

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : GENIE ELECTRIQUE

N° :



FILIERE : Electromécanique

OPTION : Electromécanique

Mémoire présenté pour l'obtention

Du diplôme de Master Académique

Par : BENSLIMANE SLIMANE

BENAISSI YOUNES

**Commande d'un Redresseur Triphasé à MLI
Alimenté par un Réseau Electrique**

Intitulé

Soutenu devant le jury composé de :

BENDAIKHA Abdlmalik	Université	Mohamed Boudiaf M'sila	Président
ZOUGGAR El Oualid	Université	Mohamed Boudiaf M'sila	Rapporteur
ROUABHI Riyadh	Université	Mohamed Boudiaf M'sila	Examineur

Année universitaire : 2023/2024

Remerciement

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

Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur Dr. ZOUGGAR El Oualid, pour ses conseils précieux, ses directives enrichissantes, sa patience et sa disponibilité, ainsi que pour la confiance et l'aide qu'il nous a accordé pour mener ce travail à terme.

Toutes mes reconnaissances vont également aux membres de jury : Dr. BENDAIKHA Abdlmalik et Dr. ROUABHI Riyadh pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant de participer au jury pour juger ce modeste travail.

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

Dédicaces

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

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

À nos parents avec toutes nos gratitudees pour tous ces années de sacrifice et d'encouragement

À nos frères et sœurs.

À toute la famille BEN SLIMANE et BENAISSI.

À tous nos amis et collègues de notre vie privée et de l'université de M'sila.

Introduction générale..... 1

I. CHAPITRE I : Etat de l’art sur les différentes commandes du redresseur à mli 3

I.1. Introduction.....4

I.2. Définition d’un redresseur :.....4

I.3. Redresseur MLI.....4

I.4. Principe de fonctionnement d’un redresseur MLI :.....5

I.5. Structure d’un redresseur MLI :6

I.6. Les différents types de redresseur MLI.....9

 I.6.1. Redresseur à MLI de courant9

 I.6.2. Redresseur à MLI de tension..... 10

I.7. La différence entre le Redresseur à MLI de courant et de tension.....11

 I.7.1. Redresseur à MLI de courant 11

 I.7.2. Redresseur à MLI de tension :..... 11

I.8. Les applications des redresseurs12

I.9. Les principaux avantages des redresseurs à MLI12

I.10. Conclusion13

II. CHAPITRE II : Modélisation et simulation d’un redresseur à MLI. 14

II.1. Introduction :15

II.2. Modélisation de redresseur à MLI.....15

II.2.1.	La source d'alimentation	15
II.2.2.	Le redresseur à MLI.....	16
II.2.3.	La charge	17
II.3.	La commande en courant du redresseur a MLI dans le repère dq.....	18
II.3.1.	Modélisation dans le repère dq	18
II.3.2.	Boucle externe de régulation de la tension.....	20
II.3.3.	Boucle interne de régulation des courants	20
II.3.4.	Commande à MLI.....	21
II.3.5.	Résultats de simulation	21
II.3.6.	Interprétation des résultats :	24
II.4.	Conclusion	25
III.	Chapitre III : La commande directe de puissance	26
III.1.	Introduction.....	27
III.2.	Commande directe de puissance DPC :	27
III.3.	Principe de la commande directe de puissance	27
III.4.	DPC classique.....	28
III.5.	Détermination du secteur	28
III.6.	Régulateur à hystérésis.....	29
III.7.	Correcteurs de puissance active :	30
III.8.	Table de commutation :	30
III.9.	Expressions des puissances instantanées :	31
III.10.	Régulation de la tension continue.....	32
III.11.	Résultats de simulation :	32

III.12. Interprétation des résultats :36

III.13. Conclusion :37

CONCLUSION GÉNÉRALE 39

BIBLIOGRAPHIE 40

LISTE DES FIGURES

<i>Figure I-1: Topologie de base d'un redresseur de tension</i>	5
<i>Figure I-2: Redresseur à MLI triphasé de structure tension</i>	7
<i>Figure I-3: Circuit équivalent pour le contrôle de courant absorbé</i>	7
<i>Figure I-4: Topologie d'un redresseur à MLI triphasé de courant</i>	10
<i>Figure I-5: Topologie d'un redresseur à MLI triphasé de tension</i>	11
<i>Figure I-6: Pont de redresseur triphasé a diode.</i>	12
<i>Figure II-1: Structure du redresseur à MLI.</i>	15
<i>Figure II-2: Schéma fonctionnel du redresseur à MLI.</i>	17
<i>Figure II-3: Schéma bloc de la commande en courant du redresseur à MLI dans le repère dq.</i>	19
<i>Figure II-4: La boucle de régulation des courants avec compensation de la tension réseau.</i>	20
<i>Figure II-5: Performances du redresseur à MLI commandé par la régulation des courants dans le repère dq.</i>	24
<i>Figure III-1: Configuration générale de la commande DPC</i>	28
<i>Figure III-2: Plant (α, β) divisé en 12 secteurs</i>	29
<i>Figure III-3: Régulation de la tension continue.</i>	32
<i>Figure III-4: Performances du redresseur à MLI commandé par la DPC.</i>	36

LISTE DES TABLEAUX

<i>Table I-1: Tensions simples en fonction des différents ordres de commande.....</i>	<i>7</i>
<i>Table II-1: Tensions simples en fonction des différents ordres de commande.</i>	Error! Bookmark not defined.
<i>Table II-2: Paramètres de simulation du redresseur à MLI.</i>	<i>21</i>
<i>Table III-1: Table de commutation de la DPC.</i>	<i>31</i>

LISTE DES SYMBOLES

$v_{s1}; v_{s2}; v_{s3}$	Tensions du réseau
$i_{res1}; i_{res2}; i_{res3}$	Courants du réseau
r	Résistance totale de la ligne
l	Inductance totale de la ligne
$v_{c1}; v_{c2}; v_{c3}$	Tensions à l'entrée du convertisseur.
$i_{\alpha}; i_{\beta}$	Composantes du vecteur courant de ligne dans le repère stationnaire (α , β)
$i_d; i_q$	Composantes du vecteur courant de ligne dans le repère tournant (d, q)
$i_{d ref}; i_{q ref}$	Courant de référence de ligne dans le repère tournant (d, q).
$v_{\alpha}; v_{\beta}$	Composantes du vecteur tension de ligne dans le repère stationnaire (α , β)
$v_d; v_q$	Composantes du vecteur tension de ligne dans le repère tournant (d, q).
v_{dc}	Tension de bus continue
$v_{dc ref}$	Tension bus continue de référence
ω	Pulsation électrique de rotation du rotor.
i_{ch}	Courant de charge
C	Capacité côté continue
R_{ch}	Résistance de la charge
$F_{11}; F_{21}; F_{31}$	Etats de commutation du redresseur
P	Puissance active de réseau
P_{ref}	Puissance active de référence
Q	Puissance réactive de réseau
Q_{ref}	Puissance réactive de référence
\hat{P}	Puissance active instantanée.
\hat{Q}	Puissance réactive instantanée.
h_p	Bande d'hystérésis pour la puissance active.
h_q	Bande d'hystérésis pour la puissance réactive.

Acronymes

MLI	Modulation de Largeur d'Impulsions
DPC	La commande directe de puissance
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
THD	Total Harmonic Distortion (Taux de Distorsion Harmonique)
MOSFET	metal–oxide–semiconductor field-effect transistor.
DTC	la commande directe du couple

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Les redresseurs, couramment appelés simplement redresseurs, jouent un rôle essentiel dans le domaine de l'électronique de puissance en convertissant directement le courant alternatif en courant continu. Ils sont alimentés par une source de tension alternative, qu'elle soit monophasée ou polyphasée, et permettent d'alimenter en courant continu un appareil connecté à leur sortie. Les redresseurs sont utilisés chaque fois que l'énergie continue est nécessaire, même lorsque l'énergie électrique est disponible sous forme alternative. Étant donné que l'énergie électrique est généralement produite et distribuée sous cette forme, les redresseurs ont un large éventail d'applications.

Il existe deux types principaux de redresseurs : les redresseurs à diodes, également appelés redresseurs non commandés, et les redresseurs à thyristors, également appelés redresseurs commandés. Les redresseurs à diodes ne permettent pas de régler le rapport entre les tensions alternatives d'entrée et la tension continue de sortie, et ils ne sont pas réversibles, c'est-à-dire que la puissance ne peut circuler que du côté alternatif vers le côté continu.

En revanche, les redresseurs à thyristors permettent de régler la tension continue de sortie pour une tension alternative d'entrée donnée, et ils sont réversibles, ce qui signifie qu'ils peuvent transférer la puissance du côté continu vers le côté alternatif, fonctionnant ainsi comme des onduleurs non autonomes.

Pour alimenter des dispositifs fonctionnant en courant continu ou des cascades d'onduleurs, on utilise des redresseurs à diodes ou des redresseurs à thyristors, qui fonctionnent en commutation naturelle ou forcée. Cependant, ces derniers présentent des inconvénients importants, notamment l'injection d'harmoniques de courant dans le réseau d'alimentation et une absorption importante de puissance réactive.

La réversibilité en courant de l'onduleur à modulation de largeur d'impulsion (MLI) permet son utilisation en tant que redresseur MLI. Cela permet d'alimenter une charge, qu'elle soit passive ou active, en courant continu à partir d'un réseau alternatif, en prélevant un courant sinusoïdal, éventuellement en phase avec la tension du réseau.

Le mémoire est composé des trois chapitres :

- ✓ Un état de l'art des différentes techniques de commande du convertisseur côté réseau

INTRODUCTION GENERALE

(redresseur à MLI) est présenté dans le premier chapitre.

- ✓ Dans le but de vérifier quelques algorithmes de commande du convertisseur côté réseau, le deuxième chapitre est consacré à la modélisation et la simulation du redresseur à MLI.
- ✓ Le troisième chapitre traite l'étude de la commande directe de puissance.

On terminera ce travail par une conclusion générale

**I. CHAPITRE I : ETAT DE L'ART SUR LES
DIFFERENTES COMMANDES DU REDRESSEUR A
MLI**

I.1. Introduction

De nombreux appareils électriques à usage domestique ou industriel fonctionnent avec du courant continu, alors que les réseaux de distribution fournissent principalement du courant alternatif. C'est pourquoi la conversion de l'énergie électrique est un défi majeur et récurrent. Les redresseurs sont donc des convertisseurs largement utilisés parmi les dispositifs électriques de puissance pour répondre à ce besoin. Les convertisseurs de puissance jouent un rôle important dans l'industrie et largement utilisée dans la production d'énergie électrique, on les trouve dans les systèmes éolienne et solaire.

Ce chapitre sera l'objectif de présenter les définitions, les généralités et la modélisation d'un redresseur à commande MLI.

I.2. Définition d'un redresseur :

Un redresseur, également désigné comme convertisseur alternatif/continu, est un appareil qui convertit une tension alternative en courant continu pour alimenter une charge. La source d'alimentation est généralement un générateur de tension. Les redresseurs non commandés, fabriqués principalement à partir de diodes, sont employés lorsque la tension de sortie n'exige pas d'ajustement. En revanche, les redresseurs commandés, qui peuvent ajuster leur tension de sortie, utilisent des thyristors ou des combinaisons de diodes et de thyristors. En raison de leur puissance élevée, ces redresseurs sont utilisés dans des applications nécessitant une régulation de l'énergie. Pour les applications à faible et moyenne puissance, les redresseurs commandés avec thyristors sont en déclin et sont souvent remplacés par des configurations associant un redresseur et un convertisseur continu-continu. Dans le domaine des petites puissances, le contrôle d'un transistor à effet de champ ou d'un IGBT est plus simple que celui d'un thyristor, et les fréquences de fonctionnement des hacheurs, atteignant aujourd'hui 200 kHz, permettent une réduction significative de la taille des composants de filtrage.

I.3. Redresseur MLI

Les redresseurs MLI diffèrent des modèles classiques en étant constitués de semi-conducteurs qui sont contrôlés pour s'ouvrir et se fermer grâce à une boucle de contrôle illustrée dans la figure I.1. Cette capacité de commande permet un contrôle intégral du convertisseur, car les interrupteurs peuvent être activés selon les besoins, tant en ouverture qu'en fermeture, avec une fréquence élevée. [9].

Il y a deux manières de mettre en application des redresseurs MLI ; comme redresseur à source de courant, et redresseur à source de tension.

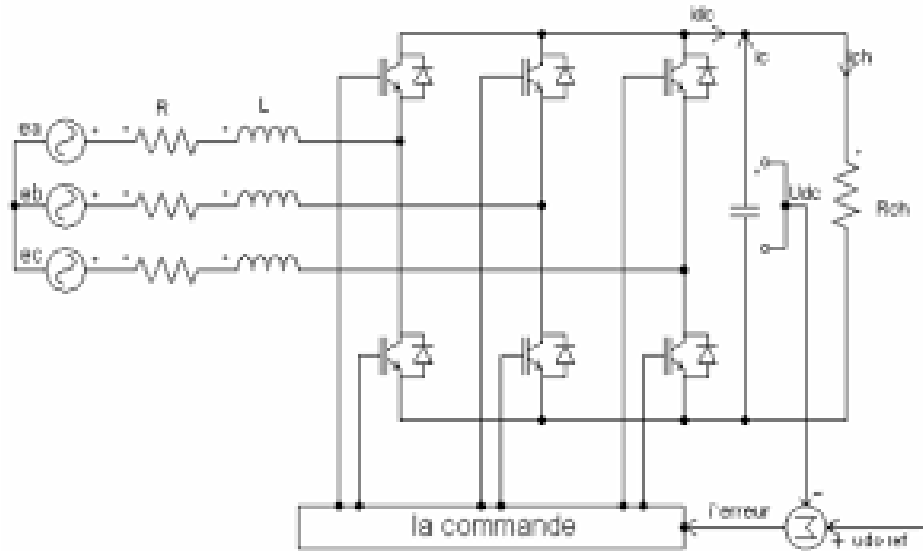


Figure I-1: Topologie de base d'un redresseur de tension

I.4. Principe de fonctionnement d'un redresseur MLI :

Le redresseur de tension fonctionne en gardant la tension du bus continu à une valeur de référence désirée, en utilisant une commande en boucle fermée, comme montré dans la figure I.1 Pour accomplir cette tâche, la tension du bus continu U_{dc} est mesurée et comparée avec une référence U_{dc-ref} , le signal d'erreur produit de cette comparaison est employé pour commuter les six interrupteurs du redresseur à la fermeture et à l'ouverture. De cette façon, la puissance peut s'écouler dans les deux sens selon les conditions sur la tension du bus continu U_{dc} mesurée aux bornes du condensateur C [9].

Quand le courant i_{ch} est positif (fonctionnement redresseur), le condensateur C est déchargé, et le signal d'erreur demande au bloc de commande de plus de puissance de la source alternative. Le bloc de commande prend la puissance de la source alternative en produisant un signal MLI approprié pour les six interrupteurs. De cette façon, un écoulement plus de courant de la source alternative au côté continu, et la tension de condensateur est récupérée. Inversement, quand i_{ch} devient négatif (fonctionnement onduleur), le condensateur C est surchargé, et le signal d'erreur demande au bloc de commande pour décharger le condensateur, et la puissance retourne à la source alternative [9].

La commande MLI non seulement peut contrôler la puissance active, mais également la puissance réactive, ce type du redresseur permet la correction du facteur de puissance. En outre, les formes d'onde des courants de la source peuvent être maintenu comme presque sinusoïdales, ce qui réduit la distorsion de la source.

I.5. Structure d'un redresseur MLI :

La capacité de réversibilité en courant d'un onduleur de tension permet son emploi en tant que redresseur à MLI. La structure associée à un filtre L à l'entrée, représentée dans la figure I.2, s'apparente à celle d'un onduleur où le côté continu est formé par un condensateur équivalent à une source de tension. Pour respecter les normes d'interconnexion des sources, il faut considérer l'entrée comme une source de courant puisque ce convertisseur ne comporte que des interrupteurs semi-conducteurs. De plus, les inductances de couplage sont indispensables pour contrôler les courants absorbés par le redresseur. En effet, quelle que soit la méthode utilisée pour générer les signaux de commande (S_a , S_b et S_c), le redresseur peut indirectement influencer la forme du courant dans ces inductances en ajustant les tensions $V_a(t)$, $V_b(t)$ et $V_c(t)$ par rapport au neutre du réseau. Autrement dit, la variation du courant prélevé (di/dt) est déterminée par la tension appliquée aux inductances qui correspond à la différence entre la tension réseau et celle à l'entrée du redresseur, comme illustré dans la figure I.3. Les inductances se comportent également comme un filtre passe-bas et réduisent l'ondulation du courant à la fréquence de commutation [1].

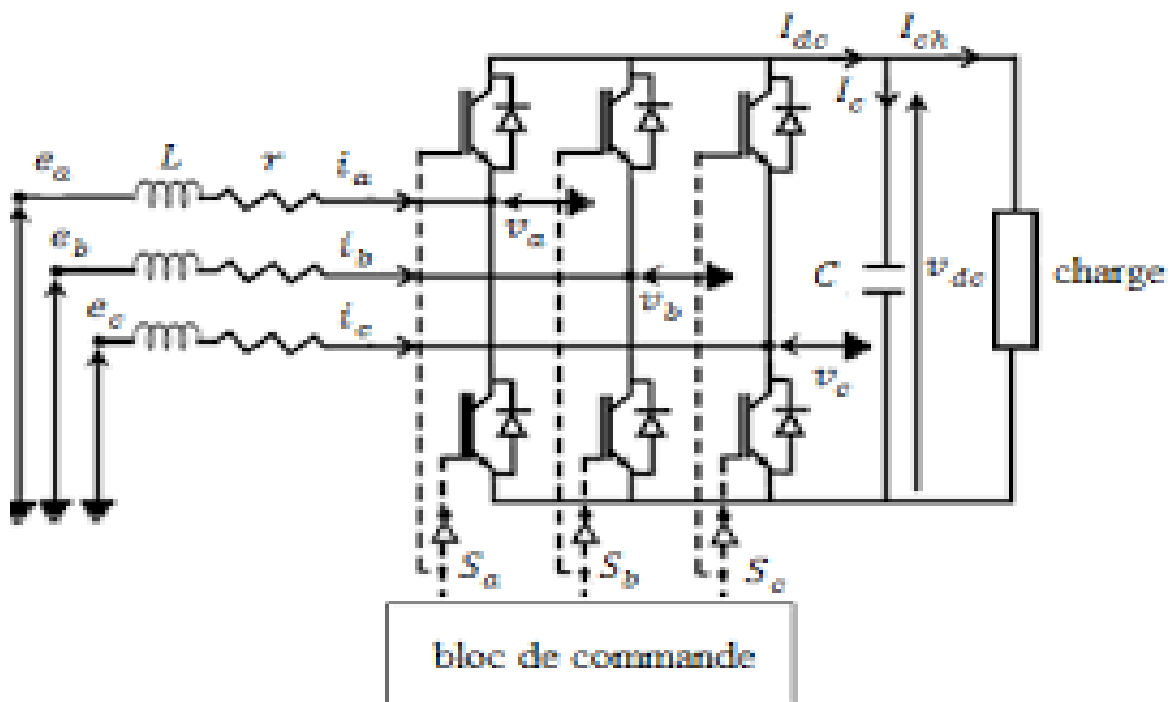
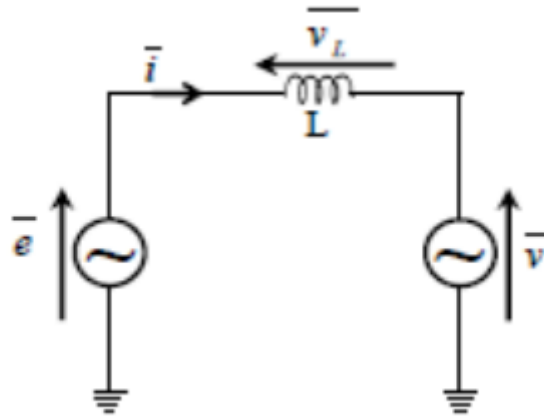


Figure I-2: Redresseur à MLI triphasé de structure tension**Figure I-3: Circuit équivalent pour le contrôle de courant absorbé**

Avec :

$$e(t) = \frac{2}{3} (e_a(t) + \lambda \cdot e_b(t) + \lambda^2 \cdot e_c(t)) \quad (\text{I-1})$$

$$v(t) = \frac{2}{3} (v_a(t) + \lambda \cdot v_b(t) + \lambda^2 \cdot v_c(t)) \quad (\text{I-2})$$

$$v_l(t) = \frac{2}{3} (v_{l_a}(t) + \lambda \cdot v_{l_b}(t) + \lambda^2 \cdot v_{l_c}(t)) \quad (\text{I-3})$$

$$\lambda = \exp(j2\pi/3) \quad (\text{I-4})$$

Le courant absorbé est alors exprimé par l'équation (I-5) suivante :

$$i(t) = x = \frac{e(t) - v(t)}{j \cdot \omega \cdot L} \quad (\text{I-5})$$

Le tableau ci-dessous représente toutes les configurations possibles du convertisseur en fonction des ordres de commande (S_a , S_b et S_c) ainsi que les tensions simples à l'entrée du pont, pour une tension constante du bus continu (vdc). Notons que les deux interrupteurs de chaque bras sont à commande complémentaire [1].

Table I-1: Tensions simples en fonction des différents ordres de commande

N°	Sa	Sb	Sc	Va	Vb	Vc
0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	$2v_{dc}/3$	$-v_{dc}/3$	$-v_{dc}/3$
2	1	1	0	$v_{dc}/3$	$v_{dc}/3$	$-2v_{dc}/3$
3	0	1	0	$-v_{dc}/3$	$2v_{dc}/3$	$-v_{dc}/3$
4	0	1	1	$-2v_{dc}/3$	$v_{dc}/3$	$v_{dc}/3$
5	0	0	1	$-v_{dc}/3$	$-v_{dc}/3$	$2v_{dc}/3$
6	1	0	1	$v_{dc}/3$	$-2v_{dc}/3$	$v_{dc}/3$
7	1	1	1	0	0	0

Dans ce tableau, les tensions simples s'expriment en fonction des ordres de commande par la relation ci-dessous :

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \frac{v_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (I-6)$$

La variation des courants absorbés, dans le cas d'un réseau triphasé équilibré, est alors donnée par les équations du système suivant :

$$\begin{cases} L \frac{di_a}{dt} = e_a(t) - v_a(t) \\ L \frac{di_b}{dt} = e_b(t) - v_b(t) \\ L \frac{di_c}{dt} = e_c(t) - v_c(t) \end{cases} \quad (I-7)$$

En remplaçant (I-6) dans (I-7) on obtient :

$$\begin{cases} L \frac{di_a}{dt} = e_a(t) - \frac{v_{dc}}{3} (2S_a - S_b - S_c) \\ L \frac{di_b}{dt} = e_b(t) - \frac{v_{dc}}{3} (-S_a + 2S_b - S_c) \\ L \frac{di_c}{dt} = e_c(t) - \frac{v_{dc}}{3} (-S_a - S_b + 2S_c) \end{cases} \quad (I-8)$$

Cette dernière relation confirme ce que nous venons de dire précédemment, à savoir qu'il est possible de contrôler l'évolution des courants prélevés sur le réseau en agissant sur les ordres de commande. Nous notons également l'existence d'un fort couplage entre ces courants pour la structure

retenue dans cette étude (sans fil neutre). De plus, le fonctionnement à facteur de puissance unitaire (puissance ne réactive nulle) est obtenu en synchronisant les courants absorbés par rapport aux tensions simples du réseau. D'autre part, la condition pour un fonctionnement valide est donc assurée s'il est possible de contrôler à tout instant, l'état des IGBT. Il faut alors que la tension de sortie, v_{dc} , soit supérieure à la valeur de la tension composée maximale, $e_a(t)-e_b(t)$ par exemple, pour éviter d'avoir le fonctionnement d'un redresseur triphasé à diodes [1].

Conformément aux lois de Kirchhoff, il n'est pas permis de connecter directement deux sources de courant. C'est pourquoi il est essentiel d'insérer un condensateur entre la sortie du redresseur et la charge. La tension à travers ce condensateur étant unidirectionnelle, la réversibilité en puissance active est assurée par le courant I_{dc} , qui circule dans les deux sens. Le contrôle du transit de puissance réactive s'effectue par l'ajustement du déphasage du courant fondamental par rapport à la tension du réseau. En mode redresseur, la tension du bus continu n'est plus fournie par une source constante. Cependant, l'amplitude des courants du réseau ne peut pas être ajustée indépendamment de la charge connectée au bus continu. La puissance active échangée avec le réseau dépend donc directement des amplitudes de ces courants. Si la composante active est trop élevée, cela entraînera une augmentation de la tension du bus continu jusqu'à atteindre un équilibre où les puissances côté alternatif et côté continu sont égales. Cela pourrait rendre la tension inacceptable pour les semi-conducteurs. À l'inverse, si cette composante est trop faible, le condensateur se déchargera et la tension sur le bus continu diminuera jusqu'à atteindre la valeur crête de la tension entre phases du réseau. Les diodes en antiparallèle de l'onduleur se comporteront alors comme dans un redresseur classique, ce qui empêchera le contrôle des courants absorbés et garantira un prélèvement non sinusoïdal [2].

I.6. Les différents types de redresseur MLI

Selon le type d'onduleur utilisé, nous distinguons deux structures de redresseurs à MLI :

- Redresseur à MLI de courant.
- Redresseur à MLI de tension.

I.6.1. Redresseur à MLI de courant

La topologie du redresseur à MLI de courant est illustrée sur la figure I-4. Il assure la conversion d'énergie entre une source de tension alternative et un récepteur de courant continu. Les interrupteurs sont unidirectionnels en courant mais bidirectionnels en tension. L'utilisation des techniques MLI conduit à un courant coté alternatif ayant une pollution harmonique contrôlée [3].

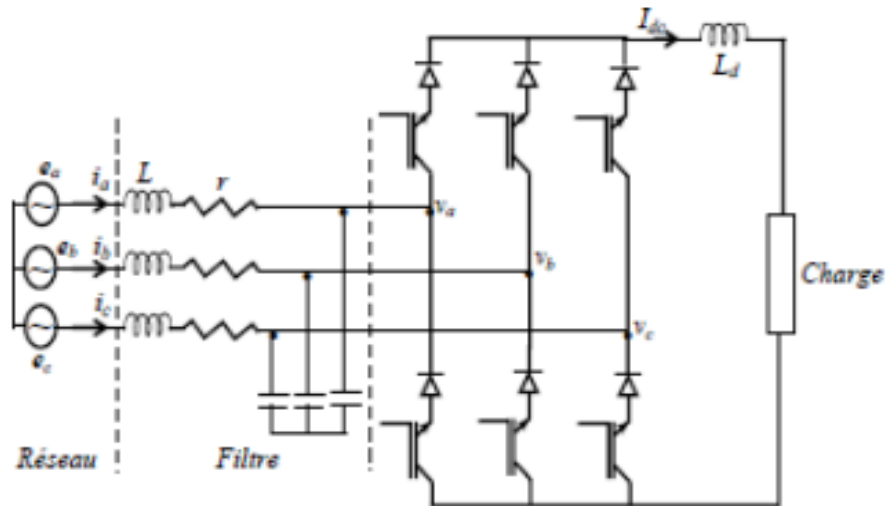


Figure I-4: Topologie d'un redresseur à MLI triphasé de courant

I.6.2. Redresseur à MLI de tension

Le redresseur à modulation de largeur d'impulsion (MLI) de tension repose sur une architecture d'onduleur de tension, comme illustré dans la figure I-5. Chaque interrupteur est composé d'un IGBT, qui est un composant pouvant être contrôlé lors de son amorçage et de son blocage, associé à une diode en antiparallèle. Cet interrupteur est unidirectionnel pour la tension et bidirectionnel pour le courant, ce qui confère au convertisseur une réversibilité en courant. Ainsi, il peut instantanément contrôler la forme d'onde des courants prélevés sur le réseau [1]. Il fournit une alimentation continue à une charge (active ou passive) à partir d'un réseau alternatif, avec un courant absorbé qui est sinusoïdal et, potentiellement, en phase avec la tension du réseau.

Ce redresseur à MLI permet d'atteindre un facteur de puissance très proche de l'unité et de régler, par le biais de la commande, la direction du flux d'énergie réactive : qu'il soit absorbé ou fourni [4].

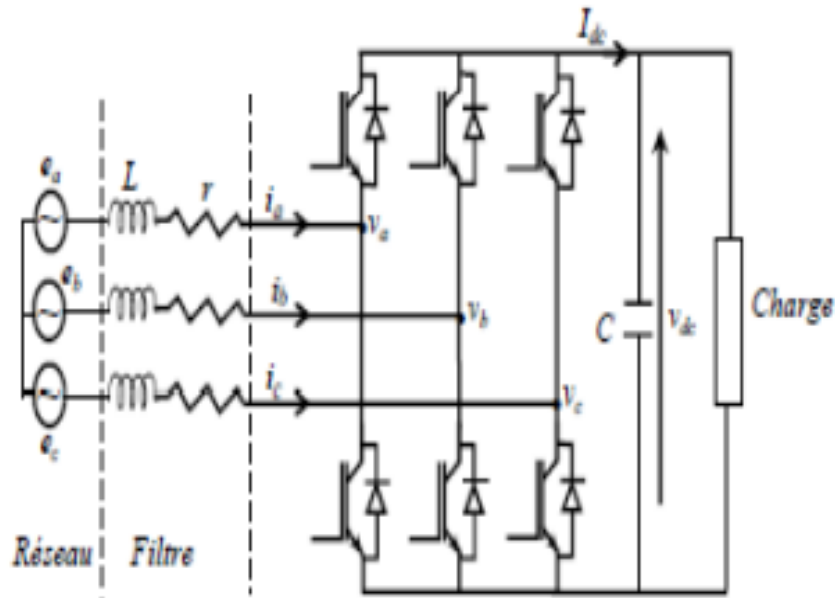


Figure I-5: Topologie d'un redresseur à MLI triphasé de tension

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

I.7. La différence entre le Redresseur à MLI de courant et de tension

I.7.1. Redresseur à MLI de courant

- Il assure la conversion d'énergie entre une source de tension et un récepteur de courant continu.
- Les interrupteurs sont unidirectionnels courant mais bidirectionnel en tension.
- Les interrupteurs sont constitués d'une diode et un thyristor.

I.7.2. Redresseur à MLI de tension :

- Il alimente alors une charge (active ou passive) en continu à partir d'un réseau alternatif.
- Permet d'atteindre un facteur de puissance.
- Les interrupteurs sont bidirectionnels en courant et unidirectionnel en tension.
- Chaque interrupteur est constitué d'un IGBT et une diode en antiparallèle.

I.8. Les applications des redresseurs

Ces convertisseurs sont présents dans de nombreux équipements industriels et domestiques ainsi que dans les dispositifs de conversion de l'énergie électrique. Nous citons ci-dessous les applications les plus courantes :

- Variateurs de vitesse pour moteurs alternatifs et à courant continu ;
- Circuit d'excitation des alternateurs ;
- Chargeurs de batterie ;
- Liaison à courant continu (HVDC) ;
- Alimentation des systèmes informatiques et audio visuels ;
- Dispositifs d'éclairage de nouvelle génération.

Nous distinguons deux structures de redresseurs :

- 1- Ponts de diodes : constitue l'étage de conversion d'énergie AC/DC figure I-9 (alimentation du bus continu des onduleurs pour les variateurs de vitesse des machines à courant alternatif par exemple).
- 2- Ponts de thyristors : même rôle que le pont à diodes avec la possibilité de contrôler le niveau de tension continue en sortie et l'ajout de la réversibilité du flux d'énergie.

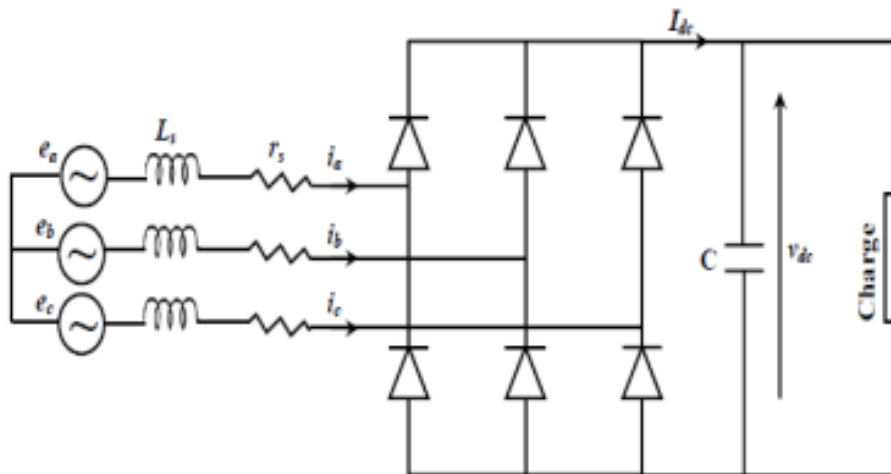


Figure I-6: Pont de redresseur triphasé à diode.

I.9. Les principaux avantages des redresseurs à MLI

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

I.10. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu sur les redresseurs à commande MLI. Dans un premier temps, nous avons présenté une généralité sur les redresseurs. Ensuite, nous avons cité leurs principes de fonctionnement, leurs avantages, et la structure du redresseur et afin d'entamer l'étude de sa commande, le chapitre suivant sera consacré à la modélisation et à la simulation du redresseur à MLI.

**II. CHAPITRE II : MODELISATION ET SIMULATION
D'UN REDRESSEUR A MLI.**

II.1. Introduction :

Ce chapitre se penche sur la modélisation et la simulation du redresseur à MLI. Une compréhension approfondie de ces aspects est essentielle pour concevoir des commandes très efficaces.

Cette unité expliquera les principes fondamentaux de la modélisation mathématique des redresseurs à MLI, ainsi que les outils de simulation couramment utilisés pour analyser leur comportement.

II.2. Modélisation du redresseur à MLI

Le Figure II-1 donne les trois étages du circuit de puissance, le réseau, la charge et le convertisseur à MLI, chaque étage sera présenté par la suite :

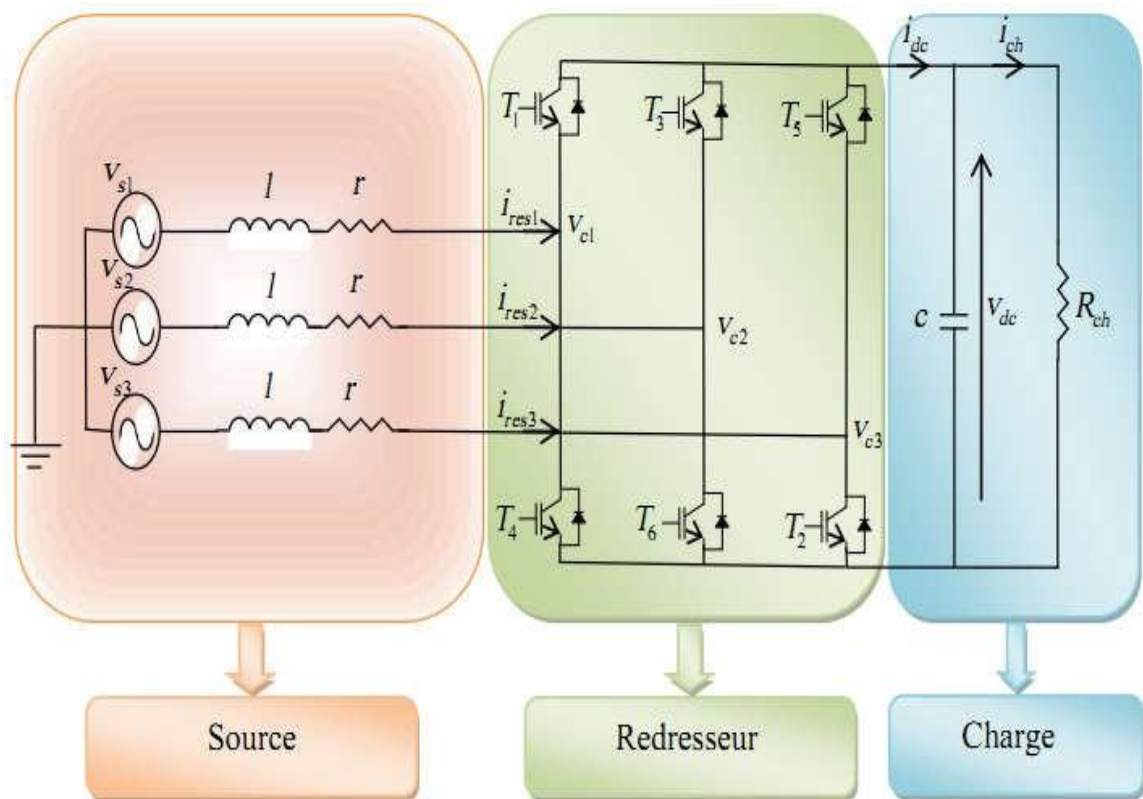


Figure II-1: Structure du redresseur à MLI.

II.2.1. La source d'alimentation

La source est modélisée par une force électromotrice (FEM) triphasée sinusoïdale, connectée en série avec une inductance l et une résistance r , représentant l'impédance totale de la ligne [5], [6].

On suppose le réseau équilibré, avec les mêmes impédances dans les trois phases, les tensions de ligne sont exprimées comme suit :

$$\begin{cases} v_{s1} = r i_{res1} + l \frac{di_{res1}}{dt} + v_{c1} \\ v_{s2} = r i_{res2} + l \frac{di_{res2}}{dt} + v_{c2} \\ v_{s3} = r i_{res3} + l \frac{di_{res3}}{dt} + v_{c3} \end{cases} \quad (II.1)$$

Et les courants de chaque phase du réseau sont alors donnés par le système d'équations différentielles suivant :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{res1} \\ i_{res2} \\ i_{res3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r}{l} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{r}{l} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{r}{l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{res1} \\ i_{res2} \\ i_{res3} \end{bmatrix} + \frac{1}{l} \begin{bmatrix} v_{s1} - v_{c1} \\ v_{s2} - v_{c2} \\ v_{s3} - v_{c3} \end{bmatrix} \quad (II.2)$$

II.2.2. Le redresseur à MLI.

Il est représenté au schéma de la Figure II-1. Les IGBTs et les diodes constituant le pont sont supposées idéales. C'est à dire que l'on néglige les phénomènes de commutation [5], [6]. Il est modélisé en associant à chaque bras une fonction logique F_{i1}

$F_{i1} = 1$ si T_i est fermé et T_{i+3} est ouvert

$F_{i1} = 0$ si T_i est ouvert et T_{i+3} est fermé

Le tableau ci-dessous représente toutes les configurations possibles du convertisseur en fonction des ordres de commande $[F_{11} F_{21} F_{31}]$ ainsi que les tensions simples à l'entrée du pont, pour une tension constante du bus continu V_{dc} . Notons que les deux interrupteurs de chaque bras sont à commande complémentaire [7].

Table II 1: Tensions simples en fonction des différents ordres de commande.

N°	F_{11}	F_{21}	F_{31}	v_{c1}	v_{c2}	v_{c3}
0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	$2v_{dc}/3$	$-v_{dc}/3$	$-v_{dc}/3$
2	1	1	0	$v_{dc}/3$	$v_{dc}/3$	$-2v_{dc}/3$
3	0	1	0	$-v_{dc}/3$	$2v_{dc}/3$	$-v_{dc}/3$
4	0	1	1	$-2v_{dc}/3$	$v_{dc}/3$	$v_{dc}/3$
5	0	0	1	$-v_{dc}/3$	$-v_{dc}/3$	$2v_{dc}/3$
6	1	0	1	$v_{dc}/3$	$-2v_{dc}/3$	$v_{dc}/3$
7	1	1	1	0	0	0

Dans ce tableau, les tensions simples s'expriment en fonction des ordres de commande par la relation ci-dessous :

$$\begin{bmatrix} v_{c1} \\ v_{c2} \\ v_{c3} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{11} \\ F_{21} \\ F_{31} \end{bmatrix} \quad (II.3)$$

Où : V_{dc} la tension continue à la sortie de redresseur à MLI. De même on peut exprimer le courant continu i_{dc} en fonction des courants d'entrées.

$$i_{dc} = [F_{11} \quad F_{21} \quad F_{31}] \begin{bmatrix} i_{res1} \\ i_{res2} \\ i_{res3} \end{bmatrix} \quad (II.4)$$

II.2.3. La charge

Cet étage est constitué d'une capacité C (pour diminuer les ondulations de la tension redressée) placée en parallèle avec une résistance R , modélisant la charge continue [5],[6].

La tension v_{dc} aux bornes de la charge est donnée par l'équation suivante :

$$\begin{cases} \frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{1}{C}(i_{dc} - i_{ch}) \\ v_{dc} = R_{ch}i_{ch} \end{cases} \quad (II.5)$$

A partir des relations (II.1), (II.2), (II.3), (II.4) et (II.5), on peut établir le schéma fonctionnel global du redresseur à MLI ayant comme entrées la commande des gâchettes des interrupteurs du haut (F_{11}, F_{21}, F_{31}) et comme sortie la tension redressée V_{dc} .

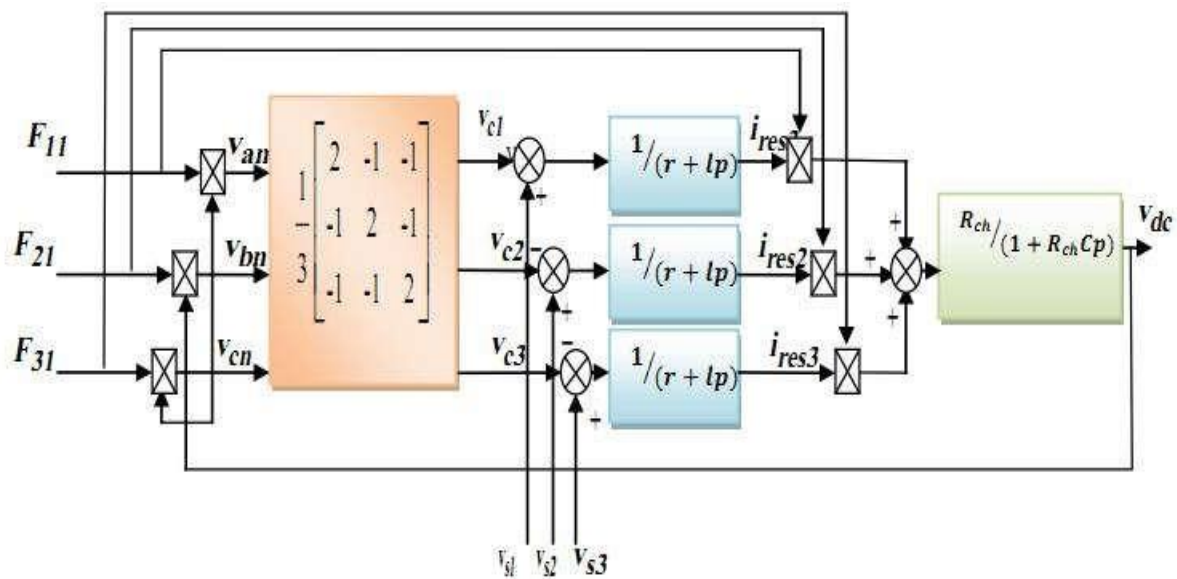


Figure II-2: Schéma fonctionnel du redresseur à MLI.

II.3. La commande en courant du redresseur a MLI dans le repère dq

La méthode de contrôle en courants dans le repère fixe présente quelques inconvénients. En effet le correcteur PI n'est pas bien adapté pour des applications de commande des signaux alternatifs et le correcteur à hystérésis produit une fréquence de commutation variable. D'autre part cette méthode nécessite trois ou deux capteurs de courant, et trois ou deux capteurs de tension en plus du capteur de tension du bus continu.

Afin d'éviter le premier problème, une solution est proposée dans le cas des systèmes triphasés, il s'agit d'utiliser les correcteurs PI dans un repère tournant (avec la transformée de Park) [8] [9].

La régulation d'un redresseur à Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) peut être mise en place sous la forme d'une régulation en cascade. Des boucles internes sont utilisées pour réguler les courants des phases, tandis qu'une boucle externe assure la régulation de la tension de capacité (voir Figure II.3). L'avantage clé de la commande en courant du redresseur à MLI dans le repère tournant dq réside dans le fait que, dans ce contexte, les grandeurs à réguler sont des grandeurs continues.

II.3.1. Modélisation dans le repère dq

Les équations dans le repère tournant $d-q$ sont obtenues à l'aide de la transformation de Park [5] [10] :

$$\begin{cases} v_{cd} = v_d - r i_d - l \frac{di_d}{dt} + l \omega i_q \\ v_{cq} = v_q - r i_q - l \frac{di_q}{dt} - l \omega i_d \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

Où v_{cd} et v_{cq} : sont les composantes de Park des tensions à l'entrée du convertisseur.

v_d et v_q : Les composantes de Park des tensions du réseau.

i_d et i_q : Les composantes de Park des courants du réseau.

ω : La pulsation du réseau.

Et les expressions des puissances active et réactive sont données par :

II.3.2. Boucle externe de régulation de la tension.

La boucle de régulation externe maintient la tension de capacité à une tension de référence. La capacité est en parallèle avec une charge assimilée à une résistance. L'impédance ainsi constituée est chargée par le courant issu du redresseur à MLI [11].

Le produit du courant continu de référence avec la tension continue donne la puissance active de référence.

II.3.3. Boucle interne de régulation des courants

Les amplitudes des courants de phases à l'entrée du redresseur sont imposées par la sortie du régulateur de la boucle externe de la tension de capacité. Dans cette stratégie de commande, la sortie du régulateur de la boucle externe donne la valeur de référence et la consigne de puissance réactive est nulle, ce qui implique que les courants de phases sont égaux en amplitude et en phase avec ses tensions correspondantes [12], [13], [14]. La boucle interne de régulation des courants dans le repère tournant est montrée dans la Figure II-4.

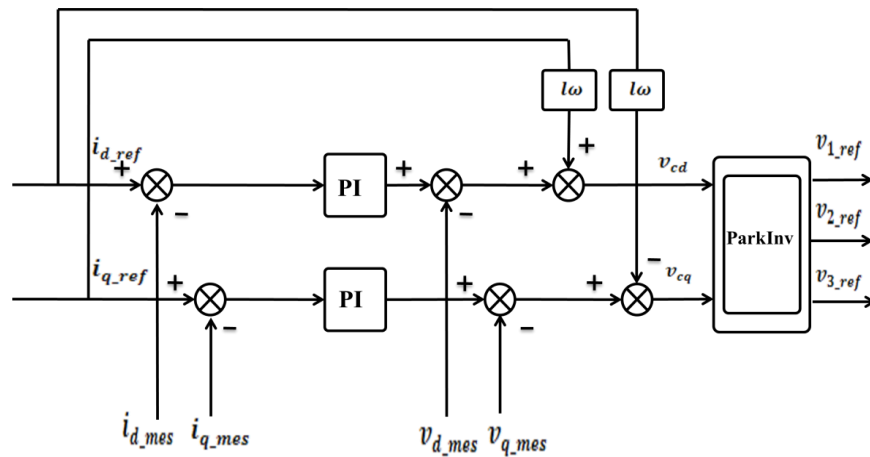


Figure II-4: La boucle de régulation des courants avec compensation de la tension réseau.

Les tensions de références sont obtenues en appliquant la transformation de Park :

$$\begin{bmatrix} v_{1\text{ ref}} \\ v_{2\text{ ref}} \\ v_{3\text{ ref}} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{d\text{ ref}} \\ v_{q\text{ ref}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

II.3.4. Commande à MLI

La méthode de la MLI à porteuse triangulaire utilisée dans cette commande, basé sur la comparaison des tensions de références avec une onde triangulaire (porteuse) d'une amplitude et d'une fréquence fixes. Les signaux de commande des interrupteurs du redresseur MLI sont obtenus à partir des intersections des tensions de références avec la porteuse [9].

II.3.5. Résultats de simulation

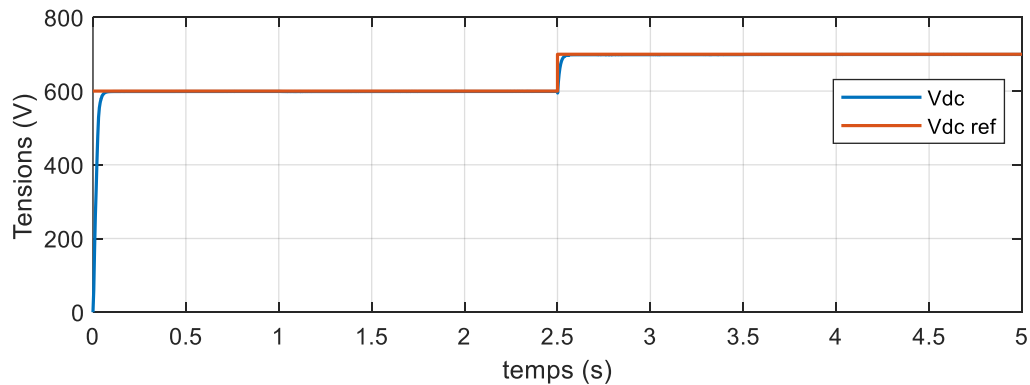
Les paramètres de simulation utilisés sont représentés dans le Tableau II-2.

Résistance totale de la ligne	0,3 Ω
Inductance totale de la ligne	0,010 H
Résistance de charge	100 Ω
Capacité de charge	0,0047F
Tension d'alimentation	220V
Fréquence de la porteuse	5KHz

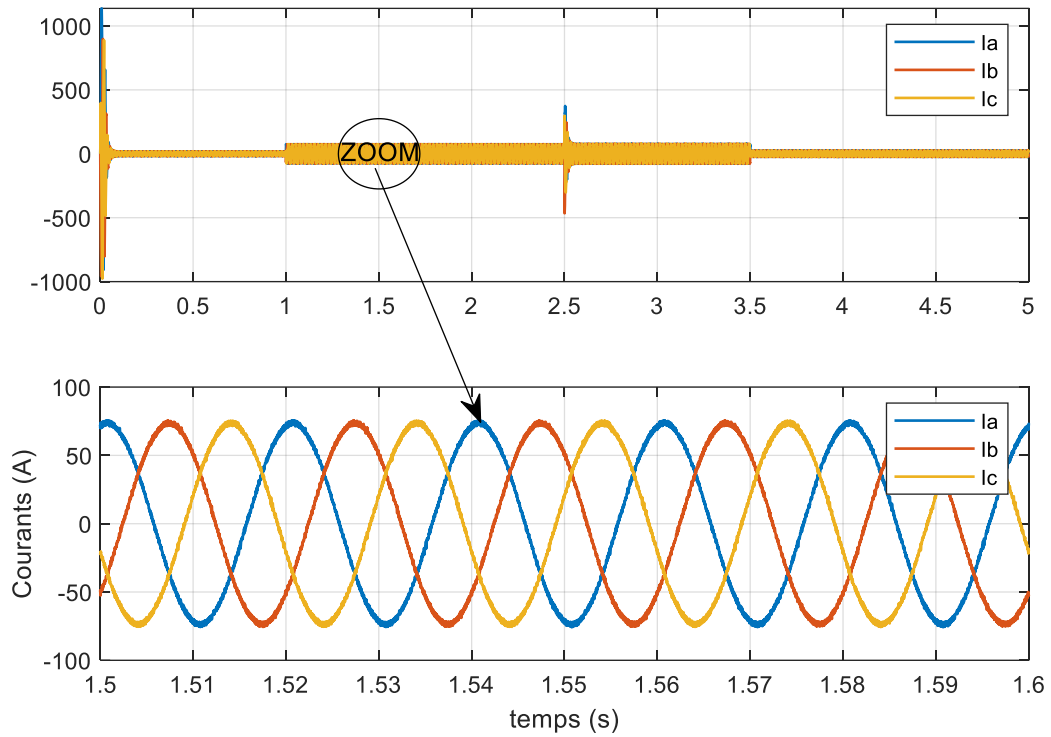
Table II-1: Paramètres de simulation du redresseur à MLI.

Les résultats de simulation pour différents tests sont présentés ci-dessous.

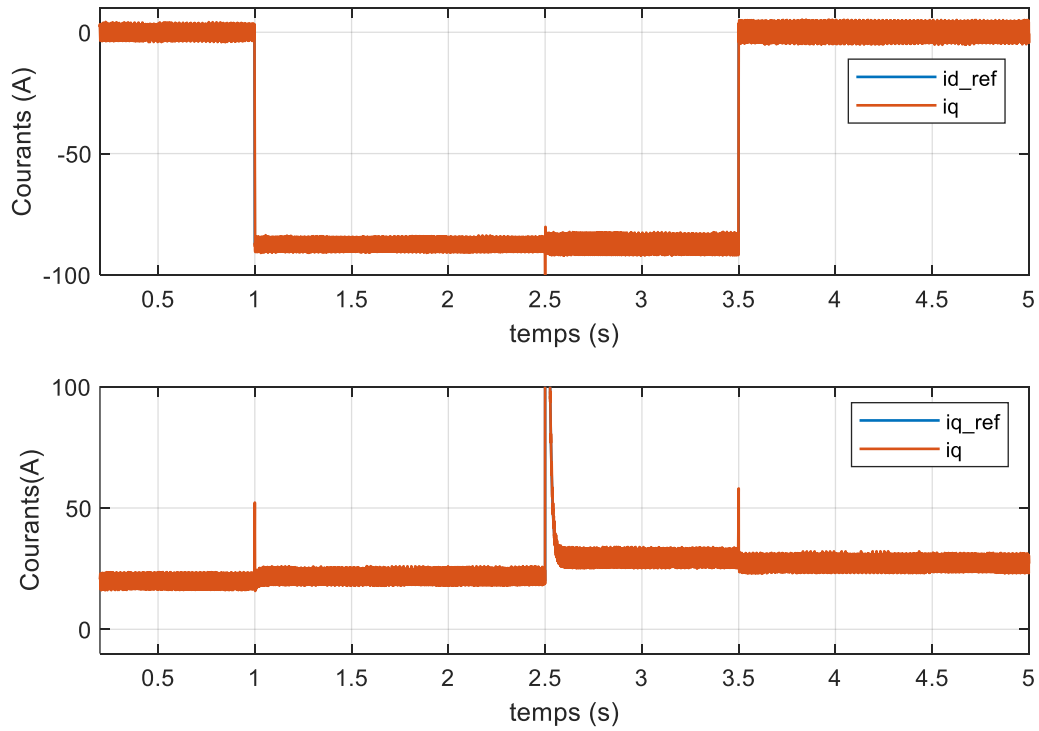
La figure II-5 présente la réponse du redresseur commandé par régulation des courants lors d'un changement de référence de la tension de sortie de $v_{dcref} = 600V$ à $v_{dcref} = 700V$ à ($t=2.5s$) dans le repère tournant dq.



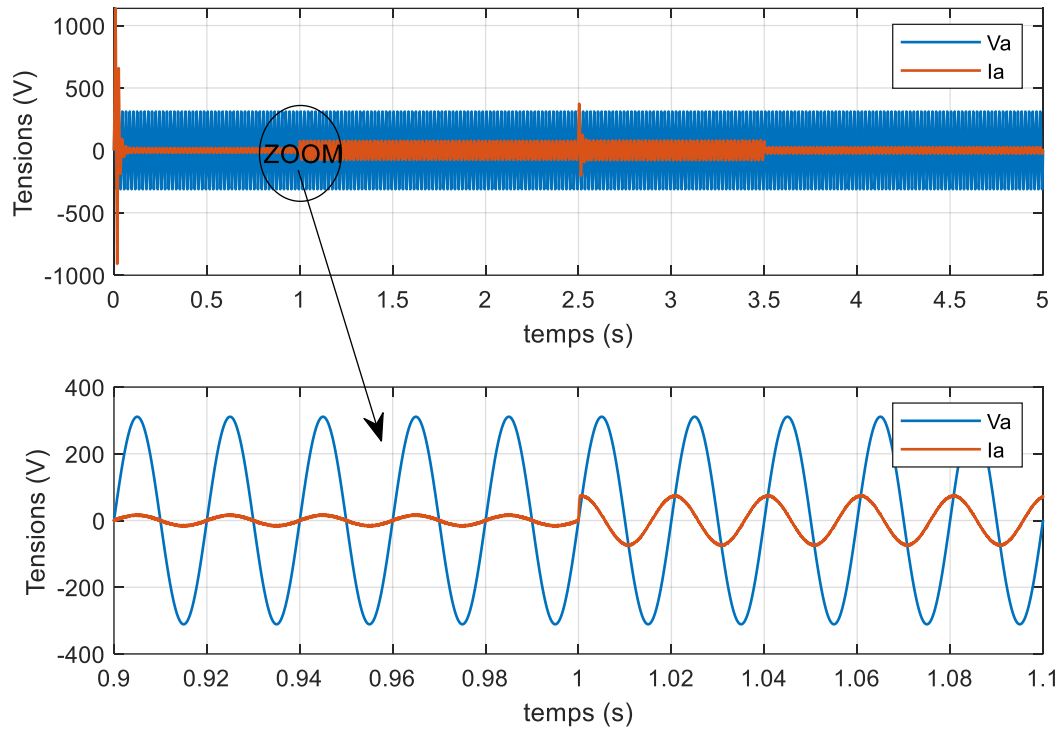
a) Tension redressée v_{dc} et sa référence.



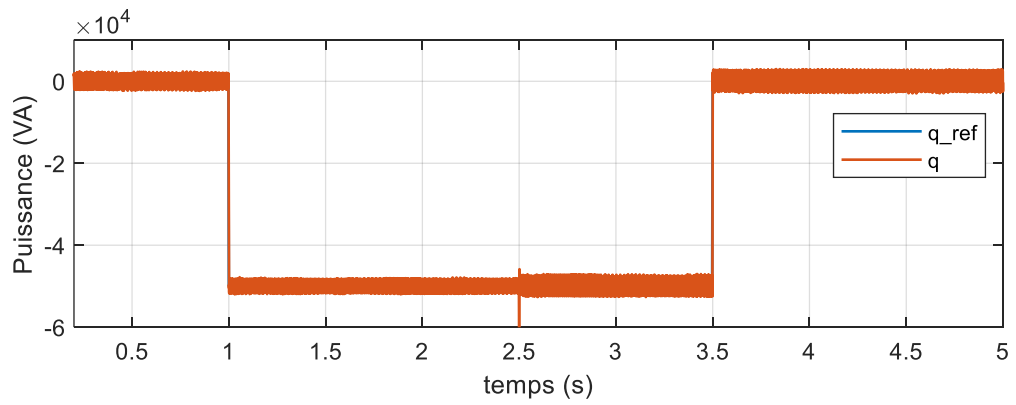
b) Courants de réseau électrique.



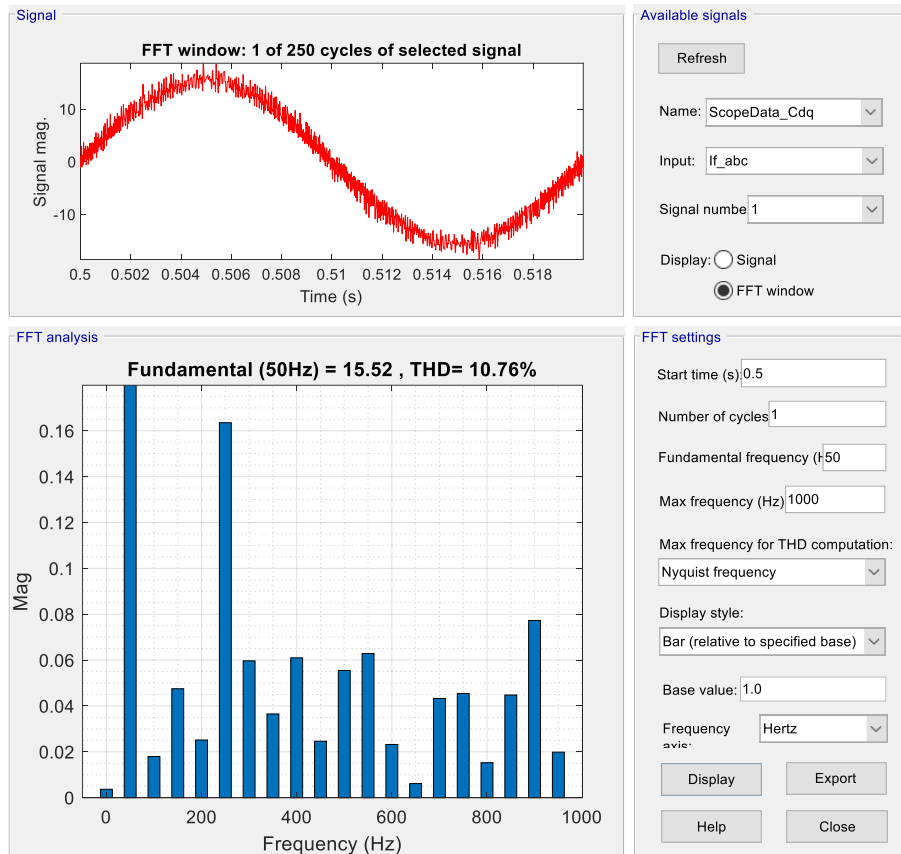
c) Courants direct et quadrature et leurs références



d) L'allure de la tension et du courant de source de la phase a.



e) Puissance réactive



f) Décomposition spectrale des courants de réseau

Figure II-5: Performances du redresseur à MLI commandé par la régulation des courants dans le repère dq.

II.3.6. Interprétation des résultats :

La figure (a) représente la tension du bus continu qui se stabilise à une valeur confondue avec sa valeur de référence (erreur statique nulle), Les résultats des deux figures (b) et (c) illustrent respectivement les formes d'ondes des courants du réseau électrique et les courants de deux axes dq.

Nous remarquons que l'allure du courant de source pour les trois phases sont purement sinusoïdaux, et d'après la figure (d) qui illustre les formes d'ondes de la tension et du courant de la phase (a) montre que le déphasage entre le courant et la tension est totalement nulle avant d'appliquer un échelon de puissance réactive, la figure (f) montre que le taux de distorsion harmonique à une valeur de 10.76%.

D'après les résultats obtenus, la puissance active a la même allure que le courant d'axe d et la puissance réactive qui varie suivant la variation du courant d'axe q, ce qui nous donne un découplage presque parfait.

II.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons commencé par la modélisation du redresseur triphasé, par la suite, une méthode de commande du redresseur à MLI en utilisant la régulation des courants dans le repère tournant dq , a été examinée et détaillée, afin de maintenir une tension continue constante à sa sortie. Cette stratégie permet d'obtenir une commande robuste et indépendante des axes.

Le prochain chapitre sera consacré à la commande directe de puissance (DPC).

III. Chapitre III : La commande directe de puissance

III.1. Introduction

Dans ce chapitre nous nous intéressons à la commande directe de puissance pour le contrôle du redresseur triphasé à MLI. On va tout d'abord expliquer son principe de fonctionnement, ensuite nous appliquerons la technique de la commande DPC pour notre redresseur. Le chapitre sera finalisé par des résultats de simulation et une conclusion.

III.2. Commande directe de puissance DPC :

L'idée principale de la commande directe de puissance (DPC) proposée initialement par Ohnishi (1991) et développée ensuite par Noguchi et Takahachi en 1998, est similaire à la commande directe du couple (DTC) des machines asynchrones. Au lieu du flux et du couple, les puissances actives (P) et réactive (Q) instantanées sont choisies comme deux grandeurs à contrôler [17],[16].

III.3. Principe de la commande directe de puissance

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^*), la référence de la puissance active est obtenue par régulation de la tension continue, en utilisant un régulateur PI. Tandis que pour assurer un facteur de puissance unitaire un contrôle de la puissance réactive à zéro 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 ($e\alpha\beta$). Pour ce dernier, le plan α - β est divisé en douze (12) secteurs égaux de 30° . Chacune des séquences de commande (F11, F21, F31) correspond à un vecteur de tension à l'entrée du redresseur \vec{v}_i [9][10].

La Figure (III-1) montre la configuration globale de DPC pour un redresseur PWM triphasé.

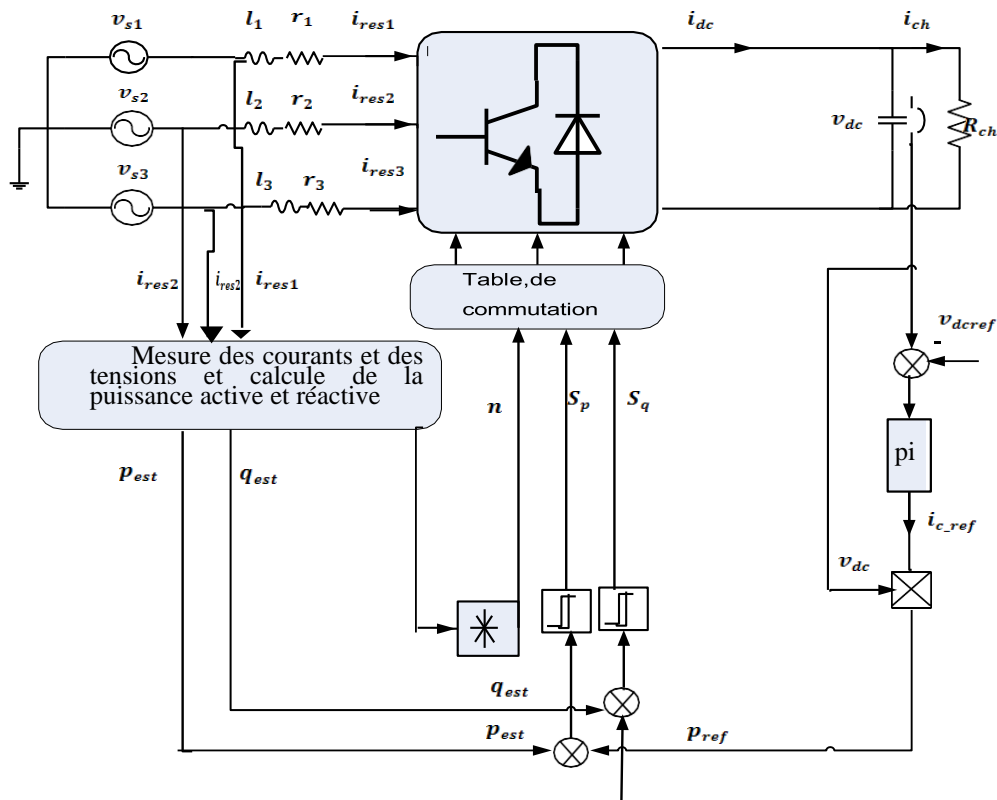


Figure III-1: Configuration générale de la commande DPC

III.4. DPC classique

Le vecteur v^* de tension à l'entrée du redresseur à MLI, dépend des états de commutation (S_a , S_b et S_c) des semi-conducteurs. Selon les différentes combinaisons possibles de ces trois états, huit vecteurs de tension peuvent être appliqués à l'entrée du redresseur : deux vecteurs nuls (v^*0 et v^*7) et six vecteurs non nuls (v^*1 , v^*2 , v^*3 , v^*4 , v^*5 , v^*6). Ces vecteurs sont représentés dans le repère stationnaire α - β . Les six vecteurs non nuls divisent le plan α - β en six secteurs dont chacun est divisé en deux secteurs égaux, afin d'obtenir un contrôle précis. Les erreurs de suivi de référence des puissances instantanées : active et réactive, introduites dans deux comparateurs à hystérésis à deux niveaux, permettent d'établir deux sorties logiques S_p et S_q qui prennent l'état "1" pour une augmentation de la variable contrôlée (P ou q) et l'état "0" pour une diminution [18] :

$$\text{Si } P^* - P \geq hP \quad S_p=1, \text{ Si } P^* - P \leq -hP \quad S_p=0$$

$$\text{Si } q^* - q \geq hq \quad S_q=1, \text{ Si } q^* - q \leq -hq \quad S_q=0$$

III.5. Détermination du secteur

Pour atteindre les états de commutation optimale, il est nécessaire de connaître la tension estimée dans le secteur. Le plan de travail (α, β) est divisé en 12 secteurs (Figure III.2), et ces derniers peuvent être déterminés par la relation suivante. [15]:

$$(n - 2)\frac{\pi}{6} < \gamma_n < (n - 1)\frac{\pi}{6} \quad n = 1,2 \dots 12 \tag{III.1}$$

Où : n est le numéro du secteur

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

$$\hat{\theta} = \text{Arctg} \left(\frac{\hat{v}_{s\beta}}{\hat{v}_{s\alpha}} \right) \tag{III.2}$$

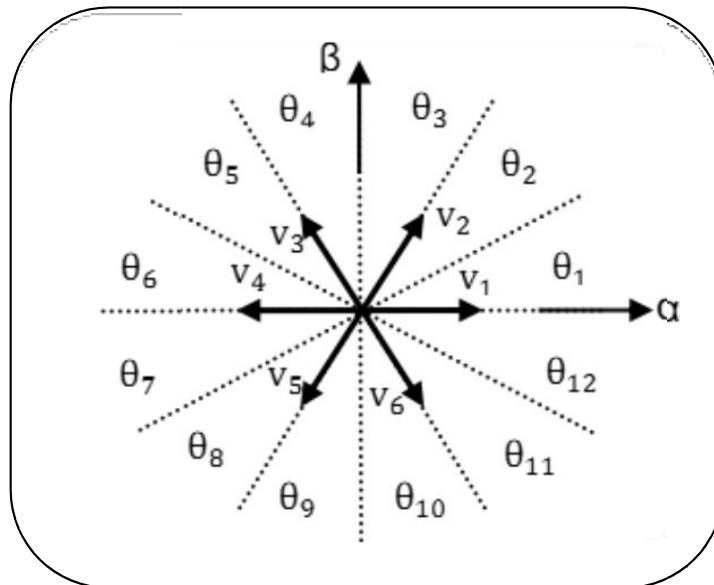


Figure III-2: Plant (α, β) divisé en 12 secteurs

Les secteurs sont utilisés pour optimiser les commutations des convertisseurs en sélectionnant les vecteurs adjacents. Pour une plus grande précision et éviter les problèmes aux frontières de chaque vecteur de commande, le plan est divisé en 12 secteurs [22].

III.6. Régulateur à hystérésis

La grande facilité d'implémentation du comparateur à deux niveaux explique son choix comme régulateur. En outre, les contraintes énergétiques sur le redresseur imposent de limiter le nombre de commutations. Néanmoins, pour une même bande d'hystérésis de contrôle, le comparateur à deux

niveaux nécessitera un nombre moins important de commutations comparé à d'autres types de comparateurs [19].

La largeur de la bande des régulateurs à hystérésis a un impact significatif sur les performances du convertisseur. En particulier, la distorsion du courant, la fréquence de commutation moyenne du convertisseur et la pulsation de la puissance sont affectées. De plus, les pertes sont fortement influencées par la bande à hystérésis. Le contrôleur proposé dans la DPC utilise un régulateur à deux niveaux pour les puissances actives et réactive. Pour une amélioration supplémentaire, un régulateur à hystérésis à trois niveaux peut être considéré. Les sorties des régulateurs à hystérésis, données par les variables booléennes S_p et S_q , indiquent les dépassements supérieurs ou inférieurs d'amplitude des puissances. En respectant les expressions suivantes : [20]

$$\begin{cases} d_p = 1 & p \leq p_{ref} - H_p \\ d_p = 0 & p \geq p_{ref} + H_p \\ d_q = 1 & q \leq q_{ref} - H_q \\ d_q = 0 & q \geq q_{ref} + H_q \end{cases} \quad (III.3)$$

Où H_p , H_q sont les écarts des régulateurs à d'hystérésis à deux niveaux.

III.7. Correcteurs de puissance active :

La sortie de régulateur à hystérésis données par le variable booléenne S_p , indiquent les dépassements supérieurs ou inférieurs des erreurs de la puissance active suivant la logique ci-dessous [19]:

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

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

III.8. Table de commutation :

Les signaux d'erreurs numériques S_p et S_q , ainsi que le secteur de fonctionnement, sont utilisés comme entrées de la table de commutation (Tableau III.1), où les états de commutation du redresseur à MLI sont enregistrés.

L'état optimal de commutation du convertisseur est déterminé à chaque étape de commutation en fonction de la combinaison des signaux numériques S_p , S_q et du numéro du secteur. Cela permet de

minimiser l'erreur de puissance active dans une bande à hystérésis de largeur 2Hp et l'erreur de puissance réactive dans une bande de largeur 2Hq [21].

S_p	S_q	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6	θ_7	θ_8	θ_9	θ_{10}	θ_{11}	θ_{12}
1	0	V ₆ (101)	V ₇ (111)	V ₁ (100)	V ₀ (000)	V ₂ (110)	V ₇ (111)	V ₃ (010)	V ₀ (000)	V ₄ (011)	V ₇ (111)	V ₅ (001)	V ₀ (000)
	1	V ₂ (110)	V ₇ (111)	V ₃ (010)	V ₀ (000)	V ₄ (011)	V ₇ (111)	V ₅ (001)	V ₀ (000)	V ₆ (101)	V ₇ (111)	V ₁ (100)	V ₀ (000)
0	0	V ₆ (101)	V ₁ (100)	V ₁ (100)	V ₂ (110)	V ₂ (110)	V ₃ (010)	V ₃ (010)	V ₄ (011)	V ₄ (011)	V ₅ (001)	V ₅ (001)	V ₆ (101)
	1	V ₁ (100)	V ₂ (110)	V ₂ (110)	V ₃ (010)	V ₃ (010)	V ₄ (011)	V ₄ (011)	V ₅ (001)	V ₅ (001)	V ₆ (101)	V ₆ (101)	V ₁ (100)

Table III-1: Table de commutation de la DPC.

III.9. Expressions des puissances instantanées :

Dans un système triphasé, la puissance active instantanée est définie par le produit scalaire des courants et des tensions de ligne. La puissance réactive est définie par le module de leur produit vectoriel. Ces puissances sont exprimées par les relations suivantes [18] :

$$P = i^T \cdot v_S = [i_{res1} \quad i_{res2} \quad i_{res3}] \cdot \begin{bmatrix} v_{res1} \\ v_{res2} \\ v_{res3} \end{bmatrix} = i_{res1} \cdot v_{res1} + i_{res2} \cdot v_{res2} + i_{res3} \cdot v_{res3} \quad (III.4)$$

$$q = \| i \times v \| \quad (III.5)$$

$$i \times v = \begin{bmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ i_{res1} & i_{res2} & i_{res3} \\ v_{res1} & v_{res2} & v_{res3} \end{bmatrix} = (i_{res2}v_{res3} - i_{res3}v_{res2})\vec{i} - (i_{res1}v_{res3} - i_{res3}v_{res1})\vec{j} + (i_{res1}v_{res2} - i_{res2}v_{res1})\vec{k} \quad (III.6)$$

Tenant compte des relations suivantes :

$$i_{res1} + i_{res2} + i_{res3} = 0 \quad (III.7)$$

$$v_{res1} = \frac{1}{3}(v_{res1res2} - v_{res3res1}), v_{res2} = \frac{1}{3}(v_{res2res3} - v_{res1res2}), v_{res3} = \frac{1}{3}(v_{res3res1} - v_{res2res3}) \quad (III.8)$$

Le produit vectoriel devient alors :

$$i \times v = \frac{1}{3}[(v_{res2} - v_{res3})i_{res1} + (v_{res3} - v_{res1})i_{res2} + (v_{res1} - v_{res2})i_{res3}](\vec{i} + \vec{j} + \vec{k}) \quad (III.9)$$

Alors, la puissance réactive est exprimée par la formule ci-dessous:

$$q = \| i \times v \| = \frac{1}{\sqrt{3}}[(v_{res2} - v_{res3})i_{res1} + (v_{res3} - v_{res1})i_{res2} + (v_{res1} - v_{res2})i_{res3}] \quad (III.10)$$

Les puissances active et réactive instantanées peuvent être évaluées sans avoir besoin de mesurer les tensions du réseau. Les expressions permettant cette évaluation reposent sur la mesure des courants absorbés, la tension du bus continu, et les états des interrupteurs. Elles sont fournies comme suit :

$$\hat{P} = \left(L \frac{di_{res1}}{dt} i_{res1} + L \frac{di_{res2}}{dt} i_{res2} + L \frac{di_{res3}}{dt} i_{res3} \right) + v_{dc}(F_{11}i_{res1} + F_{21}i_{res2} + F_{31}i_{res3}) \quad (III.11)$$

$$\hat{Q} = \sqrt{3}L \left(\frac{di_{res1}}{dt} i_{res3} - \frac{di_{res3}}{dt} i_{res1} \right) - \frac{1}{\sqrt{3}}v_{dc}[S_{11}(i_{res2} - i_{res3}) + F_{21}(i_{res3} - i_{res1}) + F_{31}(i_{res1} - i_{res2})] \quad (III.12)$$

Pour calculer la position du vecteur de tension dans le plan α - β , les valeurs des composantes e_α et e_β peuvent également être déterminées à partir des puissances instantanées et des courants absorbés, en utilisant la relation ci-après :

$$\begin{bmatrix} \hat{v}_{s\alpha} \\ \hat{v}_{s\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{i_\alpha^2 + i_\beta^2} \begin{bmatrix} i_\alpha & -i_\beta \\ i_\beta & i_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{P} \\ \hat{Q} \end{bmatrix} \quad (III.13)$$

III.10. Régulation de la tension continue

Un régulateur de type PI est utilisé pour réguler la tension continue. Ce régulateur ajuste l'erreur entre la tension continue mesurée et sa référence en utilisant la tension continue (V_{dc}) et le courant continu de référence pour déterminer la puissance active de référence (P_{ref}) [15].

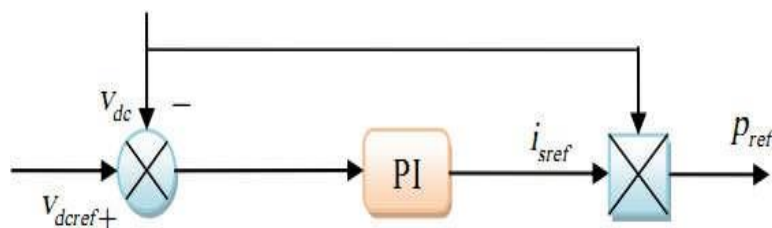
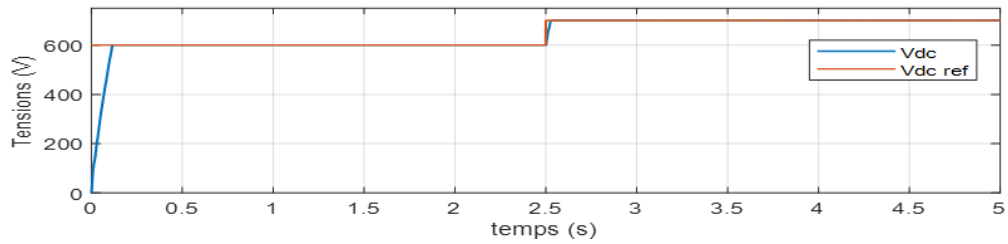


Figure III-3: Régulation de la tension continue.

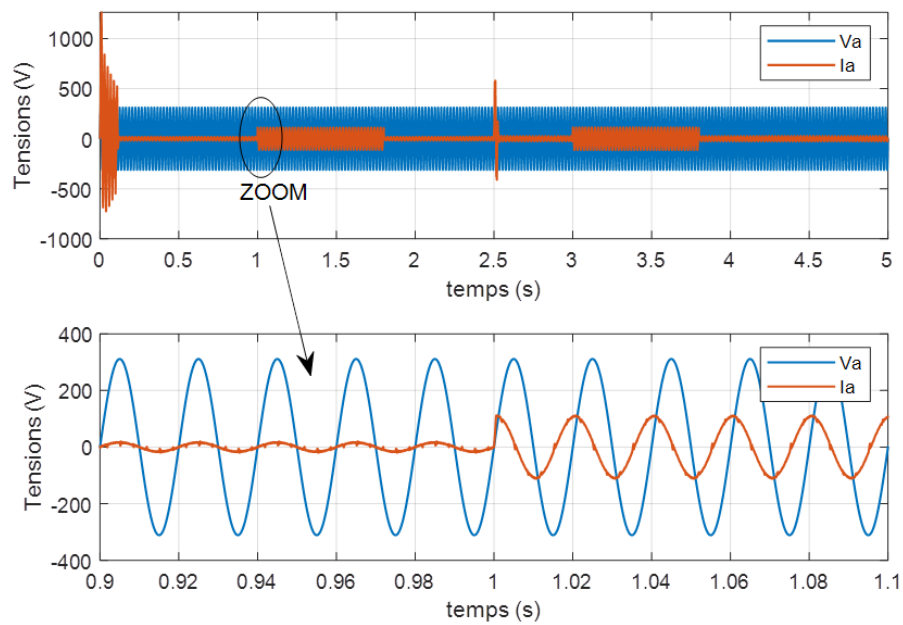
III.11. Résultats de simulation :

Les paramètres de simulation de la commande DPC sont équivalents à ceux utilisés pour la commande par régulation des courants dans le repère tournant dq.

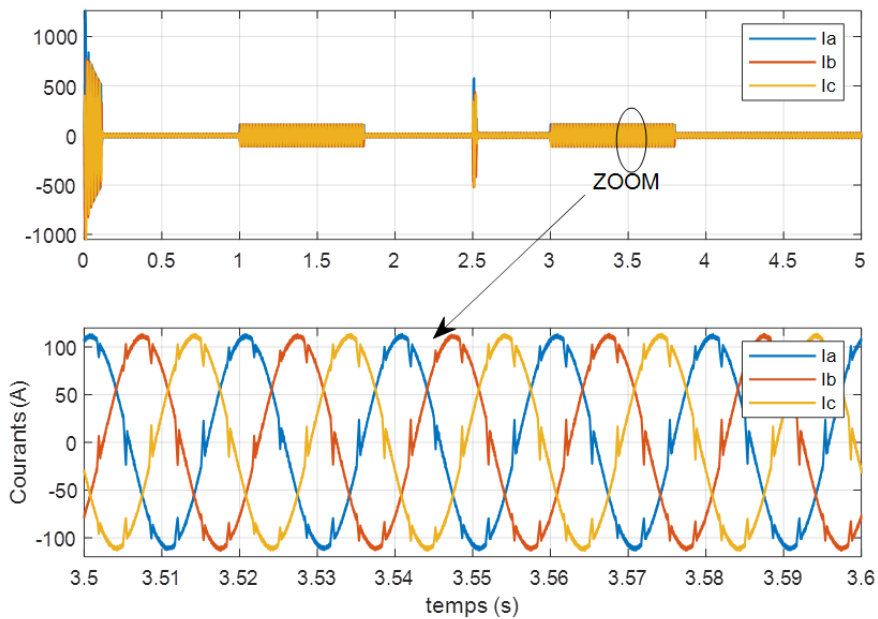
La figure III-4 présente la réponse du redresseur commandé par la commande DPC lors d'un changement de référence de la tension de sortie de 600V à 700V à $t = 2.5s$ et d'un échelon de puissance réactive qui passe de 0 VAR à -50000 VAR à $t = 1s$.



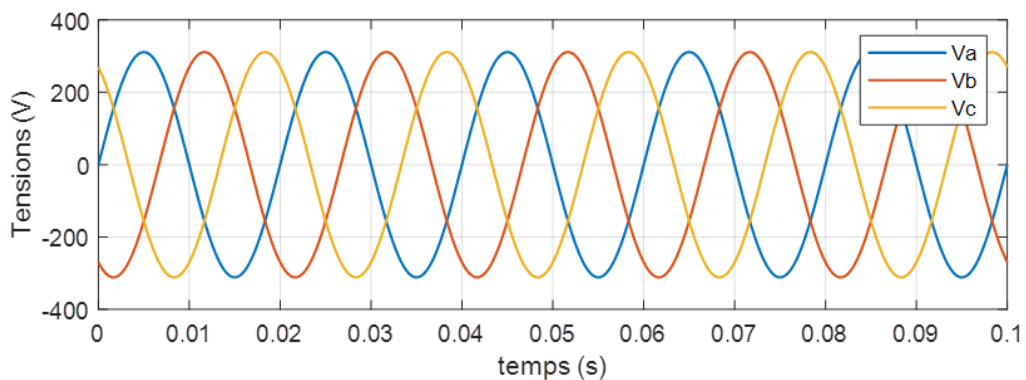
a) Tension redressé Vdc et Vdc référence



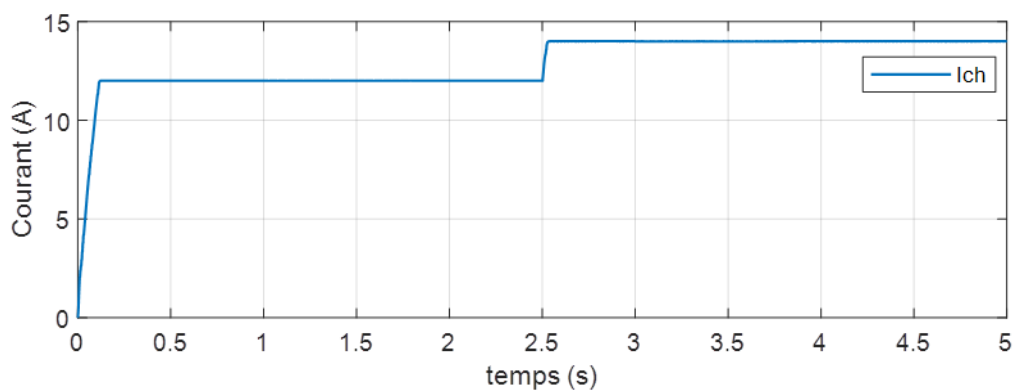
b) L'allure de la tension et du courant de source par phase.



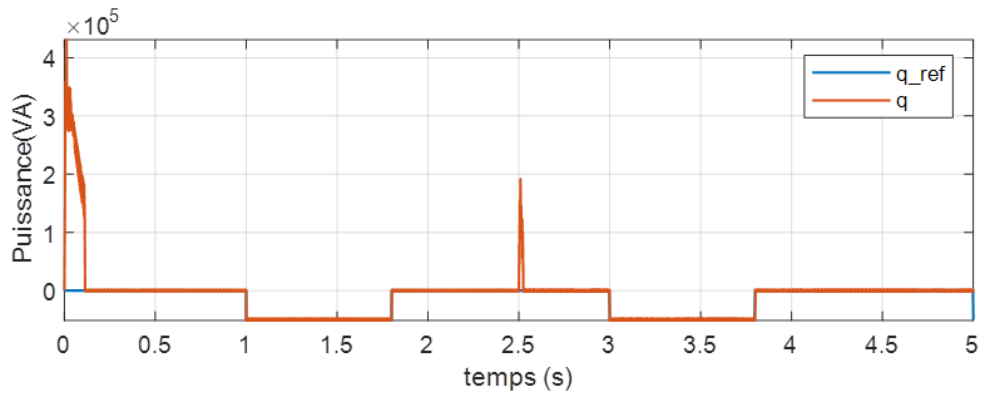
c) Courant de source de la phase



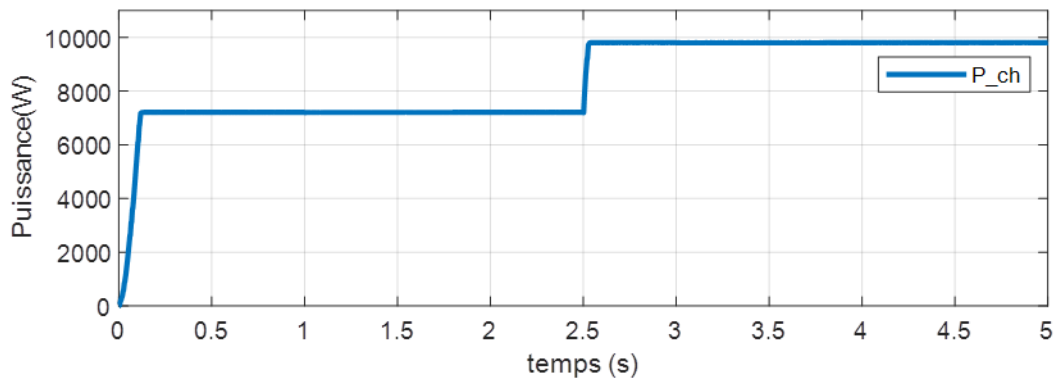
d) Tensions de source



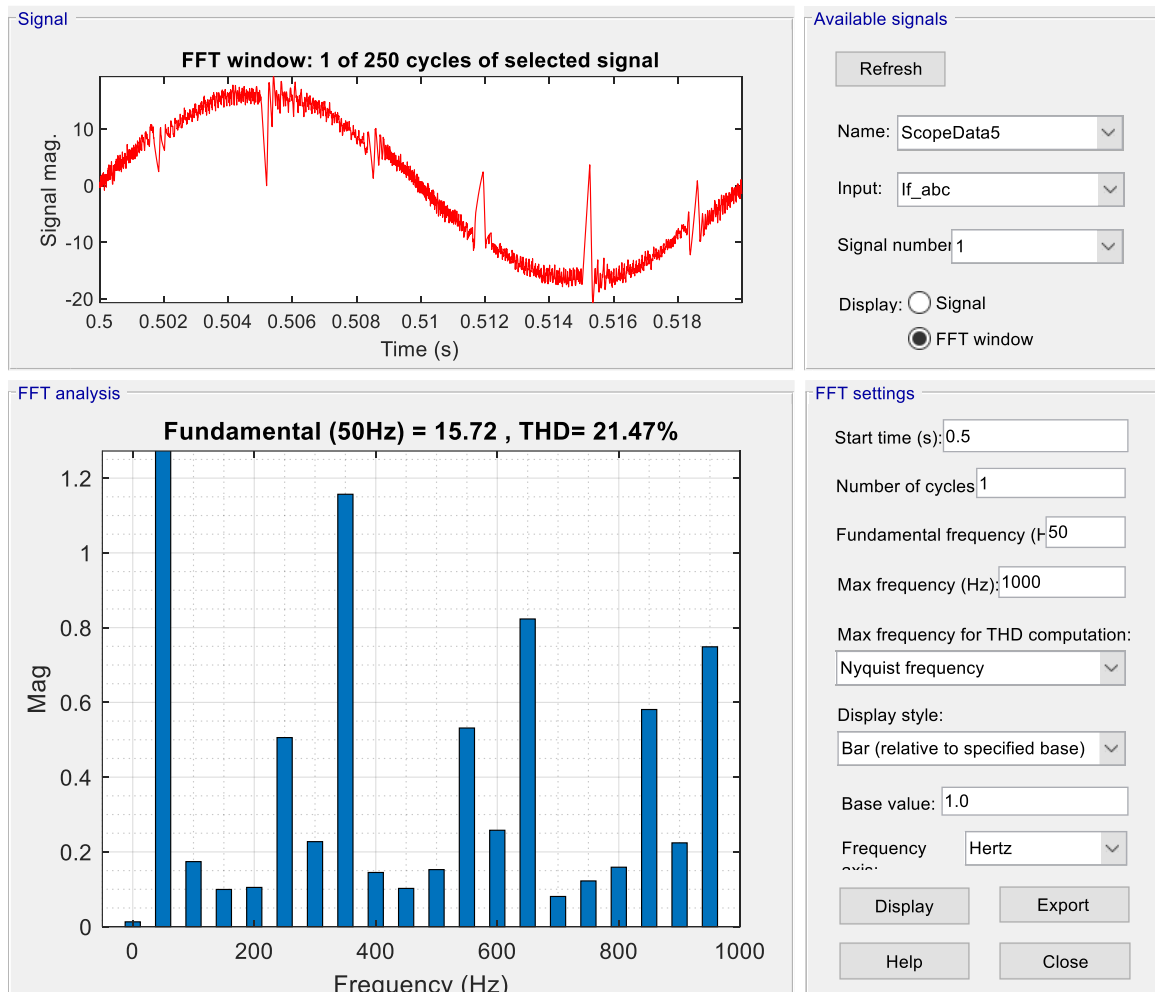
e) Courant de charge I_{ch}



f) Puissance réactive



g) puissance de charge P_{ch}



h) Décomposition spectrale des courants de réseau

Figure III-4: Performances du redresseur à MLI commandé par la DPC.

III.12. Interprétation des résultats :

On constate sur la figure (a) la variation de la tension V_{dc} jusqu' a la charge totale de la capacité puis elle se stabilise a une valeur de 700V, et la figure (b) Sur la on peut distinguer que le courant d'entrée I_{dc} et la tension d'entrée U_{dc} sont en phase, Et la figure (c), (d) On note que les courants et les tensions sont sinusoïdaux, Et les figures (e), (j) on voit la variation du courant de charge I_{ch} et puissance de charge P_{ch} Et la figure(f) que la puissance réactive q suivent la variation de puissance de référence réactive, q_{ref} respectivement, , la figure (h) montre que le taux de distorsion harmonique à une valeur de 21.47%

III.13. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous sommes concentrés sur la commande directe de puissance (DPC), qui repose sur le contrôle direct des puissances active et réactive instantanées. La DPC permet de contrôler les échanges d'énergie entre le redresseur et le réseau électrique, ce qui permet de travailler avec un facteur de puissance unitaire en imposant une puissance réactive nulle. Après avoir modélisé l'ensemble du système de puissance avec ces commandes, nous avons effectué une simulation à l'aide du logiciel MATLAB (SIMULINK).

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le travail présenté dans ce mémoire expose deux commandes pour un redresseur triphasé à MLI, La commande en courant du redresseur à MLI dans le repère dq et la commande directe de puissance DPC.

Nous avons dans un premier temps présenté une synthèse des redresseurs commande MLI, nous avons cité leurs principes de fonctionnement, et leurs avantages.

Dans le deuxième chapitre nous avons proposé une stratégie de commande pour les redresseurs à MLI en utilisant la régulation des courants dans le repère tournant dq , ce qui permet une commande robuste et indépendante des axes.

Dans le troisième chapitre de ce travail, nous sommes concentrés sur la commande directe de puissance (DPC), qui repose sur le contrôle direct des puissances active et réactive instantanées. La DPC permet de contrôler les échanges d'énergie entre le redresseur et le réseau électrique, ce qui permet de travailler avec un facteur de puissance unitaire en imposant une puissance réactive nulle. Après avoir modélisé l'ensemble du système de puissance avec ces commandes, nous avons effectué une simulation à l'aide du logiciel MATLAB (SIMULINK).

Le contrôle direct de puissance (D.P.C.), en plus de sa simplicité, une meilleure maîtrise des puissances active et réactive instantanées est obtenue mais les taux de distorsion du courant et de la tension s'avèrent légèrement supérieurs aux techniques précédentes.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] J. Fadat, Y. Dorali : "Redresseur à absorption de courants sinusoïdaux : commande dans le repère triphasé", 3EI, no. 52, pp. 46-59, Mars 2008.
- [2] P. Ladoux, M. Metz : "Utilisation de l'onduleur de tension MLI pour la correction du facteur de puissance", Les convertisseurs propres, 3EI, no. 28, pp. 5-15, Mars 2002.
- [3] 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.
- [4] P. Ladoux, G. Ollé : "Compensateur d'harmonique et de puissance réactive", système didactique, RESELEC 2002.
- [5] P. RIOUAL, H. POULIQUEN, J-P. LOUIS, " Control of a PWM rectifier in the unbalanced state by robust voltage regulation, "The European Power Electronics Association, , N°13-169,1993.
- [6] L. BELHADJI, « Commande Directe de Puissance Basée sur le Flux Virtuel d'un Convertisseur AC/DC Triphasé sans Capteur de Tension » Mémoire de magister, Ecole Militaire poly technique (EMP), Alger. 2007.
- [7] A. BOUAFIA, F. KRIM, J. GAUBERT, «Predictive direct power control of three-phase pulse width modulation (PWM) rectifier using space-vector modulation (SVM) », IEEE Transaction Power Electronics, vol. 25, no. 1, pp. 1945–1955, January. 2010.
- [8] M. MALINOWSKI, M. P. KAZMIERKOWSKI, S. HANSEN, "Virtual flux based direct power controle of three-phase PWM rectifiers, " IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 37, pp. 1019–1027, July/Aug 2001.
- [9] A. BOULAHIA," Etude des convertisseurs statiques destines a la qualité de l'énergie électrique " Mémoire de magister, Université de Constantine 2009.
- [10] M. WEINHOLD, " Four-legged three-phase PFC rectifier with fault tolerant capability " in Proc. IEEE Power Electronics Specialist Conf. (PESC), vol. 1, pp. 359–364, Jun. 2000.

BIBLIOGRAPHY

- [11] S. NOUI , " Etude et Réalisation d'un Redresseur à MLI Commandé par DSP. Application à l'alimentation d'un Onduleur Á Trois Niveaux", Mémoire de magister, Ecole Militaire polytechnique (EMP), Alger,2004.
- [12] L. HUA, L.HE, B.WANG " The Research of Three Phase Voltage PWM Rectifier Based on Variable-Structure Control", IEEE International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA.2008),N-978-0-7695-3357-5/08 ,2008.
- [13] M. MALINOWSKI, M.P. KAZMIERKOWSKI, A. TRZYNADLOWSK " Review and comparative study of control techniques for three-phase PWM rectifiers, "Science Direct, M. Malinowski et al. / Mathematics and Computers in Simulation 63 (2003) 349–36 03 , 2003.
- [14] B. KORICH, " Commande D'un Convertisseur AC/DC Triphasé à quatre bras En Régime Déséquilibré ", Mémoire de magister, Ecole Militaire Poly technique (EMP), Alger, 2009.
- [15] B. MANSOUR, S. BARKAT, " Commande par Orientation Tension d'un Redresseur PWM Utilisant la Commande Non Linéaire Adaptative" Le Premier Séminaire National sur le Génie Electrique Appliqué aux Energies Renouvelables Chlef _ ALGRIE 27-28 janvier 2010.
- [16] SADOUNI RADHWANE, "Commande directe du couple (DTC-SVM) d'une MASDE associée à deux onduleurs multiniveaux en cascade avec un redresseur à MLI piloté par DPC", Thèse de Doctorat, Université de Sidi-Bel-Abbès, 2017.
- [17] BELHADJI LAKHDAR, "Commande directe de puissance basée sur le flux virtuel d'un convertisseur AC/DC triphasé sans capteur de Tension", Mémoire de Magister, école militaire polytechnique, 2017.
- [18] B. Abdelkader, B. Ibrahim,," Contrôle directe de puissance avec modulateur vectoriel (DPC-SVM) d'un redresseur PWM triphasé", Mémoire de Master, Université de adrar, 2017.
- [19] OMAR BAZINE, "Commande Directe du Couple (DTC) d'une machine asynchrone à double étoile alimentée par un redresseur piloté par DPC (Direct Power Control)", Mémoire de Master, Université de Ghardaïa, 2016.

BIBLIOGRAPHY

- [20] BOUCHAKOUR SALIM, "Commande Directe de Puissance d'un Convertisseur AC/DC Triphasé Sans Capteurs de Tension", Mémoire de Magister, Ecole Militaire de Polytechnique, 2005.
- [21] ABDESSAID MITT, MOHAMED AISSANI, "Commande directe de puissance d'un convertisseur AC/DC par DSP", Mémoire d'ingénieur, 2005.
- [22] LAMARA Haouari GUED, A. Slimane, "Commande directe de puissance DPC d'un redresseur Triphasé à MLI" Mémoire de Master, Université de Ghardaïa, 2019.
- [23] N.D. HAMOUDA, « Etude Comparative des Techniques de Filtrage des Harmoniques de Courant », Mémoire de magister, Université Ferhat Abbas –Sétif, 12/07/2010.

ملخص

ملخص_ لتحقيق النمذجة والتحكم في مقوم ثلاثي الطور ذو تقنية تعديل الذبذبات بمعامل استطاعة أحادي، قمنا بتطبيق تقنية التحكم المباشر في الإستطاعة لضبط التوتر المستمر وتحسين شكل تيارات الشبكة الكهربائية. تم الحصول على النتائج باستخدام برنامج ماتالب/سيميلينك. النتائج بينت أن التقنية أثبتت فعاليتها ونجاحتها، حيث حصلنا على

نسبة تلوث ضئيلة للتيارات الممتصة

ضبط جيد للتوتر المستمر والإستطاعة النشيطة والخام

معامل استطاعة يساوي الواحد

هذه النتائج تظهر أن التقنية المطبقة كانت فعالة في تحسين سلوك الحمل في النظام

الكلمات المفتاحية_ مقوم ثلاثي الطور ذو تقنية تعديل عرض الذبذبات، التحكم المباشر في الإستطاعة، توافقيات

Résumé

Le but de cette étude est de développer et de contrôler un redresseur triphasé à MLI qui fonctionne avec un facteur de puissance unitaire. Dans cette optique, on a utilisé deux commandes : la commande en courant dans le repère dq et la commande directe de puissance (DPC) afin d'obtenir un réglage efficace de la tension continue et d'améliorer la forme des courants du réseau. Les simulations ont été réalisées en utilisant le logiciel Matlab/Simulink. Selon ces résultats, ces méthodes de contrôle ont démontré ses efficacités en fournissant : un taux de distorsion harmonique (THD) bas des courants absorbés, un réglage adéquat de la tension continue et des puissances active et réactive, ainsi qu'un facteur de puissance unitaire.

Mots clés_ Redresseur Triphasé à MLI, DPC, Harmoniques