

N° d'ordre :

N° de série :

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**



**UNIVERSITÉ ECHAHID HAMMA LAKHDAR EL OUED**



**FACULTE DE TECHNOLOGIE**

**DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE**

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

**MASTER ACADEMIQUE**

**Domaine:** Sciences et Technologies

**Filière:** Electromécanique

**Spécialité:** Electromécanique

*Thème*

*Etude Et Simulation D'un Convertisseur  
AC / DC*

**Devant le jury composé de :**

**Présenté par :**

..... Président  
..... Examineur  
..... Examineur  
Youcef guerfi Encadreur

- Ali Berrehouma  
- Mohammad Ilyas Zaiz  
- Yahia Zekri  
- Ramzi ban Nadji

**Année universitaire 2021 - 2022**



## *Remerciement :*

*Nous remercions tout d'abord, ALLAH qui nous a donné la force et le courage afin de parvenir à élaborer ce modeste travail.*

*En tout premier lieu, nous remercions vivement notre encadreur monsieur Youcef Guerfi, pour sa disponibilité, ses précieux conseils, son soutien moral et scientifique nous a permis de mener à terme ce travail.*

*Nous souhaitons également remercier toute l'équipe pédagogique du département Electromécanique.*

*Nos vifs remerciements vont aussi à nos enseignants qui ont fait de leurs mieux pour nous donner une formation universitaire solide qui nous a permis de préparer ce modeste mémoire, qui nous sera très utile pour notre avenir professionnel. Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre mémoire en acceptant d'examiner notre travail.*

*Nous voudrions remercier nos familles qui nous encouragées dans la poursuite de notre travail de mémoire.*

*Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*





*Dédicaces :*

*À nos chers parents avec toute notre gratitude*

*et notre amour*

*Pour toutes ces années de sacrifice et*

*d'encouragement.*

*À nos frères et sœurs et à toutes nos familles.*

*À tous les amis...*

*Pour tous ceux que j'aime.*



### Résumé

Le travail effectué porte sur une étude et Simulation des Convertisseurs AC/DC et comment élimine les problèmes des perturbations dans le réseau électrique pour l'amélioration de la qualité du signal électrique et la minimisation des perturbations en courant constant. Autrement dit que cet travail c'est une phase inévitable pour le développement électronique des techniques intelligentes, on a atteint les objectifs fixés et nous avons validé les résultats de simulation dans l'environnement MATLAB/SIMULINK, et tous les résultats sont effectués et interprétés.

**Mots clés :** *Convertisseur AC/DC , MCC ,convertisseur statique ,Modélisation, MLI, MATLAB /SIMULINK.*

### Abstract :

The work carried out concerns a study and Simulation of AC/DC Converters and how to eliminate the problems of disturbances in the electrical network for the improvement of the quality of the electrical signal and the minimisation of disturbances in constant current. In other words that this work is an inevitable phase for the electronic development of intelligent techniques, we have achieved the objectives set and we have validated the simulation results in the MATLAB/SIMULINK environment, and all the results are performed and interpreted.

**Keywords** : converter AC/DC, MCC, static converter, Modeling, MLI, MATLAB / SIMULINK.

## الملخص

يتعلق العمل المنجز بدراسة ومحاكاة محولات التيار المتردد/التيار المستمر وكيفية القضاء على مشاكل الاضطرابات في الشبكة الكهربائية من أجل تحسين جودة الإشارة الكهربائية وتقليل الاضطرابات في التيار المستمر. لقد حققنا الأهداف المحددة وقمنا بالتحقق من صحة نتائج المحاكاة في بيئة MATLAB/SIMULINK، ويتم تنفيذ جميع النتائج وتفسيرها.

**كلمات مفتاحية :** محول AC/DC , محرك التيار المستمر , محول ثابت , نمذجة , MLI , محاكاة / ماتلاب.

### Table des matières

Remerciement	
Dédicaces	
Résumé .....	I
Abstract .....	III
Table des matières .....	IV
Listes des Symboles et des Acronymes .....	VI
Liste des figures.....	VIII
Liste des Tableaux .....	XII
Liste des abréviations .....	XIII
Introduction général.....	1
Chapitre I : L'état De L'art Du Système.....	4
I.1 INTRODUCTION.....	5
I.2 LES SEMI-CONDUCTEURS .....	5
I.2.1 Les diodes.....	5
I.2.2 Les thyristors: .....	6
I.3 DEFINITION D'UN REDRESSEUR.....	8
I.3.1 Les Redresseurs non commandé .....	8
I.3.2 Les redresseurs commandés :.....	13
I.4 LES REDRESSEURS A MLI.....	16
I.4.1 Définition .....	16
I.4.2 Structure générale du redresseur à MLI .....	16
I.4.3 Principe de fonctionnement des redresseurs à MLI .....	18
I.4.4 Les applications modernes du redresseur à MLI.....	18
I.4.5 Les techniques de commande MLI : .....	19
I.5.4 Le collecteur.....	23
I.7 FONCTIONNEMENT EN MODE GENERATRICE :.....	24
I. 8 FONCTIONNEMENT DU MOTEUR A COURANT CONTINU : .....	24
I.9 MODES D'EXCITATION :.....	25
I.9.1 L'excitation séparée : (Notre choix).....	26
I.9.2 L'excitation série:.....	26
I.9.3 L'excitation shunt ou parallèle : .....	26
I.9.4 L'excitation composée ou compound : .....	27

## Table des matières

---

I.10 CONCLUSION :	27
Chapitre II : Modélisation Du Système	28
II.1 Introduction	29
II.2 MODELISATION DU REDRESSEUR A MLI	29
II.2.1 Le réseau	30
II.2.2 Le filtre	30
II.2.3 Le redresseur à MLI	30
II.3. LA COMMANDE A MLI	35
II.3.1 La commande MLI sinus-triangle	35
II.3.2 La commande MLI vectorielle	37
II.4 Modèle de la machine à courant continu sur les axes d,q	38
II.4.1. Equation des tensions	39
II.4.2. Equation des flux	39
II.4.3 Expression du couple électromagnétique	40
II.4.4 Equation du mouvement	42
II.5 Application de la théorie sur un moteur à excitation séparée:	42
II.6 Conclusion :	43
Chapitre III : Simulation Du Système	44
III-1 INTRODUCTION	45
III.2 PRESENTATION DE L'ENVIRONNEMENT MATLAB/SIMULINK™	45
III.2.1. Matlab	46
III.2.2. Simulink	46
III.3. SIMULATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS:	47
III.3.1 Les Redresseurs non commandé:	47
III.3.2 Les Redresseurs commandé:	55
III.4. INTERPRETATION DES RESULTATS :	66
III.5. CONCLUSION	68
Conclusion générale	69
Conclusion générale	70
Bibliographie	72

## Listes des Symboles et des Acronymes

---

### Listes des Symboles et des Acronymes

$e_a, e_b, e_c$	Les tensions simples du réseau triphasé d'alimentation
$E_{abc}$	Vecteur des tensions instantanées triphasées d'alimentation
$v_{ref}$	Amplitude de la tension de référence de la commande MLI
$v_{ra}, v_{rb}, v_{rc}$	Les tensions simples à l'entrée du redresseur
$u_{dc}$	Tension de bus continue
L	Inductance totale de la ligne réseau-redresseur
R	Résistance de la ligne réseau-redresseur
$\omega$	La pulsation du réseau
T	Période d'échantillonnage
$T_r$	Constante du temps électrique de l'impédance (L,R) $T_r \approx L/R$
$T_m$	Taux de modulation de la commande MLI
$I_m$	Indice de modulation de la commande MLI
$S_a, S_b, S_c$	Etats de commutation du redresseur
$i_a, i_b, i_c$	Le courant de la ligne du réseau triphasé d'alimentation
$i_{dc}$	Le courant redressé
$i_{ch}$	Courant dans la charge
$R_{ch}$	Résistance de la charge
$f_p$	la fréquence de la tension de la porteuse
$f_r$	la fréquence de la tension de référence

## Listes des Symboles et des Acronymes

---

$T_p$	Période d'un signal de la porteuse
$v_p$	Amplitude de la tension de la porteuse de la commande MLI
$dW_j$	L'énergie dissipée par effet joule
$dW_{mag}$	La variation de l'énergie magnétique emmagasinée dans le champ de couplage
$dW_{méc}$	L'énergie transformée en énergie mécanique
$C_{em}$	Le couple électromagnétique de la machine
$C_r$	Le couple résistant (statique) à l'arbre de la machine
J	Le moment d'inertie
$K_f$	le coefficient de frottement
$\Omega_m$	La vitesse électrique du rotor
p	le nombre de paires de pôles
MCC	Moteurs à Courant Continu.
AC/DC	Conversion Alternative/Continu.
SCR	Silicon-Controlled Rectifier.
MLI	Modulation de largeur d'impulsions (PWM: Pulse Width Modulation)
GTO	Thyristor commandé à l'Ouverture (Gate Turn Off Thyristor)
IGBT	Transistor Bipolaire à Port Isolé (Insulated Gate Bipolar Transistor)

### Liste des figures

FIGURE I. 1. SYMBOLE D'UNE DIODE.....	6
FIGURE I. 2. CARACTERISTIQUES STATIQUES D'UNE DIODE [2] .....	6
FIGURE I. 3. SYMBOLES D'UN THYRISTOR [2] .....	7
FIGURE I. 4. CARACTERISTIQUES STATIQUES D'UN THYRISTOR [1] .....	7
FIGURE I. 5. REDRESSEUR MONOPHASE SIMPLE ALTERNANCE.....	8
FIGURE I. 6. ALLURES DES TENSIONS ET DE COURANT DE LA REDRESSEUSE MONOPHASEE SIMPLE ALTERNANCE. ....	9
FIGURE I. 7. REDRESSEUR MONOPHASE DOUBLE ALTERNANCE. ....	10
FIGURE I. 8. ALLURES DES TENSIONS ET DE COURANT DE LA REDRESSEUSE MONOPHASEE DOUBLE ALTERNANCE. ....	10
FIGURE I. 9. REDRESSEUR TRIPHASE. ....	12
FIGURE I. 10. ALLURES DES TENSIONS ET DE COURANT DU REDRESSEUR TRIPHASE. ....	12
FIGURE I. 11. REDRESSEUR COMMANDE MONOPHASE SIMPLE ALTERNANCE. ....	13
FIGURE I. 12. ALLURES DES TENSIONS ET DE COURANT DU REDRESSEUR MONOPHASEE SIMPLE ALTERNANCE (COMMANDE).....	14
FIGURE I. 13. REDRESSEUR TRIPHASE (COMMANDE).....	14
FIGURE I. 14. ALLURES DES TENSIONS ET DE COURANT REDRESSEUR TRIPHASE (COMMANDE) .....	15
FIGURE I. 15. REDRESSEUR A <i>MLI</i> TRIPHASE DE STRUCTURE COURANT. ....	17
FIGURE I. 16. REDRESSEUR A <i>MLI</i> TRIPHASE DE STRUCTURE TENSION.....	17
FIGURE I. 17. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE MODULATEUR <i>MLI</i> A BANDE D'HYSTERESIS.....	19
FIGURE I. 18. MODULATEUR <i>MLI</i> A ECHANTILLONNAGE PERIODIQUE. ....	20
FIGURE I. 19. MODULATEUR <i>MLI</i> A PORTEUSE TRIANGULAIRE .....	20
FIGURE I. 20. LES COMPOSANTS DE LA MACHINE A COURANT CONTINU[10]. ....	21
FIGURE I. 21. LES PARTIES PRINCIPALES DE LA MACHINE A COURANT CONTINU .....	22
FIGURE I. 22. INDUCTEUR D'UNE MACHINE A COURANT CONTINU [10].....	22
FIGURE I. 23. INDUIT D'UNE MACHINE A COURANT CONTINU [10] .....	23
FIGURE I. 24. COLLECTEUR D'UNE MACHINE A COURANT CONTINU [10].....	23

## Listes des figures

---

FIGURE I. 25. LA REGLE DE LA MAIN DROITE [12] .....	25
FIGURE I. 26. MACHINE A EXCITATION SEPARÉE [13].....	26
FIGURE I. 27. MACHINE A EXCITATION SERIE [13] .....	26
FIGURE I. 28. MACHINE A EXCITATION SHUNT [13].....	27
FIGURE I. 29. MACHINE A EXCITATION COMPOSE [13] .....	27
FIGURE II. 1. structure du redresseur a mli [4] .....	29
FIGURE II. 2. CIRCUIT DE FILTRE (RL).....	30
FIGURE II. 3; DIFFERENTS ETATS DE COMMUTATION DES INTERRUPTEURS DU REDRESSEUR A MLI. [4] .....	34
FIGURE II. 4 . PRINCIPE DE LA COMMANDE MLI SINUS-TRIANGLE. [4].....	36
FIGURE II. 5. CONFIGURATION DES DIFFERENTES POSSIBILITES D'INTERRUPTEURS DU REDRESSEUR. . [4].....	38
FIGURE II. 6. REPRESENTATION DE LA MCC SUR LES AXES D ET Q. [17] .....	39
FIGURE II. 7. SCHEMA EQUIVALENT D'UN MOTEUR A EXCITATION SEPARÉE . [17] .....	42
FIGURE III. 1. SCHEMA BLOC DE REDRESSEUR MONOPHASE A UNE ALTERNANCE AVEC UNE CHARGE R EN DEMI-PONT.....	47
FIGURE III. 2. ALLURES DES TENSIONS ET LE COURANT DU REDRESSEUR MONOPHASE A UNE ALTERNANCE AVEC UNE CHARGE R EN DEMI-PONT .....	48
FIGURE III. 3. SCHEMA BLOC DE REDRESSEUR MONOPHASE A UNE ALTERNANCE AVEC UNE CHARGE RL EN DEMI-PONT .....	48
FIGURE III. 4. ALLURES DES TENSIONS ET LE COURANT DU REDRESSEUR MONOPHASE A UNE ALTERNANCE AVEC UNE CHARGE RL EN DEMI-PONT .....	49
FIGURE III. 5. SCHEMA BLOC DE REDRESSEUR MONOPHASE A UNE ALTERNANCE AVEC UNE CHARGE RL ET DIODE A ROUE LIBRE EN DEMI-PONT .....	49
FIGURE III. 6. ALLURES DES TENSIONS ET LE COURANT DU REDRESSEUR MONOPHASE A UNE ALTERNANCE AVEC UNE CHARGE RL ET DIODE A ROUE LIBRE EN DEMI-PONT .....	50
FIGURE III. 7. SCHEMA BLOC DE REDRESSEUR MONOPHASE A DOUBLE ALTERNANCE AVEC UNE CHARGE R EN DEMI-PONT.....	50

## Listes des figures

---

FIGURE III. 8. ALLURES DES TENSIONS ET LE COURANT DU REDRESSEUR MONOPHASE A DOUBLE ALTERNANCE AVEC UNE CHARGE R EN DEMI-PONT .....	51
FIGURE III. 9. SCHEMA BLOC DE REDRESSEUR MONOPHASE A DOUBLE ALTERNANCE AVEC UNE CHARGE RL EN DEMI-PONT .....	51
FIGURE III. 10. ALLURES DES TENSIONS ET LE COURANT DU REDRESSEUR MONOPHASE A DOUBLE ALTERNANCE AVEC UNE CHARGE RL EN DEMI-PONT .....	52
FIGURE III. 11. SCHEMA BLOC DE REDRESSEUR MONOPHASE A DOUBLE ALTERNANCE AVEC UNE CHARGE R EN PONT .....	52
FIGURE III. 12. ALLURES DES TENSIONS ET LE COURANT DU REDRESSEUR MONOPHASE A DOUBLE ALTERNANCE AVEC UNE CHARGE R EN PONT.....	53
FIGURE III. 13. SCHEMA BLOC DE REDRESSEUR MONOPHASE A DOUBLE ALTERNANCE AVEC UNE CHARGE RL EN PONT .....	53
FIGURE III. 14. ALLURES DES TENSIONS ET LE COURANT DU REDRESSEUR MONOPHASE A DOUBLE ALTERNANCE AVEC UNE CHARGE RL EN PONT.....	54
FIGURE III. 15. SCHEMA BLOC DE REDRESSEUR TRIPHASE AVEC UNE CHARGE R EN DEMI-PONT.....	54
FIGURE III. 16. ALLURES DES TENSIONS ET LE COURANT DU REDRESSEUR TRIPHASE AVEC UNE CHARGE R EN DEMI-PONT.....	55
FIGURE III. 17. SCHEMA BLOC DE REDRESSEUR MONOPHASE COMMANDE A UNE ALTERNANCE AVEC UNE CHARGE R.....	55
FIGURE III. 18. ALLURES DES TENSIONS ET LE COURANT DU REDRESSEUR MONOPHASE COMMANDE A UNE ALTERNANCE AVEC UNE CHARGE R.....	56
FIGURE III. 19. SCHEMA BLOC DE REDRESSEUR MONOPHASE COMMANDE A UNE ALTERNANCE AVEC UNE CHARGE RL CHARGE RL .....	56
FIGURE III. 20. ALLURES DES TENSIONS ET LE COURANT DU REDRESSEUR MONOPHASE COMMANDE A UNE ALTERNANCE AVEC UNE CHARGE RL.....	57
FIGURE III. 21. SCHEMA BLOC DE REDRESSEUR MONOPHASE COMMANDE A DOUBLE ALTERNANCE EN DEMI-PONT AVEC UNE CHARGE R ALPHA=30° .....	57
FIGURE III. 22. ALLURES DES TENSIONS ET LE COURANT DU REDRESSEUR MONOPHASE COMMANDE A DOUBLE ALTERNANCE EN DEMI-PONT AVEC UNE CHARGE R ALPHA=30° .....	58
FIGURE III. 23. SCHEMA BLOC DE REDRESSEUR MONOPHASE COMMANDE A DOUBLE ALTERNANCE EN DEMI-PONT AVEC UNE CHARGE RL ALPHA=30° .....	58

## Listes des figures

---

FIGURE III. 24. ALLURES DES TENSIONS ET LE COURANT DU REDRESSEUR MONOPHASE COMMANDE A DOUBLE ALTERNANCE EN DEMI-PONT AVEC UNE CHARGE RL ALPHA=30° .....	59
FIGURE III. 25. SCHEMA BLOC DE REDRESSEUR TRIPHASE COMMANDE EN DEMI-PONT AVEC UNE CHARGE R ALPHA=30° .....	59
FIGURE III. 26. ALLURES DES TENSIONS ET LE COURANT DE REDRESSEUR TRIPHASE COMMANDE EN DEMI-PONT AVEC UNE CHARGE R ALPHA=30° .....	60
FIGURE III. 27. SCHEMA BLOC DE REDRESSEUR TRIPHASE COMMANDE EN DEMI-PONT AVEC UNE CHARGE RL ALPHA=30° .....	60
FIGURE III. 28. ALLURES DES TENSIONS ET LE COURANT DE REDRESSEUR TRIPHASE COMMANDE EN DEMI-PONT AVEC UNE CHARGE RL ALPHA=30° .....	61
FIGURE III. 29. SCHEMA BLOC DE REDRESSEUR TRIPHASE COMMANDE EN PONT ALPHA=30° .....	61
FIGURE III. 30. ALLURES DES TENSIONS ET LE COURANT DE REDRESSEUR TRIPHASE COMMANDE EN PONT ALPHA=30° .....	62
FIGURE III. 31. SCHEMA BLOC DE REDRESSEUR TRIPHASE COMMANDE EN PONT ALIMENTE UN MOTEUR A COURANT CONTINU A EXCITATION SEPRE ALPHA=30° .....	62
FIGURE III. 32. ALLURE DE COURANT REDRESSEUR TRIPHASE COMMANDE EN PONT ALIMENTE UN MOTEUR A CC A EXCITATION SEPRE ALPHA=30° .....	63
FIGURE III. 33. ALLURE DE TENSION REDRESSEUR TRIPHASE COMMANDE EN PONT ALIMENTE UN MOTEUR A CC A EXCITATION SEPRE ALPHA=30° .....	63
FIGURE III. 34. ALLURE DE VITESSE D'UN MOTEUR A CC A EXCITATION SEPRE .....	63
FIGURE III. 35. ALLURE DE COURANT D INDUIT D'UN MOTEUR A CC A EXCITATION SEPRE.....	64
FIGURE III. 36. ALLURE DE COURANT D INDUCTEUR D'UN MOTEUR A CC A EXCITATION SEPRE .....	64
FIGURE III. 37. ALLURE DE COUPLE DE MOTEUR A CC A EXCITATION SEPRE.....	64
FIGURE III. 38. SCHEMA BLOC D'UN REDRESSEUR BIPHASE A MLI EN PONT .....	65
FIGURE III. 39. ALLURE DE LA TENSION DE CHARGE D'UN REDRESSEUR BIPHASE A MLI.....	65
FIGURE III. 40. ALLURE DU COURANT DE CHARGE D'UN REDRESSEUR BIPHASE A MLI.....	65
FIGURE III. 41. PORTEUSE TRIANGULAIRE DE LA TECHNIQUE MLI .....	66
FIGURE III. 42. TRAIN DES IMPULSIONS DES GACHETTES DE LA TECHNIQUE MLI. ....	66

**Liste des Tableaux**

TABLEAU II. 1. LES HUIT ETATS POSSIBLES DES INTERRUPTEURS [4] .....34

### Liste des abréviations

AAM	Apparence actif model (Les modèles actifs d'apparence)
ADL	Analyse Discriminante Lineaire
AR	The AR Face Database, Aleix Martinez and Robert Benavente
ARM	Advanced RISC Machine
BIC	Binary Interaction Coefficients
CNN	Convolutional Neural Network
EBGM	ElasticBench graph matching
FER	Facial Expression Recognition
FERET	The Facial Recognition Technology
FRVT	Face Recognition Vendor Test
GPIO	General-Purpose Input/Output
GPU	GraphicsProcessingUnits
HMM	Hidden Markov Model
ICA	Independent component analysis (analyse en composantes indépendantes).
K-LDA	KernelLineaire Discriminant Analysis
K-PCA	Kernel Principal Component Analysis
LBP	Local binary pattern
LFA	Local Featureanalysis .
LG-PCA	l'algorithme Log Gabor PCA
LLE	Locally Linear Embedding Alogorithm.
PCA	Principal Component Analysis (analyse en composantes principales).
PMC	Perceptron MultiCouche
SPI	Serial Peripheral Interface
SVM	Support Vector Machin (les machines à vecteurs de support)

**Introduction**

**générale**

## **Introduction générale**

Une machine électrique est un terme général désignant des machines utilisant des forces électromagnétiques, telles que les moteurs électriques, et les générateurs électriques. Ce sont des convertisseurs d'énergie électromécanique: un moteur électrique convertit l'énergie électrique en énergie mécanique, tandis qu'un générateur électrique convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.

D'autre part, les moteurs électriques sont les plus largement utilisés et considérés la force motrice de plusieurs applications industrielles, qui consomment environ 60% puissance mondiale. Répartis en deux catégories selon la nature de la tension d'alimentation : moteurs à courant alternatif et moteurs à courant continu.[19]

Les moteurs à courant continu sont encore utilisés, il nécessite une vitesse d'entraînement variable grâce à différentes fonctionnalités spécifiques à ces moteurs. Parmi eux, leur couple de démarrage important et la possibilité changer de vitesse sur une large plage.

Selon le mode d'excitation, il y a plusieurs types de moteurs à courant continu parmi lesquels: le moteur à excitation série, à excitation shunt, à excitation composée et à excitation séparée, ce dernier est le type qui sera étudié dans ce travail. Il faut noter que ce moteur ne peut pas être branché directement aux réseaux électriques de distribution parce qu'il y a une différence entre la nature de source d'alimentation et la nature d'alimentation de récepteur.[19]

Avec le développement technologique de l'industrie des semi-conducteurs les circuits d'électroniques de puissance, la variation de vitesse et la régulation du couple sont devenues précises, simples et onéreuses pour des performances élevées.

Dans notre mémoire, nous avons procédé à étudier la méthode de commande d'un moteur à courant continu à excitation séparé par un convertisseur statique dite redresseur commandé ce travail est divisé en trois chapitres:

- ❖ Le premier chapitre nous allons présenter l'état de l'art de notre système en commence par présentation les différents composants utilisés dans les convertisseurs statiques. Ensuite nous avons cité quelques types des redresseurs commandés et non commandés, en donnant les équations qui permettent de calculer la valeur efficace,

moyenne. Par la suite, nous avons fait une étude générale de la machine à courant continu, avec une explication brève de son principe de fonctionnement. Nous avons présenté les différents modes d'excitation de cette machine.

- ❖ Le second chapitre est consacré à la modélisation de notre système (chaque modèle indépendamment). Premièrement la modélisation du redresseur à MLI, puis le modèle mathématique de la machine à courant continu sur les axes  $d, q$ , enfin la modélisation de moteur à courant continu à excitation séparée.
- ❖ Le dernier chapitre illustre la simulation numérique du système dans l'environnement *MATLAB /SIMULINK*, ainsi que la description et la discussion des résultats obtenus.

Finalement, une conclusion générale résumera tous les résultats obtenus dans ce présent travail.

**Chapitre I :**

**L'état De**

**L'art Du**

**Systeme**

## **I.1 Introduction**

Entre l'électrotechnique et l'électronique s'est développée une nouvelle technique, l'électronique de puissance. La mise au point de semi-conducteurs, diodes, thyristors et transistors au silicium, permettant le contrôle de courants importants a donné un essor considérable à cette nouvelle technique, appelée aussi électronique des courants forts.[18]

En électronique des courants forts, la notion principale dans toute transformation devient celle de rendement. Il faut alors travailler en commutation ; le composant de base est le semi-conducteur de puissance fonctionnant en interrupteur.

Ce chapitre est consacré à l'état de l'art du système, cette dernière association est la MCC à excitation séparée et des différents types de convertisseurs AC/DC.

## **I.2 Les Semi-conducteurs**

Les redresseurs permettent de convertir une alimentation alternative en continue. La tension et la puissance de sortie peuvent être contrôlées par les composants de puissance utilisés (Thyristors).

On peut grouper les composants utilisés dans les convertisseurs statiques AC-DC en deux catégories :

- Les diodes
- Les thyristors (Silicon-Controlled Rectifier : SCR) [1]

### **I.2.1 Les diodes**

La diode est l'élément de base utilisé dans les convertisseurs AC/DC non commandés, (ni à la fermeture ni à l'ouverture). Elle n'est pas réversible en tension et ne supporte qu'une tension anode-cathode négative ( $V_{AK} < 0$ ) à l'état bloqué. Elle n'est pas réversible en courant et ne supporte qu'un courant dans le sens anode-cathode positif à l'état passant ( $I_{AK} > 0$ ). [1]

La diode est représentée de la façon suivante:

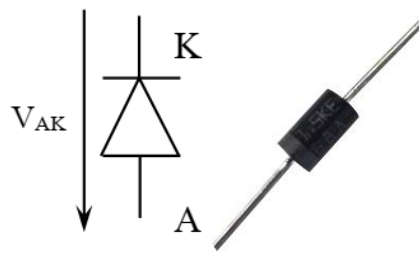


Figure I. 1. Symbole d'une diode.

### I.2.1.1 Les caractéristiques statiques d'une diode

Les critères principaux de choix d'une diode sont :

- ✓  $I_o$  le courant direct moyen.
- ✓  $VRRM$  la tension inverse de crête répétitive.
- ✓ Le type de boîtier.

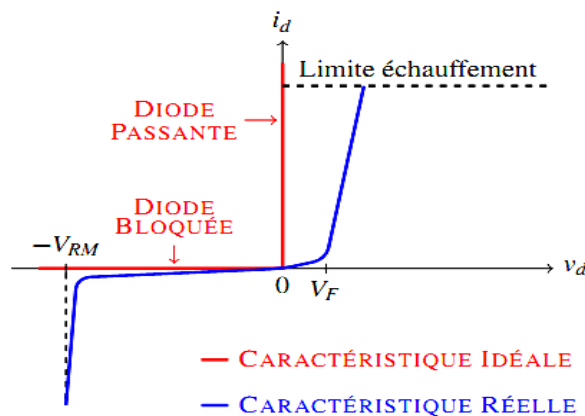


Figure I. 2. Caractéristiques statiques d'une diode [2].

### I.2.2 Les thyristors

Le thyristor est un interrupteur statique, unidirectionnel en courant, bidirectionnel en tension, à l'état solide constitué de quatre couches, alternativement dopées N et P, commandé à la ouverture. Le thyristor est un élément commandé en courant. Il est composé de quatre couches PNPN formant trois jonctions  $J_a$ ,  $J_c$  et  $J_k$  . Les symboles d'un thyristor sont donnés les suivants : [1]

### I.2.3. Symbole

Le thyristor est un dispositif semi-conducteur formé de quatre couches de dopages alternés:

- La couche de cathode de type N, elle est reliée par métallisation à l'électrode de cathode.
- La couche de commande de type P, elle est reliée à l'électrode de gâchette G.
- La couche de blocage de type N.
- La couche d'anode de type P, elle est reliée par métallisation à l'électrode d'anode A

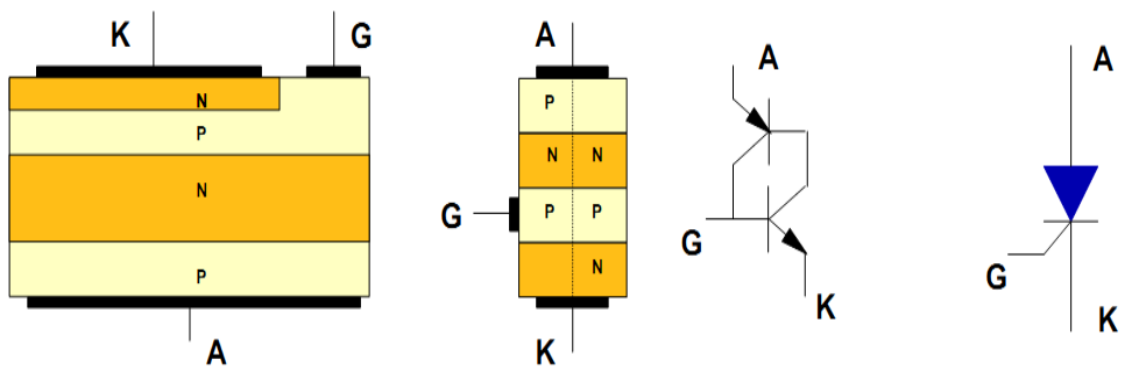


Figure I. 3. Symboles d'un thyristor [2].

#### I.2.3.1 Caractéristiques statiques d'un thyristor

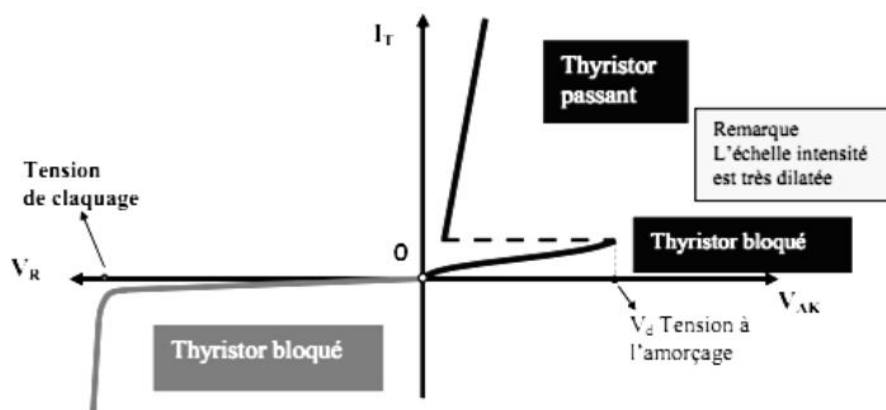


Figure I. 4. Caractéristiques statiques d'un thyristor [1].

Les critères principaux de choix d'un thyristor sont :

- $I_0$  le courant direct moyen à l'état passant.

- IT (RMS) le courant efficace à l'état passant.
- VRRM la tension inverse de crête répétitive.
- VDRM la tension directe de crête répétitive à l'état bloqué.
- Les temps d'amorçage et de désamorçage.

### I.3 Définition d'un redresseur

Les redresseurs sont les convertisseurs de l'électronique de puissance qui assurent la conversion alternatif/continu (AC/DC). Ils sont alimentés par une source de tension alternative.

Ils permettent d'alimenter en courant continu le récepteur branché à leur sortie. Le classement des redresseurs dépend essentiellement de la nature de la source génératrice : tension alternative monophasée ou triphasée, un type de redresseur : non commandé (à diodes) ou commandé (à thyristors) et de la commande des thyristors : l'angle de retard à l'amorçage  $\delta$  par rapport à la commutation naturelle du redresseur à diodes. [3]

#### I.3.1 Les Redresseurs non commandé

##### I.3.1.1 Le redresseur monophasé simple alternance

Le circuit de principe est donné sur la figure 1.5

#### a) Fonctionnement :

Dans le circuit de la Figure 1.5 la diode est bloquée lorsque  $i_s$  est négatif, et passante lorsque  $i_s$  est positif : le courant  $i_s$  est redressé.

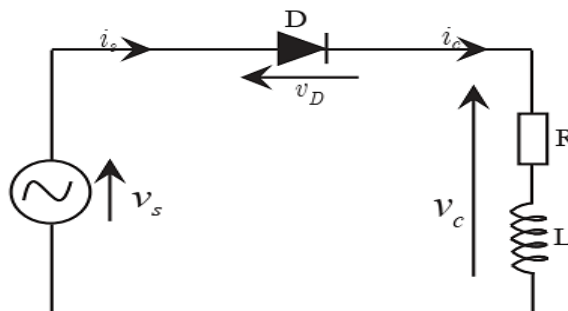


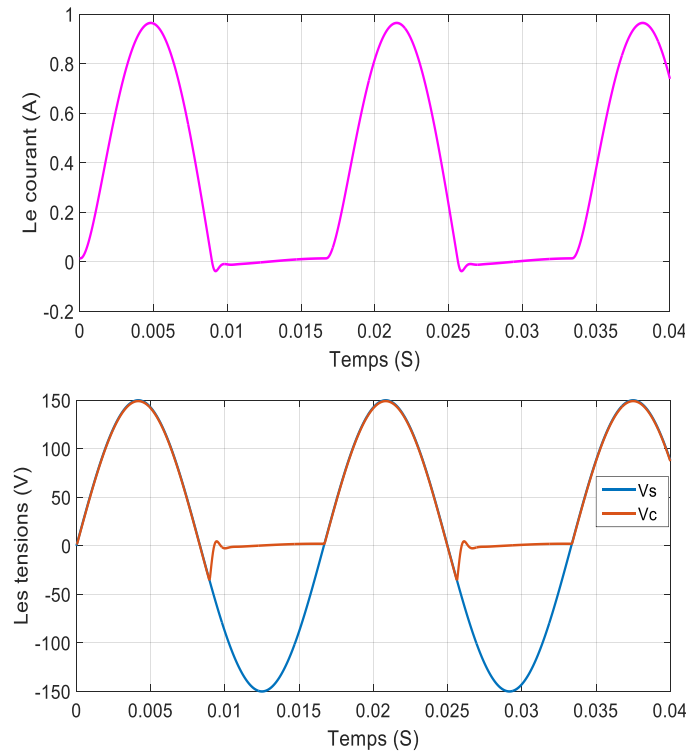
Figure I. 5. Redresseur monophasé simple alternance.

**b) Les valeurs de simulation :**

La tension :  $v = 150V$

La résistance :  $R = 150 \Omega$

L'inductance :  $L = 0.1 H$



**Figure I. 6.** Allures des tensions et de courant de la Redresseuse monophasée simple alternance.

**I.3.1.2 Le redresseur monophasée double alternance**

Le circuit de principe est donné sur la Figure 1.7

**a) Fonctionnement :**

Le pont de Graëtz est constitué de 4 diodes. Dans l'étude de ce chapitre, les diodes sont supposées parfaites et donc assimilées à des interrupteurs. Les quatre diodes doivent avoir les mêmes caractéristiques. Pour une tension d'entrée  $v_e = v_{eMax} \sin(\omega t)$ , la tension aux bornes de R est :  $v_s = v_{sMax} \sin(\omega t)$  avec

$v_s = R i_s v_{s\_Max} = v_{E\_Max}$  (Diodes parfaits) et  $\omega t = 2\pi$ . La période de  $v_s$  est égale à la moitié de la période de  $v_e$ .

- Pendant l'alternance positive les diodes  $D1$  et  $D4$  conduisent et  $v_s = v_e$ .
- Pendant l'alternance négative les diodes  $D3$  et  $D2$  conduisent et  $v_s = -v_e$  (charge résistive). [4]

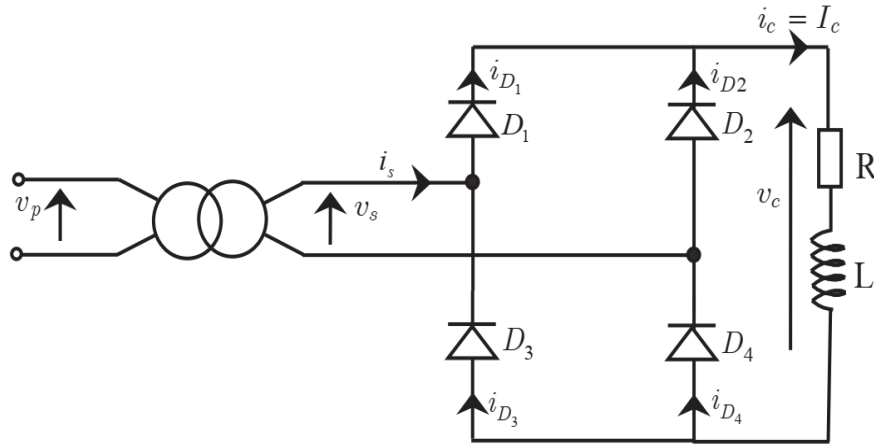
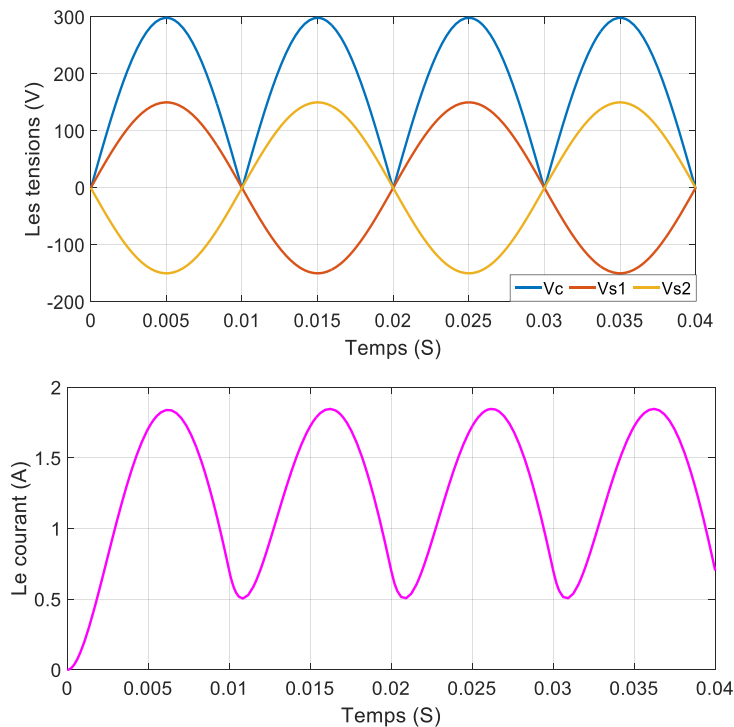


Figure I. 7. Redresseur monophasé double alternance.

b) Les valeurs de simulation :



La tension :  $v_{s1} = v_{s2} = 150V$

La résistance :  $R = 150 \Omega$

L'inductance :  $L = 0.2 H$

Figure I. 8. Allures des tensions et de courant de la Redresseuse monophasée double alternance.

### I.3.1.3 Les redresseurs triphasés

La Figure 1.9 représente le redresseur PD3. Seul le secondaire du transformateur est représenté.

Ce montage est à comparer au pont de Graëtz en monophasé et à ce titre il peut également être appelé triphasé double alternance.[4]

#### a) Fonctionnement

Le secondaire du transformateur est couplé en étoile et connecté à deux groupes de diodes : un commutateur à cathode commune (D1, D2, D3) et un commutateur à anode commune (D4, D5, D6).

L'existence d'un courant continu dans la charge exige la conduction de deux diodes à tout instant, une de chaque commutateur.[4]

La règle pour déterminer les diodes passantes est la même que pour le montage P3 :

- pour le commutateur à cathode commune, la diode dont l'anode est au potentiel le plus élevé conduit, d'où la dénomination « + positif » ;
- pour le commutateur à anode commune, la diode dont la cathode est au potentiel négatif le plus faible conduit, d'où la dénomination « - négatif ».
- lorsque  $V_{aN} > V_{cN} > V_{bN}$ , D1 et D5 conduisent :  $V_c = V_{aN} - V_{bN}$
- lorsque  $V_{aN} > V_{bN} > V_{cN}$ , D1 et D6 conduisent :  $V_c = V_{aN} - V_{cN}$
- lorsque  $V_{bN} > V_{aN} > V_{cN}$ , D2 et D5 conduisent :  $V_c = V_{bN} - V_{cN}$
- etc ...

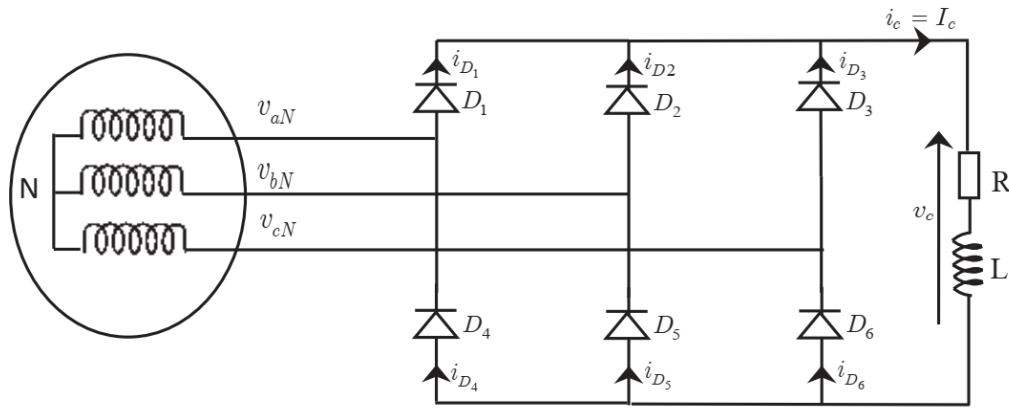
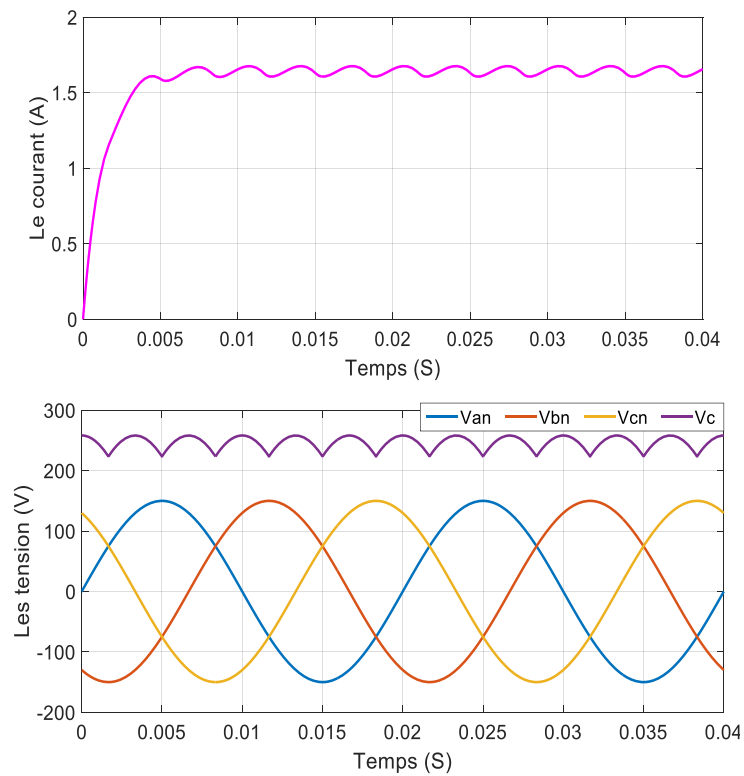


Figure I. 9. Redresseur triphasé.

b) Les valeurs de simulation :



La tension :  $v_{aN} \angle 0^\circ = v_{bN} \angle -120^\circ = v_{cN} \angle -240^\circ = 150V$

La résistance :  $R = 150$

$\Omega$

L'inductance :  $L = 0.2 \text{ H}$

Figure I. 10. Allures des tensions et de courant du Redresseur triphasé.

### I.3.2 Les redresseurs commandés :

Un montage redresseur commandé permet d'obtenir une tension continue réglable à partir d'une tension alternative sinusoïdale. L'utilisation des composants tels que les thyristors permet de réaliser des redresseurs dont la tension moyenne de sortie peut varier en fonction de l'angle de retard à l'amorçage. [4]

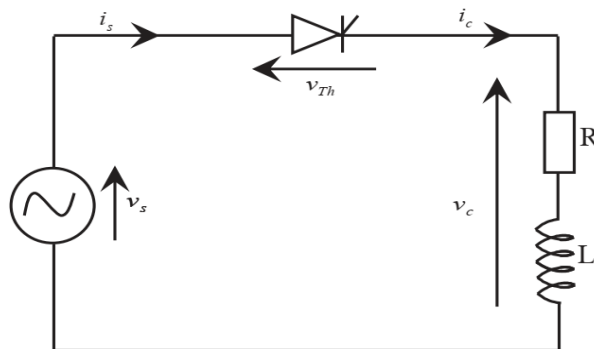
#### I.3.2.1 Les redresseurs monophasés:

Les diodes sont remplacées par des thyristors pour commander la puissance voulue aux bornes du récepteur.

##### I.3.2.1.1 Le redresseur monophasé simple alternance:

###### a) Fonctionnement :

On amorce le thyristor à  $\omega t_1 = \psi$ , la conduction du thyristor continue jusqu'à  $\theta_1$  (instant de blocage) où le courant s'annule. Donc sur une période de  $2\pi$ , la conduction est de  $\psi$  à  $\theta_1$ .



**Figure I. 11.** Redresseur commandé monophasé simple alternance.

###### b) Les paramètres de simulation :

**La tension :**  $v_s = 150V$  ; **La résistance :**  $R = 150 \Omega$ ; **L'inductance :**  $L = 0.2 H$  ; **L'angle d'amorçage**  $\alpha = 0.005$

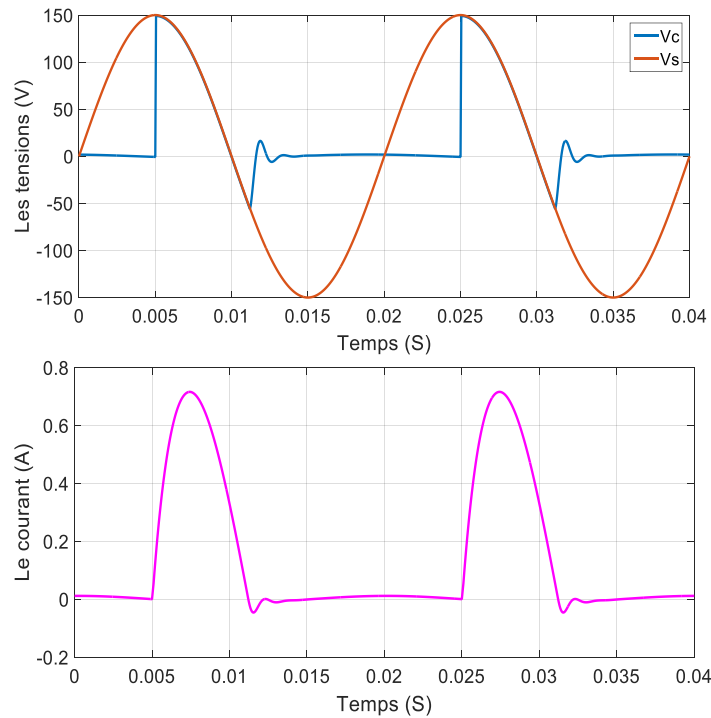


Figure I. 12. Allures des tensions et de courant du Redresseur monophasée simple alternance (commandé).

### I.3.2.2 Les redresseurs triphasés commandés

#### a) Fonctionnement :

Le pont PD3 à 6 thyristors est alimenté par une source triphasée sinusoïdale équilibrée. Les thyristors fonctionnent avec un retard à l'amorçage d'angle  $\alpha$ . Il y a en permanence et un seul thyristor conducteur parmi T1, T2 et T3 d'une part, et un et un seul parmi T4, T5 et T6.

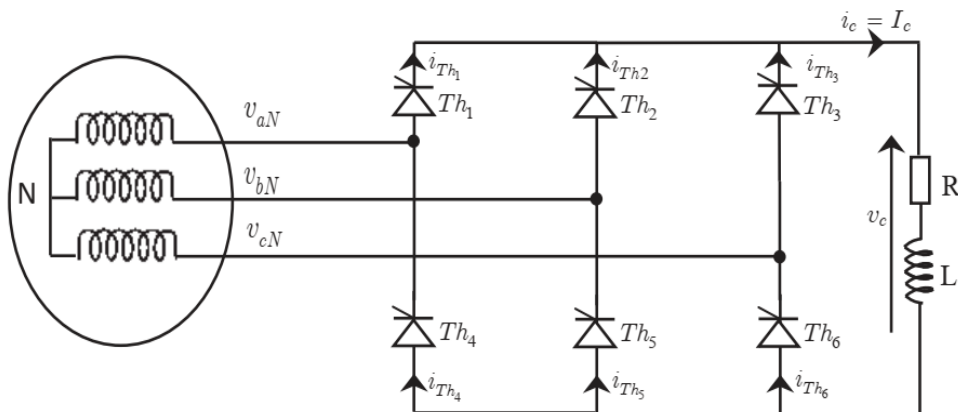
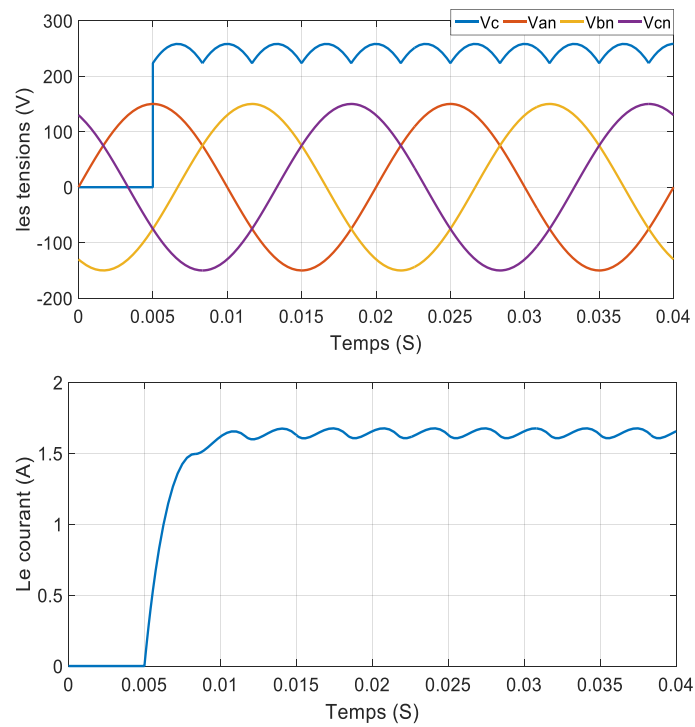


Figure I. 13. Redresseur triphasé (commande).

b) Les valeurs de simulation:



La tension :  $V_{aN} \angle 0^\circ = V_{bN} \angle -120^\circ = V_{cN} \angle -240^\circ = 150V$

La résistance :  $R = 150$

$\Omega$  L'inductance :  $L = 0.2 H$

Figure I. 14. Allures des tensions et de courant Redresseur triphasé (commande).

## I.4 Les redresseurs à MLI

Dans le souci de fournir aux consommateurs une bonne qualité de l'énergie électrique, même dans les conditions de fonctionnement les plus perturbées, les redresseurs à MLI sont proposés comme solution avancée de dépollution.

En effet, les redresseurs à MLI peuvent s'adapter aux évolutions de la charge et du réseau électrique et ceci sans toucher aux installations du fournisseur d'énergie et du consommateur.

### I.4.1 Définition

C'est un convertisseur à modulation de largeur d'impulsion utilisant des composants à commutation forcée tel que les IGBT ou les thyristors GTO. L'emploi de cette technique permet non seulement une réduction de la perturbation harmonique, en prélèvement des courants d'allure sinusoïdale mais aussi un contrôle des puissances actives et réactives. On distingue deux structures : courant et la structure tension.

### I.4.2 Structure générale du redresseur à MLI

Le redresseur à MLI triphasé est constitué de trois bras. Les interrupteurs bicommandables à deux segments sont des interrupteurs entièrement contrôlables (ouverture et fermeture) remplacent les diodes du montage en pont de Graëtz [3]. Ces dispositifs offrent les avantages suivants :

- a. le courant et la tension peuvent être modulés (modulation de largeur d'impulsions ou MLI),  
ce qui produit moins de perturbations harmoniques.
- b. le facteur de puissance peut être contrôlé.
- c. le redresseur peut être considéré comme source de tension ou source de courant.

#### I.4.2.1 Structure de courant

La structure dite "courant" ou la source continue se comporte comme un générateur du courant et la source alternative comme un générateur de tension. Son schéma de principe est représenté sur les figures (1.15). Les composants de puissance disponible (**IGBT et GTO**) étant unidirectionnels en courant, le courant  $i_{ch}$  sera également. La réversibilité en puissance

s'effectue par l'inversion de la tension redressée  $U_{ch}$ . Le contrôle de la puissance réactive est obtenu par action sur la phase du courant réseau par apport à la tension [5]

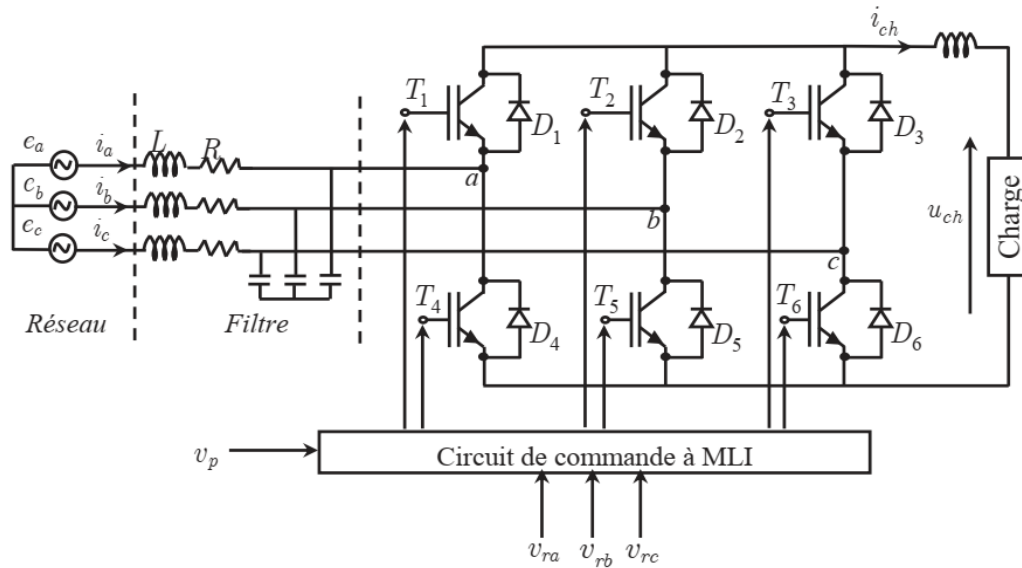


Figure I. 15. Redresseur à MLI triphasé de structure courant.

### I.4.2.2 Structure de tension

La structure dite "tension" ou la source continue se comporte un générateur du tension et la source alternative comme un générateur de courant.[4]

Elle est présentée sur les figures (1.16) la tension étant unidirectionnelle, la réversibilité de la puissance active est assurée par action indirecte sur la phase du fondamentale du courant réseau [4].

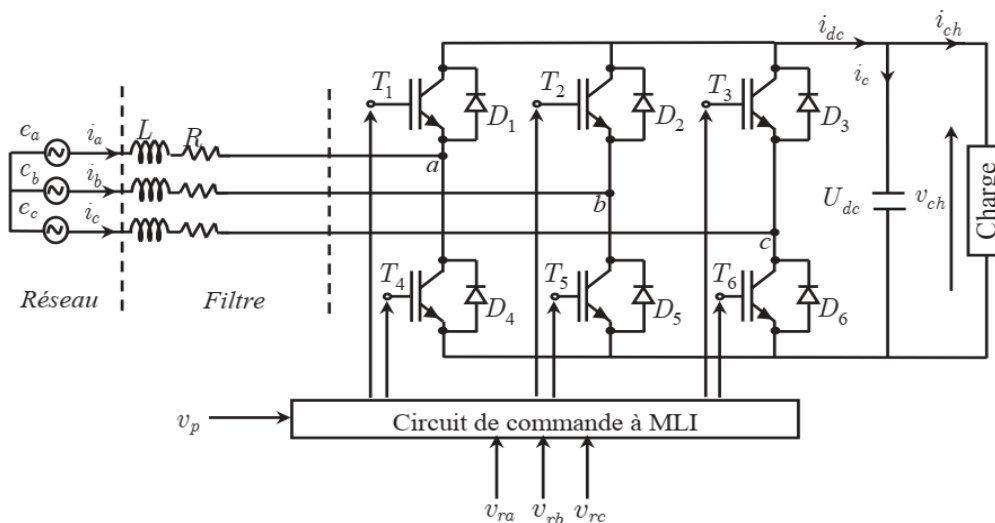


Figure I. 16. Redresseur à MLI triphasé de structure tension.

### I.4.3 Principe de fonctionnement des redresseurs à MLI

Le redresseur de tension fonctionne en gardant la tension du bus continu à une valeur de référence désirée, en utilisant une commande en boucle fermée, comme montré dans la figure (1.14). Pour accomplir cette tâche, la tension du bus continu  $U_{dc}$  est mesurée et comparée avec une référence  $U^*_{dc}$ , le signal d'erreur produit de cette comparaison est employé pour commuter les six interrupteurs du redresseur à la fermeture et à l'ouverture. De cette façon, la puissance peut s'écouler dans les deux sens selon les conditions sur la tension du bus continu  $U_{dc}$  mesurée aux bornes du condensateur. [6]

Quand le courant  $i_{ch}$  est positif (fonctionnement redresseur), le condensateur C'est déchargé, et le signal d'erreur demande au bloc de commande de plus de puissance de la source alternative. Le bloc de commande prend la puissance de la source alternative en produisant un signal MLI approprié pour les six interrupteurs. De cette façon, un écoulement plus de courant de la source alternative au côté continu, et la tension de condensateur est récupérée. Inversement, quand  $i_{ch}$  devient négatif (fonctionnement onduleur), le condensateur C est surchargé, et le signal d'erreur demande au block de commande pour décharger le condensateur, et la puissance retourne à la source alternative.[6]

La commande MLI non seulement peut contrôler la puissance active, mais également la puissance réactive, ce type du redresseur permet la correction du facteur de puissance. En outre, les formes d'onde des courants de la source peuvent être maintenu comme presque sinusoïdales, ce qui réduit la distorsion de la source [6]

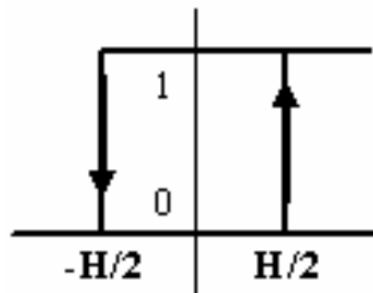
### I.4.4 Les applications modernes du redresseur à MLI

L'étude du redresseur à MLI montre plusieurs avantages par rapport aux autres redresseurs classiques (à diode et à thyristors), qu'il est possible de fonctionner dans les quatre quadrants pour la commande des machines. Cette structure permet donc tous les types de transfert d'énergie possibles, alimenter une charge (passive ou active) en continu à partir d'un réseau alternatif, le courant prélevé sur ce réseau étant sinusoïdal. On peut donc, avec un redresseur MLI, obtenir un facteur de puissance très proche de l'unité. On peut aussi régler, par le contrôle, l'énergie réactive absorbée ou fournie [3].

## I.4.5 Les techniques de commande MLI :

### I.4.5.1 MLI à Bande d'hystérésis

La méthode de la bande d'hystérésis permet la commutation des interrupteurs du redresseur lorsque l'erreur entre le signal et sa consigne excède une amplitude fixée. Cette amplitude est communément appelée fourchette ou bande d'hystérésis cette technique ne demande qu'un comparateur à hystérésis par phase. [7]



**Figure I. 17.** Principe de fonctionnement de Modulateur MLI à bande d'hystérésis.

Le comparateur à hystérésis fonctionne selon le principe expliqué dans la Figure I.17, l'interrupteur s'ouvre si l'erreur devient inférieure à  $-H/2$ , il se ferme si cette dernière est supérieure à  $+H/2$ , où  $H$  représente la fourchette (ou largeur) d'hystérésis. Si l'erreur est maintenant comprise entre  $-H/2$  et  $+H/2$  (c à d, qu'elle varie à l'intérieur de la fourchette d'hystérésis), l'interrupteur ne commute pas. [7]

### I.4.5.2 MLI à échantillonnage périodique

La méthode d'échantillonnage périodique permet aux semi-conducteurs constituant le filtre actif de commuter durant les transitions d'une horloge à onde carrée et à fréquence fixe (fréquence d'échantillonnage). Comme illustré à la Figure 1.18, ce type de commande est très simple à implanter dans la mesure où il ne nécessite qu'un comparateur et une bascule D type par phase. L'avantage principal de cette méthode est que le temps minimal entre les commutations est limité par la période d'échantillonnage de l'horloge. Cependant, la fréquence de commutation actuelle n'est pas clairement définie. [8]

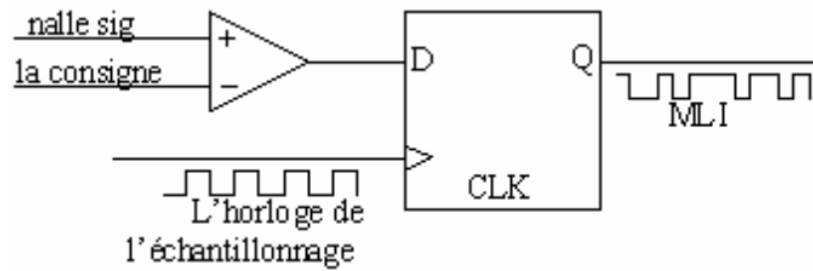


Figure I. 18. Modulateur MLI à échantillonnage périodique.

### I.4.5.3 MLI à porteuse triangulaire

La méthode de la MLI à porteuse triangulaire, compare l'erreur entre le signal (courant ou tension) et sa consigne avec une onde triangulaire (porteuse) d'une amplitude et d'une fréquence fixées. L'erreur passe par un correcteur avant d'être comparée avec la porteuse triangulaire. [6]

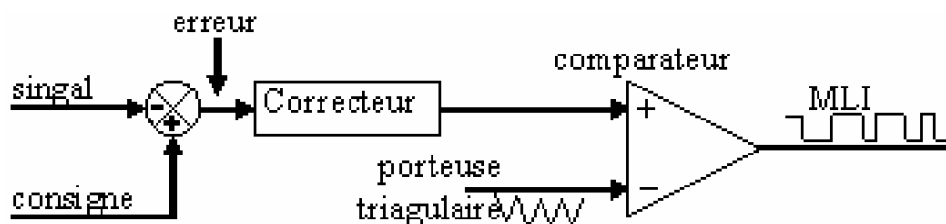


Figure I. 19. Modulateur MLI à porteuse triangulaire.

### I.4.5.4 MLI vectorielle

Dans la MLI vectorielle les vecteurs à appliquer et les temps d'application de ces vecteurs sont calculés analytiquement à travers des équations mathématiques. Chacun des états possibles du convertisseur est représenté par un vecteur de tension. L'ensemble de ces vecteurs forme le diagramme vectoriel des tensions du convertisseur.

La modulation vectorielle diffère, entre d'autres techniques par le fait que les signaux de commandes sont élaborés en tenant compte de l'état des trois bras de redresseur en même temps. [9]

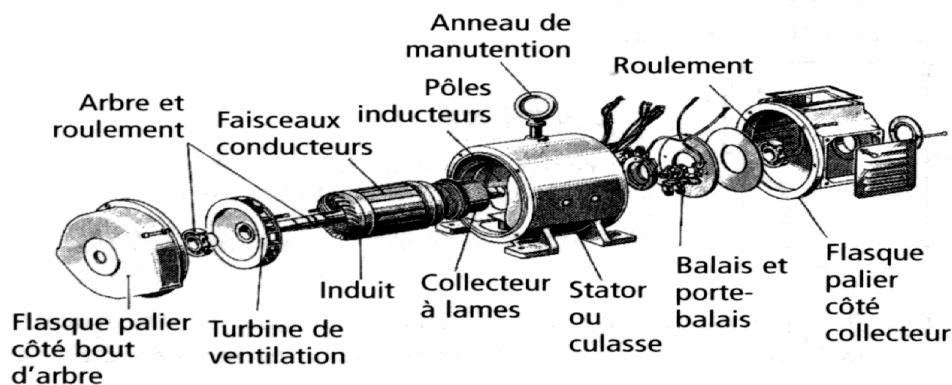
## I.5. Généralités sur les moteurs à courant continu

Les moteurs à courant continu sont des machines qui transforment l'énergie électrique qu'ils reçoivent en énergie mécanique. La construction des moteurs est identique à celle des génératrices, de sorte qu'une machine à courant continu peut servir indifféremment comme moteur ou comme génératrice.

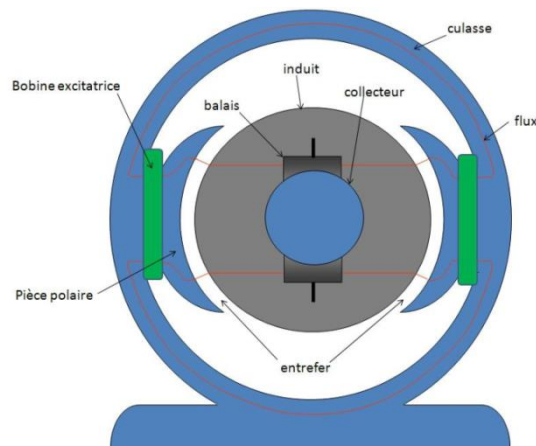
L'usage des moteurs à courant continu est plutôt restreint, car la distribution se fait à courant alternatif. Cependant, pour certaines applications il est parfois avantageux d'utiliser des moteurs à courant continu alimentés par des convertisseurs qui transforment le courant alternatif en courant continu. La supériorité de ces moteurs réside dans le fait qu'ils se prêtent facilement à un contrôle souple, continu et presque instantané de leur vitesse [10].

### I.5.1 Constitution de la machine à courant continu

La machine à courant continu est réversible. La même machine peut fonctionner en moteur ou en génératrice, c'est-à-dire que la constitution d'une génératrice est identique à celle du moteur. La machine à courant continu comporte trois éléments essentiels **Figure 1.20** et **1.21**:



**Figure I. 20.** Les composants de la machine à courant continu [10].



**Figure I. 21.** Les parties principales de la machine à courant continu.

### I.5.2 L'inducteur

C'est la partie fixe du moteur, dont la fonction consiste à créer le champ magnétique d'excitation. Il est constitué, soit par un aimant permanent, soit par un électro-aimant dont les enroulements sont parcourus par le courant continu d'excitation. Les bobines sont montées à l'intérieur d'une culasse qui est généralement en fonte d'acier, les pièces polaires sont formées de tôle d'acier doux. Les bobines excitatrices sont alimentées en courant continu, ce courant est le courant d'excitation Figure1.22.



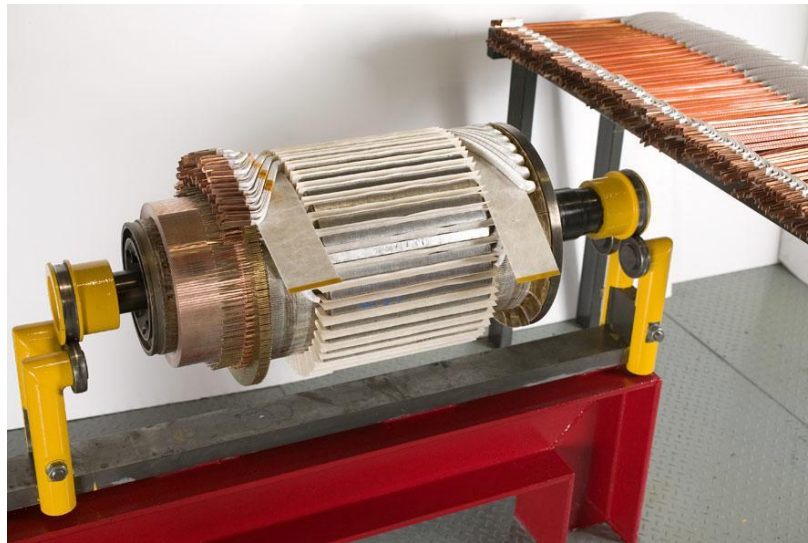
**Figure I. 22.** Inducteur d'une machine à courant continu [10].

### I.5.3 L'induit

L'induit est un corps cylindrique tournant dans l'espace situé entre les pôles et comprend:

- Une armature dentée de l'induit ;
- Un enroulement placé sur cette armature (de type ondulé ou bien imbriqué) ;

- Un collecteur.



**Figure I. 23.** Induit d'une machine à courant continu [10].

#### **I.5.4 Le collecteur**

Il est également mobile, dont le rôle est de transformer le courant induit alternatif en courant unidirectionnel (continu). Il est constitué de lames de cuivres isolés entre elles par des feuilles de mica. Il est monté sur l'arbre mais il est isolé de ce dernier Figure 1.24



**Figure I. 24.** Collecteur d'une machine à courant continu [10].

## **I-6 Principe de réversibilité**

Selon la nature de la conversion énergétique réalisée, deux types de machines sont distingués.

### **I.6.1 La génératrice à courant continu**

Elle transforme une énergie mécanique en énergie électrique sous forme de courant continu.

### **I.6.2 Le moteur à courant continu**

Il transforme une énergie électrique de forme continue en une énergie mécanique. La machine à courant continu possède la propriété de réversibilité. Elle peut en effet fonctionner indifféremment en génératrice ou en moteur. [11]

## **I.7 Fonctionnement en mode génératrice**

L'inducteur est alimenté par une tension continue et produit un champ magnétique constant. L'induit est entraîné en rotation par un moteur. Il est le siège de variation de flux au travers de spires qui le constituent. Ils en résultent la création d'une f.é.m. alternative qui est redressée et transmise au circuit extérieur par l'ensemble collecteur-balais. [10]

## **I. 8 Fonctionnement du moteur à courant continu**

Un conducteur placé dans un champ magnétique et parcouru par un courant est soumis à une force mécanique  $F$  dite « force de Laplace » dont le sens est déterminé par la direction du champ et celle du courant. C'est sur ce principe que sont basés les moteurs électriques. En tenant compte de ce qui est écrit au début et en se rapportant à la Figure 1.25, il suffit d'appliquer la règle des trois doigts de la main droite pour trouver le sens de la force qui agit sur les conducteurs et donner de ce fait le sens de rotation du moteur. [12]

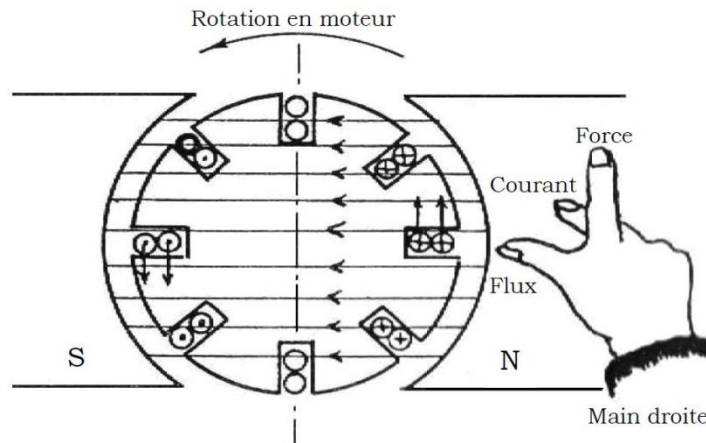


Figure I. 25. la règle de la main droite [12].

Voyons comment il est possible de créer une force mécanique sur un conducteur parcouru par un courant électrique et logé dans un champ magnétique :

Si le conducteur est maintenant parcouru par un courant  $I$ , la loi de Laplace nous donne :

$$d\vec{F} = I d\vec{x} \vec{B} \tag{I.1}$$

$$d\vec{F} = B \cdot I \cdot dx \cdot \vec{xz} = B \cdot I \cdot dx (-\vec{y}) \tag{I.2}$$

$$d\vec{F} = -B \cdot I \cdot dx \cdot \vec{y} \tag{I.3}$$

On remarque que le mouvement a lieu dans le sens contraire au précédent - . C'est ce que l'on traduit souvent par l'expression de f.e.m « s'opposant » au déplacement du conducteur. [12]

### I.9 Modes d'excitation

Les circuits de l'induit et de l'inducteur peuvent être connectés à la source électrique selon 4 modes différents. Ce sont :

### I.9.1 L'excitation séparée (Notre choix)

Est la solution qui donne la plus grande souplesse au niveau du réglage et ce mode permet en effet de contrôler de façon complètement séparée  $I$  et  $\Phi$ , mais elle suppose qu'on dispose de deux sources de tension réglables séparément pour les circuits induit et inducteur.

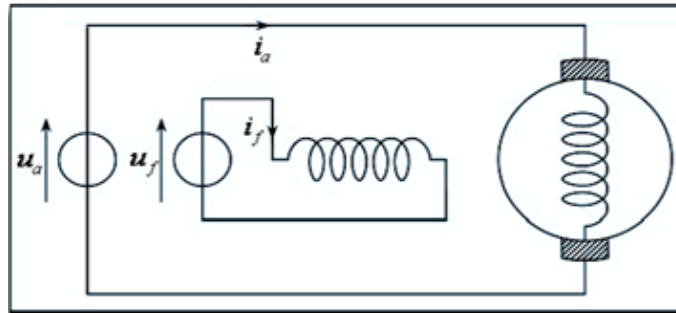


Figure I. 26. Machine à excitation séparée [13].

### I.9.2 L'excitation série

Les machines à excitation série sont équipées d'un enroulement à faible nombre de spires de forte section connecté en série avec l'induit et parcouru par un courant d'excitation égal au courant d'induit. Elle a deux intérêts :

- Elle confère à la machine un comportement particulièrement bien adapté aux problèmes de la traction : lorsque la machine est à l'arrêt, la f.c.e.m est nulle, le courant induit et le flux sont donc maximaux, d'où un démarrage facilité.

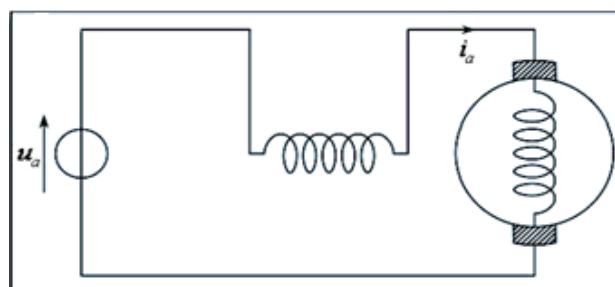


Figure I. 27. Machine à excitation série [13].

### I.9.3 L'excitation shunt ou parallèle

Est utilisée précisément lorsque le réglage séparé des tensions induit et inducteur n'est pas possible.

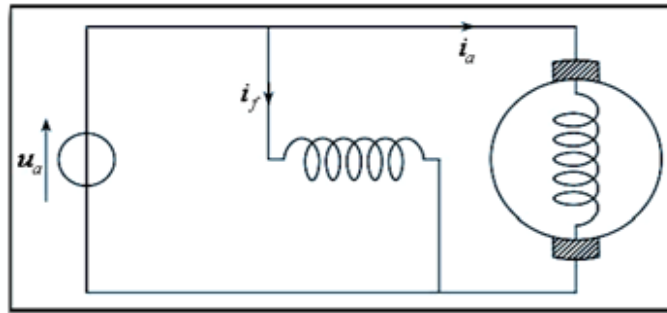


Figure I. 28. Machine à excitation shunt [13].

### I.9.4 L'excitation composée ou compound

Constitue une recherche de compromis entre les propriétés de l'excitation shunt et de l'excitation série. De plus, la composition peut être mise en œuvre soit de façon additive soit de façon soustractive, ce qui permet en particulier de corriger l'effet de la réaction d'induit. Cette machine est plus complexe, elle nécessite deux enroulements d'excitation.

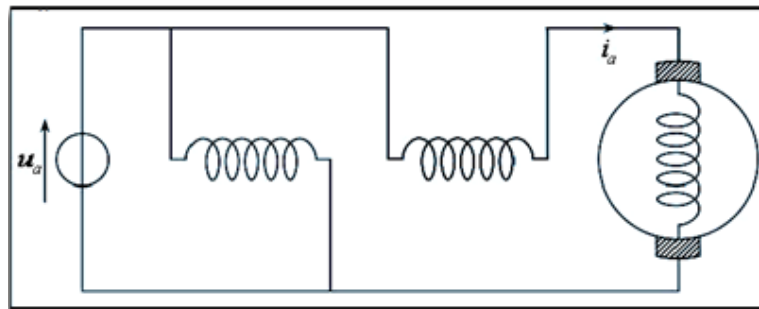


Figure I. 29. Machine à excitation composé [13]

### I.10 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons introduit des généralités sur la machine à courant continu, définition, sa construction, principe de fonctionnement, ainsi que quelques notions typique. Comme nous avons présenté le redresseur, son principe de fonctionnement, différents types de structure, topologies, ses domaines d'application et ses avantages.

En fin de ce chapitre, nous avons précisé notre choix du type de la machine donc c'est la machine à courant continu à excitation séparé.

# **Chapitre II :**

# **Modélisation**

# **Du Système**

## II.1 Introduction

La modélisation des convertisseurs présente un souci constant des électrotechniciens. Divers travaux ont été menés dans ce domaine. Nous pouvons distinguer plusieurs approches tendant à représenter soit l'évolution fine des grandeurs électriques, soit leurs valeurs moyennes. Nous avons opté pour une méthode de modélisation à topologie variable, celle-ci consiste à considérer les semi-conducteurs comme des interrupteurs idéaux, possédant deux états possibles: fermé et ouvert.

L'étape de modélisation est très importante. Il s'agit de la description mathématique de système à l'aide des équations différentielles ou des fonctions de transfert [14].

L'objet de ce chapitre est de présenter la modèle mathématique d'un machine à courant continu a excitation composé et les différentes méthodes des commandes du redresseur à modulation de largeur d'impulsion.

## II.2 Modélisation du redresseur à MLI

Le Figure (2.1) présente les trois étages du circuit de puissance du montage étudié ; à savoir; le réseau, le convertisseur à MLI et la charge. Chaque étage sera présenté par la suite.

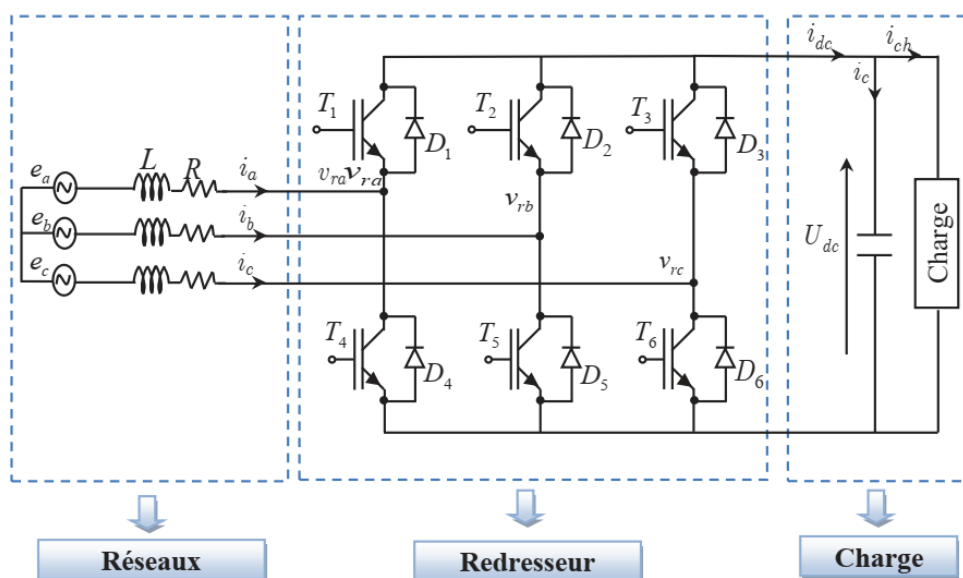


Figure II. 1. Structure du redresseur à MLI [4].

### II.2.1 Le réseau

Le réseau électrique triphasé est modélisé par une source de tension sinusoïdale triphasée :

$$\begin{cases} e_a = Em \sin(\omega t) \\ e_b = Em \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ e_c = Em \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{cases} \quad (2.1)$$

### II.2.2 Le filtre

Le filtre est modélisé par une inductance parfaite  $L$  en série avec une résistance  $R$

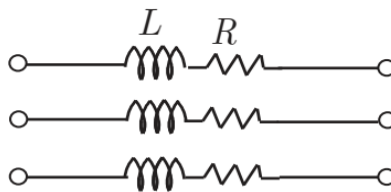


Figure II. 2. Circuit de filtre (RL).

### II.2.3 Le redresseur à MLI

En appliquant la loi des mailles au schéma du réseau électrique de la figure (3.1) on obtient :

$$\begin{cases} e_a = L \frac{di_a}{dt} + Ri_a + v_{ra} \\ e_b = L \frac{di_b}{dt} + Ri_b + v_{rb} \\ e_c = L \frac{di_c}{dt} + Ri_c + v_{rc} \end{cases} \quad (2.2)$$

Du côté redresseur, les tensions  $v_{ra}$ ,  $v_{rb}$ ,  $v_{rc}$  sont reliées avec la tension de sortie  $U_{dc}$  par :

$$\begin{cases} v_{ra} = \left[ S_a - \frac{1}{3}(S_a + S_b + S_c) \right] U_{dc} \\ v_{rb} = \left[ S_b - \frac{1}{3}(S_a + S_b + S_c) \right] U_{dc} \\ v_{rc} = \left[ S_c - \frac{1}{3}(S_a + S_b + S_c) \right] U_{dc} \end{cases} \quad (2.3)$$

Ou sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix} = \frac{U_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Le courant de sortie du redresseur est donné par :

$$i_{dc} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c \quad (2.5)$$

D ou :

$$\begin{cases} e_a = L \frac{di_a}{dt} + R i_a + \frac{2S_a - S_b - S_c}{3} U_{dc} \\ e_b = L \frac{di_b}{dt} + R i_b + \frac{2S_b - S_a - S_c}{3} U_{dc} \\ e_c = L \frac{di_c}{dt} + R i_c + \frac{2S_c - S_a - S_b}{3} U_{dc} \end{cases} \quad (2.6)$$

Ou sous forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{U_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

D'où la forme matricielle condensée :

$$[E_{abc}] = [L] \frac{d}{dt} [I_{abc}] + [R][I_{abc}] + U_{dc}[K][S_{abc}] \quad (2.8)$$

Avec :

$$[E_{abc}] = \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix}, [I_{abc}] = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}, [S_{abc}] = \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$[R] = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix}, [L] = \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix}, [K] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Et

$[E_{abc}] = [e_a \quad e_b \quad e_c]^T$ : Vecteur des tensions instantanées triphasées d'alimentation.

$[I_{abc}] = [i_a \quad i_b \quad i_c]^T$ : Vecteur des courants instantanés triphasés d'alimentation.

$[S_{abc}] = [S_a \quad S_b \quad S_c]^T$ : Vecteur des états des interrupteur du redresseur dans le repère a, b et c.

En appliquant la 2<sup>ème</sup> loi de Kirchhoff au circuit de la charge de la figure (2.1), on obtient :

$$i_{dc} = i_c + i_{ch} \quad (2.11)$$

Ou

$$i_c = i_{dc} - i_{ch} \Rightarrow C \frac{dU_{dc}}{dt} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c - \frac{U_{dc}}{R_{ch}} \quad (2.12)$$

Le modèle du redresseur dans le repère ( a, b, c ) est donné par le système d'équation suivant :

$$\begin{cases} L \frac{di_a}{dt} = e_a - Ri_a + \frac{S_b + S_c - 2S_a}{3} U_{dc} \\ L \frac{di_b}{dt} = e_b - Ri_b + \frac{S_a + S_c - 2S_b}{3} U_{dc} \\ L \frac{di_c}{dt} = e_c - Ri_c + \frac{S_a + S_b - 2S_c}{3} U_{dc} \\ C \frac{dU_{dc}}{dt} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c - \frac{U_{dc}}{R_{ch}} \end{cases} \quad (2.13)$$

D'où la forme condensée suivante :

$$\begin{cases} L \frac{di_h}{dt} = e_h - Ri_h + \left( S_h - \frac{1}{3} \sum_{k=a}^c S_k \right) \\ C \frac{dU_{dc}}{dt} = \sum_{k=a}^c S_k i_k - \frac{U_{dc}}{R_{ch}} \end{cases} \quad \text{avec } h = c, b, a \quad (2.14)$$

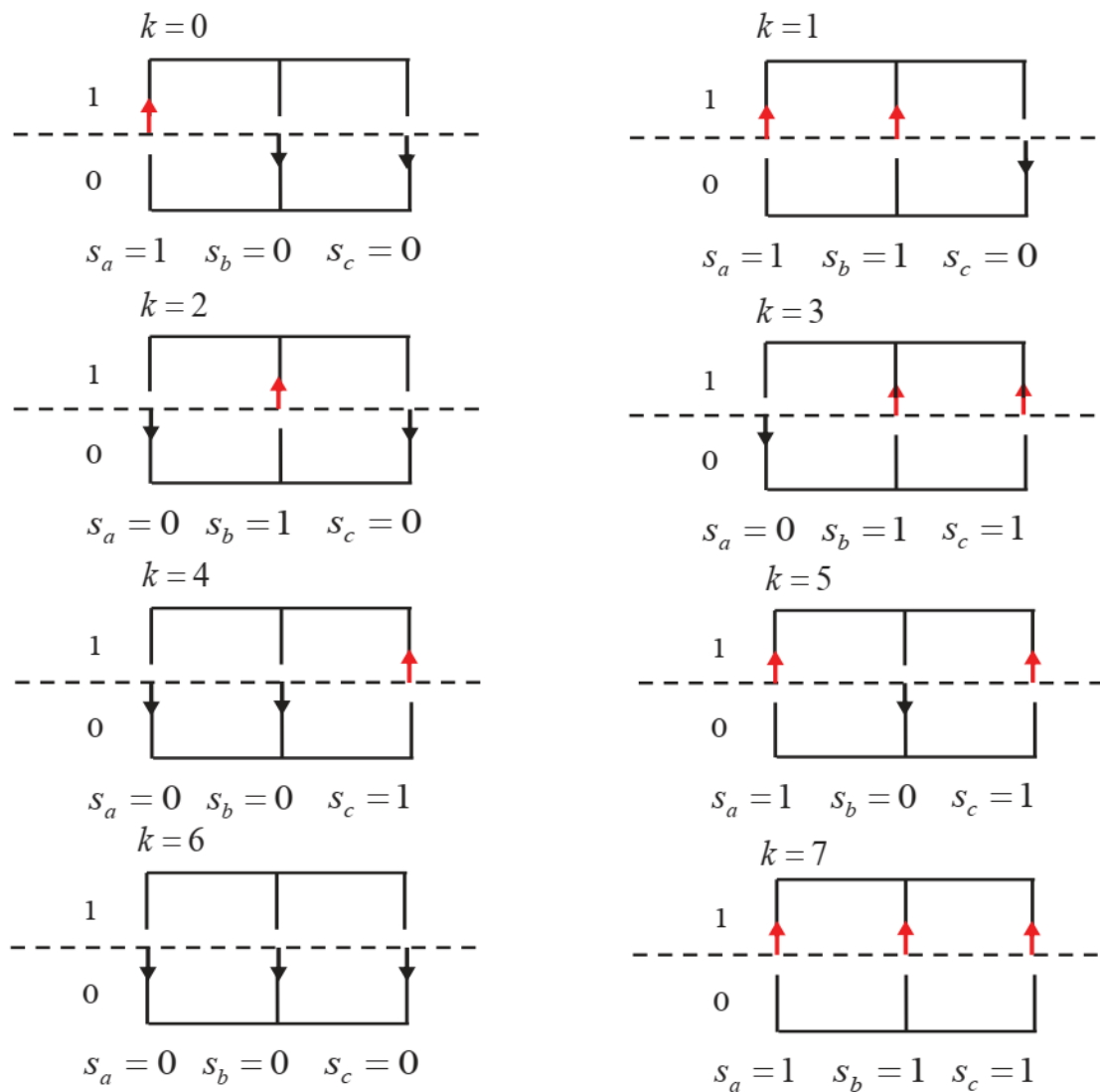
Avec

$S_j$  est l'état de l'interrupteur  $K_j$ , supposé parfait, telle que  $[j = c, b, a]$ .

-  $S_j = 1$  : si l'interrupteur en haut est fermé et l'interrupteur en bas est ouvert.

-  $S_j = 0$  : si l'interrupteur en haut est ouvert et l'interrupteur en bas est fermé.

Les schémas ci-dessous représentent toutes les configurations possibles du redresseur en fonction des états de commande ( $S_a S_b S_c$ ).



**Figure II. 3.** Différents états de commutation des interrupteurs du redresseur à MLI. [4]

Le tableau suivant résume les états de commande du redresseur ( $s_a s_b s_c$ ) ainsi que les tensions simples à l'entrée du pont, pour une tension constante du bus continu ( $U_{dc}$ ). Notons que les deux interrupteurs de chaque bras sont à commande complémentaire [15].

$k$	$s_a$	$s_b$	$s_c$	$v_{ab}$	$v_{bc}$	$v_{ca}$
0	1	0	0	$U_{dc}$	0	$-U_{dc}$
1	1	1	0	0	$U_{dc}$	$-U_{dc}$
2	0	1	0	$-U_{dc}$	$U_{dc}$	0
3	0	1	1	$-U_{dc}$	0	$U_{dc}$
4	0	0	1	0	$-U_{dc}$	$U_{dc}$
5	1	0	1	$U_{dc}$	$-U_{dc}$	0
6	0	0	0	0	0	0
7	1	1	1	0	0	0

**Tableau II. 1.** Les huit états possibles des interrupteurs [4].

### II.3. La commande à MLI

Deux techniques de commande à MLI seront étudiées dans cette section à savoir la commande MLI sinus-triangle et la commande à MLI vectorielle [4].

#### II.3.1 La commande MLI sinus-triangle

Le bloc de commande du convertisseur reçoit les tensions de référence pour les trois phases. Ces tensions sont comparées avec un signal triangulaire et, en fonction du signal d'erreur, on commande les semi-conducteurs de redresseur. Le mode de fonctionnement est très simple :

- Si  $v_{ref} > v_p$ : l'interrupteur supérieur du bras de pont conduit ;
- Si  $v_{ref} < v_p$ : l'interrupteur inférieur du bras de pont conduit ;

Où

$v_{ref}$  représente une des trois tensions de référence et  $v_p$  représente le signal triangulaire ou l'onde porteuse.

Ce type de commande est appelé commande à modulation de largeur d'impulsion ou commande **MLI** (**PWM** en anglais). Cette technique exige une commande séparée pour chaque phase de redresseur. La détermination des instants d'ouverture et de fermeture des interrupteurs est réalisée en temps réel, par une électronique de commande analogique ou numérique ou parfois hybride. La Figure (3.4) illustre le principe de base de cette technique [16].

##### II.3.1.1 Caractéristiques de la MLI sinus-triangle

Si la tension de référence est sinusoïdale, deux paramètres caractérisent la commande : l'indice de modulation  $I_m$  et le taux de modulation  $T_m$

- Indice de modulation :

$$I_m = \frac{f_p}{f_{ref}} \quad (2.15)$$

Où  $f_r$  est la fréquence de la tension de référence et  $f_p$  est celle de la porteuse

- Taux de modulation :

$$T_m = \frac{v_p}{v_{ref}} \tag{2.16}$$

Où  $v_{ref}$  est l'amplitude de la tension de référence et  $v_p$  est celle de la porteuse.

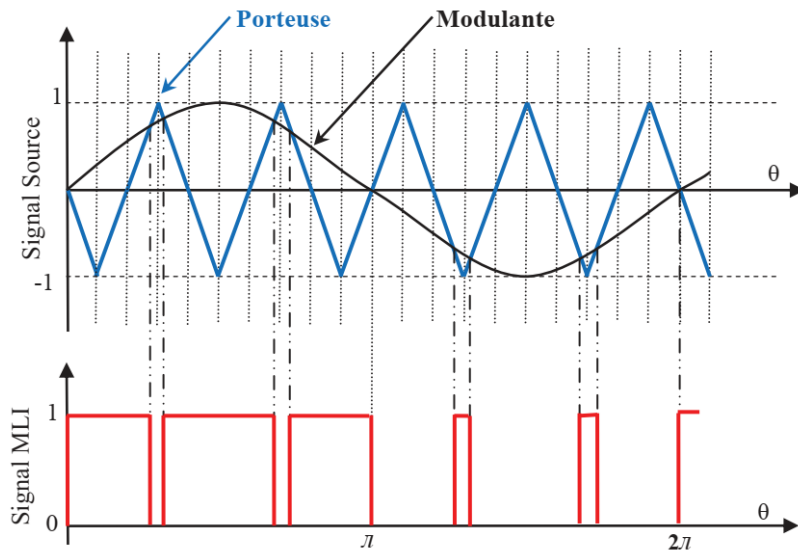


Figure II.4 . Principe de la commande MLI sinus-triangle [4].

### II.3.1.2 Equation de la porteuse

La porteuse est un signal triangulaire caractérisé par sa fréquence  $f_p$  et sa valeur de crête  $v_p$ . On définit l'équation de la porteuse dans sa période  $[0, T_p]$  par :

$$\begin{cases} v_p = V_p \left( -1 - 4 \frac{t}{T_p} \right) & \text{Si } t \in \left[ 0, \frac{T_p}{2} \right] \\ v_p = V_p \left( 3 - 4 \frac{t}{T_p} \right) & \text{Si } t \in \left[ \frac{T_p}{2}, T_p \right] \end{cases} \tag{2.17}$$

### II.3.1.3 Equations des tensions de référence

La référence est un signal sinusoïdal d'amplitude  $v_{ref}$  de fréquence  $f_{ref}$ . En triphasé, les trois tensions sinusoïdales de référence sont données par :

$$\begin{cases} v_{a,ref} = v_{ref} \cdot \sin(2\pi f_r t) \\ v_{b,ref} = v_{ref} \cdot \sin\left(2\pi f_r t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ v_{c,ref} = v_{ref} \cdot \sin\left(2\pi f_r t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (2.18)$$

### II.3.1.4 Equations des états des interrupteurs

La commande MLI sinus triangle utilise la comparaison avec les trois composantes de la tension de référence afin de calculer les états  $S_a$ ,  $S_b$  et  $S_c$  des interrupteurs de redresseur. Ceux-ci sont donnés par l'équation suivante :

$$S_j = \begin{cases} 1 & \text{si } (v_{ref} - v_p) > 0 \\ 0 & \text{si } (v_{ref} - v_p) < 0 \end{cases} \quad (2.19)$$

### II.3.2 La commande MLI vectorielle

La modulation de largeur d'impulsion vectorielle utilise un algorithme numérique afin d'obtenir une séquence de commande des interrupteurs du redresseur permettant de générer un vecteur tension de sortie qui s'approche le mieux possibles du vecteur tension de référence. Cette technique de MLI suit les principes suivants : [16]

- Le signal de référence est échantillonné sur des intervalles  $T$ .
- Réalisation dans chaque période de modulation, d'une impulsion de largeur  $T$  centrée sur la période, et dont la valeur moyenne est égale à la valeur de la tension de référence au milieu de la période de modulation (MLI Symétrique).
- Tous les interrupteurs d'un même demi-point ont un état identique au centre et aux deux extrémités de la période.

Cette modulation conduite en synchronisme sur les trois phases. Les trois tensions sinusoïdales sont représentées par un seul vecteur appelé vecteur tension de référence. On approxime au mieux ce vecteur pendant chaque intervalle de modulation en agissant sur la commande des trois jeux d'interrupteurs complémentaires  $k_1$  et  $'k_1$ ,  $k_2$  et  $'k_2$ ,  $k_3$  et  $'k_3$  représentés par la Figure(2.1).

Il existe huit combinaisons possibles pour commander les interrupteurs du redresseur. Nous allons montrer, en utilisant la transformation de Concordia, qu'on peut obtenir huit différents vecteurs de tension en fonction de la commande des trois bras du redresseur. La Figure (2.6) montre les différentes possibilités de combinaison.

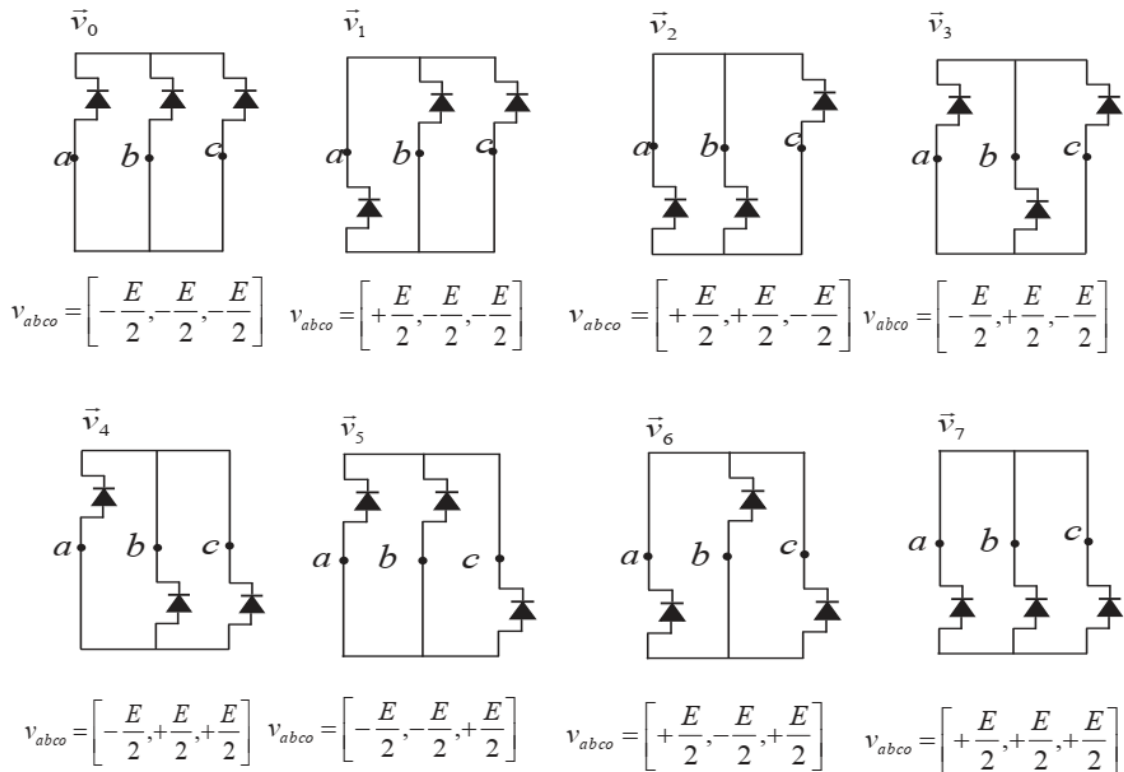


Figure II. 5. Configuration des différentes possibilités d'interrupteurs du redresseur. [4]

### II.4 Modèle de la machine à courant continu sur les axes d, q

La MCC, supposée bipolaire (Figure II.7), comporte :

- Au stator, suivant l'axe  $d$ , deux enroulements inducteurs série et shunt représentés par les indices respectivement  $s$  et  $f$ ;
- Au rotor, suivant l'axe  $q$ , un enroulement d'induit, un enroulement auxiliaire et un enroulement de compensation représentés par les indices respectivement  $a$ ,  $aux$  et  $c$ . Les pôles auxiliaires et de commutation produisent une f.é.m. de signe opposé de sorte qu'elle annule l'effet de la réaction magnétique d'induit et la f.é.m. qui cause les étincelles. Ces enroulements sont placés en série avec l'enroulement de l'induit par rapport à l'axe  $q$ . [17]

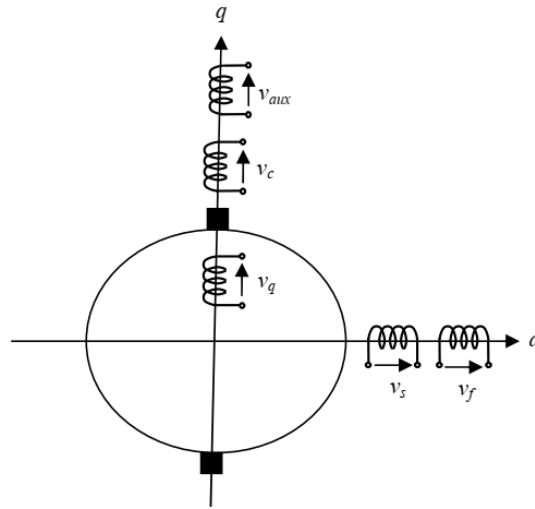


Figure II. 6. Représentation de la MCC sur les axes d et q. [17]

### II.4.1. Equation des tensions

D'après le modèle de la Figure II.7, les relations de tensions, pour le fonctionnement en moteur, sont de la forme ci-dessous :

$$\begin{cases} v_f = R_f i_f + \frac{d\psi_f}{dt} \\ v_s = R_s i_s + \frac{d\psi_s}{dt} \\ v_c = R_c i_c + \frac{d\psi_c}{dt} \\ v_{aux} = R_{aux} i_{aux} + \frac{d\psi_{aux}}{dt} \\ v_a = R_a i_a + \frac{d\psi_a}{dt} + \omega_m \psi_d \end{cases} \quad (2.20)$$

### II.4.2. Equation des flux

Les relations de flux s'écrivent :

$$\begin{cases} \psi_f = L_f i_f + M_{fs} i_s \\ \psi_s = L_s i_s + M_{sf} i_f \\ \psi_c = L_c i_c + M_{cq} i_q + M_{caux} i_{aux} \\ \psi_{aux} = L_{aux} i_{aux} + M_{auxa} i_a + M_{auxxc} i_c \\ \psi_d = M_{fa} i_f + M_{sa} i_s \\ \psi_q = L i_a + M_{a.c} i_c + M_{a.aux} i_{aux} \end{cases} \quad (2.21)$$

Les équations (2.20) et (2.21) peuvent être réduite en considérant la tension et le flux total aux bornes du circuit d'induit et l'emplacement série de ces enroulements. On peut donc écrire :

$$\begin{cases} v_a = v_q + v_{aux} + v_c \\ i_a = i_s = i_{aux} \\ \psi_a = \psi_q + \psi_{aux} + \psi_c \end{cases} \quad (2.22)$$

Alors :

$$\begin{cases} v_f = R_f i_f + \frac{d\psi_f}{dt} \\ v_s = R_s i_s + \frac{d\psi_s}{dt} \\ v_a = R_a i_a + \frac{d\psi_a}{dt} + \omega_m \psi_d \end{cases} \quad (2.23)$$

On obtient finalement :

$$\begin{cases} v_f = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} + M_{fs} \frac{di_a}{dt} \\ v_s = R_s i_s + L_s \frac{di_a}{dt} + M_{fs} \frac{di_f}{dt} \\ v_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + \omega_m (M_{fa} i_f + M_{sa} i_s) \end{cases} \quad (2.24)$$

Avec:

$$\begin{cases} R_a = R + R_{aux} + R_c \\ L_a = L + L_{aux} + L_c \\ \psi_a = L + L_{aux} + L_c + 2(M_{ac} + M_{a.aux} + M_{c.aux}) \end{cases} \quad (2.25)$$

### II.4.3 Expression du couple électromagnétique

La puissance électrique instantanée de la MCC est donnée par la relation suivante :

$$p(t) = v_a i_a + v_f i_f + v_s i_s + v_c i_c + v_{aux} i_{aux} \quad (2.26)$$

Ou encore :

$$p(t) = v_a i_a + v_f i_f + v_s i_s \quad (2.27)$$

L'énergie absorbée par la MCC pendant un intervalle de temps  $dt$  :

$$dW = (R_a i_a^2 + R_s i_s^2 + R_f i_f^2) dt + (d\psi_a i_a + d\psi_f i_f + d\psi_c i_c) + \omega_m \psi_d i_a \cdot dt \quad (2.28)$$

$dW$  peut être décomposée en :

$$dW = dW_j + dW_{mag} + dW_{méc} \quad (2.29)$$

Avec :

$$dW_j = (R_a i_a^2 + R_s i_s^2 + R_f i_f^2) dt : \text{L'énergie dissipée par effet joule .}$$

$$dW_{mag} = (d\psi_a i_a + d\psi_f i_f + d\psi_c i_c) : \text{La variation de l'énergie magnétique}$$

emmagasinée dans le champ de couplage .

$$dW_{méc} = \omega_m \psi_d i_a \cdot dt : \text{L'énergie transformée en énergie mécanique.}$$

Le couple électromécanique est donnée par :

$$C_{em} = \frac{\partial W}{\partial \theta} \quad (2.30)$$

$$C_{em} = \psi_d i_a \quad (2.31)$$

En utilisant l'équation (2.21), on aura :

$$C_{em} = (M_{fa}i_f + M_{sa}i_s)i_a \tag{2.32}$$

### II.4.4 Equation du mouvement

La Loi fondamentale de la dynamique appliquée à la MCC permet d'écrire :

$$C_{em} - C_r - K_f\Omega = \frac{J}{p} \frac{d\omega_r}{dt} \tag{2.33}$$

Où :

$C_{em}$  : Le couple électromagnétique de la machine ;

$C_r$  : Le couple résistant (statique) à l'arbre de la machine ;

$J$  : Le moment d'inertie ;

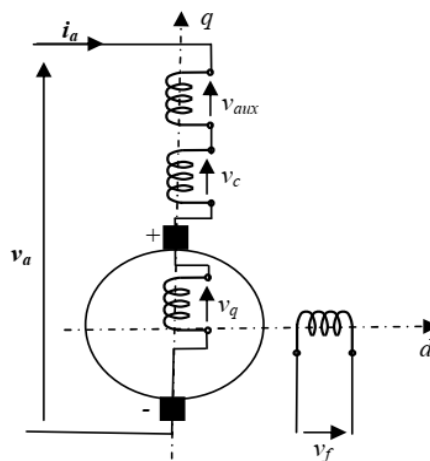
$K_f$  : le coefficient de frottement ;

$\Omega_m$  : La vitesse électrique du rotor

$p$  : le nombre de paires de pôles.

### II.5 Application de la théorie sur un moteur à excitation séparée:

L'excitation est séparée ou indépendante si le courant dans l'inducteur est fourni par une source autre que celle alimentant l'induit. Dans ce cas la machine ne possède qu'un seul enroulement d'excitations  $f$  **Figure II.8** Les équations (2.22) et (2.23) se réduisent à : [17]



**Figure II. 7.** Schéma équivalent d'un moteur à excitation séparée. [17]

- Equation des tensions :

$$\begin{cases} v_f = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} \\ v_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + \omega_m M_{fa} i_f \\ C_{em} = M_{fa} i_f i_a \end{cases} \quad (2.34)$$

-Equation des flux :

$$\begin{bmatrix} \psi_f \\ \psi_d \\ \psi_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_f & 0 \\ M_{fa} & 0 \\ 0 & L_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_f \\ i_a \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

- Expression du couple électromagnétique:

$$C_{em} = M_{fa} i_f i_a \quad (2.36)$$

## II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté l'alimentation de la machine à courant continu c'est-à-dire, le filtre (LC) et le redresseur, pour ce dernier nous avons parlé sur les configurations possibles qui sont mises en œuvre.

Ensuite, on a établi la technique de commande MLI comme stratégie de manipulation de la tension ou le courant de sortie.

Enfin, on a présenté la modélisation de la machine à courant continu, précisément celle à excitation séparé pour avoir le Modèle de la machine à courant continu sur les axes  $d, q$ .

# **Chapitre III :**

# **Simulation Du**

# **Systeme**

**III-1 Introduction**

Le principe est semblable à celui utilisé pour la simulation analogique mais tout ce qui était réalisé avec du "matériel" sera remplacé par un logiciel exécuté par un ordinateur. Le réglage des paramètres effectué à l'aide du clavier est beaucoup plus aisé que sur les simulateurs analogiques, une liaison "physique" avec l'extérieur est possible grâce aux cartes de conversion analogique numérique d'entrée et numérique de sortie.

Donc les performances des logiciels par exemple Matlab, Matrix, Sysi,..., nous permettent de simuler les modèles non linéaires, ces logiciels permettent aussi de :

- Tracer le schéma fonctionnel sur l'écran de l'ordinateur.
- Entrer en mémoire les valeurs des coefficients des fonctions de transfert.
- Simuler les entrées.
- Enregistrer les grandeurs significatives.
- Tracer les réponses temporelles ou fréquentielles à l'écran puis les sortir sur "papier" à l'aide d'une imprimante en mode graphique.

Dans cette étude nous avons utilisé le *MATLAB/SIMULINK* comme moyen de simulation de notre système.

**III.2 Présentation de l'environnement MATLAB/SIMULINK™**

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

Des bibliothèques spécialisées sont disponibles (les "Tools boxes") pour la plupart des domaines scientifiques nécessitant des moyens de calcul importants : automatique, traitement de signal, mathématiques appliquées, télécommunications, etc..... Des modules temps réel, développés autour des produits *dSPACE (Real Time Interface, TRACE, COCKPIT)* sont également proposés et rendent l'environnement de travail particulièrement attractif : l'utilisateur dispose en effet de tous les outils nécessaires à l'élaboration d'une application sur procédé réel, de la simulation à la supervision.

### III.2.1. Matlab

Un système interactif et convivial de calcul numérique et de visualisation graphique, destinés aux ingénieurs et scientifiques. Il possède un langage de programmation à la fois puissant et simple d'utilisation. Il permet d'exprimer les problèmes et solutions d'une façon aisée, contrairement à d'autres langages de programmation. Il intègre des fonctions d'analyse numérique, de calcul matriciel, de traitement de signal, de visualisation graphique 2D et 3D, etc....., il peut être utilisé de façon interactive ou en mode programmation. En mode interactif, l'utilisateur a la possibilité de réaliser rapidement des calculs sophistiqués et d'en présenter les résultats sous forme numérique ou graphique. En mode programmation, il est possible d'écrire des scripts (*programmes*) comme avec d'autres langages l'utilisateur peut aussi créer ses propres fonctions pouvant être appelées de façon interactive ou par des scripts. Ces fournissent à *MATLAB* un atout inégalable : son extensibilité. Ainsi, l'environnement *MATLAB* peut facilement être étendu. Dans *MATLAB*, l'élément de base est la matrice. L'utilisateur ne s'occupe pas des allocations de mémoire ou de redimensionnement comme dans les langages classiques. Les problèmes numériques peuvent être résolus en un temps record, qui ne représente qu'une infime partie du temps à passer avec d'autres langages comme le Basic, C, C++ ou le Fortran.

*MATLAB* s'est imposé dans les milieux universitaire et industriel comme un outil puissant de modélisation, de simulation et de visualisation de problèmes numériques. Dans le monde universitaire *MATLAB* est utilisé pour l'enseignement de l'algèbre linéaire, traitement du signal, l'automatique, etc., ainsi que dans la recherche scientifique.

Dans le domaine industriel, il est utilisé pour la résolution et la simulation de problèmes d'ingénierie et de prototypage. *MATLAB* est une abréviation de *MATrix LABORatoire*. écrit à l'origine, en Fortran, par *Cleve Moler*, *MATLAB* était destiné à faciliter l'accès au logiciel matriciel développé dans les projets *LINPACK* et *EISPACK*.

### III.2.2. Simulink

(*SIMULENK*) est un programme pour la simulation des systèmes dynamiques linéaires et non linéaires ; une (*MATLAB*), dans laquelle la définition des modèles se fait par schémas blocs (diagramme structurel). Le diagramme structurel permet la représentation graphique d'un système d'équations linéaires et non linéaires. Il met en évidence la structure du système et permet de visualiser les interactions entre les différentes grandeurs internes et externes. On distingue alors particulièrement bien les contre-réactions, les couplages réciproques, les non-

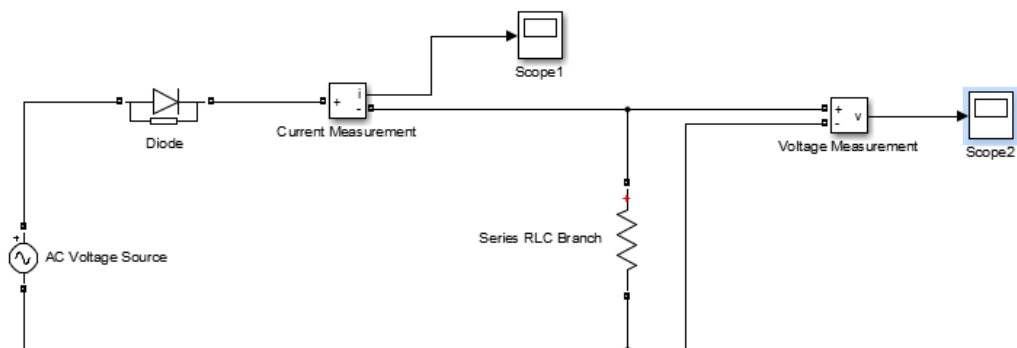
linéarités, etc. les éléments qui composent le diagramme structurel représentent des opérations mathématiques, à savoir addition, soustraction, multiplication avec un coefficient, intégration et différentiation, ainsi que la multiplication et la division de deux variables et la fonction non linéaire d'une variable. *SIMULINK* possède une interface outils nécessaires à l'élaboration d'une application sur procédé réel, de la simulation à la supervision graphique. pour visualiser les résultats sous forme de graphiques ou de valeurs numériques en cours de simulation. Les paramètres régissant le fonctionnement des systèmes peuvent être modifiés en ligne, c'est-à-dire en cours de simulation, et l'on peut observer leur effet immédiatement.

*SIMULINK* est bâti autour d'une bibliothèque de blocs (librairies) classés par catégories. Les principales librairies sont montrées dans le tableau.

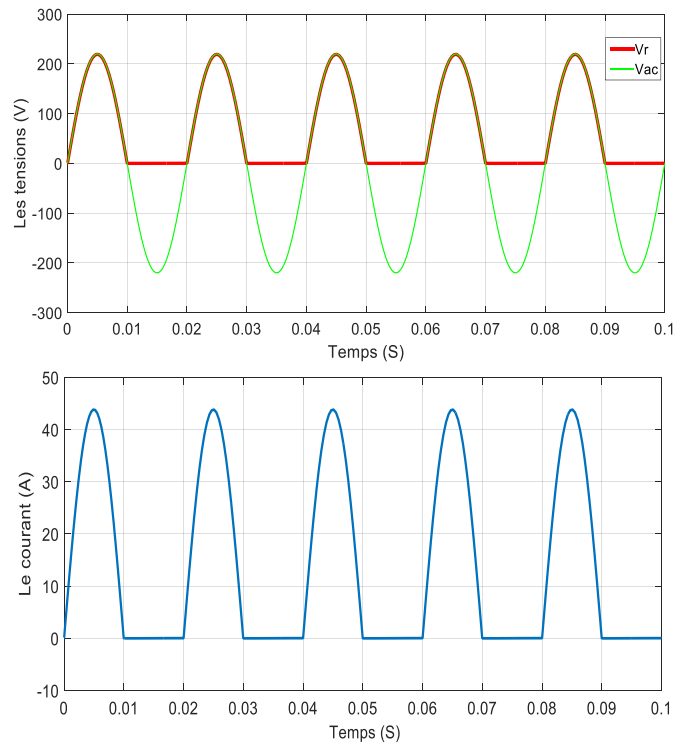
### III.3. Simulation et interprétation des résultats

#### III.3.1 Les Redresseurs non commandé

##### III.3.1.1 Redresseur monophasé à une alternance avec une charge R en demi-pont :

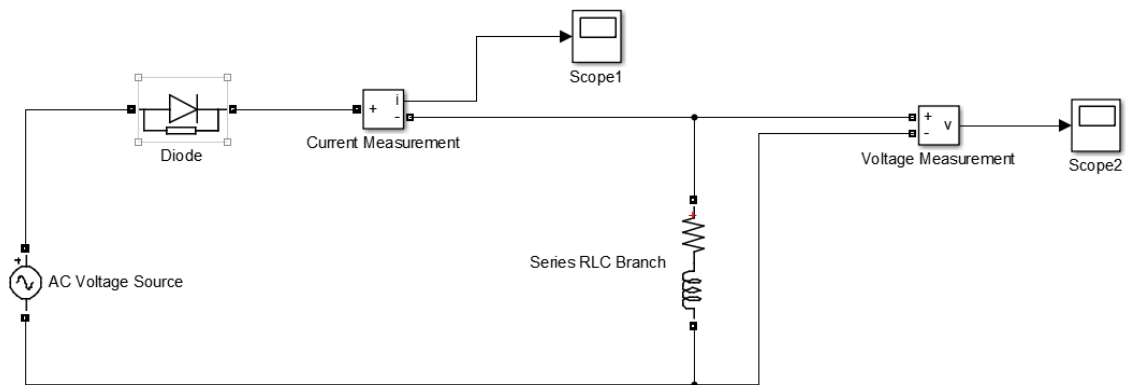


**Figure III. 1.** Schéma bloc de Redresseur monophasé à une alternance avec une charge R en demi-pont.

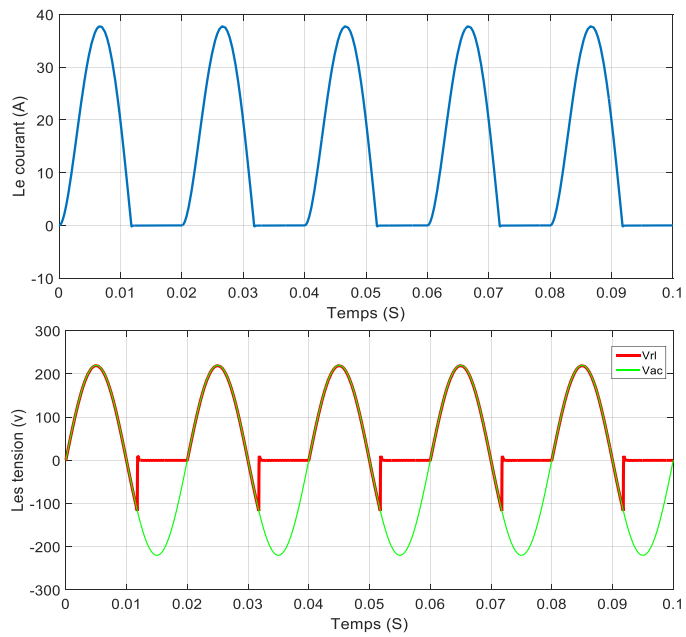


**Figure III. 2.** Allures des tensions et le courant du Redresseur monophasé à une alternance avec une charge R en demi-pont.

**III.3.1.2 Redresseur monophasé à une alternance avec une charge RL en demi-pont :**

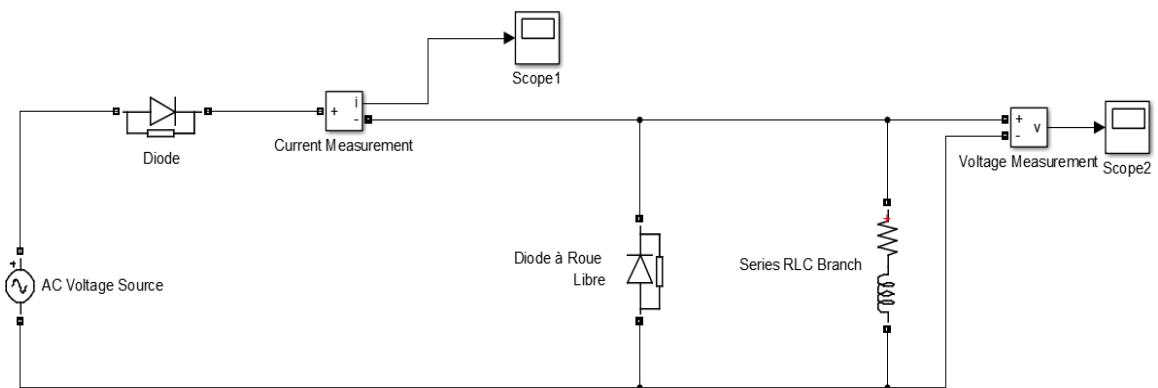


**Figure III. 3.** Schéma bloc de Redresseur monophasé à une alternance avec une charge RL en demi-pont.

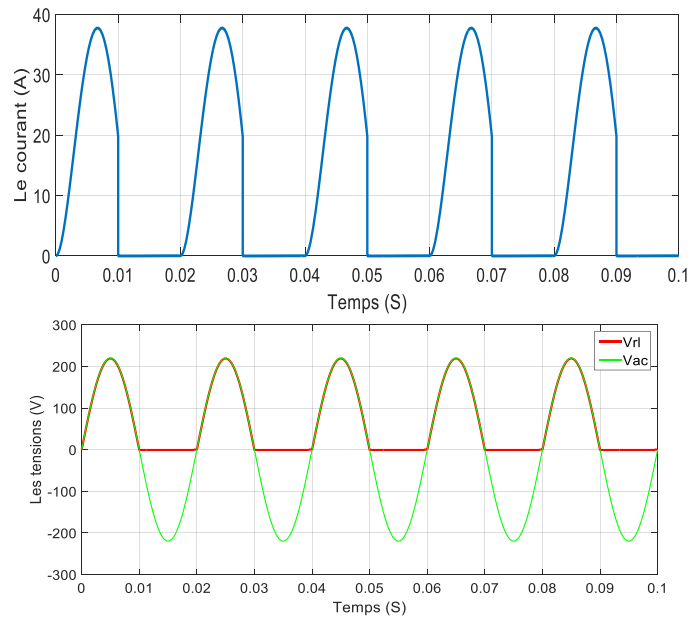


**Figure III. 4.** Allures des tensions et le courant du Redresseur monophasé à une alternance avec une charge RL en demi-pont.

**III.3.1.3 Redresseur monophasé à une alternance avec une charge RL et diode à Roue Libre en demi-pont :**

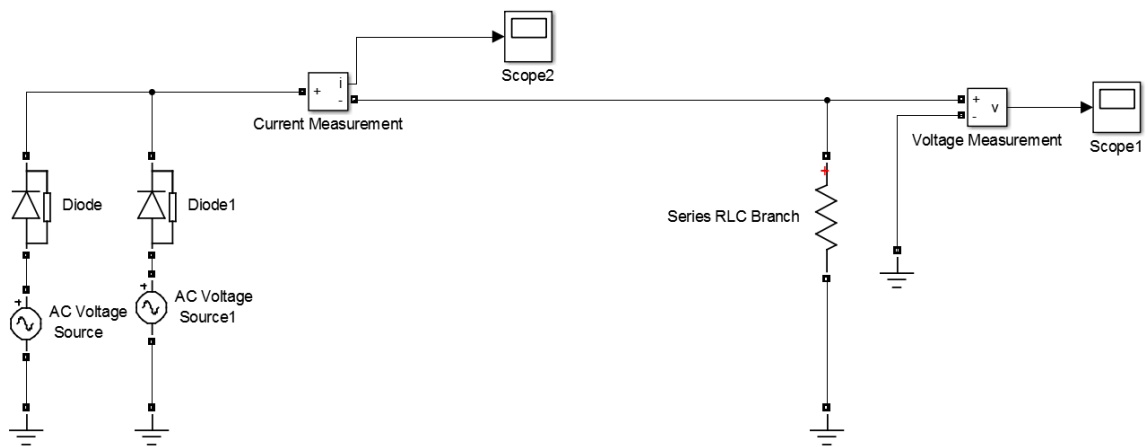


**Figure III. 5.** Schéma bloc de Redresseur monophasé à une alternance avec une charge RL et diode à Roue Libre en demi-pont.

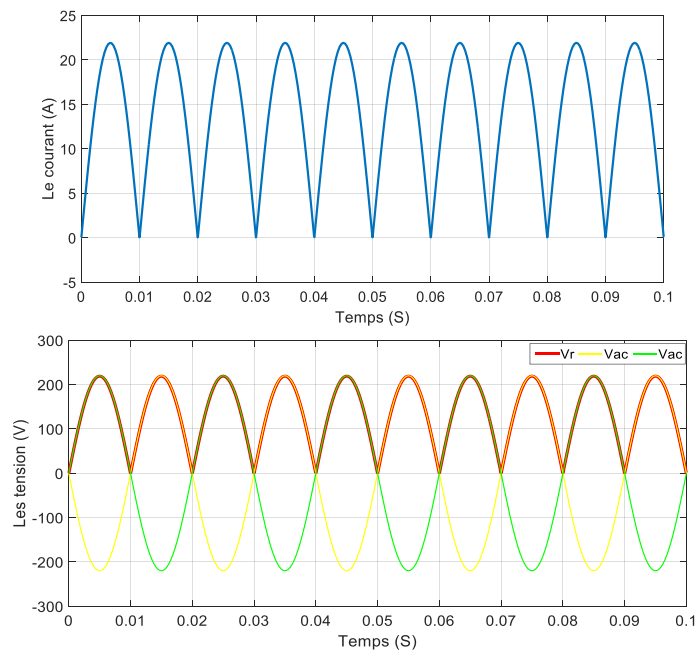


**Figure III. 6.** Allures des tensions et le courant du Redresseur monophasé à une alternance avec une charge RL et diode à Roue Libre en demi-pont.

**III.3.1.3 Redresseur monophasé à double alternance avec une charge R en demi-pont :**

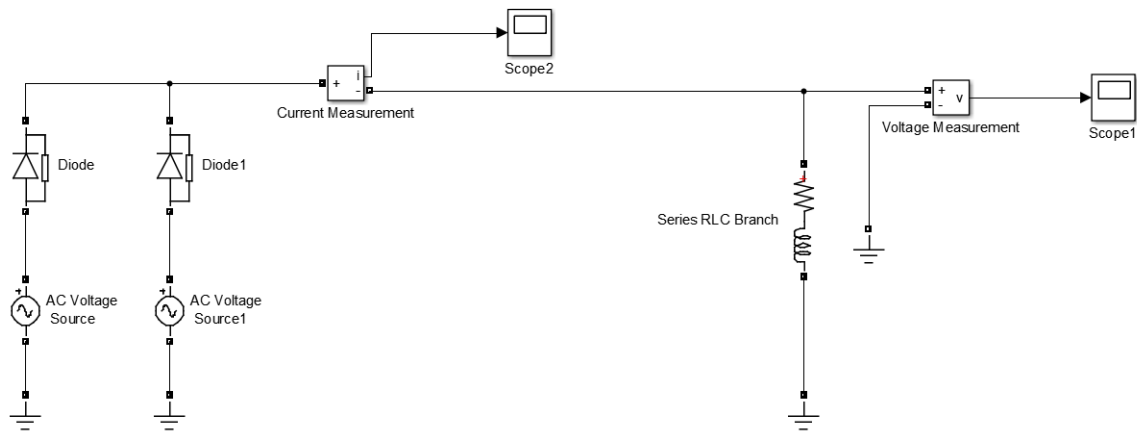


**Figure III. 7.** Schéma bloc de Redresseur monophasé à double alternance avec une charge R en demi-pont.



**Figure III. 8.** Allures des tensions et le courant du Redresseur monophasé à double alternance avec une charge R en demi-pont.

**III.3.1.4 Redresseur monophasé à double alternance avec une charge RL en demi-pont :**



**Figure III. 9.** Schéma bloc de Redresseur monophasé à double alternance avec une charge RL en demi-pont.

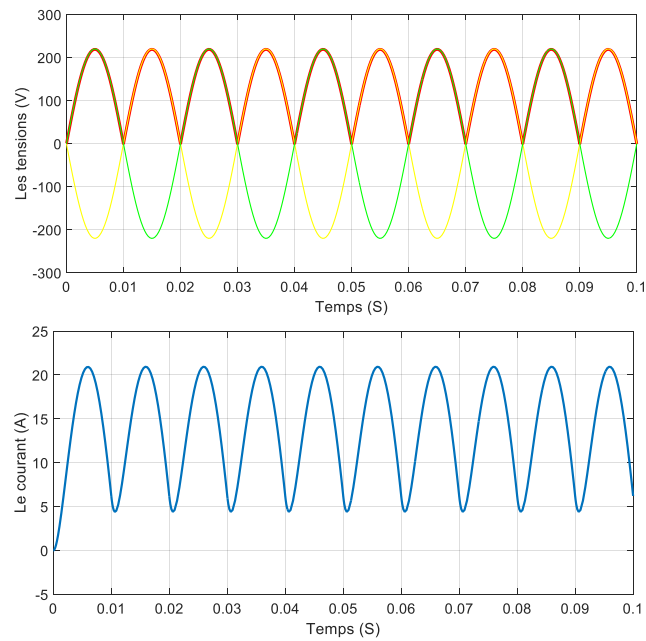


Figure III. 10. Allures des tensions et le courant du Redresseur monophasé à double alternance avec une charge RL en demi-pont.

III.3.1.5 Redresseur monophasé à double alternance avec une charge R en pont :

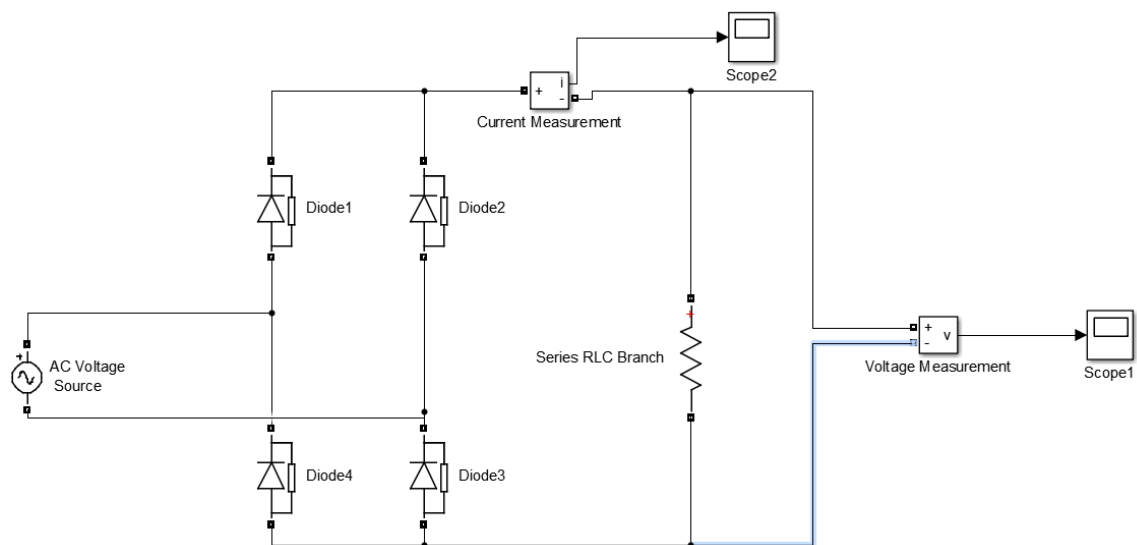
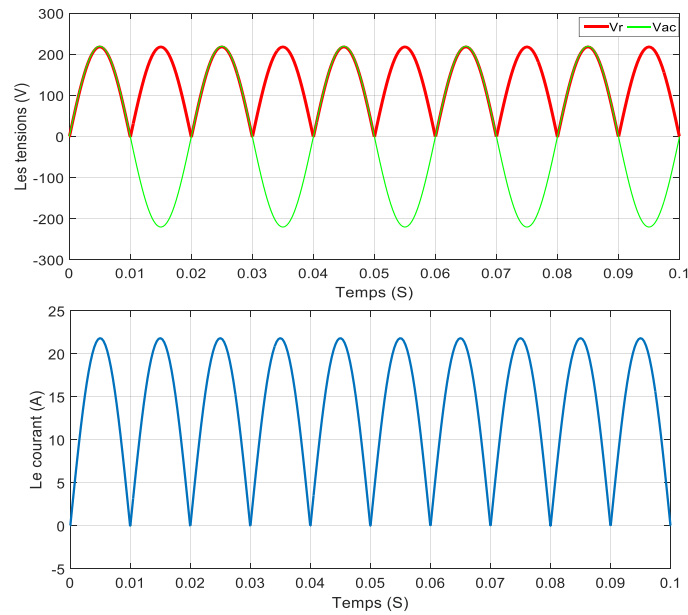
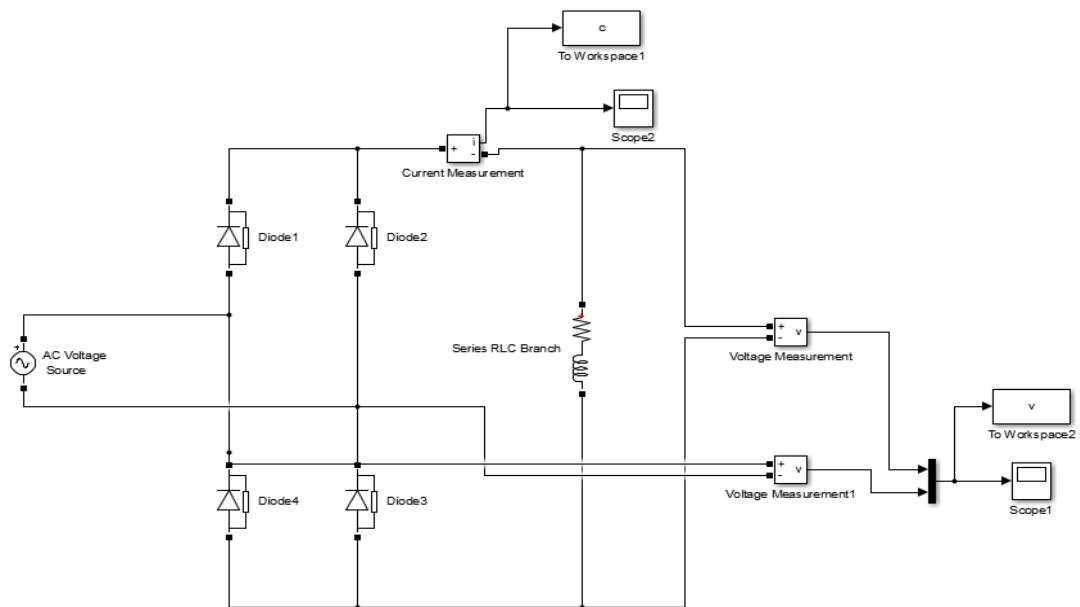


Figure III. 11. Schéma bloc de Redresseur monophasé à double alternance avec une charge R en pont.

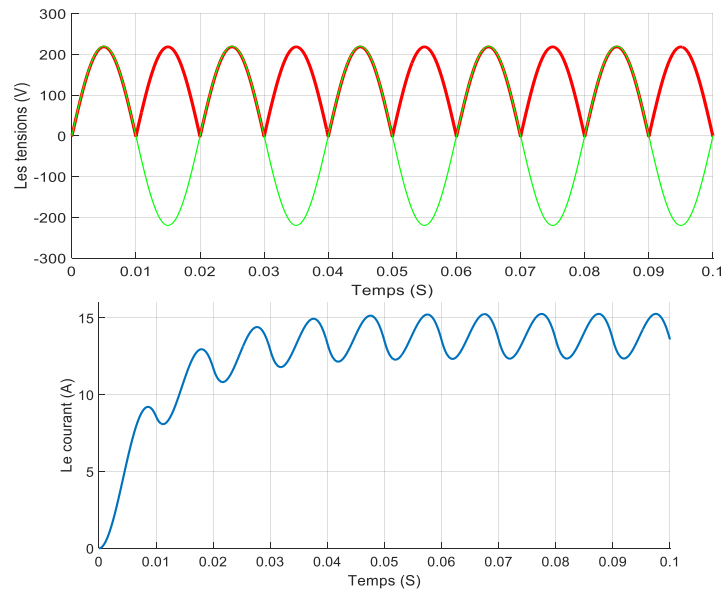


**Figure III. 12.** Allures des tensions et le courant du Redresseur monophasé à double alternance avec une charge R en pont.

**III.3.1.6 Redresseur monophasé à double alternance avec une charge RL en pont:**

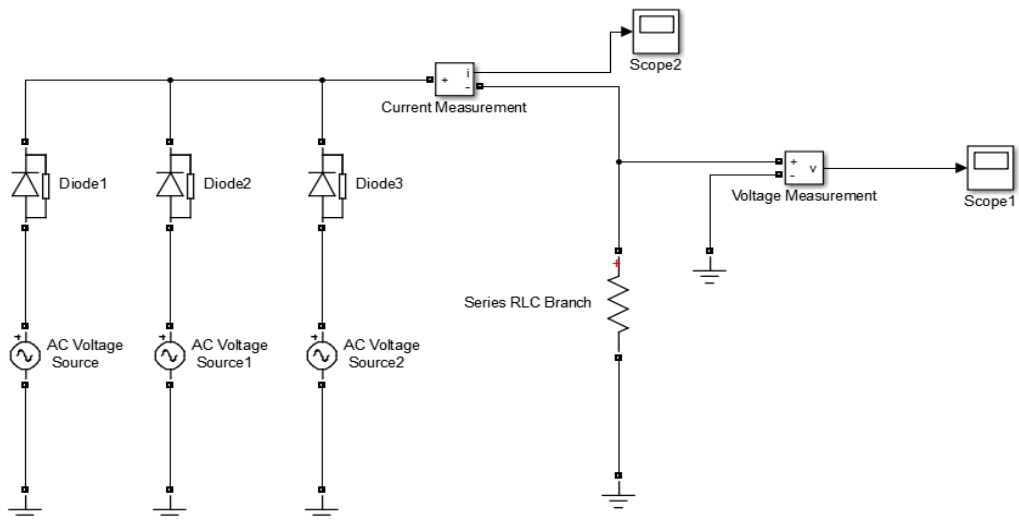


**Figure III. 13.** Schéma bloc de Redresseur monophasé à double alternance avec une charge RL en pont.

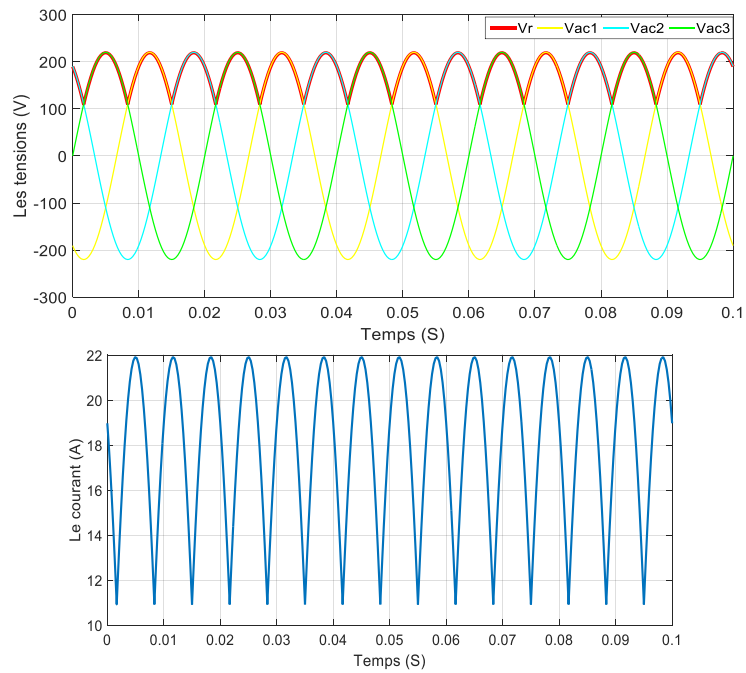


**Figure III. 14.** Allures des tensions et le courant du Redresseur monophasé à double alternance avec une charge RL en pont.

**III.3.1.7 Redresseur triphasé avec une charge R en demi-pont :**



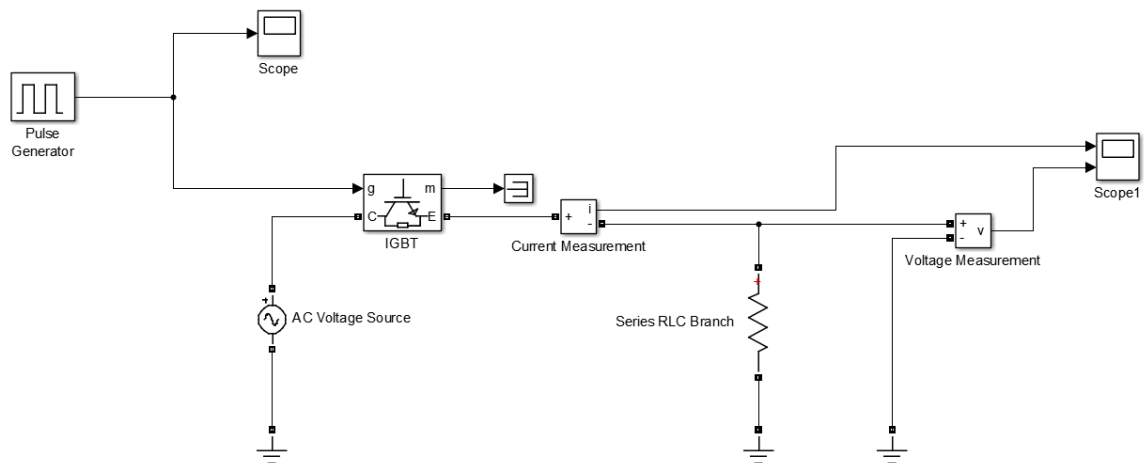
**Figure III. 15.** Schéma bloc de Redresseur triphasé avec une charge R en demi-pont.



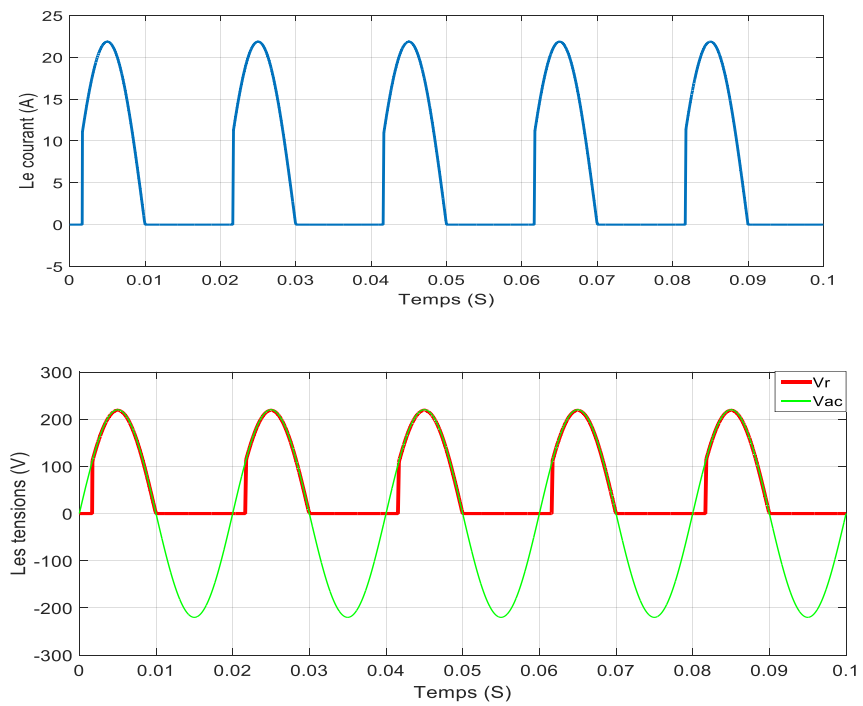
**Figure III. 16.** Allures des tensions et le courant du Redresseur triphasé avec une charge R en demi-pont.

### III.3.2 Les Redresseurs commandé

#### III.3.2.1 Redresseur monophasé commandé à une alternance avec une charge R :

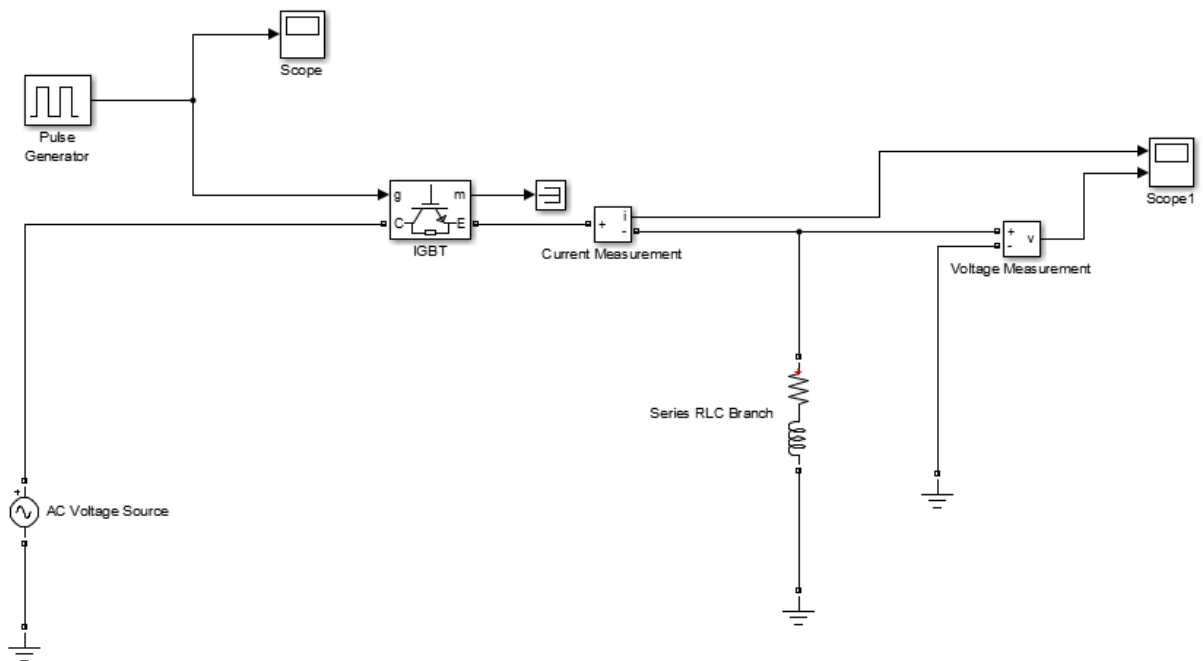


**Figure III. 17.** Schéma bloc de Redresseur monophasé commandé à une alternance avec une charge R.

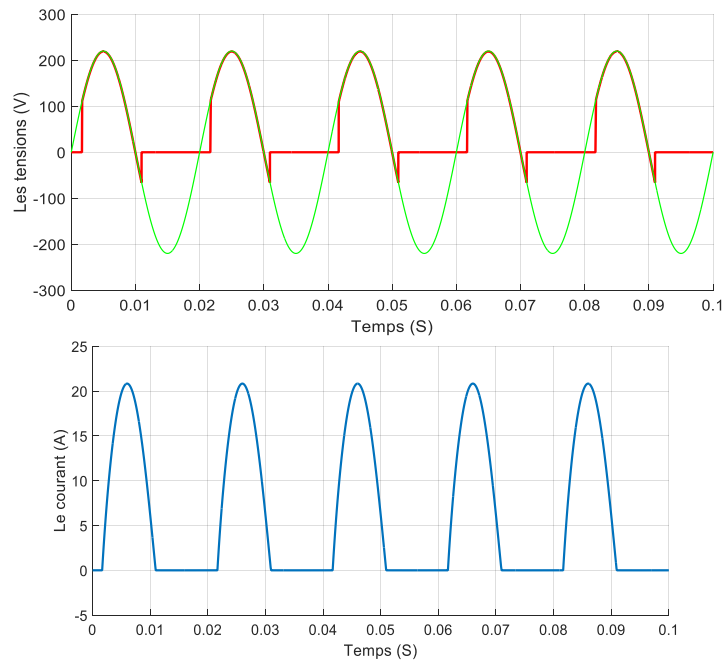


**Figure III. 18.** Allures des tensions et le courant du redresseur monophasé commandé à une alternance avec une charge R.

**III.3.2.2 Redresseur monophasé commandé à une alternance avec une charge RL:**

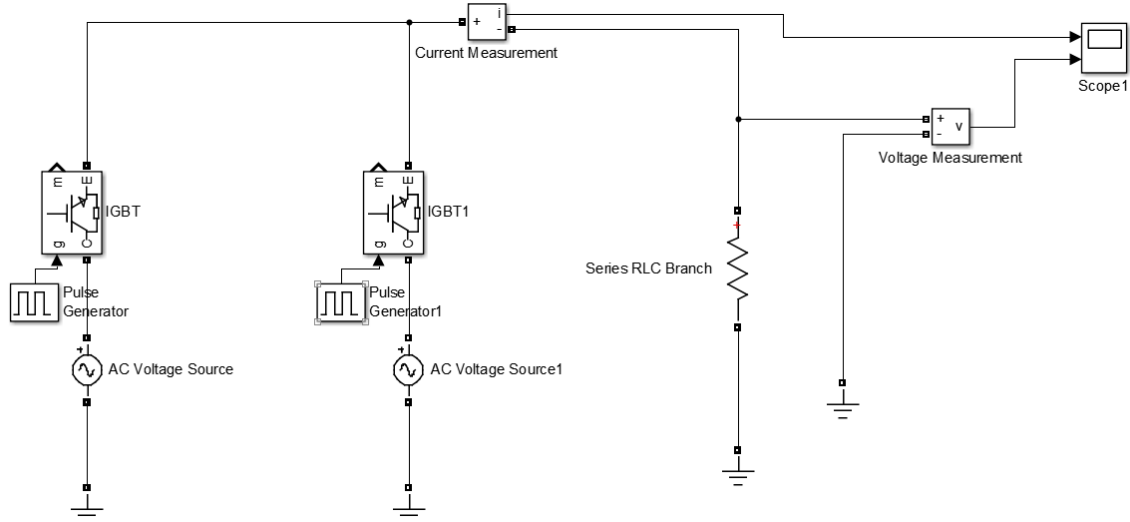


**Figure III. 19.** Schéma bloc de Redresseur monophasé commandé à une alternance avec une charge rl charge RL.



**Figure III. 20.** Allures des tensions et le courant du redresseur monophasé commandé à une alternance avec une charge RL.

**III.3.2.3 Redresseur monophasé commandé à double alternance en demi-pont avec une charge R  $\alpha=30^\circ$ :**



**Figure III. 21.** Schéma bloc de Redresseur monophasé commandé à double alternance en demi-pont avec une charge R  $\alpha=30^\circ$ .

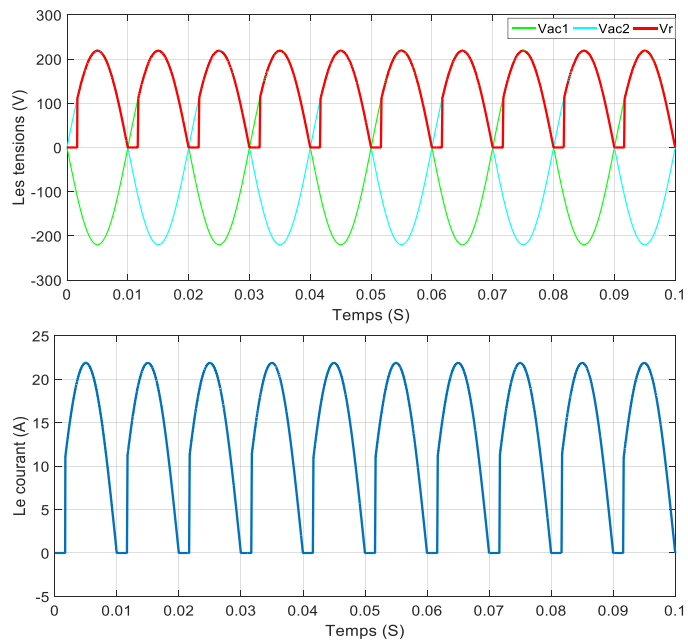


Figure III. 22. Allures des tensions et le courant du Redresseur monophasé commandé à double alternance en demi-pont avec une charge R  $\alpha=30^\circ$ .

III.3.2.4 Redresseur monophasé commandé à double alternance en demi-pont avec une charge RL  $\alpha=30^\circ$ :

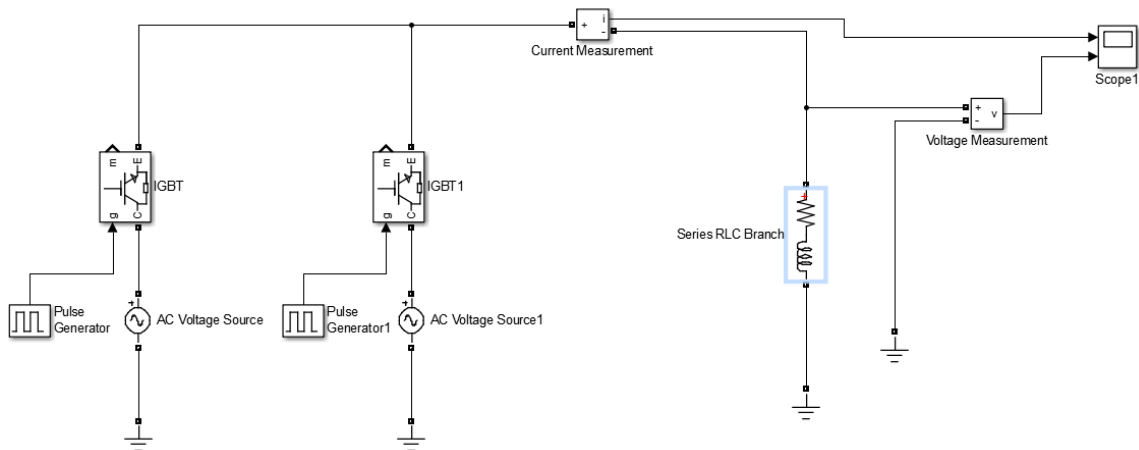
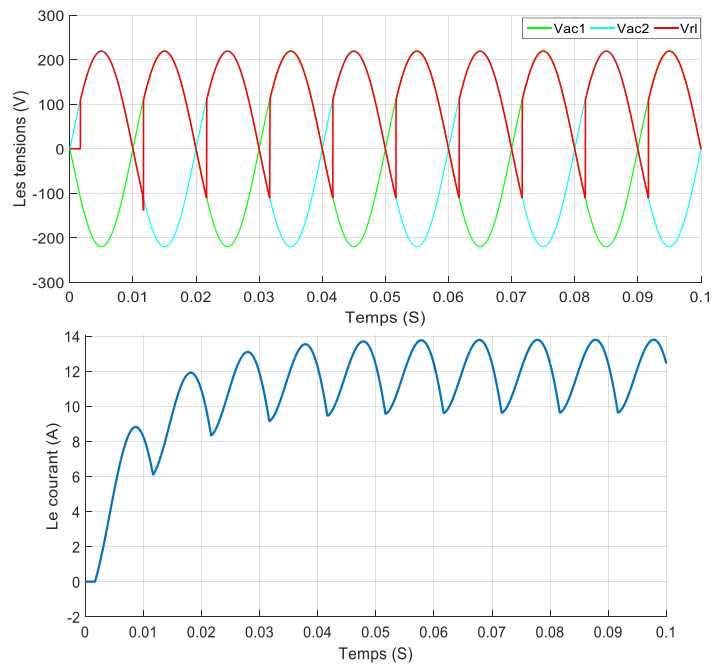
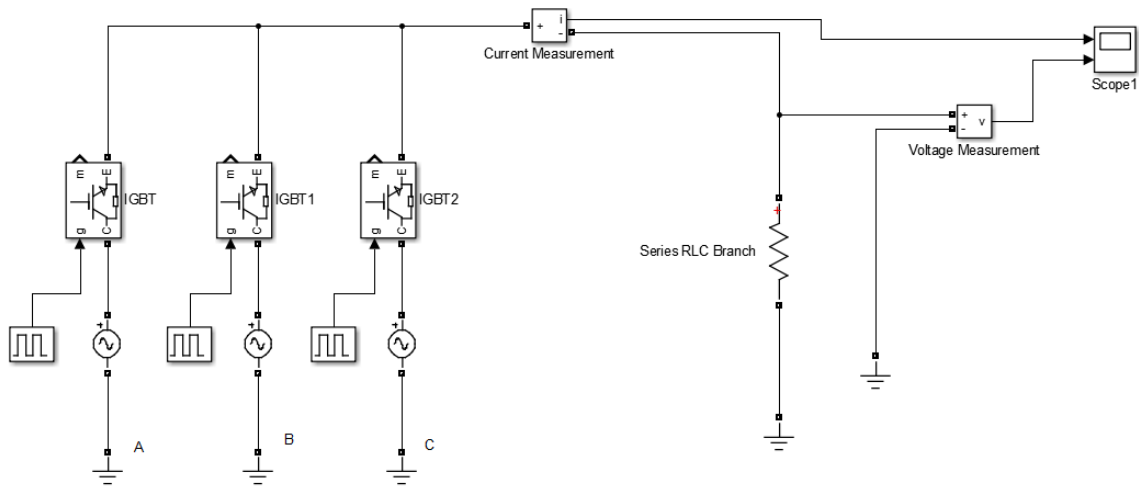


Figure III. 23. Schéma bloc de Redresseur monophasé commandé à double alternance en demi-pont avec une charge RL  $\alpha=30^\circ$ .

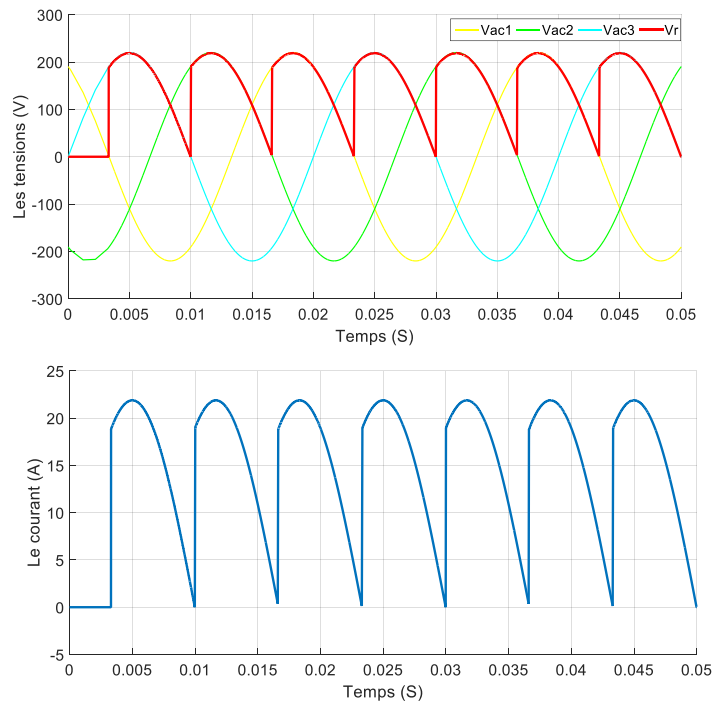


**Figure III. 24.** Allures des tensions et le courant du Redresseur monophasé commandé à double alternance en demi-pont avec une charge RL  $\alpha=30^\circ$ .

**III.3.2.5 Redresseur triphasé commandé en demi-pont avec une charge R  $\alpha=30^\circ$ :**

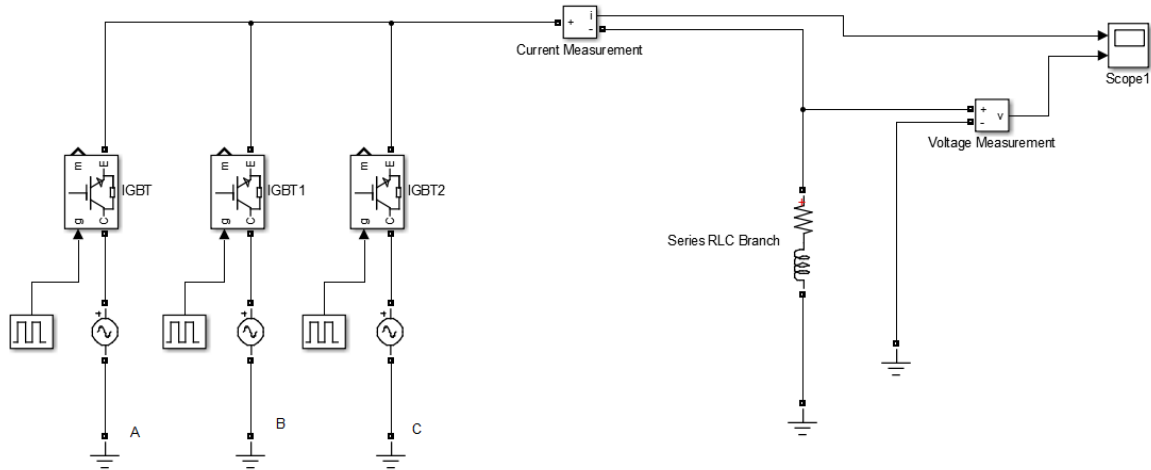


**Figure III. 25.** Schéma bloc de Redresseur triphasé commandé en demi-pont avec une charge R  $\alpha=30^\circ$ .

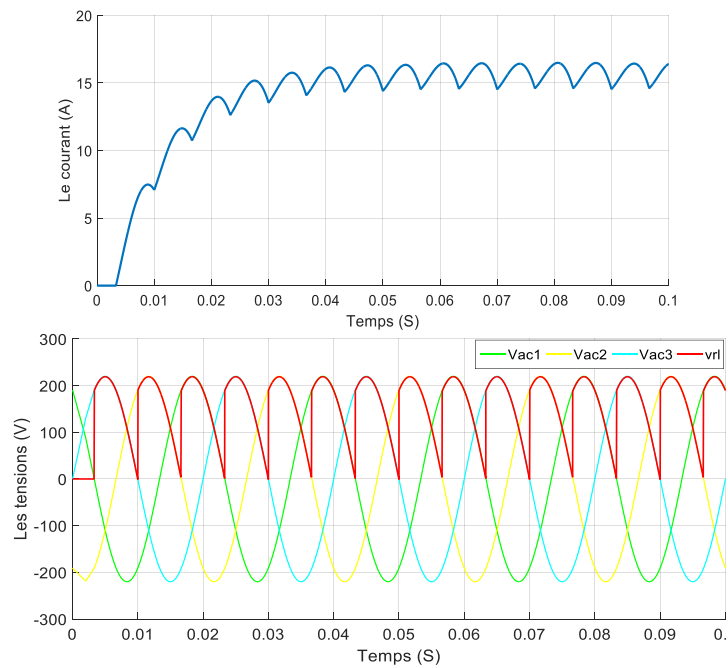


**Figure III. 26.** Allures des tensions et le courant de Redresseur triphasé commandé en demi-pont avec une charge R  $\alpha=30^\circ$ .

**III.3.2.6 Redresseur triphasé commandé en demi-pont avec une charge RL  $\alpha=30^\circ$ :**

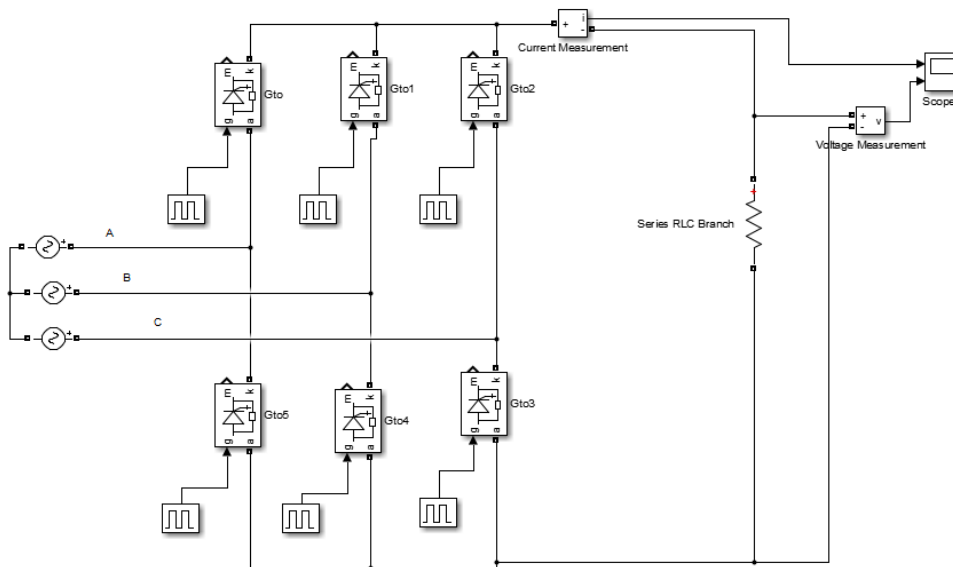


**Figure III. 27.** Schéma bloc de Redresseur triphasé commandé en demi-pont avec une charge RL  $\alpha=30^\circ$ .



**Figure III. 28.** Allures des tensions et le courant de Redresseur triphasé commandé en demi-pont avec une charge RL  $\alpha=30^\circ$ .

**III.3.2.7 Redresseur triphasé commandé en pont  $\alpha=30^\circ$ :**



**Figure III. 29.** Schéma bloc de redresseur triphasé commandé en pont  $\alpha=30^\circ$ .

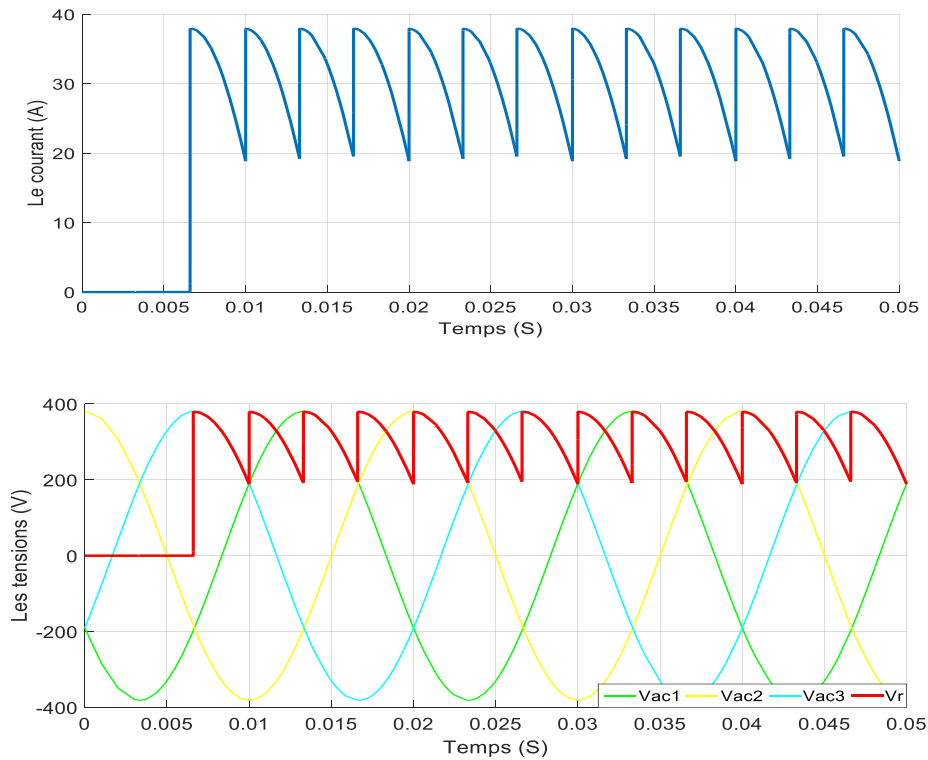


Figure III. 30. Allures des tensions et le courant de redresseur triphasé commandé en pont  $\alpha=30^\circ$ .

III.3.2.8 Redresseur triphasé commandé en pont alimenté un moteur à courant continu à excitation séparé  $\alpha=30^\circ$ :

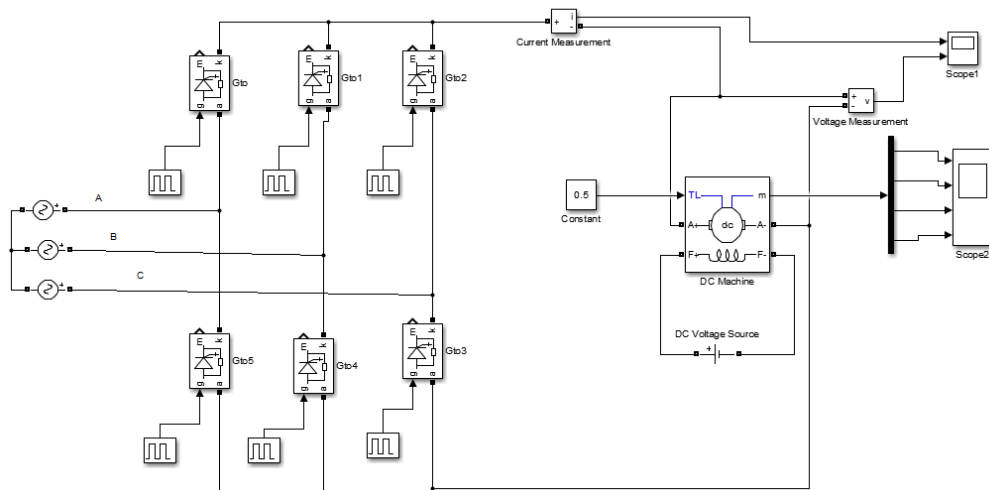
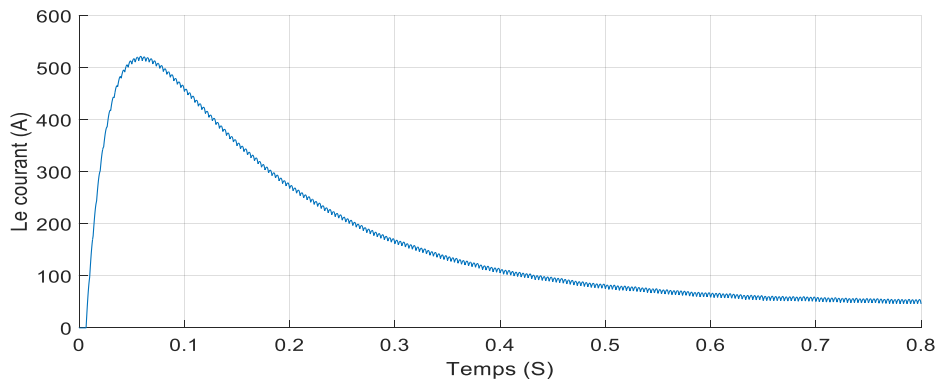
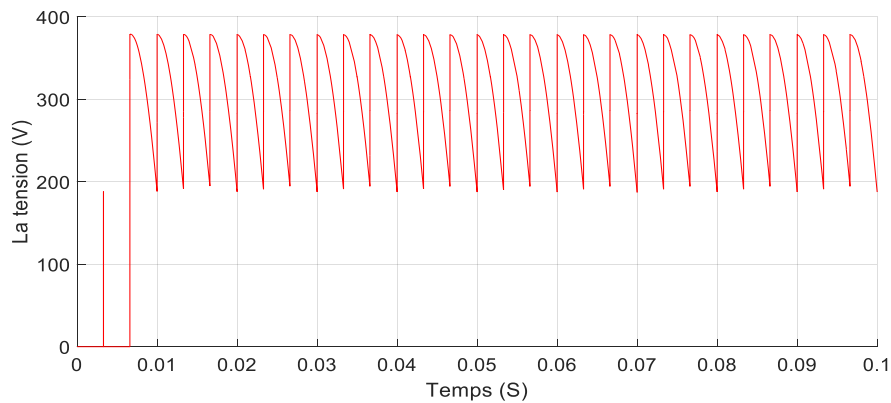


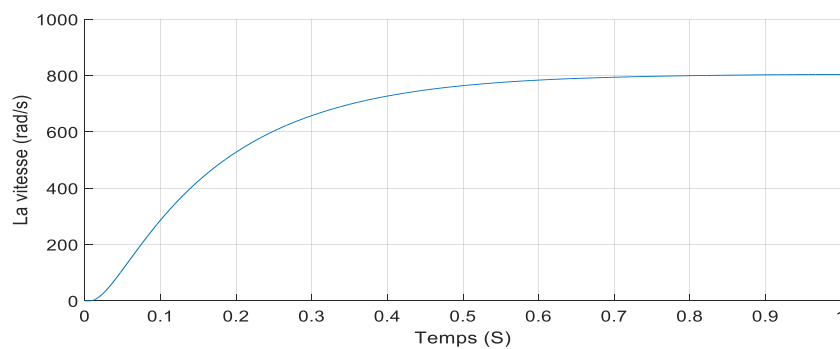
Figure III. 31. Schéma bloc de Redresseur triphasé commandé en pont alimenté un moteur à courant continu à excitation séparé  $\alpha=30^\circ$ .



**Figure III. 32.** Allure de courant Redresseur triphasé commandé en pont alimenté un moteur à CC à excitation séparé  $\alpha=30^\circ$ .



**Figure III. 33.** Allure de tension Redresseur triphasé commandé en pont alimenté un moteur à CC à excitation séparé  $\alpha=30^\circ$ .



**Figure III. 34.** Allure de vitesse d'un moteur à CC à excitation séparé.

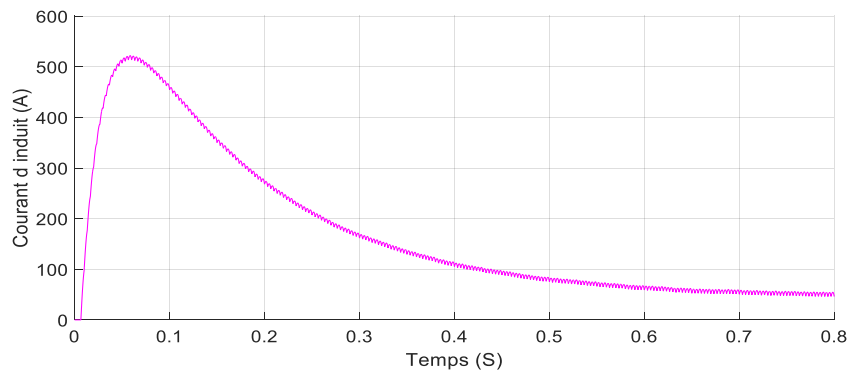


Figure III. 35. Allure de courant d induit d'un moteur à CC à excitation séparé.

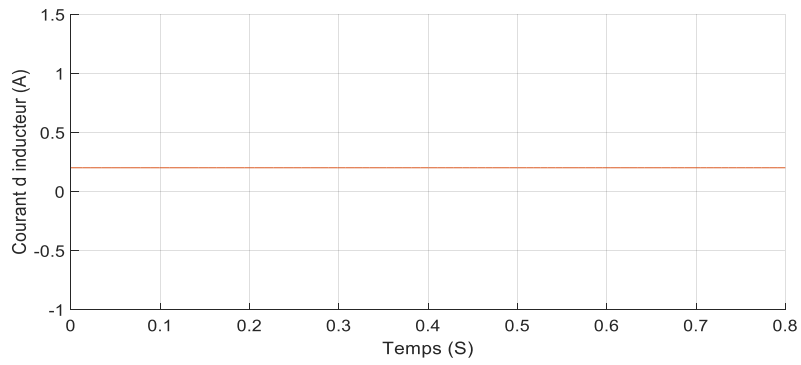


Figure III. 36. Allure de courant d inducteur d'un moteur à CC à excitation séparé.

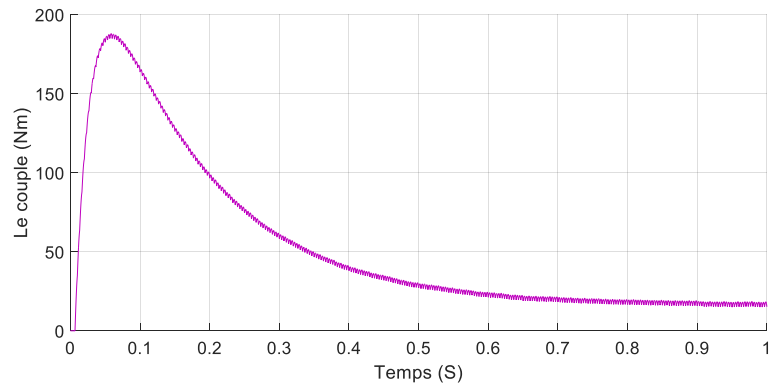


Figure III. 37. Allure de couple de moteur à CC à excitation séparé.

III.3.2.9 Redresseur Biphase a commandé MLI :

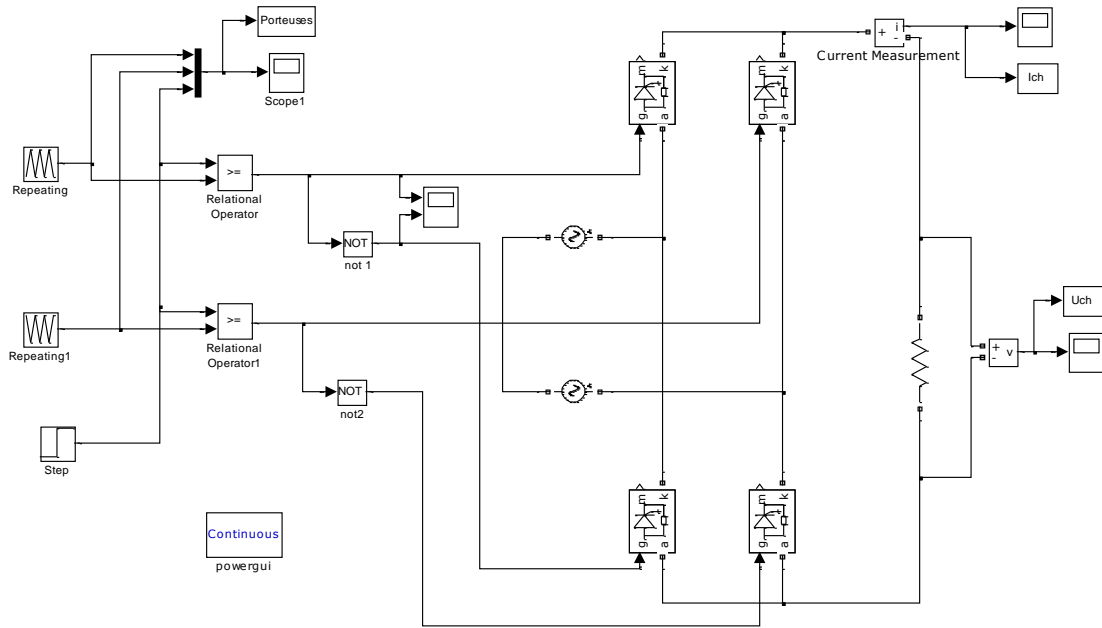


Figure III. 38. Schéma bloc d'un redresseur Biphase à MLI en pont.

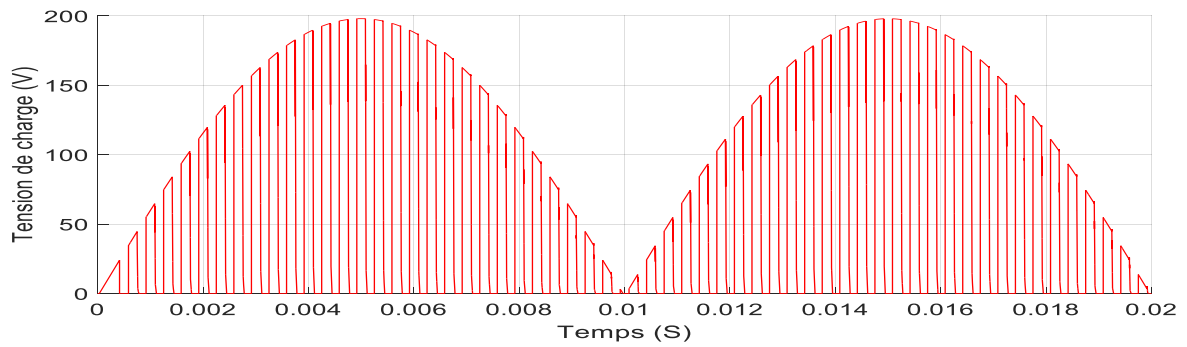


Figure III. 39. Allure de la tension de charge d'un Redresseur biphase à MLI.

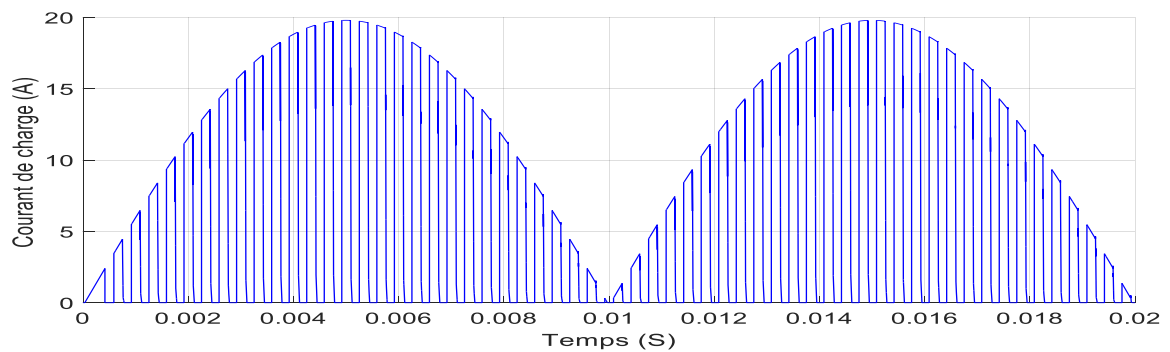
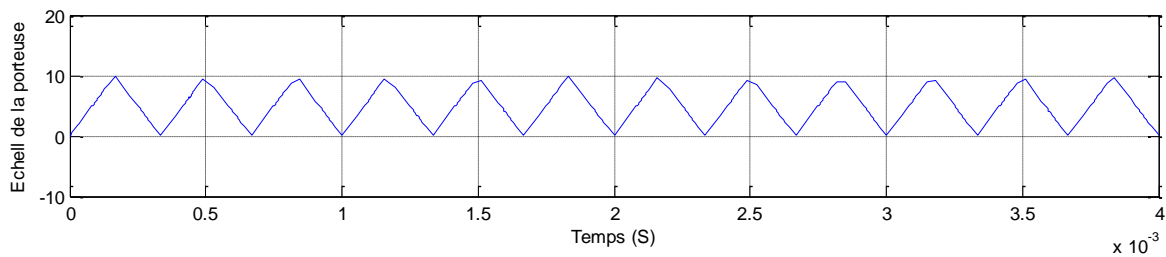
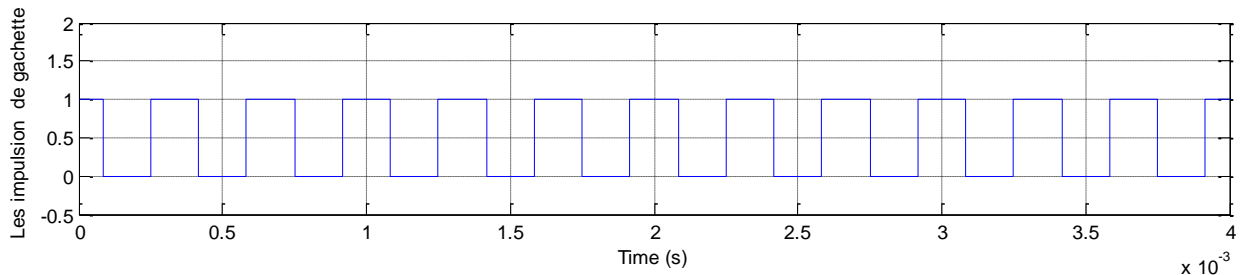


Figure III. 40. Allure du courant de charge d'un Redresseur biphase à MLI.



**Figure III. 41.** Porteuse triangulaire de la technique MLI.



**Figure III. 42.** Train des impulsions des gâchettes de la technique MLI.

### III.4. Interprétation des résultats :

Notre simulation numérique se fait sur les convertisseurs débitants sur des charges actives et passives pour voir son comportement vis-à-vis des stratégies de modulation proposées. Les résultats montrent que :

- ✓ Pour les redresseurs monophasés, l'entrée est une tension alternative monophasée. Les circuits avec des diodes fournissent des tensions continues constantes, ceux avec les thyristors ou autre composant commandé donnent des tensions continues de valeurs moyennes variables. Et le courant absorbé par la charge a pratiquement la même allure que la tension.
- ✓ Pour les redresseurs monophasés sur charge inductive avec diode de roue libre, en utilisant une diode de roue libre pour éviter les équipements assez complexes (transformateur à point milieu ou pont à quatre diodes). On obtient les mêmes résultats du redresseur monophasé avec une charge résistive.
- ✓ Pour les redresseurs biphasés non commandé, On remarque que le taux d'ondulation s'améliore c'est-à-dire que le nombre d'alternance par période égale à deux alors qu'il était un dans le cas d'un redressement par une diode (redresseur monophasé), donc la tension est plus proche du continu. On remarque aussi que pas de problème de discontinuité dans le cas des charges inductive (le courant est toujours continu).

- ✓ Pour les redresseurs biphasés commandé, d'abord En électronique de puissance (commande de moteurs...), les intensités sont élevées tandis que les tensions d'alimentation sont relativement faibles. Aussi, est-il plus intéressant d'assurer le filtrage par des inductances en série avec la charge, plutôt que par des capacités en parallèle avec la charge. C'est pourquoi, on insère habituellement en série avec la charge une inductance élevée que l'on suppose de valeur infinie. Cette inductance encore appelée inductance de lissage n'est pas forcément nécessaire quand l'inductance de la charge est elle-même importante (commande d'un moteur série à courant continu...). Ainsi peut-on conclure : ***Avec une inductance de lissage, le courant dans la charge est rigoureusement constant.***
- ✓ Pour les redresseurs triphasés, Contrairement aux alimentations à faible puissance qui utilisent le plus souvent des réseaux monophasés, les alimentations de puissance utilisent généralement des réseaux triphasés. De plus, comme les transformateurs à point milieu sont des appareils coûteux et fragiles, ceux-ci ne sont utilisés que pour des alimentations monophasées de faible puissance. Ainsi peut-on conclure : ***en électronique de puissance, le montage le plus utilisé est le pont de Graëtz alimenté en triphasé.*** Bien que les autres montages soient peu utilisés, il est intéressant d'en faire une étude sommaire car ils permettent de mieux comprendre le pont de Graëtz en triphasé. Signalons enfin que, si l'usage d'un transformateur n'est pas nécessaire avec un pont de Graëtz, il est utile d'une part pour adopter la tension du secteur à la valeur souhaitée pour l'alimentation en courant continu, d'autre part pour assurer une meilleure séparation du secteur alternatif et du réseau continu. Pour ne pas trop alors dire que pour le montage en pont :
  - Pour une même contrainte sur les composants, tant du point de vue des tensions que des courants, on convertit le double de la puissance entre le montage simple et le montage en pont. On a donc une amélioration sensible des performances du convertisseur.
  - Le facteur de puissance est nettement amélioré par rapport au montage simple alternance (0,675).

Cela nous permet de conclure que : Contrairement aux convertisseurs classiques qui fonctionnent en abaisseur de tension, ce convertisseur fonctionne en redresseur élévateur de tension.
- ✓ Pour les redresseurs biphasés à MLI, La modulation de largeur d'impulsions consiste à former chaque alternance de la tension désirée de plusieurs créneaux de

largeurs convenables. Les résultats de la simulation présente deux avantages importants :

- Elle repousse vers les fréquences les plus élevées les harmoniques de la tension désirée, ce qui facilite le filtrage ;
- Elle permet de faire varier la valeur du fondamental de la tension.

### **III.5. Conclusion**

Ce chapitre est consacré sur la simulation numérique des différents types et montages des redresseurs, pour chaque type ont été testés des charges résistives ensuite des charges résistives inductives. Les résultats de simulation obtenus montre que les performances sont globalement satisfaisantes avec la réservation d'une certaine supériorité de la commande MLI surtout en ce qui concerne la variation de la tension de charge et le concevoir de la continuité d'existence du courant de charge au cour de chaque période. Mais généralement l'objectif principal des redresseurs c'est qu'ils permettent de convertir une alimentation alternative en continue. La tension et la puissance de sortie peuvent être contrôlées par les composants de puissance utilisés (Thyristors, Mosfet, GTO, IGBT,..... ).

**Conclusion**

**générale**

## **Conclusion générale :**

Jusqu'au début des années 1970 environ, la mise en forme de l'onde électrique afin de l'adapter aux besoins a été obtenue au moyen de groupes tournants (moteurs). Les performances des composants semi – conducteurs de l'électronique de puissance (diodes, thyristors, triacs, transistors) ont ensuite permis de réaliser de telles conversions; on supprime ainsi les parties tournantes et on réduit la masse, l'encombrement et le coût de ces matériels.

Ce travail est consacré à l'étude des montages redresseurs qui assure la conversion de l'énergie électrique alternative en continue car la consommation de l'énergie électrique est très réponde en courant continu, pour cela les redresseurs sont les plus utilisés. Mais le besoin croissant induit automatiquement une multiplication de ces équipements, qui, à leurs tours provoquent des perturbations, de plus en plus présentes sur le réseau. Cependant, la pollution des réseaux est d'autant plus importante que le nombre de ces convertisseurs est plus élevé.

Ce travail nous a permis de découvrir de près la richesse des montages redresseurs en allant du simple montage monophasé mono alternance non commandé au montage triphasé double alternance et a commandé MLI entièrement commandé débitant sur différentes charges actives et passives avec prise en compte de quelques phénomènes surgissant leurs fonctionnement comme l'empiètement. La méthodologie présentée est simple, d'abord on donne les montages des redresseur utilisé.

Pour ce faire, nous avons présenté les différentes parties d'une machine à courant continue premièrement, puis nous avons apporté une attention particulière à l'élaboration des équations des circuits constituant un machine a excitation séparé , en appréhendant de façon complète leurs avantages par rapport aux autres types des moteurs, par la suite nous avons présenté la modélisation l'ensemble des montages du redresseur puis la modélisation de machine à courant continu a excitation séparé pour clarifier le fonctionnement du système , le calcul de quelques grandeurs essentiels comme la valeur moyenne, la valeur efficace, ... pour caractériser la qualité de l'énergie mise en jeu , ensuite les résultats de simulation à l'aide de *MATLAB/SIMULINK* sous forme des courbes des quelques caractéristiques qui nous paraissent importantes comme le courant ,la tension de la charge, le couple et la vitesse de la machine.

Finalement on peut dire que ce type de montage connaît, il est vrai, une utilisation encore limitée. Il est certain, cependant, que la notion d'absorption sinusoïdale de courant devrait se

généraliser en raison de normes de plus en plus sévères. Cette structure est bien sûr extensible au triphasé. On peut fournir également de la puissance réactive ce qui présente un intérêt en génération d'énergie, par exemple dans le domaine éolien. Une commande vectorielle est alors intéressante pour générer une référence de puissance réactive. Pour ne pas trop alors dire que nous avons atteint les objectifs soulignés.

Comme perspective nous proposons les points suivants:

- ✓ Utilisation des redresseurs multi niveaux pour améliorer les performances spectrales des grandeurs de sortie ainsi que la conduite de la *MCC*.
- ✓ Utilisation des redresseurs à *MLI* en absorption sinusoïdale de courant pour avoir une meilleure qualité de signal électrique.
- ✓ La réalisation d'un prototype de convertisseur AC/DC triphasé au laboratoire.
- ✓ Considérer un réseau au régime déséquilibré parce que en pratique ce régime est souvent présent.

# **Bibliographie**

## **Bibliographie**

- [1] **Hidri , Imed** Support de cours D'électronique de puissance Les convertisseurs AC-DC et AC-AC Institut supérieur des études technologiques de Nabeul.
- [2] **Talbi Amar** «Realisation D'un Redresseur Triphasé Commande Par La Carte Arduino» Mémoire Master Université Constantine I 2013/2014.
- [3] **Keddari Ben Salem , Kot Yahia**« Modélisation et Simulation D'un Convertisseur Statique AC/DC Commandée » mémoire master Université de El-Oued.
- [4] **Megherbi Hicham Hamri Sofiane** «Etude Et Modélisation Des Convertisseurs Statiques Destinés A Améliorer La Qualité De L'énergie Electrique» Mémoire Master Université Saida 2014.
- [5] **Hakim Denoun**« Contribution A L'étude Et Réalisation Des Convertisseurs AC/DC A M.L.I A Facteur De Puissance Unitaire», Thèse De Doctorat, Université De Mouloud Mammerie De Tizi-Ouzou, 2012.
- [6] **Abdelmalek Boulahia** « Etude Des Convertisseurs Statiques Destinés A La Qualité De l'Energie Electrique » Mémoire Magister Université De Constantine 2009.
- [7] **Aoues Meziane**«Filtrage Actif Des Harmoniques De Courants Générés Par Un Redresseur Triphasé» Mémoire Master Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou 2011.
- [8] **Belaid Benmahrez** «Etude Des Filtres Actifs Dans Le Cas De Production D'énergie Éolienne» Mémoire Magister Université A.Mira-Bejaia 2016.
- [9] **MesbahiNadhir** «Contribution À L'étude Des Performances Des Onduleurs Multi Niveaux Sur Les Réseaux De Distribution Thèse De Doctorat» Université De Badji Mokhtar Annaba 2014.
- [10] **Zamoum Mansour**«Identification Par Algorithmes Génétiques Des Pertes Dans Un Moteur À Courant Continu À Excitation Séparée » Mémoire D'ingénieur D'état Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou 2013.
- [11] **Pr Chaouch.S** Support De Cours Electrotechnique Fondamentale 2 « Machines A Courant Continu Mcc » 2019.

- [12] **Hanafi Ahmed** Professeur D'electronique Livre «Sciences De L'ingenieur » Sciences Et Technologies Electriques(STÉ).
- [13] **Gobbi Bader** « Etude Comparative Des Enroulements Des Machines À Courant Continu»Mémoire Magister UniversitéMohamed Khider De Biskra 2019.
- [14] **M. Yahi et B. Amara** «Modélisation et simulation d'un redresseur triphasé à deux niveaux et à commande MLI vectorielle », Mémoire de master en Electrotechnique, Université Dr. Moulay Tahar de Saida (Algérie) 2011.
- [15] **A. Bouafia**, «Techniques De Commande Prédictive Et Floue Pour Les Systèmes D'électronique De Puissance: Application Aux Redresseurs A Mli », Thèse De Doctorat Université Ferhat Abbas – Setif, 2010
- [16] **K. Hartani, Y. Miloud**, «Control strategy for three phase voltage source PWM rectifier based on the spacevector modulation», Advances in Electrical and Computer Engineering, Vol. 10, N°3, pp. 61-65, August 2010.
- [17] Dr. BOUNADJA Elhadj Maitre De Conférences « B » Support De Cours En Electrotechnique «Modelisation Des Machines Electriques».
- [18] Philippe Delarue, Francis Labrique et Guy Séguier «Livre Electronique de puissance Structures, commandes, applications»10eEdition Dunod, Paris, 2004, 2011, 2015
- [19] **Chapman, Stephen J.** 2005. Principes Fondamentaux Des Machines Electriques. 4e Ed. New York : Mcgraw Hill.