

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA

RECHERCHE SCIENTIFIQUE

CENTRE UNIVERSITAIRE D'EL-OUED

INSTITUT DES

SCIENCES ET TECHNOLOGIE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU

DIPLOME

D'INGENIEUR D'ETAT EN ELECTROTECHNIQUE

OPTION : RESEAUX ELECTRIQUES

THEME:

**COMMANDE DIRECTE DE PUISSANCE
D'UN REDRESSEUR A MLI SANS
CAPTEURS DE TENSION**

Proposé et dirigé par:

➤ Mr.MESBAHI Nadhir

Présenté par :

➤ KHEDIR Ahmed

➤ BEN SLIMANE Djaafar

PROMOTION: 2011



Chapitre I.

**PERTURBATIONS ELECTRIQUES ET
REDRESSEUR A MLI**



Chapitre II.

COMMANDE DIRECTE DE PUISSANCE



Chapitre III.

**MODELISATION ET SIMULATION DE LA
DPC**

Tables des Notation



BIBLIOGRAPHIE



SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

REMERCIEMENT

Nos remerciements vont tout premièrement à Dieu tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a donnée durant toutes ces longues années.

Nous exprimons nos profondes gratitudes à nos parents pour leurs encouragements, leur soutien et pour les sacrifices qu'ils ont enduré. Nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur Monsieur

***MESBAHI Nadhir** pour avoir d'abord proposé ce thème, pour suivi continuuel tout le long de la réalisation de ce mémoire et qui n'a pas cessée de nous donner ses conseils et remarques.*

Nous remercions les membres de jury d'examen pour l'honneur qu'ils nous font en participant au jugement de ce travail.

Nous tenons à remercier vivement toutes personnes qui nous ont aidé à élaborer et réaliser ce mémoire, ainsi à tous ceux qui nous aidés de près ou de loin à accomplir ce travail.

Un gros merci à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation sans exception.

DJAAFAR LAHMED

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	01
-----------------------------------	-----------

CHAPITRE .I.

PERTURBATIONS ELECTRIQUES ET MODELISATION DU REDRESSEUR A MLI

I.1 Introduction.....	03
I.2 Qualité de l'énergie électrique	03
I.3 Perturbations harmoniques	04
I.3.1 Origine des harmoniques.....	05
I.3.1.1 Sources harmoniques identifiables	06
I.3.1.2 Sources harmoniques non identifiables	06
I.3.2 Caractéristiques des perturbations électriques.....	06
I.4. Conséquences des harmoniques.....	07
I.4.1 Echauffement.....	07
I.4.2 L'interférence avec les réseaux de télécommunication.....	08
I.4.3 Les défauts de fonctionnements de certains équipements électriques.....	08
I.4.4 Le risque d'excitation de résonance	08
I.5 Normes et réglementations.....	10
I.6 Solutions de dépollution des réseaux électriques	12
I.6.1 Solutions traditionnelles.....	12
I.6.2 Solutions modernes	13
I.6.2.1 Filtre actif série (FAS)	13

I.6.2.2 Filtre actif parallèle (FAP).....	14
I.6.2.3 Combinaison parallèle-série de filtres actifs	14
I.6.2.4. Filtre hybride	15
I.7. Redresseurs à MLI	15
I.7.1. Redresseur à MLI triphasé de courant.....	16
I.7.2. Redresseur à MLI triphasé de tension.....	16
I.8. CONCLUSION	20

CHAPITRE .II.

COMMANDE DIRECTE DE PUISSANCE

II.1 Introduction.....	21
II.2 Redresseur à MLI	23
II.3 Principe de fonctionnement	23
II.3.1 Estimation de la puissance instantanée	25
II.3.2 Estimation de la tension	27
II.3.3 Choix de secteur.....	28
II.3.4 Table de commutation.....	39
II.3.5 Régulateur à hystérésis	32
II.6 Caractéristiques générales de la table de commutation et régulateurs à hystérésis...	33
II.7 Conclusion.....	33

CHAPITRE .III.

MODELISATION ET SIMULATION DE LA DPC

III.1 Introduction.....	34
III.2 Description et Modélisation Du Système Simule.....	34
III.2.1 Partie Puissance	34
III.2.1.1 Source d'alimentation.....	35
III.2.1.2 Redresseur à MLI.....	36
III.2.1.3 Charge.....	37
III.2.2 Partie Commande	39
III.2.2.1 Régulation de tension continue U_{dc}	39
III.2.2.2 Estimation de la puissance instantanée.....	40
III.2.2.3 Estimation de la tension de ligne.....	40
III.2.2.4 Détermination du secteur.....	41
III.2.2.5 Régulateur des puissances.....	41
III.3 Résultats de Simulation	42
III.4. Interprétation des résultats.....	45
III.5 Conclusion.....	46
CONCLUSION GENERALE.....	47

LISTE DES FIGURES

CHAP. I. PERTURBATIONS ELECTRIQUES ET REDRESSEUR A MLI

Fig. I.1. Synthèse d'une tension distordue à partir des harmoniques.

Fig. I.2 : Diagramme de Fresnel des puissances.

Fig. I.3. Filtre actif série.

Fig. I.4. Filtre actif parallèle.

Fig. I.5. Combinaison parallèle-série de filtres actifs.

Fig. I.6 : Redresseur à MLI.

Fig. I.7. Redresseur à MLI triphasé de courant.

Fig. I.8. Redresseur à MLI triphasé de tension.

Fig. I.7. Représentation d'un Redresseur à MLI triphasé.

CHAP. II.COMMANDE DIRECTE DE PUISSANCE

Fig. II.1: Relation entre le contrôle des redresseurs à MLI et les onduleurs à MLI alimentant un moteur à induction.

Fig. II.2 : Classification des méthodes de contrôle d'un redresseur à MLI.

Fig. II.3 : Configuration générale de la commande directe de puissance Sans capteur de tension.

Fig. II.4 : Représentation vectorielle des vecteurs v_a, v_b, v_c et v'_a, v'_b, v'_c .

Fig. II.5 : Le plan vectoriel divisé a) en six secteurs b) en douze secteurs.

Fig. II.6 : Variation des puissances instantanées.

Fig. II.7 : Le flux de puissance dans un redresseur MLI bidirectionnel dépend de la direction de i_L .

Fig. II.8 : Position instantanée des vecteurs.

Fig. II.9 : limitation du fonctionnement du redresseur à MLI.

Fig. II.10 : Variation du vecteur tension de convertisseur.

CHAP. III. MODELISATION ET SIMULATION DE LA DPC

Fig. III.1 : Schéma du circuit de puissance.

Fig. III.2 : Schéma de la source d'alimentation.

Fig. III.3 : Représentation des interrupteurs du convertisseur AC/DC triphasé.

Fig. III.4 : Schéma du bloc de la charge.

Fig. III.5 : Modèle de simulation du redresseur à MLI dans les coordonnées triphasées.

Fig. III.6 : Structure complète de la commande 'DPC' pour un facteur de puissance unitaire

Fig. III.7 : schéma bloc de régulation de la tension continue.

Fig. III.8 : schéma bloc d'estimation de la puissance instantanée.

Fig. III.9 : schéma bloc d'estimation de la tension de ligne.

Fig. III.10 : schéma bloc de détermination du secteur.

Fig. III.11 : Schéma bloc de régulation des puissances active et réactive

Fig. III.12 : Résultats en régime permanent de la DPC,

(a)- courant et tension de ligne, (b)- les trois courants de ligne,

(c)-tension continue, (d)-tension estimée

Fig.III.13 : Les allures des puissances active et réactive.

Fig.III.14 : spectre d'harmonique.

Fig.III.15 : Résultats en régime permanent de la DPC,

(a)- courant et tension de ligne, (b)- les trois courants de ligne,

(c)-tension continue,(d)-tension estimée

Fig.III.16 : Les allures des puissances active et réactive.

TABLE DES NOTATIONS ET SYMBOLES

f	: Fréquence du fondamental.
f_c	: Fréquence d'échantillonnage.
ω	: Fréquence angulaire.
R	: Résistance de la ligne.
L	: Inductance de la ligne.
C	: Capacité du filtre.
i_a, i_b, i_c	: Les courants de lignes.
$\bar{i}_L$	: Vecteur courant de ligne.
i_α	: Composante du vecteur courant de ligne dans les coordonnées stationnaires (α β).
i_β	: Composante du vecteur courant de ligne dans les coordonnées stationnaires (α β).
i_d	: Composante du vecteur courant de ligne dans les coordonnées tournantes (d_q)
i_q	: Composante du vecteur courant de ligne dans les coordonnées tournantes (d_q)
v_a, v_b, v_c	: Les tensions de ligne.
$\bar{v}_L$	: Vecteur tension de ligne.
$v_{L\alpha}$	: Composante du vecteur tension de ligne dans les coordonnées stationnaires (α β).
$v_{L\beta}$	: Composante du vecteur tension de ligne dans les coordonnées stationnaires (α β).
v_{Ld}	: Composante du vecteur tension de ligne dans les coordonnées tournantes (d_q)
v_{Lq}	: Composante du vecteur tension de ligne dans les coordonnées tournantes (d_q)
$\bar{U}_s$	: Vecteur tension convertisseur.
$u_{c\alpha}$	: Composante du vecteur tension convertisseur dans les coordonnées stationnaires (α β).
$u_{c\beta}$	: Composante du vecteur tension convertisseur dans les coordonnées stationnaires (α β).
u_{cd}	: Composante du vecteur tension convertisseur dans les coordonnées tournantes (d_q)
u_{cq}	: Composante du vecteur tension convertisseur dans les coordonnées tournantes (d_q)
P	: Puissance active.

D	: Puissance déformante.
Q, q	: Puissance réactive.
S	: Puissance apparente.
$\hat{P}$	: Puissance active instantanée.
$\hat{q}$	: Puissance réactive instantanée.
p_{ref}	: La puissance active de référence.
q_{ref}	: La puissance réactive de référence.
S_p, S_q	: L'erreur numérique des puissances.
U_{dc}	: Tension continue.
i_{ref}	: Courant redressé.
i_{ch}	: Courant de charge.
S_a, S_b, S_c	: Etats de commutation du convertisseur.
MLI	: Modulation de Largeurs d'Impulsions.
THD	: Taux de Distorsion Harmonique.
FP	: Facteur de Puissance.
FPU	: Facteur de Puissance Unitaire
FA	: Filtre Actif.
DPC	: Commande Directe de Puissance.
VF_DPC	: Commande Directe de Puissance basée sur le Flux Virtuel.
DTC	: Commande Directe du Couple.
FOC	: Commande par Orientation du Flux.
VOC	: Commande par Orientation de la Tension.

INTRODUCTION GENERALE

Après sa production, l'énergie électrique doit être entretenue et suivie en raison des altérations subies pendant le transport. Les origines des perturbations les plus significatives dans les réseaux électriques sont moins au niveau de la production que du côté des consommateurs. Elles sont causées par la prolifération des charges non linéaires, telles que les redresseurs, les gradateurs, le matériel informatique, les appareils de climatisation ou encore les éclairages à base de tubes fluorescents. Ces appareils absorbent des courants non sinusoïdaux et introduisent de ce fait des pollutions harmoniques sur les courants et les tensions des réseaux de distribution électrique.

Les harmoniques engendrés par ces charges circulent dans les réseaux électriques et peuvent perturber le fonctionnement normal de certains équipements électriques voire même engendrer leur destruction. Ces effets néfastes peuvent apparaître instantanément ou se produire en différé tant pour le distributeur que pour les utilisateurs. C'est pour ces raisons que le filtrage des distorsions en courant et en tension est au centre des préoccupations actuelles à la fois des fournisseurs et des utilisateurs d'énergie électrique; ils adoptent donc, les uns comme les autres, les limites proposées par les normes IEEE 519-1992, CEI 61000.3-2/4 [1].

Pour faire face à tous ces problèmes, 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) [2].

Une autre technique intéressante de réduction des courant harmoniques est l'utilisation du redresseur à MLI. Les redresseurs à MLI sont des onduleurs utilisés "à l'envers" qui permettent de produire une tension continue à partir d'un réseau alternatif (comme un redresseur à diodes muni d'un filtre) mais en absorbant sur le dit réseau des courants sinusoïdaux et à facteur de puissance unitaire. Deux types de redresseurs existent : à structure courant et à structure tension [3].

Plusieurs stratégies de contrôle du redresseur, parmi ces elles, la commande directe de puissance DPC : elle consiste à sélectionner un vecteur de commande à partir d'une table de commutation. Cette dernière est basée aussi bien sur la régulation de la puissance active et réactive que sur la position angulaire de la tension de ligne estimée. Ceci permet de réduire le nombre de capteurs et aussi d'éliminer des blocs de modulation et des boucles de régulation

internes (de courant) tout en garantissant un contrôle découplé des puissances et de bonnes performances dynamiques [3].

Dans le but d'approfondir chacun des points mentionnés ci-dessus, cette mémoire est organisée en trois chapitres. Dans les paragraphes suivants, on explique brièvement le contenu de chacun.

Le premier chapitre débute avec les notions sur la qualité de l'énergie électrique et les différentes perturbations pouvant l'affecter. La problématique des harmoniques, leur origine, leur caractérisation et leurs conséquences néfastes sur le réseau, est ensuite présentée. Nous évoquons également dans cette partie quelques des normes et des réglementations en vigueur pour limiter les dysfonctionnements occasionnés par les harmoniques. On présentera également des solutions de réduction d'harmoniques les plus répandues.

La stratégie de contrôle du redresseur à MLI sera l'objet du deuxième chapitre. On décrira le principe du contrôle direct des puissances instantanées, la technique d'estimation de la tension de ligne et l'élaboration de la table de commutation.

Le dernier chapitre sera notamment consacré à la modélisation et à l'interprétation des résultats de simulation de l'ensemble du système (Réseau/Convertisseur/Charge).

Nous terminons par une conclusion sur l'ensemble de cette étude et nous proposons des perspectives à ce travail.

I.1.Introduction

Les réseaux de distribution modernes doivent faire face aux nouveaux défis et aux nouvelles opportunités d'un système électrique en pleine évolution technologique, du point de vue technique, le principal changement pour le réseau concerne la nature des charges connectées ; d'une part les charges passives classiques ont subi une évolution très importante et d'autre part de nouvelles charges actives ont été connectées au réseau.

Plusieurs types de ces nouvelles charges engendrent des perturbations importantes dans le réseau électrique ; ces perturbations peuvent être classées sur deux catégories, qui sont:

- Des perturbations causées par les courants perturbateurs, tel que les courants harmoniques, les courants déséquilibrés et les courants réactifs.
- Des perturbations causées par les tensions perturbatrices, telle que les tensions harmoniques et les tensions déséquilibrées.

Dans ce chapitre, nous allons présenter la qualité d'énergie et l'origine des harmoniques dans le réseau électrique, ainsi, l'étude des caractéristiques des harmoniques et les conséquences de la distorsion harmonique, et enfin les normes. Ensuite, nous présenterons quelques notes sur les solutions utilisées pour réduire les perturbations.

On termine ce chapitre en présentant de façon générale le redresseur à MLI.

I.2.Qualité de l'énergie électrique

La qualité de l'énergie est une notion assez large qui recouvre à la fois la qualité de la fourniture électrique, la qualité de l'onde de tension et la qualité des courants . Lorsque la tension est présente, les principaux phénomènes pouvant l'affecter sont d'une part les variations lentes : creux de tension, surtension, coupures, déséquilibres et d'autre part des variations rapides : surtensions 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[4,5].

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

nombre de critères ou de nombre à caractère quantitatif et absolu. L'énergie électrique est délivrée sous forme d'un système triphasé de tensions sinusoïdales.

Tout phénomène physique affectant une ou plusieurs de ces caractéristiques peut être considéré comme perturbation. En pratique, ces perturbations sont classées selon la durée du phénomène. Ainsi, il est possible de distinguer :

- les altérations de l'onde de tension (harmoniques, déséquilibres, flicker). Ces phénomènes sont permanents ou durent au minimum plusieurs minutes,
- les creux de tension et coupures brèves d'une durée de l'onde d'une à quelques secondes,
- les surtensions transitoires, de durée inférieure à période[6].

Dans ce qui suit nous restreindrons à la présentation des perturbations provoquées par les harmoniques ainsi que leurs conséquences néfastes sur le réseau électrique.

I.3.Perturbations 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 entraîne un mauvais fonctionnement des dispositifs raccordés au réseau. L'intérêt d'éliminer ou de minimiser ces harmoniques[3].

Un récepteur d'énergie est 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 générateur, des transformateurs et des lignes électriques[5].

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 [4,6].

I.3.1.Origine des harmoniques

Les harmoniques sont des perturbations permanentes affectant la forme d'onde de la tension du réseau. Ces perturbations résultent de la superposition, sur l'onde fondamentale. D'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples de celle du fondamentale[6]. En générale, les harmoniques pairs sont négligeables et seuls les harmoniques impairs existent [4].

Nous pouvons également observer des sous-harmoniques ou des inter-harmoniques à des fréquences non multiples de la fréquence fondamentale. La figure I-1 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.

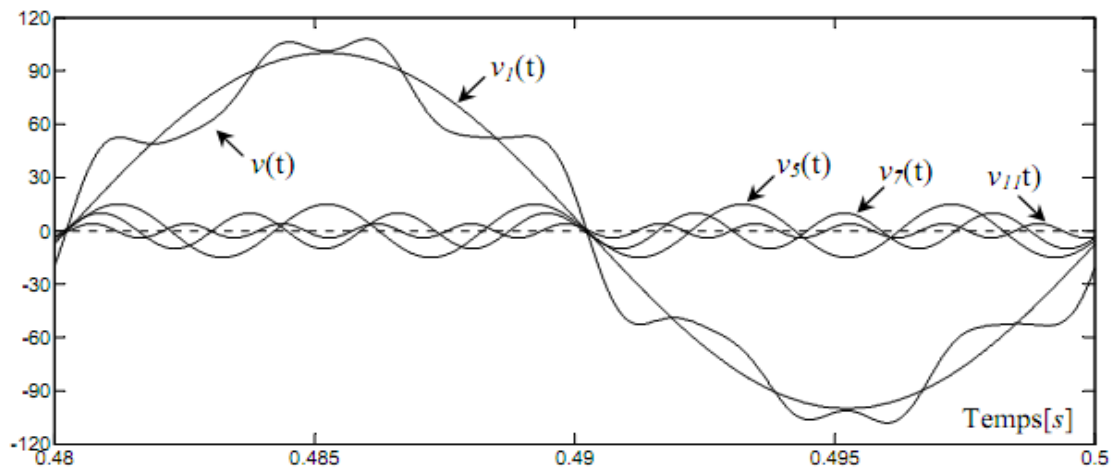


Fig. I.1. *Synthèse d'une tension distordue à partie des harmoniques.*

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. Il s'agit alors de sources génératrices de courants harmoniques qui peuvent être classées en deux type :

I.3.1.1 Sources harmoniques identifiables

Les équipements dotés de dispositifs à base d'électronique de puissance, notamment les redresseurs et les cycloconvertisseurs de puissances importantes, installés sur les réseaux haute et moyenne tension sont d'énergie est capable d'identifier le point d'injection des

harmoniques et de quantifier la perturbation provoquée, Dans ce cas, c'est l'utilisateur qui doit se procurer les moyens nécessaires afin de réduire cette perturbation au dessous du seuil exigé par le distributeur de l'énergie sous peine pénalisé [6].

I.3.1.2 Sources harmoniques non identifiabiles

Ce type de générateur de courants harmoniques est principalement représenté par les appareils utilisés dans les domaines électrodomestiques ou tertiaires tels que les micro-ordinateurs. Vue leur très large diffusion, Ces équipements comportant souvent un redresseur monophasé à diodes avec un condensateur de lissage, prélèvent des courants harmoniques non négligeables, Dans ce cas, il est de la responsabilité du distributeur de l'énergie électrique d'empêcher la propagation de la perturbation harmonique sur le réseau puisque individuellement chaque utilisateur génère un faible taux d'harmonique [6,5].

I.3.2 Caractéristiques des perturbations électriques

Les tensions d'un réseau électrique constituent un système alternatif triphasé , dont la fréquence de base est de 50 Hz ou 60Hz .les paramètres Caractéristiques d'un tel système sont les suivant :

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

La qualité de la tension peut être affectée. Soit du fait de certains incidents inhérents à la nature physique et 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 donc quatre possibilités distinctes de perturbations :

- les fluctuations de la fréquence à 50Hz.
- les variations de l'amplitude.
- la modification de la forme d'onde de la tension.
- le déséquilibre du système triphasé.

Afin de bien spécifier les pollutions des réseaux électriques en basse tension, on va distinguer deux types de perturbations, à savoir les perturbations de courant et celles de tension [7].

Les courantes perturbations comme les courants harmoniques, les courants déséquilibrés et la puissance réactive sont majoritairement émis par des charges non linéaires, à base d'électronique de puissance, et déséquilibrées. La puissance réactive peut être aussi consommée par des charges linéaires inductives comme les moteurs asynchrones qui sont largement présent dans les sites industriels .

Les perturbations de tension comme les creux, les déséquilibres et les harmoniques de tension trouvent généralement leurs origines dans le réseau électrique lui-même mais parfois également dans les charges .

Ces types de perturbation ont des effets très néfastes sur les équipements électriques, ces effets peuvent aller à des échauffements ou l'arrêt des machines tournantes, et même la destruction totale de ces équipements.

Dans ce qui suit, notre étude sera limitée aux perturbations de courant plus précisément les harmoniques de courant engendrées par les redresseurs[5].

I.4.Conséquences 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 de fonctionnement de certains équipements électriques et le risque d'excitation de résonance :

1. **L'échauffement :** Les pertes totales par '*effet Joule*' sont la somme de celles du fondamental et des harmoniques :

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

Avec I le courant totale. I_h le courant harmonique de rang h qui représente le fondamentale pour $h=1$, et R la résistance traversée par le courant I .

Les harmoniques augmentent aussi les *pertes fer* (pertes par courants de Foucault). Ils prennent de l'importance dans les matériels utilisant les circuits magnétiques (moteurs, transformateur.....).

Le vieillissement des isolant est souvent du à une contrainte en tension consécutive à la présence de la tension harmonique, et donc à une augmentation locale du courant de fuit, ou encore à l'échauffement exagéré dans les conducteurs.

2. ***L'interférence avec les réseaux de télécommunication :*** Le couplage électromagnétique entre les réseaux électriques et de télécommunication peut induit dans ces derniers des bruits importants. Dans le cas de résonances, une partie des réseaux de télécommunication peut être rendue inutilisable[8].
3. ***Les défauts de fonctionnements de certains équipements électriques :*** En présence des harmoniques, la tension (ou le courant) peut changer plusieurs fois de signe dans une demi-période, par conséquent, tout appareil dont le fonctionnement est basé sur le passage par zéro des grandeurs électriques (appareils utilisant la tension comme référence) peut être perturbé.
4. ***Le risque d'excitation de résonance :*** Les fréquences de résonance des circuits par formés par des inductances du transformateur et des câbles sont normalement élevées. Ce n'est pas le cas 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 le convertisseur statique. Dans ce cas, il y aura des phénomènes d'amplification d'harmoniques. Différentes grandeurs sont définies pour chiffrer ces perturbations. Parmi celles ci les plus utilisées sont :

-le taux harmonique de rang h :

$$I_h = \frac{C_h}{C_1} \quad (I.2)$$

Ou C_h représente la composante harmonique de rang h , C_1 représente la composante fondamentale,

- le taux global de distorsion harmonique :

$$\text{THD} = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \frac{C_h^2}{C_1^2}} \quad (\text{I. 3})$$

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 atténuée par l'effet de peau et par la présence des inductances de lignes. De plus, les appareils générant des harmoniques ont, en grande majorité, un spectre d'émission inférieur à 2500Hz, c'est-à-dire des range 2 à 50[8].

-le 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 ou il y a des harmoniques, une puissance supplémentaire appelée la puissance déformant (D), donnée par la relation (I-4), apparait comme le montre le diagramme de *Fresnel* de la Fig. I.2.

$$D = 3 \cdot V_1 \sqrt{\sum_{h=2}^{50} I_h^2} \quad (\text{I. 4})$$

Le facteur de puissance ($F.P.$) devient :

$$F.P. = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} = \cos \varphi_1 \cdot \cos \gamma \quad (\text{I. 5})$$

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

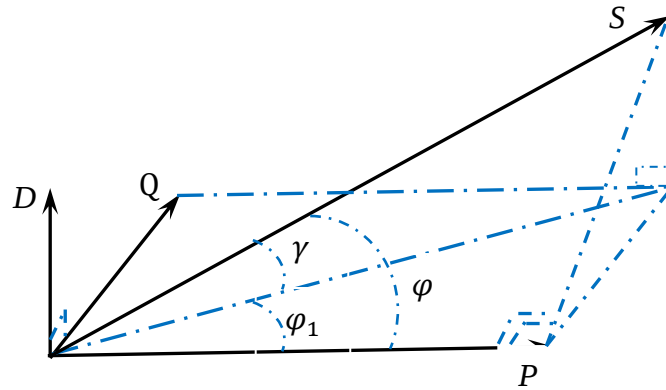


Fig. I.2. Diagramme de Fresnel des puissances.

I.5. Normes et réglementations

Afin de limiter d'influence d'une charge polluante sur les autres charges connectées au réseau et en même temps éviter la modification des caractéristiques de ce dernier, les distributeurs d'énergie électrique ont été amenés à émettre des recommandations. Ces recommandations concernent les exigences au point de raccordement de l'utilisateur sur le réseau électrique. Un exemple de ces recommandations (les plus anciennes) stipule que chaque utilisateur pris séparément, doit, à son point de raccordement, respecter les limites de perturbation en tension suivantes [6] :

- harmoniques pairs : $V_h/V_1 < 0,6\%$
- harmoniques impairs : $V_h/V_1 < 1\%$
- taux de distorsion harmonique en tension : $THD < 1.6\%$

Au-delà de ces valeurs, il est nécessaire d'installer des dispositifs de filtrage ou bien dans certains cas extrêmes augmenter la puissance de court-circuit du réseau. Ces limites sont destinées à minimiser le risque de voir le réseau d'alimentation général atteindre un taux de distorsion harmonique en tension supérieur à 5%.

D'autre part, pour assurer la compatibilité entre les installations sensibles alimentées par le réseau, il faut imposer des limites d'émission et donner des niveaux d'immunité suffisant. Les caractéristiques principales de la tension fournie par un réseau de distribution (MT ou BT). Définies par la norme Européenne **EN 50160**, précisent les tolérances qui doivent être garanties pour la tension et la fréquence ainsi que les niveaux des perturbations habituellement rencontrées. Le tableau I.1 suivant précise les valeurs adoptées.

Tableau I.1 : Limites de perturbations définies par EN 50160

Amplitude de la tension	- Pour chaque période d'une semaine 95% des valeurs efficaces moyennes sur 10 minutes doivent être dans la plage $V_n \pm 10\%$
Variations rapides de la tension	- De 5% à 10% de V_n (4 à 6% en moyenne tension)
Creux de tension	- Profondeur : entre 10% à 99% de V_n - Durée : entre 10 ms et 1 minute - Nombre : quelques dizaines à 1 millier par an
Coupures brèves	- Durée : jusqu'à 3 minutes - Nombre : quelques dizaines à plusieurs centaines par an
Coupures longues	- Durée : supérieure à 3 minutes - Nombre : entre 10 et 50 par an
Fréquence	- 50 Hz $\pm$ 1% pendant 95% d'une semaine - 50Hz + 4%, 6% pendant 100% d'une semaine.

Afin de concilier distributeurs et consommateurs, des normes ont été dictées. Le tableau. I.2 résume les principales normes concernant la qualité d'énergie et la tension dans les systèmes électriques.

Tableau I.2 : Classification des normes concernant la qualité d'énergie électrique.

Thèmes	Normes
Classification de la qualité d'énergie	CEI 61000-2-5 :1995 CEI 61000-2-1 :1990 IEEE 1159 :1995
Creux /Surtension/Interruption	CEI 61009-2-1 :1990 IEEE 1159 :1995
Harmoniques	CEI 61000-2-1 :1990 CEI 61000-2-2 CEI 61000-3-2 CEI 61000-4-7 :1991 IEEE 519 :1992
Flicker de tension	CEI 61000-4-15 :1997
Transitoires	CEI 61000-2-1 :1990 CEI 816 :1984 IEEE 1159 :1995 IEEE C62.41 :1991

Le tableau .I.3, repris de la norme CEI 61000-2-2, présente les caractéristiques et le niveau de compatibilité pour les harmoniques au point de raccordement du client pour un réseau satisfaisant la norme CEI 1000-2-4 [9].

Tableau I.3 : Niveau de compatibilité pour les tensions harmoniques sur les réseaux basse tension.

Rangs impairs non multiples de 3		Rangs impairs multiples de 3		Rangs pairs	
Rang	Tension harm. (%)	Rang	Tension harm. (%)	Rang	Tension harm. (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.3	6	0
13	3	21	0.2	8	.
17	2	>21	0.2	10	5
19	1.5			12	0
23	1.5			>12	.
25	1.5				5
>25	$0.2+1.3*25/h$				0

I.6. Solutions de dépollution des réseaux électriques

Deux types de solutions sont envisageables. La première consiste à utiliser des Convertisseurs statiques moins ou peu polluants, tandis que la seconde consiste en la mise en œuvre d'un filtrage des composantes harmoniques. La première classe de solutions s'intéresse à la conception tandis que la seconde consiste à compenser les courants ou les tensions harmoniques [9]. Deux groupes de solutions de dépollution pour compenser toutes les perturbations peuvent être distingués : les solutions traditionnelles et les solutions modernes.

I.6.1.Solutions traditionnelles

Il s'agit notamment de mettre en œuvre les moyens suivants :

- Statocompensateur : il s'agit d'une méthode de compensation utilisée pour relever le facteur de puissance ;
- Filtre passif : le plus ancien pour le traitement des harmoniques de courant. Il consiste à piéger les courants harmoniques pour empêcher qu'ils ne se propagent dans le reste du réseau.

I.6.2 Solutions modernes

Ces solutions sont proposées comme des solutions efficaces de dépollution des réseaux électriques afin de traiter les inconvénients inhérents aux solutions traditionnelles comme les filtres passifs (non adaptatifs aux variations de la charge et du réseau, phénomènes de résonance). Parmi toutes les solutions modernes, on trouve deux types de structures classiquement utilisées :

- Le filtre actif (série, parallèle ou bien encore associant les deux).
- Le filtre actif hybride (série, parallèle).

Le but de ces filtres actifs est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à ce que le courant ou la tension redevienne sinusoïdal. Le filtre actif est connecté au réseau soit en série (FAS), soit en parallèle (FAP) suivant qu'il est conçu respectivement pour compenser les tensions ou les courants harmoniques, soit associé à des filtres passifs.

Pour fournir aux consommateurs une énergie électrique de qualité, même dans les conditions de fonctionnement les plus perturbées,

Les filtres actifs sont proposés comme des solutions de dépollution des réseaux électriques [10].

Dans la suite, différentes topologies de filtres actifs usuels sont présentées.

I.6.2.1 Filtre actif série (FAS)

Le rôle d'un FAS est de modifier localement l'impédance du réseau, comme le montre la figure.I.3. Il se comporte comme une source de tension harmonique qui annule les perturbatrices (creux, déséquilibre, harmonique) venant de la source et celles générées par la circulation de courants perturbateur à travers l'impédance du réseau. Ainsi, la tension aux bornes de la charge peut être rendue sinusoïdale. Le FAS ne permet pas de compenser les courants harmoniques consommés par la charge.



Fig. I.3. *Filtre actif série.*

I.6.2.2 Filtre actif parallèle (FAP)

Le FAP se connecte en parallèle avec le réseau, et injecte en temps réel les composantes harmoniques des courants absorbés par les charges non linéaires connectées au réseau. Ainsi, le courant fourni par la source d'énergie devient sinusoïdal, comme illustré sur la figure. I.4.

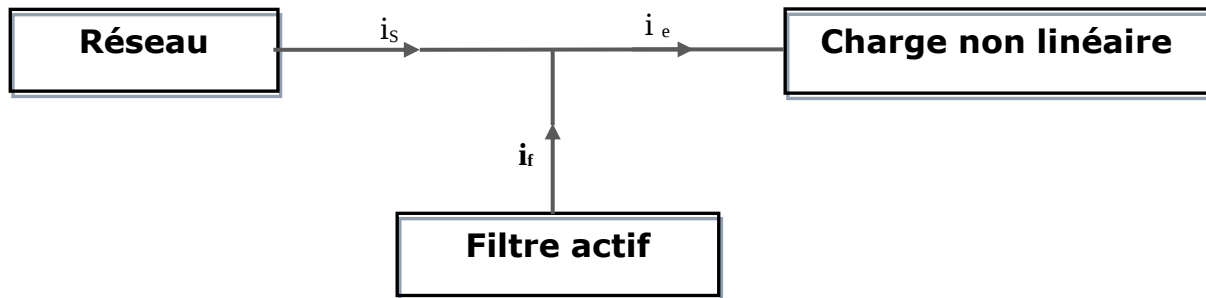


Fig. I.4. Filtre actif parallèle.

I.6.2.3 Combinaison parallèle-série de filtres actifs

La figure I.5 illustre l'association de deux filtres actifs parallèle et série, également appelée "Unified Power Quality Conditioner (UPQC)". Cette structure bénéficie des avantages des deux types de filtres actifs série et parallèle. Ainsi, elle permet d'assurer simultanément un courant sinusoïdal et une tension du réseau électrique également sinusoïdale [10].

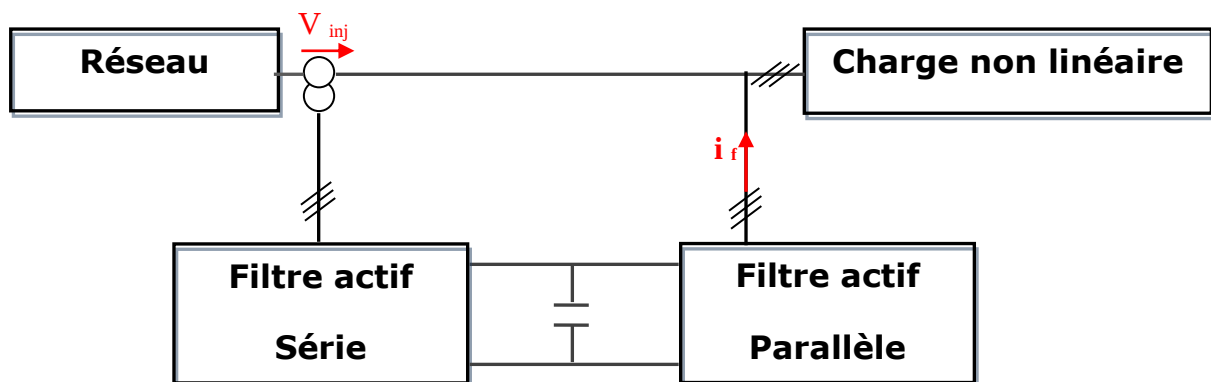


Fig. I.5. Combinaison parallèle-série de filtres actifs.

Les inconvénients des filtres passifs (résonances série ou parallèle avec la source et/ou la charge, détérioration des performances du filtre lors de variations de l'impédance du réseau,...) et des filtres actifs (coût élevé en raison du dimensionnement des composants de Puissance) ont conduit à l'élaboration d'une nouvelle topologie de filtre actif. Il s'agit du filtre hybride qui est en réalité l'association de filtres actifs de faibles puissances à des filtres passifs.

I.6.2.4. Filtre hybride

Le filtre hybride est une topologie de filtre qui combine les avantages des filtres passifs et des filtres actifs. Pour cette raison, il est considéré comme l'une des meilleures solutions pour filtrer les harmoniques de courant des réseaux de distribution. Une des principales raisons de l'utilisation du filtre actif hybride est liée au développement des semi-conducteurs de puissance tels que les transistors de puissance de types MOSFET ou IGBT. De plus, du point de vue économique, le filtre hybride présente un atout majeur : il permet de réduire le coût du filtre actif, actuellement l'obstacle majeur à l'utilisation de filtres actifs [3].

I.7. Redresseurs à MLI

Les redresseurs à MLI sont finalement des onduleurs utilisés " à l'envers " qui permettent de produire une tension continue à partir d'un réseau alternatif (comme un redresseur à diode muni d'un filtre) mais en absorbant sur le dit réseau des courants sinusoïdaux, à facteur de puissance unitaire[11]. Ils sont, comme nous l'avons déjà souligné, entièrement réversibles.

La contrainte de commande du convertisseur sera donc d'imposer une puissance réactive Q nulle et d'absorber des courants réseaux sinusoïdaux.

Deux structures existent pratique, la structure courant et la structure tension.

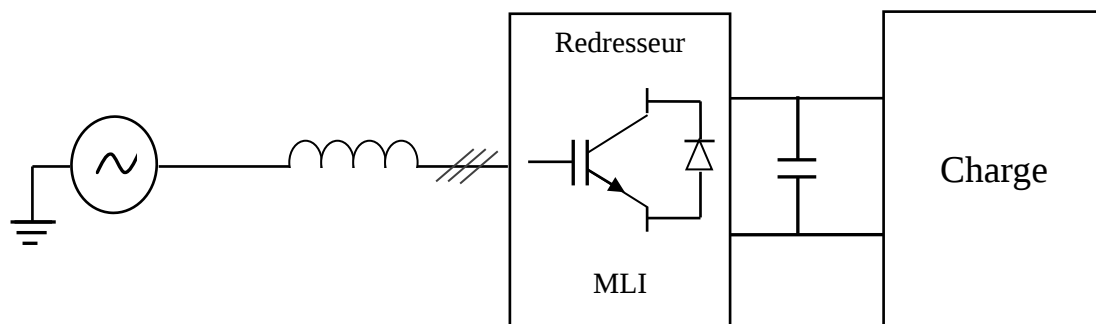


Fig. I.6. Redresseur à MLI.

I.7.1. Redresseur à MLI triphasé de courant

Dans cette structure (figure.1.7), la source alternative triphasée associée au filtre RL se comporte comme un générateur de courant, et la source continue comme un générateur de tension. D'autre part, à la sortie on a ajouté une capacité de filtrage pour rendre négligeable l'ondulation de la tension redresseur. Les semi-conducteurs utilisés sont des semi-conducteurs commandable à l'ouverture et à la fermeture, tels que les GTO et les IGBT.

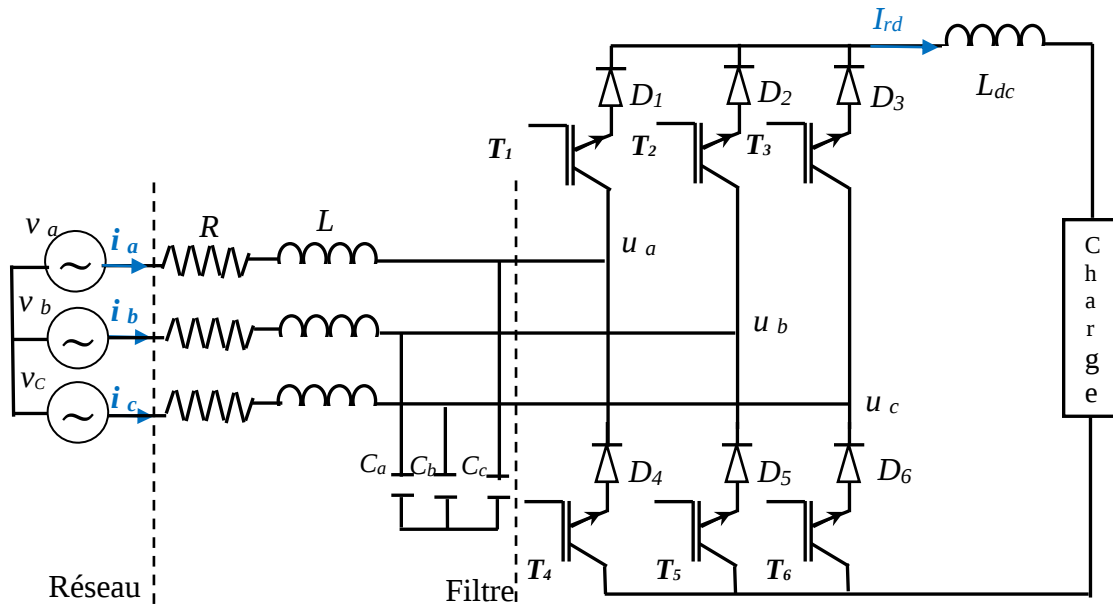


Fig. I.7. Redresseur à MLI triphasé de courant.

I.7.2. Redresseur à MLI triphasé de tension

Dans cette structure (figure. I.8), la source alternative triphasée associée au filtre RLC se comporte comme un générateur de tension, et la source continue comme un générateur de courant. D'autre part, pour le redresseur débiter un courant constant, on ajoute une inductance de lissage à la sortie de façon à lisser le courant redresseur I_{rd} [12].

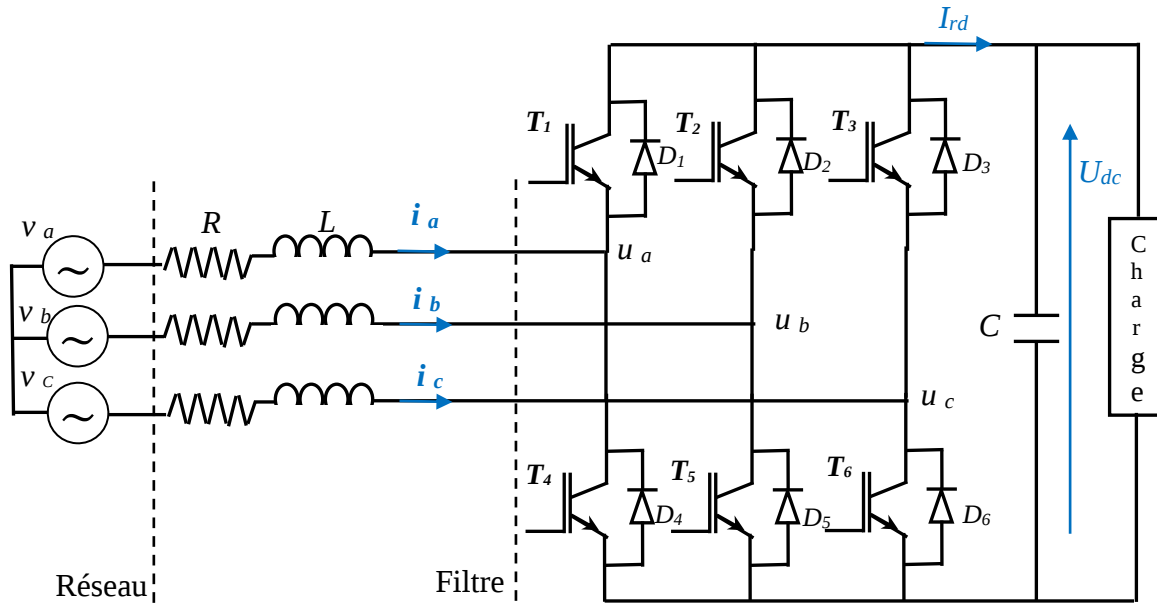


Fig. I.8. Redresseur à MLI triphasé de tension.

Le redresseur MLI fournit :

- Un flux de puissance bidirectionnel ;
- Un courant de source proche d'une sinusoïde ;
- Réglage du facteur de puissance ;
- Un ajustement et une stabilité de la tension (courant) continu(e).

❖ Principe de fonctionnement

Dans la suite de ce travail, nous nous intéressons plus particulièrement à la structure de courant.

Le redresseur MLI donné par la figure(I.9) est constitué de six IGBT avec six diodes antiparallèles pour assurer la continuité du courant. Tous ces éléments sont considérés comme des interrupteurs idéaux, tel que :

Les tensions de réseau sont :

$$\begin{cases} v_a = E_m \cos(\omega t) \\ v_b = E_m \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ v_c = E_m \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (\text{I.6})$$

Avec :

E_m : Amplitude des tensions du réseau,

ω : pulsation de réseau

La figure (I.9) montre le schéma équivalent du redresseur MLI par phase.

Avec :

R : Résistance de ligne.

L : Inductance de ligne.

v : Tension de ligne.

u_c : Tension d'entrée du redresseur.

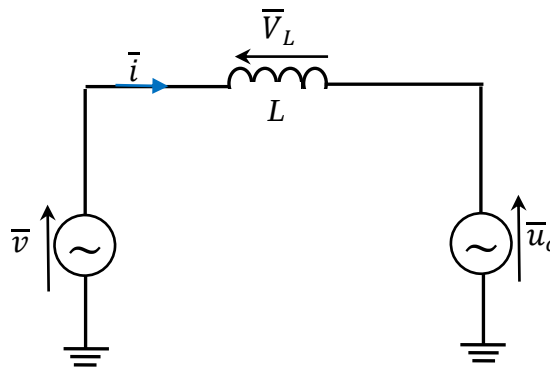


Fig. I.9 Schéma équivalent d'une seule phase.

Les inductances connectées entre l'entrée du redresseur et la ligne, sont une partie intégrée du circuit. Elles fournissent à la source et au redresseur les caractères d'une source de courant et redresseur survolteur respectivement [12]. La chute de tension aux bornes de l'inductance est égale à la différence entre la tension v et le tension U_{dc} . Cette dernière permet le contrôle du courant en phase et en amplitude. La valeur moyenne et le signe du courant redressé sont proportionnels à la puissance active conduite par le redresseur.

La puissance réactive peut être contrôlée indépendamment par le décalage du courant fondamental i , par rapport à la tension de ligne (v).

La figure (I.10) présente le diagramme vectoriel du redresseur triphasé, général et sous un facteur de puissance unitaire.

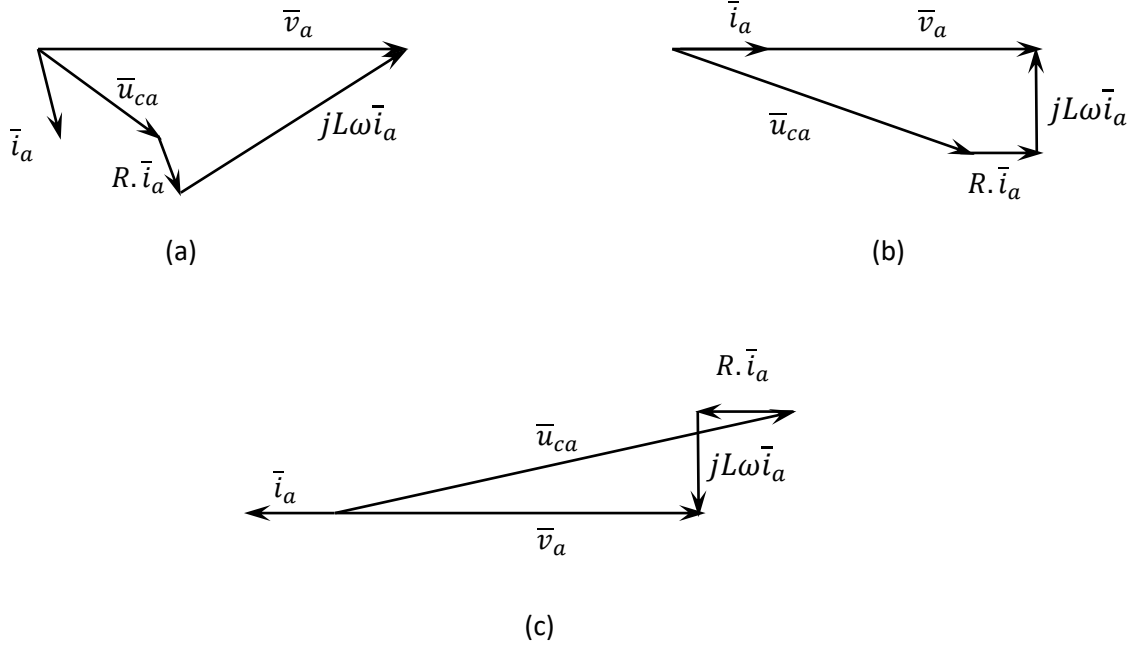


Fig .I.10 : a) Diagramme vectoriel du redresseur MLI général

b) Facteur de puissance unitaire (courant direct).

c) Facteur de puissance unitaire (courant inverse).

L'ouverture et la fermeture des interrupteurs du redresseur montré dans la figure (I.5) dépendent de l'état des signaux de commande (S_a , S_b , S_c), comme ils sont définis ci-dessous:

$$S_a = \begin{cases} 1 & T_1 \text{ fermé et } T_4 \text{ ouvert} \\ 0 & T_1 \text{ ouvert et } T_4 \text{ fermé} \end{cases}$$

$$S_b = \begin{cases} 1 & T_2 \text{ fermé et } T_5 \text{ ouvert} \\ 0 & T_2 \text{ ouvert et } T_5 \text{ fermé} \end{cases}$$

$$S_c = \begin{cases} 1 & T_3 \text{ fermé et } T_6 \text{ ouvert} \\ 0 & T_3 \text{ ouvert et } T_6 \text{ fermé} \end{cases}$$

En pratique, les deux semi-conducteurs d'un même bras ne doivent jamais conduire en même temps afin d'éviter de court-circuiter la source de tension ; il faut donc générer un temps d'attente, également appelé temps mort, entre la commande au blocage d'un interrupteur et la commande à l'amorçage de l'autre interrupteur du même bras.

Ainsi, le redresseur peut être représenté par huit états de commutation possibles (Tableau(I.4)). Six vecteurs actifs et deux nuls.

Tableau (I.4) : Calcul des vecteurs de tension

S_c	S_b	S_a	u_{ca}	u_{cb}	u_{cc}	$u_{c\alpha}$	$u_{c\beta}$	V_i
0	0	0	0	0	0	0	0	V_0
0	0	1	$\frac{-U_{dc}}{3}$	$\frac{-U_{dc}}{3}$	$\frac{2U_{dc}}{3}$	$\frac{-U_{dc}}{\sqrt{6}}$	$\frac{-U_{dc}}{\sqrt{2}}$	V_5
0	1	0	$\frac{-U_{dc}}{3}$	$\frac{2U_{dc}}{3}$	$\frac{-U_{dc}}{3}$	$\frac{-U_{dc}}{\sqrt{6}}$	$\frac{U_{dc}}{\sqrt{2}}$	V_3
0	1	1	$\frac{-2U_{dc}}{3}$	$\frac{U_{dc}}{3}$	$\frac{U_{dc}}{3}$	$-\sqrt{\frac{2}{3}}U_{dc}$	0	V_4
1	0	0	$\frac{2U_{dc}}{3}$	$\frac{U_{dc}}{3}$	$\frac{U_{dc}}{3}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}U_{dc}$	0	V_1
1	0	1	$\frac{U_{dc}}{3}$	$\frac{-2U_{dc}}{3}$	$\frac{U_{dc}}{3}$	$\frac{-U_{dc}}{\sqrt{6}}$	$\frac{-U_{dc}}{\sqrt{2}}$	V_6
1	1	0	$\frac{U_{dc}}{3}$	$\frac{U_{dc}}{3}$	$\frac{-2U_{dc}}{3}$	$\frac{U_{dc}}{\sqrt{6}}$	$\frac{U_{dc}}{\sqrt{2}}$	V_2
1	1	1	0	0	0	0	0	V_7

I.8. Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre la qualité de l'énergie électrique, et nous avons exposé le problème des harmoniques affectant la tension de réseau de distribution d'énergie, et dégradant, la qualité d'énergie électrique.

Par la suite, on a présenté les différentes méthodes de réduction des harmoniques, notamment les techniques de filtrage et compensation à base d'éléments passifs qui présentent de nombreuses contraintes. La solution la plus intéressante est l'utilisation du filtrage actif.

Ensuite on s'est intéressé à exposer les solutions avancées présentées par les redresseurs MLI qui peuvent contrôler l'amplitude, la phase et le spectre du courant consommé sur le réseau de fréquence fixe.

II.1.Introduction

Dans ce chapitre, on présente le principe de fonctionnement de cette nouvelle technique de commande, où on analyse en particulier le contrôle et la dynamique des grandeurs à contrôler. des nouvelles commandes sans capteurs de tension de lignes sont proposées pour un contrôle plus performant du redresseur tel que la commande directe de puissance DPC.

Dans un premier temps, on présentera l'analogie entre les méthodes de contrôle des redresseurs et des onduleurs. Puis on introduira d'une manière générale, le principe de fonctionnement de la DPC incluant tous le système.

Dans une seconde partie, on développera la technique d'estimation des différentes grandeurs nécessaires pour le contrôle du convertisseur.

Enfin, des représentations vectorielles seront établies pour permettre l'élaboration d'une étude de la dynamique du contrôle direct des puissances et indirect du courant. Ainsi le choix du type du régulateur (le nombre de niveau) et le nombre de secteurs.

Le contrôle du redresseur à MLI peut être considéré comme un problème dual avec la commande d'un onduleur à MLI Figure.II.1. Plusieurs stratégies de contrôle ont été proposées dans les travaux récents de ce type de convertisseur à MLI. Bien que ces stratégies de contrôle puissent atteindre le même but global, un facteur de puissance élevé et un courant de forme presque sinusoïdale, leurs principes diffèrent.

Par contre dans le nouveau contrôle proposé, Commande Directe de Puissance, il n'y a pas des boucles de régulation internes de courant ni bloc de modulation MLI. En effet, les états de commutation du convertisseur sont sélectionnés à partir d'une table de commutation. Cette dernière est basée sur l'erreur entre les puissances active et réactive estimées et leurs références [13,2].

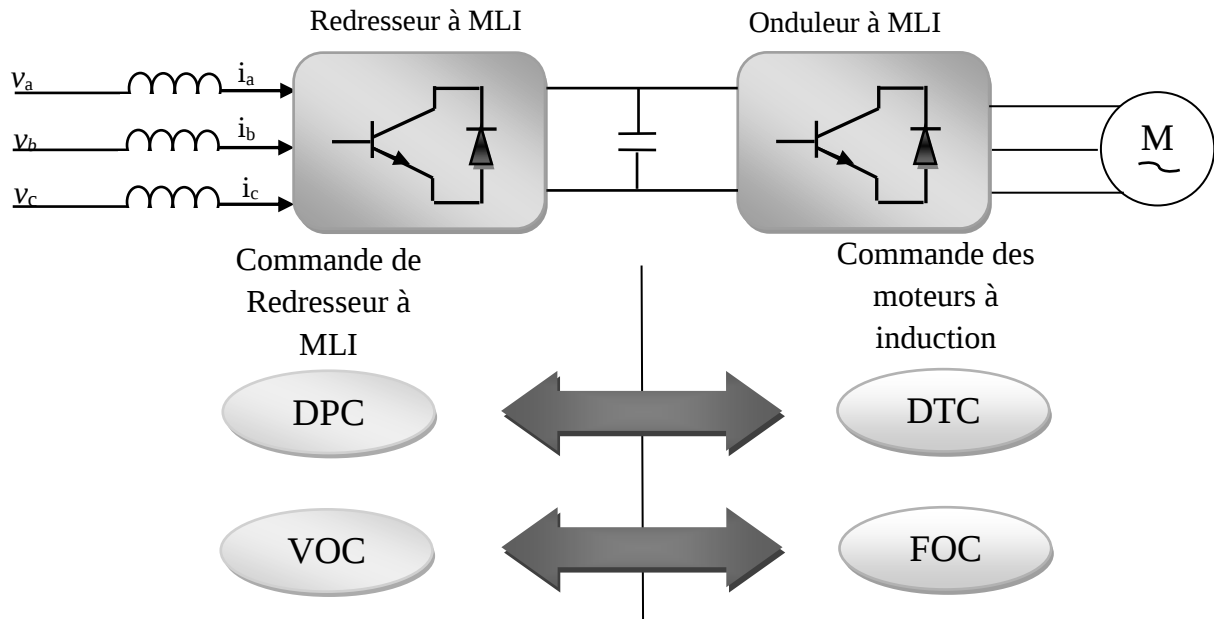


Fig. II.1 Relation entre le contrôle des redresseurs à MLI et les onduleurs à MLI alimentant un moteur à induction.

Les nouvelles techniques de contrôle des redresseurs à MLI, peuvent être généralement classifiées en deux **Figure. II.2** [14]:

- Techniques basées sur la tension.
- Techniques basées sur base du flux virtuel.

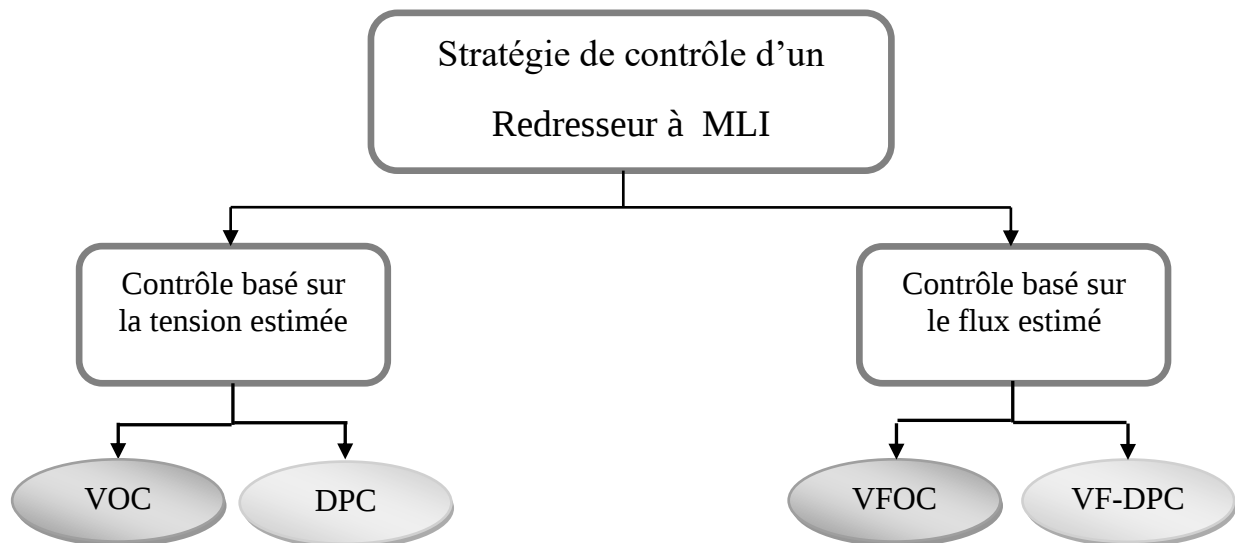


Fig. II.2 Classification des méthodes de contrôle d'un redresseur à MLI.

II.2. Redresseur à MLI

L'étude d'une structure en pont complet, commande en modulation de largeur d'impulsion (MLI), montre qu'il est possible de fonctionner dans les quatre quadrants du plan (U, I) si la technologie des interrupteurs à semi-conducteurs l'autorise, cette structure permet donc tout les types de transfert d'énergie possibles.

Les modes de fonctionnement hacheur et onduleur et sont les plus connus et en général bien traité dans la littérature du génie électrique, en revanche, le fonctionnement redresseur, absorbant un courant sinusoïdale, reste peu traité [15].

L'intérêt connu de découpage (MLI) est le réduire considérablement la taille des éléments de filtrage. Nous allons voir qu'en mode redresseur il est aussi possible de corriger de façon active le facteur de puissance moyennent l'utilisation d'une loi de commande particulière.

II.3. Principe de fonctionnement

La première application développée visait le contrôle d'une machine électrique et la structure de contrôle est connue sous la dénomination de Contrôle Direct de Couple (DTC). Dans ce cas, le flux statorique et le couple électromagnétique de la machine sont contrôlés sans aucun bloc de modulation. Par la suite, une technique similaire de commande en puissance (DPC) était proposée par pour une application de contrôle des redresseurs connectés au réseau.

Dans ce cas, les grandeurs contrôlées sont les puissances active et réactive instantanées. Avec la D.P.C. il n'y a pas de boucle de régulation en courant ni d'élément de modulation MLI, car les états de commutation de l'onduleur, pour chaque période d'échantillonnage, sont sélectionnés à partir d'une table de commutations, basée sur l'erreur instantanée entre les valeurs de références et celles mesurées ou estimées des puissances active et réactive, et la position angulaire du vecteur de tension de source. Généralement avec cette stratégie de commande, la tension du bus continu est régulée pour un contrôle de la puissance active et le fonctionnement avec un facteur de puissance unitaire est obtenu en imposant la puissance réactive à une valeur nulle [15].

La figure. II.3 montre la configuration globale de la commande directe de puissance sans capteur de tension pour un redresseur à MLI triphasé.

La DPC consiste à sélectionner un vecteur de commande d'après une table de commutation. Cette dernière est fondée sur l'erreur numérisée S_p , S_q des puissances active et réactive instantanées, aussi bien que sur la position angulaire de la tension estimée. Le plan (α - β) est divisé en douze secteurs, pour déterminé le secteur de travail [13] [14].

La référence de la puissance active est obtenue par le bloc de contrôle de la tension continue, où on utilise un régulateur PI pour contrôler l'erreur entre la tension captée (continue) et sa référence.

Tandis que pour réaliser un facteur de puissance unitaire, la puissance réactive de référence est directement imposée égale à zéro.

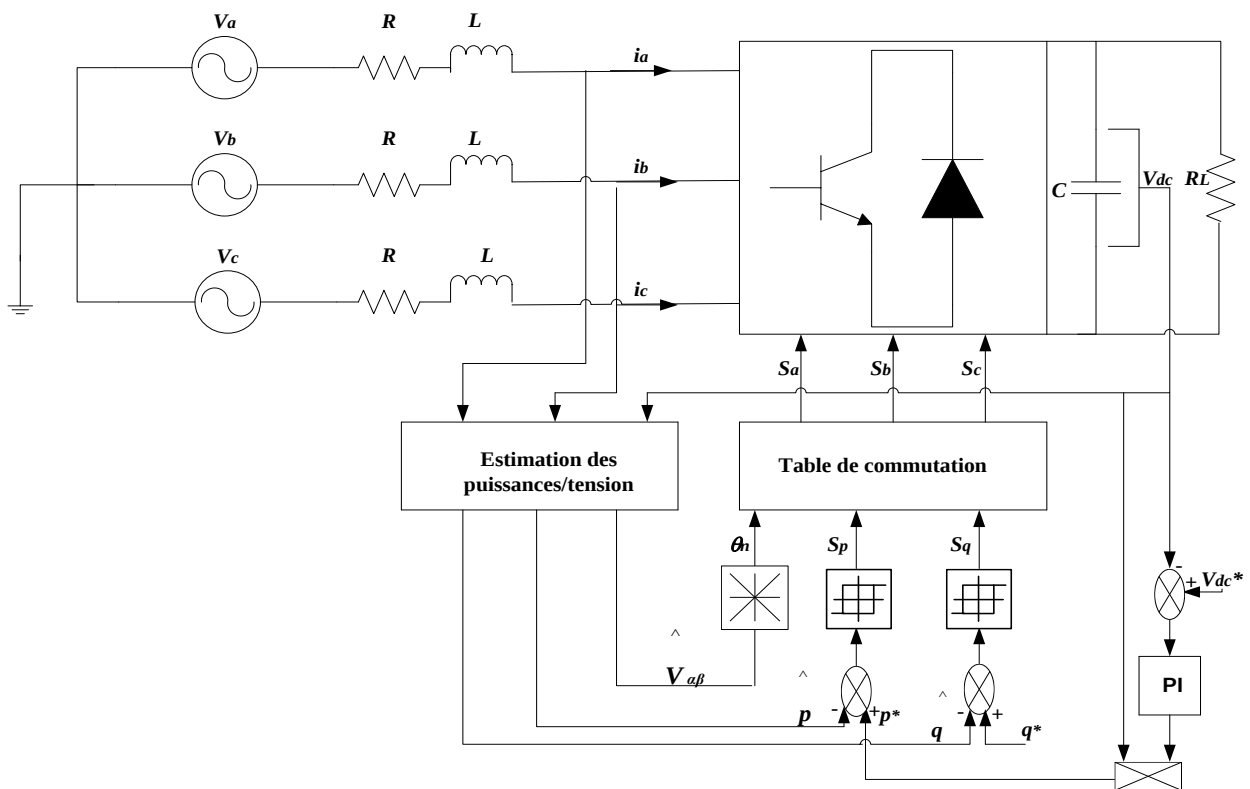


Fig .II .3 Configuration générale de la commande directe de puissance sans capteurs de tension.

Avec;

v_a, v_b, v_c : Les trois tensions simples de la ligne.

i_a, i_b, i_c : Les trois courants de ligne.

S_a, S_b, S_c : Les états de commutation des interrupteurs du convertisseur.

U_{dc} : La tension continue.

L : L'inductance de connexion réseau convertisseur.

C : Capacité de filtrage de la tension continue.

R : Charge résistive.

II.3.1 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 [17,2].

$$P = v_{(abc)} \cdot i_{(abc)} = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \quad (II.1)$$

$$q = v_{(abc)} \wedge i_{(abc)} = v'_a i_a + v'_b i_b + v'_c i_c \quad (II.2)$$

D'où, v'_a, v'_b, v'_c sont en arrière de 90° sur v_a, v_b, v_c respectivement (Figure. II.4).

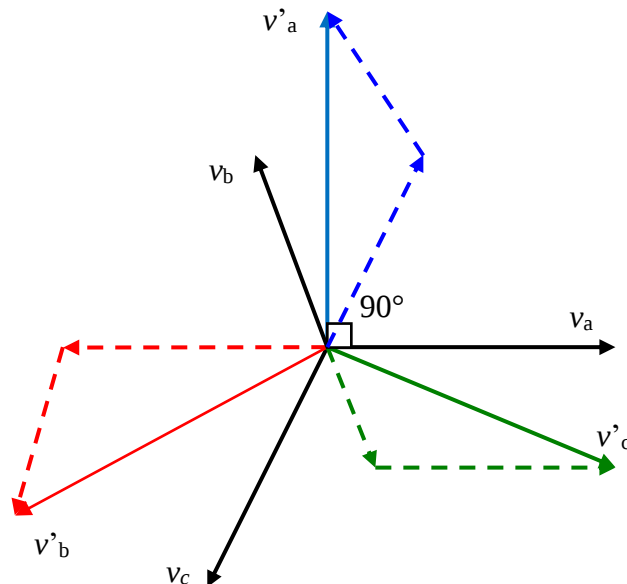


Fig. II.4. Représentation vectorielle des vecteurs v'_a, v'_b, v'_c et v_a, v_b, v_c

La même équation peut être décrite sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_a & v_b & v_c \\ v'_a & v'_b & v'_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.3})$$

Avec :

$$\begin{bmatrix} v'_a \\ v'_b \\ v'_c \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} v_b & -v_c \\ v_c & -v_a \\ v_a & -v_b \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} v_{bc} \\ v_{ca} \\ v_{ab} \end{bmatrix} \quad (\text{II.4})$$

La puissance apparente complexe S peut être exprimée par l'expression suivante [2]:

$$\bar{S} = \bar{V} \cdot \bar{I} = p + jq$$

$$S = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c + j \frac{1}{\sqrt{3}} [(v_b - v_c) i_a + (v_c - v_a) i_b + (v_a - v_b) i_c] \quad (\text{II.5})$$

Sachant que :

V : Tension instantanée de la source.

I : Courant instantané de ligne.

Cependant, l'expression (II.5) exige l'information sur la tension, or cette dernière doit être éliminée pour une commande sans capteurs.

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

$$\hat{p} = L \left(\frac{di_a}{dt} i_a + \frac{di_b}{dt} i_b + \frac{di_c}{dt} i_c \right) + U_{dc} (S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c) \quad (\text{II.6})$$

$$\hat{q} = \frac{1}{\sqrt{3}} [3L \left(\frac{di_a}{dt} i_c - \frac{di_c}{dt} i_a \right) - U_{dc} (S_a (i_b - i_c) + S_b (i_c - i_a) + S_c (i_a - i_b))] \quad (\text{II.7})$$

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 [18,2].

D'après les expressions II.6 et II.7, la puissance change instantanément en fonction des ordres de commutation du convertisseur.

II.3.2 Estimation de la tension

Le secteur de travail de la tension de ligne est nécessaire, pour déterminer les ordres de commutation. De plus il est important d'estimer la tension de ligne correctement, même avec l'existence des harmoniques, sa donne un facteur de puissance élevé [13]. La chute de tension aux bornes de l'inductance peut être calculée en dérivant le courant.

Donc, la tension peut être calculée en additionnant la tension de référence à l'entrée du convertisseur avec la chute de tension déjà calculée.

En revanche, cette approche à un inconvénient qui est la dérivée du courant, où les bruits seront amplifiés. Pour éviter cet inconvénient une estimation de tension basée sur le calcul des puissances peut être appliquée [13].

L'expression suivante (II.8) donne les courants de ligne i_a , i_b , i_c dans les coordonnées stationnaires α_β :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

Pour un système triphasé, la puissance active instantanée est définie par le produit scalaire des courants et des tensions de ligne. Ces puissances sont exprimées respectivement par les relations: [6]

$$\hat{p} = \bar{v}_{(abc)} \cdot \bar{i}_{(abc)} = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta \quad (\text{II.9})$$

$$\hat{q} = \bar{v}_{(abc)} \wedge \bar{i}_{(abc)} = v_\alpha i_\beta - v_\beta i_\alpha \quad (\text{II.10})$$

L'écriture matricielle des expressions (II.9) et (II.10) est :

$$\begin{bmatrix} \hat{p} \\ \hat{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

L'équation matricielle (II.11) peut être réécrite, en fonction du courant de ligne (mesuré) et la puissance (estimée), comme suit :

$$\begin{bmatrix} \hat{v}_\alpha \\ \hat{v}_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{i^2_\alpha + i^2_\beta} \begin{bmatrix} i_\alpha & -i_\beta \\ i_\beta & i_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{p} \\ \hat{q} \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

La transformée inverse de Concordia des tensions de ligne s'écrit :

$$\begin{bmatrix} \hat{v}_a \\ \hat{v}_b \\ \hat{v}_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{v}_\alpha \\ \hat{v}_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

II.3.3 Choix du secteur

L'influence de chaque vecteur de sortie résultant du redresseur à MLI sur les puissances active et réactive est très dépendante de la position réelle du vecteur de la tension de ligne. Ainsi, outre les signaux des deux contrôleurs à hystérésis, la table de commutation fonctionne selon la position du vecteur de la tension de ligne, qui tourne à la pulsation (ω), dans le plan complexe. Toutefois, au lieu d'introduire à la table de commutation la position exacte du vecteur de la tension, le bloc du choix de secteur nous informe dans quel domaine est localisé l'actuel vecteur de la tension de ligne [15].

Afin d'augmenter la précision et aussi pour éviter les problèmes rencontrés aux frontières de chaque vecteur de commande, le plan de l'espace vectoriel est divisé en 12 secteurs de 30° chacun, comme la montre sur la Figure.II.5. Ces secteurs peuvent être exprimés numériquement comme suit :

$$(2n-3)\frac{\pi}{6} < \theta_n < (2n-1)\frac{\pi}{6} \quad n=1,2, \dots, 6 \quad (\text{II.14})$$

$$(n-3)\frac{\pi}{6} < \theta_n < (n-1)\frac{\pi}{6} \quad n=1,2, \dots, 12 \quad (\text{II.15})$$

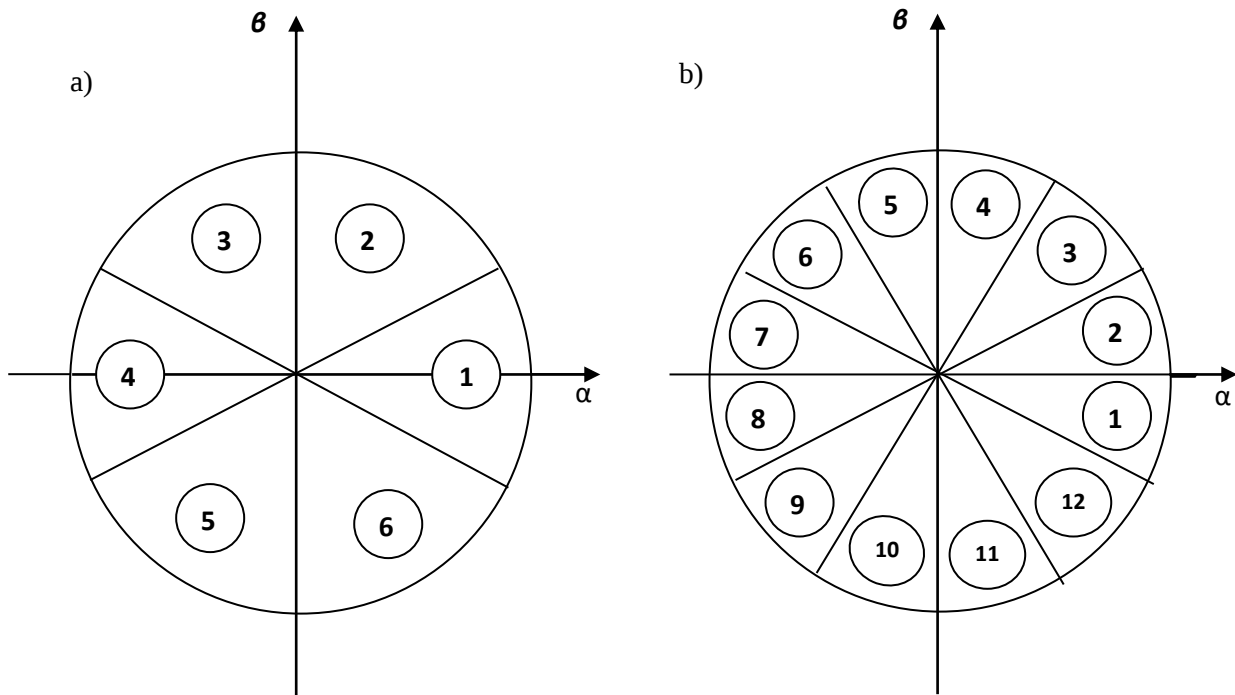


Fig. II.5. Le plan vectoriel divisé a) en six secteurs

b) en douze secteurs.

II.3.4 Table de commutation

On peut voir sur la Figure. II.6 que les puissances active et réactive instantanées dépendent de la position du vecteur tension U_s . Car ce dernier permet le contrôle (indirect) en phase et en amplitude du courant de ligne [16].

La Figure. II.6 présente les quatre situations différentes, qui illustrent les variations de la puissance instantanée. Le point **M** présente la valeur de référence des puissances active et réactive.

Les quatre situations possibles des puissances instantanées sont schématisées, dans le cas où le vecteur tension se trouve dans le troisième secteur. Le courant de ligne est en avance sur la tension UL pour les deux premiers cas (a) et (b). Mais son amplitude est supérieure dans (a) et inférieure dans (b) par rapport au courant de référence. Dans les deux derniers cas (c) et (d), le courant est en retard sur la tension UL, avec une amplitude inférieure dans (c) et supérieure dans (d) [19].

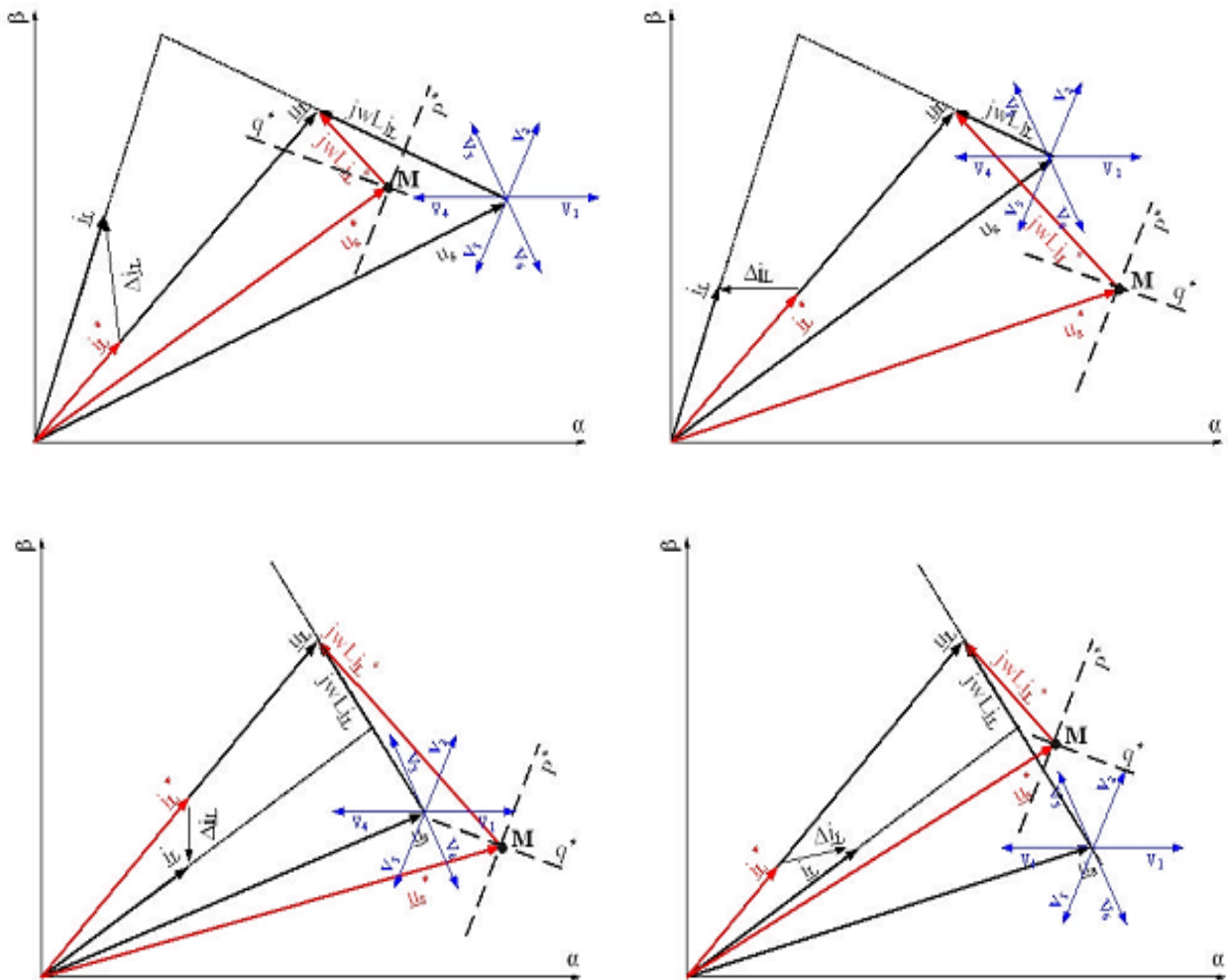


Fig. II.6 Variation des puissances instantanées

$$a) p_{ref} < \hat{p}, q_{ref} > \hat{q}, (0,1);$$

$$b) p_{ref} > \hat{p}, q_{ref} > \hat{q} (1,1); a) p_{ref} > \hat{p}, q_{ref} < \hat{q} (1,0)$$

$$b) p_{ref} < \hat{p}, q_{ref} < \hat{q} (0,0);$$

La sélection du vecteur de commande doit être choisie de sorte que l'erreur entre l'estimation et la référence soit restreinte dans une bande à hystérésis.

Certains comportements de la DPC ne sont pas satisfaisants. Dans les instants où le vecteur de la tension estimée est près des frontières d'un secteur, deux possibilités sur six sont mauvaises. Car ces vecteurs peuvent garantir seulement le contrôle de la puissance active instantanée, sans pouvoir faire de correction sur l'erreur de la puissance réactive.

Quelques méthodes pour améliorer le comportement de la DPC dans les frontières d'un secteur sont bien connues. Une d'entre elles est d'augmenter le nombre de secteurs ou bien d'utiliser des comparateurs à hystérésis à plusieurs niveaux [19,2].

Généralement, la table de commutation est construite en tenant compte des points importants suivants :

- Le nombre de secteurs.
- Les performances dynamiques.
- Les régulateurs à hystérésis à deux ou trois niveaux.

Le tableau. II.1 donne la table de commutation de la commande directe de puissance.

Les erreurs numérisées S_p , S_q et le secteur de travail $Sect_n$ sont les entrées de cette table, où les états de commutation S_a , S_b et S_c du convertisseur sont mémorisés.

L'état optimal de commutation du convertisseur est choisi à chaque état de commutation selon la combinaison des signaux numériques S_p , S_q et $sect_n$. C'est-à-dire, que le choix s'effectue de sorte que l'erreur de la puissance active puisse être restreinte dans une bande à hystérésis de largeur $2\Delta H_p$, et de même pour l'erreur de la puissance réactive, avec une bande de largeur $2\Delta H_p$.

Tableau. II.1 Table de commutation de la DPC

S_p	S_q	Sect 1	Sect 2	Sect 3	Sect 4	Sect 5	Sect 6	Sect 7	Sect 8	Sect 9	Sect 10	Sect 11	Sect 12
1	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	V_2	V_7	V_3	V_0	V_4	V_7	V_5	V_0	V_6	V_7	V_1	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

$V_0(000) ; V_1(100) ; V_2(110) ; V_3(010) ; V_4(011) ; V_5(001) ; V_6(101) ; V_7(111) ;$

II.3.5 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 [20].

La sortie des régulateurs à hystérésis donnée par les variables booléennes S_p et S_q , qui prennent l'état "1" pour une augmentation de la variable contrôlée (p ou q) et l'état "0" pour une diminution :

$$\left\{ \begin{array}{ll} P_{ref} - \hat{P} > \Delta H_p & \Rightarrow S_p = 1 \\ P_{ref} - \hat{P} < -\Delta H_p & \Rightarrow S_p = 0 \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{Hystérésis à deux niveaux} \\ \end{array} \quad (II.16)$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} P_{ref} - \hat{P} > \Delta H_p & \Rightarrow S_p = 1 \\ -\Delta H_p < P_{ref} - \hat{P} < \Delta H_p & \Rightarrow S_p = 0 \\ P_{ref} - \hat{P} < -\Delta H_p & \Rightarrow S_p = -1 \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{Hystérésis à trois niveaux} \\ \end{array}$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} q_{ref} - \hat{q} > \Delta H_q & \Rightarrow S_q = 1 \\ q_{ref} - \hat{q} < -\Delta H_q & \Rightarrow S_q = 0 \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{Hystérésis à deux niveaux} \\ \end{array} \quad (II.17)$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} q_{ref} - \hat{q} > \Delta H_q & \Rightarrow S_q = 1 \\ -\Delta H_q < q_{ref} - \hat{q} < \Delta H_q & \Rightarrow S_q = 0 \\ q_{ref} - \hat{q} < -\Delta H_q & \Rightarrow S_q = -1 \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{Hystérésis à trois niveaux} \\ \end{array}$$

Où ΔH_p , ΔH_q sont les écarts des régulateurs à hystérésis.

II.4 Caractéristiques générales de la table de commutation et régulateurs à hystérésis

- La fréquence de commutation dépend de la largeur de la bande des régulateurs à hystérésis des puissances active et réactive.
- En utilisant le régulateur à hystérésis à trois niveaux, le vecteur zéro est naturellement et symétriquement sélectionné.
- Les vecteurs nuls diminuent la fréquence de commutation, mais produisent des courts-circuits entre lignes.
- Le choix des vecteurs nuls V_0 (000) et V_7 (111) doit être bien approprié.
- Dans la DPC les vecteurs voisins doivent être sélectionnés ce qui diminue la dynamique, mais fournis peu d'ondulation du courant et de puissance (bas THD).
- Les douze secteurs permettent une sélection de la vectrice tension plus précise.

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons pu présenter et définir, dans la première partie la configuration globale de la commande directe de puissance sans capteur de tension pour un redresseur à MLI triphasé. Dans la deuxième partie on a présenté les éléments constituant la structure générale du DPC. Cette structure a d'abord été partagée en deux parties, l'une dite partie puissance, et l'autre dite partie contrôle. Nous avons exprimé l'estimation de la puissance instantanée et l'estimation de la tension. Ainsi, nous avons pu fixer le choix du secteur, de même que ceux de la table de commutation.

III.1 Introduction

L'étude menée dans le chapitre précédent a permis d'analyser et de comprendre la structure et stratégies de commande DPC du redresseur à MLI.

Ce chapitre est consacré à la modélisation et la simulation d'un redresseur à MLI, contrôlé par la commande directe de puissance. Plusieurs tests de simulation effectués pour illustrer la validité de cet algorithme. Dans ce domaine, la simulation numérique constitue un outil d'étude, d'évaluation et de préconception très efficace. En conséquence, de nombreux logiciels de simulation ont été développés et diffusés ces dernières années (exemple : MATLAB).

Le présent chapitre sera décomposé en deux parties :

Dans une première partie, nous présentons la modélisation individuelle de chaque partie du système, Dans une deuxième partie, consiste à effectuer la simulation de l'ensemble modélisé précédemment. Pour finir, nous présenterons les résultats de simulations suivis de commentaires.

III.2 Description et modélisation du système simulé

III.2.1 Partie Puissance

La Figure.III.1 donne les trois étages du circuit de puissance, charge et le redresseur à MLI, chaque étage sera présenté par la suite :

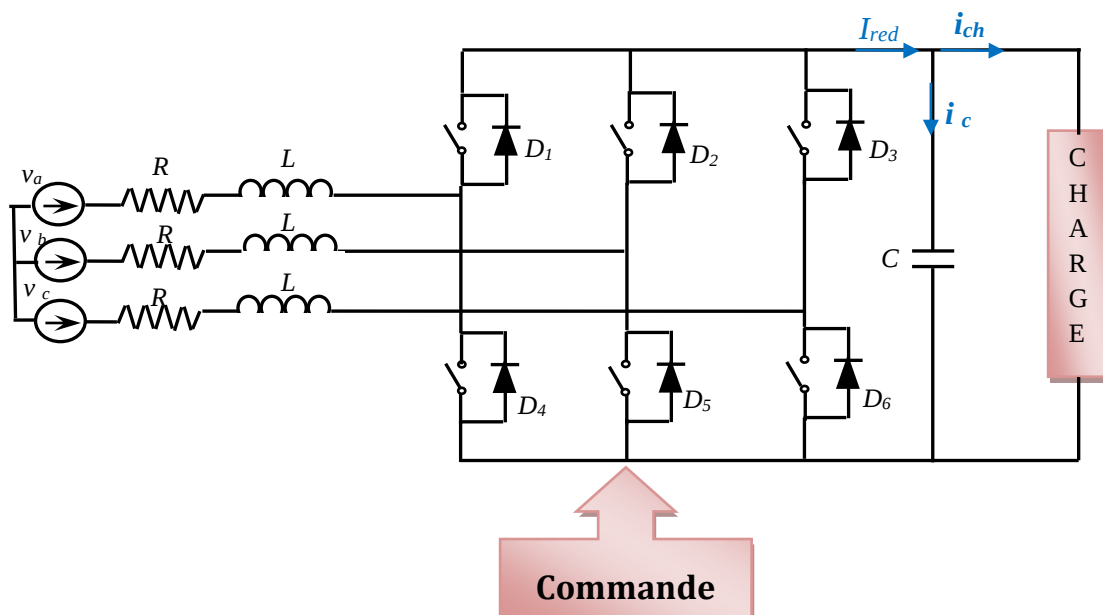


Fig. III.1 Schéma du circuit de puissance.

III.2.1.1 Source d'alimentation

le réseau est représenté par phase, comme l'indique la figure (III.2), par une f.e.m sinusoïdale en série avec une impédance (L_c, R_c).

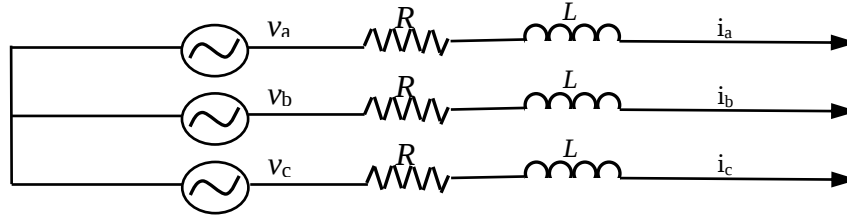


Fig. III.2 Schéma de la source d'alimentation.

A l'équilibre, avec des impédances des trois phases identiques, de ligne et les courants fondamentaux sont exprimés comme suit :

$$\begin{cases} v_a = V_m \sin(\omega t) \\ v_b = V_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ v_c = V_m \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

$$\begin{cases} i_a = I_m \cos(\omega t + \varphi) \\ i_b = I_m \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \varphi) \\ i_c = I_m \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \varphi) \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

Avec ;

V_m : L'amplitude de la tension.

I_m : L'amplitude du courant.

ω : La fréquence angulaire.

φ : Déphasage entre le courant et la tension. On s'assure que :

On s'assure que :

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (\text{III.3})$$

Les équations de tension pour un système triphasé équilibré, sans raccordement du fil neutre, peuvent être écrites comme suit :

$$u_L = u_{isd} + u_s \quad (\text{III.4})$$

$$u_L = Ri_L + L \frac{di_L}{dt} + u_s \quad (\text{III.5})$$

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = s_a i_a - s_b i_b + s_c i_c - i_{ch} \quad (\text{III.6})$$

Le système d'équations différentielles, donnant le courant i_x ($x : a, b, c$) dans chaque phase est donné par l'équation (III.7) :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} V_a & -V_m \\ V_b & -V_m \\ V_c & -V_m \end{bmatrix} \quad (\text{III.7})$$

Avec ;

v_a : La tension de ligne.

u_{an}, u_{bn}, u_{cn} : Les tensions à l'entrée du convertisseur.

III.2.1.2 Redresseur à MLI

Il est représenté au schéma de la Figure III.3. Les IGBT s et les diodes constituant le pont sont supposés idéaux. C'est à dire que l'on néglige les phénomènes de commutation. Il est modélisé en associant à chaque bras une fonction logique S_j selon la Figure.III.3 [7].

On définit les fonctions logiques de connexion par

$$S_j = \begin{cases} 1 & \text{si } T_i \text{ est fermé et } T'_i \text{ est ouvert} \\ 0 & \text{si } T_i \text{ est ouvert et } T'_i \text{ est fermé} \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

Avec ; $j = a, b, c$ & $i = 1, 2, 3$.

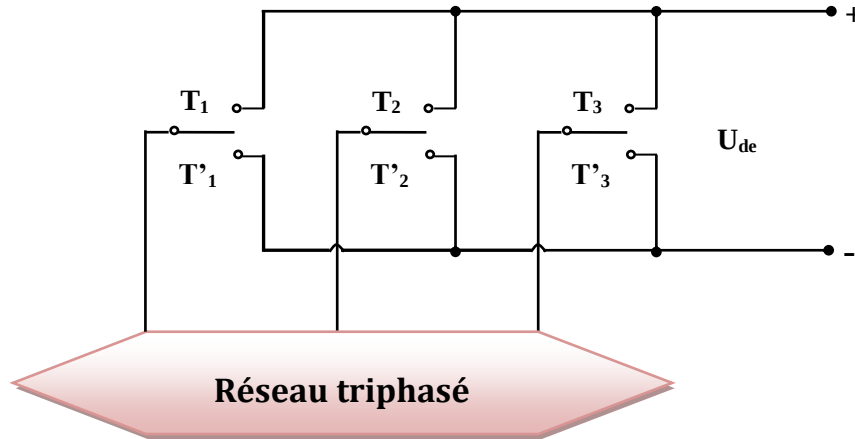


Fig.III.3 Représentation des interrupteurs d'un redresseur AC/DC triphasé.

Ainsi les tensions entre lignes sont données par :

$$\begin{cases} U_{ab} = U_{dc} \cdot (S_a - S_b) \\ U_{bc} = U_{dc} \cdot (S_b - S_c) \\ U_{ac} = U_{dc} \cdot (S_a - S_c) \end{cases} \quad (\text{III.9})$$

Connaissant l'état de chaque interrupteur, on peut définir la matrice de conversion du convertisseur. Les tensions simples v_a , v_b et v_c s'expriment par la relation (III.10) :

$$\begin{bmatrix} u_{an} \\ u_{bn} \\ u_{cn} \end{bmatrix} = \frac{U_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.10})$$

Le courant redressé est donné par :

$$i_{red} = [S_a \ S_b \ S_c] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.11})$$

III.2.1.3 Charge

Ce bloc est constitué d'une capacité C (pour diminuer les ondulations de la tension redressée) placée en parallèle avec une résistance R , modélisant la charge continue Figure. III.4.

La tension U_{dc} aux bornes de la charge et le courant redressé, sont donnés par les deux expressions (III.12) & (III.13) :

$$\frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{i_{red} - i_{ch}}{C} \quad (III.12)$$

i_{ch} : Courant de la charge.

i_{red} : Courant redressé.

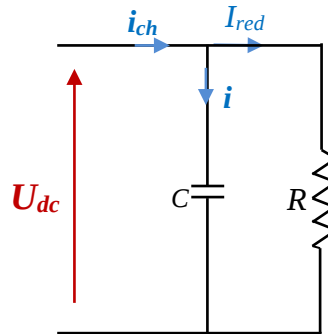


Fig. III.4 Schéma du bloc de la charge.

L'équation de i_{red} dépend de la nature de la charge :

➤ A vide : $i_{ch} = 0$

Pour une charge résistive R: $i_{ch} = \frac{U_{dc}}{R}$ (III.13)

Les équations (III.6, III.7, III.10 et III.11), peuvent être présentés sous **MATLAB** 'SIMULINK', par la figure suivante :

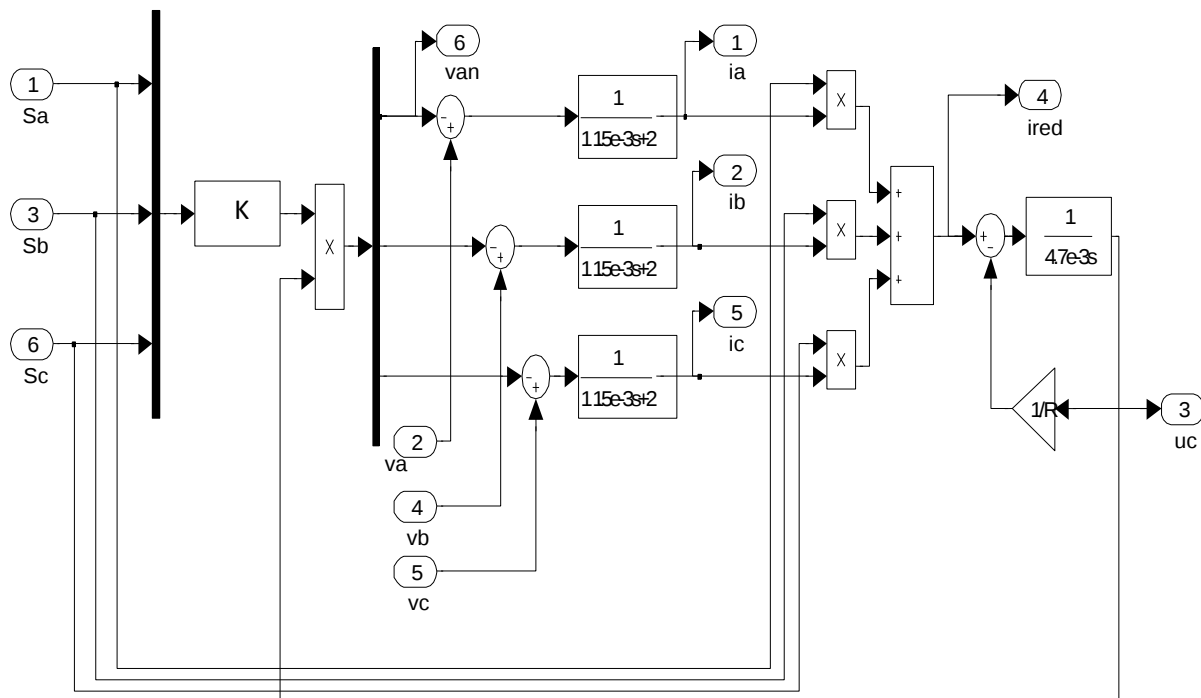


Fig. III.5 Modèle de simulation du redresseur à MLI dans les coordonnées Triphasées.

III.2.2 Partie Commande

Les différents blocs de contrôle direct du convertisseur sont mis en évidence sur la Fig.III.6. Pour cela, on reprend les expressions établies dans le chapitre II.

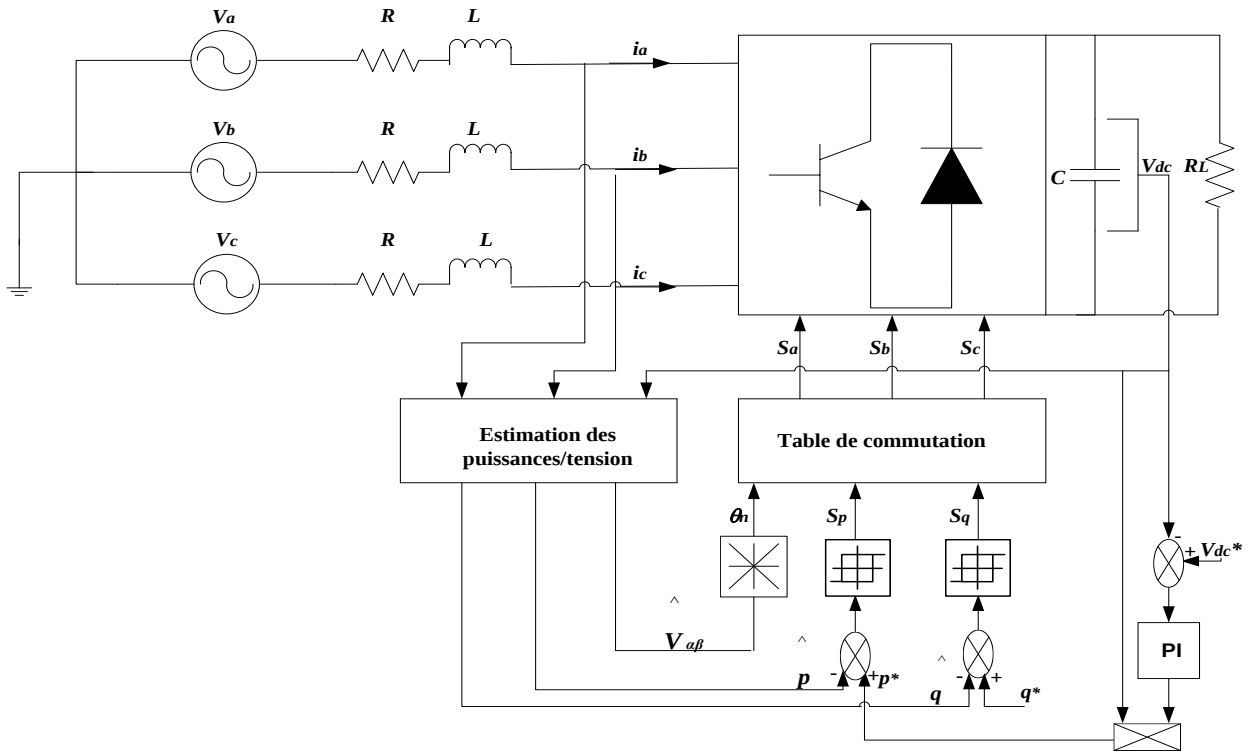


Fig. III.6 Structure complète de la commande 'DPC' pour un facteur de puissance unitaire.

III.2.2.1 Régulation de tension continue U_{dc}

La fonction du transfert de la charge est :

$$\frac{U_{dc}(p)}{i_d(p)} = \frac{R}{(1+T_c p)} \quad (\text{III.14})$$

Avec ; $T_c = RC$

La régulation de la tension continue est effectuée par un régulateur 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 donne la puissance active de référence Figure.III.7.

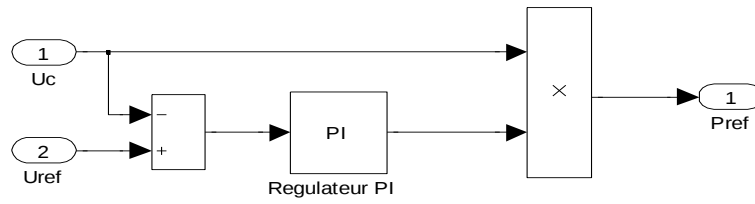


Fig.III.7 Schéma bloc de régulation de la tension continue.

III.2.2.2 Estimation de la puissance instantanée

La puissance active et réactive instantanées sont estimées d'après les équations (III.6) et (III.7) respectivement.

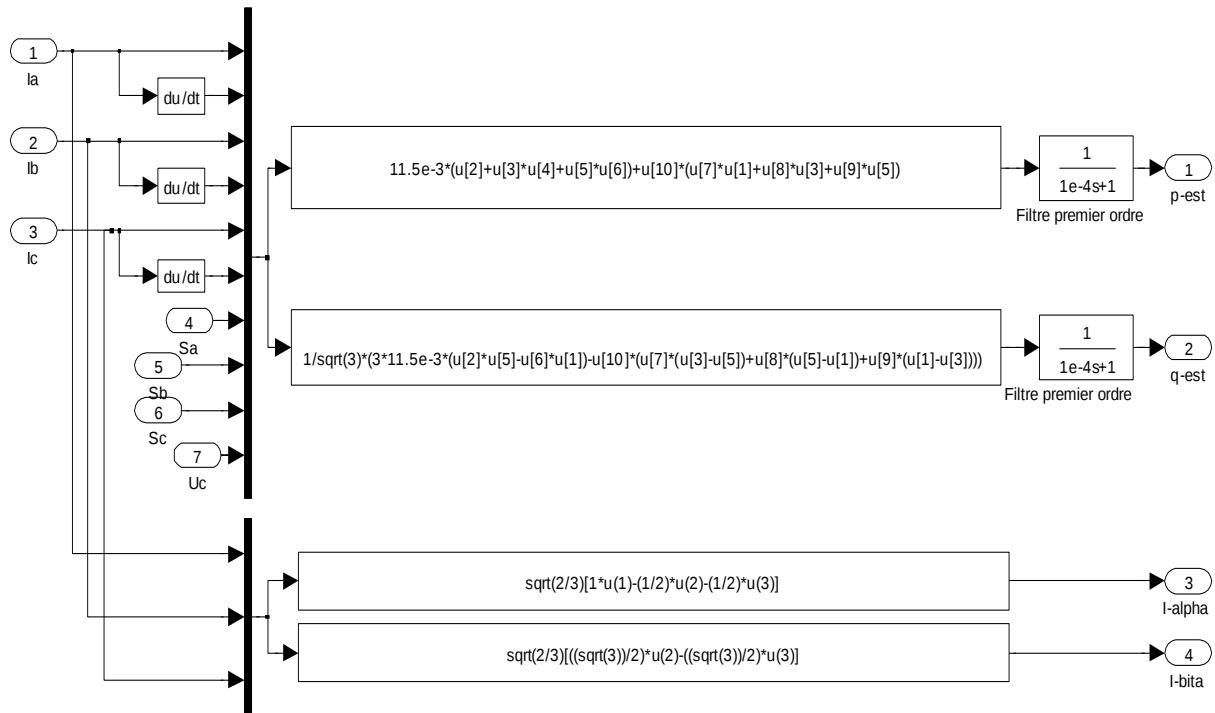


Fig.III.8 schéma bloc d'estimation des puissances instantanées.

III.2.2.3 Estimation de la tension de ligne

On est amené à déterminer les composantes (v_α, v_β) , afin de désigner le secteur de travail, l'expression (II.12) permettent l'estimation de la tension Figure.III.9.

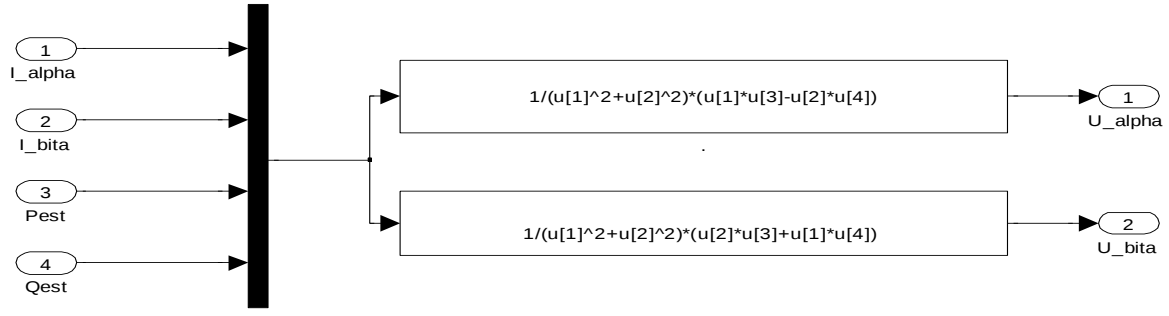


Fig.III.9 Schéma bloc d'estimation de la tension de ligne.

III.2.2.4 Détermination du secteur

D'après l'équation (II.15), on peut déterminer le secteur du travail, sachant que :

$$\theta = \text{Arctg}\left(\frac{V_\alpha}{V_\beta}\right) \quad (\text{III.15})$$

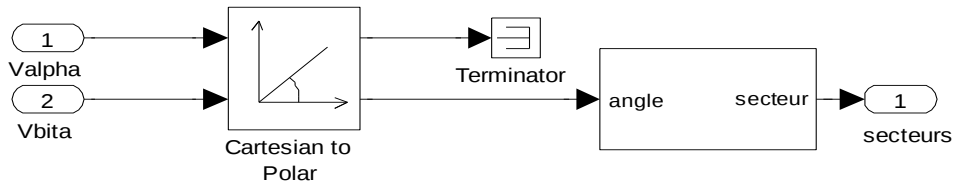


Fig.III.10 Schéma bloc de détermination du secteur.

III.2.2.5. Régulateur des puissances

La puissance active est estimée, à partir des courants de la ligne, la tension continue et les états des interrupteurs, puis comparée sa référence, qui est fournie par le bloc de contrôle de la tension continue, L'erreur est corrigée par un régulateur à hystérésis, ce dernier est défini par l'expression suivante :

$$p_{ref} - p_{ext} > h_p \Rightarrow S_p = 1 \quad (\text{III.16})$$

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

De même pour la puissance réactive, sauf que la référence est fixée à zéro. Le régulateur à hystérésis du réactive fonctionne de la manière suivant :

$$q_{ref} - q_{ext} > h_q \Rightarrow S_q = 1 \quad (\text{III.16})$$

$$p_{ref} - p_{ext} < -h_q \Rightarrow S_q = 0$$

Avec : h_q : Bande d'hystérésis pour la puissance active.

h_q : Bande d'hystérésis pour la puissance réactive.

La figure(III.11) montre le bloc de contrôle des puissances, cette boucle de régulation agit de telle sorte que l'erreur correspondante à la puissance active puisse être restreinte dans un bande l'erreur de la puissance réactive, avec une bande de largeur $2h_q$.

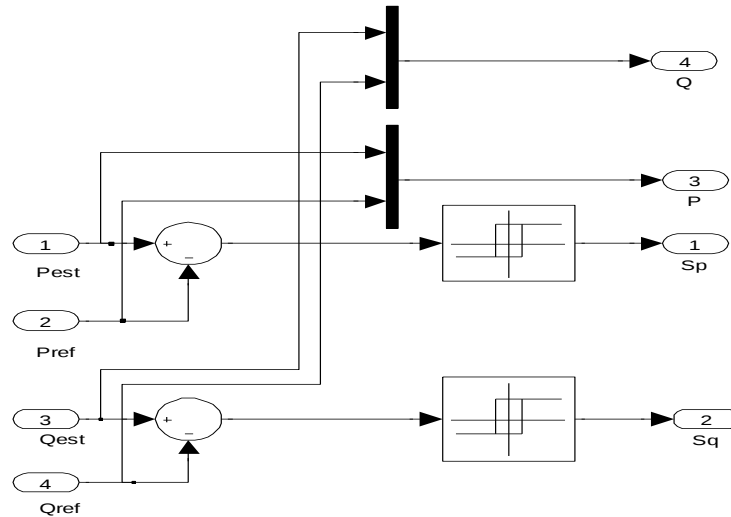


Fig.III.11 Schéma bloc de régulation des puissances active et réactive.

III.3 Résultats de simulation

La simulation du système global (source, charge, convertisseur) est effectuée sous l'environnement *Matlab/Simulink* en utilisant également la *toolbox* « *SimPowerSystem* ». Les caractéristiques de ce convertisseur sont rassemblées dans le tableau.III.1.

Tableau. III.1 Paramètres électriques du circuit de puissance.

R_r : Résistance de la ligne	0.2 [Ω]
L_r : Inductance de la ligne	11.5 [mH]
C : capacité de filtrage	4700 [μF]
R : Résistance de la charge	100 [Ω]
V_m : Tension d'alimentation	220 [V]
U_{dc} : Tension continue de référence	750 [V]
F : Fréquence de la source	50 [Hz]

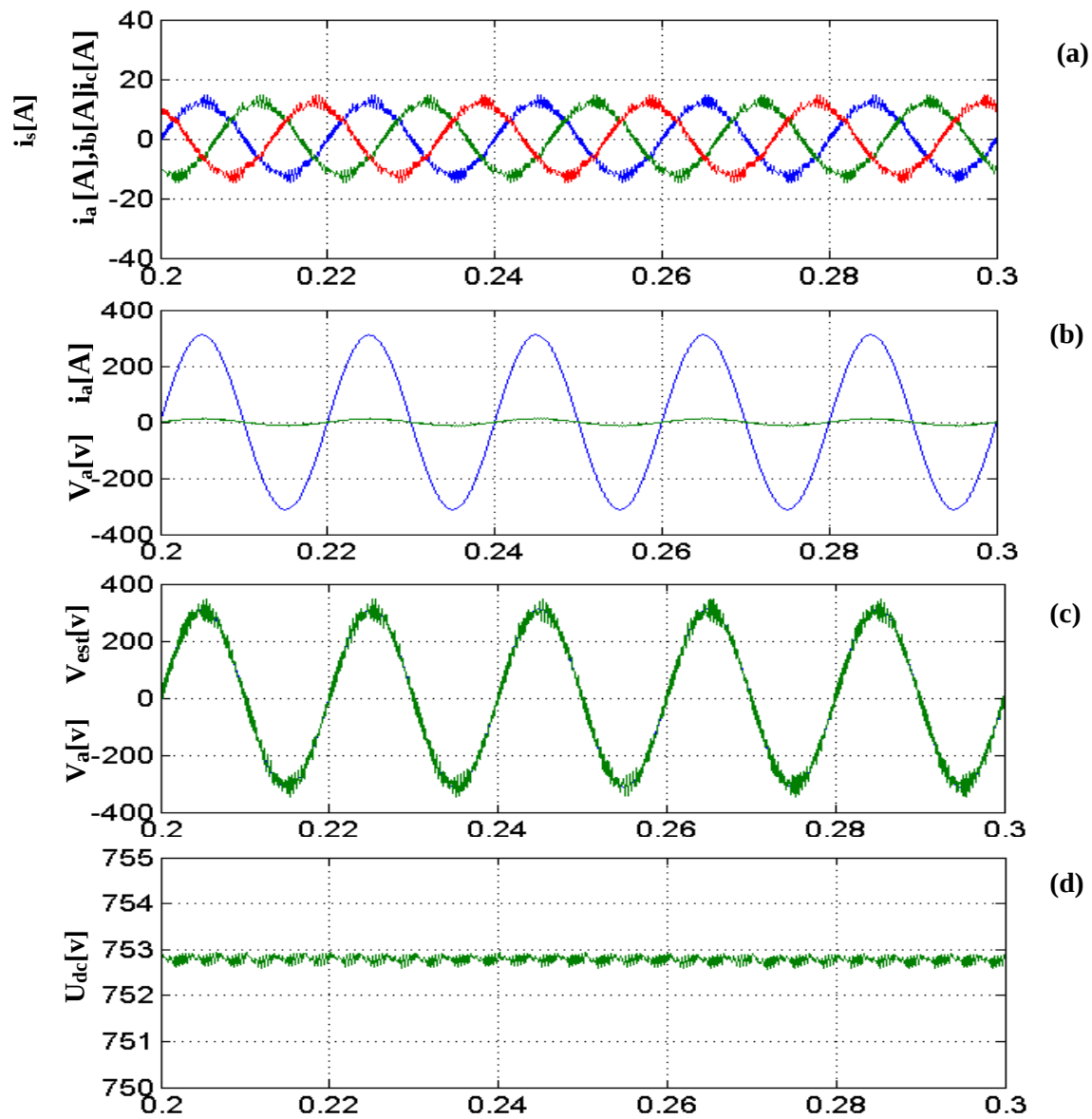


Fig.III.12 Résultats en régime permanent de la DPC,
 (a)- les trois courants de ligne, (b)- courant et tension de ligne,
 (c)-tension estimée (d)-tension continue

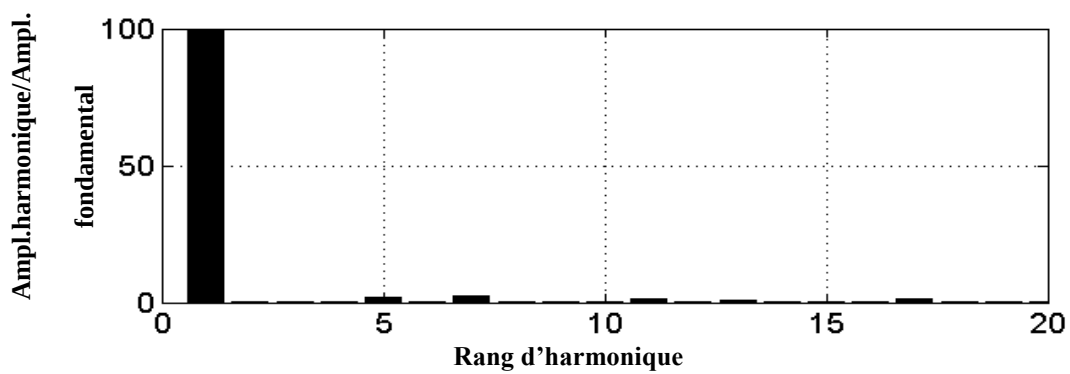


Fig .III.13 spectre d'harmonique de i_a .

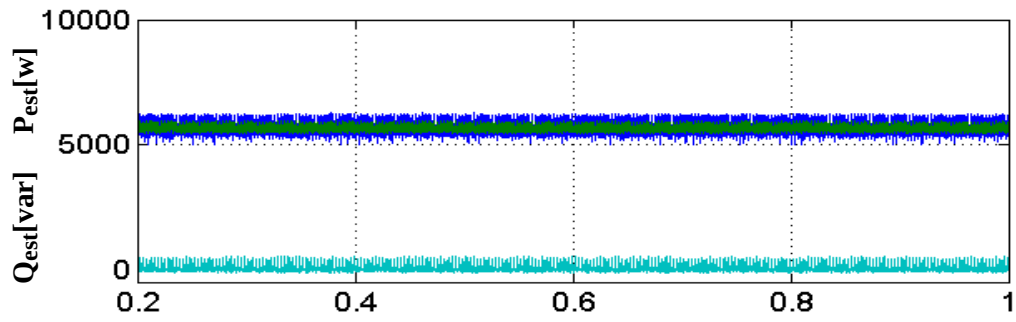


Fig.III.14 Les allures des puissances active et réactive.

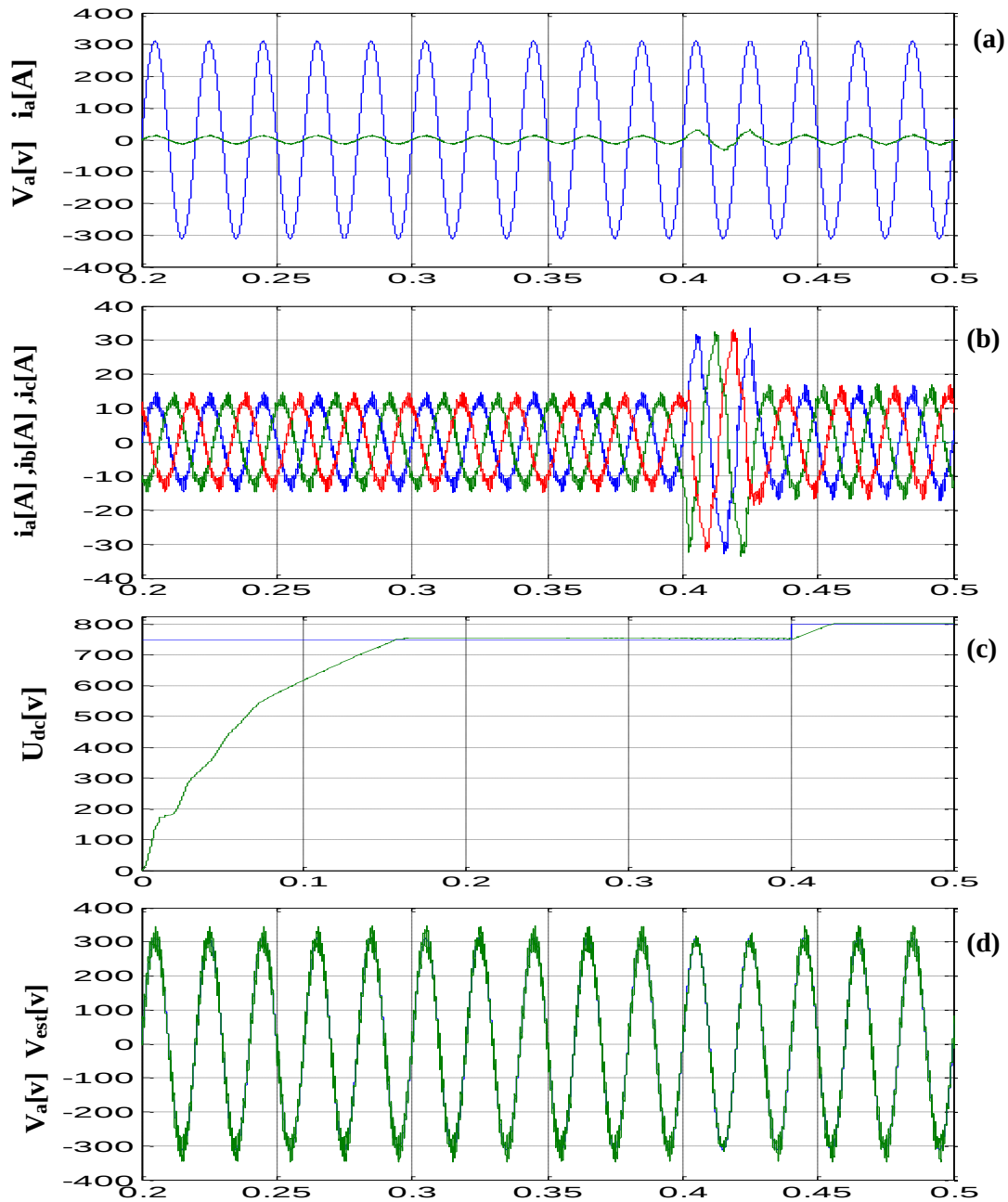


Fig.III.15 Résultats en régime permanent de la DPC,
(a)- courant et tension de ligne, (b)- les trois courants de ligne,
(c)-tension continue,(d)-tension estimée

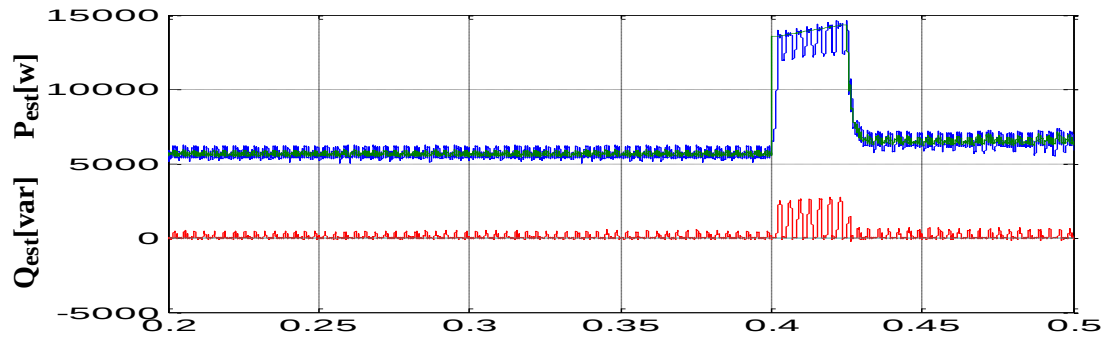


Fig.III.16 Les allures des puissances active et réactive.

III.4 Interprétation des résultats

1. La figure.III.12 montre les résultats de simulation en régime permanent du redresseur à MLI contrôlé par la DPC sous un facteur de puissance unitaire et pour une charge résistive. Ces résultats sont obtenus pour une alimentation purement sinusoïdale et équilibrée.

Nous pouvons constater que les courants de ligne (Fig.III.12(a)), après un transitoire, deviennent sinusoïdaux et présentent ainsi un taux de distorsion de $THDi = 3.91\%$ et sont en phase avec les tensions du réseau. Nous remarquons qu'une bonne estimation de la tension de ligne sur la figure III.12(c). En ce qui concerne la tension du bus continu, elle se stabilise vers sa référence après un transitoire. Cette technique de commande permet d'obtenir une meilleure qualité d'énergie, ceci peut être confirmé par les allures des puissances active et réactive qui suivent leurs références avec la précision voulue, en ne présentant aucune perturbation (Fig.III.13).

2. Les figures (III.15) et (III.16) montrent la réponse du redresseur commandé par DPC lors d'un changement de la référence de la tension $U_{dc} = 750V$ à $800V$ à $t = 0.4s$. Les mêmes conditions que lors de l'essai en régime permanent sont maintenues. On constate que lorsque la tension continue atteint la nouvelle référence, la puissance active et le courant de ligne augmentent. La tension et le courant du réseau sont en phase, et donc le facteur de puissance est unitaire.

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons tout d'abord présenté la modélisation du système étudié afin de simuler l'ensemble (Réseau/Convertisseur/Charge).

Ensuite, nous avons présenté les résultats de simulations. Ils mettent en évidence que cette stratégie de commande présente des performances comme il a été bien démontré par une amélioration des allures des puissances instantanées active et réactive sont parfaitement réglées vis-à-vis de leurs références.

Conclusion Générale

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre de la recherche de nouvelles solutions qui permettent l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique de la source vers un système de récepteurs qui présente une non linéarité de la charge. Nous nous sommes intéressé aux principes de fonctionnement et de contrôle d'un convertisseur AC/DC associé à un réseau électrique équilibré contrôlé par la technique de commande directe de puissance.

On a opté pour la commande directe de puissance qui est une méthode de commande des redresseurs à MLI basée sur le contrôle directe des puissances active et réactive instantanée. Contrairement aux méthodes traditionnelles qui nécessitent une boucle de régulation de courant, cette technique de contrôle des convertisseurs AC/DC sans capteur repose sur l'estimation de la tension de ligne. En utilisant la DPC, on peut contrôler l'échange d'énergie entre le redresseur et le réseau électrique donc on peut travailler avec un facteur de puissance unitaire en imposant la puissance réactive à une valeur nulle.

Dans une première phase de notre étude, nous avons montré l'influence des harmoniques sur le réseau électrique, cette influence est clairement vu en plusieurs points, par exemple la dégradation du facteur de puissance et l'échauffement des appareils électriques. On a également cité les solutions pouvant remédier à ce problème de pollution harmonique, particulièrement le redresseur à MLI.

Dans la deuxième partie du travail nous avons présenté une étude théorique sur une nouvelle technique de commande nommée control direct de puissance basée sur l'estimation de la tension de ligne.

Après une modélisation de l'ensemble du système de puissance avec sa commande, nous avons mis au point une simulation avec le logiciel *MATLAB/SIMULINK*. Les résultats ont montré les performances dynamiques de cette commande. L'analyse spectrale du courant de ligne montre que tous les harmoniques de rang faibles sont bien atténués ce qui donne un THD inférieur à 5 %.

Comme perspectives, nous pouvons proposer la continuité des études suivantes :

- Utilisation d'autres nouvelles stratégies développés récemment telle que: DPC flou ; commande prédictive ;
- Application la technique DPC sur les filtres à base des onduleurs ;
- Réalisation pratique pour valider notre modèle.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] A.Thameur "Application du Multiniveaux au Filtrage Actif des Réseaux", *Thèse De Doctorat*, Ecole Nationale Polytechnique, Novembre 2010.
- [2] S.Bouchakour,"Commande directe de puissance d'un convertisseur AC/DC. Triphasé sans capteurs de Tension", *Mémoire Magister*, Ecole Militaire Polytechnique, 2005.
- [3] L.Belhadji, "Commande directe de puissance basée sur le flux virtuel d'un convertisseur AC/DC triphasé sans capteur de tension", *Mémoire de Magister*, Ecole Militaire Polytechnique, 2007
- [4] M.Shafiee Koor,"Amélioration de la qualité de l'énergie à l'aide de compensateurs actifs. Série, parallèle ou conditionneurs unifiés de réseaux électrique", *Thèse de Doctorat*, Ecole polytechnique de l'université de Nantes, Nantes, 2006.
- [5] A.Bouafia, "Techniques de commande prédictive et floue pour les systèmes d'électronique de puissance: application aux redresseurs à MLI", *Thèse De Doctorat*, Université Ferhat Abbas - Sétif ,Octobre 2010.
- [6] L.Benchaita,"Etude, par simulation numérique et expérimentation d'un filtre actifs parallèle à structure courant avec une nouvelle méthode de commande", *Thèse de doctorat*, de l'université Henri Poincaré, Nancy 1, 1998.
- [7] Ion Etx Berria-Otadui. "Les systèmes de l'électroniques de puissance dédiés à la distribution électrique application à la qualité de l'énergie ",*Thèse doctorat de INSTITUT National Polytechnique de Grenoble*, 2003.
- [8] T. Deflandre, P.Mawas "Harmoniques sur les réseaux électriques ", Edition . Eyrolles, 1998.
- [9] Y.Abdelli, "Etude et commande des convertisseurs statiques multifonctions en vue de l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique ",*Thèse de doctorat*, Université Nantes, Nantes,2005.
- [10] A. Mohamed Muftah, "Structure et stratégies de commande des filtres actifs parallèles et hybrides avec validations expérimentales ", *Thèse de doctorat*, Université Henri Poincaré, Nancy, 2008.
- [11] G.Oole, P.Ladooux,"Système didactique Compensateur d'harmoniques et de puissance réactive ", Publication Reselec, 2002.
- [12] Theodore Wildi, "électrotechnique ". 3^{ème} Edition, 2000.

- [13] T. Noguchi, H.Tomiki, S. KONDO, and I.Takahashi,"Direct power control of PWM converter without Power-Source voltage ", IEEE Trans-Ind application , vol. 34, pp. 473/ 479 ,1998.
- [14] S.Hansen, M Malionowski; "Sensorless control Strategy for PWM rectifier". IEEE,2000.
- [15] A. Chaoui, "Filtrage actif triphasé pour charges non linéaires", *Thèse de Doctorat*, Université Ferhat Abbas – Sétif, Octobre 2010.
- [16] M.Malinowski , Mp Raz Imierkowski, S.Hansen, F.Blabjer, and G.Dmaques , "virtual flux based direct power control of three phase PWM rectifier", IEEE. Trans.Ind.applicat, 2001.
- [17] T.Ghennem."Etude et réalisation d'un compensateur actif de puissance commandé par DSP ", *Thèse Magister* : EMP ALGER, 2005.
- [18] T.Ohnishi."Three_phase PWM Converter/Inverter by Means of instantaneous. Active and reactive power control", To kushima .Jappen, 1991.
- [19] M.Malinowski, Mp.Kazwerkovski,"simulation study of virtual Flux Based direct power control for Three-Phase PWM rectifier" Warsawa-Poland.
- [20] Y.A. Chapuis, "Contrôle direct du couple d'une machine asynchrone par l'orientation de son flux Statorique " *Thèse Doctorat* .INP Grenoble .1996 .