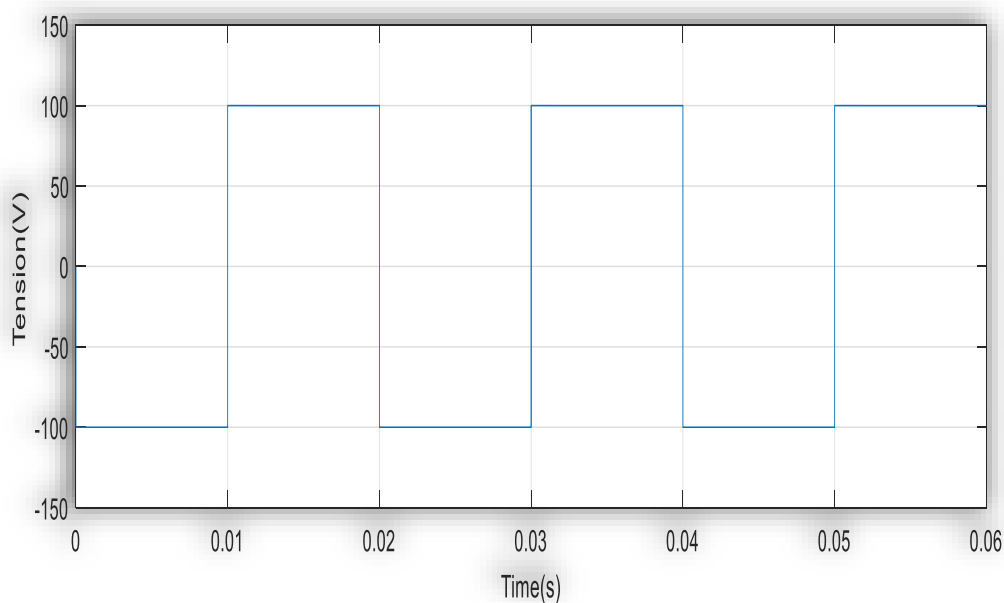


Figure 3.6 : La tension de sortie d l'onduleur charge RL.

Nous remarquons bien que la fréquence est de 50Hz, le changement de tension est de +100Và -100V (forme carrée).

- Spectre d'harmonique de la tension :

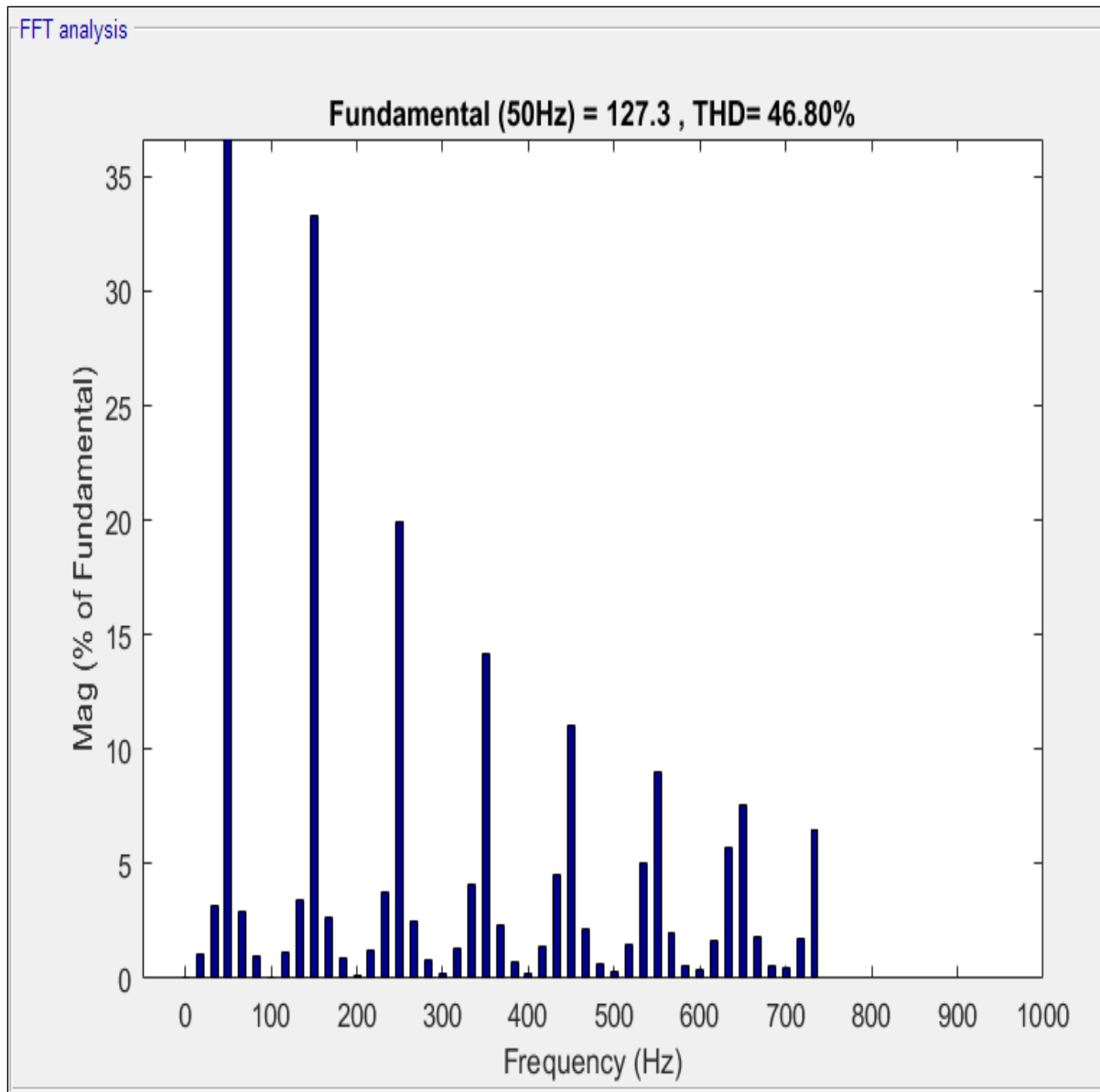


Figure 3.7 : Spectre d'harmonique de tension de sortie de la commande plein onde reler avec une charge R.

Elle montre un taux de distorsion harmonique significatif pour la tension, nous remarquons la valeur de THD=46.80%, la distorsion très importante de l'onde de tension.

La figure 3.8 représente le courant de sortie de l'onduleur.

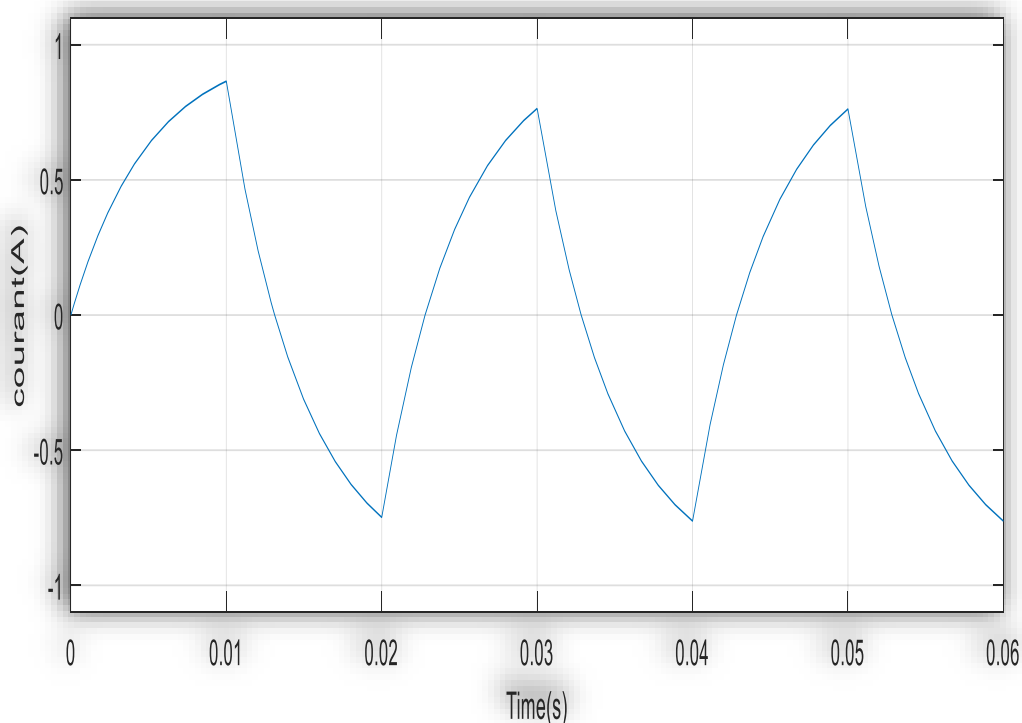


Figure 3.8 : Le courant de sortie d'onduleur charge RL.

Cette figure représente le courant de sortie de l'onduleur entre ses deux points milieu avec charge RL. Nous remarquons que le changement de courant est de (+0.7 à - 0.7) formes exponentielles.

3.3.1.3 Comparaison des résultats

On remarque qu'il n'y a aucun changement de tension de sortie d'onduleur commandé par plein onde quelque soit la charge reliée. Par contre on remarque qu'il a un changement de courant si on place la charge R ou charge RL. On obtient un signal de courant lorsque la charge R est connectée au circuit. Si on ajoute une inductance (L).

Le tableau ci-dessous montre les résultats de THD obtenues par la commande plein onde :

La commande Plein onde	Avec charge R	Avec charge RL
THD de tension(%)	46.15	46.80

Tableau 3.1 : Les valeurs harmoniques (THD) des tensions d'un onduleur commandé avec plein onde.

On observe que les résultats obtenus restent cohérents malgré de légères approximations.

3.3.2 Commande en décalée

3.3.2.1 Commande décalée avec charge R

La figure 3.9 présente le schéma bloc de commande décalée un onduleur monophasé avec une charge résistive ($R=1\Omega$). La tension de la source continue est fixée à une valeur déterminée 100V.

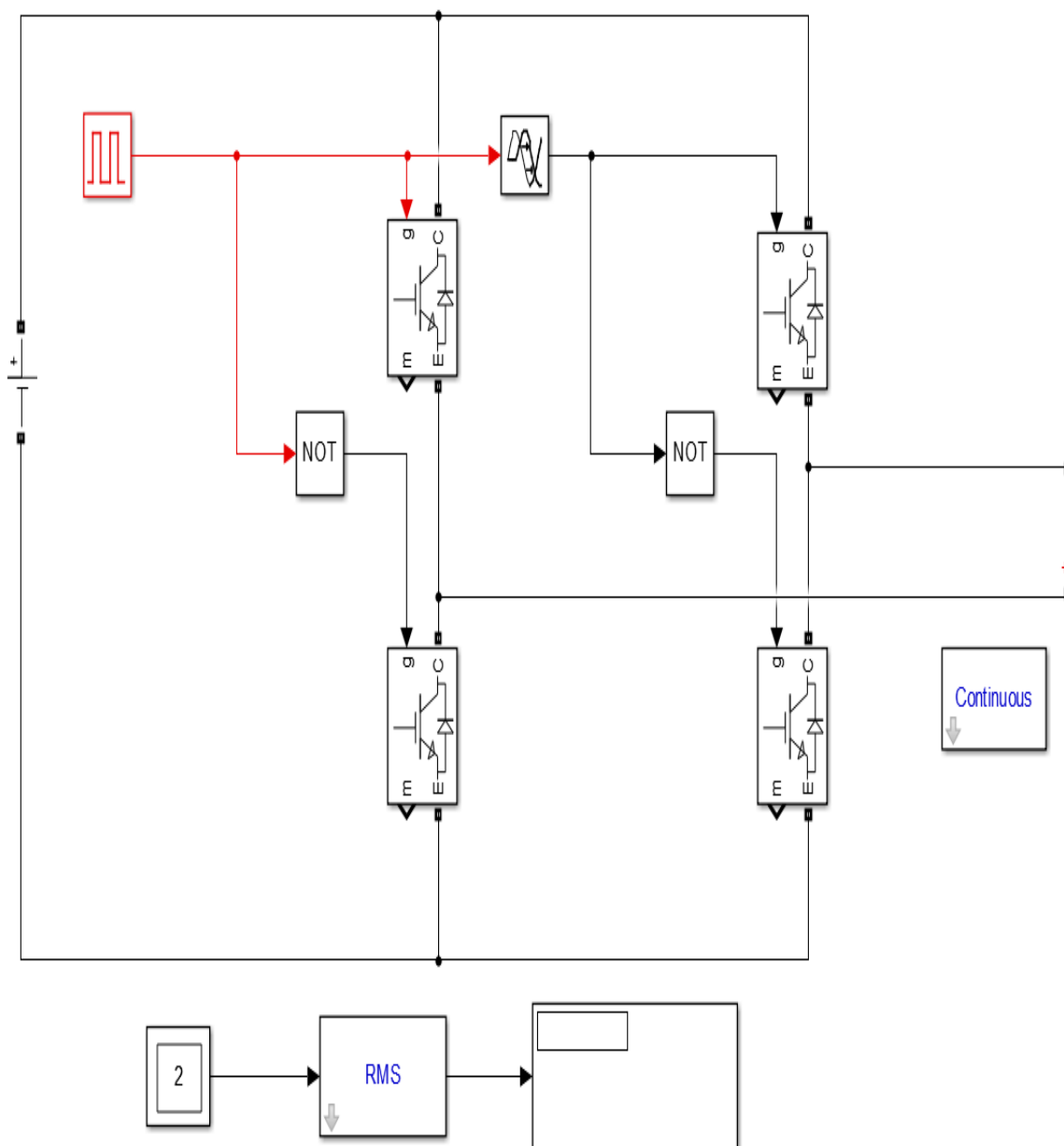


Figure 3.9 : Schéma bloc d'un onduleur monophasé avec la commande décalée reliée à une charge résistive.

3.3.2.1.1 Résultats de simulation

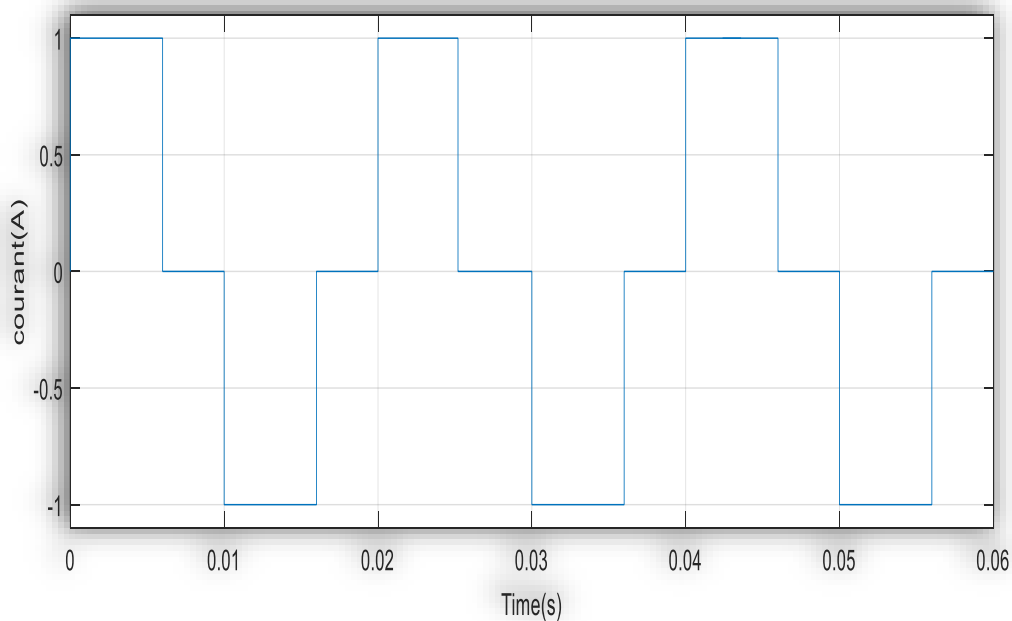


Figure 3.10 : Le courant de sortie d'un onduleur avec commande décalée à charge R.

La figure 3.10 représente le courant de sortie de l'onduleur entre ses deux points milieu avec charge $R = 100\Omega$. Nous remarquons que le changement de courant a trois état (+1,0,-1), est nous obtenue la forme carrée.

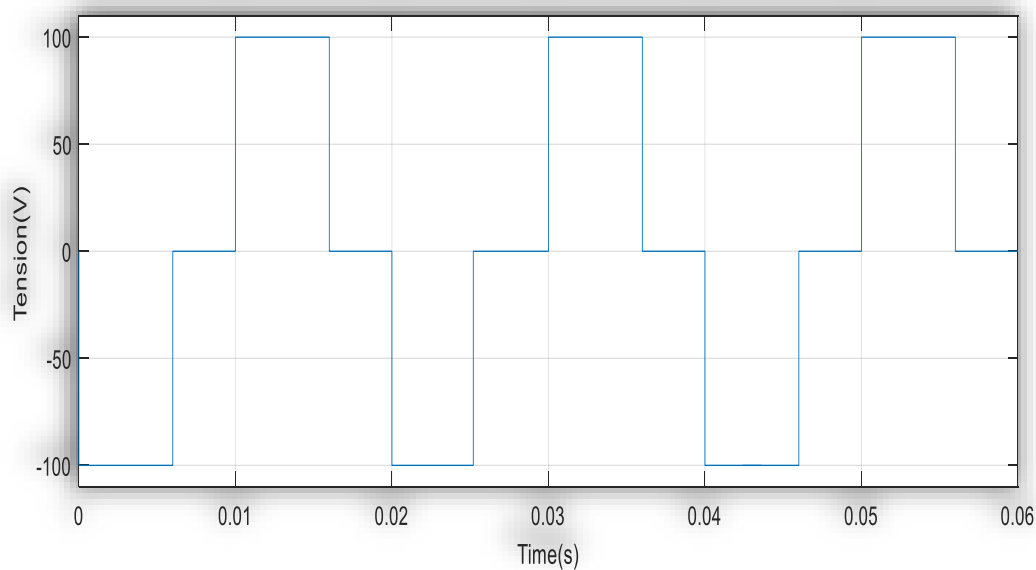


Figure 3.11 : La tension de sortie d'un onduleur avec commande décalée à charge R.

Nous remarquons bien que le changement de tension est de +100V à -100V passe par le 0, et nous obtenons une forme carrée.

- Spectre d'harmonique de la tension :

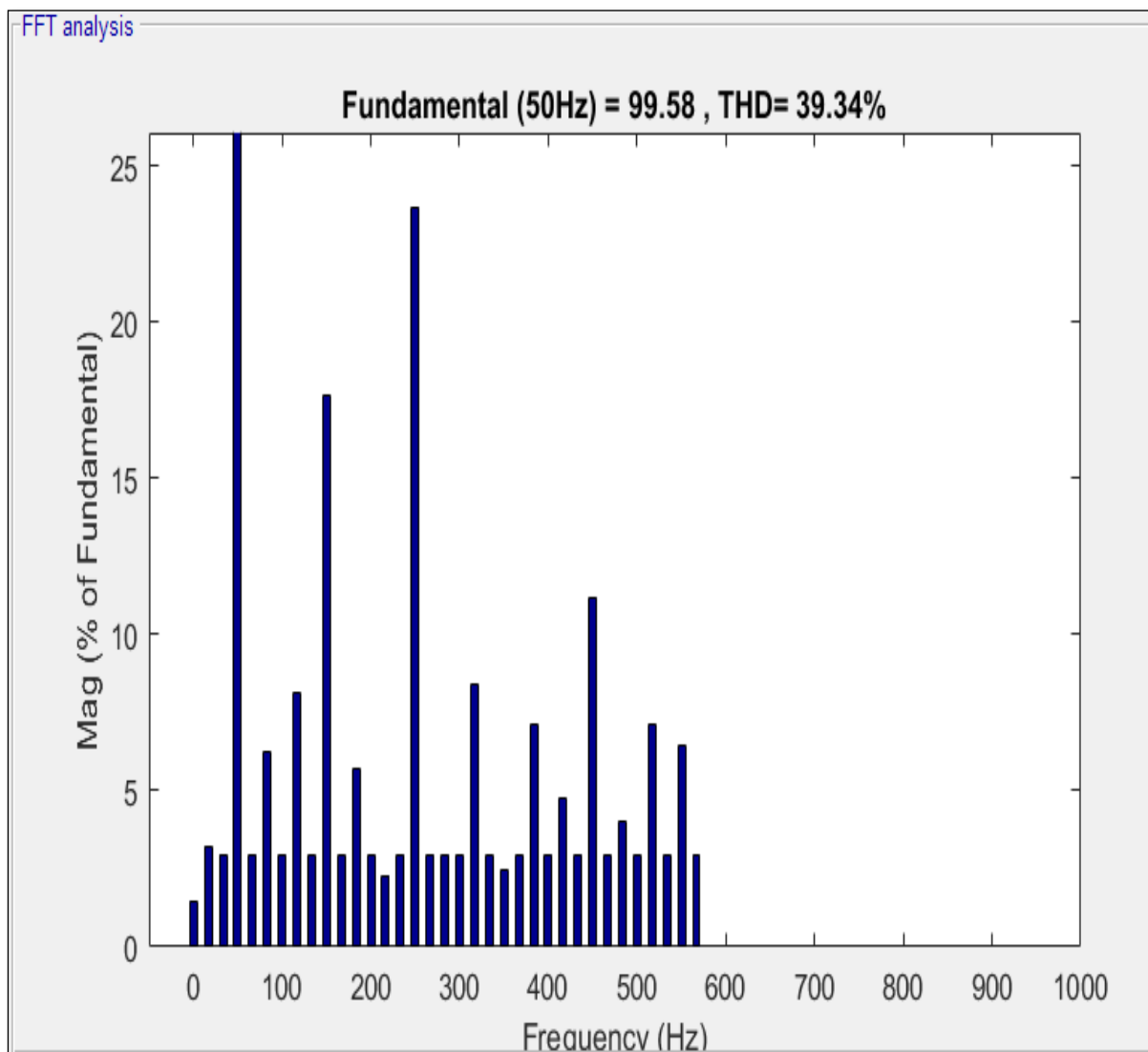


Figure 3.12 : Spectre d'harmonique de tension de sortie commande décalée avec charge R.

La figure 3.12 montre un THD = 39,34%. La distorsion de l'onde de tension est très importante, entraînant un risque élevé de perturbation.

3.3.2.2 Commande décalée avec charge RL

On applique une charge RL sur un onduleur commande décalée, la figure 3.13 représente le schéma bloc de cette application.

($R = 100\Omega, L = 0.5 \text{ H}$) , une tension de source fixée à la valeur 100V.

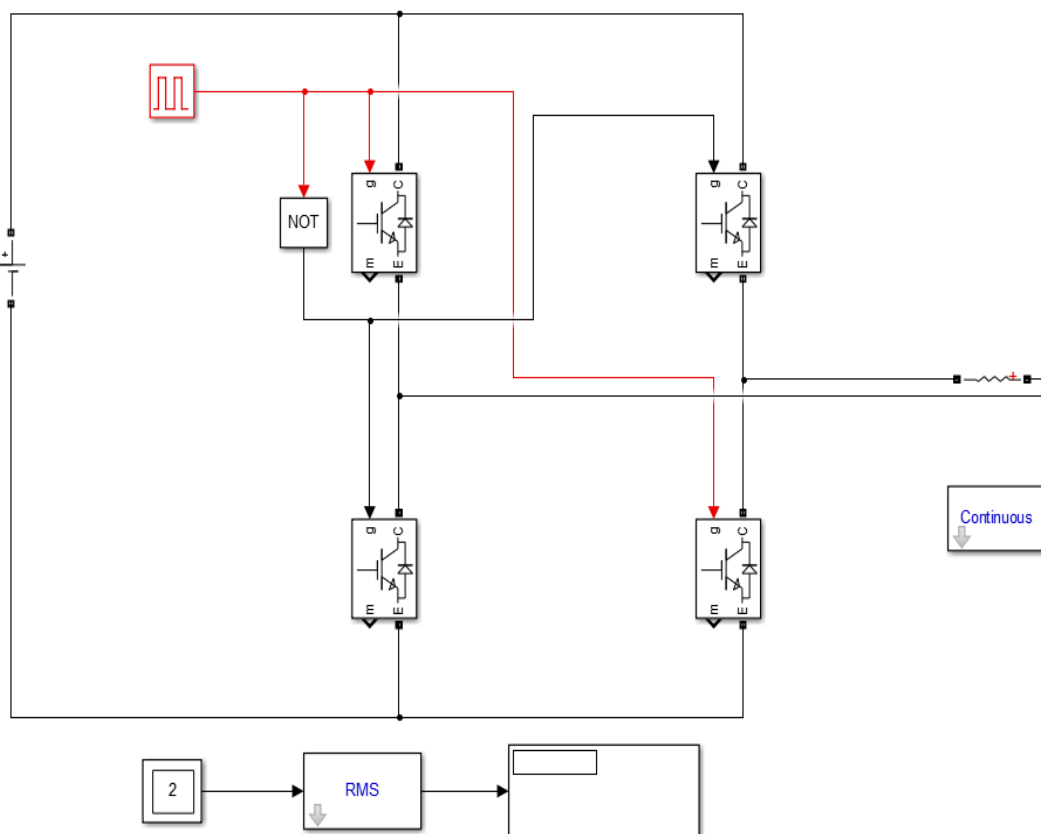


Figure 3.13 : Schéma bloc d'un onduleur monophasé avec la commande décalée avec charge RL.

3.3.2.2.1 Résultats de simulation

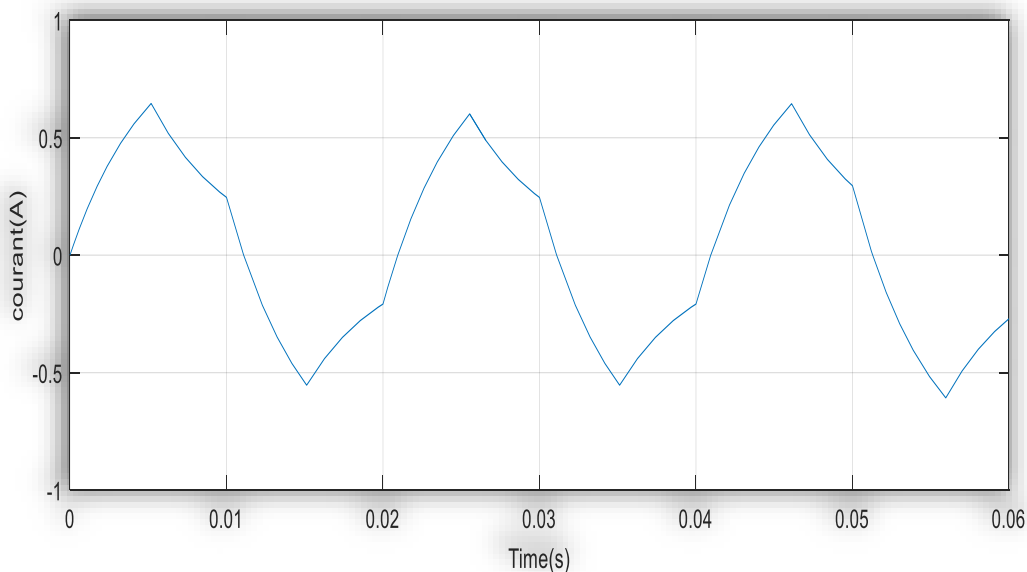


Figure 3.14 : Le courant de sortie d'un onduleur avec commande décalée charge RL.

Nous remarquons que le changement de courant est de +0.6 à 0.6 passant par le 0, nous obtenons une forme périodique avec une fréquence de 50Hz.

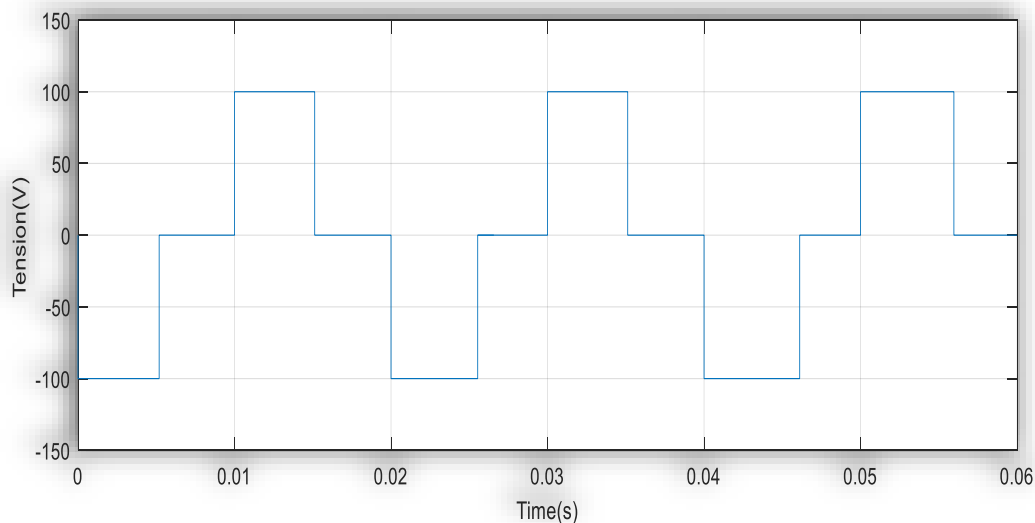


Figure 3.15 : La tension de sortie d'un onduleur avec commande décalée charge RL.

Nous remarquons bien que la fréquence est de 50Hz, et le changement de tension est de +100V à -100V passant par le 0 et obtenue une forme carrée.

- Spectre d'harmonique de la tension :

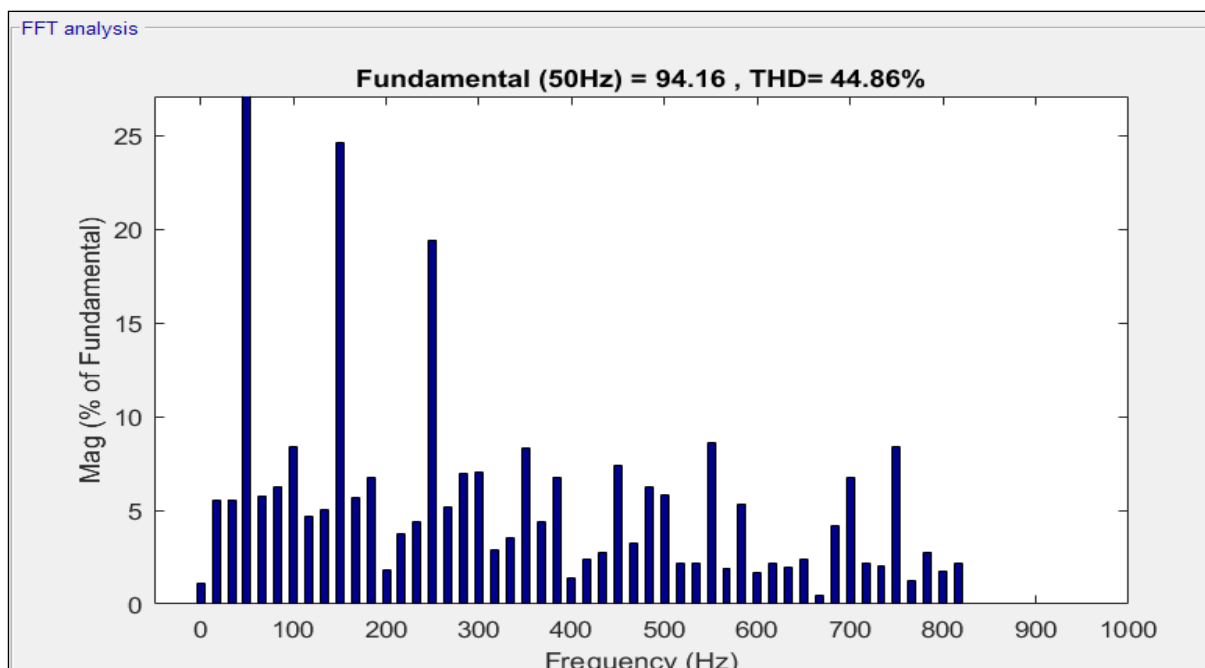


Figure 3.16 : Spectre d'harmonique de tension de sortie commande décalée avec charge RL.

La figure 3.16 montre un THD = 44,86%. La distorsion de l'onde de tension est très importante, entraînant un risque élevé de perturbation.

3.3.2.3 Comparaison des résultats

Dans le cas de la commande décalée d'un onduleur monophasé, la tension de sortie reste inchangée quel que soit la charge reliée. Cependant, la forme du courant de sortie diffère selon la nature de la charge.

Avec la charge résistive (R), le courant de sortie présente une forme d'onde carrée. En revanche, l'ajout d'une inductance (L) à la charge permet d'obtenir un courant de sortie qui de forme exponentielles.

Le tableau ci-dessous montre les résultats de THD obtenues par la commande décalée :

La commande Décalée	Avec charge R	Avec charge RL
THD de tension(%)	39.84	44.86

Tableau 3.2 : La valeur des harmoniques (THD) des tensions d'un onduleur commande décalée.

Le THD de la tension de sortie produite par un onduleur de commande décalée reliée à une charge R égal (**39.84%**) et dans le cas de la charge RL (**44.86%**), on remarque y a une diminution de THD par rapport à celui de la pleine onde avec charge RL.

3.3.3 Comparaison entre plein onde et décalée

La commande plein onde et la commande décalée son deux techniques de commande impotentes pour les onduleurs monophasés.

Le tableau ci-dessous montre les résultats de THD obtenus par les différentes techniques de commande :

Commande	Plein onde		Décalée	
	R	RL	R	RL
THD de tension(%)	46.15	46.80	39.48	44.86

Tableau 3.3 : Les valeurs des harmoniques (THD) des tensions obtenues par les différentes techniques des commandes (plein onde et décalée).

La commande décalée offre généralement un THD faible que la commande plein onde.

Les deux commandes génèrent un signal de forme carrée, la différence entre les deux c'est que la commande en plein onde génère un signal de deux états par contre l'autre (décalée) donne un signal carrée de trois états.

3.4 Simulation de commande d'onduleur triphasé

3.4.1 Commande en plein onde

C'est une technique de commande importante pour les onduleurs triphasés. Elle est utilisée dans une large gamme d'application.

La figure 3.13 présente le schéma bloc d'un onduleur triphasé. Il se compose de trois bras de commutation à transistors associé à une charge RL, cet onduleur est commandé en plein onde.

La charge : $R = 10\Omega$, $L = 0.01$ H

La tension de la source continue qui alimente notre onduleur est fixée à valeur 100V.

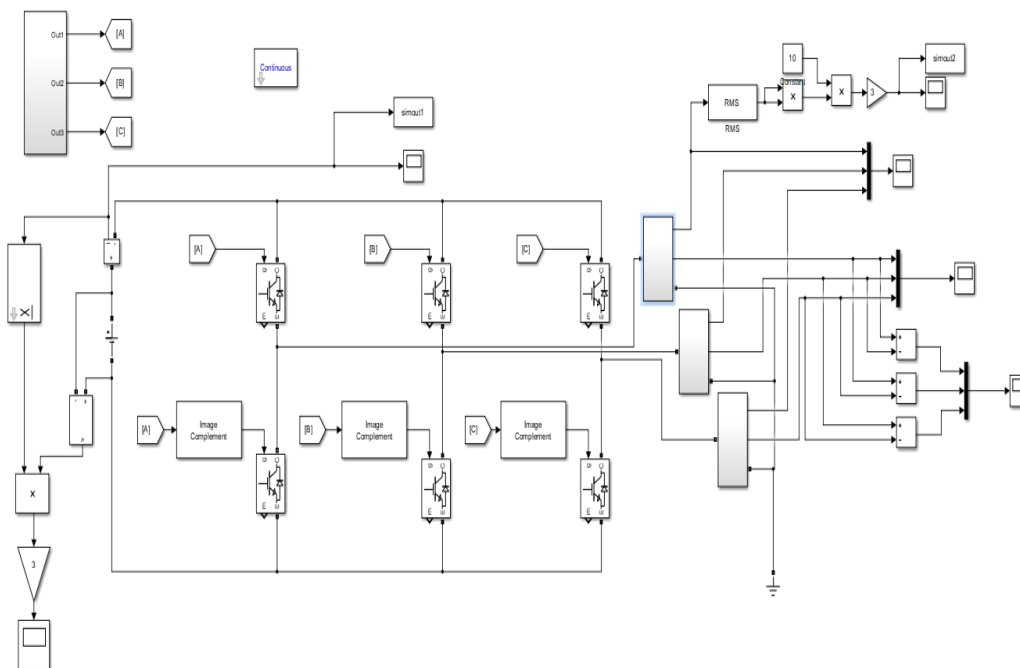


Figure 3.17 : Schéma bloc d'un onduleur triphasé avec la commande plein onde.

3.4.1.1 Résultats de simulation

Dans cette simulation nous allons montrer les résultats obtenus pour les 3 phases.

- Tension d`une phase :

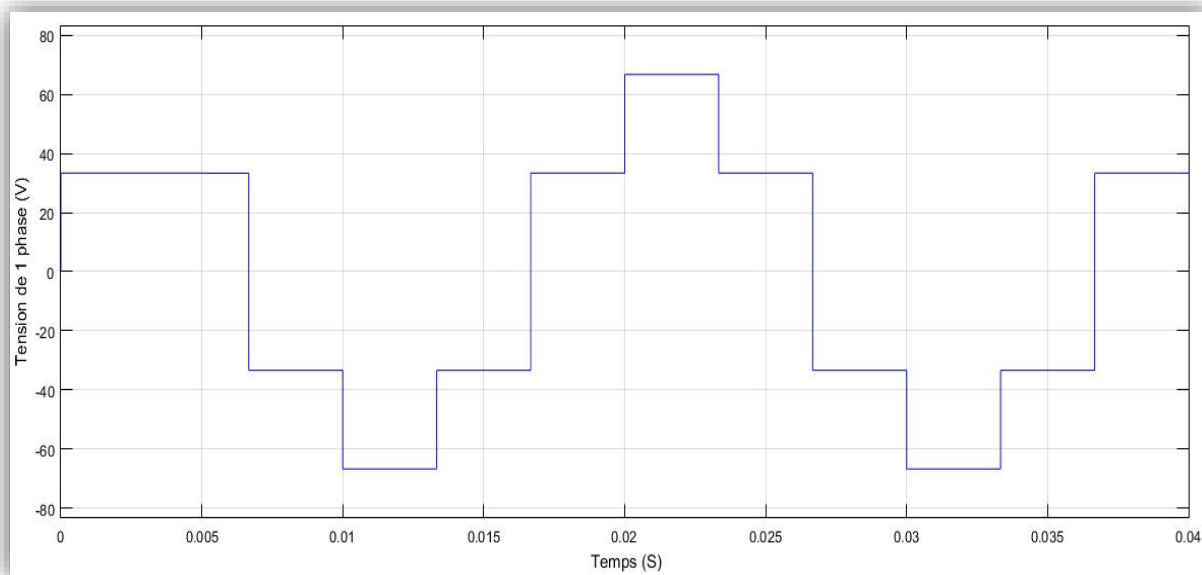


Figure 3.18 : Tension de sortie d`une phase de l`onduleur triphasé commandé par plein onde.

- Tension de 3 phases :

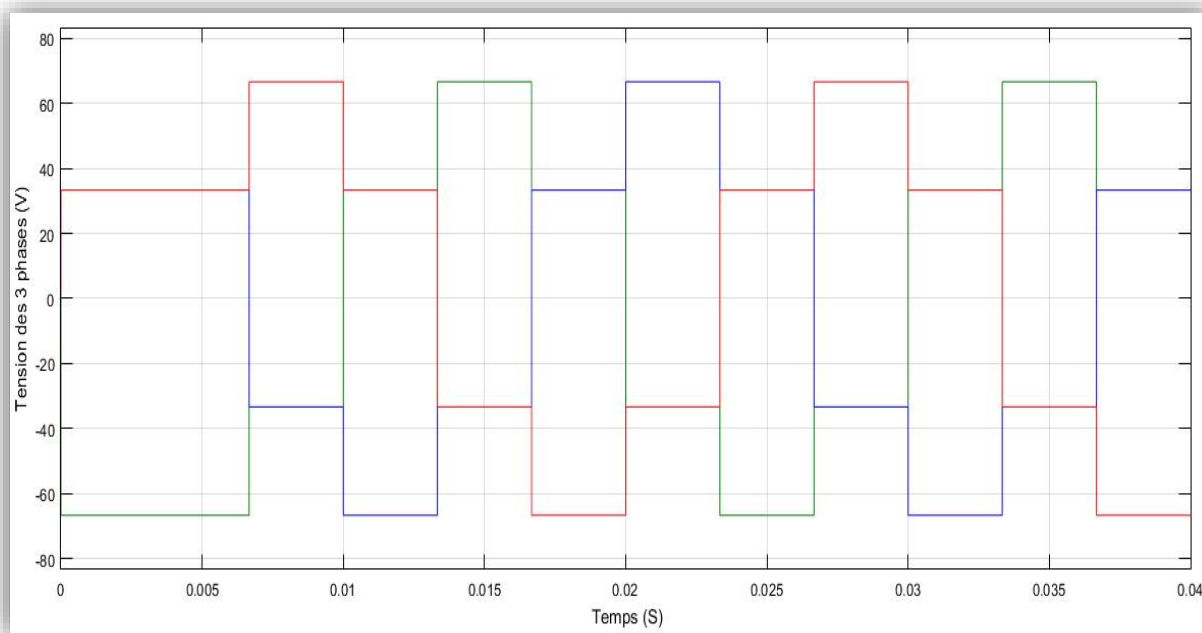


Figure 3.19 : Tension de sortie de 3 phases de l`onduleur triphasé commandé par plein onde.

- Spectre d'harmonique de la tension :

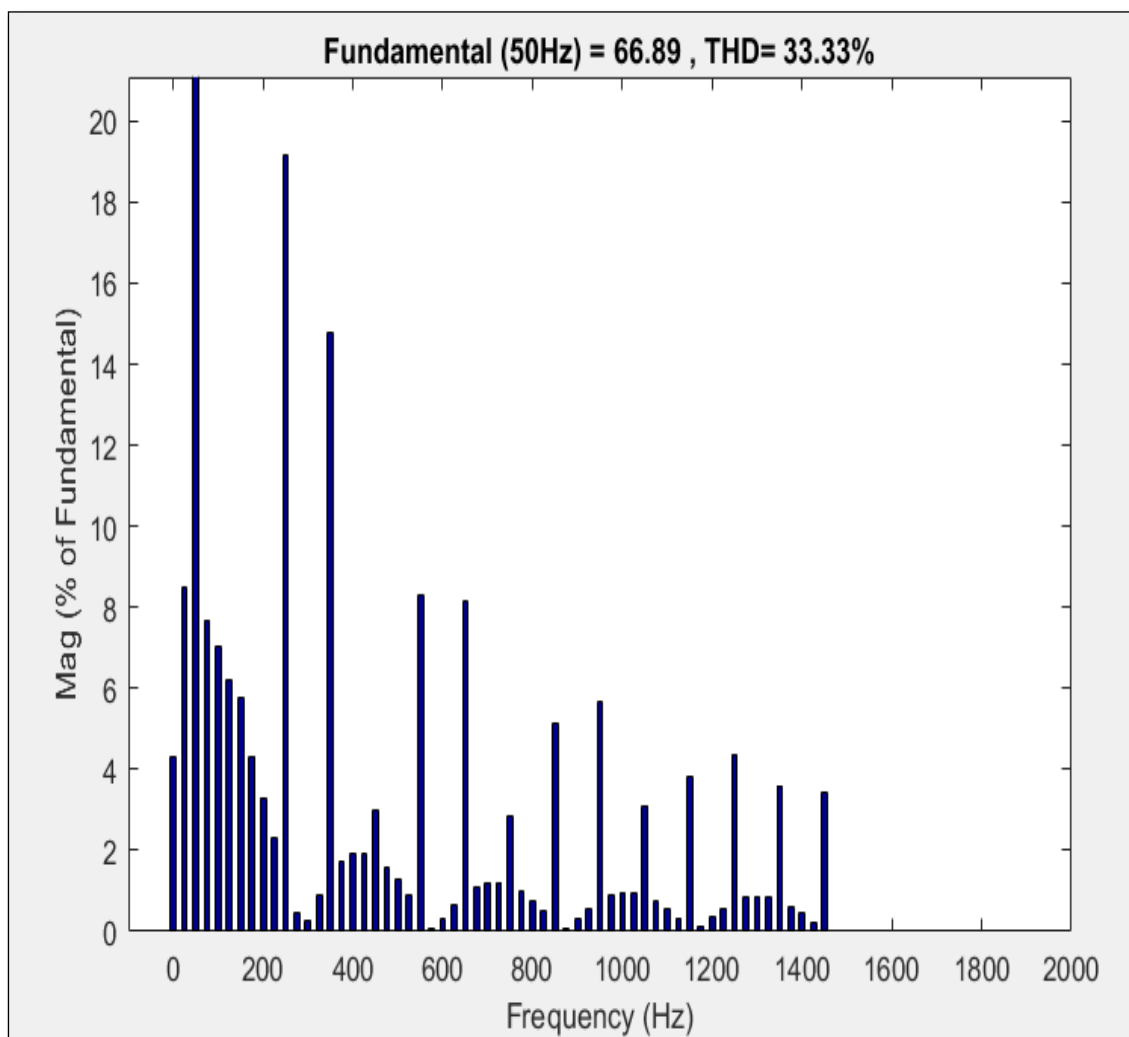


Figure 3.20 : Spectre d'harmonique de la tension de sortie de l'onduleur triphasé commande pleine onde.

La figure 3.20 représente l'analyse spectrale d'harmonique de tension, nous avons obtenus un **THD = 33.33%**.

- Courant d'une phase :

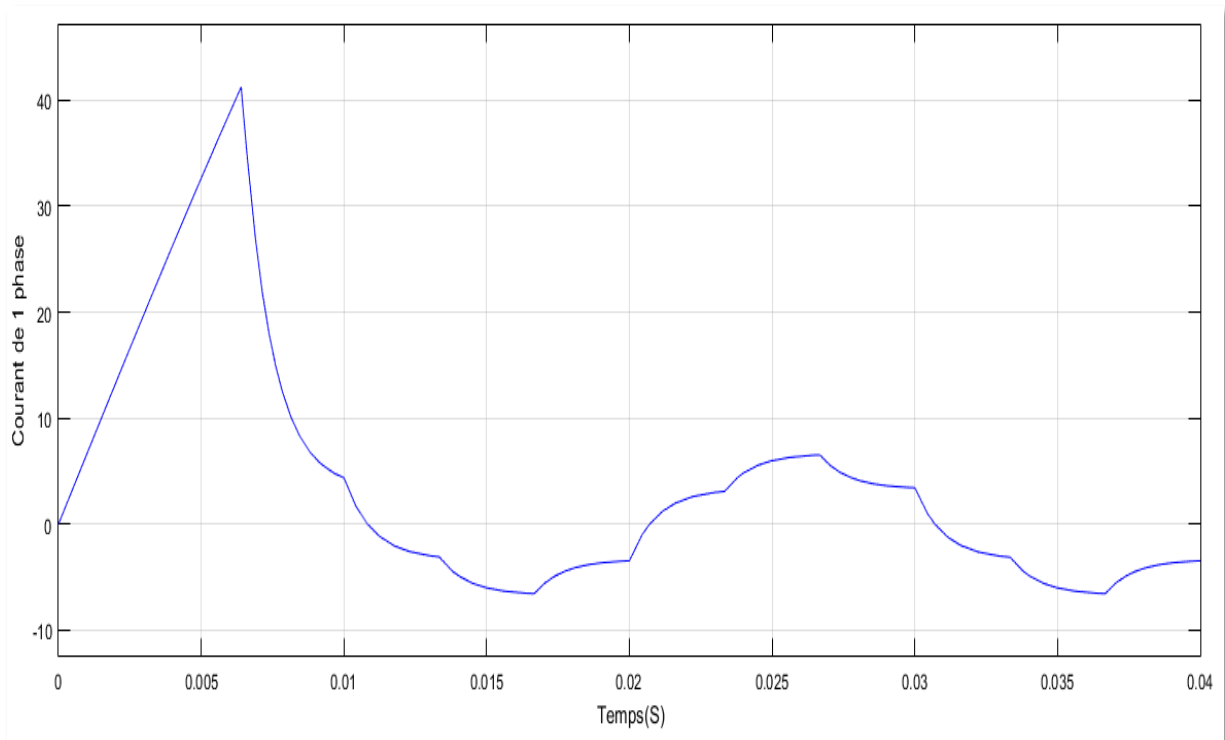


Figure 3.21 : Courant de sortie d'une phase de l'onduleur triphasé commande pleine onde.

- Courant de 3 phases :

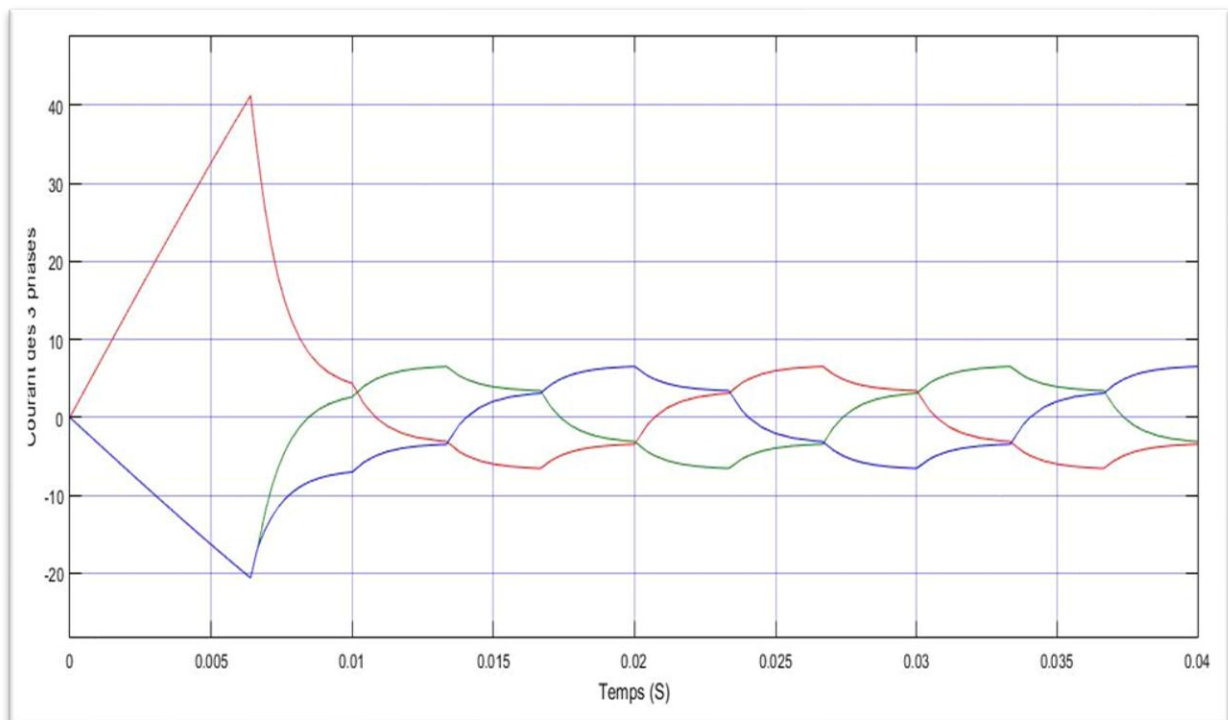


Figure 3.22 : Courant de sortie de 3 phases de l'onduleur triphasé commande plein onde.

- Tension entre les 3 phases :

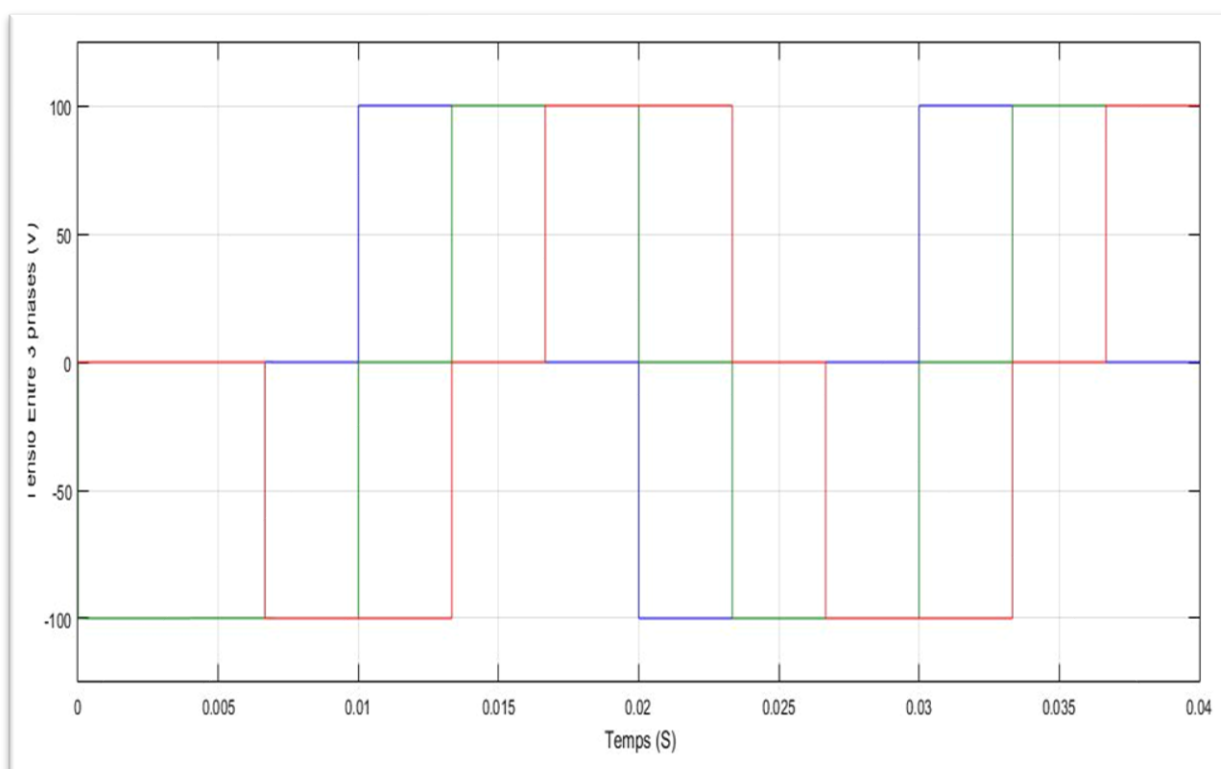


Figure 3.23 : Tension de sortie entre 3 phases.

3.4.1.2 Description des résultats

Après la simulation nous obtenons des signaux de tension de sortie d'onduleur 3 phases sont variés dans l'intervalle (100V & -100V passer par 0), il y a un décalage entre les tensions de phase.

Nous remarquons que le taux de distorsion harmonique pour la tension de sortie est de valeur de THD=33.33%. Il y a un risque très élevé de perturbation et d'échauffement.

3.4.2 Simulation de commande MLI d'un onduleur triphasé

3.4.2.1 MLI sinus-triangle

La commande MLI sinus-triangle est une technique de commande utilisée pour contrôler la tension de sortie d'un onduleur en but d'obtenir une forme d'onde sinusoïdale, les principes de fonctionnement de cette commande compare deux signaux :

- Un signal de référence sinusoïdale
- Un signal triangulaire

L'avantage de cette commande c'est que la forme d'onde de sortie sinusoïdale est de haute qualité, de bonne résolution de la tension de sortie et de simple mis en œuvre.

Le model électrique d'un onduleur avec commande MLI sinus-triangle peut être utilisé pour simuler le comportement de l'onduleur et analyser ses performances. Ce modèle peut intégrer la caractéristique des interrupteurs de l'onduleur, la tension d'entrée continue, la charge connectée et la technique de commande MLI sinus-triangle.

Le modèle mathématique de la commande MLI sinus-triangle permet de déterminer les moments de commutation des interrupteurs en fonction des caractéristiques de l'onde sinusoïdale de référence et de l'onde triangulaire porteuse.

3.4.2.1.1 Sinus-triangle model électrique

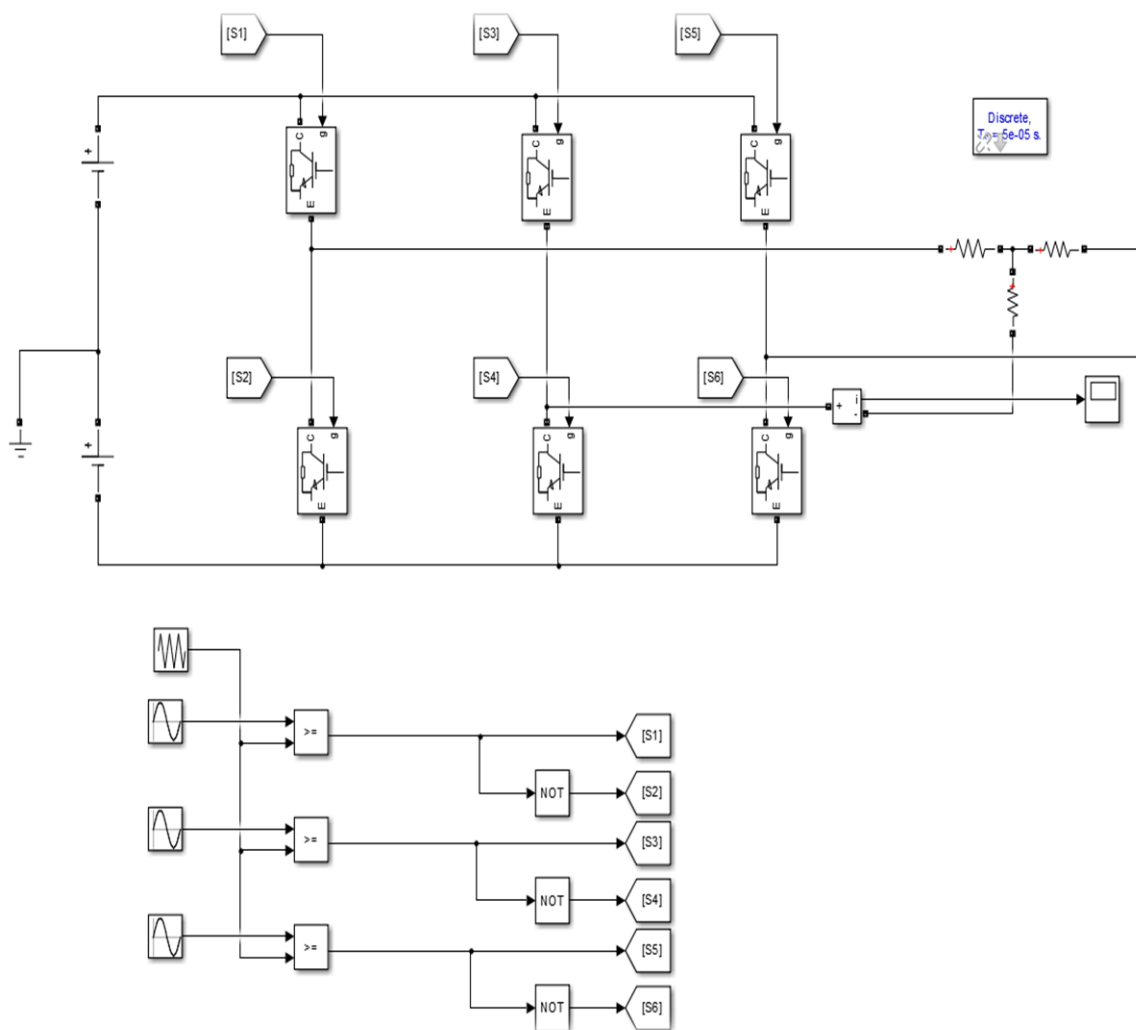


Figure 3.24 : Schéma bloc de la commande sin-triangle modèle électrique.

3.4.2.1.1 Résultats de simulation

Pour charge R ($R = 1\Omega$) :

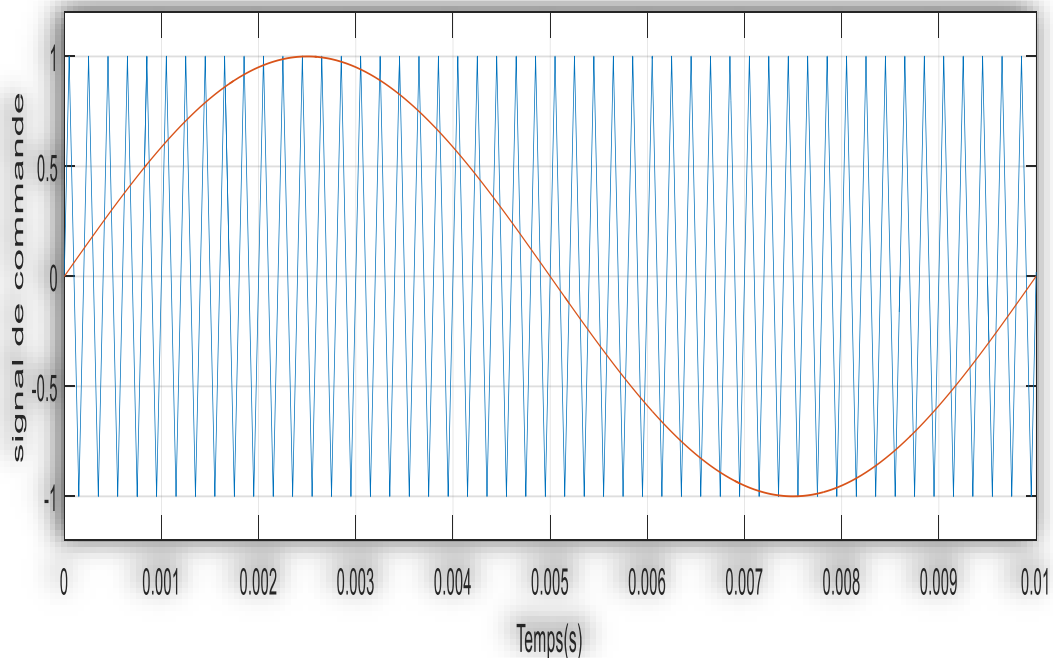


Figure 3.25 : Signal de la commande.

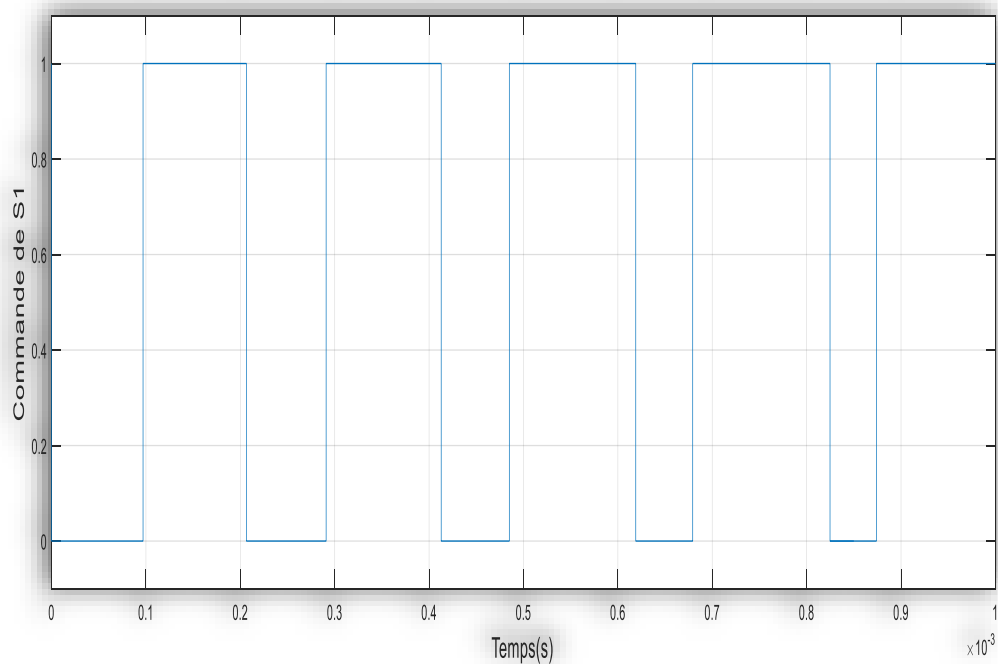


Figure 3.26 : Signal d'interrupteur S1.

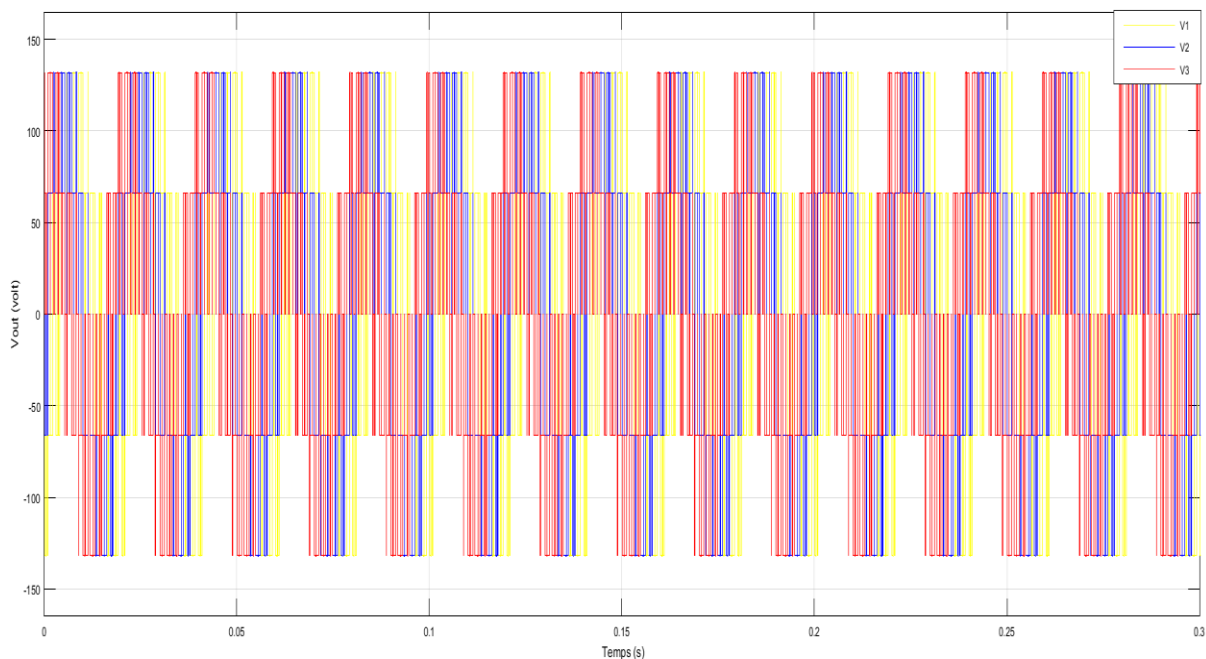


Figure 3.27 : Signal de tension de sortie.

3.4.2.1.1.2 Description des résultats

Après la simulation nous obtenons un signal de tension de sortie carrée a trois étapes de valeurs vairée (+130 à -130, passer par le 0).

3.4.2.1.2 Sinus-triangle modèle mathématique

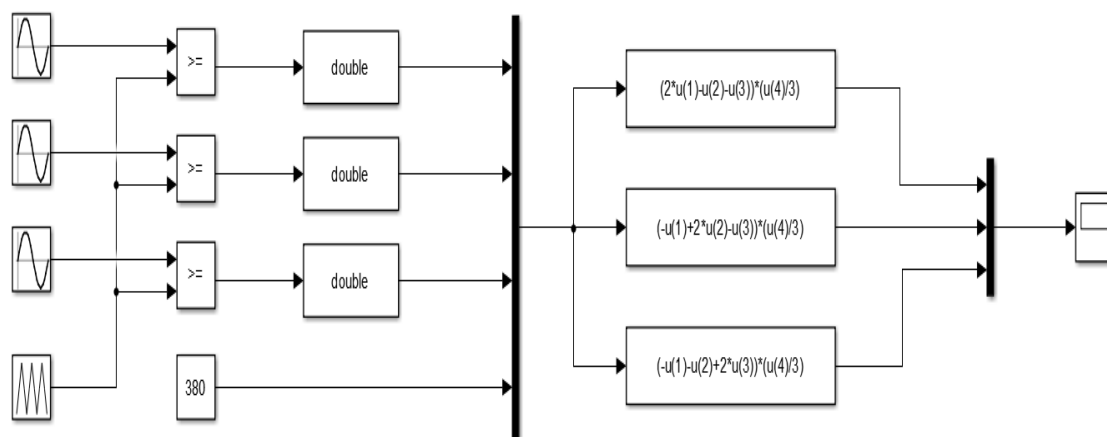


Figure 3.28 : Schéma bloc de la commande sinus-triangle modèle mathématique.

3.4.2.1.2.1 Résultats de la simulation

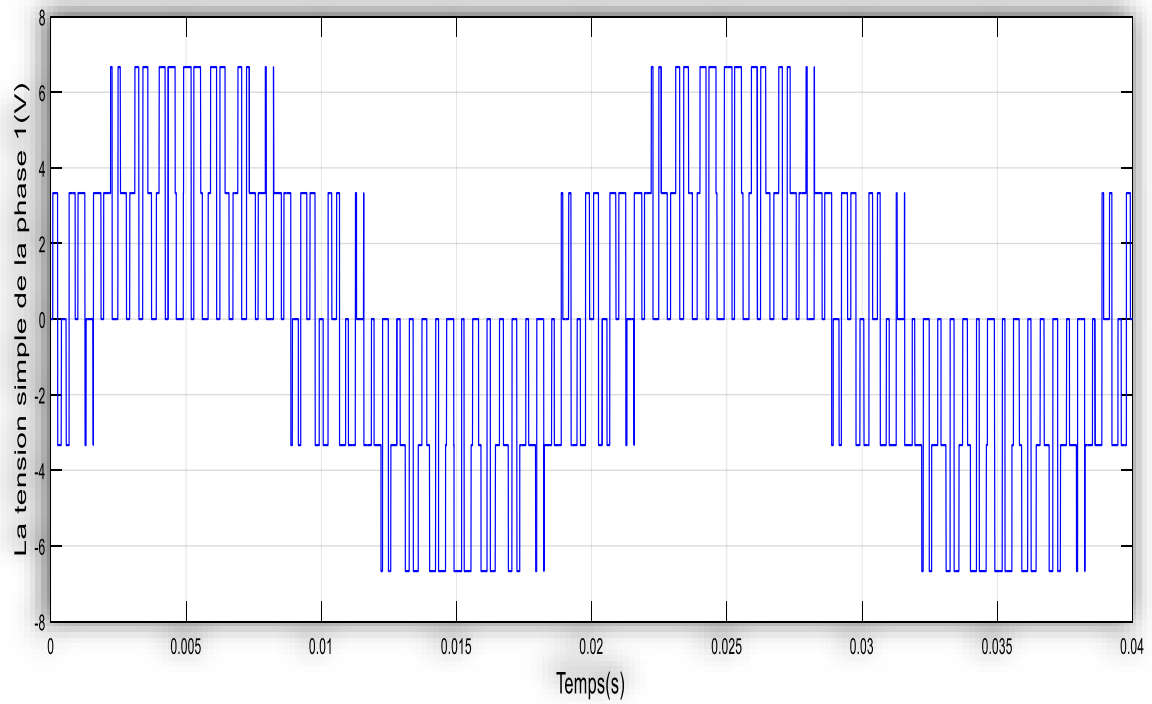


Figure 3.29 : La tension simple d'une phase (V1).

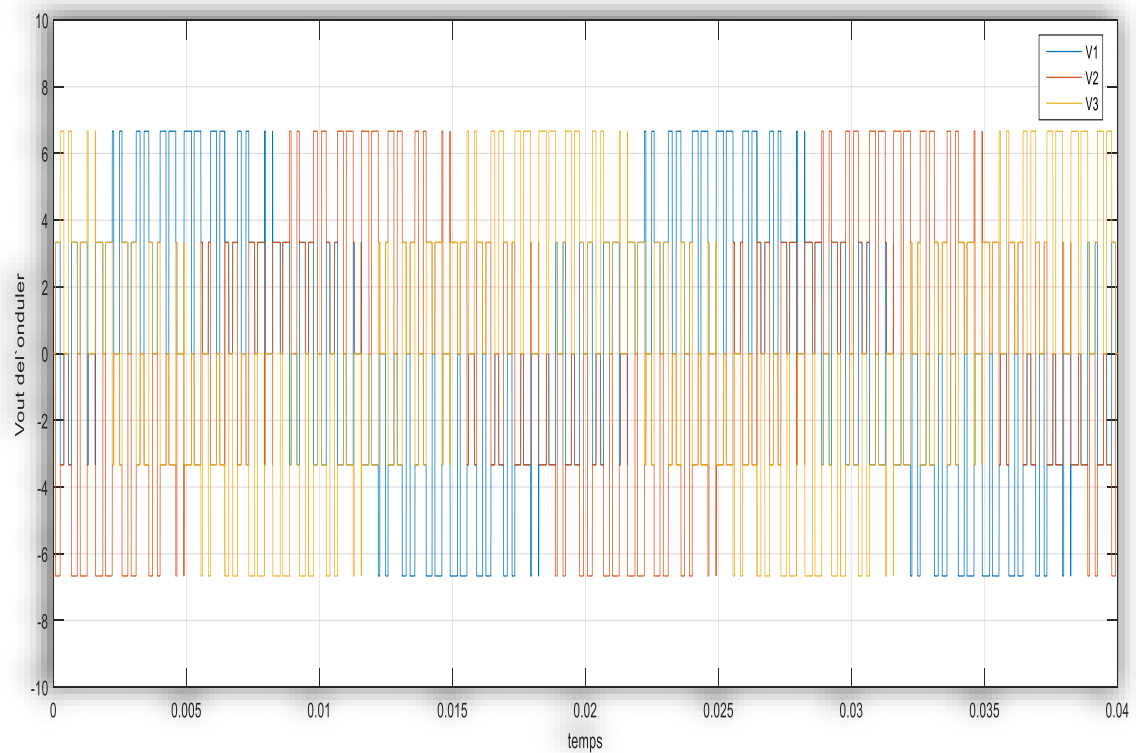


Figure 3.30 : La tension de sortie trois phases.

- Spectre d'harmonique de tension :

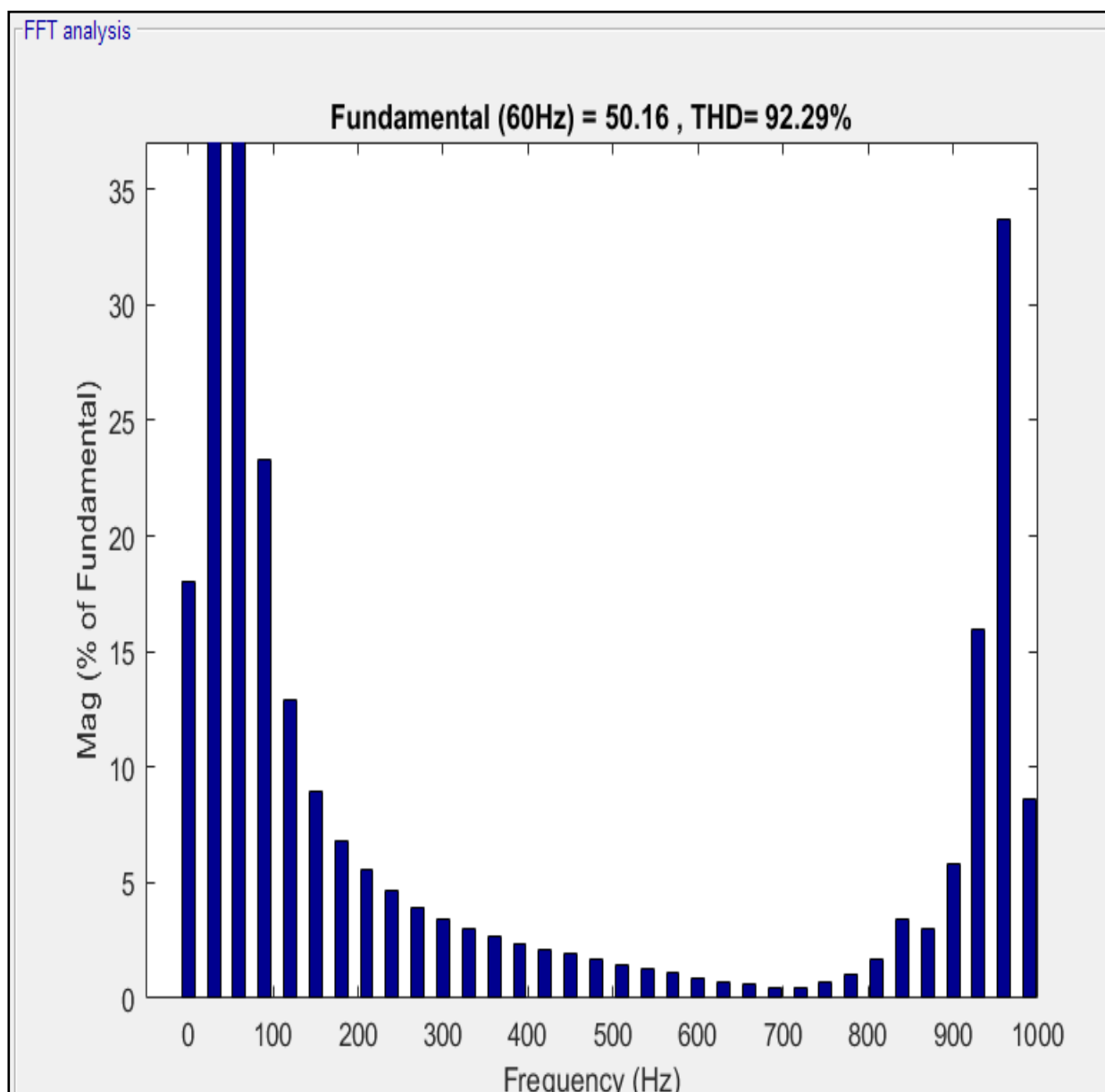


Figure 3.31 : Spectre d'harmonique de tension de sortie de l'onduleur triphasé commande sinus- triangle modèle mathématique.

3.4.2.1.2.2 Description des résultats

Après la simulation nous obtenons le signal des tensions de sorties d'onduleur 3 phases commandé par sinus-triangle de 3 états varié dans l'intervalle (+7V & -7V passer par 0), il y a un décalage de tension entre les phases.

Nous remarquons que le taux de distorsion harmonique de la tension de sortie est de valeur THD=92.29%, il y a un risque très élevé de perturbation et d'échauffement.

3.4.2.2 MLI sinus-hystérésis

La commande onduleur MLI sinus-hystérésis est une stratégie de commande simple, efficace et robuste, utilisée pour contrôler les onduleurs. Elle permet d'obtenir une forme d'onde de sortie de haute qualité avec une faible distorsion harmonique.

Le principe de fonctionnement de cette commande est la comparaison d'une onde sinusoïdale de référence avec une onde triangulaire porteuse. Les moments de commutation des interrupteurs de l'onduleur coïncident avec les points d'intersection de ces deux ondes.

Les avantages de la commande sinus-hystérésis est la simplicité de mise on œuvre, la bonne qualité de la forme d'onde de sortie et une commande très robuste aux variations des paramètres du système. Par contre l'inconvénients de cette commande c'est la sensibilité au bruit dans le signal de rétraction.

3.4.2.2.1 Simulation de commande sinus-hystérésis

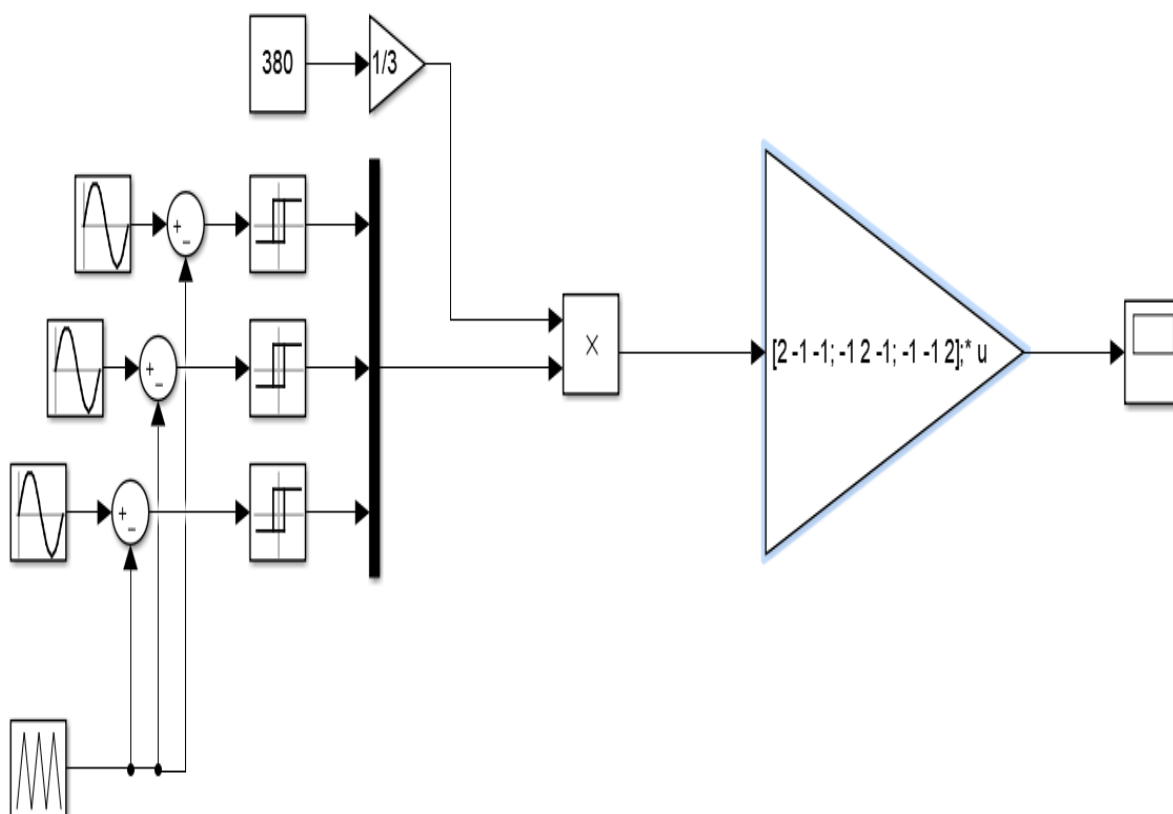


Figure 3.32 : Schéma bloc de la commande sinus-hystérésis.

La figure 3.32 représente le schéma bloc de la commande sinus-hystérésis d'un onduleur triphasé.

3.4.2.2.1 Résultats de simulation

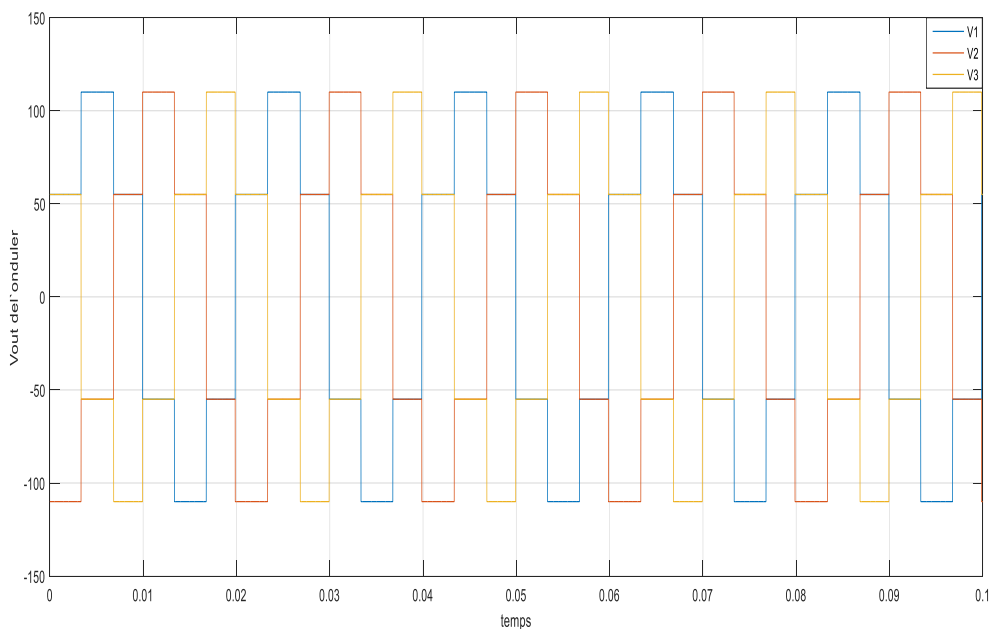


Figure 3.33 : La tension de sortie des trois phases.

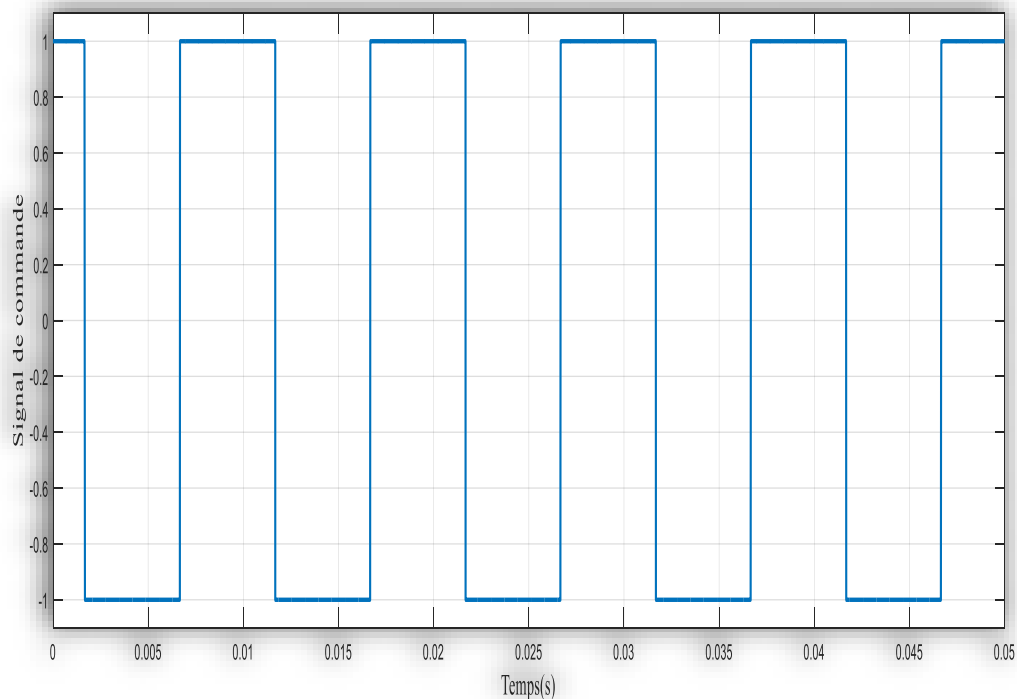


Figure 3.34 : Le signal de commande sinus-hystérésis.

3.4.2.2.1.2 Description de résultat

Après la simulation, nous avons obtenu un signal carré de tension de sortie de l'onduleur triphasé commandé par hystérésis. Ce signal passe par quatre états et chaque phase varie dans l'intervalle (+110V, +55V, -55V et -110V). De plus, il y a un décalage entre les tensions des différentes phases.

- Spectre d'harmonique de tension :

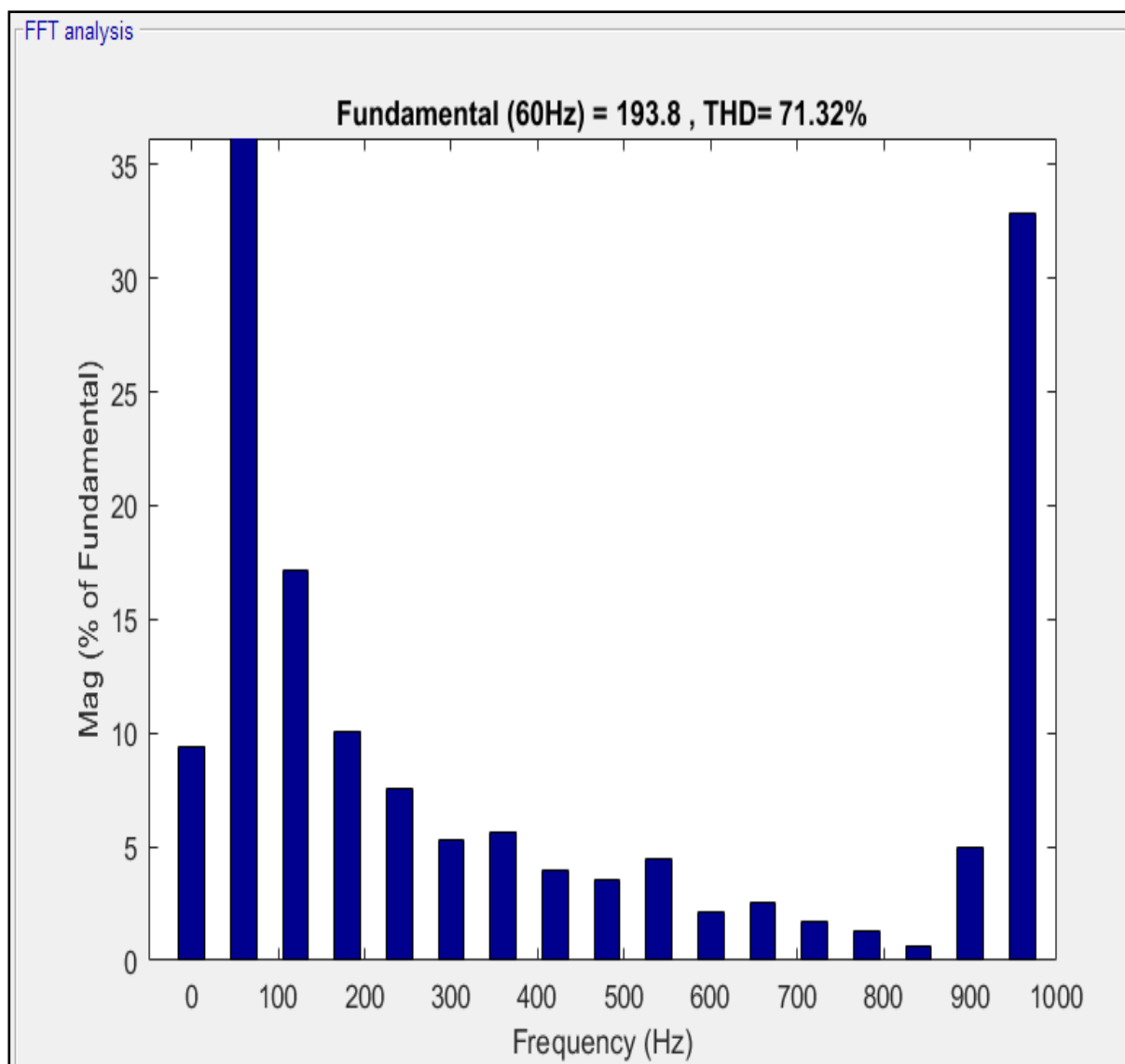


Figure 3.35 : Spectre d'harmonique de tension de sortie de l'onduleur triphasé commande sinus- hystérésis.

La figure 3.35 montre un taux de distorsion harmonique pour la tension, nous remarquons la valeur de THD est (=71.32%).

3.4.2.2.2 Simulation de commande sinus-hystérésis avec filtre

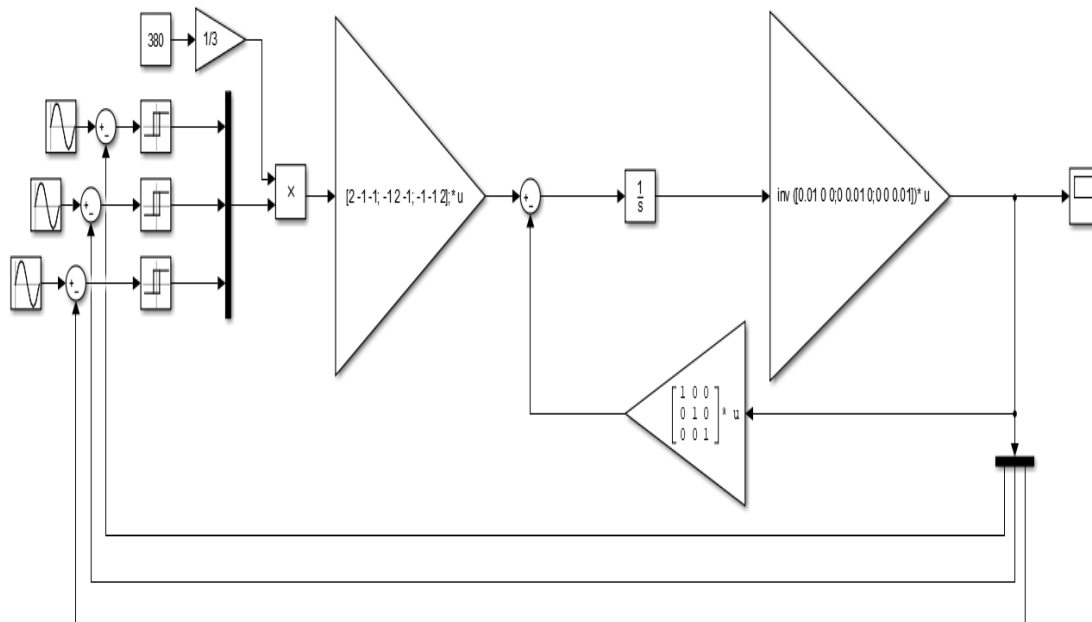


Figure 3.36 : Schéma bloc de la commande sinus-hystérésis avec filtre.

3.4.2.2.2.1 Résultats de simulation

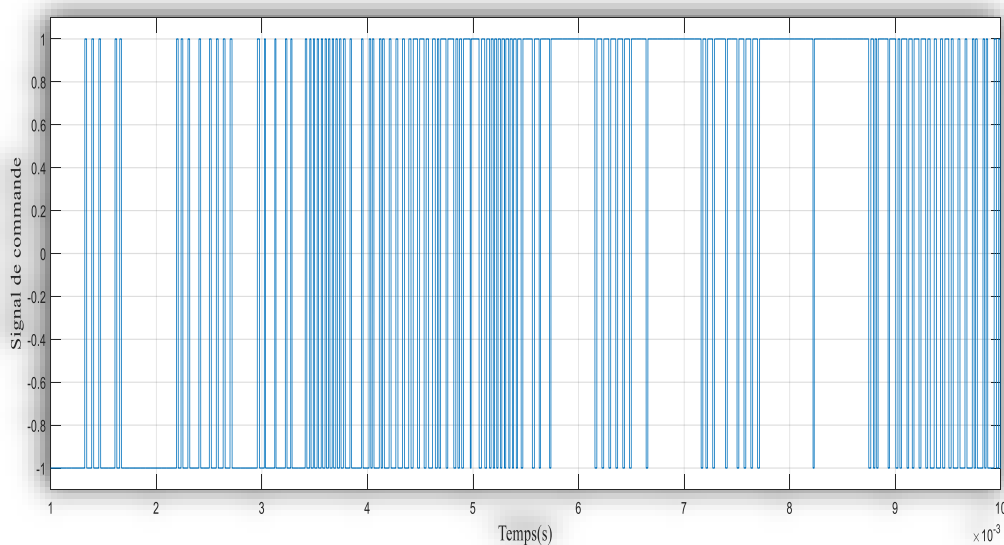


Figure 3.37 : Signal de commande.

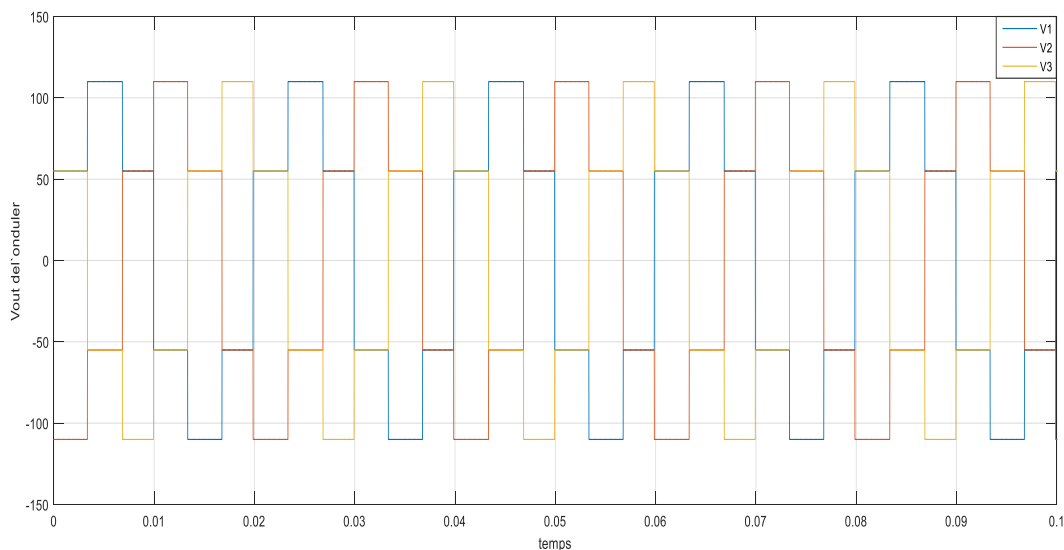


Figure 3.38 : Signal de sortie des 3 phases.

- Spectre d'harmonique de tension :

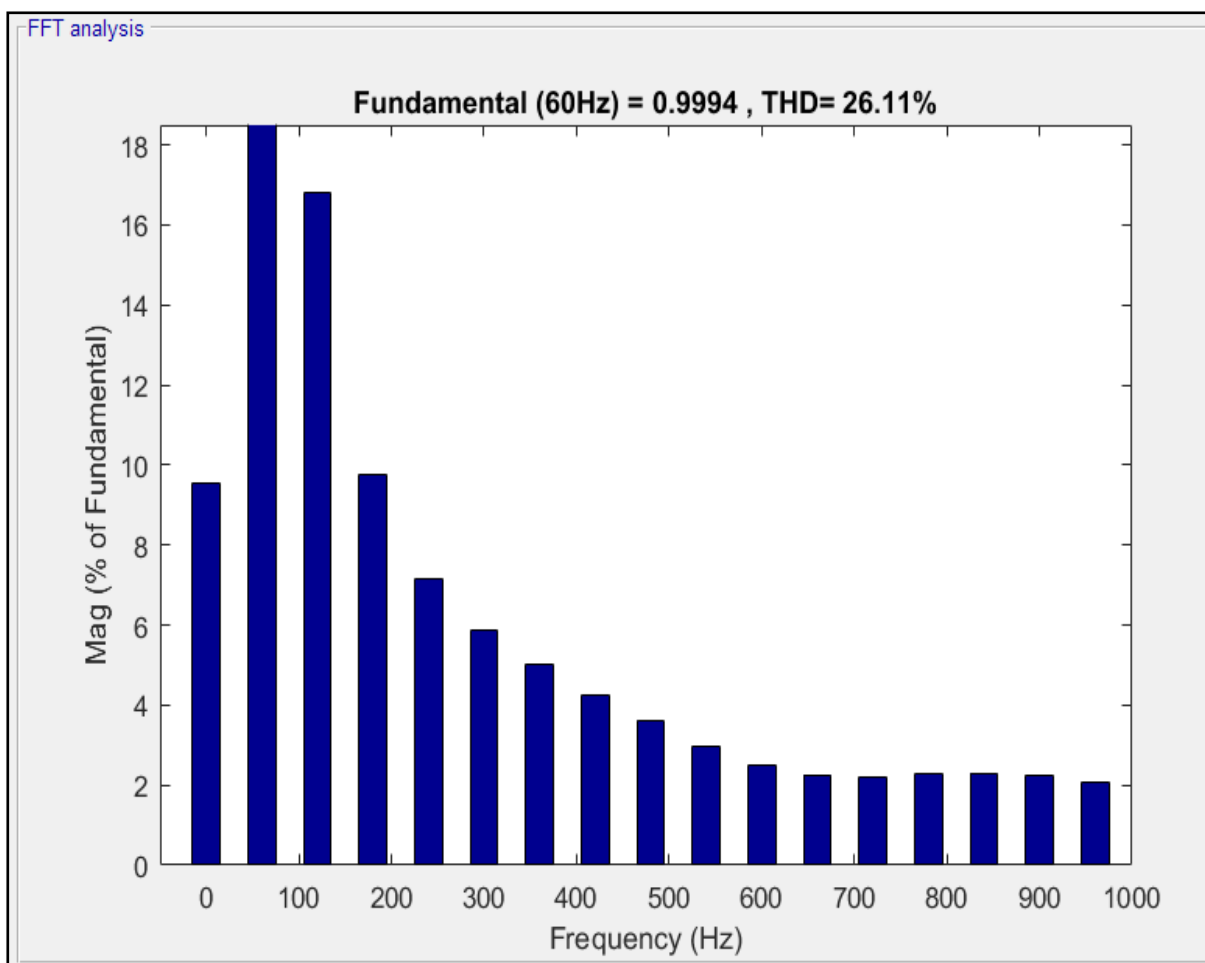


Figure 3.39 : Spectre d'harmonique de tension de sortie de l'onduleur triphasé commande sinus-hystérésis avec filtre.

3.4.2.2.2 Description des résultats

Après la simulation, nous avons obtenu un signal sinusoïdal de tension de sortie d'onduleur triphasé commandé par sinus-hystérésis avec filtre. Chaque phase varie dans l'intervalle (+20V et -20V) avec une fréquence 50Hz.

Le taux de distorsion harmonique (THD) de la tension de sortie est de 26,11 %. La distorsion de l'onde de tension est très importante, entraînant un risque élevé de perturbation.

3.4.3 Comparaison entre les commandes d'onduleurs triphasés

Dans les onduleurs triphasés, la commande joue un rôle crucial en déterminant la forme d'onde de la tension de sortie. Trois techniques de commande courantes pour les onduleurs triphasés sont : la commande plein onde, la commande MLI sinus-triangle et la commande MLI sinus-hystérésis.

Le tableau ci-dessous montre les résultats de THD obtenues d'un onduleur triphasé commande par les différentes techniques de commande :

Commande	Plein onde	MLI sinus-triangle	MLI sinus-hystérésis	MLI sin hystérésis avec filtre
THD de tension (%)	33.33	92.29	71.32	26.11

Tableau 3.4 : Les valeurs des harmoniques (THD) obtenues d'un onduleur triphasé commande par les différentes techniques de commande.

Classement des commandes en croissance : On a en premier la commande sinus-hystérésis avec filtre de valeur de THD=26.11% en suit la commande plein onde de valeur de THD=33.33%, après la commande MLI sinus-hystérésis de valeur de THD=71.32%, et en fin la commande sinus-triangle de valeur de THD=92.29%.

3.5 Association d'un moteur asynchrone à base d'un onduleur

Pour contrôler la vitesse d'un moteur on utilise plusieurs techniques, parmi ces dernières le branchement d'onduleur.

Dans cette étude, nous allons utiliser plusieurs techniques de commande afin de sélectionner la plus efficace.

Les figures suivantes reprenant la schéma block de moteur asynchrone a cage d`écureuil

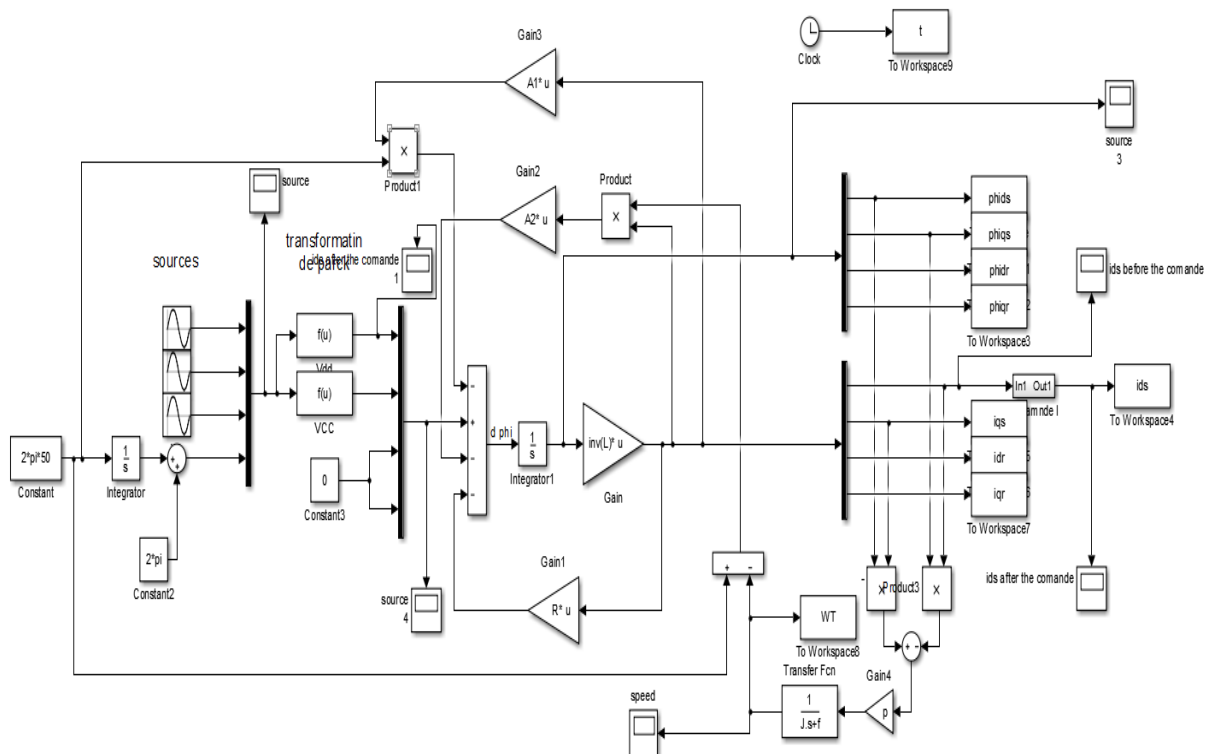


Figure 3.40 : Schéma bloc de MAS a cage d`écureuil.

3.5.1 Commande sinus-triangle

Les figures suivantes montrent les performances de fonctionnement d`un moteur asynchrone.

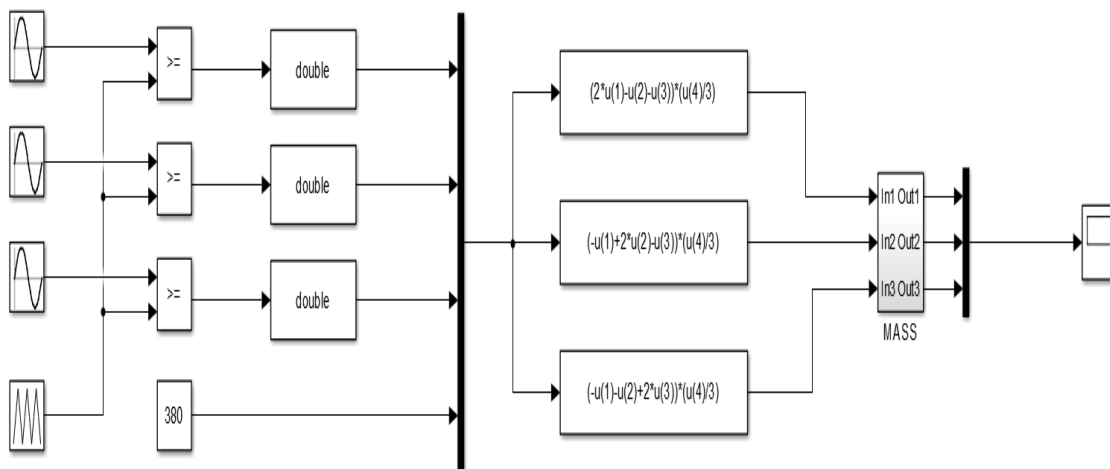


Figure 3.41 : Schéma bloc de MAS alimenté par un onduleur sinus-triangle.

3.5.1.1 Résultat de commande sinus-triangle à vide

- La vitesse d'une MAS à vide :

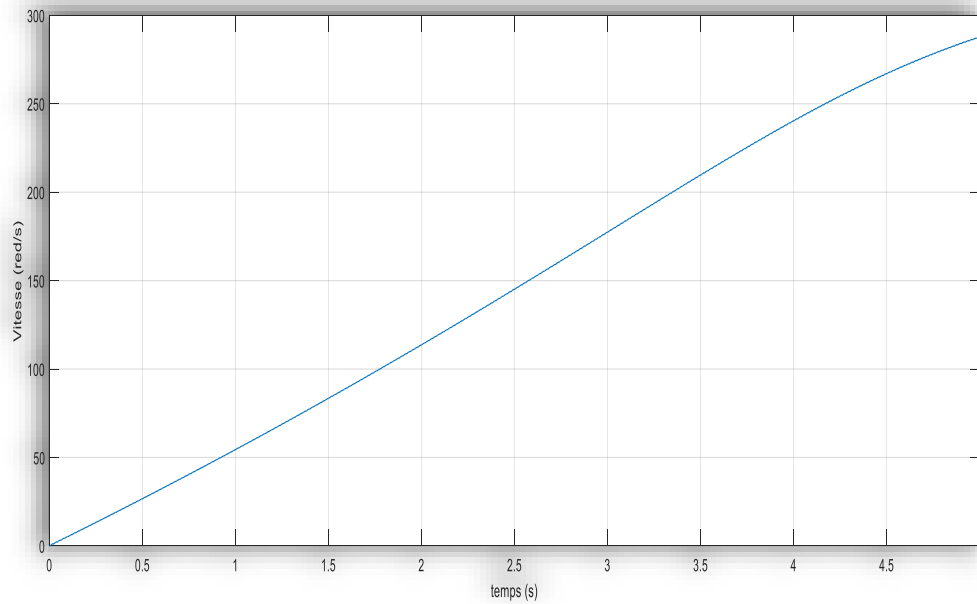


Figure 3.42 : La vitesse d'une MAS à vide utilisant l'onduleur sinus-triangle.

- Le courant d'une MAS à vide :

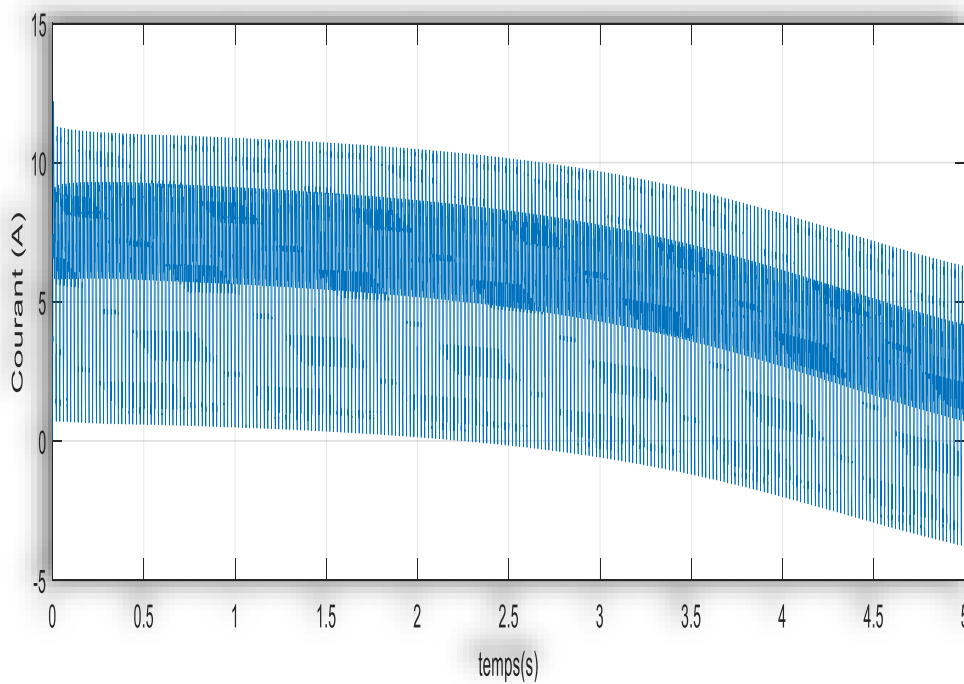


Figure 3.43 : Le courant d'une MAS à vide utilisant l'onduleur sinus-triangle.

- Le couple d'une MAS à vide :

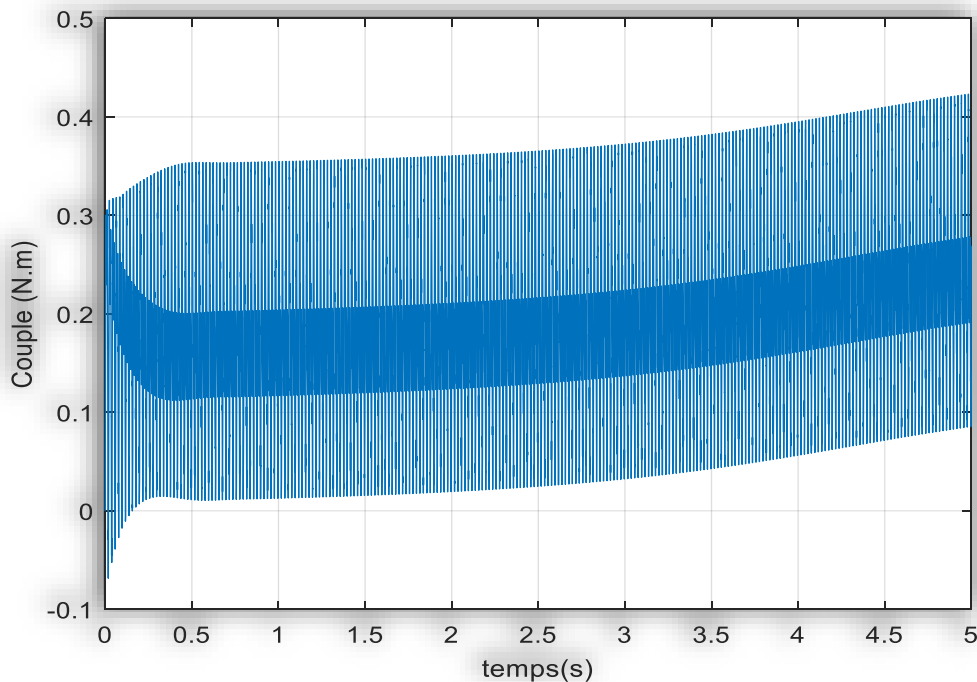


Figure 3.44 : Le couple d'une MAS à vide obtenu après l'association d'un onduleur sinus-triangle.

3.5.1.2 Résultat de commande sinus-triangle en charge

- La vitesse d'une MAS en charge :

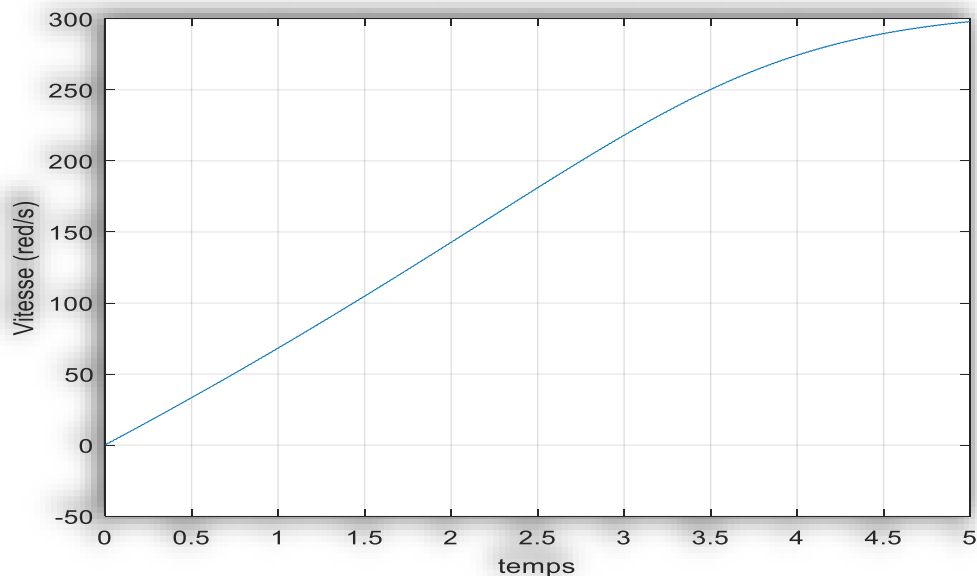


Figure 3.45 : La vitesse d'une MAS en charge on utilisant l'onduleur sinus-triangle.

- Le courant d'une MAS en charge :

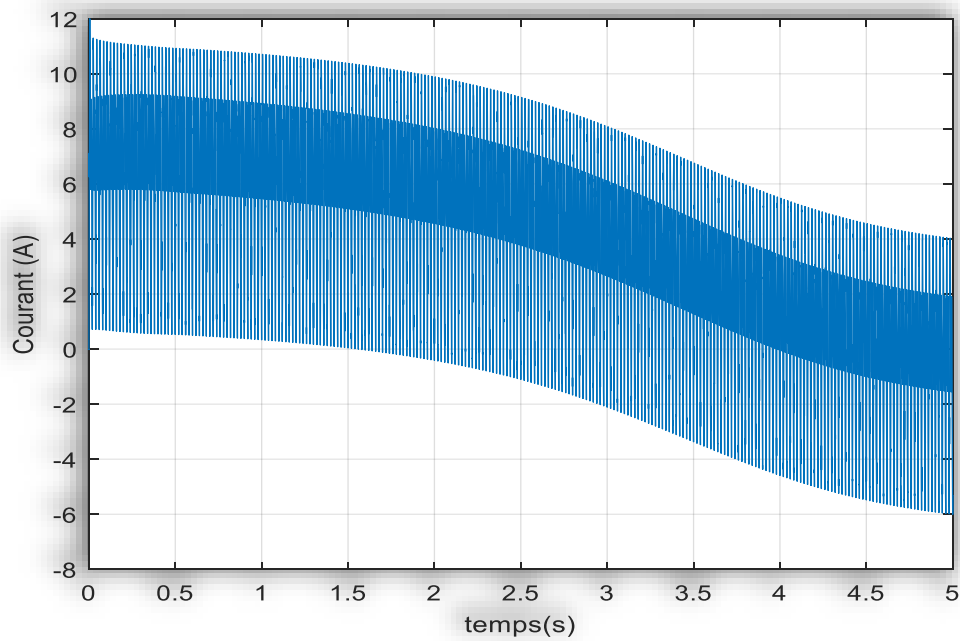


Figure 3.46 : Le courant d'une MAS en charge on utilisant l'onduleur sinus-triangle.

- Le couple d'une MAS en charge :

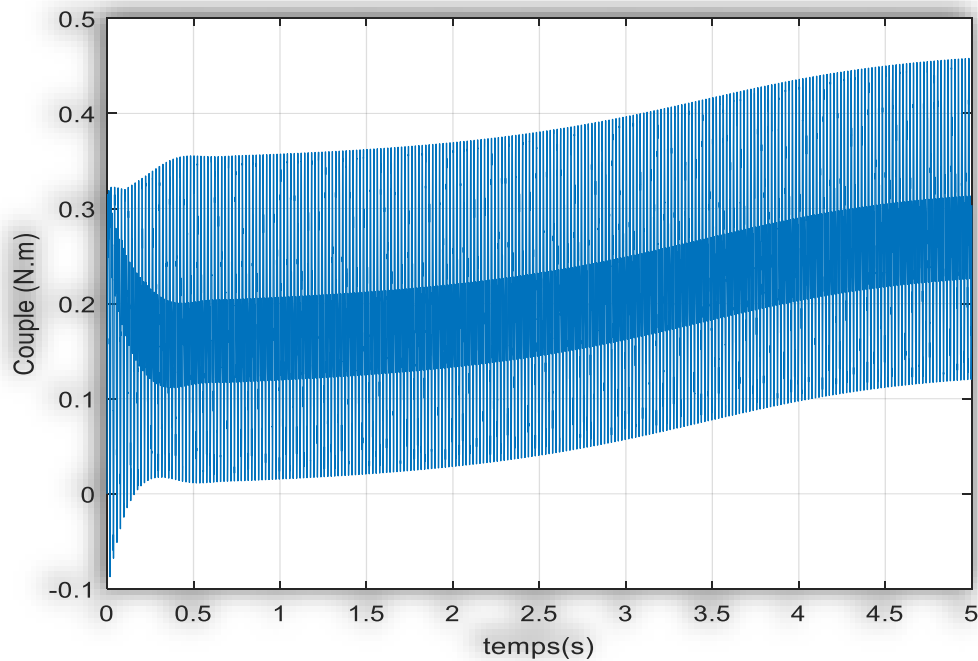


Figure 3.47 : Le couple d'une MAS en charge on utilisant l'onduleur sinus-triangle.

3.5.2 Commande sinus-hystérésis

Le schéma bloc est présenté par la Figure 3.47 :

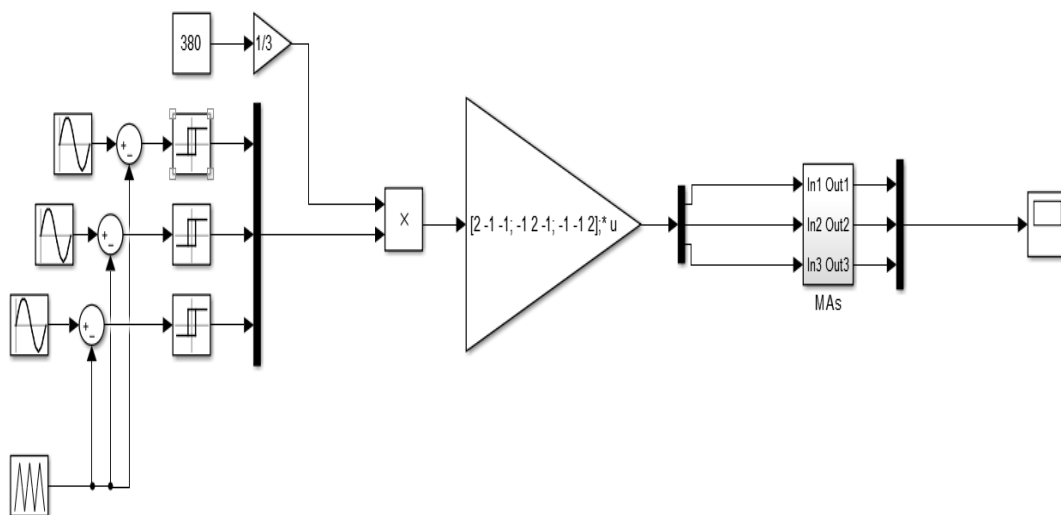


Figure 3.48 : Schéma bloc de MAS alimenté par un onduleur sinus-hystérésis.

3.5.2.1 Résultat de commande sinus-hystérésis à vide

- La vitesse d'une MAS à vide :

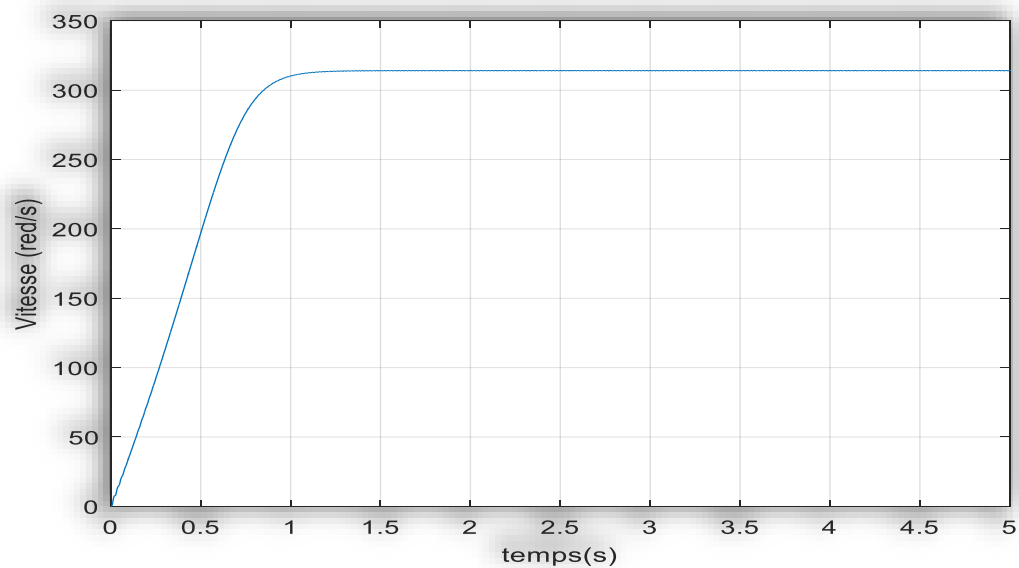


Figure 3.49 : La vitesse d'une MAS à vide relié à un onduleur sinus-hystérésis.

- Le courant d'une MAS à vide :

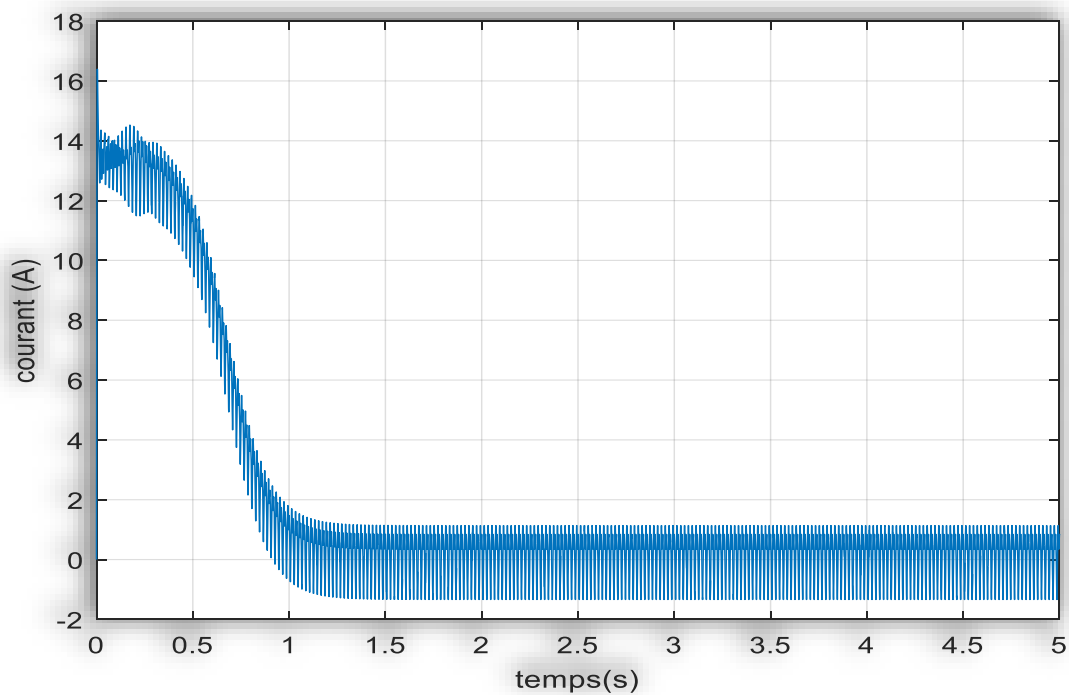


Figure 3.50 : Le courant d'une MAS à vide reliev à un onduleur sinus-hystérésis.

- Le couple d'une MAS à vide :

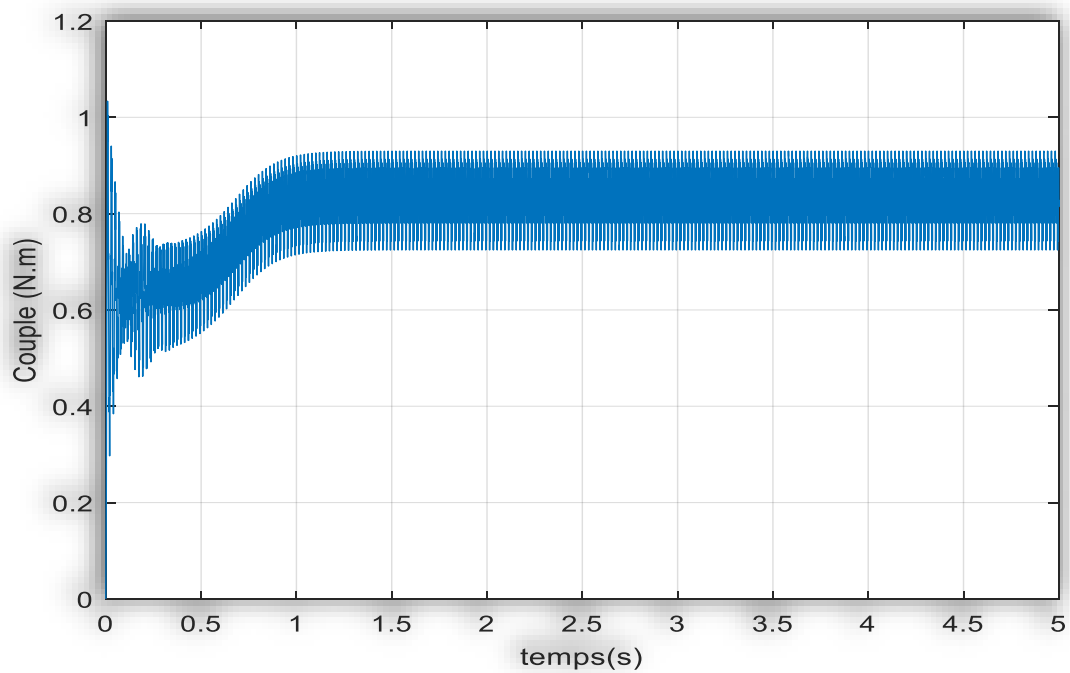


Figure 3.51 : Le couple d'une MAS à vide reliev à un onduleur sinus-hystérésis.

3.5.2.1 Résultat de commande sinus-hystérésis en charge

- La vitesse d'une MAS en charge :

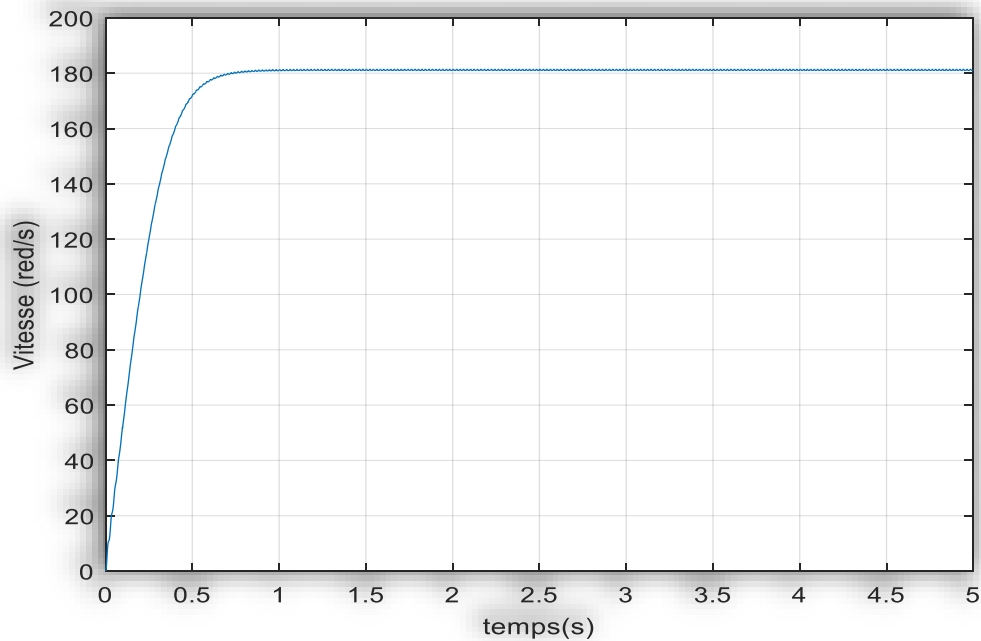


Figure 3.52 : La vitesse d'une MAS en charge relié à un onduleur sinus-hystérésis.

- Le courant d'une MAS en charge :

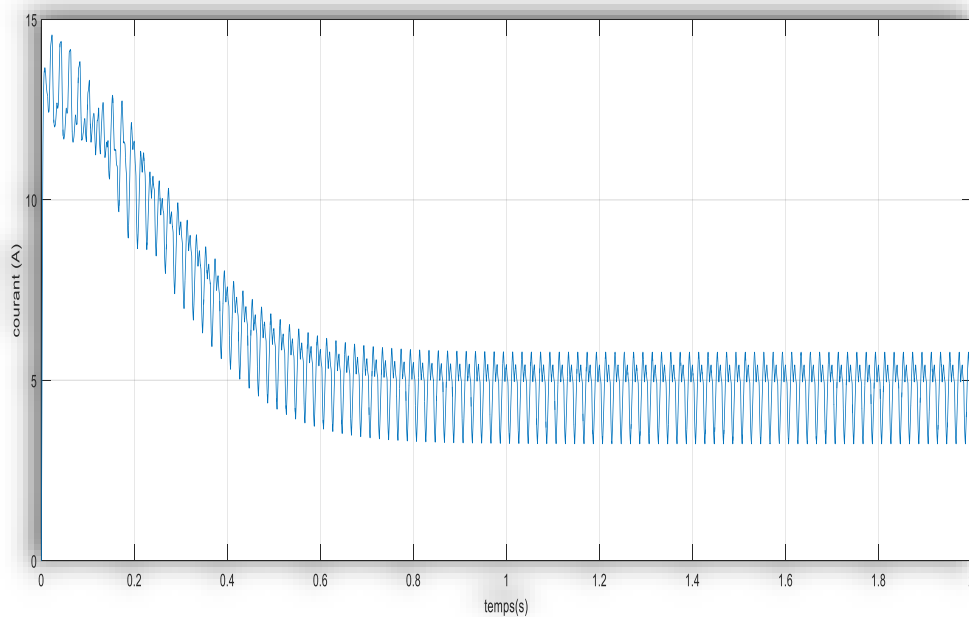


Figure 3.53 : Le courant d'une MAS en charge relié à un onduleur sinus-hystérésis.

- Le couple d'une MAS en charge :

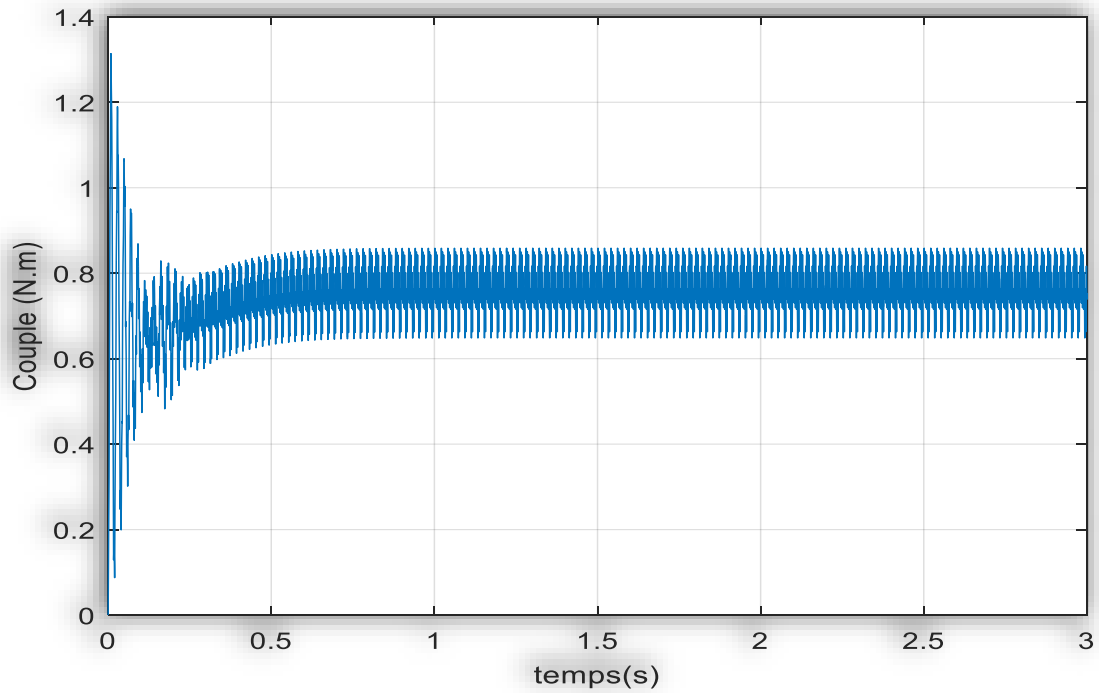


Figure 3.54: Le couple d'une MAS en charge relié à un onduleur sinus-hystérésis.

3.5.3 Commande sinus-hystérésis avec filtrage

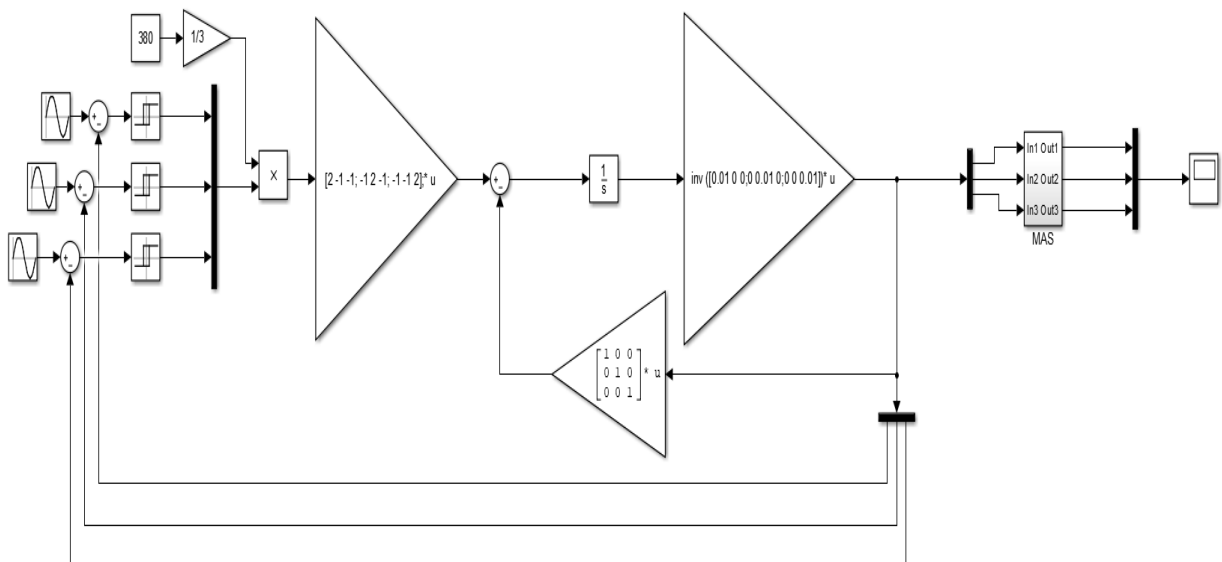


Figure 3.55 : Schéma bloc de MAS alimenté par un onduleur sinus-hystérésis avec filtrage.

3.5.3.1 Résultat de commande sinus-hystérésis avec filtrage à vide

- La vitesse d'une MAS à vide :

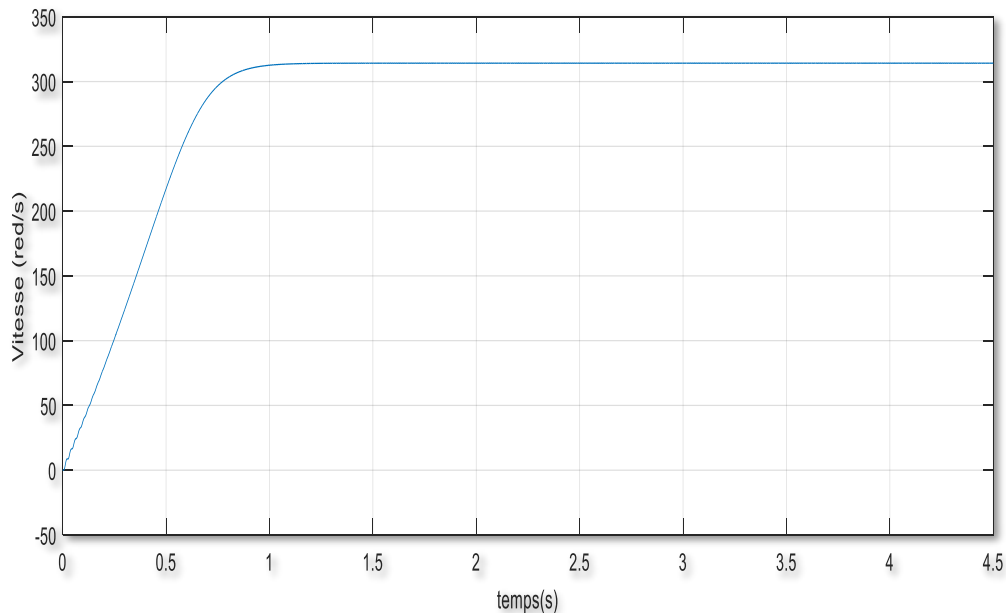


Figure 3.56 : La vitesse d'une MAS à vide relié à un onduleur sinus-hystérésis avec filtrage.

- Le courant d'une MAS à vide :

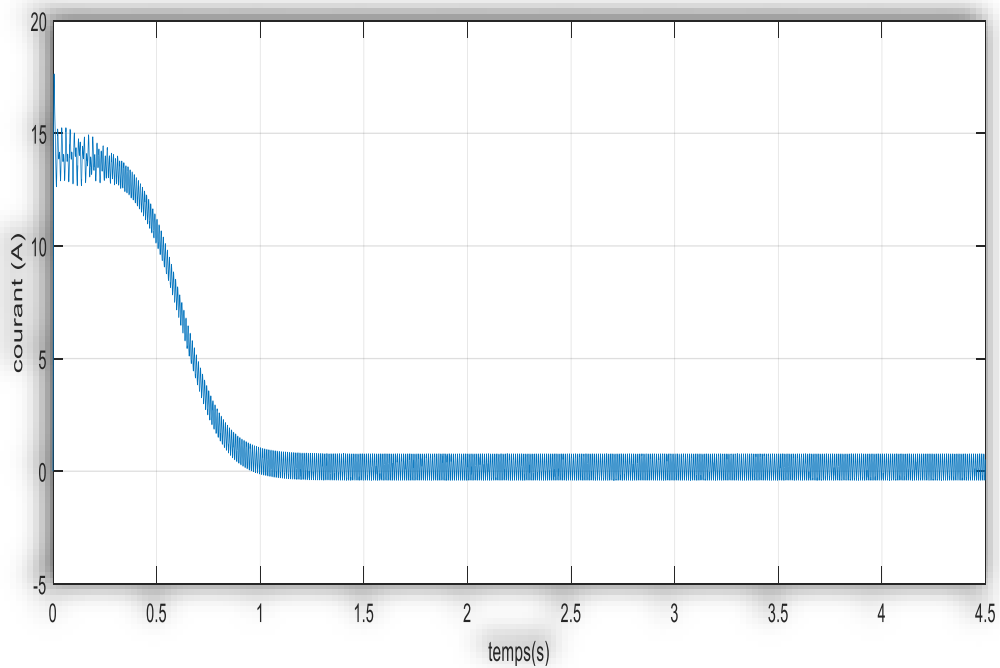


Figure 3.57 : Le courant d'une MAS à vide relié à un onduleur sinus-hystérésis avec filtrage.

- Le couple d'une MAS à vide :

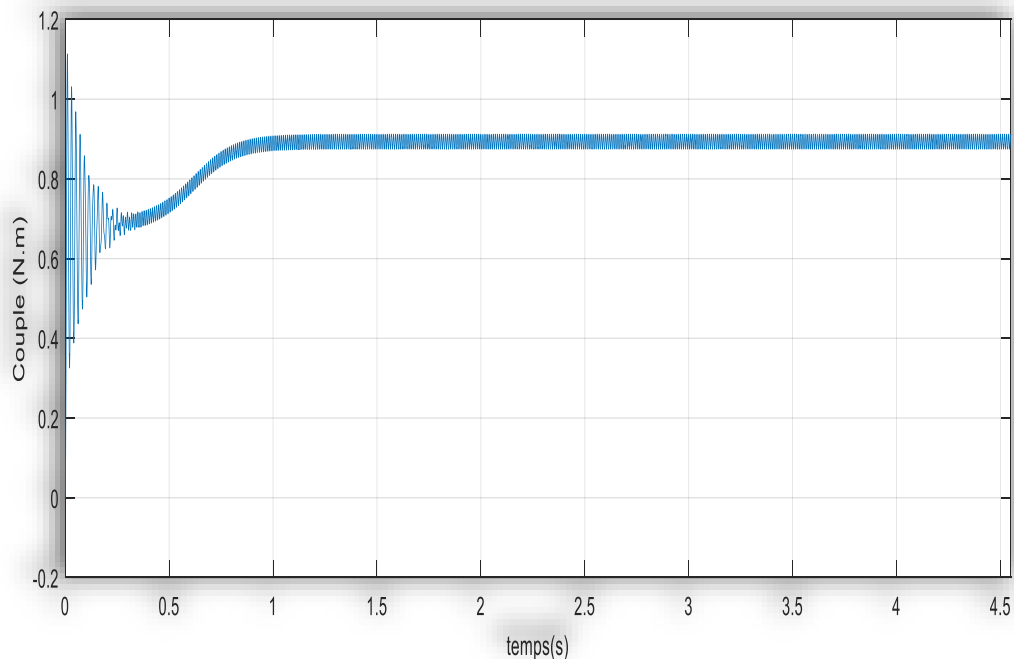


Figure 3.58 : Le couple d'une MAS à vide relié à un onduleur sinus-hystérésis avec filtrage.

3.5.3.2 Résultat de commande sinus-hystérésis avec filtrage en charge

- La vitesse d'une MAS en charge :

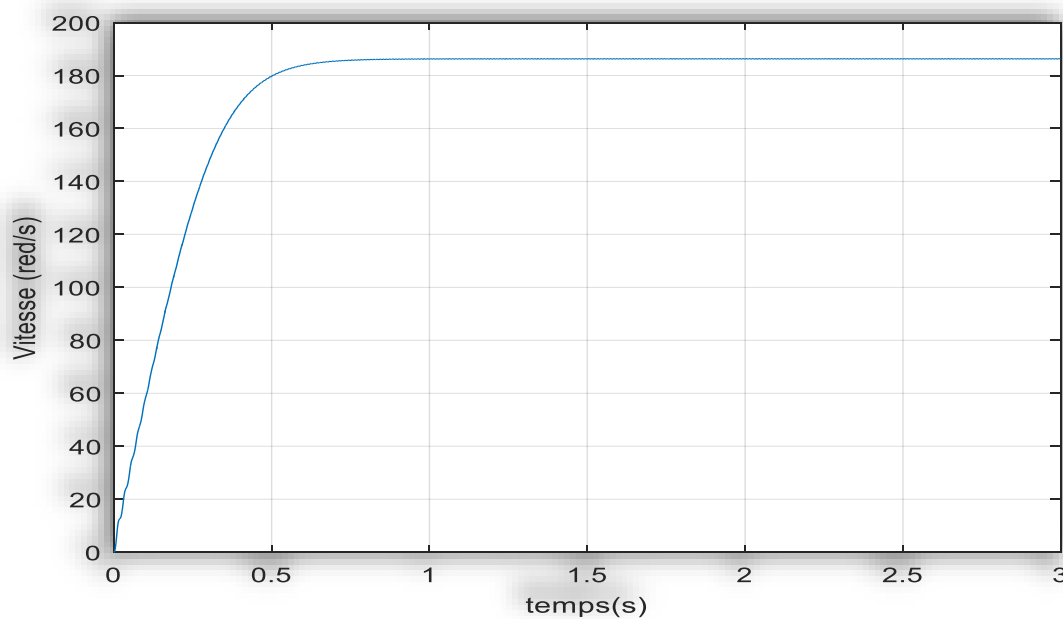


Figure 3.59 : La vitesse d'une MAS en charge relié à un onduleur sinus-hystérésis avec filtrage.

- Le courant d'une MAS en charge :

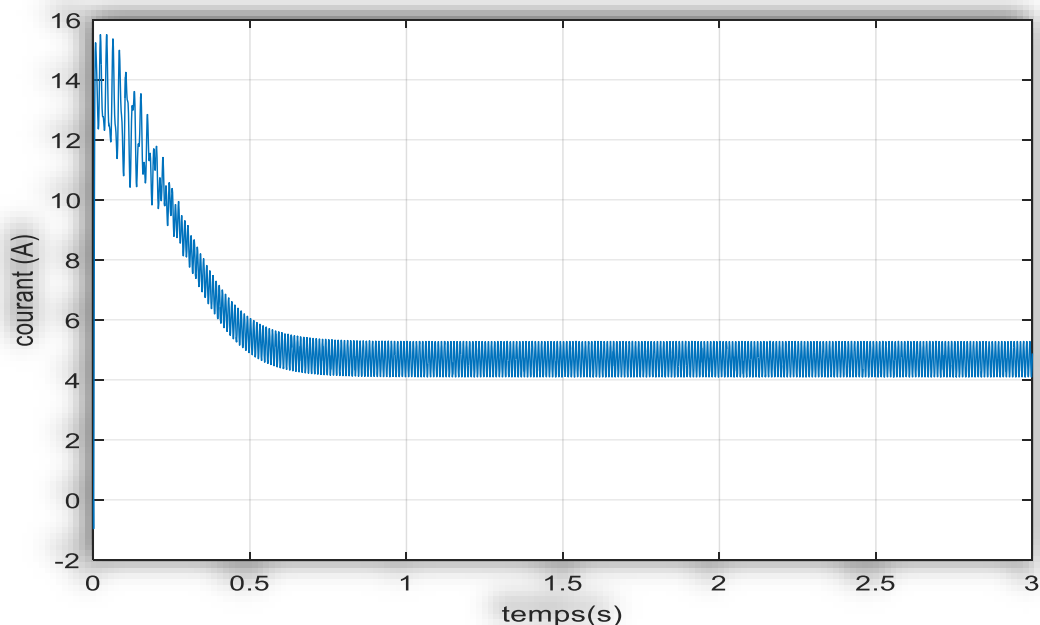


Figure 3.60 : Le courant d'une MAS en charge relié à un onduleur sinus-hystérésis avec filtrage.

- Le couple d'une MAS en charge :

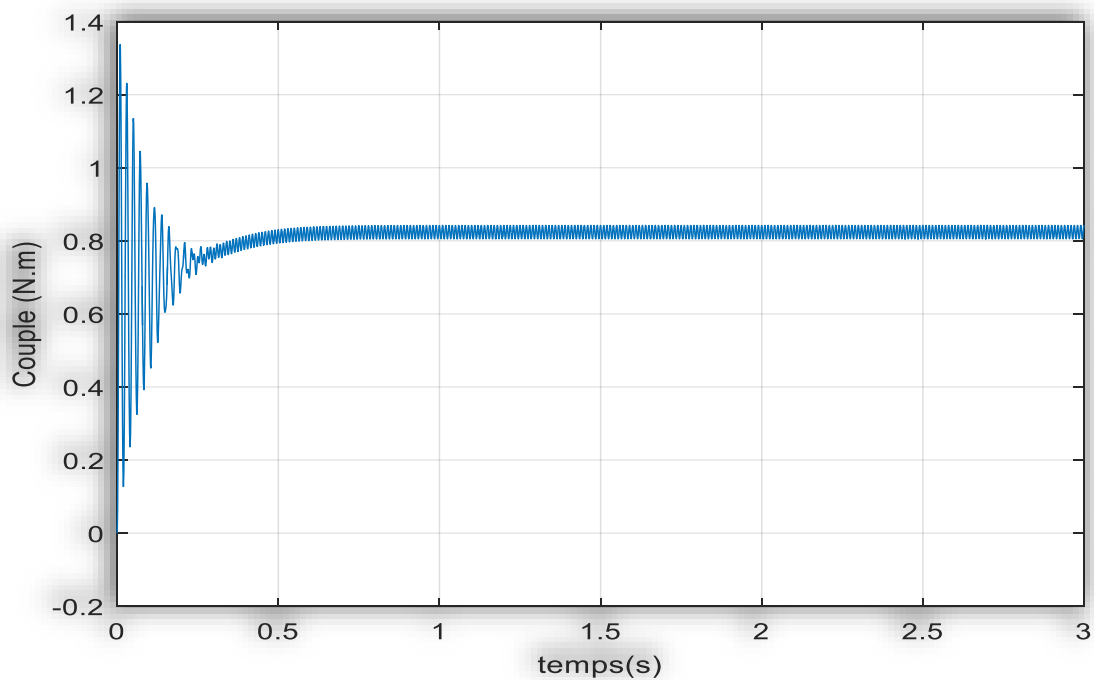


Figure 3.61 : Le couple d'une MAS en charge on utilisant l'onduleur sinus-hystérésis avec filtrage.

3.6 Conclusion

Dans ce dernier chapitre, nous avons présenté les techniques de commande d'un onduleur, on a simulé 5 types des commandes avec deux charges différentes dans chaque onduleur et on a comparé les commandes en termes de valeur THD de tension.

En conclusion, les onduleurs à commande en MLI sinus-hystérésis avec filtre offrent une tension de sortie de haute qualité, tandis que la MLI sinus-triangle et la commande plein onde permet d'optimiser plusieurs fronts de performances de l'onduleur en termes de rendement énergétique, de réduction des harmoniques et d'élimination des perturbations parasites. Le choix de la technique de commande adéquate s'effectue en fonction des besoins spécifiques de l'application. Cependant, il est essentiel de cerner les avantages et les limites inhérentes à chaque méthode afin d'opérer un choix plus approprié.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

L'utilisation des convertisseurs statiques dans l'industrie est considérablement étendue, car les équipements industriels adoptent de plus en plus des entraînements à vitesse variable et change le type d'énergie.

Dans cette recherche, nous pencherons sur différentes techniques et méthodes visant à réduire les pertes dans les onduleurs monophasés et triphasés. Nous identifierons les principaux paramètres responsables des pertes, étudierons des stratégies de commande avancées, et évaluerons l'efficacité de ces approches à travers des simulations numériques, notamment en utilisant Matlab/Simulink.

L'objectif ultime est de fournir des recommandations pratiques pour la conception et la mise en œuvre de systèmes d'onduleurs en pleine onde, décalés à deux niveaux, ainsi que pour la commande MLI à trois niveaux associés à une charge, afin d'obtenir une efficacité maximale et des pertes d'énergie minimales.

Au premier lieu, nous avons abordé les principes fondamentaux des onduleurs, la sélection des composants appropriés et les domaines d'application variés de ces dispositifs. Maîtriser les différents types d'onduleurs, leurs modes de fonctionnement et les composants associés sont essentiel pour une utilisation optimale et un choix judicieux dans une multitude d'application.

En second lieu, l'association de techniques de commande sophistiquées, comme la commande MLI, à des filtres de qualité supérieure s'avère déterminante pour optimiser les performances des onduleurs dans divers domaines critiques. Maîtriser ces concepts techniques de manière approfondie est indispensable à la conception et à l'exploitation d'onduleurs robustes, performants et respectueux des normes de qualité de l'énergie électrique.

Au dernier lieu, nous avons consacré notre travail à la modélisation d'onduleur alimenté par deux charges (RL et MAS) et à la simulation des multiples commandes pleine onde, décalée, MLI sinus-hystérésis et MLI sinus-triangle, avec MATLAB (Simulink).

Au cours de ce travail, nous avons permis d'approfondir nos connaissances en électronique de puissance, notamment le comportement des semi-conducteurs, les diverses topologies d'onduleurs multiniveaux, les différentes stratégies de commande des onduleurs, la maîtrise de l'outil de simulation MATLAB/Simulink.

Après les nos résultats de la simulation, on remarque que la commande MLI sinus-hystérésis avec filtre est la meilleure par rapport aux autres commandes, aussi a chaque fois le nombre des bras de commutation augmente le résultat sa améliore.

Bibliographie :

- [1] **S. KASAT** “Analysis, design and modeling of dc-dc converter using simulink” Institute of Engineering and Technology Indore, Madhya Pradesh State India Master of Science December, 2004
- [2] **F. Chahinaz – C. Tahani** «COMMANDE D’UN CONVERTISSEUR DC/DC PAR UN MICRO CONTROLEUR», Memoire de Master Académique, Université Larbi Tébessi – Tébessa, 2021.
- [3] **Fontès, Guillaume.** *Modélisation et caractérisation de la pile PEM pour l'étude des interactions avec les convertisseurs statiques.* Diss. 2005.
- [4] **Guy Séguier, Francis Labrique, Philippe Delarue.** *Électronique de puissance.* 10e édition. Paris : Dunod, 2004, 2011, 2015.
- [5] **L. Lasne, Electronique de puissance - Cours,** études de cas et exercices corrigés, 2e Edition. Paris: DUNOD, 2015.
- [6] **R.KABOUCHE,** "Etude et élaboration d'une technique MLI à élimination d'harmoniques optimale", Mémoire de Magister en Electronique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2002.
- [7] **E.Acha, V.G.Agelidis,O.Anaya-Lara,**"Power Electronics Control in Electrical Systems" Newnes 2002.
- [8]**Benayad, Mustapha, Seyf Eddine Boumaaraf, and Djafer Encadreur Lalili.** *Commande d’un convertisseur en pont, Implémentation sur une carte ARDUINO.* Diss. Université de Jijel, 2023.
- [9] **J.R. Espinoza,**"Inveters" In: M.H.Rashid,"Power Electronic Handbook", Academic Press, USA 2001.
- [10] **Dj. Lalili,** « MLI Vectorielle et Commande Non Linéaire du Bus Continu des Onduleurs Multiniveaux. Application à la Conduite de la Machine Asynchrone. », thèse de doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, Alger 2009.
- [11] **Kamel, Mousli, and Mammeri Youcef.** *Etude par simulation d’un onduleur à haute fréquence, application au chauffage à induction.* Diss. Université Mouloud Mammeri, 2015.
- [12] **ELFERD Hamza et ZEGAAR Mourada,** “fonctionnement en mode d’egrade d’un onduleur multi niveaux application au filtre actif parallèle”, mémoire d’ingénieur

d'état.universite mohamed boudiaf - M'sila,2016 /2017.

[13] **Y. DIAF D. BEN ANTER** , MODELISATION ET COMMANDE D'UN ONDULEUR TRIPHASE PILOTE PAR MLI A STRUCTRE MULTINIVEAUX Mémoire de Master en Génie électrique Université Kasdi Merbah–Ouargla 2012

[14]**BOUKAROURA Abdelkader**, “Modélisation et Diagnostic d'un Onduleur Triphasé par l'Approche BondGraph”,Mémoire Présenté pour l'obtention du Diplome de Magister en electrotechniques,Option :Réseaux electriques,université ferhat abbas de setif ,2009.

[15]**E.Acha, V.G.Agelidis,O.Anaya-Lara**, "Power Electronics Control in Electrical Systems" Newnes 2002.

[16]**J.R. Espinoza**, "Inveters" In: M.H.Rashid, "Power Electronic Handbook", Academic Press, USA 2001.

[17]**B.KHALIFA** ; Réalisation d'un banc d'essai pour la Commande et l'Observation des Convertisseurs Multicellulaires Série : Approche Hybride. Grade de docteur Université de cergy-pontoise 2009

[18] **A.Zakaria – D.Karim** «ETUDE ET SIMULATION D'UN ONDULEUR DE TENSION TRIPHASE». PROJET FIN D'ETUDE LICENCE . Université BADJI MOKHTAR-Annaba .2021

[19] **Cours master 2 Chap1**. Electronique de puissance avancée. Université Hamma Lakhder. Eloued

[20] **Benzazah, Chirine, M. Ait Lafkih, and Loubna Lazrak**. "Etude comparative entre deux topologies d'onduleurs triphasés, classique à 2-niveaux et NPC à 3-niveaux avec deux différentes méthodes de commande MLI-ST et SWM." *International Journal of Innovation and Applied Studies* 9.2 (2014): 841-852.

[21] **Begag, S., N. Belhaouchet, and L. Rahmani**. "Fonctionnement à fréquence de commutation constante d'un onduleur de tension triphasé par une nouvelle technique de commande en courant par hystérésis." *4th International Conference on CIP'2007*. 2007.

[22]**Adamou, Mamane, et al**. "Dépollution harmonique des réseaux électriques: Etude comparative des commandes, par Modulation de Largeur d'Impulsion et par Hystérésis, des filtres actifs shunts triphasés." *International Journal of Innovation and Applied Studies* 28.2 (2020): 557-566.

[23] **A.GUELLAL** Implémentation sur FPGA d'une commande MLI on-line basée sur le principe des réseaux de neurones, Mémoire de Magister en Electronique. ENP 2009

- [24] **A. Haddoun**, “Modélisation et commande d’un onduleur MLI” Mémoire de fin d’études En vue de l’obtention du Diplôme de Master en Systèmes Electriques et Automatique (SEA) Université Larbi Ben M’hidi Oum El-Bouaghi, 2008/2009
- [25] **BERREZZEK Farid**. “Etude des Différentes Techniques de Commande des Onduleurs à MLI Associés à une Machine Asynchrone”. mémoire d’ingénieur d’état. Université de Annaba-Badji Mokhtar, 2006.
- [26] **Guellal, Amar, Chérif Larbès, and Linda Hassaine**. "Une nouvelle approche MLI basée sur le principe des réseaux de neurone pour la commande des onduleurs." *Journal of Renewable Energies* 15.1 (2012): 57-66.
- [27] **B.Hocine – S.Mohcin** «Étude et analyse des commandes d’un onduleur de tension triphasé», Mémoire de MASTER . Université de Bordj Bou Arreridj . 2021
- [28] **OULD ABDESLAM Djaffar**, “Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension”, Thèse de Doctorat, Université de Haute-Alsace, 2005.
- [29] **Hyver, C**. "Reactions chimiques couplees considerees en tant que filtres passe-bande." *Bulletin of Mathematical Biology* 35 (1973): 319-337.
- [30] **Lin, Jenshan, et al**. "Conception d’un Filtre Passe-Bande Actif Accordable." *Annales Des Télécommunications*. Vol. 47. Springer-Verlag, 1992.
- [31] **Le site web** : <https://www.mathworks.com/>
- [32] **NOD, D**. (2008). MODELISATION ET SIMULATION'A BASE D'AGENTS.



غرداية في:

إذن بالطباعة (مذكرة ماستر)

بعد الاطلاع على التصحيحات المطلوبة على محتوى المذكرة المنجزة من طرف الطلبة التالية أسماؤهم:

1. الطالب (ة): خروائين عبد الرزاق
2. الطالب (ة): مري عبد الكريم

تخصيص:

نمنح نحن أعضاء لجنة المناقشة:

الإمضاء	الصفة	المؤسسة الأصلية	الرتبة	الإسم واللقب
	المتحن 1	م. تمه أينا	MCA	بلقاسم بكار
	المتحن 2	جامعة عزواية	MAB	صباح سعيد
	الموظز	م. الخحوط	MAB	سنانى كلثوم
	رئيس اللجنة	ع. عزواية	Pr	داودى احمر

الإذن بطباعة النسخة النهائية لمذكرة الماستر الموسومة بعنوان:

Etude comparative des stratégies de commande
des Onduleurs

إمضاء رئيس القسم

علمي عبد اللطيف
رئيس قسم الآلية
والكهروميكانيك

