

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. MIRA-BEJAIA



Faculté de Technologie
Département de Génie Électrique

Mémoire de Fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de MASTER en Électrotechnique

Spécialité : commande électrique

Thème

**Commande directe en puissance d'un redresseur MLI a
trois niveaux de tension**

Réalisé par :

- Menchi Massinissa
- Iberraken Younes

Encadré par :

- Mr. Bouderies Zoubir

Année universitaire : 2019/2020

REMERCIEMENT

En tout premier lieux nos remerciement vont à dieux tout puissant pour nous avoir donné le courage et la patience au long de nos années d'étude ainsi que la santé.

Nous remercions tous nos enseignant qui nous ont aider de près et de loin pour achever notre cycle d'étude.

Notre remerciement s'adresse plus particulièrement notre encadreur BOUDARIES ZOUBIR qui nous a beaucoup aider et soutenue toute au long de la conception de ce mémoire.

Nous dédions ce travail à tous les membres de notre famille plus particulièrement nos parents qui ont beaucoup sacrifier pour nous élever dans le confort.

Nos remerciements vont également au membre du jury qui ont accepté sans réserve de juger et d'évaluer notre travail.

Liste des tableaux :

Tableaux du chapitre I

Tableau I.1 : Grandeurs électriques Caractérisant chaque configuration possible d'un bras k.....	12
---	----

Tableaux du chapitre II

Tableau II.1 : Signes de pente de la puissance active et réactive pour tous les secteurs.....	21
Tableau II.2 : Table de commutation utilisée pour la commande DPC d'un redresseur MLI triphasé à deux niveaux.....	21

Tableaux du chapitre III

Tableau III.1 : Etats des commutateurs et des vecteurs correspondants	32
Tableau III.2 : Vecteurs de tension générés par le redresseur a trois niveau NPC.....	36
Tableau III.3 : Table de commutation du DPC pour PWM à trois niveaux.....	38

Liste des figures :

Figures du chapitre I

Figure I.1 : Structure de l'onduleur triphasé à deux niveaux.....	6
Figure I.2 : Les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux.....	9
Figure I.3 : onduleur triphasé à trois niveaux de tension.....	10
Figure I.4 : Principe de convertisseur multiniveau.....	10
Figure I.5 : structures d'un bras de l'onduleur à trois niveaux à structure NPC.....	11
Figure I.6 : Interrupteur bidirectionnel équivalent de la paire transistor-diode.	11
Figure I.7 : Les cinq configurations possibles d'un bras d'onduleur à trois Niveaux.....	13

Figures du chapitre II

Figure II.1 : configuration générale de la commande DPC	16
Figure II.2 : Schéma de principe de génération de la puissance active de référence.....	17
Figure II.3 : Représentation du vecteur de la tension dans le plan de l'espace vectoriel (α, β) divisé en douze (12) secteurs.....	19
Figure II.4 : Variation de la puissance active et réactive pour différents vecteurs tension du redresseur.....	20
Figure II.5 : Performances du redresseur deux niveaux commandé par DPC lors d'une variation de la tension de référence $V_{dc_{ref}}$	24
Figure II.6 : Performances du redresseur deux niveaux commandé par DPC lors d'une variation de la résistance de charge.....	26

Figures du chapitre III

Figure III.1 : Diagramme schématique d'un redresseur NPC à trois niveaux.....	29
Figure III.2 : Schéma de principe de la commande DPC d'un redresseur MLI à trois niveaux.....	33
Figure III.3 : Vecteurs et division du secteur du système DPC dans le redresseur NPC trois niveaux.....	34
Figure III.4 : Régulateur à hystérésis de la puissance active à quatre niveaux	37
Figure III.5 : Performances du redresseur deux niveaux commandé par DPC lors d'une variation de la tension de référence $V_{dc_{ref}}$	41
Figure III.6 : Performances du redresseur deux niveaux commandé par DPC lors d'une variation de la résistance de charge.....	43

Table des matières :

Liste des tableaux.....	1
Liste des figures.....	1
Introduction générale.....	3

Chapitre I : Les redresseurs MLI triphasés à deux et trois niveaux

I.1 Introduction.....	5
I.2 Modélisation de l'onduleur à Deux Niveaux	5
I.2.1 Codage des interrupteurs	6
I.3 Classification des onduleurs	7
I.3.1 Onduleur non autonome	7
I.3.2 Onduleur autonome	7
I.3.2.1 Les onduleurs de courant triphasé	7
I.3.2.2 Les onduleurs de tension triphasé	8
I.4 Les convertisseurs multiniveaux	8
I.4.1 Intérêt des onduleurs multi-niveaux	8
I.4.2 Structure de l'onduleur à trois niveaux NPC	9
I.4.2.1 Principe des convertisseurs multiniveaux	10
I.4.2.2 Modélisation du fonctionnement d'un bras d'onduleur à trois niveaux.....	11
I.4.2.3 Différentes configurations d'un bras d'onduleur à trois niveaux	12
I.4.2.4 Fonctionnement d'un bras d'onduleur à trois niveaux	14
I.5 Conclusion	14

Chapitre II : Commande directe en puissance d'un redresseur MLI a deux niveaux de tension

II.1 Introduction	15
II.2 Principe De la commande directe de puissance (DPC)	15
II.2.1 Schéma bloc de la DPC	16
II.2.2 Calcul des puissances instantanées injectées	16
II.2.3 Calcul des puissances instantanées de référence	17

Table des matières

II.2.4 Régulateur à hystérésis	18
II.2.5. Détermination du secteur	18
II.2.6 Table de commutation	19
II.3 Simulation de la commande DPC	21
II.3.1 Interprétation des résultats	27
II.4 Conclusion	28

Chapitre III : commande directe en puissance d'un redresseur MLI trois niveaux de tentions

III.1 Introduction	29
III.2 Redresseur NPC à trois niveaux	29
III.2.1 Vecteurs de tensions	30
III.3 Techniques DPC de redresseur à trois niveaux.....	33
III.3.1 Principe de la DPC a trois niveaux de tentions	33
III.3.2 Analyse du modèle de puissance.....	34
III.3.3 Régulateurs à hystérésis	36
III.4.2 Table de commutation pour le redresseur à trois niveaux	37
III.5 Simulation et discussions des résultats	38
III.5.1 Interprétation des résultats	44
III.6 Comparaison entre DPC a deux niveaux et DPC à trois niveaux	45
III.6 Conclusion.....	45
Conclusion générale.....	46

Référence bibliographique

Introduction générale :

Grâce aux progrès technologiques réalisés ces dernières années dans le domaine de l'électronique de puissance, les convertisseurs statiques voient progressivement leur champ d'applications s'élargir, près de 25 % de l'énergie électrique produite est converti sous une forme ou une autre. Au cours des années la taille, le poids et le coût des convertisseurs n'ont fait que diminuer, en grande partie grâce aux progrès fait dans le domaine des interrupteurs électroniques. Elle concerne l'étude, la réalisation, et la maintenance :

Des composants électroniques utilisés en forte puissance, des structures, de la commande, et des applications industrielles de ces convertisseurs.

Les convertisseurs statiques sont classés en quatre catégories : Gradateur (AC-AC), redresseur (AC-DC), hacheur (DC-DC), et onduleur (DC-AC).

La catégorie du redresseur (AC-DC) est très importante, elle était pendant longtemps limité à la technique des hautes fréquences. Les possibilités d'application étaient limitées par le manque de fiabilité des éléments électroniques alors disponibles. Cette fiabilité était insuffisante pour répondre aux hautes exigences requises par les nouvelles applications dans le domaine industriel. Ce ne fut qu'à la suite du développement des composants électroniques spéciaux de fiabilité plus élevée et de tolérance plus restreintes.

L'apparition des convertisseurs multi niveaux est l'un des résultats de cette évolution, il y a eu une augmentation considérable dans l'application du redresseur MLI. Récemment, les redresseurs à trois niveaux ont été largement appliqués aux nouveaux systèmes énergétiques, tels que l'énergie éolienne et les systèmes d'énergie solaire. Ils sont aussi appliqués à des systèmes d'entraînement haute tension à fréquence variable et à de nombreux autres systèmes à haute capacité car de leurs caractéristiques sont attrayantes, telles qu'une faible distorsion harmonique des courants d'entrée, fonctionnement du facteur de puissance unitaire, capacité de flux de puissance bidirectionnel, faible tension de commutation, faible fréquence de commutation et ainsi de suite.

Les stratégies de contrôle des redresseurs MLI à trois niveaux sont principalement divisées en deux catégories: commande de tension orientée (VOC) et la commande direct de puissance (DPC). Par rapport à la stratégie VOC, la stratégie DPC, ne nécessite pas de transformation de coordonnées rotatives ou de stratégie de modulation, il faut choisir les

Introduction générale

vecteurs de tension du redresseur appropriés pour contrôler la puissance active et la puissance réactive, il est donc simple dans l'algorithme de contrôle, rapide en réponse dynamique et très efficace.[1][2]

Dans le cas de notre travail, on va étudier le redresseur à trois niveaux de structure NPC et sa commande DPC.

On va commencer dans le premier chapitre par l'étude des redresseurs triphasés à deux et trois niveaux de tension, tout en passant par leurs modélisations et leurs fonctionnements en précisant les cinq différentes combinaisons d'un bras et leurs fonctionnements dans le cas du redresseur à trois niveaux de structure NPC.

Dans le deuxième chapitre, nous allons étudié le principe et le schéma bloc de la commande directe en puissance d'un redresseur MLI à deux niveaux de tension, nous allons expliqué l'implantation d'un régulateur hystérésis et déterminé les 12 secteurs possibles (le calcul de la position angulaire du vecteur des tensions du réseau dans le plan stationnaire α - β), après avoir défini les signes de pente de la puissance active et réactive de chaque secteurs pour obtenir de meilleures performances du système. À la fin de ce chapitre, nous allons présenter une simulation et l'interprétation des résultats de la DPC à deux niveaux.

Dans le dernier chapitre, nous allons présenter le schéma bloc de la DPC à trois niveaux de structure NPC et son principe, nous ferons le même travail que sur la DPC à deux niveaux mais avec une table de commutations différentes. Enfin, nous présenterons une simulation et l'interprétation des résultats ainsi qu'une comparaison par rapport à la DPC à deux niveaux.

Nous terminerons notre travail par une conclusion générale et des perspectives pour son amélioration par les promotions futures.

Chapitre I: Les

redresseurs MLI triphasés à

deux et trois niveaux

Chapitre I : Les redresseurs MLI triphasés à deux et trois niveaux :

I.1 Introduction :

En vue des développements industriels croissant et leurs grandes exigences en termes de performances dynamiques, la progression technologiques dans le domaine de l'électronique est devenue une priorité, alors les convertisseurs statiques voient progressivement leur champ d'applications s'élargir. Ce ne fut qu'à la suite du développement des composants électroniques de puissance de fiabilité plus élevée et de tolérance plus restreintes, que les nouvelles techniques peuvent être envisagées. L'évolution croissante des calibres en tension et en courant des semi-conducteurs de puissance a stimulé le marché des convertisseurs statiques de puissance spécialement dédiés aux applications de moyennes et de fortes puissances, allant de quelques kilowatts jusqu'à plusieurs mégawatts.

Généralement les redresseurs multi-niveaux sont utilisés dans la traction et la propulsion : tous types de transport (locomotive navire électrique véhicule électrique), ainsi dans le transport de l'énergie électrique.

L'utilisation des convertisseurs multiniveaux dans les installations industrielles a été motivée par des avantages énergétiques, largement éprouvés de nos jours : la réduction très significative du taux de distorsion harmonique du courant, l'amélioration du facteur de puissance, la réduction des contraintes électriques aux bornes des interrupteurs statiques, la diminution des pertes de puissance et la réduction du volume des filtres (si nécessaires).[1]

Toutefois, ces convertisseurs présentent des inconvénients. On peut citer : le nombre élevé de composants électriques, la complexité de la commande et la nécessité d'équilibrer les tensions aux bornes des condensateurs du bus continu.

Dans ce chapitre, nous présentons la modélisation de l'onduleur N.P.C triphasé à deux et à trois niveaux ainsi que son principe de fonctionnement

I.2 Modélisation de l'onduleur à Deux Niveaux :

L'onduleur triphasé à deux niveaux est illustré par son circuit de puissance de la figure (I.1). On doit distinguer d'une part les tensions de branche V_{AN} , V_{BN} , V_{CN} mesurées par rapport au point neutre N, d'autre part, il y a les tension composé V_{AB} , V_{BC} et V_{CA} représentant une charge équilibrée montée en étoile, pouvant être tirées facilement des tensions simples.

Chapitre I : Les redresseurs MLI triphasés à deux et trois niveaux :

niveaux :

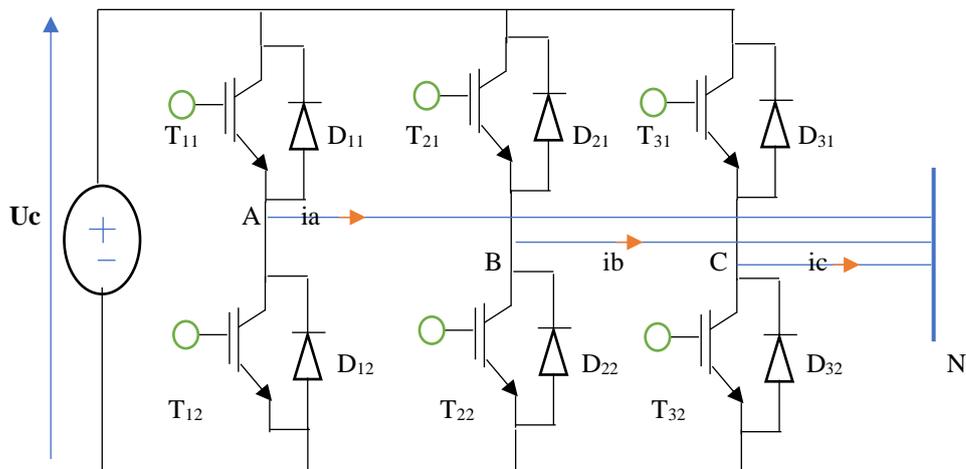


Figure I.1 : Structure de l'onduleur triphasé à deux niveaux.

Dans le circuit de puissance de l'onduleur triphasé représenté dans la figure (I.1), les états des interrupteurs d'un même bras sont complémentaires. En utilisant, ces états des interrupteurs, nous pouvons obtenir les tensions de branche de sortie de l'onduleur mesurées par rapport à la borne négative de la tension du coter continu comme suit :

- $V_{AN} = S_1 \cdot U_c$
- $V_{BN} = S_2 \cdot U_c$
- $V_{CN} = S_3 \cdot U_c$

Ou S_1 , S_2 et S_3 désignent les états des interrupteurs des phases A, B et C respectivement.

I.2.1 Codage des interrupteurs :

Pour caractériser les éléments constituant les bras de l'onduleur, on utilise :

- Un codage qui caractérise les éléments qui constituent les trois bras, à l'aide d'indices S et K.
- Un codage qui définit les diodes et qui assurent la restitution de l'énergie de la charge vers la source à l'aide d'indice C et K.
- $S = (1,2)$, $C = (1,2)$, $K = (1,2,3)$

S : indique l'emplacement vertical de l'élément dans le bras, et l'indice K précise le bras concerné.

C : indique l'emplacement de la diode dans la partie supérieure ou inférieure du montage dans un bras K.

Chapitre I : Les redresseurs MLI triphasés à deux et trois niveaux :

I.3 Classification des onduleurs :

Une première classification peut être faite en distinguant deux type :

- Onduleur non autonome.
- Onduleur autonome.

I.3.1 Onduleur non autonome :

C'est le nom donné au montage redresseur tout thyristors (pont de Graëtz) qui, en commutation naturelle assistée par le réseau auquel il est raccordé, permet un fonctionnement en onduleur (par exemple par récupération de l'énergie lors des périodes de freinage dans les entraînements à moteurs électriques). À la base du développement des entraînements statiques à vitesse variable pour moteurs à courant continu et alternatif, cyclo convertisseurs, onduleurs de courant pour machines synchrones et asynchrones, jusqu'à des puissances de plusieurs MW, [2].

I.3.2 Onduleur autonome :

Un onduleur est classer autonome lorsqu'il est soumis à l'énergie d'un circuit auxiliaire propre à lui pour la commutation des semi-conducteurs alors dans ce cas nous imposons la fréquence ainsi que la forme d'onde de la tension de sortie désirer. On distingue deux types d'onduleurs autonomes [2] :

- Les onduleurs de tension sont alimentés par une source de tension continue.
- Les onduleurs de courant sont alimentés par une source de courant continue.

I.3.2.1 Les onduleurs de courant triphasé :

Un onduleur de courant est un onduleur permettant la transformation d'un courant continue d'entrée en courants alternatifs triphasés dans les enroulements de la machine. Il peut fonctionner en commutation naturelle, c'est le cas des machines synchrones. La commutation forcée est réalisée pour toutes les autres machines. Ce type d'onduleur ne permet que le réglage de la fréquence des grandeurs de sortie, l'amplitude de celle-ci doit être réalisée par ajustement de la grandeur d'entrée [3].

Chapitre I : Les redresseurs MLI triphasés à deux et trois niveaux :

I.3.2.2 Les onduleurs de tension triphasé :

On peut réaliser un onduleur triphasé en regroupant, en parallèle, trois onduleurs monophasés (en pont ou en demi-pont) et commander les interrupteurs de chacun pour obtenir à la sortie trois phases décalées de 120° . En fait, en regroupant trois demi ponts monophasés, on obtient un onduleur en pont triphasé à six interrupteurs représentés par la Figure I .14 dont les interrupteurs du même bras de l'onduleur doivent être complémentaires pour que la tension continue U ne soit jamais en court-circuit et pour que les circuits des courants i_a , i_b et i_c ne soient jamais ouverts. Afin que les interrupteurs puissent imposer les tensions de sortie, quelques soient les courants de charge, il faut que ces derniers soient bidirectionnels en courant. Chacun d'eux est formé d'un semi-conducteur à ouverture et à fermeture commandées et d'une diode montée en antiparallèle. Ces interrupteurs peuvent être réalisées, suivant la puissance à contrôler, avec des transistors MOS ou bipolaires, des IGBTs ou des GTOS associés à une diode en antiparallèle pour obtenir la réversibilité en courant [2]

I.4 Les convertisseurs multiniveaux :

I.4.1 Intérêt des onduleurs multi-niveaux :

Un convertisseur statique est dit « multi niveaux » lorsqu'il génère une tension découpée de sortie composée d'au moins trois niveaux. Ce type de convertisseur présente essentiellement deux avantages. D'une part les structures multi niveaux permettent de limiter les contraintes en tension subies par les interrupteurs de puissance : chaque composant, lorsqu'il est à l'état bloqué, supporte une fraction d'autant plus faible de la pleine tension continue que le nombre de niveaux est élevé. D'autre part, la tension de sortie délivrée par les convertisseurs multi niveaux présente d'intéressantes qualités spectrales. Le fait de multiplier le nombre de niveaux intermédiaires permet de réduire l'amplitude de chaque front montant ou descendant de la tension de sortie. L'amplitude des raies harmoniques est, par conséquent, d'autant moins élevée. Dans le cas plus précis d'un fonctionnement en modulation de largeur d'impulsion, le recours à un convertisseur multi-niveaux associé à une commande judicieuse des composants de puissance permet en outre de supprimer certaines familles de raies harmoniques [4]. La figure (I.3) représente les trois topologies principales des onduleurs multiniveaux les plus récentes.

Chapitre I : Les redresseurs MLI triphasés à deux et trois niveaux :

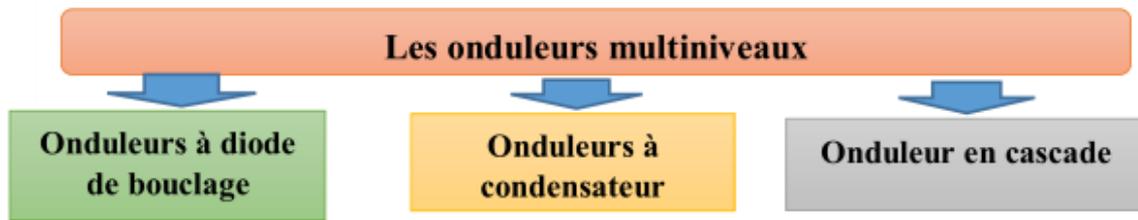


Figure I.2 : Les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux

I.4.2 Structure de l'onduleur à trois niveaux NPC :

Plusieurs structures sont possibles pour réaliser un onduleur triphasé à trois niveaux. Nous avons choisi d'étudier la structure NPC (Neutral Point Clamping) c'est-à-dire une structure à point milieu.

L'onduleur triphasé à trois niveaux à structure NPC étudié se compose de trois bras symétriques constitués chacun de quatre interrupteurs en série, plus deux diodes permettant l'obtention du zéro de la tension VKM notées DD_{k0} et DD_{k1} . Chaque interrupteur est composé d'un transistor et d'une diode montée en tête bêche, il est donc constituée de douze interrupteurs bidirectionnels en courant, pour assurer le transfert d'énergie réversible, ainsi que six interrupteurs unidirectionnels en courant (diodes) reliés au point milieu des sources continues. Le point milieu de chaque bras est relié à une alimentation continue de force électromotrice ($U_{c1} + U_{c2}$). Ces deux générateurs ainsi que les diodes DD_{k0} et DD_{k1} se trouvent connectés entre eux en un point fictif noté « M »

La représentation schématique de cet onduleur est donnée par la figure (I.4) ; où :

- Les tensions continues V_{dc1} , V_{dc2} sont les tensions d'entrée.
- Les tensions alternatives V_A , V_B , V_C sont les tensions de sortie.
- Les courants i_a , i_b , i_c sont les courants de sortie.

Chapitre I : Les redresseurs MLI triphasés à deux et trois niveaux :

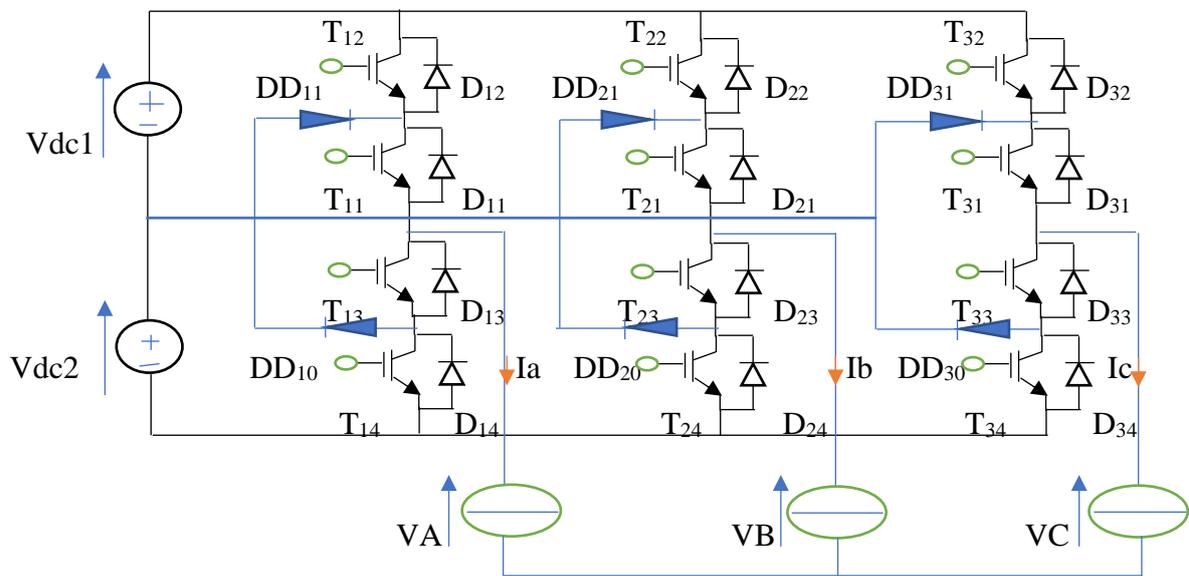


Figure I.3 : onduleur triphasé à trois niveaux de tension.

On a trois possibilités de connexion de la source ;

- Alimentation triphasée de la charge (les trois courants de sortie sont non nuls).
- Alimentation monophasée de la charge (avec un courant de charge nul) et les courants des deux autres phases sont fixés par les interrupteurs fermés.
- Charge déconnectée, quand tous les courants de sortie sont nuls, ainsi la charge va se comporter comme générateur.

I.4.2.1 Principe des convertisseurs multiniveaux :

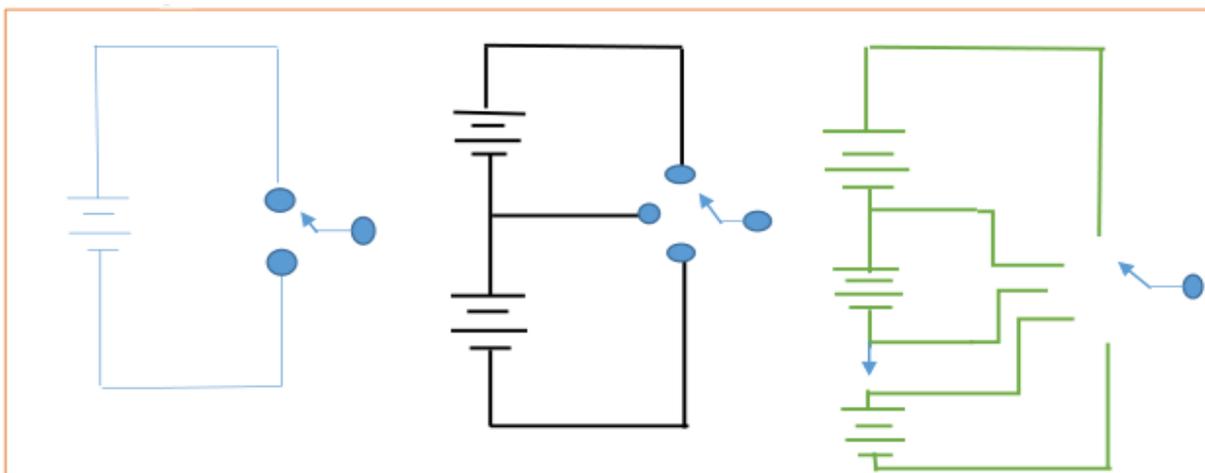


Figure I.4 : Principe de convertisseur multiniveau.

Chapitre I : Les redresseurs MLI triphasés à deux et trois niveaux :

La figure I.5 présente une simplification des convertisseur multiniveaux. Le schéma à gauche représenter le convertisseur a deux niveaux, le schéma au centre représenter l'onduleur a trois niveaux et le schéma à droit représenter l'onduleur de N niveau.

I.4.2.2 Modélisation du fonctionnement d'un bras d'onduleur à trois niveaux :

L'onduleur à trois niveaux a une structure symétrique. Donc on procède par bras figure (1.6). Ainsi, on définit en premier lieu un modèle global d'un bras

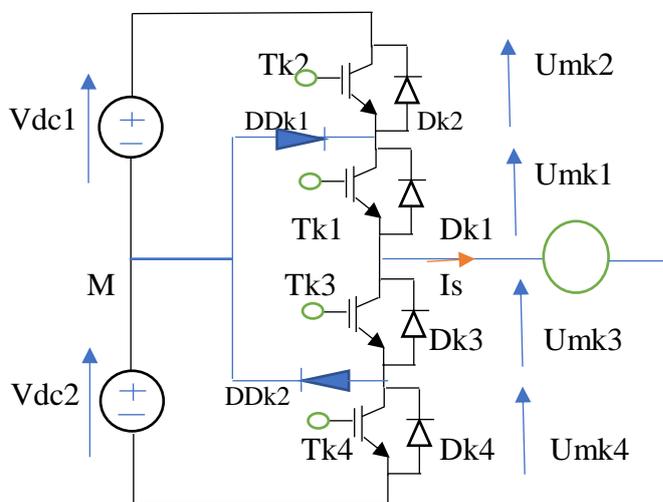


Figure I.5 : structures d'un bras de l'onduleur à trois niveaux à structure NPC.

Pour simplifier la complexité de la structure de l'onduleur multi-niveaux, on présente chaque paire transistor-diode par un seul interrupteur bidirectionnel TD_{ks} (figure I.7), et vue la symétrie de sa structure, on fait le raisonnement sur un seul bras (figure I.6).

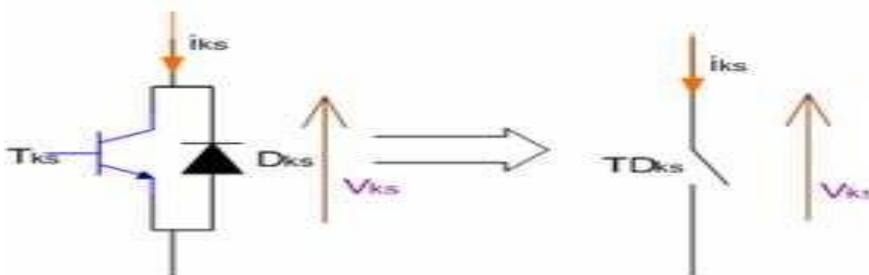


Figure I.6 : Interrupteur bidirectionnel équivalent de la paire transistor-diode.

Chapitre I : Les redresseurs MLI triphasés à deux et trois

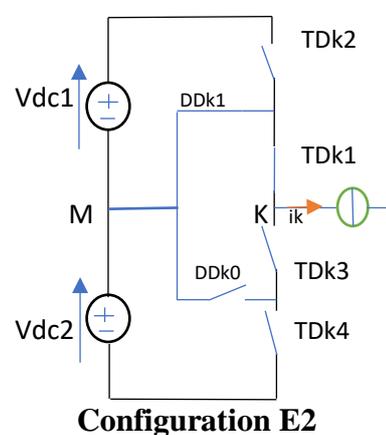
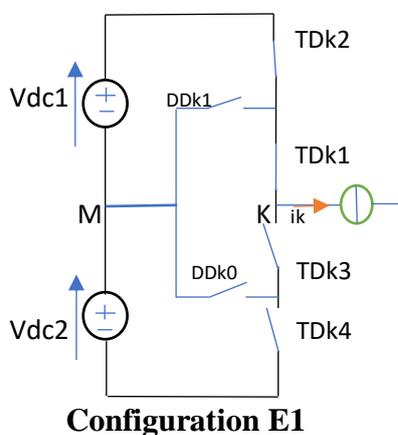
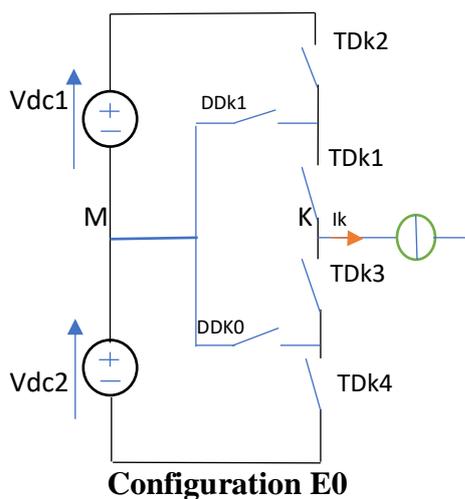
niveaux :

L'ouverture et la fermeture des interrupteurs dépendent de :

- La commande externe B_{ks} (l'ordre d'amorçage ou de blocage des semi-conducteurs bi-commandables T_{ks}).
- Une commande interne définie par les signes des courants du bras et des tensions aux bornes des semi-conducteurs.

I.4.2.3 Différentes configurations d'un bras d'onduleur à trois niveaux :

Un bras de l'onduleur définit cinq configurations possibles. Ces différentes configurations sont représentées par la figure (I-8). Le tableau (I-1) donne les grandeurs électriques caractérisant chacune de ces configurations (avec « M » origine des potentiels et V_{KM} la différence de potentiel entre le bras K et le point fictif M).



Chapitre I : Les redresseurs MLI triphasés à deux et trois

niveaux :



<i>La configuration</i>	<i>La grandeur électrique qui la caractérise</i>
E_0	$I_k=0$
E_1	$V_k=U_{c1}$
E_2	$V_k=0$
E_3	$V_k=-U_{c2}$
E_4	$V_k=0$

Tableau I.1 : Grandeurs électriques Caractérisant chaque configuration possible d'un bras k

Figure I.8 : Les cinq configurations possibles d'un bras d'onduleur à trois niveaux.

I.4.2.4 Fonctionnement d'un bras d'onduleur à trois niveaux :

Chaque bras est équivalent à un interrupteur à trois positions permettant d'obtenir en sortie trois niveaux de tension U_{c1} , 0 et $-U_{c2}$.

La structure de cet onduleur de tension consiste à créer un point sur l'étage de tension continue tel que $U_{c1}+U_{c2} = E$, permettant de générer des créneaux d'amplitudes : $-E/2$, 0 et $E/2$ dont la combinaison de ces niveaux permet d'avoir un fondamental plus proche de la sinusoïde qu'avec la structure classique à deux niveaux.[5]

I.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté la structure du redresseur a deux niveaux ainsi que son

Chapitre I : Les redresseurs MLI triphasés à deux et trois

niveaux :

fonctionnement. Nous avons alors classé les onduleurs en deux groupes distincts : les onduleurs autonome et non autonome qui se partage en eux types : les onduleurs de tensions et ceux de courant.

Dans un deuxième temps nous avons énoncé les redresseurs multi-niveaux, on s'est concentré sur les onduleurs à trois niveaux à structure NPC en présentant sa structure, son principe de fonctionnement et la Modélisation d'un bras de l'onduleur ainsi que son fonctionnement et ses différentes configurations.

Les onduleurs NPC sont intéressants pour les applications triphasées nécessitant peu de niveaux. L'énergie stockée à l'étage intermédiaire peut être réduite. Les structures permettant une conversion directe, telles que NPC, est avantageuses pour les applications avec échange de puissance active, la commande prédictive à base d'un modèle NPC est souvent utilisé dans des applications de commande de courant des onduleurs, Il est applicable dans les repère fixe et tournant pour des applications diverses telles que le filtrage actif parallèle et série, les systèmes connectés au réseau et des sources d'alimentation sans interruption.

Dans le chapitre suivant nous allons étudier la commande directe en puissance (DPC) des redresseurs présentés dans ce chapitre.

CHAPITRE II

COMMANDE DIRECT EN
PUISSANCE D'UN REDRESSEUR
MLI A DEUX NIVEAU DE TENSION

II.1 INTRODUCTION

Les redresseurs à MLI deviennent de plus en plus un moyen intéressant d'interfaçage avec le réseau électrique pour différentes applications industrielles, surtout les entraînements électriques hautement performants. La recherche dans ce domaine s'est considérablement développée ces dernières années. Elle considère plusieurs aspects, notamment la qualité de l'énergie électrique, les topologies des convertisseurs, les structures et les performances des interrupteurs de puissance ainsi que les techniques de commande.

Différentes techniques de commande ont été proposées pour ce type de convertisseurs. Parmi celles-ci, on trouve la technique basée sur la commande directe en puissance, connue sous le nom DPC (Direct Power Control), les variables contrôlées sont les puissances active et réactive instantanées.

En plus de sa simplicité qui est due à l'élimination des blocs de modulation et des boucles de régulation internes, cette commande garantit un contrôle découplé des puissances et de bonnes performances dynamiques.

Dans cette technique, les états de commutation du convertisseur sont sélectionnés par une table de commutation basée sur les erreurs entre les valeurs de référence et celles mesurées des puissances active et réactive. [6] [7]

Nous allons donc étudier dans ce chapitre la commande DPC d'un redresseur MLI à deux niveaux. Nous développons, l'estimation des deux grandeurs de contrôle qui sont la puissance active et réactive. Ensuite nous donnerons les résultats de simulation qui mettent en évidence les performances de la commande DPC.

II.2 Principe de la commande directe de puissance (DPC)

Le principe de la DPC consiste à utiliser une table de commutation pour sélectionner une séquence des ordres de commutation (S_1, S_2, S_3) des interrupteurs constituant le redresseur à MLI. La sélection s'effectue sur la base des positions angulaires des vecteurs des tensions du réseau qui sont calculés dans le plan α - β qui est divisé en douze (12) secteurs égaux de 30° , ainsi que sur les 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. 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, la puissance réactive de référence est toujours maintenue à zéro.

Chacune des séquences de commande (S_1, S_2, S_3) correspond à un vecteur de tension à l'entrée du redresseur [8][9].

II.2.1 Schéma bloc de la DPC

Le schéma bloc de la commande directe de puissance DPC est illustré par la figure II.1.

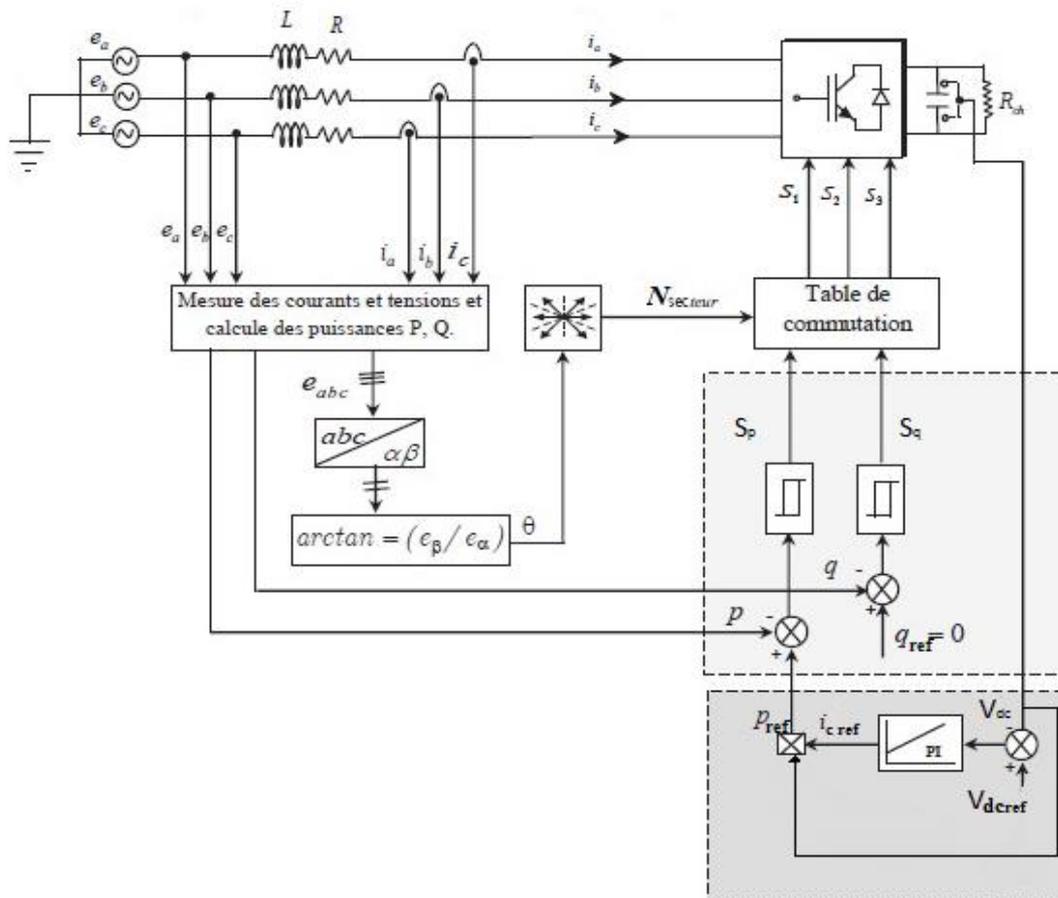


Figure II.1 : Configuration générale de la commande DPC.

II.2.2 Calcul des puissances instantanées

Les puissances active et réactive instantanées sont estimées à base de la mesure des tensions et courants injectés, elles peuvent être calculées par les expressions suivantes:

Puissance active :

$$P = i^t \cdot e = [i_a \ i_b \ i_c] \cdot \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = i_a \cdot e_a + i_b \cdot e_b + i_c \cdot e_c \quad (\text{II.1})$$

Puissance réactive :

$$Q = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot [(e_b - e_c) \cdot i_a + (e_c - e_a) \cdot i_b + (e_a - e_b) \cdot i_c] \quad (\text{II.2})$$

Toutefois, le nombre des capteurs requis augmente le coût et réduit la fiabilité du système. Par conséquent, afin d'estimer correctement la puissance et en même temps de réduire le nombre de capteurs de tension, Noguchi propose l'utilisation d'un estimateur du vecteur de tension [10].

II.2.3 Calcul des puissances instantanées de référence

Basée sur la mesure des tensions et courants de charge, la puissance active de référence P_{ref} peut être calculée par le produit du courant continu de référence avec la tension continue V_{dc} . La régulation de la tension continue est assurée par un régulateur de type PI qui corrige l'erreur entre la tension continue mesurée et sa référence.

Tandis que la puissance réactive de référence est toujours maintenue à zéro.

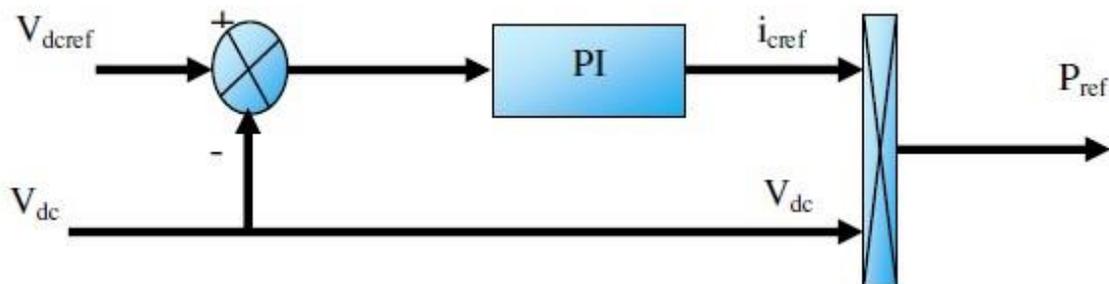


Figure II.2 : Schéma de principe de génération de la puissance active de référence.

II.2.4 Régulateur à hystérésis

La grande simplicité d'implémentation de cet outil de contrôle est également un élément important dans le choix du comparateur à deux niveaux. De plus, les considérations énergétiques sur le convertisseur imposent un nombre restreint de commutations. Or, pour une même largeur de la bande d'hystérésis, le comparateur à deux niveaux nécessite un nombre moins élevé de commutations. Les largeurs de la bande d'hystérésis ont une influence sur les performances du redresseur, en particulier, sur la distorsion du courant harmonique, et sur la fréquence moyenne de commutation. Le contrôleur proposé dans notre cas est un régulateur à deux niveaux pour les puissances actives et réactive. Les sorties des régulateurs à hystérésis données par les variables booléennes S_p et S_q , indiquent les dépassements supérieurs ou inférieurs des erreurs des puissances comme suite :

$$\text{Si } P_{ref} - P \geq H_p ; S_p = 1, \quad \text{Si } P_{ref} - P \leq -H_p; S_p=0$$

$$\text{Si } q_{ref} - q \geq H_q ; S_q = 1, \quad \text{Si } q_{ref} - q \leq -H_q; S_q=0$$

H_p, H_q sont les écarts des régulateurs à hystérésis à deux niveaux [11].

II.2.5. Détermination du secteur

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

$$\theta = \text{atang} \left(\frac{e_\beta}{e_\alpha} \right) \quad (\text{II.3})$$

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

$$(k - 2) \left(\frac{\pi}{6} \right) \leq \theta \leq (k - 1) \left(\frac{\pi}{6} \right) \quad k=1,2,\dots,12 \quad (\text{II. 4})$$

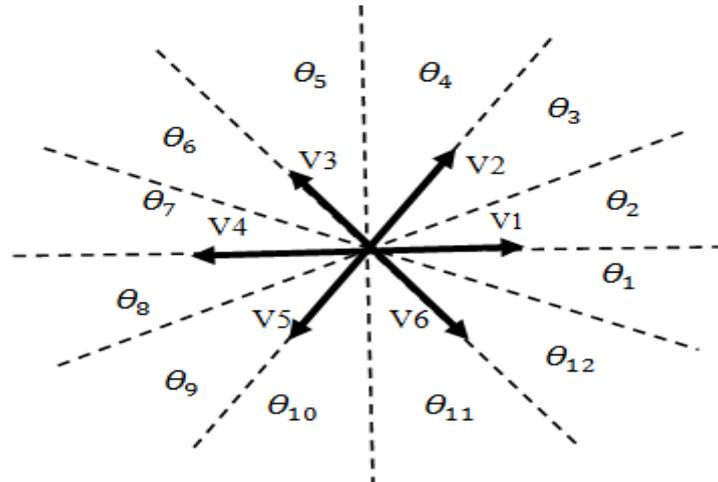


Figure II.3 : Représentation du vecteur tension dans le plan (α, β) divisé en douze secteurs.

II.2.6 Table de commutation

Le modèle de puissance du redresseur MLI est donné par [12]:

$$L \frac{dp}{dt} = -R_p - \omega L_q (V_\alpha V_{r\alpha} + V_\beta V_{r\beta}) + (V_\alpha^2 + V_\beta^2)$$

$$L \frac{dq}{dt} = -R_q + \omega L_p (V_\alpha V_{r\alpha} + V_\beta V_{r\beta}) \quad (\text{II-5})$$

Si on considère que R est assez petit et négligeable, la puissance active et réactive peut-être réécrite comme suite:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{3 V_M^2}{2 L} - \frac{V_M V_{dc}}{L} \cos\left[\omega t - \frac{\pi}{3}(k - 1)\right]$$

$$\frac{dq}{dt} = -\frac{V_M V_{dc}}{L} \sin\left[\omega t - \frac{\pi}{3}(k - 1)\right] + \omega p \quad (\text{II-6})$$

Où $k = 1, 2, 3, 4, 5, 6$, correspondant au numéro du vecteur tension sélectionnée non nul indiqué à la (Figure II.3)

La variation de la puissance active et de la puissance réactive en fonction de la tension du réseau pour divers vecteurs tension du redresseur est illustrée à la (Figure II.4).

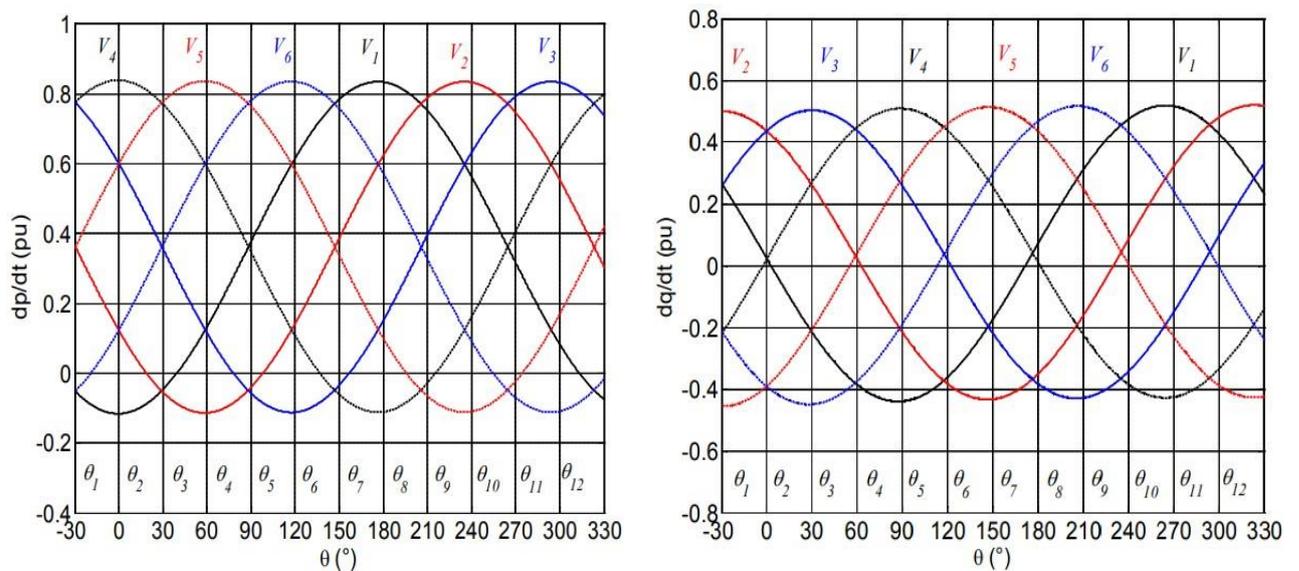


Figure II.4 : Variation de la puissance active et réactive pour différents vecteurs tension du redresseur.

La table de commutation est formée à partir de la sortie des deux contrôleurs d'hystérésis (S_p , S_q) et de la position angulaire θ du vecteur tension, donc pour obtenir de meilleures performances du système, la table de commutation doit être synthétisée sur la base de la variation de la puissance active et réactive pour différents vecteurs de tension du redresseur dans chaque secteur. Si $\frac{dp}{dt} > 0$; $S_p = 1$ ce qui représente le besoin d'augmenter la puissance active, si $\frac{dp}{dt} < 0$; $S_p = 0$ se qui représente le besoin de diminuer la puissance active. Et c'est la même chose pour S_q . A partir de là et de la (figure II.4) on peut établir le tableau suivant :

Secteurs	$\frac{dp}{dt} > 0$ $S_p = 1$	$\frac{dp}{dt} < 0$ $S_p = 0$	$\frac{dq}{dt} > 0$ $S_q = 1$	$\frac{dq}{dt} < 0$ $S_q = 0$
θ_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
θ_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
θ_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
θ_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
θ_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
θ_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
θ_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

θ_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
θ_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
θ_{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
θ_{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
θ_{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 II.1 : Vecteur de tension pour chaque signe de pente de la puissance active et réactive dans chaque secteur

La nouvelle table de commutation pour la commande DPC du redresseur MLI à deux niveaux peut être résumée dans le Tableau II.2. Par exemple dans le premier cas : $S_p=1, S_q=0$: la méthode de sélection du vecteur se fait par le choix des vecteurs commun entre (V_2, V_3, V_4, V_5) et (V_4, V_5, V_6) de façon que le vecteur qui augmenter la puissance active et diminuer la puissance réactive, c'est donc V_4, V_5 . Cela est décidé à travers les courbes de variation de puissance.

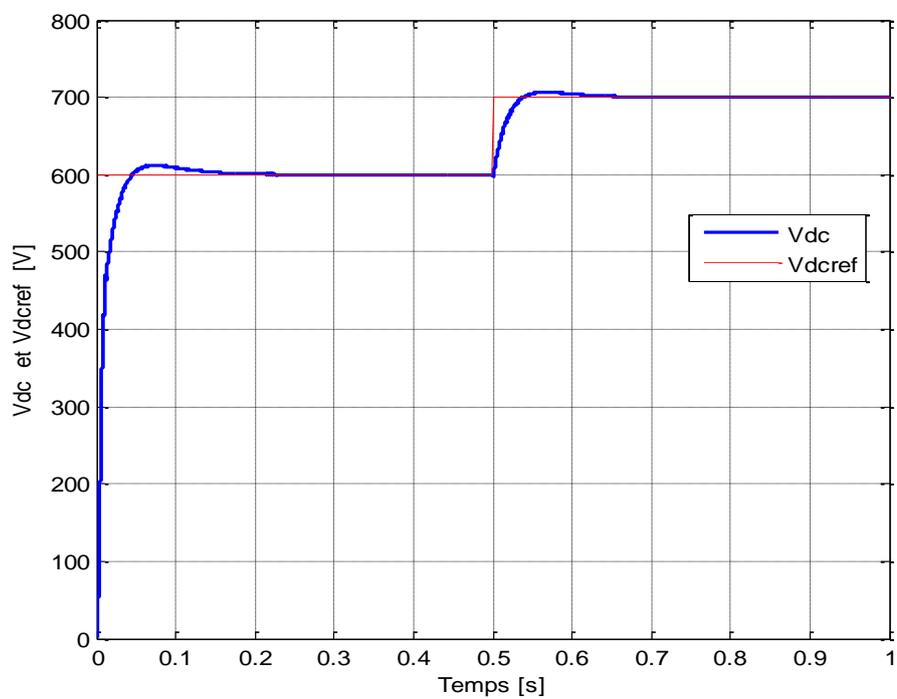
S_p	S_q	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6	θ_7	θ_8	θ_9	θ_{10}	θ_{11}	θ_{12}
1	0	V_4	V_5	V_5	V_6	V_6	V_1	V_1	V_2	V_2	V_3	V_3	V_4
	1	V_3	V_4	V_4	V_5	V_5	V_6	V_6	V_1	V_1	V_2	V_2	V_3
0	0	V_6	V_1	V_1	V_2	V_2	V_3	V_3	V_4	V_4	V_5	V_5	V_6
	1	V_1	V_2	V_2	V_3	V_3	V_4	V_4	V_5	V_5	V_6	V_6	V_1

Tableau II.2 : Table de commutation utilisée pour la commande DPC d'un redresseur MLI à deux niveaux [12]

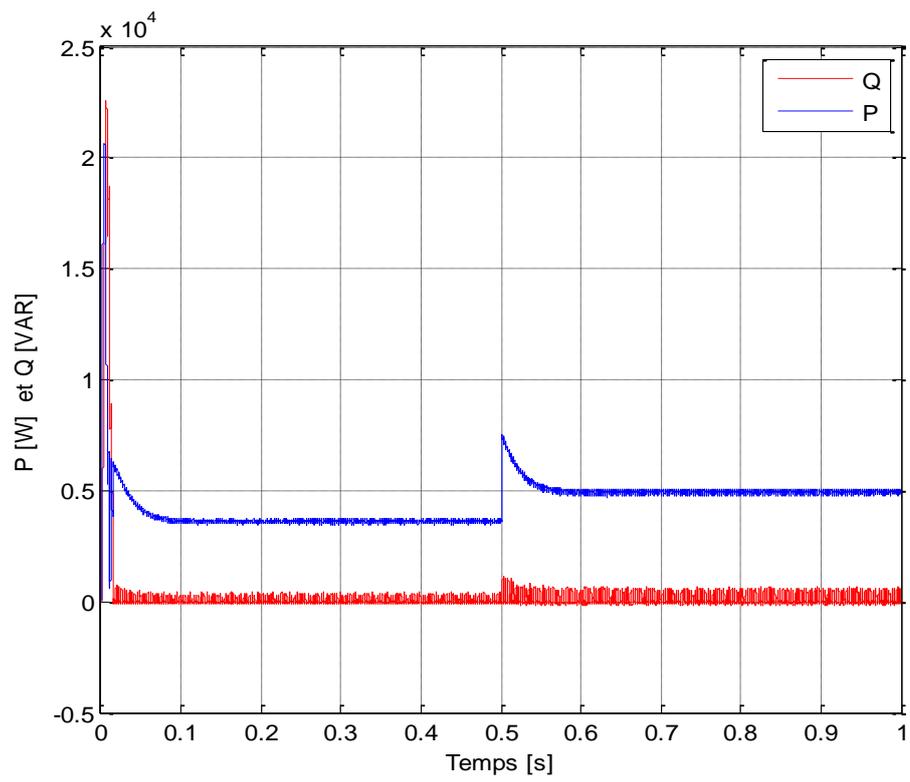
II.3 Simulation de la commande DPC

La commande directe de puissance du redresseur MLI à deux niveaux, à l'aide de la nouvelle table de commutation a été simulé à l'aide du logiciel Matlab/Simulink. Les paramètres du circuit électrique utilisés en simulation sont mentionnés dans le tableau suivant :

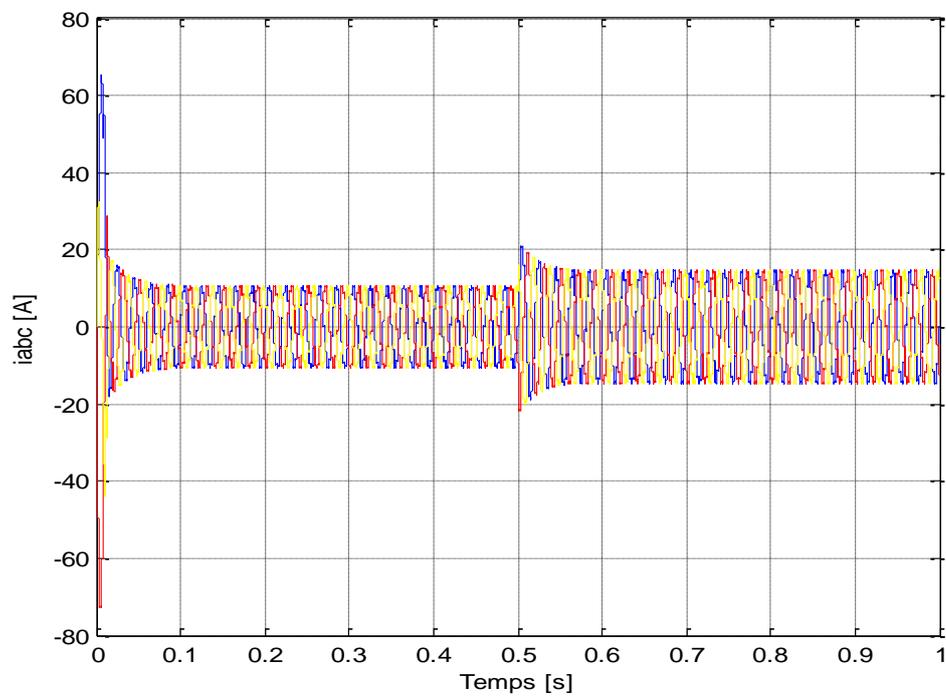
Résistance de l'inductance de couplage r	0.1Ω
Self de l'inductance de couplage L	$1mH$
Capacité du bus continu C	$1mF$
Résistance de la charge R_{ch}	100Ω
Tension composée efficace du réseau E	220 V
Fréquence du réseau f	$50Hz$
Référence de la tension continue de sortie $V_{dc_{ref}}$	$600V$



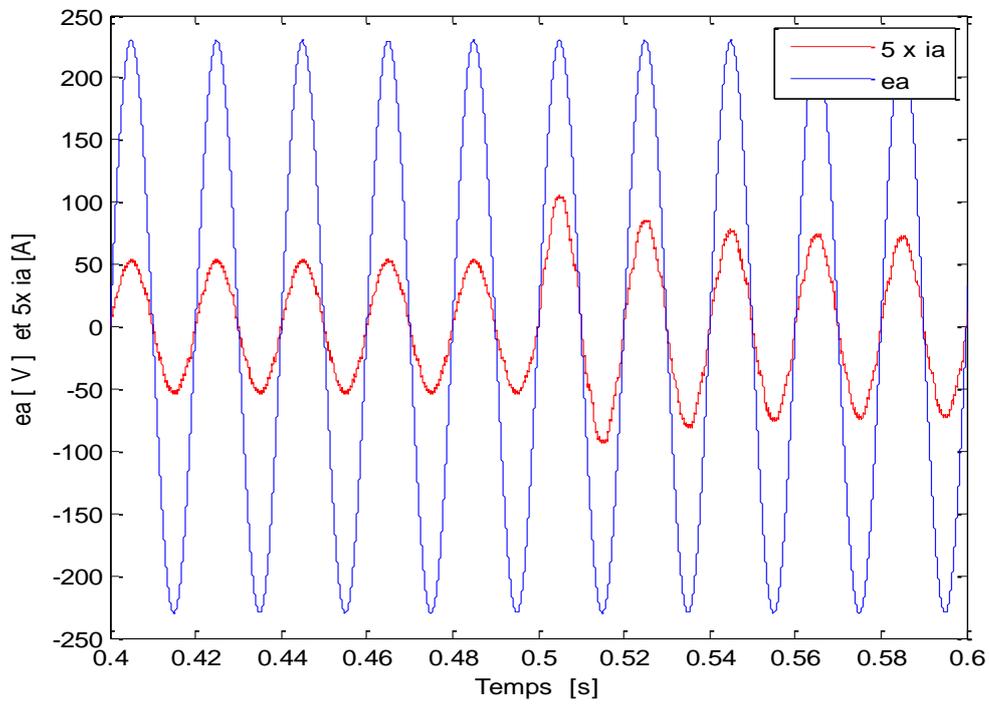
(a)



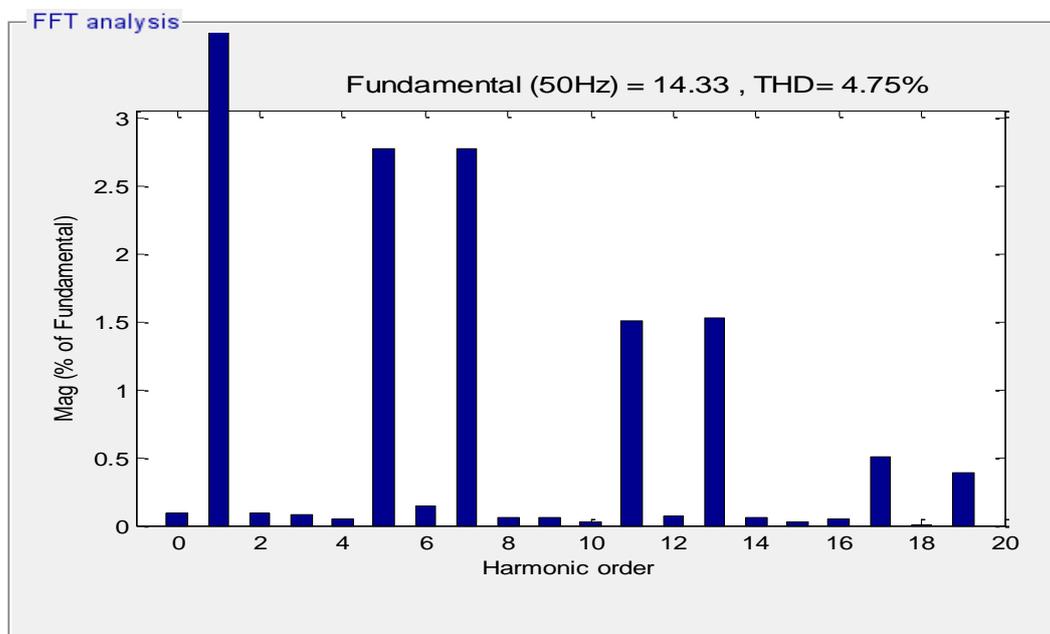
(b)



(c)

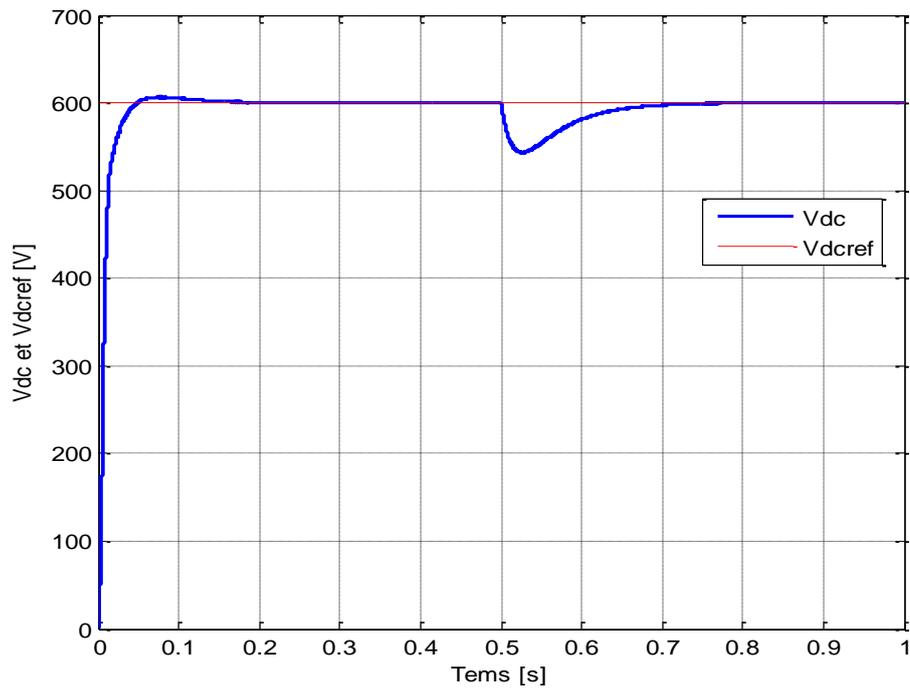


(d)

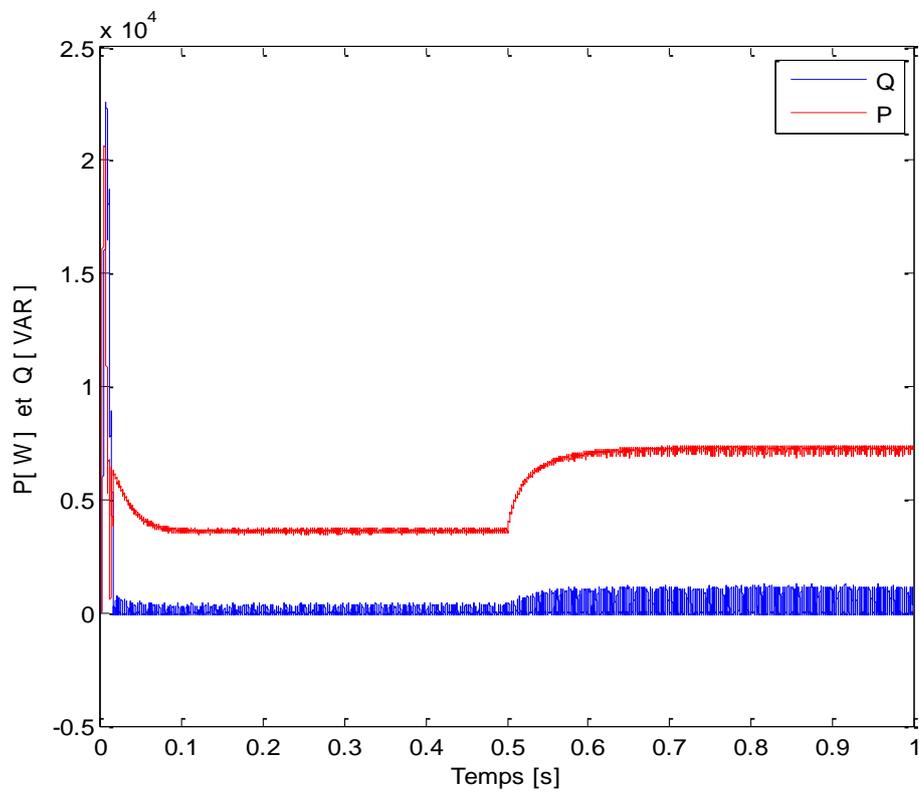


(e)

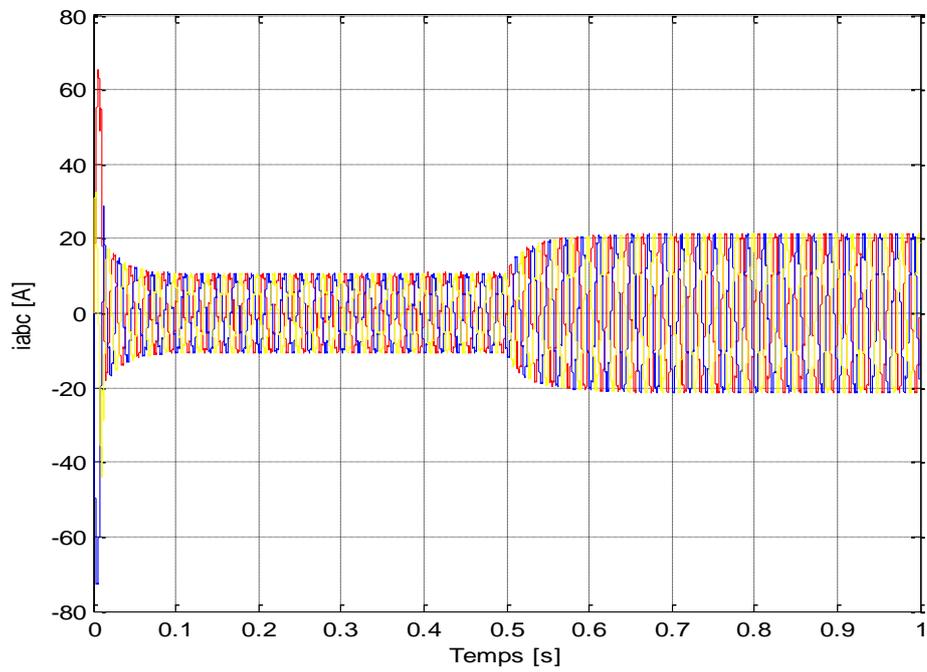
Figure II.5 : Performances du redresseur deux niveaux commandé par DPC lors d'une variation de la tension de référence $V_{dc_{ref}}$.



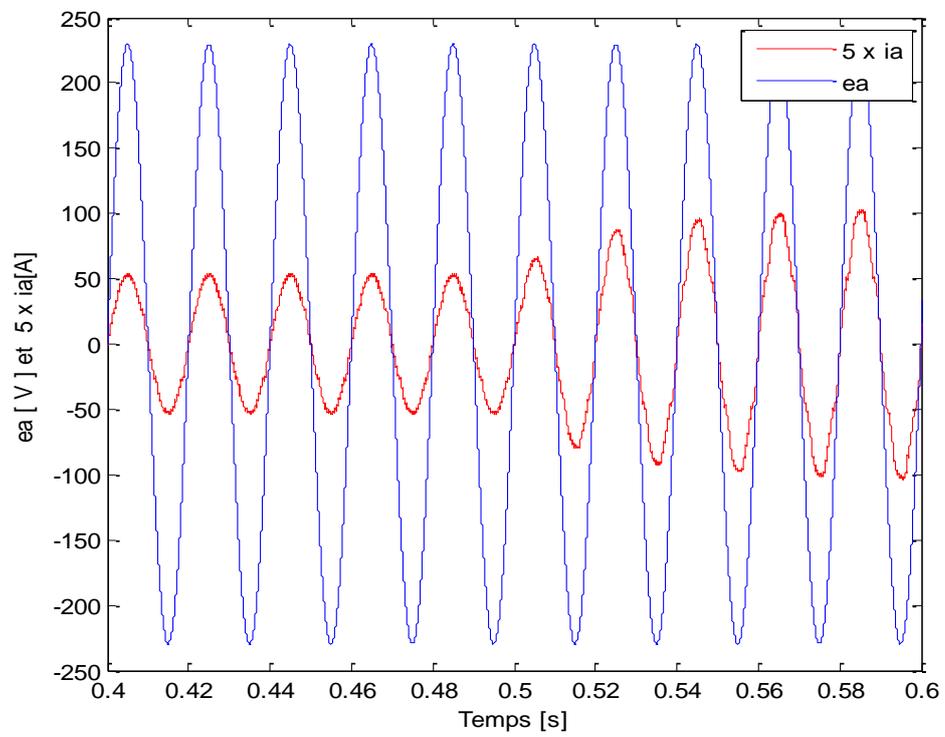
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure II.6 : Performances du redresseur deux niveaux commandé par DPC lors d'une variation de la résistance de charge.

II.3.1 Interprétation des résultats

Les résultats de la simulation obtenus pour différentes conditions montrent que :

Pour la variation de tension de référence $V_{dc_{ref}}$, (de 600 à 700 volts a 0.5s) :

- La figure II.5 (a) montre la variation de la tension continue V_{dc} , lorsque le changement est appliqué à $V_{dc_{ref}}$, V_{dc} suit sa référence.
- La figure II.5 (b) montre les allures de la puissance active et réactive dans la ligne côté AC lors de la variation de tension de référence $V_{dc_{ref}}$. On remarque que la puissance active augmente
- La figure II.5 (c) montre l'allure du courant du réseau lors de la variation de tension de référence $V_{dc_{ref}}$. On remarque que le courant augmente
- La figure II.5 (d) montre l'allure de la tension e_a et celle du courant i_a (i_a est multiplier par 5 pour facilité la comparaison) de la phase a du réseau lors de la variation de tension de référence $V_{dc_{ref}}$
- La figure II.5 (e) montre l'analyse FFT on remarque que le THD est petit (4.75%) se qui signifie que le courant du réseau est sinusoïdal lors de la variation de tension de référence $V_{dc_{ref}}$.

Pour la variation de la résistance de charge R_{ch} (de 100 à 50 ohms a 0.5s):

- La figure II.6 (a) montre la variation de la tension continue V_{dc} , lorsque le changement est appliqué à la résistance de la charge R_{ch} , V_{dc} diminue puis elle reprend la valeur de sa référence.
- La figure II.6 (b) montre les allures de la puissance active et réactive dans la ligne côté AC lorsque le changement est appliqué à la résistance de la charge R_{ch} , on remarque que la puissance active a augmenté.
- La figure II.6 (c) montre l'allure du courant de réseaux lorsque le changement est appliqué à la résistance de la charge R_{ch} , on remarque que le courant a augmenté.

- La figure II.6 (d) montre l'allure de la tension e_a et celle du courant i_a (i_a est multiplié par 5 pour faciliter la comparaison) de la phase a du réseau lors de la variation de R_{ch} .

Les résultats obtenus lors d'un changement de référence de la tension de sortie pour la commande DPC nous font remarquer que lorsque la tension continue atteint, la nouvelle référence, la puissance active et le courant de ligne augmentent.

La tension et le courant du réseau sont en phase, et donc le facteur de puissance est unitaire. Avec THD de valeur basse (4.75%) on peut dire que le courant du réseau est sinusoïdal

La réponse du redresseur à propos de la variation de charge nous fait remarquer que cette dernière entraîne un changement dans la référence de la puissance active instantanée et aussi dans le courant nécessaire pour maintenir le bus continu chargé.

II.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la description de la commande directe de puissance avec une nouvelle table de commutation. Nous avons effectué la simulation d'un redresseur à deux niveaux et sa commande DPC. A partir de ces résultats, on remarque que le contrôle direct de puissance répond rapidement au changement de la consigne de puissance.

Dans le chapitre qui suivra nous allons détailler la commande DPC d'un redresseur à trois niveaux de tensions à structure NPC.

CHAPITRE III

COMMANDE DIRECT EN
PUISSANCE D'UN REDRESSEUR
MLI A TROIS NIVEAU DE TENSION

III.1 Introduction

La stratégie de commande directe de puissance est d'abord utilisée dans le redresseur MLI à deux niveaux dans les années 1990, puis elle est étendue aux redresseurs multi-niveaux. La recherche de la stratégie DPC à trois niveaux attire de plus en plus d'attention puisque le redresseur NPC à trois niveaux est le redresseur multi-niveau le plus utilisé. La stratégie de contrôle DPC consiste à choisir les vecteurs de tension appropriés pour contrôler la puissance active et la puissance réactive à travers les boucles d'hystérésis. Elle ne nécessite pas de stratégie de modulation, Son algorithme de contrôle est donc simple, sa réponse dynamique est rapide avec une efficacité élevée.

III.2 Redresseur NPC à trois niveaux

Le redresseur NPC est construit autour de douze cellules de commutation (basées sur IGBT) et six interrupteurs unidirectionnels en courant (diodes) reliés au point milieu des sources continues, chaque phase peut produire trois niveaux distincts en connectant la sortie soit au positif ($V_{dc}/2$), négatif ($-V_{dc}/2$) ou potentiel nul (0). Dans un système à trois, il en résulte $3^3=27$ vecteurs de tension de sortie, liés à 19 vecteurs de tension possibles à la sortie du convertisseur [13].

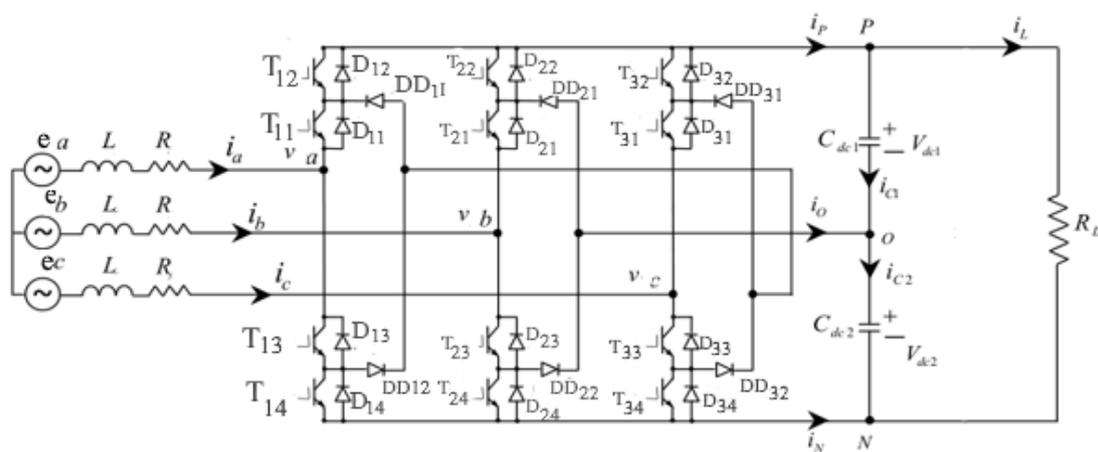


Figure III.1 : Diagramme schématique d'un redresseur NPC à trois niveaux.

Le modèle mathématique du redresseur MLI triphasé à trois niveaux dans les coordonnées statiques abc peut être exprimé comme suit:

$$e_j = L \frac{di_j}{dt} + R_{i_j} + v_j \text{ Avec } (j = a, b, c) \quad (\text{III.1})$$

Tandis que:

e_j, i_j : tension de phase et courant de phase de la source.

v_j : la tension du point neutre de la phase j du redresseur côté AC.

On peut définir les fonctions de commutation S_1, S_2 et S_3 pour décrire les états de commutation du redresseur MLI à trois niveaux. Chaque tension de phase peut être exprimée comme suit :

$$v_a = \frac{V_{dc}}{2} S_1, \quad v_b = \frac{V_{dc}}{2} S_2, \quad v_c = \frac{V_{dc}}{2} S_3 \quad (\text{III.2})$$

$$S_x = 1; \quad T_{x1}, T_{x2}: \text{Conduisent} \quad T_{x3}, T_{x4}: \text{Bloqués}$$

$$S_x = 0; \quad T_{x2}, T_{x3}: \text{Conduisent} \quad T_{x1}, T_{x4}: \text{Bloqués}$$

$$S_x = -1; \quad T_{x1}, T_{x2}: \text{Bloqués} \quad T_{x3}, T_{x4}: \text{Conduisent}$$

Avec $x = 1, 2, 3$ représente les phases pour les trois bras. [14]

III.2.1 Vecteurs de tensions

Les vecteurs de tension sont divisés en quatre groupes selon leurs amplitudes montrées dans le Tableau (III.1) :

- **Vecteur Nul** : le vecteur de tension de ce groupe est d'amplitude nulle. Il est obtenu par trois états de commutation différents.
- **Vecteur Petit** : ces vecteurs peuvent être obtenus par deux états de commutation différents classifiés selon le type positif ou négatif.
- **Vecteur Moyen** : Ces vecteurs sont obtenus par la combinaison des états 1,0 et -1.
- **Vecteur Grand** : Ces vecteurs sont obtenus par la combinaison des états 1 et -1.

Vecteur	Etat des commutateurs	Classification du vecteur	Amplitude du vecteur
V_{25}	111	Vecteur Nul (VN)	Nul
V_{26}	000		
\vec{V}_{27}	-1-1-1		
\vec{V}_{14}	100	Vecteur Petit Positif (VPP)	$\frac{1}{3}v_{dc}$
\vec{V}_{15}	110		
\vec{V}_{18}	010		
\vec{V}_{19}	011		
V_{22}	001		
\vec{V}_{23}	101		
V_{13}	0-1-1	Vecteur Petit Négatif (VPn)	$\frac{1}{3}v_{dc}$
\vec{V}_{16}	00-1		
\vec{V}_{17}	-10-1		
\vec{V}_{20}	-100		
\vec{V}_{21}	-1-10		
\vec{V}_{24}	0-10		
\vec{V}_2	10-1	Vecteur Moyen (VM)	$\frac{\sqrt{3}}{3}v_{dc}$
\vec{V}_4	01-1		
\vec{V}_6	-110		
\vec{V}_8	-101		
\vec{V}_{10}	0-11		
\vec{V}_{12}	1-10		
\vec{V}_1	1-1-1	Vecteur Grand (VG)	$\frac{2}{3}v_{dc}$
\vec{V}_3	11-1		
\vec{V}_5	-11-1		
\vec{V}_7	-111		
\vec{V}_9	-1-11		
\vec{V}_{11}	1-11		

Tableau III.1 : Les vecteurs de tension.[15]

III.3 Techniques DPC de redresseur à trois niveaux

III.3.1 Principe de la DPC a trois niveaux de tentions

La figure suivante donne le schéma de principe de la commande DPC du redresseur MLI à trois niveaux.

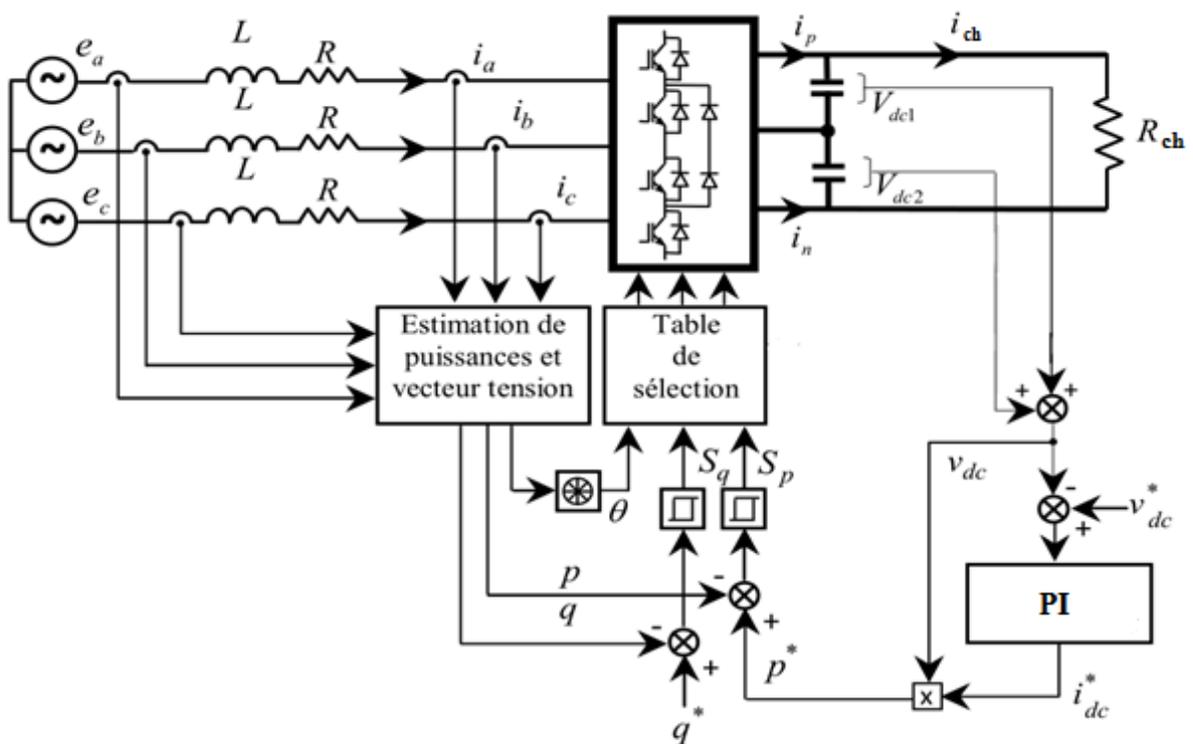


Figure III.2 : Schéma de principe de la commande DPC d'un redresseur MLI à trois niveaux.

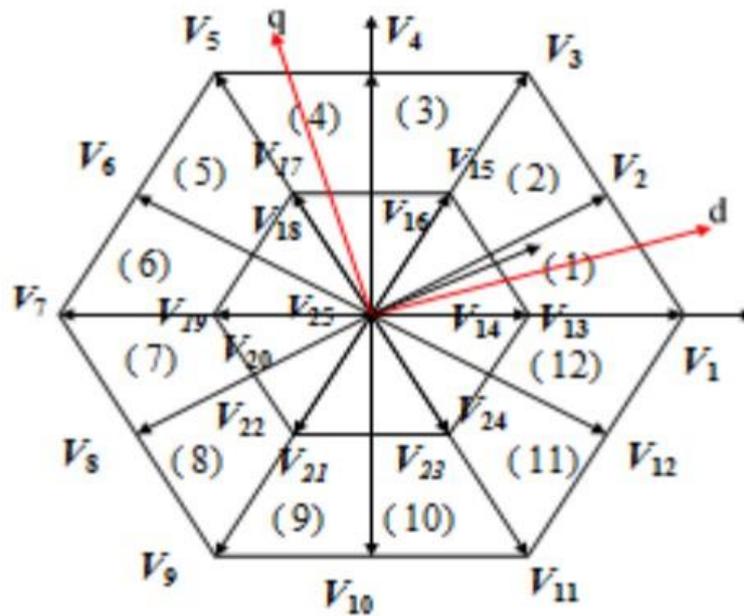


Figure III.3 : Vecteurs et division du secteur du système DPC dans le redresseur NPC trois niveaux.

En mesurant les tensions de capacité supérieure et inférieure, la tension du bus continu V_{dc} peut être obtenue. La puissance active P_{ref} est le produit de la tension du bus continu V_{dc} et du courant de référence actif généré par le contrôleur PI pour réguler V_{dc} . La puissance réactive de référence q_{ref} est généralement imposée égale à zéro pour le fonctionnement en facteur de puissance unitaire du redresseur. Les erreurs des puissances actives et réactives entre la valeur de référence et la valeur mesurée réelle sont quantifiées par les signaux de commutation S_p et S_q . Les états de commutation S_1 , S_2 , et S_3 du redresseur MLI peut être sélectionné à partir d'une table de commutation, qui s'effectue sur la base des erreurs numérisées S_p , S_q et le secteur θ .

III.3.2 Analyse du modèle de puissance

Selon la transformation des coordonnées et en négligeant la résistance R dans l'équation (III.1) le modèle mathématique du redresseur MLI à trois niveaux en coordonnées stationnaires dq est le suivant:

$$L \frac{di_d}{dt} = e_d - v_d$$

$$L \frac{di_q}{dt} = -v_q \tag{III.3}$$

Selon la théorie de la puissance instantanée:

$$p = e_d i_d + e_q i_q$$

$$q = e_q i_d - e_d i_q \tag{III.4}$$

L'équation (III.3) est multipliée par e_q , et on la remplace dans l'équation (III.4).

Donc le modèle mathématique du redresseur MLI a trois niveaux basés sur la DPC dans les coordonnées de rotation dq sont décrites comme suit:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{e_d}{L} (e_d - v_d)$$

$$\frac{dq}{dt} = \frac{1}{L} e_d v_q \tag{III.5}$$

Il est évident que la puissance active et la puissance réactive pourraient être contrôlées par la tension du point neutre du redresseur côté AC.

Par exemple, si le vecteur de tension de référence était situé dans le secteur θ_1 . L'influence des vecteurs de tension fournis par le redresseur sur la puissance active et réactive est indiquée dans le tableau (III.2). Dans ce tableau +, - signifie le changement de puissance, et le nombre de symboles + ou - représente l'intensité de cet impact ; 0 signifie que l'incrément de puissance active ou de puissance réactive est nul, il n'y a pas d'influence du vecteur tension sur la puissance active ou réactive. X signifie que l'incrément de puissance active ou de puissance réactive est incertain.

	V_0	V_{13}	V_{14}	V_{15}	V_{16}	V_{17}	V_{18}
p	++	+	+	++	++	++	+
q	0	-	+	++	+	-	--
	V_2	V_4	V_6	V_8	V_{10}	V_{12}	
p	--	+	++	++	++	X	
q	+	++	++	-	--	--	
	V_1	V_3	V_5	V_7	V_9	V_{11}	
p	---	X	+	+++	++	+	
q	-	++	+++	+	--	---	

Tableau III.2: Vecteurs de tension générés par le redresseur a trois niveau NPC [14].

III.3.3 Régulateurs à hystérésis

S_p et S_q représentent la demande d'incrément de puissance active et de puissance réactive par rapport à la valeur de référence. Δp est quantifié en quatre niveaux, $S_p = 2, 1, 0, -1$ par un comparateur d'hystérésis à bandes à plusieurs étages. $S_p = -1$ Signifie que la puissance active doit être réduite. $S_p = 0$ Signifie que la puissance réactive est principalement contrôlée lorsque la puissance active change légèrement. $S_p = 1$ Signifie que la puissance active doit augmenter. $S_p = 2$ Signifie que la puissance active nécessite une augmentation rapide en cas d'augmentation de la charge. De même Δq est quantifié en trois niveaux. $S_q = -1$ Signifie que la puissance réactive doit être réduite. $S_q = 0$ Signifie que la puissance active est principalement contrôlée lorsque la puissance réactive change légèrement. $S_q = 1$ Signifie que la puissance réactive doit augmenter.

S_p et S_q sont définis comme suit :

$$\text{Si } P_{ref} - P > Hp_2 \quad \rightarrow \quad S_p = 2$$

$$\text{Si } Hp_2 > P_{ref} - P > Hp_1 \quad \rightarrow \quad Sp = 1$$

$$\text{Si } Hp_1 > P_{ref} - P > -Hp_1 \quad \rightarrow \quad Sp = 0$$

$$\text{Si } P_{ref} - P < -Hp_1 \quad \rightarrow \quad Sp = -1$$

$$\text{Si } q_{ref} - q > Hq_1 \quad \rightarrow \quad Sq = 1$$

$$\text{Si } Hq_1 > q_{ref} - q < -Hq_1 \quad \rightarrow \quad Sq = 0$$

$$\text{Si } q_{ref} - q < -Hq_1 \quad \rightarrow \quad Sq = -1$$

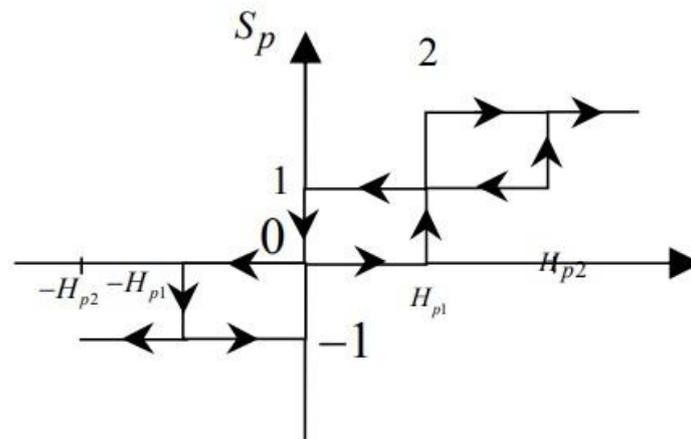


Figure III.4: Régulateur à hystérésis de la puissance active à quatre niveaux.

III.4.2 Table de commutation pour le redresseur à trois niveaux

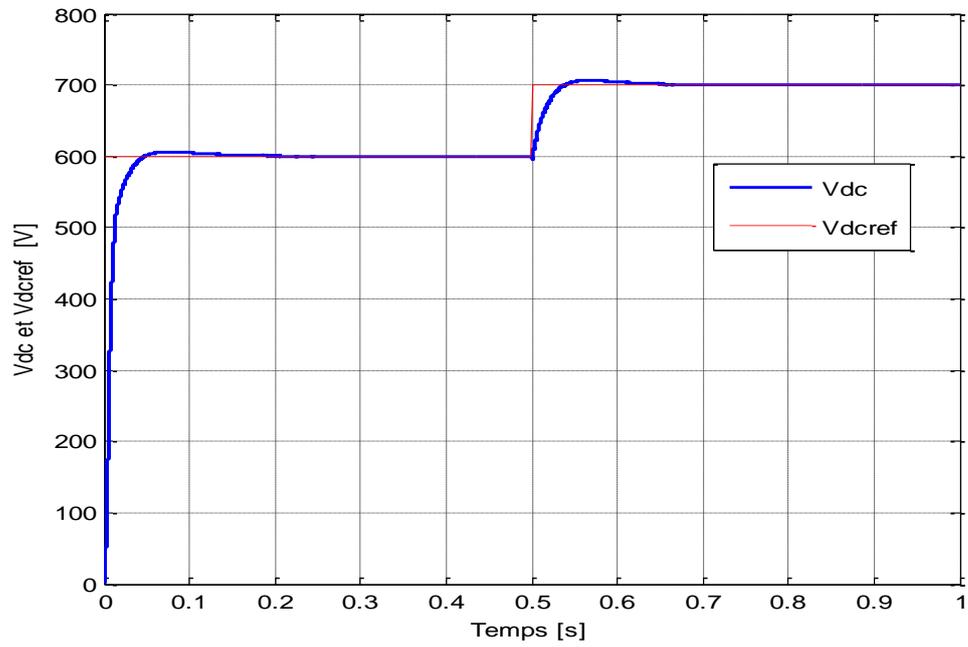
À partir du tableau (III-2), certaines conclusions peuvent être tirées. Dans chaque secteur, seuls deux vecteurs de commutation ont la capacité de diminuer la puissance active actuelle. Il n'est donc pas nécessaire de régler deux comparateurs d'hystérésis pendant la zone négative de puissance active. Quelques vecteurs de commutation, tel que V_3 et V_{12} , ont une influence indéfinie sur la puissance active. Il est conseillé d'éviter de sélectionner ces vecteurs par peur états incontrôlables du redresseur. Ensuite, la nouvelle table de commutation est donnée dans le tableau (III.3).

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}
2	1	V_5	V_6	V_7	V_8	V_9	V_{10}	V_{11}	V_{12}	V_1	V_2	V_3	V_4
	0	V_7	V_8	V_9	V_{10}	V_{11}	V_{12}	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6
	-1	V_8	V_9	V_{10}	V_{11}	V_{12}	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_7
1	1	V_{17}	V_{17}	V_{19}	V_{19}	V_{21}	V_{21}	V_{23}	V_{23}	V_{13}	V_{13}	V_{15}	V_{15}
	0	V_{25}	V_{25}	V_{26}	V_{26}	V_{25}	V_{25}	V_{26}	V_{26}	V_{25}	V_{25}	V_{26}	V_{26}
	-1	V_{21}	V_{21}	V_{23}	V_{23}	V_{13}	V_{13}	V_{15}	V_{15}	V_{17}	V_{17}	V_{19}	V_{19}
0	1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_7	V_8	V_9	V_{10}	V_{11}	V_{12}	V_1
	0	V_{13}	V_{13}	V_{15}	V_{15}	V_{17}	V_{17}	V_{19}	V_{19}	V_{21}	V_{21}	V_{23}	V_{23}
	-1	V_{11}	V_{12}	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_7	V_8	V_9	V_{10}
-1	1	V_1	V_1	V_3	V_3	V_5	V_5	V_7	V_7	V_9	V_9	V_{11}	V_{11}
	0	V_1	V_1	V_3	V_3	V_5	V_5	V_7	V_7	V_9	V_9	V_{11}	V_{11}
	-1	V_{12}	V_{12}	V_2	V_2	V_4	V_4	V_6	V_6	V_8	V_8	V_{10}	V_{10}

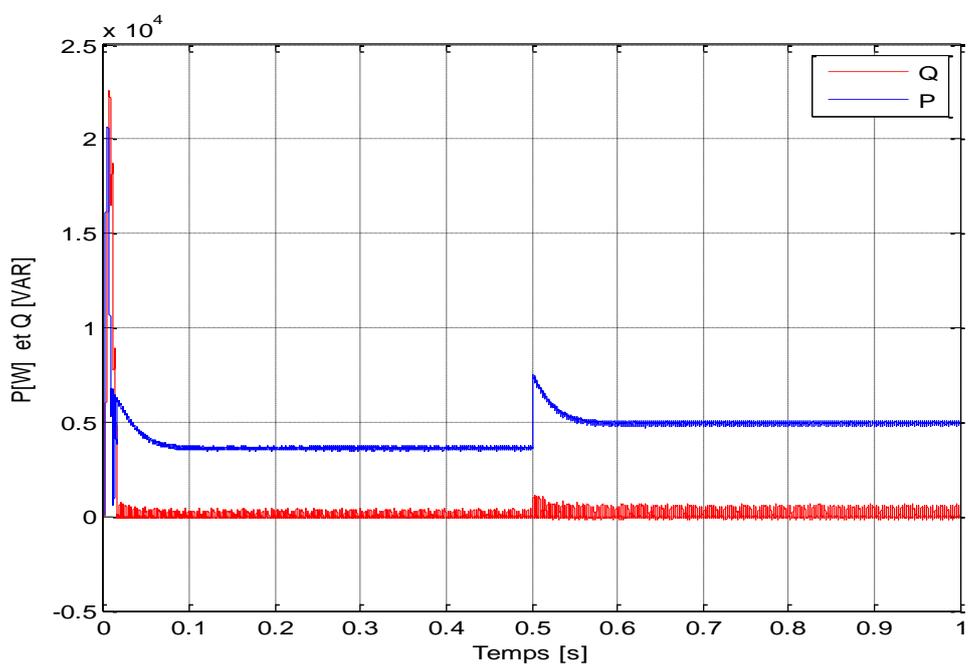
Tableau III.3: Table de commutation du DPC pour un redresseur MLI à trois niveaux.[13].

III.5 Simulation et discussions des résultats

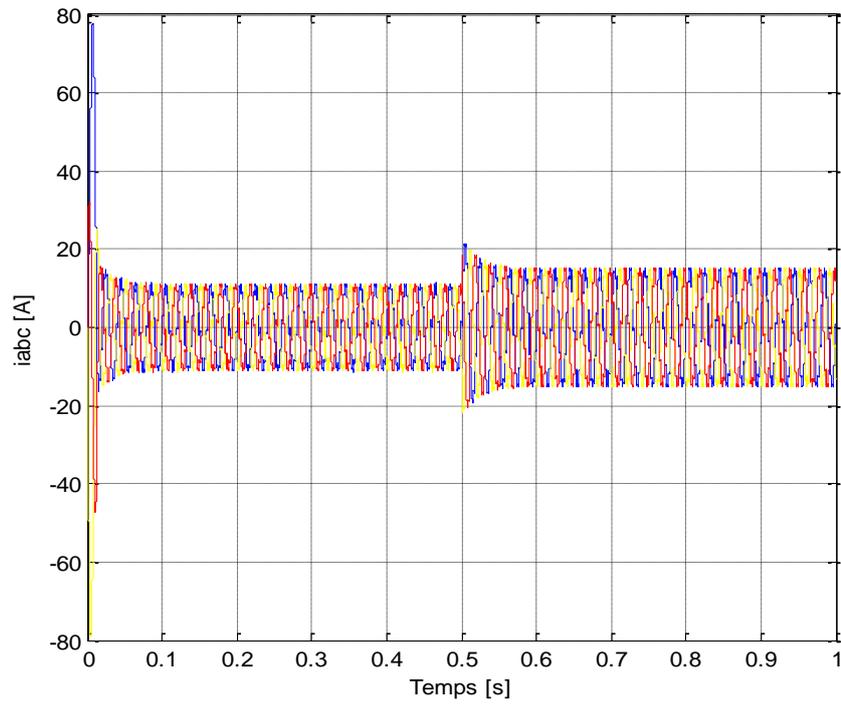
Le contrôle direct de puissance du redresseur MLI trois niveaux, à l'aide de la nouvelle table de commutation a été simulé avec le logiciel Matlab/Simulink, les paramètres du circuit électrique utilisés en simulation sont les mêmes paramètres que la DPC à deux niveaux réalisés dans le chapitre II:



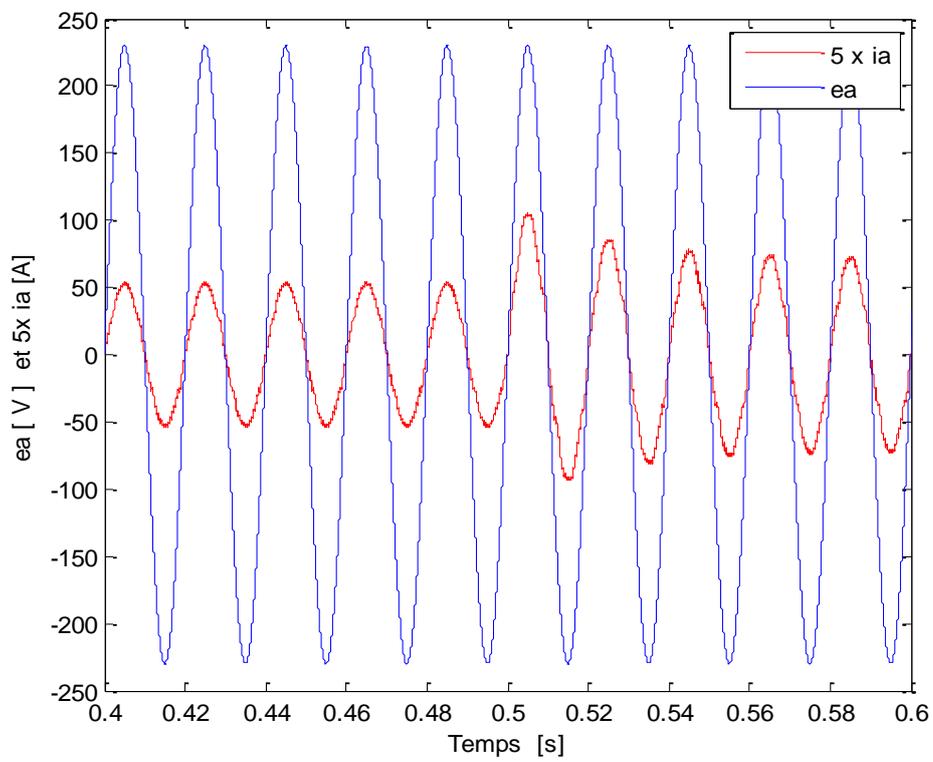
(a)



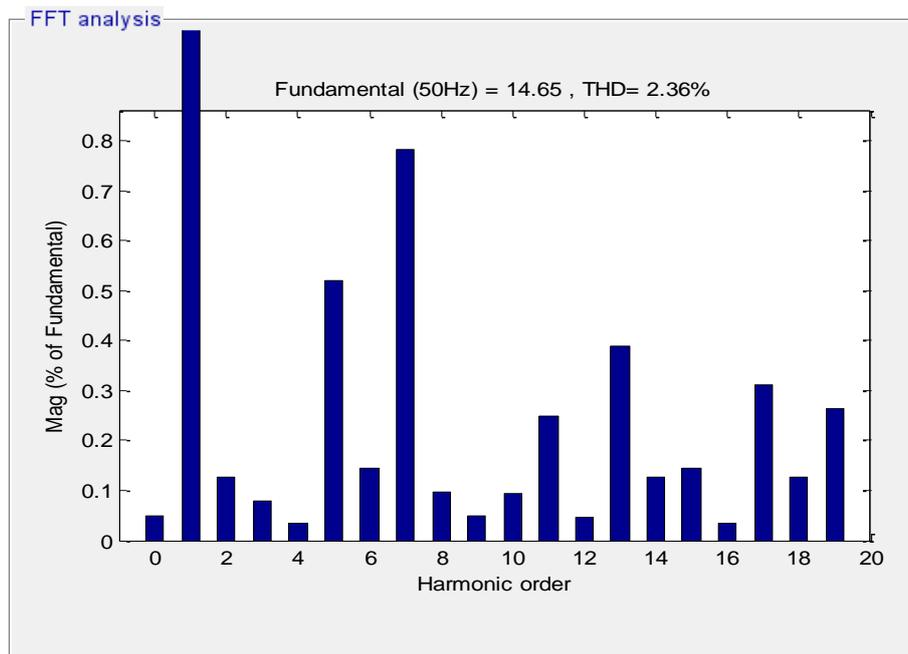
(b)



(c)

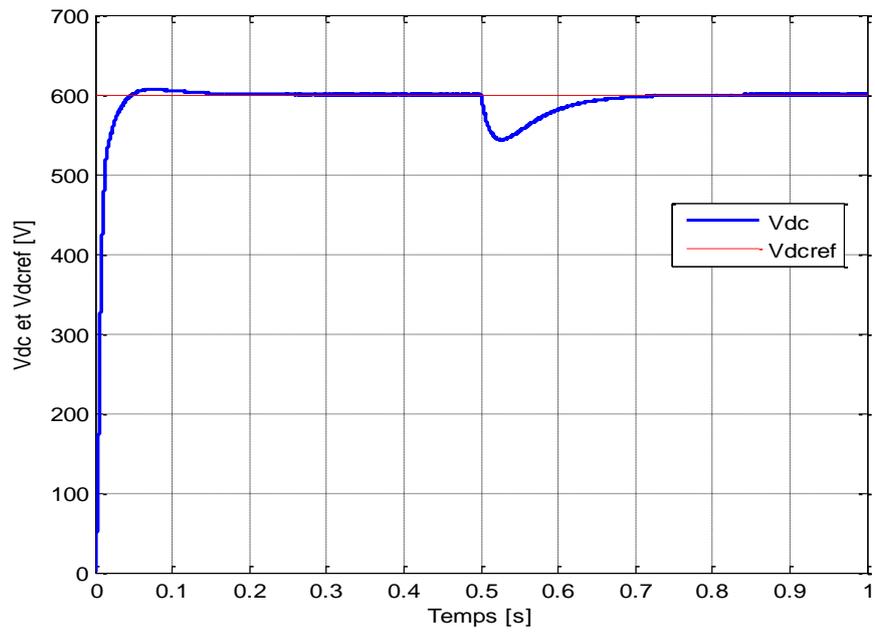


(d)

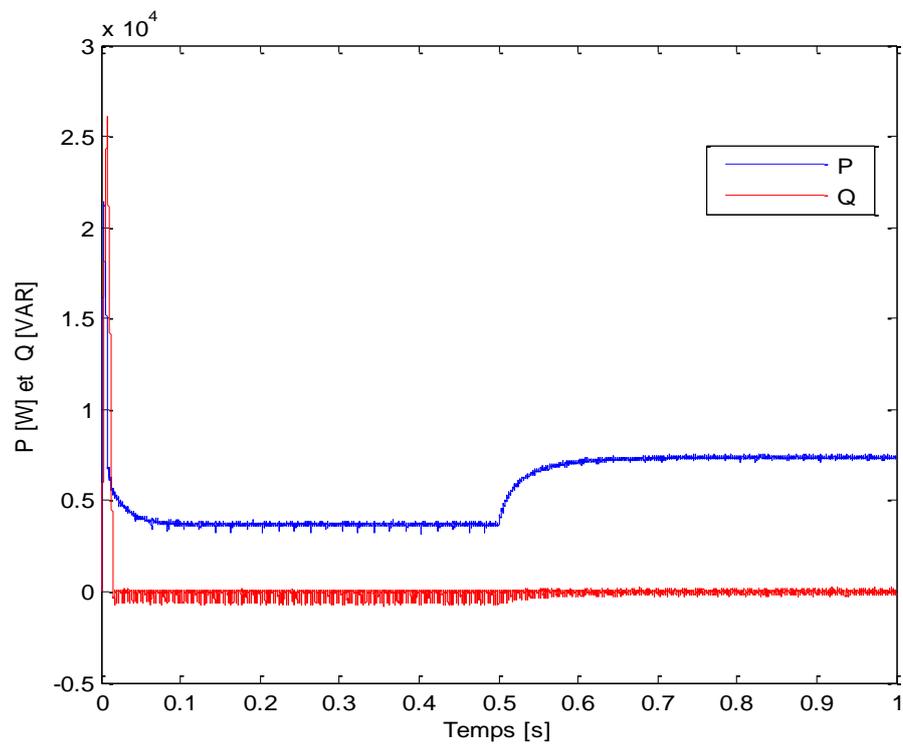


(e)

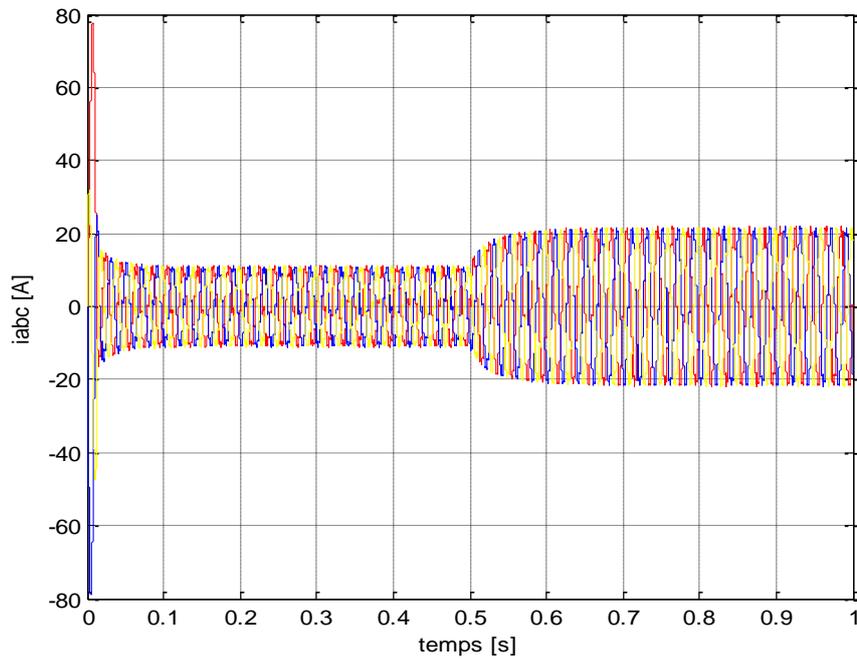
Figure III.5 : Performances du redresseur deux niveaux commandé par DPC lors d'une variation de la tension de référence $V_{dc_{ref}}$.



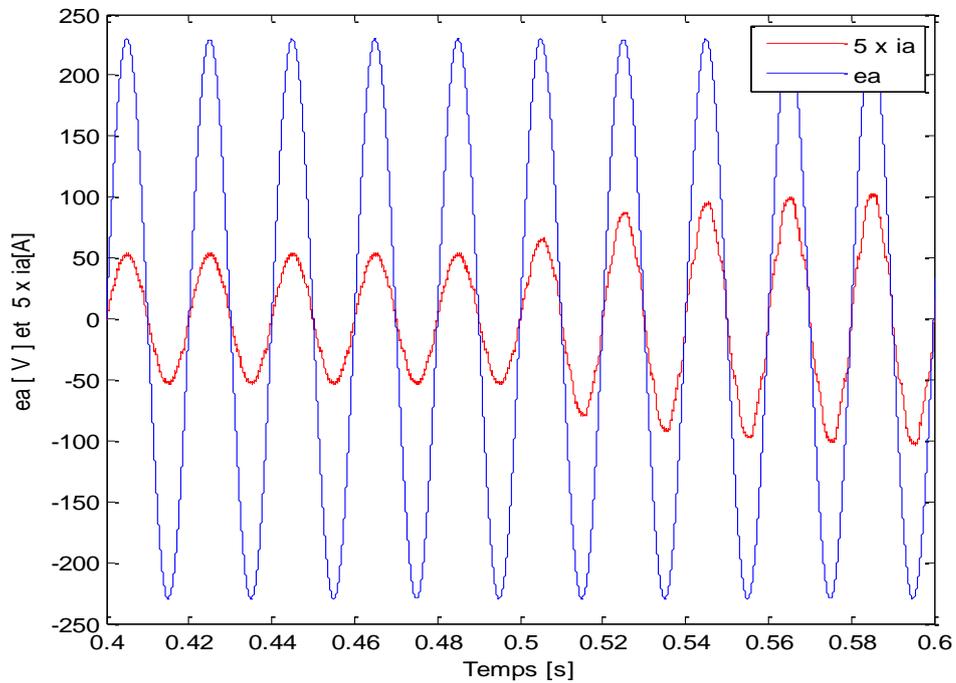
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure III.6 : Performances du redresseur deux niveaux commandé par DPC lors d'une variation de la résistance de charge.

III.5.1 Interprétation des résultats

Les résultats de la simulation obtenus pour différentes conditions montrent que:

Pour la variation de tension de référence $V_{dc_{ref}}$ (de 600 à 700 volts à 0.5s):

- La figure III-5 (a) montre la variation de la tension continue V_{dc} , lorsque le changement est appliqué à $V_{dc_{ref}}$, V_{dc} suit sa référence.
- La figure III-5 (b) montre les allures de la puissance active et réactive dans la ligne côté AC lors de la variation de tension de référence $V_{dc_{ref}}$. On remarque que la puissance active augmente
- La figure III-5 (c) montre l'allure du courant de réseaux lors de la variation de tension de référence $V_{dc_{ref}}$. On remarque que le courant augmente
- La figure III-5 (d) montre l'allure de la tension e_a et celle du courant i_a de la phase a du réseau lors de la variation de tension de référence $V_{dc_{ref}}$.
- La figure III-5 (e) montre l'analyse FFT on remarque que le THD est petit (2.36%) on peut dire que le courant du réseau est quasiment sinusoïdale.

Pour la variation de la résistance de charge R_{ch} (de 100 à 50 ohms à 0.5 s):

- La figure III-6 (a) montre la variation de la tension continue V_{dc} , lorsque le changement est appliqué à la résistance de la charge R_{ch} , V_{dc} diminue puis elle reprend la valeur de sa référence.
- La figure III-6 (b) montre les allures de la puissance active et réactive dans la ligne côté AC lorsque le changement est appliqué à la résistance de la charge R_{ch} , on remarque que la puissance active a augmenté.
- La figure III-6 (c) montre l'allure du courant de réseaux lorsque le changement est appliqué à la résistance de la charge R_{ch} , on remarque que le courant a augmenté.

- La figure III-6 (d) montre l'allure de la tension e_a et celle du courant i_a de la phase a du réseau lors de la variation de R_{ch} .

III.5.2 Comparaison entre DPC a deux niveaux et DPC à trois niveaux

Les performances de la DPC à deux niveaux et celle à trois niveaux contre les changements de tension de référence et contre les perturbations de charge sont en fonctionnement avec un facteur de puissance unitaire. À 0,5 s, la puissance de charge de chaque système a été augmentée de la même valeur. On peut observer que les deux méthodes maintiennent le FPU avec succès et maintiennent la tension du bus continue proche de la valeur de V_a référence.

Le courant de ligne obtenu par DPC à trois niveaux est quasi-sinusoidal il s'améliore beaucoup par rapport a celui dans la DPC à deux niveaux, comme le montrent les diagrammes d'analyse FFT, le THD du courant de ligne dans la DPC à trois niveaux est de 2,36% (figure III- 5 (e)), ce qui est bien inférieur à celui de 4,75% dans la DPC à deux niveaux (figure II-5 (e)).

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté la description de la commande directe de puissance d'un redresseur MLI à trois niveaux. On a présenté un modèle mathématique du redresseur MLI à trois niveaux de tension dans le plan abc , comment réalisé un modèle de contrôle de puissance à partir de la théorie de la puissance instantanée, et un schéma de contrôle de puissance direct (DPC) pour un redresseur MLI à trois niveaux utilisant un comparateur d'hystérésis à quatre niveaux pour le contrôle de la puissance active et à trois niveaux pour la puissance réactive. On a effectué sa simulation, à partir des résultats obtenus, on remarque que le contrôle direct de puissance répond rapidement au changement de la consigne de puissance.

Puis on a comparé la DPC à trois niveaux avec celle à deux niveaux, on conclut que la DPC utilisant des redresseurs MLI à trois niveaux présente de bonnes performances et des réductions d'ondulations du courant, par rapport au DPC utilisant des redresseurs MLI à deux niveaux.

Conclusion générale :

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre de la recherche de nouvelles solutions qui permettent l'amélioration de la qualité du transfert de l'énergie électrique d'une source vers un récepteur basée sur la conception de la stratégie de commande DPC des convertisseurs AC/DC à absorption de courant sinusoïdal à faible taux distorsion harmonique (THD). L'une des solutions la plus utilisée est la commande directe de puissance (DPC) d'un redresseur (MLI), l'objectif principal du système de commande est de maintenir la tension du bus continu à la valeur requise et d'obtenir un fonctionnement FPU.

Dans la première partie, on a présenté la structure du redresseur à deux niveaux et multi-niveaux, on s'est concentré sur les onduleurs à trois niveaux a structure NPC en présentant sa structure ainsi que leurs fonctionnements.

La deuxième partie a été consacrée à l'étude de la commande directe de puissance (DPC) d'un redresseur à deux niveaux, et la dernière partie à la DPC d'un redresseur a trois niveaux de structure NPC. Elle est basée sur le contrôle direct des puissances active et réactive instantanées. Contrairement aux méthodes traditionnelles qui nécessitent une boucle de régulation de courant, cette technique de contrôle des convertisseurs AC/DC sans capteur repose sur l'estimation de la tension de ligne. En utilisant la DPC, on peut contrôler l'échange d'énergie entre le redresseur et le réseau électrique, donc nous parviendrons à réaliser un facteur de puissance unitaire en imposant la puissance réactive à une valeur nulle. Nous avons mis au point une simulation avec le logiciel MATLAB/SIMULINK. Les résultats de simulation de commande présentant une réponse transitoire rapide, un haut comportement statique, une amélioration importante dans la forme des courants et la qualité de la tension continue. L'analyse spectrale du courant de ligne montre que toutes les harmoniques de rang faibles sont bien atténués ce qui donne un THD acceptable. Finalement on a fait une comparaison entre la DPC à deux niveaux avec celle à trois niveaux on a conclu que la DPC utilisant des redresseurs MLI à trois niveaux présente de bonnes performances et des réductions d'ondulations. D'après les résultats de simulation, ce dernier offre de meilleurs résultats au niveau de la qualité du courant du réseau, avec un THD faible.

On a pu conclure que les redresseurs multi-niveaux sont les meilleurs solution envisageable grâce à leurs performances par rapport à :

- ❖ Leurs faibles taux de distorsion d'harmonique (THD) injecter aux réseaux.
- ❖ Leurs facteurs de puissance unitaire.
- ❖ La puissance supporter par chaque semi-conducteur qui est proportionnelle a l'augmentation de niveaux.

Référence bibliographique

- [1] Kambiz ARAB TEHRANI « Conception, Synthèse et Application d'une Nouvelle Commande Robuste par PID Fractionnaire pour Les Onduleurs Multiniveaux », Pour l'obtention du grade de Docteur de l'INPL en génie électrique. Université de Lorraine, novembre, 2010.
- [2] Abdelkader Boukaroura « Modélisation et Diagnostic d'un Onduleur Triphasé par l'Approche Bond Graph », mémoire Présenté pour l'obtention du Diplôme de magister en électrotechnique. Université Ferhat Abbas de Sétif.2009.
- [3] EL Hella Othmane Damene Aissa « Etude De Stratégies De Commande Pour La Régulation Des Courants De La Machine Asynchrone », Master académique, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2013.
- [4] BOUKAROURA Abdelkader « Modélisation et Diagnostic d'un onduleur triphasé par l'Approche Bond-Graph », Mémoire pour l'obtention du diplôme de magister en électrotechnique, Université Ferhat abbes Sétif, Soutenu le 02/ 12 / 2009.
- [5] Eladjaoui Moussa, Bechar Belaid «Modélisation et commande d'un onduleur triphasé multi-niveaux », Mémoire en vue d'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique, université Mouloud-Mammeri de Tizi-ouzou, 2013
- [6] A. DEHMANE, K. BOUGUERRA, « Etude et Commande d'un Convertisseur Statique AC/DC à Prélèvement Sinusoïdal », mémoire de master, Université MOHAMED Boudiaf - M'SILA, 2019.
- [7] S. ARROUR, A. AZROU, « Étude et analyse des performances d'une commande directe en puissance basée sur la table de commutation d'un redresseur à MLI triphasé », mémoire de master Université A. Mira Bejaia, 2016.
- [8] A. BOUAFIA, « Technique de commande prédictive et floue pour les systèmes d'électronique de puissance : application aux redresseurs à MLI » Thèse de Doctorat UFAS Algérie, Octobre 2010.
- [9] BENGANA.S, « Stratégies de Contrôle Direct de Puissance d'un Redresseur PWM Triphasé », mémoire de master, Université KASDI – Ouargla, 2013.
- [10] T. TAKAHASHI, T. NOGUCHI, «A new quick-response and high-efficiency control strategy of induction motor », IEEE Trans. on Industry Applications, vol. I5-22, no.5, pp. 820-827, Sep. /Oct. 1986.

Référence bibliographique

- [11] A. BELAOURA, I. BOUSSAID, « Contrôle directe de puissance avec modulateur vectoriel (DPC-SVM) d'un redresseur PWM triphasé », mémoire de master, université d'Adrar, 2017.
- [12] T. M. CHIKOUCHE, K. HARTANI, «Direct power control of three-phase PWM rectifier based on new switching table », Journal of Engineering Science and Technology, vol. 13, pp. 1751-1763, 2018.
- [13] J. LAMTERKATI, M. KHAFALLAH, L. OUBOUBKE, A. ELAFIA, (2015), «Comparison of DPC methods Using Two-Level and Three-Level Rectifiers», International Journal of Science and Research (IJSR), 4(11), 336-343.
- [14] Shi, T., et al., « Direct power control for three-level PWM rectifier based on hysteresis strategy», Science China Technological Sciences, 2012. 55(11): p. 3019-3028
- [15] K. HADJI, S. SMAÏL, « Commande directe de puissance d'un redresseur MLI triphasé de structure NPC à trois niveaux », mémoire de master, Université Dr. Tahar Moulay de Saïda, 2019.