



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Electrotechnique
Commande électrique

Réf. :

Présenté et soutenu par :
AHMED SALAH Houssam Eddine & DEHDA Abdelhamid

Le : mardi 1er septembre 2020

Commande d'un redresseur MLI

Jury :

Dr.	RABHI Boualaga	Pr	Université de Biskra	Président
Dr.	AMRANI Ishaq	MCA	Université de Biskra	Encadreur
Dr.	Kiyyour Brahim	MCB	Université de Biskra	Examineur

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث 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 : COMMANDE ELECTRIQUE

Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme :

MASTER

Thème

Commande d'un redresseur MLI

Présenté par :

AHMED SALAH Houssam Edinne

DEHDA Abdelhamid

Avis favorable de l'encadreur :

AMRANI Ishaq

Avis favorable du Président du Jury

RABHI BOUALAGA

Cachet et signature

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث 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 : **COMMANDE ELECTRIQUE**

Thème:

Commande d'un redresseur MLI

Dirigé et proposé par : MCA AMRANI Ishaq

RESUMES (Français et Arabe)

Le travail effectué dans cette mémoire présente l'étude des commandes d'un pont redresseur à *IGBT*. Nous avons tout d'abord présenté les différentes stratégies de commandes pour le pont redresseur MLI, telles que l'échantillonnage périodique, la Bande d'hystérésis, la porteuse triangulaire. Puis une étude détaillée de la commande *DPC* a été présentée. Nous avons terminé par une présentation des résultats de simulation qui sont caractérisés par une amélioration de la qualité d'énergie électrique.

Mots clés : *IGBT*, *DPC* : contrôle directe de puissance, *MLI* : modulation de largeur d'impulsion.

ملخص

يعرض العمل المنجز في هذه المذكرة دراسة عن التحكم لمحول كهربائي IGBT . حيث سنقوم أولاً بتقديم مختلف طرق التحكم للمقوم الكهربائي MLI مثل التحكم في الحلقة التراجعية. ثم قدمت دراسة مفصلة عن التحكم DPC. ثم أنهينا هذا العمل بتقديم نتائج المحاكاة للتحكم DPC حيث تعطي أفضل النتائج مع تحسين جودة الطاقة الكهربائية. الكلمات الدالة: معدل PWM، التحكم المباشر بالاستطاعة.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

سنة ١٤٢٠

Dédicaces

*Nous offrons cet humble travail avec un cœur plein de joie : A
ceux qui nous ont été source d'inspiration et de volonté : mes
très chers pères et mes très chères mères pour leurs sacrifices et
encouragement durant toute la période de nos études.*

A tous mes frères et sœurs.

A toute la famille : DEHDA & AHMED SALAH

A mes amis et collègues.

*A tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin à faire ce
travail*

Remerciements

Je remercie tout d'abord ALLAH de m'avoir prêté santé et volonté pour mener à terme ce modeste travail. Nous tenons à remercier notre promoteur AMRANI Ishaq d'avoir accepté de nous encadrer et de nous suivre durant toute cette période. Nos remerciements vont aussi au président du jury et aux membres du jury examinateurs qui nous ont fait l'honneur de participer au jury de ce travail. Et enfin nous remercions l'ensemble, enseignants et collègues de notre promotion, qui nous ont aidés à réaliser ce modeste travail.

Résumé

Le travail effectué dans cette mémoire présente l'étude des commandes d'un pont redresseur à *IGBT*. Nous avons tout d'abord présenté les différentes stratégies de commandes pour le pont redresseur MLI, telles que l'échantillonnage périodique, la Bande d'hystérésis, la porteuse triangulaire. Puis une étude détaillée de la commande *DPC* a été présentée. Nous avons terminé par une présentation des résultats de simulation qui sont caractérisés par une amélioration de la qualité d'énergie électrique.

Mots clés : *IGBT*, *DPC* : contrôle directe de puissance, *MLI* : modulation de largeur d'impulsion.

Abstract

The work carried out in this thesis presents the study of the controls of an *IGBT* rectifier bridge. We first presented the different control strategies for the PWM rectifier bridge, such as periodic sampling, the hysteresis band, the triangular carrier. Then a detailed study of the *DPC* command was presented. We ended with a presentation of the simulation results, which are characterized by an improvement in the quality of the energy.

Keys words: *IGBT*, *PWM*: pulse width modulation, and *DPC*: direct power control.

ملخص

يعرض العمل المنجز في هذه المذكرة دراسة عن التحكم لمحول كهربيائي *IGBT*. حيث سنقوم أولاً بتقديم مختلف طرق التحكم للمقوم الكهربيائي *MLI* مثل التحكم في الحلقة التراجعية. ثم قدمت دراسة مفصلة عن التحكم *DPC*. ثم أنهينا هذا العمل بتقديم نتائج المحاكاة للتحكم *DPC* حيث تعطي أفضل النتائج مع تحسين جودة الطاقة الكهربيائية. الكلمات الدالة: معدل *PWM*، التحكم المباشر بالاستطاعة.

Sommaire

<i>Dédicaces</i>	i
<i>Remerciements</i>	ii
<i>Résumé</i>	iii
<i>Listes des figures</i>	iv
<i>Liste des Tableaux</i>	vii
<i>Liste des Symboles et Acronymes</i>	viii
Introduction générale.....	1
I.1. Introduction :.....	4
I.2.Définition de la qualité d'énergie électrique :.....	4
I.3.Perturbations de tension:	5
I.3.1.Creux de tension :.....	5
I.3.2.Déséquilibre de tension :.....	6
I.3.3.Harmoniques :	7
I.3.3.1. Problématique des harmoniques :	7
I.3.3.2.Origine des harmoniques :	7
I.3.3.3. Conséquences néfastes des harmoniques :.....	9
I.3.3.4. Caractéristiques des harmoniques :.....	10
I.3.3.5. Réduction de la pollution harmonique :.....	12
I.4. Conclusion:.....	14
II.1 Introduction :.....	17
II.2 Généralités et classification des convertisseurs statiques :.....	17
II.3. Topologies de base du redresseur triphasé à MLI :	20
a)- Redresseur à MLI triphasé de tension :.....	20
b)- Redresseur MLI triphasé de courant :	21
II.4.Techniques de commande MLI :	22
II.4.1. Commande du redresseur par la méthode MLI à bande d'hystérésis :.....	22

II.4.2 MLI à échantillonnage périodique :	22
II.4.3 MLI à porteuse triangulaire :	23
II.4.4 MLI vectorielle :	23
II.5. Modélisation du redresseur à MLI :	24
II.4.1. Modes d'opération du redresseur MLI :	24
II.5.2. États de commutation du redresseur à MLI :	25
II.5.3. Modèle du redresseur à MLI dans le repère (a, b, c) :	27
II.5.4. Modèle du redresseur MLI dans le repère (α, β) :	29
II.5.5. Modèle du redresseur à MLI dans le repère (d, q) :	30
I.6. THD et FFT d'un redresseur triphasé à diodes :	31
II.6.1. Interprétation des résultats :	32
II.7. Conclusion :	33
III.1 Introduction :	35
III.2. la commande directe de puissance :	35
III.2.1. le principe de la commande directe de puissance :	35
III.2.2. Estimation de la puissance instantanée :	37
III.2.3. Estimation de la tension du réseau :	37
III.2.4. Détermination du secteur :	38
III.2.5. Régulateur à hystérésis :	39
III.2.6. Table de commutation :	40
III.2.7. Régulation de la tension continue :	41
III.3. Résultat de simulation du DPC :	41
III.3.1. Résultats de simulation du DPC (six secteurs) :	42
III.3.2. Résultats de simulation du DPC (douze secteurs) :	45
III.3.3. Interprétations des résultats (pour six et douze secteur) :	50
III.4. Conclusion :	50
Conclusion générale	53

Références Bibliographiques.....56

Listes des figures

CHAPITRE I Qualité d'énergie électrique et électronique de puissance

Figure. I.1 : Exemple d'un creux de tension..... 06

Figure. I.2 : Exemple de déséquilibre de tension 06

Figure I.3 Courant et spectre pour une charge non linéaire..... 08

Figure I.4 Tension perturbée due à la présence d'une charge non linéaire..... 09

Figure I.5 a) Filtre passif résonnant b) Filtre passif amorti
13

Figure I.6 a) filtre actif parallèle b) filtre actif série
14

CHAPITRE II Redresseur à MLI triphasé (Principe et modélisation)

Figure II.1 : Schéma de principe d'un redresseur..... 18

Figure II.2 : Schéma de principe d'un hacheur..... 18

Figure II.3 : Schéma de principe d'un onduleur..... 19

Figure II.4 : Schéma de principe d'un gradateur..... 19

Figure II.5 : Redresseur à MLI structure tension 20

Figure II.6 : Redresseur à MLI structure courant 21

Figure (II.7) : Principe de fonctionnement de Modulateur MLI à bande d'hystérésis..... 21

Figure II.8. Modulateur MLI à échantillonnage périodique..... 22

Figure II.9. Modulateur MLI à porteuse triangulaire..... 23

Figure (II.10) : Schéma monophasé équivalent d'un redresseur à MLI..... 24

Figure (II.11) : Différents états de commutation des interrupteurs du redresseur MLI.....	25
Figure (II.12) : Modèle de redresseur à MLI dans le repère (a, b, c).....	28
Figure II.13 : Modèle du redresseur dans le système d'axes (α , β).....	29
Figure II.14 : Modèle du redresseur dans le système d'axes (d, q).....	30
Figure II.15 : l'allure de courant du réseau I_a (A).....	31
Figure II.16 : FFT du courant de réseau.....	31
 CHAPITRE III Commande directe de puissance (DPC) (modélisation et simulation)	
Figure III.1 : Configuration générale de la commande DPC.....	35
Figure III.2 : Représentation du vecteur de la tension dans le plan de l'espace vectoriel (α , β) divisé en Six (6) et douze (12) secteurs.....	38
Figure III.3 : Régulation de la tension continue.	40
Figure (III-4. A) : l'allure de tension V_{dc} et sa référence.....	41
Figure (III-4. b) : l'allure de tension V_a et le courant de réseaux I_a	41
Figure (III-4.c) : l'allure de puissance active estimée et sa référence	42
Figure (III-4. d) : l'allure de puissance réactive estimée et sa référence	42
Figure (III-4. e) : l'allure de la position Theta.....	43
Figure (III-4. f) : l'allure de secteur	43
Figure III.4 : Performances du redresseur commandé par DPC (six secteurs)	43
Figure III.5 : FFT du courant de réseau I_a	44
Figure (III-6. a) : l'allure de tension V_{dc} et sa référence	44
Figure (III-6.b) : l'allure de tension V_a et le courant de réseaux I_a	45
Figure (III-6.c) : l'allure de puissance active estimée et sa référence.....	45
Figure (III-6. d) : l'allure de puissance réactive estimée et sa référence.....	46
Figure (III-6. e) : l'allure de la position Theta.....	46
Figure (III-6. f) : l'allure de secteur	47
Figure III.6 : Performances du redresseur commandé par DPC (douze secteurs).....	47

Figure III.7 : FFT du courant de réseau *a*.....47

Liste des Tableaux

Tableau II.1 : Les tensions en fonction des interrupteurs de commande.....	30
Tableau II .2 : Paramètres de simulation du redresseur.....	30
Tableau III.1 : Table de commutation six Secteur de la commande DPC classique.....	39
Tableau III.2 : Table de commutation douze Secteur de la commande DPC classique.....	40

Liste des Symboles et Acronymes

Symboles

v_{as}, v_{bs}, v_{cs}	Les tensions du réseau
i_{cs}, i_{cs}, i_{cs}	Les courants du réseau
r	Résistance totale de la ligne
l	Inductance totale de la ligne
v_a, v_b, v_c	Les tensions à l'entrée du convertisseur
i_α, i_β	Les composantes du vecteur courant de ligne dans le repère stationnaire (α, β)
i_d, i_q	Les composantes du vecteur courant de ligne dans le repère tournante (d, q)
$v_{s\alpha}, v_{s\beta}$	Les composantes du vecteur tension de ligne dans le repère stationnaire (α, β)
v_d, v_q	Les composantes du vecteur tension de ligne dans le repère tournant (d, q)
$v_{c\alpha}, v_{c\beta}$	Les composantes du vecteur tension convertisseur dans le repère stationnaire (α, β)
v_{cd}, v_{cq}	Les composantes du vecteur tension convertisseur dans le repère tournante (d, q)
v_{dc}	Tension de bus continue
v_{dc_ref}	Tension bus continue de référence
i_{ch}	Courant de charge
C	Capacité côté continue
R_{ch}	Résistance de la charge
$S_a \quad S_b \quad S_c$	Etats de commutation du redresseur
P	Puissance active de réseau
P_{ref}	La puissance active de référence
Q	Puissance réactive de réseau

Q_{ref}	La puissance réactive de référence
\hat{p}	Puissance active instantanée
\hat{q}	Puissance reactive instantanée.
h_p	Bande d'hystérésis pour la puissance active
h_q	<i>Bande d'hystérésis pour la puissance réactive.</i>
V_{jno}	La tension de point a, b et c par rapport au point n_0 .
$S_j(j = a, b, c)$	Des ordres de commandes.
u_{ab}, u_{bc} et u_{ca}	La tension composée.
V_{an}, V_{bn}, V_{cn}	Les tensions simples.
R	Résistance de la ligne.
L	Inductance de la ligne.
I_{ch}	Le courant de charge.
f	La fréquence de réseau .

Acronymes

MLI	modulation de largeur d'impulsions (Pulse Width Modulation).
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor.
GTO	Gate Turn -Off.
AC/DC	Conversion alternative continue.
THD	Total Harmonic Distortion.
FP	Facteur de Puissance.
PI	Regulateur Propotionnel intégral.
DPC	Contrôle directe de puissance (Directe power control).

Introduction générale

Introduction générale

A l'heure actuelle, l'utilisation de ces convertisseurs statiques (les redresseurs à diodes thyristors, les gradateurs, etc.), dans les installations de conversion d'énergie électrique, a considérablement contribué à améliorer les performances et l'efficacité de ces systèmes. Ceci grâce à une fiabilité et à des performances accrues par rapport aux convertisseurs électromécaniques classiques.

Ces convertisseurs absorbent des courants non sinusoïdaux et entraînent de ce fait une augmentation sensible du niveau de pollution harmonique. Il existe plusieurs méthodes de réduction des harmoniques, basées sur des composants passifs ou actifs, l'utilisation de l'une ou de l'autre dépendra du coût de l'installation et des performances exigées.

Généralement ces méthodes sont classées en deux catégories. La première englobe les techniques où la charge non linéaire est déjà installée comme : le filtrage passif, le filtrage actif (série parallèle...). La deuxième concerne les techniques permettant d'avoir des charges non linéaires non polluantes (les redresseurs à MLI de courant ou de tension).

Plusieurs stratégies de contrôle ont été proposées dans de récents travaux sur les redresseurs MLI. L'une d'elle, s'appelant 'Contrôle direct de la puissance' DPC, est basée sur des boucles de contrôle des puissances active et réactive instantanées. Son principe, mais aussi celui de la DTC 'Contrôle direct du couple', a été proposé en 1986 par 'Takahashi', et il a été développé ultérieurement pour d'autres applications.

Dans la DPC, les états de commutation du convertisseur sont sélectionnés par un tableau de commutation qui dépend d'erreurs instantanées entre les valeurs mesurées et estimées des puissances active et réactive. Alors, le point clé de l'implémentation de la DPC est une estimation rapide et correcte des puissances active et réactive.

Le premier chapitre portera sur les différents types de perturbations affectant le réseau électrique et qui ont des effets néfastes sur les équipements électriques, puis nous montrerons les différentes solutions existantes pour la dépollution harmonique.

Ensuite, dans le second chapitre on va présenter des topologies de base du redresseur MLI et sa modélisation, et ainsi les différentes techniques de commande MLI.

Le troisième chapitre présentera en détail la stratégie de commande que nous avons choisie pour le pont redresseur à MLI et les résultats de simulation que nous avons obtenus.

A la fin de ce mémoire, nous avons ajouté une conclusion générale ainsi que des perspectives de ce travail.

CHAPITRE I

Qualité d'énergie électrique et électronique de puissance

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 deservice 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.

I.2.Définition de la qualité d'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. Lorsque la tension est présente, les principaux phénomènes pouvant l'affecter sont d'une part les variations lentes : creux de tension, sursensions, coupures, déséquilibres et d'autre part des variations rapides : sursensions transitoires, flicker ainsi que les harmoniques. 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 [2].

I.3.Perturbations de tension:

Les perturbations de tension sont la cause la plus fréquente d'un large éventail de perturbations dans les systèmes d'alimentation industriels et commerciaux [3].

Les perturbations peuvent être transitoires, de courte durée, de longue durée ou périodiques.

Toutefois, les problèmes les plus souvent rencontrés sont :

- Creux de tension
- Déséquilibre du système triphasé.
- Harmoniques.

N'importe quelle perturbation affecte un ou plusieurs paramètres suivants du système :

- Amplitude de tension ou de courant.
- Fréquence.
- Contenu spectral.

Deux facteurs ont une influence directe sur l'effet de la perturbation [4] :

- Durée de la perturbation.
- Impédance de la source.

1.3.1.Creux de tension :

Un creux de tension est une diminution de la tension à une valeur située entre 1 et 90% de la tension nominale et d'une durée allant de 10 ms jusqu'à 1 minute. Une coupure brève est un cas particulier du creux de tension voir la figure (1.1).

Sa profondeur est supérieure à 99% ; elle est caractérisée uniquement par sa durée (inférieure à 3 minutes). Les coupures longues sont supérieures à 3 minutes [5].

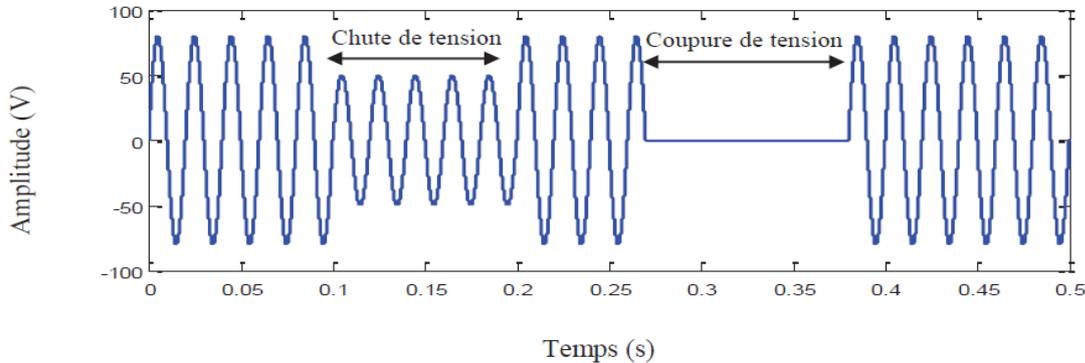


Figure. I.1 : Exemple d'un creux de tension

1.3.2. Déséquilibre de tension :

Un récepteur électrique triphasé, qui n'est pas équilibré et que l'on alimente par un réseau triphasé équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau figure (I.2).

Ceci est fréquent pour les récepteurs monophasés basses tensions de puissances différentes. Mais cela peut également être engendré, à des tensions plus élevées, par des machines à souder, des fours à arc ou par la traction ferroviaire.

Un système triphasé est déséquilibré lorsque les trois tensions ne sont pas égales en amplitude et/ou ne sont pas déphasées les unes des autres de 120° [6].

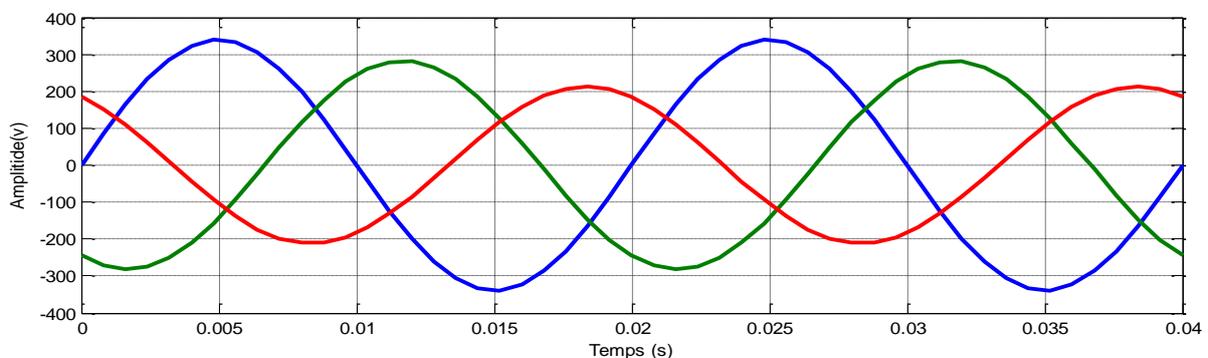


Figure. I.2 : Exemple de déséquilibre de tension

I.3.3. Harmoniques :

I.3.3.1. Problématique des harmoniques :

Avec l'augmentation des charges non linéaires connectées 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 équipements raccordés au réseau. D'où l'intérêt d'éliminer ou de minimiser ces harmoniques.

I.3.3.2. Origine des harmoniques :

On appelle harmoniques des tensions ou courants 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 [7]. Le non linéarité des récepteurs va générer un courant dit « déformer », principalement les sources de pollution harmonique sont les convertisseurs statiques d'énergie (gradateur, onduleur et le redresseur) [8].

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 [8], [9].

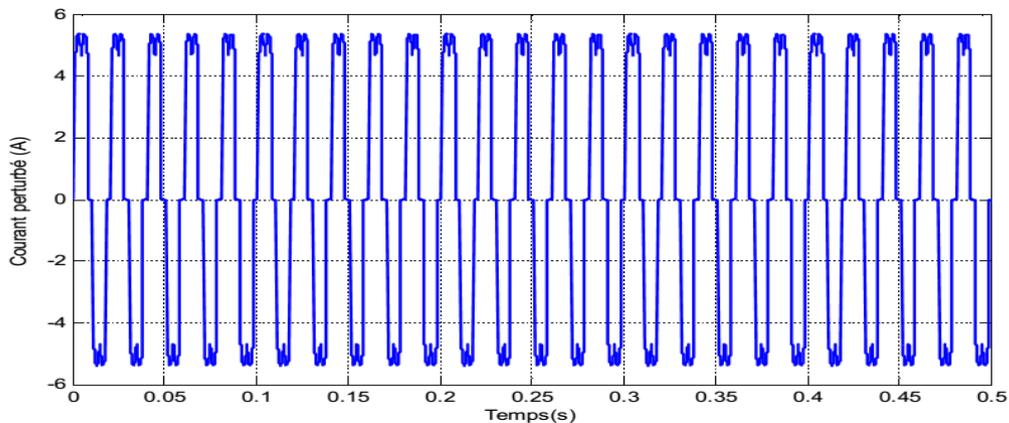
Les conséquences sur les systèmes d'alimentation électrique deviennent préoccupantes du fait de l'utilisation croissante de ces équipements, mais aussi de l'utilisation des composants de l'électronique dans presque toutes les charges électriques. En effet, une charge non-linéaire impose au réseau un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

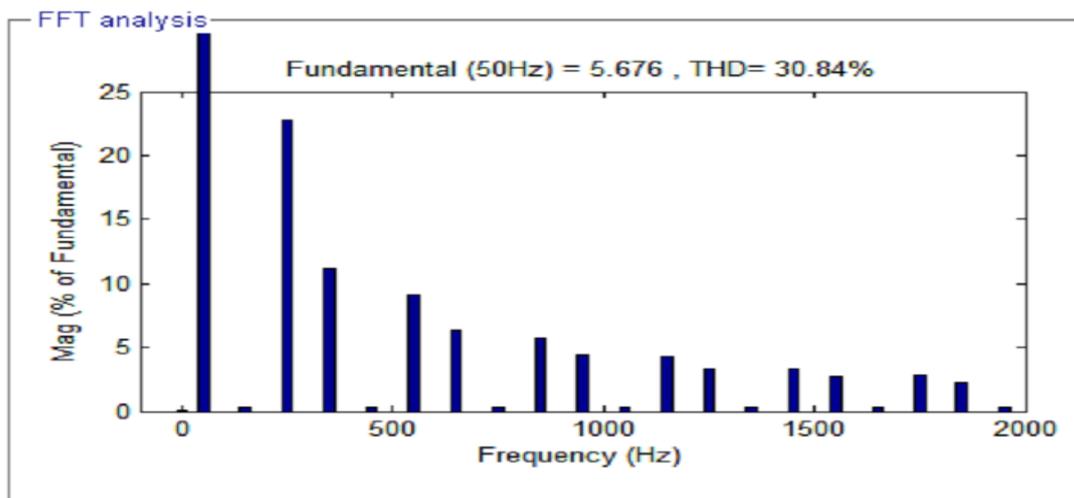
Ce qui se traduit par un facteur de puissance très faible de l'installation globale. La présence de ces harmoniques génère des effets négatifs sur la quasi-totalité des composants du système électrique, en créant de nouvelles contraintes diélectriques, thermiques et/ou mécaniques ainsi que des perturbations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

I.3.3.2.1. Harmonique du courant :

Les harmoniques présents sur les réseaux électriques proviennent de l'utilisation des charges non linéaires. Ces charges sont les sources principales des courants harmoniques, c'est à dire que le courant harmonique est fixé par la charge et non par l'impédance ou la tension du réseau auquel elles sont raccordées, figure (I.3).



a)-Courant perturbé d'une charge non linéaire



b)-Spectres harmoniques du courant perturbé

Figure I.3 Courant et spectre pour une charge non linéaire.

I.3.3.2.2. Harmonique de tension :

Par l'intermédiaire de l'impédance du réseau, les courants harmoniques générés par la charge non linéaire déforment la tension de celui-ci et par conséquent provoquent des perturbations harmoniques de tension. Figure (I.4).

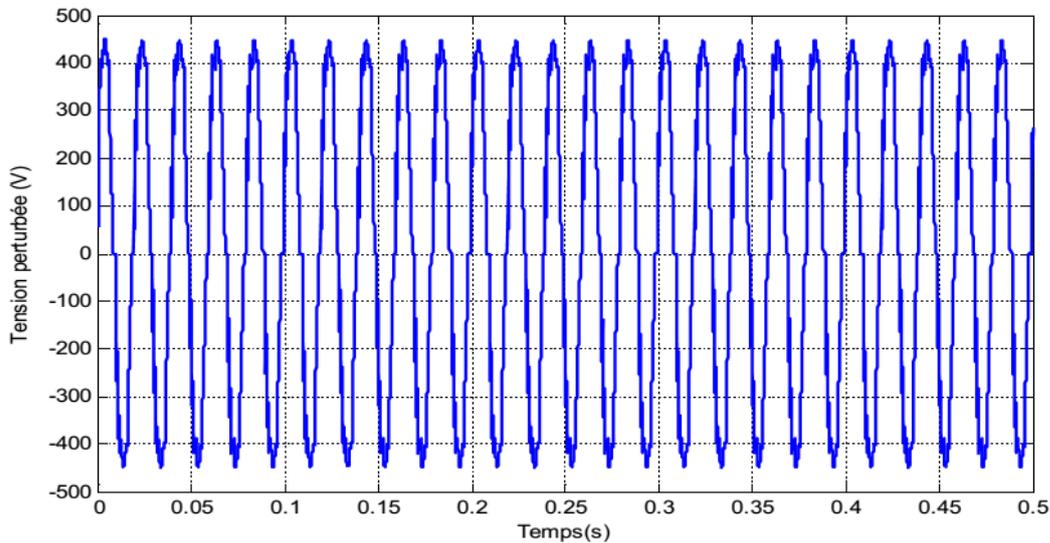


Figure I.4 Tension perturbée due à la présence d'une charge non linéaire

I.3.3.3. 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 différents équipements et appareils électriques, raccordés à un réseau pollué, soient très diversifiées, on distingue deux sortes d'effets possibles:[10]

a) Effets instantanés :

Concernent certains types d'appareillage, tels que l'électronique de puissance, calculateurs, relais, système 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.

b) Effets à termes :

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 tels que les :

➤ **Alternateurs:**

Pertes supplémentaires dans les enroulements statoriques et dans les amortisseurs liées 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:**

perdes 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 [11]. 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 [12].

➤ **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) [13].

I.3.3.4. Caractéristiques des harmoniques :

Différentes grandeurs sont définies pour caractériser la distorsion en régime harmonique. Le taux global de distorsion harmonique ou total harmonique distorsion en anglais (THD) et le facteur de puissance sont les plus employés pour déterminer les perturbations harmoniques et la consommation de puissance réactive [9].

I.3.3.4.1. 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.

$$S_n = \frac{C_n}{C_1} \text{(I.1)}$$

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.3.5.2. Taux Global de Distorsion Harmonique (Total harmonique Distorsion) :

IL représente le rapport de la valeur efficace des harmoniques (X_n) à la valeur efficace du fondamental (X_1).

Le THD est défini par :

$$THD = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{X_n}{X_1}\right)^2} \text{(I.2)}$$

X: désigne un courant ou une tension. Lorsque le THD est nul, on peut conclure qu'il n'y a pas d'harmoniques sur le réseau.

I.3.5.3. Facteur de Puissance (Power Factor) :

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

$$FP = \frac{P}{S} \text{(I.3)}$$

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 [10] :

$$S = 3 \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2} \cdot \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} = 3VI \text{ (I.4)}$$

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 :

$$P = 3 \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \cos \varphi_n \text{ (I.5)}$$

$$Q = 3 \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \sin \varphi_n \text{ (I.6)}$$

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

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

$$FP = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \cos \varphi_n}{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2} \cdot \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}} \text{ (I.8)}$$

I.3.3.5. Réduction de la pollution harmonique :

On peut regrouper les solutions visant à réduire les perturbations harmoniques en deux groupes : les solutions traditionnelles et les solutions modernes.

I.3.3.5.1. Solutions traditionnelles :

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 :

- ☒ L'augmentation de la puissance de court-circuit du réseau et l'utilisation de convertisseurs peu polluants qui ont pour effet de diminuer la distorsion harmonique.
- ☒ L'utilisation de dispositifs de filtrage pour réduire la propagation des harmoniques produits par des charges non linéaires.

Le filtrage consiste à placer en parallèle sur le réseau d'alimentation une impédance de valeur très faible autour de la fréquence à filtrer et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau. Parmi les dispositifs de filtrage les plus répandus, on distingue le filtre passif résonnant et le filtre passif amorti ou passe-haut

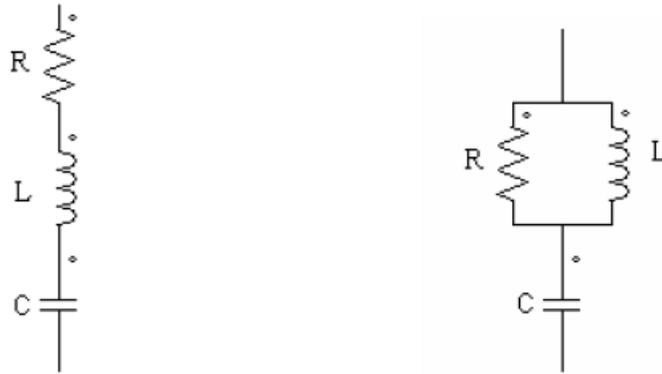


Figure I.5 a) Filtre passif résonnant

b) Filtre passif amorti

Ces dispositifs sont utilisés pour empêcher les courants harmoniques de se propager dans les réseaux électriques. Ils peuvent aussi être utilisés pour compenser la puissance réactive.

Malgré leur large utilisation dans l'industrie, ces dispositifs peuvent présenter beaucoup d'inconvénients :

- Manque de souplesse à s'adapter aux variations du réseau et de la charge.
- Équipements volumineux.
- Problèmes de résonance avec l'impédance du réseau.

I.3.3.5.2. Solutions modernes :

Les solutions de dépollution traditionnelle ne répondant plus à l'évolution des réseaux électriques et des charges à protéger, comme nous venons de le décrire précédemment, d'autres solutions modernes ont été proposées. La première solution de dépollution consiste à

fabriquer la charge la moins polluante possible, comme le pont redresseur dodécaphasé, de manière à réduire le taux d'émission d'harmoniques.

Pour fournir aux consommateurs une bonne qualité de l'énergie électrique, même dans les conditions de fonctionnement les plus perturbées, les filtres actifs 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.

Cependant, ces solutions entraînent un coût supplémentaire et demandent plus que le savoir-faire habituel pour les mettre en œuvre. De plus, ces solutions ne résolvent pas les problèmes causés par les charges polluantes qui existent sur le marché.

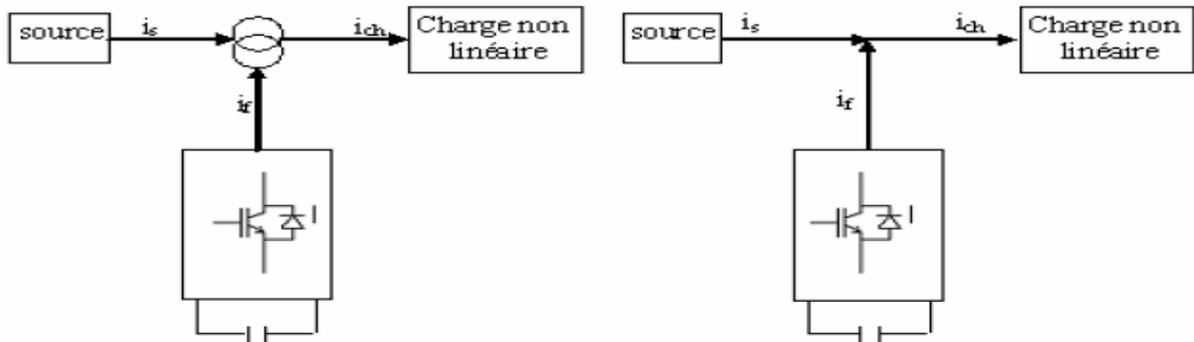


Figure I.6a) filtre actif parallèle

b) filtre actif série

Redresseur à MLI :

Dans le souci de fournir aux consommateurs une bonne qualité de l'énergie électrique, même dans les conditions de fonctionnement les plus perturbées, les redresseurs à MLI sont proposés comme solution avancée de dépollution des réseaux électriques. En effet, les redresseurs à MLI peuvent s'adapter aux évolutions de la charge et du réseau électrique et ceci sans toucher aux installations du fournisseur d'énergie et du consommateur [11] [12].

1.4. Conclusion:

Nous avons consacré ce premier chapitre pour la définition de la qualité de l'énergie électrique, Puis nous avons recensé les origines et les conséquences des harmoniques sur les différents éléments constitutifs du réseau et sur les récepteurs raccordés au réseau.

Ensuite, nous avons présenté les différentes solutions traditionnelles et modernes de la réduction des harmoniques.

Pour l'objectif d'améliorer la qualité de l'énergie électrique, nous étudierons dans le prochain chapitre : le redresseur à MLI en détail.

CHAPITRE II

Redresseur à MLI triphasé (Principe et modélisation)

II.1 Introduction :

La modélisation est une étape principale dans l'analyse d'un dispositif à automatiser. Elle consiste à décrire mathématiquement un processus technique d'un système à régler. Nous allons présenter dans ce chapitre une modélisation du redresseur dans les repères (abc) , (dq) et $(\alpha\beta)$, cette modélisation s'appuie sur le formalisme de Park, Concordia et Clark.

Le domaine de l'électronique de puissance s'est considérablement développé et offre un énorme potentiel pour la conversion d'énergie électrique. Les nouveaux convertisseurs statiques AC/DC sont devenus un domaine de recherche attractif et de grand intérêt, ceci grâce aux applications industrielles domestiques diverses et des avantages qu'ils offrent, à savoir : le transfert bidirectionnel de puissance, le contrôle de la tension de bus continue et l'amélioration du facteur de puissance.

II.2 Généralités et classification des convertisseurs statiques :

Les convertisseurs statiques sont des dispositifs à composants électroniques semi-conducteurs capables de modifier la forme et/ou la fréquence d'une onde électrique. Ils sont réalisés à l'aide de circuits électroniques qui permettent la liaison entre deux réseaux électriques parcourus par des courants de natures différentes, cette liaison est obtenue en reliant entre elles, d'une manière déterminée périodique et unidirectionnelle, les bornes des deux réseaux de façon à obtenir la conversion désirée [13].

On distingue deux types de source :

- les sources de tension continue caractérisée par la valeur U de la tension ;
- les sources de tension alternative définie par les valeurs de la tension efficace et de la fréquence f .

Les interrupteurs électroniques les plus couramment utilisés actuellement dans les convertisseurs statiques sont les diodes, les thyristors, les thyristors GTO, les transistors bipolaires, MOSFET, et IGBT [13].

Les convertisseurs statiques peuvent être classés de la manière suivante :

❖ **Les redresseurs :**

Ce sont des convertisseurs alternatif-continu qui permettent de convertir une tension alternative en une tension continue unidirectionnelle, si ils sont commandés la valeur moyenne de la tension obtenue est alors réglable.

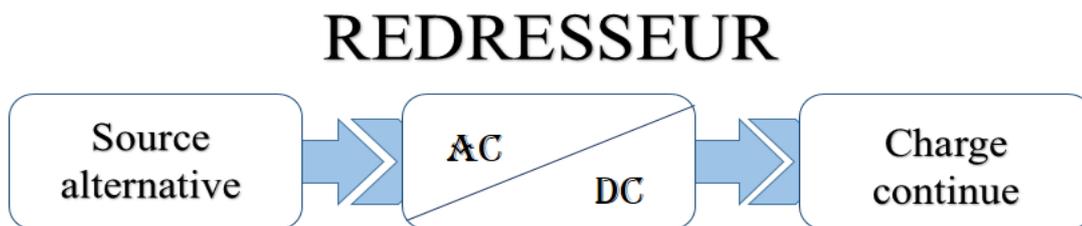


Figure II.1 : Schéma de principe d'un redresseur

❖ **Les hacheurs :**

Ce sont des convertisseurs continu-continu délivrant une tension continue réglable à partir d'une tension continue de valeur fixe, ils jouent ainsi le rôle de transformateur à courant continu.

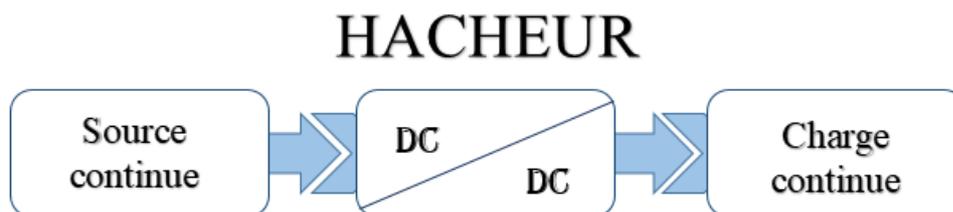


Figure II.2 : Schéma de principe d'un hacheur.

❖ **Les onduleurs :**

Ce sont des convertisseurs continu-alternatif, ils permettent donc de convertir une tension continue en une tension alternative, on les désigne alors d'onduleurs de tension (ou un courant continu en un courant alternatif, on parle alors de mutateurs).

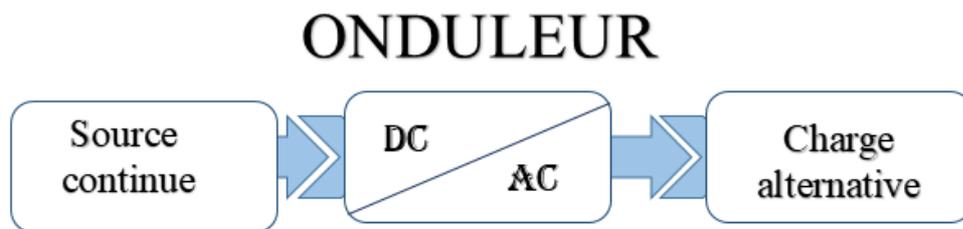


Figure II.3 : Schéma de principe d'un onduleur.

❖ **Le gradateur :**

Ce sont des convertisseurs alternatif-alternatif, ou variateur de courant alternatif lorsque $f_1=f_2$. Les gradateurs produisent des tensions et des courants alternatifs à partir d'une alimentation alternative sans modifier la fréquence des tensions, ils jouent ainsi le rôle des autotransformateurs abaisseurs réglables.

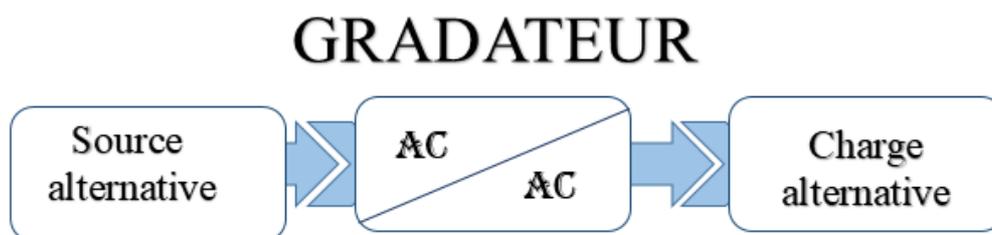


Figure II.4 : Schéma de principe d'un gradateur.

❖ **Les cyclo-convertisseurs :**

Ce sont des convertisseurs alternatif-alternatif (ou convertisseur de fréquence), c'est-à-dire qu'il permet la conversion d'une tension alternative de fréquence f_1 en tension alternative de fréquence f_2 .

II.3. Topologies de base du redresseur triphasé à MLI :

Le redresseur à MLI triphasé est constitué de trois bras. Les interrupteurs bicommandables à deux segments sont des interrupteurs entièrement contrôlables (ouverture et fermeture) remplacent les diodes du montage en pont de Graëtz[14]. Ces dispositifs offrent les avantages suivants :

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

Il y a deux manières de mettre en application les redresseurs triphasés à MLI :

- a) Redresseur de courant, où l'inversion de puissance est assurée par l'inversion du courant
- b) Redresseur de tension, où l'inversion de puissance est assurée par l'inversion de la tension.[15].

a)- Redresseur à MLI triphasé de tension :

Dans cette structure la source alternative triphasée associée au filtre « lc » se comporte comme un générateur de tension, et la source continue comme un générateur de courant
Figure (II.5).

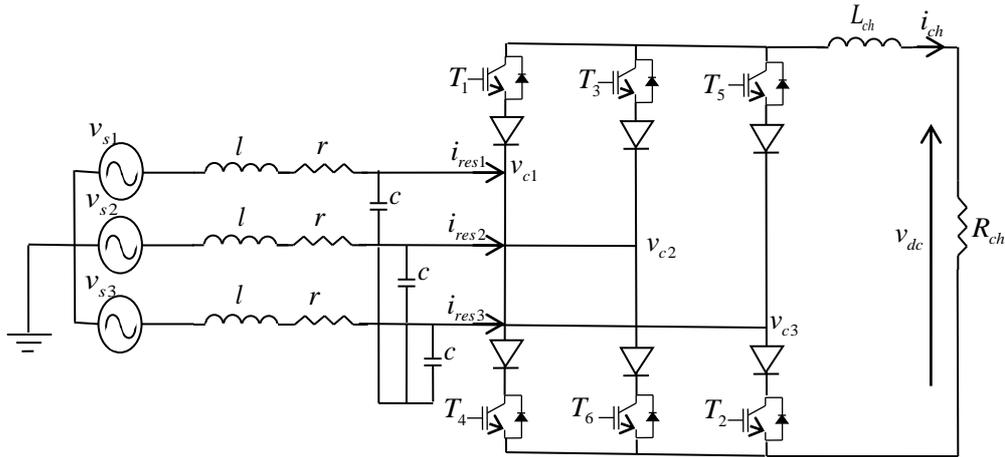


Figure II.5 : Redresseur à MLI structure tension

b)- 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.6).

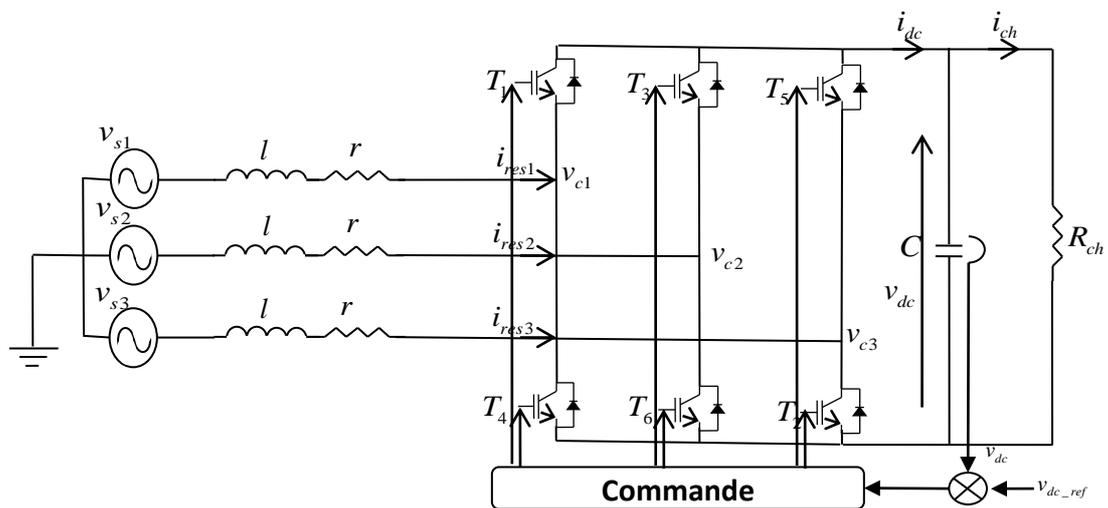


Figure II.6 : Redresseur à MLI structure courant

II.4. Techniques de commande MLI :

II.4.1. Commande du redresseur par la méthode MLI à bande d'hystérésis :

La méthode de la bande d'hystérésis permet la commutation des interrupteurs du redresseur lorsque l'erreur entre le signal et sa consigne excède une amplitude fixée. Cette amplitude est communément appelée fourchette ou bande d'hystérésis cette technique ne demande qu'un comparateur à hystérésis par phase [18]· [21].

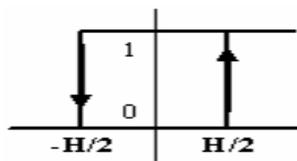


Figure (II.7) : Principe de fonctionnement de Modulateur MLI à bande d'hystérésis.

Le comparateur à hystérésis fonctionne selon le principe expliqué dans la Figure (II.7) 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.

II.4.2 MLI à échantillonnage périodique :

La méthode d'échantillonnage périodique permet aux semi-conducteurs constituant le filtre actif de commuter durant les transitions d'une horloge à onde carrée et à fréquence fixe (fréquence d'échantillonnage). Comme illustré à la Figure (II.8), ce type de commande est très simple à implanter dans la mesure où il ne nécessite qu'un comparateur et une bascule D type par phase.

L'avantage principal de cette méthode est que le temps minimal entre les commutations est limité par la période d'échantillonnage de l'horloge. Cependant, la fréquence de commutation actuelle n'est pas clairement définie.

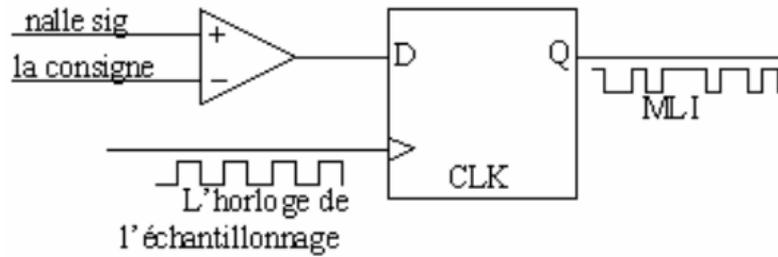


Figure II.8. Modulateur MLI à échantillonnage périodique.

II.4.3 MLI à porteuse triangulaire :

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

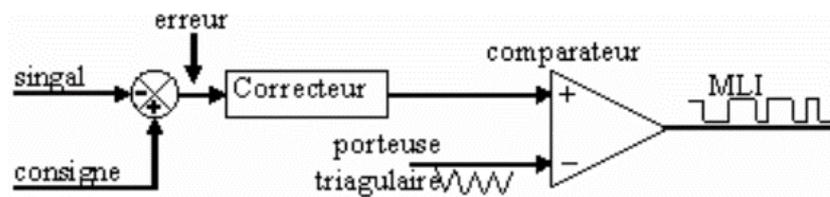


Figure II.9. Modulateur MLI à porteuse triangulaire.

II.4.4 MLI vectorielle :

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

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

II.5. Modélisation du redresseur à MLI :

L'état de chaque paire d'interrupteurs, supposés parfaits, peut être représenté par trois grandeurs booléennes de commande $S_j (j = a, b, c)$, telles que [16] :

$S_j = 1$, Si l'interrupteur du haut est fermé et celui du bas ouvert.

$S_j = 0$, Si l'interrupteur du haut est ouvert et celui du bas fermé.

Dans ces conditions, les tensions des points a, b et c par rapport au point n_0 s'écrivent comme suit :

$$V_{jn0} = S_j \cdot V_{dc} \quad (\text{II.1})$$

V_{dc} : Etant la tension du bus continu.

On en déduit les relations suivantes exprimant les tensions composées u_{ab} , u_{bc} et u_{ca} :

$$\begin{cases} u_{ab} = V_{an0} - V_{bn0} = (S_a - S_b)V_{dc} \\ u_{bc} = V_{bn0} - V_{cn0} = (S_b - S_c)V_{dc} \\ u_{ca} = V_{cn0} - V_{an0} = (S_c - S_a)V_{dc} \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

Soient ; $V_a = V_{an}$, $V_b = V_{bn}$, $V_c = V_{cn}$ les tensions du redresseur, celles-ci sont reliées aux tensions u_{ab} , u_{bc} et u_{ca} par ces équations :

$$\begin{cases} u_{ab} = V_a - V_b \\ u_{bc} = V_b - V_c \\ u_{ca} = V_c - V_a \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

À partir des équations précédentes on aboutit aux relations :

$$\begin{cases} V_a = \frac{V_{dc}}{3} (2S_a - S_b - S_c) \\ V_b = \frac{V_{dc}}{3} (-S_a + 2S_b - S_c) \\ V_c = \frac{V_{dc}}{3} (-S_a - S_b + 2S_c) \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

II.4.1. Modes d'opération du redresseur MLI :

Soit le schéma monophasé équivalent du redresseur représenté sur la figure (II.10) \overline{V}_s représente le vecteur tension de ligne et \overline{V} le vecteur tension du convertisseur contrôlable à

partir du côté continu. Son amplitude dépend de l'indice de modulation et du niveau de tension du bus continu V_{dc} [16].

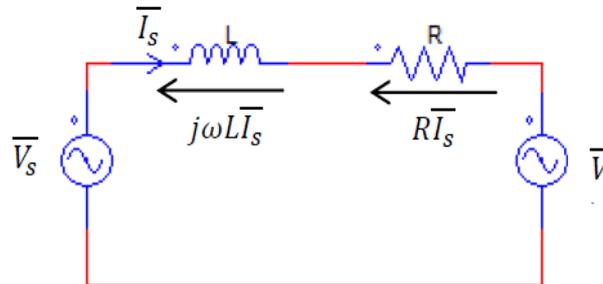


Figure (II.10) : Schéma monophasé équivalent d'un redresseur à MLI.

Les bobines d'inductance (L, R) placées entre l'entrée du redresseur et la source d'alimentation font partie intégrante du circuit. Elles confèrent le caractère courant à la source d'entrée et acquièrent au convertisseur la fonction d'amplification. De plus leur présence est indispensable pour assurer le contrôle des courants absorbés par le redresseur et assurer ainsi le contrôle de la puissance échangée entre les deux côtés alternatif et continu du circuit.

En effet pour commander le transfert de puissance entre les deux côtés du redresseur, il faut contrôler le courant de ligne \bar{I}_s .

Pour ce faire, il faut régler la chute de tension aux bornes de l'inductance L en agissant sur le vecteur de tension \bar{V} du convertisseur. Ainsi donc en contrôlant l'amplitude et la phase de ce dernier, on contrôle indirectement la phase et l'amplitude du vecteur courant de ligne, ce qui nous permettra de réaliser tous les échanges d'énergie possible entre les deux côtés du convertisseur.

II.5.2. États de commutation du redresseur à MLI :

➤ **Hypothèses :**

Le circuit principal du convertisseur se compose de trois bras avec IGBT ou, avec GTO en cas de puissance élevée. La tension de convertisseur peut être représentée par huit états possibles de commutation comme le montre la figure (II.11) ci-dessous[17], [18], [19] :

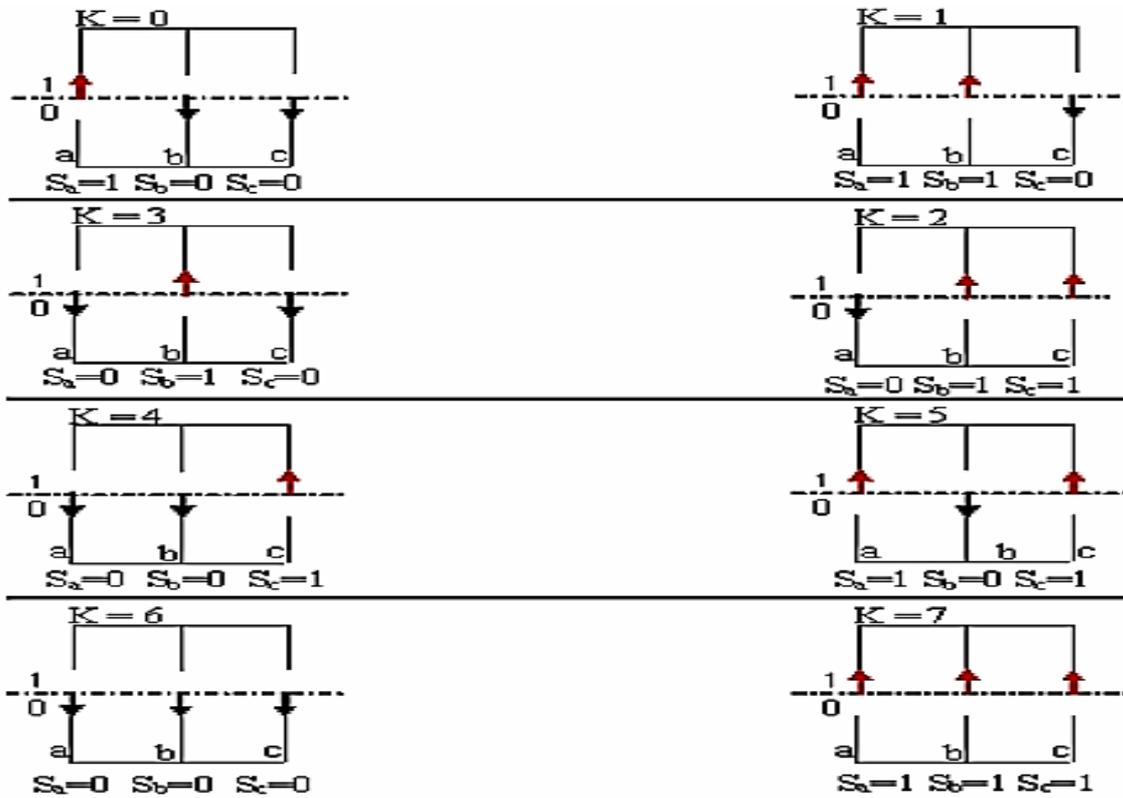


Figure (II.11) : Différents états de commutation des interrupteurs du redresseur MLI.

Le tableau ci-dessous représente toutes les configurations possibles du convertisseur en fonction des ordres de commandes (s_a, s_b, s_c) ainsi que les tensions simples à l'entrée du pont, pour une tension constante de bus continue (V_{dc}):

K	S_a	S_b	S_c	V_a	V_b	V_c	U_{ab}	U_{bc}	U_{ca}
0	1	0	0	$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	V_{dc}	0	$-V_{dc}$
1	1	1	0	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$	0	V_{dc}	$-V_{dc}$
2	0	1	1	$-2V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$-V_{dc}$	0	V_{dc}
3	0	1	0	$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}$	V_{dc}	0
4	0	0	1	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$	0	$-V_{dc}$	V_{dc}

5	1	0	1	$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	V_{dc}	$-V_{dc}$	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	1	1	1	0	0	0	0	0	0

Tableau (II.1) : Les tensions en fonction des interrupteurs de commande.

Les équations électriques d'un système triphasé équilibré sont données par : [16], [20]

➤ Pour les tensions :

$$V_a = V_m \cos(\omega t)$$

$$V_b = V_m \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (\text{II.5})$$

$$V_c = V_m \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)$$

➤ Pour les courants :

$$i_a = I_m \cos(\omega t + \varphi)$$

$$i_b = I_m \cos\left(\omega t + \varphi - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$i_c = I_m \cos\left(\omega t + \varphi - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (\text{II.6})$$

Avec V_m , I_m et ω sont : l'amplitude de tension, courant et la pulsation respectivement.

Système triphasé équilibré :

$$i_{as} + i_{bs} + i_{cs} = 0 \quad (\text{II.7})$$

II.5.3. Modèle du redresseur à MLI dans le repère (a, b, c) :

À partir de la figure (II.10), on tire les équations suivantes :

$$\bar{V}_s = \bar{V}_i + \bar{V} \quad (\text{II.8})$$

Avec la Chute de tension aux bornes du filtre.

$$V_i = Ri_s + L \frac{di_s}{dt} \quad (\text{II.9})$$

On aura donc :

$$V_s = Ri_s + L \frac{di_s}{dt} + V \quad (\text{II.10})$$

En écriture matricielle, on aura :

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

Le passage aux transformées de Laplace nous permet d'écrire :

$$\begin{aligned} I_{as} &= (V_{as} - V_a) \frac{1}{(R + Lp)} \\ I_{bs} &= (V_{bs} - V_b) \frac{1}{(R + Lp)} \\ I_{cs} &= (V_{cs} - V_c) \frac{1}{(R + Lp)} \end{aligned} \quad (\text{II.12})$$

L'équation des courants peut être écrite comme suite :

$$C \frac{dV_{ds}}{dt} = s_a \cdot i_{as} + s_b \cdot i_{bs} + s_c \cdot i_{cs} - I_{ch} \quad (\text{II.13})$$

Après avoir appliqué la transformée de Laplace :

$$V_{ds} = \frac{1}{C \cdot p} [(s_a \cdot i_{as} + s_b \cdot i_{bs} + s_c \cdot i_{cs}) - I_{ch}] \quad (\text{II.14})$$

La combinaison des équations (III.11), (III.12), (III.13) et (III.14) nous permet de dessiner le schéma bloc du modèle du redresseur dans le système d'axe (a, b, c) figure (II.12)[16], [18], [20].

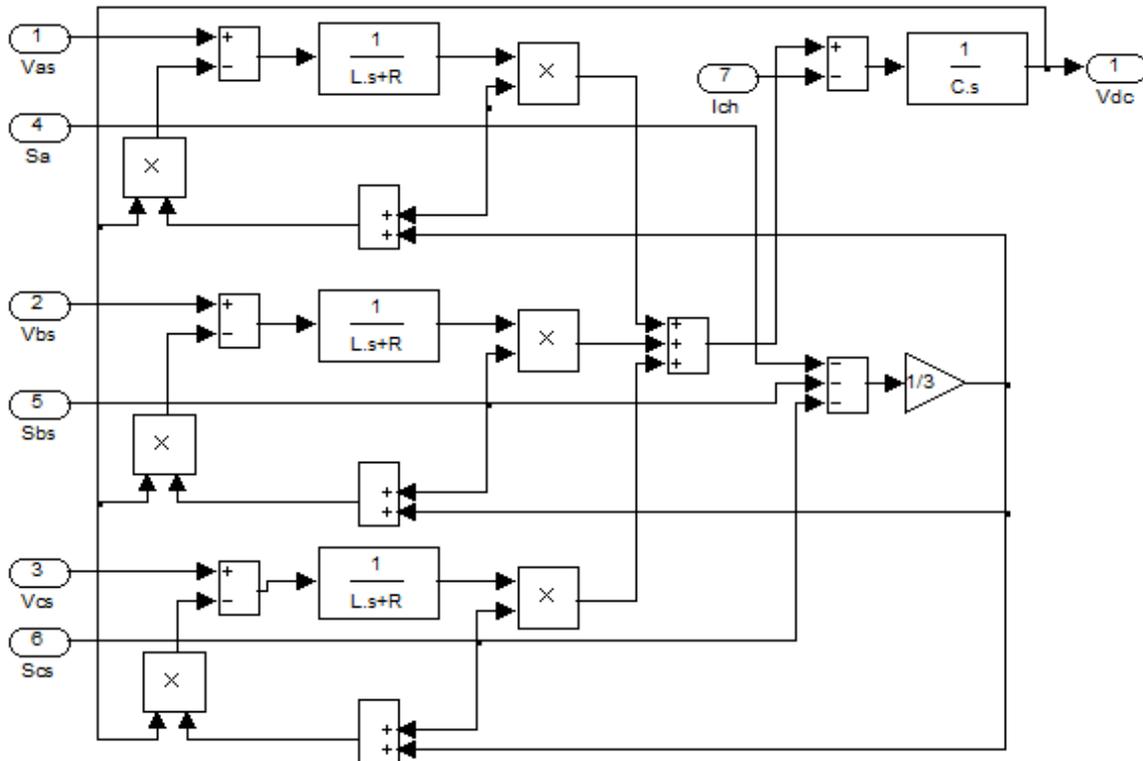


Figure (II.12) : Modèle de redresseur à MLI dans le repère (a, b, c).

II.5.4. Modèle du redresseur MLI dans le repère (α, β) :

Les équations en tension du redresseur dans le système d'axes (α, β) sont obtenues par l'application de la transformation Concordia aux équations précédentes :

$$\begin{bmatrix} V_{\alpha s} \\ V_{\beta s} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_{\alpha s} \\ i_{\beta s} \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{\alpha s} \\ i_{\beta s} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{\alpha} \\ V_{\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

Avec :

$V_{\alpha s}, V_{\beta s}$: Composantes d'axes (α, β) des tensions du convertisseur

$i_{\alpha s}, i_{\beta s}$: Composantes des courants de ligne.

Pour les courants, on aura :

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = (s_{\alpha} \cdot i_{\alpha s} + s_{\beta} \cdot i_{\beta s}) - I_{ch} \begin{bmatrix} V_{\alpha} \\ V_{\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

$$S_\alpha = \frac{1}{\sqrt{6}}(2S_a - S_b - S_c); S_\beta = \frac{1}{\sqrt{2}}(S_a - S_c) \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{II.17})$$

Le schéma bloc de redresseur dans le système d'axes (α, β) et représenté sur la figure(II.13)

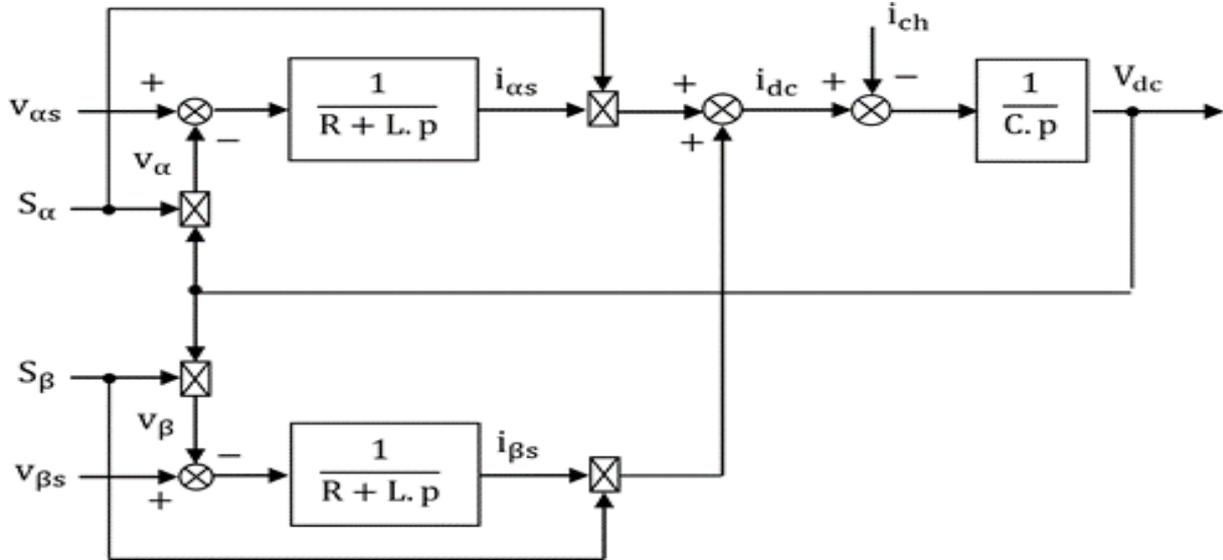


Figure II.13 : Modèle du redresseur dans le système d'axes (α, β) .

II.5.5. Modèle du redresseur à MLI dans le repère (d, q) :

$$\begin{cases} V_{ds} = Ri_{ds} + L \frac{di_{ds}}{dt} - \omega Li_{qs} + V_d \\ V_{qs} = Ri_{qs} + L \frac{di_{qs}}{dt} - \omega Li_{ds} + V_q \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

$$c \frac{dV_{ds}}{dt} = (s_d i_{ds} + s_q i_{qs}) - I_{ch} \quad (\text{II.19})$$

Avec :

$$S_d = S_\alpha \cos \omega t + S_\beta \sin \omega t \quad (\text{II.20})$$

$$S_q = S_\beta \cos \omega t + S_\alpha \sin \omega t \quad (\text{II.21})$$

Le schéma bloc du modèle du redresseur dans le système d'axe (d, q) est représenté sur la figure (II .11)[2], [15], [20].

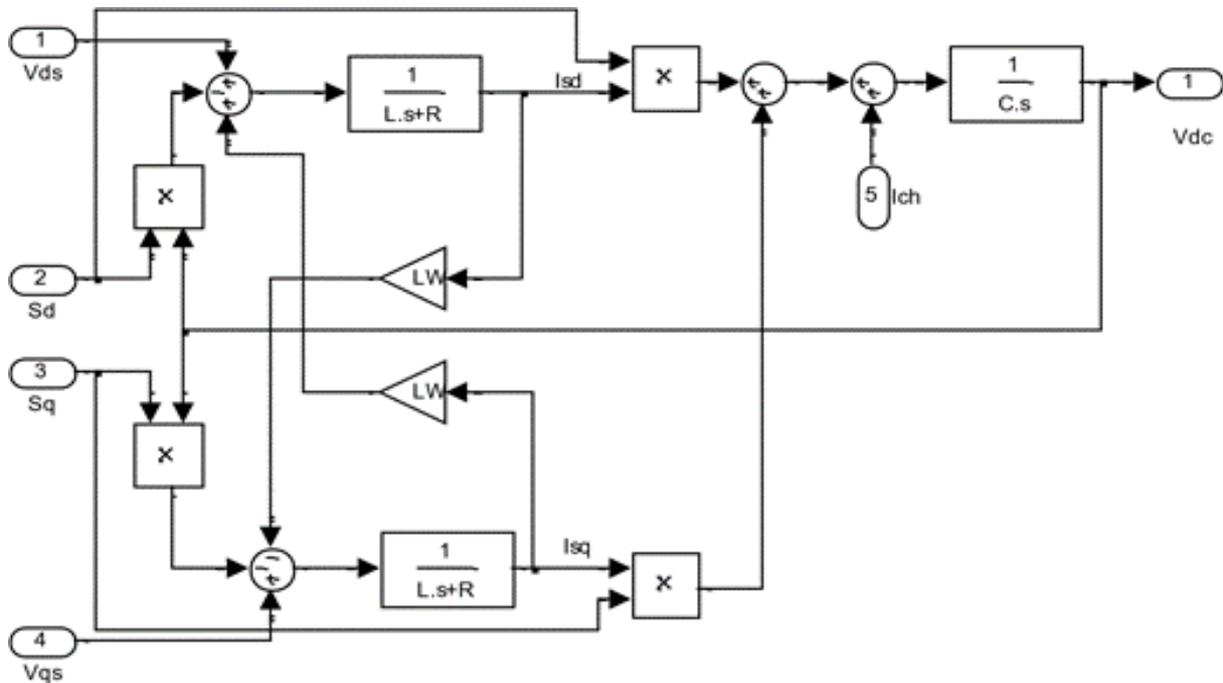


Figure II.14 : Modèle du redresseur dans le système d'axes (d, q) .

I.6. THD et FFT d'un redresseur triphasé à diodes :

Nous exposons dans cette section les résultats obtenues par les simulations d'un redresseur triphasé à diode(non commandé), ces résultats ont été relevés en régime permanent et transitoire.

Les paramètres du circuit et de contrôle sont indiqués dans le tableau (II.2) :

Résistance totale de la ligne	0.3 Ω
Inductance totale de la ligne	10^{-3} H
Résistance de charge	100 Ω
Capacité de charge	4700 μF
Tension d'alimentation	220 V
Fréquence de réseau	50 Hz

Tableau II .2 : Paramètres de simulation du redresseur.

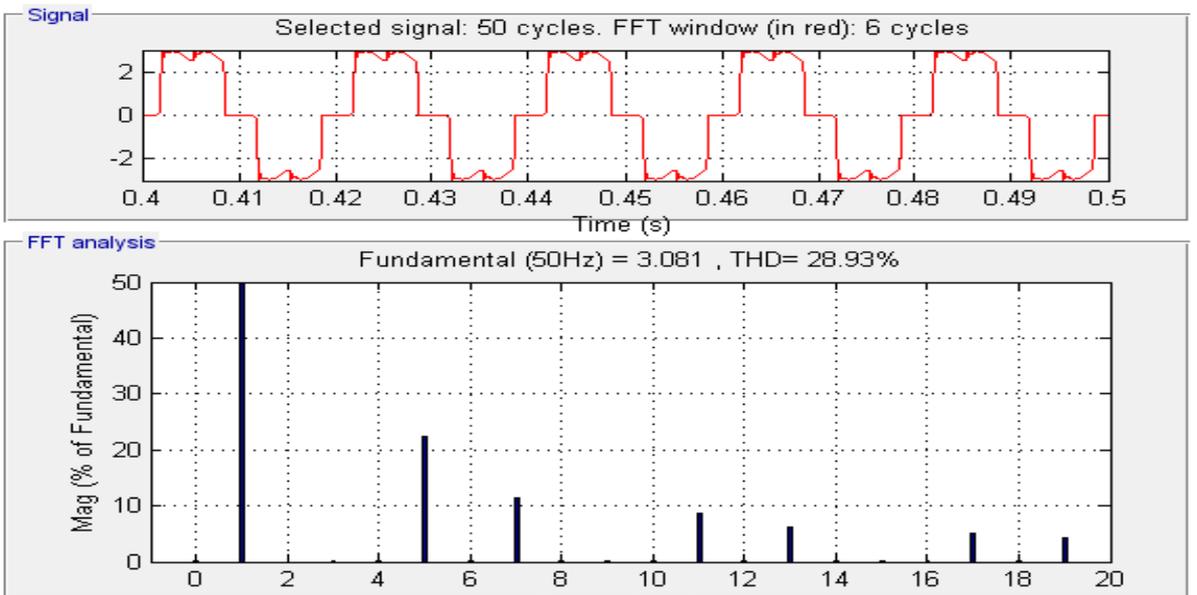
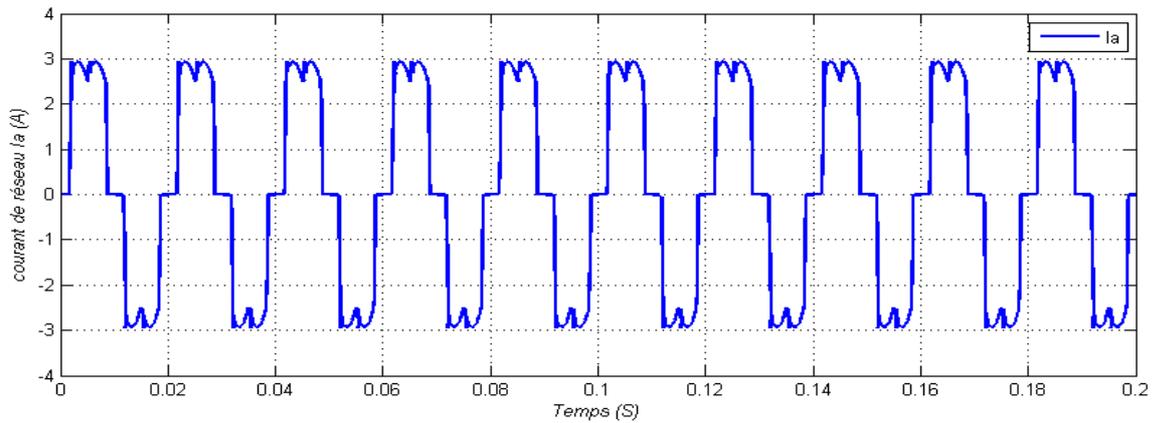


Figure II.15 : l'allure de courant du réseau I_a (A).

Figure II.16 : FFT du courant de réseau.

II.6.1. Interprétation des résultats :

Le courant du réseau obtenu par notre simulation est représenté sur la figure (II.15), On remarque que ce courant n'est pas sinusoïdal.

L'analyse spectrale du courant de ligne présentée dans la figure (II.16) montre que tous les harmoniques sont de rangs élevés, ce qui donne un THD = 28.93%. On peut dire que ce résultat est inacceptable.

II.7. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté tout d'abord une étude fonctionnelle du redresseur, cette étude est commencée par des généralités et des classifications des convertisseurs statiques, ainsi que la topologie de base du redresseur triphasé à MLI. Nous avons aussi cité les techniques de commande de ce dernier.

Ensuite, nous avons présenté la modélisation du redresseur MLI et ainsi les états de commutation de ce dernier, après nous avons donné le modèle du redresseur dans les différents repères (a, b, c) , (d, q) , (α, β) .

Enfin, nous avons simulé un redresseur triphasé à diodes pour faire une comparaison avec les redresseurs commandés. La commande directe de puissance (DPC) sera l'objet de notre étude du chapitre prochain.

CHAPITRE III

Commande directe de puissance (DPC) (modélisation et simulation)

III.1 Introduction :

Cette nouvelle structure de commande, couramment nommée : Commande directe de puissance d'un convertisseur à MLI AC/DC triphasé. On la trouve plus souvent, dans la nouvelle littérature, sous l'abréviation anglaise de DPC Direct Power Control. [22]

La Commande Directe de Puissance consiste à sélectionner un vecteur de commande à partir d'une table de commutation. Cette dernière est basée sur des boucles de régulation des puissances active et réactive instantanées, utilisant la position des tensions de ligne. Elle consiste à sélectionner un vecteur de commande à partir d'une table de commutation, cette dernière est basée sur l'erreur de puissance P et Q aussi bien que sur la position angulaire de la tension de ligne. Cette tension est estimée, ce qui permet de réduire le nombre de capteurs.

En plus de sa simplicité qui est due à l'élimination des blocs de modulation et des boucles de régulation internes (de courant) et aussi à l'absence de transformations de coordonnées, cette commande garantit un contrôle découplé des puissances et de bonnes performances dynamiques.[24]

Nous présentons dans ce chapitre cette dernière solution, La commande directe de puissance d'un convertisseur AC/DC triphasé sans capteur de tension.

III.2. la commande directe de puissance :

III.2.1.le principe du la commande directe de puissance :

La commande directe de puissance (DPC) est basée sur le concept du contrôle direct du couple appliqué aux machines électriques. Le but est de contrôler directement la puissance active et réactive dans un redresseur MLI, le même principe a été appliqué pour contrôler le couple et le flux dans les machines électriques alternatives. Les régulateurs utilisés sont des comparateurs à hystérésis à deux niveaux pour les erreurs de puissance active et réactive instantanées S_p et S_q . La sortie des régulateurs avec le secteur où se trouve la position du vecteur de tension du réseau, constituent les entrées d'un tableau de commutation qui à son

tour détermine l'état de commutation des interrupteurs, la référence de puissance active est obtenue à partir du régulateur de tension du bus continu [22].

La Figure (III.1) montre la configuration globale de la commande directe de puissance sans capteur de tension pour un redresseur à MLI.

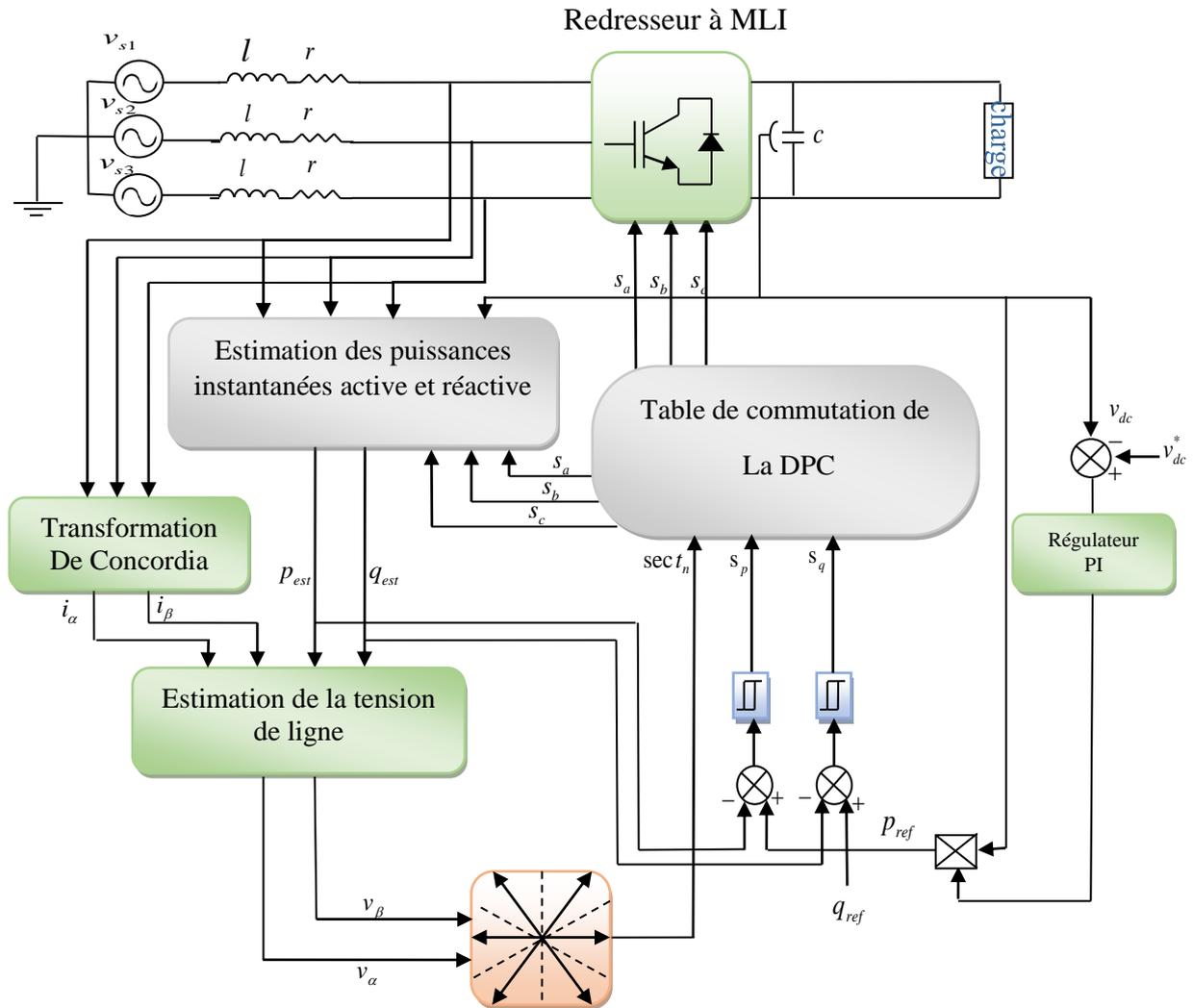


Figure III.1 : Configuration générale de la commande DPC.

III.2.2. Estimation de la puissance instantanée :

La puissance active instantanée est définie par le produit scalaire entre les courants et les tensions de ligne. Alors que, la puissance réactive est définie par le produit vectoriel entre eux [22] [23].

$$\bar{S} = p + jq \quad (\text{III.1})$$

$$\bar{S} = v_{sa}i_a + v_{sb}i_b + v_{sc}i_c + \frac{1}{\sqrt{3}}[(v_{sa} - v_{sc})i_a + (v_{sc} - v_{sa})i_b + (v_{sa} - v_{sb})i_c] \quad (\text{III.2})$$

Cependant, l'expression (III.2) exige la connaissance des tensions du réseau. De ce fait, il faut exprimer les puissances par des autres expressions indépendantes des tensions du réseau. Alors, les expressions qui donnent l'estimation des puissances active et réactive instantanées sans capteur de tensions sont comme suit [22] [24] :

$$\begin{cases} \hat{p} = L \left(\frac{di_a}{dt} i_a + \frac{di_b}{dt} i_b + \frac{di_c}{dt} i_c \right) + v_{dc}(S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c) \\ \hat{q} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[3L \left(\frac{di_a}{dt} i_b - \frac{di_c}{dt} i_a \right) - v_{dc}(S_a(i_b - i_c) + S_b(i_c - i_a) + S_c(i_a - i_b)) \right] \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

Les premières parties des deux expressions représentées précédemment présentent la puissance dans les inductances de ligne, notant ici que les résistances internes de ces inductances sont négligeables car la puissance active dissipée dans ces résistances est en fait beaucoup plus faible devant la puissance mise en jeu. Les autres parties représentent la puissance dans le convertisseur [25].

III.2.3. 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 $i_{s1} i_{s2} i_{s3}$, dans les coordonnées stationnaires $\alpha\beta$ [25] :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.4})$$

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

$$\begin{cases} \hat{p} = \bar{v}_{s(123)} \cdot \bar{i}_{(123)} = v_{s\alpha} i_{\alpha} + v_{s\beta} i_{\beta} \\ \hat{q} = \bar{v}_{s(123)} \wedge \bar{i}_{(123)} = v_{s\beta} i_{\alpha} - v_{s\alpha} i_{\beta} \end{cases}$$

(III.5)

L'écriture matricielle des expressions (III.5) est :

$$\begin{bmatrix} \hat{p} \\ \hat{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & v_{s\beta} \\ v_{s\beta} & -v_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix}$$

(III.6)

La tension peut être estimée par l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} \hat{v}_{s\alpha} \\ \hat{v}_{s\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{(i_{\alpha}^2 + i_{\beta}^2)} \begin{bmatrix} i_{\alpha} & -i_{\beta} \\ i_{\beta} & i_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{p} \\ \hat{q} \end{bmatrix}$$

(III.7)

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

$$\begin{bmatrix} \hat{v}_{sa} \\ \hat{v}_{sb} \\ \hat{v}_{sc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{v}_{s\alpha} \\ \hat{v}_{s\beta} \end{bmatrix}$$

(III.8)

III.2.4. Détermination du secteur :

Le numéro du secteur où se trouve le vecteur des tensions est déterminé en comparant l'angle θ avec les bornes de chacun des six et douze secteurs qui sont définies par la formule ci-dessous :

$$(2n - 3) \frac{\pi}{6} \leq \theta_n \leq (2n - 1) \frac{\pi}{6} \quad n=1,2,\dots,6.$$

$$(n - 2) \frac{\pi}{6} \leq \theta_n \leq (n - 1) \frac{\pi}{6} \quad n=1,2,\dots,12. \text{(III.9)}$$

Le calcul de la position angulaire du vecteur des tensions du réseau dans le plan stationnaire α - β (figure III.2), nécessite la connaissance des composantes, qui peut être soit calculées à partir des mesures des tensions du réseau, soit être estimées à partir de l'estimation des puissances instantanées et des courants absorbés. Cette position est définie par la relation suivante :

$$\theta = \arctg\left(\frac{v_\beta}{v_\alpha}\right) \text{ (III.10)}$$

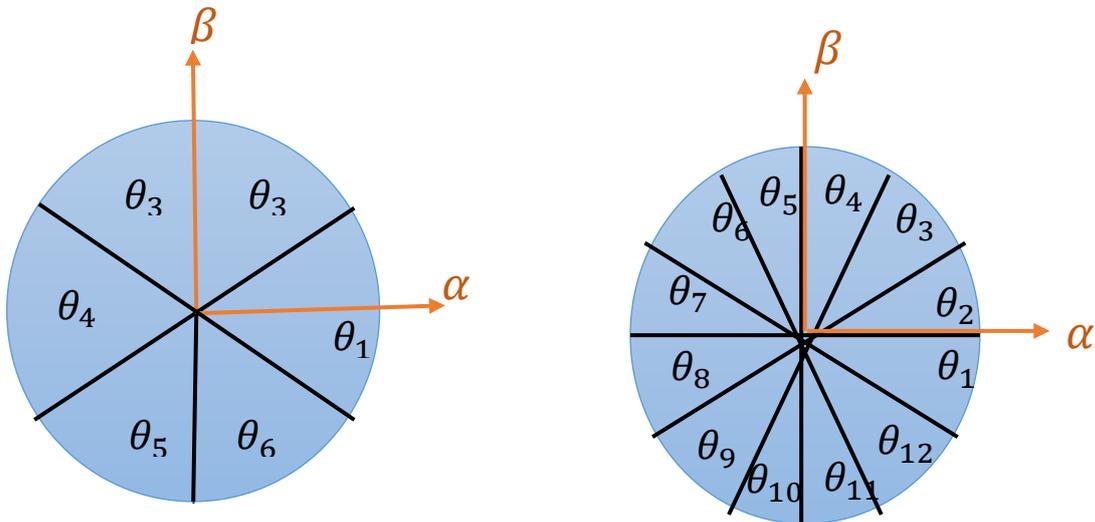


Figure III.2 : Représentation du vecteur de la tension dans le plan de l'espace vectoriel (α, β) divisé en six (6) et douze (12) secteurs.

III.2.5. Régulateur à hystérésis :

La grande simplicité de l'implémentation de cet outil de contrôle est également un élément important dans le choix du comparateur à deux niveaux. De plus, les considérations énergétiques sur le convertisseur imposent un nombre restreint de commutations. Or, pour une même largeur d'hystérésis de contrôle, le comparateur à deux niveaux nécessite un nombre moins élevé de commutations.

Les largeurs de la bande d'hystérésis ont une influence sur la performance du redresseur en particulier, sur la distorsion du courant harmonique, et sur la fréquence moyenne de commutation.

Le contrôleur proposé dans la DPC classique c'est un régulateur à deux niveaux pour les puissances actives et réactive. Les sorties des régulateurs à hystérésis données par les variables booléennes Sp et Sq , indiquent les dépassements supérieurs ou inférieurs des erreurs des puissances suivant la logique ci-dessous :

$$S_p \begin{cases} 1 \text{ pour } \hat{p} < \hat{p}_{ref} - H_p \\ 0 \text{ pour } \hat{p} > \hat{p}_{ref} + H_p \end{cases} \quad \text{et} \quad S_q \begin{cases} 1 \text{ pour } \hat{q} < \hat{q}_{ref} - H_q \\ 0 \text{ pour } \hat{q} > \hat{q}_{ref} + H_q \end{cases} \quad (\text{III.11})$$

Où H_p, H_q sont les écarts des régulateurs à hystérésis à deux niveaux [24].

III.2.6. Table de commutation :

Les signaux numériques d'erreurs S_p et S_q , et le secteur de travail sont les entres de la table de commutation Tableau (III.1), où les états de commutations Sa, Sb, Sc 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 le numéro du secteur, 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 $2H_q$ [26].

S_p	S_q	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6
1	0	v_6	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5
	1	v_0	v_7	v_0	v_7	v_0	v_7
0	0	v_6	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5
	1	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6

Tableau III.1 : Table de commutation six Secteur de la commande DPC classique [10], avec

$v_0 (0 0 0); v_1 (1 0 0); v_2 (1 1 0); v_3 (0 1 0); v_4 (0 1 1); v_5 (0 0 1); v_6 (1 0 1); v_7 (1 1 1)$.

S_p	S_q	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6	θ_7	θ_8	θ_9	θ_{10}	θ_{11}	θ_{12}
	0	v_6	v_7	v_1	v_0	v_2	v_7	v_3	v_0	v_4	v_7	v_5	v_0

1	1	v_7	v_7	v_0	v_0	v_7	v_7	v_0	v_0	v_7	v_7	v_0	v_0
0	0	v_6	v_1	v_1	v_2	v_2	v_3	v_3	v_4	v_4	v_5	v_5	v_6
	1	v_1	v_2	v_2	v_3	v_3	v_4	v_4	v_5	v_5	v_6	v_6	v_1

Tableau III.2 : Table de commutation douze Secteur de la commande DPC classique [10], avec $v_0 (0\ 0\ 0)$; $v_1 (1\ 0\ 0)$; $v_2 (1\ 1\ 0)$; $v_3 (0\ 1\ 0)$; $v_4 (0\ 1\ 1)$; $v_5 (0\ 0\ 1)$; $v_6(1\ 0\ 1)$; $v_7 (1\ 1\ 1)$.

III.2.7. Régulation de la tension continue :

La régulation de la tension continue est assurée par un régulateur de type *PI*. Ce dernier corrige l'erreur entre la tension continue mesurée et sa référence. Le produit du courant continu de référence avec la tension continue (V_{dc}) donne la puissance active de référence (P_{ref}) [27].

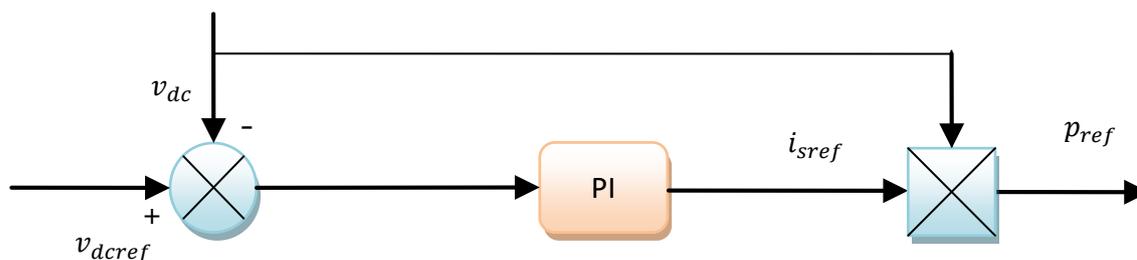


Figure III.3 : Régulation de la tension continue.

III.3. Résultat de simulation du DPC :

De nombreuses simulations ont été effectuées afin d'évaluer la méthode de contrôle décrite. Les simulations ont été axées sur les propriétés du contrôle direct de puissance DPC basé sur une table de commutation bien définie (à six et douze secteurs) pendant un régime transitoire et permanent. Les modèles de simulation ont été développés dans Matlab\Simulink® 2014.

III.3.1. Résultats de simulation du DPC (six secteurs) :

Nous exposons dans cette section les résultats obtenues par les simulations de la DPC en utilisons le tableau de six secteurs. Les paramètres du circuit et de contrôle sont les mêmes utilisés dans le deuxième chapitre avec un changement de la référence de la tension de sortie de $V_{dc\ ref} = 600V$ à $V_{dc\ ref} = 700V$ à $(t = 0.4s)$ et un échelon de puissance réactive à $(Q_{ref} = 0 VAR)$.

A) :

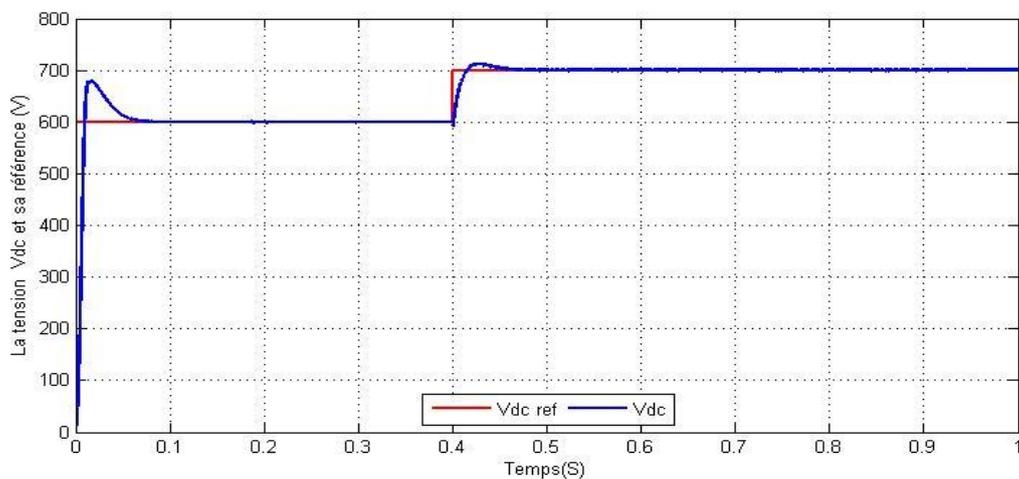


Figure (III-4. A) : l'allure de tension Vdc et sa référence

B) :

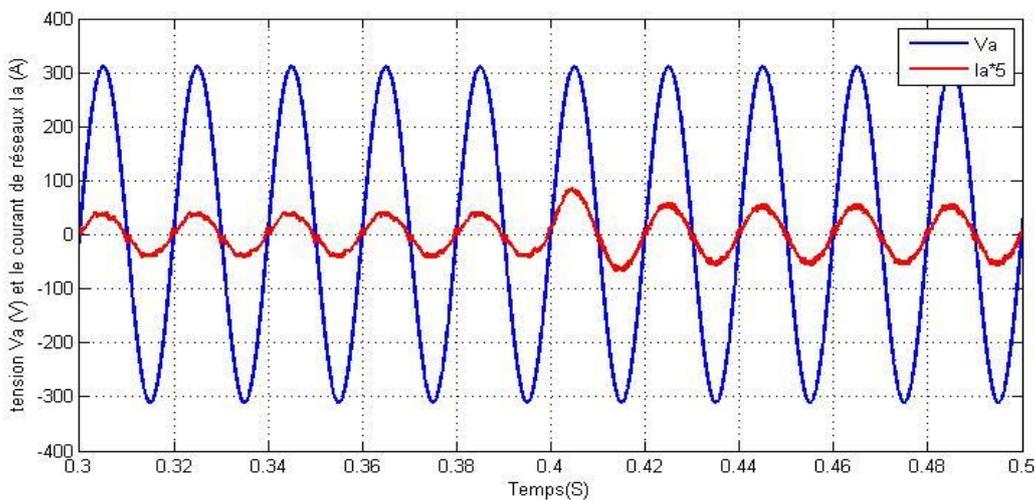


Figure (III-4. b) : l'allure de tension Va et le courant de réseaux Ia.

c) :

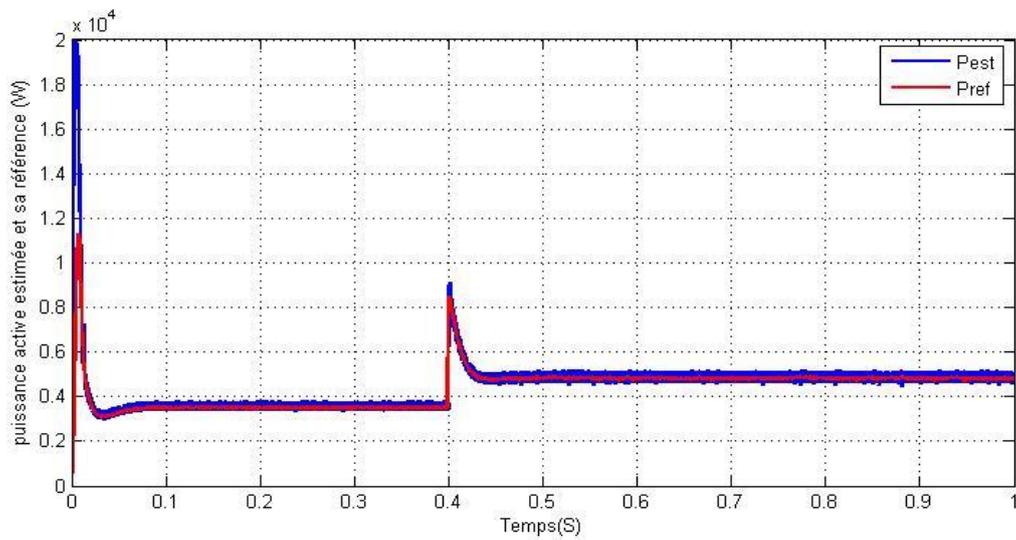
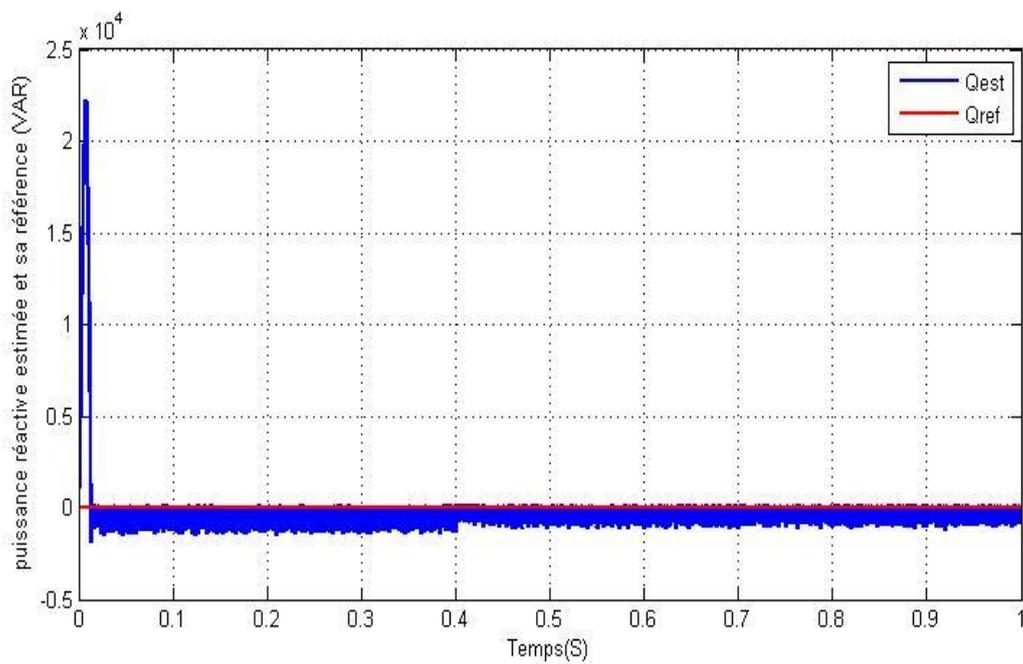


Figure (III-4.c) : l'allure de puissance active estimée et sa référence



d) :

Figure (III-4. d) : l'allure de puissance réactive estimée et sa référence

e) :

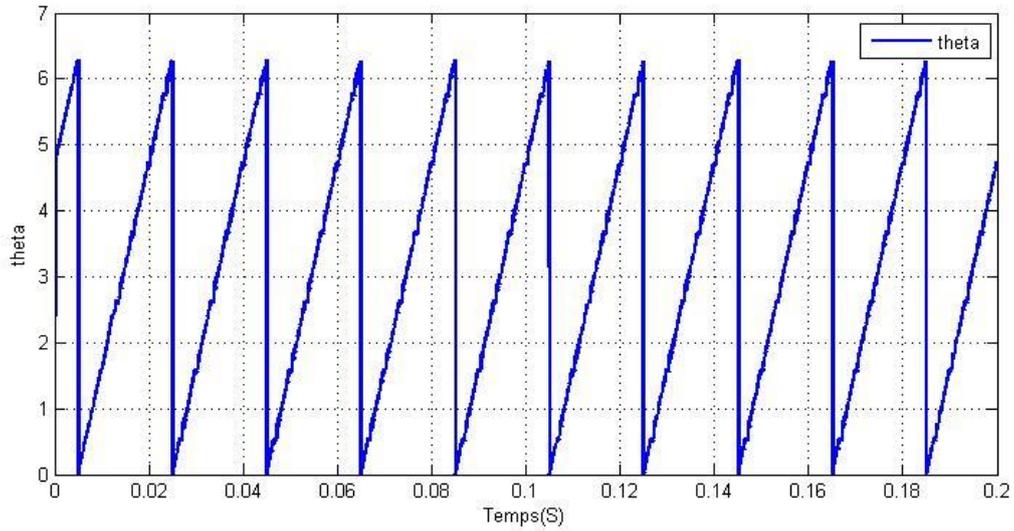
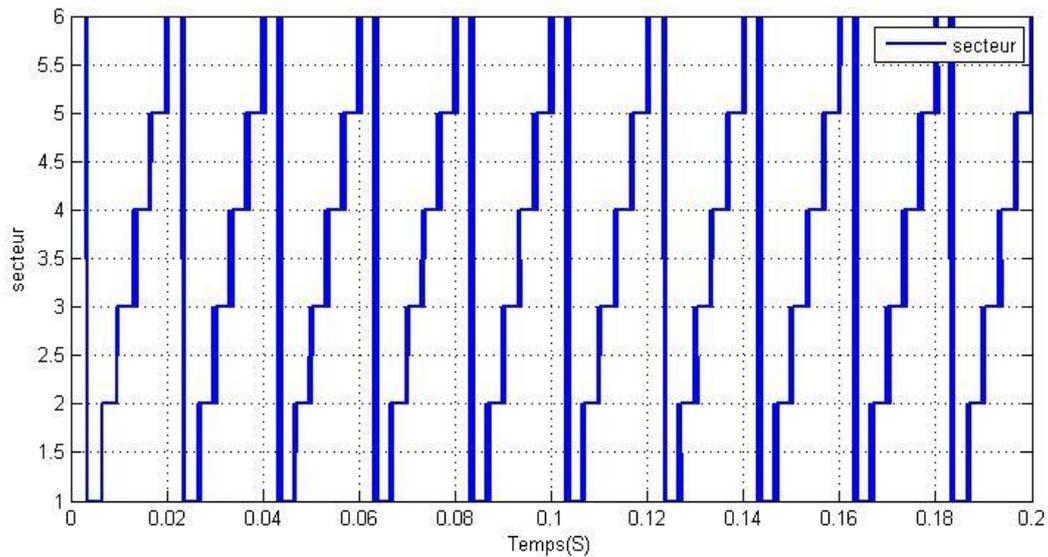


Figure (III-4. e) : l'allure de la position Theta



f) :

Figure (III-4. f) : l'allure de secteur

Figure III.4 : Performances du redresseur commandé par DPC (six secteurs).

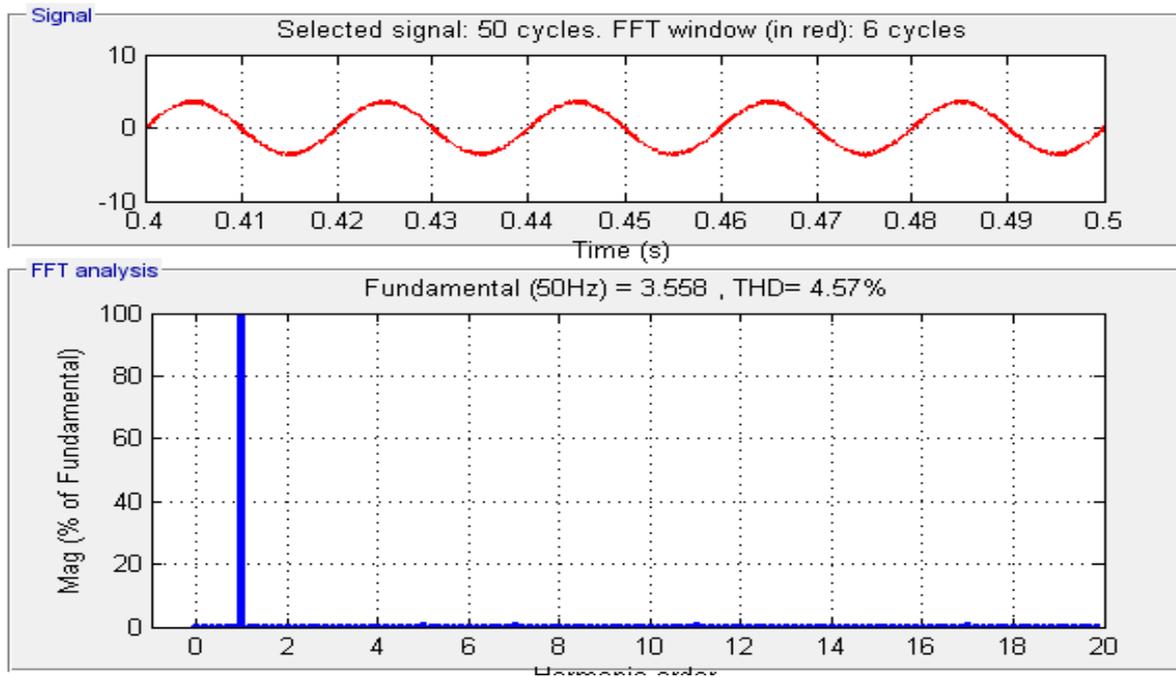


Figure III.5 : FFT du courant de réseau *i_a*.

III.3.2. Résultats de simulation du DPC (douze secteurs) :

On utilisant les mêmes paramètres que ceux utilisés précédemment pour la simulation de la commande DPC de six secteurs.

a) :

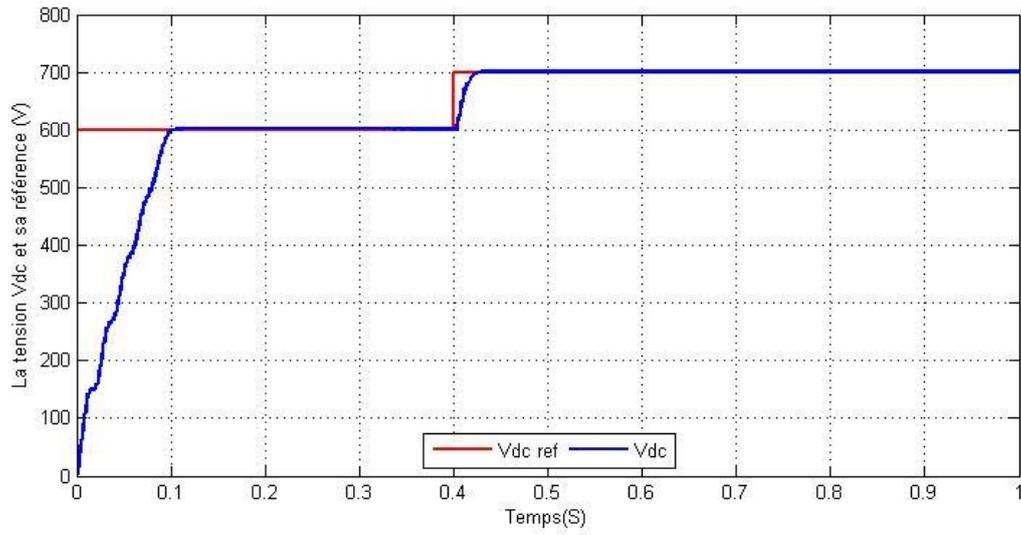


Figure (III-6. a) : l'allure de tension V_{dc} et sa référence.

b) :

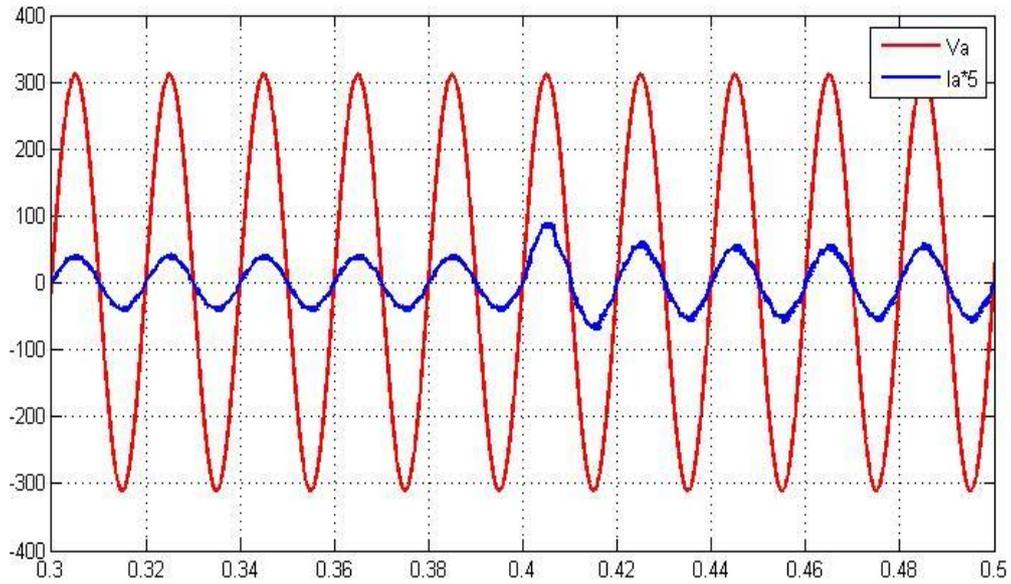


Figure (III-6.b) : l'allure de tension V_a et le courant de réseaux I_a .

c) :

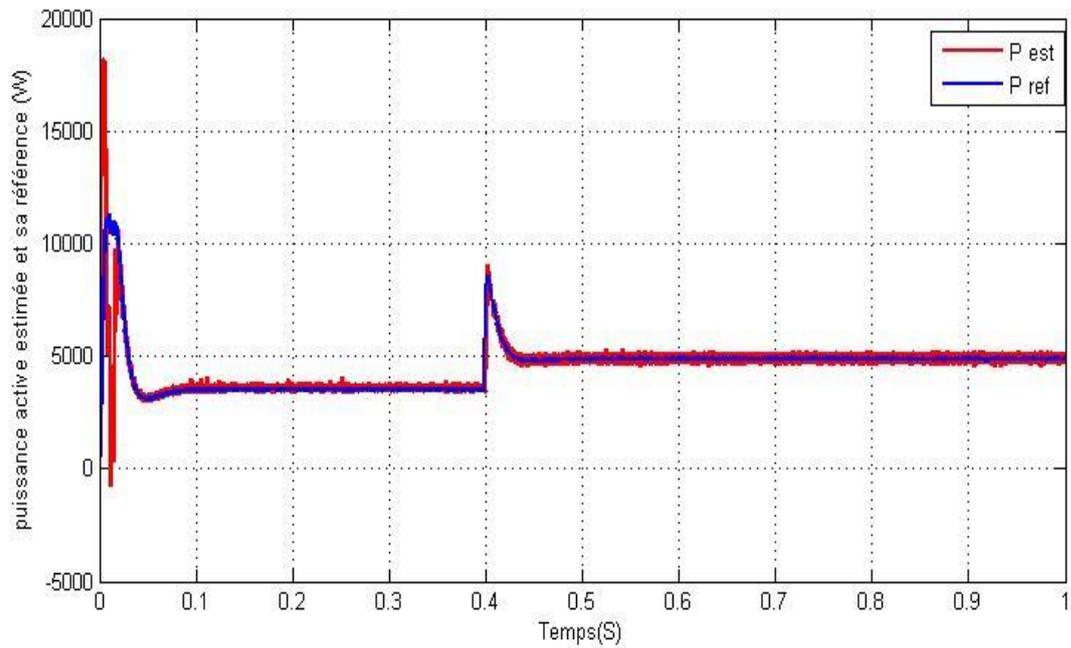


Figure (III-6.c) : l'allure de puissance active estimée et sa référence

d) :

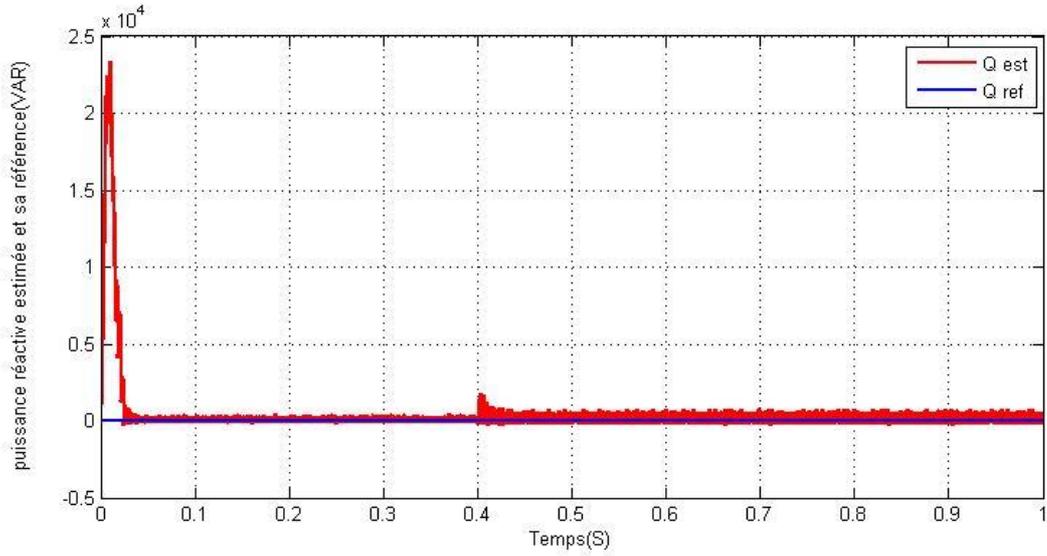


Figure (III-6. d) : l'allure de puissance réactive estimée et sa référence.

e) :

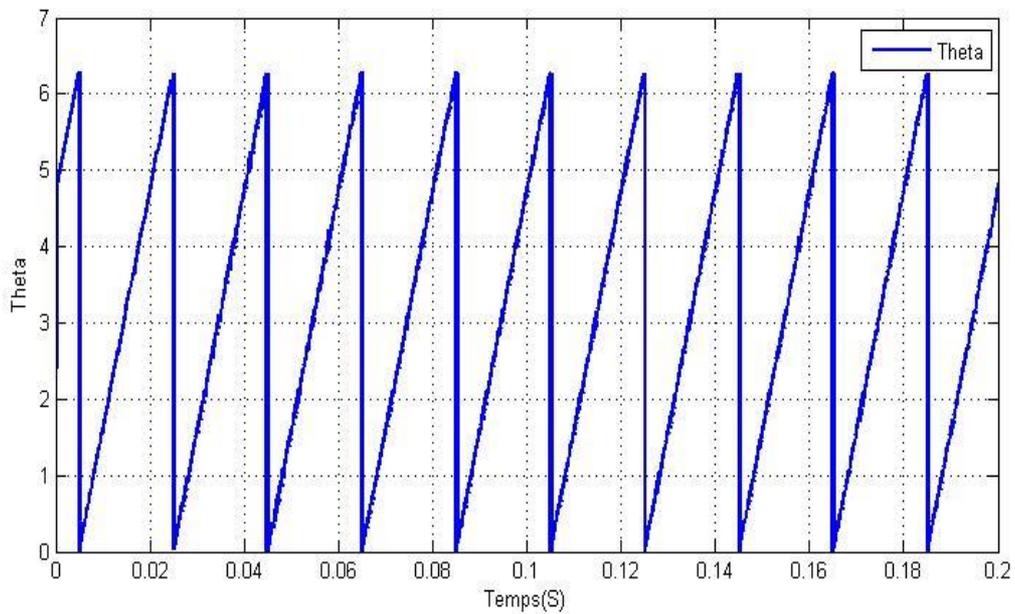


Figure (III-6. e) : l'allure de la position Theta

f) :

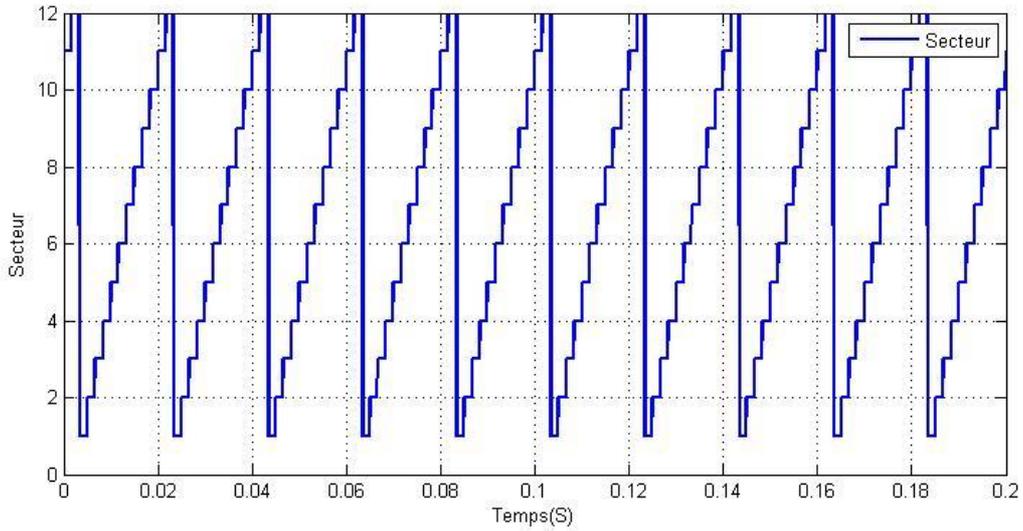


Figure (III-6. f) : l'allure de secteur

Figure III.6 : Performances du redresseur commandé par DPC (douze secteurs).

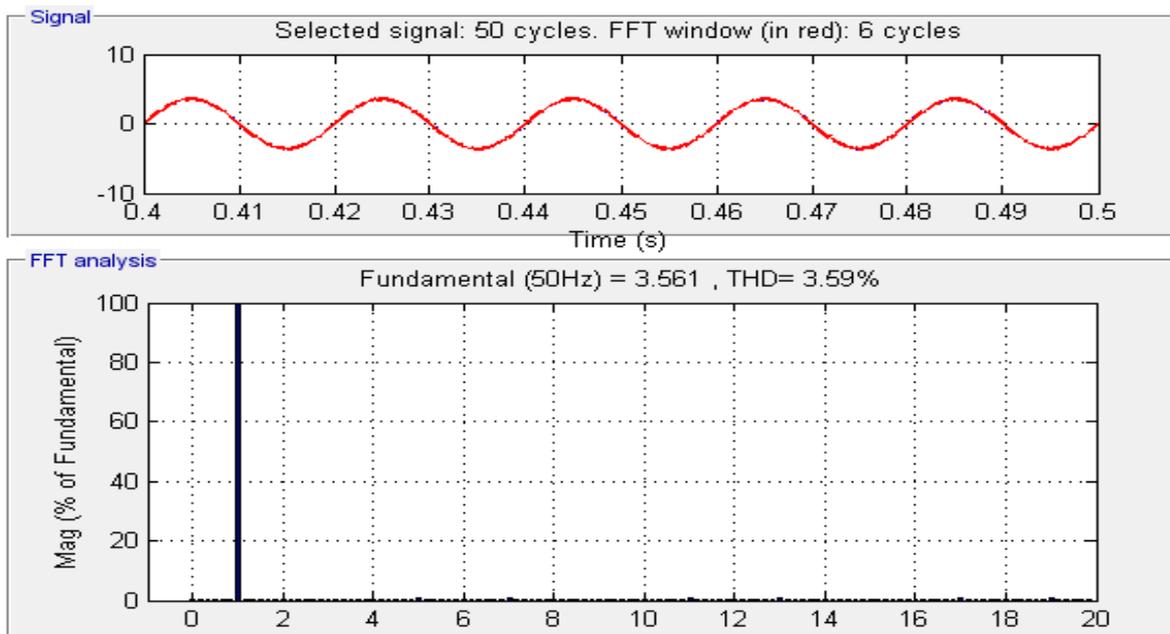


Figure III.7 : FFT du courant de réseau i_a .

III.3.3. Interprétations des résultats (pour six et douze secteur) :

Nous remarquons sur les figures (III-4.a) et (III-6.a) que la tension de bus continu V_{dc} est caractérisé par :

- ✓ Dépassement de la valeur de référence imposée par la commande (600V) par desfaibles ondulations.
- ✓ Stabilisation sur cette valeur de référence.

On peut éliminer cesfaibles ondulations indésirablespar l'utilisation dutableau de douze secteurs.

Le courant de phaseIa présenté dans les figures (III.4-b) (III.6-b) est caractérisé par :

- ✓ Il est plus proche à la formesinusoidale.
- ✓ Il est en phase avec la tension du réseau Va.

Les figures (III.5) et (III.7) représentent l'analyse spectrale du courant de ligne, quidonne un bon THD du courant (4.57% pour six secteurs) et (3.59% pour douze secteurs), ces valeurs sont acceptables.

Les figures (III.4-d et III.5-d) représentent la puissance réactive qui stabilise sur une valeur nulle pourassurer l'unicité du facteur de puissance.

III.4. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté le principe du contrôle direct de puissance, ce dernier représente une solution très intéressante au traitement du problème des harmoniques à la source.

Cette méthode de contrôle est basée sur l'estimation des puissances active et réactive instantanées à chaque état de commutation du convertisseur, tel que la connaissance de la position de la tension de ligne ne nécessite aucun capteur de tension AC.

A cet effet, nous avons obtenu une réponse transitoire rapide et haut comportement statique par les résultats de simulation des deux méthodes de commande. L'amélioration

importante dans la forme des courants et la qualité de la tension continue est très claire lorsque le facteur de puissance est unitaire.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Nous nous sommes intéressés dans ce travail, par des nouvelles solutions modernes, basé sur l'électronique de puissance, de contrôle d'un convertisseur AC/DC de tension.

Nous avons élaboré l'étude d'une stratégie de commande du redresseur à MLI associé à un réseau électrique équilibré contrôlé par la commande directe des puissances instantanées absorbées (DPC), cette dernière est basée sur la régulation de la tension du bus continu afin d'obtenir un facteur de puissance unitaire en imposant la puissance réactive à une valeur nulle.

Dans le premier chapitre, nous avons effectué une étude bibliographique concernant la qualité d'énergie électrique et les perturbations harmoniques dans les réseaux. Ensuite, nous avons expliqué les différentes solutions traditionnelles et modernes de la réduction de ces harmoniques.

Une de ces solutions, est le redresseur à MLI qui traite lui-même la consommation de l'énergie réactive, de plus il possède des avantages suivants : un bas THD et la régulation la tension continue.

Le second chapitre est commencé par des généralités et des classifications des convertisseurs statiques, ainsi que la structure du redresseur triphasé à MLI. Après la présentation des techniques de commande de ce dernier, nous avons le modélisé dans les différents repères (a, b, c) , (d, q) , (α, β) .

La dernier chapitre de ce travail, a été consacré à l'étude de commande directe de puissance (DPC) qui est contrôlé directement les puissances active et réactive instantanées. Cette technique de contrôle des convertisseurs AC/DC sans capteur repose sur l'estimation de la tension de ligne, contrairement aux méthodes traditionnelles qui a besoin une boucle de régulation de courant.

Le DPC permet de contrôler l'échange d'énergie entre le redresseur et le réseau électrique avec un facteur de puissance unitaire. Après une modélisation de l'ensemble du système (puissance, commande), nous avons fait une simulation avec le logiciel MATLAB (SIMULINK).

A cet effet, nous avons obtenu une réponse transitoire rapide et haut comportement statique par les résultats de simulation des deux méthodes de commande. Ces dernières montrent le fonctionnement à facteur de puissance unitaire avec l'amélioration importante dans la forme des courants et la qualité de la tension continue.

L'analyse spectrale du courant de ligne montre que tous les harmoniques de rang faibles sont bien atténués ce qui donne un bon THD.

En perspectives, nous proposons d'améliorer notre algorithme DPC pour plus d'efficacité par l'utilisation du DPC basé sur le flux virtuel. Ce dernier pourrait réduire le problème des bruits engendrés par les dérivées des courants de ligne nécessaires au calcul des puissances. Aussi, on peut proposer l'implémentation pratique de cet algorithme de commande.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] **D.Ould Abdeslam**“ Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension ”, thèse de doctorat, Université de Haute Alsace U.F.R. des Sciences et Techniques, 2005.
- [2] **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.
- [3] **M. Wang** “ Classification of power quality events using optimal time frequency representations, part1 : theory ”, Power Delivery, IEEE Transactions, pp.1488-1495, Vol.19, N.3, July 2004.
- [4] **N. H. Mendalek**“Qualité de l'onde électrique et moyens de mitigation”, Thèse de Doctorat, Ecole de technologie supérieure, Université du Québec, 2003.
- [5] **I. Etxeberria-Otadui**“Sur les systèmes de l'électronique de puissance dédiés à la distribution électrique-application à la qualité de l'énergie ”, Thèse de Doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble, 2003.
- [7] **S.Chellah**“analyse stochastique de la résultante d'injection de courants harmoniques dans un réseau électrique ”, thèse magistère université mouloudMammeride Tizi-Ouzou, département d'électrotechnique, 17/05/2012.
- [8] **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.
- [9] **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.
- [10] **A. Bouafia**“technique de commande prédictive et floue pour les systèmes d'électronique de puissance : application au redresseur à MLI”, thèse de doctorat en électrotechnique de l'université de Ferhat Abbas-Sétif, 06/10/2010.

- [11] **G. Séguier**“Electronique de puissance : Les fonctions de base et leurs principales Applications ”, 7eme édition Dunod 1999.
- [12] **P.Ladoux, G.Ollé**“Compensation d’harmonique et de puissance réactive ”, publication Reselec 2002.
- [13] **A.Brahimi et H.Gusouli**“Etude et réalisation d’une carte de commande à basse d’un microcontrôleur PIC 16f877 pour ponts redresseurs triphasés à thyristors”, Mémoire de Master, Université Abou-BekrBelkaid, Tlemcen, 2014.
- [14] **S. NOUI**“Etude et Réalisation d’un Redresseur à MLI Commandé par DSP. Application à l’alimentation d’un Onduleur Á Trois Niveaux ”, Mémoire de magister, Ecole Militaire polytechnique (EMP), Alger, 2004.
- [15] **B. KORICH**“Commande D’un Convertisseur AC/DC Triphasé à quatre bras En Régime Déséquilibré ”, Mémoire de magister, Ecole Militaire Poly technique (EMP), Alger, 2009.
- [16] **Z. Boudries**“Etude d’une Génératrice Asynchrone Commandée” thèse doctorat, université A. mira Bejaia. 2013.
- [17] **S. LECHAT SANJUAN**“Voltage Oriented Control of Three-Phase Boost PWM Converters”, thèse master en science département de l’énergie et l’onvernement, université de chalmers de technologie, Göteborg, suède ,2010.
- [18] **A. BOULAHIA**“Etude des Convertisseurs Statiques destinés à la Qualité de l’Energie Electrique”, Mémoire de Magister en électrotechnique Université.de Constantine Avril 2009
- [19] **M. Cichwlas, M. p & Kazmierkowski**warsaw“ comparison of current control technics for PWM rectifier”, warsawuniversity of technology, Institute of control industrial electronics, 00-662 Warszawa, Ul, Koszykow 75, Poland.
- [20] **M. Sc. Mariusz Malinowski** “Sensorless Control Stratégies for Three – Phase PWM d’électronique industrielle”, Varsovie, Pologne-2001.
- [21] **F. KENDOULI**“Centrale Eolienne et Qualité De L’énergie Électrique”, Thèse de Doctorat En Sciences En Electrotechnique, Université Mentouri de Constantine, 2012.
- [22] **A.BOUAFIA, F. KRIM , J. GAUBERT** “ Predictive direct power control of three-phase pulse width modulation (PWM) rectifier using space-vector modulation (SVM) ”, IEEE Trans. Power Electron., vol. 25, no. 1, pp. 1945–1955, JANUARY. 2010.
- [23] **M. MALINOWSKI, M.P. KAZMIERKOWSKI, A. TRZYNADLOWSK** “Review and comparative study of control techniques for three-phase PWM rectifiers ”, Science

- Direct, M. Malinowski et al. / Mathematics and Computers in Simulation 63 (2003) 349–360, 2003.
- [24] **S. BOUCHAKOUR**, “Commande Directe de Puissance d’un Convertisseur AC/DC Triphasé Sans Capteurs de Tension”, in école militaire e poly technique Jun. 2005.
- [25] **M.TEDJANI** “Gestion des flux énergétiques dans un système de conversion éolienne”, Mémoire de magister, Université. D’Annaba 2011.
- [26] **J.A.Restrepo, J.M. Aller, A.Bueno, J.C.Viola, A.Berzoy**, “ Direct Power Control of a Dual Converter Operating as Synchronous Rectifier”, IEEE TRANS ON POWER ELECTRONICS, 2010.
- [27] **B. MANSOUR, S.BARKAT**, “Commande par Orientation de la Tension d’un Redresseur PWM Utilisant la Commande Non Linéaire Adaptative”, le premier séminaire national sur le génie électrique appliqué aux énergies renouvelables, Chlef, 2010.