

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département d'Electronique

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : ELECTRONIQUE

Spécialité : Industries Electroniques

Par

- **FOULLANE Omar**
- **ZIOUAR Hamza**

Intitulé

Commande Prédictive d'un Redresseur Multiniveaux Monophasé à Double Sortie de Type Packed U Cells (PUC).

Soutenu le : 25/06/2024

Devant le Jury composé de :

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>M. ZAIDI Elyazid</i>	<i>MCB</i>	<i>Président</i>	<i>ENSH-Blida</i>
<i>M. SAHLI Abdeslem</i>	<i>MAB</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. TALBI Billel</i>	<i>MCA</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

Année Universitaire 2023/2024

Remerciements

Louange à Dieu, par Sa grâce les bonnes actions sont accomplies, et nous Le remercions pour Son aide et Son soutien dans la réalisation de ce mémoire. Ce fut un voyage plein de défis et d'apprentissages, et nous souhaitons exprimer notre profonde gratitude à tous ceux qui ont contribué à cet accomplissement.

Nous adressons nos sincères remerciements et notre profonde gratitude au **Dr. SAHLI abdeslem**, qui a été pour nous un excellent guide et mentor. Grâce à sa vaste connaissance et à ses précieux conseils, nous avons pu surmonter de nombreux obstacles et défis rencontrés lors de la préparation de ce mémoire.

Dr. SAHLI Abdeslem, vous avez joué un rôle crucial en nous orientant dans la bonne direction. Votre expertise et votre vaste savoir ont grandement contribué à la qualité de ce travail. Votre dévouement et votre sincérité dans votre enseignement et votre orientation n'ont pas eu de limites, et nous apprécions chaque moment que vous avez consacré à nous aider. Que Dieu vous récompense pour nous et vous accorde le succès dans votre carrière académique et professionnelle.

Nous remercions nos chers parents, qui nous ont toujours encouragés et soutenus pour réaliser nos rêves, et nos chères mères, qui ont été un pilier pour nous à chaque étape que nous avons franchie.

À nos frères et sœurs, merci pour votre soutien constant et vos encouragements tout au long de notre vie.

Nous remercions l'ensemble des membres de mon jury de mémoire pour avoir accepté de juger ce travail. Nous tenons ainsi à remercier **Dr. ZAIDI Elyazid** Maitre de Conférences B à l'Ecole Nationale supérieure d'Hydraulique de nous avoir fait l'honneur de présider de Jury. Nous remercions également nous examinateur, **Dr. TALBI Billel** Maitre de Conférences A à l'Université Bordj Bou Arreridj.

Nous remercions tous les professeurs et les administrateurs du département **MCIL ELECTRONIQUE BBA** pour leur soutien et leurs conseils tout au long de notre période d'études.

Nous remercions également tous ceux qui nous ont aidés et soutenus de près ou de loin dans la réalisation de ce mémoire.

Recevez tous nos remerciements et notre respect, que Dieu vous récompense pour nous.

Dédicace

À ceux qui ont été ma source de soutien et d'inspiration, après Dieu, dans mon succès et mon excellence. À mon cher père, qui m'a appris que l'ambition n'a pas de limites et que la persévérance est la clé du succès. À ma chère mère, qui a toujours été mon pilier et mon soutien, et qui n'a ménagé aucun effort pour m'encourager et m'aider.

À mes frères et sœurs bien-aimés : chacun par son nom, en particulier **Fatima**, **Fatiha** et **Mohammed**, merci pour votre soutien constant et votre aide à chaque étape de mon parcours.

À mes chers professeurs : depuis l'école primaire jusqu'à aujourd'hui, en particulier **Dr. SAHLI Abdeslem** et **Dr. TALBI Billel**, qui n'ont jamais hésité à partager leur savoir et leurs précieux conseils avec moi. Je vous adresse toute ma gratitude et mon respect.

À tous mes amis, qui ont été à mes côtés en toutes circonstances, partageant avec moi les moments difficiles et agréables.

À mon collègue **Hamza Ziouar**, qui a été un excellent compagnon tout au long de mon parcours académique.

Je vous dédie ce travail modeste en signe de ma reconnaissance et de mes remerciements à vous tous.

Omar Foullane

Dédicace

Je le dédie à mes parents, en particulier à ma mère, qui sont restées éveillées tard depuis mon premier jour d'école jusqu'à ce jour béni où j'écris ces mots.

Je le dédie à mes frères et à ma famille, qui ont été ma source d'inspiration.

A tous ceux qui m'ont appris une lettre, à tout propos, **Dr. SAHLI Abdeslem** et **Dr. TALBI Billel**.

À mes collègues **Omar Foullane** et **Saadi Adel**. Merci à tous, sans exception.

Hamza Ziouar

Table des Matières

Table des Matières	iii
Liste des Figures	vi
Liste des Tableaux	vii
Liste de symbole	viii
Liste des Abréviations	vii
Introduction Générale	1
Chapitre I : Notions générales sur la qualité d'énergie électrique	3
I.1 Introduction	3
I.2 Qualité de l'énergie électrique	3
I.3 Problématique des harmoniques.....	4
I.3.1 Origine des harmoniques	5
I.3.2 Sources harmoniques identifiables :	6
I.3.3 Sources harmoniques non identifiables :	6
I.3.4 Caractérisation des harmoniques	6
I.3.5 Taux de distorsion harmonique THD	7
I.3.6 Facteur de distorsion.....	7
I.3.7 Facteur de puissance :	8
I.3.8 Normes concernant les perturbations harmoniques	8
I.5 Normes et réglementations.....	11
I.6 Solutions pour l'amélioration de la qualité d'énergie	14
I.6.1 Solutions traditionnelles (Filtres passifs)	14
I.6.2 Prélèvement sinusoïdal	16
I.7 Conclusion.....	20
Chapitre 2 : Le Redresseur Monophasé à MLI de Tension à Deux Niveaux	21
II.1 Introduction	21
II.2 Structure d'un Redresseur MLI monophasé à deux niveaux :	22
II.3 Contrôle par hystérésis du courant d'un redresseur monophasé à deux niveaux.....	23
II.3.1 Commande de courant par hystérésis	24
II.3.2 Boucle de régulation de la tension du bus continu	25
II.3.3 Boucle de verrouillage de phase	25
II.3.4 Résultats de simulation	26
II.4 Contrôle prédictif du courant de source pour commande un redresseur monophasé monophasés à deux niveaux.....	29

II.4.1	Principe du contrôle prédictif à commandes finies.....	29
II.4.2	Commande prédictive pour le fonctionnement à deux niveaux.....	30
II.4.3	Algorithme de commande prédictive.....	31
II.4.4	Résultats de simulation	34
II.5	Conclusion.....	36
Chapitre 3 : Le Redresseur monophasé multi-niveaux de type PUC		37
III.1	Introduction	37
III.2	Topologie du convertisseur multi-niveaux PUC5	37
III.3	Système de redressement à base du convertisseur PUC5	38
III.3.1	Modèle mathématique du rectifier PUC5	38
III.4	Commande prédictive de redresseur PUC5	41
III.4.1	Algorithme du contrôle prédictif du courant	41
III.5	Résultats de simulation.....	43
III.6	Étude comparative.....	53
III.7	Conclusion.....	53
Conclusion Générale.....		54
Références Bibliographiques.....		55
Résumé :.....		58

Liste des Figures

FIGURE I.1: Synthèse d'une tension distordue à partir des harmoniques.....	6
FIGURE I.2 Forme d'onde du courant absorbé par un ordinateur et spectre associé.....	7
FIGURE I.3 Redresseur Pont de Diodes.....	11
FIGURE I.5 Différents types de filtres harmoniques passifs.....	15
FIGURE I.6 Combinaison de filtres passifs pour redresseur à thyristors.....	16
FIGURE I.7 Structure et principe de commande d'un convertisseur <i>AC/DC</i> avec <i>PFC</i>	17
FIGURE I.8 : Schéma synoptique d'un redresseur triphasé à injection de courant.....	18
FIGURE I.9 Topologie d'un redresseur à <i>PWM</i> triphasé de courant.....	19
FIGURE I.10 Topologie d'un redresseur à <i>PWM</i> triphasé de tension.....	19
FIGURE II.1. Structure générale Redresseur monophasé à MLI de Tension à deux niveaux.....	22
FIGURE II.2. Structure de contrôle par hystérésis du courant de source pour un redresseur monophasé à deux niveaux.....	23
FIGURE II.3. Principe de contrôle de courant par hystérésis.....	24
FIGURE II.4. Principe de génération des ordres de commande.....	24
FIGURE II.5. Schéma bloc de la boucle de régulation de la tension du bus continue.....	25
FIGURE II.6. Diagramme de blocs d'une PLL.....	26
FIGURE II.7 Résultats de simulation de redresseur monophasé a deux niveaux par commande de courant à hystérésis.....	28
FIGURE II.8 Schéma fonctionnel de la commande MPC.....	29
FIGURE II.9 Structure générale de la FCS-MPC appliqué au convertisseur de puissance....	30
FIGURE II.10 Forme d'onde de la tension durant une période de commutation pour le fonctionnement à deux niveaux.....	31
FIGURE II.11 : Structure de contrôle prédictif du courant de source.....	32
FIGURE II.12. Diagramme de l'algorithme du contrôle prédictif.....	32
FIGURE II.13 Résultats de simulation de redresseur PWM à deux niveaux avec une commande FCS-MPC.....	36
FIGURE III.1. Topologie PUC5.....	38
FIGURE III.2. Structure d'un redresseur PUC5.....	39
FIGURE III.3. Les états de commutation de redresseur PUC5.....	40
FIGURE III.4. Structure de contrôle prédictif du courant de source avec un redresseur PUC5.....	41
FIGURE III.5. Diagramme de l'algorithme du contrôle prédictif pour le redresseur PUC5...	43
FIGURE III.6 Résultats de simulation de redresseur multiniveaux PUC5 avec la commande FCS-MPC.....	47
FIGURE III.7 Résultats de simulation de redresseur multiniveaux PUC5 avec la commande FCS-MPC avec variation de charge R1.....	50
FIGURE III.7 Résultats de simulation de redresseur multiniveaux PUC5 avec la commande FCS-MPC avec variation de charge R2.....	50

Liste des Tableaux

TABLEAU I.1 Normes les plus utilisées sur les problèmes de qualité de l'énergie.....	9
TABLEAU I.2 Std IEC 61000-3-2 : Courant maximum admissible (courant de l'équipement inférieur ou égal à 16A par phase), (puissance absorbée $P < 600W$)	10
TABLEAU I.3 Norme IEEE 519-1992 limites de distorsion de tension.....	10
TABLEAU I.4 Limites de perturbations définies par EN 50160.....	12
TABLEAU I.5 Classification des normes concernant la qualité d'énergie électrique.....	13
TABLEAU I.6 Niveau de compatibilité pour les tensions harmoniques sur les réseaux basse tension (Norme CEI 61000-2-2).....	13
TABLEAU III.1 Les états de commutation et niveaux de tension de Redresseur monophasé à MLI de Tension à deux niveaux.....	23
TABLEAU III.2 Les paramètres de simulation.....	26
TABLEAU IV.1 Les états de commutation et niveaux de tension du redresseur PUC.....	39
TABLEAU V.2 Les paramètres de simulation.....	44
TABLEAU VI.3 Analyse spectrale du courant de source.....	53

Liste des Abréviations

MLI	Multi-level inverter
PI	Proportional Integral
MPC	Model Predictive Control
CCS-MPC	Continuous control set model predictive control,
FCS-MPC	Finite Control Set model predictive control
AC	Alternative Current
DC	Direct Current
HCC	Hysteresis Current Control
PLL	Phase Locked Loop
THDi	Total Harmonic Distortion index
PUC	Packed unit cell
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
<i>FD</i>	Distortion factor
<i>FP</i>	Power factor
EN	European norms
DPF	Displacement power factor
IGBT	Insulated-gate bipolar transistor
MOSFET	Metal-oxide-semiconductor field-effect transistor
PLL	Phase Locked Loop
PFC	Power factor corrector
VCO	Voltage-Controlled Oscillator
PWM	Pulse width modulation

Liste des symboles

V_s	Tension du réseau
f_s	Fréquence de la source
I_s	Courant du réseau
R_s, L_s	L'inductance et la résistance du réseau
C_{dc}	Capacité du condensateur du bus continu
V_{dc}	Tension du bus continu
V_{dc-ref}	Tension de référence du bus continu
$S_{a,b,c}$	Signaux de commutation du redresseur
C_1, C_2	Capacités des condensateurs du PUC5
C_{dc1}, C_{dc2}	Liaisons DC du l'onduleur PUC5
V_{dc1}, V_{dc2}	Tensions des liaisons DC du redresseur PUC5
I_{s-ref}	Courant de référence du réseau
ΔI	Largeur de la bande hystérésis
T_s	Temps d'échantillonnage
f_s	Fréquence d'échantillonnage
P	Puissance Active
Q	Puissance Réactive
g	Fonction de cout de l'algorithme prédictif
V_r	Tension d'entrée de redresseur
$k+1$	Prochain échantillon
$V_{o_{1,2}}$	Tensions aux bornes de charge R1&R2

Introduction Générale

La conversion d'énergie électrique est un domaine crucial dans les systèmes de distribution et de gestion de l'énergie. Les redresseurs jouent un rôle essentiel dans cette conversion, en transformant le courant alternatif (AC) en courant continu (CC). Parmi les diverses topologies de redresseurs, les redresseurs multiniveaux se distinguent par leur capacité à produire une tension de sortie avec des niveaux de distorsion harmonique réduits et une meilleure qualité de puissance.

Le redresseur multiniveau monophasé à double sortie de type PUC (Packed U-Cell) est une configuration innovante qui offre plusieurs avantages par rapport aux redresseurs conventionnels. Cette topologie permet non seulement de réduire le contenu harmonique, mais aussi d'améliorer l'efficacité de conversion et de fournir des sorties CC de haute qualité adaptées à des applications variées.

L'une des approches de contrôle les plus efficaces pour gérer le fonctionnement des redresseurs multiniveaux est la commande prédictive. La commande prédictive utilise des modèles mathématiques pour prédire le comportement futur du système et sélectionner l'action de commande optimale à chaque instant. Cette méthode permet d'améliorer la réponse dynamique du système, de minimiser les pertes de commutation et de maintenir les tensions et les courants de sortie dans des limites désirées.

L'objectif de ce travail consiste alors à appliquer une technique de commande avancée, à savoir la commande prédictive, au redresseur multi-niveau à double sorties de type Packed U Cells (PUC) monophasé avec correcteur de facteur de puissance PFC et d'améliorer sa performance.

De façon à atteindre cet objectif, ce mémoire est divisé en trois chapitres :

- Le premier chapitre aborde la qualité de l'énergie électrique, en mettant l'accent sur les harmoniques : leur origine, leur caractérisation et les normes associées. Il examine aussi les solutions traditionnelles et modernes pour réduire les perturbations harmoniques, comme les filtres passifs et les redresseurs à modulation de largeur d'impulsion (PWM).

- Le deuxième chapitre est consacré à l'étude de la commande par hystérésis des courants absorbés par le redresseur monophasé à PWM à deux niveaux. Des tests de simulation ont été réalisés afin de comparer les performances des régulateurs étudiés.
- Dans le troisième chapitre nous nous intéressons au contrôle prédictif de courant prélevé sur le réseau par le redresseur un redresseur PUC à 5 niveaux (PUC5) correcteur de facteur de puissance (PFC) à double sorties, un contrôleur prédictif de modèle à ensemble de commande fini (FCS-MPC) est proposé. Des tests de simulation ont été réalisés afin de comparer les performances des régulateurs étudiés sous différentes conditions de fonctionnement.

Enfin, une conclusion générale de ce travail ainsi que des perspectives clôturent le mémoire.

Chapitre I :

Notions générales sur la qualité d'énergie électrique

I.1 Introduction

L'utilisation des appareils électriques est de plus en plus intense que ce soit pour des applications industrielles ou domestiques. Cependant la plupart de ces appareils tels que les redresseurs, les gradateurs, le matériel informatique absorbent des courants non sinusoïdaux, ce qui provoque des distorsions harmoniques dans l'ensemble du réseau électrique. Ces harmoniques peuvent perturber le fonctionnement normal de certains équipements électriques [2].

Toutefois, le rôle des réseaux électriques est de fournir aux consommateurs de l'énergie électrique avec une parfaite continuité, sous forme de tension parfaitement sinusoïdale ayant des valeurs d'amplitude et de fréquence préétablies en fonction du point de raccordement. Afin d'atteindre cet objectif, plusieurs méthodes de dépollution harmonique sont étudiées, parmi elles les filtres actifs qui sont une alternative très intéressante du point de vue rendement, fiabilité et coût.

Dans ce chapitre, nous présentons d'abord les différentes sources d'harmoniques et leurs effets sur l'ensemble des équipements électriques. Ensuite, nous abordons les différentes stratégies de dépollution de ces harmoniques.

I.2 Qualité de l'énergie électrique

La qualité de l'énergie électrique est un enjeu important dans le réseau de distribution électrique. Pour déterminer la qualité de l'énergie électrique dans des conditions déséquilibrées ou déformées, des composants symétriques, la puissance, le facteur de puissance et des transformateurs triphasés peuvent être utilisés. La qualité de l'énergie électrique peut être classée, mesurée et évaluée selon des normes relatives. Certains types de charges peuvent entraîner des problèmes de qualité de l'énergie électrique. Pour améliorer la qualité de l'énergie électrique, des méthodes conventionnelles et des technologies avancées telles que les filtres passifs, actifs et hybrides, la multiplication de phases, les compensateurs de puissance réactive statique (SVC), STATCOM et le contrôle unifié du flux de puissance (UPFC, UPQC) peuvent être utilisées. Les sources d'énergie renouvelables telles que les systèmes photovoltaïques et éoliens peuvent poser des problèmes de qualité uniques à l'énergie électrique, nécessitant des technologies et des techniques spécialisées pour les résoudre [2]. La qualité de l'onde de tension est le facteur le plus critique pour déterminer la qualité de l'énergie électrique. Les normes de qualité de l'énergie font la distinction entre les propriétés de la tension et du courant, la qualité de la tension étant influencée par le courant. Les trois principaux critères permettant de déterminer la qualité de l'énergie électrique sont la continuité de l'alimentation, la qualité des ondes de tension et la qualité des ondes de courant. Fluke propose des solutions liées à la qualité de l'énergie électrique pour les utilisateurs responsables de la qualité de l'électricité. Des solutions passives telles que des filtres ou une compensation ou des solutions actives telles que des filtres dynamiques actifs peuvent être nécessaires pour résoudre les problèmes de qualité de l'énergie, qui peuvent survenir en raison de problèmes à la source, chez le fabricant de l'équipement ou dans la construction de l'installation [1]. Les problèmes de qualité de l'énergie peuvent également être causés par des sources d'énergie renouvelables et différents types de charges, les distributeurs et les utilisateurs étant les deux acteurs qui agissent sur la qualité de l'énergie [1- 2]. Afin de réguler la qualité de l'alimentation du réseau, les distributeurs ont la responsabilité de surveiller différents types de perturbations et de paramètres selon la norme EN50160 [2].

I.3 Problématique des harmoniques

La pollution harmonique est un problème courant pour la qualité de l'énergie électrique dans divers contextes tels que les stations de pompage, les navires, les hôpitaux, les centres de

données et les immeubles de bureaux économes en énergie [1- 3]. Les signaux harmoniques peuvent entraîner des problèmes de qualité de l'énergie et peuvent être identifiés à l'aide de techniques d'analyse de Fourier [1]. Pour résoudre ces problèmes, des filtres anti-harmoniques sont utilisés comme mesures correctives [3]. Le texte suggère également que les techniques de filtrage harmonique peuvent être utilisées pour le conditionnement de l'énergie électrique. Les charges non linéaires connectées à des tensions linéaires peuvent provoquer des courants pollués ou non linéaires, qui créent alors une chute de tension non linéaire entre les impédances, entraînant une pollution de tension [1]. La pollution totale en courant est exprimée par THD-I, tandis que THD-U est utilisée pour exprimer la pollution totale en tension [4]. Il est donc nécessaire d'utiliser des mesures correctives comme des filtres anti-harmoniques pour réduire les effets de la pollution harmonique sur la qualité de l'énergie.

I.3.1 Origine des harmoniques

Comprendre l'origine des harmoniques commence par reconnaître que chaque système électrique a une fréquence naturelle, qui est la fréquence la plus basse à laquelle le système peut osciller. C'est ce qu'on appelle la fréquence fondamentale et elle sert de base à la génération d'harmoniques. Les harmoniques elles-mêmes sont des fréquences qui sont des multiples entiers de cette fréquence fondamentale, et elles apparaissent en raison de diverses perturbations du courant et de la tension électriques [4- 5]. Ces perturbations sont souvent introduites par des charges non linéaires, qui consomment du courant de manière non sinusoïdale, conduisant à la création de courants harmoniques qui déforment l'onde d'origine. L'onde déformée qui en résulte est essentiellement un composite de l'onde fondamentale et des différentes ondes harmoniques, comme l'explique la décomposition en série de Fourier. Ce phénomène ne se limite pas à un ensemble fixe de fréquences ; des inters-harmoniques, qui sont des harmoniques d'ordre non entier, peuvent également se produire, en particulier dans les systèmes qui incluent des composants électroniques de puissance, tels que les compensateurs de var statiques (SVC) et les cyclo convertisseurs, ou dans des processus tels que les fours à arc [9]. Ces harmoniques et inter harmoniques sont omniprésentes dans les réseaux électriques modernes, avec des sources communes comprenant des appareils électroniques tels que des ordinateurs et divers types d'équipements électroniques qui reposent sur des variateurs de fréquence [5].

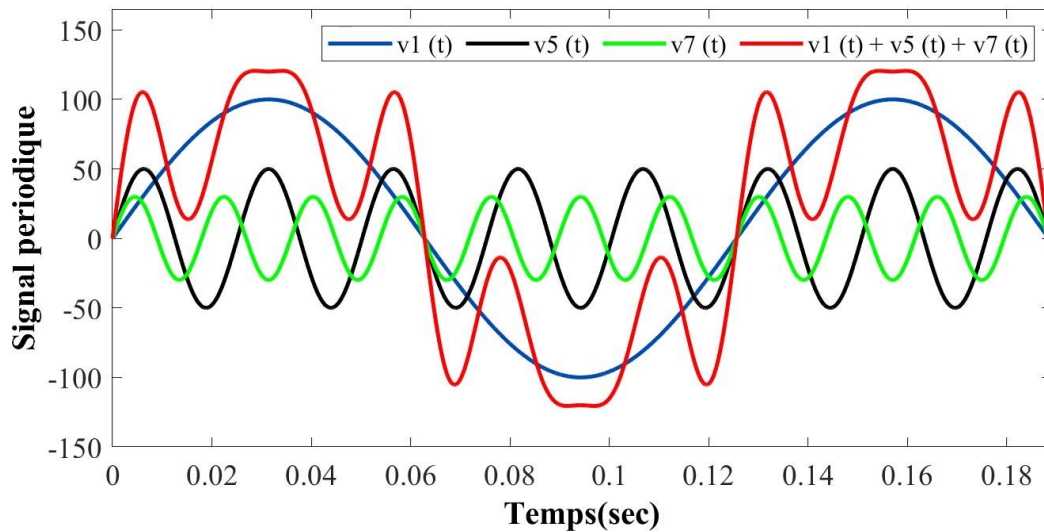


FIGURE I.1: Synthèse d'une tension distordue à partir des harmoniques.

Comme nous l'expliquerons plus loin, la principale raison pour laquelle les harmoniques de tension existent est que des charges non linéaires injectent des courants non sinusoïdaux dans le réseau. Ce sont des sources qui produisent des courants harmoniques et peuvent être divisées en deux types :

I.3.2 Sources harmoniques identifiables :

Les équipements installés sur les réseaux hauts et moyens tensions équipés par des équipements à base d'électronique de puissance, notamment les redresseurs et cyclo-convertisseurs de forte puissance, sont souvent des sources d'harmoniques identifiables. Pour ce type de charge non linéaire, le diviseur d'énergie est capable d'identifier les points d'injection d'harmoniques et de quantifier les interférences qui en résultent. Dans ce cas, l'utilisateur doit se procurer les moyens nécessaires pour réduire ces interférences en dessous du seuil exigé par le distributeur d'énergie, sous peine d'être pénalisé [4].

I.3.3 Sources harmoniques non identifiables :

Ce type de générateur de courant harmonique est principalement représenté par des appareils utilisés dans les domaines électriques domestiques ou tiers tels que les téléviseurs et les microordinateurs. En raison de sa très large distribution, ce dispositif contient généralement un redresseur à diodes monophasé avec des condensateurs de lissage, qui absorbe de grandes quantités de courants harmoniques. Dans ce cas, il appartient au distributeur d'électricité d'éviter la propagation des interférences harmoniques sur le réseau, puisque chaque utilisateur

génère individuellement de faibles taux d'harmoniques [5]. A titre d'exemple, la Figure I.2 ci-dessous montre un courant de dessin informatique. Il ressemble à une impulsion, est riche en harmoniques et présente des taux de distorsion inacceptables.

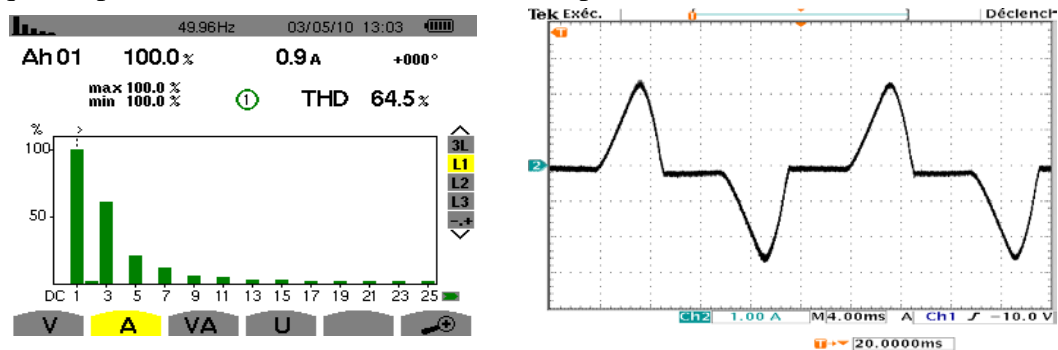


FIGURE I.2 Forme d'onde du courant absorbé par un ordinateur et spectre associé [23].

I.3.4 Caractérisation des harmoniques

Une caractérisation approfondie des harmoniques est essentielle pour comprendre leur impact sur les systèmes électriques, en particulier dans le cas de charges non linéaires. Il est bien connu que les harmoniques sont caractérisées par leur fréquence, leur amplitude et leur angle de phase, ce qui permet une analyse détaillée de leur comportement au sein d'un système électrique. Un aspect essentiel de cette caractérisation implique la mesure de la distorsion harmonique, le compteur de distorsion harmonique totale (THD) étant un outil clé pour quantifier l'étendue de la distorsion présente, car il calcule le THD pour le courant et la tension, fournissant ainsi un aperçu de la qualité de la puissance consommée. De plus, les harmoniques spécifiques, en particulier les 5^e et 7^e, sont plus communes et peuvent entraîner des perturbations importantes, soulignant la nécessité d'une mesure et d'une analyse précises au moyen d'équipements tels que des compteurs d'énergie et des enregistreurs qui enregistrent la distorsion de la forme d'onde originale créée par ces harmoniques. Par conséquent, comprendre le spectre harmonique est crucial pour sélectionner des techniques d'atténuation appropriées afin de minimiser les effets négatifs sur le système électrique, tels que les perturbations de courant et de tension, qui peuvent résulter de ces fréquences harmoniques [6- 7].

I.3.5 Taux de distorsion harmonique THD

Le taux de distorsion harmonique totale décrit l'effet des composantes harmoniques du signal déformé. Il mesure le degré de distorsion du signal provoqué par les harmoniques par

rapport aux ondes sinusoïdales. Le taux de distorsion harmonique totale d'un courant est défini par le rapport entre la valeur efficace de l'harmonique et la valeur efficace du fondamental [8].

$$THD_i = \sqrt{\sum_{h=2}^{h=H} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2} \quad (I.1)$$

Avec I_1, I_h : valeur efficace du courant fondamental et du courant harmonique de rang h .

Le taux de distorsion harmonique de tension est un paramètre utilisé pour évaluer le degré de distorsion de tension, exprimé sous la forme suivante [8] :

$$THD_v = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{v_h}{v_1}\right)^2} \quad (I.2)$$

I.3.6 Facteur de distorsion

Le facteur de distorsion FD est défini comme le rapport entre l'onde fondamentale et le signal (exprimé en valeur efficace). Il est donné par l'expression suivante [7] :

$$FD = \frac{I_1}{I_{eff}} \quad (I.3)$$

Il est égal à 1 lorsque le courant est une onde sinusoïdale pure et diminue lorsque le courant est déformé.

I.3.7 Facteur de puissance

Pour une courbe sinusoïdale, le facteur de puissance FP est donné par le rapport entre la puissance réelle P et la puissance apparente S , L'expression du facteur de puissance est la suivante :

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{\sum_{h=1}^n V_h I_h \cos(\varphi_h)}{\sqrt{\sum_{h=1}^n V_h^2} \sqrt{\sum_{h=1}^n I_h^2}} \quad (I.4)$$

Pour le monophasé, la puissance apparente S peut être définie par :

$$S = V_{eff} I_1 \quad (I.5)$$

La puissance active P :

$$P = V_{eff} I_1 \cos(\varphi) \quad (I.6)$$

La puissance réactive Q :

$$Q = V_{eff} I_1 \sin(\varphi) \quad (I.7)$$

Avec : φ est angle de déphasage entre le courant fondamentale et la tension.

I.3.8 Normes concernant les perturbations harmoniques

Pour limiter l'impact des interférences harmoniques sur le réseau électrique, des normes ont été élaborées. Les deux principaux organismes qui élaborent de telles normes sont la Commission électrotechnique internationale (CEI) et Institut des ingénieurs électriciens et électroniciens (IEEE). Les normes qu'ils ont développées sont la série CEI 61000 et la norme IEEE 519 [9]. De manière générale, ces normes identifient les principales sources de pollution harmonique, décrivent l'impact de ces harmoniques sur le réseau, décrivent les méthodes d'analyse et de mesure des harmoniques et fournissent diverses recommandations pour réduire l'apparition d'harmoniques dans le réseau électrique [3]. Le Tableau I.1 répertorie certaines des normes actuellement disponibles concernant divers aspects de la qualité de l'énergie. Les Tableaux I.1, I.2 et I.3 répertorient certaines limites importantes de tension et de courant dans ces normes.

TABLEAU I.1 Normes les plus utilisées sur les problèmes de qualité de l'énergie [9][13].

Norms	Description
IEEE Standard 519-1992	Pratiques et exigences recommandées pour le contrôle des harmoniques dans les réseaux électriques
IEEE Standard 1159-1995	Pratique recommandée pour la surveillance de la qualité de l'énergie électrique
IEEE Standard 1100-1999	Pratique recommandée pour l'alimentation et la mise à la terre d'équipements électroniques sensibles
IEEE Standard 1250-1995	Guide d'entretien des équipements sensibles aux perturbations de tension momentanées
IEEE Standard 1366-2012	Indices de fiabilité de la distribution d'énergie électrique
IEC 61000-2-2	Niveaux de compatibilité pour les perturbations conduites à basse fréquence et la signalisation dans les réseaux publics d'alimentation
IEC 61000-2-4	Niveaux de compatibilité dans les installations industrielles pour les perturbations conduites à basse fréquence
IEC 61000-3-2	Limites d'émission de courant harmonique
EN 50160	Caractéristiques de tension des réseaux publics de distribution

TABLEAU I.2 Std IEC 61000-3-2 : Courant maximum admissible (courant de l'équipement inférieur ou égal à 16A par phase), (puissance absorbée $P < 600W$) [13].

Ordre harmonique, h	Harmonique maximale admissible courant par watt (mA/W)	Maximum autorisé courant harmonique (A)
3	3.4	2.30
5	1.9	1.14
7	1.0	0.77
9	0.5	0.40
11	0.35	0.33
13<h<39 (Harmoniques impaires)	3.84/h	0.15-0.15/h

TABLEAU I.3 Norme IEEE 519-1992 limites de distorsion de tension [9].

Tension du bus PCC	Distorsion de tension individuelle (%)	Distorsion de tension totale (%)
69 kV et moins	3	5
69.001-161 kV	1.5	2.5
Jusqu'à 161.001KV	1.0	1.5

Avant l'avènement des convertisseurs statiques en électronique de puissance, les courants magnétisants des transformateurs, des moteurs et des ballasts constituaient la plupart des charges non linéaires présentes dans les réseaux électriques. Mais aujourd'hui, avec le développement de la technologie de l'électronique de puissance, les convertisseurs statiques deviennent la source d'harmoniques la plus répandue sur le réseau [10]. Les redresseurs non contrôlés commandés par diodes et thyristors fonctionnant en mode de commutation naturelle sont les charges non linéaires les plus courantes. Ces convertisseurs se retrouvent dans de nombreux équipements industriels et domestiques ainsi que dans les dispositifs de conversion d'énergie électrique. Nous avons répertorié ci-dessous les applications les plus courantes :

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

Nous distinguons deux structures de redresseurs [4]:

1. **Ponts de diodes** : constitue l'étage de conversion d'énergie AC/DC (alimentation du bus continu des onduleurs pour les variateurs de vitesse des machines à courant alternatif par exemple) ;

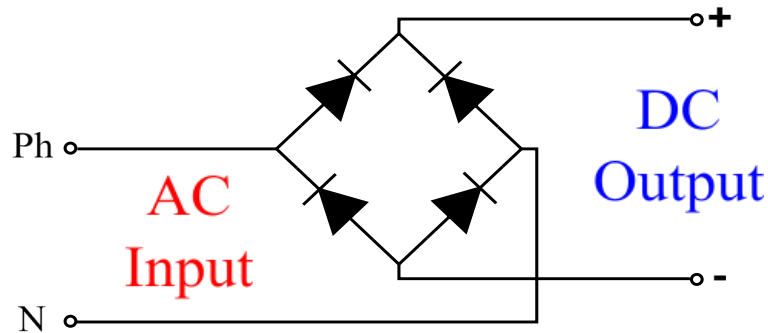


FIGURE I.3 Redresseur Pont de Diodes.

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.

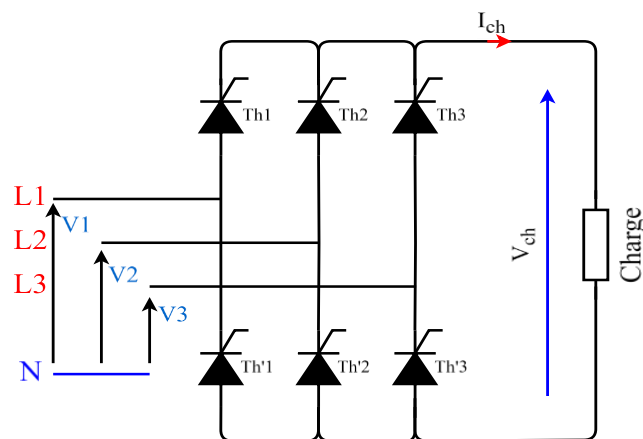


FIGURE I.4 Redresseur triphasé pont de thyristor.

I.5 Normes et réglementations

Afin de limiter l'impact des charges polluantes sur les autres charges connectées au réseau, tout en évitant de modifier les caractéristiques de ces dernières, il est demandé aux distributeurs d'énergie électrique d'émettre des recommandations. Les recommandations concernent les exigences relatives aux points de raccordement au réseau pour les consommateurs. Un exemple

de ces recommandations (les plus anciennes) précise que chaque utilisateur pris individuellement doit respecter les limites de perturbations de tension suivantes à ses points de connexion [11] :

- Harmoniques pairs : $V_h / V_1 < 0.6\%$.
- Harmoniques impairs : $V_h / V_1 < 1\%$.
- Taux de distorsion harmonique en tension : $THD < 1.6\%$.

Pour s'assurer que le taux de distorsion harmonique en tension ne dépasse pas 5 % dans le réseau électrique, il est impératif de mettre en œuvre des mécanismes de filtrage ou, dans des circonstances extrêmes, d'augmenter la puissance de court-circuit du réseau. Ces mesures sont cruciales pour respecter les limites prescrites et atténuer les risques potentiels.

En revanche, afin d'assurer la compatibilité entre les équipements sensibles alimentés par le réseau, il est nécessaire d'imposer des limites d'émission et de prévoir une immunité adéquate. Les principales caractéristiques des tensions fournies par les réseaux de distribution (moyenne tension ou basse tension), définies par la norme européenne EN 50160, précisent les tensions et les fréquences qui doivent être garanties ainsi que les tolérances sur les niveaux de parasites typiquement rencontrés. Le Tableau I.4 ci-dessous précise les valeurs utilisées [12].

TABLEAU I.4 Limites de perturbations définies par EN 50160

Amplitude de la tension	<ul style="list-style-type: none"> • Pour chaque période d'une semaine 95% des valeurs efficaces moyennes sur 10 minutes doivent être dans la plage $V_n \pm 10\%$
Variations rapides de la tension	<ul style="list-style-type: none"> • De 5% à 10% de V_n (4 à 6% en moyenne tension)
Creux de tension	<ul style="list-style-type: none"> • Profondeur : entre 10% à 99% de V_n • Durée : entre 10 ms et 1 minute • Nombre : quelques dizaines à 1 millier par an
Coupures brèves	<ul style="list-style-type: none"> • Durée : jusqu'à 3 minutes • Nombre : quelques dizaines à plusieurs centaines par an
Coupures longues	<ul style="list-style-type: none"> • Durée : supérieure à 3 minutes • Nombre : entre 10 et 50 par an
Fréquence	<ul style="list-style-type: none"> • 50 Hz $\pm 1\%$ pendant 95% d'une semaine • 50Hz + 4%, 6% pendant 100% d'une semaine

Pour harmoniser les concessionnaires et les consommateurs, des normes ont été élaborées. Le Tableau I.5 résume les principales normes concernant la qualité de l'énergie et la tension dans les systèmes électriques.

TABLEAU I.5 Classification des normes concernant la qualité d'énergie électrique [9][13].

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

Le Tableau I.6, issu de la norme CEI 61000-2-2, répertorie les caractéristiques harmoniques et les niveaux de compatibilité au point de connexion client d'un réseau répondant à la norme CEI 1000-2-4 [13].

TABLEAU I.6 : Niveau de compatibilité pour les tensions harmoniques sur les réseaux basse tension (Norme CEI 61000-2-2)

Rangs impairs non multiples de 3		Rangs impairs multiples de 3		Rangs pairs	
Rang	Tension harm. (%)	Rang	Tension harm. (%)	Rang	Tension harm. (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.3	6	0.5
13	3	21	0.2	8	0.5
17	2	>21	0.2	10	0.5
19	1.5			12	0.2
23	1.5			>12	0.2
25	1.5				
>25	0.2+1.3*25/h				

I.6 Solutions pour l'amélioration de la qualité d'énergie

Pour réduire les interférences de tension ou de courant, des mesures peuvent être prises à deux niveaux :

1. Filtrer la tension du réseau ou améliorer le réseau de transport et de distribution d'énergie côté source ;
2. Du côté du client, rendre le courant de ligne aussi sinusoïdal que possible.

Différentes solutions ont été envisagées pour limiter la propagation des harmoniques et améliorer la qualité et la gestion de l'énergie électrique. Ils peuvent être divisés en deux catégories traditionnelles et modernes (basés sur l'électronique de puissance) [8].

I.6.1 Solutions traditionnelles (Filtres passifs)

Ce furent les premiers appareils utilisés pour éliminer les harmoniques. Ils sont composés de composants passifs tels que des inductances, des condensateurs et des résistances. D'une manière générale, les filtres d'harmoniques sont connectés en parallèle avec des charges injectant des courants harmoniques (diodes ou redresseurs à thyristors, fours à arc, etc.). La combinaison d'éléments capacitifs et inductifs en parallèle avec la charge polluante permet d'obtenir une résonance série adaptée au niveau d'harmoniques à éliminer. La Figure I.5 [14] montre les différents types possibles de filtres passifs pour compenser les courants harmoniques.

Le filtre harmonique passe-bande illustré à la Figure I.5 (a) est le plus simple et le plus largement utilisé. L'avantage est que l'impédance est presque nulle à la fréquence d'accord, ce qui donne un filtre presque parfait à cette fréquence. L'inconvénient est que les fréquences inférieures à la fréquence de coupure peuvent entrer en résonance avec l'impédance du réseau, en d'autres termes, d'autres composantes harmoniques peuvent être amplifiées [10].

La figure I.5(b) montre un filtre d'harmoniques passe-haut, qui peut être un compromis entre le filtrage de la fréquence cible et l'atténuation des harmoniques de fréquence plus élevée. Ce filtre est généralement réglé au niveau de la 7^{ème} ou de la 11^{ème} harmonique.

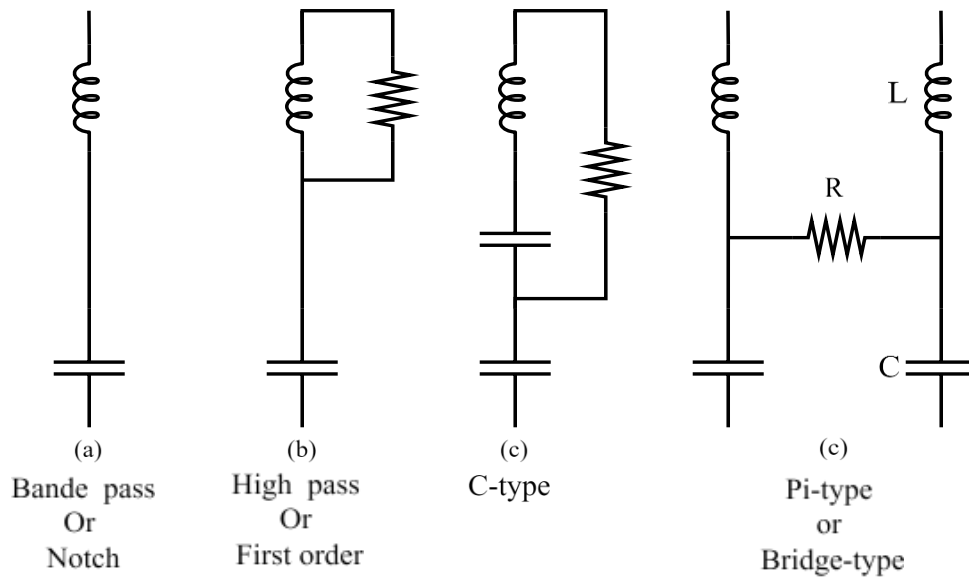


FIGURE 1.5 Différents types de filtres harmoniques passifs.

Un filtre harmonique de type C, illustré à la Figure 1.5(c), présente des caractéristiques similaires à celles d'un filtre harmonique passe-haut, avec l'avantage que la résistance ne dissipe pas de puissance à la fréquence fondamentale du réseau. Il est couramment utilisé dans les applications de fours à arc électrique où des inters harmoniques sont présentes.

La Figure 1.5(d) montre un filtre harmonique de type Pi, qui se compose essentiellement de deux filtres passe-bande avec une résistance connectée entre les deux. Le principal avantage de ce filtre réside dans ses bonnes caractéristiques de filtrage aux deux fréquences de résonance.

L'option la plus courante pour les redresseurs à thyristors de haute puissance consiste à utiliser une combinaison de plusieurs filtres accordés sur une seule fréquence (harmoniques 5, 7, 11 et 13) et un filtre passe-haut de second ordre accordé autour de la fréquence harmonique 17, comme montré dans la Figure 1.6 [15].

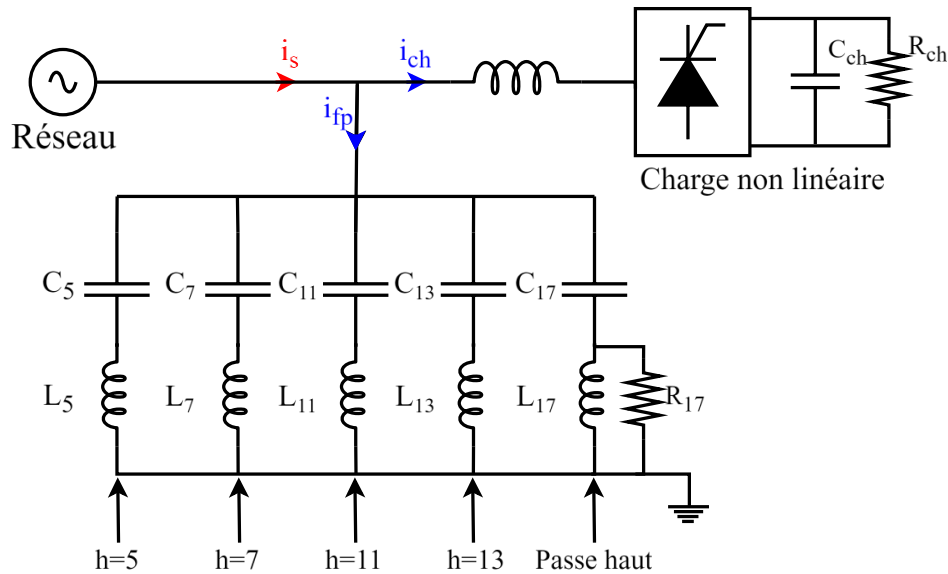


FIGURE I.6 Combinaison de filtres passifs pour redresseur à thyristors.

I.6.2 Prélèvement sinusoïdal

L'échantillonnage sinusoïdal joue un rôle central dans le domaine de la distribution d'énergie et de la gestion de l'énergie. En injectant du courant réactif pour ajuster le facteur de puissance de déplacement (DPF), l'efficacité du transfert de puissance peut être considérablement améliorée [16]. Cette amélioration est non seulement cruciale pour la qualité de l'énergie, mais également pour sa gestion compétente, ce qui correspond à l'objectif primordial des systèmes électriques modernes d'optimiser la consommation d'énergie. Le processus d'amélioration de la qualité de l'énergie et de la tension implique des mesures, des analyses et des optimisations méticuleuses, qui font partie intégrante de la garantie que l'énergie électrique fournie est du plus haut calibre [10]. De plus, la relation entre qualité et rapport de puissance est directement liée à la fiabilité des systèmes de distribution d'énergie ; une qualité d'énergie supérieure garantit que les systèmes fonctionnent sans interruption, favorisant ainsi un approvisionnement électrique constant et fiable [16]. Au-delà des systèmes de distribution eux-mêmes, les solutions actives d'efficacité énergétique visent l'optimisation du fonctionnement des systèmes et des équipements, conduisant à une utilisation plus efficace de l'énergie et à une réduction potentielle des coûts. Dans une application pratique, par exemple, une bonne isolation d'une maison peut avoir un impact direct sur la consommation d'énergie, permettant une réduction tangible des factures d'énergie, ce qui

souligne l'importance d'optimiser la consommation d'énergie même au niveau du consommateur [10].

I.6.2.1 Correction du facteur de puissance PFC

La structure de base et le principe de contrôle du convertisseur AC/DC avec correction du facteur de puissance sont présentés dans la Figure I.7. Il s'agit d'un pont redresseur à diodes connecté au réseau et équipé d'un étage de correction entre la sortie du pont et la charge. L'étage de correction du facteur de puissance est basé sur une structure d'hacheur élévateur, comprenant une inductance, des commutateurs de puissance à double commande (TB, IGBT, MOSFET) et des diodes de puissance. Ce composant est placé en parallèle avec le condensateur du bus DC. Le convertisseur AC/DC ainsi obtenu constitue une structure boostée et irréversible, comprenant un seul interrupteur contrôlable.

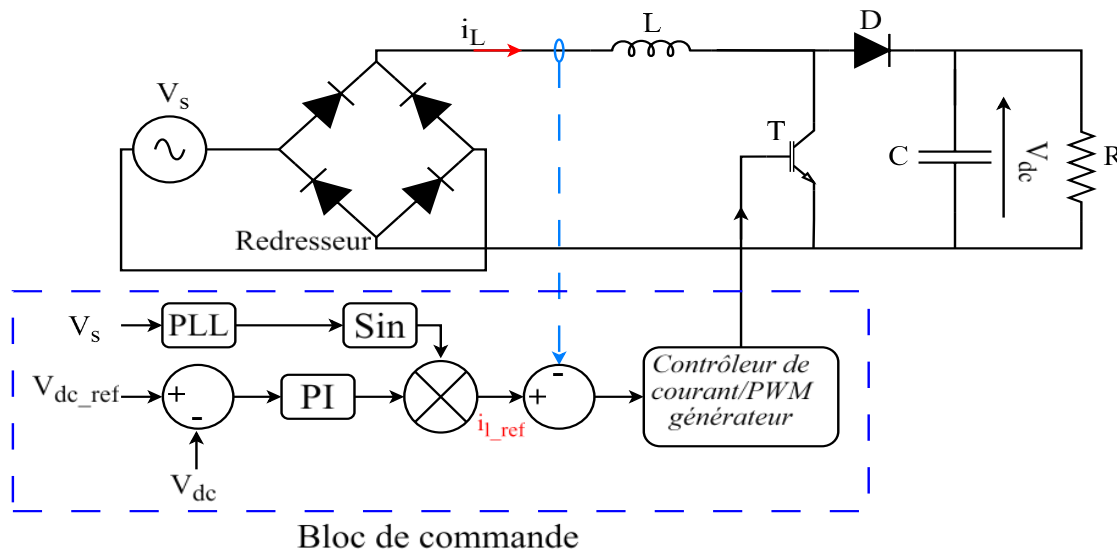


FIGURE I.7 Structure et principe de commande d'un convertisseur AC/DC avec PFC.

Différentes stratégies de contrôle ont été proposées pour cette structure, toutes avec un objectif commun : façonner le courant tiré du réseau [17]. Le principe de l'échantillonnage sinusoïdal consiste à forcer le courant circulant dans l'inductance à suivre une référence sinusoïdale redressée en commandant la fermeture et l'ouverture de l'interrupteur de commande de puissance. L'amplitude de cette référence est fournie par la boucle de contrôle de

tension du bus DC, tandis que la forme sinusoïdale est obtenue via une PLL synchronisée avec le réseau électrique. Cette solution garantit l'unité du facteur de puissance du terme fondamental au niveau du réseau.

Il convient également de noter que cette structure est réalisée à partir d'un pont redresseur monophasé. Dans le cas d'un réseau triphasé, un seul interrupteur doit contrôler trois courants absorbés. Cela rend la commande très complexe et beaucoup moins efficace. Pour cette configuration nous préférons utiliser un redresseur à injection de courant ou un redresseur PWM.

I.6.2.2 Redresseurs à injection de courant

Les redresseurs à injection de courant triphasé sont apparus au début des années 1990 dans le but d'améliorer les performances des convertisseurs AC/DC existants. Le schéma fonctionnel structurel est présenté à la Figure I.8. Le circuit de modulation produit un courant grâce au processus de mise en forme du courant à la sortie d'un pont de diodes, qui est injecté dans le réseau électrique à l'aide d'un circuit de distribution. Cette injection de courant permet de compenser le niveau nul de courant ligne inhérent au fonctionnement normal du pont de diodes. Il existe plusieurs variantes de ce type de convertisseur ; elles diffèrent par la nature des circuits de modulation et de distribution, qui peuvent être passifs ou actifs [18][19].

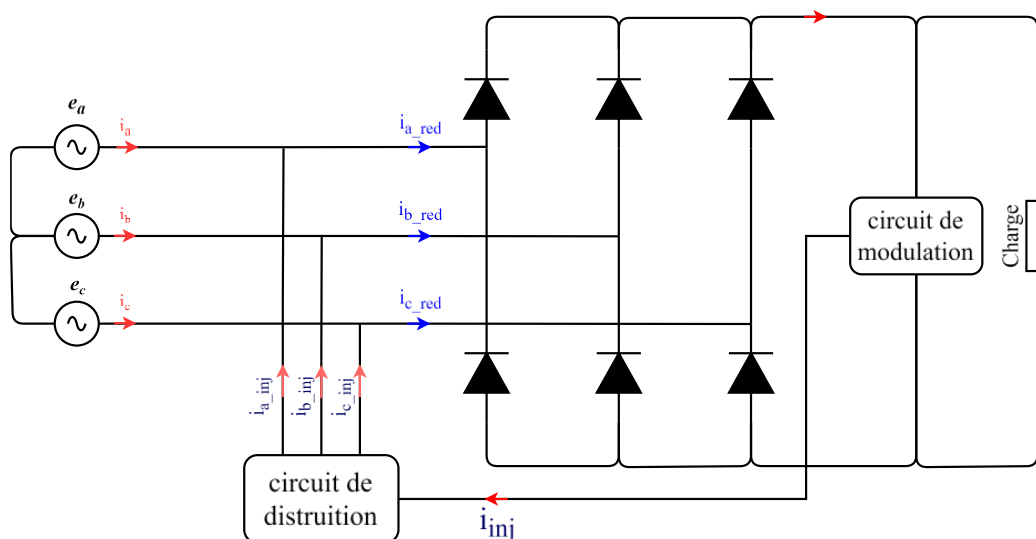


FIGURE I.8 : Schéma synoptique d'un redresseur triphasé à injection de courant.

I.6.2.3 Redresseurs à PWM

Les redresseurs PWM sont des convertisseurs qui exploitent leur réversibilité du courant dans un second mode de fonctionnement. Grâce au contrôle PWM, ces convertisseurs peuvent tirer un courant sinusoïdal du réseau AC et garantir un facteur de puissance unitaire [18]. Selon le type de convertisseur utilisé, on distingue deux structures de redresseur PWM :

- Redresseur PWM de courant ;
- Redresseur PWM de tension.

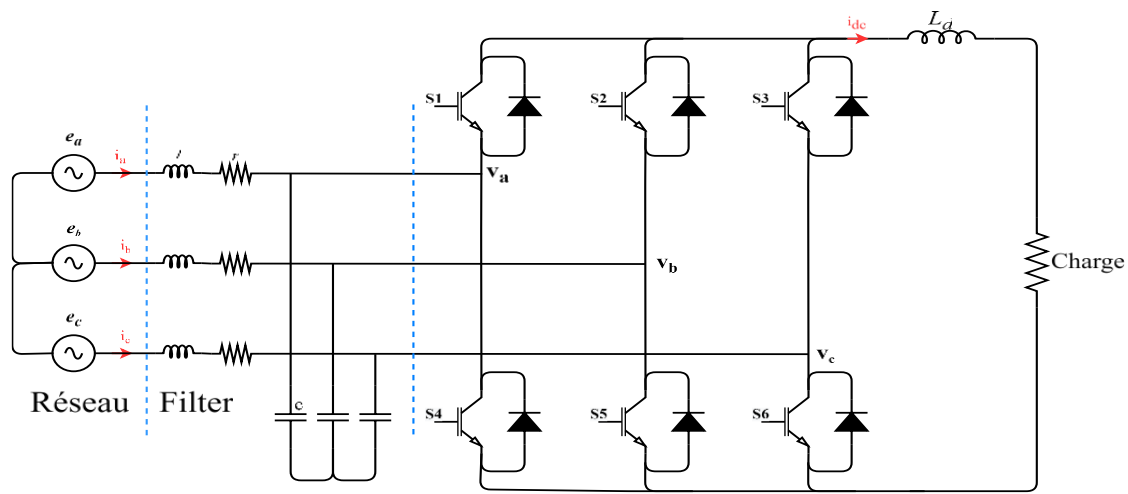


FIGURE I.9 Topologie d'un redresseur à PWM triphasé de courant.

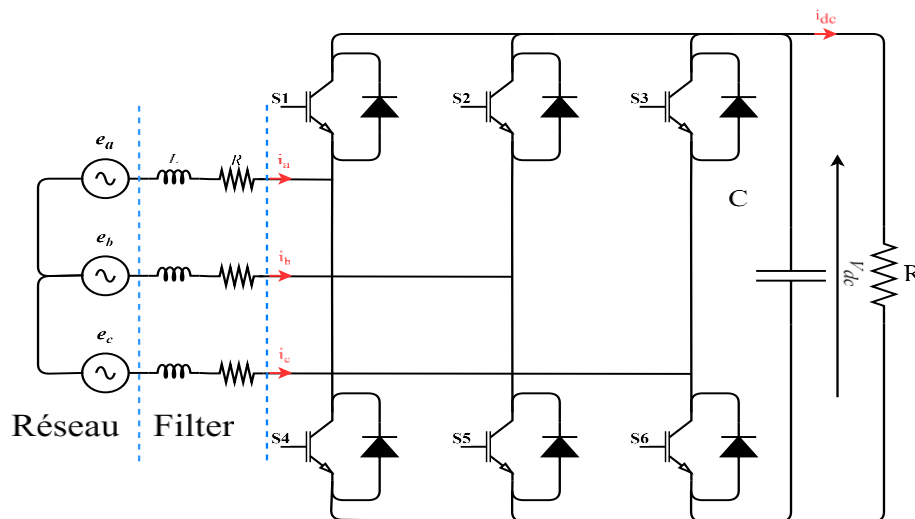


FIGURE I.10 Topologie d'un redresseur à PWM triphasé de tension.

I.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons parlé de la qualité de l'énergie électrique et des problèmes causés par les harmoniques. Nous avons expliqué d'où viennent les harmoniques, comment les identifier, et les règles pour les contrôler.

Nous avons aussi vu les perturbations que les redresseurs à commutation naturelle peuvent causer et les réglementations pour les gérer. Ensuite, nous avons présenté des solutions pour améliorer la qualité de l'énergie, comme les filtres passifs et les méthodes modernes comme la correction du facteur de puissance (PFC) et les redresseurs à modulation de largeur d'impulsion (PWM).

Ce chapitre nous donne une bonne base pour comprendre les problèmes et les solutions liés aux harmoniques et à la qualité de l'énergie électrique. Ces connaissances seront importantes pour les sujets des chapitres suivants.

Chapitre 2 :

Redresseur Monophasé à PWM de Tension à Deux Niveaux

II.1 Introduction

Depuis plusieurs décennies, les stratégies de commande des convertisseurs à PWM font l'objet de recherches continues dans le domaine de l'électronique de puissance. La partie commande de ces convertisseurs joue un rôle majeur et très important, où plus la stratégie de commande est performante plus on verra un meilleur comportement du système.

Plusieurs stratégies de commande du redresseur à PWM ont été proposées dans la littérature [20]. Toutes ces stratégies visent à atteindre les mêmes objectifs, à savoir un facteur de puissance unitaire et une forme de courant sinusoïdale à l'entrée du redresseur. Elles diffèrent par la nature du circuit de commande utilisé.

La commande par hystérésis est la commande de base pour les convertisseurs statiques. Cette technique est bien connue et plus souvent utilisée pour le contrôle direct de courant, elle présente de gros avantages au niveau de la robustesse, de la stabilité et de la dynamique très rapide. Il s'agit d'une forme de commande de commutation directe (c'est-à-dire sans porteuse), son principe consiste à maîtriser l'évolution du courant [21].

Parmi les techniques de commande avancées des redresseurs PWM, la commande prédictive est largement utilisée dans diverses applications industrielles [22]. Cette stratégie est devenue un outil de commande très précieux et attractif pour la recherche de meilleures performances dans diverses applications [23]. L'idée de base de la commande prédictive est l'utilisation d'un modèle mathématique pour prédire le comportement futur des variables

contrôlées. Ces informations sont utilisées pour obtenir l'action optimale, selon un critère d'optimisation prédéfini.

Ce chapitre est consacré à l'étude de la commande d'un Redresseur PWM monophasé à deux niveaux avec deux stratégies de commande : la commande par hystérésis et la commande prédictive.

II.2 Structure d'un Redresseur PWM monophasé à deux niveaux :

La structure générale du redresseur monophasé a deux niveaux dans ce chapitre est représentée à la Figure II.1. On y retrouve :

- Le réseau d'alimentation monophasé.
- Le pont redresseur à base d'IGBT.
- Une charge (résistance avec un condensateur)

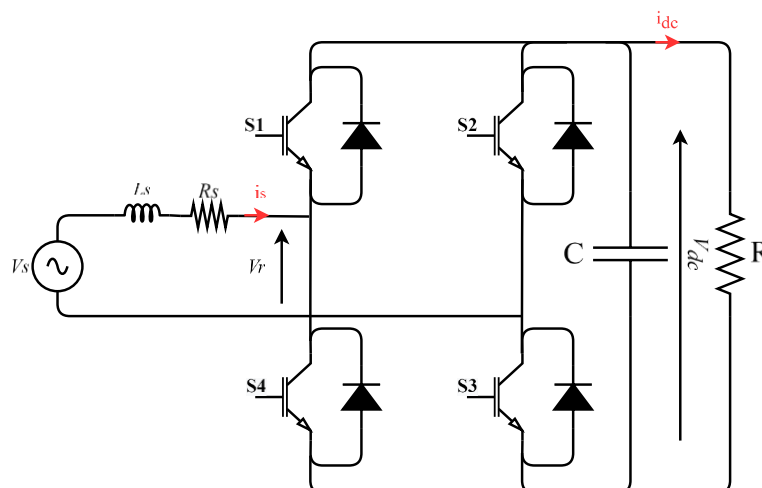


FIGURE II.1. Structure générale Redresseur monophasé à MLI de Tension à deux niveaux.

La Figure II.1 montre le schéma et indique les notations adoptées. Le redresseur est constitué de quatre interrupteurs S_i ($i=1,4$) à contrôle de courant bidirectionnel. Chaque interrupteur est constitué d'un transistor IGBT T_i et d'une diode D_i pour assurer la continuité du courant de source. Les deux interrupteurs de chaque bras ne doivent pas être en marche en même temps pour éviter de court-circuiter la source de tension. Le redresseur est connecté directement sur le réseau monophasé.

Ainsi, le tableau suivant résume la tension d'entrée V_r en fonction du signal de commande du commutateur ($S1 \dots S4$) et de la tension de bus continue (V_{dc}) :

TABEAU II.1 Les états de commutation et niveaux de tension de Redresseur monophasé à MLI de Tension à deux niveaux

état de commutation	S1	S2	S3	S4	La tension V
Etat 1	1	0	1	0	$V = 0v$
Etat 2	0	1	1	0	$V = -V_{dc}$
Etat 3	1	0	0	1	$V = V_{dc}$
Etat 4	0	1	0	1	$V = 0v$

II.3 Contrôle par hystérésis du courant d'un redresseur monophasé à deux niveaux

La structure du contrôle de l'hystérésis du courant du redresseur monophasé est illustrée à la Figure II.2 La tension source détectée v_s est transmise au module PLL (Phase Locked Loop). Dans le cas d'un système compensé monophasé, la PLL agit comme un filtre, générant une seule onde sinusoïdale synchronisée avec le réseau en multipliant la sortie de la PLL par la boucle de régulation du bus continu (régulateur PI) pour fournir un courant source de référence (i_s_ref). Après avoir soustrait le courant de charge mesuré et i_s on obtient l'erreur qui est ensuite appliquée à l'entrée du comparateur d'hystérésis dont la sortie fournit l'ordre de contrôle au bras correspondant du pont. Ce type de contrôle de courant par hystérésis, également appelé contrôle tout ou rien, est le plus couramment utilisé en raison de sa simplicité et de sa robustesse [1].

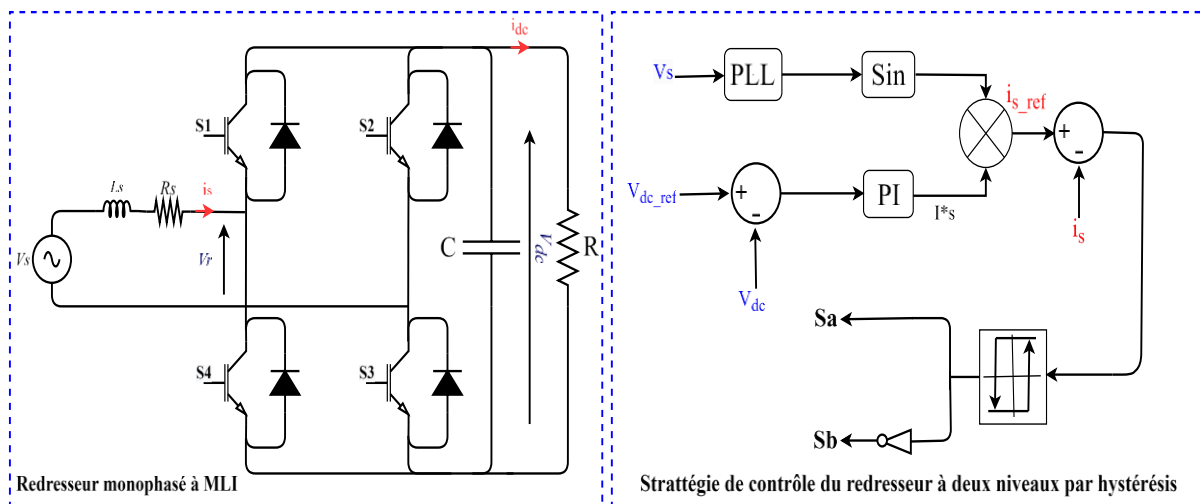


FIGURE II.2. Structure de contrôle par hystérésis du courant de source pour un redresseur monophasé à deux niveaux.

II.3.1 Commande de courant par hystérésis

Le contrôle du courant d'hystérésis (HCC) consiste à maintenir le courant dans une plage entourant sa valeur de référence. Chaque violation de cette bande envoie une séquence de commutation au commutateur. La Figure II.3 illustre le principe de contrôle du courant par hystérésis de la courroie fixe à deux étages. La différence entre le courant de référence et le courant mesuré est appliquée à l'entrée du comparateur à hystérésis, dont la sortie fournit l'ordre de contrôle du bras correspondant du pont [24] [25].

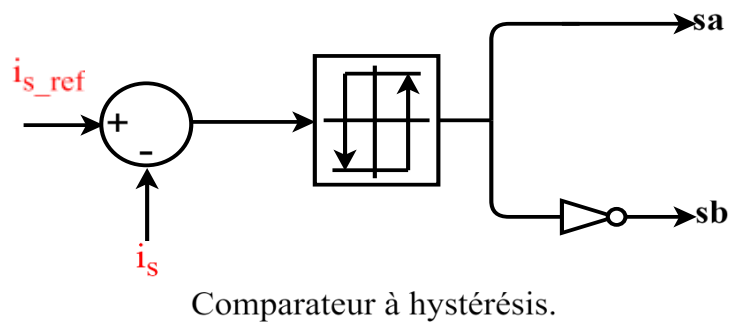


FIGURE II.3. Principe de contrôle de courant par hystérésis.

Le contrôle par hystérésis est une technique de contrôle non linéaire car la commande fournie est binaire (tout ou rien) avec un seul paramètre de réglage, la bande d'hystérésis, qui affecte directement la précision du commutateur et la fréquence de commutation. Le principe de génération des instructions de contrôle est illustré à la Figure II.4 où ΔI est la largeur de la bande d'hystérésis [26].

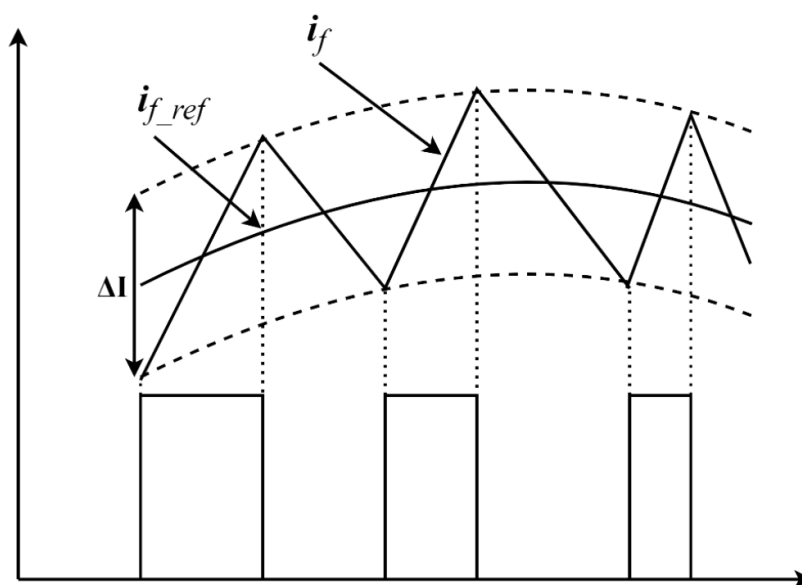


FIGURE II.4. Principe de génération des ordres de commande.

II.3.2 Boucle de régulation de la tension du bus continu

Afin de réduire la variation et l'instabilité de la tension du bus continu, un régulateur proportionnel-intégral (PI) est utilisé pour réguler la tension du bus continu. Ce régulateur est largement utilisé car il est facile à mettre en œuvre et offre une bonne réponse dynamique lorsque les paramètres sont correctement réglés. La fonction de la boucle de régulation de tension du bus continu est de maintenir cette tension à une valeur de référence constante et de contrôler le processus de charge et de décharge du condensateur. La tension du bus continu V_{dc} est détectée et comparée à la tension de référence V_{dc_ref} et le résultat de la comparaison (erreur) est appliqué à ce régulateur PI pour obtenir l'amplitude du courant de référence de la source I_{s_max} . Cette amplitude est ensuite multipliée par la sortie de la PLL pour obtenir le courant de référence instantané de la source i_{s_ref} . Le schéma fonctionnel de la boucle de régulation de tension du bus continu est illustré à la Figure II.5[27].

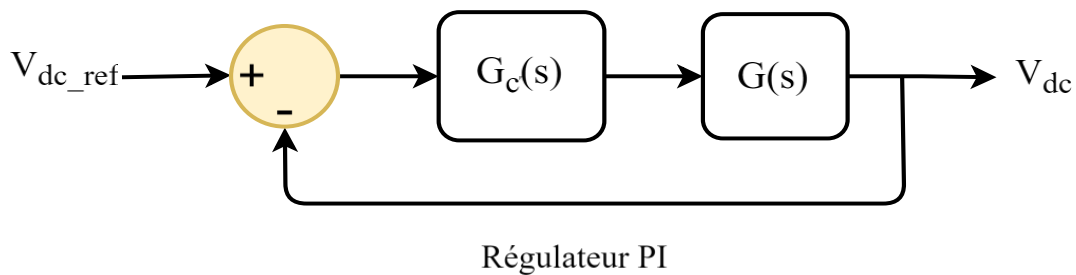


FIGURE II.5. Schéma bloc de la boucle de régulation de la tension du bus continue.

Le régulateur PI (Proportionnel-Intégral) est une technique de contrôle utilisée dans de nombreux systèmes industriels pour maintenir une variable à une valeur souhaitée.

Dans ce cas, on prend :

$$K_p = 0.12. \text{ et } K_I = 6$$

Tel que :

$G_c(s)$ est la fonction de transfert du régulateur et $G(s)$ est la fonction de transfert du système.

II.3.3 Boucle de verrouillage de phase

Pour assurer un suivi précis de la fréquence et de la phase de la tension du réseau, une boucle de verrouillage de phase (PLL) est intégrée dans le système. La PLL synchronise les signaux de commande avec la tension du réseau, essentielle pour le fonctionnement correct du redresseur et pour minimiser la distorsion harmonique.

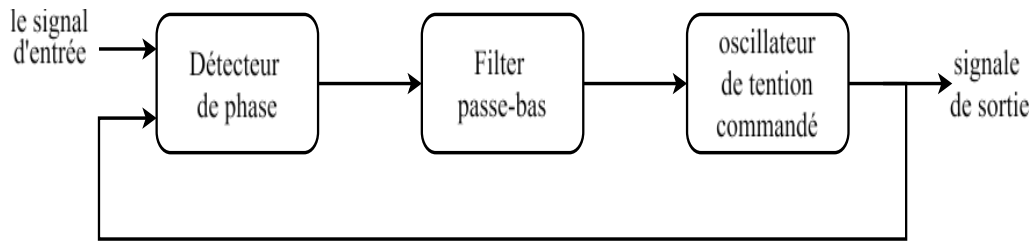


FIGURE II.6. Diagramme de blocs d'une PLL.

Le principe de fonctionnement d'une PLL repose sur trois composants principaux : un comparateur, un multiplicateur de fréquence et un relais de phase.

Détection de Phase : Un détecteur de phase mesure la différence de phase entre la tension du réseau et l'oscillateur interne.

Filtrage : Le signal de différence de phase est filtré pour éliminer les bruits indésirables.

Contrôle de Fréquence : Le VCO ajuste sa fréquence pour réduire la différence de phase à zéro, synchronisant ainsi avec la tension du réseau [28].

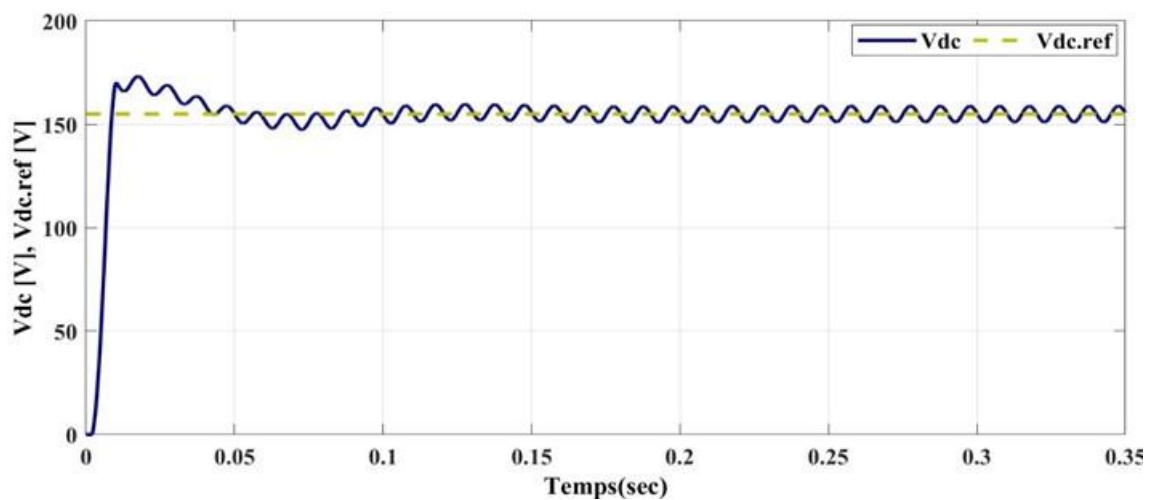
II.3.4 Résultats de simulation

Afin d'évaluer les performances de contrôle du courant hystérétique une simulation numérique a été développée et implémentée dans le logiciel MATLAB/Simulink. Les paramètres du circuit de puissance et de commande sont illustrés dans le Tableau II.2. Dans ce test la référence de la tension du bus continu est fixée à **155V**.

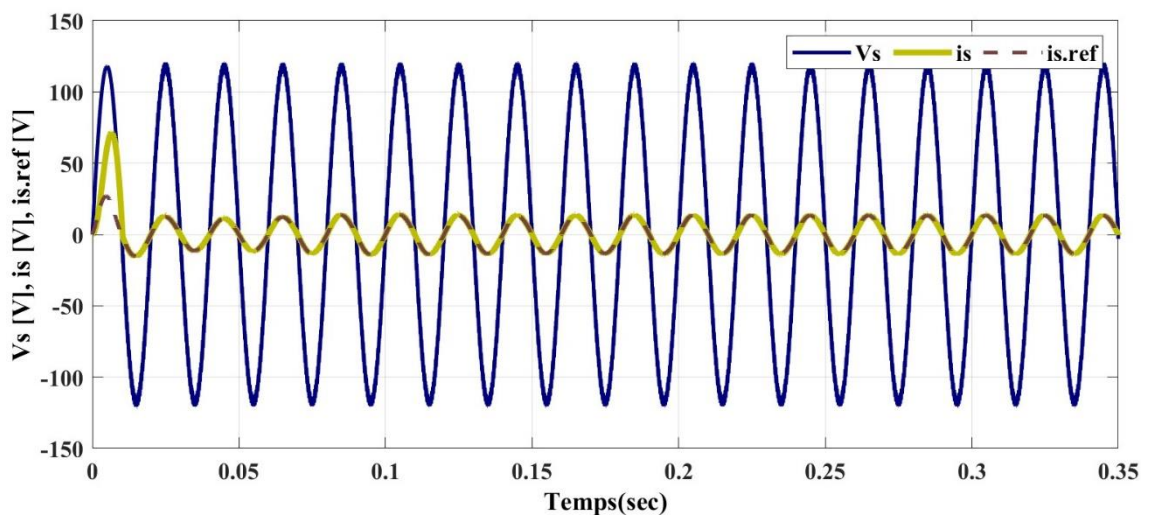
TABLEAU II.2 Les paramètres de simulation

Paramètre	Les valeurs
Voltage de la source (V_s)	120V
La fréquence de la source (f_s)	50Hz
L'inductance de la source (L_s)	0,1mH
La résistance de la source (R_s)	0,01 Ω
La capacité de la charge (C_{dc})	2200 μ F
La résistance de la charge (R)	30 Ω
La fréquence d'échantillonnage f_s	100 KHz
Gains du contrôleur PI (K_p et K_i)	$K_p = 0.12, K_i = 6$

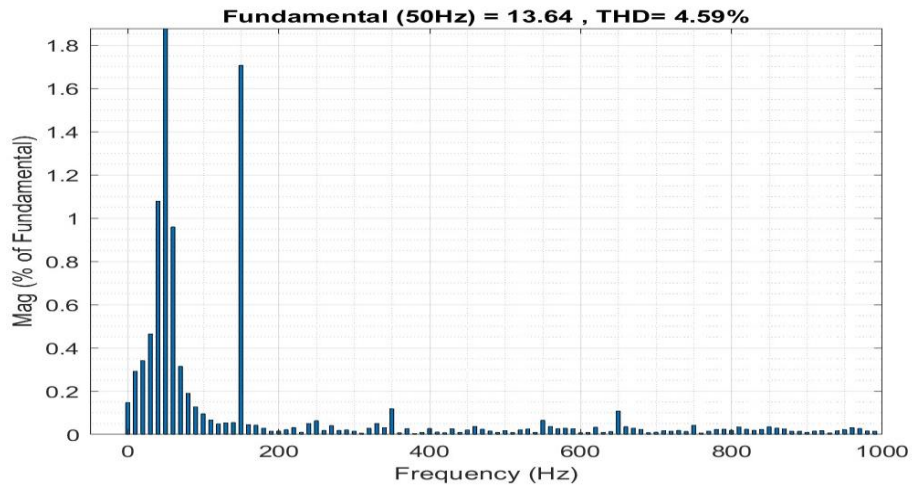
La Figure II.7 montre les résultats de simulation de redresseur monophasé à deux niveaux par la commande à hystérésis. Nous pouvons constater que la tension du bus continu se stabilise vers sa référence après un transitoire de **0.1 s** (Figure II.7 (a)). Nous pouvons constater aussi que le courant absorbé ait une forme sinusoïdale est suit bien le courant de référence et présentent ainsi un taux de distorsion de $THDi=4.59\%$ (Figure II.7 (b, c)). De plus, on peut noter que le courant dans la phase est en phase avec la tension de ligne ce qui signifie que le facteur de puissance est très proche de l'unité (Figure II.7 (b)). Ceci peut être confirmé par les allures des puissances active et réactive (Figure II.7 (d)). La figure II.7 (e) montre le courant DC absorbé par la charge résistive.



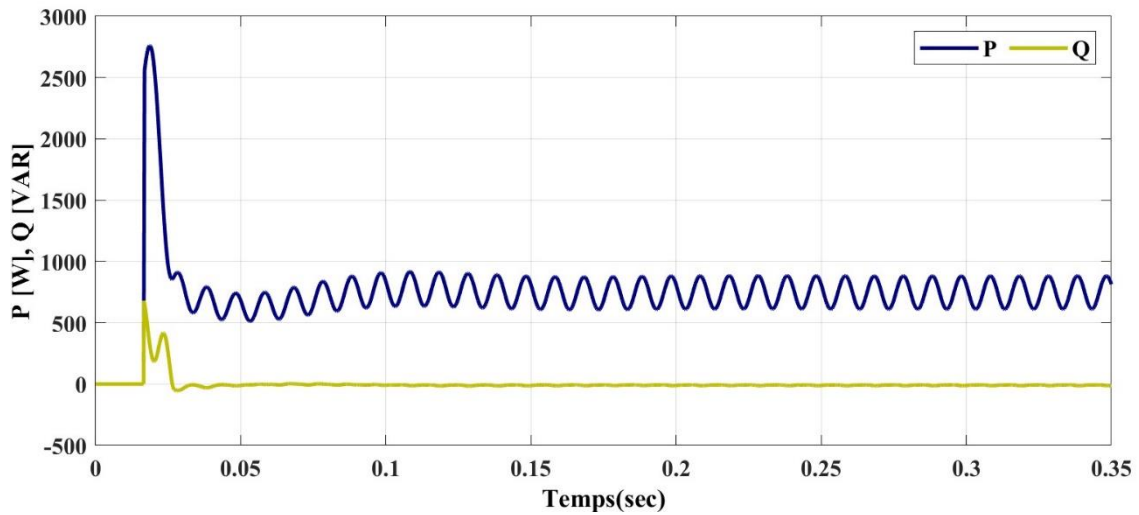
(a) Tension du bus continu mesuré et sa référence



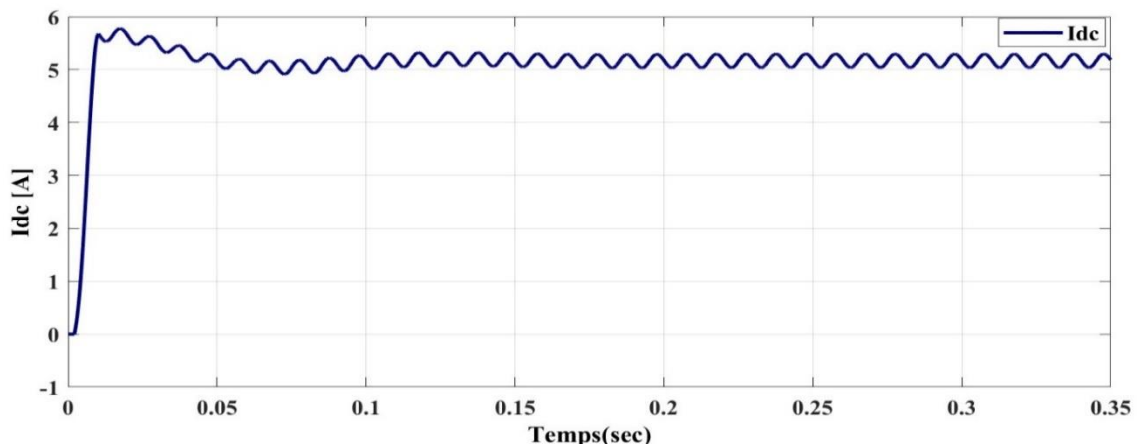
(b) Tension de source et courant absorbé par le redresseur PWM



(c) Spectre du courant absorbé



(d) Puissances active (P) et réactive (Q)



(e) Courant de la charge

FIGURE II.7 Résultats de simulation de redresseur monophasé a deux niveaux par commande de courant à hystérésis.

II.4 Contrôle prédictif du courant de source pour commande un redresseur monophasé monophasés à deux niveaux

Avec le développement rapide de l'électronique numérique et des microprocesseurs, la mise en œuvre de nouveaux schémas de contrôle avancés et complexes est devenue possible. Parmi ces nouveaux schémas de contrôle de convertisseurs de puissance, le contrôle prédictif de modèle (MPC) a reçu une attention considérable ces dernières années. Le contrôle MPC est devenu un outil de contrôle très précieux et attrayant dans la recherche de meilleures performances dans diverses applications. Le principe de base du contrôle MPC est d'utiliser la valeur actuelle et la valeur passée ainsi que la valeur de contrôle prédictive future optimale pour prédire la sortie future du système. Ce dernier est calculé par une méthode d'optimisation qui prend en compte une fonction de coût qui dépend également des références futures et des contraintes éventuelles [29]. La Figure II.8 donne un schéma fonctionnel de base de cette technique de commande.

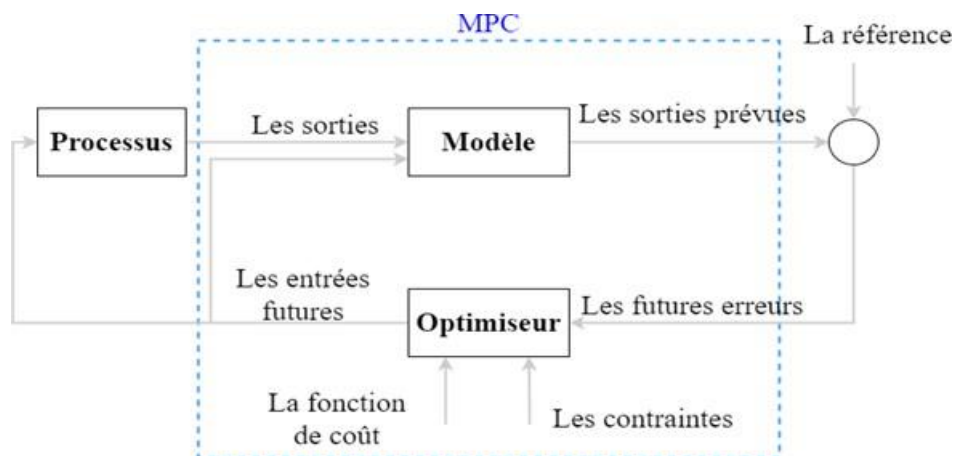


FIGURE II.8 Schéma fonctionnel de la commande MPC.

II.4.1 Principe du contrôle prédictif à commandes finies

La technologie MPC appliquée à l'électronique de puissance est principalement divisée en deux catégories : le contrôle continu MPC (continuous control set model predictive control, CCS-MPC) et le contrôle limité MPC (limited control set model predictive control, FCS) [30][31]. La principale différence réside dans la manière dont l'optimisation est effectuée et dans la manière dont les opérations de contrôle sont appliquées. Pour la commande CCS-MPC, la sortie du contrôleur est un signal de référence continu, qui est converti en action de contrôle.

Par contre la commande FCS-MPC, exploite le nombre limité d'états de commutation disponibles dans le convertisseur de puissance et utilise un algorithme itératif simple pour

résoudre le problème d'optimisation. Une fois l'état de commutation optimal trouvé, il est appliqué directement au convertisseur et reste fixe pour chaque cycle de commutation.

La commande FCS-MPC présente plusieurs avantages qui la rendent attrayante pour le contrôle des convertisseurs de puissance, tels que la facilité de mise en œuvre, la flexibilité dans la définition des objectifs de contrôle et une réponse dynamique rapide, tandis que le principal avantage du FCS-MPC est son application directe au contrôle des convertisseurs sans l'utilisation d'un étage de modulation.

La Figure II.9 montre la structure générale du contrôle FCS-MPC appliqué à un convertisseur de puissance. Dans ce schéma de commande, la variable mesurée $X(k)$ est utilisée dans le modèle pour calculer la prédiction $X(k+1)$ de la variable contrôlée (tension ou courant) pour chaque état de commutation possible. Ces prédictions sont évaluées à l'aide d'une fonction de coût qui prend en compte la valeur de référence $X^*(k)$. Ensuite, l'état de commutation optimal S_{opt} est sélectionné et appliqué au convertisseur.

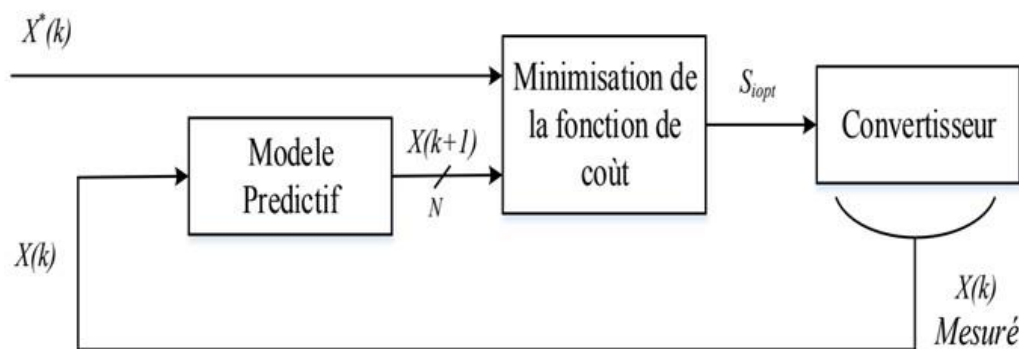


FIGURE II.9 Structure générale de la FCS-MPC appliqué au convertisseur de puissance.

II.4.2 Commande prédictive pour le fonctionnement à deux niveaux

La commande prédictive pour le fonctionnement à deux niveaux du redresseur à PWM consiste à ajuster la largeur du créneau de commutation à chaque instant pour annuler l'erreur du courant absorbé. Lors de l'alternance positive, les interrupteurs S3 et S2 sont fermés pour produire un créneau négatif, tandis que les interrupteurs S1 et S4 sont fermés pour produire deux créneaux positifs. Pour l'alternance négative, les interrupteurs S1 et S4 sont fermés pour produire un créneau positif, et les interrupteurs S3 et S2 sont fermés pour le reste de la période. La tension appliquée à l'entrée du redresseur dicte le courant absorbé pour égaliser sa référence à la fin de chaque période de commutation. Le principe de cette technique de commande est illustré dans la Figure II.10.

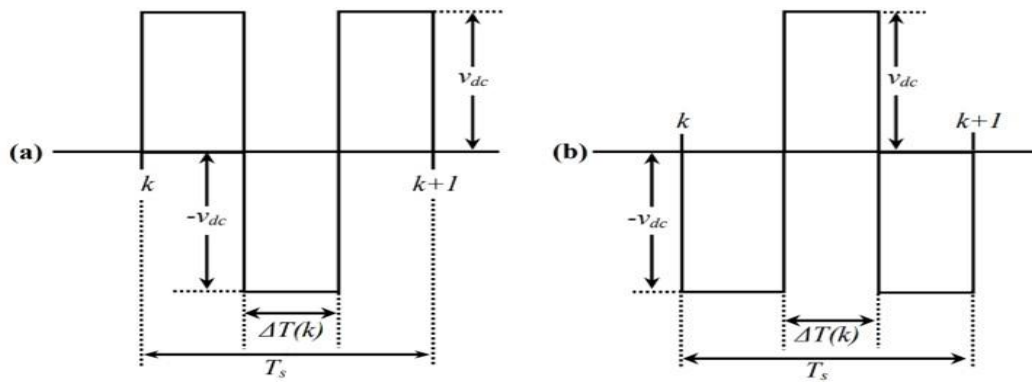


FIGURE II.10 Forme d'onde de la tension durant une période de commutation pour le fonctionnement à deux niveaux : (a) alternance positive, (b) alternance négative.

II.4.3 Algorithme de commande prédictive

Pour appliquer la commande FCS-MPC à un convertisseur de puissance, les quatre étapes suivantes doivent être suivies :

- Prédire les variables du système à l'aide d'une estimation par modèle discret.
- calculer le courant de référence de source.
- Évaluer la fonction de coût pour 4 états de commutation du convertisseur.
- L'état de commutation qui minimise la fonction de coût est sélectionné puis appliqué au convertisseur.

La structure globale de la commande FCS-MPC appliquée au courant absorbé par le redresseur à MLI est illustrée sur la Figure **II.11**.

L'algorithme de contrôle prédictif est présenté dans la Figure **II.12** et comprend les étapes suivantes :

1. Mesurez le courant source et obtenez la valeur du courant de référence à partir de la sortie de la boucle de régulation du bus DC.
2. Le modèle MPC est utilisé pour prédire la valeur du courant source.
3. Le courant de référence est calculé par le produit de $I_s \max$ et $\sin(\theta)$, où θ : la phase de V_s .
4. La fonction de coût (g) minimise l'erreur entre le courant de référence et le courant prédit.
5. Sélectionnez le vecteur de tension qui minimise l'erreur de courant et appliquez le signal correspondant à l'état de commutation.

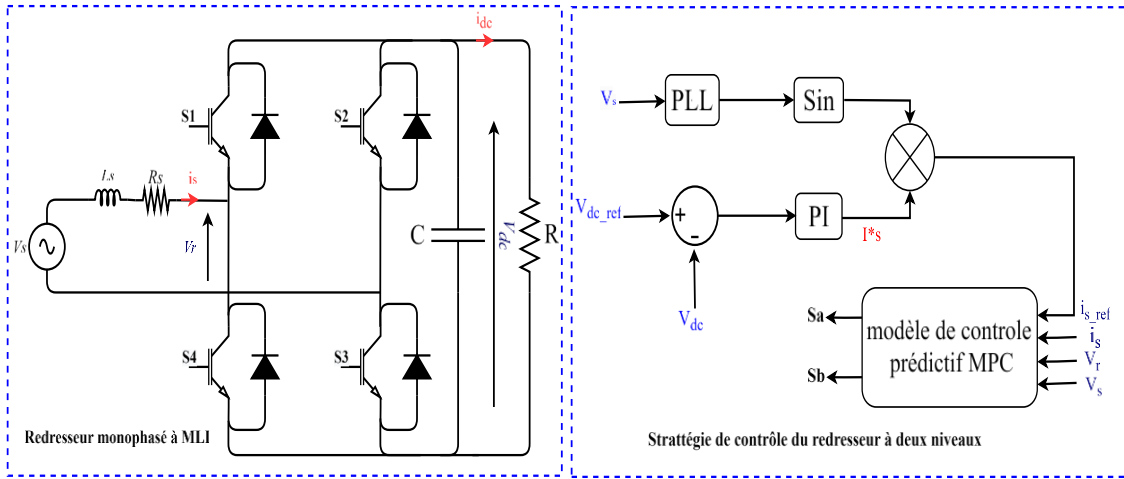


FIGURE II.11 : Structure de contrôle prédictif du courant de source.

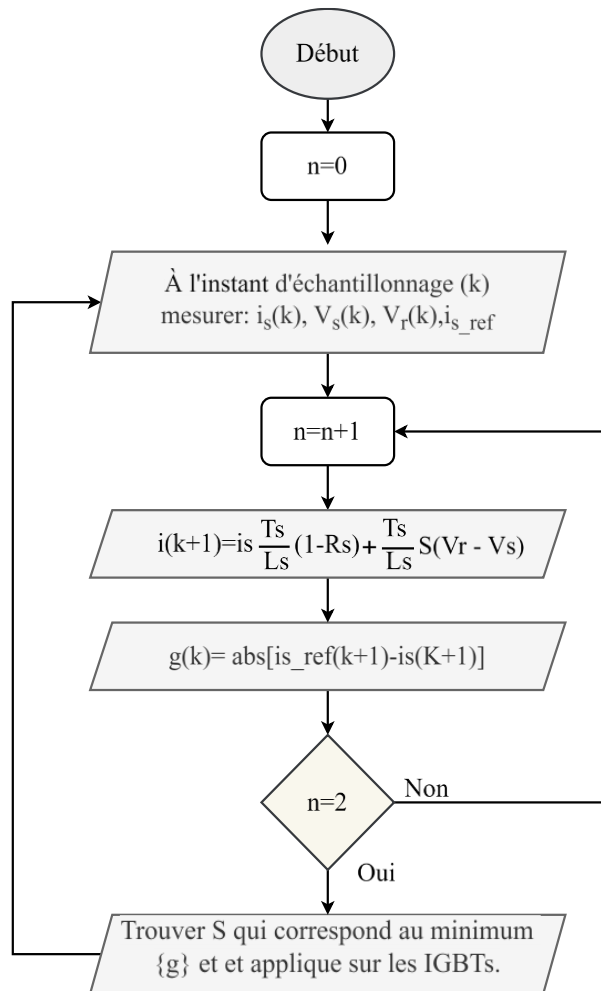


FIGURE II.12. Diagramme de l'algorithme du contrôle prédictif.

a) Prédiction du courant I_s

Afin de réaliser le contrôle FCS-MPC, le modèle en temps continu doit être discrétisé. Le modèle à temps discret nous permet de prédire la valeur future du vecteur courant d'entrée en fonction de la tension et du courant mesurés à $k^{\text{ème}}$ temps d'échantillonnage. Plusieurs méthodes de discrétisation peuvent être utilisées pour obtenir des modèles en temps discret. L'approximation d'Euler est utilisée en raison de sa simplicité. Il offre également une précision acceptable, nécessaire à de bonnes performances. Selon cette méthode, nous obtenons la forme temporelle discrète du système comme suit :

$$\frac{dx}{dt} = \frac{x(k+1) - x(k)}{T_s} \quad \text{II.1}$$

Où T_s est la période d'échantillonnage. $x(k+1)$ et $x(k)$ sont la valeur de la variable d'état dans le prochain temps d'échantillonnage et à l'état actuel, respectivement.

Nous avons le model électrique suivant :

$$L_s \frac{dx}{dt} = R_s i_s + V_r - V_s \quad \text{II.2}$$

Où i_s et V_s sont respectivement le courant de source et la tension de source mesurés, V_r est la tension d'entrée de redresseur et L_s et R_s sont respectivement l'inductance et la résistance de la source.

En utilisant la méthode d'Euler, l'équation II.2 est discrétisée pour obtenir une expression qui prédit le courant futur ($k+1$) pour quatre états de commutation possibles appliqués à l'redresseur, qui s'écrit sous la forme suivante :

$$i(k+1) = i_s \frac{T_s}{L_s} (1 + R_s) + \frac{T_s}{L_s} S(V_r - V_s) \quad \text{II.3}$$

b) Fonction de coût

La fonction de coût est définie et mesure l'erreur entre le courant de référence et le courant prédit de la source :

$$g(k) = |i_{s,ref}(k+1) - i_s(k+1)| \quad \text{II.4}$$

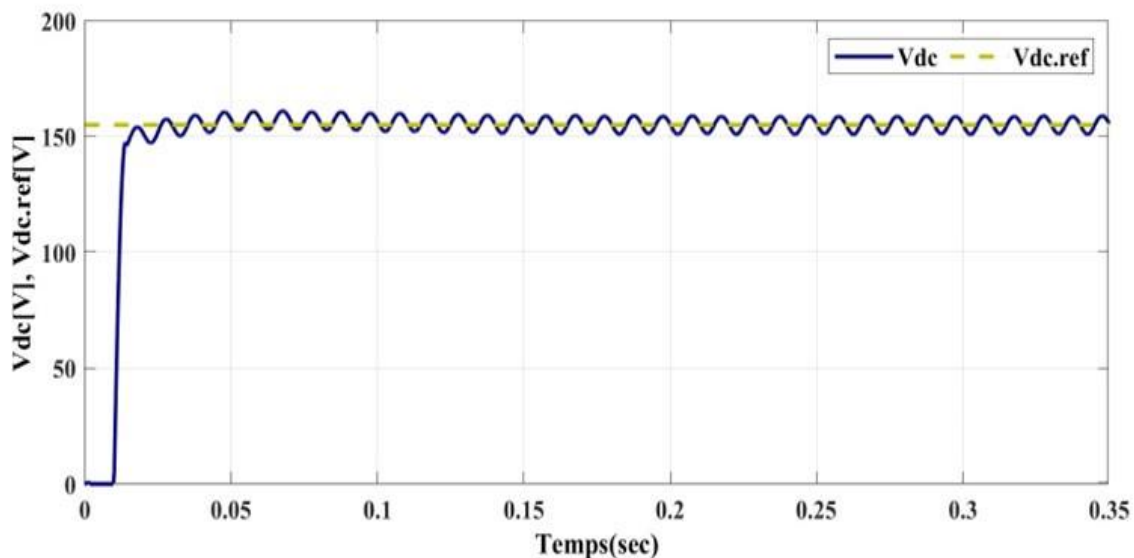
Où $i_{s_{ref}}(k+1)$ et $i_s(k+1)$ sont les courant de référence et prédit de la source respectivement.

Le but de l'optimisation de la fonction de coût est de choisir la valeur de g aussi proche que possible de zéro. L'état de commutation optimal qui minimise la fonction de coût est sélectionné puis appliqué à l'instant d'échantillonnage suivante.

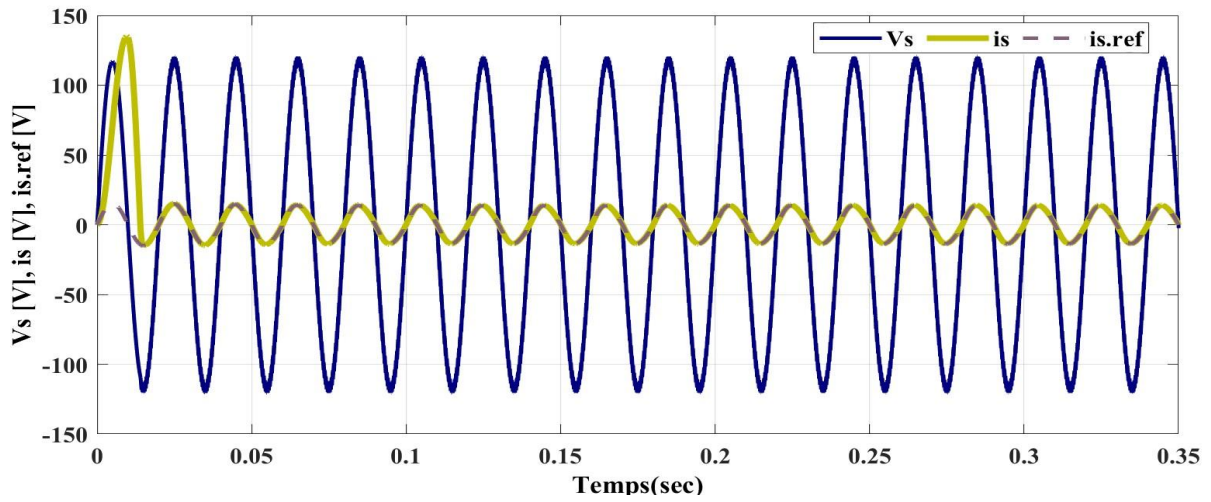
II.4.4 Résultats de simulation

Une simulation à été construite et implémentée dans le logiciel MATLAB/Simulink pour examiner les performances du contrôle FCS-MPC. Les paramètres de simulation de système sont les mêmes que ceux indiqués dans le Tableau II.2. Pour les paramètres de contrôle, la période d'échantillonnage est égale à **50 μ s** pour la commande MPC.

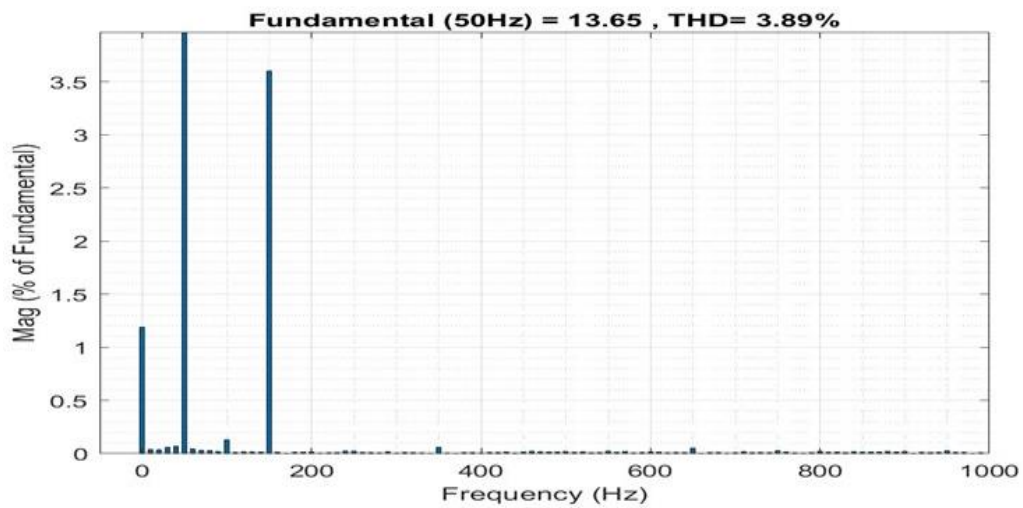
La Figure II.13 montrent les résultats de simulations obtenus pour une tension de référence constante $V_{dc_ref} = 155V$. Nous remarquons que la tension de bus continu stabilise vers sa référence avec des réductions remarquables au niveau de temps de réponse t_r et le temps de montée t_m , ce qui entraîne un dépassement **D** minimale au niveau de la tension de bus continu. De plus, nous remarquons une amélioration de la valeur du taux de distorsion harmonique de courant de source de **$THDi = 3.89\%$** .



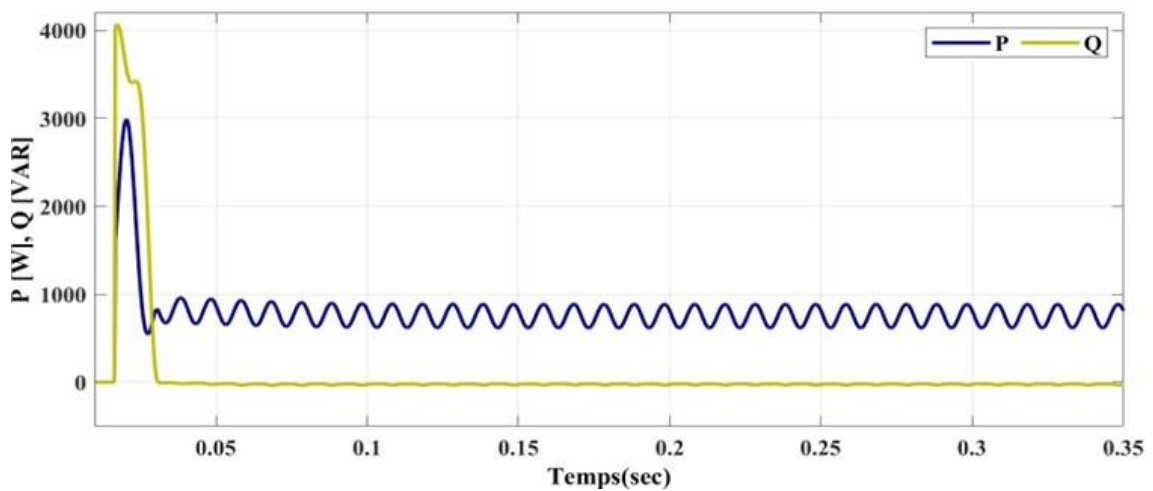
(a) La tension du bus continu mesuré et sa référence.



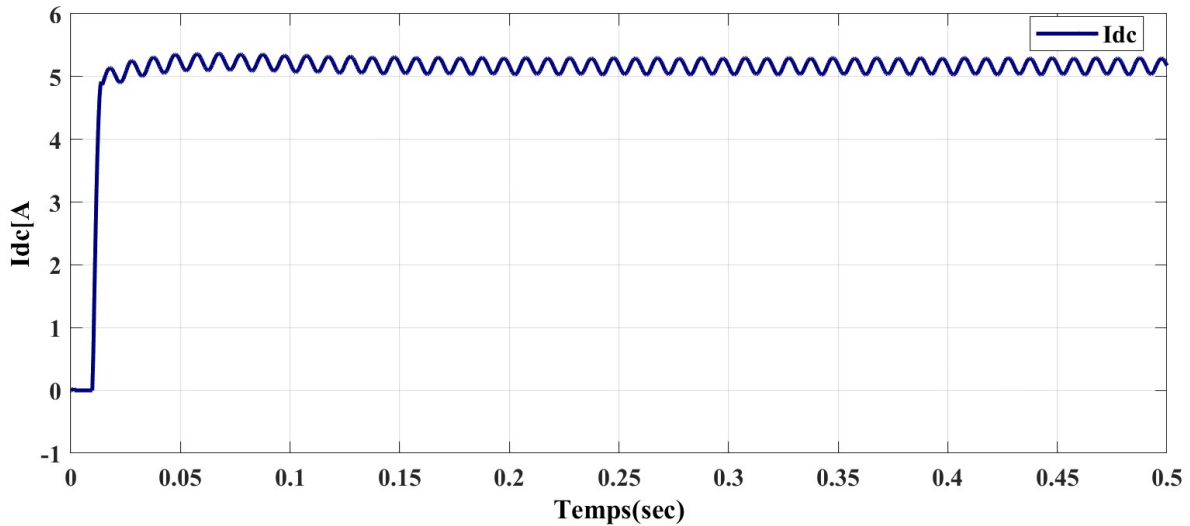
(b) Tension de source et courant absorbé par le redresseur MLI.



(c) Spectre du courant absorbé.



(d) Puissances active (P) et réactive (Q).



(e) Le courant de la charge.

FIGURE II.13 Résultats de simulation de redresseur PWM à deux niveaux avec une commande FCS-MPC.

Nous remarquons la supériorité de la commande FCS-MPC par rapport aux autres techniques. Il est à noter, que cette technique a l'avantage considérable de maintenir la fréquence de commutation des interrupteurs de puissance à une fréquence quasi fixe, cela diminue fortement les pertes de commutation et augmente la longévité des composants.

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la commande à hystérésis et la commande prédictive à modèle de référence (MPC) et leurs applications aux convertisseurs de puissance en général et au redresseur PWM à deux niveaux de tension. Ensuite nous avons étudié le principe et la structure de la commande prédictive à ensemble de commande finie (FCS-MPC) de courant absorbé par le redresseur à PWM. Après avoir simulé ces deux stratégies de commande, les résultats de simulation obtenus montrent les performances des deux techniques commande à hystérésis et FCS-MPC appliqués au redresseur à PWM et montrent que FCS-MPC est plus performante par rapport à la commande à hystérésis.

Dans le prochain chapitre un redresseur monophasé multi-niveaux de type PUC (Packed U Cells) sera étudié et contrôlé par la commande prédictive FCS-MPC.

Chapitre 3 :

Redresseur monophasé multi-niveaux de type PUC

III.1 Introduction

La transition mondiale vers les énergies renouvelables et les véhicules électriques (VE) nécessite des avancées en électronique de puissance, en particulier dans le développement de chargeurs de batterie efficaces. Ce chapitre est consacré à l'étude et l'application de la commande prédictive (FCS-MPC) à un redresseur monophasé à cellules en U empilées PUC Packed U-Cell (PUC5) pour la charge de batteries de VE. La topologie PUC5 offre plusieurs avantages, notamment des pertes de commutation réduites, une densité de puissance améliorée et une qualité de puissance accrue. L'objectif principal de cette étude est de concevoir une stratégie de commande assurant une conversion de puissance efficace, une faible distorsion harmonique totale (THD) et un fonctionnement à facteur de puissance unitaire.

III.2 Topologie du convertisseur multi-niveaux PUC5

La topologie PUC5 se distingue par sa capacité à générer une forme d'onde de tension d'entrée à cinq niveaux et à fournir deux tensions de sortie continues. Elle comprend deux condensateurs DC et six interrupteurs de puissance, offre ainsi un système de conversion compact et efficace. La conversion AC-DC réalisée par ce convertisseur est optimisée pour le chargement des batteries de véhicules électriques (VE), grâce à sa capacité à fournir des niveaux de tension adaptés à différents types de batteries [32]. La version à cinq niveaux du PUC (PUC5), présentée à la Figure III.1.

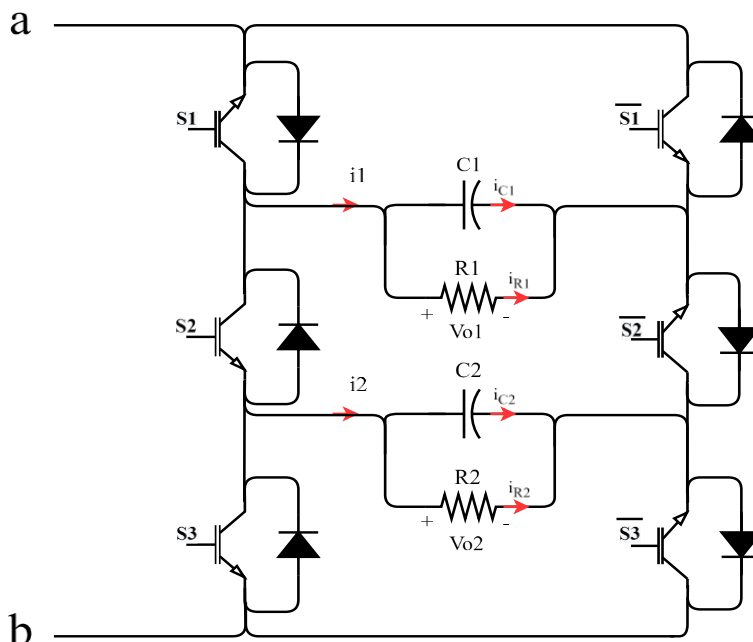


FIGURE III.1. Topologie PUC5

III.3 Système de redressement à base du convertisseur PUC5

Dans ce chapitre, le redresseur double sorties PUC5 étudié est illustré dans la Figure II.1. Le convertisseur est connecté à une alimentation en courant alternatif représentant le réseau à l'aide d'un filtre en L. Le convertisseur dispose de deux condensateurs DC (sorties doubles) et de six interrupteurs de puissance. Compte tenu des schémas de commutation montrés dans le Tableau 1, les deux résultats sont utilisés pour créer une tension d'entrée à 5 niveaux, où le niveau de tension de sortie DC supérieur ($v_{o1} = 2E$) est le double du niveau de tension de sortie DC inférieur ($v_{o2} = E$), où E représente la tension de référence à la deuxième sortie. Les niveaux d'entrée du redresseur sont $\pm 2E$, $\pm E$, et 0. Chaque interrupteur S_k ($k = a, b, c$) a les états de contrôle suivants.

III.3.1 Modèle mathématique du rectifier PUC5

Le convertisseur PUC5 possède six commutateurs de puissance bidirectionnels et deux tensions continues de sortie. La tension de sortie supérieure ($v_{o1} = 2E$) est le double de la tension de sortie inférieure ($v_{o2} = E$) et selon la séquence de contrôle donnée dans le Tableau III.1, les deux sorties sont utilisées pour produire une tension d'entrée à 5 niveaux au redresseur PUC5 [32]. La fonction de commutation de l'entrée est définie comme suit :

$$S_a = S_1 - S_2 \tag{III.1}$$

$$S_b = S_2 - S_3 \tag{III.2}$$

Pour des raisons de simplicité, on suppose que deux charges résistives (avec des valeurs nominales de R1 et R2) sont connectées en parallèle avec les deux condensateurs C1 et C2, respectivement.

La relation entre le courant de la source et les courants tirés de chaque branche est donnée par :

$$i_1 = S_a i_s = i_{dc1} + i_{R1} \tag{III.1}$$

$$i_2 = S_b i_s = i_{dc2} + i_{R2} \tag{III.2}$$

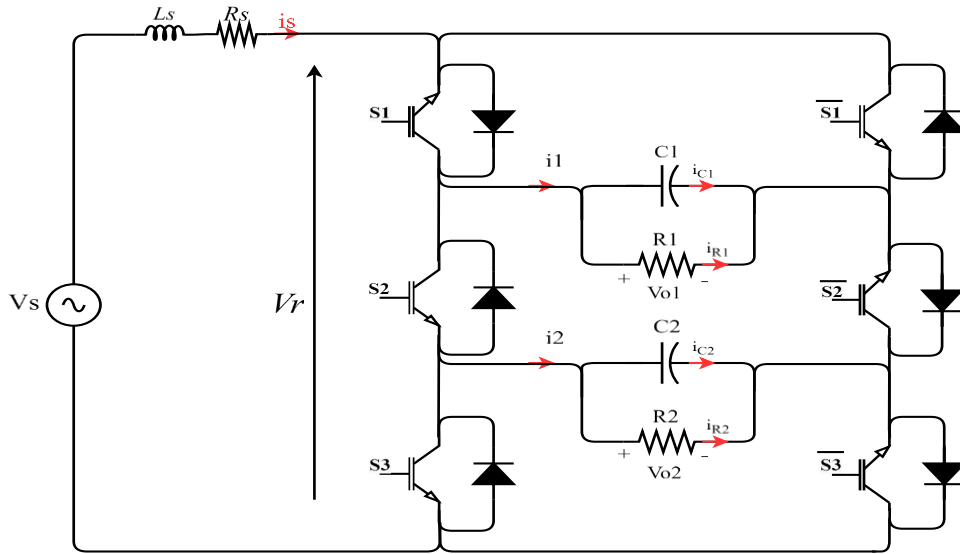


FIGURE III.2. Structure d'un redresseur PUC5

TABLEAU III.1 Les états de commutation et niveaux de tension du redresseur PUC5

Etat de commutation	S1	S2	Sa	Sb	Sc	Vr	Vi $\begin{matrix} V_{dc1} = 2E \\ V_{dc2} = E \end{matrix}$
Etat 1	+1	0	1	0	0	V _{dc1}	2E
Etat 2	+1	-1	1	0	1	V _{dc1} - V _{dc2}	E
Etat 3	0	+1	1	1	0	V _{dc2}	E
Etat 4	0	0	1	1	1	0	0
Etat 5	0	0	0	0	0	0	0
Etat 6	0	-1	0	0	1	-V _{dc2}	-E
Etat 7	-1	1	0	1	0	V _{dc2} - V _{dc1}	-E
Etat 8	-1	0	0	1	1	-V _{dc1}	-2E

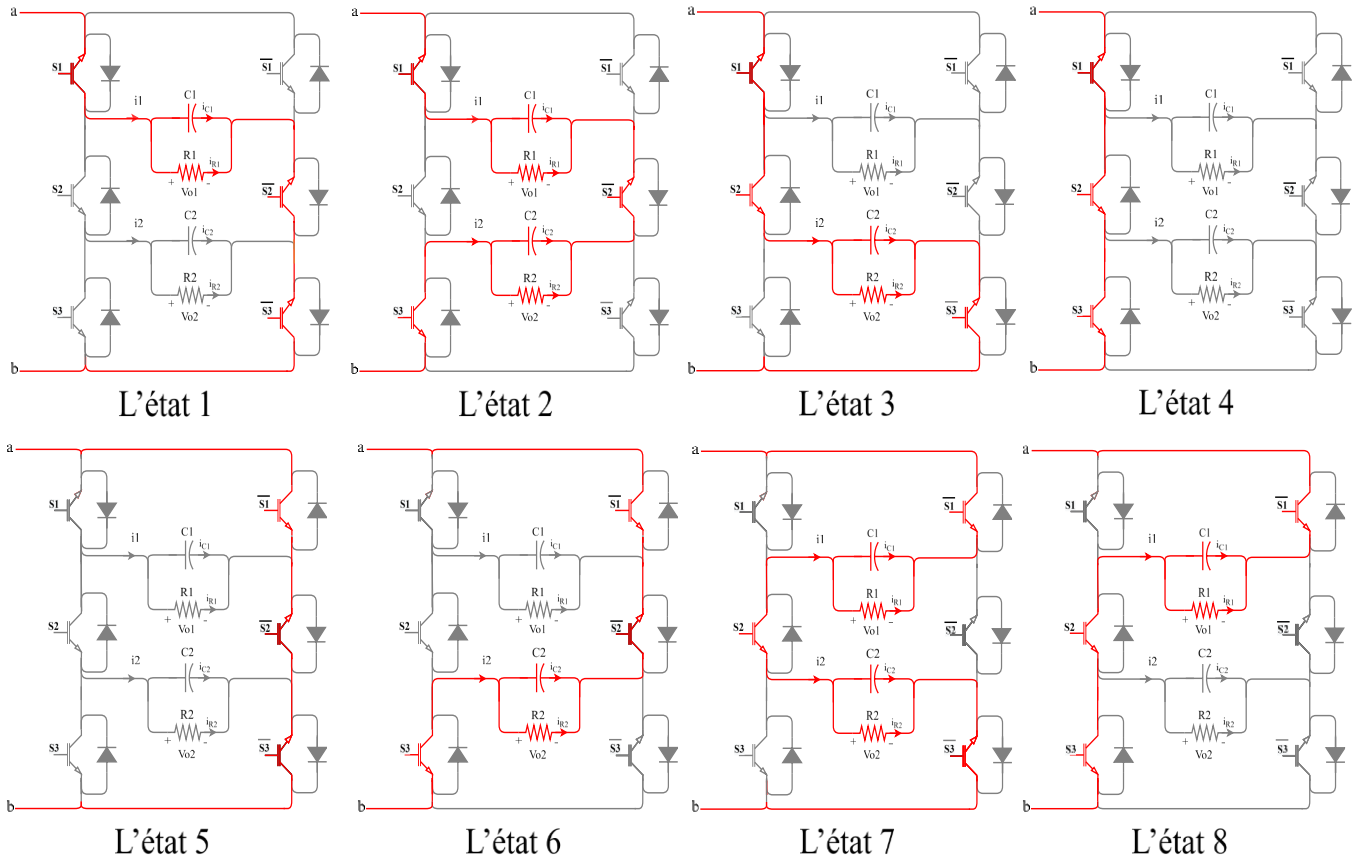


FIGURE III.3. Les états de commutation de redresseur PUC5.

La variation des tensions des condensateurs est calculée par [32] [34]:

$$C1 \frac{dV_{dc1}}{dt} = S_a i_s - \frac{V_{o1}}{R_1} \quad \text{III.5}$$

$$C2 \frac{dV_{dc2}}{dt} = S_b i_s - \frac{V_{o2}}{R_2} \quad \text{III.6}$$

De plus, la variation de courant de réseau est la suivante :

$$\frac{di_s}{dt} = -\frac{R_s}{L_s} i_s + \frac{1}{L_s} (V_s - V_r) \quad \text{III.7}$$

Où V_r est la tension d'entrée de convertisseur PUC5.

Les signaux d'entrée de commande relient les tensions de charge à la tension d'entrée de l'onduleur (forme d'onde de tension d'entrée à 5 niveaux). Comme illustré dans le Tableau III.1. Cette relation est donnée par :

$$V_r = S_a V_{dc1} + S_b V_{dc2} \quad \text{III.8}$$

III.4 Commande prédictive de redresseur PUC5

La structure du contrôle prédictif du courant source basé sur le redresseur PUC5 est illustrée sur la Figure III.4. La structure utilisée est la même que celle utilisée pour le contrôle d'un redresseur monophasé à deux niveaux au chapitre 2. La tension du bus V_{dc} régulée par le régulateur PI ($V_{dc} = |V_{dc1}| + |V_{dc2}|$) sera utilisée comme référence pour réguler le courant de source via l'algorithme de contrôle prédictif.

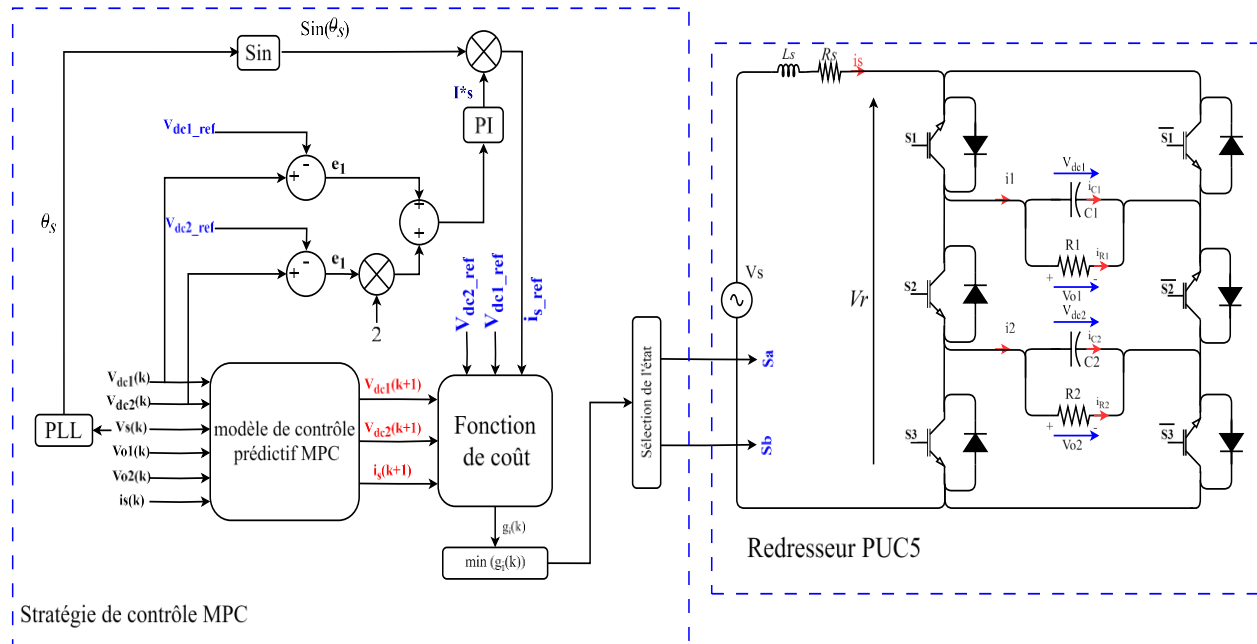


FIGURE III.4. Structure de contrôle prédictif du courant de source avec un redresseur PUC5.

III.4.1 Algorithme du contrôle prédictif du courant

Pour appliquer les commandes FCS-MPC à un convertisseur de puissance, il faut suivre les mêmes étapes mentionnées dans le Chapitre 02.

Généralement, le FCS-MPC nécessite le modèle équivalent en temps discret du système contrôlé, la prédiction des valeurs au pas de temps suivant, et la minimisation d'une fonction de coût en ligne. Dans cette étude de cas, le contrôleur doit assurer ce qui suit :

- Pour contrôler les tensions continues de sortie V_{dc1} et V_{dc2} autour de leurs valeurs de référence $2E$ et E (ce choix des références de tension des condensateurs assurera un fonctionnement stable du redresseur PUC5),
- Pour tirer un courant d'entrée i_s synchronisé avec la tension de source alternative v_s afin d'atteindre un facteur de puissance unitaire avec une faible distorsion harmonique totale (THD), la procédure de conception du contrôleur est détaillée dans les sous-sections suivantes.

L'algorithme du contrôle prédictif de redresseur PUC5 est illustré sur la Figure III.5.

En utilisant l'approximation d'Euler explicite du premier ordre, les formes équivalentes discrètes des équations (III.5) et (III.6) sont respectivement données par [34]:

$$V_{dc1}(K + 1) = V_{dc1}(k) + \frac{Ts}{C1} \left(S_a(k)i_s(k) - \frac{V_{o1}(k)}{R_1} \right) \quad \text{III.9}$$

$$V_{dc2}(K + 1) = V_{dc2}(k) + \frac{Ts}{C2} \left(S_b(k)i_s(k) - \frac{V_{o2}(k)}{R_2} \right) \quad \text{III.10}$$

De même, la forme discrète de courant de la source est donnée comme :

$$i_s(k + 1) = i_s(k) - \frac{R_s Ts}{L_s} i_s(k) + \frac{T_s}{L_s} (V_s(k) - S_1(k)V_{C1}(k) - S_2(k)V_{C2}(k)) \quad \text{III.11}$$

Enfin, la fonction de coût g est définie comme :

$$g(k) = \left(\frac{V_{dc1}(k+1) - V_{dc1ref}(K)}{V_{dc1ref}(K)} \right)^2 + \left(\frac{V_{dc2}(k+1) - V_{dc2ref}(K)}{V_{dc2ref}(K)} \right)^2 + \lambda \left(\frac{i_s(k+1) - i_{sref}(K)}{I_{s_m}} \right)^2 \quad \text{III.13}$$

avec λ est un gain de pondération supposer égale à 1.

La fonction de coût g est calculée pour 8 états de commutation possibles selon le tableau de commutation prédéfini (Tableau III.1). L'état de commutation optimal qui minimise la fonction de coût est sélectionné puis appliqué au PUC5 à l'instant d'échantillonnage suivante.

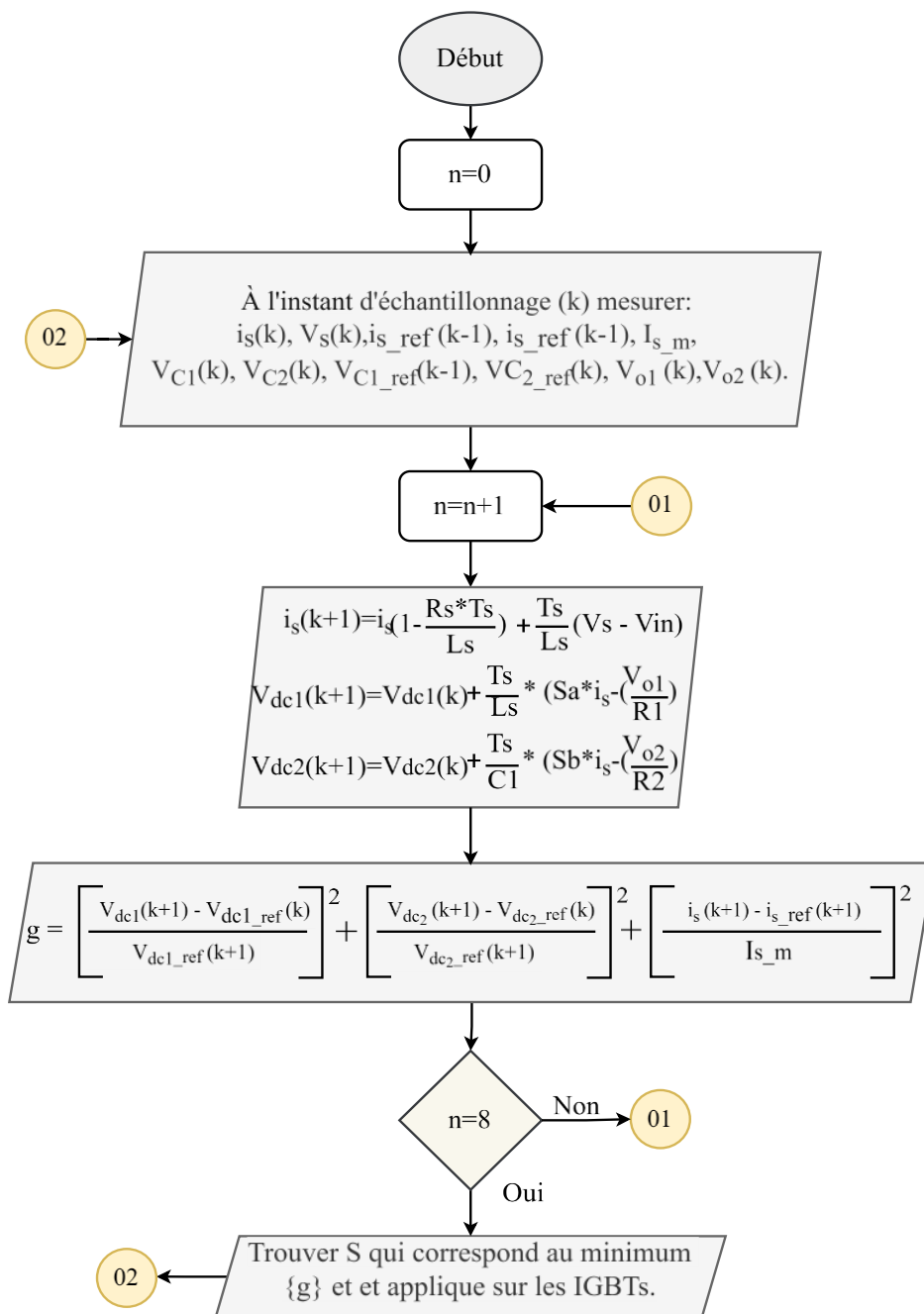


FIGURE III.5. Diagramme de l’algorithme du contrôle prédictif pour le redresseur PUC5.

III.5 Résultats de simulation

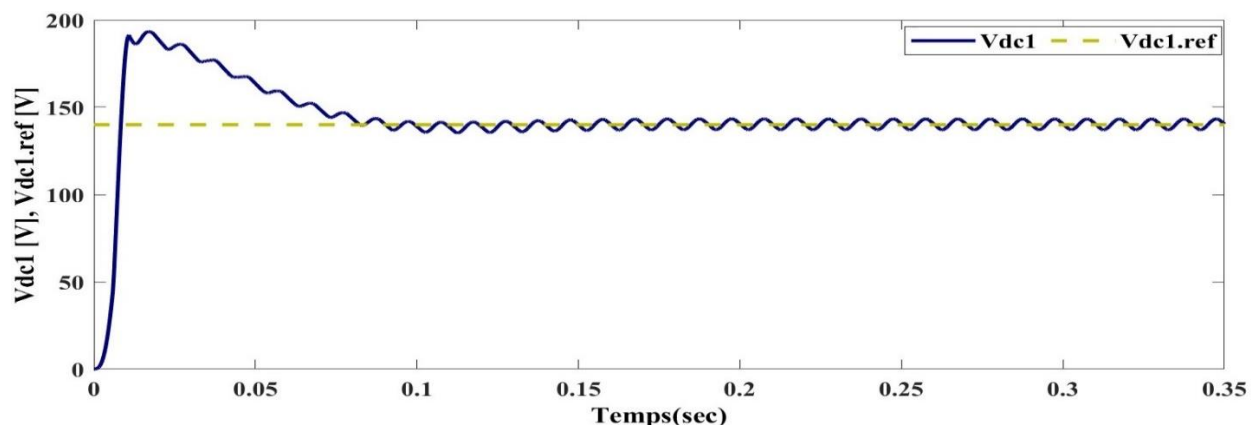
Différents tests ont été appliqués au redresseur PUC5 afin d'évaluer l'efficacité du régulateur. Les simulations ont été réalisées en utilisant l'environnement Matlab/Simulink pour les paramètres de simulation donnés dans le Tableau III.2.

TABLEAU II.2 Les paramètres de simulation

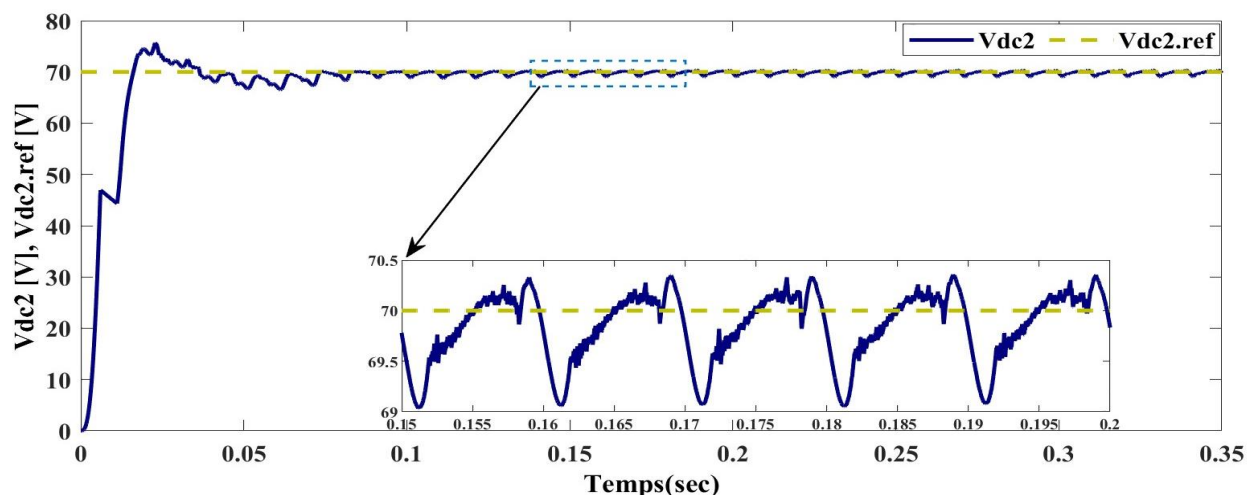
Paramètre	Les valeurs
Voltage de la source (V_s)	120V
La fréquence de la source (f_s)	50Hz
L'inductance de la source (L_s)	5mH
La résistance de la source (R_s)	0,01 Ω
La capacité de la charge (C_1 & C_2)	1100 μ F
La résistance de la charge ($R1$ & $R2$)	80 Ω
Gains du contrôleur PI (K_p et K_i)	$K_p = 0.12$, $K_i = 6$
Tensions de références	Vdc1_ref=140V, Vdc2_ref=70V

1) Test en régime permanent

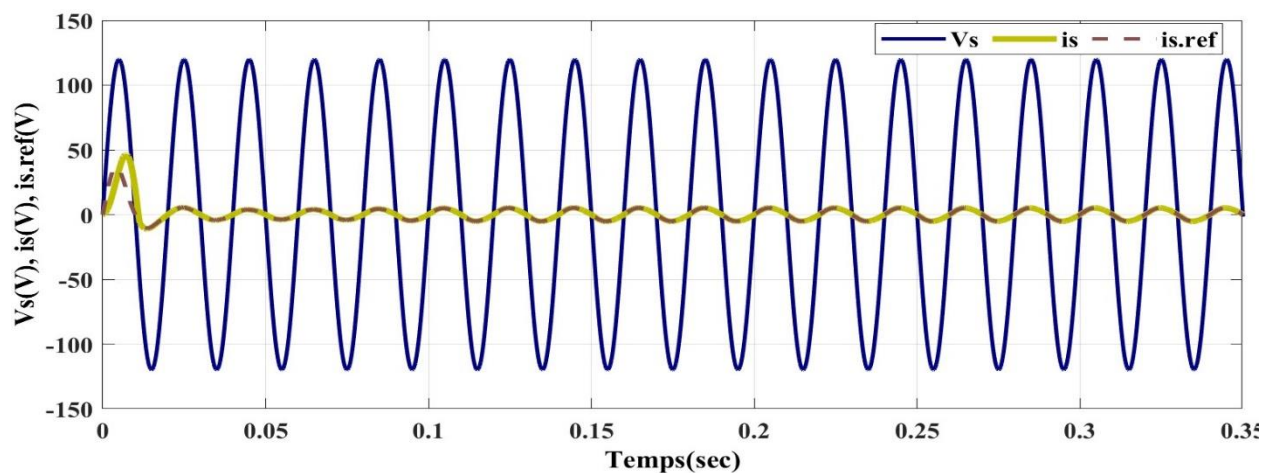
Le test en régime permanent est effectué avec des résistances de charge égales ($R1 = R2 = 80\Omega$). Les résultats de la simulation sont présentés dans la Figure III.6. À partir de cette figure, il est clairement visible que les tensions des deux condensateurs Vdc1 et Vdc2 ont été maintenues à leurs valeurs de référence (Figure III.6(a), (b)). Le courant provenant de la source est sinusoïdal et en phase avec la tension de la source (Figure III.6(c)), ce qui indique un fonctionnement à facteur de puissance unitaire. Le THD (Distorsion Harmonique Totale) du courant de la source est de **2.64 %** (Figure III.6(h)). Figure III.6(d), (e)) représente les tensions et les courants des charges résistives à la sortie du redresseur PUC5. Figure III.6(f)) illustre la tension à 5 niveaux à l'entrée du redresseur PUC5.



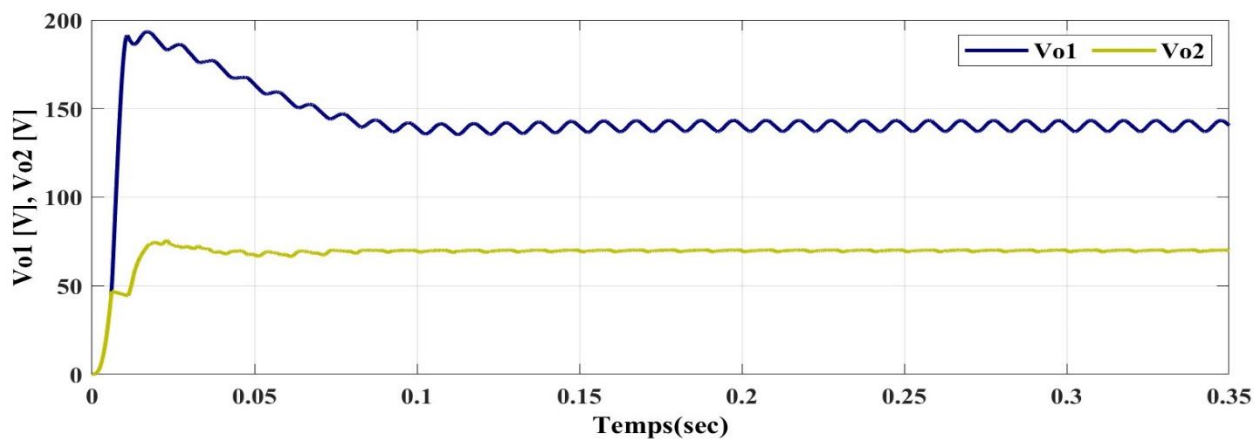
(a) Tension du bus continu Vdc1



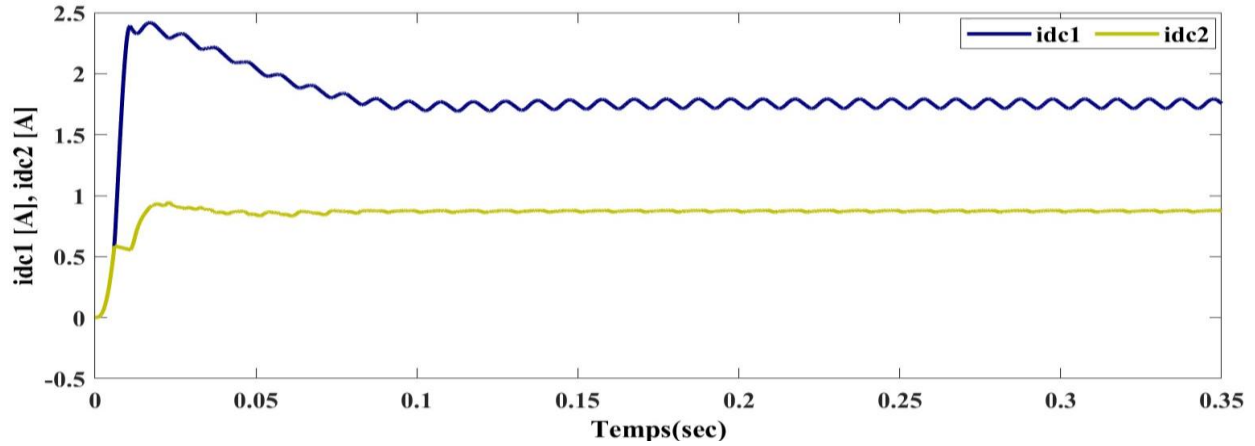
(b) Tension de bus continu V_{dc2}



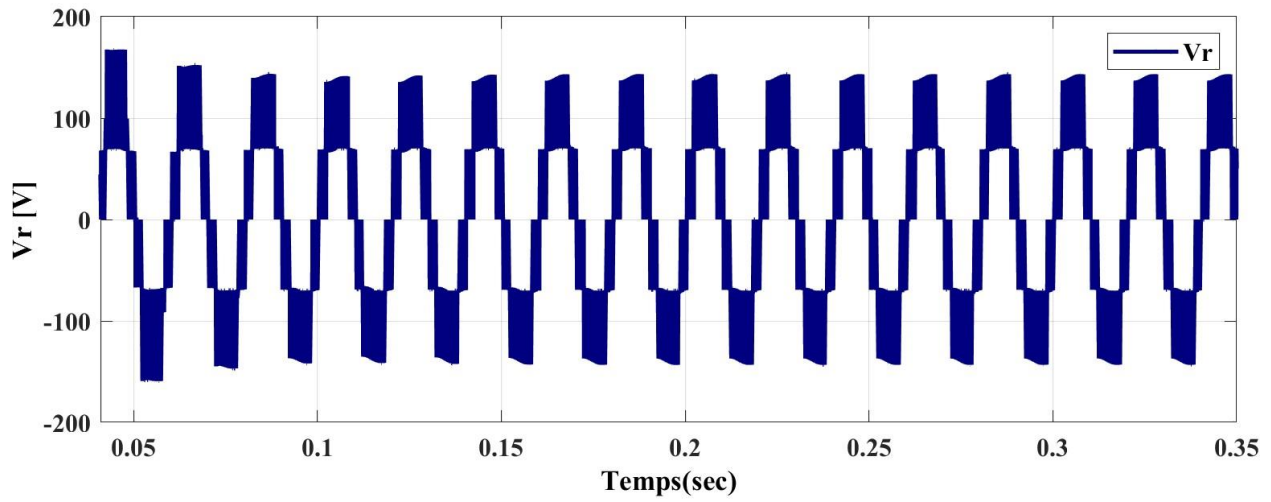
(c) Courant et tension de source



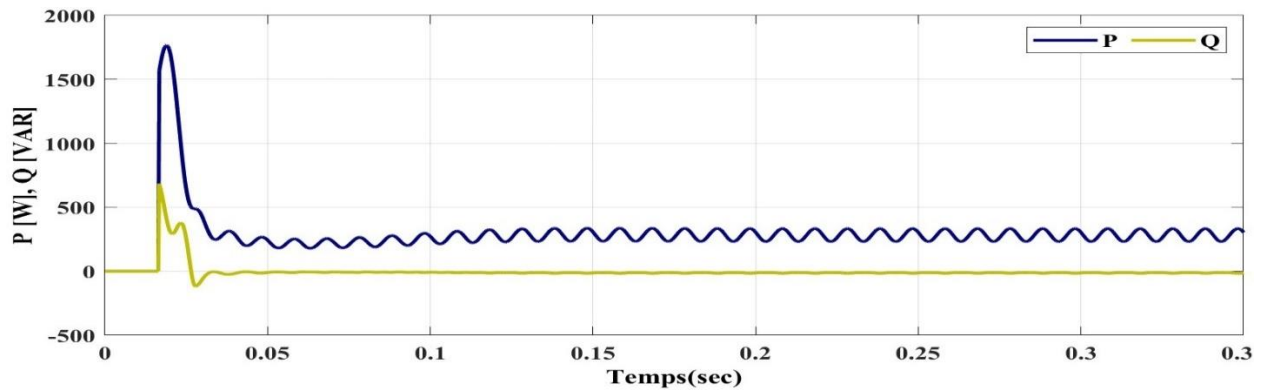
(d) Tensions aux bornes de charge R1&R2



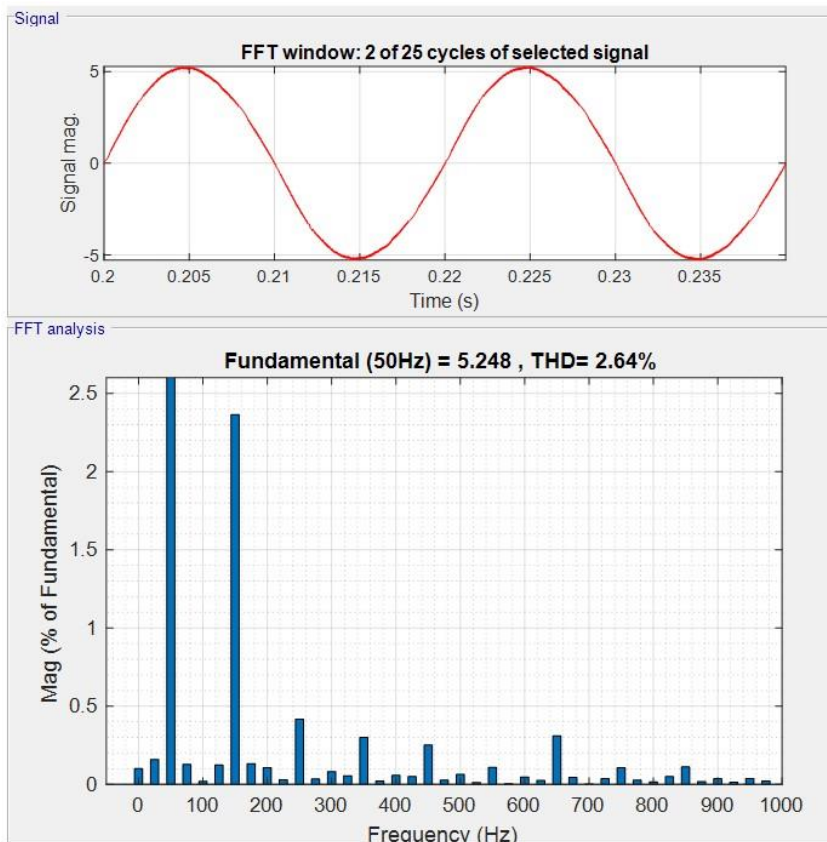
(e) Courants de charge R1&R2



(f) Tension d'entrée 5 niveaux de Redresseur PUC5



(g) Puissance active (P) et réactive (Q) de la source

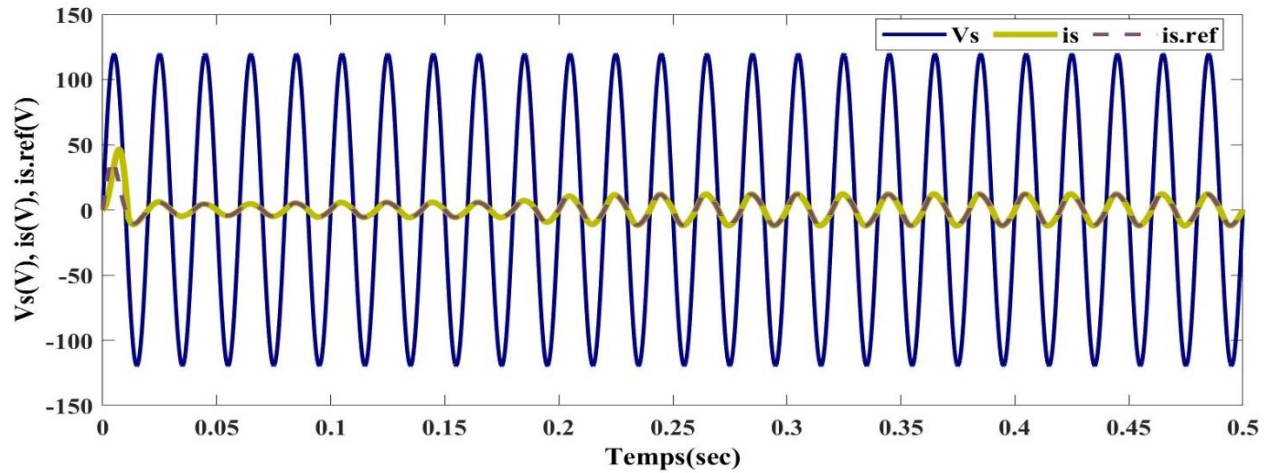


(h) Analyse spectrale du courant de source

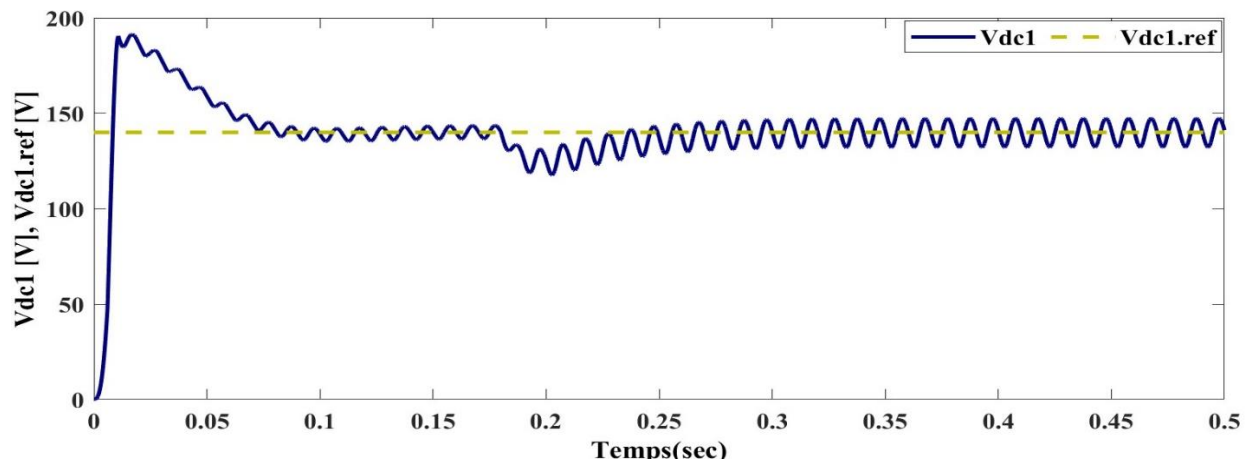
FIGURE III.6 Résultats de simulation de redresseur multiniveaux PUC5 avec la commande FCS-MPC.

2) Tests de variation de charge

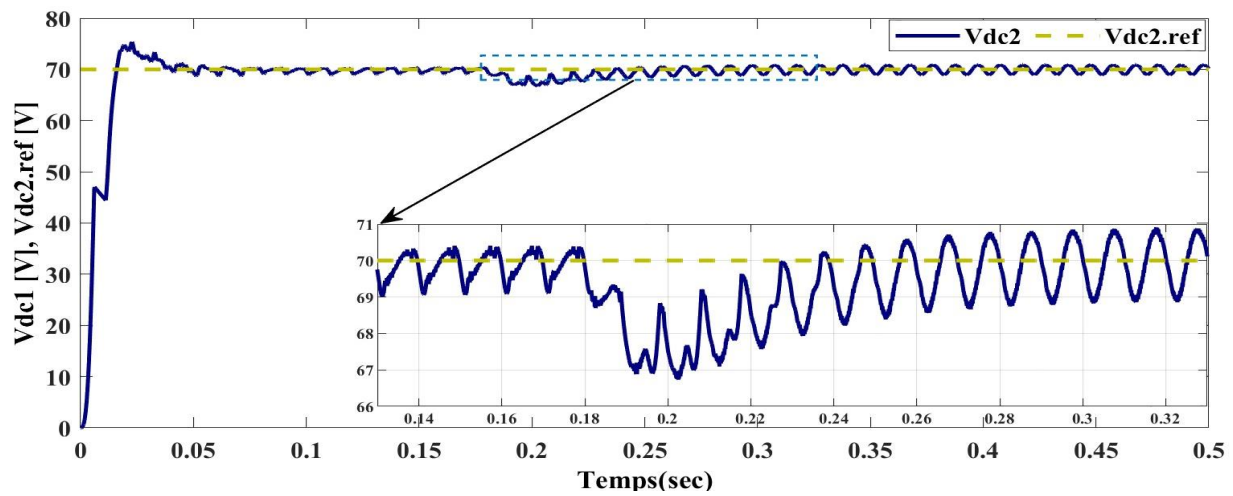
Le premier test de changement de charge est réalisé comme suit : initialement, les deux charges étaient réglées à $R_1 = R_2 = 80\Omega$. Ensuite, à l'instant $t=0.18s$, la résistance R_1 a été variée de 80Ω à 30Ω (Figure 7), tout en maintenant la valeur de la deuxième charge inchangée ($R_2 = 80\Omega$), simulant ainsi une augmentation du courant de la source Figure III.7 (a). La tension de bus continu V_{dc1} subit une légère variation à l'instant de variation de charge et continue de suivre sa référence Figure III.7 (b), par contre la tension V_{dc2} reste inchangée Figure III.7 (c). De l'autre côté, on constate une augmentation de courant (i_{dc1}) et de la tension aux bornes de la charge R_1 (V_{o1}), tandis que le courant (i_{dc2}) et la tension (V_{o2}) de la charge R_2 n'ont pas été affectés par ce changement Figure III.7 (d), (e). Figure III.7 (g) montre la tension à 5 niveaux à l'entrée du PUC5.



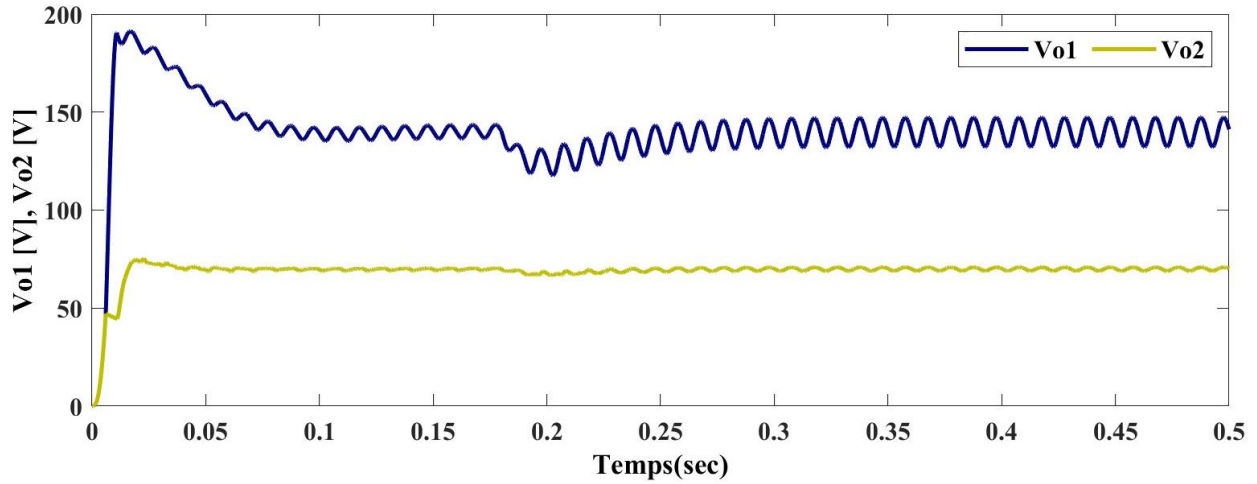
(a) Courant et tension de source



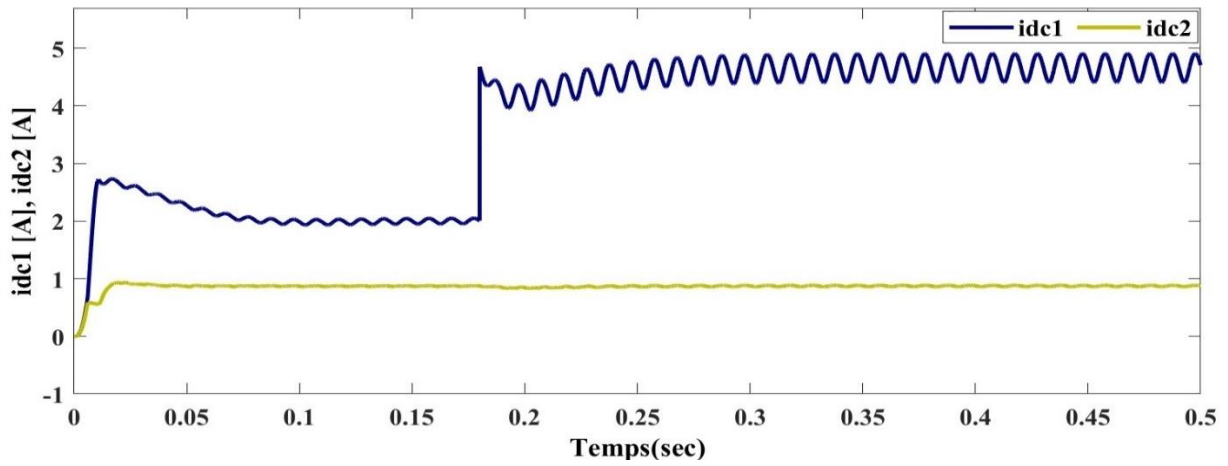
(b) Tension du bus continu Vdc1



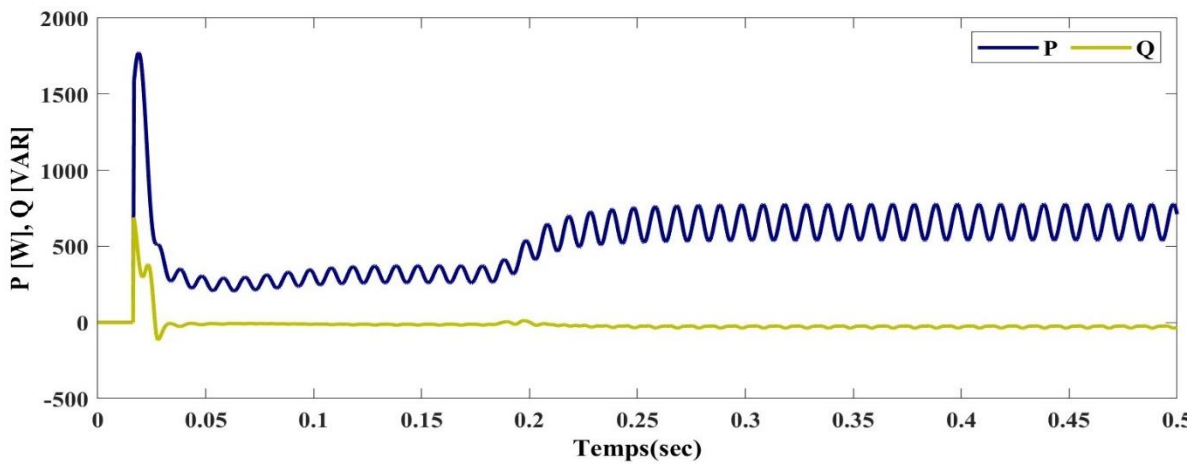
(c) Tension du bus continu Vdc2



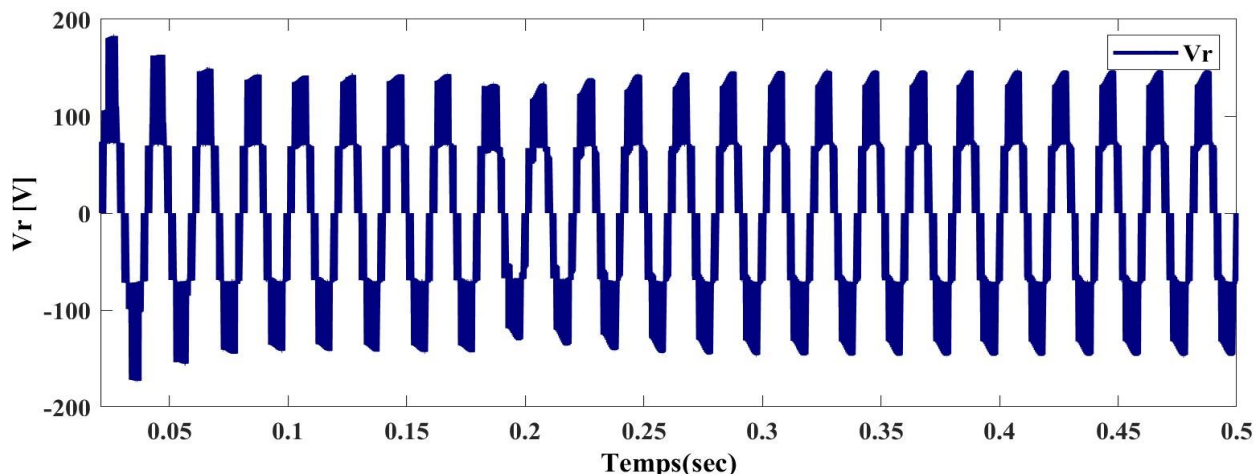
(d) Tensions aux bornes de charge R1&R2



(e) Courants de charges R1&R2



(f) Puissance active (P) et réactive (Q) de la source

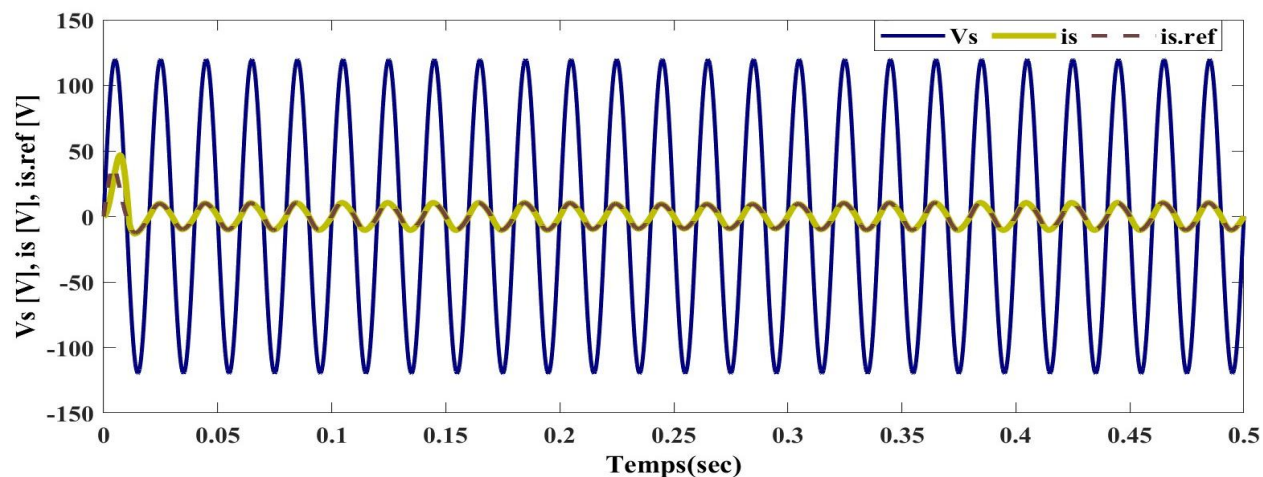


(g) Tension d'entrée du redresseur PUC5

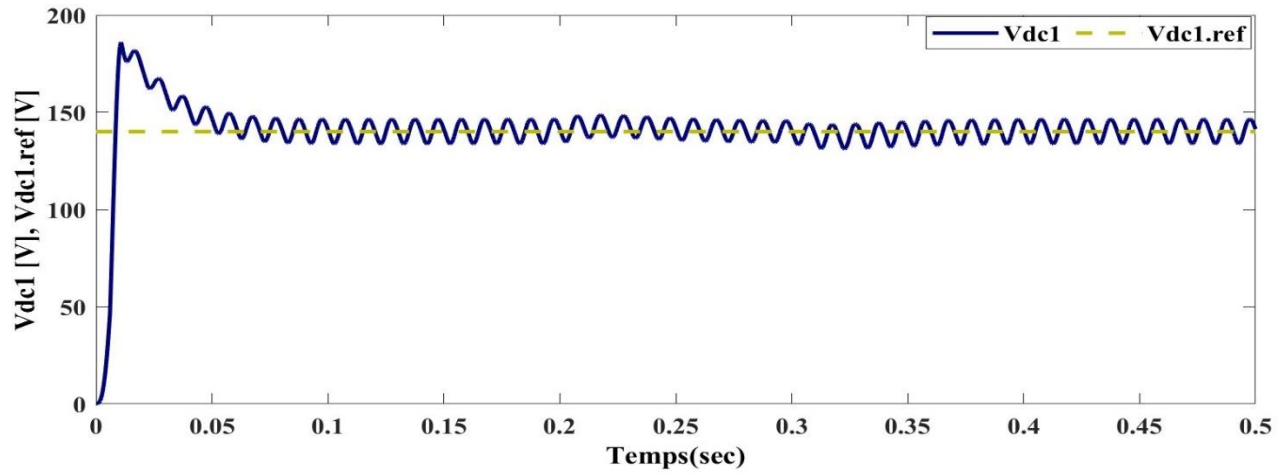
FIGURE III.7 Résultats de simulation de redresseur multiniveaux PUC5 avec la commande FCS-MPC avec variation de charge R1.

Le deuxième test a été réalisé en faisant varier la résistance R2 de 80 Ω à 60 Ω, à l'instant 0.2s puis en la ramenant à 80 Ω à l'instant 0.3s tout en gardant R1 = 80 Ω. Figure III.8 présente

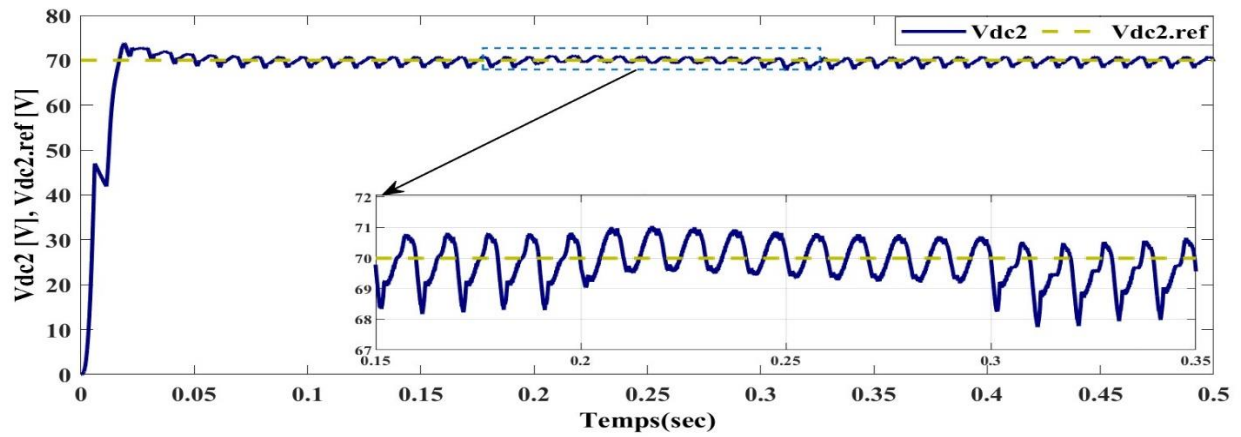
Le seul changement observé a été au niveau du courant i_{dc2} uniquement. Après avoir changé la valeur de résistance R2, la valeur du courant i_{dc2} subit une augmentation de 25%. Puis, lorsque nous avons rétabli la résistance à sa valeur initiale de 80 ohms, le courant i_{dc2} est revenu à sa valeur précédente. Quant aux autres résultats, tels que les tensions et les courants dans le système, ils sont restés stables et n'ont pas été affectés par le changement de résistance.



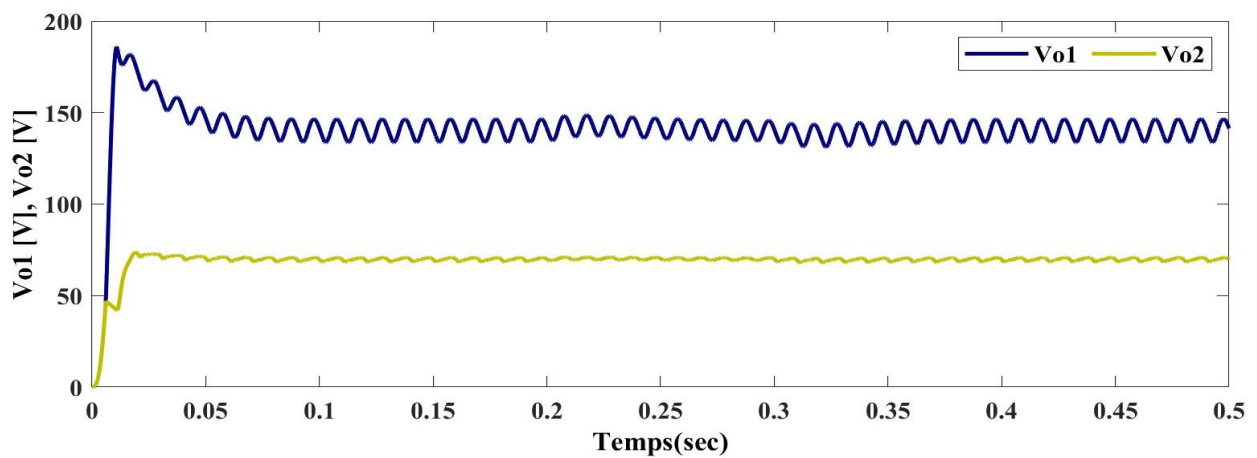
(a) Courant et tension de source



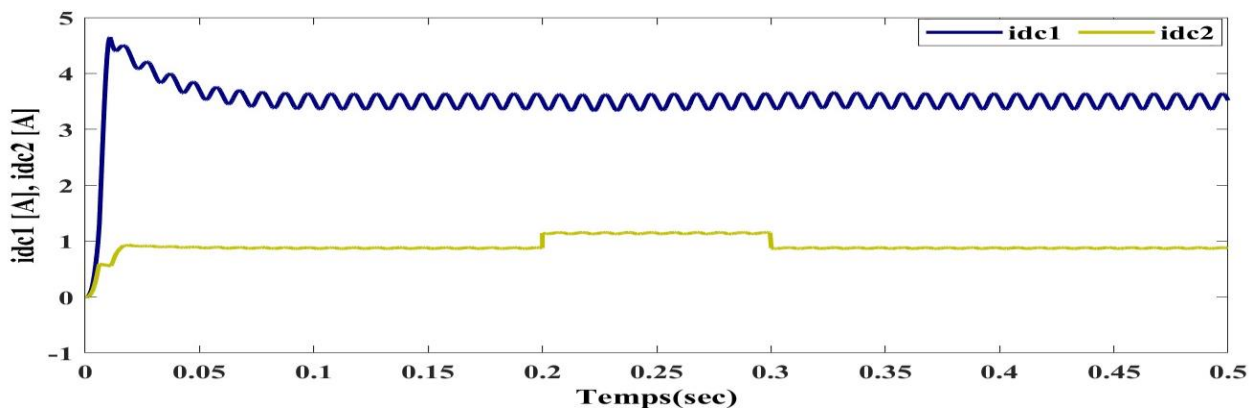
(b) Tension du bus continu Vdc1



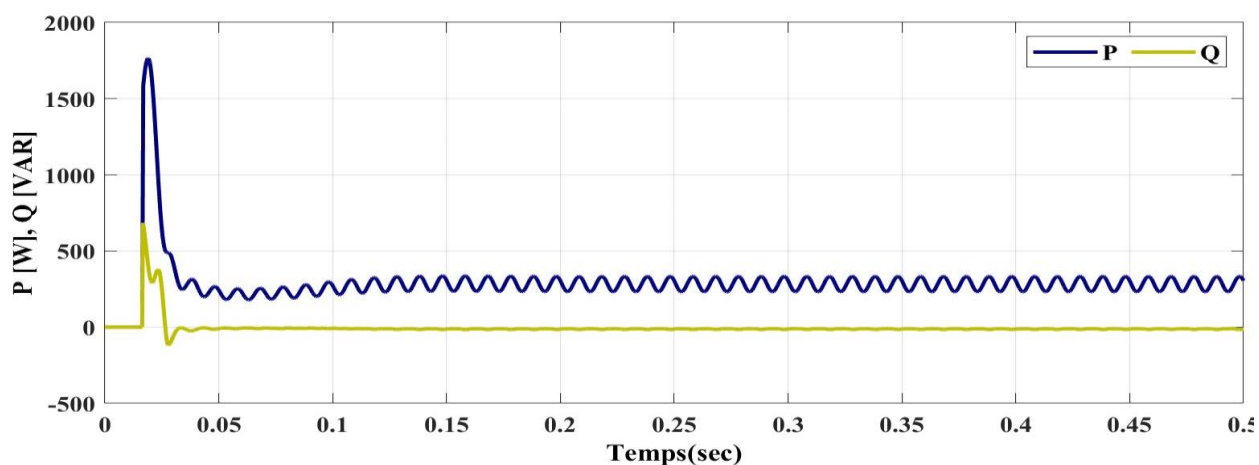
(c) Tension du bus continu Vdc2



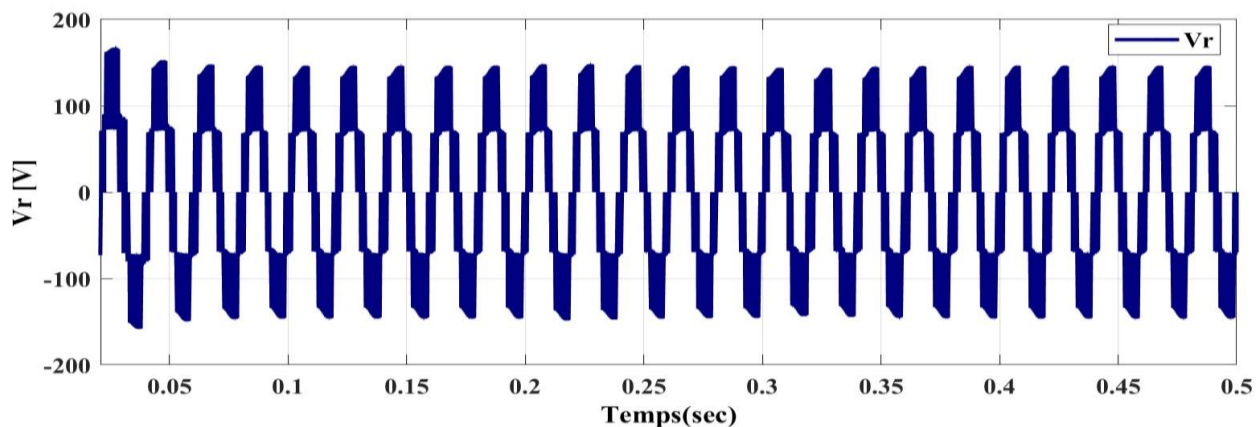
(d) Tensions aux bornes de charge R1&R2



(e) Courants des charges R1&R2



(f) Puissance active (P) et réactive (Q) de la source



(g) Tension d'entrée du redresseur PUC5

FIGURE III.7 Résultats de simulation de redresseur multiniveaux PUC5 avec la commande FCS-MPC avec variation de charge R2.

À partir de ces deux tests, il est visible que le régulateur est capable de fournir la puissance requise aux charges tout en maintenant les tensions des charges régulées à leurs valeurs de référence. De plus, il est observable que le courant provenant de la source a un faible contenu harmonique et est en phase avec la tension de la source. Le tableau III.3 illustre le niveau de THD durant les deux tests, on remarque que le THD est maintenu à un niveau inférieur à 5%, ce qui prouve la robustesse du système de control à base de la commande prédictive FCS-MPC.

TABLEAU III.3 Analyse spectrale du courant de source

Tests	<i>Test1</i> $R1=80\Omega, R2=80\Omega$	<i>Test1</i> $R1=80\Omega \rightarrow 30\Omega,$ $R2=80\Omega$	<i>Test2</i> $R1=80\Omega$ $R2=80\Omega \rightarrow 60\Omega,$
THDi%	2.64%	2.96%	3.10%

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre un contrôleur prédictif de modèle à ensemble de commande fini (FCS-MPC) est proposé pour un redresseur PUC à 5 niveaux (PUC5) correcteur de facteur de puissance (PFC) à double sorties. Le contrôleur proposé utilise les erreurs de tension de sortie (les tensions des condensateurs) et l'angle de phase de la tension du réseau pour générer le courant de référence de la source. Le contrôleur MPC sélectionne ensuite l'entrée de commande appropriée minimisant une fonction de coût nouvellement conçue qui utilise les erreurs d'état normalisées. Les résultats de simulation présentés ont montré une performance dynamique rapide et de grandes capacités de suivi du contrôleur proposé, où les deux tensions de sortie de redresseurs étaient contrôlées à leurs valeurs de référence avec un facteur de puissance unitaire et une faible $THD < 5\%$ du courant de la source. En somme, le convertisseur PUC5 s'avère être une solution performante et fiable pour les applications de redressement multi-niveaux et pour des futures applications au chargeurs des batteries des véhicules électriques.

Conclusion Générale

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre d'étude d'une technique de commande avancée, à savoir la commande prédictive, appliquée au redresseur multi-niveau à double sorties de type PUC monophasé avec correcteur de facteur de puissance PFC a pour but d'améliorer sa performance.

Pour ce faire, dans le premier chapitre nous avons abordé le concept de la qualité de l'énergie électrique, en mettant l'accent sur les harmoniques. Nous avons examiné également les solutions traditionnelles et modernes pour atténuer ces perturbations.

Dans le deuxième chapitre, nous avons étudié le principe et la structure d'un redresseur monophasé à deux niveaux, où deux structures de contrôle du courant sont utilisées pour commander ce redresseur : le contrôle par hystérésis et le contrôle prédictif. Les résultats de la simulation obtenus montrent les performances et l'efficacité des algorithmes de contrôle, où le contrôle prédictif montre une meilleure efficacité en termes d'élimination des harmoniques.

Dans le troisième chapitre, nous avons employé un redresseur de type PUC5. Ce convertisseur se distingue par une efficacité énergétique significative puisqu'il permet d'obtenir 5 niveaux de tension avec seulement six interrupteurs et deux condensateurs. Nous avons effectué des tests par simulation qui nous ont montré que ce système proposé est le plus efficace en termes de forme de courant absorbée (THD).

Comme perspectives au travail débuté dans ce mémoire, on pourrait toutefois étendre et approfondir l'étude aux points suivants :

- Validation expérimentale des structures de commande étudiées.
- Simulant le redresseur PUC5 en effectuant des tests expérimentaux avec un prototype basse puissance utilisant un système de stockage d'énergie par batterie (BESS) comme charge.

Références Bibliographiques

[1] Livre Blanc “*Power Quality: La qualité de l'énergie électrique (Code réseau EN50160)*”.
<https://fortop.be/fr/information/livres-blancs/puissance-qualite-energie-electrique/>

[2] SAHLI, A. (2021). *Optimisation de la qualité d'énergie dans les Smart grids* (Doctoral dissertation, Université Ferhat Abbas – Sétif).

[3] AOUIOUAT, A. F. (2023). *Contribution à la commande d'un filtre actif triphasé* (Doctoral dissertation, Université IBN KHALDOUN-Tiaret).

[4] KESSEL, A. (2012). *Correction du facteur de puissance à l'entrée d'un convertisseur ac/dc* (Doctoral dissertation, Université Ferhat Abbas – Sétif).

[5] BENCHAITA, L. (1998). *Etude, par simulation numérique et expérimentation, d'un filtre actif parallèle à structure courant avec une nouvelle méthode de contrôle-commande* (Doctoral dissertation, Université Henri Poincaré-Nancy 1).

[6] Qualité de réseau électrique” Sept étapes pour réduire les problèmes d'harmoniques des variateurs de fréquence”

<https://www.fluke.com/fr/apprendre/blog/qualite-du-reseau-electrique/sept-etapes-pour-reduire-les-problemes-d-harmoniques-des-variateurs-de-frequence>.

[7] MOHAMMED, B., & MOURA, B. (2022). *Utilisation d'un convertisseur multi-niveaux de type PUC dans un Système de filtrage actif* (Doctoral dissertation, faculté des sciences et de la technologie univ bba).

[8] BOUCHAKOUR, S. (2015). *Contribution à l'étude et commande d'un couplage des systèmes hybrides (réseau et photovoltaïque) pour la production d'énergie électrique* (Doctoral dissertation).

[9] IEEE Standard 519, «IEEE recommended practice and requirement for harmonic control in electric power systems. In IEEE Std 519-2014,» Piscataway, Vols. 1, p. 1–29, 2014

[10] Khor, M. S. (2006). *Amélioration de la qualité de l'énergie à l'aide de compensateurs actifs: série, parallèle ou conditionneurs unifiés de réseaux électriques* (Doctoral dissertation).

[11] Nia, A. S. (1996). *Contribution à l'étude théorique et expérimentale d'un filtre actif parallèle à commandes analogique et numérique temps réel* (Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Lorraine).

[12] Abdelli, Y. (2005). *Étude et commande de convertisseurs statiques multifonctions en vue de l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique* (Doctoral dissertation, Nantes).

- [13] CEI 1000-2-4 (02.1994) « *compatibilité électromagnétique (CEM). Partie 2 : environnement. Section 4 : niveaux de compatibilité dans les installations industrielles pour les perturbations conduites à basse fréquence* ».
- [14] IEEE Std 1531. 2003 “*IEEE Guide for application and specification of harmonic filters*”.
- [15] Akagi, H. (2005). Active harmonic filters. *Proceedings of the IEEE*, 93(12), 2128-2141.
- [16] Meriem MERAI, Mohamed Wissem NAOUAR, Ilhem SLAMA-BELKHODJA. Compensation des courants harmoniques et réactifs dans un réseau électrique. *Technique de l'ingénieur*, 2018, Réf : D4267 v1
- [17] De Gusseme, K., Van de Sype, D. M., Van den Bossche, A. P., & Melkebeek, J. A. (2005). Digitally controlled boost power-factor-correction converters operating in both continuous and discontinuous conduction mode. *IEEE transactions on industrial electronics*, 52(1), 88-97.
- [18] Kanaan, H. Y., & Al-Haddad, K. (2008). Réduction du TDH d'un redresseur triphasé par réglage du courant injecté. *Revue internationale de génie électrique*, 11(1), 41-68.
- [19] Maswood, A. I., & Liu, F. (2007). A unity-power-factor converter using the synchronous-reference-frame-based hysteresis current control. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 43(2), 593-599.
- [20] Kazmierkowski, M. P., & Malesani, L. (1998). Current control techniques for three-phase voltage-source PWM converters: A survey. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 45(5), 691-703.
- [21] Abdusalam, M. M. (2008). Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales. *These de doctorat, Université Henri Poincaré-Nancy-I-France*.
- [22] Rodriguez, J., & Cortes, P. (2012). *Predictive control of power converters and electrical drives*. John Wiley & Sons.
- [23] Bouafia, A. (2014). *Techniques de commande prédictive et floue pour les systèmes d'électronique de puissance: application aux redresseurs à MLI* (Doctoral dissertation).
- [24] Shahraki, E. G. (2003). *Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques* (Doctoral dissertation, Université Henri Poincaré-Nancy 1).
- [25] B,YACINE; C,AISSA, «*Commande prédictive d'un redresseur triphasé,*» Mémoire de Master Industries Electroniques, Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi -BBA, 2020.
- [26] Bouafia, A. (2014). *Techniques de commande prédictive et floue pour les systèmes d'électronique de puissance: application aux redresseurs à MLI* (Doctoral dissertation).
- [27] Chaoui, A., Gaubert, J. P., & Krim, F. (2010). Power quality improvement using DPC

controlled three-phase shunt active filter. *Electric Power Systems Research*, 80(6), 657-666.

[28] Lee, C. K., & Hui, S. Y. (2012). Reduction of DC-bus voltage fluctuation in multilevel inverters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27(8), 3443-3453. DOI: 10.1109/TPEL.2012.2188912

[29] Kouro, S., Perez, M. A., Rodriguez, J., Llor, A. M., & Young, H. A. (2015). Model predictive control: MPC's role in the evolution of power electronics. *IEEE industrial electronics magazine*, 9(4), 8-21.

[30] MOHAMMED, B., & MOURA, B. (2022). *Utilisation d'un convertisseur multi-niveaux de type PUC dans un Système de filtrage actif* (Doctoral dissertation, faculté des sciences et de la technologie univ bba).

[31] Ameen, N. A., & Kennel, R. (2010, October). Realization of the explicit solution of model-based predictive control for electric drive applications using rt-linux. In *Real-Time Linux Workshop, RTL12 WS*.

[32] Makhamreh, H., Trabelsi, M., Kükrer, O., & Abu-Rub, H. (2019, April). Model predictive control for a PUC5 based dual output active rectifier. In *2019 IEEE 13th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG)* (pp. 1-6). IEEE.

[33] Vahedi, H., & Al-Haddad, K. (2016). A novel multilevel multioutput bidirectional active buck PFC rectifier. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63(9), 5442-5450.

[34] Makhamreh, H., Kanzari, M., & Trabelsi, M. (2023). Model predictive control of a PUC5-based dual-output electric vehicle battery charger. *Sustainability*, 15(19), 14483.

Résumé :

Le redresseur à modulation de largeur d'impulsion (PWM) est une solution avancée pour optimiser la conversion d'énergie et améliorer la qualité de l'alimentation électrique. Cette mémoire explore d'abord un redresseur monophasé à deux niveaux, intégrant deux stratégies de contrôle : le contrôle par hystérésis et le contrôle prédictif. Les tests et simulations ont démontré que le contrôle prédictif offre une efficacité accrue en réduisant la distorsion du courant d'entrée. Ensuite, une étude est menée pour améliorer la qualité de l'énergie en utilisant un redresseur multiniveau de type PUC à cinq niveaux. Les résultats montrent que le contrôle prédictif du courant, appliqué à un redresseur monophasé basé sur un redresseur PUC5, surpasse les topologies conventionnelles en termes de performance globale.

Mots-clés : Redresseur à modulation de largeur d'impulsion, le contrôle par hystérésis, contrôle prédictif, qualité de l'énergie, réduction des harmoniques, Redresseur Multi-niveaux PUC5.

ملخص:

يعد مقوم التحويل بالعرض النبضي (MLI) حلاً متقدماً لتحسين تحويل الطاقة وتحسين جودة التغذية الكهربائية. يقدم هذا العمل أولاً مقوم أحادي الطور بمستويين، مدمجاً بين استراتيجيتين للتحكم: التحكم بالتباطؤ والتحكم التنبؤي. أظهرت الاختبارات والمحاكاة أن التحكم التنبؤي يوفر فعالية متزايدة في تقليل تشوه تيار الإدخال. بعد ذلك، يتم إجراء دراسة لتحسين جودة الطاقة باستخدام مقوم متعدد المستويات من نوع PUC بخمسة مستويات. تظهر النتائج أن التحكم التنبؤي في التيار، عند تطبيقه على مقوم أحادي الطور يعتمد على مقوم PUC5، يتفوق على الطوبولوجيات التقليدية من حيث الأداء العام.

الكلمات المفتاحية: مقوم التحويل بالعرض النبضي، التحكم بالتباطؤ، التحكم التنبؤي، جودة الطاقة، تقليل التوافقيات، متعدد المستويات PUC5.

Abstract:

The pulse-width modulation rectifier (PWM) is an advanced solution for optimizing energy conversion and improving the quality of electrical power supply. This dissertation first explores a single-phase two-level rectifier, integrating two control strategies: hysteresis control and predictive control. Tests and simulations demonstrated that predictive control offers increased efficiency in reducing input current distortion. Then, a study is conducted to improve energy quality using a five-level PUC-type multilevel rectifier. The results show that predictive current control, applied to a single-phase rectifier based on a PUC5 rectifier, outperforms traditional topologies in terms of overall performance.

Keywords: Pulse-width modulation rectifier, hysteresis control, predictive control, energy quality, harmonic reduction, PUC5 multilevel rectifier.