

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République algérienne démocratique et populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب  
Université –Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib  
Faculté des Sciences et de Technologie  
Département : Electronique et Télécommunication



Projet de Fin d'Etudes  
Pour l'obtention du diplôme de Master :  
Domaine : **Sciences et Technologies**  
Filière : **Electronique**  
Spécialité : **Instrumentation**  
Thème

## **Modélisation et simulation d'un redresseur triphasé avec régulateur MLI**

**Présenté Par :**

**1) Mr. Moulay Nabil**

**Devant le jury composé de :**

<b>Mme. BOUTKHIL Malika</b>	MA A	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Président
<b>Mme. CHAIB Amina</b>	MAA	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Examineur
<b>Dr. GHEZALI Sanaa</b>	MCB	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant

*Année Universitaire 2024/2025*

## *Dédicaces*

*À ma mère et à mon père, merci pour tout votre soutien et vos sacrifices. Sans vous, je ne serais jamais arrivé là où j'en suis aujourd'hui.*

*À ma sœur et à mon frère, votre présence a toujours été pour moi une source de force et d'appui.*

*À ma directrice de mémoire, merci pour vos précieux conseils et votre accompagnement bienveillant à chaque étape de ce travail.*

*À mes amis, je vous suis reconnaissant pour chaque moment sincère partagé à vos côtés.*

***MOULAY Nabil***

# Remerciements

*Nous remercions, en premier lieu, notre Dieu qui a bien voulu nous donner la force pour effectuer le présent travail. En second lieu, nous tenons à remercier notre promoteur Docteur GHEZALI SANAA pour ses conseils, sa compétence et ses orientations durant l'élaboration de ce projet. Nous remercions tous les enseignants de département Electronique et Télécommunication pour leurs rôles importants dans notre formation. Ainsi nous exprimons notre reconnaissance à tous les membres de jury, Madame BOUTKHIL Malika et Madame CHAIB Amina d'avoir accepté de lire ce manuscrit et d'apporter les critiques nécessaires à la mise en forme de cet ouvrage.*

*Enfin, à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin pour la réalisation de ce projet de fin d'étude*

# Table des matières

Table des figures .....	III
Liste des tableaux.....	V
Symboles et Notations.....	VI
Acronymes.....	VII
Introduction générale .....	1
<b>I. ANALYSE DES REDRESSEURS TRIPHASÉS</b>	
I.1 Introduction.....	3
I.2. Généralités sur le redressement triphasé .....	3
I.3. Classification des redresseurs triphasés .....	4
I-4 Fonctionnement des redresseurs triphasés.....	6
I-5 Paramètres de performance .....	6
I-6 Comparaison des redresseurs triphasés.....	7
I.7. Formes d'ondes typiques .....	8
I.8 Domaines d'utilisations.....	9
I.9. Conclusion .....	9
<b>II. REDRESSEUR TRIPHASE A MLI-FONDEMENT ET TECHNIQUE</b>	
II-1 Introduction.....	10
II.2 Rappel sur les redresseurs triphasés .....	11
II.2.1 Inconvénients des redresseurs classiques .....	11
II.3 Introduction à la Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI / PWM) .....	11
II.3.1 Définition de la MLI .....	11
II.3.2 Types de MLI .....	12
II.3.3 Objectifs de la MLI dans un redresseur .....	13
II-3-3-1 MLI (SPWM) .....	13
II-3-3-2 MLI "Sinus Triangle" .....	14
II.4 Topologies de redresseurs triphasés à MLI.....	15
II.5 Étude comparative : redresseur classique vs redresseur à MLI .....	16
II.6 Applications des redresseurs triphasés à MLI .....	17
II.7 Avantages et limites de la MLI.....	17
II.8 Conclusion.....	18

### **III. ÉTUDE ET SIMULATION D'UN REDRESSEUR TRIPHASE A MODULATION DE LARGEUR D'IMPULSION (MLI)**

III.1 Introduction.....	19
III-2 Présentation des redresseurs commandés par Modulation de Largeur d'Impulsion .....	20
III-2-1 MLI "Sinus Triangle" .....	21
III.3 Redresseur Triphasé Non Commandé en Pont Complet .....	22
III.4 Redresseur Triphasé Commandé en Demi-Pont .....	25
III.5 Redresseur Triphasé Commandé en Pont Complet .....	27
III.6 Redresseur Triphasé à Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) .....	29
III.6.1 Les principaux objectifs de la Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) .....	30
III.6.2 Les paramètres essentiels de la M.L.I .....	30
III.7 Redresser triphasé à (MLI) .....	32
III.8 Redresseur Triphasé avec Régulation PID .....	35
III.9 Comparaison des performances des différents redresseurs étudiés .....	38
III.10 Conclusion .....	39
Conclusion générale .....	41
Bibliographie.....	42
Annexes.....	44

# Table des figures

I. 1. Schéma de principe du redresseur.....	4
I. 2 Redresseurs non commandés.....	5
I. 3 Redresseurs commandés, mixtes.....	5
I. 4 Redresseur triphasé & Allures des tensions du Redresseur triphasé.....	8
II.1 La création des signaux des impulsions et des tensions.....	14
II.2 Redresseur avec MLI en aval.....	15
II.3 Redresseur commandé tout thyristors avec MLI.....	15
II.4 Redresseur à IGBT ou MOSFET avec commande MLI directe.....	16
III.1 La création des signaux des impulsions et des tensions.....	22
III.2 Schéma bloc du redresseur triphasé non commandé en pont complet.....	22
III.3 Formes d'onde des trois d'alimentation.....	23
III.4 Tension de charges en sortie.....	23
III.5 Courant de charge en sortie.....	24
III.6 Trois tensions,tension de sortie.....	24
III.7 Schéma bloc du redresseur triphasé commandé en demi-pont.....	25
III.8 Tension de charge en sortie.....	26
III.9 Courant de charge en sortie.....	26
III.10 Trois tension,tension de sortie.....	27
III.11 Schéma bloc du redresseur triphasé commandé en pont complet.....	28
III.12 Tension de charge en sortie.....	28
III.13 Courant de charge en sortie.....	29
III.14 Signal de commande généré par la technique MLI.....	31
III.15 Signaux de commande ML.....	31
III.16 Schéma bloc de simulation du redresseur MLI.....	32
III.17 Signaux de commande MLI appliquée à un redresseur triphasé.....	32
III.18 Tension de charge en sortie.....	33
III.19 Courant de charge en sortie.....	34
III.20 THD en tension du redresseur triphasé selon les paramètres de MLI.....	34
III.21 Schéma bloc de redresseur triphasé généré par la fonction de régulation PID.....	36
III.22 Tension de charge en sortie.....	36
III.23 Courant de charge en sortie.....	37
III.24 THD en tension du redresseur triphasé selon les paramètres de PID.....	37

# Listes des Tableaux

**I.1:** Analyse comparative des redresseurs triphasés

**II.1 :** Analyse des performances comparées

# Symboles et Notations

**Alpha** : Angle d'amorçage ou angle de retard (en degrés ou radians)

**Fr** : Fréquence de référence ou fréquence de la modulante (Hz)

**F<sub>m</sub>** : Fréquence de modulation ou fréquence de la porteuse (Hz)

**m** : Indice de modulation de fréquence

**r** : Coefficient de réglage ou indice de modulation

**V<sub>LL</sub>** : Tension ligne à ligne

# Acronymes

- MLI** : Modulation de Largeur d'Impulsion
- PWM** : Pulse Width Modulation
- SPWM** : Sinusoidal Pulse Width Modulation
- SVPWM** : Space Vector Pulse Width Modulation
- THD** : Total Harmonic Distortion
- FP** : Facteur de Puissance
- AC** : Alternative Current
- DC** : Direct Current
- PID** : Proportional-Integral-Derivative

---

# **Introduction générale**

---

## Introduction générale

L'électronique de puissance est une branche essentielle de l'électrotechnique, souvent désignée sous le terme d'électronique de commutation. Elle constitue aujourd'hui un domaine stratégique dans la recherche et le développement de solutions énergétiques modernes. Son objectif principal est de convertir l'énergie électrique d'une forme à une autre, en s'appuyant sur des dispositifs statiques. Ces dispositifs incluent des composants non commandés tels que les diodes, et des composants commandés comme les thyristors.

Assemblés dans des circuits adaptés, ces composants permettent de façonner le courant et la tension afin de répondre aux exigences de diverses applications. L'électronique de puissance permet ainsi la conversion d'énergie sous différentes formes (AC/DC, DC/AC...) tout en assurant un rendement élevé, une fiabilité accrue et une réduction significative des pertes.

Les convertisseurs statiques tels que les redresseurs, occupent une place centrale dans cette discipline. Parmi eux, le redresseur triphasé, sujet principal de ce mémoire, est largement utilisé pour alimenter des moteurs, des systèmes de traction ou encore des équipements industriels. Depuis l'avènement des semi-conducteurs de puissance, les performances des redresseurs n'ont cessé de progresser, en particulier grâce à l'intégration de techniques de commande avancées comme la modulation de largeur d'impulsion (MLI) ou la régulation PID.

Ce travail vise à démontrer l'évolution et l'intérêt des techniques modernes de commande dans le domaine du redressement triphasé, en mettant en évidence les avantages techniques de la MLI, tout en offrant une base comparative avec les structures classiques.

Afin d'accomplir au mieux cette étude, le présent mémoire est structuré en trois principaux chapitres.

Le premier chapitre est consacré à une analyse détaillée des redresseurs triphasés. Il présente leur principe de fonctionnement, leur classification (non commandés, commandés), les paramètres de performance essentiels, ainsi qu'une comparaison synthétique des différentes topologies.

Le deuxième chapitre s'intéresse à la technique de redressement triphasé par modulation de largeur d'impulsion (MLI). Après un rappel sur les fondements théoriques de la MLI, ses différentes variantes, dans un contexte de redressement, et les topologies associées. Une comparaison avec les redresseurs traditionnels y est également proposée.

Enfin, le troisième chapitre est dédié à la simulation et à l'analyse des performances de différentes structures de redresseurs triphasés sous l'environnement MATLAB/Simulink. Il inclut la simulation des redresseurs non commandés, commandés, à MLI, ainsi que ceux à commande PID, avec une comparaison basée sur des indicateurs clés tels que la tension de sortie, le courant, et le taux de distorsion harmonique (THD).

# Chapitre I

---

## **Analyse des Redresseurs Triphasés**

---

# **Chapitre I : Analyse des Redresseurs Triphasés**

## **I.1. Introduction**

Les redresseurs jouent un rôle fondamental dans les systèmes d'électronique de puissance en assurant la conversion de l'énergie électrique alternative (AC) en énergie continue (DC).

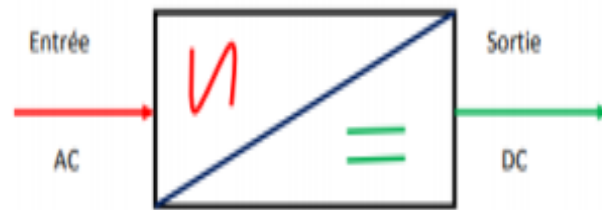
Les redresseurs sont des composants essentiels dans de nombreux appareils électroniques et systèmes d'alimentation. Ils peuvent être construits à partir de diodes à semi-conducteurs, de thyristors, ou d'autres composants électroniques.

Il existe plusieurs types de redresseurs, notamment : (Redresseur simple alternance (demi-onde), Redresseur double alternance (onde complète), Redresseur en pont de Graetz, Redresseurs triphasés). Parmi eux, les redresseurs triphasés occupent une place importante dans les applications industrielles en raison de leurs performances supérieures par rapport aux redresseurs monophasés. [1]

Ce chapitre a pour objectif d'introduire les redresseurs triphasés, de les classer, d'analyser leur fonctionnement, d'étudier leurs paramètres de performance et de les comparer selon différents critères. [2]

## **I.2 Généralités sur le redressement triphasé**

Les redresseurs sont des convertisseurs qui transforment le courant alternatif en courant continu. Branchés à une source alternative (monophasée ou triphasée), ils fournissent du courant continu aux appareils connectés à leur sortie [7]. La figure (I.1) montre le schéma de base d'un redresseur.



**FIGURE I.1** – Schéma de principe du redresseur

Un **redresseur triphasé** est un dispositif qui convertit une tension triphasée alternative en une tension continue. Il est largement utilisé dans les alimentations de moteurs, les systèmes de traction, et les installations industrielles de forte puissance. Comparés aux redresseurs monophasés, les redresseurs triphasés offrent plusieurs avantages : [2]

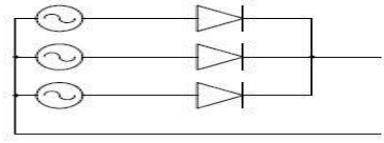
- Une tension de sortie plus élevée et plus stable.
- Une ondulation (ripple) réduite, ce qui diminue les besoins en filtrage.
- Une meilleure efficacité énergétique.
- Une densité de puissance plus élevée.

Ces avantages font du redresseur triphasé un choix favorisé dans les systèmes nécessitant une alimentation continue fiable et performante. [3]

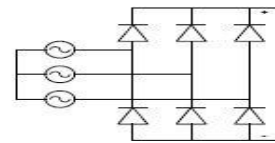
### **I.3 Classification des redresseurs triphasés**

Les redresseurs triphasés peuvent être classés en trois grandes catégories selon les composants utilisés et le mode de commande : [1]

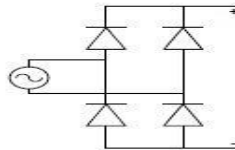
- **Redresseurs non commandés** : Utilisent uniquement des diodes. Exemple : pont de Graëtz triphasé. Ils ne permettent pas de régulation de la tension de sortie.



Le pont simple triphasé PS3



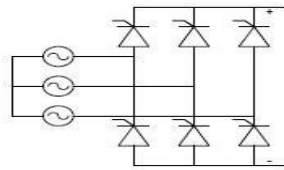
Le pont double triphasé PD3



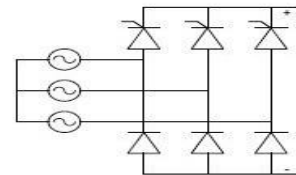
Le pont double monophasé PD2

FIGURE I.2 – Redresseurs non commandés

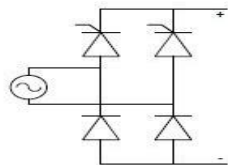
- **Redresseurs commandés** : Utilisent des thyristors. Permettent de contrôler la tension de sortie en agissant sur l'angle d'amorçage (angle de retard).
- **Redresseurs mixtes** : Combinent diodes et thyristors. Ils sont utilisés lorsque l'on souhaite un compromis entre simplicité et capacité de régulation.



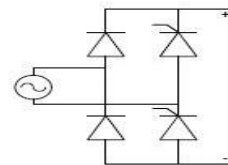
Le pont tout thyristor triphasé PT3



Le pont mixte triphasé PM3



Le pont mixte symétrique monophasé



Le pont mixte asymétrique monophasé

FIGURE I.3 – Redresseurs commandés, mixtes

**I.4 Fonctionnement des redresseurs triphasés****➤ a. Principe général**

Le principe repose sur la conduction sélective des phases pour acheminer en permanence la tension la plus positive (ou la plus négative) vers la charge. En fonction du type de composants utilisés, le redresseur peut être autonome (diodes) ou commandé (thyristors). [2]

**➤ b. Redresseur triphasé non commandé**

Le pont de Graëtz triphasé se compose de 6 diodes disposées de manière à redresser les tensions entre les différentes phases. Deux diodes conduisent simultanément à chaque instant : l'une pour le chemin de courant positif, l'autre pour le retour. [1]

Les formes d'ondes de la tension de sortie montrent une ondulation à six pulsations par période (6-pulse).

**➤ c. Redresseur triphasé commandé**

Le pont commandé utilise 6 thyristors. Chaque thyristor est amorcé avec un angle de retard, permettant ainsi de contrôler la tension de sortie moyenne selon :  $V_{s_{moy}} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_{LL} \cos(\alpha)$  [2]. Cette commande permet une régulation efficace, mais introduit également des harmoniques et diminue le facteur de puissance.

**I.5 Paramètres de performance**

Pour évaluer les performances d'un redresseur triphasé, il est essentiel d'analyser certains paramètres clés qui influencent son efficacité et sa qualité de conversion. Voici une présentation rédigée de manière plus fluide et naturelle : [4]

- ✚ **Tension moyenne de sortie** : Il s'agit de la valeur continue fournie à la charge. Elle dépend du type de redresseur (commandé ou non) et, dans le cas des redresseurs commandés, de l'angle de déclenchement.

- ✚ **Tension efficace de sortie** : Cette valeur est liée à la puissance transmise. Elle joue un rôle important dans le dimensionnement des composants et des filtres en aval.
- ✚ **Ondulation (Ripple)** : Plus l’ondulation est faible, plus la tension est proche d’une valeur continue parfaite. Les redresseurs triphasés sont avantagés sur ce point car leur fréquence de ripple est plus élevée, ce qui facilite le filtrage.
- ✚ **Facteur de puissance (FP)** : Ce facteur exprime l’efficacité de l’utilisation du réseau électrique. Un FP élevé est souhaitable. Il diminue lorsque l’angle augmente dans les redresseurs commandés.
- ✚ **Distorsion Harmonique Totale (THD)** : Ce paramètre reflète la pureté du courant absorbé par le redresseur. Une faible THD est synonyme de bon comportement vis-à-vis du réseau.
- ✚ **Rendement global** : Il mesure la rapport de la puissance utile par rapport à la puissance absorbée. Les redresseurs triphasés peuvent atteindre des rendements très élevés, souvent supérieurs à 95 %, surtout dans les configurations simples.

**I.6 Comparaison des redresseurs triphasés**

Afin de mieux visualiser les différences entre les principaux types de redresseurs triphasés, le tableau suivant présente une comparaison synthétique selon plusieurs critères de performance et de conception. [3]

Type de redresseur	Composants	Commande	$V_{smoy}$	FP	THD	Complexité
Non commandé	Diodes	Non	Fixe	Bon	Faible	Faible
Commandé	Thyristors	Oui	Variable ( $\alpha$ )	Moyenne	Elevé	Moyenne
Mixte	Diodes+Thyristors	Partielle	Semi-variable	Bon	Moyen	Moyenne

**Tableau 1-1**-Analyse comparative des redresseurs triphasés

Ainsi que le choix dépend de l’application : alimentation à tension fixe, régulée, ou dynamique.

I.7 Formes d’ondes typiques

Dans le cas d’un redresseur triphasé non commandé à pont de Graëtz, les formes d’ondes caractéristiques permettent de mieux comprendre le comportement du circuit pendant une période complète de la tension secteur [5].

La tension de sortie présente une forme d’onde constituée de six segments par période (6-pulses), correspondant aux six combinaisons de conduction de paires de diodes. Chaque segment correspond à la valeur instantanée de la tension ligne-à-ligne maximale disponible à l’instant considéré. L’allure est périodique avec une fréquence de 300 Hz (pour une fréquence réseau de 50 Hz). L’ondulation est relativement faible, ce qui permet une conversion efficace même sans filtrage important.

Le courant redressé suit l’allure de la tension de sortie si la charge est résistive. Il est donc également formé de segments correspondant à chaque conduction de pair de diodes. Dans le cas d’une charge RL, le courant est plus lissé, avec une forme légèrement trapézoïdale due à l’inductance de charge qui limite les variations brutales du courant. [1].

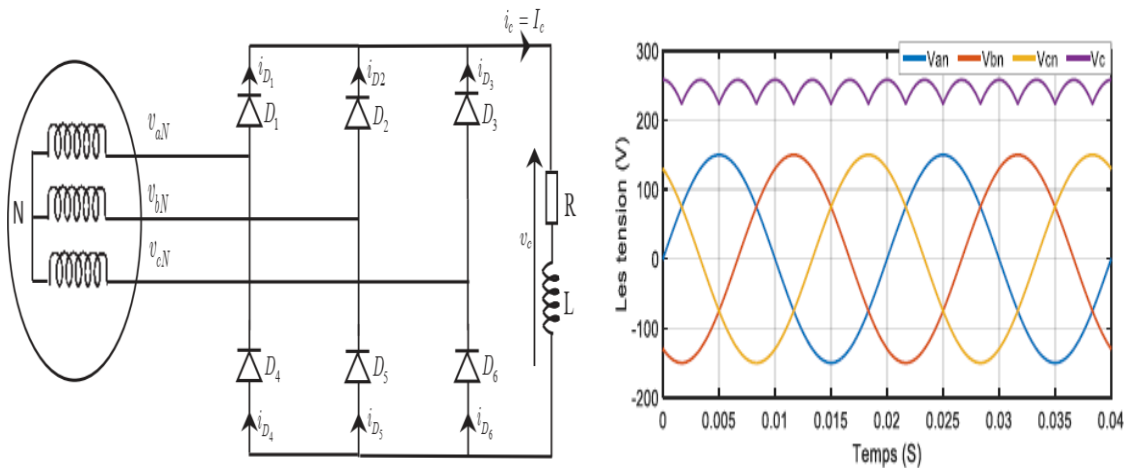


FIGURE I.4 – Redresseur triphasé & Allures des tensions du Redresseur triphasé.

**I.8 Domaines d'utilisations**

La conversion (alternative / continue) est utilisée dans une très large plage de puissance :

- De quelques mW (milliwatts) pour les alimentations de petits ensembles électroniques (chargeur de téléphone portable).
- A plusieurs GW (gigawatts) pour l'interconnexion de réseaux de distribution d'énergie électrique de phases différentes. [6].

**I.9 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les redresseurs triphasés, leurs principes de fonctionnement, leur classification et leurs performances. Le redresseur triphasé est un élément clé dans de nombreux systèmes industriels grâce à sa capacité à fournir une tension continue stable et efficace. La compréhension de ses paramètres et de son fonctionnement est essentielle avant d'aborder les techniques de commande ou de simulation qui feront l'objet du chapitre suivant.

# Chapitre II

---

## **Redresseur triphasé à MLI- Fondement et technique**

---

## Chapitre II : Redresseur triphasé à MLI-Fondement et technique

### II.1 Introduction

L'électronique de puissance a profondément marqué l'évolution du secteur industriel ces dernières décennies [8]. Cette avancée s'est concrétisée avec l'apparition de composants comme les thyristors, triacs, GTO, IGBT ou encore les transistors de forte puissance. Grâce à ces éléments, il a été possible de concevoir des convertisseurs statiques capables de transformer l'énergie électrique d'une forme à une autre, ouvrant ainsi la voie à des procédés industriels plus performants et mieux maîtrisés.

Cependant, l'intégration de ces convertisseurs dans les installations électriques a également introduit de nouveaux défis, notamment en ce qui concerne la qualité de l'énergie. En effet, ces dispositifs consomment des courants dont la forme n'est plus parfaitement sinusoïdale, ce qui engendre des perturbations dans les réseaux de distribution. [9]

Pour remédier à ce problème, les redresseurs commandés utilisant la modulation de largeur d'impulsion (MLI) apparaissent comme une solution prometteuse. Ce qui suit propose un aperçu des redresseurs à commande MLI, souvent utilisés pour améliorer la qualité de l'alimentation électrique, ce type de redresseur permet une régulation fine de la tension de sortie, une réduction du facteur de distorsion harmonique (THD). [10]

Ce chapitre présente les fondements théoriques, les techniques de commande MLI et les topologies les plus utilisées.

## II.2 Rappel sur les redresseurs triphasés

Un redresseur triphasé convertit une tension alternative triphasée en une tension continue. [11] Selon la commande utilisée (non commandé, commandé), le redresseur peut fournir une tension plus ou moins régulée.

### II.2.1 Inconvénients des redresseurs classiques

Les redresseurs traditionnels présentent plusieurs inconvénients majeurs. Ils génèrent une tension de sortie fortement ondulée, provoquent une distorsion harmonique importante dans le réseau, et affichent un faible facteur de puissance. De plus, leur système de commande reste limité en termes de flexibilité, ce qui restreint leur capacité d'adaptation aux différentes exigences des applications modernes. Alors On peut les résumer en quatre points :

- ✓ Forte ondulation de la tension de sortie
- ✓ Distorsions harmoniques importantes
- ✓ Faible facteur de puissance
- ✓ Commande peu flexible

## II.3 Introduction à la Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI / PWM)

La modulation de largeur d'impulsion (MLI) est une technique de commande utilisée pour piloter les convertisseurs statiques [12]. Elle consiste à générer des signaux de commande destinés aux interrupteurs électroniques, en ajustant la largeur des impulsions selon une loi de commande bien définie.

### II.3.1 Définition de la MLI

La MLI permet de contrôler précisément l'énergie délivrée à une charge en modulant la largeur des impulsions d'un signal.

### II.3.2 Types de MLI

#### ✓ MLI sinusoïdale (SPWM)

La MLI sinusoïdale est l'une des techniques les plus couramment utilisées dans les systèmes de conversion de puissance. Son principe de fonctionnement est relativement simple :

-Un signal de référence sinusoïdal (modulante) est comparé à un signal triangulaire à haute fréquence (porteuse)

-Lorsque la modulante est supérieure à la porteuse, l'interrupteur de puissance est fermé (état ON)

-Lorsque la modulante est inférieure à la porteuse, l'interrupteur est ouvert (état OFF)

Le rapport entre la fréquence de la porteuse et celle de la modulante définit l'indice de modulation de fréquence (mf). Plus cet indice est élevé, meilleure est la qualité du signal de sortie et l'amplitude de la modulante par rapport à celle de la porteuse définit l'indice de modulation d'amplitude (ma), qui détermine l'amplitude de la tension de sortie. Cet indice doit généralement rester inférieur à 1 pour éviter la surmodulation.

Les avantages de la SPWM incluent sa simplicité d'implémentation et sa capacité à réduire les harmoniques de rang faible [13]

#### ✓ MLI à fréquence fixe

La MLI à fréquence fixe garde une fréquence de commutation constante tout au long du cycle de fonctionnement. Cette technique présente plusieurs variantes :

-MLI unipolaire, MLI bipolaire, MLI régulière, MLI naturelle.

Cette approche offre l'avantage d'un contenu harmonique prévisible et concentré autour de multiples de la fréquence de commutation, ce qui facilite le dimensionnement des filtres. Elle simplifie également la conception des circuits de commande et de protection. [14]

Cependant, la contrainte de fréquence fixe peut limiter l'optimisation des performances dans certaines applications spécifiques.

#### ✓ MLI vectorielle (SVPWM)

La MLI vectorielle s'appuie sur une approche fondamentalement différente. Elle examine les trois phases d'un système triphasé comme un vecteur unique dans l'espace, et cherche à approximer un vecteur de référence par une séquence de vecteurs d'état de base.

Dans un onduleur triphasé standard, huit configurations de commutation sont possibles, correspondant à six vecteurs actifs et deux vecteurs nuls. La SVPWM sélectionne les vecteurs adjacents au vecteur de référence et calcule leurs temps d'application respectifs.

[15]

Toutefois, sa mise en œuvre est plus complexe et nécessite une puissance de calcul supérieure.

### II.3.3 Objectifs de la MLI dans un redresseur

L'objectif principal de la MLI dans un redresseur est d'améliorer la qualité de la tension de sortie en réduisant l'ondulation et les harmoniques. Elle permet également un meilleur contrôle de la puissance transférée vers la charge, tout en optimisant le facteur de puissance. Grâce à cette technique, on obtient une commande plus souple et plus efficace du redresseur.

#### III.3.3.1 MLI (SPWM)

La SPWM nécessite uniquement une comparaison entre deux signaux, ce qui peut être réalisé avec un minimum de composants électroniques [16]

II.3.3.2 MLI "Sinus Triangle"

La MLI Sinus Triangle utilise le principe d'intersection entre une référence sinusoïdale de fréquence  $f_r$ , appelée modulante et un signal triangulaire de haute fréquence  $f_m$ , appelée la porteuse, pour déterminer les instants de commutation. Le schéma de principe est donné par la Fig. (II-3). [23]

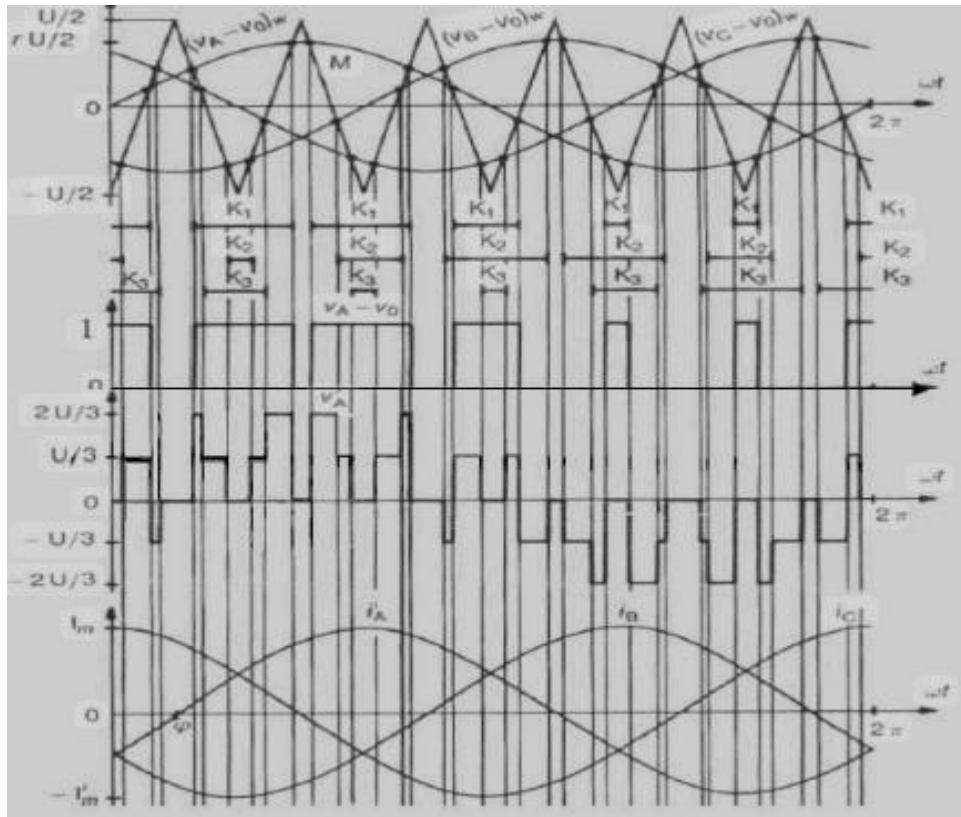


FIGURE II-1 - La création des signaux des impulsions et des tensions

## II. 4 Topologies de redresseurs triphasés à MLI

### - Redresseur à diodes avec étage MLI en aval

Système simple où les diodes convertissent d'abord le courant alternatif en continu, puis un étage MLI contrôle la tension ou le courant. Économique mais génère des harmoniques côté réseau. [17]

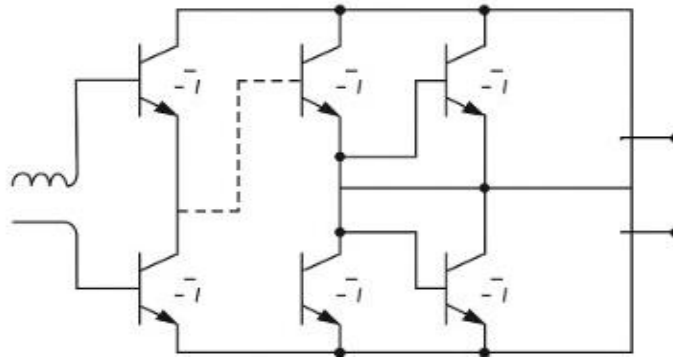


FIGURE II.2 - Redresseur avec étage MLI en aval

### - Redresseur commandé tout thyristors avec MLI

Configuration utilisant des thyristors dont l'angle d'amorçage est modulé par MLI pour contrôler la tension de sortie. Puissant pour les applications de forte puissance, mais avec des limites en termes de dynamique. [18]

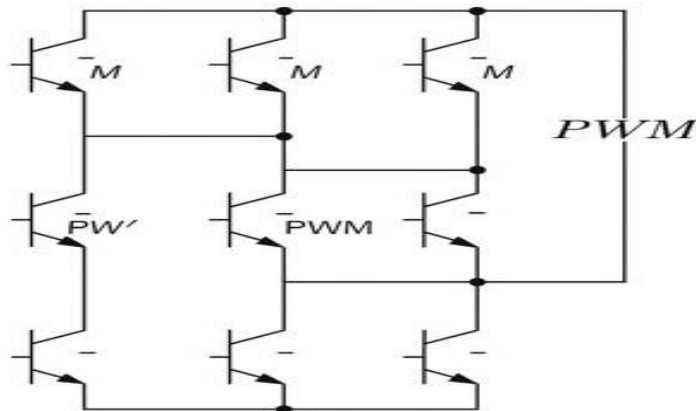
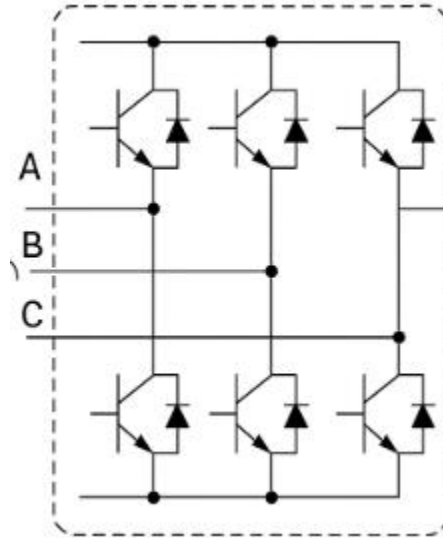


FIGURE II.3 - Redresseur commandé tout thyristors avec MLI

### - Redresseur à IGBT ou MOSFET avec commande MLI directe

Solution moderne adoptant des semi-conducteurs entièrement commandables pour appliquer directement la MLI au redressement. [19]



**FIGURE II.4** -Redresseurs à IGBT ou MOSFET avec commande MLI directe

## II.5 Étude comparative : redresseur classique vs redresseur à MLI

Le tableau ci-dessous présente une analyse comparative entre les deux principales technologies de redressement utilisées dans l'électronique de puissance moderne. [20] Cette comparaison met en évidence les avantages significatifs qu'offre la technologie à (MLI) par rapport aux solutions classiques, particulièrement en termes de qualité de l'onde électrique et d'efficacité énergétique. Les quatre paramètres clés évalués figurent les critères essentiels pour le choix d'une solution adaptée aux applications industrielles actuelles.

Caractéristique	Redresseur classique	Redresseur à MLI
<b>Ondulation</b>	Élevée	Faible
<b>THD</b>	Élevée	Réduit
<b>Régulation de tension</b>	Faible	Bonne
<b>Facteur de puissance</b>	Moyen	Amélioré

**Tableau II.1** - Analyse des performances comparées

## II.6 Applications des redresseurs triphasés à MLI

Les redresseurs triphasés à MLI figurent aujourd'hui une technologie clé dans plusieurs secteurs industriels grâce à leurs performances supérieures. Voici leurs principales applications: [21]

- ✚ Alimentation des moteurs en courant continu
- ✚ Conversion d'énergie pour systèmes photovoltaïques
- ✚ Véhicules électriques
- ✚ Conversion industrielle

## II.7 Avantages et limites de la MLI

Face aux exigences croissantes en matière de qualité d'énergie et d'efficacité, les redresseurs à MLI s'exigent comme une alternative avantageuse aux solutions classiques. Cette technologie offre plusieurs avantages significatifs, mais présente certaines contraintes qu'il convient d'analyser attentivement avant son implémentation dans un système électrique. [22]

### ✚ Avantages :

- Réduction du THD
- Meilleure régulation
- Moins de filtrage requis
- Réalisable avec IA

### ✚ Limites :

- Complexité
- Besoin de contrôleur numérique
- Bruits de commutation

Alors, le choix d'un redresseur à MLI doit provenir d'un compromis entre performances techniques et contraintes pratiques. Dans la plupart des applications modernes, particulièrement celles nécessitant une haute qualité d'énergie, ces inconvénients sont largement compensés par les bénéfices apportés.

## **II.8 Conclusion**

Le redresseur triphasé à MLI constitue une avancée majeure en électronique de puissance. Il admet d'obtenir une tension de sortie plus propre, régulée, et de meilleure qualité.

Grâce aux techniques de commande numérique, son intégration dans des systèmes difficiles devient accessible.

# Chapitre III

---

## **Étude et Simulation d'un Redresseur Triphasé à Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI)**

---

# Chapitre III : Étude et Simulation d'un Redresseur Triphasé à Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI)

## III.1. Introduction

Le départ de l'électronique de puissance au cours des dernières décennies a profondément marqué le secteur industriel. Cette évolution a été rendue possible grâce à l'introduction progressive de composants semi-conducteurs de puissance tels que les thyristors, triacs, GTO (Gate Turn-Off thyristors), IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors) et autres transistors à haute capacité. Ces dispositifs ont permis le développement de convertisseurs statiques performants, capables de transformer l'énergie électrique d'une forme à une autre (AC/DC, DC/AC, AC/AC, DC/DC), et ce avec une efficacité étendue et un contrôle précis.

Ces convertisseurs statiques, largement utilisés dans les systèmes industriels modernes, les installations d'énergies renouvelables et les entraînements électriques, ont considérablement amélioré les procédés de conversion de puissance. Toutefois, leur utilisation n'est pas sans conséquences, ils peuvent provoquer une élévation du **taux de** distorsion harmonique (THD), facteur de puissance, ainsi que des dysfonctionnements sur d'autres équipements sensibles.

Face à ces problématiques, les chercheurs et ingénieurs ont développé plusieurs stratégies d'atténuation, parmi lesquelles la commande par Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) occupe une place centrale. Cette technique permet d'améliorer la forme des signaux de tension et de courant, en les rapprochant de l'onde sinusoïdale idéale, ce qui permet de réduire les perturbations harmoniques et d'améliorer la stabilité des systèmes de conversion. Les redresseurs triphasés commandés par MLI représentent ainsi une solution efficace pour atténuer les effets indésirables des convertisseurs classiques sur la qualité de l'énergie [24].

## **Chapitre III Étude et Simulation d'un Redresseur Triphasé à (MLI)**

### **III.2 Présentation des redresseurs commandés par Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI)**

Les redresseurs commandés par Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) constituent aujourd'hui une solution technologique avancée et particulièrement efficace pour l'interfaçage entre le réseau électrique et les systèmes industriels, en particulier dans le domaine des entraînements électriques hautes performances. Leur popularité croissante s'explique par de nombreux avantages techniques : une réduction significative du contenu harmonique des courants absorbés du réseau, une capacité de fonctionnement bidirectionnel (régénération de l'énergie), une réponse dynamique rapide, ainsi qu'un encombrement, un poids et un coût globalement réduits par rapport aux solutions conventionnelles.

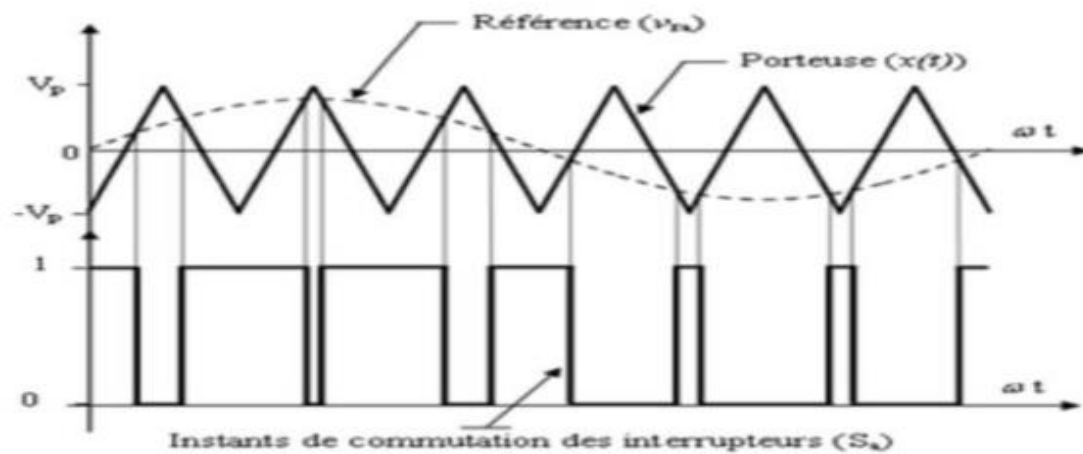
En effet, les redresseurs traditionnels à diodes ou à thyristors, bien qu'efficaces en termes de conversion, introduisent des courants fortement déformés dans le réseau, ce qui perturbe la forme d'onde de la tension et affecte négativement les autres récepteurs connectés au même réseau. Cette distorsion est à l'origine de plusieurs phénomènes indésirables, notamment la dégradation du facteur de puissance, l'augmentation des pertes dans les lignes, ainsi que l'échauffement prématuré des équipements. De plus, pour pallier ces effets, les solutions classiques imposent souvent l'utilisation de filtres passifs lourds et coûteux, sous forme d'inductances de forte valeur côté réseau et de condensateurs de grande capacité côté continu, ce qui accroît le volume, le poids et le coût de l'installation éléments devenus inacceptables dans de nombreuses applications modernes.

Face à ces limitations, les redresseurs à MLI se présentent comme une alternative performante et élégante, assurant ainsi un contrôle fin et précis des formes d'ondes. Leur capacité à fonctionner en mode redresseur ou régénérateur les rend particulièrement adaptés aux systèmes réversibles tels que les variateurs de vitesse, les réseaux de traction ou les alimentations interactives. De ce fait, ces structures font l'objet de nombreuses recherches visant à optimiser leur modélisation, leur commande, et leur intégration dans les réseaux intelligents [24] [25].

## Chapitre III Étude et Simulation d'un Redresseur Triphasé à (MLI)

### III.2.1 MLI "Sinus Triangle"

La modulation de largeur d'impulsion (MLI) Sinus Triangle fonctionne en comparant deux signaux : une onde sinusoïdale à basse fréquence  $f_r$  (la modulante) et une onde triangulaire à haute fréquence  $f_m$  (la porteuse). Cette comparaison permet de déterminer avec précision les moments où la commutation doit s'effectuer. Le principe de fonctionnement est illustré dans la Figure (III-1).



**FIGURE III.1** – La création des signaux des impulsions et des tensions [26]

**Dans ce chapitre**, nous allons étudier par simulation quelques topologies de redresseurs triphasés. Ces simulations nous permettront d'analyser le comportement des redresseurs non commandés, commandés, et ceux utilisant la technique MLI, en observant particulièrement la qualité de la tension de sortie comme le taux de distorsion harmonique (THD). Les résultats de ces simulations nous permettront d'évaluer l'impact de la MLI sur l'efficacité des systèmes de conversion d'énergie.

## Chapitre III Étude et Simulation d'un Redresseur Triphasé à (MLI)

### Remarque préliminaire :

Les simulations réalisées dans cette étude ont été développées à l'aide du logiciel MATLAB/Simulink, qui offre un environnement adapté à la modélisation des systèmes électroniques de puissance.

### III.3 Redresseur Triphasé Non Commandé en Pont Complet

Le redresseur triphasé non commandé en pont complet est constitué de six diodes connectées en pont.

Ce type de montage permet de redresser la tension triphasée en fournissant une tension de sortie continue avec des ondulations. Les figures suivantes présentent le schéma de simulation, la tension de sortie et le courant de charge.

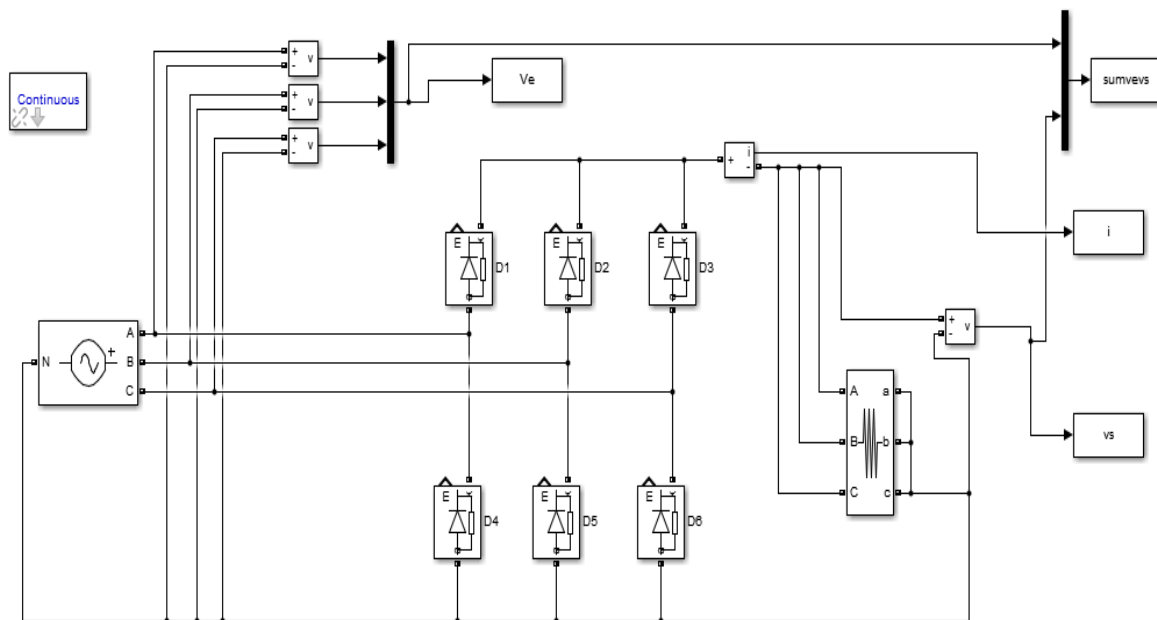
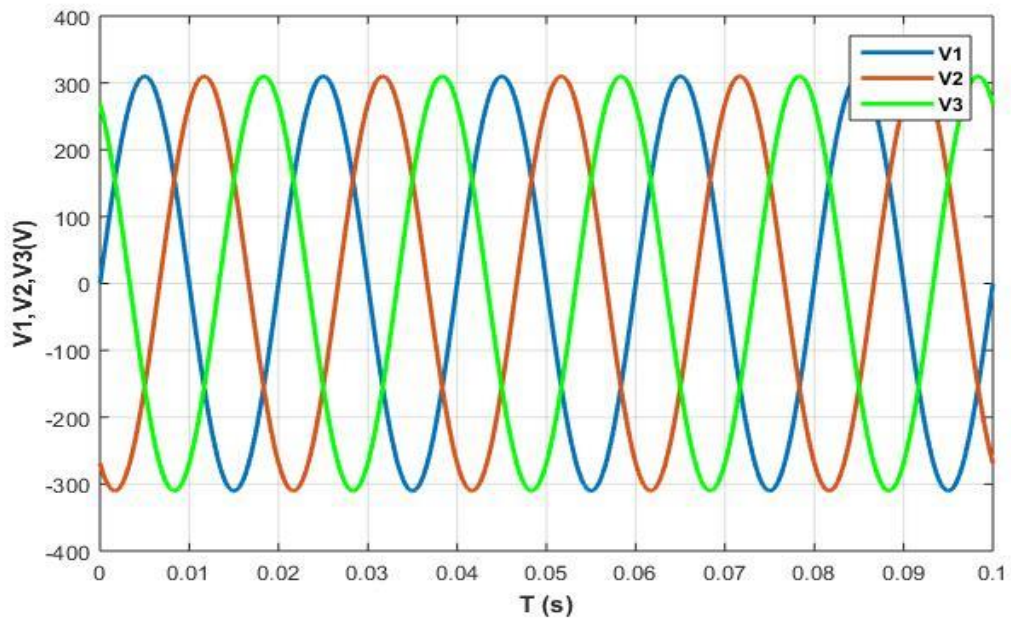
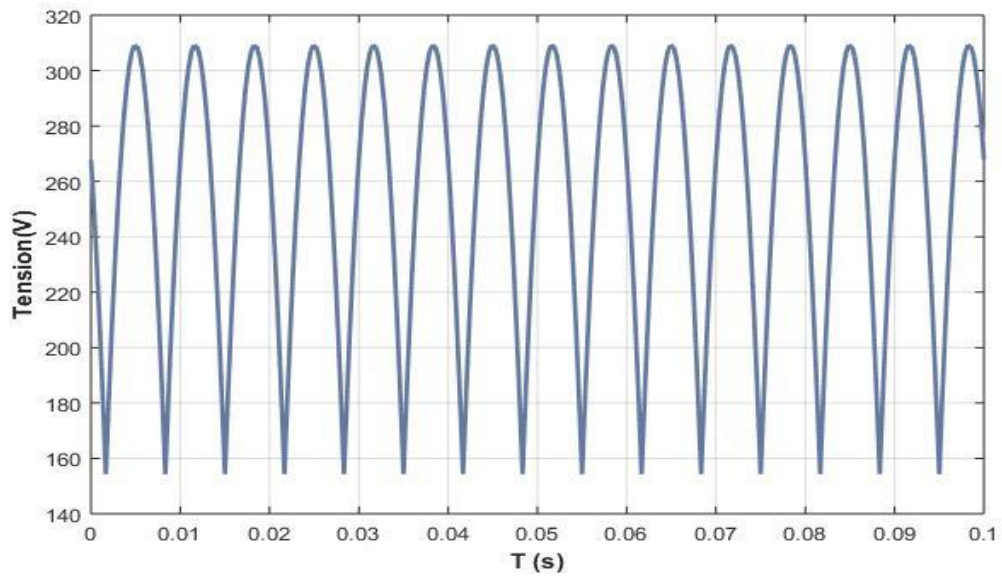


FIGURE III.2 – Schéma bloc du redresseur triphasé non commandé en pont complet.

## Chapitre III Étude et Simulation d'un Redresseur Triphasé à (MLI)



**FIGURE III.3** – Formes d'onde des trois tensions d'alimentation



**FIGURE III.4** – Tension de charge en sortie

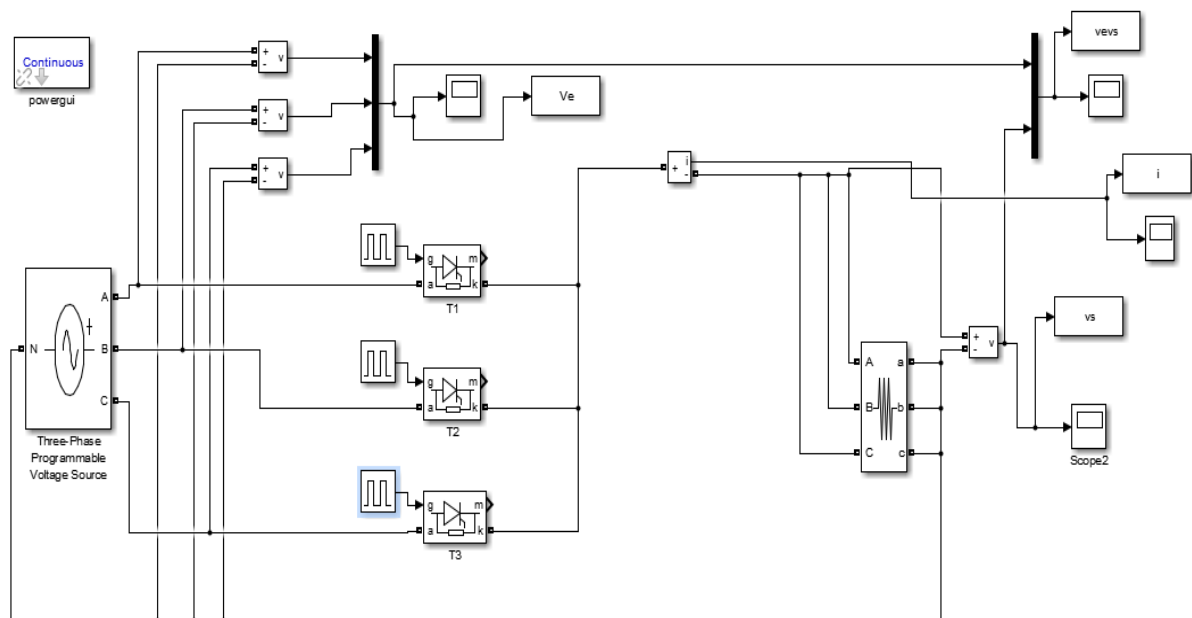


## Chapitre III Étude et Simulation d'un Redresseur Triphasé à (MLI)

$V_s$  entre les deux phases extrêmes. Et puisque la charge est pure résistive, le courant suit directement la forme de la tension.

### III.4 Redresseur Triphasé Commandé en Demi-Pont

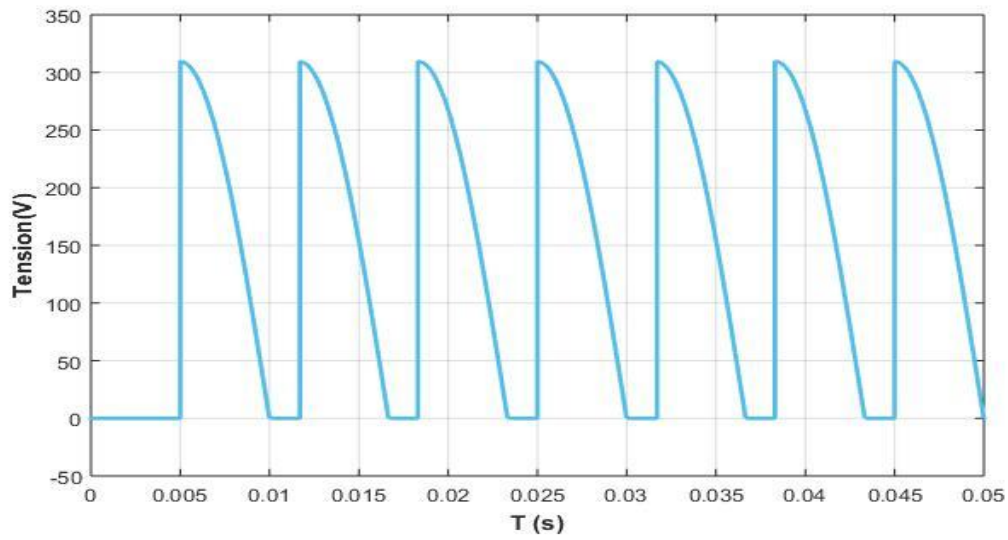
Ce montage utilise trois thyristors et trois diodes pour commander la conduction sur une demi-période. Il permet un contrôle partiel de la tension de sortie par variation de l'angle d'amorçage des thyristors.



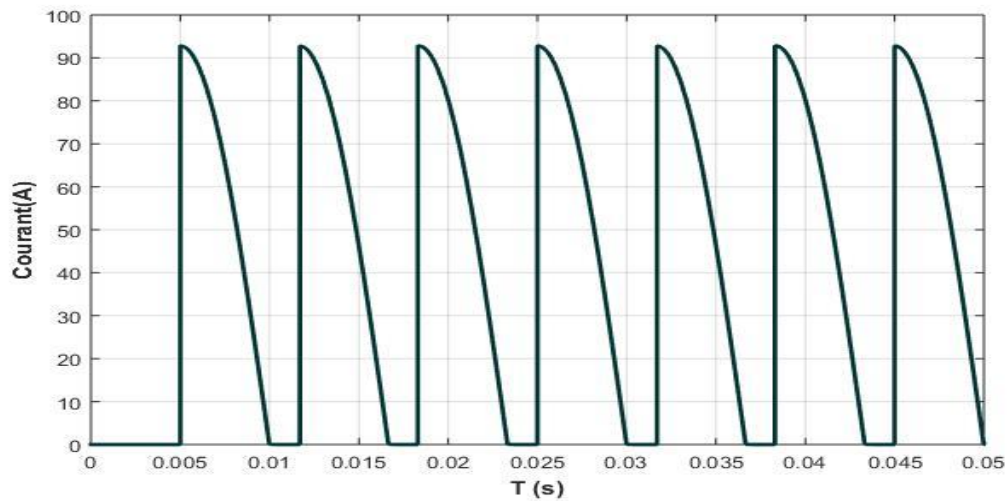
**FIGURE III.7– Schéma bloc du redresseur triphasé commandé en demi-pont.**

Le système présenté est un redresseur commandé triphasé à demi-pont, équipé d'un circuit d'amorçage qui génère des impulsions de déclenchement pour les thyristors.

## Chapitre III Étude et Simulation d'un Redresseur Triphasé à (MLI)

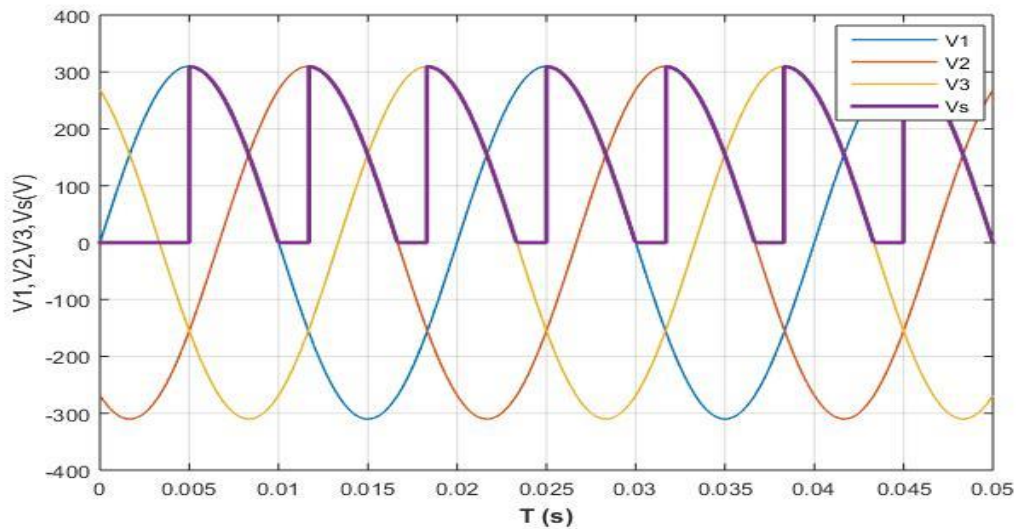


**FIGURE III.8** – Tension de charge en sortie



**FIGURE III.9**– Courant de charge en sortie

## Chapitre III Étude et Simulation d'un Redresseur Triphasé à (MLI)



**FIGURE III.10** – Trois tensions, tension de sortie

Le thyristor dont la tension d'anode est la plus élevée conduit le courant, mais uniquement après avoir reçu son impulsion d'amorçage. Quand V1 commande, T1 est déclenché, alors, c'est ce thyristor qui conduit. De même pour T2 avec V2 et T3 avec V3. À chaque séquence, le thyristor actif laisse passer la totalité du courant de charge.

### **III.5 Redresseur Triphasé Commandé en Pont Complet**

Le redresseur commandé en pont complet utilise six thyristors. Il offre un meilleur contrôle sur la tension de sortie en permettant un ajustement précis de l'angle d'amorçage. Cela permet une meilleure régulation par rapport aux montages précédents.

### Chapitre III Étude et Simulation d'un Redresseur Triphasé à (MLI)

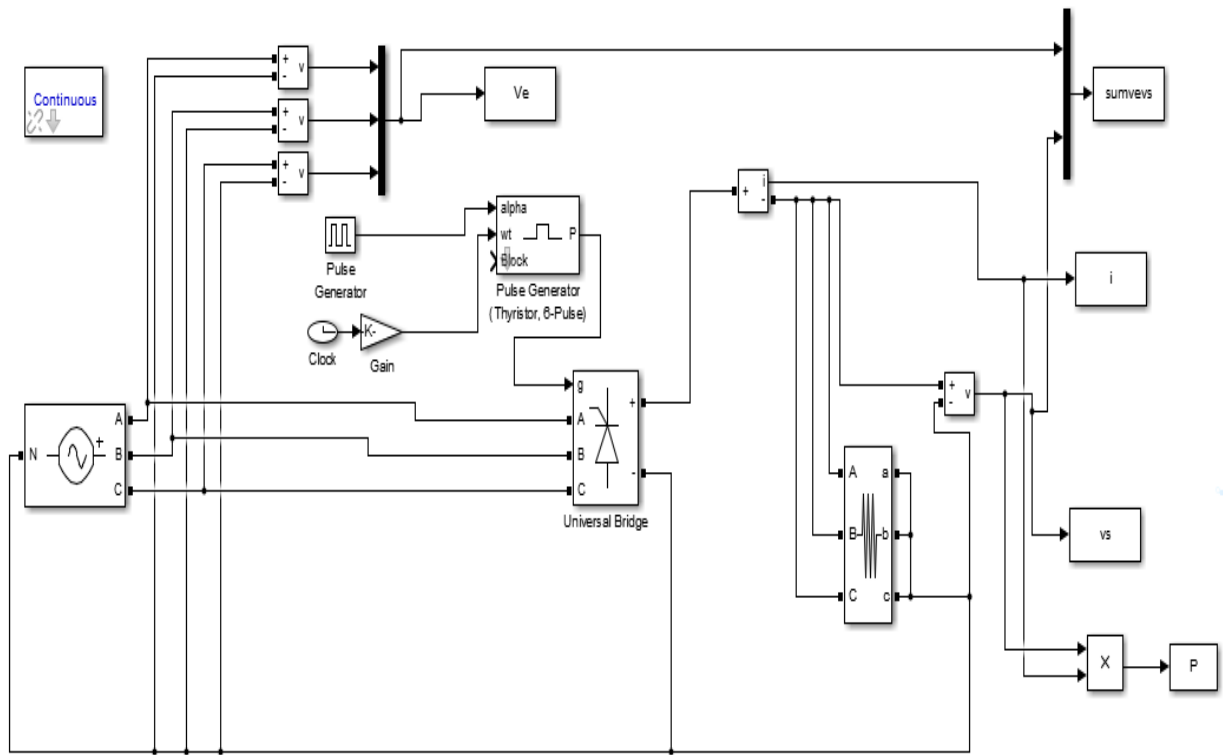


FIGURE III.11 – Schéma bloc du redresseur triphasé commandé en pont complet

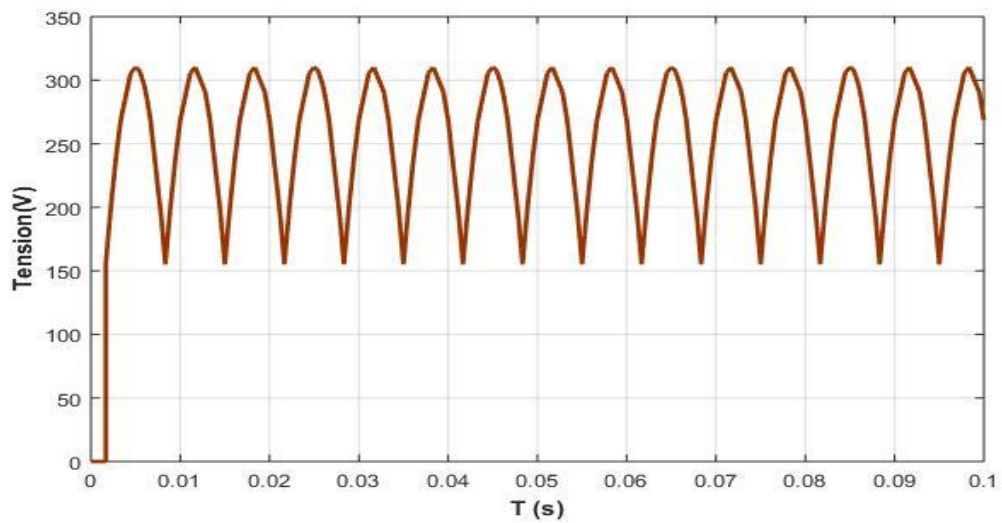
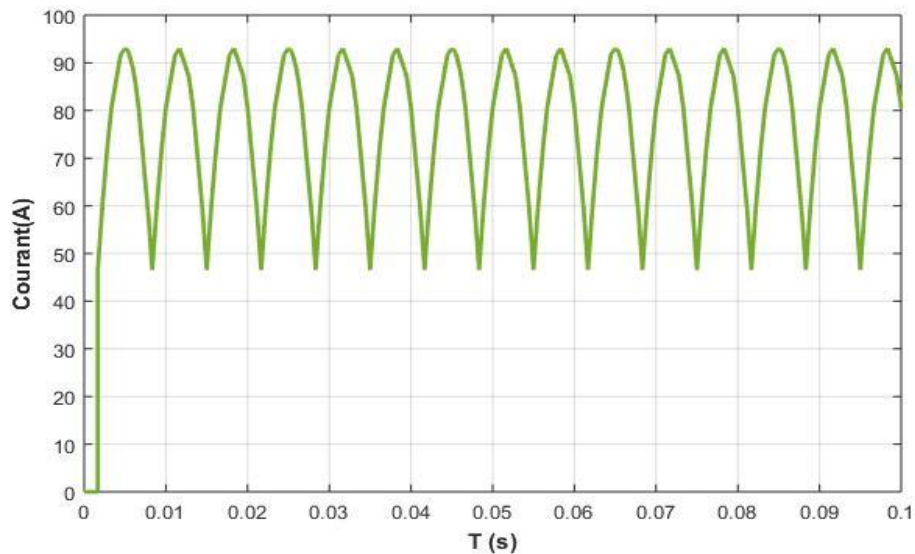


FIGURE III.12 – Tension de charge en sortie

## Chapitre III Étude et Simulation d'un Redresseur Triphasé à (MLI)



**FIGURE III.13** – Courant de charge en sortie

Cette tension présente une forme pulsée caractéristique avec une valeur maximale d'environ 310V et minimale d'environ 150V. Cette ondulation est typique d'un redresseur triphasé commandé. La fréquence des ondulations est de 150 Hz (soit 6 fois la fréquence fondamentale de 50 Hz), ce qui est caractéristique d'un redresseur triphasé à 6 impulsions, on peut observer les creux réguliers dans la tension de sortie, qui correspondent aux moments de commutation entre les phases. L'angle d'amorçage que nous avons implémenté est réglé à une valeur intermédiaire, ce qui est caractéristique du fonctionnement d'un redresseur commandé et explique pourquoi la tension de sortie n'atteint pas sa valeur maximale possible, mais les ondulations continuent, le courant à une forme d'onde similaire à celle de la tension mais avec un déphasage et une amplitude qui oscille entre 45A et 95A.

### **III.6. Redresseur Triphasé à Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI)**

L'utilisation de la MLI permet de générer un signal de commande plus proche d'une onde sinusoïdale par comparaison d'un signal sinusoïdal de référence avec une onde porteuse triangulaire. Cela améliore significativement la forme d'onde de la tension de sortie.

## Chapitre III Étude et Simulation d'un Redresseur Triphasé à (MLI)

### III.6.1 Les principaux objectifs de la Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI)

-Fournir aux moteurs électriques une alimentation en courant dont la forme d'onde se rapproche au mieux d'une sinusoïde, en modulant le rapport cyclique et en utilisant une fréquence de commutation des interrupteurs nettement supérieure à celle des tensions de sortie.

-Offrir un contrôle précis de l'amplitude de la composante fondamentale des tensions de sortie, généralement sur une large plage, tout en permettant une variation étendue de la fréquence de sortie.

L'objectif est généralement de maximiser ce coefficient afin d'obtenir une amplitude de tension de sortie aussi élevée que possible. [27]

### III.6.2 Les paramètres essentiels de la M.L.I

➤ **L'indice de modulation :**

$$m = \frac{fm}{f}$$

Où :

$fm$  est la fréquence de modulation

$f$  est la fréquence du fondamentale

➤ **Le coefficient de réglage :**

$$r = \frac{Ar}{Am}$$

Où :

**Ar** : la valeur crête de la tension de référence

**Am** : la valeur crête de la tension de commande

On cherche généralement à obtenir une valeur maximale de **r** la plus élevée.

## Chapitre III Étude et Simulation d'un Redresseur Triphasé à (MLI)

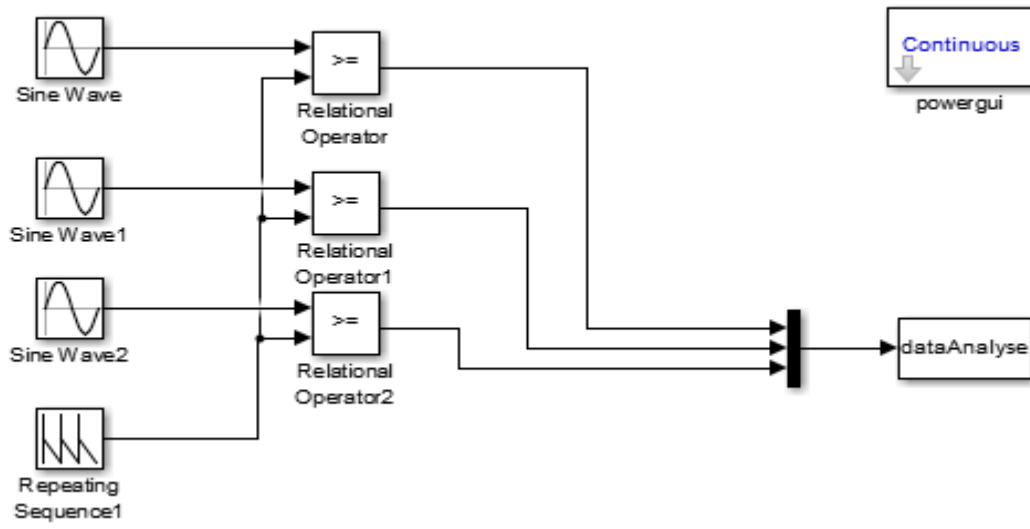


FIGURE III.14 – Signal de commande généré par la technique MLI.

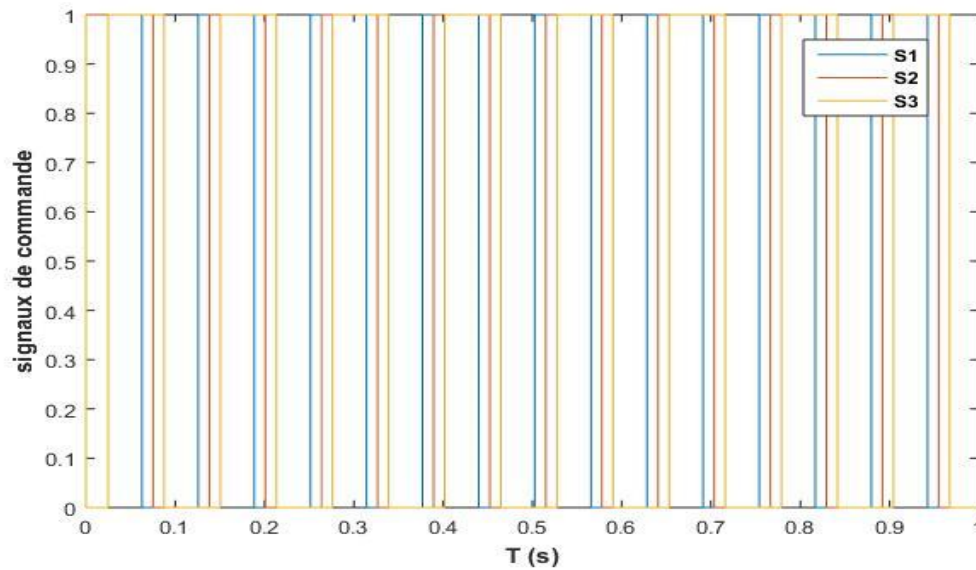


FIGURE III.15 – Signaux de commande MLI

# Chapitre III Étude et Simulation d'un Redresseur Triphasé à (MLI)

## III.7 Redresser triphasé à (MLI)

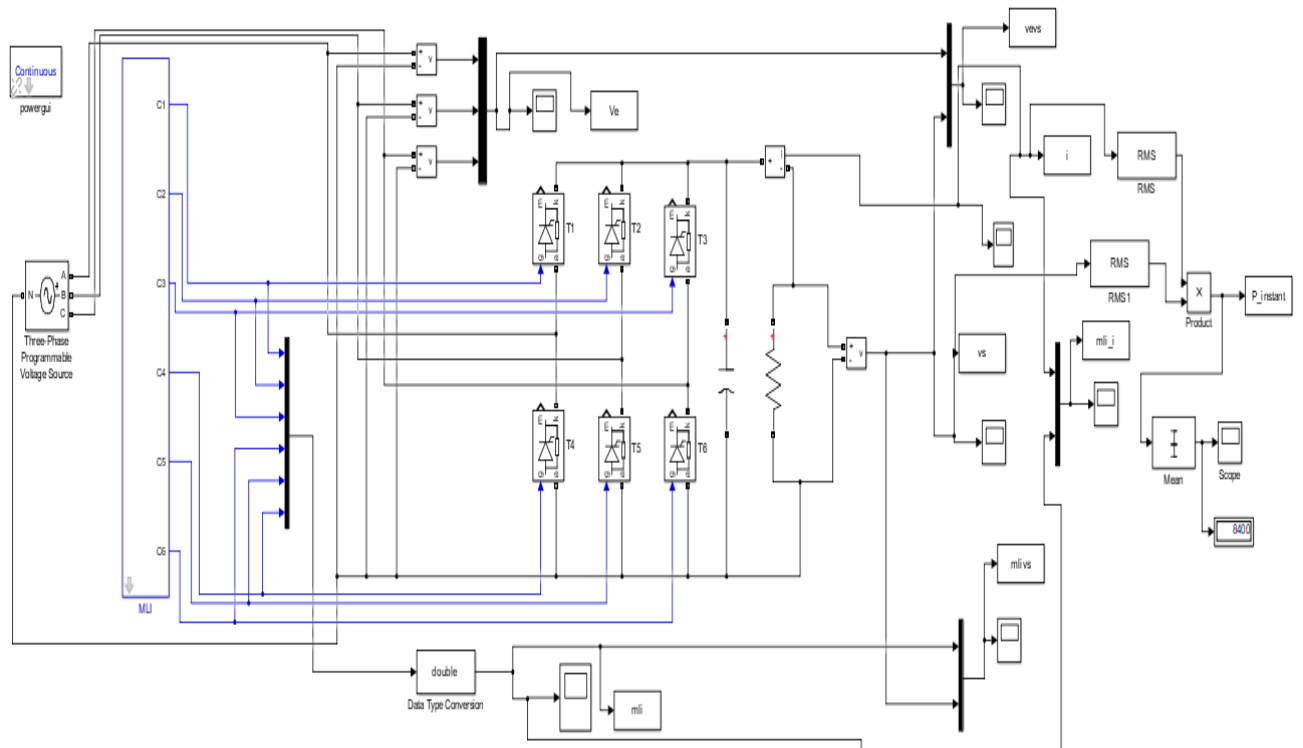


FIGURE III.16 – Schéma bloc de simulation du redresseur MLI

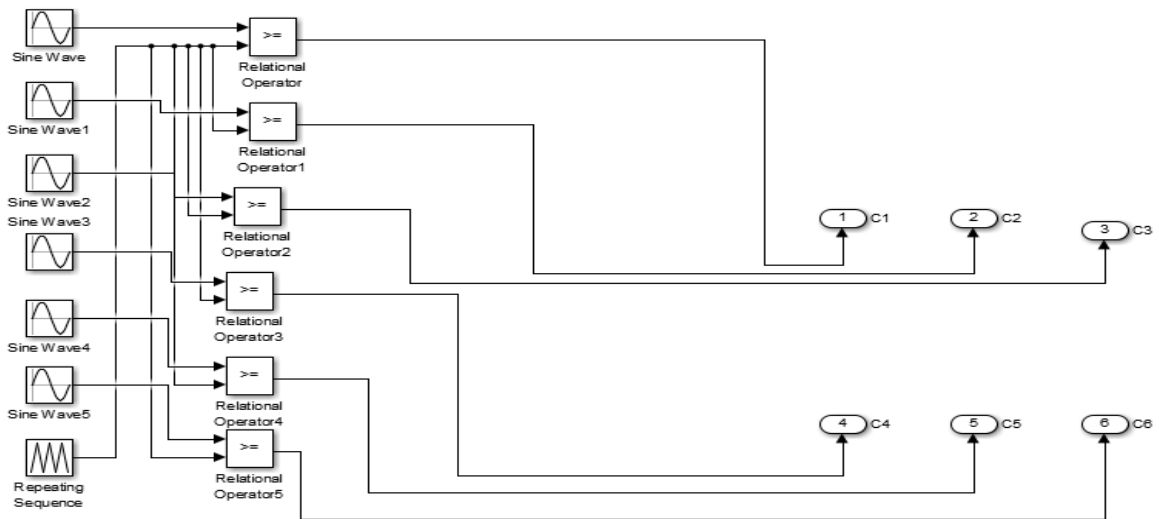


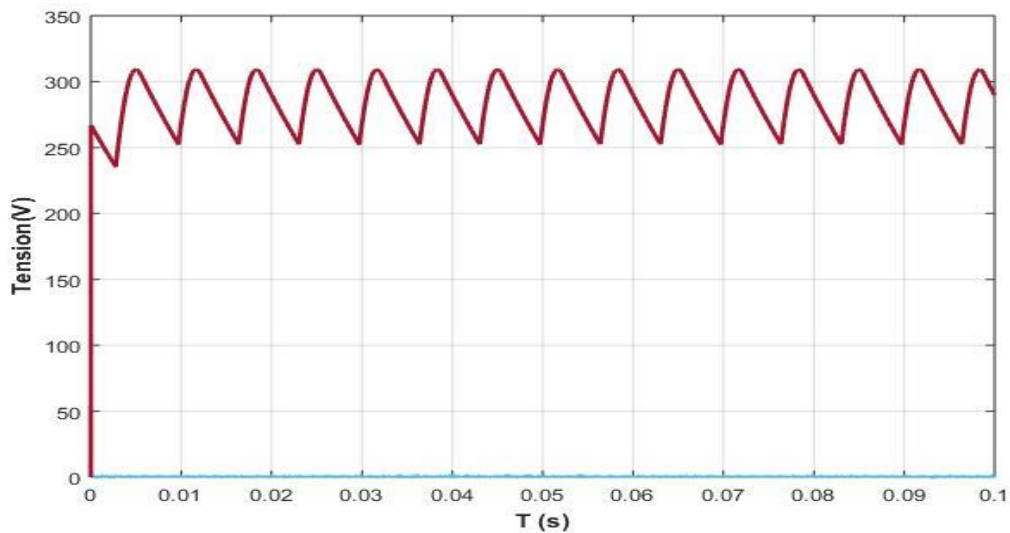
FIGURE III.17 – Signaux de commande MLI appliquée à un redresseur triphasé

### Chapitre III Étude et Simulation d'un Redresseur Triphasé à (MLI)

**Paramètres utilisés :** fréquence ( $f_{\text{MLI}}$ ) = 5 kHz,  $V_{\text{pm}} = 100$  V, rapport d'amplitude  $r = 0.5$ , indice de modulation  $m = 1.7$

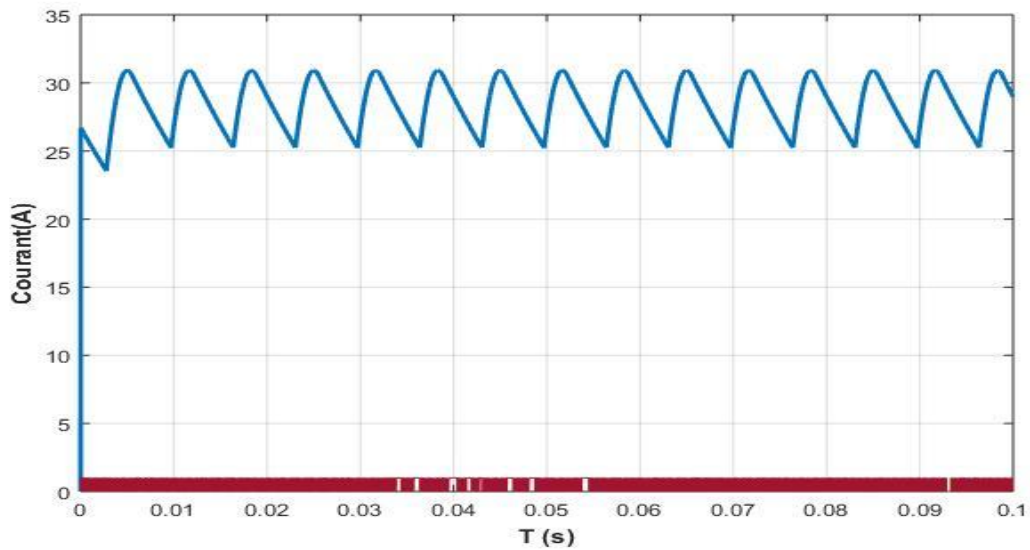
Dans ce schéma blocs, nous avons remplacé les signaux de commande des six gâchettes des thyristors par six signaux de commande utilisant la Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI).

Les résultats de cette mise en œuvre sont illustrés dans les figures II-8 et II-9, qui montrent les effets de cette technique de modulation sur le fonctionnement du système.

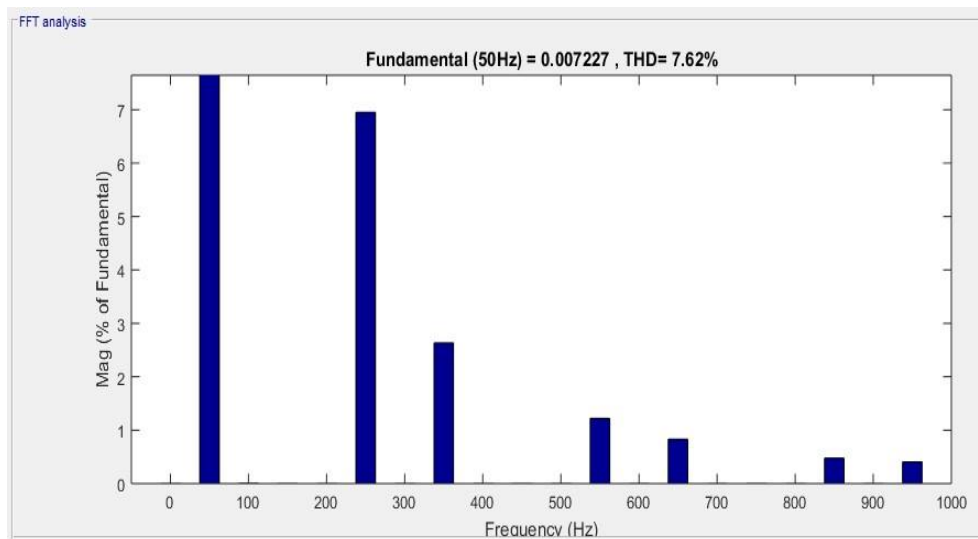


**FIGURE III.18** – Tension de charge en sortie

### Chapitre III Étude et Simulation d'un Redresseur Triphasé à (MLI)



**FIGURE III.19** – Courant de charge en sortie



**FIGURE III.20** – THD en tension du redresseur triphasé selon les paramètres de MLI

La tension redressée oscillant entre environ 240V et 310V, Cette ondulation résiduelle est caractéristique d'un redresseur triphasé mais l'utilisation de la MLI permet un certain contrôle sur la valeur moyenne de la tension redressée, ce dernier présente une valeur moyenne élevée avec une ondulation relativement faible, le courant oscillant entre 24A et 31A environ, avec une puissance active de 8400 W.

## **Chapitre III Étude et Simulation d'un Redresseur Triphasé à (MLI)**

Les impulsions rouges en bas correspondent aux instants de commutation des thyristors. Ces commutations sont déterminées par la technique MLI, Le THD (taux de distorsion harmonique) de 7,62% indique une bonne qualité de redressement, ainsi que le spectre harmonique montre que les harmoniques de rang 5 et 7 sont les plus significatifs, ce qui est typique d'un système triphasé, donc,

La MLI permet de réduire le taux de distorsion harmonique (THD) et améliore la régulation de tension.

**Après avoir réalisé la simulation** d'un redresseur triphasé commandé utilisant une régulation par Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI), nous proposons d'évaluer une méthode de régulation alternative : le régulateur PID (Proportional – Integral – Derivative). Afin de comparer les performances des deux types de régulation pour de déterminer laquelle est la plus efficace. Pour ce faire, une régulation de type PID a été intégrée au modèle d'un redresseur triphasé commandé classique.

### **III.8 Redresseur Triphasé avec Régulation PID**

Pour comparer davantage les performances du redresseur MLI, une commande PID est intégrée sous forme d'une fonction MATLAB. Cette commande ajuste dynamiquement l'angle d'amorçage en fonction de l'erreur entre la tension mesurée et la tension de référence. Le schéma bloc ci-dessous illustre cette nouvelle architecture, (Le code de régulation PID utilisé dans cette simulation est présenté en Annexe B).

## Chapitre III Étude et Simulation d'un Redresseur Triphasé à (MLI)

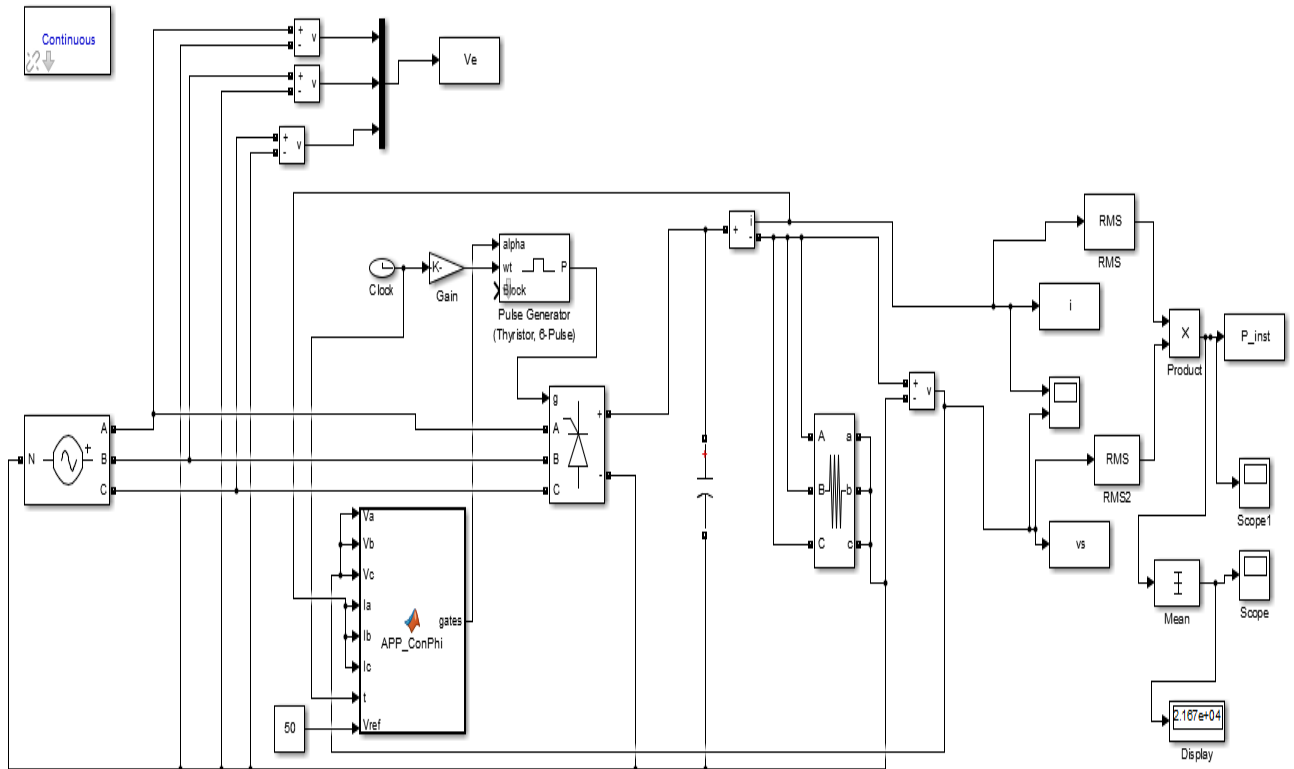


FIGURE III.21 – Schéma bloc de redresseur triphasé généré par la fonction de régulation PID.

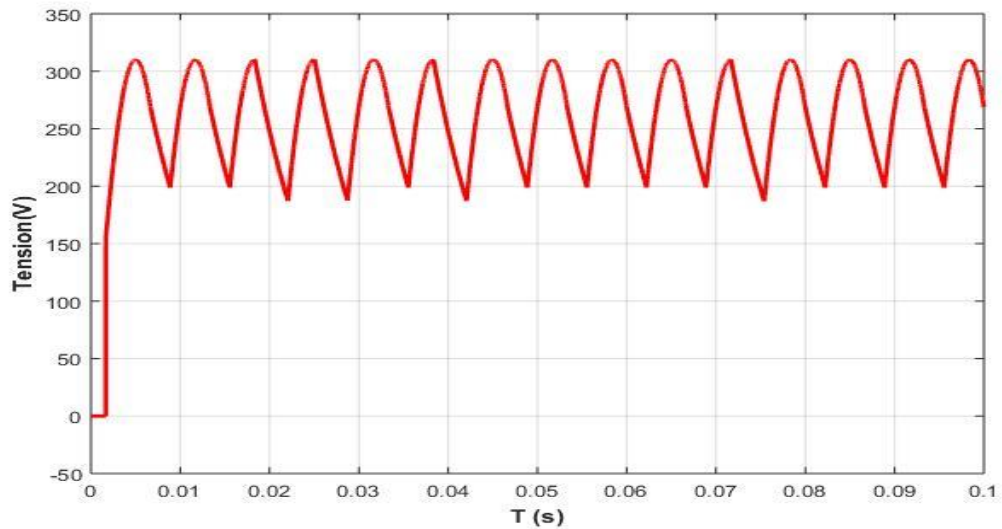
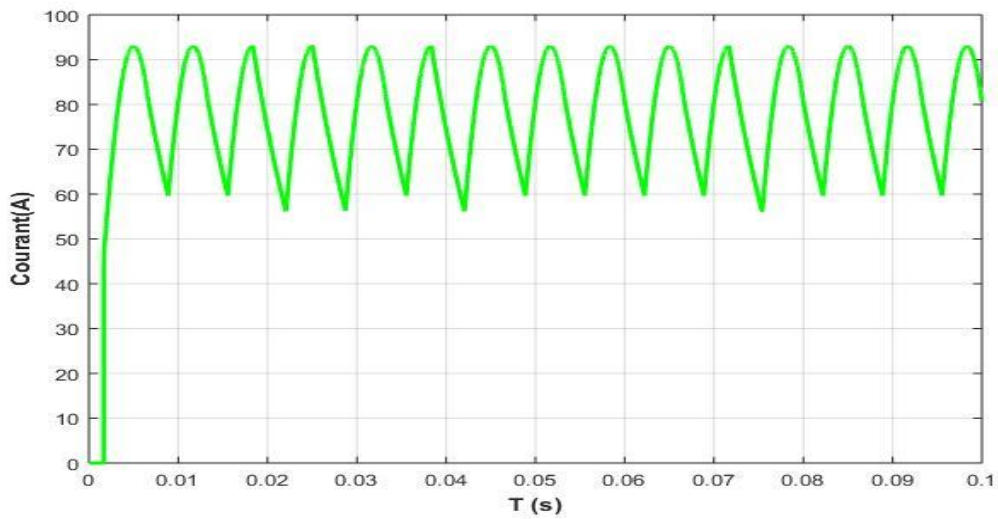
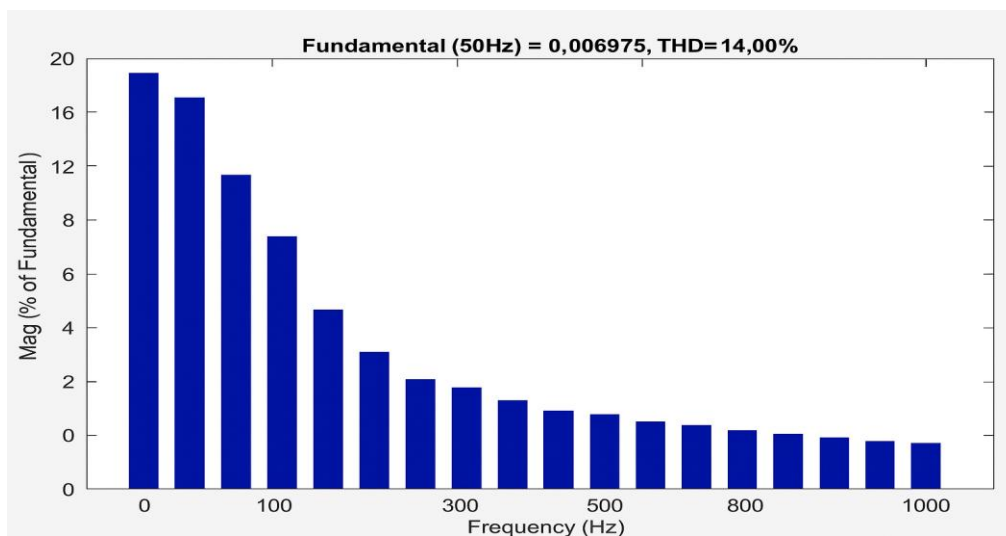


FIGURE III.22 – Tension de charge en sortie

### Chapitre III Étude et Simulation d'un Redresseur Triphasé à (MLI)



**FIGURE III.23** – Courant de charge en sortie



**FIGURE III.24** – THD en tension du redresseur triphasé selon les paramètres de PID

La tension est pulsée Oscille entre 200 V et 320 V. Bien régulée en moyenne, mais présente des ondulations liées au fonctionnement par angle d'amorçage. Le courant, varie entre 60 A et 90 A, il suit les variations de la tension redressée, ce courant présente également des harmoniques significatives.

Le redresseur triphasé commandé avec un régulateur PID permet d'atteindre une bonne régulation de la tension de sortie avec une puissance active plus élevé 21670 W. Toutefois, l'analyse spectrale du courant montre une distorsion harmonique totale (THD) relativement

## **Chapitre III Étude et Simulation d'un Redresseur Triphasé à (MLI)**

élevée de 14.16%. Sachant que Le THD reflète le niveau de distorsion harmonique. Moins il est élevé.

**En comparaison**, le redresseur triphasé commandé avec une régulation PID présente une puissance active de 21670 W, mais un THD relativement élevé de 14,16 %. A proximité, le redresseur commandé par MLI délivre une puissance active inférieure 8400 W, mais avec un THD plus faible de 7.62 %, indiquant ainsi une meilleure qualité de l'onde et une réduction significative des harmoniques

**Donc,**

La MLI permet de mieux contrôler la tension de sortie et de réduire fortement le THD, ce qui améliore la qualité de l'énergie

### **III.9 Comparaison des performances des différents redresseurs étudiés**

Les simulations réalisées ont permis de comparer plusieurs topologies de redresseurs. On peut résumer leurs caractéristiques comme suit :

#### **Redresseur non commandé :**

Présente une forte ondulation de la tension de sortie, sans possibilité de régulation. Il est simple mais peu performant en termes de qualité de signal.

#### **Redresseur demi-pont commandé :**

Permet une certaine régulation de la tension, mais reste limité en performance et en qualité du signal.

#### **Redresseur à pont complet commandé :**

Offre une régulation plus efficace de la tension de sortie, avec de meilleures performances que les précédents.

## **Chapitre III Étude et Simulation d'un Redresseur Triphasé à (MLI)**

### **Redresseur avec commande MLI (PWM) :**

Permet un contrôle précis de la tension de sortie avec une réduction significative du THD. Il améliore nettement la qualité du signal grâce à une commutation rapide et régulière.

**Redresseur commandé avec régulateur PID** : offre une régulation simple mais efficace, cependant le THD reste élevé. Bien qu'il soit facile à implémenter, il est moins performant que la MLI en matière de qualité d'énergie.

### **III.10 Conclusion**

À l'issue de cette étude, il prouve que la performance d'un redresseur triphasé dépend fortement de la stratégie de commande utilisée. Le redresseur non commandé, bien que simple, présente une forte ondulation en sortie. Les redresseurs commandés permettent une meilleure maîtrise de la tension moyenne mais souffrent toujours d'un THD élevé. L'utilisation de la MLI améliore significativement la forme d'onde du signal de sortie. Cette progression met en évidence l'intérêt croissant des techniques de commande avancées pour les applications de conversion d'énergie.

---

# Conclusion générale

---

## Conclusion générale

L'évolution rapide de l'électronique de puissance a profondément transformé la manière dont l'énergie électrique est convertie, régulée et utilisée dans les systèmes industriels modernes. Au cœur de cette évolution, les redresseurs triphasés occupent une place incontournable, notamment grâce à leur capacité à fournir une tension continue stable et adaptée aux applications de forte puissance.

Dans ce mémoire, nous avons étudié en détail les différentes topologies de redresseurs triphasés, en débutant par une analyse comparative des structures classiques, qu'elles soient non commandées, commandées ou mixtes. Cette première étape a permis de bien entourer leurs principes de fonctionnement, leurs limites, et les critères de performance qui les caractérisent.

Nous avons ensuite abordé les techniques modernes de commande, en particulier la modulation de largeur d'impulsion (MLI), qui offre une solution efficace pour améliorer la qualité de l'onde de sortie, réduire l'ondulation, et optimiser le taux de distorsion harmonique (THD). Ce type de commande, notamment dans sa forme sinusoïdale, s'est révélé particulièrement pertinent pour les applications exigeantes en termes de qualité de l'énergie.

Enfin, les simulations réalisées sous MATLAB/Simulink ont permis de valider les performances des différentes structures de redresseurs étudiées. Les résultats ont clairement montré que la commande MLI permet une nette amélioration de la forme d'onde de sortie comparée aux solutions classiques, tout en maintenant une bonne régulation. Par ailleurs, l'intégration d'une commande PID a également été explorée, offrant une régulation efficace mais avec un THD plus élevé que la commande MLI.

En conclusion, ce travail met en évidence l'intérêt croissant des techniques avancées de commande pour améliorer les performances des redresseurs triphasés. Les perspectives futures pourraient porter sur l'intégration de techniques intelligentes, notamment à base d'intelligence artificielle ou de logique floue, afin d'optimiser davantage la commande en fonction des variations de charge et des contraintes du réseau.

---

# Bibliographie

---

# Bibliographies

- [1] M. Rashid, "Power Electronics: Circuits, Devices and Applications," 4th ed., Pearson, 2013.
- [2] N. Mohan, T. Undeland, W. Robbins, "Power Electronics: Converters, Applications, and Design," 3rd ed., Wiley, 2003.
- [3] B. Wu, "High-Power Converters and AC Drives," Wiley-IEEE Press, 2006.
- [4] A. Ioinovici, "Power Electronics and Energy Conversion Systems," Volume 1, Wiley, 2013.
- [5] M. H. Rashid, "Introduction to PSpice Manual for Power Electronics," Pearson, 2004.
- [6] Guy Séguier, Francis Labrique, Philippe Delarue " Électronique de puissance (Structures, commandes, applications) "livre, 10e édition
- [7] BEKKOUCHE Charaf Eddine et TOUGGORTI Abdel Kader, « Étude et Simulation d'un variateur de vitesse commande un moteur à courant continu », mémoire de master, université Kasdi Merbah, Ouargla, 2015/2016 .
- [8] Mohan, N., Undeland, T.M., Robbins, W.P., Power Electronics: Converters, Applications, and Design, Wiley, 2003.
- [9] Rashid, M.H., Power Electronics: Circuits, Devices, and Applications, Pearson Education, 2014.
- [10] Erickson, R.W., Maksimovic, D., Fundamentals of Power Electronics, Springer, 2001.
- [11] Batarseh, I., Power Electronic Circuits, Wiley, 2004.
- [12] Holmes, D.G., Lipo, T.A., Pulse Width Modulation for Power Converters: Principles and Practice, Wiley-IEEE Press, 2003.
- [13] Habetler, T.G., et al., "A Review of PWM Methods for Voltage Source Inverters," IEEE Trans. Industrial Electronics, vol. 44, 1997.
- [14] Zdanov, A., Power Electronic Systems: Theory and Design, Springer, 2017.
- [15] Depenbrock, M., "Space Vector Modulation – An Engineering Perspective," EPE Journal, 1993.

- [16] Kastha, D., Bose, B.K., "Investigation of SPWM for Adjustable-Speed Drives," IEEE Trans. Industry Applications, vol. 30, no. 4, 1994
- [17] Lipo, T.A., Introduction to AC Machine Design, Wisconsin Power Electronics Research Center, 2004.
- [18] Dubois, M., Convertisseurs statiques de puissance, Ellipses, 2009.
- [19] Skvarenina, T.L., The Power Electronics Handbook, CRC Press, 2002.
- [20] Bendaoud, M., "Analyse comparative des redresseurs," Revue RIGE, 2019.
- [21] Carrara, G., Gardella, S., et al., "Multilevel PWM methods," IEEE Trans. Power Electronics, 1992
- [22] Benyoucef, D., "Commande numérique appliquée aux redresseurs," Thèse de doctorat, 2018.
- [23] L. Zellouma et B.S. Salem, « Etude et réalisation d'un onduleur monophasé utilisant la technique PWM à base des MOSFET », Mémoire d'ingénieur, biskra 2007.
- [24] Rashid, M. H. (2014). Power Electronics: Circuits, Devices and Applications. *4th Edition*, Pearson.
- [25] Mohan, N., Undeland, T. M., & Robbins, W. P. (2002). Power Electronics: Converters, Applications, and Design. Wiley.
- [26] Amri, L « Contrôle ADRC de l'éolienne utilisant la machine asynchrone à double alimentation », Mémoire de master en génie électrique, Université de Casablanca., Maroc, 2023.
- [27] Denoun hakim, « Des convertisseurs AC/ DC à MLI à facteur de puissance unitaire », Thèse de doctorat en électrotechnique, université mouloud mammeri de tizi – ouzou, 2006.

---

# Annexes

---

## Annexe

### Annexe A



Logiciels Utilisés Matlab & Simulink est un environnement de programmation graphique basé sur MATLAB pour la modélisation, la simulation et l'analyse de systèmes dynamiques multi domaines. Son interface principale est un outil graphique de diagramme de blocs et un ensemble personnalisable de bibliothèques de blocs. Il offre une intégration étroite avec le reste de l'environnement MATLAB et peut soit piloter MATLAB, soit être scriptée à partir de celui-ci. Simulink est largement utilisé dans le domaine de la commande automatique et du traitement des signaux numériques pour la simulation multi domaine et la conception à base de modèles.

## Annexe B

### Code du Régulateur PID

```

function gates = APP_ConPhi(Va, Vb, Vc, Ia, Ib, Ic, t, Vref)
% Fonction de contrôle pour redresseur triphasé avec régulation PID
% Entrées:
% Va, Vb, Vc: Tensions triphasées
% Ia, Ib, Ic: Courants triphasés
% t: Temps de simulation
% Vref: Tension de référence souhaitée
% Sorties:
% V_meas: Tension mesurée (ou valeur alpha pour monitoring)
% I_meas: Courant mesuré (courant DC de sortie)
% gates: Signaux de gâchette pour les thyristors

% Variables persistantes pour le contrôleur PID
persistent prev_error;
persistent integral;
persistent prev_alpha;
persistent last_time;

% Initialisation des variables persistantes
if isempty(prev_error)
    prev_error = 0;
    integral = 0;
    prev_alpha = 30; % Angle initial en degrés
    last_time = 0;
end

% Paramètres du PID
Kp = 0.5; % Coefficient proportionnel
Ki = 0.2; % Coefficient intégral
Kd = 0.1; % Coefficient dérivé

% Calcul de la tension DC moyenne (simplifiée)
% Dans un système réel, cette mesure viendrait d'un capteur externe
V_dc_measured = max([Va, Vb, Vc]) - min([Va, Vb, Vc]); % Approximation
simple

% Calcul du courant DC (moyenne des courants absolus)
I_dc = (abs(Ia) + abs(Ib) + abs(Ic))/3;

% Calcul de l'erreur
error = Vref - V_dc_measured;

% Calcul du temps écoulé
dt = t - last_time;
if dt <= 0
    dt = 0.001; % Éviter division par zéro
end

% Calcul des termes PID
% Terme proportionnel
P_term = Kp * error;

% Terme intégral avec anti-windup
if prev_alpha > 0 && prev_alpha < 90
    integral = integral + error * dt;

```

```

end
I_term = Ki * integral;

% Terme dérivé
derivative = (error - prev_error) / dt;
D_term = Kd * derivative;

% Calcul de la variation d'alpha
delta_alpha = P_term + I_term + D_term;

% Mise à jour de l'angle alpha
alpha = prev_alpha - delta_alpha; % Signe négatif car alpha? =>
tension?

% Limiter alpha entre 0 et 90 degrés
alpha = max(0, min(90, alpha));

% Conversion en radians
alpha_rad = alpha * pi/180;

% Mémoriser les valeurs pour la prochaine itération
prev_error = error;
prev_alpha = alpha;
last_time = t;

% Sorties pour le monitoring

% Initialisation des signaux de gâchette
gates = zeros(6, 1);

% Calcul du temps de cycle pour une fréquence de 50Hz
T = 1/50;

% Détection des passages par zéro et génération des impulsions
% Utilisation d'un système de détection plus robuste avec les signes

% Thyristor 1 (positif de la phase A)
if Va >= 0 && Vb < 0 && Vc < 0
    phase_angle = 2*pi*mod(t, T)/T;
    if phase_angle < pi/3
        gates(1) = (phase_angle >= alpha_rad/180*pi) && (phase_angle <=
alpha_rad/180*pi + 0.01);
    end
end

% Thyristor 3 (positif de la phase B)
if Va < 0 && Vb >= 0 && Vc < 0
    phase_angle = 2*pi*mod(t, T)/T;
    if phase_angle >= 2*pi/3 && phase_angle < pi
        gates(3) = (phase_angle >= 2*pi/3 + alpha_rad/180*pi) &&
(phase_angle <= 2*pi/3 + alpha_rad/180*pi + 0.01);
    end
end

% Thyristor 5 (positif de la phase C)
if Va < 0 && Vb < 0 && Vc >= 0
    phase_angle = 2*pi*mod(t, T)/T;
    if phase_angle >= 4*pi/3 && phase_angle < 2*pi

```

```
        gates(5) = (phase_angle >= 4*pi/3 + alpha_rad/180*pi) &&
(phase_angle <= 4*pi/3 + alpha_rad/180*pi + 0.01);
    end
end

% Thyristor 2 (négatif de la phase A)
if Va <= 0 && Vb > 0 && Vc > 0
    phase_angle = 2*pi*mod(t, T)/T;
    if phase_angle >= pi && phase_angle < 4*pi/3
        gates(2) = (phase_angle >= pi + alpha_rad/180*pi) &&
(phase_angle <= pi + alpha_rad/180*pi + 0.01);
    end
end

% Thyristor 4 (négatif de la phase B)
if Va > 0 && Vb <= 0 && Vc > 0
    phase_angle = 2*pi*mod(t, T)/T;
    if phase_angle >= pi/3 && phase_angle < 2*pi/3
        gates(4) = (phase_angle >= pi/3 + alpha_rad/180*pi) &&
(phase_angle <= pi/3 + alpha_rad/180*pi + 0.01);
    end
end

% Thyristor 6 (négatif de la phase C)
if Va > 0 && Vb > 0 && Vc <= 0
    phase_angle = 2*pi*mod(t, T)/T;
    if phase_angle >= 5*pi/3 || phase_angle < 0
        gates(6) = (phase_angle >= 5*pi/3 + alpha_rad/180*pi) &&
(phase_angle <= 5*pi/3 + alpha_rad/180*pi + 0.01);
    end
end

% Protection contre les courts-circuits
if I_dc > 10 % Limite de courant (à ajuster selon votre application)
    gates = zeros(6, 1); % Désactivation de tous les thyristors
end
end
```

# Résumé

Ce mémoire s'inscrit dans le domaine de l'électronique de puissance et traite de l'étude, de la modélisation et de la simulation des redresseurs triphasés. L'objectif principal est de comparer les performances des redresseurs classiques (non commandés, commandés) avec celles des redresseurs commandés par Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI). Après une analyse théorique des différentes topologies, des simulations ont été réalisées sous MATLAB/Simulink afin d'évaluer les formes d'onde, la tension de sortie, le courant de charge, et le taux de distorsion harmonique (THD). Les résultats obtenus montrent que la commande MLI offre une meilleure qualité d'énergie et une régulation plus précise que les commandes classiques. Une comparaison avec la commande PID a également été menée, mettant en évidence les avantages de la MLI.

**Mots clés :** électronique de puissance, redresseur triphasé, modulation de largeur d'impulsion (MLI), THD, MATLAB/Simulink.

# Abstract

This thesis falls within the field of power electronics and focuses on the study, modeling, and simulation of three-phase rectifiers. The main objective is to compare the performance of conventional rectifiers (uncontrolled and controlled) with those using Pulse Width Modulation (PWM). After a theoretical analysis of various topologies, simulations were carried out using MATLAB/Simulink to evaluate the output waveforms, voltage, load current, and Total Harmonic Distortion (THD). The results show that PWM control provides better power quality and more precise regulation compared to classical methods. A comparison with PID control was also conducted, highlighting the advantages of PWM.

**Keywords:** power electronics, three-phase rectifier, pulse width modulation (PWM), THD, MATLAB/Simulink.

## ملخص

تندرج هذه الأطروحة في مجال إلكترونيات الطاقة وتتناول دراسة ونمذجة ومحاكاة المقومات ثلاثية الطور. والهدف الرئيسي هو مقارنة أداء المقومات التقليدية (غير المتحكم بها وغير المتحكم بها) بأداء المقومات التي يتم التحكم بها بواسطة بعد التحليل النظري للطوبولوجيا المختلفة، تم إجراء عمليات محاكاة باستخدام (MLI) تعديل عرض النبض أظهرت (THD) لتقييم الأشكال الموجية وجهد الخرج وتيار الحمل ونسبة التشوه التوافقي MATLAB/Simulink يوفر جودة طاقة أفضل وتنظيمًا أكثر دقة من التحكم التقليدي. كما تم إجراء مقارنة مع التحكم MLI النتائج أن التحكم في MLI ، مما يسלט الضوء على مزايا PID

**الكلمات المفتاحية:** إلكترونيات الطاقة، مقوم ثلاثي الأطوار، ماطلاب سيميلينك، تعديل عرض النبض

MATLAB/Simulink، (THD) نسبة التشوه التوافقي