

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



Université Dr. Tahar Moulay de Saïda  
Faculté de la Technologie  
Département d'Electrotechnique



## Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme de

**Master (LMD)**

**Spécialité : ELECTROTECHNIQUE INDUSTRIELLE**

**Filière : ELECTROTECHNIQUE**

Intitulé :

**Commande directe de puissance d'un redresseur à MLI  
alimenté par un réseau déséquilibré**

Présenté par :

**NASRI Salah eddine  
MAZARI Adel**

Devant le jury composé de :

**Dr. M. RACHEDI**

Président

**Dr. T. MOHAMMED CHIKOUCHE**

Encadreur

**Pr. K. HARTANI**

Examineur

Soutenu le 08/11/2020  
Promotion 2019-2020

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## *Remerciements*

Alors que nous franchissons nos dernières étapes dans la vie universitaire, nous devons adopter une position qui rappelle les années que nous avons passées dans son espace avec nos estimés professeurs, qui nous ont donné beaucoup d'efforts pour faire des efforts pour construire la prochaine génération.

Après avoir remercié le Créateur Tout-Puissant, qui m'a accordé cette bénédiction et ce moment ... La responsabilité morale me motive et la reconnaissance du mérite me pousse à offrir mes sincères remerciements à mon professeur [Dr.T.Mohammed Chikouche] qui ne m'a épargné aucun effort.

Aux membres du comité qui ont accepté ce modeste effort de ma part et à tous ceux qui m'ont aidé à accomplir ce travail.

# Dédicaces

Dans de tels moments, le stylo s'arrête pour réfléchir avant de dégrader les lettres pour les combiner en mots que les lettres sont éparpillées, et en vain d'essayer de les regrouper en de nombreuses lignes qui passent par l'imagination, ne nous laissant au final que quelques souvenirs.

Je dédie ma médaille de fin d'études à:

Qui m'a donné tout ce qu'il possédait pour que je puisse réaliser ses espérances pour lui. A ceux qui me poussaient à atteindre le but désiré de ma première école de vie, mon cher père, que Dieu prolonge sa vie.

A celle qui a donné à son plaisir sincère toute la tendre et la tendresse à celle qui a été patiente avec tout. Celle qui a pris soin de moi était le droit de prendre soin de moi et a été mon soutien dans la vie et sa revendication de succès m'a suivi un pas dans mon travail, la source de la tendresse, ma mère, est l'ange le plus cher de cœur et de yeux Que Dieu la récompense bien.

À qui j'ai partagé toute ma vie avec mes frères qui ont partagé avec moi le fardeau de la vie.

À mes amis, que je chéris et que je connais et à la chose la plus incroyable que j'ai rencontrée dans ma vie.

Au plus merveilleux du corps dans toutes ses significations... J'ai eu du soutien et de la générosité... Ils m'ont beaucoup offert en images telles que: la patience ... l'espoir ... et l'amour ... je ne dirai pas merci, mais je vivrai toujours merci avec vous ...Imane

Au poussin Farouk ...

SALAH EDDINE

# Dédicaces

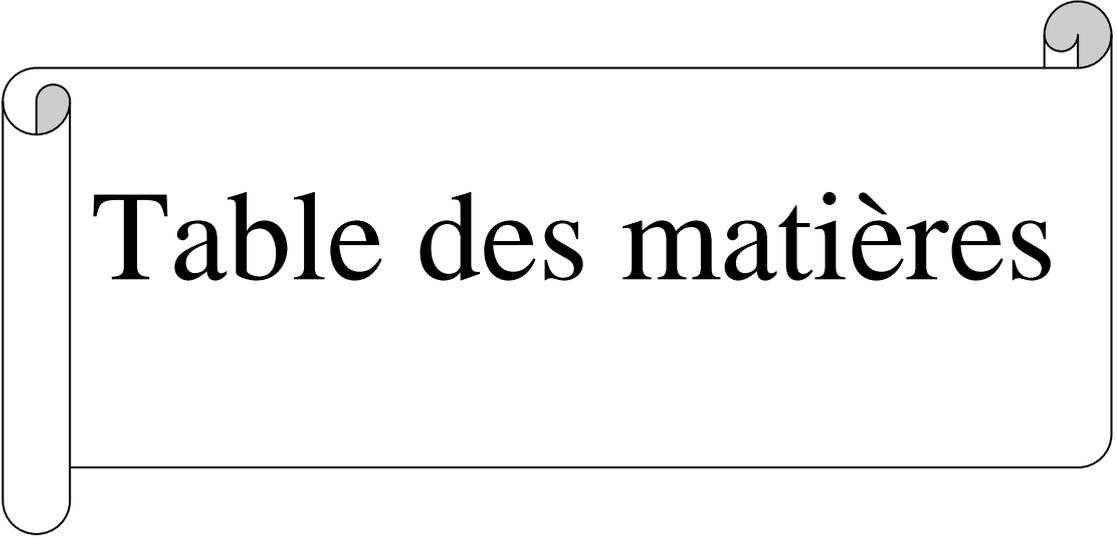
J'ai levé mon chapeau pour dire adieu aux dernières années.

À mon cher père, qui s'est fatigué et a travaillé pour voir notre sourire.

-À ma mère, qui a passé sa vie pour me voir dans la fierté de la santé et du bonheur, elle mérite d'être donnée par ma joie, mais ma vie. Merci, ô chose la plus précieuse que j'ai.

Je dédie mon diplôme à mes frères, mes liens et toute ma famille, en particulier mes amis qui étaient avec moi pendant mon bonheur et mon diplôme.

À toutes les personnes pour qui j'apporte amour et appréciation ...



# Table des matières

# Table des matières

Remerciements	
Dédicaces	
Table des matières .....	i
Liste des figures .....	iv
Liste des tableaux.....	v
Liste des notations et symboles .....	vi
<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>

## **CHAPITRE 1 : Modélisation et commande VOC du redresseur à MLI triphasées**

<b>1.1 Introduction.....</b>	<b>4</b>
<b>1.2 Perturbations produites par les convertisseurs AC/DC à commutation Naturelle .....</b>	<b>5</b>
1.2.1 Redresseurs non commandés .....	5
1.2.2 Redresseurs semi-commandés .....	5
1.2.3 Redresseurs commandés .....	5
<b>1.3 Redresseurs à MLI.....</b>	<b>6</b>
1.3.1 Topologies de base.....	6
1.3.1.1 Redresseur à MLI triphasé de tension .....	7
1.3.1.2 Redresseur à MLI triphasé de courant.....	7
1.3.2 Description du circuit de puissance d'un redresseur MLI.....	8
1.3.3 Les applications du redresseur à MLI .....	8
1.3.4 Modes d'opération redressement/régénération.....	8
<b>1.4 Modélisation du circuit de puissance .....</b>	<b>9</b>
<b>1.5 Commande VOC du convertisseur AC-DC.....</b>	<b>12</b>
1.5.1 Structure d'orientation .....	12
1.5.2 Régulation de la tension du bus continu.....	12
<b>1.6 Résultats de simulation .....</b>	<b>13</b>
1.6.1 Fonctionnement en régime normale.....	13
1.6.2 Application d'une diminution de tension avec une variation de la charge.....	15
<b>1.7 Conclusion .....</b>	<b>17</b>

---



---

## **CHAPITRE 2 : Commande DPC du redresseur à MLI avec une nouvelle table de commutation**

<b>2.1 Introduction.....</b>	<b>18</b>
<b>2.2 Contrôle direct de puissance du redresseur triphasé à MLI en utilisant une nouvelle table de commutation .....</b>	<b>19</b>
2.2.1 Principe de la DPC avec une nouvelle table de commutation .....	19
2.2.2 Expressions des puissances instantanées.....	20
2.2.3 Estimation de la tension du réseau.....	20
2.2.4 Détermination du secteur .....	21
<b>2.3 Etude des variations des puissances instantanées .....</b>	<b>22</b>
<b>2.4 Sélection du vecteur tension avec la nouvelle table de commutation .....</b>	<b>23</b>
<b>2.5 Résultats de simulation .....</b>	<b>25</b>
<b>2.6 Conclusion .....</b>	<b>29</b>

## **CHAPITRE 3 : Contrôle DPC du redresseur à MLI sous un réseau déséquilibré**

<b>3.1 Introduction.....</b>	<b>30</b>
<b>3.2 Etude d'un réseau déséquilibré .....</b>	<b>31</b>
3.2.1 Origine du déséquilibre.....	31
3.2.2 Conséquences néfastes du déséquilibre.....	31
3.2.3 Composantes symétriques d'un système triphasé déséquilibré .....	32
3.2.4 Synthèse des composantes symétriques .....	33
<b>3.3 Modèle du redresseur MLI sous un réseau déséquilibré .....</b>	<b>34</b>
<b>3.4 Contrôle direct de puissance du redresseur triphasé à MLI sous un réseau déséquilibré .....</b>	<b>36</b>
3.4.1 Principe du contrôle direct de puissance .....	36
3.4.2 Principe de l'annulation de l'oscillation de la puissance active (APOC).....	37
3.4.3 Table de commutation de la nouvelle DPC.....	38
<b>3.5 Résultats de simulation .....</b>	<b>41</b>
<b>3.6 Conclusion .....</b>	<b>47</b>
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>48</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>50</b>



*Liste des figures*

## *Liste des figures*

### **Liste des figures du chapitre 1**

<b>Figure 1.1</b>	Redresseur à MLI structure tension	7
<b>Figure 1.2</b>	Redresseur à MLI structure courant	7
<b>Figure 1.3</b>	Schéma du redresseur à MLI triphasé	8
<b>Figure 1.4</b>	Circuit équivalent du redresseur à MLI à absorption de courant sinusoïdal et principe du transit bidirectionnel de la puissance active	9
<b>Figure 1.5</b>	Schéma bloc de la régulation de la tension de sortie $v_{dc}$	13
<b>Figure 1.6</b>	Résultats de simulation du système en fonctionnement normal	15
<b>Figure 1.7</b>	Résultats de simulation du système avec une variation de charge	17

### **Liste des figures du chapitre 2**

<b>Figure2.1</b>	Contrôle DPC du redresseur à MLI avec la structure proposée	20
<b>Figure2.2</b>	Secteurs et vecteurs des tensions du redresseur dans le plan $\alpha - \beta$	21
<b>Figure2.3</b>	Variation de la puissance active et réactive pour divers vecteurs de tension du redresseur	24
<b>Figure2.4</b>	Résultats de simulation de la structure du contrôle DPC avec nouvelle table de commutation	28

### **Liste des figures du chapitre 3**

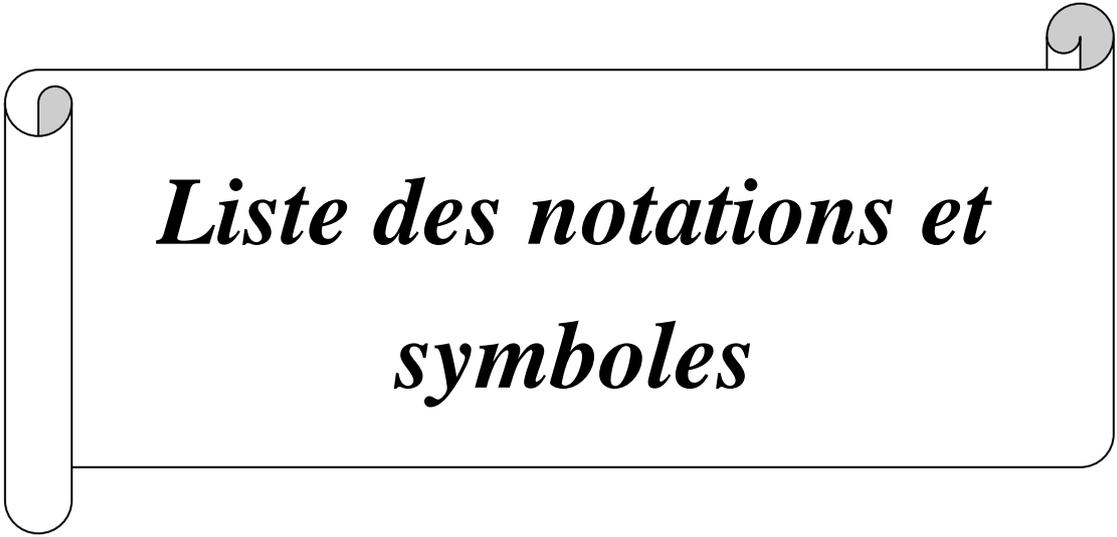
<b>Figure 3.1</b>	Décomposition d'un système de tensions déséquilibrées en la somme de trois Systèmes de tensions triphasées équilibrées	33
<b>Figure 3.2</b>	Contrôle DPC du redresseur à MLI dans des conditions de réseau déséquilibrée	36
<b>Figure 3.3</b>	Secteurs et vecteurs des tensions du redresseur dans le plan $\alpha - \beta$	37
<b>Figure 3.4</b>	Variation de la puissance active et réactive pour divers vecteurs de tension du redresseur	40
<b>Figure 3.5</b>	Résultats de simulation de la structure du contrôle DPC conventionnelle	44
<b>Figure 3.6</b>	Résultats de simulation de la structure du contrôle DPC proposée	46



*Liste des tableaux*

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1.1</b>	Paramètres du système	13
<b>Tableau 2.1</b>	Position du vecteur tension dans l'intervalle $[0, 2\pi]$	22
<b>Tableau 2.2</b>	Signes de variation des puissances active et réactive pour les 12 secteurs	24
<b>Tableau 2.3</b>	La nouvelle table de commutation	25
<b>Tableau 3.1</b>	Signes de variation des puissances active et réactive pour les 6 secteurs	40
<b>Tableau 3.2</b>	Table de commutation du déséquilibre	41



***Liste des notations et  
symboles***

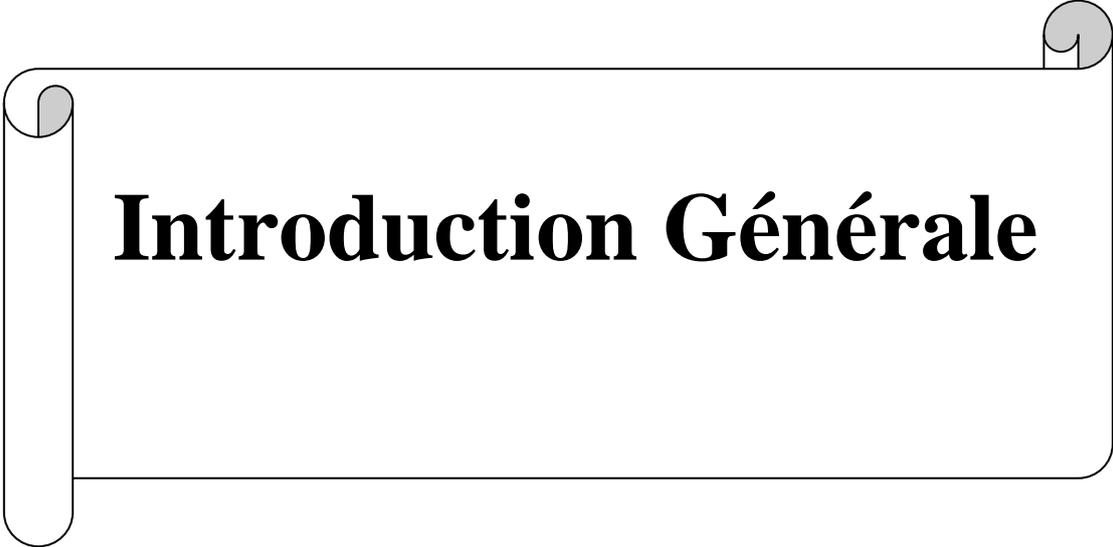
# Liste des notations et symboles

$v_a, v_b, v_c, e_a, e_b, e_c$	Les tensions simples du réseau triphasé d'alimentation [V]
$v_{ab}, v_{bc}, v_{ca}$	Les tensions composées du réseau triphasé d'alimentation [V]
$v_{ra}, v_{rb}, v_{rc}$	Les tensions simples à l'entrée du redresseur dans le repéré $(a, b, c)$ [V]
$v_{rd}, v_{rq}$	Les tensions simples à l'entrée du redresseur dans le repéré tournant $(d, q)$ [V]
$v'_{rd}, v'_{rq}$	Les tensions simples de références à l'entrée du redresseur dans le repéré tournant $(d, q)$ [V]
$V_M$	L'amplitude des tensions de réseau [V]
$v_i$	Le vecteur de tension [V]
$v_{dc}$	La tension du bus continu.[V]
$v_{dc}^*$	La tension du bus continu de référence [V]
$v_d, v_q$	Les tensions simples du réseau d'alimentation dans le repère tournant $(d, q)$ [V]
$v_\alpha, v_\beta, e_\alpha, e_\beta$	Les tensions de ligne dans le repère $(\alpha, \beta)$ [V]
$e'_\alpha, e'_\beta$	Les valeurs déphasées des tensions du réseau déséquilibré [V]
$e_d^+, e_d^-, e_q^+, e_q^-$	Séquences positive et négative de la tension déséquilibrée dans le repère tournant $(d, q)$ [V]
$e_\alpha^+, e_\alpha^-, e_\beta^+, e_\beta^-$	Séquences positive et négative de la tension déséquilibrée dans le repère $(\alpha, \beta)$ [V]
$i_a, i_b, i_c$	Les courants de ligne du réseau triphasé d'alimentation [A ]
$i_d, i_q$	Les tensions de ligne dans le repère tournant $(d, q)$ [A]
$i_\alpha, i_\beta$	Les courants de ligne dans le repère $(\alpha, \beta)$ [A]
$i'_\alpha, i'_\beta$	Les valeurs déphasées des courants du réseau déséquilibré [A ]
$i_d^+, i_d^-, i_q^+, i_q^-$	Séquences positive et négative du courant déséquilibré dans le repère tournant $(d, q)$ [A ]

$i_{\alpha}^{+}, i_{\alpha}^{-}, i_{\beta}^{+}, i_{\beta}^{-}$	Séquences positive et négative du courant déséquilibré dans le repère $(\alpha, \beta)$ [A]
$i_{dc}$	Courant de sortie redressé [A]
$i_c$	Courant dans le condensateur [A]
$i_L$	Courant dans la charge [A]
$K_i$	L'interrupteur du haut
$s_{\alpha}, s_{\beta}, s_c$	Etats de commutation du redresseur
$s_d, s_q$	Etats des interrupteurs du redresseur dans le repère tournant $(d, q)$
$L$	Inductance totale de la ligne réseau-redresseur [H]
$R$	Résistance de la ligne réseau-redresseur [ $\Omega$ ]
$C$	Condensateur du redresseur [F]
$R_L$	Résistance de la charge [ $\Omega$ ]
$\omega$	La pulsation du réseau [rd/s]
$\theta$	Position électrique [rd]
$\theta_n$	Nombre des secteurs
$S$	Puissance apparente [VA]
$P$	Puissance active instantanée [W]
$Q$	Puissance réactive instantanée [VAR]
$\Delta p$	L'erreur de la puissance active [W]
$\Delta q$	L'erreur de la puissance réactive [VAR]
$\frac{dp}{dt}, \frac{dq}{dt}$	Variation des puissances active et réactive
$H_q, H_p$	Les écarts des régulateurs à d'hystérésis
$s_p, s_q$	Sorties des deux contrôleurs a hystérésis
$p^*, q^*$	Références de la puissance active et réactive [W], [VAR]
$K_{p,Id}, K_{i,Id}$	Composantes proportionnelle/ intégrale du correcteur PI du courant $i_d$
$K_{p,Iq}, K_{i,Iq}$	Composantes proportionnelle/ intégrale du correcteur PI du courant $i_q$

# Glossaire

<b>THD</b>	Taux de distorsion harmonique (Total harmonic distortion)
<b>FP</b>	Facteur de puissance
<b>MLI</b>	Modulation de largeur d'impulsions (PWM : Pulse with modulation)
<b>PI</b>	Proportionnel et intégral
<b>IP</b>	Intégral et Proportionnel
<b>AC/DC</b>	Conversion alternative /Continue
<b>VOC</b>	Voltage oriented Control
<b>DPC</b>	Contrôle directe de puissance (Direct control power)
<b>NEW-DPC</b>	Contrôle directe de puissance avec une nouvelle table de commutation
<b>SVM</b>	Modulation vectorielle (space vector modulation)
<b>APOC</b>	Principe de l'annulation de l'oscillation de la puissance active



# **Introduction Générale**

## Introduction Générale

Ces dernières années, le domaine de l'électronique de puissance s'est développé considérablement en offrant un potentiel énorme pour la conversion d'énergie électrique. La recherche dans ce domaine considère plusieurs aspects, notamment les topologies des convertisseurs, les structures et les performances des interrupteurs de puissance et ainsi que les techniques de commande.

La plupart des redresseurs triphasés sont réalisés par des circuits à pont de diodes et capacité de lissage. Ce montage a l'avantage de sa simplicité et de son coût faible. Cependant, un redresseur à diodes est unidirectionnel pour l'écoulement de puissance, un faible facteur de puissance, et une distorsion des courants d'entrés. En conséquence, le redresseur à modulation de la largeur d'impulsion (PWM rectifier en anglais) est une solution intéressante de plus en plus utilisée dans les applications industrielles, et présente les avantages suivants:

- La puissance est bidirectionnelle (réversible);
- Faible distorsion harmonique du courant du réseau ;
- Facteur de puissance presque unitaire;
- Contrôle de la tension du bus continu;
- Réduction des dimensions du condensateur du bus continu.

Les redresseurs MLI sont appliqués comme convertisseurs AC/DC/AC ou comme système de puissance de distribution HVDC.

Le développement des méthodes de contrôles des redresseurs MLI est possible grâce au développement des dispositifs semi-conducteurs et aux techniques numériques, qui permet un fonctionnement rapide avec coût réduit. Ce qui offre la possibilité de l'implémentation des algorithmes de contrôle sophistiqués. Un contrôle approprié peut provoquer l'amélioration des performances du redresseur et la réduction des composants passifs.

Différentes techniques de contrôle ont été proposées ces dernières années pour ce type de redresseurs. La technique connue sous le nom VOC (voltage-oriented control) garantit une performance dynamique et statique élevée par l'intermédiaire de boucle de contrôle des courants internes. Cependant, ces performances dépendent de la qualité de la stratégie de contrôle de courant choisie. Autre technique basée sur le contrôle directe de puissance active et réactive connue sous le nom de contrôle direct de puissance (direct power control (DPC)) utilise une table de commutation appropriée. Par contre, ces deux stratégies ne donnent pas un courant sinusoïdal lorsque la tension du réseau est perturbée.

En exploitation normale, la qualité de l'électricité se réduit principalement à la qualité de l'onde de la tension délivrée. Les principaux phénomènes pouvant l'affecter sont:

- Les creux de tensions de courtes ou longues durées,
- Les harmoniques,
- Le déséquilibre.

Les principaux paramètres caractérisant une tension triphasée sont : la fréquence, l'amplitude ; la forme d'onde qui doit être sinusoïdale, la symétrie du système caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et de leurs déphasages relatifs.

Diverses méthodes ont été proposées pour atténuer l'influence du déséquilibre du réseau mais elles sont généralement compliquées et nécessitent une extraction de la séquence positive et négative de la tension et des courants du réseau. Dans ce mémoire nous proposons une nouvelle structure de DPC, qui permet d'obtenir des courants de réseau sinusoïdaux et une puissance active constante sans utiliser l'extraction de séquence compliquée. La simplicité et la robustesse de cette DPC sont atteintes et cela par l'utilisation d'une nouvelle définition de la puissance réactive dans le redresseur MLI. Une nouvelle table de commutation est réalisée qui serait plus adaptée aux tensions de réseau déséquilibrées. L'efficacité de cette nouvelle DPC sous des conditions de réseau déséquilibré est validée par des tests de simulation.

**Le document a été organisé en trois chapitres :**

**Le premier chapitre** sera consacré à des définitions et des généralités sur les redresseurs triphasés à commande MLI. La modélisation du convertisseur AC/DC sera présentée et se portera sur l'application de la stratégie de commande (VOC) en utilisant la modulation de largeur d'impulsion pour le control du redresseur. Des résultats de simulations seront présentés à la fin du chapitre.

Dans **le deuxième chapitre**, nous présenterons le contrôle direct de puissance (DPC) du redresseur à MLI basée sur le contrôle directe des puissances active et réactive instantanées en appliquons une nouvelle table de commutation. Dans ce contexte, notre contribution portera sur l'élaboration d'une nouvelle table de commutation. Avec cette nouvelle table, on a pu assurer un fonctionnement à facteur de puissance unitaire, une bonne régulation de la tension du bus continu et une amélioration de la forme d'onde des courants du réseau. Cette structure sera illustrée dans la fin du chapitre par une série de simulations.

Quant **au troisième chapitre** sera entièrement consacré à la commande DPC du redresseur MLI alimenté par un réseau déséquilibrée en proposant une DPC améliorée, qui prend en

considération la puissance active et une nouvelle puissance réactive comme variables de contrôle. Une nouvelle définition de la puissance réactive sera proposée qui serait adaptée aux tensions de réseau déséquilibrées. Une table de commutation sera établie pour obtenir un contrôle simultané à la fois de la puissance active et de la nouvelle puissance réactive. Comparée la stratégie de DPC utilisant la puissance réactive traditionnelle et sous des conditions de réseau déséquilibré, les résultats de simulation ont montré que la stratégie de DPC proposée est plus robuste, assurant ainsi la stabilité de la tension du bus continu. De bonnes performances sont obtenues en ce qui concerne les courants absorbés qui possèdent une forme quasi-sinusoidale. Les courants et les tensions du réseau sont en phase assurant ainsi un facteur de puissance unitaire. Finalement, une conclusion générale de ce travail ainsi que des perspectives clôturent le document.



# ***CHAPITRE 1***

***Modélisation et commande VOC du  
redresseur à MLI triphasées***

## 1.1 Introduction

Les travaux de recherche concernant les redresseurs à MLI ont connu une croissance rapide au cours de ces dernières années. Ces nouveaux convertisseurs AC/DC sont devenus un domaine de recherche plus attractif et de grand intérêt, pour leurs applications industrielles tels que les variateurs de vitesse, les systèmes HVDC, les filtres actifs, les éoliennes, les systèmes photovoltaïques et d'autres systèmes de production d'énergie renouvelable [Rod-05][Has-12][Liu 08]. Les avantages qu'ils offrent ce type de convertisseur sont : la possibilité de régénération de l'énergie, le contrôle de la tension du bus continu sur une large gamme, l'absorption de courants sinusoïdaux, et la possibilité de fonctionnement avec un facteur de puissance proche de l'unité.

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 avancé 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.

Différents stratégies de contrôle ont été proposées pour contrôler le redresseur, parmi ces stratégies les plus répandues et les plus attractives, il existe deux techniques basée sur le vecteur de tension pour ce type de convertisseur ; le contrôle classique VOC du redresseur qui est identique à la commande vectorielle des machines électriques et le contrôle direct de puissance DPC qui est similaire au contrôle direct de couple des machines électriques.

Dans ce contexte, nous avons présenté dans ce chapitre la structure du redresseur à MLI et sont principe de fonctionnement. La modélisation est une étape fondamentale dans l'analyse d'un dispositif à automatiser, elle consiste à décrire mathématiquement un processus technique d'un système à régler. Dans ce chapitre nous allons présenter aussi la modélisation du redresseur dans les repères  $(a,b,c)$ ,  $(d,q)$  et  $(\alpha,\beta)$  cette modélisation s'appuie sur le formalisme de *Park*, *Concordia* et *Clark*.

Donc l'objectif principal de ce chapitre est d'étudier le circuit de puissance du redresseur à MLI, commandé par la technique (VOC).

## 1.2 Perturbations produites par les convertisseurs AC/DC à commutation Naturelle

Avant l'apparition des convertisseurs statiques de l'électronique de puissance, les courants de magnétisation des transformateurs, des machines électriques et des ballasts constituaient l'essentiel des charges non-linéaires présentes sur le réseau électrique. Mais aujourd'hui, avec le développement de l'électronique de puissance, les convertisseurs statiques deviennent les sources d'harmoniques les plus répandus sur le réseau. Les redresseurs non contrôlés à diodes et contrôlés à thyristors, fonctionnant en commutation naturelle, représentent la charge non-linéaire la plus usitée. Ces convertisseurs sont présents dans de nombreux équipements industriels et domestiques.

Nous citons ci-dessous les applications les plus courantes [Ben-16]:

- Variateurs de vitesse pour moteurs alternatifs et à courant continu,
- Circuit d'excitation des alternateurs,
- Chargeur de batteries,
- Alimentation des systèmes informatiques et audio-visuels,
- Dispositifs d'éclairage de nouvelle génération.

On classe les divers redresseurs en trois catégories :

### 1.2.1 Redresseurs non commandés

Ne comportent que des diodes, ils fournissent une tension moyenne de sortie fixe pour une tension alternative d'alimentation donnée.

### 1.2.2 Redresseurs semi-commandés

Ils comportent des thyristors ou transistor (IGBT, GTO) et des diodes qui empêchent la tension aux bornes de la charge de s'inverser, mais permettent de régler la tension moyenne.

Les redresseurs non commandés et les redresseurs semi-commandés sont appelés des convertisseurs unidirectionnels, car la puissance ne peut circuler que de l'alimentation vers la charge continue.

### 1.2.3 Redresseurs commandés

Ne comportent que des transistors ou thyristors, ils sont appelés des convertisseurs bidirectionnels, car la puissance peut circuler dans les deux sens. Le redresseur en pont de part sa structure représente une charge non-linéaire. À cause de non linéarité de cette charge, le courant absorbé de la source ne sera pas sinusoïdal même si la source de tension est parfaite. Il contient donc une composante fondamentale et des composantes harmoniques. Ces harmoniques de courant circulent dans la source de tension, en même temps qu'ils parcourent

la charge. En ce qui concerne le réseau électrique, ces courants harmoniques vont engendrer une détérioration de l'onde de tension au point de raccordement de la charge au réseau.

### 1.3 Redresseurs à MLI

Ce sont des convertisseurs à modulation de largeurs d'impulsions, utilisant des composants semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture, telles que les transistors *IGBT* (Insulated Gate Bipolar Transistor) ou les thyristors *GTO* (Gate Turn-Off).

L'emploi de cette technique permet non seulement une réduction de la perturbation harmonique en prélevant des courants d'allure sinusoïdale, mais aussi un contrôle des puissances actives et réactives.

#### 1.3.1 Topologies de base

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. Ces dispositifs offrent les avantages suivants :

- le courant et la tension peuvent être modulés (modulation de largeur d'impulsion sou MLI), ce qui produit moins de perturbations harmoniques.
- le facteur de puissance peut être contrôlé.
- 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 :

- Redresseur de tension, où l'inversion de puissance est assurée par l'inversion de la tension.
- Redresseur de courant, où l'inversion de puissance est assurée par l'inversion du courant.

##### 1.3.1.1 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 1.1). Ce redresseur à MLI permet d'atteindre un facteur de puissance très proche de l'unité et régler, via la commande, la direction du flux de l'énergie réactive : absorbée ou fournie [Lad-02].

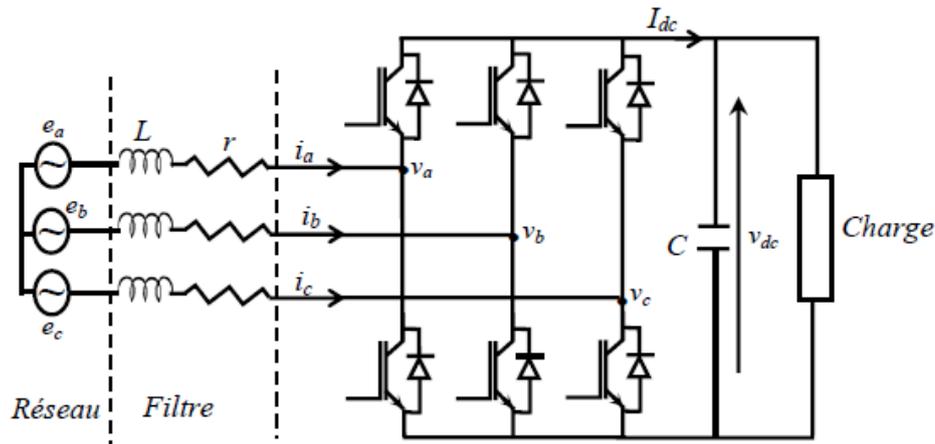


Figure 1.1 : Redresseur à MLI structure tension.

### 1.3.1.2 Redresseur à 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 1.2). L'utilisation des techniques MLI conduit à un courant coté alternatif ayant une pollution harmonique contrôlée [Nia-96].

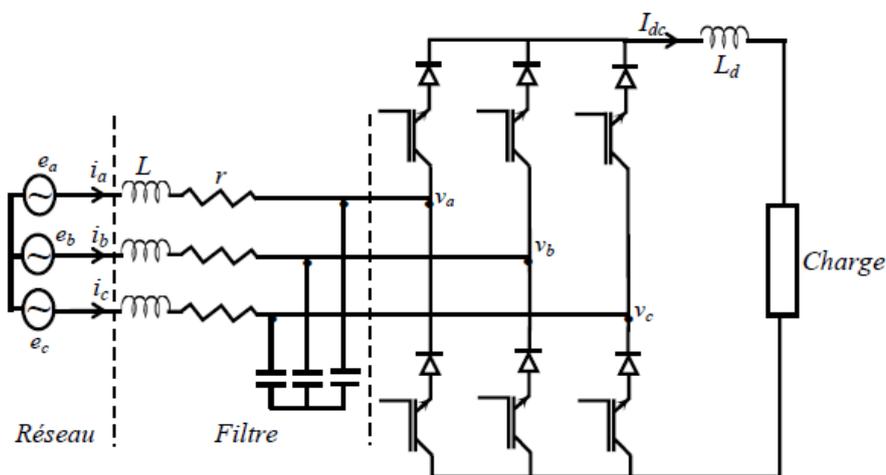


Figure 1.2 : Redresseur à MLI structure courant

### 1.3.2 Description du circuit de puissance d'un redresseur MLI

Largement décrit dans la littérature, les redresseurs MLI sont des onduleurs utilisés à l'envers qui permettent de produire une tension continue à partir d'un réseau alternatif (tension AC polyphasée de fréquence et d'amplitude fixes), comme les redresseurs à diodes munis des filtres, mais en absorbant sur le dit réseau des courants sinusoïdaux, à facteur de puissance unitaire. Ils sont entièrement réversibles.

La partie puissance d'un redresseur à MLI comporte six transistors de puissance avec des diodes en antiparallèle pour assurer la conversion bidirectionnelle de la puissance ainsi que la génération de la MLI. La Figure 1.3 montre le schéma du redresseur MLI triphasé de tension sur lequel est basée notre étude [Har-10].

Il est construit à base des composants semi-conducteurs bidirectionnels (conduisant le courant dans les deux directions grâce aux diodes en antiparallèles) et commandés à l'ouverture et à la fermeture. Il est associé généralement à deux étages passifs l'un du côté continu et l'autre du côté alternatif. L'étage passif du côté alternatif, a comme fonction principale le filtrage. Celui du côté continu a une double fonction, le stockage d'énergie et le filtrage de la tension continue, c'est des condensateurs qui assurent ces fonctionnalités.

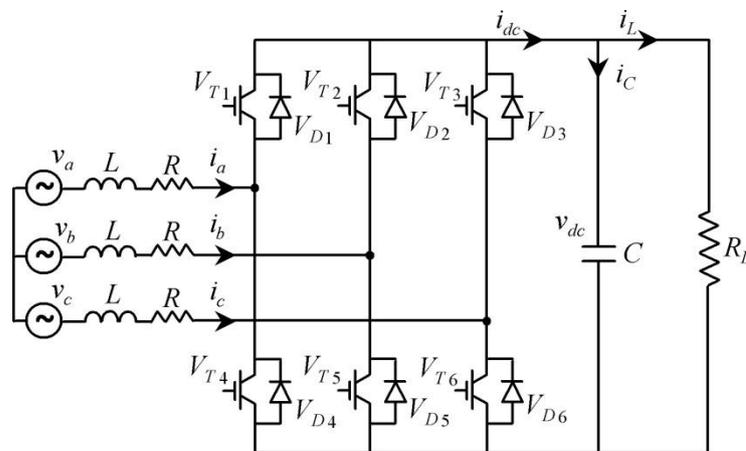


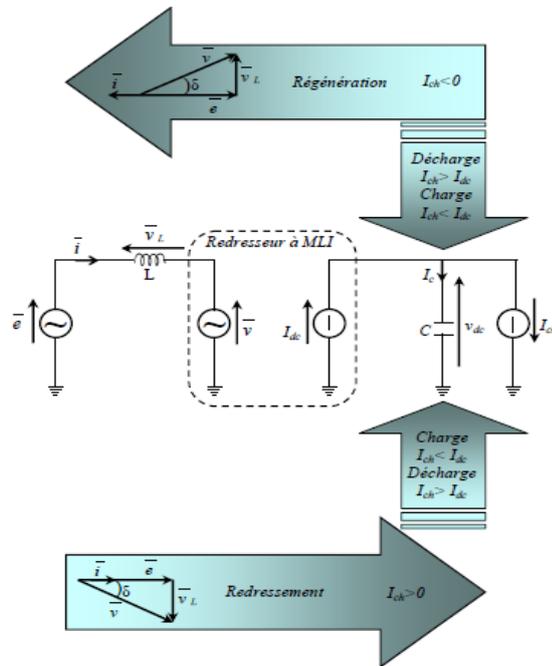
Figure 1.3 : Schéma du redresseur à MLI triphasé.

### 1.3.3 Modes d'opération redressement/régénération

L'avantage principal du redresseur de tension à MLI, par rapport aux autres convertisseurs à absorption de courant sinusoïdal, vient de sa capacité à fonctionner en mode redressement et en mode régénération. En effet, si la charge connectée au bus continu consomme de la puissance active, le convertisseur fonctionne en mode redressement (il prélève au réseau de la puissance active). Si elle produit de la puissance active, le convertisseur fonctionne en mode régénération (il fournit de la puissance active au réseau). Lors de ces deux modes de fonctionnement, la tension du bus continu est contrôlable en échangeant une partie de la puissance transitée pour charger ou décharger le condensateur.

Le schéma équivalent global du redresseur à MLI triphasé à absorption de courant sinusoïdal, illustrant les deux modes de son fonctionnement de redressement et de régénération, le processus de chargement et de déchargement du condensateur et le diagramme de Fresnel correspondant est représenté sur la figure 1.4. Notons que pour un fonctionnement idéal du

redresseur, l'onduleur doit se comporter comme une source de tension côté réseau et comme une source de courant côté charge. Le respect de l'équilibre des puissances nécessite le contrôle des puissances fondamentales active et réactive et de la minimisation de celles dues aux harmoniques. De plus, la composante continue de la tension du bus continu doit être contrôlable quelque soit la nature de la charge connectée en sortie du redresseur, linéaire ou non linéaire, passive ou active [Kot-14].



**Figure 1.4:** Circuit équivalent du redresseur à MLI à absorption de courant sinusoïdal et principe du transit bidirectionnel de la puissance active.

#### 1.4 Modélisation du circuit de puissance

Dans cette étude, on considère le cas idéal d'un redresseur triphasé qui est modélisé par des interrupteurs parfaits à commutation instantanée. A partir du schéma de la Figure 1.1, on représente les trois étages du circuit de puissance de montage étudié, à savoir le réseau, le convertisseur a MLI et la charge, chaque étage sera présenté comme suite :

##### ➤ Réseau

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

$$\begin{cases} v_a = v_m \sin(\omega t) \\ v_b = v_m \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ v_c = v_m \sin(\omega t - 4\pi/3) \end{cases} \quad (1.1)$$

##### ➤ Filtre

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

➤ **Redresseur MLI**

Prenant une seule phase et en appliquant la loi des mailles on aura :

$$\begin{cases} v_a = L \frac{di_a}{dt} + Ri_a + v_{ra} \\ v_b = L \frac{di_b}{dt} + Ri_b + v_{rb} \\ v_c = L \frac{di_c}{dt} + Ri_c + v_{rc} \end{cases} \quad (1.2)$$

Les tensions  $v_{ra}, v_{rb}, v_{rc}$  reliées avec la tension de sortie  $v_{dc}$  par :

$$\begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix} = \frac{v_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

Avec  $S_i$  est l'état de l'interrupteur  $K_i$ , supposé parfait, telle que le  $i^{\text{ème}}$  bras de redresseur

- $S_i = 1$  si l'interrupteur en haut est fermé et l'interrupteur en bas est ouvert,
- $S_i = 0$  si l'interrupteur en haut est ouvert et l'interrupteur en bas est fermé.

Le courant de sortie du redresseur est donné par :

$$i_{dc} = s_a i_a + s_b i_b + s_c i_c \quad (1.4)$$

D'où :

$$\begin{cases} v_a = L \frac{di_a}{dt} + Ri_a + \frac{2s_a - s_b - s_c}{3} v_{dc} \\ v_b = L \frac{di_b}{dt} + Ri_b + \frac{-s_a + 2s_b - s_c}{3} v_{dc} \\ v_c = L \frac{di_c}{dt} + Ri_c + \frac{-s_a - s_b + 2s_c}{3} v_{dc} \end{cases} \quad (1.5)$$

Appliquant la 2<sup>ème</sup> loi de Kirchhoff, on obtient :

$$i_{dc} = i_c + i_L \quad (1.6)$$

Où :

$$i_c = i_{dc} - i_L \Rightarrow c \frac{dv_{dc}}{dt} = s_a i_a + s_b i_b + s_c i_c - \frac{v_{dc}}{R_L} \quad (1.7)$$

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

$$\begin{cases} L \frac{di_a}{dt} = v_a - Ri_a + \frac{s_b + s_c - 2s_a}{3} \cdot v_{dc} \\ L \frac{di_b}{dt} = v_b - Ri_b + \frac{s_a + s_c - 2s_b}{3} \cdot v_{dc} \\ L \frac{di_c}{dt} = v_c - Ri_c + \frac{s_a + s_b - 2s_c}{3} \cdot v_{dc} \\ C \frac{dv_{dc}}{dt} = s_a i_a + s_b i_b + s_c i_c - \frac{v_{dc}}{R_L} \end{cases} \quad (1.8)$$

Ou sous la forme généralisée :

$$\begin{cases} L \frac{di_l}{dt} = v_l - Ri_l \left( s_l - \frac{1}{3} \sum_{k=a,b,c} s_k \right) v_{dc} \cdot l = a, b, c \\ C \frac{dv_{dc}}{dt} = \sum_{k=a,b,c} s_k i_k - \frac{v_{dc}}{R_L} \end{cases} \quad (1.9)$$

Les pertes dans le convertisseur ne sont pas prises en compte pour ce modèle, ce qui ne permet pas d'estimer le rendement du convertisseur [Bou-18].

Avec la transformation dans le repère de Park du système (1.8), on aura

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} = v_d - Ri_d + \omega Li_q - v_{rd} \\ L \frac{di_q}{dt} = v_q - Ri_q + \omega Li_d - v_{rq} \\ C \frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{3}{2} (s_d i_d + s_q i_q) - \frac{v_{dc}}{R_L} \end{cases} \quad (1.10)$$

Avec :

$$\begin{cases} v_{rd} = s_d \cdot v_{dc} \\ v_{rq} = s_q \cdot v_{dc} \end{cases} \quad (1.11)$$

$v_{rd}, v_{rq}$  et  $s_d, s_q$ : sont les tensions d'entrée du redresseur, les états des interrupteurs dans le repère(d.q), respectivement.

$v_d, v_q$  et  $i_d, i_q$ : sont les tensions et courants du réseau dans le repère (d.q).

$\omega$ : est la fréquence angulaire.

La modélisation des éléments constitutifs du redresseur MLI permettra de mettre en œuvre la régulation de la tension continue de sortie et les courants côté alternative [Bou-18].

## 1.5 Commande VOC du convertisseur AC-DC

### 1.5.1 Structure d'orientation

Le système est décrit par les lois de commande :

$$\begin{cases} v_{rd} = -v'_{rd} + \omega L i_q + v_d \\ v_{rq} = -v'_{rq} + \omega L i_d + v_q \end{cases} \quad (1.12)$$

Substituant l'équation (1.12) dans l'équation (1.10), on obtient :

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} = -R i_d + v'_{rd} \\ L \frac{di_q}{dt} = -R i_q + v'_{rq} \end{cases} \quad (1.13)$$

### 1.5.2 Régulation de la tension du bus continu

Parmi les principaux objectifs du redresseur MLI est évidemment d'obtenir une tension continue contrôlée. Le rôle de la boucle de régulation de la tension du bus continu est de maintenir cette tension à une valeur de référence constante, en contrôlant le processus de chargement et de déchargement du condensateur.

La régulation de la tension du bus continu est assurée par une gestion des échanges de puissances entre le réseau et l'élément stockeur d'énergie (DC-Link Capacitor). En effet, réguler revient à régler la puissance fournie à la charge.

La tension  $v_{dc}$  est régulée à travers la boucle externe du bloc. La sortie de son régulateur (IP) est le courant  $i_d^*$  de référence (Il est limité de manière à tenir compte des caractéristiques des IGBT du redresseur). Le courant  $i_d^*$  est comparé à la valeur de courant  $i_d$  issue de la mesure des courants réels. L'erreur sollicite l'entrée du régulateur PI dont la sortie est la tension de référence  $v'_{rd}$ . En parallèle avec cette boucle interne, on trouve une boucle de régulation de  $i_q$ . Le courant de référence  $i_q^*$  (courant réactif absorbé par le redresseur) est maintenu nul. La sortie de régulateur  $i_q$  donne la tension de référence  $v'_{rq}$ . Les deux tensions de références  $v'_{rd}$  et  $v'_{rq}$  sont alors transformée en grandeurs  $v'_{ra}, v'_{rb}, v'_{rc}$ . Les courants,  $i_a, i_b, i_c$  sont mesurées puis transformés et donnent  $i_d$  et  $i_q$  qu'on utilise pour la régulation des courants. Donc, le principe de régulation des courants consiste à reconstruire des tensions et à la sortie des régulateurs de courants de manière à séparer les boucles de régulations d'axe  $d$  et  $q$  comme montre la figure 1.5.

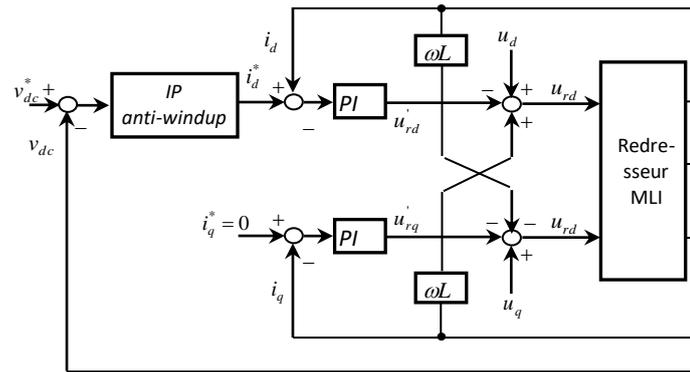


Figure 1.5 : Schéma bloc de la régulation de la tension de sortie  $v_{dc}$

## 1.6 Résultats de simulation

Afin d'avoir une idée sur le comportement du système en boucle fermée et de connaître les performances de la régulation de la tension de sortie du redresseur MLI, vis-à-vis du changement de la tension du bus continu et de la variation de la charge, nous avons effectué des simulations numériques sous l'environnement Matlab/Simulink.

Les résultats de simulation qui suivent représentent la simulation du redresseur triphasé alimenté par un réseau électrique (50Hz, 125 V), commandé par la technique VOC classique.

Les paramètres du système à l'usage de cette simulation sont donnés par le tableau suivant :

Réseau électrique	$V=125V, f=50Hz$
Paramètres du filtre	$R=0.3\Omega, L=37mH$
Résistance de la charge	$R_L = 500 \Omega$
Condensateur (DC-Link capacitor)	$C_{DC} = 1100 \mu F$
Tension continue de sortie	500V

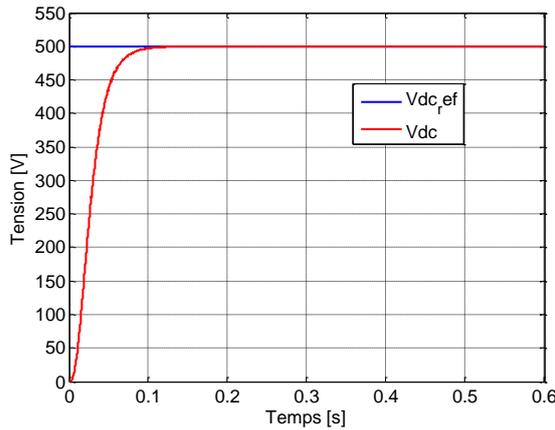
Tableau 1.1 : Paramètres du système

### 1.6.1. Fonctionnement en régime normale

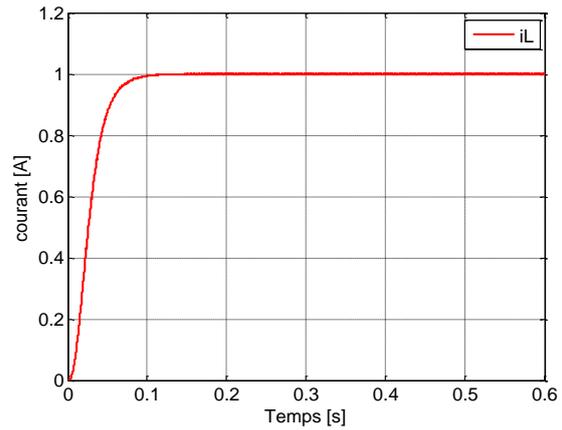
La réponse en tension d'après la figure 1.6. (a), montre que la tension de sortie du redresseur se stabilise à la valeur 500V avec un temps de réponse de 0.12s. On remarque que la dynamique du système est rapide, cela est dû au temps de réponse qui est faible. On peut constater alors, un fonctionnement satisfaisant en régime transitoire et en régime permanent (erreur statique nulle).

Le courant  $i_L$  circulant dans la charge est représenté par la figure 1.6(b), d'après les résultats de simulation, on remarque que le courant est maintenu constant à la valeur (1A). On ce qui concerne que le courant  $i_d$  qui est montré dans la figure 1.6(c), il atteint une valeur maximale de 20.4 A, puis se fixe à la valeur 1.7 A, par contre le courant  $i_q$  est maintenu nul.

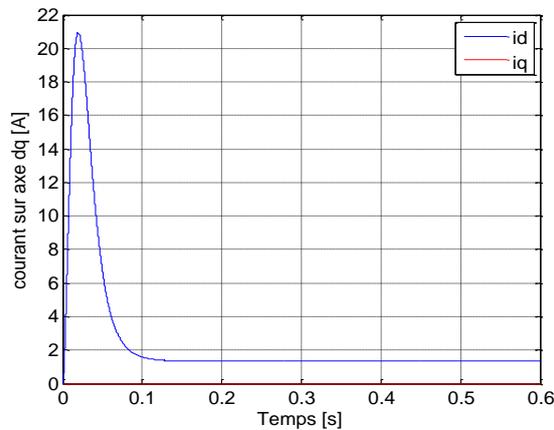
La figure 1.6(d) représente l'allure des trois courants  $i_a, i_b, i_c$  correspondant au fonctionnement considéré. Au démarrage les courants de ligne font apparaître un transitoire de 15.1A et après une courte période, il se stabilise à la valeur 2.5A. La figure 1.6 (e) représente le zoom des courants triphasés, on remarque une forme sinusoïdale qui apparaît sur l'allure de ces trois courants. La figure 1.6(f), (d) représentent respectivement les trois tensions triphasés  $V_a, V_b, V_c$  ainsi que leur zoom avec une valeur maximal de 176V.



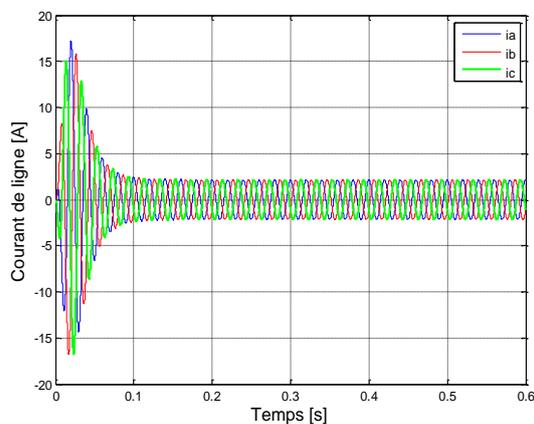
(a) Tension continue



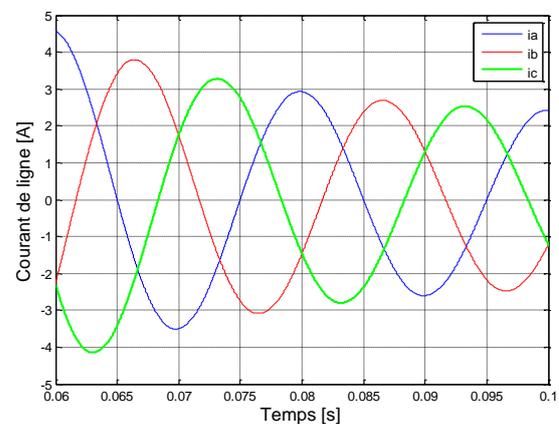
(b) Courant de charge



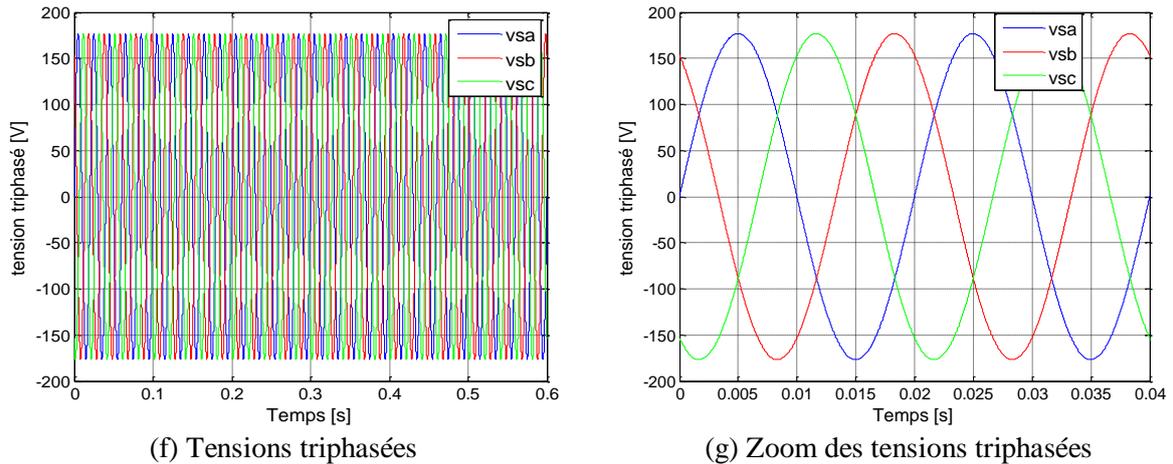
(c) Courants id, iq



(d) Courants de ligne ia, ib, ic



(e) Zoom des courants de ligne ia, ib, ic



**Figure 1.6 :** Résultats de simulation du système en fonctionnement normal

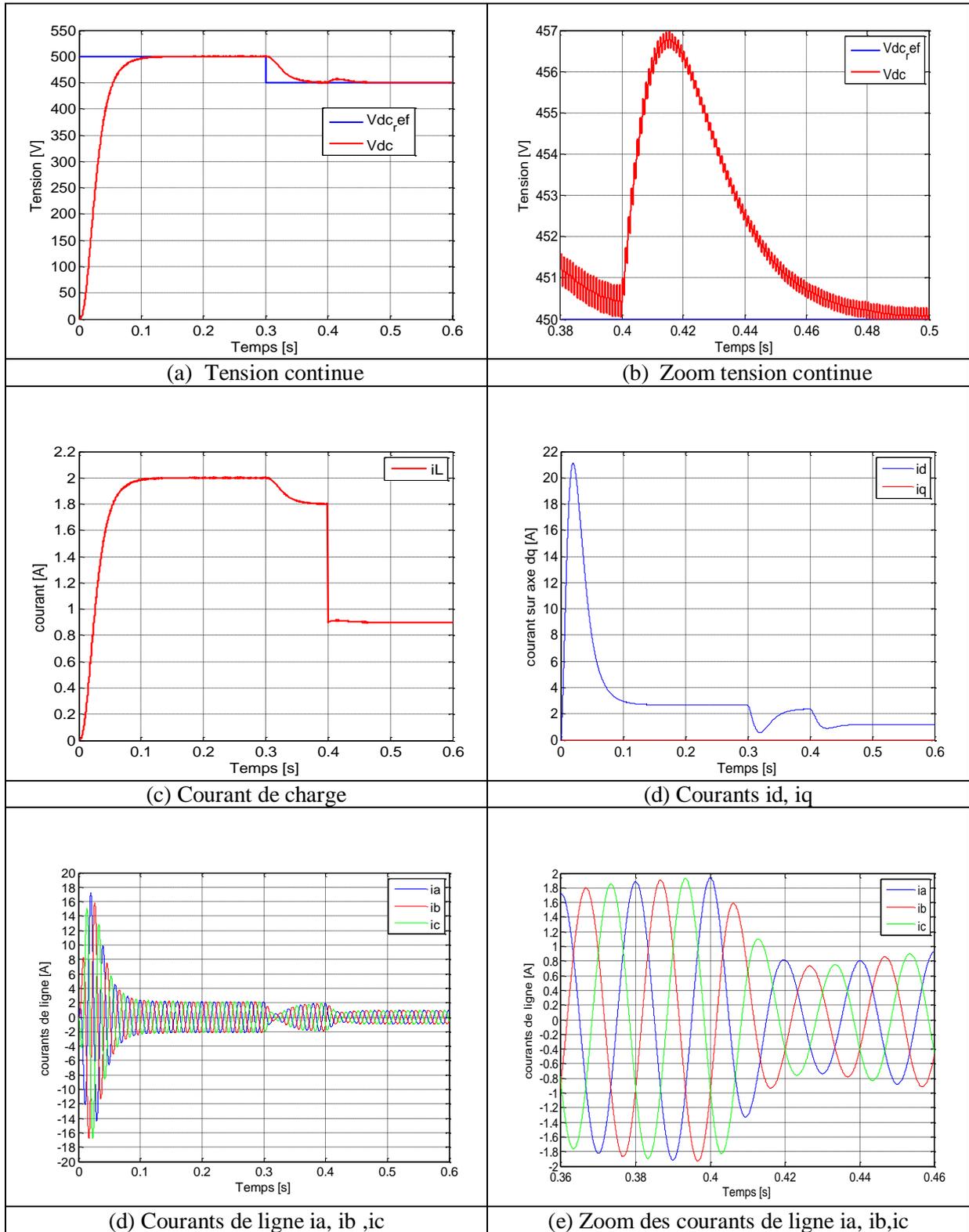
### 1.6.2 Application d'une diminution de tension avec une variation de la charge

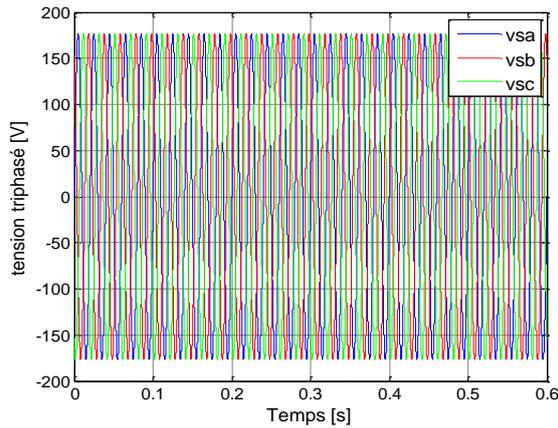
Dans cet essai nous allons appliquer une diminution de la tension du bus continu et une variation de la charge.

La figure 1.7 (a) représente l'évolution de la tension du bus continu, on remarque que la tension  $V_{dc}$  est obtenue sans dépassement et suit parfaitement sa référence. A l'instant  $t=0.3s$  nous avons appliqué une diminution de la tension d'une valeur de 50V, on remarque que la tension  $V_{dc}$  suit bien sa référence. A l'instant  $t=0.4s$ , nous avons appliqué une variation de la charge on remarque une petite augmentation de la tension  $V_{dc}$  comme illustré dans le zoom de la figure 1.7(b) où elle sera rejetée rapidement par le régulateur de tension.

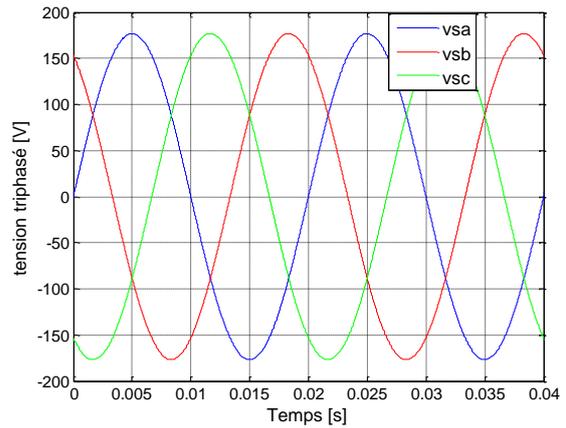
Le courant de charge  $I_L$  subit une diminution de la valeur 1.8A jusqu'à 0.9A lors de l'application de la variation de la charge à  $t=0.4$  (figure 1.7 (c)). Dans la figure 1.7(d) le courant  $I_d$  fait apparaître un transitoire puis une diminution rapide lors de la diminution de la tension  $V_{dc}$  à  $t=0.4s$ , alors que le courant  $I_q$  est maintenu autour de zéro.

Les figures 1.7 (d) et 1.7 (f) représente les trois courants alternatifs à l'entrée du redresseur et les trois tensions correspondant au fonctionnement considéré.





(f) Tensions triphasées



(g) Zoom des tensions triphasées

**Figure 1.7 :** Résultats de simulation du système avec une variation de charge.

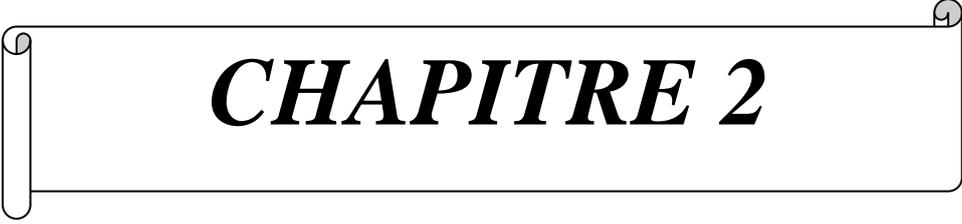
## 1.7 Conclusion

Ce chapitre a fait l'objet de l'application de la commande (VOC) pour le côté réseau du redresseur MLI, l'objectif principal étant la régulation de la tension de bus continu, cette structure est basée sur la transformation des coordonnées entre le système de coordonnées fixe (abc) et de coordonnées (dq). Cette technique présente plusieurs avantages, on peut citer:

- La fréquence de commutation qui est fixe ;
- des stratégies avancées de MLI peuvent être employées.

D'autre part quelques inconvénients caractérisent cette stratégie de contrôle:

- La transformation du même rang et le découplage entre les composants actifs et réactifs est exigée ;
- Algorithme complexe ;
- Facteur de puissance moins que l'unitaire.



## ***CHAPITRE 2***

***Commande DPC du redresseur à MLI  
avec une nouvelle table de commutation***

## 2.1 Introduction

L'objectif du chapitre précédent était la modélisation des différents blocs constituant le convertisseur AC-DC qui est le redresseur à MLI en vue de l'application d'un contrôle orienté en tension (VOC). Dans ce chapitre, nous allons effectuer une étude détaillée sur une autre stratégie de commande pour le contrôle du redresseur MLI triphasé, appelée la commande directe de puissance (DPC).

Au cours de ces dernières années, des travaux de recherche importants ont été menés sur les stratégies de contrôle des convertisseurs MLI triphasés. Ces stratégies proposées peuvent être classées selon l'utilisation des régulateurs de boucle de courant ou de régulateurs de puissances active / réactive. Il existe deux stratégies de commandes communes, un contrôle orienté en tension (VOC) et un contrôle de puissance directe (DPC). La commande VOC peut contrôler indirectement les puissances active et réactive d'entrée en commandant le courant d'entrée du convertisseur MLI. Cela permet d'obtenir de bonnes réponses stables et dynamiques.

Cependant la performance de commande VOC repose largement sur le contrôle du courant interne et l'ajustement d'un PI précis [Nog-98]. La commande DPC est un autre type de stratégie de contrôle de haute performance pour les convertisseurs MLI basés sur la théorie de la puissance instantanée proposée pour la première fois dans et plus clairement présenté dans [Mal-01]. L'idée de base de cette commande est de choisir le meilleur état de commutation des commutateurs de puissance à travers une table de commutation avec des comparateurs à hystérésis pour maintenir un courant purement sinusoïdal et atteindre aussi un facteur de puissance unitaire. Bien que la DPC ait été considérée comme un système de commande puissant et robuste pour les convertisseurs MLI, les ondulations de puissance élevées et la fréquence de commutation variable sont les deux inconvénients les plus notables de la commande DPC conventionnel.

Dans ce chapitre, nous présenterons une étude détaillée sur la commande DPC à base d'une nouvelle table de commutation. Le principe et les étapes de modélisation de la commande DPC sont développés. A la fin, nous présenterons les résultats de simulation obtenus de la commande DPC d'un redresseur à MLI triphasé.

## 2.2 Contrôle direct de puissance du redresseur triphasé à MLI en utilisant une nouvelle table de commutation

### 2.2.1 Principe de la DPC avec une nouvelle table de commutation

Cette partie présente l'étude de la technique de contrôle direct de puissance appliqué au redresseur de tension triphasé à MLI, en se basant sur une nouvelle table de commutation. Cette méthode permet de sélectionner le vecteur tension optimale du redresseur tout en assurant un contrôle simultané et précis des puissances active et réactive, une réduction de la distorsion harmonique du courant de ligne et une amélioration du facteur de puissance.

La structure globale de la *DPC*, utilisant une nouvelle table de commutation, appliqué au pont redresseur à *MLI* triphasé est illustrée sur la figure 2.1. Elle est analogue à celle du contrôle direct de couple (*DTC*) des machines à induction. Au lieu du couple et du flux statorique, c'est les puissances instantanées actives et réactive qui sont les grandeurs contrôlées. Le principe du *DPC* consiste à sélectionner une séquence des ordres de commutation ( $s_a, s_b, s_c$ ) des semi-conducteurs constituant le redresseur à *MLI*, à partir d'une table de commutation. La sélection s'effectue sur la base des erreurs numérisées,  $s_p$  et  $s_q$  entre les références des puissances active et réactive ( $p^*$  et  $q^*$ ) et les valeurs réelles ( $p$  et  $q$ ), fournies par deux comparateurs à hystérésis à deux niveaux, ainsi que sur la position angulaire du vecteur des tensions du réseau  $v_\alpha, v_\beta$ . Pour ce dernier, le plan  $\alpha$ - $\beta$  est divisé en douze secteurs égaux de  $30^\circ$ , comme l'illustre le graphique de la figure 2.2. Chacune des séquences de commande ( $s_a, s_b, s_c$ ) correspond à un vecteur de tension à l'entrée du redresseur  $v_i$  dont l'ensemble est représenté sur la figure 3.2 [Chi 3-18].

Pour toute structure du *DPC*, le contrôle de la tension du bus continu  $v_{dc}$ , s'effectue par ajustement de la puissance active instantanée. L'objectif du *DPC* est de permettre au redresseur à *MLI* d'échanger avec le réseau des puissances instantanées actives et réactive constantes, tout en garantissant un contrôle découplé de ces dernières. Ainsi, la référence de la puissance active,  $P^*$ , est fournie par le régulateur *IP* de la tension du bus continu. Tandis que celle de la puissance réactive,  $q^*$ , provient de l'extérieur. Elle est imposée égale à zéro pour l'absorption de courants sinusoïdaux sous une tension de source de forme supposée sinusoïdale, afin d'assurer un fonctionnement du redresseur avec un facteur de puissance unitaire [Bou-18].

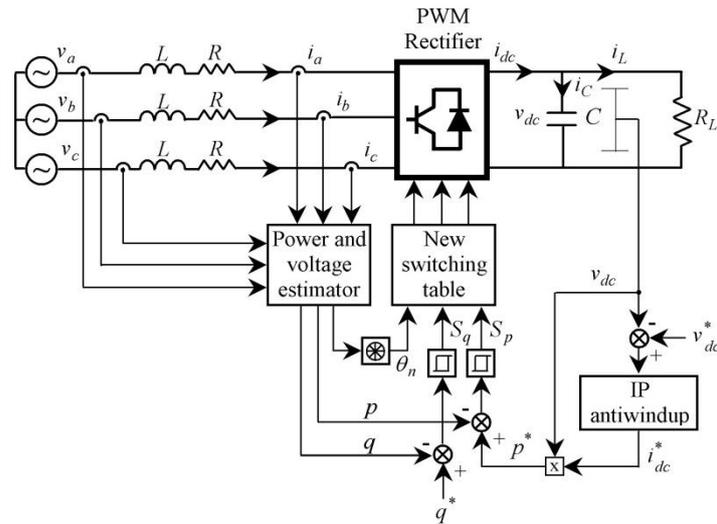


Figure 2.1 : Contrôle DPC du redresseur à MLI avec la structure proposée.

### 2.2.2 Expressions des puissances instantanées

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 module de leur produit vectoriel [Mal-03].

Ces puissances peuvent être exprimées respectivement par les relations suivantes :

$$\begin{cases} p = v_{\alpha} \cdot i_{\alpha} + v_{\beta} \cdot i_{\beta} \\ q = v_{\alpha} \cdot i_{\beta} - v_{\beta} \cdot i_{\alpha} \end{cases} \quad (2.1)$$

L'erreur de la puissance active  $\Delta p$  est la différence entre la valeur de la puissance active  $p^*$  est la valeur réelle de la puissance active  $p$  est donnée par :

$$\Delta p = p^* - p \quad (2.2)$$

L'erreur de la puissance réactive  $\Delta q$  est la différence entre la valeur de la puissance réactive  $q^*$  est la valeur réelle de la puissance réactive  $q$  :

$$\Delta q = q^* - q \quad (2.3)$$

### 2.2.3 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  $i_a, i_b, i_c$  dans les coordonnées stationnaires  $\alpha\beta$  [Ted-11] :

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

À partir de l'équation (2.1) la tension peut être estimée par l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{(i_\alpha^2 + i_\beta^2)} \begin{bmatrix} i_\alpha & -i_\beta \\ i_\beta & i_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

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

$$\begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

#### 2.2.4 Détermination du secteur

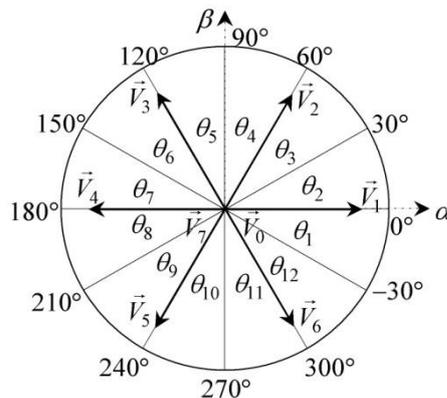
La connaissance du secteur de la tension estimée est nécessaire pour déterminer les états de commutation optimale. Pour cela, le plan de travail  $(\alpha, \beta)$  est divisé en douze secteurs, ces derniers peuvent être déterminés par la relation suivante [Ben-13] :

$$(n-2)\frac{\pi}{6} \leq (\theta_n - 1) \leq (n-1)\frac{\pi}{6} \quad \text{Avec : } n=1,2,\dots,12 \quad (2.7)$$

Où :  $n$  est le numéro du secteur.

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

$$\theta_n = \arctg \frac{v_\beta}{v_\alpha} \quad (2.8)$$



**Figure 2.2 :** Secteur set vecteurs des tensions du redresseur dans le plan  $\alpha - \beta$

La détermination de la valeur exacte de l'angle dans l'intervalle  $[0, 2\pi]$  que fait un vecteur avec l'axe horizontal dans le sens trigonométrique, peut être obtenue à partir du tableau suivant:

Vecteur de tension		Position de $\theta_n$
$v_\alpha > 0$	$v_\beta > 0$	$\arctg(v_\beta/v_\alpha)$
	$v_\beta < 0$	$\arctg(v_\beta/v_\alpha) + 2\pi$
$v_\alpha < 0$		$\arctg(v_\beta/v_\alpha) + \pi$
$v_\alpha = 0$	$v_\beta > 0$	$2\pi$
	$v_\beta < 0$	$3\pi/2$

**Tableau 2.1** : Position du vecteur tension dans l'intervalle  $[0,2\pi]$

### 2.3 Étude des variations des puissances instantanées

Dans le repère stationnaire  $(a,b,c)$  et avec un système triphasé équilibré, la dynamique des courants absorbés par un redresseur à MLI est régie par les équations différentielles suivantes [Chi 3-18]:

$$\begin{bmatrix} L \frac{di_a}{dt} \\ L \frac{di_b}{dt} \\ L \frac{di_c}{dt} \\ C \frac{dv_{dc}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -R & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -R & 0 \\ S_a & S_b & S_c & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_a - v_{ra} \\ v_b - v_{rb} \\ v_c - v_{rc} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$\begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2/3 & -1/3 & -1/3 \\ -1/3 & 2/3 & -1/3 \\ -1/3 & -1/3 & 2/3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} v_{dc} \quad (2.10)$$

avec  $S_a, S_b$  et  $S_c$  sont les états des interrupteurs du redresseur dans le repère  $(a,b,c)$ .

La transformé dans le repère fixe  $\alpha, \beta$  est donnée par :

$$T = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

La transformation résultante de l'équation (2.9) dans le repère  $\alpha, \beta$  est exprimée par [Gon-14]:

$$\begin{bmatrix} L \frac{di_\alpha}{dt} \\ L \frac{di_\beta}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R & 0 \\ 0 & -R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_\alpha - v_{r\alpha} \\ v_\beta - v_{r\beta} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Dans le repère de Park (d-q), l'équation (2.12) est exprimée par :

$$\begin{bmatrix} L \frac{di_d}{dt} \\ L \frac{di_q}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R & \omega L \\ -\omega L & -R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_d - v_{rd} \\ v_q - v_{rq} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Où  $\omega$  est la vitesse de rotation, les tensions  $v_{rd}$  et  $v_{rq}$  à l'entrée du redresseur dans le repéré d-q sont exprimées comme suit [Gon-14]:

$$\begin{cases} v_{rd} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cos[\omega t - \frac{\pi}{3}(k-1)] \\ v_{rq} = \sqrt{\frac{2}{3}} \sin[\omega t - \frac{\pi}{3}(k-1)] \end{cases} \quad (2.14)$$

Où  $k = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ , est le numéro de vecteur de tension approprié.

En supposant que la source d'alimentation est idéale et que le vecteur de tension alternative  $v = V_M e^{j\theta}$ , alors il en résulte que  $v_d = \sqrt{3/2} V_M$  et  $v_q = 0$ .  $\theta = \omega t$  est l'angle de phase de  $v$ . Les puissances instantanées active et réactive dans le repère stationnaire ( $d-q$ ) sont données par l'expression ci-dessous:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_d & v_q \\ v_q & -v_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} V_M & 0 \\ 0 & -V_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Sur la base de (2.13) et (2.14), la variation de  $p$  et  $q$  peut être calculée comme :

$$\begin{cases} \frac{dp}{dt} = \frac{3}{2L} V_M^2 - \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{1}{L} V_M v_{rd} - \frac{R}{L} p - \omega q \\ \frac{dq}{dt} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{1}{L} V_M v_{rq} - \frac{1}{L} q + \omega \end{cases} \quad (2.16)$$

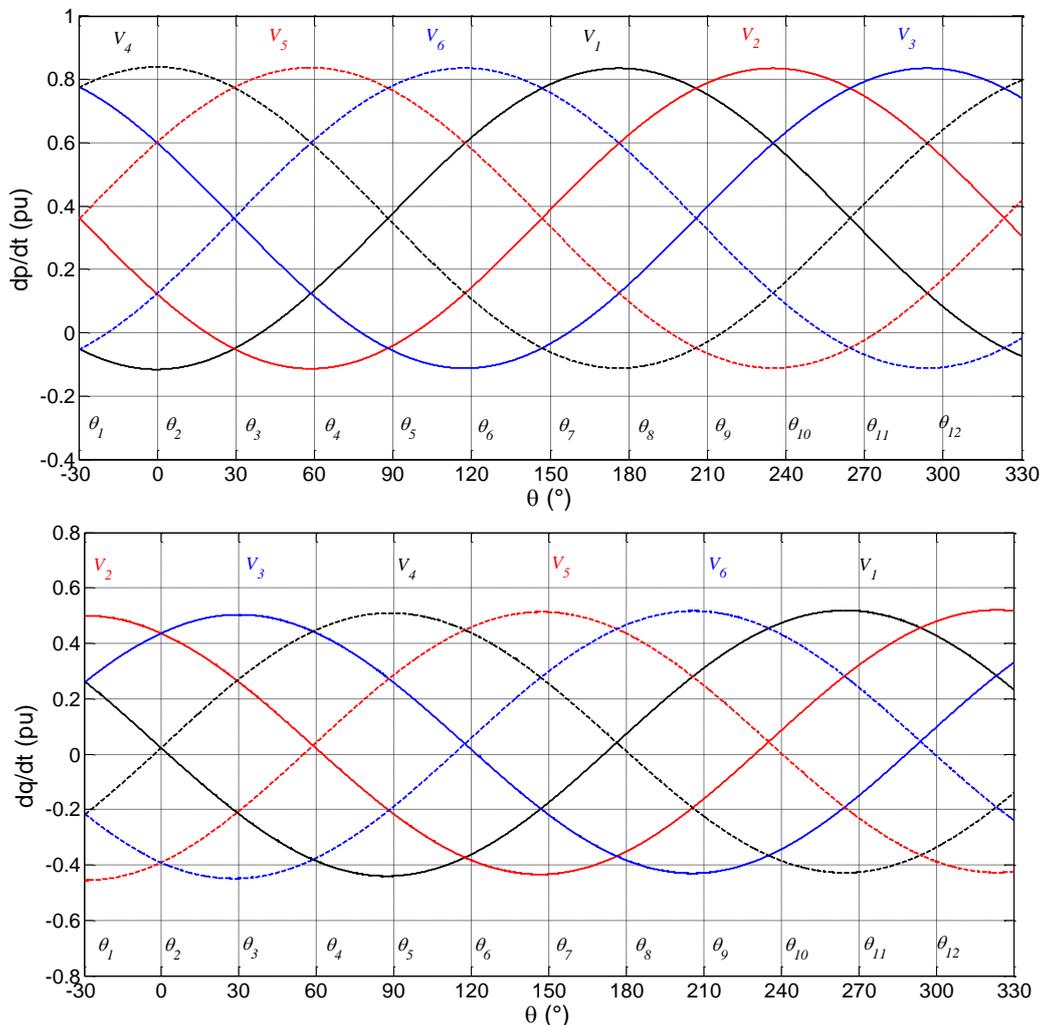
## 2.4 Sélection du vecteur tension avec la nouvelle table de commutation

La nouvelle table de commutation est formée à partir de la sortie des deux contrôleurs à hystérésis ( $\mathbf{s}_p, \mathbf{s}_q$ ) et la position angulaire  $\theta_n$  du vecteur de tension. La valeur de,  $\mathbf{s}_p = \mathbf{1}$  indique que on veut augmenter la puissance active,  $\mathbf{s}_p = \mathbf{0}$  indiquant la nécessité de diminuer la puissance active (la même règle pour  $\mathbf{s}_q$ ), par conséquent l'état de commutation correspondant sera envoyée pour déclencher les IGBT de circuit principal [Hom-19].

Considérant que la valeur de  $R$  est suffisamment petite pour être négligée et la puissance réactive est toujours contrôlé pour être 0. En tenant compte des équations (2.14) et (2.16), la variation de la puissance active et réactive instantanée peut être réécrite comme:

$$\begin{cases} \frac{dp}{dt} = \frac{3}{2} \frac{V_M^2}{L} - \frac{V_M v_{dc}}{L} - \cos \left[ \omega t - \frac{\pi}{3}(k-1) \right] \\ \frac{dq}{dt} = \frac{V_M v_{dc}}{L} - \sin \left[ \omega t - \frac{\pi}{3}(k-1) \right] \end{cases} \quad (2.17)$$

La variation de la puissance active et réactive, est représentée sur la Figure 2.3, en fonction de la position pour différents vecteurs tension du redresseur [Chi1-18] [Chi2-18] [Chi 3-18] :



**Figure 2.3 :** Variation de la puissance active et réactive pour divers vecteurs de tension du redresseur

Afin d'obtenir de meilleures performances du système, la table de commutation est synthétisée en fonction de la variation de la puissance active et réactive pour différents vecteurs tension dans chaque secteur, comme le montre la Figure 2.3. Les signes de variation des puissances active et réactive sont illustrés dans le tableau 2.2:

Secteur	dp/dt		dq/dt	
	$> 0 \leftrightarrow s_p = 1$	$< 0 \leftrightarrow s_p = 0$	$> 0 \leftrightarrow s_q = 1$	$< 0 \leftrightarrow s_q = 0$
$\theta_1$	$V_2, V_3, V_4, V_5$	$V_1, V_6$	$V_1, V_2, V_3$	$V_4, V_5, V_6$
$\theta_2$	$V_3, V_4, V_5, V_6$	$V_1, V_2$	$V_2, V_3, V_4$	$V_1, V_5, V_6$
$\theta_3$	$V_3, V_4, V_5, V_6$	$V_1, V_2$	$V_2, V_3, V_4$	$V_1, V_5, V_6$
$\theta_4$	$V_1, V_4, V_5, V_6$	$V_2, V_3$	$V_3, V_4, V_5$	$V_1, V_2, V_6$

$\theta_5$	$V_1, V_4, V_5, V_6$	$V_2, V_3$	$V_3, V_4, V_5$	$V_1, V_2, V_6$
$\theta_6$	$V_1, V_2, V_5, V_6$	$V_3, V_4$	$V_4, V_5, V_6$	$V_1, V_2, V_3$
$\theta_7$	$V_1, V_2, V_5, V_6$	$V_3, V_4$	$V_4, V_5, V_6$	$V_1, V_2, V_3$
$\theta_8$	$V_1, V_2, V_3, V_6$	$V_4, V_5$	$V_1, V_5, V_6$	$V_2, V_3, V_4$
$\theta_9$	$V_1, V_2, V_3, V_6$	$V_4, V_5$	$V_1, V_5, V_6$	$V_2, V_3, V_4$
$\theta_{10}$	$V_1, V_2, V_3, V_4$	$V_5, V_6$	$V_1, V_2, V_6$	$V_3, V_4, V_5$
$\theta_{11}$	$V_1, V_2, V_3, V_4$	$V_5, V_6$	$V_1, V_2, V_6$	$V_3, V_4, V_5$
$\theta_{12}$	$V_2, V_3, V_4, V_5$	$V_1, V_6$	$V_1, V_2, V_3$	$V_4, V_5, V_6$

**Tableau 2.2** : Signes de variation des puissances active et réactive pour les 12 secteurs

La nouvelle table de commutation pour le contrôle direct de puissance DPC du redresseur MLI peut être résumée dans le tableau 2.3.

$s_p$	$s_q$	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_4$	$\theta_5$	$\theta_6$	$\theta_7$	$\theta_8$	$\theta_9$	$\theta_{10}$	$\theta_{11}$	$\theta_{12}$
<b>1</b>	<b>0</b>	$V_5$	$V_6$	$V_6$	$V_1$	$V_1$	$V_2$	$V_2$	$V_3$	$V_3$	$V_4$	$V_4$	$V_5$
	<b>1</b>	$V_2$	$V_3$	$V_3$	$V_4$	$V_4$	$V_5$	$V_5$	$V_6$	$V_6$	$V_1$	$V_1$	$V_2$
<b>0</b>	<b>0</b>	$V_6$	$V_1$	$V_1$	$V_2$	$V_2$	$V_3$	$V_3$	$V_4$	$V_4$	$V_5$	$V_5$	$V_6$
	<b>1</b>	$V_1$	$V_2$	$V_2$	$V_3$	$V_3$	$V_4$	$V_4$	$V_5$	$V_5$	$V_6$	$V_6$	$V_1$

**Tableau 2.3** : La nouvelle table de commutation

## 2.5 Résultats de simulation

Pour confirmer l'efficacité du contrôle DPC avec la nouvelle table de commutation, appliqué au redresseur MLI triphasé à deux niveaux, une simulation numérique est effectuée avec le logiciel Matlab/Simulink. Les principaux paramètres du circuit sont donnés en chapitre 1.

Nous avons imposé la référence de la tension du bus continu à 350 V en suite on a appliqué une variation de charge (diminution et augmentation) à  $t=0.40$  et  $t=0.60$ , comme le montre dans la figure 2.4.

La figure 2.4 (a) représente l'allure de la tension du bus continu. On remarque que la tension suit bien sa référence. Avec notre choix de régulateur de tension de type IP anti-windup, on constate qu'il n'y a pas de dépassement. Avec l'application de la perturbation de charge modifiée peu la tension, nous obtenons un chute de 0.44 % pendant une durée de 0.05 s, zoom sur la figure 2.4 (b). Donc on peut dire que le régulateur de tension fonctionne très bien avec la stratégie de contrôle DPC proposée.

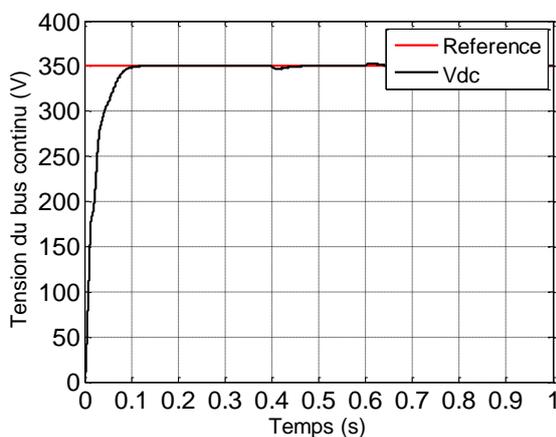
Dans la figure 2.4 (c), le courant de charge  $I_L$  fait une augmentation jusqu'à 1.4 A, avec la variation de la charge à  $t=0.40s$  puis une diminution à  $t=0.60s$  au pré 0.7A.

Les figures 2.4 (e)-(h) représentent l'allure des trois courants du réseau correspondant au fonctionnement considéré. Au début le courant fait apparaître un transitoire, puis une augmentation rapide lors de l'application de la charge. Nous remarquons que ces courants sont sinusoïdaux, ce qui donne un faible taux de distorsion harmonique.

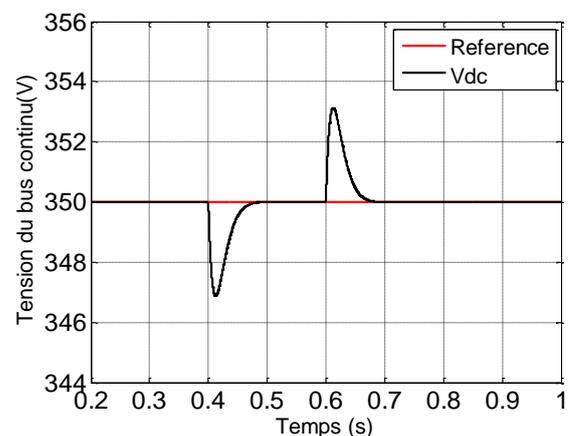
Le courant et la tension de phase sont représentés par la figure 2.4 (j), on remarque que le courant  $i_a$  et en phase avec la tension du réseau, ce qui donne un facteur de puissance unitaire.

La figure 2.4 (k), représente la réponse en puissance active. La puissance fait apparaître un accroissement de 245W jusqu'à 490W à  $t =0.40s$ , puis démunie à sa valeur initial à  $t =0.50s$ . On peut remarquer que la réponse de cette structure offre d'excellentes performances. La structure de DPC proposée ajuste bien la puissance active dans tous les secteurs lorsque la puissance de charge augmente. Il est clair de voir dans la figure 2.4 (l) que la puissance réactive est maintenue à zéro pour obtenir un facteur de puissance unitaire.

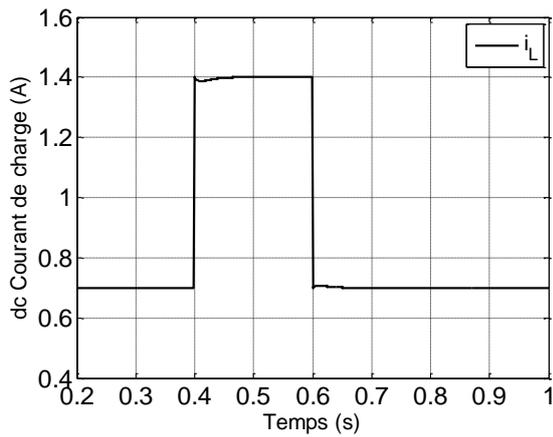
La figure 2.4 (n) montre le spectre harmonique de la réponse du courant de ligne  $i_a$ . Il est à noter que toutes les harmoniques basses sont bien atténuées, ce qui donne un taux de distorsion harmonique (THD =0,96%). Finalement, on peut constater que le DPC réalise un contrôle découplé de la puissance active et réactive lorsque la charge change.



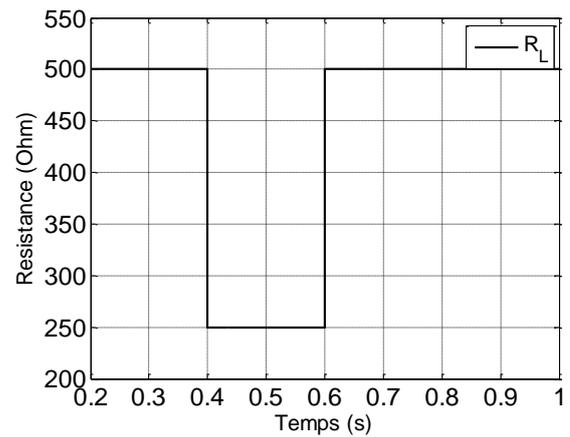
a) Tension du bus continu



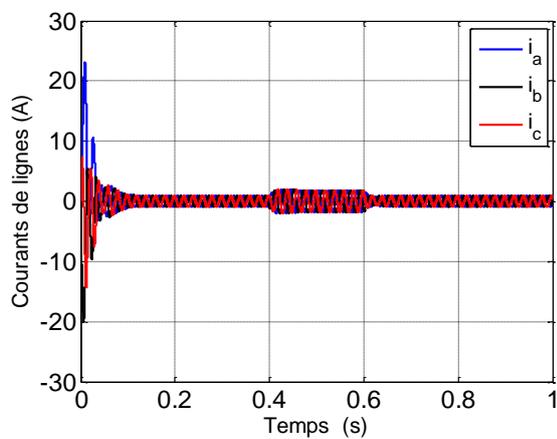
b) Zoom sur la Tension de sortie



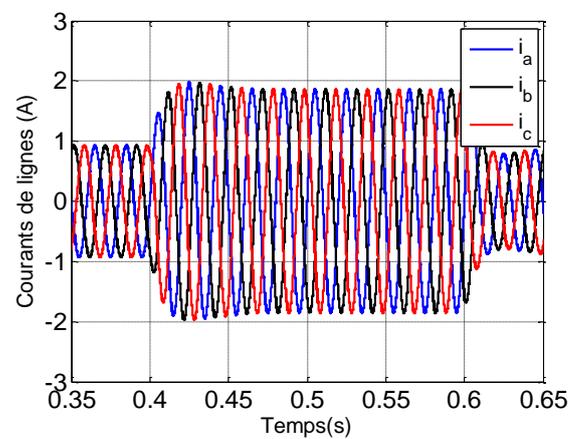
c) Courant de Charge  $i_L$



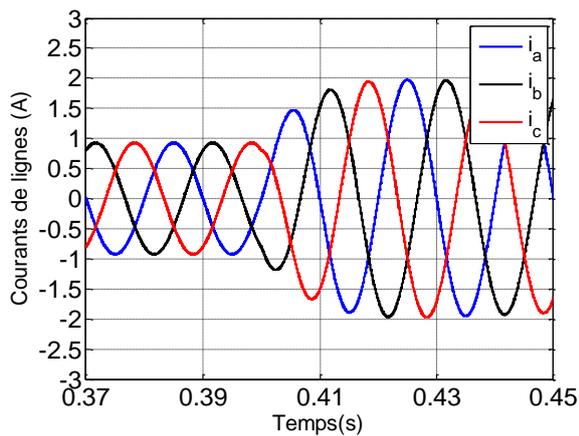
d) Variation de la Charge



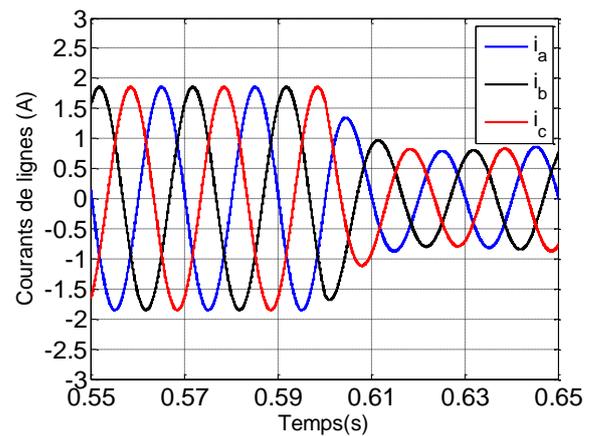
e) Courants de ligne  $i_a, i_b, i_c$



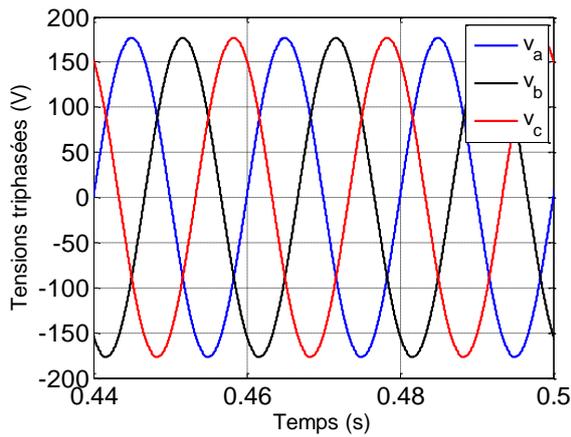
f) Zoom des Courants de ligne  $i_a, i_b, i_c$



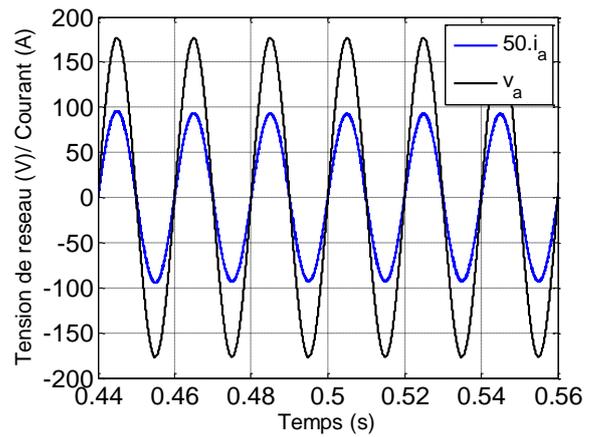
g) Zoom des Courants de ligne  $i_a, i_b, i_c$



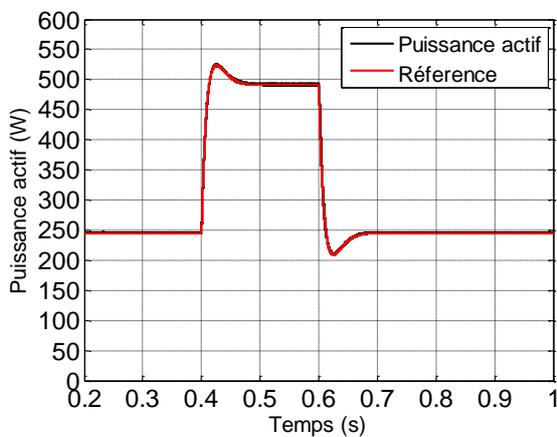
h) Zoom des Courants de ligne  $i_a, i_b, i_c$



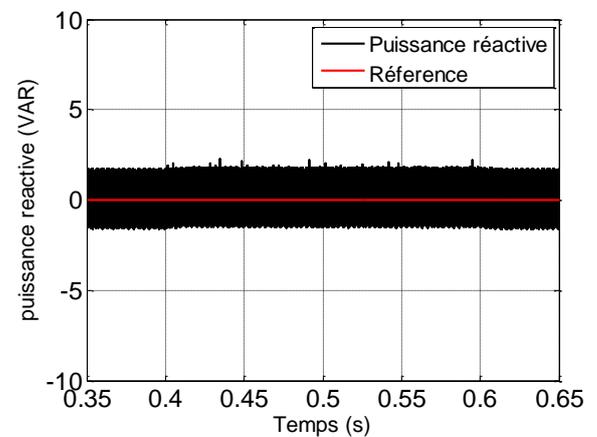
i) Tensions triphasé



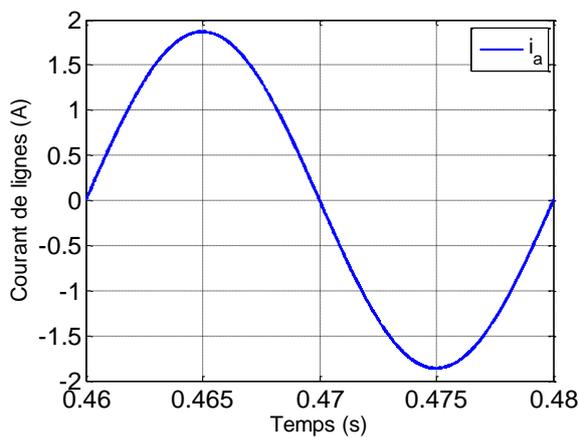
j) Forme de la tension et du courant de la phase  $a$



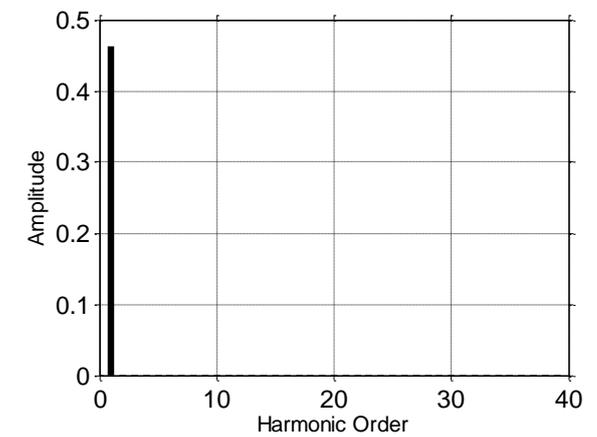
k) Zoom la puissance active



l) Zoom la puissance réactive



m) Courant de ligne  $i_a$



n) Fourier Components

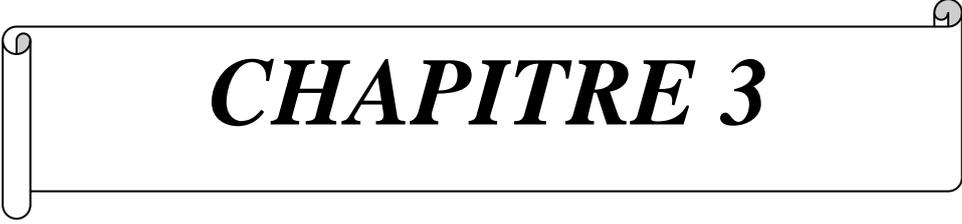
**Figure 2.4 :** Résultats de simulation de la structure du contrôle DPC avec nouvelle table de commutation

## 2.6 Conclusion

L'étude présentée dans ce chapitre le contrôle direct de puissance avec une nouvelle table de commutation, on a présenté les relations fondamentales sur la DPC à travers le contrôle de puissance active et réactive. La table proposée est élaborée grâce à l'expertise faite sur les variations provoquées sur les puissances active et réactive lors de l'application de chacun des vecteurs de commande.

Cette technique a apporté une solution des problèmes qui sont soumis à un réseau électrique par la régulation de la tension du bus continu, la réduction de la distorsion harmonique totale du courant de ligne et l'amélioration du facteur de puissance (un facteur de puissance unitaire). Vu les résultats obtenue avec cette stratégie, la technique DPC assure un contrôle précis et simultané des puissances instantanées active et réactive.

Pour voir le comportement de La DPC en présence d'un réseau déséquilibré nous allons dans le chapitre qui suit présenté une nouvelle stratégie de la commande DPC du redresseur à MLI dans ce genre de situation.



# ***CHAPITRE 3***

***Contrôle DPC du redresseur à MLI  
sous un réseau déséquilibré***

### 3.1 Introduction

Les redresseurs triphasés à modulation en largeur d'impulsion (MLI) ont été largement utilisés dans les applications industrielles en raison de ses avantages, de transfert de puissance bidirectionnel, de courants sinusoïdaux, de facteur de puissance contrôlable et de bonne capacité de régulation de la tension du bus continu [Zha-16], [Zha2-15]. Généralement, les principales stratégies de commande du redresseur MLI sont la commande orientée de tension (VOC) et la commande directe de puissance (DPC) dans des conditions normales de réseau.

Ces techniques de contrôle ont de bonnes performances avec des tensions d'entrée équilibrées. Cependant, la tension du réseau dans les conditions réelles n'est souvent pas idéale dans un système électrique réel. Ainsi le redresseur MLI conçu dans des conditions de réseau idéales pourrait apparaître dans un état de fonctionnement anormal tel que la présence des harmoniques dans la sortie continue et des harmoniques impaires dans les courants d'entrée lorsque les tensions du réseau sont déséquilibrées [Zha-16]. Néanmoins, la DPC basée sur une table de commutation conventionnelle, ne peut pas fonctionner correctement lorsque les tensions du réseau sont déséquilibrées [Zha1-15]. Les performances de la DPC seront gravement détériorées et des courants de lignes fortement déformés seront obtenus, si aucune mesure spéciale n'est prise [Zha-14].

Certaines méthodes ont été proposées dans la littérature pour améliorer les performances de la DPC sous une tension de réseau non équilibrée. La stratégie de compensation de puissance a été proposée dans [Elo-08], qui tente d'obtenir des courants de réseau triphasés sinusoïdaux et équilibrés. Cependant, cette stratégie a besoin d'une boucle à verrouillage de phase pour obtenir l'angle de tension de séquence positive et l'extraction des séquences positive et négative de la tension et des courants du réseau. Le bloc de compensation de puissance est simplifié dans [Sha-11], en éliminant l'extraction du courant de séquence négative. Malheureusement, il nécessite encore l'extraction des tensions de réseau à séquence négative et des courants de réseau à séquence positive pour obtenir la compensation de la puissance.

Par conséquent, il est souhaitable d'étendre la capacité de la DPC fonctionnant sous une tension de réseau déséquilibrée tout en gardant sa simplicité autant que possible. Pour atteindre cet objectif, une nouvelle définition de la puissance réactive proposée dans [Suh-06] est utilisée dans le redresseur MLI, qui serait plus adaptée aux tensions de réseau déséquilibrées que la définition de la puissance réactive conventionnelle. La méthode de [Suh-06] est toujours basée sur la stratégie VOC, qui nécessite un calcul de référence de courant

compliqué, une extraction de séquence positive et négative de la tension et des courants du réseau [Zha-14].

Dans notre travail on va tenter de combiner les performances de la DPC et de la nouvelle puissance réactive en proposant une DPC améliorée, qui prend en considération la puissance active et la nouvelle puissance réactive comme variables de contrôle. Une table de commutation adaptée à la commande de cette puissance réactive est établie dans ce mémoire, réservant ainsi la simplicité et la robustesse de la DPC conventionnelle. Cette DPC basée sur la table proposée est très simple en raison de l'élimination de l'extraction des séquences positive et négative des tensions ainsi que des courants du réseau, du calcul de la référence de courant ou du bloc de compensation de puissance. Des résultats de simulation sont présentés pour confirmer l'étude théorique et l'efficacité de la méthode proposée.

### **3.2 Etude d'un réseau déséquilibré**

#### **3.2.1 Origine du déséquilibre**

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. Ceci est fréquent pour les récepteurs monophasés basse tension. 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 [Bou 09][Meg-16]. 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  $120^\circ$ .

#### **3.2.2 Conséquences néfastes du déséquilibre**

Une charge est non équilibrée si elle est constituée de trois impédances différentes  $\bar{Z}_1$ ,  $\bar{Z}_2$  et  $\bar{Z}_3$  couplées en étoile ou en triangle. Les courants de ligne ne sont alors pas tous égaux. La conséquence la plus immédiate est que le potentiel du neutre de la charge est décalé par rapport à celui de l'équilibre. On peut aussi citer d'autres conséquences telles que [Med-18] :

- Un dysfonctionnement des appareils connectés à basses tensions :

- Mauvais fonctionnement d'un appareil monophasé alimenté par une tension très faible (lampe à incandescence qui fournit un mauvais éclairage).
- Un appareil monophasé alimenté par une tension trop élevée, il peut être détruit (claquage d'un filament de lampe par surtension).

-Les dispositifs triphasés d'électronique de puissance peuvent être affectés :

- Le fonctionnement des redresseurs en présence du déséquilibre entraîne l'apparition des composantes harmoniques non caractéristiques, notamment des harmoniques de rang multiple de 3. Outre les effets classiques des harmoniques, peuvent conduire, dans certains cas, au blocage de la commande.

-L'effet des composantes inverses :

- La création d'un champ tournant en sens inverse du sens de rotation normal pour les machines électrique tournantes, que signifie l'apparition d'un couple de freinage parasite et des pertes supplémentaires qui conduit à l'échauffement de la machine.

-L'effet des composantes homopolaires :

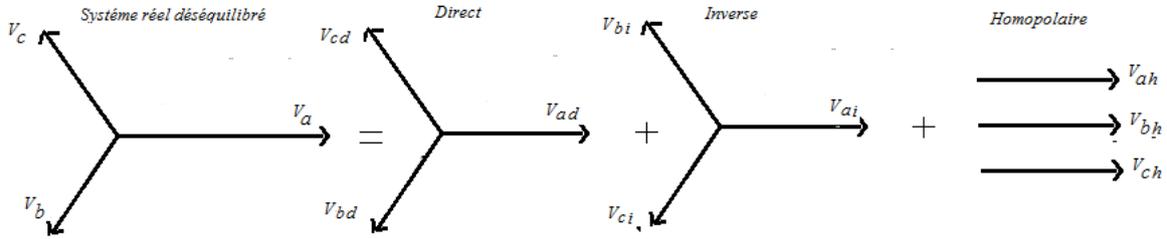
- Il y a un risque d'échauffement du conducteur de neutre pour les réseaux électrique BT, lorsque le conducteur est d'un diamètre trop faible, peut provoquer une rupture du Conducteur de neutre.

### 3.2.3 Composantes symétriques d'un système triphasé déséquilibré

La méthode de la composante symétrique a été généralement utilisée pour étudier le système triphasé déséquilibré, les vecteurs d'asymétries triphasées peuvent être décomposés de manière unique en trois vecteurs symétriques qui comprennent une séquence positive (directe), une séquence négative (inverse) et une composante de séquence nulle (homopolaire)[Zhe-13]. En se référant au théorème de Fortescue, trois phaseurs asymétriques et déséquilibrés (tension/courants) d'un système triphasé peuvent être décomposés en trois systèmes des phaseurs équilibrés qui contiennent une certaine symétrie [Zeg-19] [Bel-14]:

- Un ensemble de trois phaseurs égaux en amplitudes et déphasés de  $120^\circ$  l'un par rapport à l'autre et une séquence de phase pareil que celle des phaseurs déséquilibrés originaux. Cet ensemble de phaseurs équilibrés est appelé séquence de phase positive (système directe) ;
- Un système de trois phaseurs à amplitudes égales, disposés à  $120^\circ$  l'un par rapport à l'autre avec une séquence opposée à celle des phaseurs originaux. Cet ensemble équilibré est dénommé composante à séquence négative de phase (système inverse) ;
- Et un ensemble de trois phaseurs à amplitudes égales, avec un déphasage zéro (nul) arbitraire en direction entre eux. Cet ensemble est nommé : composante à séquence de phase zéro (système homopolaire).

Ces trois ensembles des phaseurs équilibrés, tels que représente la figure 3.1, sont nommé les composantes symétriques du système original de phaseurs déséquilibrés. Sur la figure 3.1, soient  $V_a, V_b, V_c$  un système déséquilibré de phaseurs tensions, avec  $abc$ , comme séquence original.



**Figure 3.1 :** Décomposition d'un système de tensions déséquilibrées en la somme de trois systèmes de tensions triphasées équilibrées.

On accorde la notation suivante pour les trois composantes symétriques:

- $(V_{ah}, V_{bh}, V_{ch})$  : système homopolaire (ensemble à séquence zéro),
- $(V_{ad}, V_{bd}, V_{cd})$  : système directe (ensemble à séquence positive),
- $(V_{ai}, V_{bi}, V_{ci})$  : système inverse (ensemble à séquence négative).

### 3.2.4 Synthèse des composantes symétriques

Par application du principe de superposition dans l'étude des circuits d'électrotechnique, on a :

$$V_a = V_{ah} + V_{ad} + V_{ai} \quad (3.1)$$

$$V_b = V_{bh} + V_{bd} + V_{bi} \quad (3.2)$$

$$V_c = V_{ch} + V_{cd} + V_{ci} \quad (3.3)$$

On prend  $V_a$  comme référence des phases et en utilisant l'opérateur de rotation  $a$  on aura un système triphasé déséquilibré de tensions sinusoïdales simples s'écrit [Zeg-19][Bel-14]:

$$V_a = V_{ah} + V_{ad} + V_{ai} \quad (3.4)$$

$$V_b = V_{ah} + a^2 V_{ad} + a V_{ai} \quad (3.5)$$

$$V_c = V_{ah} + a V_{ad} + a^2 V_{ai} \quad (3.6)$$

Avec :  $a = e^{j2\pi/3}$

Sous forme matricielle on écrit :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ah} \\ V_{ad} \\ V_{ai} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$V_{abc} = A.V_{hdi}$ , c'est l'équation de synthèse des composantes symétriques avec :

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \text{ matrice de transformation qui transforme } V_{abc} \text{ à } V_{hdi}.$$

### 3.3 Modèle du redresseur MLI sous un réseau déséquilibré

En utilisant la transformation triphasée –biphasé :

$$x_{\alpha\beta} = \frac{2}{3}(x_a + ax_b + a^2x_c) \quad (3.8)$$

Où  $x_{a,b,c}$  est la variable dans le plan triphasé et  $a = e^{j2\pi/3}$ , le modèle mathématique du redresseur MLI dans le plan biphasé  $\alpha\beta$  est exprimé par [Zha-16]:

$$e_{\alpha\beta} = Ri_{\alpha\beta} + L \frac{di_{\alpha\beta}}{dt} + v_{\alpha\beta} \quad (3.9)$$

Où  $v_{\alpha\beta}$ ,  $e_{\alpha\beta}$  et  $i_{\alpha\beta}$  sont le vecteur de tension du redresseur, le vecteur de tension du réseau et le vecteur de courant du réseau, respectivement;  $R$  et  $L$  sont respectivement la résistance équivalente en série et l'inductance du filtre du réseau.

La puissance complexe  $S$  côté réseau peut être calculée à partir de l'équation théorique instantanée [Zha-16] :

$$S = \frac{3}{2}(i_{\alpha\beta}^* e_{\alpha\beta}) = P + jQ \quad (3.10)$$

Où "\*" désigne le conjugué d'un vecteur complexe.

Dans des conditions de réseaux déséquilibrés, les tensions et les courants de réseau déséquilibrés peuvent être exprimés comme la somme de leurs vecteurs respectifs de séquence positive (directe) et de séquence négative (inverse), à savoir [Zha-14][Zha-15] :

$$e_{\alpha\beta} = e_{dq}^+ \cdot e^{j\omega t} + e_{dq}^- \cdot e^{-j\omega t} = e_{\alpha\beta}^+ + e_{\alpha\beta}^- \quad (3.11)$$

$$i_{\alpha\beta} = i_{dq}^+ \cdot e^{j\omega t} + i_{dq}^- \cdot e^{-j\omega t} = i_{\alpha\beta}^+ + i_{\alpha\beta}^- \quad (3.12)$$

Où  $e_{dq}^+ = e_d^+ + je_q^+$ ,  $e_{dq}^- = e_d^- + je_q^-$ ,  $i_{dq}^+ = i_d^+ + ji_q^+$ ,  $i_{dq}^- = i_d^- + ji_q^-$  et  $\omega$  la fréquence du réseau en rad / s.

La puissance active et la puissance imaginaire peuvent être exprimées comme :

$$P = Re(S) = \frac{3}{2} Re(i_{\alpha\beta}^* \cdot e_{\alpha\beta}) \quad (3.13)$$

$$Q = Im(S) = \frac{3}{2} Im(i_{\alpha\beta}^* \cdot e_{\alpha\beta}) \quad (3.14)$$

La nouvelle définition de la puissance réactive s'exprime comme [Zha1-15] [Zha-17] :

$$Q^{nov} = Re(S) = \frac{3}{2} Re(i_{\alpha\beta}^* e'_{\alpha\beta}) \quad (3.15)$$

La valeur déphasée de la tension du réseau déséquilibrée  $e'_{\alpha\beta}$  et qui est en retard sur  $e$  de 90 degrés électriques, peut être exprimée comme suit:

$$\begin{aligned} e'_{\alpha\beta} &= e_{dq}^+ \cdot e^{j(\omega t - \frac{\pi}{2})} + e_{dq}^- \cdot e^{-j(\omega t - \frac{\pi}{2})} \\ &= -j e_{dq}^+ \cdot e^{j\omega t} + j e_{dq}^- \cdot e^{-j\omega t} = -j e_{\alpha\beta}^+ + j e_{\alpha\beta}^- \end{aligned} \quad (3.16)$$

Dans des conditions de réseaux déséquilibrés, la puissance active et la nouvelle puissance réactive peuvent être exprimées comme [Zha-16][Zha-13][Zha1-15][Zha-18][Zha-19] :

$$\begin{aligned} P &= \frac{3}{2} Re(i_{\alpha\beta}^* \cdot e_{\alpha\beta}) \\ &= \frac{3}{2} Re[(i_{dq}^+ \cdot e^{j\omega t} + i_{dq}^- \cdot e^{-j\omega t})^* \cdot (e_{dq}^+ \cdot e^{j\omega t} + e_{dq}^- \cdot e^{-j\omega t})] \\ &= P_0 + P_{c2} \cos(2\omega t) + P_{s2} \sin(2\omega t) \end{aligned} \quad (3.17)$$

$$\begin{aligned} Q^{nov} &= \frac{3}{2} Re(i_{\alpha\beta}^* e'_{\alpha\beta}) \\ &= \frac{3}{2} Re[(i_{dq}^+ \cdot e^{j\omega t} + i_{dq}^- \cdot e^{-j\omega t})^* \cdot (-j e_{dq}^+ \cdot e^{j\omega t} + j e_{dq}^- \cdot e^{-j\omega t})] \\ &= Q_0^{nov} + Q_{c2}^{nov} \cdot \cos(2\omega t) + Q_{s2}^{nov} \cdot \sin(2\omega t) \end{aligned} \quad (3.18)$$

Où

$$\begin{aligned} P_0 &= \frac{3}{2} (i_{dq}^+ \odot e_{dq}^+ + i_{dq}^- \odot e_{dq}^-) \\ P_{c2} &= \frac{3}{2} (i_{dq}^+ \odot e_{dq}^- + i_{dq}^- \odot e_{dq}^+) \\ P_{s2} &= \frac{3}{2} (i_{dq}^+ \otimes e_{dq}^- + i_{dq}^- \otimes e_{dq}^+) \\ Q_0^{nov} &= \frac{3}{2} (i_{dq}^+ \otimes e_{dq}^+ + i_{dq}^- \otimes e_{dq}^-) \\ Q_{c2}^{nov} &= \frac{3}{2} (-i_{dq}^+ \otimes e_{dq}^- + i_{dq}^- \otimes e_{dq}^+) \\ Q_{s2}^{nov} &= \frac{3}{2} (i_{dq}^+ \odot e_{dq}^- + i_{dq}^- \odot e_{dq}^+) \end{aligned} \quad (3.19)$$

Il convient de noter que la définition de la puissance réactive en (3.15) est la même que la définition classique en (3.14) sous des tensions de réseau idéales. Cependant, la nouvelle puissance réactive est plus appropriée que la puissance classique dans des conditions de réseau déséquilibrées [Zha1-15][Zhe-13].

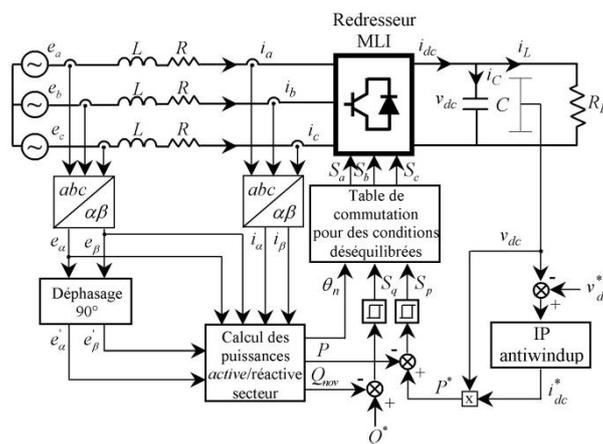
Comme le montre le système d'équation (3.19),  $P_{c2} = Q_{s2}^{nov}$  et  $P_{s2} = -Q_{c2}^{nov}$ , ce qui signifie que l'amplitude d'ondulation de la nouvelle puissance réactive est la même que celle de la puissance active.

En d'autres termes, en utilisant la nouvelle puissance réactive, nous pouvons éliminer les oscillations à la fois de la puissance active et de la nouvelle puissance réactive en même temps tout en obtenant des courants sinusoïdaux dans ces conditions de tension de réseau déséquilibrées.

### 3.4 Contrôle direct de puissance du redresseur triphasé à MLI sous un réseau déséquilibré

#### 3.4.1 Principe du contrôle direct de puissance

La technique de contrôle directe de puissance (DPC) alimenté par un réseau déséquilibré est basée sur le contrôle direct de la puissance active et de la nouvelle puissance réactive du redresseur MLI. Comme représenté sur la figure 3.2, la sortie des deux contrôleurs à hystérésis constitue les entrées de la table de commutation proposée qui sélectionne les états de commutation optimaux du redresseur à MLI.



**Figure 3. 2 :** Contrôle DPC du redresseur à MLI dans des conditions de réseau déséquilibrée

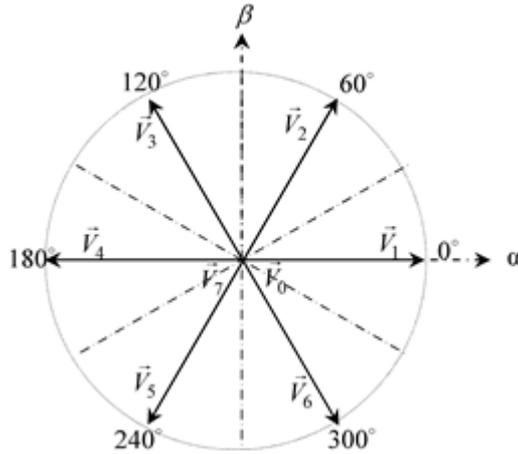
La connaissance du secteur de la tension estimée est nécessaire pour déterminer les états de commutation optimale. Pour cela, le plan de travail  $(\alpha, \beta)$  est divisé en six secteurs (figure 3.3), ces derniers peuvent être déterminés par la relation suivante [Zha1-15][Zhe-13][Ben-13] :

$$(n - 2) \frac{\pi}{3} \leq (\theta_n - 1) \leq (n - 1) \frac{\pi}{3} \quad \text{Avec : } n=1,2,\dots,6 \quad (3.20)$$

Où :  $n$  est le numéro du secteur.

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

$$\theta_n = \arctg \frac{e_\beta}{e_\alpha} \quad (3.21)$$



**Figure 3.3:** Secteurs et vecteurs des tensions du redresseur dans le plan  $\alpha - \beta$

### 3.4.2 Principe de l'annulation de l'oscillation de la puissance active (APOC)

Dans ce travail, le but du contrôle est d'obtenir un courant de réseau sinusoïdal et un facteur de puissance unitaire tout en éliminant les oscillations de la puissance active [Zha-16]. Pour simplifier le processus de calcul, dans ce mémoire, le vecteur de tension de réseau d'origine  $e_{\alpha\beta}$  et sa valeur déphasée  $e'_{\alpha\beta}$  seraient utilisés à la place du vecteur de tension de réseau de séquence positive et de séquence négative. À partir des équations (3.11) et (3.16), nous pouvons obtenir le vecteur de tension de réseau de séquence positive et de séquence négative dans leur plan synchrone respectif comme [Zha-16][Zha-13][Zha-19]:

$$\begin{bmatrix} e_{dq}^+ \\ e_{dq}^- \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} e^{-j\omega t} & je^{-j\omega t} \\ e^{j\omega t} & -je^{j\omega t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{\alpha\beta} \\ e'_{\alpha\beta} \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

De manière similaire, les séquences positive et négative du vecteur courant dans leur référentiel synchrone respectif peuvent être obtenues de la manière suivante :

$$\begin{bmatrix} i_{dq}^+ \\ i_{dq}^- \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} e^{-j\omega t} & je^{-j\omega t} \\ e^{j\omega t} & -je^{j\omega t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha\beta} \\ i'_{\alpha\beta} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Où  $i'_{\alpha\beta}$  désigne le courant en quadrature déphasant  $i_{\alpha\beta}$  de 90 degré électrique.

En tenant compte des équations (3.22) et (3.23), le système d'équations en (3.19) peut-être exprimé par les tensions et les courants du réseau et leur valeur déphasée dans le plan stationnaire  $\alpha\beta$  comme suit [Zha-16][Zhe-13] :

$$\begin{aligned} P_0 &= \frac{3}{2} (i_{\alpha\beta} \odot e_{\alpha\beta} + i'_{\alpha\beta} \odot e'_{\alpha\beta}) \\ P_{c2} &= \frac{3}{4} (k_1 \cos(2\omega t) + k_2 \sin(2\omega t)) \\ P_{s2} &= \frac{3}{4} (-k_2 \cos(2\omega t) + k_1 \sin(2\omega t)) \end{aligned} \quad (3.24)$$

Où

$$\begin{aligned} k_1 &= (i_{\alpha\beta} \odot e_{\alpha\beta} - i'_{\alpha\beta} \odot e'_{\alpha\beta}) \\ k_2 &= (i_{\alpha\beta} \odot e'_{\alpha\beta} + i'_{\alpha\beta} \odot e_{\alpha\beta}) \end{aligned} \quad (3.25)$$

De manière similaire, en remplaçant les équations (3.22) et (3.23) dans (3.19), les gains sont maintenant exprimés par les variables du plan stationnaire  $\alpha\beta$  et leurs valeurs déphasées par [Zha-16] [Zha2-15]:

$$\begin{aligned} Q_0^{nov} &= \frac{3}{2} (i_{\alpha\beta} \odot e'_{\alpha\beta} + i'_{\alpha\beta} \odot e_{\alpha\beta}) \\ Q_{c2}^{nov} &= \frac{3}{4} (k_2 \cos(2\omega t) - k_1 \sin(2\omega t)) \\ Q_{s2}^{nov} &= \frac{3}{4} (k_1 \cos(2\omega t) + k_2 \sin(2\omega t)) \end{aligned} \quad (3.26)$$

Où

$$\begin{aligned} k_1 &= (i_{\alpha\beta} \odot e_{\alpha\beta} - i'_{\alpha\beta} \odot e'_{\alpha\beta}) \\ k_2 &= (i_{\alpha\beta} \odot e'_{\alpha\beta} + i'_{\alpha\beta} \odot e_{\alpha\beta}) \end{aligned} \quad (3.27)$$

### 3.4.3 Table de commutation de la nouvelle DPC

Le but principal de ce travail est d'établir une table de commutation appropriée pour obtenir un contrôle simultané à la fois de la puissance active et de la nouvelle puissance réactive, qui est l'aspect clé de la DPC [Zha-14]. Après l'introduction de la nouvelle puissance réactive, le travail restant est d'établir une table de commutation appropriée pour obtenir un contrôle simultané à la fois de la puissance active et de la nouvelle puissance réactive [Zha1-15]. La dérivée du vecteur de tension du réseau et sa valeur déphasée peut être obtenue à partir des équations (3.11) et (3.16) comme [Zha-16][Zha-19]:

$$\frac{de_{\alpha\beta}}{dt} = j\omega e_{dq}^+ \cdot e^{j\omega t} - j\omega e_{dq}^- \cdot e^{-j\omega t} = j\omega e_{\alpha\beta}^+ - j\omega e_{\alpha\beta}^- = -\omega e'_{\alpha\beta} \quad (3.28)$$

$$\frac{de'_{\alpha\beta}}{dt} = -j\omega e_{dq}^+ \cdot e^{j\omega t} + j\omega e_{dq}^- \cdot e^{-j\omega t} = -j\omega e_{\alpha\beta}^+ + j\omega e_{\alpha\beta}^- = \omega e_{\alpha\beta} \quad (3.29)$$

À partir de l'équation (3.9), la dérivée du courant du réseau peut être exprimée par:

$$\frac{di_{\alpha\beta}}{dt} = \frac{1}{L} (e_{\alpha\beta} - v_{\alpha\beta} - Ri_{\alpha\beta}) \quad (3.30)$$

En remplaçant les équations (3.28) et (3.30) dans (3.13) et en considérant l'équation (3.15), la dérivée de la puissance active peut être obtenue comme suit

$$\frac{dP}{dt} = \frac{3}{2L} \left[ |e_{\alpha\beta}|^2 - Re(v_{\alpha\beta}^* \cdot e_{\alpha\beta}) - \frac{R}{L} P - \omega Q^{nov} \right] \quad (3.31)$$

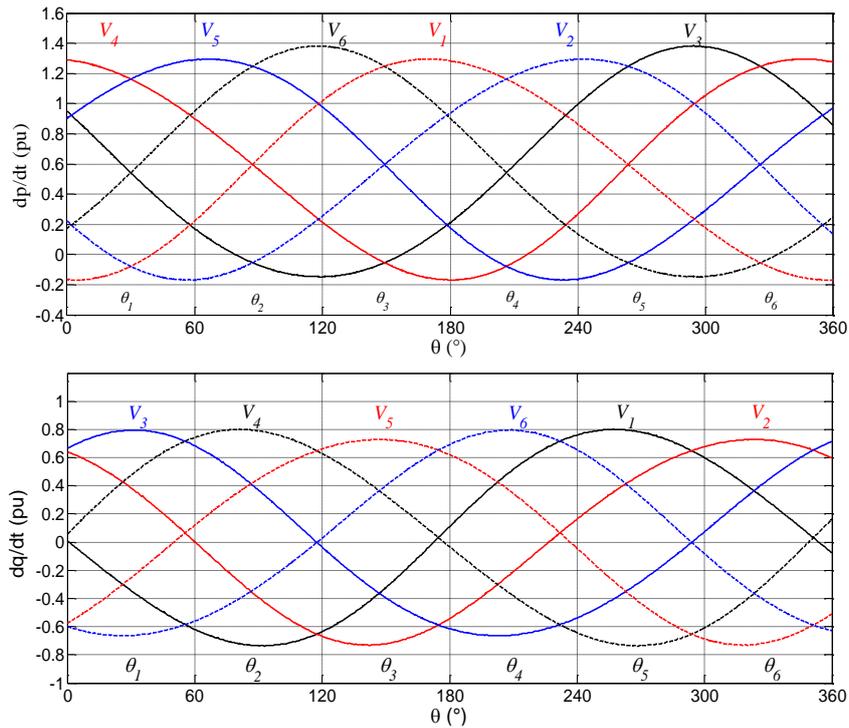
De même, la dérivée de la puissance réactive peut être obtenue à partir des équations (3.15), (3.28), (3.29) et (3.30) comme suit:

$$\frac{dQ^{nov}}{dt} = \frac{3}{2L} Re[(e_{\alpha\beta}^* - v_{\alpha\beta}^*) e'_{\alpha\beta}] - \frac{R}{L} Q^{nov} + \omega P \quad (3.32)$$

Les puissances actives et réactives instantanées peuvent être contrôlées en sélectionnant le vecteur de tension approprié du redresseur à MLI. Par conséquent, il est nécessaire d'étudier l'influence de chaque vecteur de tension du redresseur sur la variation des puissances active et réactive instantanée. Dans l'analyse suivante, les influences de divers vecteurs de tension dans tous les secteurs sont tracées pour obtenir la nouvelle table de commutation pour la commande simultanée des puissances active et réactive pendant le déséquilibre du réseau [Zha-14] [Zha-16].

D'après les équations (3.31) et (3.32), les variations de la puissance active et de la nouvelle puissance réactive en fonction de la tension de réseau pour divers vecteurs de tension du convertisseur peuvent être calculées.

Les vecteurs de tension du convertisseur peuvent être exprimés comme  $v = 0$  pour les vecteurs nuls et  $v = \frac{2}{3} v_{dc} e^{j\pi/3(n-1)}$  avec ( $n = 1, 2, \dots, 6$ ) pour les vecteurs non nuls. En substituant le vecteur de tension du convertisseur en (3.31) et (3.32), les variations de puissance pour divers vecteurs de tension du convertisseur dans des conditions de réseau non équilibrées peuvent être obtenues et illustrées sur la figure 3.4. L'amplitude du vecteur de tension de séquence négative est supposée égale à 10% du vecteur de tension de séquence positive, à savoir  $|e^-| = 0.1 |e^+|$  [Zha-14] [Zha-15] [Zha-16]. Étant donné que le déséquilibre typique de tension en régime permanent ne dépasse pas 3% dans le réseau [Zha-14] [Zha-16], l'hypothèse d'un déséquilibre de tension de 10% dans ce travail est plus rigoureuse.



**Figure 3.4 :** Variation de la puissance active et réactive pour divers vecteurs de tension du redresseur

Supposons que le vecteur de tension du réseau  $e$  se situe dans le premier secteur ( $0 \sim 60$  degrés), on peut voir sur la figure 3.4 qu'il y a deux vecteurs pour augmenter à la fois  $P$  et  $Q^{nov}$  ( $V_3, V_4$ ), deux vecteurs ( $V_5, V_6$ ) pour augmenter  $P$  et diminuer  $Q^{nov}$ , un vecteur pour diminuer  $P$  et augmenter  $Q^{nov}$  ( $V_2$ ) et un vecteur pour diminuer à la fois  $P$  et  $Q^{nov}$  ( $V_1$ ).

Afin d'obtenir de meilleures performances du système, la nouvelle table de commutation dans les conditions de réseau déséquilibrées, doit être synthétisée en fonction de la variation de la puissance active et réactive pour différents vecteurs tension dans chaque secteur, comme le montre la figure 3.4. Les signes de variation des puissances active et réactive sont illustrés dans le tableau 3.1.

Secteur	dp/dt		dq/dt	
	$> 0 \leftrightarrow s_p = 1$	$< 0 \leftrightarrow s_p = 0$	$> 0 \leftrightarrow s_q = 1$	$< 0 \leftrightarrow s_q = 0$
$\theta_1$	$V_3, V_4, V_5, V_6$	$V_1, V_2$	$V_2, V_3, V_4$	$V_1, V_5, V_6$
$\theta_2$	$V_1, V_4, V_5, V_6$	$V_2, V_3$	$V_3, V_4, V_5$	$V_1, V_2, V_6$
$\theta_3$	$V_1, V_2, V_5, V_6$	$V_3, V_4$	$V_4, V_5, V_6$	$V_1, V_2, V_3$
$\theta_4$	$V_1, V_2, V_3, V_6$	$V_4, V_5$	$V_1, V_5, V_6$	$V_2, V_3, V_4$
$\theta_5$	$V_1, V_2, V_3, V_4$	$V_5, V_6$	$V_1, V_2, V_6$	$V_3, V_4, V_5$
$\theta_6$	$V_2, V_3, V_4, V_5$	$V_1, V_6$	$V_1, V_2, V_3$	$V_4, V_5, V_6$

**Tableau 3.1 :** Signes de variation des puissances active et réactive pour les 6 secteurs

En résumant les résultats de la figure 3.4, la table de commutation appropriée pour obtenir un contrôle simultané de  $P$  et  $Q^{nov}$  peut être obtenue dans le tableau 3.2.

$s_p$	$s_q$	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_4$	$\theta_5$	$\theta_6$
<b>1</b>	<b>0</b>	$V_6$	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$
	<b>1</b>	$V_4$	$V_5$	$V_6$	$V_1$	$V_2$	$V_3$
<b>0</b>	<b>0</b>	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$	$V_6$
	<b>1</b>	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$	$V_6$	$V_1$

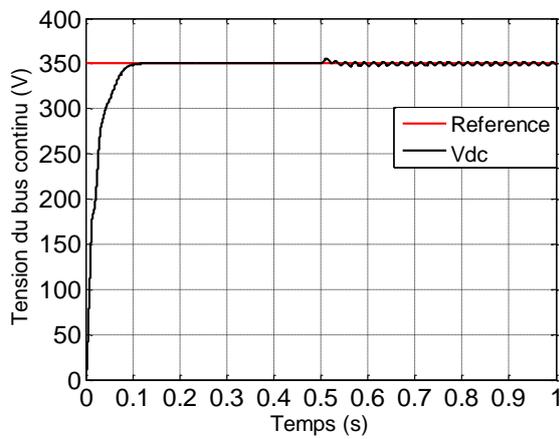
**Tableau 3.2** : Table de commutation du déséquilibre

### 3.5 Résultats de simulation

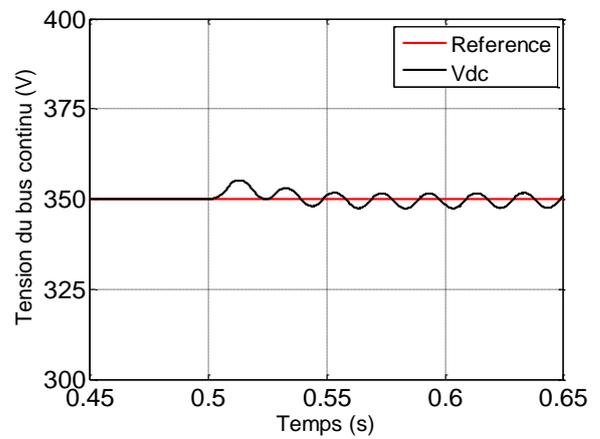
Pour vérifier les performances de la DPC proposée dans des conditions de tension de réseau déséquilibrée, une simulation numérique est effectuée avec le logiciel Matlab/Simulink sur un convertisseur AC / DC triphasé à deux niveaux. Les résultats obtenus à partir de la DPC utilisée dans chapitre 2 sont également présentés pour la comparaison des objectifs. Il est à noter que les deux structures de DPC sont alimentées par le même réseau déséquilibré.

Les figures (3.5) et (3.6) montrent les résultats de simulation sous un déséquilibre des tensions du réseau pour la DPC conventionnel et la DPC proposée. La condition du test est la même pour les deux méthodes. Une tension de réseau de séquence négative avec une amplitude de 10% de la tension de séquence positive est imposée dans le réseau à  $t = 0.5s$ . On peut voir que dans des conditions de tension de réseau déséquilibrées, les courants du réseau sont fortement déformés et la puissance active oscille dans la DPC conventionnelle, figure 3.5 (c), (d), (g), (h) et figure 3.5 (i), (j). Au contraire, en utilisant la nouvelle puissance réactive comme variable de contrôle, la puissance active et la nouvelle puissance réactive sont maintenant constantes et les distorsions dans les courants du réseau sont éliminées, figure 3.6 (c), (d), (k), (l). On remarque aussi que le déséquilibre affecte la stabilité de la tension du bus continu dans le cas de la DPC conventionnelle. En effet, des oscillations exagérées apparaissent en régime permanent, figure 3.5 (a), (b) ce qui n'est pas le cas pour la structure de DPC proposée où elle assure la stabilité de la tension de sortie, figure 3.6 (a). La figure 3.5 (j) montre que le courant du réseau n'est pas en phase avec la tension du réseau, ce qui ne donne pas un facteur de puissance unitaire. Contrairement à la structure proposée où le courant est la tension sont en phase figure 3.5 (m), qui assure un facteur de puissance unitaire. La qualité du réseau de la DPC proposée n'est pas affectée par le déséquilibre des tensions du réseau figures 3.6 (e),

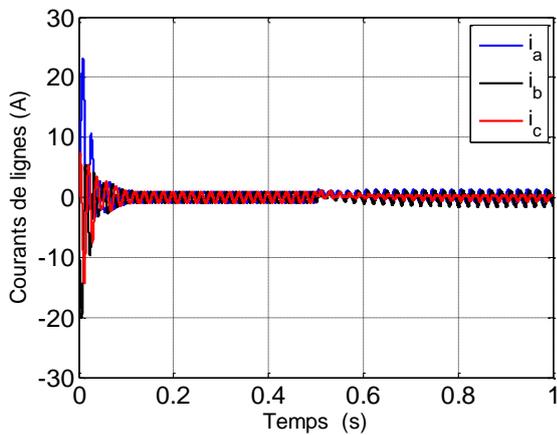
(f).Enfin, les résultats de simulation montrent que le contrôle proposé est plus robuste que celui du contrôle conventionnel lors d'un déséquilibre de tension.



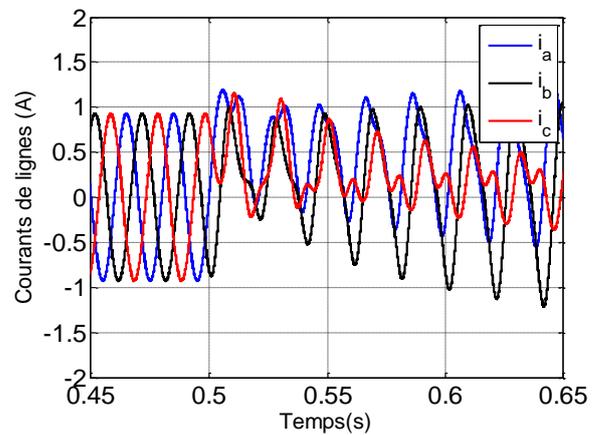
(a) Tension de sortie



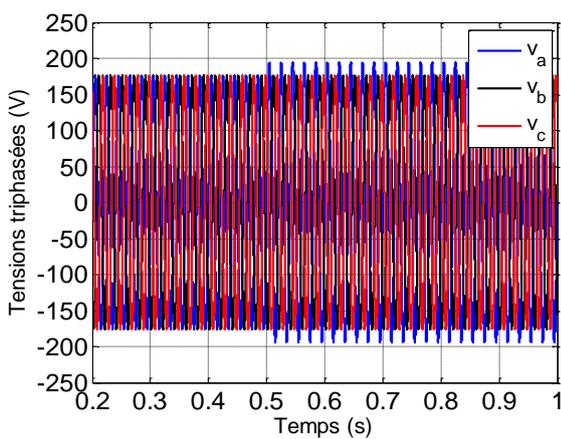
(b) Zoom sur la tension de sortie



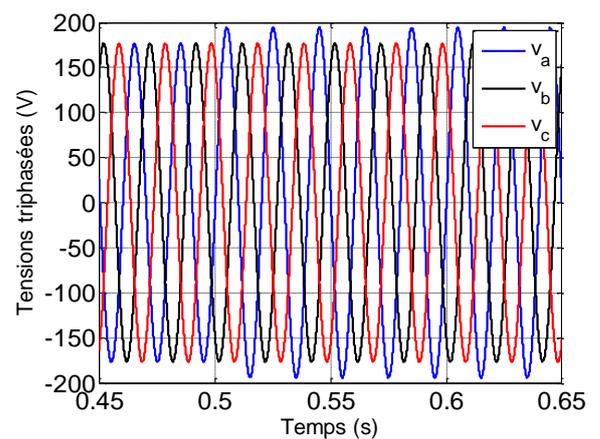
(c) Courants de ligne  $i_a, i_b, i_c$



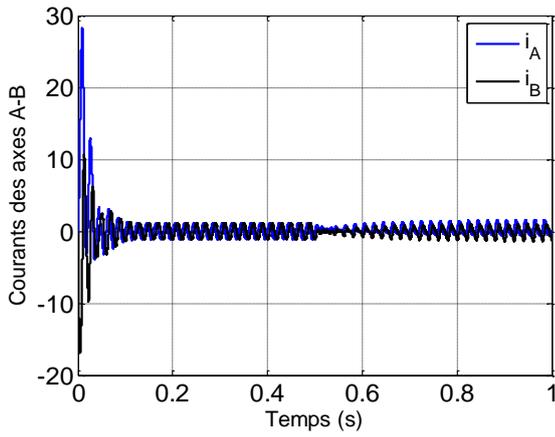
(d) Zoom des Courants de ligne  $i_a, i_b, i_c$



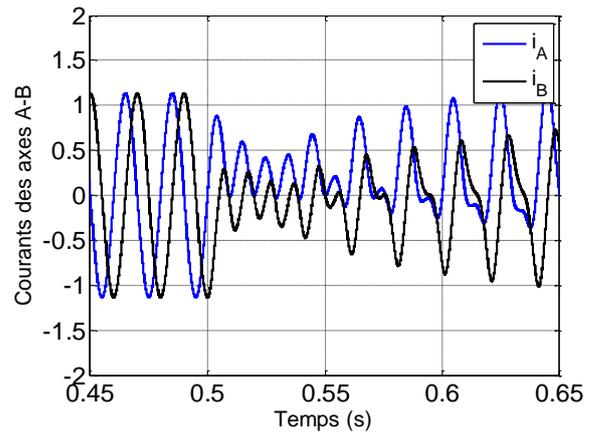
(e) Tensions triphasées



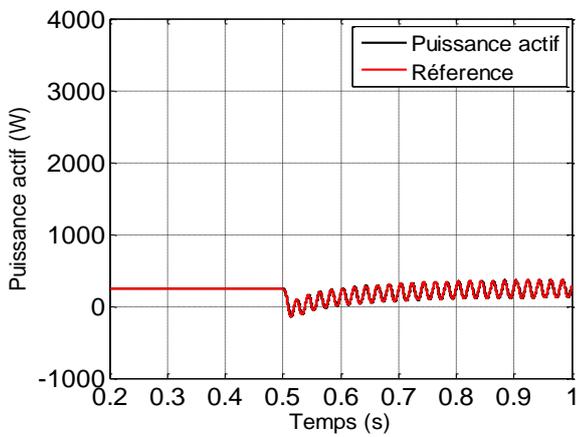
(f) Zoom des Tensions triphasées



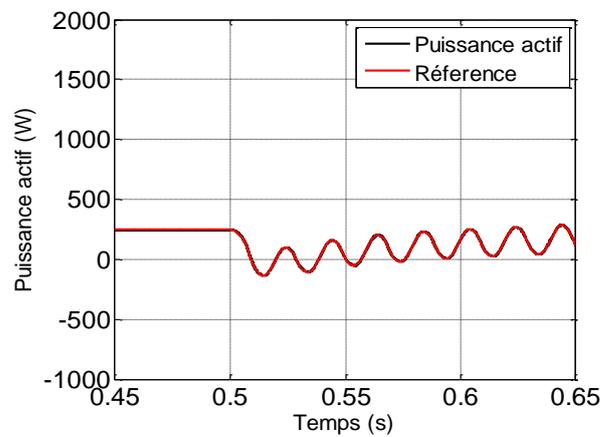
g) Courants  $i_\alpha, i_\beta$



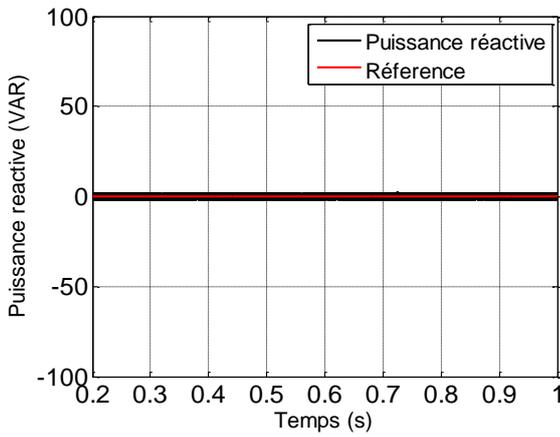
h) Zoom des Courants  $i_\alpha, i_\beta$



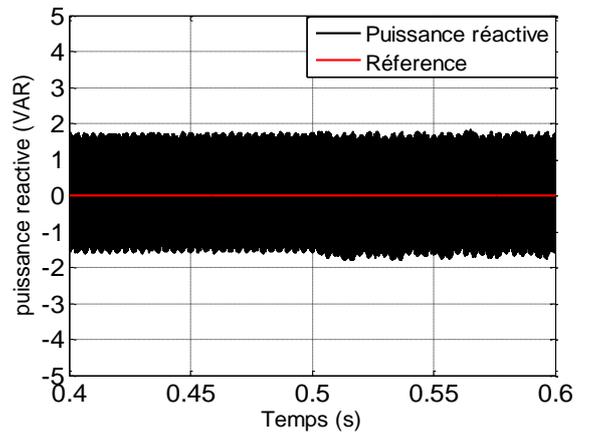
i) La puissance active



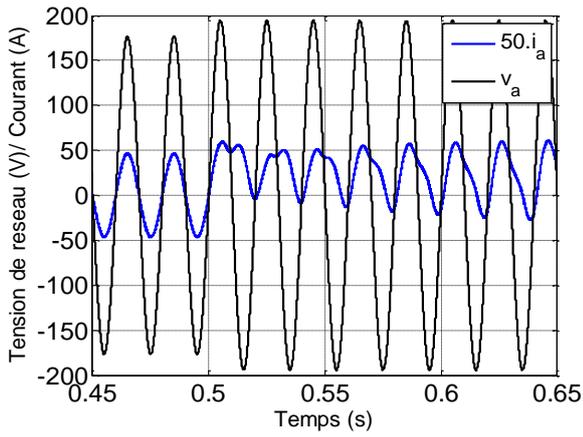
j) Zoom de la puissance active



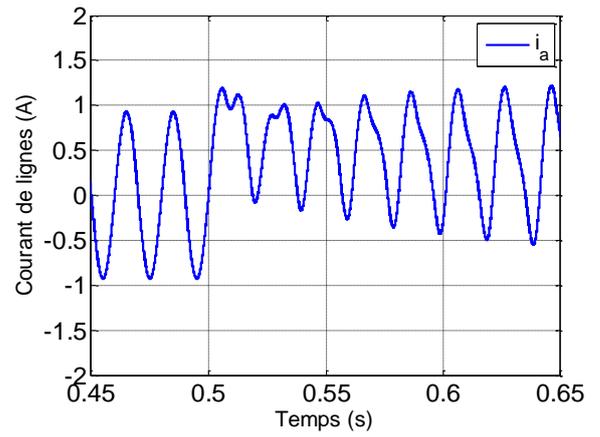
k) La puissance réactive



l) Zoom de la puissance réactive

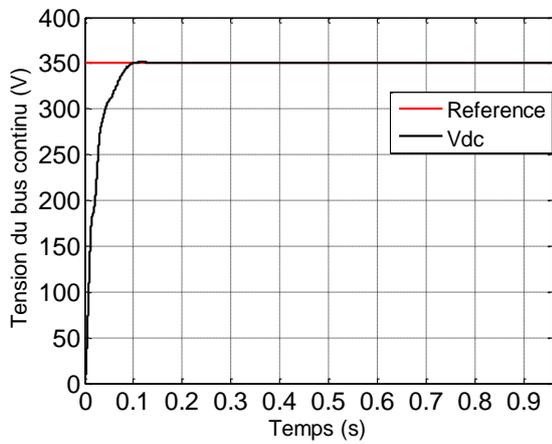


j) Tension et courant de phase

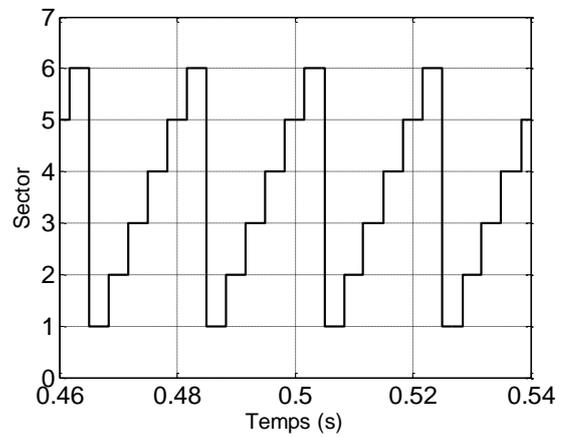


m) Courant de ligne  $i_a$

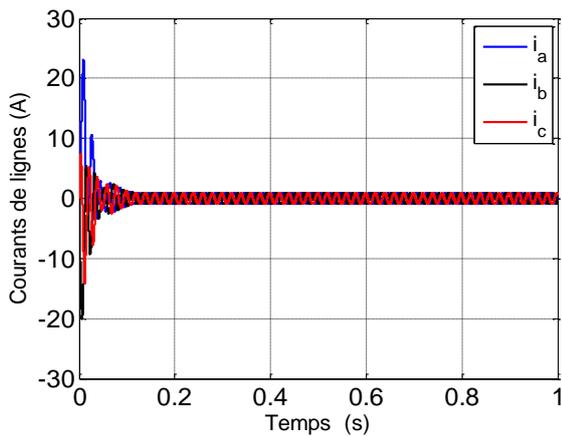
**Figure 3.5 :** Résultats de simulation de la structure du contrôle DPC conventionnelle



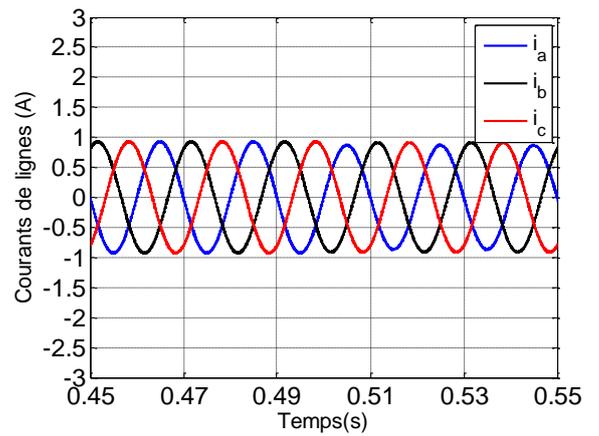
a) Tension de Sortie



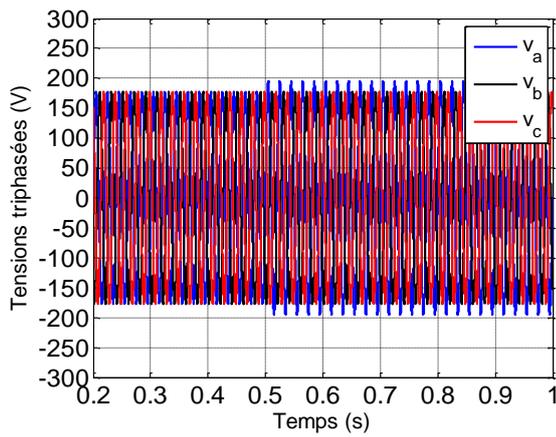
b) Variation du secteur



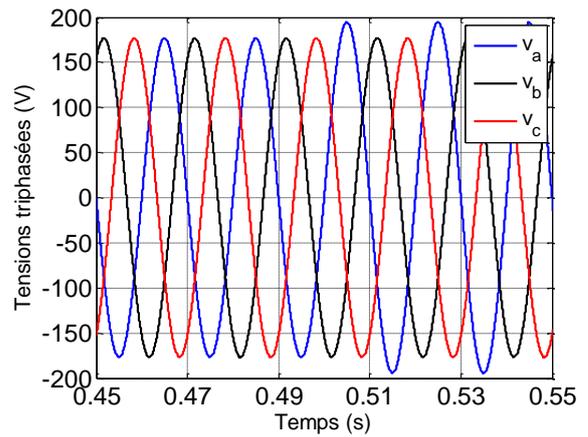
c) Courants de ligne  $i_a, i_b, i_c$



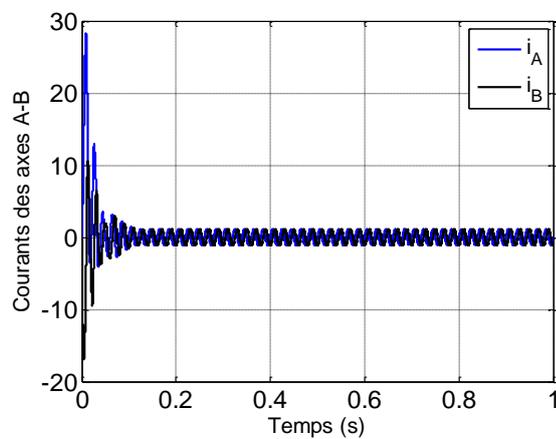
d) Zoom des courants de ligne  $i_a, i_b, i_c$



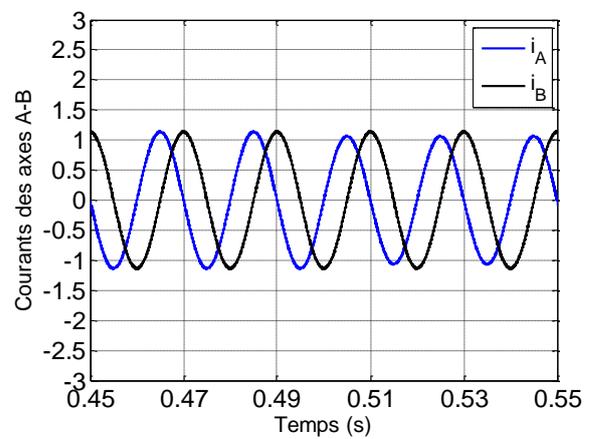
e) Tensions triphasées



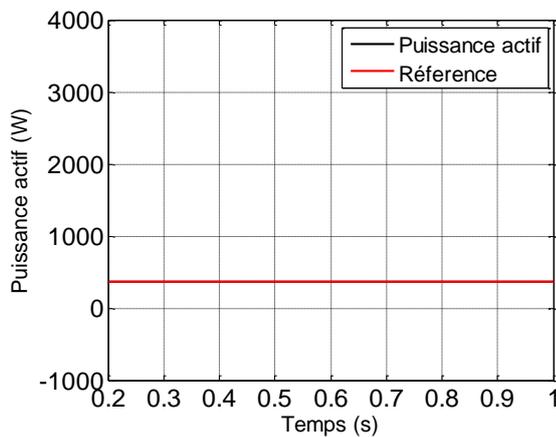
f) Zoom des Tensions triphasées



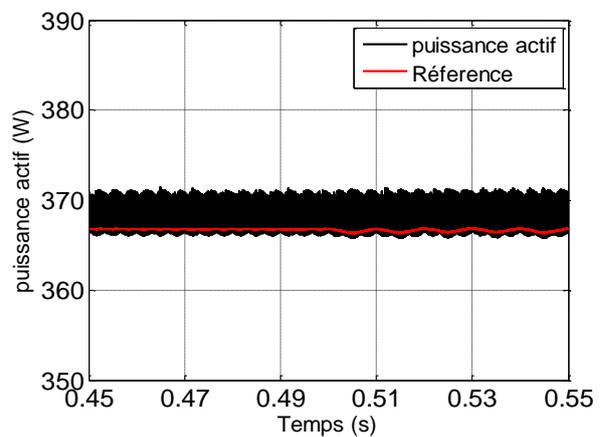
g) Courants  $i_\alpha, i_\beta$



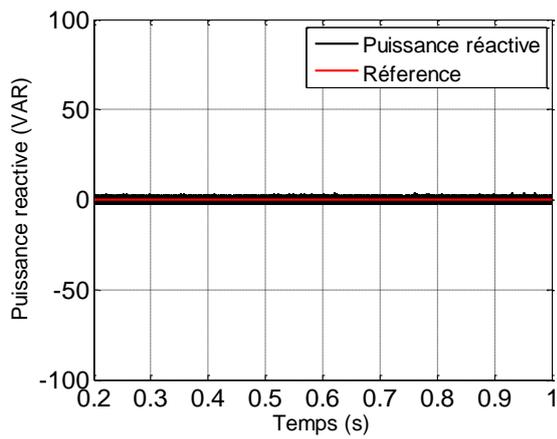
h) Zoom des Courants  $i_\alpha, i_\beta$



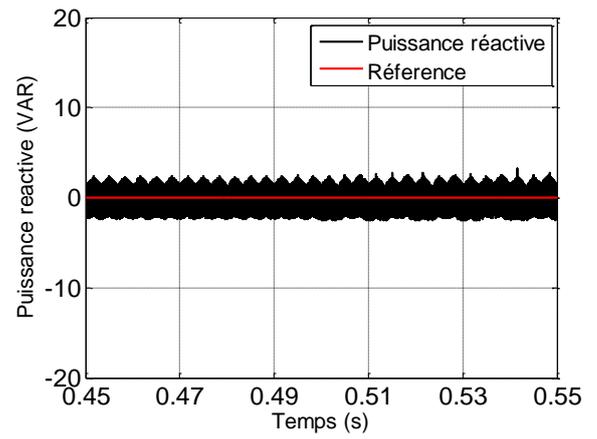
i) La puissance active



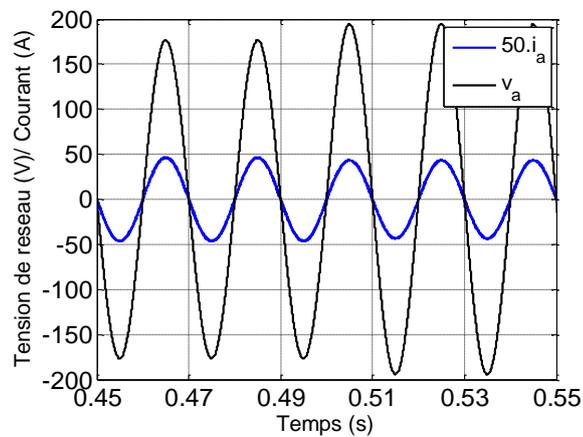
j) Zoom de la puissance active



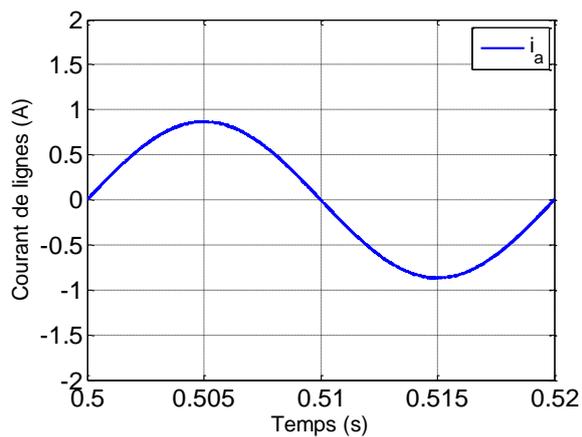
k) La puissance réactive



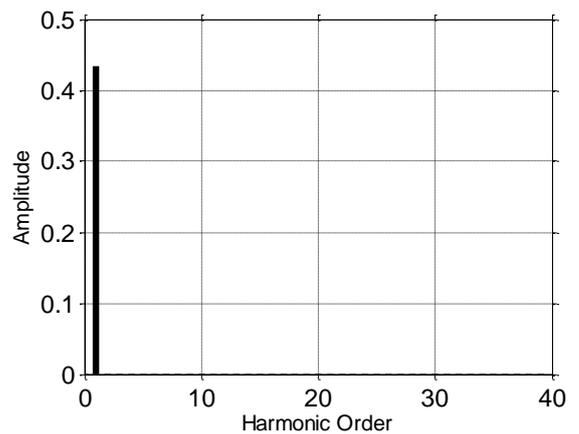
l) Zoom la puissance réactive



m) Tension et courant de phase



n) Courant de ligne  $i_a$



o) Spectre du courant de ligne de la phase  $a$

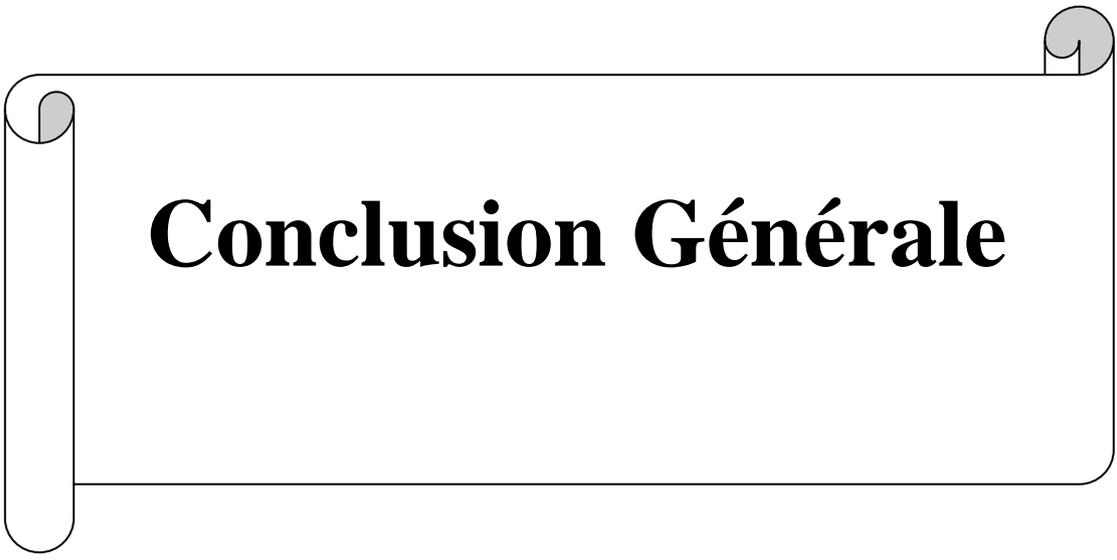
**Figure 3.6 :** Résultats de simulation de la structure du contrôle DPC proposée

### 3.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une nouvelle structure de contrôle DPC du redresseur triphasé à MLI basée sur une table adaptée pour fonctionner dans des conditions de tension de réseau équilibrées et déséquilibrées. La structure de DPC proposée est la même que celle de la DPC conventionnelle, sauf que la puissance réactive est remplacée par une nouvelle définition, qui est le produit scalaire des courants de réseau et des tensions de réseau déphasées.

Comparer à la stratégie de DPC utilisant la puissance réactive traditionnelle, l'avantage de la DPC proposée est sa simplicité en éliminant l'extraction compliquée des séquences positive et négative des tensions et des courants du réseau. Pour obtenir un contrôle simultané à la fois de la puissance active et de la nouvelle puissance réactive, une table de commutation est établie en analysant l'influence de chaque vecteur de tension du convertisseur sur la variation de puissance.

Cette stratégie est également robuste et présente une bonne régulation et assure la stabilité de la tension du bus continu lors du déséquilibre de la tension. De bonnes performances sont obtenues en régimes permanent et transitoire pour le réglage appréciable des puissances instantanées active et réactive et de la tension du bus continu. Ainsi, les courants absorbés possèdent une forme quasi-sinusoïdale et les performances en régime permanent et transitoire sont nettement meilleures par rapport au contrôle de DPC conventionnel.



# **Conclusion Générale**

## Conclusion générale

Le présent travail de ce mémoire s'inscrit dans le cadre de présentation de nouvelles solutions modernes à base d'électronique de puissance pour le contrôle des convertisseurs AC/DC de tension associé à un réseau électrique déséquilibré et alimentant une charge à un facteur de puissance unitaire. Dans ce mémoire, nous nous sommes intéressés plus particulièrement au contrôle direct des puissances instantanées active et réactive d'un redresseur triphasé alimenté par une source de tension non équilibrée.

Le redresseur à MLI commandé par le contrôle direct de puissance (DPC) se caractérise par les avantages d'une structure simple, une réponse rapide, pas besoin de réglage du courant interne et d'une forte robustesse. Cependant, la DPC basée sur une table de commutation conventionnelle ne peut pas fonctionner correctement lorsque la tension du réseau est déséquilibrée.

Dans ce contexte, nous avons élaboré dans notre travail une nouvelle stratégie de commande du redresseur de tension à MLI sous des conditions de réseau déséquilibré. Cette stratégie a pour but de garantir, la régulation et la stabilité de la tension du bus continu avec absorption des courants sinusoïdaux et un fonctionnement à facteur de puissance unitaire.

Ainsi, dans le premier chapitre de ce travail, un intérêt s'est porté sur les différentes structures de redresseurs commandés et non commandés et plus particulièrement au redresseur commandé à MLI. Cet intérêt est dû principalement à ses nombreuses applications. En plus de sa capacité de fonctionner en deux modes : redressement/régénération et le contrôle bidirectionnel du flux de puissance. Après nous avons présenté la modélisation de chaque bloc du convertisseur AC-DC et les équations analytiques du redresseur à MLI. Le principe de la commande (VOC) qui est basée sur le contrôle de courant dans le repère tournant synchrone (d-q) a été développé en détail. Les résultats de simulation ont montré l'efficacité de cette stratégie de commande. Elle est robuste, rapide et simple à implanter mais elle fonctionne avec un facteur de puissance moins que l'unitaire. Nous avons donc constaté que nous devons offrir une autre méthode pour améliorer les résultats obtenus par ce contrôle.

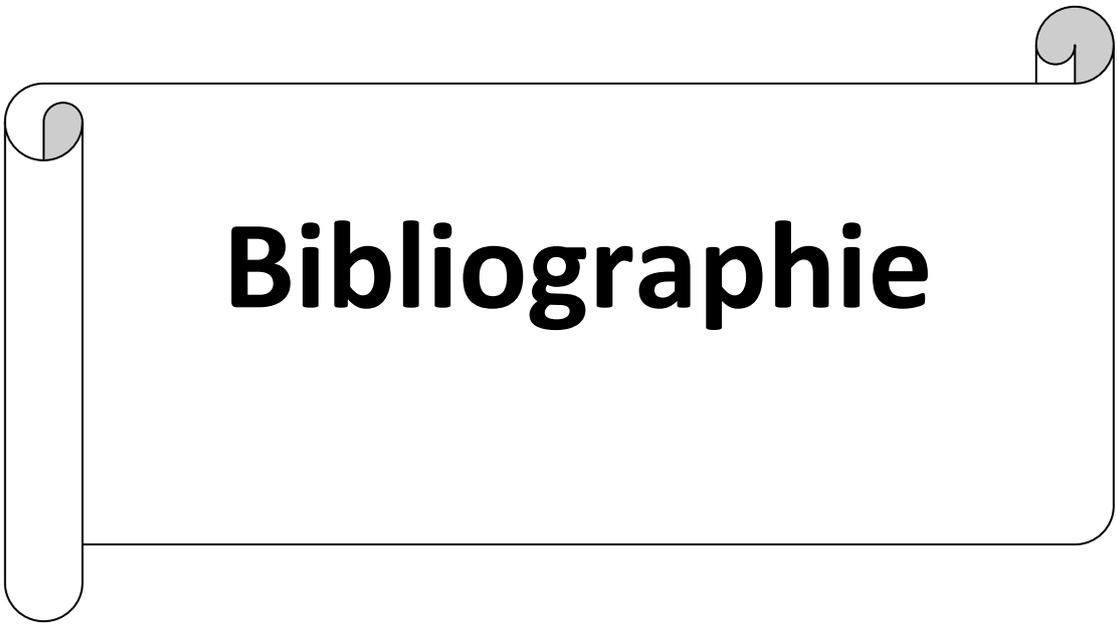
Dans le deuxième chapitre, il a été développé en tant qu'alternative au VOC, une stratégie de la DPC basée sur une nouvelle table de commutation à la place de la table de commutation classique. On a présenté les relations fondamentales sur la DPC à travers le contrôle direct de puissances instantanées actives et réactives, en estimant le vecteur de tension et les comparateurs à hystérésis. La nouvelle table de commutation a été élaborée sur la base de l'étude des variations des puissances active et réactive, provoquées par l'application de

chacun des vecteurs de commande durant une période complète de la tension du réseau. D'après les résultats obtenus dans ce chapitre nous avons constaté que la nouvelle table à assurer un contrôle plus précis et simultané des puissances actives et réactive dans tous les secteurs. Cette stratégie a pu garantir le contrôle et l'échange d'énergie entre le redresseur et le réseau. Donc on peut en travailler avec un facteur de puissance unitaire en imposant la puissance réactive à une valeur nulle. Cette approche a pu garantir aussi une bonne régulation du bus continu, en plus, les courants absorbés possèdent une forme quasi-sinusoidale.

Dans le troisième chapitre de ce travail, nous avons proposé, une DPC améliorée en utilisant une nouvelle définition de la puissance réactive instantanée qui peut atteindre des courants de réseau sinusoïdaux et une puissance active constante sans utiliser l'extraction compliquée, des séquences positive et négative de la tension et des courants du réseau. Une table de commutation a été établie pour atténuer l'influence du déséquilibre du réseau, en analysant l'influence de chaque vecteur de tension du convertisseur sur la variation de puissance. Cette table de commutation a été adaptée pour réguler à la fois la puissance active et la nouvelle puissance réactive. En conséquence, la distorsion du courant de réseau a été éliminée, une puissance active constante et une nouvelle puissance réactive ont été obtenues. Comparer à la stratégie de DPC utilisant la puissance réactive traditionnelle, les résultats de simulation ont montré que la DPC proposée est plus robuste. En effet, la qualité du réseau de la DPC proposée n'a pas été affectée par le déséquilibre de tensions du réseau assurant ainsi la stabilité de la tension du bus continu. Ainsi, les courants absorbés possèdent une forme proche de la sinusoïde, les courants est les tensions étaient en phase ce qui assure un facteur de puissance unitaire.

Les suites à donner à ce travail sont multiple. A titre d'exemple, on peut citer les perspectives suivantes :

- Application à d'autres convertisseurs multi niveaux tels que trois et cinq niveaux,
- Amélioration du contrôle DPC en utilisant la commande prédictive,
- Implémentation pratique des algorithmes de commandes utilisées.



# **Bibliographie**

# Bibliographie

- [Bac-19] **BACHAR Rahima** ‘ Commande Prédicative Appliquée au Filtre Actif ‘ Doctorat en Sciences en Génie Electrique, Université Mohamed Khider – Biskra, Avril 2019.
- [Bel-11] **Belhaouchet nouri** : « Fonctionnement a fréquence de commutation constante des convertisseurs de puissance en utilisant des techniques de commande avancées », thèse doctorat, université ferhat abbas Sétif, 06/07/2011.
- [Bel-18] **BELRECHID Raouf** « Analyse des performances des convertisseurs statiques commandés par le contrôle direct de puissance (DPC) : cas d’une centrale éolienne connectée au réseau électrique, », mémoire de master en électrotechnique, Université Saad Dahlab Blida, 2013-2014.
- [Ben-16] **Bensalah Wassila** : « Etude de la commande des redresseurs MLI », Projet de fin d’études pour l’obtention du diplôme de Master, Centre Universitaire Belhadj Bouchaïb d’Ain-Temouchent, 2015/2016.
- [Bou-09] **BOUTABA Samia** ‘ Amélioration de la stabilité d’un réseau électrique par l’utilisation d’un ASVC ’ mémoire de magistère, Université Hassiba Ben Bouali Chlef, Juin 2009.
- [Bou-18] **Bouarfa Bouchra, Bouzar Salima** : « Commande floue direct de puissance d’un redresseur a MLI triphasée » mémoire de master, université de Saida ,2018.
- [Chi 1-18] **T. Mohammed Chikouche, K. Hartani**, « A Strategy of Direct Power Control for PWM Rectifier Reducing Ripple in Instantaneous Power », 20th International Conference on Automobile and Electrical Engineering, ICAEE ‘18, February 15-16, 2018, Istanbul, Turkey.
- [Chi 2-18] **T. Mohammed Chikouche, K. Hartani**, « A Strategy of Direct Power Control for PWM Rectifier Reducing Ripple in Instantaneous Power », World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electrical and Computer Engineering, Vol.12, No.2, 2018.
- [Chi 3-18] **T. Mohammed Chikouche, K. Hartani**, « Direct Power Control Of Three-Phase Pwm Rectifier Based On New Switching Table », Journal of Engineering Science and Technology, Vol.13, No.6, 2018.
- [Elo-08] **J. Eloy-Garcia, S. Arnaltes, and J. Rodriguez-Amenedo**, “Direct power control of voltage source inverters with unbalanced grid voltages,” IET Power Electronics, vol. 1, no. 3, pp. 395 –407, 2008.
- [Gon-14] **B. Gong, K. Wang, J. Zhang, J. You, Y. Luo, and Z. Wenyi**, "Advanced switching table for direct power control of a three-phase PWM rectifier," in Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), 2014 IEEE Conference and Expo, 2014, pp. 1-5.
- [Har-10] **K. Hartani and Y. Miloud**, "Control strategy for three phase voltage source PWM rectifier based on the space vector modulation," Advances in Electrical and Computer Engineering, vol. 10, pp. 61-65, 2010.7.

- [Has-12] **M. U. Hashmi**, "Design and Development of UPF Rectifier in a Micro grid Environment," Indian Institute of Technology Bombay, 2012.
- [Hom-19] **Homir Brahim, GHout Mohamed** : « Contrôle direct de puissance du redresseur triphasé à MLI en utilisant une nouvelle table de commutation » mémoire de master, université de Saida ,2019.
- [Kot-14] **Kot Yahia**: « Modélisation et Simulation D'un Convertisseur AC/DC triphasé », Mémoire de Fin d'Etude En vue de l'obtention du diplôme de MASTER ACADEMIQUE Université d'EL-Oued 2013/2014.
- [Lad-02] **P. Ladoux, G. Ollé** : « Compensateur d'harmonique et de puissance réactive », système didactique, RESELEC 2002.
- [Liu-08] **P. Liutanakul, S. Pierfederici, and F. Meibody-Tabar**, "Application of SMC with I/O feedback linearization to the control of the cascade controlled-rectifier/inverter-motor drive system with small dc-link capacitor," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 23, pp. 2489-2499, 2008.
- [Mal-01] **M. Malinowski**, « Sensorless Control Strategies for Three - Phase PWM Rectifiers ». Phd Thesis, Faculty of Electrical Engineering Institute of Control and Industrial Electronics, 2001.
- [Mal-03] **M. Malinowski, P. Kazmierkowski, A. Trzynadlowski** , « Simple Direct Power Control of Three-Phase PWM Rectifier Using Space Vector Modulation ». IEEE Trans. On Industrial Electronics, vol. 51, n° 2, p. 447-454, April 2004.
- [Mal-04] **M. Malinowski, M. Jasinski, M. P. Kazmierkowski** , « 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) 349–36 03 ,2003.
- [Med-18] **Medouce Houssam Eddine** : «Analyse des performances des convertisseurs statiques commandés par le contrôle direct de puissance (DPC) : cas d'une centrale éolienne connectée au réseau électrique », Thèse de doctorat de 3eme cycle en Electrotechnique, Université Frères Mentouri Constantine 1, Juillet 2018.
- [Meg-16] **Megerbi Hichem, HAMERI Sofiane** : « Etude et modélisation des convertisseurs statiques destinés à améliorer la qualité de l'énergie électrique », mémoire de master en électrotechnique, université Moulay Taher a Saida, Juin 2016.
- [Nia-96] **S. Nia Ahmed** : « Contribution à l'étude théorique et expérimentale d'un filtre actif parallèle à commande analogique et numérique temps réel », Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL), Lorraine, 1996.
- [Rod-05] **J. R. Rodriguez, J. W. Dixon, J. R. Espinosa, J. Pontt, and P. Lezana**, "PWM régénérative rectifiers: State of the art," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 52, pp. 5-22, 2005.
- [Sha-11] **L. Shang, D. Sun, and J. Hu**, "Sliding-mode-based direct power control of grid-connected voltage-sourced inverters under unbalanced network conditions," IET Power Electronics, vol. 4, no. 5, pp. 570–579, 2011.

- [Suh-06] **Y. Suh and T. A. Lipo**, “Modeling and analysis of instantaneous active and reactive power for pwm ac/dc converter under generalized unbalanced network,” IEEE Trans. Power Del., vol. 21, no. 3, pp. 1530–1540, 2006.
- [Ted-11] **M.TEDJANI** : «Gestion des flux énergétiques dans un système de conversion éolienne» Mémoire de magister, Université. D’Annaba 2011.
- [Zha-13] **Yongchang Zhang, Changqi Qu , Zhengxi Li and Yingchao Zhang** “ Mechanism Analysis and Experimental Study of Table-Based Direct Power Control, ” International Conference on Electrical Machines and Systems, Oct. 26-29, 2013, Busan, Korea.
- [Zha-14] **Yongchang Zhang, Changqi Qu, Zhengxi Li and Yingchao Zhang** “ Direct Power Control of PWM Rectifier Under Unbalanced Grid Voltage ” ,17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS),Oct. 22-25, 2014, Hangzhou.
- [Zha-16] “Relationship Between Two Direct Power Control Methods for PWM Rectifiers Unbalanced Network”, 0885-8993 (c) 2016 IEEE, Transactions on Power Electronics.
- [Zha-17] **Yongchang Zhang, Jie Liu and Jihao Gao**“Direct Power Control of PWM Rectifier under Unbalanced Network Using Extended Power Theory,” 978-1-5090-2998-3/17/\$31.00 ©2017 IEEE.
- [Zha-18] **Yongchang Zhang, Jian Jiao and Jie Liu** “Robust Direct Power Control of PWM Rectifier with DC Voltage Ripple under Unbalanced Network,” 978-1-4799-7312-5/18/\$31.00 ©2018 IEEE.
- [Zha-19] **Yongchang Zhang, Jian Jiao, Jie Liu, and Jihao Gao** “Direct Power Control of PWM Rectifier with Feedforward Compensation of DC-Bus Voltage Ripple under Unbalanced Grid Conditions,” 0093-9994 (c) 2018 IEEE, Transactions on Industry Applications.
- [Zha1-15] **Yongchang Zhang, Changqi Qu and Jihao Gao** “ Performance Improvement of Direct Power Control of PWM Rectifier Under Unbalanced Network ” the 9th International Conference on Power Electronics (ICPE 2015), 1-5 June, 2015, Seoul, Korea.
- [Zha2-15] “Power Control of PWM Rectifier with Optimal Duty Ratio Under Unbalanced Network”, 9th International Conference on Power Electronics, June 1 - 5, Seoul, Korea.
- [Zha1-18] **Yongchang Zhang, Jian Jiao and Jie Liu**, « Direct Power Control of PWM Rectifiers with Online Inductance Identification under Unbalanced and Distorted Network Conditions », 0885-8993 (c) 2018 IEEE, Transactions On Power Electronics.
- [Zhe-13] **ZHENG Zheng,ZHANG Zhen-hua** “Research of Direct Power Control for PWM Rectifier under Unbalanced Grid Voltage,” 978-1-4673-5534-6/13/\$31.00 © 2013 IEEE.

## Résumé

Le redresseur à MIL commandé par le contrôle direct de la puissance (DPC) se caractérise par les avantages d'une réponse rapide, pas besoin de réglage du courant interne et d'une forte robustesse. Cependant, la DPC basée sur une table de commutation conventionnelle ne peut pas fonctionner correctement lorsque la tension du réseau est déséquilibrée. Diverses méthodes ont été proposées pour atténuer l'influence du déséquilibre du réseau mais elles sont généralement compliquées et nécessitent une extraction des séquences positive et négative de la tension et des courants du réseau. De plus, l'application d'un seul vecteur de tension pendant une période de contrôle entraîne des ondulations de puissance élevées en régime dynamique. Dans ce travail nous avons proposé une DPC améliorée en utilisant une nouvelle définition de la puissance réactive instantanée qui peut atteindre des courants de réseau sinusoïdaux et une puissance active constante sans utiliser l'extraction des séquences compliquées. Une nouvelle table de commutation est établie pour réguler à la fois la puissance active et la nouvelle puissance réactive. La simplicité et la robustesse de la DPC conventionnelle sont maintenues grâce à l'utilisation de cette nouvelle définition de puissance réactive. Les résultats de simulation sont présentés pour confirmer l'étude théorique et l'efficacité de la méthode proposée.

Mots clés : | Commande direct de puissance (DPC), Réseau déséquilibré, Nouvelle table de commutation, Nouvelle puissance réactive.