

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

Laboratoire de Matériaux,  
Technologie des Systèmes  
Énergétiques et Environnement



*Université de Ghardaïa*

Faculté des Sciences et Technologies  
Département d'automatique et électromécanique



**Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de**

## **MASTER**

**Domaine:** *Sciences et Technologies*

**Filière:** *Automatique*

**Spécialité:** *Automatique et Système*

**Par: LAMARA Haouari**

**GUED Ahmed Slimane**

## **Thème**

**Commande Directe de Puissance (DPC) d'un Redresseur Triphasé  
à MLI**

**Soutenu publiquement le: 24/06/2019**

**Devant le jury:**

<b>ARIF Mohamed</b>	MAA	Univ.Ghardaïa	<b>Président</b>
<b>KHATTARA Abdelouahab</b>	MCB	Univ.Ghardaïa	<b>Examineur</b>
<b>HACEN Nacer</b>	MAA	Univ.Ghardaïa	<b>Examineur</b>
<b>SADOUNI Radhwane</b>	MCB	Univ.Ghardaïa	<b>Encadreur</b>

**Année universitaire: 2018/2019**

N° d'ordre :  
N° de série :

## ***REMERCIEMENTS***

Remerciements à Dieu -le tout puissant- qui nous a aidé à réaliser ce modeste travail.

Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur

Docteur: ***SADOUNI Radhwane***, Maitre de Conférences à l'université de Ghardaia, pour ses conseils précieux, ses directives enrichissantes, sa patience et sa disponibilité, ainsi que pour la confiance et l'aide qu'il nous a accordé pour mener ce travail à terme.

Toutes mes reconnaissances vont également aux membres de jury:

Monsieur **ARIF Mohamed**, Maitre Assistant à l'université de Ghardaia qui nous avoir fait l'honneur de présider notre jury.

Monsieur **HACEN Nacer**, Maitre Assistant à l'université de Ghardaia.

Monsieur **KHATTARA Abdelouahab**, Maitre de Conférences à l'université de Ghardaia.

Nous remercions également tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

# *Dédicace*

A tous les scientifiques qui travaillent pour le bonheur de l'humanité.

Aux lecteurs de ce mémoire, pour qui, on l'espère, leur sera utile.

À nos parents avec toutes nos gratitudee pour tout

Ces années de sacrifice et d'encouragement

A nos frères et sœurs

A toute la famille **AHMED SLIMANE** et **LAMARA**.

À tous nos amis et collègues de notre vie privée et de l'université de Ghardaïa

---



---

## SOMMAIRE

Sommaire.....	I
Symboles et Abréviations.....	IV
Table des figures.....	VI
Liste des tableaux.....	VIII
Introduction générale.....	01
<b>Chapitre I</b>	
<b>Généralités sur les harmoniques</b>	
I.1 Introduction.....	03
I.2 Décomposition d'un signal périodique .....	04
I.2.1 Représentation spectrale.....	04
I.3 Définition.....	04
I.4 Problématique des harmoniques.....	05
I.5 Origine des harmoniques.....	06
I.6 Conséquences des harmoniques.....	07
I.6.1 Echauffement.....	07
I.6.2 Interférence avec les réseaux de télécommunication.....	07
I.6.3 Défauts de fonctionnements de certains équipements électriques.....	07
I.6.4 Risque d'excitation de résonance.....	07
I.7 Effets des harmoniques.....	07
I.7.1 Effets instantanés.....	08
I.7.2 Effets à terme.....	08
I.8 Caractérisation des harmoniques.....	10
I.8.1 Taux de distorsion harmonique de courant.....	10
I.8.1.1 Taux de Distorsions Harmoniques (THD).....	10
I.8.2 Taux de Distorsion Harmonique Individuel $TDH_n$ .....	10
I.8.3 Facteur de puissance.....	11
I.9 Norme.....	11
I.9.1 Norme relative à l'alimentation en tension alternative.....	11
I.9.2 Norme relative au courant absorbé par les appareils alimentés par une tension alternative .....	12
I.10 Solutions de dépollution des réseaux électriques.....	13

I.11 Réglementation.....	14
I.12 Conclusion.....	14

## Chapitre II

### Modélisations de redresseur à MLI

II.1 Introduction.....	15
II.2 Modélisation du redresseur non commandé.....	15
II.2.1 Redresseur non commandé.....	15
II.2.1.1 La diode.....	15
II.2.1.2 Symboles.....	16
II.2.1.3 Caractéristiques de la diode.....	16
II.2.1.4 Constitution.....	16
II.2.1.5 Fonctionnement.....	17
II.2.1.6 Type des diodes.....	17
II.2.1.7 Applications des diodes.....	18
II.2.1.7.1 En série.....	18
II.2.1.7.2 En parallèle.....	18
II.2.1.7.3 Une diode en série, l'autre en parallèle.....	18
II.2.1.8 Circuits à diodes.....	19
II.2.1.8.1 Redressement simple et double alternance.....	19
II.2.1.8.2 Redresseur simple alternance.....	19
II.2.1.9 Modélisation du redresseur.....	19
II.3 Modélisation du redresseur commandé.....	21
II.3.1 Redresseur commandé.....	21
II.3.1.1 Transistors.....	21
II.3.1.2 Caractéristiques essentielles pour un transistor IGBT.....	21
II.3.2 Redresseur en pont triphasé.....	22
II.3.3 Principe de fonctionnement du redresseur à MLI.....	22
II.3.3.1 Redresseur à MLI triphasé de tension.....	23
II.3.3.2 Redresseur a MLI triphasé de courant.....	24
II.3.4 Types de modélisation des redresseurs MLI.....	24
II.3.4.1 Modélisation en grandeurs triphasées.....	24
II.3.4.2 Modélisation dans le repère tournant d-q.....	25
II.3.4.3 La Modulation de largeur d'impulsion.....	25

---

---

II.3.5 Résultats de simulation.....	25
II.4 Conclusion.....	26
<b>Chapitre III</b>	
<b>Commande directe de puissance d'un redresseur à MLI</b>	
III.1 Introduction.....	27
III.2 Commande directe de puissance DPC.....	27
III.3 Principe de la commande directe de puissance.....	28
III.4 Estimation de la puissance instantanée.....	29
III.5 Estimation de la tension du réseau .....	30
III.6 Détermination de secteur.....	31
III.7 Régulateur à hystérésis .....	32
III.8 Correcteurs de puissance active.....	32
III.9 La table de commutation.....	32
III.10 Résultats de simulation.....	33
III.11 Interprétation des résultats de simulation.....	36
III.12 Etude comparative.....	36
III.13 Conclusion.....	38
Conclusion Générale.....	39
Bibliographie.....	IX

## Symboles et Abréviations

D: Puissance déformante.

S: Puissance apparente.

P: Puissance active.

FP: Facteur de puissance.

Q: Puissance réactive.

$S_p, S_q$ : L'erreur numérique des puissances.

$(\alpha-\beta)$ : le plan de travail.

V: Tension instantané de la source.

I: Courant instantané de ligne.

j: Désigne la partie imaginaire.

$\hat{p}$ : L'estimation puissances active.

$\hat{q}$ : L'estimation puissances réactive.

$\hat{v}$ : L'estimation tension.

k: Numéro du secteur.

$S_a, S_b$  et  $S_c$ : Les états de commutations

R: Résistance de la ligne.

L: Inductance de la ligne.

C: Capacité du filtre.

$i_a, i_b, i_c$ : Les courants de lignes

$e_a, e_b, e_c$ : Les tensions de lignes.

V: Tension continue.

$V_{dc}^{ref}$ : Tension continue de référence.

$I_{rd}$ : Courant redressé.

$I_{ch}$ : Courant de charge.

E: Amplitude des tensions triphasées.

$Q^*$ : La puissance réactive de référence.

THD: Taux de distorsion harmonique.

$THD_n$ : Taux de Distorsion Harmonique Individuel.

DTC: Commande Directe du Couple.

DPC: Commande Directe de Puissance.

MLI (PWM): Modulation de Largeurs d'Impulsions.

GTO: Gurēto Tīchā Onizuka.

IGBT: Insulated-gate Bipolar Transistor.



## Table des Figures

<b>Chapitre I: Généralités sur les harmoniques</b>		
Figure (I.1)	Spectre harmonique d'un signal	04
Figure (I.2)	La représentation de la forme de l'onde d'un courant déformé avec les différents courants harmoniques le constituant	05
Figure (I.3)	Synthèse d'une tension distordue à partir des harmoniques	06
Figure (I.4)	Diagramme de Fresnel des puissances	11
Figure (I.5)	Différents types d'élimination des harmoniques	13
<b>Chapitre II: Modélisation de redresseur à MLI</b>		
Figure (II.1)	Constitution de diode	16
Figure (II.2)	Symbole normalisé de diode	16
Figure (II.3)	Diode polarisé en direct	17
Figure (II.4)	Diode polarisé en inverse	17
Figure (II.5)	Redresseur non commandé à diode	20
Figure(II.6)	Tension redressée d'un redresseur non commandé à diode	20
Figure (II.7)	Déphasage entre le courant et la tension (diode)	21
Figure (II.8)	Principe de fonctionnement de redresseur à MLI	23
Figure (II.9)	Redresseur à MLI structure tension	24
Figure (II.10)	Redresseur à MLI structure courant (redresseurs MLI)	24
Figure (II.11)	Tension $V_{red}$ et $V_{red}$ de référence	25
Figure (II.12)	Déphasage entre le courant et la tension	26
<b>Chapitre III: Commande directe de puissance d'un redresseur à MLI</b>		
Figure (III.1)	Commande directe de puissance DPC	28
Figure (III.2)	Représentation vectorielle des vecteurs $V_a, V_b, V_c$ et $V'_a, V'_b, V'_c$	29
Figure (III.3)	Représentation du vecteur de la tension dans le plan de l'espace vectoriel $(\alpha, \beta)$	31
Figure (III.4)	Allure de tension $V_{dc}$ et de sa référence	34
Figure (III.5)	Allure de la tension et du courant de réseaux	34
Figure (III.6)	Courant de ligne $i_a$ (A)	35
Figure (III.7)	Allure de puissance active estimée et sa référence	35

Figure (III.8)	Allure de puissance réactive estimée et sa référence	35
Figure (III.9)	Facteur de puissance	36
Figure (III.10)	Redresseur non commande à diode	37
Figure (III.11)	Redresseur commandé à MLI	37
Figure (III.12)	Redresseur commandé par DPC	37

**Liste des tableaux:**

<b>Chapitre I: Généralités sur les harmoniques</b>		
Tableau (I.1)	Norme des harmoniques de tension du réseau	12
Tableau (I.2)	Norme des harmoniques de courant	12
<b>Chapitre III: Commande directe de puissance d'un redresseur à MLI</b>		
Tableau (III.1)	Table de commutation de la DPC	16
Tableau (III.2)	Paramètres électriques du circuit de puissance	16
Tableau (III.3)	Paramètres électriques du régulateur PI	17
Tableau (III.4)	Comparison termes de THD	17
Tableau (III.5)	Principales déférences entre les trois cas.	20

### Introduction générale

Un réseau électrique est un ensemble d'infrastructures énergétiques plus ou moins disponibles permettant d'acheminer l'énergie électrique des centres de production vers les consommateurs d'électricité. Il est constitué de lignes électriques exploitées à différents niveaux de tension, connectées entre elles dans des postes électriques. Les postes électriques permettent de répartir l'électricité et de la faire passer d'une tension à l'autre grâce aux transformateurs [12].

Un réseau électrique doit aussi assurer la gestion dynamique de l'ensemble (production – transport – consommation) mettant en œuvre des réglages ayant pour but d'assurer la stabilité de l'ensemble.

L'énergie électrique est généralement distribuée sous la forme de trois tensions constituant un système sinusoïdal triphasé. Un des paramètres de ce système est la forme d'onde qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde. La correction de la forme d'onde est rendue nécessaire si la déformation dépasse certaines limites, souvent atteintes dans les réseaux possédant des sources de perturbations harmoniques tels que: fours à arc, convertisseurs statiques de puissance, ou encore certains types d'éclairage,... etc [4].

Un autre problème affectant le bon fonctionnement du réseau électrique c'est celui de la puissance réactive. En effet l'énergie consommée est composée d'une partie "active", transformée en chaleur ou mouvement, et d'une partie "réactive" transformée par les actionneurs électriques pour créer leurs propres champs électromagnétiques. L'utilisateur ne bénéficie que de l'apport énergétique de la partie "active"; la partie "réactive" ne peut pas être éliminée, mais doit être compensée par des dispositifs appropriés. L'énergie totale soutirée au réseau de distribution sera ainsi globalement réduite [12].

L'objectif étant de réduire les harmoniques et améliorer la forme des courants coté réseau, avec l'augmentant du facteur de puissance ( $\cos \varphi=1$ ), et l'obtention d'une tension continue commandable et stabilisante à la sortie du redresseur. Pour cela et afin d'atteindre cet objectif, la commande directe de puissance d'un redresseur triphasé à MLI a été proposée.

Ce mémoire sera composé de trois chapitres comme suit:

Dans le premier chapitre on va donner des généralités sur la pollution des réseaux électriques, ainsi un aperçu sur les harmoniques et leurs effets indésirables et nuisibles.

Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation du redresseur non commandé et du redresseur à MLI, après avoir fait une description sur le fonctionnement des éléments semi-conducteurs (diode et transistor).

On va présenter dans le troisième chapitre la commande directe de puissance (DPC) d'un redresseur triphasé à MLI.

Finalement, on terminera par une conclusion générale.

CHAPITRE I  
GENERALITE SUR LES  
HARMONIQUES

## I.1 Introduction:

Depuis de nombreuses années, le distributeur d'énergie électrique s'efforce de garantir la qualité de la fourniture d'électricité. Les premiers efforts se sont portés sur la **continuité de service** afin de rendre toujours disponible l'accès à l'énergie chez l'utilisateur. Aujourd'hui, les critères de qualité ont évolué avec le développement des équipements où l'électronique prend une place prépondérante dans les systèmes de commande et de contrôle. L'énergie électrique est fournie sous forme de tension constituant un système sinusoïdal triphasé dont les paramètres caractéristiques sont les suivants [1]:

- La fréquence ;
- L'amplitude des trois tensions ;
- La forme d'onde. qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde ;
- Le déséquilibre. la symétrie du système triphasé, caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et de leur déphasage relatif.

La qualité d'énergie peut être affectée, soit du fait de certains incidents inhérents à la nature physique et aux sujétions liées à l'exploitation du réseau, soit du fait de certains récepteurs. Ces défauts se manifestent sous forme de différentes perturbations affectant un ou plusieurs des quatre paramètres précédemment définis. On a donc quatre possibilités distinctes de perturbations [1]:

- ❖ **Les fluctuations de la fréquence à 50 Hz:** elles sont rares et ne sont observées que lors de circonstances exceptionnelles, par exemple certains défauts graves du réseau, au niveau de la production ou du transport;
- ❖ **Les variations de l'amplitude:** il ne s'agit pas des variations lentes de tension qui sont corrigées par les transformateurs de réglage en charge, mais de variations rapides de tension ou de creux de tension se présentant souvent sous forme d'à-coups brusques. Les creux de tension peuvent être soit isolés, soit plus ou moins répétitifs, de forme régulière ou non;
- ❖ **La modification de la forme d'onde de la tension:** cette onde n'est alors plus sinusoïdale, et peut être considérée comme représentable par une onde fondamentale à 50 Hz, associée soit à des harmoniques de fréquence multiple entier de 50 Hz, soit même parfois à des ondes de fréquence quelconque;
- ❖ **La dissymétrie du système triphasé:** que l'on appelle déséquilibre. On peut, en plus, mentionner un type particulier de perturbations difficile à classer puisqu'il concerne

tout à la fois l'amplitude et la forme d'onde: ce sont les variations transitoires d'amplitudes dont la durée est inférieure à 10 ms.

## I.2 Décomposition d'un signal périodique:

Fourier a démontré que toute fonction périodique  $y(t)$  non sinusoïdale de fréquence  $F$  peut être représenté selon la décomposition harmonique sous la forme d'une somme composée:

- D'un terme sinusoïdal à la fréquence  $F$  de valeur efficace  $y_1$ , Ce terme est appelé fondamental;
- De termes sinusoïdaux dont les fréquences sont égales à  $n$  fois la fréquence  $F$  du Fondamental et de valeurs efficaces  $y_n$ ; Ces autres fréquences multiples du fondamental sont appelées harmoniques;
- D'une éventuelle composante continue d'amplitude  $y_0$ ;
- 'expression de ces grandeurs est donnée par le développement de Fourier de la fonction tension ou courant  $y(t)$ .

$$y(t) = y_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} y_n \sin(n\omega t - \varphi) \quad (\text{I.1})$$

**Exemple:** Si on a un signal de fréquence industrielle 50Hz à la présence des harmoniques de rang 5 (de fréquence 250Hz) et de rang 9 (de fréquence 450Hz) alors le signal résultant sera perturbé par ces harmoniques (périodique mais pas sinusoïdal) [6].

### I.2.1 Représentation spectrale:

C'est un histogramme donnant l'amplitude de chaque harmonique en fonction du rang. L'amplitude est donnée en valeur relative par rapport au fondamental en un point spécifié. La figure ci-dessous montre un exemple de spectre [10].

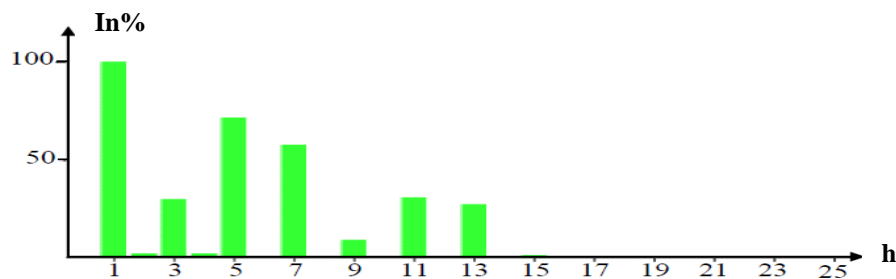


Figure (I.1): Spectre harmonique d'un signal.

### I.3 Définition:

Les harmoniques sont une superposition sur l'onde fondamentale à 50Hz, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples entières de celle du fondamental. Les déformations harmoniques sont des grandeurs aléatoires qui sont souvent la résultante des perturbations issues d'appareils distincts et transmis par le réseau. Cette transmission peut



s'effectuer avec atténuation s'il n'y a pas de résonance ou avec amplification dans le cas contraire.

La fréquence de résonance dépend de l'impédance, l'acuité de cette résonance est fonction du coefficient de surtension de cette impédance qui est directement liée aux charges de la clientèle.

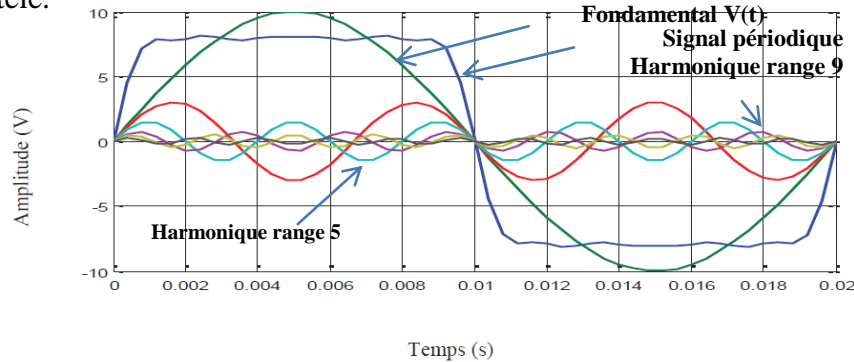


Figure (I.2): La représentation de la forme de l'onde d'un courant déformé avec les différents courants harmoniques le constituant.

#### 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.

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.

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 [7].

### I.5. 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. En général, les harmoniques pairs sont négligeables et seuls les harmoniques impairs existent. Nous pouvons également observer dessous-harmoniques ou des inter-harmoniques à des fréquences non multiples de la fréquence fondamentale. La figure (I.3) 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 [7].

Les origines des harmoniques proviennent de l'utilisation dans les milieux industriels et domestiques de récepteurs non-linéaires de différents types dont nous pouvons citer à titre d'exemples:

- Redresseur monophasé à diodes avec filtrage.
- Redresseur triphasé à diodes avec filtrage.
- Convertisseurs statiques.
- Variateur de vitesse des moteurs asynchrones.
- Gradateur monophasé (Régulation de puissance de fours à résistances).
- Modulation de puissance des lampes halogènes.
- Redresseur triphasé à thyristors (Variation de vitesse des moteurs à courant continu et des moteurs synchrones, Electrolyseurs).
- Moteur asynchrone (Machines-outils, Appareils électroménagers, Ascenseurs, ...)
- Alimentation à découpage (Micro-informatique, ...) [4].

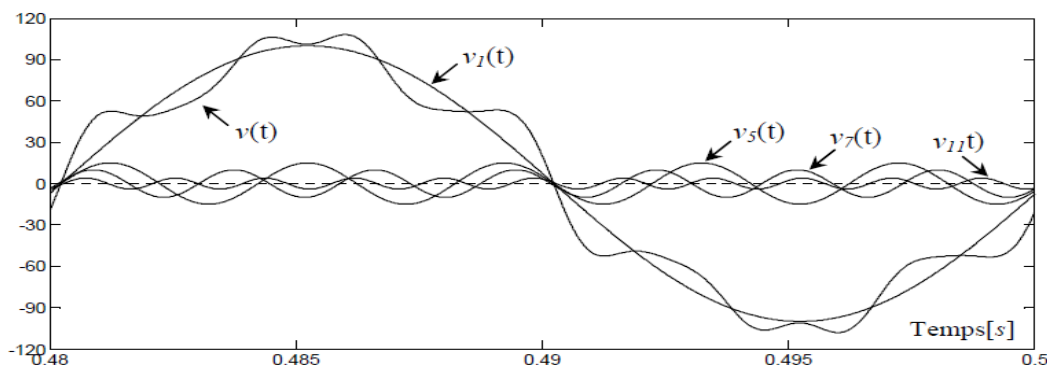


Figure (I.3): Synthèse d'une tension distordue à partir des harmoniques.

La cause principale de l'existence des harmoniques de tension, comme on le montrera ultérieurement, est l'injection dans le réseau des courants non sinusoïdaux par des charges non linéaires [7].

## **I.6. Conséquences des harmoniques:**

De nombreux effets des harmoniques sur les installations et les équipements électriques peuvent être cités.

### **I.6.1 Echauffement:**

Les pertes totales par effet Joule sont la somme de celles du fondamental et des harmoniques:

$$i^2 R = \sum_{h=1}^{\infty} i_h^2 R \quad (\text{I.2})$$

Avec  $i$  le courant total,  $i_h$  le courant harmonique de rang  $h$  qui représente la fondamentale pour  $h=1$ , et  $R$  la résistance traversée par le courant  $i$ .

### **I.6.2 Interférence avec les réseaux de télécommunication:**

Le couplage électromagnétique entre les réseaux électriques et de télécommunication peut induire dans ces derniers des bruits importants. Dans le cas de résonances, une partie des réseaux de télécommunication peut être rendue inutilisable.

### **I.6.3 Défauts de fonctionnements de certains équipements électriques:**

En présence des harmoniques, tout appareil dont le fonctionnement est basé sur le passage par zéro des grandeurs électriques (appareils utilisant la tension comme référence) peut être perturbé.

### **I.6.4 Risque d'excitation de résonance:**

Lorsque des batteries de capacité sont raccordées au réseau pour relever le facteur de puissance; les fréquences de résonance peuvent devenir assez faibles, et coïncider ainsi avec celles des harmoniques engendrés par les convertisseurs statiques. Dans ce cas, il y aura des phénomènes d'amplification des harmoniques [2].

## **I.7. Effets des harmoniques:**

De nombreux effets des harmoniques sur les installations et les équipements électriques peuvent être cités. Les effets les plus importants sont l'échauffement, l'interférence avec les réseaux de télécommunication, les défauts du mauvais fonctionnement des équipements de protection (ouvertures aléatoires des fusibles, déclenchements intempestifs des disjoncteurs/contacteurs) et le risque d'excitation de résonance dans le cas où la fréquence propre de l'ensemble condensateur réseau est proche d'un rang d'harmonique. Ces effets ont des impacts économiques majeurs, sachant qu'ils peuvent causer un surcoût lié à la

dégradation du rendement énergétique de l'installation (pertes d'énergie), un surdimensionnement des équipements, une perte de productivité (vieillesse accélérée des équipements, déclenchements intempestifs). Au-delà d'un taux de distorsion harmonique de tension de 8 %, les dysfonctionnements sont possibles. Entre 5 et 8 %, les dysfonctionnements sont probables. Les harmoniques sont donc des problèmes néfastes et il faut les limiter s'il n'est pas possible de les éliminer. On distingue deux types d'effets d'harmoniques, à définir: les effets instantanés et les effets à terme [8].

### 1.7.1. Effets instantanés:

Les effets instantanés font suite à un phénomène de résonance entre l'impédance du réseau et les condensateurs de compensation. Le plus spectaculaire de ce type d'effet est la destruction d'équipement (condensateurs, disjoncteur). D'autres troubles fonctionnels sont liés à la déformation de l'onde de tension tels que: couples pulsatoires sur les moteurs d'entraînement, vibrations, erreurs des systèmes de mesures (selon leur bande passante), perte de la détection du passage au zéro de tension pour les dispositifs de régulation.

D'une manière générale, sur tous les systèmes électroniques, les tensions harmoniques peuvent perturber les dispositifs de régulation. Elles peuvent influencer les conditions de commutation des thyristors lorsqu'elles déplacent le passage à zéro de la tension. En présence des efforts électrodynamiques proportionnels aux courants instantanés, les courants harmoniques généreront des vibrations, des bruits acoustiques, surtout dans les appareils électromagnétiques (transformateurs, inductances). Ainsi, les compteurs d'énergie à induction présentent des erreurs supplémentaires en présence d'harmoniques: Par exemple, un compteur classe 2 donnera une erreur supplémentaire de 0,3% avec un taux de 5% d'harmonique sur le courant et la tension [8].

### 1.7.2. 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 [9].

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 [10] [9]:

- **Alternateurs:** pertes supplémentaires dans les enroulements statoriques et dans les amortisseurs liées à l'augmentation de la valeur efficace du courant absorbé. Ces

perdes 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 celui des moteurs asynchrones en particulier (pertes supplémentaires dans le fer et les enroulements et pulsation du couple).
- **Echauffement des condensateurs :** Les pertes, causes de l'échauffement, sont dues à deux phénomènes : conduction et hystérésis dans les diélectriques. Elles sont en première approximation proportionnelles au carré du courant efficace. Les condensateurs sont donc sensibles aux surcharges, quelle soient dues à une tension fondamentale trop élevée ou à la présence de tensions harmoniques.

Les surchauffes des condensateurs, lors des surtensions, sont nocives car s'il n'y a pas claquage immédiat ; pour une surtension de 10% il en résulte une augmentation de 7 % de la température et une réduction de l'espérance de vie du condensateur de 30 %.

- **Echauffement dû aux pertes supplémentaires des machines et des transformateurs:** Les écarts de vitesse importants entre les champs tournants harmoniques et le rotor causent des pertes supplémentaires dans les machines tournantes. Les pertes supplémentaires des transformateurs sont dues à l'effet de peau qui se traduit par une augmentation de la résistance apparente du cuivre avec la fréquence, ainsi qu'à l'hystérésis et aux courants de Foucault dans le circuit magnétique.

➤ **Echauffement des câbles et des équipements:**

Les pertes des câbles traversés par des courants harmoniques sont majorées, d'où une augmentation de température. Parmi les causes des pertes supplémentaires on peut citer:

- Une augmentation de la valeur efficace du courant pour une même puissance active consommée;
- L'élévation de la résistance apparente de l'âme avec la fréquence, phénomène dû à l'effet de peau ;
- L'augmentation des pertes diélectriques dans l'isolant avec la fréquence, si le câble est soumis à une distorsion de tension non négligeable.

**Remarque:** Les effets à moyen terme et à long terme génèrent des échauffements dans les condensateurs et les conducteurs et provoquent un vieillissement prématuré du matériel ou encore des échauffements dus aux pertes supplémentaires dans les machines et les transformateurs [10].

## I.8 Caractérisation des harmoniques:

Différentes grandeurs sont définies pour chiffrer ces perturbations. Parmi celles-ci les plus utilisées sont [2]:

### I.8.1. Taux de distorsion harmonique de courant:

$$\text{THD} = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \frac{i_h^2}{i_1^2}} \quad (\text{I.3})$$

En général, les harmoniques pris en compte dans un réseau électrique sont inférieurs à 2500 Hz, ce qui correspond au domaine des perturbations basses fréquences au sens de la normalisation. Les harmoniques de fréquence plus élevée sont fortement atténués par la présence des inductances de lignes. De plus, les appareils générant des harmoniques ont, en grande majorité, un spectre d'émission inférieur à 2500 Hz, c'est la raison pour laquelle le domaine d'étude des harmoniques s'étend généralement de 100 à 2500 Hz, c'est-à-dire des rangs 2 à 50.

### I.8.2. Taux de Distorsion Harmonique Individuel $\text{TDH}_n$ :

Le taux de distorsion harmonique individuel de rang  $n$  est le rapport de la valeur efficace  $I_n$  de l'amplitude de l'harmonique  $n$  à celle du fondamental  $i_0$ :

$$\text{TDH}_n = 100 \frac{i_n}{i_0} \quad (\text{I.4})$$

### I.8.3. 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**). 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. Dans le cas où il y a des harmoniques en triphasé, une puissance supplémentaire appelée la puissance déformante (**D**), donnée par la relation (I.5), apparaît comme le montre le diagramme de Fresnel de la Figure (I.4).

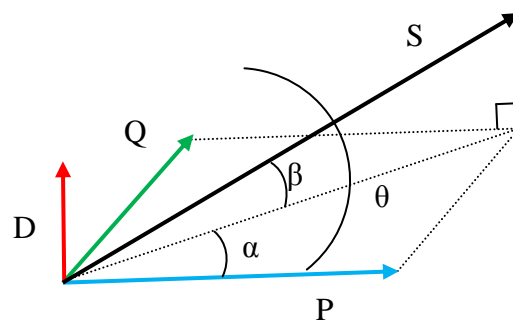


Figure (I.4):Diagramme de Fresnel des puissances

$$D = 3V_1 \sqrt{\sum_{h=2}^{50} i_h^2} \quad (\text{I.5})$$

Le facteur de puissance (FP) devient:

$$F_p = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} = \cos \alpha \cos \beta \quad (\text{I.6})$$

On voit bien que les harmoniques affectent aussi le facteur de puissance [2].

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (\text{I.7})$$

Le facteur de puissance sera toujours inférieur à 1 [4].

## 1.9 Norme:

### I.9.1 Norme relative à l'alimentation en tension alternative:

On définit pour l'harmonique de rang  $k$  le taux individuel d'harmonique de tension en % [5]:

$$\tau_{hvk} = 100 \frac{V_{hk}}{V_{eff}} \quad (\text{I.8})$$

Tableau (I.1): Norme des harmoniques de tension du réseau.

Rang harmonique	Réseau public		Réseau industriel		
	Basse tension	Haute tension	Rang harmonique	Basse tension	Haute tension
2	2	1,5	2	2	3
3	5	2	3	5	6
4	1	1	1	1	1,5
5	6	2	3	6	8
6	0,5	0,5	0,5	0,5	1
7	5	2	3	5	7
8	0,5	0,2	0,5	0,5	1
9	1,5	1	1,5	1,5	2,5
10	0,5	0,2	0,5	0,5	1
11	3,5	1,5	3	3,5	5
12	0,2	0,2	0,2	0,2	1
13	3	1,5	3	3	4,5
<b>Global</b>	<b>8</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>8</b>	<b>10</b>

### I.9.2 Norme relative au courant absorbé par les appareils alimentés par une tension alternative:

On se limite ici aux appareils dont la consommation est inférieure ou égale à 10 A en valeur efficace. On a élaboré la norme CEI 1000-3-2 pour définir les valeurs maximales acceptables pour les valeurs efficaces des principaux harmoniques (voir tableau (I.2)) [5].

Tableau (I.2): Norme des harmoniques de courant.

Rang de l'harmonique	Courant maximal en valeur efficace
2	1,08 A
3	2,3 A
4	0,43 A
5	1,14 A
6	0,3 A
7	0,77 A
8 à 40 (harmoniques de rang n pair)	$0,23 \times \frac{8}{n}$ en A
9	0,4 A
11	0,33 A
13	0,21 A
15 à 39 (harmoniques de rang n impair)	$0,15 \times \frac{815}{n}$ en A



### I.10 Solutions de dépollution des réseaux électriques:

Il existe deux solutions principales de dépollutions électriques pour réduire les perturbations: la solution de dépollution traditionnelle qui consiste à utiliser les convertisseurs statiques peu ou moins polluant et les solutions de dépollution moderne qui utilise le filtrage pour compenser les harmoniques.

Une des solutions intéressantes de réduction des harmoniques est l'utilisation d'un redresseur PWM(MLI), Deux types de redresseur PWM peuvent être utilisés, le redresseur à PWM de courant et le redresseur PWM de tension [3].

Le redresseur MLI fournit [3]:

- Un flux de puissance bidirectionnel ;
- Un courant de source proche d'une sinusoïde ;
- Réglage du facteur de puissance à l'unité ;
- Un faible  $THD < 5\%$ .
- Un ajustement et une stabilité de la tension (courant) continu.

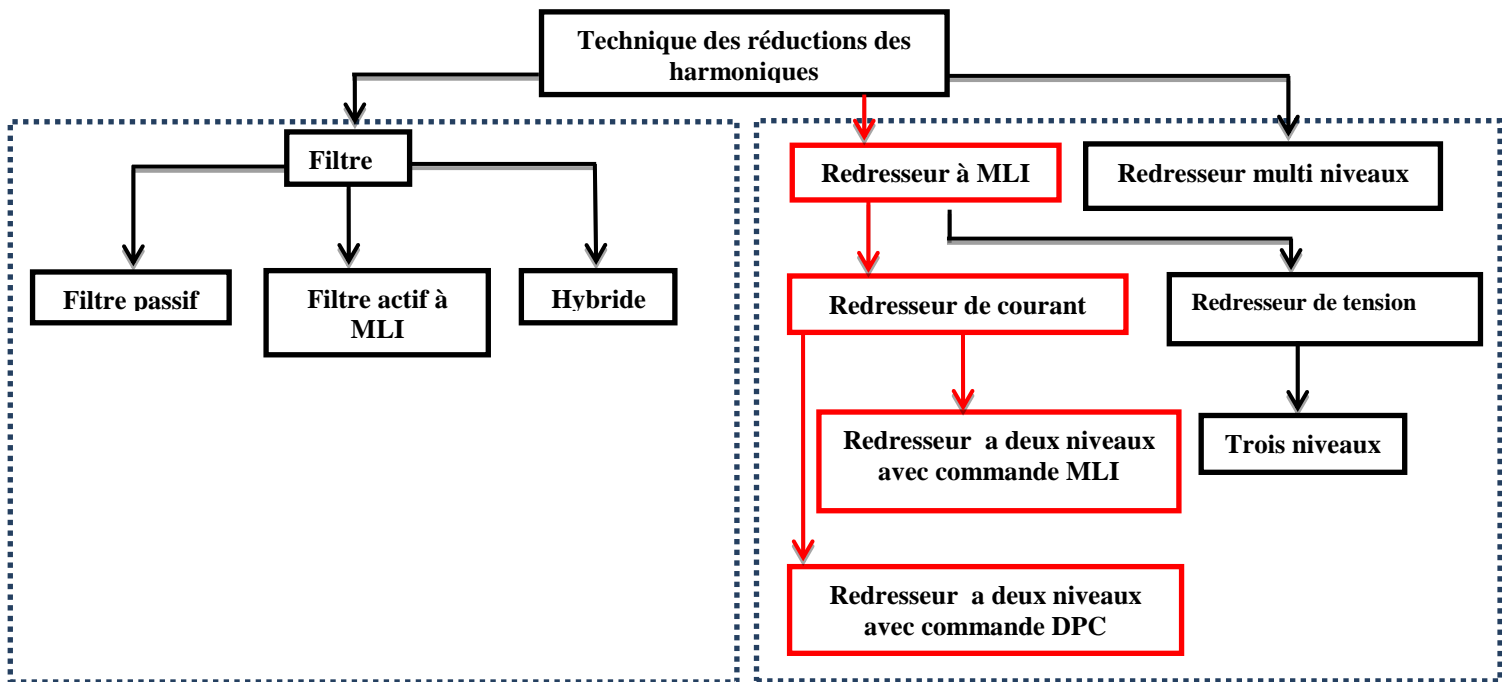


Figure (I.5): Différents types d'élimination des harmoniques

Dans ce mémoire, on s'intéresse au redresseur triphasé commandé par les deux techniques: MLI et DPC.

### **I.11 Réglementation:**

Il est d'usage de dire que, dans les installations industrielles, les tensions harmoniques dont le THD est inférieur à 5% ne produisent pas d'effet notable. Entre 5% et 7% on commence à observer des effets, et pour plus de 10% les effets sont quasi certains [3].

### **1.12 Conclusion:**

L'énergie électrique, principalement produite et distribuée sous forme de tensions triphasées sinusoïdales, permet de fournir la puissance électrique nécessaire aux différentes charges sur le réseau électrique. Lorsque la forme d'onde n'est plus sinusoïdale, on rencontre des perturbations qui peuvent affecter le bon fonctionnement de nombreux équipements et de charges raccordés sur le réseau. Dans ces conditions, des problèmes de compatibilité électromagnétique peuvent survenir entre ces éléments connectés au réseau.

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents types de perturbations affectant le réseau électrique et qui ont des effets néfastes sur les équipements électriques. En outre, nous avons montré les différentes solutions existantes pour la dépollution harmonique comme le redresseur à MLI.

CHAPITRE II  
MODILISATION DE  
REDRESSEUR A MLI

## II.1 Introduction:

La modélisation est une étape fondamentale dans l'analyse d'un dispositif à automatiser. Elle consiste à décrire mathématiquement un processus technique d'un système à régler. Dans ce chapitre nous allons présenter une modélisation du redresseur non commandé et du redresseur commandé à MLI. La diode est généralement le premier composant semi-conducteur présenté dans tous l'électronique. Ceci vient du fait que parmi les différents composants semi-conducteurs, la diode possède la structure interne la plus simple.

La commutation électronique dans les composants semi-conducteurs s'agit essentiellement d'interruptions ou de rétablissement des courants qui peuvent être commandés à des instants arbitraires ou périodiques. Les composants utilisés en commutation sont de divers types: diodes, transistors bipolaires, transistors à effet de champ, transistors MOS ou thyristors. Les principales caractéristiques sont :

- La rapidité, autrement dit la fréquence maximale à laquelle on peut considérer la commutation acceptable ;
- La tension et la puissance maximale que le composant peut supporter sans détérioration [19].

## II.2 Modélisation du redresseur non commandé:

### II.2.1 Redresseur non commandé:

#### II.2.1.1 La diode:

C'est le composant à semi-conducteurs le plus simple, le moins coûteux, le plus fiable. Mais il n'est pas commandable. Une diode conduit dès que la tension à ses bornes est positive (symbole  $v \uparrow = 0$ ) et se bloque quand le courant qui la traverse tend vers 0 (symbole  $i \downarrow = 0$ ). En définitive, les changements d'état de la diode sont spontanés et donnés par les relations suivantes:

À la fermeture,  $CF = (v \uparrow = 0)$

À l'ouverture,  $CO = (i \downarrow = 0)$

En commutation (lors du changement d'état), on caractérise la diode au moment du blocage par le temps de recouvrement inverse TRR (Reverse Recovery Time) qui est la durée pendant laquelle elle laisse passer un courant inverse jusqu'au blocage définitif. Ce temps est indispensable pour la charge du condensateur équivalent à l'état bloqué. On désigne par CRR (Reverse Recovery Charge) la valeur de cette quantité d'électricité de la jonction p-n [5].

### II.2.1.2 Symboles:

On représente la diode par son symbole normalisé (Figure II.1) ou par d'autres symboles (figure II.2) [24].

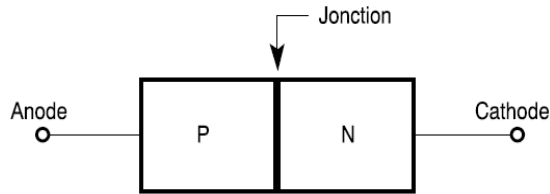


Figure (II.1): Constitution de diode.

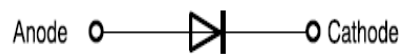


Figure (II.2): Symbole normalisé de diode.

### II.2.1.3 Caractéristiques de la diode:

En électronique de puissance, on s'intéresse essentiellement aux performances suivantes pour une diode [5]:

- Faible chute de tension à l'état passant ( $f=1$ );
- Faible courant à l'état bloqué ( $f=0$ );
- Temps de commutation très faible ( $t_{rr}$ : time reverse recovery);
- Capacité CT à l'état bloqué très faible (CT de l'ordre de quelques pF).

### II.2.1.4 Constitution:

Une diode est un dipôle passif et non-linéaire. Passif parce que ce composant ne peut jamais fournir d'énergie au circuit et non linéaire parce que la tension à ses bornes n'est pas proportionnelle au courant. Pour former une diode, on utilise un matériau semi-conducteur (le silicium en général) sur lequel on crée une jonction en dopant différemment deux zones, c'est-à-dire en ajoutant des impuretés qui modifient le comportement électrique de la substance.

On crée ainsi une zone P et une zone N (Figure II.1).

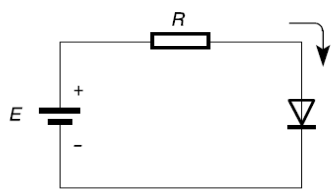
C'est la jonction qui donne à la diode ses propriétés particulières.

La connexion reliée à la partie dopée P est appelée anode et celle qui est reliée à la partie N est nommée cathode [24].

### II.2.1.5 Fonctionnement:

En simplifiant, on peut dire qu'une diode laisse passer le courant lorsqu'elle est branchée en polarisation directe (tension positive sur l'anode) et qu'elle bloque le passage du courant lorsque la polarisation est inverse (tension positive sur la cathode).

Dans le premier cas (Figure II.3), on dit que la diode est passante ou conductrice et dans le second cas (Figure II.4), on dit que la diode est bloquée. Si l'on regarde d'un peu plus près, on constate qu'il faut en fait un minimum de tension directe pour rendre la diode conductrice : c'est le seuil de la jonction. Pour une diode au silicium, ce seuil est de l'ordre de 0,6 V. Tant que la diode reste passante, la tension à ses bornes garde une valeur voisine de 0,6 à 0,7 V. En polarisation inverse, on constate que si l'on dépasse une certaine valeur de tension, il apparaît également un courant: c'est le claquage de la jonction. Ce phénomène est dû soit à l'effet d'avalanche, soit à l'effet Zener. Le claquage n'est pas destructif à condition que le courant soit limité à une valeur raisonnable par une résistance [24].



Figure(II.3): Diode polarisé en direct.

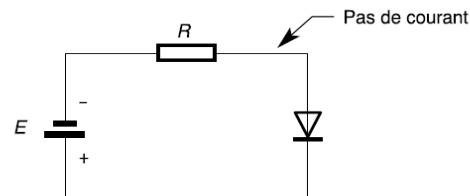


Figure (II.4): Diode polarisé en inverse.

### II.2.1.6 Type des diodes:

- ❖ Diode Zener
- ❖ Diode varicap
- ❖ Photodiode
- ❖ Diode électroluminescente
- ❖ Diode Schottky
- ❖ Diode Transil
- ❖ Diode laser
- ❖ Diode Gunn

- ❖ Diode PIN
- ❖ Diode à effet tunnel
- ❖ Diode à vide

### II.2.1.7 Applications des diodes:

#### II.2.1.7.1 En série dans un circuit:

Redressement de tension (conversion courant alternatif vers courant continu, semi-redressé); protection contre une erreur de branchement d'un circuit alimenté en courant continu en empêchant la circulation du courant dans le mauvais sens ;détection de valeur crête ou d'enveloppe ou d'une modulation dans la transmission en modulation d'amplitude; les diodes sont en général l'élément non-linéaire nécessaire à la multiplication de fréquence hétérodyne; plusieurs diodes en série transmettent le signal avec une différence de potentiel continue qui diminue la distorsion de raccordement dans un étage de sortie push-pull d'amplificateur électronique à transistors bipolaires ;la non-linéarité d'une ou plusieurs diodes en série avec une résistance suffisamment grande sert à adapter la réponse de circuits électroniques, et notamment donne une approximation de la valeur efficace d'un signal mise à profit dans un VU-mètre [20].

#### II.2.1.7. 2 En parallèle:

Restitution de composante continue pour la transposition d'un signal électrique (pompe à diode (en)) ;régulation de tension simple (alimentations simples de montages électroniques) et référence de tension avec une diode Zener; montages écrêteurs et protection contre les surtensions (diode Zener, Transil...).

#### II.2.1.7. 3 Une diode en série, l'autre en parallèle:

Doubleur et multiplicateur de tension ou pompe à diodes, dont multiplicateurs de tension Schenkel; transposition de niveau d'un signal par pompe à diodes (par exemple: génération d'une alimentation négative à partir d'une alimentation positive). Les diodes dites de roue libre sont un élément capital de l'alimentation à découpage.

Elles sont utilisées pour la compensation des variations de température et en thermométrie (mesure de température en fonction de la variation de la caractéristique)[20].

Les diodes permettent la réalisation de circuits logiques câblés simples Utilisées en pontage (bypass en anglais) elles assurent la protection des générateurs (panneaux solaire photovoltaïques en série, etc.).

Les diodes électroluminescentes sont utilisées en traitement du signal dans les photo coupleurs.

Les diodes Gunn permettent la production de rayonnement de très haute fréquence à faible puissance.

Les diodes varicap ont leur application pour l'accord des récepteurs radios et TV [20].

### II.2.1.8 Circuits à diodes:

#### II.2.1.8.1 Redressement simple et double alternance:

La plupart des circuits électroniques ont besoin d'une tension continue pour fonctionner. Puisque la tension de réseau électrique est alternative (AC), on la transforme en une tension continue (DC) par un montage appelé alimentation. Le premier étage de cette alimentation est le redresseur [25].

#### II.2.1.8.2 Redresseur simple alternance:

Il admet l'alternance positive et annule l'alternance négative. Une simple diode en série avec la charge suffit à réaliser cette fonction [25].

#### II.2.1.9 Modélisation du redresseur:

Concernant le redresseur non commandé qui veut dire qu'on ne peut pas varier le rapport entre les tensions alternatives d'entrées et la tension continue de la sortie est composé des diodes. Il fournit une tension moyenne de sortie fixe pour une tension alternative d'alimentation donnée.

Ce redresseur est appelé également convertisseur unidirectionnel parce qu'il permet la puissance de ne s'écouler que de l'alimentation alternative vers le récepteur continu.

L'avantage de ce montage est d'être simple et d'un coût faible, bien qu'il possède un facteur de puissance faible et une distorsion harmonique des courants d'entrées élevés.

Ainsi, pour des tensions  $e_a, e_b$  et  $e_c$  qui sont des tensions entre phases et neutre (tensions simples) de valeur efficace  $V$ , nous avons les expressions suivantes [23]:

$$\begin{aligned} e_a &= \sqrt{2}V \sin(\omega t) \\ e_b &= \sqrt{2}V \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ e_c &= \sqrt{2}V \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{aligned} \quad (\text{II.1})$$

L'expression de la tension de charge est comme suite :

$$V_{ch} = e_{max} \frac{3\sqrt{3}}{3} \quad (\text{II.2})$$

Le modèle de ce redresseur est représenté par la figure (II.5):



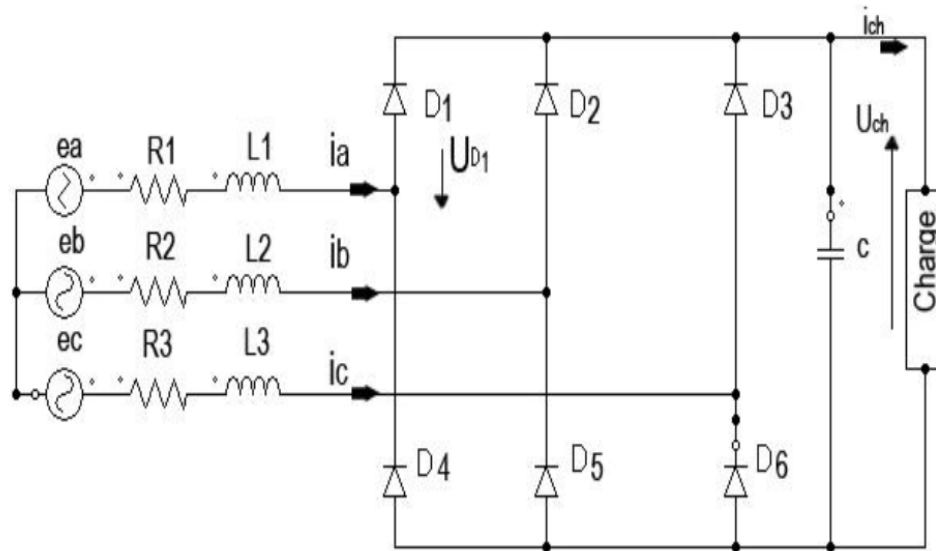
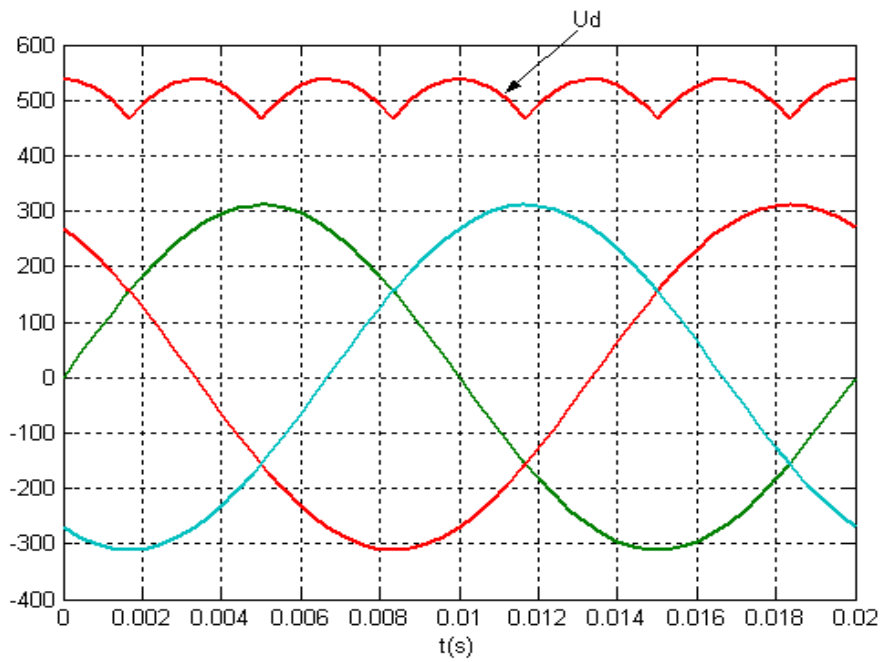


Figure (II.5): Redresseur non commandé à diode.

Les diodes :  $D_1, D_2$  et  $D_3$  sont à cathode commune, assurant l'allée du courant  $I_d$ .

Les diodes :  $D_4, D_5$  et  $D_6$  sont à anode commune, assurant le retour du courant  $I_d$ .



Figure(II.6): Tension redressée d'un redresseur non commandé à diode.

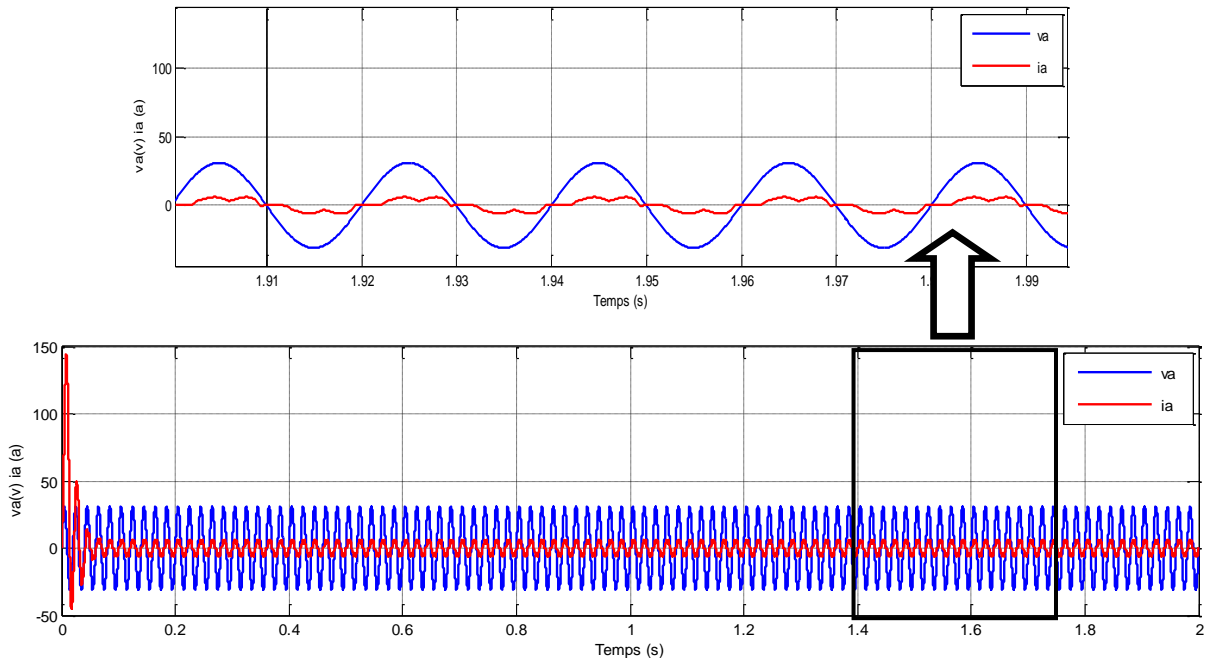


Figure (II.7): Déphasage entre le courant et la tension (diode)

### II.3 Modélisation du redresseur commandé:

#### II.3.2 Redresseur commandé:

##### II.3.2.1 Transistors:

Le transistor est l'élément de base de l'électronique moderne. Si les circuits intégrés sont formés d'un grand nombre de transistors regroupés sur la même pastille de semi-conducteur, on trouve aussi dans beaucoup de domaines des transistors discrets (un seul élément par boîtier) [24].

##### II.3.2.2 Caractéristiques essentielles pour un transistor IGBT:

Si le choix se porte sur l'utilisation d'un tel transistor, c'est que le convertisseur est un hacheur ou un onduleur, la puissance nominale envisagée est comprise (approximativement) entre 1 kW et 500 kW. Les données techniques sont les suivantes pour caractériser un transistor IGBT [5]:

- ❖ VCES: Tension collecteur-émetteur maximale;
- ❖ IC: Courant de drain;
- ❖ QGe (on): Charge nécessaire sur la grille pour saturer le transistor;
- ❖ Td (on): Retard à la commande pour saturer le transistor;
- ❖ tr: Temps de montée pour saturer le transistor;
- ❖ td (off): Retard à la commande pour bloquer le transistor;
- ❖ tf: Temps de descente bloquer le transistor;
- ❖ VCE (sat): Tension collecteur-émetteur à l'état saturé;

- ❖  $t_{rr}$ : Temps de recouvrement inverse de la diode en antiparallèle;
- ❖ Les températures sont celles de la jonction principale.

### II.3.3 Redresseur en pont triphasé:

Le redresseur en pont triphasé est identique au redresseur en pont monophasé sauf qu'il possède deux diodes supplémentaires raccordées à la troisième phase, ce redresseur est aussi connu sous le nom de pont de Graëtz[21].

### II.3.4 Principe de fonctionnement du redresseur à MLI:

Il est représenté par la figure 1, les transistors IGBT et les diodes constituant le pont sont supposés idéales. C'est à dire que l'on néglige les phénomènes de commutation ainsi que les pertes par conduction. Le redresseur de type pont de Graëtz est constitué de transistors IGBT comprenant chacun une diode en antiparallèle d'une manière à assurer la continuité des courants de sources [21].

Le bloc source est composé d'une FEM triphasée purement sinusoïdale en série avec une résistance  $R$  et une inductance  $L$  sur chaque phase.

Le principe de fonctionnement d'un redresseur à MLI est de garder la tension à la sortie du redresseur égale à une valeur de référence désirée, en utilisant une boucle d'asservissement comme représenté sur la figure (II.7). Pour accomplir cette tâche, la tension de sortie du redresseur est mesurée et comparée à une référence  $U_c$ . Le signal d'erreur produit les ordres de commande pour les transistors du redresseur.

De cette façon, l'énergie peut venir ou retourner à la source alternative s'accordant avec les conditions de la tension de sortie de redresseur mesurée aux bornes du condensateur. Quand le courant  $I_d$  est positif (fonctionnement redresseur), le condensateur  $C$  est déchargé, et le signal d'erreur demande au bloc de commande plus d'énergie d'alimentation à partir du réseau. Le bloc de commande prend l'énergie d'alimentation en produisant des signaux appropriés de MLI pour les transistors.

De cette façon des écoulements du courant du côté alternatif vers le côté continu et la tension de condensateur est récupérée.

Inversement, quand  $I_d$  devient négatif (fonctionnement onduleur), le condensateur  $C$  est surchargé, et le signal d'erreur demande de la commande de décharger le condensateur et l'énergie retourne vers le réseau.

On distingue deux types de fonctionnement relatifs à la nature des sources reliées. Sachant que lorsque deux sources sont reliées directement leurs natures doivent être différentes.

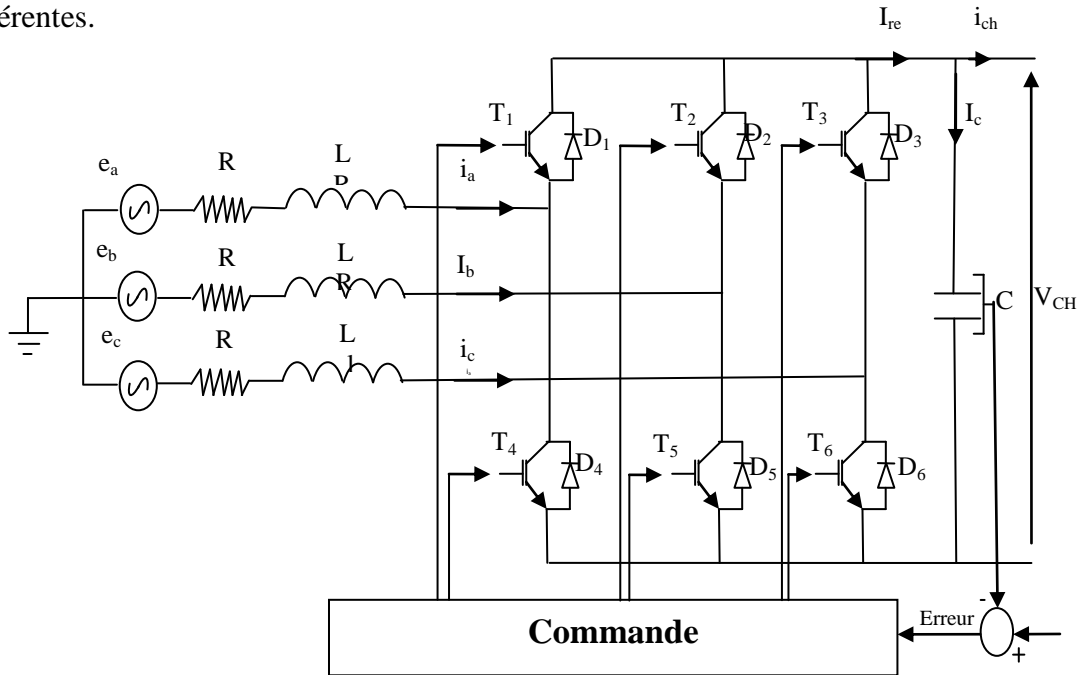


Figure (II.8):Principe de fonctionnement de redresseur à MLI.

On peut utiliser pour les redresseurs à MLI les mêmes structures que pour les onduleurs à MLI, on distingue donc deux types de structures:

- Un redresseur MLI de courant alimenté par une source triphasée de courants sinusoïdaux, débitant sur une source de tension, a la structure d'un onduleur de tension figure (II.8).
- Un redresseur MLI de tension alimenté par une source triphasée de tensions sinusoïdales, débitant sur une source de courant, a la structure d'un onduleur de courant figure (II.9) [24].

### II.3.4.1 Redresseur à MLI triphasé de tension:

Dans cette structure la source alternative triphasée associée au filtre «RLC» se comporte comme un générateur de tension, et la source continue comme un générateur de courant figure (II.8) [20], [26].

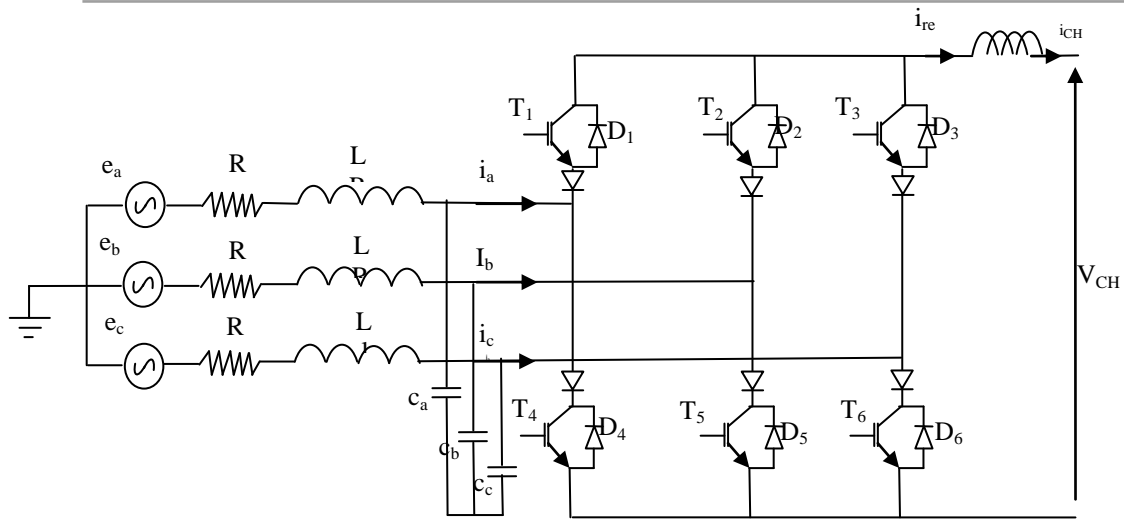


Figure (II.9): Redresseur à MLI structure tension.

**II.3.4.2 Redresseur MLI triphasé de courant:**

Dans cette structure, la source alternative triphasée associée au filtre «RL» se comporte comme un générateur de courant, et la source continue comme un générateur de tension figure (II.9)[26], [20].

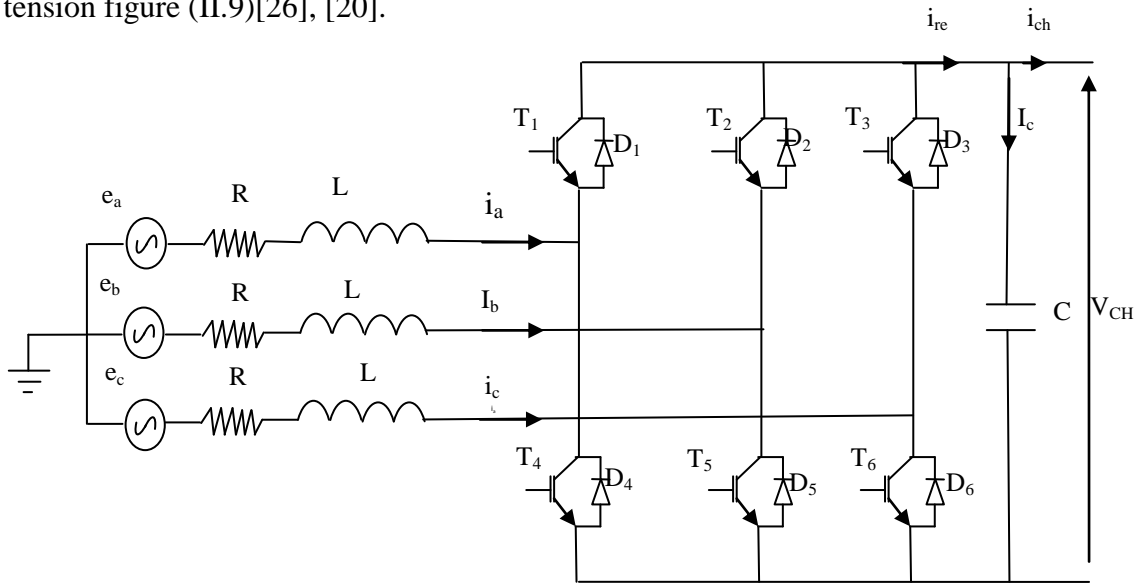


Figure (II.10): Redresseur à MLI structure courant (redresseurs MLI).

**II.3.5 Types de modélisation des redresseurs MLI:**

**II.3.5.1 Modélisation en grandeurs triphasées:**

Le premier modèle est basé sur l’usage d’un vecteur général  $y(t)$ , constitué de trois composantes triphasées représentant une grandeur triphasée [28]:

$$y_t = y_a y_b y_c \tag{II.3}$$

Le modèle résultant prendra la forme ci-dessous:

$$x = f_x u \tag{II.4}$$

Pour ce modèle, les courants traversant les inductances et la tension aux bornes du condensateur constituent le vecteur des variables d'état " $x$ ". Les ordres de commutation  $S_a$ ,  $S_b$  et  $S_c$  sont le vecteur de commande " $u$ ", les tensions du réseau et le courant de charge sont représentés par la variable " $w$ ".

### II.3.5.2 Modélisation dans le repère tournant $d$ - $q$ :

Le repère synchrone  $d$ - $q$  tourne à la pulsation  $\omega$  ( $\omega=2\pi f$ ,  $f$ : la fréquence fondamentale de la tension du réseau). La projection de chacun des vecteurs, exprimant les quantités électriques du redresseur, sur les deux axes perpendiculaires  $d$  et  $q$  donne deux composantes constantes, si le module de ce vecteur est constant et tourne à la même pulsation que le repère [28].

### II.3.5.3 La Modulation de largeur d'impulsion:

La modulation de largeur d'impulsion consiste à comparer le signal de référence avec un ensemble de porteuses (signal triangulaire ou en dents de scie). La comparaison permet de produire un signal modulé qui servira à déterminer les signaux de gâchettes des interrupteurs [28].

### II.3.6 Résultats de simulation:

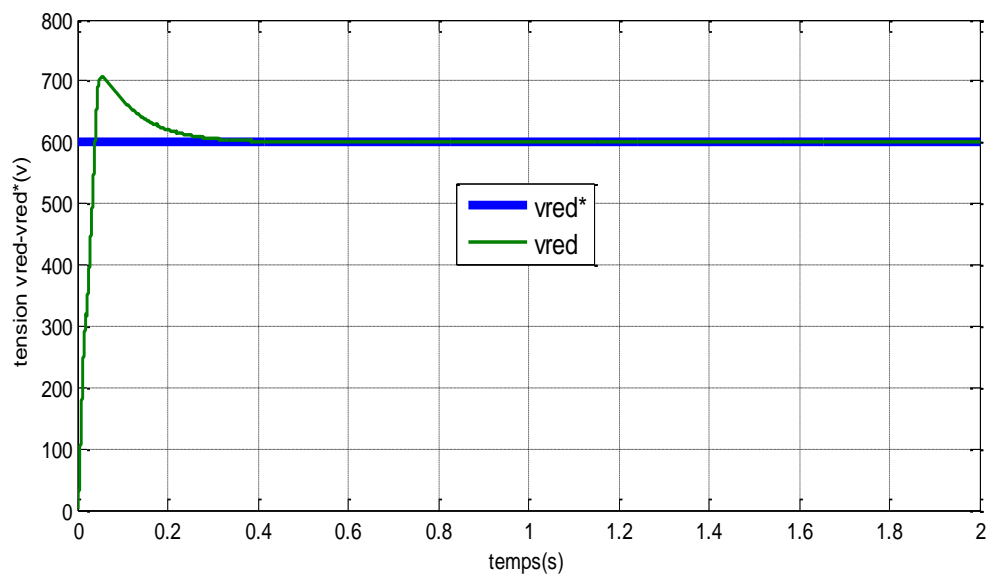


Figure (II.11): Tension  $V_{red}$  et  $V_{red}^*$  de référence

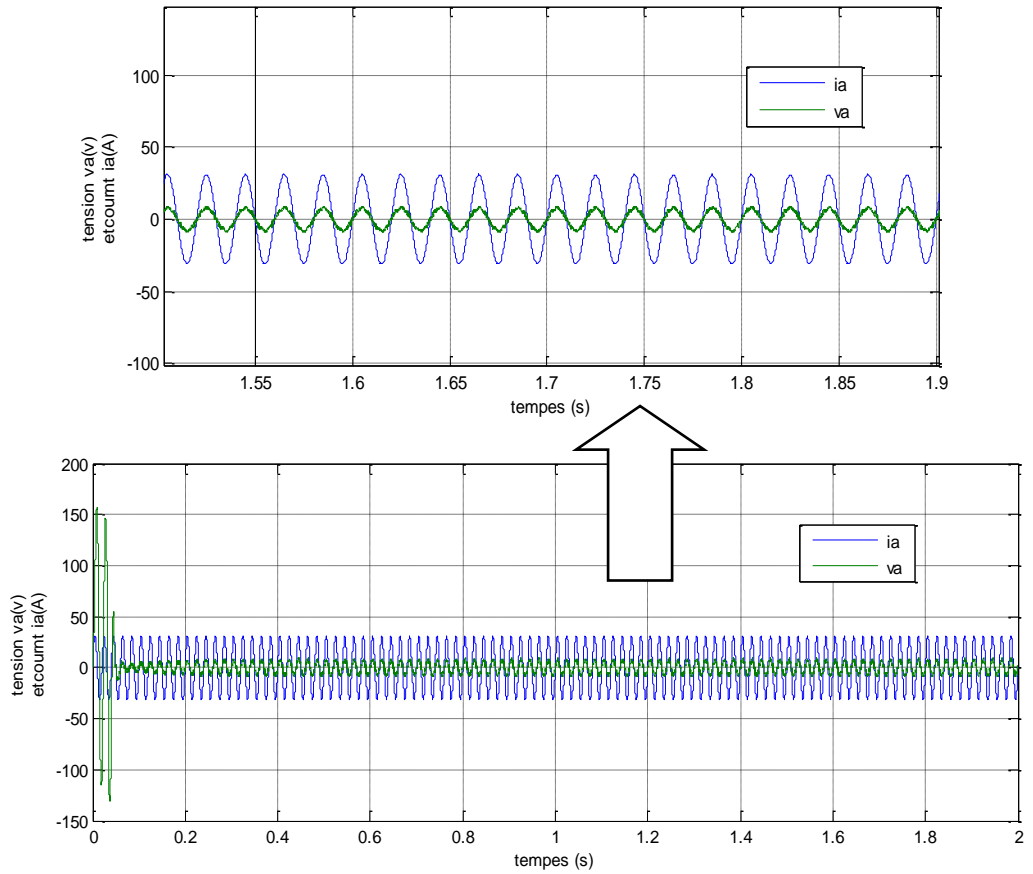


Figure (II.12): Déphasage entre le courant et la tension.

**II.4 Conclusion:**

Dans ce chapitre nous avons présenté une étude fonctionnelle du redresseur triphasé non commandé et du redresseur triphasé à MLI, commençant par des généralités sur les diodes et les transistors qui sont les éléments de base qui constituent ces redresseurs, puis on a passé à la modélisation et simulation des redresseurs. Les résultats de simulation montrent les améliorations remarquables du redresseur triphasé à MLI.

CHAPITRE III  
COMMANDE DIRECTE  
DE PUISSANCE D'UN  
REDRESSEUR A MLI



### III.1 Introduction:

L'avènement de l'électronique de puissance a eu un impact majeur sur le monde industriel au cours des dernières décennies. Cet avènement s'est produit par l'arrivée sur le marché des composants d'électronique de puissance tels les thyristors, les triacs, les GTO, les IGBT ou les transistors de forte puissance. Ces composantes ont permis le développement de convertisseurs statiques de grande puissance qui permettent la conversion de la puissance électrique d'une forme quelconque à une autre forme. Ces convertisseurs apportent un progrès considérable au niveau des procédés industriels L'utilisation de ces convertisseurs statiques dans les installations de conversion d'énergie électrique participe à détériorer la "qualité" du courant et de la tension des réseaux de distribution. En effet, ces systèmes consomment des courants non sinusoïdaux.

Les paragraphes suivants présentent une synthèse des redresseurs à commande MLI, qui sont classés comme une solution de ce problème [1].

Dans ce chapitre nous nous intéressons à la commande directe de puissance pour le contrôle du redresseur triphasé à MLI. On va tout d'abord modéliser le redresseur MLI triphasé, ensuite nous appliquerons la technique de commande DPC. Le chapitre sera finalisé par des résultats de simulation avec interprétations et conclusion [18].

### III.2 Commande directe de puissance DPC:

L'idée principale de la commande directe de puissance (DPC) proposée initialement par Ohnishi (1991) et développée ensuite par Noguchi et Takahachi en 1998, est similaire à la commande directe du couple (DTC) des machines asynchrones. Au lieu du flux et du couple, les puissances actives (P) et réactive (Q) instantanées sont choisies comme deux grandeurs à contrôler (fig.III.1)[15],[18].

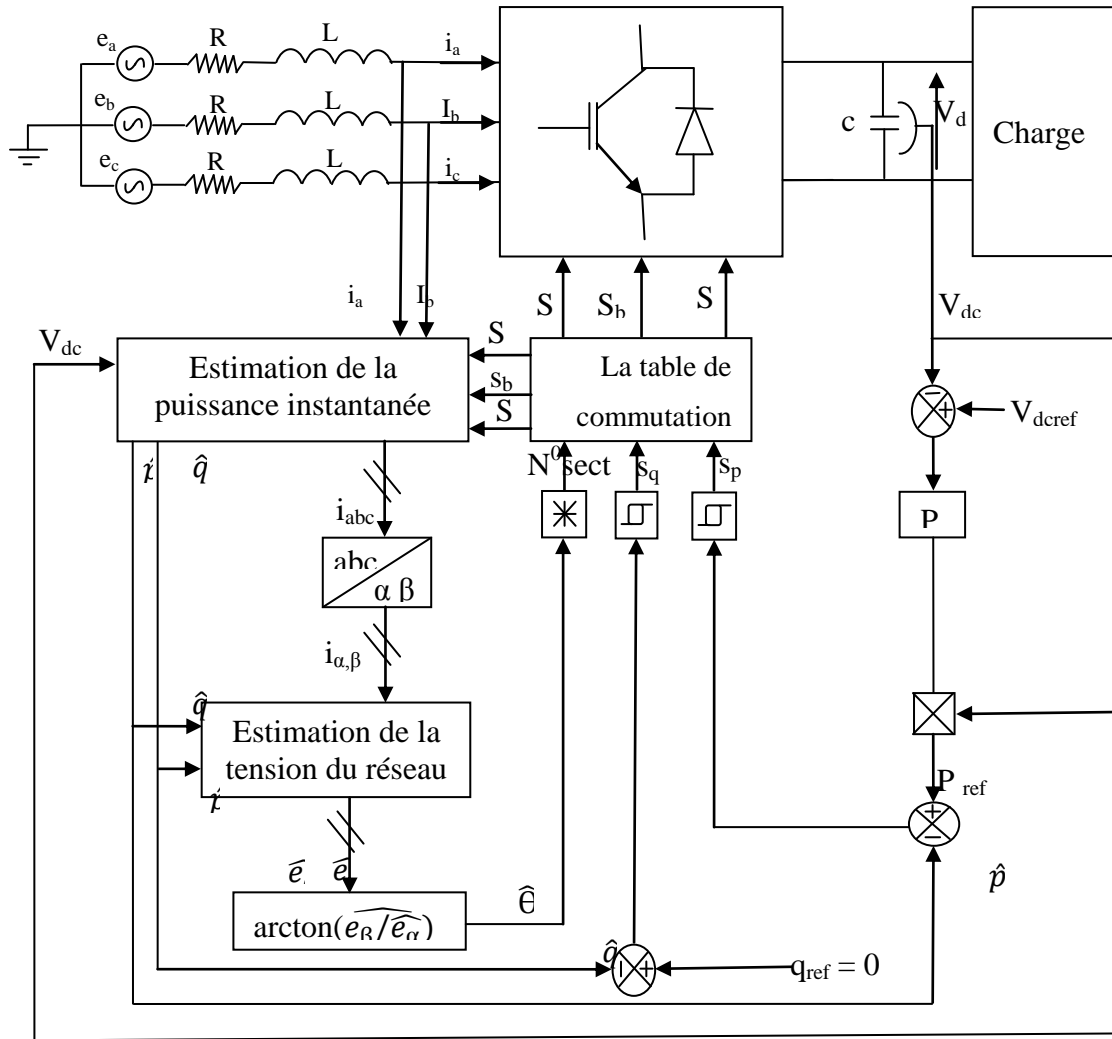


Figure (III.1): Commande directe de puissance DPC.

### III.3 Principe de la commande directe de puissance:

La figure (III.1) montre la configuration globale de la commande directe de puissance sans capteur de tension pour un redresseur PWM triphasé.

La DPC consiste à sélectionner un vecteur de commande d'après une table de commutation [3].

Cette dernière est fondée sur les erreurs numérisées  $S_p$ ,  $S_q$  des puissances active et réactive instantanées (erreurs entre les puissances active et réactive estimés et celles de référence), fournies par les régulateurs à hystérésis à deux niveaux, aussi bien que sur la position angulaire du vecteur tension estimé. En fonction de la valeur de cette position, le plan ( $\alpha$ - $\beta$ ) est divisé en douze secteurs où on doit associer à chaque secteur un état logique du redresseur [18].

La référence de la puissance active est obtenue par régulation de la tension continue, en utilisant un régulateur PI. Tandis que pour assurer un facteur de puissance unitaire un contrôle de la puissance réactive à zéro est effectué [3].

**III.4 Estimation de la puissance instantanée:**

Takahashi définit la puissance active instantanée par le produit scalaire entre les courants et les tensions de ligne et la puissance réactive par le produit vectoriel entre eux [2].

$$P = \underline{V}_{(abc)} \cdot \underline{i}_{(abc)} = V_a i_a + V_b i_b + V_c i_c$$

$$q = V_{(abc)} \otimes i_{(abc)} = V'_a i'_a + V'_b i'_b + V'_c i'_c$$

D'où  $V'_a$ ,  $V'_b$ ,  $V'_c$  sont en arrière de  $90^\circ$  sur  $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$  respectivement (Fig.III.2)

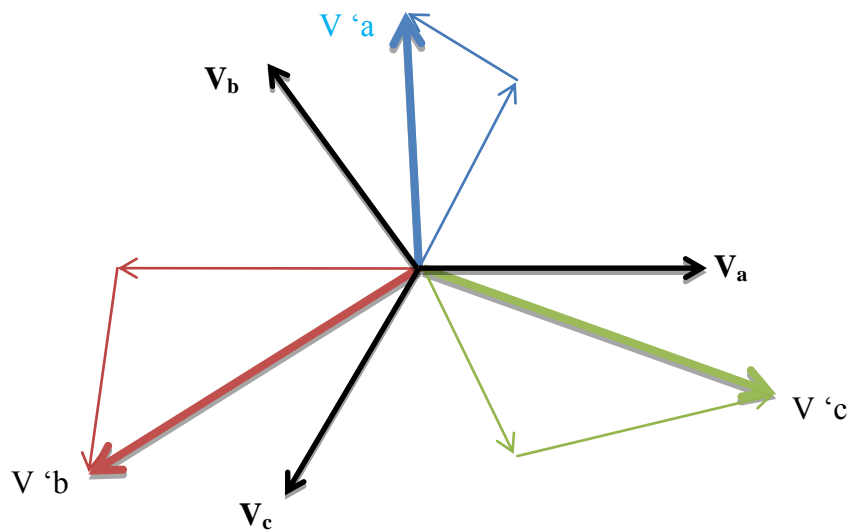


Figure (III.2): Représentation vectorielle des vecteurs  $V_a, V_b, V_c$  et  $V'_a, V'_b, V'_c$

La même équation peut être décrite sous la forme matricielle suivante [2].

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_a & V_b & V_c \\ V'_a & V'_b & V'_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \tag{III.1}$$

Avec :

$$\begin{bmatrix} V'_a \\ V'_b \\ V'_c \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} V_b & - & V_c \\ V_c & - & V_a \\ V_a & - & V_b \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} V_{bc} \\ V_{ca} \\ V_{ab} \end{bmatrix} \tag{III.2}$$

La puissance apparente complexe  $S$  peut être exprimée par l'expression suivante

$$\bar{s} = \bar{v} \cdot \bar{i} = p + jq \tag{III.3}$$

$$S = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c + j \frac{1}{\sqrt{3}} [(v_b - v_c) i_a + (v_c - v_a) i_b + (v_a - v_b) i_c] \tag{III.4}$$

Sachant que :

$V$ : Tension instantané de la source.

I : Courant instantané de ligne.

j: Désigne la partie imaginaire.

Cependant, l'expression au-dessous exige l'information sur la tension, cette dernière doit être éliminée pour une commande sans capteur.

Alors, les expressions qui gèrent l'estimation des puissances active et réactive instantanées sans capter les tensions sont comme suit :

$$\hat{p}=L\left(\frac{dia}{dt} ia + \frac{dib}{dt} ib + \frac{dic}{dt} ic\right)+U_c(Saia + Sbib + Scic) \quad (III.5)$$

$$\hat{q}=\frac{1}{\sqrt{3}}\left[3L\left(\frac{dia}{dt} ic - \frac{dic}{dt} ia\right) - UC(Sa(ib - ic) + Sb(ic - ia) + Sc(ia - ib))\right] \quad (III.6)$$

La première partie des deux expressions représentées précédemment présente la puissance dans les inductances de ligne, notant ici que les résistances internes ces inductances son négligeables car la puissance active dissipée dans ces résistances est en fait beaucoup plus faible devant la puissance mise en jeu.

Cependant, la deuxième partie représente la puissance dans le redresseur. On peut voir que la forme des équations (Fig.III.3 et Fig.III.4) est changée en fonction des états des interrupteurs  $S_a, S_b, S_c$ , et aussi la connaissance de l'inductance de ligne  $L$  est nécessaire.

La tension d'alimentation est généralement constante, alors les puissances active et réactive instantanées sont proportionnel aux courants de ligne [13].

### III.5 Estimation de la tension du réseau:

Le secteur de la tension est nécessaire pour utiliser la table de commutation, donc la connaissance de la tension de ligne est essentielle.

L'expression suivante donne les courants de ligne  $i_{res1}, i_{res2}, i_{res3}$  dans les coordonnées stationnaire[14]:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ q_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{res1} \\ i_{res2} \\ i_{res3} \end{bmatrix} \quad (III.7)$$

On peut écrire les expressions des puissances active et réactive comme suit:

$$\hat{p}=\bar{v}_{s(123)} \cdot \bar{I}_{(123)} =v_{sa} \cdot \bar{i}_a + v_{s\beta} \cdot i_\beta \quad (III.8)$$

$$\hat{q}=\bar{v}_{s(123)} \wedge \bar{I}_{(123)} =v_{s\beta} \cdot i_a + v_{sa} \cdot i_\beta \quad (III.9)$$

L'écriture matricielle des expressions (III.6 et III.7) est:

$$\begin{bmatrix} \hat{p} \\ \hat{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{sa} & v_{s\beta} \\ v_{s\beta} & -v_{sa} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (III.10)$$

La tension peut être estimée par l'équation suivante:

$$\begin{bmatrix} \hat{v}_{sa} \\ \hat{v}_{s\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{(i_a^2 + i_\beta^2)} \begin{bmatrix} i_a & -i_\beta \\ i_\beta & i_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{p} \\ \hat{q} \end{bmatrix} \quad (III.11)$$

La transformée inverse de Concordia de la tension de ligne s'écrit

$$\begin{bmatrix} \hat{v}_{s1} \\ \hat{v}_{s2} \\ \hat{v}_{s3} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{v}_{sa} \\ \hat{v}_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (III.12)$$

### III.6 Détermination du secteur:

La connaissance du secteur de la tension estimée est nécessaire pour déterminer les états de commutation optimale. Pour cela, le plan de travail  $(\alpha, \beta)$  est divisé en douze secteurs (Fig.III.3), (Les six vecteurs non nuls divisent le plan  $\alpha$ - $\beta$  en six secteurs dont chacun est divisé en deux secteurs égaux, afin d'obtenir un contrôle précis) [16].

Ces derniers peuvent être déterminés par la relation suivante:

$$(2k - 3) \frac{\pi}{6} < \theta_k < (2k - 3) \frac{\pi}{6} \quad k = 1, 2, 3; 12 \quad (III.13)$$

Où :  $k$  est le numéro du secteur

Le numéro du secteur est déterminé instantanément par la position de vecteur tension donné par:

$$\theta_k = \arctng \left( \frac{e_\beta}{e_\alpha} \right) \quad (III.14)$$

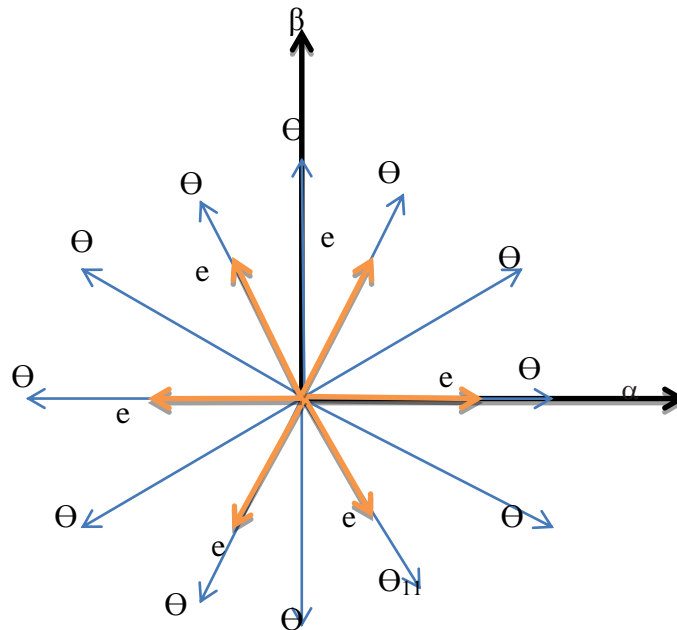


Figure (III.3): Représentation du vecteur de la tension dans le plan de l'espace vectoriel  $(\alpha, \beta)$ .

On utilise les secteurs pour optimiser les commutations des convertisseurs, et cela par le choix des vecteurs adjacents. On divise le plan en 12 secteurs pour plus de précision et aussi pour éviter les problèmes qu'on rencontre aux frontières de chaque vecteur de commande.

### III.7 Régulateur à hystérésis:

La grande simplicité de l'implémentation du comparateur à deux niveaux est dernière le choix de ce type de régulateur. De plus, les considérations énergétiques sur le redresseur imposent un nombre restreint de commutations Or, pour une même largeur d'hystérésis de contrôle, le comparateur à deux niveaux nécessitera un nombre moins élevé de commutations [17].

La largeur de la bande des régulateurs à hystérésis a un effet considérable sur les performances du convertisseur. En particulier, la distorsion du courant, la fréquence de commutation moyenne du convertisseur, la pulsation de la puissance. En plus les pertes sont fortement affectées par la bande à hystérésis. Le contrôleur proposé dans la DPC est le régulateur à deux niveaux pour les puissances actives et réactive. Le régulateur a hystérésis à trois niveaux peut-être envisagé pour plus d'amélioration. La sortie des régulateurs à hystérésis donnée par les variables booléennes  $S_p$  et  $S_q$ , indique les dépassements supérieurs ou inférieurs d'amplitude des puissances. En respectant les expressions suivantes [2].

$$p_{ref} - \hat{p} > h_p \Rightarrow S_p = 1$$

$$p_{ref} - \hat{p} < -h_p \Rightarrow S_p = 0$$

### III.8 Correcteurs de puissance active:

La sortie de régulateur à hystérésis données par le variable booléenne  $S_p$ , indiquent les dépassements supérieurs ou inférieurs des erreurs de la puissance active suivant la logique ci-dessous [17]:

$S_p = 0$ : signifier qu'il faut réduire la puissance active.

$S_p = 1$ : signifier qu'il faut augmenter la puissance active.

### III.9 La table de commutation:

Les signaux numériques d'erreurs  $S_p$  et  $S_q$  et le secteur de travail sont les entrées de la table de commutation (Tableau III.1), où les états de commutations  $S_a$ ,  $S_b$  et  $S_c$  du redresseur à MLI sont mémorisés.

En employant la table, l'état optimum de commutation du convertisseur peut être choisi à chaque état de commutation selon la combinaison des signaux numériques  $S_p$ ,  $S_q$  et sect. c'est-à-dire, que le choix de l'état optimum de commutation est effectué de sorte que l'erreur de la puissance active puisse être restreinte dans une bande à hystérésis de largeur  $2h_p$ , et de même pour l'erreur de la puissance réactive, avec une bande de largeur  $2h_q$  [13].

**Tableau (III.1): Table de commutation de la DPC.**

Sp	Sq	S <sub>ect</sub>	S <sub>ect</sub>	S <sub>ect</sub>	S <sub>ect</sub>	S <sub>ect</sub>	S <sub>ect</sub>	S <sub>ect</sub>	S <sub>ect</sub>	S <sub>ect</sub>	S <sub>ect</sub>	S <sub>ect</sub>	S <sub>ect</sub>
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	V <sub>6</sub> (101)	V <sub>7</sub> (111)	V <sub>1</sub> (100)	V <sub>0</sub> (000)	V <sub>2</sub> (110)	V <sub>7</sub> (111)	V <sub>3</sub> (010)	V <sub>0</sub> (000)	V <sub>4</sub> (011)	V <sub>7</sub> (111)	V <sub>5</sub> (001)	V <sub>0</sub> (000)
	1	V <sub>7</sub> (111)	V <sub>7</sub> (111)	V <sub>0</sub> (000)	V <sub>0</sub> (000)	V <sub>7</sub> (111)	V <sub>7</sub> (111)	V <sub>0</sub> (000)	V <sub>0</sub> (000)	V <sub>7</sub> (111)	V <sub>7</sub> (111)	V <sub>0</sub> (000)	V <sub>0</sub> (000)
0	0	V <sub>6</sub> (101)	V <sub>1</sub> (100)	V <sub>1</sub> (100)	V <sub>2</sub> (110)	V <sub>2</sub> (110)	V <sub>3</sub> (010)	V <sub>3</sub> (010)	V <sub>4</sub> (011)	V <sub>4</sub> (011)	V <sub>5</sub> (001)	V <sub>5</sub> (001)	V <sub>6</sub> (101)
	1	V <sub>1</sub> (100)	V <sub>2</sub> (110)	V <sub>2</sub> (110)	V <sub>3</sub> (010)	V <sub>3</sub> (010)	V <sub>4</sub> (011)	V <sub>4</sub> (011)	V <sub>5</sub> (001)	V <sub>5</sub> (001)	V <sub>6</sub> (101)	V <sub>6</sub> (101)	V <sub>1</sub> (100)

**III.10 Résultats de simulation:**

On présente ici les résultats de simulation obtenus pour différents tests. L'étude par simulation a été réalisée pour les paramètres du redresseur utilisés en simulation sont:

**Tableau(III.2) : Paramètres électriques du circuit de puissance**

Résistance de ligne	R = 0.25Ω
Inductance de ligne	L = 10mH
Condensateur	C=5 mF
Charge	Rch = 100Ω
Amplitude maximale de tension de réseau	E <sub>m</sub> =220√2 V
Angle de déphasage	Ø=120°

Les paramètres du régulateur PI et les régulateurs à hystérésis sont:

**Tableau(III.3) : Paramètres électriques du régulateur PI**

La largeur de la bande des régulateurs à hystérésis	hp=1W, hq=1 var
Les paramètres du correcteur PI	K <sub>p</sub> =0.176,k <sub>i</sub> = 3.125

La figure (III.4) montre la réponse du redresseur commandé par la DPC lors d'un changement de la référence de la tension de sortie de v<sub>dc</sub><sup>ref</sup> = 600V à v<sub>dc</sub><sup>ref</sup> = 700V à t = 0.6s.

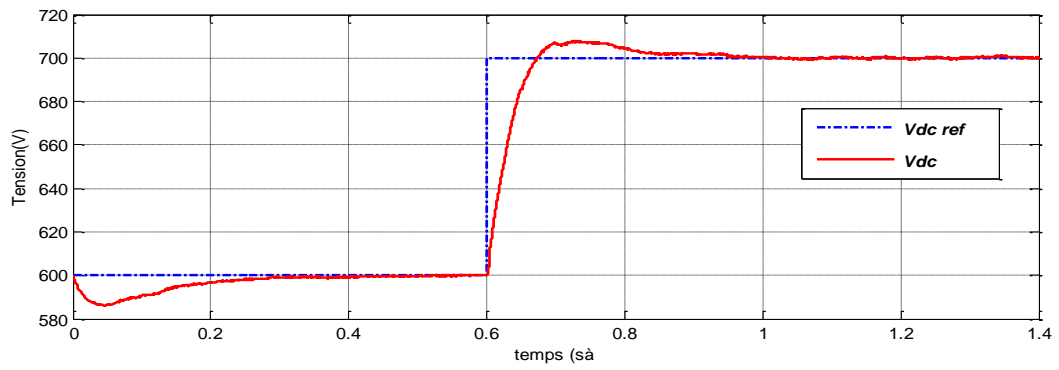


Figure (III.4): Allure de tension  $V_{dc}$  et de sa référence.

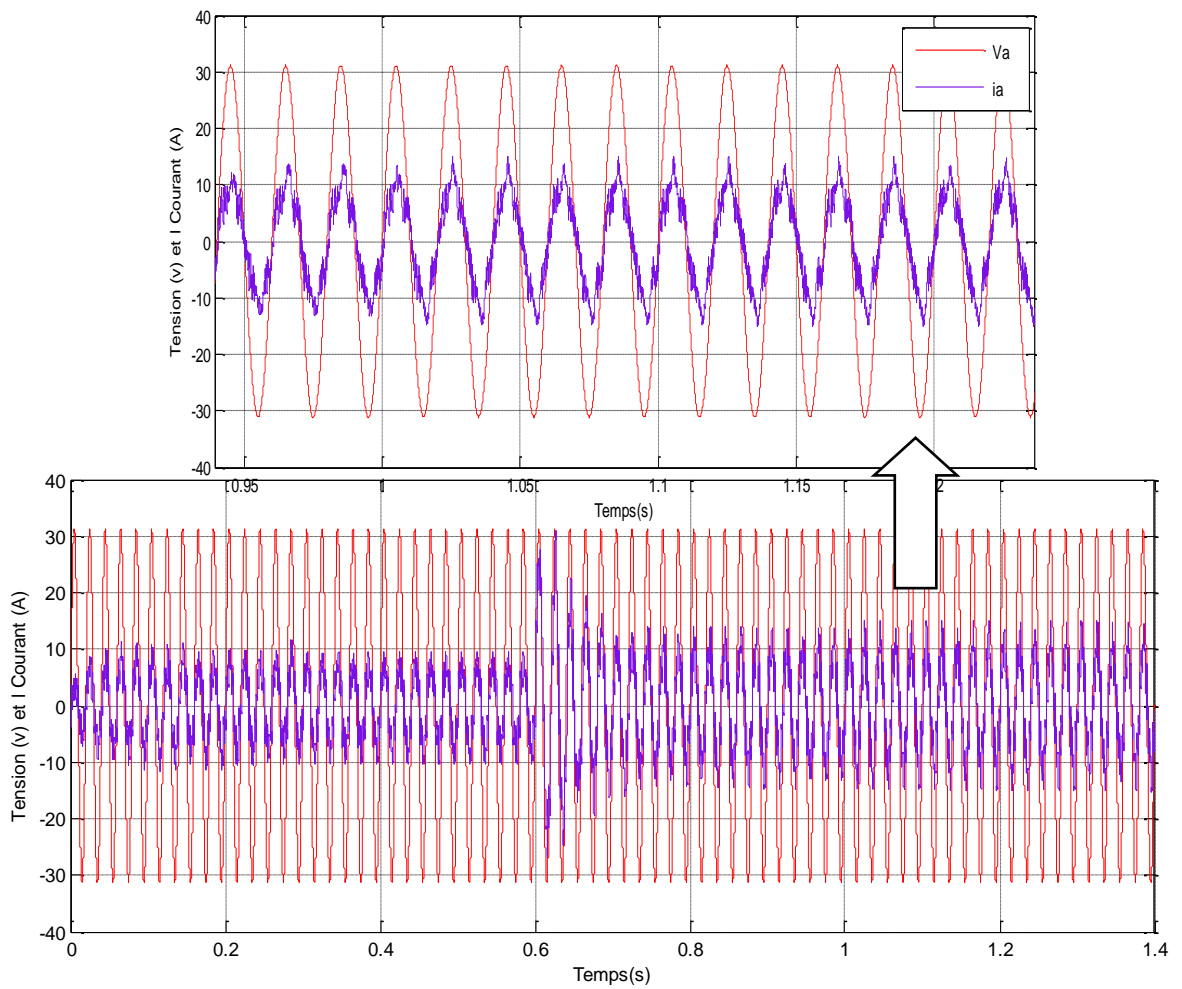


Figure (III.5): Allure de la tension et du courant de réseaux.



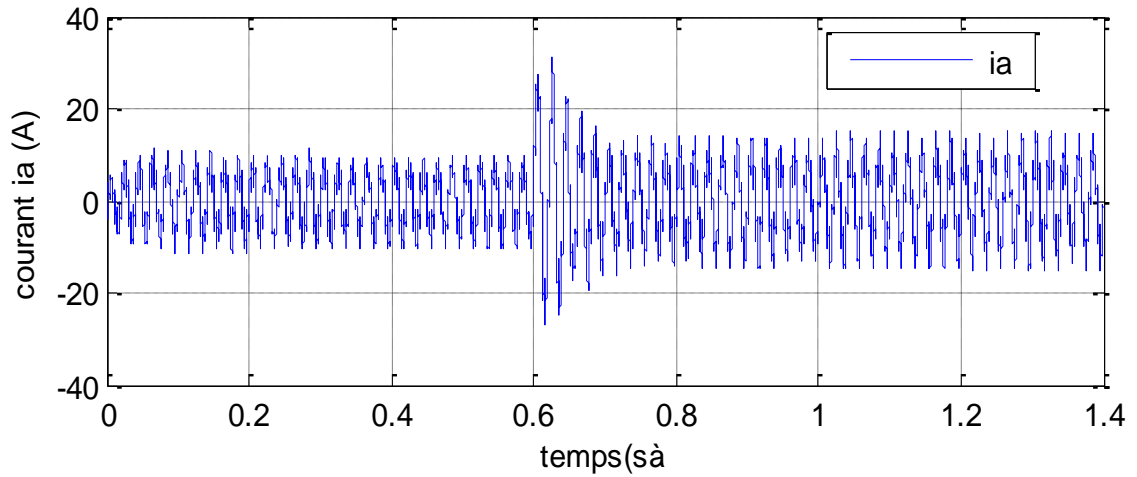


Figure (III.6): Courant de ligne  $i_a$  (A)

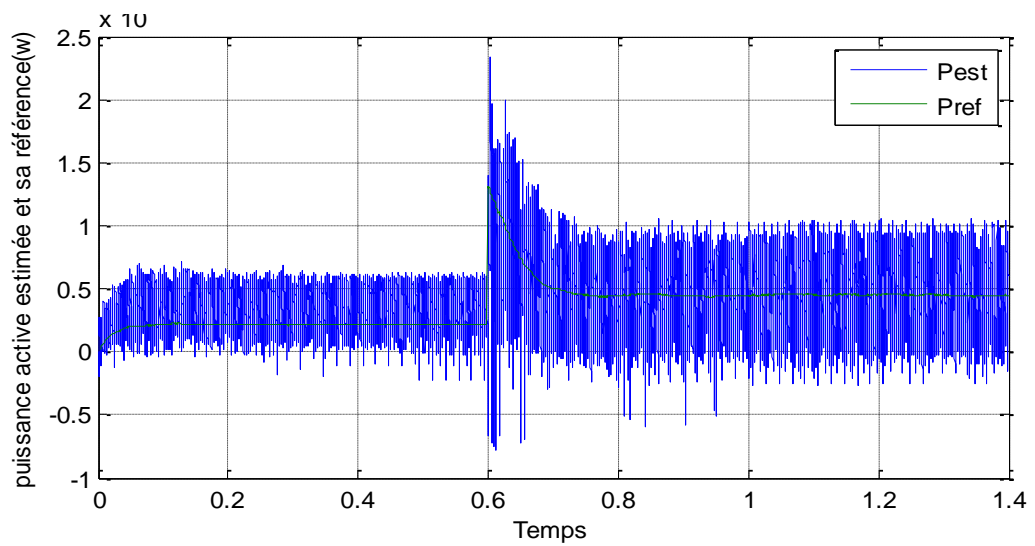


Figure (III.7): Allure de puissance active estimée et sa référence.

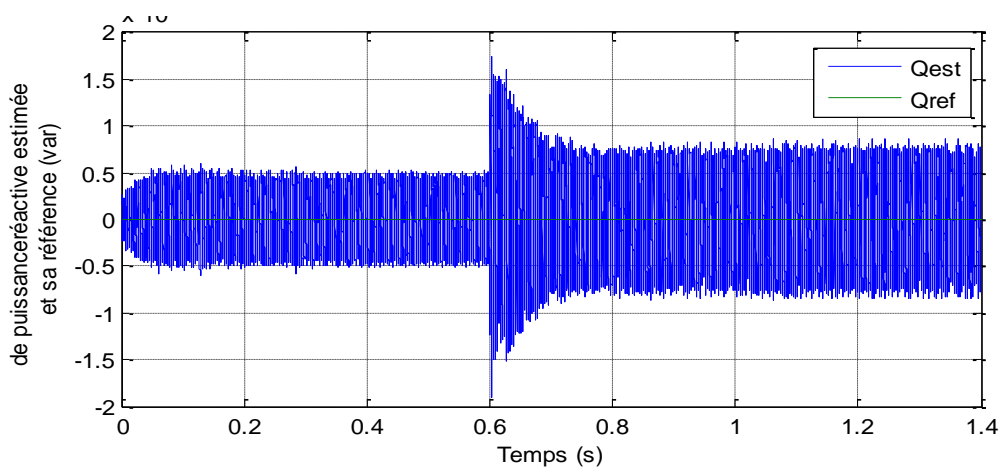


Figure (III.8): Allure de puissance réactive estimée et sa référence.

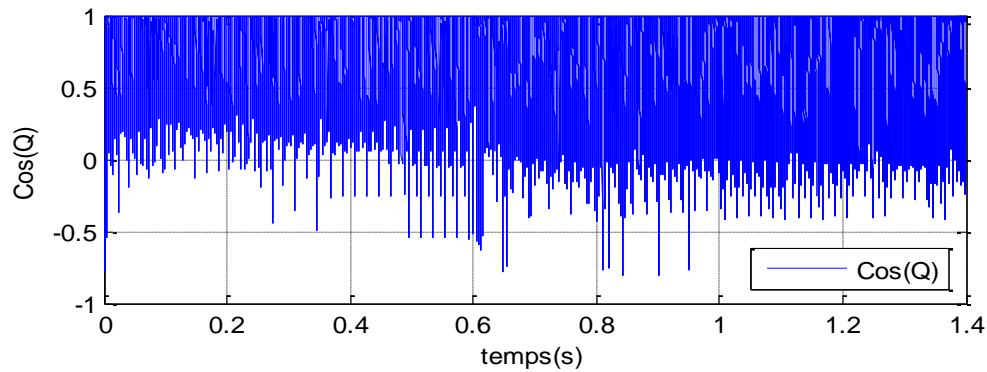


Figure (III.9): Facteur de puissance.

### III.11 Interprétation des résultats de simulation:

La tension continue suit parfaitement sa référence (Fig. III.4). La tension et le courant ont une forme proche de la sinusoïde, ils sont en phase, ce qui signifie que la charge est linéaire et donc non polluante (Fig. III.5 et Fig. III.6).

Les puissances actives et réactives suivent leurs références avec une certaine fluctuation (Fig. III.8).

Le facteur de puissance égale presque à l'unité (Fig. III.9).

### III.12 Etude comparative:

Le tableau suivant montre bien la différence entre deux types de redresseur à savoir: le redresseur triphasé non commandé à base des diodes et le redresseur triphasé à MLI, et entre deux stratégies de commande à savoir: la MLI et la DPC:

Tableau(III.4): Comparaison en termes de THD

Redresseur non commandé à diode	THD(%)	
	Redresseur commandé à MLI	DPC
31.72%	9.25%	27.90%

On remarque que l'utilisation du redresseur non commandé présente un taux de distorsion harmonique élevé. L'utilisation des redresseurs commandés soit par MLI ou bien par DPC peut réduire le ce THD.

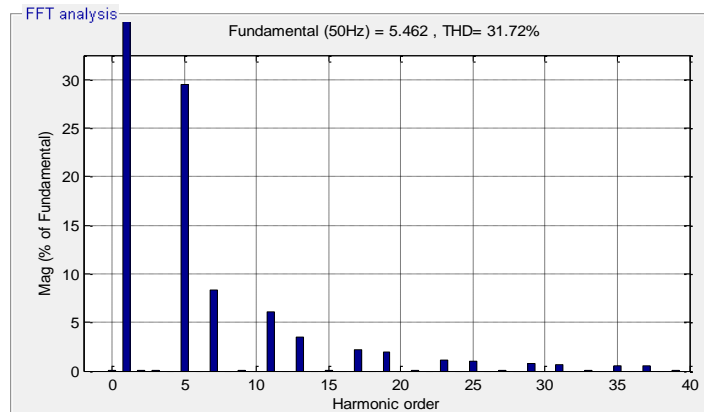


Figure (III.10): Redresseur non commandé à diode

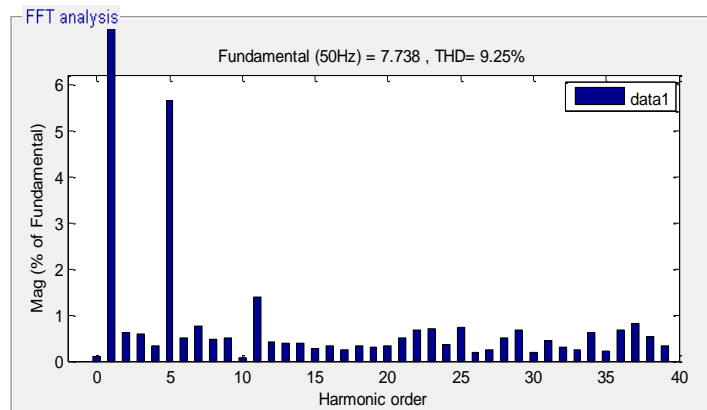


Figure (III.11): Redresseur commandé à MLI

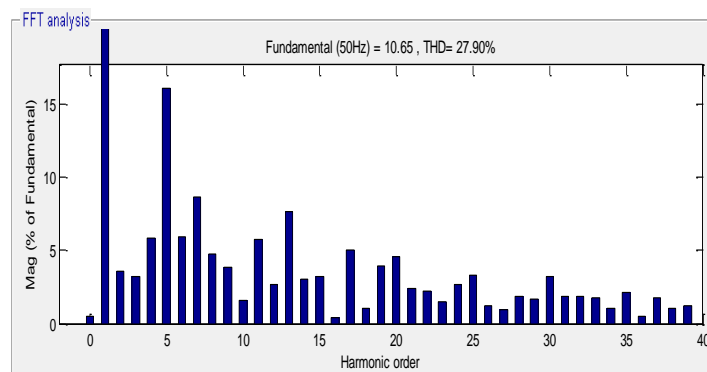


Figure (III.12): Redresseur commandé par DPC

Le tableau ci-dessous résume les principales différences entre les trois cas vu précédemment:

Tableau (III.5): Principales déférences entre les trois cas.

	<b>Redresseur non commandé à diode</b>	<b>Redresseur commandé à MLI</b>	<b>DPC</b>
Tension continue	Non commandable	Commandable	Commandable
Puissances: active et réactive	Non commandable	Non commandable	Commandable
Linéarité de la charge	Non linéaire	Linéaire	Linéaire

### III.13 Conclusion:

Le principe de contrôle direct de puissance, présenté dans ce chapitre, a apporté une solution très intéressante au traitement du problème des harmoniques à la source.

Ce contrôle direct est basé sur l'évaluation instantanée des puissances active et réactive à chaque état de commutation du convertisseur, et ne nécessite aucun capteur de tension AC pour connaître la position de la tension de ligne.

## Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire expose la commande directe de puissance DPC d'un redresseur triphasé à MLI.

Des généralités sur les harmoniques et la pollution des réseaux électriques ont été présentés. Ensuite, et en premier lieu, une modélisation du redresseur triphasé non commandé (à base des diodes) a été réalisé juste pour comparer les performances avec le redresseur triphasé à MLI (à base des transistors) qui a été réalisé en deuxième lieu. Finalement, la commande directe de puissance (DPC) basée sur l'estimation des tensions du réseau a été présentée et appliquée sur le redresseur triphasé.

Les résultats de simulation obtenus montrent bien la validité des techniques de commande présentées dans ce mémoire. Ils nous ont permis d'avoir une tension continue commandable, une puissance active et réactive ajustables, un taux de distorsion harmonique (THD) réduit avec un facteur de puissance unitaire.

A la fin et pour la continuité des recherches relatives à ce travail, nous proposons comme perspectives:

- L'implémentation des commandes présentées dans ce mémoire dans le but de vérifier expérimentalement les résultats théoriques.
- Reprendre l'étude présentée en changeant le redresseur triphasé à deux niveaux par un redresseur multi-niveaux afin d'améliorer de plus les performances désirées.
- Améliorer la technique de commande présentée (DPC), en fixant la fréquence de commutation par l'application de la DPC\_SVM, la DPC floue ou encore la DPC neuronale.
- Appliquer d'autres techniques de commande du redresseur triphasé à MLI telles que: la DPC prédictive, la VOC, ... etc.

**BIBLIOGRAPHIE**

- [1]: ABDELMALEK BOULAHIA, "Etude des Convertisseurs Statiques destinés à la Qualité de l'Energie Electrique", Mémoire de Magister, Université de Constantine, 2009.
- [2]: BOUCHAKOUR SALIM, "Commande Directe de Puissance d'un Convertisseur AC/DC Triphasé Sans Capteurs de Tension", Mémoire de Magister, Ecole Militaire de Polytechnique, 2005.
- [3]: BOUZIDI MANSOUR, BENZAADI ABDERRAHIM, "Commandes non Linéaires d'un Redresseur PWM Triphasé", Mémoire de d'ingénieur, Université de M'sila, 2009.
- [4]: AMARA ASMA, BENGANA ADIL YASSINE, "Etude et simulation d'un circuit de commande pour un filtre actif de puissance parallèle à deux bras à point milieu pour un réseau électrique à trois fils", Mémoire de Master, Université de Tlemcen, 2015.
- [5]: MICHEL PINARD, "Convertisseurs et Électronique de Puissance Commande, Description et Mise en œuvre", Dunod, Paris, 2007.
- [6]: ALLAG ZOUBIR, YAHIAOUI HILLAL, "Influence des harmoniques et des déséquilibres sur la Compensation de l'énergie réactive des réseaux électriques de distribution", Mémoire de Master, Université A. Mira de Bejaia, 2012.
- [7]: BOUAFIA ABDELOUAHAB, "Techniques de Commande Prédictive et Floue pour les Systèmes d'électronique de puissance: Application aux Redresseurs a MLI", thèse de doctorat, Université de Sétif, 2010.
- [8]: HAKIM SAKKOU, "Conception d'un Compensateur Actif Multifonctions Corrigeant Toutes les perturbations en tension générées par les charges non linéaires et les fours à arc", Mémoire de d'ingénieur, Université du Québec, 2007.
- [9]: BELGHIT HADJAR, FITNI SOUHILA, "Commande d'un filtre actif parallèle à onze niveaux à base d'un régulateur flou en vue de la dépollution du réseau électrique", Mémoire de Master, Université de Tébessa, 2018.
- [10]: CHALAH SAMIRA, "Analyse Stochastique de la résultante de l'injection de courants harmoniques dans un réseau électrique", Mémoire de Magister, Université de Tizi-Ouzou, 2012.
- [11]: LEMAINI MOHAMED, "Contrôle de puissance d'un redresseur MLI", Mémoire de Master, Université de Biskra, 2018.
- [12]: MIDOUNE NASREDDINE, HIKA EL-MEHDI, "Étude par simulation des effets des harmoniques et de la puissance réactive sur le réseau électrique", Mémoire de Master, Université de Ouargla, 2018.

- [13]: ABDESSAID MITT, MOHAMED AISSANI, "Commande directe de puissance d'un convertisseur AC/DC par DSP", Mémoire d'ingénieur, 2005.
- [14]: BEN SALEM KEDDARI, YAHIA KOT, "Modélisation et simulation d'un convertisseur AC/DC triphasé", Mémoire de Master, Université de El-Oued, 2014.
- [15]: BELHADJI LAKHDAR, "Commande directe de puissance basée sur le flux virtuel d'un convertisseur AC/DC triphasé sans capteur de Tension", Mémoire de Magister, école militaire polytechnique, 2017.
- [16]: HAMRI SOFIANE, MEGHERBI HICHAM, "Etude et modélisation des convertisseurs statiques destinés à améliorer la qualité de l'énergie électrique", Mémoire de Master, Université de Saïda, 2016.
- [17]: OMAR BAZINE, "Commande Directe du Couple (DTC) d'une machine asynchrone à double étoile alimentée par un redresseur piloté par DPC (Direct Power Control)", Mémoire de Master, Université de Ghardaïa, 2016.
- [18]: SADOUNI RADHWANE, "Commande directe du couple (DTC-SVM) d'une MASDE associée à deux onduleurs multiniveaux en cascade avec un redresseur à MLI piloté par DPC", Thèse de Doctorat, Université de Sidi-bel-abbes, 2017.
- [19]: TAHAR NEFFATI, "introduction a l'électronique analogique" Dunod, Paris, 2008.
- [20]: [https://fr.wikipedia.org/wiki/Diode#cite\\_ref-6](https://fr.wikipedia.org/wiki/Diode#cite_ref-6) , date : 9:26,27/06/2019.
- [21]: MEZIANI SOFIANE, "Etude et réalisation de la commande par DSP d'un convertisseur AC/DC", Mémoire de Magister, Université de Tizi-Ouzou, 2012.
- [22]: THEODORE WILDI, GILBERT SYBILLE, "Electrotechnique, 4<sup>ème</sup> édition", Imprimé au Canada Dépôt légal: Bibliothèque Nationale, Paris: juin 2005.
- [23]: LAOUEDJ FETHIA, ZEBBAR HADJER, "Etude et simulation d'une commande numérique (discrète) d'un pont redresseur à IGBT/MOSFET" Mémoire de Master, Université de Tlemcen, 2015.
- [24]: PIERRE MAYE, "Aide-mémoire: Composants électroniques, 3<sup>ème</sup> édition", Fréquences, Paris, 1989.
- [25]: HERIZI ABDELGHAFOR, Support de cours, "Electronique fondamentale 1", Université de Ghardaïa, 2016.
- [26]: SADOUNI RADHWANE, "Commande par Mode Glissant Flou d'une Machine Asynchrone à Double Etoile", Mémoire de Magister, Université de Sidi Bel Abbes, 2010.
- [27]: BENSALAH WASSILA, BOUTALEB NOUR EL HOUDA, "Etude de la commande des redresseurs MLI", Mémoire de Master, Centre Universitaire d'Ain-Temouchent, 2016.





**Résumé** \_L'objectif de ce mémoire étant la modélisation et la commande d'un redresseur triphasé à MLI fonctionnant à facteur de puissance unitaire. A cet effet, la commande directe de puissance (DPC) a été appliquée dont le but d'obtenir un réglage performant de la tension continue et une amélioration de la forme des courants du réseau .Les résultats de simulation ont été mise en œuvre à l'aide du logiciel Matlab/Simulink.Ces résultats montrent que cette stratégie de commandes a prouvé son efficacité en obtenant: un faible taux de distorsion harmonique (THD) des courants absorbés, un bon réglage de la tension continue et des puissances active et réactive, un facteur de puissance unitaire.

**Mots clés** \_Redresseur Triphasé à MLI, IGBT, DPC, Harmoniques

**ملخص** \_الهدف من هذه المذكرة هو النمذجة و التحكم في مقوم ثلاثي الطور ذو تقنية تعديل عرض النبضات بمعامل استطاعة أحادي. لهذا الغرض قمنا بتطبيق تقنية التحكم المباشر في الإستطاعة من أجل الحصول على ضبط مثالي للتوتر المستمر و تحسين شكل تيارات الشبكة الكهربائية. نتائج المحاكاة تم الحصول عليها باستخدام برنامج ماتلاب/سيمولينك. هذه النتائج بينت أن تقنية التحكم المطبقة أثبتت فعاليتها و نجاعتها و ذلك بالحصول على: نسبة تلوث ضئيلة للتيارات الممتصة، ضبط جيد للتوتر المستمر و الإستطاعة النشيطة و الخاملة، معامل استطاعة يساوي الواحد.

**الكلمات المفتاحية** \_ مقوم ثلاثي الطور ذو تقنية تعديل عرض النبضات، الصمام الثنائي، التحكم المباشر في الإستطاعة،

توافقيات