



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière d'Electrotechnique

MÉMOIRE DE MASTER

Réseaux Electrique

Présenté et soutenu par :
KASMIOURI Ahlem

Le: samedi 6 juillet 2019

Étude par simulation de la commande MLI d'un redresseur de courant

Jury

Dr.	HAMMOUDI Mohamed Yacine	MCB	Université de Biskra	Président
Mme.	ABDEDDAIM Sabrina	MCA	Université de Biskra	Encadreur
Dr.	CHENOUI Halim	MAA	Université de Biskra	Examineur

Année universitaire : 2018/2019

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière: Electrotechnique
Option: Réseaux électrique

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:

MASTER

Thème

Étude par simulation de la commande MLI d'un
redresseur de courant

Présenté par :

KASMIOURI Ahlem

Avis favorable de l'encadreur :

Mme. ABDEDDAIM Sabrina signature

Avis favorable du Président du Jury

Dr. HAMMOUDI Mohamed Yacine

signature

Cachet et signature

REMERCIEMENTS

*J'exprime mes remerciements et ma profonde gratitude, avant tout au **ALLAH** qui m'a*

Donné la force, la volonté et la patience durant mes années d'études et surtout pendant la

Réalisation de ce modeste travail.

*Egalement, j'adresse avec mes agréables remerciements à **M^{me} ABDEDAJEM** Sabrina pour*

avoir accepté de m'encadrer, et m'orienter avec abnégation et m'avoir consacré une part de

son précieux temps, et pour son expertise et son support tout au long de mon travail.

Je tiens à adresser mes vifs et sincères remerciements aux membres de jury et à tous les enseignants du département de génie électrique pour leur soutien.

Enfin, j'adresse avec mes plus vifs remerciements à toute ma famille et mes amis, qui m'ont

Toujours me soutenue et m'encouragé.



DEDICACE

Je dédie ce modeste travail à mes chers parents, qui ont consacré leur existence à bâtir la mienne, pour leur soutien, patience et soucis de tendresse et d'affection pour tout ce qu'ils ont fait pour que je puisse arriver à ce stade.

*A Mon Cher Père **SALAH KASMIOURI** : Qui est toujours disponible pour nous et prêt à nous aider, je lui confirme mon attachement et mon profond respect.*

*A Ma Chère Mère **DJEMAA KASMIOURI** : Qui m'a encouragé durant toutes mes études, et qui sans elle, ma réussite n'aura pas eu lieu.*

*A Mes Chères Frères : **KARIM, KAMEL, AMRAN** et mes chères sœurs **HOUDA, AICHA, SALSABIL**.*

*A toute ma famille **KASMIOURI**.*

*Une spéciale dédicace à mon amies : **SAMIHA, BESSMA**.*

A tous qui mon connu de loin ou de près, je dédie ce modeste travaille et que dieu vous garde.

AHLAM

Table de matières

Dédicaces	
Remerciements	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Listes des Symboles et Acronymes	
Introduction Générale.....	1
<u>CHAPITRE I : QUALITE D'ENERGIE ELECTRIQUE</u>	
I.1 Introduction.....	3
I.2 Qualité de l'énergie électrique.....	3
I.3 Les perturbations électriques.....	4
I.3.1 Creux et coupures de tension.....	4
I.3.2 Fluctuations de tension.....	5
I.3.3 Déséquilibre du système triphasé de tension.....	6
I.3.4 Variation de fréquence.....	7
I.3.5 Surtensions.....	7
a- Les surtensions temporaires.....	7
b- Les surtensions de manœuvre.....	8
c- Les surtensions atmosphériques.....	8
I.3.6 Harmoniques et inter-harmoniques.....	8
I.3.6.1 Sources des harmoniques.....	9
I.4 Problématique des harmoniques.....	9
I.4.1 Caractérisation des Harmoniques.....	10
I.4.1.1 Origine des harmoniques.....	10
I.4.1.2 Décomposition d'un Courant Distordu Périodique en Série de Fourier....	11
I.4.1.3 Taux Harmonique de Rang n.....	11
I.4.1.4 Taux Global de Distorsion Harmonique.....	12
I.4.1.5 Facteur de Puissance.....	12

I.4.1.6 Facteur de Crête.....	13
I.4.2 Conséquences néfastes des harmoniques.....	13
I.5 Conclusion.....	16
<u>CHAPITRE II : LES SOULUTION DE DIMINUTION DES HARMO NIQUE</u>	
II.1 Introduction.....	17
II.2 Solutions pour améliorer la qualité de l'énergie.....	17
II.2.1 Dépollution des harmoniques.....	17
II.2.1.1 Solutions traditionnelle.....	17
a) Action sur la structure de l'installation.....	18
b) Augmentation de la puissance de court-circuit.....	18
c) Placement d'une inductance de ligne.....	18
d) Compensation de la puissance réactive	18
e) Les filtres passifs.....	18
e.1) Classification des filtres passifs.....	18
e.2) Filtre passif série.....	19
e.3) Filtre passif parallèle.....	19
e.4) Filtre passif amorti.....	20
e.5) Filtre résonant.....	20
II.2.1.2 Solutions Modernes de Dépollution.....	21
a) Filtres Actifs.....	21
a.1) Le Filtre Actif Parallèle (FAP).....	21
a.2) Le Filtre Actif Série (FAS).....	22
a.3) La Combinaison Parallèle-Série Actifs (UPQC).....	23
a.4) Filtre Actif Hybride.....	24
b) Les Convertisseurs à Prélèvement Sinusoïdal.....	24
b.1) Structure de Redresseur Utilisant un Hacheur BOOST.....	25
b.2) Structures de Redresseurs à Injection de Courant.....	26
b.3) Redresseurs MLI.....	27
II.3 Conclusion.....	30
<u>CHAPITRE III: MODELISATION ET SIMULATION DE RESULTAT DE</u>	
<u>LA COMMANDE MLI D'UN REDRESSEUR DE COURANT</u>	
III.1 Introduction.....	31

III.2 redresseur triphasé non commandé.....	31
III.2.1 Schéma de principe.....	31
III.2.2 Simulation d'un Redresseur triphasé à diodes.....	32
A. le schéma de simulation.....	32
B. résultat de simulation.....	33
III.3 Structure et principe de fonctionnement du redresseur triphasé à MLI.....	34
III.3.1 Structure.....	34
III.4 Modélisation du convertisseur.....	35
III.5 Commande d'un redresseur de courant.....	40
III.5.1 Commande par hystérésis.....	40
III.5.1.1 schéma de principe.....	40
a. Principe de fonctionnement de la Commande à Hystérésis.....	40
b. Régulation de la tension du bus continue.....	42
c. Résultats de simulation.....	44
III.6 Conclusion.....	48
Conclusion Générale.....	49
Bibliographie	
Annexes	

Liste des figures

Chapitre I

- Figure I.1** : Creux et coupures de tension.....(5)
- Figure I.2** : Variations rapides de la tension.....(6)
- Figure I.3** : Déséquilibre des tensions.....(6)
- Figure I.4**: Fluctuation de la fréquence.....(7)
- Figure I.5** : Synthèse d'une tension distordue à partir des harmoniques.....(10)

Chapitre II

- Figure II.1**: Filtre passif série.....(19)
- Figure II.2**: Filtre passif parallèle.....(20)
- Figure II.3** : les différents types de filtrage.....(20)
- Figure II.4** : Le Filtre Actif Parallèle.....(22)
- Figure II.5**: Filtre actif série.....(23)
- Figure II.6**: Combinaison parallèle-série des filtres actifs.....(24)
- Figure II.7**: Structure du PFC.....(26)
- Figure II.8**: Schéma synoptique d'un convertisseur AC/DC triphasé à injection de courant.....(27)
- Figure II.9**: Topologie d'un redresseur MLI triphasé de courant.....(28)
- Figure II.10**: Topologie d'un redresseur à *MLI* triphasé de tension.....(29)

Chapitre III

- Figure III.1** : Redresseur double alternance. Montage PD3.....(32)
- Figure III.2** : Schéma de simulation.....(32)

Figure III.3 : Courants absorbés par un redresseur à diodes.....	(33)
Figure III.4 : Analyse spectrale des courants de redresseur à diodes.....	(33)
Figure III.5 : Circuit de puissance du redresseur MLI en pont triphasé.....	(34)
Figure III.6 : Schéma unifilaire d'un pont redresseur MLI connecté au réseau.....	(35)
Figure III.7 : Etats de commutation du pont redresseur MLI.....	(36)
Figure III.8 : Schéma fonctionnel du redresseur MLI dans le référentiel triphasé <i>abc</i>	(39)
Figure III.9 : schéma de commande d'un redresseur de courant par hystérésis.....	(40)
Figure. III.10 : Principes de fonctionnement de modulateur MLI à bande <i>d'hystérésis</i>	(41)
Figure III.11 : Principe de commande par hystérésis.....	(42)
Figure III-12 : Schéma fonctionnel pour la boucle de réglage de tension du bus continu.....	(43)
Figure III.13 : L'allure de la Tension du réseau V_a, V_b et V_c	(44)
Figure III.14 : L'allure de courant I_{abc}	(45)
Figure III.15 : Analyse spectrale des courants de redresseur commandé à hystérésis.....	(45)
Figure III.16 : L'allure de la tension V_{dc} et $V_{d\ ref}$ (V).....	(46)
Figure III.17 : L'allure de courant I_a (A) et la tension de source V_a (v).....	(46)
Figure III.18 : L'allure de courant I_a (A) et le courant de référence $I_{a\ ref}$ (A).....	(47)

Liste des Tableaux

Chapitre III

Tableau III.1 : Valeurs des tension simples selon les états possibles des interrupteur.....(37)

Listes des Symboles et Acronymes

Symboles :

P : Puissance active instantanée ou puissance réelle.

D : puissance déformante.

Q : la puissance réactive.

C : Condensateur du bus continu.

L : L'inductance d'alimentation.

R : Résistance

S : Puissance apparente

L_s : L'inductance de la lingue de réseau

R_s : Résistance de la lingue de réseau

φ :Phase du courant.

α : angle du vecteur de tension de référence.

γ : Secteurs du Contrôle Direct de Puissance.

R_{ch} : Résistance de la charge continue du redresseur à prélèvement sinusoïdal.

i_{ref} : Courant de référence du redresseur

i_A, i_B, i_C : les courants de la source d'alimentation.

I_{red} : Le courant à la sortie de redresseur.

$i_{Aref}, i_{Bref}, i_{Cref}$: les courants de référence.

f : Fréquence de la tension de référence.

f_p : La fréquence de la porteuse

V_A, V_B, V_C : Les tensions triphasées instantané de la source d'alimentation

V_{dc} : La tension de sortie de redresseur.

V_{dref} : La tension de référence.

V_m : L'amplitude de la tension de référence

E : la valeur efficace de f-e-m.

Δi : La bande d'hystérésis

e : Tension instantanée de phase du réseau

Acronymes :

MLI : Modulation de Largeur d'Impulsion

PWM: Pulse Width Modulation

AC/DC: Conversion alternative continue

THD: Total Harmonic Distortion

FP: Facteur de Puissance

FAP : Filtre Actif Parallèle

FAS : Filtre Actif Série

PLL: Phase Locked Loop

PI: Regulateur Proportionnel intégral

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

La qualité de l'énergie électrique désigne plus concrètement la qualité du réseau qu'offre un fournisseur d'énergie (comme le cas de SONELGAZ en Algérie, EDF en France, ...etc). Celle-ci dépend de trois facteurs qui sont la continuité d'alimentation, la qualité de l'onde de tension et la qualité de service. Dans ce travail, nous nous sommes concentrés sur la qualité de l'onde de tension.

La qualité de l'onde de tension désigne les perturbations liées à la forme de l'onde de tension délivrée par le réseau, susceptibles d'altérer le fonctionnement des appareils électriques raccordés au réseau, voire de les endommager. Les types de perturbations identifiés sont par exemple les creux de tension, les surtensions, les variations de fréquence, etc.

Ces dernières années, l'utilisation croissante des dispositifs d'électronique de puissance dans les systèmes électriques a entraîné de plus en plus de problèmes liés aux perturbations ou distorsions harmoniques des réseaux électriques. Le pont redresseur est le convertisseur de puissance le plus largement utilisé. Cette structure qui convertit la tension d'une forme alternative en une forme continue a beaucoup évolué. Les premières topologies étaient basées sur l'utilisation des semi-conducteurs de type diode. Les diodes comme nous le savons sont des composants non commandable (ni à la fermeture ni à l'ouverture). Ce qui rend le fonctionnement d'un pont redresseur à diode très limité. Puis sont venues les ponts redresseurs à thyristors qui avaient la particularité d'être commandable. Cependant, le thyristor comme la diode, laisse passer le courant électrique dans un seul sens, de l'anode vers la cathode. De plus, ce dernier ne conduira que si un courant minimum et positif est fourni à la gâchette.

Sont venu ensuite le développement des semi-conducteurs de type IGBT. Les caractéristiques de ce dernier est qu'ils associent les caractéristique MOS et transistor bipolaire de puissance. Ils cumulent les avantages des deux sans totalement en éliminer les inconvénients. De plus ils sont commandable en tension.

Ces nouveaux convertisseurs AC/DC se distinguent par leur structure et par la manière de gérer les courants absorbés. Ils peuvent être divisés en trois classes : redresseur à diodes

INTRODUCTION GÉNÉRALE

avec correcteur de facteur de puissance (PFC), redresseur à injection de courant et redresseur à MLI de tension ou de courant.

Le mémoire de ce travail, contient trois chapitres

Dans le premier chapitre, nous avons étudié la qualité de l'énergie électrique, Les perturbations électriques, les problématiques des harmoniques et les conséquences néfastes des harmoniques.

Dans le deuxième chapitre, nous avons étudié les solutions pour améliorer la qualité de l'énergie, solutions traditionnelle et solutions modernes de dépollution.

Dans le dernier chapitre, nous avons étudié la modélisation et la simulation de la commande d'un redresseur à absorption sinusoïdale de courant associé à une commande par hystérésis, en présentant les détails de chaque partie constituant ces commandes.

***CHAPITRE I : QUALITE D'ENERGIE
ELECTRIQUE***

I.1 Introduction

La qualité de l'énergie électrique concerne tous les acteurs du domaine énergétique qu'ils seront gestionnaires de réseaux, fournisseurs, producteurs ou consommateurs d'électricité

La qualité de l'énergie est un concept assez large qui recouvre à la fois la qualité de la fourniture électrique, celle de l'onde de tension et la qualité des courants. L'amélioration de la qualité de l'énergie sur les réseaux de distribution électrique, devient de nos jours, un enjeu important tant pour les gestionnaires des réseaux que pour les exploitants de l'énergie électrique.

De plus, la pollution harmonique du réseau de distribution de l'énergie électrique constitue actuellement un problème majeur surtout en industrie. La présence de ce phénomène gênant est due principalement aux charges non linéaires. En effet, les charges non linéaires, créant des courants non sinusoïdaux et/ou déphasés par rapport à la tension, engendrent des pollutions harmoniques, une augmentation de la valeur du courant efficace, une accélération du vieillissement de certains matériels. Ces charges non linéaires ou polluantes sont principalement les convertisseurs statiques d'électronique de puissance tels que les redresseurs à diodes ou thyristors, les gradateurs, onduleur ,..... etc.

Ce chapitre a pour objectif d'étudier, la Qualité de l'énergie électrique et les perturbations électriques : tel que les creux de tension, le flicker, la surtension, le déséquilibre ou les harmoniques. Est une étude non exhaustive sur la pollution harmonique dans le réseau électrique et leurs effets sur les réseaux électriques.

I.2 Qualité de l'énergie électrique

La qualité de l'énergie est une notion assez large qui recouvre à la fois la qualité de la fourniture électrique, la qualité de l'onde de tension et la qualité des courants. Les principaux phénomènes pouvant l'affecter sont d'une part les variations lentes : creux de tension, coupures, surtensions, déséquilibres. La qualité des courants reflète par contre la possibilité des charges à fonctionner sans perturber ni réduire l'efficacité du système de puissance. C'est pourquoi certains considèrent que la qualité de l'électricité se réduit à la qualité de la tension [1].

La qualité de l'alimentation électrique ou qualité de l'onde fait référence à la mesure du degré de conformité d'une source d'alimentation électrique par rapport à un certain nombre de

CHAPITRE I: QUALITE D'ENERGIE ELECTRIQUE

critères ou de normes à caractère quantitatif et absolu. L'énergie électrique est délivrée sous forme d'un système triphasé de tensions sinusoïdales. Les paramètres caractéristiques de ce système sont les suivants :

- la fréquence,
- l'amplitude,
- la forme d'onde qui doit être sinusoïdale,
- la symétrie du système triphasé, caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et de leurs déphasages relatifs [2].

I.3 Les perturbations électriques

L'énergie électrique est délivrée sous forme de tension caractérisée par sa fréquence, son amplitude et sa forme d'onde qui doit être sinusoïdale. La qualité de la tension peut être affectée, soit par des perturbations aléatoires à caractère accidentel, soit par des perturbations existantes en permanence ou pendant des instants de durées bien déterminées [3]. Ces perturbations sont classées comme suit :

I.3.1 Creux et coupures de tension

Un creux de tension est une baisse brutale de la tension en un point d'un réseau d'énergie électrique, à une valeur comprise (par convention) entre 90 % et 1% (CEI 61000-2-1, CENELEC EN 50160), ou entre 90 % et 10 % (IEEE 1159) d'une tension de référence (U_{ref}) suivie d'un rétablissement de la tension après un court laps de temps compris entre la demi-période fondamentale du réseau (10 ms à 50 Hz) et une minute

Les coupures sont un cas particulier de creux de tension de profondeur, supérieures à 90 % (IEEE) ou 99 % (CEI-CENELEC); elle est caractérisée uniquement par sa durée (inférieure à 3 minutes). Les coupures longues sont supérieures à 3 minutes. Les creux de tension sont dus à l'apparition de défauts sur l'installation ou sur le réseau de distribution.

Les coupures brèves sont généralement la cause de manœuvres des automatismes des réseaux de distribution (réenclencher, isolations de défaut) [4].

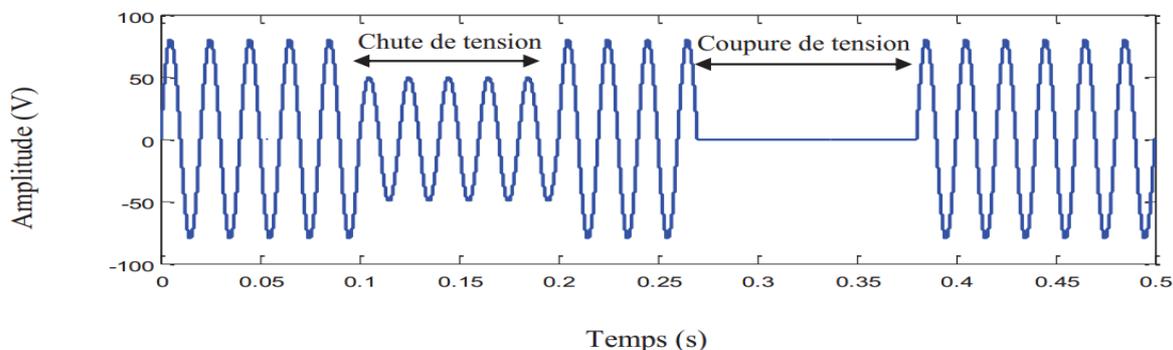


Figure I.1 : Creux et coupures de tension.

▪ Origine :

Les creux de tension et les coupures brèves sont principalement causés par des phénomènes conduisant à des courants élevés qui provoquent à travers les impédances des éléments du réseau une chute de tension d'amplitude d'autant plus faible que le point d'observation est électriquement éloigné de la source de la perturbation.

Les creux de tension et les coupures brèves ont différentes causes :

- des défauts sur le réseau de transport (HT) de distribution (BT et MT) ou sur l'installation elle-même
- la commutation de charges de puissance importante (moteurs asynchrones, fours à arc, machines à souder, chaudières...) [4].

I.3.2 Fluctuations de tension

Les fluctuations de tension sont des variations périodiques ou erratiques de l'enveloppe de la tension qui se produisent à des intervalles de temps de quelques centièmes de secondes. L'amplitude de la tension doit se situer dans une bande de $\pm 10\%$ de sa valeur nominale. Ces fluctuations entraînent des variations de flux lumineux pour les lampes à incandescence créant un papillotement de la lumière [5]. Comme indiqué dans la Figure (I.2) suivant.

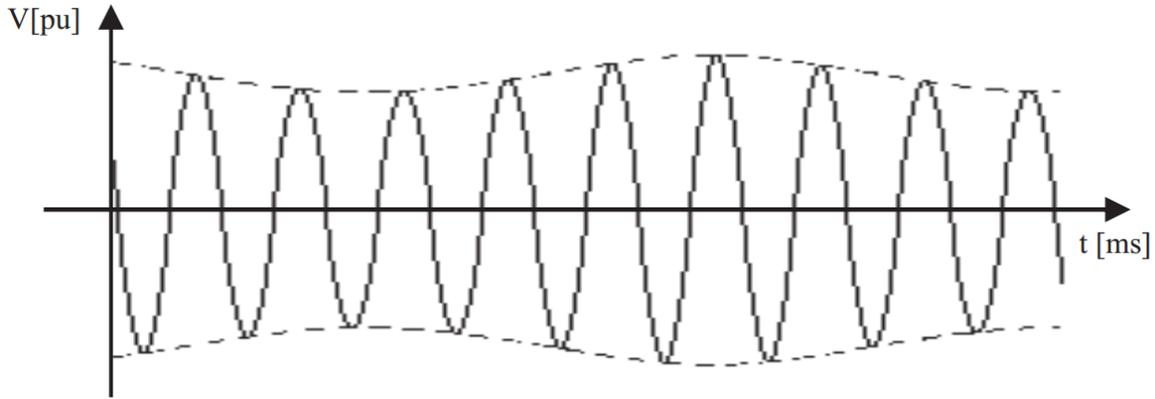


Figure I.2 : Variations rapides de la tension.

I.3.3 Déséquilibre du système triphasé de tension

Lorsque les trois tensions ne sont pas identiques en amplitude et/ou ne sont pas décalées d'un angle de 120° les unes par rapport aux autres, on parlera de déséquilibre du système triphasé. Un réseau électrique triphasé équilibré alimentant un récepteur électrique triphasé non équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation des courants non équilibrés dans les impédances du réseau [6]. Le degré de déséquilibre est défini en utilisant la méthode des composantes de Fortescue par le rapport de la composante inverse ($U_{1,i}$) (ou homopolaire ($U_{1,0}$)) du fondamental à celui de la composante directe ($U_{1,d}$) du fondamental [7]. Comme indiqué dans les équations suivantes (I.1) et (I.2).

$$\Delta U_i = \frac{|U_{1,i}|}{|U_{1,d}|} \quad (\text{I.1})$$

et

$$\Delta U_0 = \frac{|U_{1,0}|}{|U_{1,d}|} \quad (\text{I.2})$$

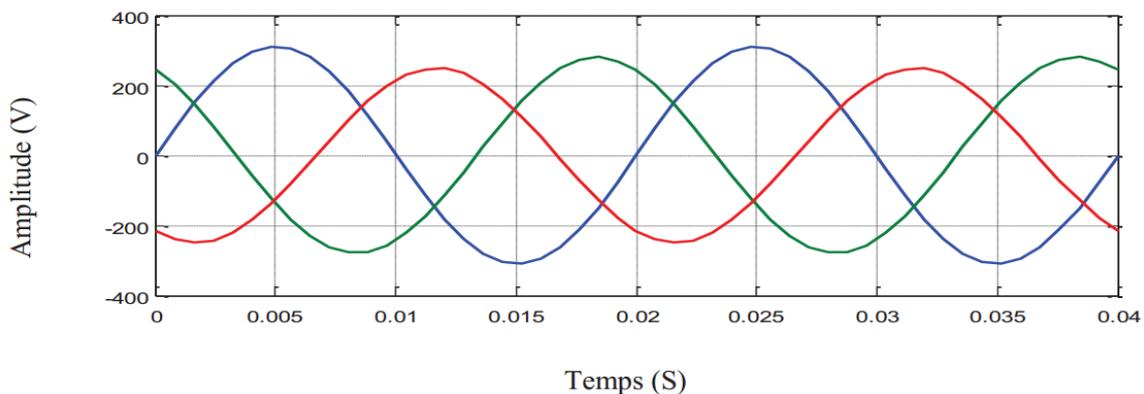


Figure I.3 : Déséquilibre des tensions.

I.3.4 Variation de fréquence

Les réseaux de distributions ou de transports ont une fréquence constante, sa variation est très rare sauf dans des circonstances exceptionnelles, comme dans le cas de certains défauts graves sur le réseau. Dans les conditions normales d'exploitations, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle $50 \text{ Hz} \pm 1 \%$ [8].

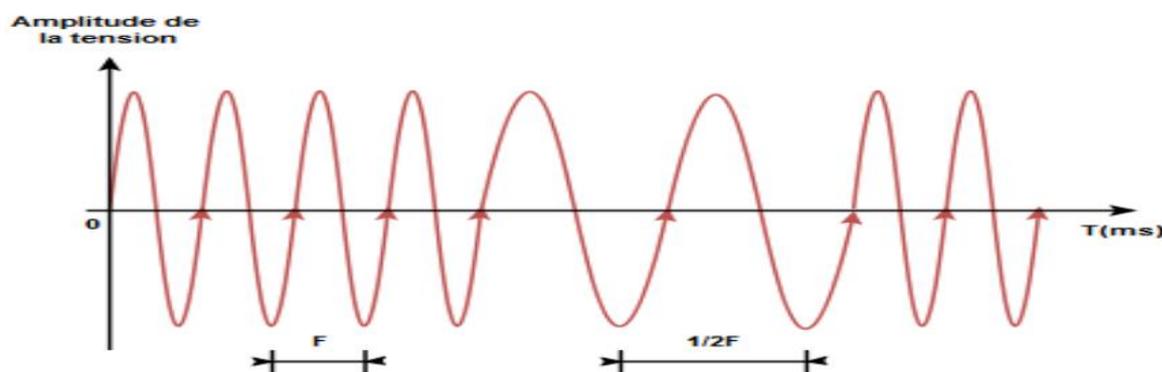


Figure I.4: Fluctuation de la fréquence.

I.3.5 Surtensions

Toute tension appliquée à un équipement dont la valeur de crête sort des limites d'un gabarit défini par une norme ou une spécification est une surtension. Les surtensions sont de trois natures [4].:

- temporaires (à fréquence industrielle),
- de manœuvre,
- d'origine atmosphérique (foudre).

a- Les surtensions temporaires

Par définition elles sont à la même fréquence que celle du réseau (50 Hz ou 60 Hz). Elles ont plusieurs origines :

- Un défaut d'isolement :

Lors d'un défaut d'isolement entre une phase et la terre dans un réseau à neutre impédant ou isolé, la tension des phases saines par rapport à la terre peut atteindre la tension composée.

- La Ferro résonance :

Il s'agit d'un phénomène oscillatoire non linéaire rare, souvent dangereux pour le matériel, se

CHAPITRE I: QUALITE D'ENERGIE ELECTRIQUE

produisant dans un circuit comportant un condensateur et une inductance saturable.

- La rupture du conducteur de neutre :

Les appareils alimentés par la phase la moins chargée voient leur tension augmenter (parfois jusqu'à la tension composée).

- La surcompensation de l'énergie réactive :

Les condensateurs shunt produisent une augmentation de la tension depuis la source jusqu'au point où ils se trouvent.

b- Les surtensions de manœuvre

Elles sont provoquées par des modifications rapides de la structure du réseau (ouverture d'appareils de protection...).

c- Les surtensions atmosphériques

La foudre est un phénomène naturel apparaissant en cas d'orage. On distingue les coups de foudre directs (sur une ligne ou sur une structure) et les effets indirects d'un coup de foudre (surtensions induites et montée en potentiel de la terre). Également harmoniques. Les tensions peuvent également contenir des signaux permanents mais non-périodiques, alors dénommés bruits.

I.3.6 Harmoniques et inter-harmoniques

On appelle harmoniques des tensions ou courants non sinusoïdaux, les ondes dont la fréquence est un multiple entier de la fréquence fondamentale du réseau. En général, les harmoniques pairs sont négligeables et seuls les harmoniques impairs sont d'une certaine importance. Les principaux harmoniques présents sont le 3^e, 5^e, 7^e et 9^e. La non linéarité des récepteurs va générer un courant dit « déformé », principalement les sources dépollution harmonique sont les convertisseurs statiques d'énergie (gradateur, onduleur, hacheur et les redresseur). Depuis les dernières décennies, il y a une forte augmentation des charges non-linéaires connectées au réseau électrique telles que les : ordinateurs, télécopieurs, lampes à décharge, fours à arc, chargeurs de batterie, systèmes de l'électronique de puissance, alimentations électroniques. [10] [11].

Les conséquences sur les systèmes d'alimentation électrique deviennent préoccupantes du fait de l'utilisation croissante de ces équipements, mais aussi de l'utilisation des composants de l'électronique dans presque toutes les charges électriques. En effet, une charge non-linéaire

impose au réseau un courant discontinu, déformé avec une amplitude très importante et son fondamental est déphasé par rapport à la tension du réseau. Cette discontinuité s'accompagne de deux inconvénients perturbant le réseau d'alimentation :

- La consommation de l'énergie réactive.
- L'injection sur le réseau de courants harmoniques.

Ce qui se traduit par un facteur de puissance très faible de l'installation globale. La présence de ces harmoniques génère des effets négatifs sur la quasi-totalité des composants du système électrique, en créant de nouvelles contraintes diélectriques, thermiques et/ou mécaniques ainsi que des perturbations électromagnétiques et acoustiques importantes. [10] [12].

Les inter-harmoniques sont superposées à l'onde fondamentale mais ne sont pas des multiples entiers de la fréquence du réseau. [6].

I.3.6.1 Sources des harmoniques

La cause principale de l'existence des harmoniques de tension est l'injection des courants non sinusoïdaux par des charges non linéaires, ou des charges déséquilibrées branchées au réseau. Une charge est dite linéaire si, alimentée par une tension sinusoïdale, elle consomme un courant sinusoïdal. Cependant, le courant et la tension peuvent être déphasés. Les charges linéaires couramment utilisées sont constituées de résistances, de capacités et d'inductances. Une charge est dite non-linéaire lorsque la relation entre la tension et le courant n'est plus linéaire. Un tel récepteur alimenté par une tension sinusoïdale, consomme un courant non sinusoïdal. Par la suite, nous nous restreindrons aux charges non-linéaires triphasées, qui consomment un courant périodique, de même période que celle de la tension [6].

I.4 Problématique des harmoniques

La problématique des harmoniques dans le réseau électrique, également appelée pollution harmonique, n'est pas un phénomène nouveau. Néanmoins, du fait que de plus en plus de charges non linéaires se connectent au réseau, la problématique des harmoniques est devenue très répandue. Les charges non linéaires provoquent une distorsion des courants et donc des tensions, ce qui peut entraîner un mauvais fonctionnement des dispositifs raccordés au réseau. D'où, l'intérêt d'éliminer ou de minimiser ces harmoniques [13].

CHAPITRE I: QUALITE D'ENERGIE ELECTRIQUE

Un récepteur d'énergie est considéré par le réseau électrique comme une charge perturbatrice s'il absorbe des courants non sinusoïdaux ou des courants déséquilibrés ou s'il consomme de la puissance réactive. Les deux premiers types de perturbations peuvent déformer ou déséquilibrer les tensions du réseau lorsque l'impédance de celui-ci n'est pas négligeable. Le troisième réduit la capacité de production ou de transmission de la puissance active des générateurs, des transformateurs et des lignes électriques [14].

Les harmoniques de courant, une fois injectés par des charges non linéaires, se propagent à travers le réseau électrique en affectant la forme d'onde des tensions aux différents points du réseau. Cette propagation n'est limitée que par les bifurcations (points de division des courants) et les impédances du réseau qui dépendent généralement de la fréquence des courants harmoniques. La présence des harmoniques de courant se révèle essentiellement à travers leurs effets sur la tension du réseau [13].

I.4.1 Caractérisation des Harmoniques

Différentes grandeurs sont définies pour quantifier les perturbations harmoniques. Parmi celles-ci les plus utilisées sont :

1.4.1.1 Origine des harmoniques

Les harmoniques sont des perturbations permanentes affectant la forme d'onde de la tension du réseau. Ces perturbations résultent de la superposition, sur l'onde fondamentale, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples de celle du fondamental [2]. En général, les harmoniques pairs sont négligeables et seuls les harmoniques impairs existent [1]. La figure I.5 illustre un exemple de forme d'onde d'une tension distordue contenant, en plus du terme fondamental de fréquence 50Hz, trois harmoniques de rang impair 5, 7 et 11.

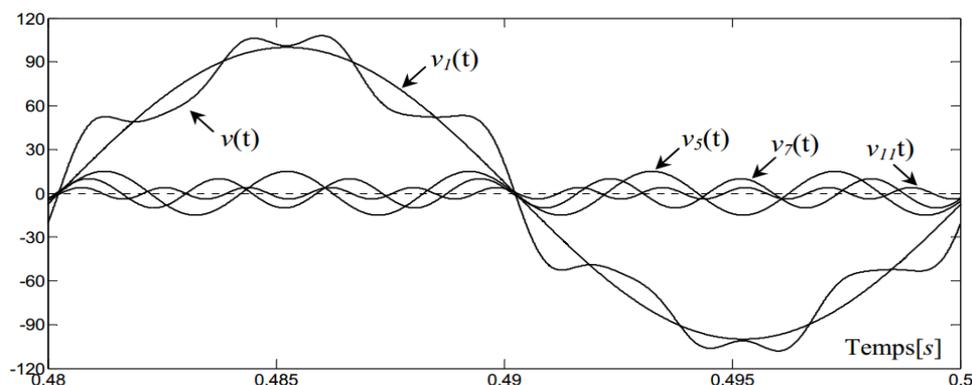


Figure I.5 : Synthèse d'une tension distordue à partir des harmoniques.

I.4.1.2 Décomposition d'un Courant Distordu Périodique en Série de Fourier

Avec les charges non-linéaires, les courants ne sont pas sinusoïdaux et peuvent être considérés comme la somme d'un courant sinusoïdal de 50/60Hz appelé fondamental et d'une série de courants sinusoïdaux de fréquences multiples de la fréquence fondamentale appelés harmoniques. Le passage de ces courants harmoniques dans les impédances du réseau pollue les consommateurs alimentés par le même réseau électrique. Le courant alternatif périodique déformé absorbé par une charge non-linéaire peut être décomposé en série de Fourier comme suit :

$$i(\omega t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \sin(n\omega t) + b_n \cos(n\omega t)) \tag{I.3}$$

Avec : a_0, a_n, b_n sont les coefficients de Fourier.

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i(\omega t) d\omega t \tag{I.4}$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i(\omega t) \sin(n\omega t) d\omega t \tag{I.5}$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i(\omega t) \cos(n\omega t) d\omega t \tag{I.6}$$

L'expression du courant d'une charge non-linéaire est :

$$i(\omega t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_n \cos(n\omega t + \varphi_n) \tag{I.7}$$

Où : n : est un nombre entier.

φ_n : est le déphasage de la composante harmonique à l'instant initial ($t=0$).

D'une autre manière :

$$i(\omega t) = I_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \tag{I.8}$$

$$I_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \text{ Et } \varphi_n = \text{Arctg} \left(\frac{a_n}{b_n} \right) \tag{I.9}$$

I.4.1.3 Taux Harmonique de Rang n

Le taux harmonique (tension ou courant) est défini par le rapport entre l'amplitude de la composante harmonique d'ordre n et l'amplitude de la composante du terme fondamental.

$$THD_n = \frac{c_n}{c_1} \quad (I.10)$$

Où C_n : représente l'amplitude la composante harmonique de rang n ;
 C_1 : représente l'amplitude la composante fondamentale.

En général, la valeur de chaque harmonique est exprimée par son taux individuel (en Pourcentage du fondamental).

I.4.1.4 Taux Global de Distorsion Harmonique

Notre étude se limite au cas où la source de tension est sinusoïdale et/ou le courant absorbé par la charge contient des composantes harmoniques. Dans ces conditions, le taux global de distorsion harmonique est bien adapté pour déterminer le niveau de pollution harmonique sur les réseaux électriques. Le THD s'exprime par rapport à la fréquence fondamentale et caractérise l'influence des harmoniques sur l'onde de courant déformée. Il est donné par l'expression suivante :

$$THD_i = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{I_n}{I_1}\right)^2} \quad (I.11)$$

D'où I_1 est la valeur efficace du courant fondamental et I_n les valeurs efficaces des différentes harmoniques de courant.

I.4.1.5 Facteur de Puissance

Normalement, pour un signal sinusoïdal le facteur de puissance est donné par le rapport Entre la puissance active P et la puissance apparente S .

$$FP = \frac{P}{S} \quad (I.12)$$

Les générateurs, les transformateurs, les lignes de transport et les appareils de contrôle et de mesure sont dimensionnés pour la tension et le courant nominaux. Une faible valeur du facteur de puissance se traduit par une mauvaise utilisation de ces équipements. Il est donc possible de caractériser les harmoniques par leur participation dans la puissance apparente. Nous utilisons alors la notion de puissance déformante D , d'où la puissance apparente dans le cas d'un réseau triphasé équilibré sera exprimée par la formule suivante [14] :

$$S = 3\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2} \cdot \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} = 3VI \quad (\text{I.13})$$

I, V : Valeurs efficaces des courants et des tensions respectivement.

V_n : Tension d'harmoniques d'ordre n

I_n : Courant d'harmoniques d'ordre n

La puissance active p, la puissance réactive Q et la puissance déformante D sont donnée par les relations suivantes :

$$P = 3VI_1 \cos \varphi_1 \quad (\text{I.14})$$

$$Q = 3VI_1 \sin \varphi_1 \quad (\text{I.15})$$

$$D = \sqrt{S^2 - Q^2 - P^2} \quad (\text{I.16})$$

Le facteur de puissance FP est exprimé par l'expression suivante :

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{3VI_1 \cos \varphi_1}{3VI} \quad (\text{I.17})$$

I.4.1.6 Facteur de Crête

Le facteur de crête est le rapport entre la valeur de crête du courant ou de la tension et la valeur efficace

$$F_C = \frac{X_{mas}}{X_{eff}} \quad (\text{I.18})$$

Pour un signal sinusoïdal, ce facteur est donc égal à $\sqrt{2}$

Pour un signal non-sinusoïdal, il peut être soit inférieur, soit supérieur à $\sqrt{2}$

Ce facteur est plus particulièrement utile pour attirer l'attention sur la présence des valeurs de crête exceptionnelles par rapport à la valeur efficace. Un facteur de crête très élevé signifie des surintensités ponctuelles importantes. Ces surintensités, détectées par les dispositifs de protection, peuvent être à l'origine de déclenchements intempestifs [16].

1.4.2 Conséquences néfastes des harmoniques

Les courants et les tensions harmoniques ont des effets néfastes sur le fonctionnement, la rentabilité et la durée de vie des équipements électriques. Bien que les susceptibilités des

CHAPITRE I: QUALITE D'ENERGIE ELECTRIQUE

différents équipements et appareils électriques, raccordés à un réseau pollué, soient très diversifiées, on distingue deux sortes d'effets possibles [15] :

- **Les effets quasi-instantanés** : concernent certains types d'appareillage, tels que l'électronique de puissance, calculateurs, relais, systèmes de contrôle et régulation...etc. La présence des harmoniques sur le réseau provoque le déplacement du passage par zéro et des modifications de la valeur crête de l'onde ;
- **Les effets à terme** : se rapportent essentiellement aux machines tournantes, aux transformateurs et aux condensateurs, ce qui se manifeste par des échauffements supplémentaires et l'augmentation du niveau sonore. Il en découle la destruction de matériel ou plus fréquemment une diminution de leur durée de vie par surcharge thermique.

La liste suivante donne une idée de l'impact des harmoniques sur certains équipements à usage fréquent qui font partie intégrante du réseau électrique, tels que les :

- ❖ **Alternateurs** : pertes supplémentaires dans les enroulements statoriques et dans les amortisseurs liés à l'augmentation de la valeur efficace du courant absorbé. Ces pertes provoquent un échauffement supplémentaire et réduisent également le rendement de ces machines ;
- ❖ **Câbles électriques** : pertes Joule supplémentaires, surtout dans les câbles de retour du neutre où circulent les courants harmoniques homopolaires et corrosion des câbles en aluminium sous l'effet de la circulation de courants harmoniques pairs associés à une composante continue. La présence des harmoniques dans le réseau diminue aussi la capacité de transport en puissance active des lignes
- ❖ **Transformateurs** : ils sont les constituants les plus directement affectés par les courants harmoniques. Ces derniers produisent des pertes additionnelles dans les enroulements. Ces pertes ne sont pas seulement dues à l'effet Joule pelliculaire, mais aussi à des courants induits dans les bobinages, le noyau et les pièces métalliques par les composantes à hautes fréquences des champs de fuite
- ❖ **Moteurs à courant alternatif** : la déformation de la forme d'onde de la tension du réseau, due à l'interaction entre les courants harmoniques et l'impédance équivalente du réseau, influe sur le fonctionnement des machines électriques à courant alternatif en général et sur

CHAPITRE I: QUALITE D'ENERGIE ELECTRIQUE

celui des moteurs asynchrones en particulier (pertes supplémentaires dans le fer et les enroulements et pulsation du couple)

- ❖ **Condensateurs** : ils sont aussi très affectés par les courants harmoniques. Les condensateurs branchés en parallèle sur les réseaux pour la compensation de la puissance réactive (correction du facteur de puissance) ont des impédances d'autant plus faibles que la fréquence est élevée. Les courants harmoniques se superposent au courant fondamental et causent des pertes supplémentaires qui peuvent excéder la capacité thermique des condensateurs et réduire considérablement leur durée de vie. De plus, des phénomènes de résonance peuvent survenir et soumettre les condensateurs à des surtensions, lesquelles sont susceptibles de les dégrader, voire de perforer leur isolation
- ❖ **Équipements à base d'électronique de puissance** : dysfonctionnement lié à la déformation de la tension qui peut créer des faux passages par zéro (perte de synchronisation).
- ❖ **Ordinateurs** : troubles fonctionnels liés à la distorsion de la tension du réseau ;
- ❖ **Réseaux de télécommunication** : génération de bruits importants liés au couplage électromagnétique entre les lignes de puissance et les circuits de communication. Dans des cas particuliers, surtout lors de résonances, une partie des réseaux de télécommunication peut être rendue inutilisable
- ❖ Surcharge des conducteurs de neutre en raison de la sommation des harmoniques
- ❖ Surcharge et vieillissement des condensateurs de compensation d'énergie réactive

I.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé la qualité de l'onde de tension désignant les perturbations liées à la forme de l'onde de tension délivrée par le réseau, susceptibles d'altérer le fonctionnement des appareils électriques raccordés au réseau, voire de les endommager. Nous avons présenté les différents types de perturbations identifiés sont par exemple les creux de tension, les surtensions, les variations de fréquence, Fluctuations de tension, les harmoniques, etc.

Dans ce contexte, nous avons pu mettre en évidence les harmoniques et Effets des harmoniques sur le réseau électrique, et nous travaillons sur trouvent des solutions pour l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique. C'est pour cela on a recouru solutions dans le chapitre deux.

***CHAPITRE II : LES SOLUTIONS DE
DIMINUTION DES HARMONIQUE***

II.1 Introduction

Ce chapitre préliminaire nous permet d'introduire et de présenter une étude non exhaustive sur la pollution harmonique dans le réseau électrique et les différents moyens de dépollution.

Nous avons fait une étude exposons les différentes techniques possibles de dépollution harmonique, traditionnelles et modernes. Nous montrerons aussi l'utilité et le rôle primordial de l'électronique de puissance dans le processus de dépollution et d'amélioration de la qualité de l'énergie électrique.

II.2 Solutions pour améliorer la qualité de l'énergie

Le choix de la solution la plus appropriée dépend des caractéristiques de l'offre au niveau du point de connexion, les exigences de la charge et de l'économie [17]. Il existe deux possibilités pour l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique, l'une est appelée conditionnement de la charge qui consiste à rendre les équipements du processus industriel moins sensibles aux problèmes de la qualité de l'énergie, en leur permettant ainsi de les surmonter, l'autre possibilité réside dans l'installation d'un dispositif de conditionnement capable de minimiser ou d'empêcher les perturbations provenant du réseau [18].

II.2.1 Dépollution des harmoniques

Les systèmes d'électronique de puissance utilisés pour l'amélioration de la qualité de l'énergie sont essentiellement des systèmes de compensation. Ils travaillent en combinaison avec le réseau, en superposant leur énergie à celle de ce dernier [26]. Deux types de solutions sont envisageables. La première consiste à utiliser des convertisseurs statiques peu ou moins polluants, tandis que la seconde réalise un filtrage des composantes harmoniques. Deux groupes de solutions de dépollution pour compenser toutes les perturbations peuvent être distingués: les solutions traditionnelles et les solutions modernes [19].

II.2.1.1 Solutions traditionnelle

Ce sont des techniques qui doivent être connues par tous les électriciens. Elles apportent une solution facile et rapide pour certains cas de perturbations bien localisées et utilisent des composants passifs (inductances, condensateurs, transformateurs) et/ou des branchements qui modifient le schéma de l'installation. Plusieurs solutions existent pour limiter la propagation et l'effet des harmoniques dans les réseaux électriques [7] :

CHAPITRE II : LES SOLUTIONS DE DIMINUTION DES HARMONIQUES

a) Action sur la structure de l'installation :

Il est souhaitable d'alimenter un grand pollueur par un transformateur à part, afin de le séparer d'un récepteur sensible. Face à un pollueur moyen il est préférable d'effectuer l'alimentation par des câbles distincts au lieu de les connecter en parallèle. Une distribution en étoile permet le découplage par les impédances naturelles et/ou additionnelles [7].

b) Augmentation de la puissance de court-circuit :

La puissance harmonique augmente lorsque la puissance de court-circuit diminue si l'on ne prend pas en compte les phénomènes de résonance [20]. La diminution de l'impédance totale en amont de la charge non-linéaire permet de réduire la tension créée par les harmoniques de courant, et donc de diminuer le taux de distorsion harmonique en tension au point de raccordement. En revanche, les courants harmoniques ne sont pas atténués [10].

c) Placement d'une inductance de ligne :

Dans le but de limiter la prolifération des effets nocifs dans le réseau, il est possible de limiter les courants harmoniques de certains convertisseurs. Cette solution est utilisée pour les entraînements à vitesse réglable (variateurs de vitesse) et les redresseurs triphasés. Elle consiste à introduire une inductance série en amont d'une charge non linéaire. La distorsion en courant est divisée approximativement par deux [21].

d) Compensation de la puissance réactive :

La puissance réactive est majoritairement consommée par les moteurs asynchrones et plus récemment par des dispositifs à base d'électronique de puissance. Différentes méthodes de compensation sont utilisées pour relever le facteur de puissance [11]. La plus simple consiste à placer des batteries de condensateurs en parallèle avec le réseau, à proximité des charges qui ont un mauvais facteur de puissance pour la compensation locale ou près d'un transformateur d'alimentation pour la compensation globale [22].

e) Les filtres passifs :

e.1) Classification des filtres passifs :

Les solutions conventionnelles aux problèmes de distorsion harmonique existent depuis longtemps. Le filtrage passif est la plus simple solution conventionnelle pour atténuer la distorsion harmonique. Les filtres passifs sont des éléments à base d'inductance, capacité et résistance configurés et réglés pour contrôler les harmoniques [23]. On peut classer les filtres passifs suivant leur fréquence de résonance, leur mode de connexion et leur emplacement sur le réseau.

CHAPITRE II : LES SOLUTIONS DE DIMINUTION DES HARMONIQUES

Cela permet de définir deux grands modes de filtres passifs: les filtres séries utilisés pour les charges génératrices de tensions harmoniques et les filtres parallèles utilisés dans le cas des charges génératrices de courants harmoniques et suivant le modèle choisi, les harmoniques peuvent être : précisément bloqués par une grande impédance série entre le convertisseur, déviés par une faible impédance en parallèle ou une combinaison des deux [7].

e.2) Filtre passif série :

Une façon d'atténuer les harmoniques générées par les charges non linéaires est d'introduire un filtre passif série Figure(II.1), dans l'alimentation d'entrée ligne de sorte que le filtre offre une impédance élevée à la circulation des harmoniques à partir de la source à la charge non-linéaire. Depuis le filtre passif série est accordé sur une fréquence particulière, il offre une impédance élevée à sa seule fréquence d'accord. Selon la propriété physique de L et C choisie, il existe généralement une bande étroite autour de la fréquence d'accord lorsque l'impédance reste élevée [24].

Figure II.1:

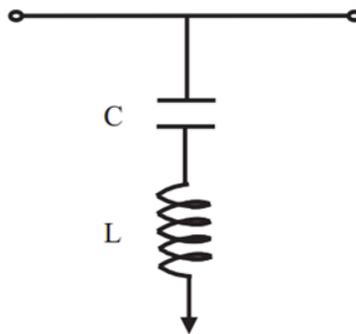


Figure II.1:Filtre passif série.

e.3) Filtre passif parallèle :

Le filtre passif parallèle est montré sur la Figure (II.2) Il est constitué d'une inductance en série avec un condensateur.

Le filtre passif parallèle a un comportement inductif pour les fréquences inférieures à la fréquence fondamentale et un comportement capacitif pour les fréquences supérieures à la fréquence fondamentale, ce qui est un avantage majeur pour le contrôle du courant dans l'inductance [25].

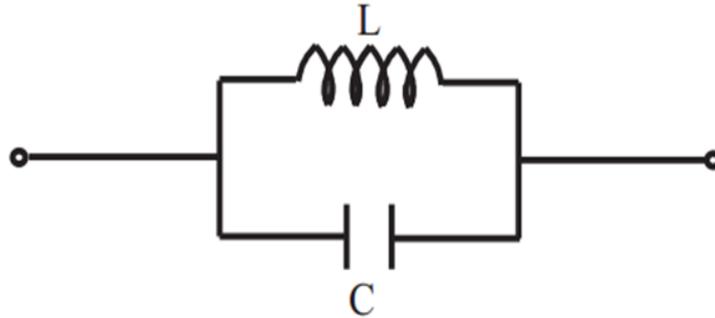


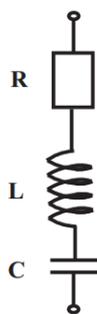
Figure II.2: Filtre passif parallèle.

e.4) Filtre passif amorti :

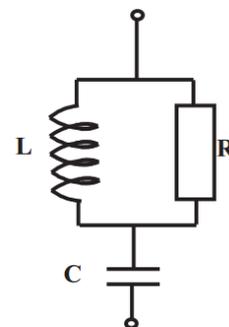
Le filtre amorti peut réduire le risque de résonance non souhaitée, et permet de réduire considérablement la taille du filtre passif, en fonctionnant sur une large gamme de fréquence. On distingue trois types de filtre amorti : le filtre de premier ordre est très peu utilisé car il exige une grande capacité et provoque des pertes de puissance élevées. Les filtres de deuxième et troisième ordres sont plus performants [7].

e.5) Filtre résonant :

Le filtre passif résonnant est constitué d'un circuit résonnant composé d'un condensateur et d'une inductance en série accordés sur la fréquence de l'harmonique que l'on veut éliminer. Ce filtre possède une impédance faible pour l'harmonique concerné et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau [7].



a) Filtre passif résonnant



b) Filtre passif amorti

Figure II.3 : les différents types de filtrage

II.2.1.2 Solutions Modernes de Dépollution

L'exploitation de la bonne qualité d'énergie électrique avec un faible coût a fait l'objet d'une demande croissante de la part des industriels. Le but principal des chercheurs dans le domaine de l'électronique de puissance est de satisfaire les industriels par l'utilisation des solutions plus efficaces et économiques. Les progrès remarquables réalisés d'une part dans le domaine des composants semi-conducteurs, comme les IGBT, IGCT, GTO et MOSFET, ainsi que la maîtrise de leur mise en œuvre et d'autre part l'existence de nouvelles méthodes de traitement analogique et numérique du signal, ont permis l'émergence de moyens modernes et efficaces pour faire face aux différentes perturbations (harmoniques, puissance réactive, fluctuations, creux de tension) affectant les systèmes électriques [27]. Parmi ces moyens modernes, nous pouvons citer :

- Les filtres actifs de puissance "Active Power Filters (APF)" ;
- Les convertisseurs à prélèvement sinusoïdal.

En raison de son importance, nous aborderons dans cette thèse ces deux points.

a) Filtres Actifs

Les solutions traditionnelles de dépollution ne répondant plus à l'évolution des réseaux électriques et des charges à protéger. Pour fournir aux consommateurs une bonne qualité de l'énergie électrique, même dans les conditions de fonctionnement les plus perturbées, les filtres actifs de puissance (Active Power Filters) sont proposés comme des solutions avancées de dépollution des réseaux électriques. En effet, ces solutions 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 [28]. En fonction de leur mode de connexion au réseau, on distingue :

a.1) Le Filtre Actif Parallèle (FAP)

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau comme le montre la figure (II.4) est le plus souvent commandé comme un générateur de courant. Il injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci. Le courant du côté réseau est alors sinusoïdal. Ainsi l'objectif du FAP consiste à empêcher les courants perturbateurs (harmoniques, réactifs et déséquilibrés) produits par des charges polluantes de circuler à travers l'impédance du réseau, située en amont du point de connexion du filtre actif.

CHAPITRE II : LES SOLUTIONS DE DIMINUTION DES HARMONIQUES

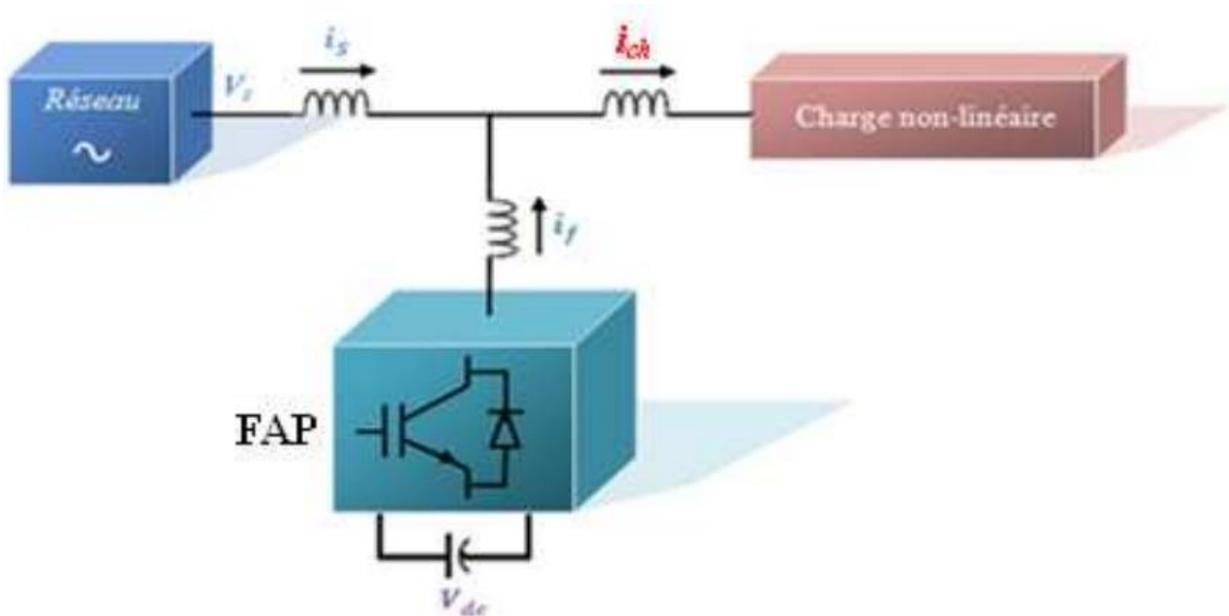


Figure II.4 : Le Filtre Actif Parallèle

Ce filtre peut être utilisé selon mode de fonctionnement [28] :

✓ **Filtre adaptatif**

Ce filtre permet d'identifier lui-même les harmoniques et il s'adapte automatiquement à leur éventuelle évolution, sa commande lui permet de générer en temps réel des courants harmoniques en opposition de phase.

a.2) Le Filtre Actif Série (FAS)

Dans cette configuration, le filtre est placé en série sur le réseau comme le montre la figure. (II.5) Il se comporte comme une source de tension qui s'oppose aux tensions Perturbatrices (creux, déséquilibre, harmonique) venant de la source et également à celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Ainsi la tension aux bornes de la charge à protéger est purement sinusoïdale [29].

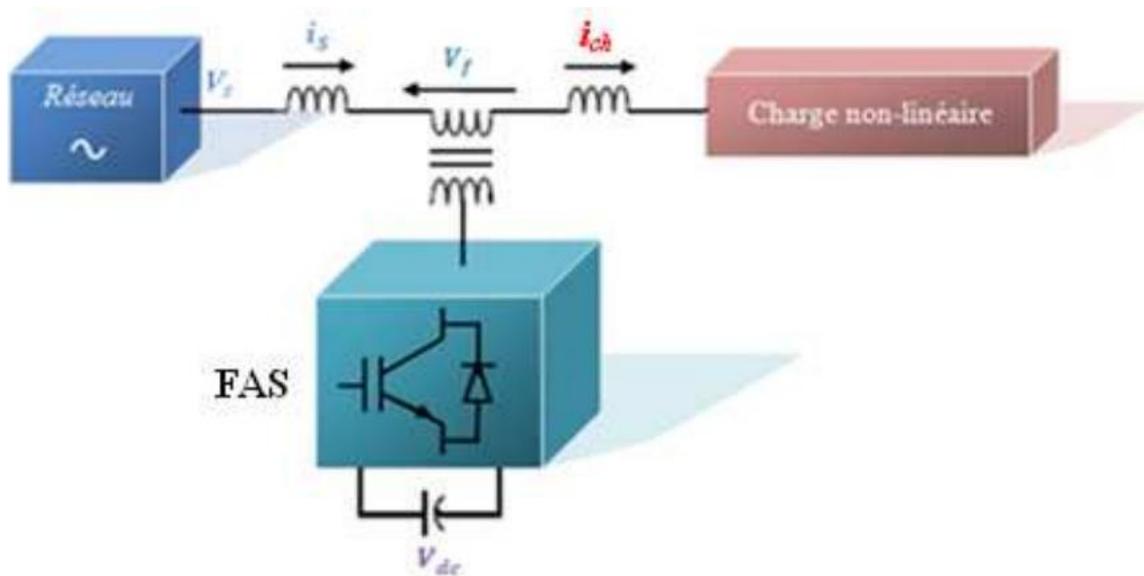


Figure II.5: Filtre actif série.

a.3) La Combinaison Parallèle-Série Actifs (UPQC)

La figure (II.6) schématise la configuration de la combinaison parallèle-série actifs qui s'appelle aussi (Unified Power Quality Conditionner UPQC), elle résulte de l'association des deux filtres actifs de puissance parallèle et série. Cette structure bénéficie des avantages de deux types de filtres actifs série et parallèle et elle permet d'assurer simultanément un courant sinusoïdal et une tension du réseau électrique également sinusoïdale [28].

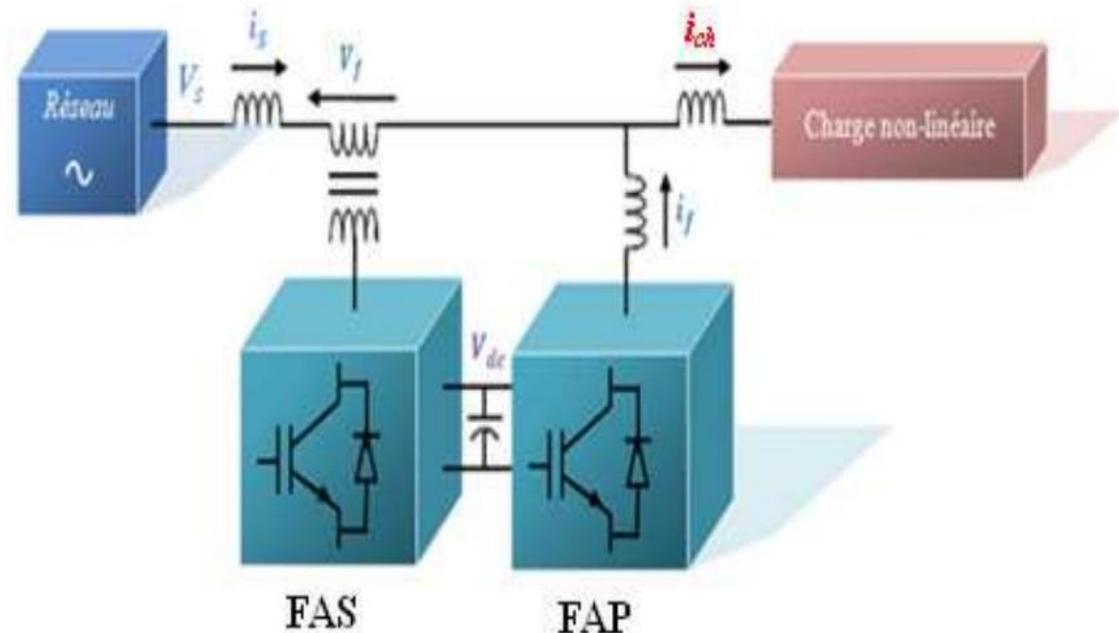


Figure II.6: Combinaison parallèle-série des filtres actifs.

a.4) Filtre Actif Hybride

Le filtre actif hybride est une topologie de filtre qui combine les avantages des filtres passifs et des filtres actifs. Pour cette raison, il est considéré comme l'une des meilleures solutions pour filtrer les harmoniques de courant des réseaux de distribution. Une des principales raisons de l'utilisation du filtre actif hybride est liée au développement des semiconducteur de puissance tels que les transistors de puissance de types MOSFET ou IGBT. De plus, du point de vue économique, le filtre hybride présente un atout majeur, il permet de réduire le coût de filtre actif, qui est actuellement l'obstacle majeur à l'utilisation de ce type des filtres. On peut distinguer trois configurations du filtre actif hybride [30] [31]:

- ✚ Combinaison du filtre actif série et du filtre passif parallèle ;
- ✚ Combinaison du filtre actif parallèle et du filtre passif parallèle ;
- ✚ Filtre actif parallèle connecté en série avec un filtre passif.

b) Les Convertisseurs à Prélèvement Sinusoïdal

Le prélèvement d'un courant sinusoïdal engendre une nouvelle structure de conversion AC/DC, différente de la version classique, où le courant peut être contrôlé. Les techniques de prélèvement sinusoïdal s'appliquent aux structures monophasées et triphasées. Dans ce contexte,

CHAPITRE II : LES SOLUTIONS DE DIMINUTION DES HARMONIQUES

plusieurs structures ont été développées et présentées dans la littérature, ayant pour objectif d'assurer un facteur de puissance unitaire [32].

b.1) Structure de Redresseur Utilisant un Hacheur BOOST

La structure de base du convertisseur AC/DC avec correction du facteur de puissance ainsi que son principe de commande sont illustrés sur la figure 1.16. Il s'agit d'un redresseur en pont à diodes connecté au réseau et doté d'un étage de correction placé entre la sortie du pont et la charge. Cet étage de correction du facteur de puissance basé sur une structure d'hacheur élévateur comprend une inductance, un interrupteur de puissance à double commande (TB, IGBT, MOSFET) et une diode de puissance. Cet ensemble est mis en parallèle avec le condensateur du bus continu. Le convertisseur AC/DC ainsi obtenu constitue une structure élévatrice et non réversible, mettant en jeu un seul interrupteur commandable [15]

Le principe de prélèvement sinusoïdal consiste à forcer le courant circulant dans l'inductance à suivre une référence sinusoïdale redressée, en contrôlant la fermeture et l'ouverture de l'interrupteur commandé de puissance. L'amplitude de cette référence est fournie par la boucle d'asservissement de la tension du bus continu, tandis que la forme sinusoïdale est obtenue par l'intermédiaire d'une PLL synchronisée avec le réseau d'alimentation. Cette solution garantit l'obtention d'un facteur de puissance unitaire pour le terme fondamental au niveau du réseau [33] [34].

Il convient aussi de noter que cette structure est réalisée à partir d'un pont redresseur monophasé. Dans le cas d'un réseau triphasé, un seul interrupteur doit contrôler les trois courants absorbés. Ceci rend la commande très complexe et beaucoup moins performante.

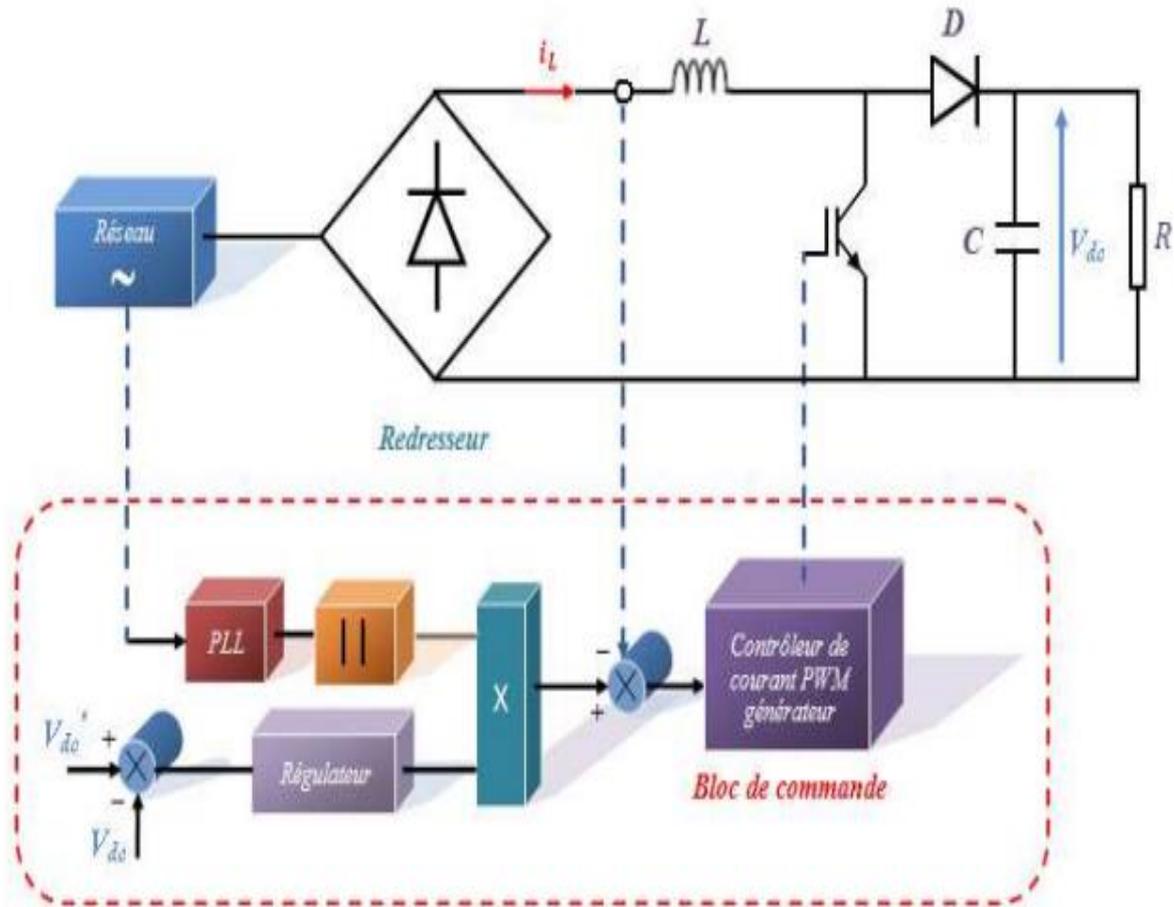


Figure II.7: Structure du PFC.

b.2) Structures de Redresseurs à Injection de Courant

Les structures à injection de courant sont apparues au début des années 1990, suite à des tentatives d'améliorer les performances des convertisseurs AC/DC déjà présents. La structure à injection de courant dans le réseau est constituée d'un redresseur triphasé à diodes et de deux circuits auxiliaires, de modulation et de distribution. Le schéma synoptique de cette structure est représenté sur la figure (II.8). Un circuit de modulation crée, par le procédé de mise en forme des courants à la sortie du pont à diodes, un courant qui est injecté au réseau d'alimentation à l'aide d'un circuit de distribution. L'injection d'un tel courant permet de compenser les paliers à zéro des courants de ligne, inhérents au fonctionnement normal du pont à diodes. Plusieurs variantes de ce

CHAPITRE II : LES SOLUTIONS DE DIMINUTION DES HARMONIQUES

type de convertisseur existant actuellement ; elles se distinguent par la nature des circuits de modulation et de distribution qui peuvent être soit passifs, soit actifs [35] [36]. .

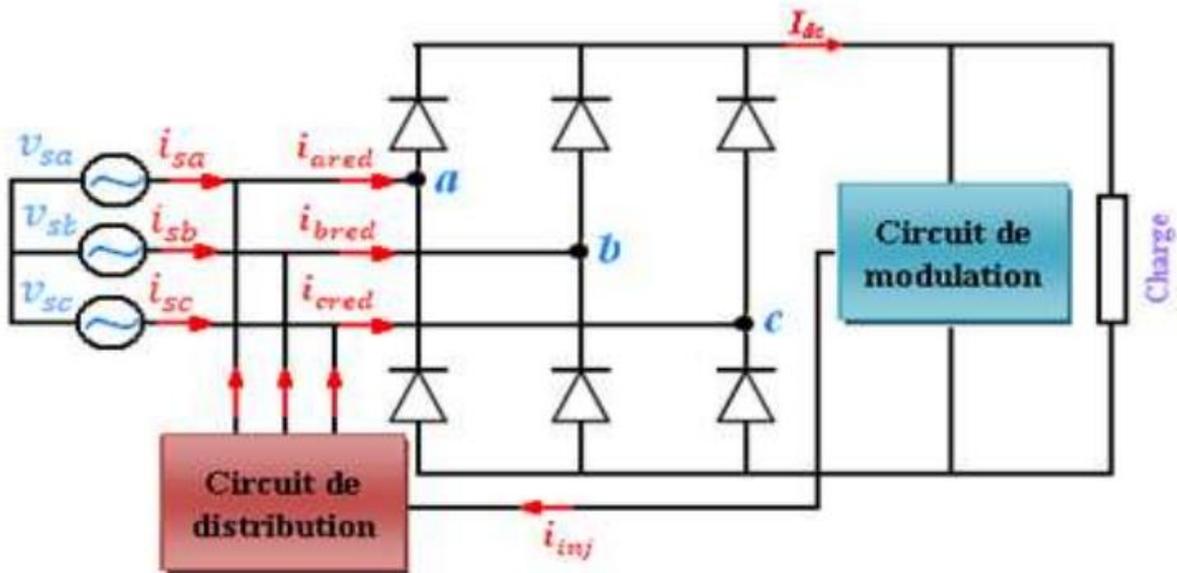


Figure II.8: Schéma synoptique d'un convertisseur AC/DC triphasé à injection de courant.

b.3) Redresseurs MLI

Cette structure fait appel à un onduleur à MLI fonctionnant en redresseur, désigné sous le nom redresseur à modulation de largeur d'impulsion (MLI) également appelé redresseur à PWM (Pulse Width Modulation). Ces convertisseurs peuvent prélever des courants sinusoïdaux sur le réseau alternatif et assurer aussi un facteur de puissance unitaire. Selon le type d'onduleur utilisé, nous distinguons deux structures de redresseurs MLI [37] :

- ⚡ Redresseur MLI de courant ;
- ⚡ Redresseur MLI de tension.

- **Redresseur MLI de Courant**

la topologie du redresseur à MLI de courant est illustrée sur la figure (II.9). Il assure la conversion d'énergie entre une source de tension alternative et un récepteur de courant continu. Les interrupteurs sont unidirectionnels en courant mais bidirectionnels en tension. L'utilisation des techniques MLI conduit à un courant côté alternatif ayant une pollution harmonique contrôlée [14]. Cette structure est souvent dotée d'un filtre de second ordre LC du côté alternatif [38] [39].

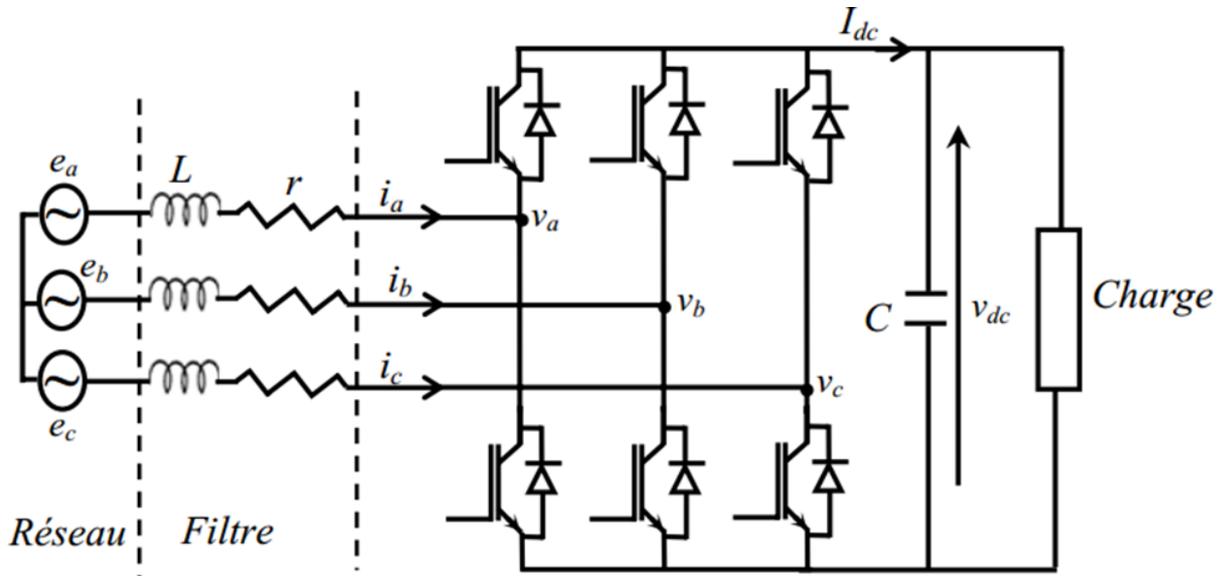


Figure II.9: Topologie d'un redresseur MLI triphasé de courant.

- **Redresseur à MLI de tension :**

Le redresseur à MLI de tension est basé sur une structure d'onduleur de tension représenté sur la figure (II.10). Chaque interrupteur est constitué d'un IGBT (composant commandé à l'amorçage et au blocage) et d'une diode en antiparallèle. Cet interrupteur est unidirectionnel en tension et bidirectionnel en courant. Ainsi, ce convertisseur, de part sa structure, est réversible en courant. Il peut donc contrôler de façon instantanée la forme d'onde des courants prélevés sur le réseau [40]. Il alimente alors une charge (active ou passive) en continu à partir d'un réseau alternatif, le courant absorbé étant sinusoïdal et, éventuellement, en phase avec la tension réseau correspondante. Ce redresseur à MLI permet d'atteindre un facteur de puissance très proche de l'unité et régler, via la commande, la direction du flux de l'énergie réactive : absorbée ou fournie [41].

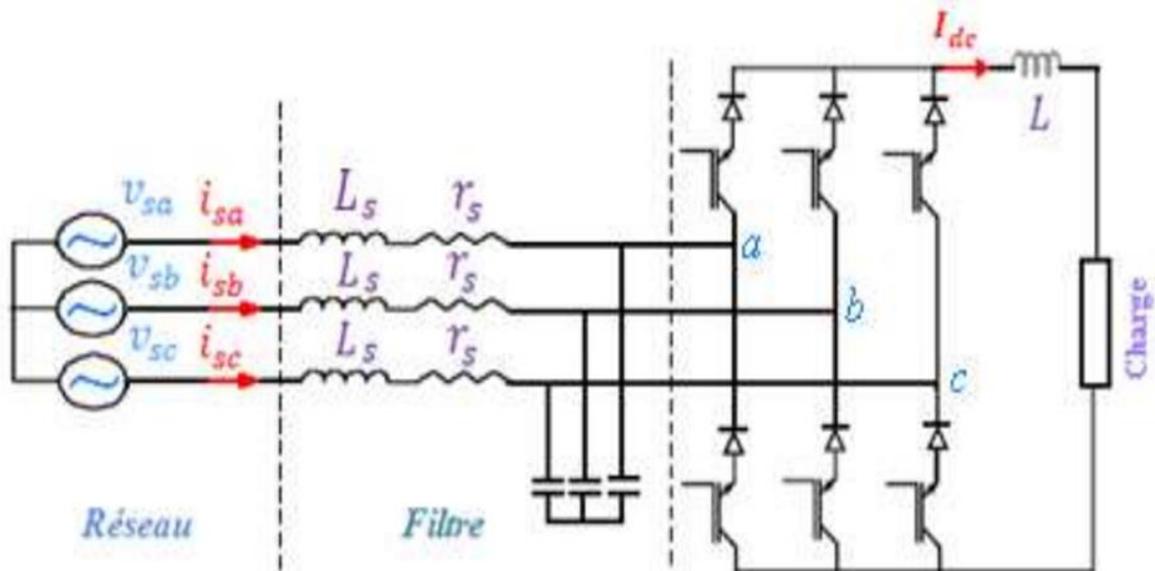


Figure II.10: Topologie d'un redresseur à MLI triphasé de tension.

Parmi les moyens de dépollution harmonique présentés précédemment, plus particulièrement les convertisseurs à prélèvement de courant sinusoïdal, on s'intéressera dans la suite de ce travail uniquement à la structure du redresseur à MLI de tension. Elle constitue donc notre topologie support pour développer et implanter des stratégies de commande permettant le prélèvement de courants sinusoïdaux sur le réseau alternatif et le fonctionnement avec un facteur de puissance unitaire [15].

II.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé les problèmes de pollution des réseaux électriques qui affectent la tension du réseau électrique et réduisent ainsi la qualité de l'énergie électrique. Afin d'améliorer la qualité de l'énergie du réseau électrique, nous avons proposé deux types de solutions: la première repose sur l'utilisation des méthodes traditionnelles que nous fournissons dans la plupart des filtres passifs qui ne peuvent pas s'adapter au développement du réseau et aux charges polluées. Grâce aux progrès de l'électronique énergétique (en particulier des composants à semi-conducteurs) et des dispositifs de contrôle, nous avons dévoilé la deuxième solution basée sur des méthodes modernes incluant l'apport de l'électronique de puissance dans la lutte contre les harmoniques et l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique.

Parmi les moyens de dépollution harmonique présentés dans ce chapitre, convertisseurs AC/DC non-polluants (notamment le redresseur MLI triphasé de tension et le redresseur triphasé de courant).

**CHAPITRE III : MODELISATION
ET RESULTAT DE SIMULATION
D'UN MLI DE REDRESSEUR DE
COURANT**

CHAPITRE III : MODELISATION ET RESULTAT DE SIMULATION D'UN MLI DE REDRESSEUR DE COURANT

III.1 Introduction

Ce chapitre présente la modélisation et les résultats de simulation de la commande d'un redresseur, on distingue deux grandes catégories des redresseurs de point de vue de la commutation électrique :

- Redresseur non commandé (à diodes).
- Redresseur commandé (à IGBT).

Les redresseurs à diodes, ou redresseurs non contrôlés, ne permettent pas de faire varier le rapport entre la ou les tensions alternatives d'entrée et la tension continue de sortie. De plus, ils sont irréversibles, c'est-à-dire que la puissance ne peut aller que du côté alternatif vers le côté continu.

Les redresseurs à IGBT, ou redresseurs contrôlés, permettent, pour une tension alternative d'entrée fixée, de faire varier la tension continue de sortie. Ils sont de plus réversibles ; lorsqu'ils assurent le transfert de puissance du côté continu vers le côté alternatif, on dit qu'ils fonctionnent en onduleurs non autonomes. [9]

III.2 redresseur triphasé non commandé

Dans le cas général, les q enroulements, sièges des q tensions alternatives v_1, v_2, \dots, v_q , sont encore couplés en étoile, mais on utilise $2q$ diodes.

Le premier groupe, D_1, D_2, \dots, D_q , forme un commutateur "plus positif" et réunit M à la plus positive des bornes $1, 2, \dots, q$. Le second groupe, D_1', D_2', \dots, D_q' , forme un commutateur "plus négatif" et relie N à la plus négative des bornes $1, 2, \dots, q$. Cet ensemble de $2q$ diodes est couramment appelé pont de diodes.

La tension redressée U_{red} , recueillie entre M et N , est égale, à chaque instant, à la plus grande différence entre les tensions d'entrée. Le montage effectue donc un double choix, d'où le sigle PD (parallèle double) utilisé.

La figure (III.1) représente le redresseur PD3 ($q=3$). 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 [9].

III.2.1 Schéma de principe

CHAPITRE III : MODELISATION ET RESULTAT DE SIMULATION D'UN MLI DE REDRESSEUR DE COURANT

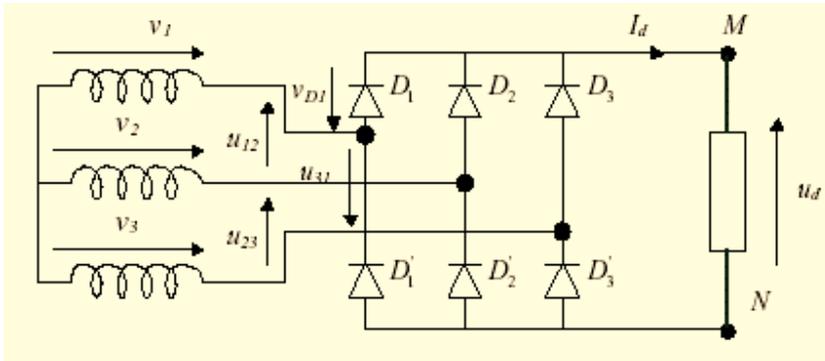


Figure III.1 : Redresseur double alternance. Montage PD3

Certains appareils, contenant en général des éléments d'électronique de puissance (les différents convertisseurs sont vus comme étant des charges non linéaires qui injectent des courants harmoniques sur le réseau électrique) pour se raccorder au réseau, absorbent un courant qui n'est pas sinusoïdal. Ces charges sont connues sous le nom de charges non linéaires et sont principalement à l'origine de la distorsion harmonique présente sur le réseau [44].

III.2.2 Simulation d'un redresseur triphasé à diodes :

A. le schéma de simulation :

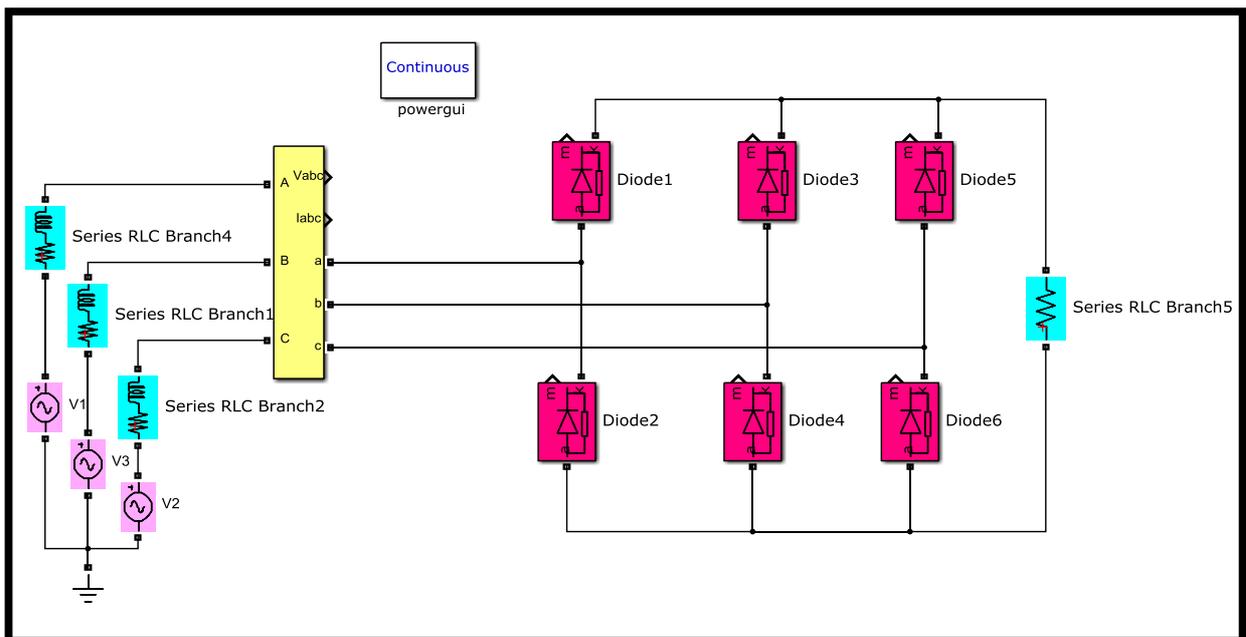


Figure III.2 : Schéma de simulation

CHAPITRE III : MODELISATION ET RESULTAT DE SIMULATION D'UN MLI DE REDRESSEUR DE COURANT

B. résultat de simulation

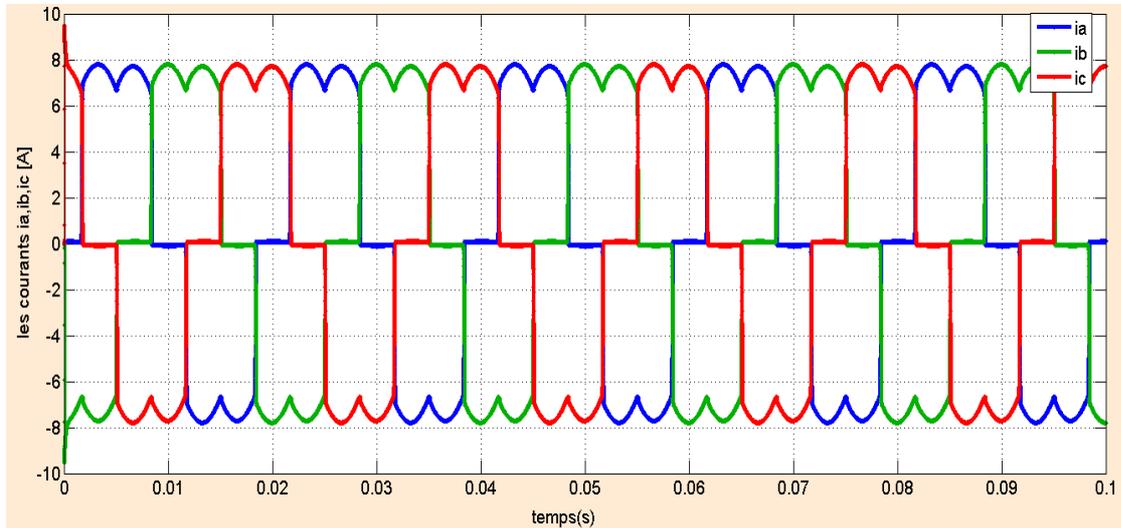


Figure III.3 : Courants absorbés par un redresseur à diodes

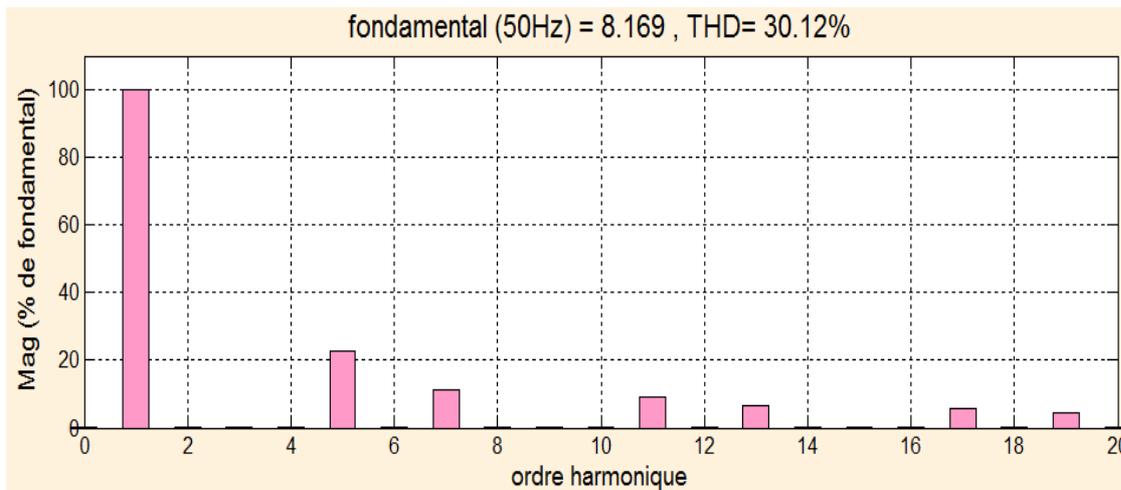


Figure III.4 : Analyse spectrale des courants de redresseur à diodes

✚ Interprétation des résultats

- La figure (III.3) montre la forme d'onde des courants de la source. Le redresseur absorbe donc un courant non sinusoïdal, On remarque une distorsion des courants dû à la charge non linéaire ce qui montre la présence des harmoniques dans le réseau.
- La figure (III.4) représente le spectre d'harmonique de courant, on remarque la présence des harmoniques 5,7,11 et 13. Le THD de courant du réseau est rang impaire 30.12% les courants possèdent un taux de distorsion élevé ce qui est très élevé par rapport aux normes internationaux.

CHAPITRE III : MODELISATION ET RESULTAT DE SIMULATION D'UN MLI DE REDRESSEUR DE COURANT

III.3 Structure et principe de fonctionnement du redresseur triphasé à MLI

III.3.1 Structure

La technologie employée consiste à modifier la structure interne du redresseur en remplaçant les diodes par des interrupteurs entièrement commandables à l'ouverture et à la fermeture : transistor MOSFET pour les moyennes et petites puissances, transistors IGBT ou thyristor GTO pour les fortes puissances, en anti parallèle avec des diodes [6].

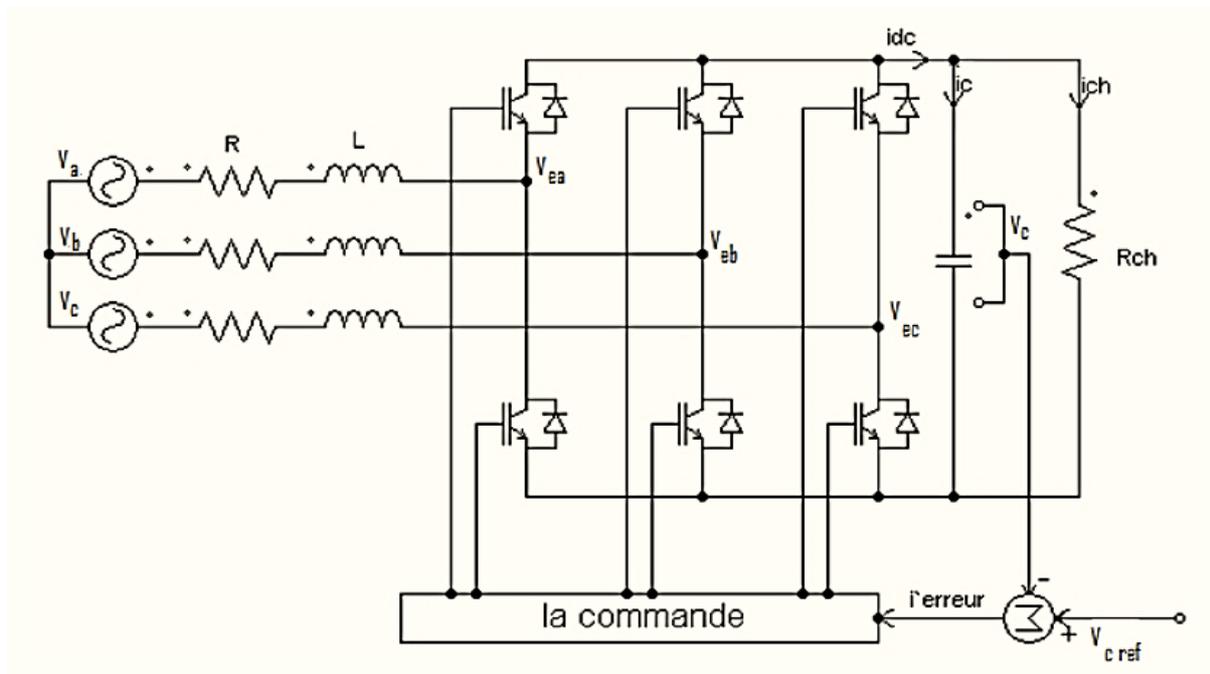


Figure III.5 : Circuit de puissance du redresseur MLI en pont triphasé.

Ce circuit compte [42]:

- Six commutateurs à semi-conducteurs commandable à l'ouverture et à la fermeture. Chaque commutateur est shunté par une diode branchée en antiparallèle pour la récupération.
- **L** est l'inductance du filtre placé au plus près du convertisseur et qui permet de réduire les ondulations hautes fréquences sans trop affecter la composante basse fréquence à 50 Hz.
- **R** représente la résistance par ligne du réseau alternatif.
- Du côté continu, **C** représente la capacité du condensateur jouant le rôle d'accumulateur d'énergie, la charge à courant continu est constituée d'une résistance R_{ch} .
- V_a , V_b , et V_c les trois tensions à l'entrée du redresseur MLI
- Les trois tensions du réseau alternatif triphasé, sont données par la relation :

CHAPITRE III : MODELISATION ET RESULTAT DE SIMULATION D'UN MLI DE REDRESSEUR DE COURANT

$$\begin{aligned}
 v_a &= v_{max} \sin(\omega t) \\
 v_b &= v_{max} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\
 v_c &= v_{max} \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)
 \end{aligned}
 \tag{III.1}$$

III.4 Modélisation du convertisseur

La figure (III.6) présente le schéma unifilaire d'un pont redresseur connecté au réseau \bar{v} , est tension de la source et R, L sont les paramètres de la ligne, \bar{v}_e est la tension d'entrée du redresseur MLI [42].

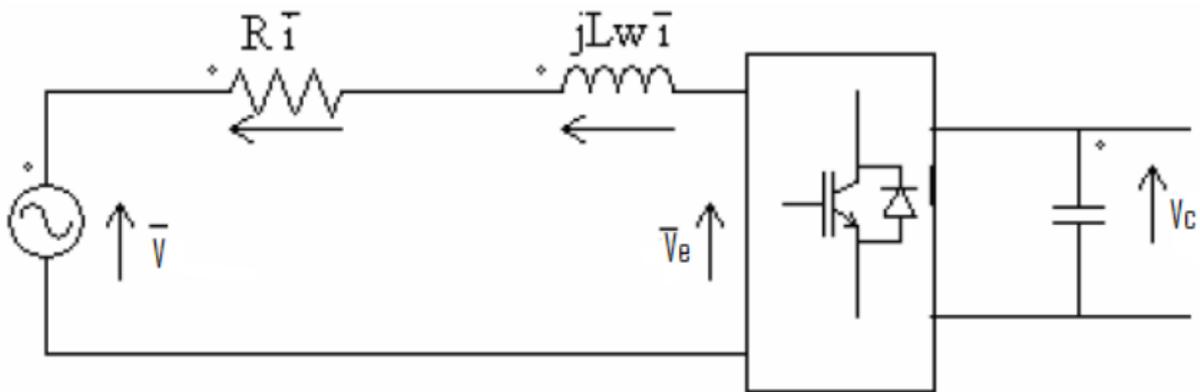


Figure III.6 : Schéma unifilaire d'un pont redresseur MLI connecté au réseau.

Le courant de ligne \bar{i} est commandé par la chute de tension produite par l'inductance L et la résistance R de la ligne et la tension d'entrée du redresseur \bar{v}_e . Le pont redresseur est constitué de trois bras avec deux transistors (MOS, IGBT, ...) en antiparallèle avec des diodes qui sont présentés comme des interrupteurs pouvant être commandés à l'ouverture (état 0) et à la fermeture (état 1). Les tensions d'entrée \mathcal{V}_{eabc} sont en fonction des états de ces interrupteurs (Figure.III.7) :

CHAPITRE III : MODELISATION ET RESULTAT DE SIMULATION D'UN MLI DE REDRESSEUR DE COURANT

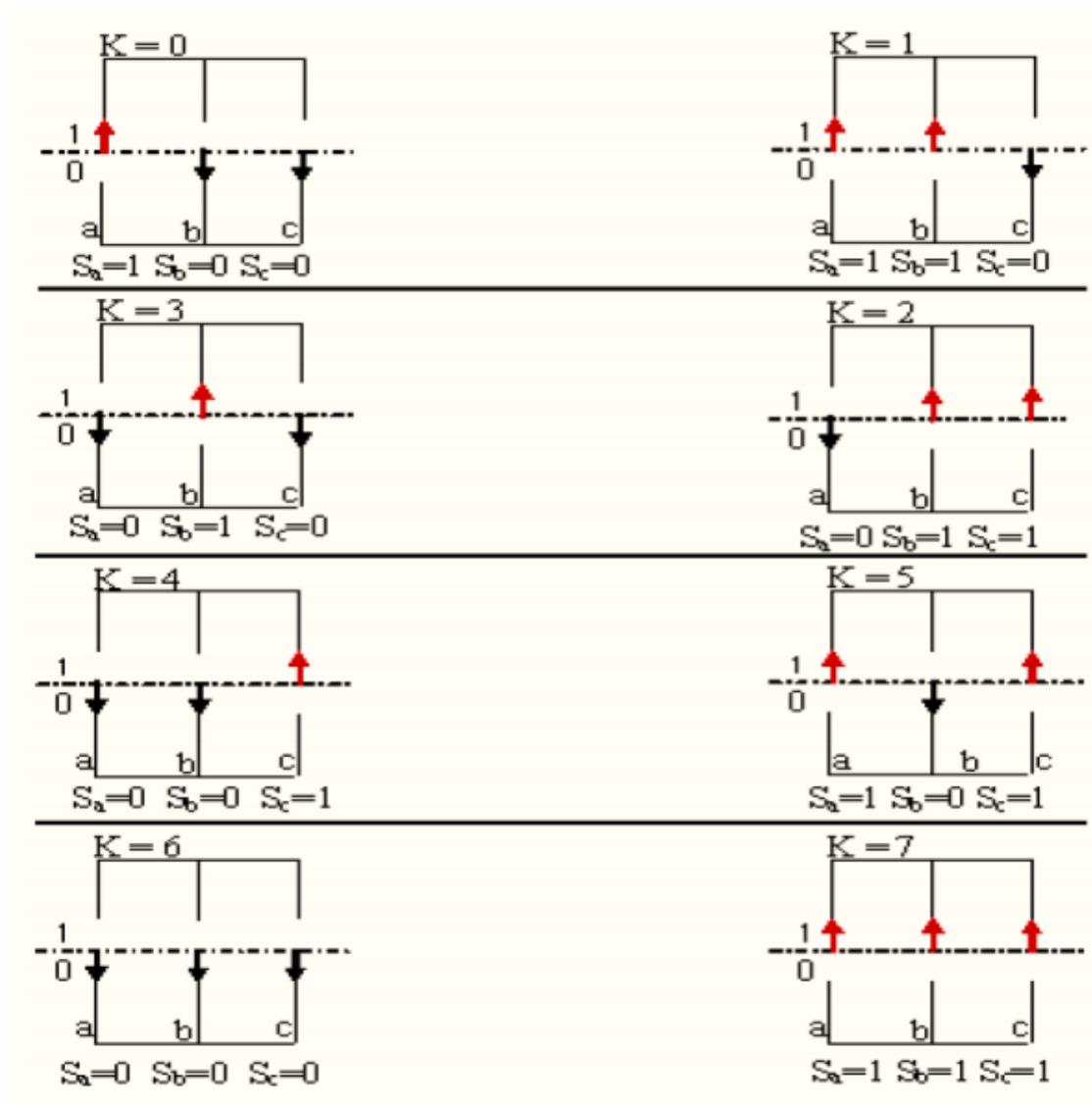
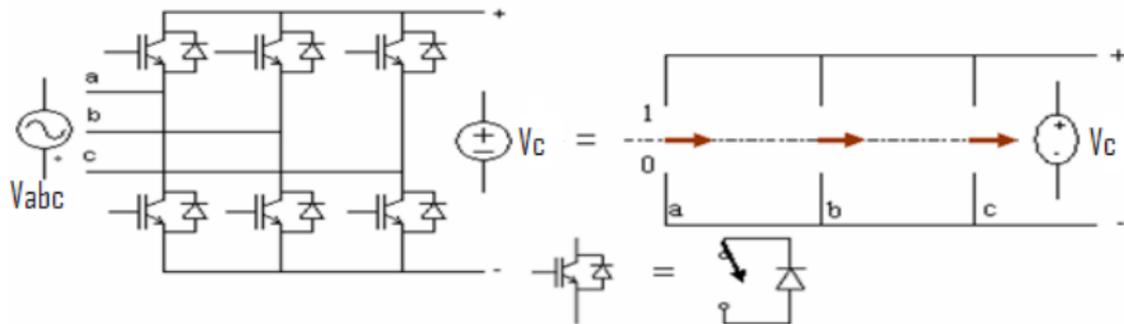


Figure III.7 : Etats de commutation du pont redresseur MLI.

CHAPITRE III : MODELISATION ET RESULTAT DE SIMULATION D'UN MLI DE REDRESSEUR DE COURANT

De cette table, on peut écrire les tensions d'entrée du redresseur d'une manière générale, comme suit :

$$\begin{aligned} v_{ab} &= (s_a - s_b) v_c \\ v_{bc} &= (s_b - s_c) v_c \\ v_{ca} &= (s_c - s_a) v_c \end{aligned} \tag{III.2}$$

D'où, on peut déduire les tensions simples :

$$\begin{aligned} v_a &= f_a v_c \\ v_b &= f_b v_c \\ v_c &= f_c v_c \end{aligned} \tag{III.3}$$

Avec :

$$\begin{aligned} f_a &= \frac{2s_a - (s_b + s_c)}{3} \\ f_b &= \frac{2s_b - (s_a + s_c)}{3} \\ f_c &= \frac{2s_c - (s_a + s_b)}{3} \end{aligned} \tag{III.4}$$

Leurs valeurs sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau III.1 : Valeurs des tension simples selon les états possibles des interrupteurs

K	s_a	s_b	s_c	v_a	v_b	v_c
0	1	0	0	$2v_c/3$	$-v_c/3$	$-v_c/3$
1	1	1	0	$v_c/3$	$v_c/3$	$-2v_c/3$
2	0	1	0	$-v_c/3$	$2v_c/3$	$-v_c/3$
3	0	1	1	$-2v_c/3$	$v_c/3$	$v_c/3$
4	0	0	1	$-v_c/3$	$-v_c/3$	$2v_c/3$
5	1	0	1	$v_c/3$	$-2v_c/3$	$v_c/3$
6	0	0	0	0	0	0
7	1	1	1	0	0	0

Représentation dans le référentiel triphasé abc

Selon la figure III.6. Les équations des tensions simples pour le système triphasé équilibré sans neutre peuvent être écrites comme suit :

CHAPITRE III : MODELISATION ET RESULTAT DE SIMULATION D'UN MLI DE REDRESSEUR DE COURANT

$$\bar{v}_{abc} = \bar{v}_L + \overline{v_{e abc}} \quad (\text{III.5})$$

$$\bar{v}_{abc} = R \bar{i} + L \frac{di}{dt} + \overline{v_{e abc}} \quad (\text{III.6})$$

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.7})$$

Et la tension d'entrée du redresseur peut être écrite comme suit :

$$v_{e abc} = v_c \left(S_n - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c S_n \right) \quad (\text{III.8})$$

Où $S_n = 0$ ou 1 , est l'état des interrupteurs, où ($n = a, b, c$), par ailleurs, on peut écrire le courant du bus continu comme

$$C \frac{dv_c}{dt} = i_c \quad (\text{III.9})$$

Le courant dans la capacité peut aussi écrire

$$i_c = i_{dc} - i_{ch} \quad (\text{III.10})$$

Aussi, le courant i_c est la somme du produit courants de chaque phase l'état de son interrupteur :

$$C \frac{dv_c}{dt} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c - i_{ch} \quad (\text{III.11})$$

Donc, du côté alternatif du redresseur, on a :

$$\begin{aligned} L \frac{di_a}{dt} + Ri_a &= V_a - V_c \left(S_a - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c S_n \right) = V_a - V_c \left(S_a - \frac{1}{3} (S_a + S_b + S_c) \right) \\ L \frac{di_b}{dt} + Ri_b &= V_b - V_c \left(S_b - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c S_n \right) = V_b - V_c \left(S_b - \frac{1}{3} (S_a + S_b + S_c) \right) \\ L \frac{di_c}{dt} + Ri_c &= V_c - V_c \left(S_c - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c S_n \right) = V_c - V_c \left(S_c - \frac{1}{3} (S_a + S_b + S_c) \right) \end{aligned} \quad (\text{III.12})$$

L'équation précédente peut s'écrire comme suit :

$$\left(L \frac{d}{dt} + R \right) i_n = V_n - V_c \left(S_n - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c S_n \right) \quad (\text{III.13})$$

$$C \frac{dv_c}{dt} = \sum_{k=a}^c i_n S_n - i_{ch} \quad (\text{III.14})$$

CHAPITRE III : MODELISATION ET RESULTAT DE SIMULATION D'UN MLI DE REDRESSEUR DE COURANT

Avec $n=a,b,c$

La combinaison des équations (III.13) et (III.14) permet de représenter le schéma fonctionnel triphasé suivant (Figure.III.8) :

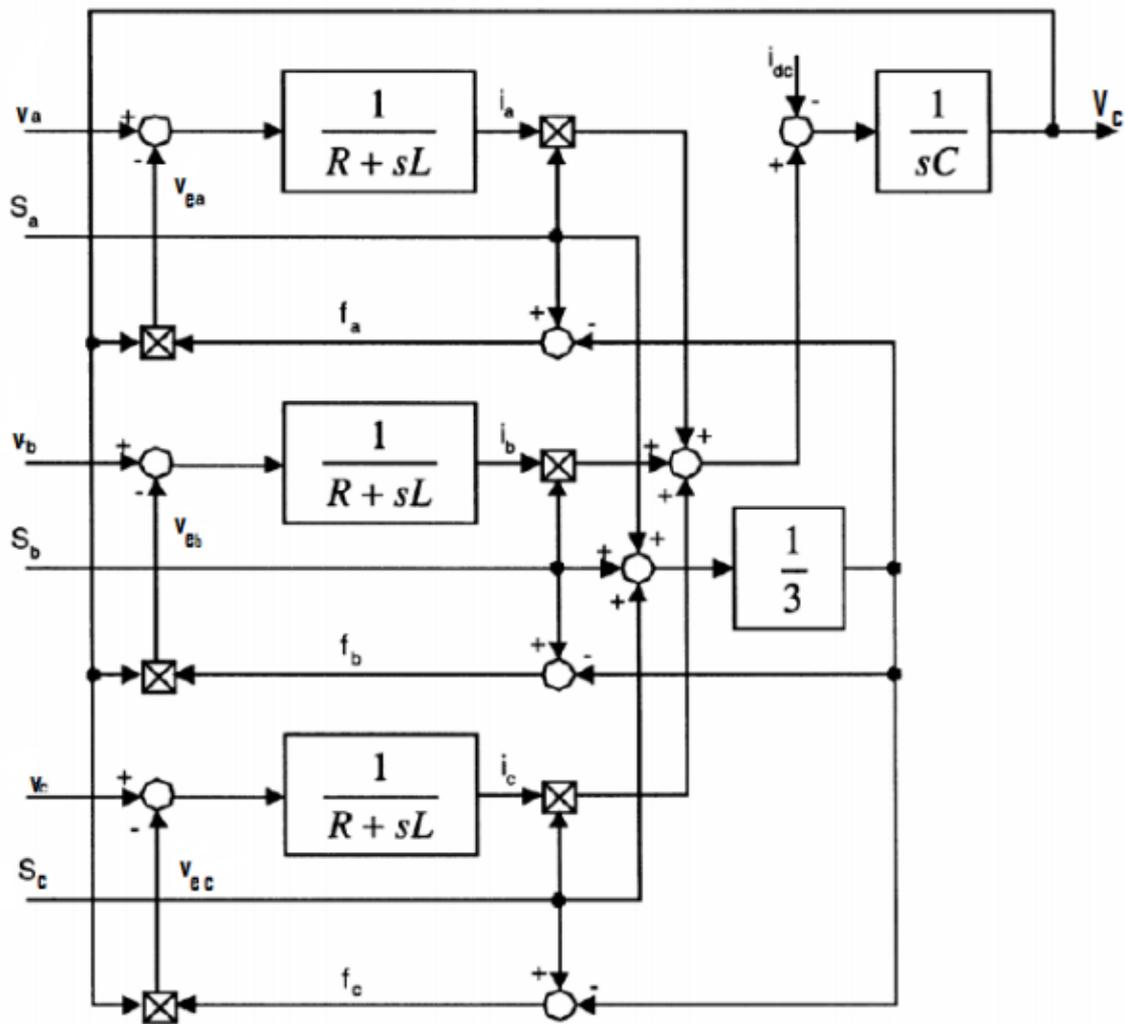


Figure III.8 : Schéma fonctionnel du redresseur MLI dans le référentiel triphasé abc .

CHAPITRE III : MODELISATION ET RESULTAT DE SIMULATION D'UN MLI DE REDRESSEUR DE COURANT

III.5 Commande d'un redresseur de courant

III.5.1 Commande par hystérésis

III.5.1.1 schéma de principe

Cette technique a pour objectif le réglage de courant d'entrée par la commande l'hystérésis

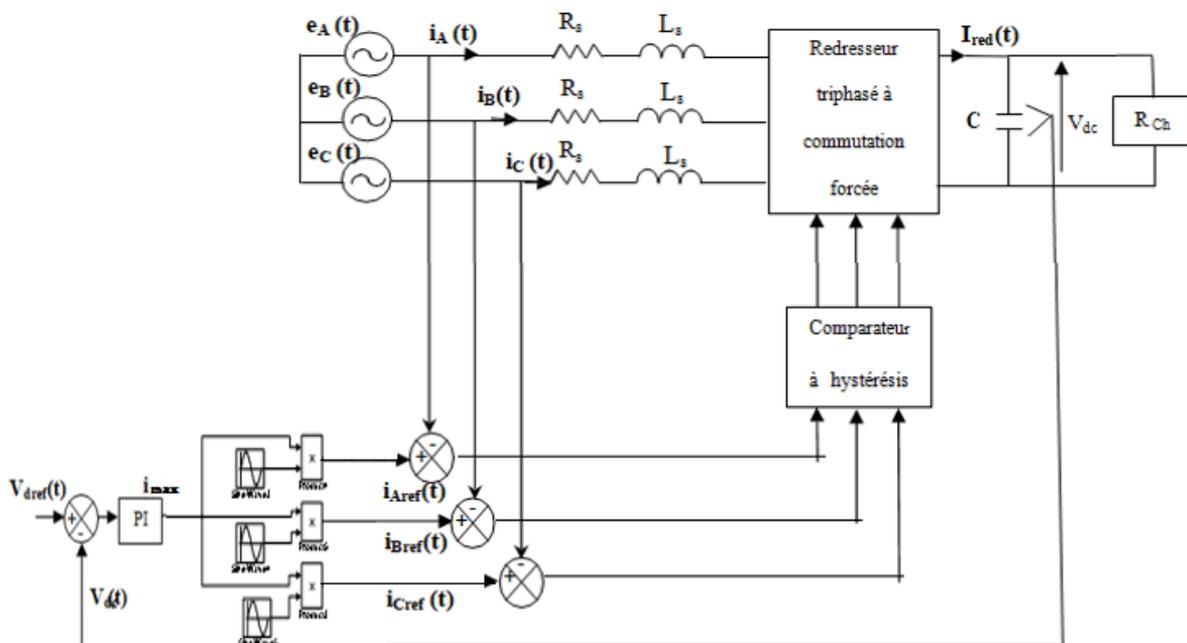


Figure III.9 : schéma de commande d'un redresseur de courant par hystérésis.

a. Principe de fonctionnement de la Commande à 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 [43].

CHAPITRE III : MODELISATION ET RESULTAT DE SIMULATION D'UN MLI DE REDRESSEUR DE COURANT

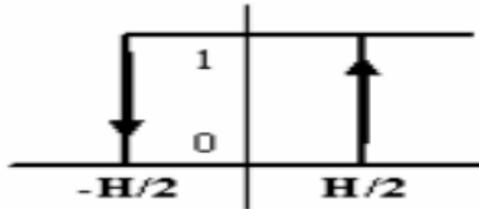
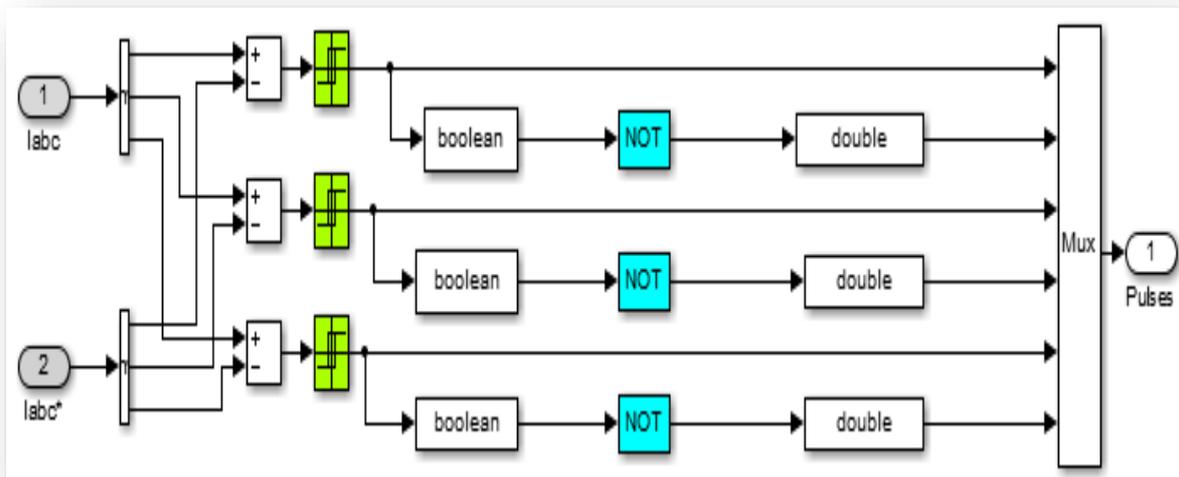


Figure. III.10 : Principes de fonctionnement de modulateur MLI à bande *d'hystérésis*.

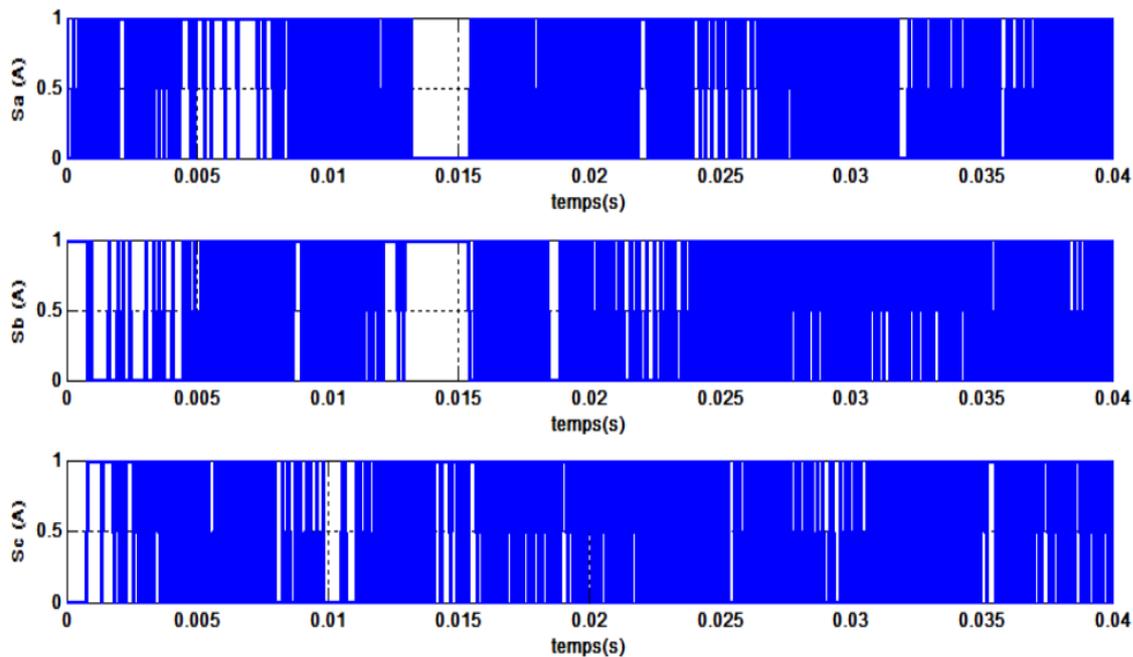
Le comparateur à hystérésis fonctionne selon le principe expliqué dans la Figure. (III.10), l'interrupteur s'ouvre si l'erreur devient inférieure à $-H/2$, il se ferme si cette dernière est supérieure à $+H/2$, où H représente la fourchette (ou largeur) d'hystérésis. Si l'erreur est maintenant comprise 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 [43].

La (figure.III.11) illustre le schéma de simulation du contrôle du courant par hystérésis à bande fixe (figure III.11.a) et les signaux de commande de chaque bras du redresseur (figureIII.11. b) [].



a) Schéma bloc de la commande à hystérésis.

CHAPITRE III : MODELISATION ET RESULTAT DE SIMULATION D'UN MLI DE REDRESSEUR DE COURANT



b) Signaux de command correspondents.

Figure (III.11) Principe de commande par hystérésis.

Cette technique de contrôle fonctionne en tout ou rien et elle a l'avantage d'être robuste et simple d'implantation. Par ailleurs, la largeur de la bande hystérésis est le seul paramètre à régler et qui détermine la fréquence de commutation bien que cette dernière inconnue et variable.

b. Régulation de la tension du bus continu

La régulation des transits de puissance permet d'imposer le courant capacitif au bus continu. Le réglage du bus continu est alors réalisé au moyen d'une boucle de régulation, permet de maintenir une tension constante du bus continue, avec deux types de correcteur PI et la référence du courant a injecté dans le condensateur C.

Il est à noter que le réglage du bus continu est donc réalisé par une boucle externe de régulation

CHAPITRE III : MODELISATION ET RESULTAT DE SIMULATION D'UN MLI DE REDRESSEUR DE COURANT

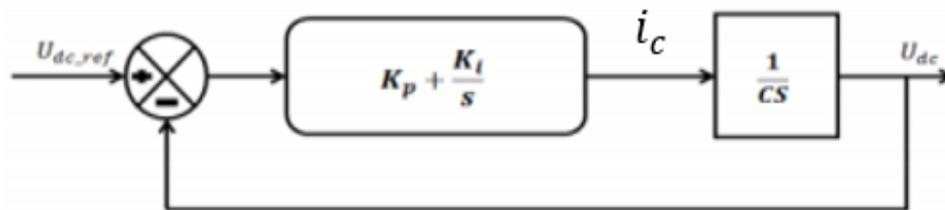


Figure III-12 : Schéma fonctionnel pour la boucle de réglage de tension du bus continu.

La fonction de transfert en boucle ouvert est comme suit :

$$\text{FTBO} = \frac{K_p s + K_i}{C s^2} \quad (\text{III.16})$$

La fonction de transfert en boucle fermé est comme suit :

$$T(s) = \text{FTBF} = \frac{K_p s + K_i}{C s^2 + K_p s + K_i} \quad (\text{III.17})$$

On divise le dénominateur et le numérateur de l'équation (II – 17) par C est en trouve :

$$T(s) = \frac{\frac{K_p s + K_i}{C}}{s^2 + \frac{K_p}{C} s + \frac{K_i}{C}} \quad (\text{III.18})$$

Après identification du dénominateur de l'équation (II-18) avec celui de la fonction de transfert du second ordre, nous obtenons :

CHAPITRE III : MODELISATION ET RESULTAT DE SIMULATION D'UN MLI DE REDRESSEUR DE COURANT

$$2\varepsilon\omega n = \frac{K_p}{C} \quad \text{et} \quad \omega n^2 = \frac{K_i}{C}$$

$$\text{Donc : } K_p = 2\varepsilon\omega n C \quad \text{et} \quad K_i = \omega n^2 C$$

c. Résultats de simulation

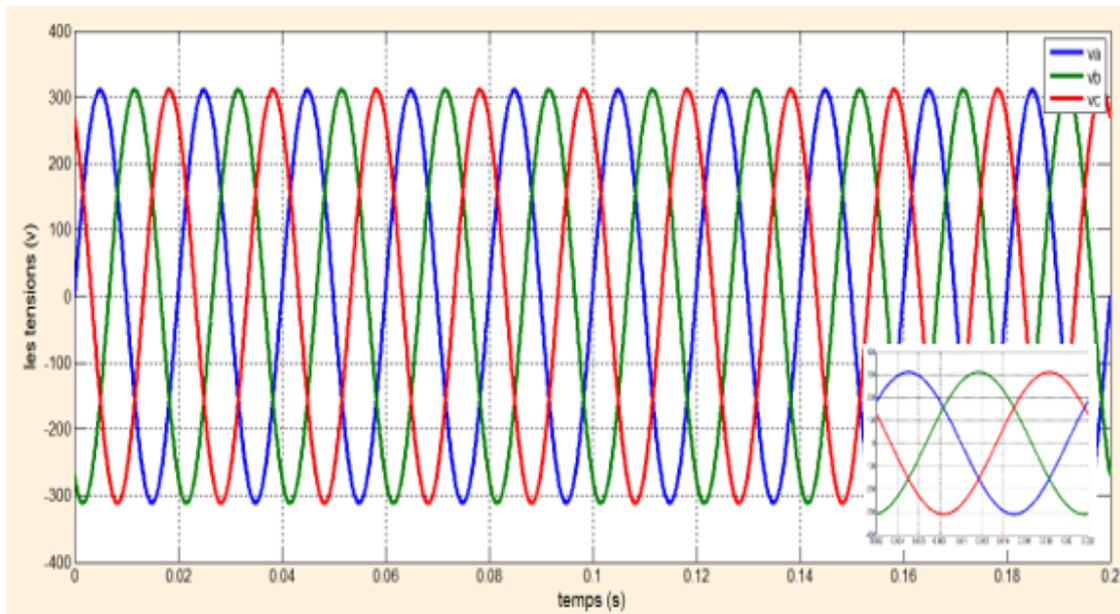


Figure III.13 : L'allure de la Tension du réseau Va,Vb et Vc.

- La figure (III.13) montre l'allure de la tension sinusoïdales du réseau

CHAPITRE III : MODELISATION ET RESULTAT DE SIMULATION D'UN MLI DE REDRESSEUR DE COURANT

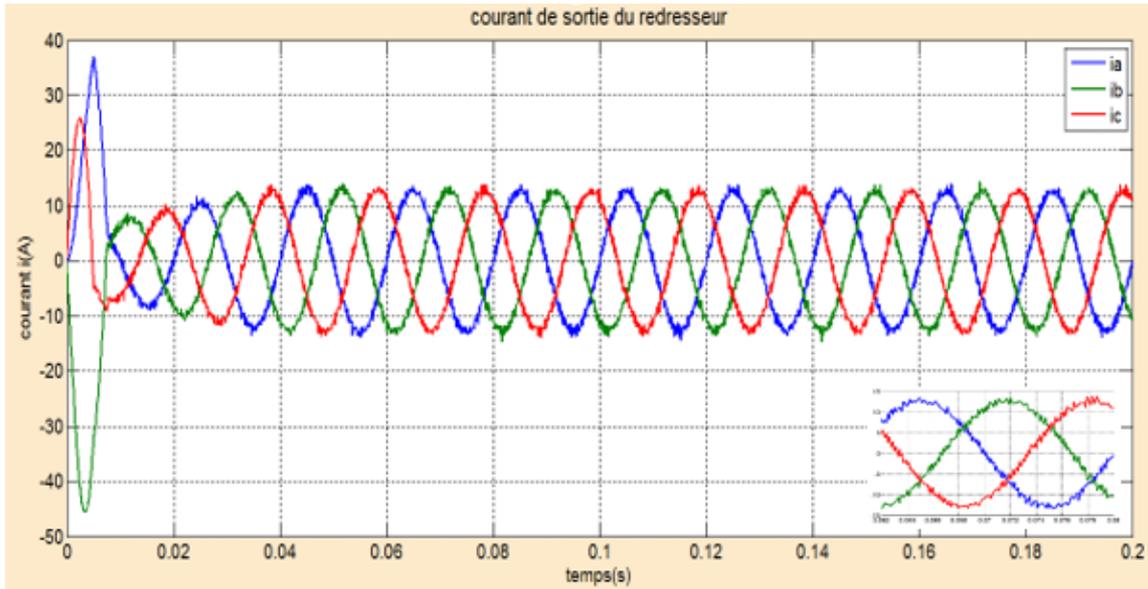


Figure III.14 : L'allure des courants I abc

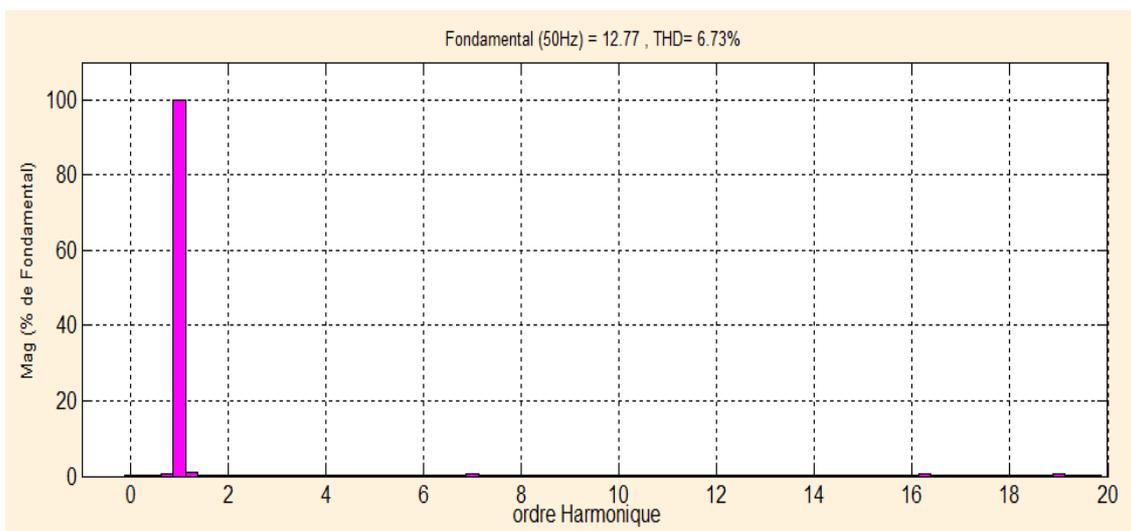


Figure III.15 : Analyse spectrale des courants de redresseur commandé à hystérésis

- Lors des simulations effectuées sous Simulink, nous constatons dans les figures (III.14) et figures (III.15) que les courants de lignes ayant des formes sinusoïdales avec une faible ondulation ou un THDi de l'ordre de 12.5% (Présence de l'harmonique d'ordre 7 dans le spectre) et le THD est Faible égala 6.73%.

CHAPITRE III : MODELISATION ET RESULTAT DE SIMULATION D'UN MLI DE REDRESSEUR DE COURANT

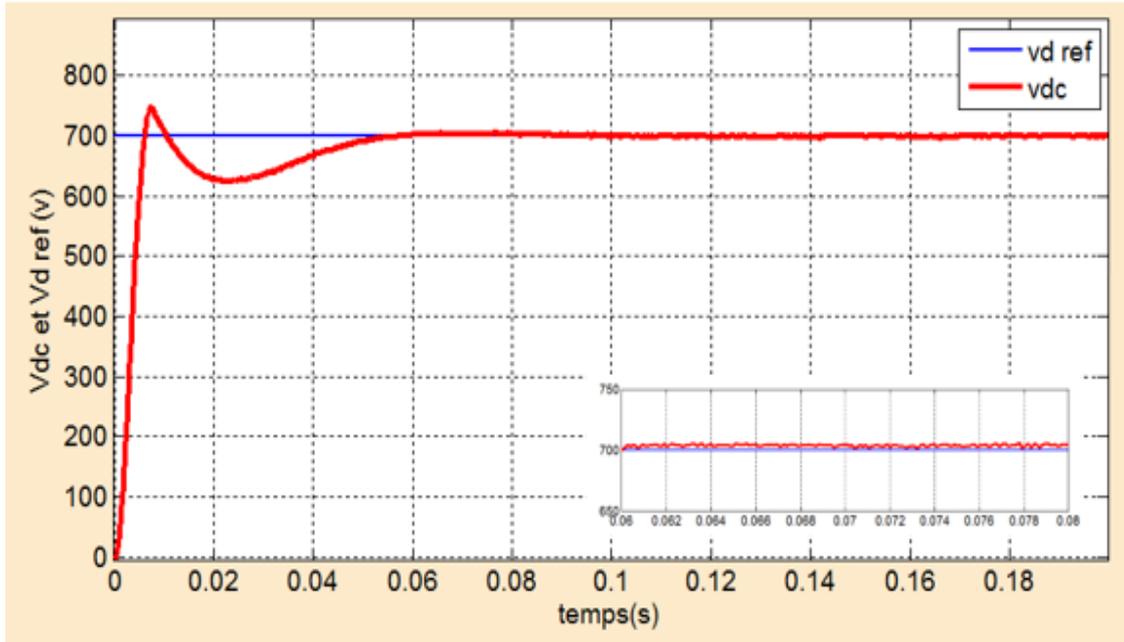


Figure III.16 : L'allure de la tension Vdc et Vd ref (V)

- Dans la figure (III.16), on voit que la tension redresse suit parfaitement sa référence ce qui montre le calcul des paramétré du régulateur PI, la figure (III.17) montre la tension de la source avec le courant de la phase, les deux allures sont en phase, ce qui montre que le fondamental est à facteur de puissance unitaire.

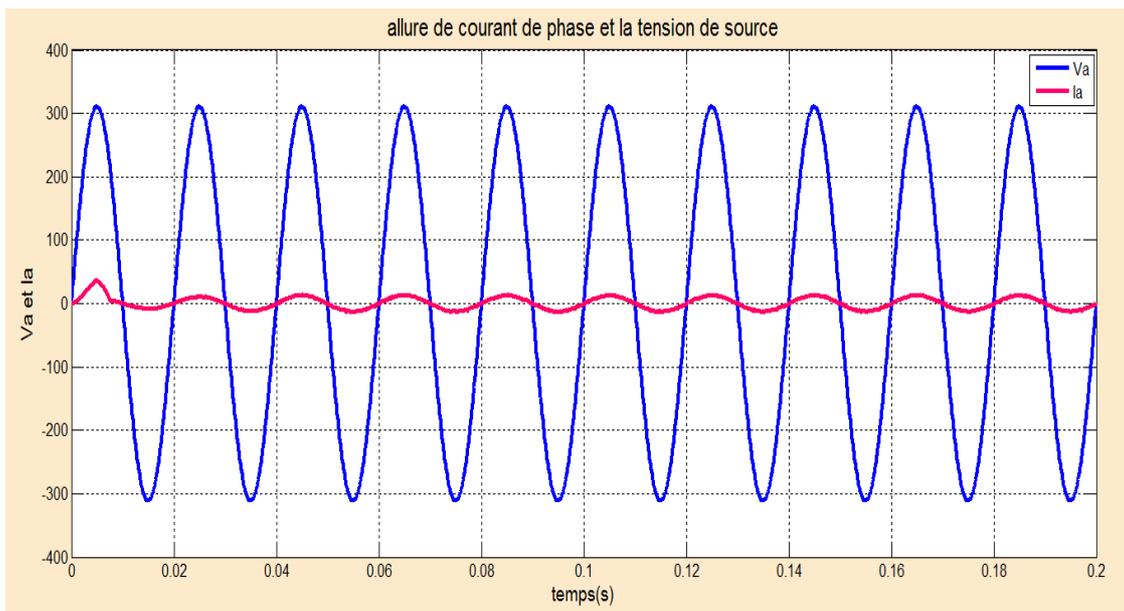


Figure III.17: L'allure de courant Ia (A) et la tension de source Va (v)

CHAPITRE III : MODELISATION ET RESULTAT DE SIMULATION D'UN MLI DE REDRESSEUR DE COURANT

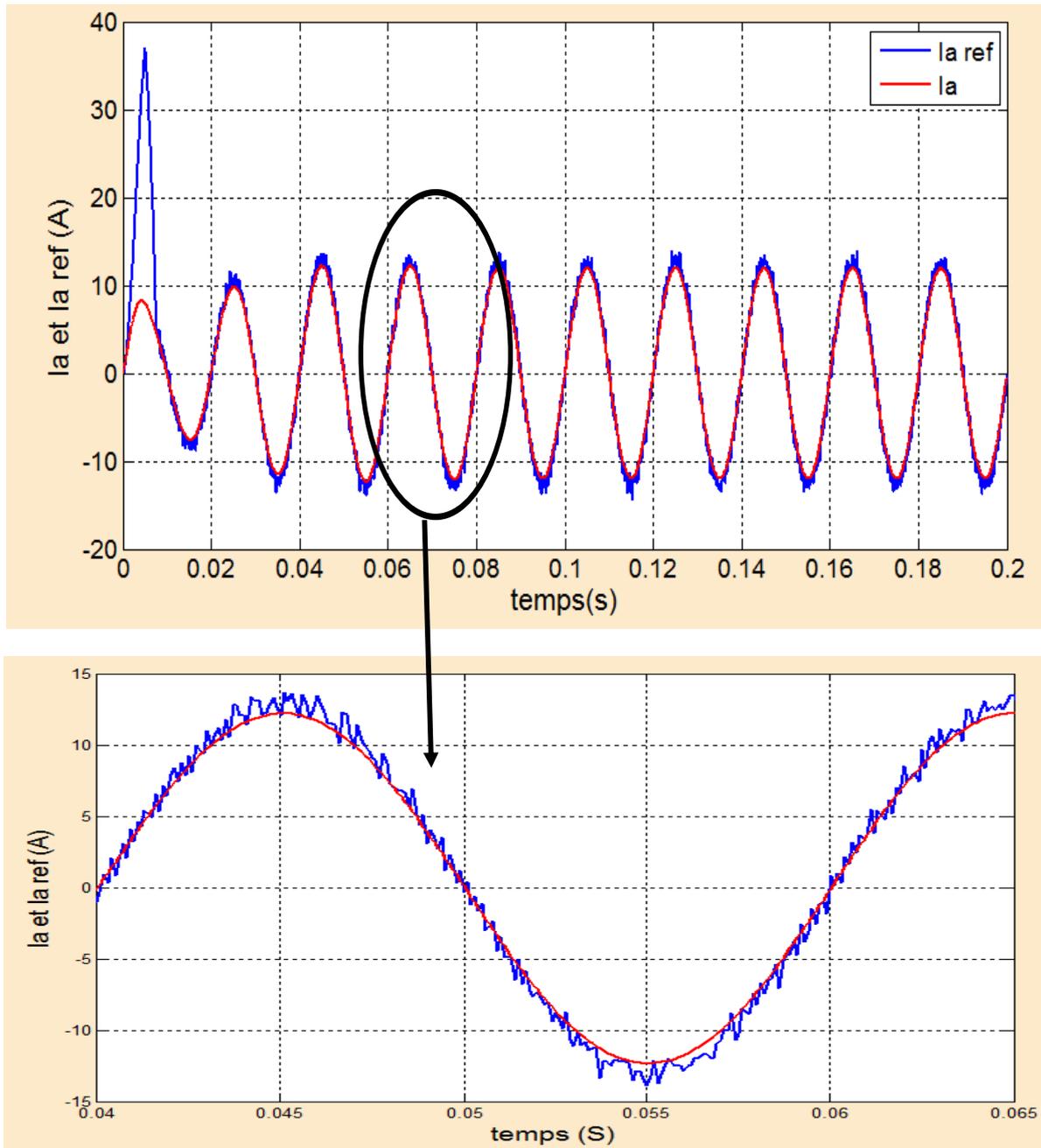


Figure III.18 : L'allure de courant I_a (A) et le courant de référence $I_{a\text{ ref}}$ (A)

- Dans la figure (III.18), on remarque que le courant absorbé suit parfaitement le courant de référence. On voit que l'erreur entre les deux courbes ne dépasse pas le seuil de l'hystérésis, ce qui montre l'efficacité de la commande hystérésis.

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté une approche concernant la commande de redresseur de courant triphasé. La stratégie de commande utilisée est basée sur un réglage par PI de la tension de l'étage continu et application de commandes (hystérésis) pour contrôler la phase et l'amplitude des courants du réseau d'alimentation.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion Générale

Dans ce travail, nous nous sommes concentrés sur le développement de technologies anciennes à une autre technologies nouvelles qui améliorent la qualité de l'énergie électrique, réduisent les Problématique des harmoniques et extraient le plus possible les courants sinusoïdaux du réseau.

D'autre part nous avons étudié un problème sérieux qui est la pollution de réseau électrique causé par les redresseurs coté réseau. Pour ce faire, nous avons relie le système à travers un redresseur de courant commandé à absorption sinusoïdale dont le but d'avoir des courants sinusoïdaux à l'entrée, on contrôle les courants de phases par hystérésis autour des courants de références. Ces courants de références fixes en phase avec les tensions d'alimentation pour avoir un facteur de puissance unitaire. L'amplitude de ces courants est générée par une boucle extérieure introduite pour régler la tension continue aux bornes de la charge et les résultats obtenus avec ce type de commande sont notablement acceptable du point de vue du taux de distorsion harmonique THD qui est faible, en abordant trois chapitres.

Dans le premier chapitre, nous avons étudié la qualité de l'énergie et les perturbations et leur effet sur les réseaux électriques.

Dans le deuxième chapitre, nous avons étudié les solutions à ces perturbations et exposons les différentes techniques traditionnelles et modernes pour débarrasser les harmonique, l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique.

Dans le dernier chapitre, nous avons choisi de faire une étude détailler la modélisation et la simulation de la commande d'un redresseur de courant par hystérésis, en présentant les détails de chaque partie constituant ces commandes.

Nous avons également présenté le calcul des régulateurs PI et que nous avons utilisé. Les simulations que nous avons réalisées avec les toolbox Simulink et SimPowerSystem de MATLAB nous ont

CONCLUSION GÉNÉRALE

Montré que la Commande d'un redresseur de courant par hystérésis donne des résultats Acceptable.

Comme perspectives, nous proposons l'utilisation de la Commande d'un redresseur de tension par MLI

Annexes

1. Paramètres de Simulation

➤ Redresseur triphase à diodes

e	220√2	v
R_s	0.001	Ω
L_s	0.0001	H
f	50	Hz
R_{ch}	85	Ω

➤ Commande d'un redresseur de courant par hystérésis.

e	220√2	v
R_s	0.5	Ω
L_s	0.015	H
f	50	Hz
C_{dc}	250e-6	F
R_{ch}	85	Ω
V_{dref}	700	v
K_i	3	
K_p	0.009	

Bibliographie

- [1] **M. ShafieeKhoor** : « Amélioration de la qualité de l'énergie à l'aide de compensateurs actifs : série, parallèle ou conditionneurs unifiés de réseaux électriques », Thèse de doctorat de l'école Polytechnique de l'université de Nantes, Nantes, 2006.
- [2] **L. Benchaïta** : « Etude, par simulation numérique et expérimentation, d'un filtre actif parallèle à structure courant avec une nouvelle méthode de contrôle – commande », Thèse de docteur de l'université Henri Poincaré, Nancy 1, 1998.
- [3] **M. Alaa Eddin Alali** : « Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension » thèse de doctorat l'Université Louis Pasteur – Strasbourg 2002
- [4] **Philippe Ferracci** : « La qualité de l'énergie électrique », Cahier technique n° 199, CT 199(e) édition octobre 2001
- [5] **P. Meynaud** : « Qualité de la tension dans les réseaux électrique – creux de tension, flicker et harmonique », Technique de l'ingénieur, traité génie électrique, D4260, pp.125, 1990.
- [6] **M. Lemaini** : « Contrôle de puissance d'un redresseur MLI » , Mémoire de master , Université Mohamed Khider de Biskra , dimanche 24 juin 2018.
- [7] **H. Megherbi, S. Hamri** : « Etude et modélisation des convertisseurs statiques destinés à améliorer la qualité de l'énergie électrique », mémoire de master, Université Dr. Tahar moulay de Saïda, Jun 2016.
- [8] **D. Ould Abdeslam** : « Techniques neuromimétriques pour la commande dans les systèmes électrique, Application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électrique basse tension » Thèse de doctorat de l'université de haute-alsace. Décembre 2005.
- [9] **A. Hamed, A. Afroukh** : « Étude et simulation et commande d'un redresseur MLI de courant », Mémoire de Master, Université Mohamed Khider de Biskra,2008
- [10] **T. Gouraud** : « Identification et rejet de perturbations harmoniques dans des réseaux de distribution électrique », Thèse de doctorat, École Doctorale Sciences pour l'Ingénieur de Nantes, Janvier 1997.

Bibliographie

- [11] **M. A. E. Alali** : « Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension (Automatisation des systèmes de puissance électriques) », Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg I, 12 Octobre 2002.
- [12] **L. Marroyo** : « Contribution à l'étude des redresseurs triphasés à absorption de courants sinusoïdaux », Thèse de docteur, Institut National Polytechnique de Toulouse (INPT), Toulouse, 1999.
- [13] **A. Lopez De Heredia Bermeo** : « Commandes avancées des systèmes dédiés à l'amélioration de la qualité de l'énergie : de la puissance basse tension à la montée en tension », Thèse de docteur de l'Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG), Grenoble, 1996.
- [14] **S. Nia Ahmed** : « Contribution à l'étude théorique et expérimentale d'un filtre actif parallèle à commande analogique et numérique temps réel », Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL), Lorraine, 1996.
- [15] **A. Bouafia** : « Techniques de commande prédictive et floue pour les systèmes d'électronique de puissance : application aux redresseurs à MLI », Thèse de doctorat en sciences, Université Ferhat Abbas Sétif (UFAS), Algérie, 06 Octobre 2010.
- [16] **Youssef touzani** : « commande aléatoire du convertisseur buck-boost a prélèvement sinusoïdal du courant », thèse doctorat en électronique et système, université blaise pascal, juillet 2006.
- [17] **A. Sannino**: « power-electronic solutions to power quality problem », Electric power systems Research 66, Elsevier science B.V.2003
- [18] **A. Arora** : « Solutions innovatrices pour l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique », Revue Qualité de L'énergie Electrique ABB 3/1998.
- [19] **M. Abdusalam** : « Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales », Thèse de Doctorat, Université de Nancy-I ,2008.
- [20] **F. Defaÿ** : « Commande prédictive directe d'un convertisseur multicellulaire triphasé pour une application de filtrage actif », Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, 2008.
- [21] **S. Bernard et G. Trochain** : « Compensation des courants harmoniques générés par

Bibliographie

les ordinateurs grâce à un compensateur actif d'harmoniques révolutionnaire », Publication : MGE UPS SYSTEMS-01/2000.

- [22] **H. Kouara** : « Application d'un filtre actif série au contrôle de la tension d'un réseau basse tension », Mémoire de Magister, Université de Batna, 2006
- [23] **B. TanPerng** : « A single-phase hybride active power filters with photovoltaic application », Mémoire de Master en Génie Electrique, Université de technologie Malaysia 2006.
- [24] **M.M. Swamy**: « Passive techniques for reducing input current harmonics », WP.AFD.01 Copyright by Yaskawa Electric America, Inc, 2005
- [25] **A. Hamadi** : « Contribution à l'étude des filtres hybrides de puissance utilisés pour améliorer la qualité de l'énergie dans le réseau électrique de distribution », Thèse de Doctorat, Université du Québec, 2010.
- [26] **S. R. DzondeNaoussi** : « Implantation de réseaux neuromimétiques sur cible FPGA Application à l'intégration d'un système de filtrage actif », Thèse de Doctorat, Université de Strasbourg, 2011.
- [27] **M. Shafiee Khor** : « Amélioration de la qualité de l'énergie à l'aide de compensateurs actifs : série, parallèle ou conditionneurs unifiés de réseaux électriques », Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, Nantes, 2006.
- [28] **T. Gouraud** : « Identification et rejet de perturbations harmoniques dans des réseaux de distribution électrique », Thèse de doctorat, Ecole Doctorale Sciences pour l'Ingénieur de Nantes, Janvier 1997.
- [29] **M. A. E. Alali** : « Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension (Automatisation des systèmes de puissance électriques) », Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg I, 12 Octobre 2002.
- [30] **Hadji Seddik** : « Correction du facteur de puissance dans les systèmes de traction alimentés en courant alternatif monophasé », Thèse de doctorat, École Nationale Polytechnique, El Harrach, Alger, Algérie, Décembre 2007.

Bibliographie

- [31] **S. Attia** : « Commande en temps réel d'un filtre actif de puissance utilisant la technique par mode de glissement », Mémoire de magister, Université Ferhat Abbas Sétif (UFAS), Algérie, 2005.
- [32] **N. Belhaouchet** : « Fonctionnement à Fréquence de Commutation Constante des Convertisseurs de Puissance en Utilisant des Techniques de Commande Avancées Application : Amélioration de la Qualité de l'Energie », Thèse de doctorat en sciences, Université Ferhat Abbas – Sétif, jui 2011
- [33] **S. Begag, N. Belhaouchet et L. Rahmani** : « Correction du facteur de puissance d'un convertisseur AC-DC monophasé à fréquence de commutation constante », 3rd International Conference on Electrical Engineering (ICEE'09), Algiers, Algérie, May 19-21, 2009.
- [34] **M. Benmeddour, M. Boumahraz, and M.C. Ghanem** : « Facteur de puissance unitaire par commande à hystérésis variable dans la cascade dévolteur-survolteur », Courrier du Savoir, No. 8, pp. 133-142, Juin 2007.
- [35] **Nimrod Vázquez et al**: « Three-phase rectifier with active current injection and high efficiency », IEEE, Transactions on Industrial Electronics, Vol. 56, No. 1, pp. 689–694, January 2009.
- [36] **Naik, M. Rastogi and N. Mohan**: « Third-harmonic modulated power electronics interface with 3-phase utility to provide a regulated DC output and to minimize line-current harmonics », IEEE, IAS 92 Ann. Meet Conf Rec, pp. 689–694, Octobre 1992.
- [37] **A. Bouafia** : « Techniques de commande prédictive et floue pour les systèmes d'électronique de puissance : application aux redresseurs à MLI », Thèse de doctorat en sciences, Université Ferhat Abbas Sétif (UFAS), Algérie, 06 Octobre 2010.
- [38] **J.D. Gandoy, C.M. Penalver**: « Dynamic and steady state analysis of a three-phase buck rectifier »IEEE Transon Power Electronics, vol. 15, no. 6, pp.953-959, Nov.2000.
- [39] **J. F. Chen, C. L. Chu**: « Combination voltage-controlled and current controlled PWM inverters for UPS parallel operation », IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 10, no. 5, pp. 547-558, Sep. 1995.

Bibliographie

- [40] **J. Fadat, Y. Dorali** : « Redresseur à absorption de courants sinusoïdaux : commande dans le repère triphasé », 3EI, no. 52, pp. 46-59, Mars 2008.
- [41] **P. Ladoux, G. Ollé** : « Compensateur d'harmonique et de puissance réactive », système didactique, RESELEC 2002.
- [42] **Mr A Barkat** : « Etude d'un redresseur en pont triphasé à MLI », Mémoire de Master, Université Larbi Ben M'hidi, Oum El-Bouaghi, juin 2016
- [43] **F. Aimene, S. Touahri** : « Etude et simulation d'un système redresseur MLI – onduleur Pour l'entraînement de la MAS », Mémoire de Master, Université kasdi merbah ouargla,2015
- [44] **A. Boulahia** : « Etude des Convertisseurs Statiques destinés à la Qualité de l'Energie Electrique », Mémoire de Master, Université de Constantine,2009

Résumé

L'utilisation des équipements à charges non linéaire, absorbent des courants non sinusoïdaux et consomment de la puissance réactive. Ces équipements contribuent considérablement à la détérioration de la qualité de l'énergie électrique. Alors, pour remédier à cette situation, Nous avons abordé le développement des technologies anciennes et nouvelles pour améliorer la qualité de l'énergie et réduire les problèmes des harmoniques, Pour ce faire, nous avons relié le système à travers un redresseur de courant commandé à absorption sinusoïdale dont le but d'avoir des courants sinusoïdaux à l'entrée, on contrôle les courants de phases par hystérésis autour des courants de références et régulateur de type PI , Nous avons terminé par une présentation des résultats de simulation, Ce qui nous a donné de bons résultats tout en améliorant la qualité du courant et de la tension.

Mot clés: Redresseur MLI-THD- facteur de puissance.

ملخص

استخدام المعدات ذات الأحمال الغير الخطية تمتص تيارات غير جيبيية وتستهلك طاقة رد الفعل , هذه السليبيات تساهم بشكل كبير في تدهور نوعية الطاقة الكهربائية, ولتصحيح هذا الوضع تطرقنا الي تطوير التقنيات القديمة الي اخرى جديدة لتحسين جودة الطاقة و تقليل من مشاكل التوافقات و للقيام بذلك قمنا بتوصيل النظام من خلال مقوم تيار مسيطر عليه والذي يهدف الي الحصول على التيارات الجيبية عند المدخلات, ونحن نتحكم في التيارات المرحلة عن طريق التباطؤ حول التيارات المرجعية و منظم من نوع PI ثم انهينا هذا العمل بتقديم نتائج المحاكات التي اعطتنا نتائج جيدة وتحسين جودة التيار و التوتر.

كلمات مفتاحيه : مقوم MLI- PI- THD - عامل القوة.