

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد- تلمسان -

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen -

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER

Filière : Électrotechnique

Spécialité : Commandes électriques

Par : **BACHIR Asma et MERABTI Mohammed el amine.**

Étude et simulation d'un filtre actif parallèle

Multi-niveaux

Soutenu publiquement, le 30/ 09/2020, devant le jury composé de :

Mr S.M MELIANI	Président	M .C.A	U.A.B -Tlemcen
Mr M.A. BRIKCI NIGASSA	Encadrant	M.A.A	U.A.B -Tlemcen
Mr M.C. BENHABIB	Examineur	M.C.B	U.A.B -Tlemcen

Année Universitaire: 2019/2020

Dédicace

Je dédie ce mémoire

A l'Eternel, mon Dieu, le Tout puissant de m'avoir donné la force et l'énergie pour

Achevé mes études de master.

A mes chers parents

Pour leur patience, amour, soutien et encouragement.

A mes frère et sœurs.

A Toute la famille MERABTI, GHERRAS & BOUANANI grand et petit.

A Mes amis qui m'ont beaucoup aidé :

« Anes Safaa, abde lhamid Khouani, Lotfi Hamiti, Mohammed Oubachir »

A mes amies :

Boumediene, abde illah, abde lghani, Chakib, charaf, Ramzi, Oussama, Ibrahim,

Mahyadine, Wassini, moundir, Mahdi, Ali, Rima, Djihane, Kamal,

Abde Allah, sidi Mohammed.

A l'Equipe de restauration:

Abde krim, Abde nour, houssin way way, abde hafid,

Hamid,imed, ilyes, hasni.

A mes frères:

Djamal dine, Aissam, Riad, fethi halawa, abde Malek, Farouk, Yassin,

Ayoub, Taha, Younes, Sanaa, Marwa.

Younes Beni mellal 2020 happy New year "karima hnaya"

A Mon binôme : Asma BACHIR.

MERABTI Mohammed El-Amine.

Dédicace

Je dédie ce fruit de travail :

A ma très chère maman, pour sa tendresse, sa bienveillance, son Encouragement, pour ce qu'elle a fait depuis mon enfance jusqu'à ce jour.

A mon cher père pour sa générosité, sa bonté, je te remercie Cher papa du fond du cœur pour tout ce qui tu as fait pour moi.

A mes frères et A mon chère sœur.

A mon défunt grand-père que dieu tout-puissant ait pitié de lui.

Et à tous les membres de ma grande famille qui porte Les noms de " BACHIR" et " MOUSSAOUI".

A mon binôme M.A. MERABTI.

A mes amies que j'aime particulièrement dans «Union Générale Estudiantine Libre-Tlemcen »
Spécialement " Mira, Amina, Fadila, Asma, Shefaa, Dalale, Marwa, Sarra, Fatna, Noria, Boualame,
Lakheder, Samir , Maghnone ".

A mes compagnons "Rokia ,Sarrah ,Bouchra ,Somia et Imen" et à tous mes amis sans exception en particulier ceux de la promotion de la 2^{ème} Année Master Commande Electrique 2019/2020.

A tous mes enseignants et enseignantes.

En fin à tout ce qui nous aime et qu'on aime

BACHIR ASMA.

Remercîment

Grace à Dieu le tout puissant qui nous a donné la force et la patience nécessaires à l'accomplissement de ce mémoire de fin d'étude.

Nous tenons à remercier, Mr M. A. BRIKCI NIGASSA Maître Assistant à l'université de Tlemcen pour sa patience, sa diligence et surtout pour sa disponibilité et son encadrement, le temps et les précieux conseils qu'il nous a prodigués tout au long de notre travail.

Nos remerciements vont également à Monsieur S. M. MELIANI, maître de conférences à l'université de Tlemcen qui a bien voulu présider notre jury de mémoire.

Nos vifs remerciements vont aussi à Monsieur M. C. BENHABIB Maître de conférences à l'université de Tlemcen pour avoir accepté d'examiner notre travail.

Nous remercions Monsieur le responsable du Master Mr A. MECHERNENE Maître de conférences à l'université de Tlemcen pour la qualité d'enseignement et ses efforts fourni pour notre formation.

Nous tenons à exprimer nos sincères gratitudees et nos profondes reconnaissances à toutes les personnes qui nous ont aidées à la réalisation de ce modeste travail.

BACHIR Asma, MERABTI Mohamed el Amine

Tlemcen le 30/09/2020

Table des matières

<i>Introduction générale</i>	1
<i>CHAPITRE I : Qualité l'Energie Electrique</i>	
<i>I.1 Introduction</i>	2
<i>I.2 Perturbations Harmoniques</i>	2
<i>I.2.1 Définition Harmoniques</i>	2
<i>I.2.2 Sources des harmoniques</i>	3
<i>I.2.3 Effets des harmoniques</i>	3
<i>I.2.3.1 Effets instantanés</i>	3
<i>I.2.3.2 Effets à long terme</i>	3
<i>I.2.4 Conséquences néfastes des harmoniques</i>	3
<i>I.2.5 Caractéristiques des harmoniques</i>	4
<i>I.2.5.1 Décomposition en série de Fourier</i>	4
<i>I.2.5.2 Taux de distorsion harmonique(THD)</i>	5
<i>I.2.5.3 Le facteur de puissance (FP)</i>	5
<i>I.2.6 Les Normes</i>	6
<i>I.2.6.1 Normes et réglementations sur les harmoniques</i>	6
<i>I.2.6.2 Normes d'appareillage</i>	6
<i>I.3 Solutions de dépollution des réseaux électriques</i>	7
<i>I.3.1 Les solutions traditionnelles</i>	7
<i>I.3.2 Solutions modernes de dépollution</i>	8
<i>I.3.2.a/ filtrage actif de puissance</i>	8
<i>I.3.2.a.1/ Filtre actif parallèle</i>	9
<i>I.3.2.a.2/ Filtre actif série</i>	10
<i>I.3.2.a.3/ Combinaison parallèle série actif</i>	10
<i>I.3.2.a.4/ Filtrage hybride</i>	10
<i>I.4 Techniques de Commande en courant</i>	11
<i>I.4. 1 Commande par hystérésis</i>	11
<i>I.4.2 commande par MLI</i>	12
<i>I.4.2.1 MLI Inter Sélective</i>	12
<i>I.4.2.2 MLI Vectorielle</i>	12
<i>I.5 Conclusion</i>	13

Chapitre 2 : Etude et simulation d'un filtre actif parallèle de puissance à 3 fils

II.1 Introduction.....	15
II. 2 Principe de fonctionnement de FAP.....	15
II .2.1 <i>Topologies de FAP de puissance</i>	16
II.2.1.1 <i>Filtre actif de puissance à 2 bras avec condensateurs à point milieu</i>	16
II.2.1.2 <i>Filtre actif de puissance à 3 bras</i>	17
II.3 Structure Générale de FAP A trois bras.....	18
II.3.1 <i>Partie Puissance</i>	19
II.3.2 <i>Partie commande</i>	20
II.3.2.1 <i>Méthode des puissances réelles et imaginaires instantanées (p-q)</i>	21
II.4 Simulation d'une charge triphasée équilibrée.....	25
II.4.1 <i>Avant filtrage</i>	25
II.4.1.1 <i>modèle de simulation</i>	25
II.4.1.2 <i>paramètre de simulation</i>	26
II.4.1.3 <i>Résultats de Simulation</i>	26
II.4.2 <i>Après filtrage</i>	27
II.4.2.1 <i>modèle de simulation</i>	28
II.4.2.2 <i>paramètre de simulation</i>	28
II.4.2.3 <i>Résultats de Simulation</i>	28
II.5 Conclusion.....	34

CHAPITRE III : onduleur multi niveaux de tension

III.1 Introduction.....	36
III.2 Définition de l'onduleur.....	36
III.3 Les applications des onduleurs.....	37
III.4 Principe générale de fonctionnement de l'onduleur.....	37
III.5 Onduleur de tension.....	38
III.6 Les différents types d'onduleurs de tension.....	40
III.6.1 <i>Les onduleurs monophasés de tension</i>	40
III.6.2 <i>Les onduleurs de tension triphasée</i>	41
III.6.3 <i>Les onduleurs multi niveaux</i>	42
III.7 Intérêt des convertisseurs statiques multi-niveaux.....	42
III.8 Principe de l'onduleur multi-niveaux.....	42
III.9 Différentes topologie des onduleurs multi-niveaux.....	43
III.9.1 <i>Onduleur de tension à diode de bouclage (NPC)</i>	43
III.9.2 <i>Onduleur de tension a condensateur Flottant</i>	44
III.9.3 <i>Onduleur de tension en cascade</i>	45
III.10 Filtre actif de puissance à cinq niveaux.....	47
III.10.1 <i>Structure de SAPF à cinq niveaux</i>	47
III.11 Simulation du système et interprétations des résultats.....	49
III.11.1 <i>Simulation du système sans filtre</i>	50

III.11.2 Simulation du système Après filtrage	52
III.12 Conclusion.....	55
Conclusion Générale.....	56

Liste des figures

CHAPITRE I :

<i>Figure I.1 : représentation d'un signal Harmonique</i>	2
<i>Figure I.2 : représentation Le facteur de puissance</i>	5
<i>Figure I.3 : les filtres passifs</i>	8
<i>Figure I.4: commande par hystérésis</i>	9
<i>Figure I.5: principe de commande des courants par MLI</i>	10
Figure I.6: Représentation Conditionneur actif de puissance.....	10
Figure I.7: Représentation d'un filtre hybride (actif parallèle et passif parallèle).....	11
Figure I.7: Représentation d'un filtre hybride (actif parallèle et passif parallèle).....	11
Figure I.9 : Commande des courants par MLI.....	13

CHAPITRE II :

<i>Figure II .1 : principe du filtrage actif parallèle</i>	15
<i>Figure II .2: Onduleur de tension à 2 bras avec condensateurs à point milieu</i>	16
<i>Figure II.3 : onduleur de tension à trois bras pour un réseau électrique a 3 fils</i>	17
Figure II.4: structure générale de filtre actif parallèle d'onduleur de tension.....	18
Figure II.5 : structure d'un filtre actif parallèle basée à onduleur de tension.....	19
Figure II.6 : commandes d'un filtre actif parallèle de puissance.....	21
Figure II.7: Schéma de principe de la méthode séparation des puissances.....	23
<i>Figure II.8 : Boucle de régulation de la tension d'alimentation du filtre actif parallèle</i>	24
<i>Figure II.9: Méthode des puissances instantanées pour identifier les courants de référence</i>	25
Figure II.10 : Schéma d'un réseau triphasé à trois fils alimenté une charge non linéaire.....	26
Figure II.11: courbe de Tension de source triphasée avant le filtrage.....	27
<i>Figure II.12 : courbe de courant de charge phase (a)avant le filtrage</i>	27
Figure II.13 : THD de courant de source phase (a) sans FAP.....	27
<i>Figure II.14 : modèle de simulation de FAP étudié</i>	27
Figure II.15 : courbe de tension triphasée de source après le filtrage.....	28
Figure II.16 : courbe de courant de source phase (a) après le filtrage.....	28

Figure II.17 : courbe de courant de charge phase (a) après le filtrage.....	29
Figure II. 18 : courbe de courant de FAP phase (a).....	29
Figure II.19 : courbe de courant de source phase (b) après le filtrage.....	29
Figure II.20: courbe de courant de charge phase (b) après le filtrage.....	30
Figure II. 21 : courbe de courant de FAP phase (b).....	30
Figure II.22 : courbe de courant de source phase (c) après le filtrage.....	30
Figure II.23 : courbe de courant de charge phase (c) après le filtrage.....	31
Figure II. 24 : courbe de courant de FAP phase (c).....	31
Figure II. 25 : courbe de tension à la borne de condensateur de FAP.....	31
Figure II.26: THD de courant de source phase (a)après le filtrage.....	32
Figure II.27 : Les THD des trois phases de FAP.....	33

CHAPITRE III :

Figure III.1 : Schéma de principe de l'onduleur.....	36
Figure III.2 : Symbole et signal d'un onduleur.....	37
Figure III.3 : Fonctionnement et signal de l'onduleur dans le 1er demi-cycle.....	38
Figure III.4 : Signal complet de l'onduleur	38
Figure III.5 : Onduleur de tension en pont Monophasé	39
Figure III.6 : Signaux de commande et forme d'onde des tensions de sortie.....	39
Figure III.7 : Schéma de l'onduleur de tension À demi-pont.....	40
Figure III.8: Schéma de l'onduleur de tension deux niveaux en pont complet.....	40
Figure III.9 : Onduleur monophasé avec diviseur Capacitif.....	41
<i>Figure III.10 : Onduleur monophasé en demi pont</i>	41
Figure III.11 : Schéma d'onduleur de tension triphasé.....	42
Figure III.12: Onduleur à niveaux multiples à deux (a), à trois (b) et à m niveaux (c).....	43
Figure III.13 : Topologies d'onduleur NPC.....	43
Figure III.14 : Onduleurs à condensateurs flotteurs à trois et à quatre niveaux (phase A).....	45
Figure III.15 : Onduleur en cascade à 5 niveaux (phase A).....	46
Figure III.16 : Onduleur en cascade à 7 niveaux.....	46
Figure III.17 : Circuit de puissance du filtre actif parallèle à cinq niveaux proposé....	47
Figure III.18: Schéma d'un onduleur à diode flottante à cinq niveaux.....	48

Figure III.19: Circuit de puissance du filtre actif parallèle cinq niveaux proposé	49
Figure III.20: Réseau électrique triphasé Connecte à une charge non linéaire.....	50
Figure III.21: Tension monophasé de la source (Avant filtrage).....	50
Figure III.22: Courant de la charge non linéaire $I_c(a)$ (Avant filtrage).....	51
Figure III.23: THD Avant filtrage	51
Figure III.24: Réseau électrique triphasé Connecte à une charge non linéaire.....	52
Figure III.25: Réseau électrique triphasé Connecte à une charge Non linéaire (dans subsystem).....	52
Figure III.26: Tension monophasé de la source (Après filtrage).....	53
Figure III.27 : Courant de la source $I_s(a)$ (Après filtrage).....	53
Figure III.29 Courant de la charge non linéaire $I_c(a)$ (Après filtrage).....	54
Figure III.28 Courant de FAP $I_f(a)$ (Après filtrage).....	54
Figure III.30 : THD Après filtrage.....	54

Liste des tableaux

CHAPITRE I :

Tableau 1.1 : Valeurs des niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques (CEI-1 000-2-4).....	6
Tableau 1.2 : Limites des émissions de courants harmoniques (CEI-1000-3-2).....	7

CHAPITRE II :

Tableau II.1 : Tensions générées par l'onduleur de tension à 2 bras à point milieu capacitif.....	16
Tableau II.2 : Tensions générées par l'onduleur de tension à trois bras.....	17
Tableau II.3: Tensions générées par l'onduleur étudié.....	20
Tableau II.4 : Modes de compensation de la commande des puissances instantanées.....	24
Tableau II.5 : Modes de compensation de la commande des puissances instantanées.....	26
Tableau II.6 : paramètres de système avant filtrage.....	28
Tableau II.7 : paramètres de simulation de FAP.....	33

CHAPITRE III :

Tableau III.1 : Paramètres de simulation d'un filtre actif à cinq niveaux.....	48
Tableau III.2 : Paramètres de simulation pour ce système.....	50
Tableau III.3 : Paramètres du filtre actif de puissance parallèle.....	53
Tableau III.4 : comparaison THD entre FAP et FAP +Cinq niveau	55

Glossaire

FPB	: filtre passe bas
FPH	: filtre passe haut
FAS	: Filtre Actif Série
FAPP	: Filtre Actif Parallèle de puissance
FMV	: Filtre Multi Variables
MLI	: Modulation de Largeur d'Impulsion
SRF	: théorie du référentiel lié au synchronisme
THD	: Taux de Distorsion Harmonique
FFT	: Fast Fourier Transformer
IGBT	: Isolated Gate Bipolar Transformer
CEI	: Commission Electrotechnique Internationale
CENELEC	: Comité Européen de Normalisation en Electronique et en Electrotechnique
PLL	: Phase-Locked Loop (Boucle de verrouillage de phase)
I_{inj}	: Courant d'harmonique injecté sur le réseau
i_s	: Courant de la source
V_s	: Tension de la source
i_c	: Courant de la charge
i_f	: Courant injecté par le filtre
i_f^*	: Courant référence
V_f	: Tension imposée par l'onduleur
K	: constante du FMV
V_{dc}	: Tension aux bornes du condensateur de l'onduleur
C_{dc}	: Condensateur de stockage
R_s	: Résistance de court-circuit de réseau
L_s	: Inductance de court-circuit de réseau
R_c	: Résistance de ligne
L_c	: Inductance de ligne
R_{charge}	: Résistance de la charge
L_{charge}	: Inductance de la charge
$R_f L_f$: Inductance de filtre de sortie
X_α, X_β	: Valeur dans le repère ($\alpha\beta$)
p	: Puissance instantanée active
q	: Puissance instantanée réactive
\bar{p}, \bar{q}	: Puissance continue liée à la composante fondamentale active et réactive du courant
\tilde{p}, \tilde{q}	: Puissance alternative liées à la somme des composantes harmonique du courant.
I_{loss}	: Le courant de référence additionnel
K_p, K_i	: Les termes du correcteur PI
ξ	: Coefficient d'amortissement
ω_c	: Fréquence de la coupure
f_c	: Fréquence de la commutation
V_{cm}	: Tension du mode homopolaire.
V_{cm-eff}	: valeur efficace de la tension homopolaire.
Z_{cm}	: impédance interne du mode homopolaire
C_{ws}	: capacité parasite par phase entre l'enroulement et le stator.
C_{wr}	: capacité parasite entre l'enroulement et le rotor.
C_g	: capacité parasite par phase de l'entrefer.
E	: Tension principale de l'onduleur.

C1, C2, ... : capacités représentant les sources de tensions secondaires.
m : nombre de niveaux de l'onduleur NPC.
s : nombre de source de tension continue secondaire.
Vao , Vbo : Tensions simples à la sortie de l'onduleur NPC.
et Vco
k : nombre d'interrupteur de l'onduleur multi-niveaux.
D : nombre de diodes de bouclage de l'onduleur multi-niveaux.
Vm1, Vm2 : signaux de référence sinusoïdaux.
et Vm3
V1, V2 : signaux intermédiaires pour la MLI modifiée.
fm : fréquence du signal de référence. Am : amplitude du signal de référence.
fc : fréquence de la porteuse.
Ac : amplitude de la porteuse.
ma : taux de modulation.
mf : rapport de fréquence.
P : Nombre requis de porteuses pour la modulation sinusoïdale modifiée.

Introduction Générale

L'énergie électrique est un facteur essentiel pour le développement que ce soit sur le plan de l'amélioration des conditions de vie ou sur le plan du développement des activités industrielles. Le développement croissant de l'industrie a intégré à grande échelle des équipements à base d'électroniques de puissance, tels que les ponts redresseurs commandés ou non, ce qui à entrainer d'énormes perturbations au niveau des réseaux électriques. Ainsi, les utilisateurs connectés au réseau électrique sont soumis à une augmentation régulière d'harmonique et de déséquilibre des courants ainsi qu'une importante consommation de la puissance réactive. La présence de ces courants perturbés engendrées par ces différentes charges non-linéaires s'est traduite par l'apparition d'harmoniques et/ou de déséquilibres de tension. Ce qui peut engendrer des conséquences néfastes sur les équipements électriques. Cependant, les nouvelles réglementations internationales imposent aux consommateurs des limites aux harmoniques, engendrées par leurs systèmes, tant en courant qu'en tension. Ainsi, le filtrage des composantes harmoniques est au centre des préoccupations des distributeurs d'une part et des utilisateurs d'énergie électrique d'autre part, ils adoptent donc, les uns comme les autres, les limites proposées par les normes IEEE 519-1992, IEEE 1159-1995, CEI 61000-2-2 et CEI 61000-3-2.

Pour faire face à ces problèmes, les ingénieurs et les chercheurs dans le domaine des réseaux électriques s'efforcent de trouver des solutions efficaces qui permettent de minimiser les courants harmoniques circulants dans ces derniers.

Parmi les solutions classiques, l'utilisation des filtres passifs et la plus répandue, en pratique, sauf qu'elle présente deux inconvénients majeurs.

Le premier est lié au phénomène de résonance avec le réseau, le deuxième est la dépendance des performances du filtre passif aux caractéristiques du réseau sur lequel il est connecté.

Grâce aux progrès remarquables réalisés au cours des dernières années dans le domaine des semi-conducteurs de puissance commandés à l'ouverture et à la fermeture et fonctionnant à des fréquences très élevés, ont permis de concevoir des dispositifs de filtrage modernes des harmoniques auto-adaptables appelés filtrage actifs. Le but de ces filtres est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à compenser les perturbations responsables de la dégradation des performances des équipements et installations électriques.

Le filtre actif est un onduleur de tension ou de courant qui injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci conduisant ainsi à des courants sinusoïdaux courant côté réseau.

Ainsi l'objectif du filtre actif parallèle consiste à empêcher les courants harmoniques produits par des charges polluantes, de circuler à travers l'impédance du réseau, située en amont du point de connexion du filtre actif. Jusqu'à présent plusieurs solutions de dépollution des réseaux électriques ont été déjà proposées dans la littérature. Ils se distinguent, soit par leur mode de branchement sur le réseau (parallèle ou série), soit par leur mode de contrôle, ou bien par la structure de leur circuit de puissance. Celles qui répondent le mieux aux contraintes industrielles d'aujourd'hui sont les filtres actifs parallèles, séries et combinaison parallèle-série actifs.

Le filtre actif parallèle peut être utilisé pour compenser les courants harmoniques et déséquilibrés de même que la puissance réactive. Le filtre série actif peut compenser à la fois les tensions harmoniques et déséquilibrées, et les creux de tension.

La combinaison parallèle série actifs correspond à une solution universelle de compensation pour un, plusieurs ou tous les types de perturbation, de courant et de tension que l'on observe sur le réseau.

Le travail présenté dans cette mémoire concerne particulièrement l'étude suivie de simulation d'un filtre actif parallèle à structure de tension à trois fils destiné à compenser les courants harmoniques générés par une charge non linéaire et la compensation de l'énergie réactive.

Le filtre actif parallèle comporte deux fonctions principales; une fonction d'identification de courants harmoniques et une fonction de commande d'onduleur pour injecter les courants de compensation. Nos travaux portent sur l'étude conjointe de l'identification des harmoniques et de la commande de l'onduleur. L'étape d'identification des courants harmoniques est fondamentale dans le processus de filtrage.

De manière à atteindre ces objectifs, notre mémoire sera divisé en trois chapitres tels que :

Le premier chapitre sera consacré à présenter les différents phénomènes qui affectent la qualité de l'énergie électrique, On présentera les solutions traditionnelles et modernes de dépollution. Normes internationale en la matière.

Le deuxième chapitre présentera, le principe de fonctionnement d'un filtre actif parallèle et leur structure ainsi que les stratégies de commande pour le cas d'un filtre actif de puissance à

trois bras, cette dernière est basée sur la méthode des puissances réelles et imaginaires $p-q$ pour obtenir notre résultat des simulations.

Le troisième et dernier chapitre couvrira l'utilisation d'onduleur cinq niveaux à structure NPC en tant que filtre actif de tension ainsi que la stratégie de commande basée sur la méthode discrète de type $p-q$ avec son résultat de simulation.

Chapitre I
Qualité de l'Energie Electrique

I.1 INTRODUCTION

La tension délivrée par le distributeur d'énergie électrique est sinusoïdale triphasée et équilibrée. Cependant des perturbations électriques peuvent affecter la qualité des signaux électrique, ces perturbations sont principalement de nature harmoniques de type courant génères par les appareils électriques industriels ou domestiques à base d'électronique de puissance (charges non-linéaire).

De ce fait, une connaissance des perturbations, de leurs origines et de leurs conséquences est nécessaire pour trouver les solutions convenables pour les éliminer. Ainsi, nous entamons ce chapitre par la présentation de définitions des origines et les effets des courants harmoniques. Nous allons ensuite exposer les différentes solutions de compensation traditionnelles et modernes pour y remédier.

I.2 PERTURBATIONS HARMONIQUES

I.2.1 Définition

Le signal harmonique est une superposition sur l'onde fondamentale à 50 Hz ainsi que d'ondes sinusoïdales mais de fréquences multiples entier de celle du fondamental. La *Figure I.1* montre la superposition de l'harmonique de rang 3 sur une fondamental à fréquence 50 Hz. La principale source de la présence de courants harmoniques dans les réseaux électriques est l'utilisation de plus en plus croissante d'équipements à base d'électronique de puissance.

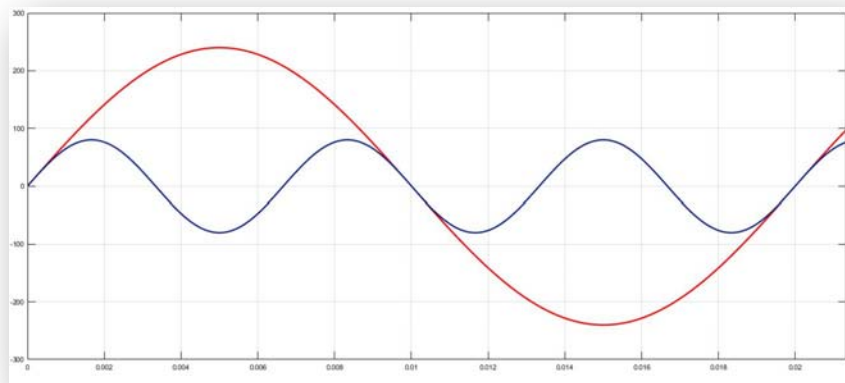


Figure I.1: Représentation de deux signaux fondamental et d'ordre 3

I.2.2 Sources des harmoniques [37] [39]

La cause principale des courants harmoniques est l'injection des courants non-sinusoïdaux par des charges non-linéaires. Les onduleurs, les ponts redresseurs, les variateurs de vitesse des machines électriques, les appareils domestiques tel que les téléviseurs et les lampes fluorescentes, et les alimentations à découpage représentent la majorité des sources d'émission des harmoniques.

I.2.3 Effets des harmoniques

Les effets des harmoniques les plus connus sont la destruction des condensateurs ou des disjoncteurs sous l'effet des forts courants harmoniques. Un autre phénomène fréquent est l'échauffement des transformateurs et des conducteurs de neutre sous l'effet des courants harmoniques de rang 3.

I.2.3.1. Effets instantanés

- Déclenchements à un moment inapproprié des protections;
- Perturbations induites des systèmes à courants faibles (télécommande, téléviseur, écran d'ordinateur, ...);
- Destruction par surcharge thermique de condensateurs;
- Perte de précision des appareils de mesure.

I.2.3.2. Effets à long terme

- Une surcharge en courant provoque des échauffements supplémentaires donc un vieillissement prématuré des équipements;
- Echauffement des transformateurs et des alternateurs (par augmentation des pertes Joule, des pertes fer...);
- Fatigue mécanique;
- Echauffement des récepteurs : des conducteurs de phases et du neutre par augmentation des pertes Joule et diélectriques;
- Destruction de matériels (condensateurs, disjoncteurs, ...).

I.2.4 Conséquences dû à la présence de signaux harmoniques [38] [39]

Les courants et les tensions harmoniques ont des effets néfastes sur le fonctionnement normal, la rentabilité et la durée de vie de certains équipements électriques liés à la circulation des courants harmonique :

- Lignes : pertes ohmiques supplémentaires;

- Transformateurs : pertes supplémentaires dans les enroulements par effet joule et dans le noyau par courant de Foucault ;
- Moteur à courant alternatif : pertes supplémentaires dans les enroulements principalement liées aux harmoniques de tension;
- Condensateur de puissance : pertes diélectrique supplémentaires conduisant aux vieillissements rapide du condensateur;
- Equipement de l'électronique de puissance : dysfonctionnement lié à la déformation de la tension;
- Ordinateurs : trouble fonctionnels liés à la distorsion de la tension;
- Lignes téléphoniques : génération des bruits importants liés au couplage électromagnétique entre les lignes de puissance et les circuits de communication

I.2.5 Caractéristiques des harmoniques

Les perturbations harmoniques sont généralement caractérisées par le taux de distorsion harmonique (THD) et le facteur de puissance (FP).

I.2.5.1 Décomposition en série de Fourier

Au début du 19^{ème} siècle, Joseph Fourier a montré qu'un signal périodique de fréquence f peut être décomposé avec des signaux sinusoïdaux de fréquence multiple entière de f .

Dans le cas d'un courant électrique de fréquence f :

$$i_c(t) = i_c + \sum_{n=1}^{\infty} i_{cn} \sqrt{2} \sin(2\pi n f t + \alpha_n) \quad \text{I.1}$$

Avec

- i_c : Valeur de la composante continue.
- f : Fréquence du signal sinusoïdal de fréquence fondamentale.
- n : Rang de l'harmonique.
- i_{cn} : Valeur efficace de courant harmonique de rang n .
- α_n : Phase de l'harmonique de rang n .

Pour la tension électrique v de fréquence f :

$$v(t) = v + \sum_{n=1}^{\infty} v_n \sqrt{2} \sin(2\pi n f t + \theta + \varphi) \quad \text{I.2}$$

- V_n : valeur efficace de l'harmonique de rang n (en volts)
- $\theta + \varphi$: Phase à l'origine de l'harmonique de rang n (en radians)
- φ : Déphasage entre les harmoniques de rang n de la tension et du courant.

I.2.5.2 Taux de distorsion harmonique(THD)

Le taux de distorsion harmonique « THD » permet de quantifier le contenu harmonique d'un signal périodique de tension ou de courant donné. Le THD se calcule comme suit :

$$THD_N = 100 \frac{I_n}{I_0} \quad I.3$$

THD_N : Le taux de distorsion harmonique individuel de rang n est le rapport de la valeur efficace I_n de l'amplitude de l'harmonique n a celle du fondamentale I_0 .

$$THD_f = 100 \frac{\sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_N^2}}{I_0} \quad I.4$$

THD_f : Le taux de distorsion harmonique total par rapport au fondamental

$$THD_s = 100 \frac{\sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_N^2}}{\sqrt{I_0^2 + I_1^2 + \dots + I_N^2}} \quad I.5$$

THD_s : Le taux de distorsion harmonique relatif à la valeur efficace.

I.2.5.3 Le facteur de puissance (FP)

On définit par :

$$F_p = \frac{p}{\sqrt{p^2 + Q^2 + D^2}} \quad I.6$$

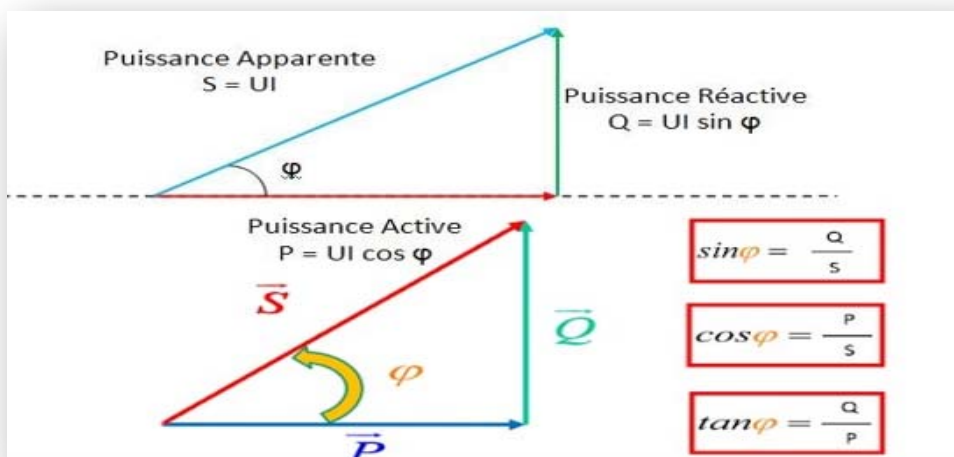


Figure I.2 : Le facteur de puissance

I.2.6 Les Normes

I.2.6.1 Normes et réglementations sur les harmoniques

Pour assurer une qualité de l'énergie satisfaisante en limitant les effets des perturbations harmoniques, les distributeurs d'énergie et les utilisateurs sont amenés à respecter des normes et des recommandations qui définissent les règles relatives à la compatibilité électromagnétique « CEM » définies. Ces normes peuvent être d'origines divers, à titre d'exemple : « CEI » - International, « CENELEC » - Européen.

I.2.6.2 Normes d'appareillage

La norme CEI 61000-3-2 ou EN 61000-3-2 est appliquée pour les appareils basse tension pour un courant inférieur à 16A. Le tableau ci-dessous montre les normes de limitation de courant.

**Tableau I.1 : Valeurs des niveaux de compatibilité
Pour les tensions harmoniques (CEI-1 000-2-4)**

Harmoniques impairs Non multiple de 3		Harmoniques impairs multiple de 3		Harmonique pairs	
Rang harmonique n	Tension harmonique %	Rang harmonique n	Tension harmonique %	Rang harmonique n	Tension harmonique %
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	$0.2+(0.5*25)/n$	–	–	–	–

La norme CEI-1000-3-2 fixe les limites pour les émissions des courants harmoniques dans un réseau public basse tension pour des équipements dont le courant par phase est inférieur à 16A (appareils domestiques; voir le *Tableau I.2*).

Tableau I.2 : Limites des émissions de courants harmoniques (CEI-1000-3-2)

Rand harmonique n	Courant harmonique maximal autorisé
Harmoniques impaires	
3	2.30
5	1.14
7	0.77
9	0.40
11	0.33
13	0.21
$15 \leq n \leq 39$	$(0.15*15)/n$
Harmonique paire	
2	1.08
4	0.43
6	0.30
$8 \leq n \leq 40$	$(0.23*8)/n$

I.3 Solutions de dépollution des réseaux électriques

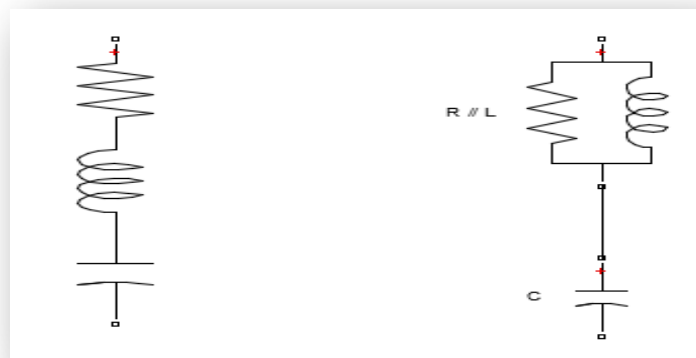
Plusieurs procédures sont mises en pratique pour réduire la pollution harmonique des réseaux électriques, regrouper en deux catégories à savoir les solutions des dépollutions traditionnelles et modernes :

I.3.1 Les solutions traditionnelles [3][4][5]

Ces sont des techniques qui apportent une solution facile et rapide pour certains cas de perturbations bien localisées et utilisent des composants passifs (inductances, condensateurs, transformateurs) et/ou des branchements qui modifient le schéma de l'installation. Plusieurs solutions existent pour limiter la propagation des signaux harmoniques dans les réseaux électriques :

- L'augmentation de la puissance de court-circuit du réseau et l'utilisation de convertisseurs peu polluants qui ont pour effet de diminuer la distorsion harmonique ;
- L'utilisation de dispositifs de filtrage pour réduire la propagation des harmoniques produits par des charges non linéaires.

Le filtrage consiste à placer en parallèle sur le réseau d'alimentation une impédance de valeur très faible autour de la fréquence à filtrer et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau. Parmi les dispositifs de filtrage les plus répandus, on distingue le filtre passif résonnant et le filtre passif amorti ou passe-haut Figure I.3 :



a - Filtre passif résonnant

b- Filtre passif amorti

Figure I.3 : Exemple de filtres passifs

Ces dispositifs sont utilisés pour empêcher les courants harmoniques de se propager dans les réseaux électriques. Ils peuvent aussi être utilisés pour compenser la puissance réactive.

I.3.2 Solutions modernes de dépollution [5]

Pour fournir aux consommateurs une bonne qualité de l'énergie électrique, même lors de perturbations, les filtres actifs de puissances sont proposés comme des solutions avancées moderne de dépollution des réseaux électriques.

En effet, ces solutions peuvent s'adapter aux évolutions de la charge et du réseau électrique et ceci sans toucher aux installations du fournisseur d'énergie et du consommateur.

I.3.2.a/ filtrage actif de puissance : Deux raisons principales ont conduit à concevoir une nouvelle structure de filtrage moderne et efficace appelée filtre actif de puissance :

- La première raison est due à l'inconvénient majeur des solutions traditionnelles de dépollution qui ne répondent pas à l'évolution des charges et des réseaux électriques. Les méthodes "classiques" de filtrage ou de dépollution des réseaux électriques présentent un inconvénient du fait qu'elle soit sensible aux évolutions de l'environnement. Ils voient leur efficacité baisser avec les variations des perturbations (variation des fréquences et des amplitudes des harmoniques).
- La seconde raison fait suite à l'apparition de nouveau composant à commutation forcée, comme les transistors bipolaires, les thyristors GTO et les transistors IGBT qui a permis de réaliser

de nouvelles structures qui permettent le contrôle de la forme d'onde de la phase du courant d'entrée. Le but de ces filtres est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à compenser les perturbations responsables de la dégradation des performances des équipements et installations électriques. Ainsi le filtrage actif tend à annuler les courants harmoniques en injectant dans la source perturbatrice des courants harmoniques d'amplitudes identiques, mais en opposition de phase à l'aide d'un onduleur. A cet effet, une mesure du courant de la charge non linéaire permet de connaître le courant à fournir.

Nous citerons les configurations possibles des filtres actifs :

- Le filtre actif parallèle (FAP) : conçu pour compenser toutes les perturbations de type courant.
- Le filtre actif série (FAS) : conçu pour compenser toutes les perturbations de type tension.
- La combinaison parallèle/série actif (conditionneur de puissance) : solution universelle pour compenser à la fois les perturbations de type courant et tension.
- Le filtre actif hybride.

I.3.2.a.1/ Filtre actif parallèle : Il est appelé aussi compensateur shunt, connecté en parallèle sur le réseau de distribution. Il est habituellement commandé comme un générateur de courant. Son principe est d'injecter dans le réseau électrique des courants harmoniques i_{inj} égaux à ceux absorbés par la charge non linéaire mais en opposition de phase, de sorte que le courant fourni par le réseau i_s soit sinusoïdal. Ainsi, il empêche les courants harmoniques de circuler à travers l'impédance du réseau. Par conséquent, Il améliore le taux de distorsion en courant.

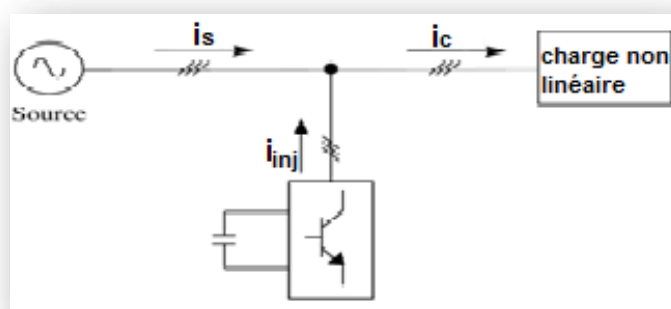


Figure I.4: Représentation filtre actif parallèle

I.3.2.a.2/ Filtre actif série : Le filtre actif série est connecté en série sur le réseau .Il se comporte comme une source de tension qui engendre des tensions harmoniques dont la somme avec la tension du réseau nous une onde sinusoïdale.

Il est destiné à protéger les installations qui sont sensibles aux tensions perturbatrices (harmoniques, creux, déséquilibrés) provenant de la source et également celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau.

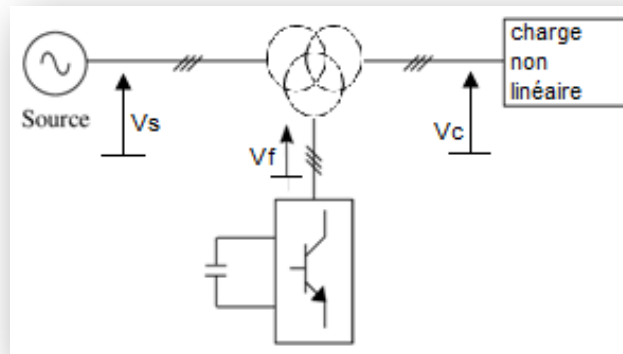


Figure I.5: Représentation filtre actif série.

I.3.2.a.3/ Combinaison parallèle/série actif : C'est une solution de compensation universelle basée sur le fonctionnement simultané des filtres actifs parallèle et série. Donc, elle possède les avantages cumulés des filtres actifs parallèles et série. Cette topologie est appelée en anglais Unified Power Quality Conditionner « UPQC ».

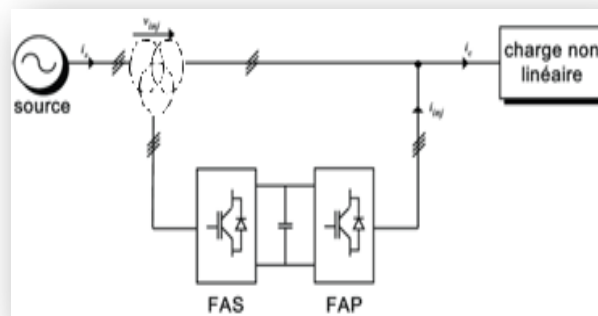


Figure I.6: Représentation Conditionneur actif de puissance

I.3.2.a.4/ Filtrage hybride : Afin de réduire le dimensionnement et par conséquent le prix des filtres actifs, l'association de filtres actifs de faible puissance à des filtres passifs peut être une solution. Dans ce cas, les filtres passifs ont pour rôle d'éliminer les harmoniques prépondérants permettant de réduire le dimensionnement des filtres actifs qui ne compensent que le reste des perturbations. Plusieurs configurations ont été présentées dans la littérature, les plus étudiées étant:

- Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles ;
- Le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles ;
- Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.

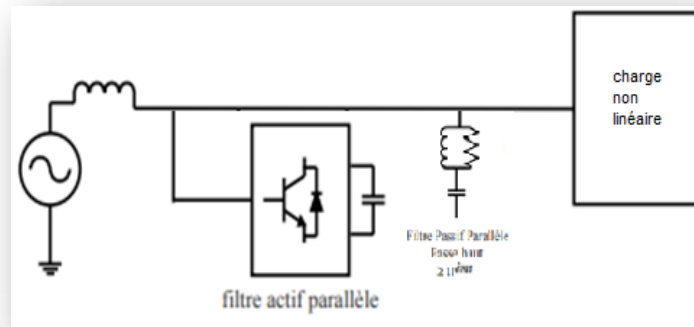


Figure I.7: Représentation d'un filtre hybride (actif parallèle et passif parallèle)

I.4 TECHNIQUES DE COMMANDE EN COURANT

I.4.1 Commande par hystérésis [2] [9] [10]

La commande par hystérésis, appelée aussi commande en tout ou rien, est une commande non linéaire qui utilise l'erreur existant entre le courant de référence (i_f^*) et le courant produit par l'onduleur (i_f). L'erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis. Dès que l'erreur atteint la bande inférieure ou supérieure, un ordre de commande est envoyé de manière à rester à l'intérieur de la bande. La simplicité de la mise en œuvre, comme le montre la *Figure I.8*, est le principal atout de cette technique. En revanche, les commutations évoluant librement à l'intérieur de la bande d'hystérésis. On ne peut pas maîtriser correctement le spectre haute fréquence dû aux fréquences de commutation.

Cette commande présente un inconvénient majeur : elle ne permet pas de contrôler la fréquence de commutation du semi-conducteur.

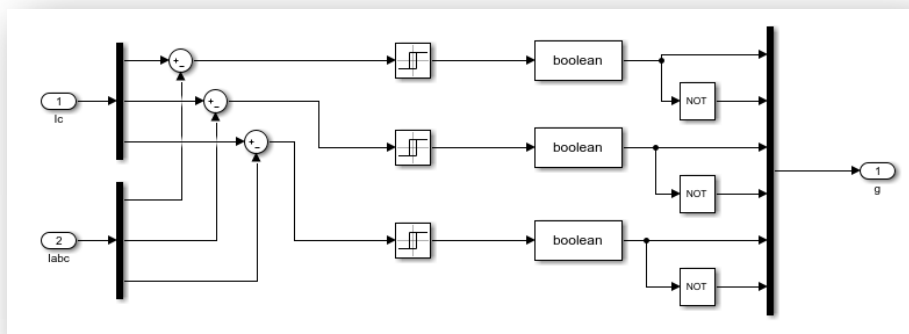


Figure I.8 : commande par hystérésis.

I.4.2 Commande par MLI [1] [11]

La fonction de la modulation est de déterminer les instants de commutation des interrupteurs afin d'obtenir une séquence de commutation qui présente le même spectre basse fréquence que le signal d'origine et son principe est décrit à la *Figure I.9*. La Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) consiste à adopter une fréquence de commutation suffisamment élevée par rapport à la fréquence maximale du signal de sortie souhaité, et de reproduire la valeur moyenne de ce signal à chaque période de commutation en jouant sur la durée d'application des tensions positives et négatives par rapport au point milieu du bus continu. On distingue deux techniques : la MLI inter sélective et la MLI vectorielle

I.4.2.1 MLI Inter Sélective [1] [12] [11]

C'est la modulation la plus classique. Le principe de cette commande consiste à comparer le signal de (courant ou tension) de référence avec une porteuse HF de forme triangulaire. Le résultat de cette comparaison détermine les instants de commutation des interrupteurs. C'est ce qui explique qu'à la sortie de l'onduleur, le courant n'est pas purement sinusoïdal.

I.4.2.2 MLI Vectorielle [1] [11]

Dans cette technique, les vecteurs à appliquer et leurs temps d'application sont calculés analytiquement à travers des équations mathématiques. Chacun des états possibles du convertisseur est représenté par un vecteur de tension. L'ensemble de ces vecteurs forme le diagramme vectoriel des tensions du convertisseur.

L'objectif de cette technique est de calculer les intervalles de temps attribués à chaque vecteur de tension pendant la durée du cycle de modulation, pour obtenir le vecteur de référence.

La modulation vectorielle diffère de la modulation inter sélective par le fait que les signaux de commandes sont élaborés en tenant compte de l'état des trois bras de l'onduleur en même temps.

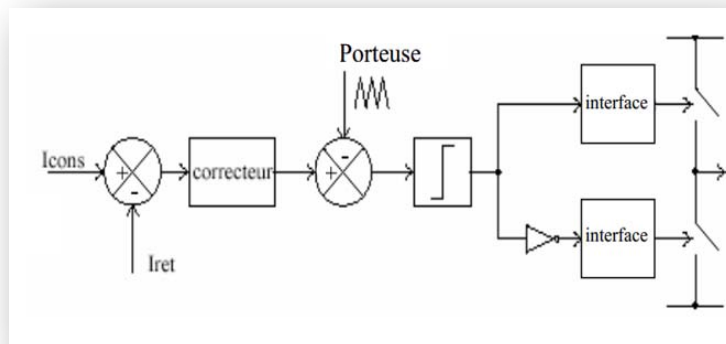


Figure I.9 : Commande des courants par MLI

On applique la commande MLI vectorielle à un filtre actif parallèle à base d'un onduleur de tension à trois niveaux.

I.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présentés les différentes perturbations affectant les réseaux électriques et leurs conséquences nuisibles au bon fonctionnement des appareils électriques. De plus, on a présenté les normes fixées par les instances internationales, ensuite, nous avons vu les solutions appliquées pour la dépollution des réseaux électriques. Les solutions classiques telles que les filtres passifs qui présentent certaines limites et des solutions modernes à base de filtres actifs de puissance efficace pour la compensation des harmoniques courants.

Le deuxième chapitre sera dédié à l'étude et la simulation d'un filtre actif parallèle de puissance.

Chapitre II
Etude et simulation
d'un filtre actif parallèle de
puissance à trois fils

II.1 INTRODUCTION

Les nouvelles structures de dépollution des réseaux appelé filtre actif de puissance. Ce type de filtre actif existe sous 3 formes : série, parallèle et hybride en fonction de la nature des perturbations : tension, courant, tension et courant.

Nous nous proposons de faire une étude avec simulation d'un filtre active de puissance parallèle (compensateur shunt) dans le but d'éliminer les courants perturbateurs (harmoniques, réactifs) produits par les charges non linéaires.

En premier lieu, nous présenterons le principe de fonctionnement et la structure générale du filtre actif parallèle de puissance à trois bras. Suivie par une série de simulation pour valider notre modèle.

II.2 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE FAPP

Ce type de filtre est commandé comme un générateur de courant, il génère des courants harmoniques en opposition de phase aux courants harmoniques générés par la charge polluante ce qui permettra d'obtenir des courants de source (réseau) purement alternatifs et équilibrés comme illustré dans la *Figure II.1*.

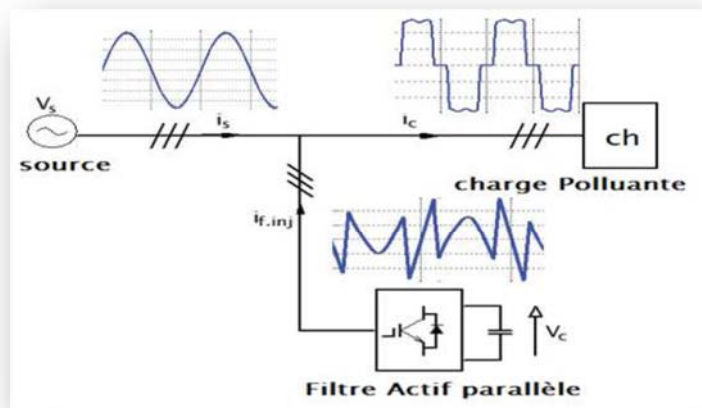


Figure II.1 : principe de filtrage actif parallèle.

En générale, le filtre actif parallèle est utilisé pour la dépollution des réseaux BT et MT. Son impédance totale vis à vis de la source et de la charge lui confère une bonne auto-adaptabilité avec les performances appréciables. [6]

Actuellement, les filtres actifs parallèles sont essentiellement installés par les consommateurs industriels. Un intérêt particulier sera donné aux différentes topologies de filtre actif de puissance relié aux réseaux électriques à trois fils. [7]

II .2.1 Topologies de FAPP de puissance

Pour le cas d'un réseau à trois fils, il existe deux topologies de filtre actif de puissance :

II.2.1.1 Filtre actif de puissance à 2 bras avec condensateurs à point milieu : La configuration du filtre actif de puissance à deux bras avec un point milieu capacitif côté DC est illustrée dans la *Figure II .2*. Cette topologie est constituée de quatre interrupteurs réversibles en courants commandés à la fermeture et à l'ouverture (transistor, IGBT, thyristor ou GTO) montée en antiparallèle avec une diode. Ils forment ainsi les deux bras d'un onduleur triphasé. Le troisième bras est constitué de deux condensateurs dont le point milieu, est relié à la troisième phase du réseau électrique, le potentiel au point milieu du bus continu doit être contrôlé et éviter ainsi tout déséquilibre entre les deux tensions $\frac{V_{dc}}{2}$. [8][15]

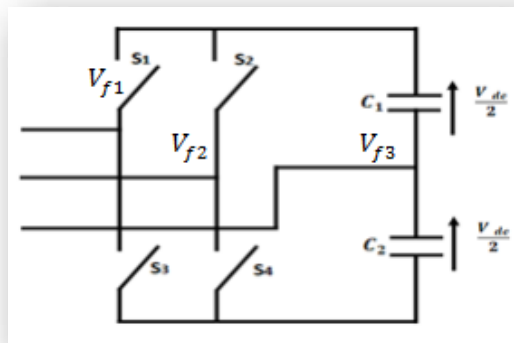


Figure II .2: Onduleur de tension à 2 bras avec condensateurs à point milieu.

Les états de commutation pour ce type d'onduleur sont présentés dans le *Tableau II.1*

Tableau II.1 : Tensions générées par l'onduleur de tension à 2 bras à point milieu capacitif.[15]

K	s2	s1	V_{f1}	V_{f2}	V_{f3}
0	0	0	$\frac{V_{dc}}{6}$	$\frac{V_{dc}}{6}$	$\frac{V_{dc}}{3}$
1	0	1	$+\frac{V_{dc}}{2}$	$-\frac{V_{dc}}{2}$	0
2	1	0	$-\frac{V_{dc}}{2}$	$+\frac{V_{dc}}{2}$	0
3	1	1	$+\frac{V_{dc}}{6}$	$+\frac{V_{dc}}{6}$	$-\frac{V_{dc}}{3}$

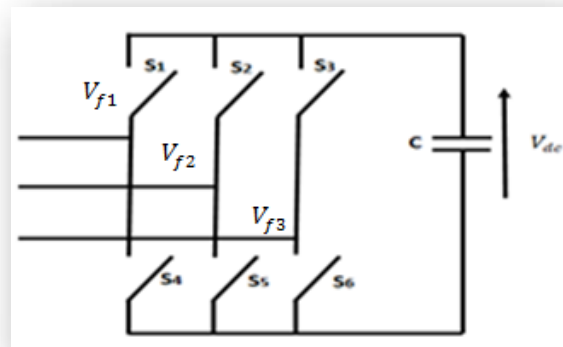
Cette topologie contient 4 combinaisons de commande possibles. Pour obtenir ces états de commutations nous utilisons les expressions suivantes :

$$\begin{bmatrix} V_{f1} \\ V_{f2} \\ V_{f3} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 4s1 - 2s2 - 1 \\ -2s1 + 4s2 - 1 \\ -2s1 - 2s2 + 2 \end{bmatrix} \frac{V_{dc}}{2}$$

II.1

II.2.1.2 Filtre actif de puissance à 3 bras : Nous utilisons un onduleur compensant trois bras constitués de 6 interrupteurs réversibles en courant commande à la fermeture et à l'ouverture. Cet onduleur est relié au réseau électrique côté alternatif via un filtre d'entrée du premier ordre (voire Figure II.3). la source de tension continue de notre onduleur est constitué par un condensateur de sorte que la tension a ces bornes soit maintenue à une valeur positive quasi-constante. [8] [15]

Figure II.3 : onduleur de tension à trois bras pour un réseau électrique à 3 fils.



Les états de commutation pour ce type d'onduleur sont présentés dans le *Tableau II.2*.

Tableau II.2 : Tensions générées par l'onduleur de tension à trois bras.[15]

K	S3	S2	S1	V_{f3}	V_{f2}	V_{f1}
0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	$\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{3}$	$+2\frac{V_{dc}}{3}$
2	0	0	1	$\frac{V_{dc}}{3}$	$+2\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{3}$
3	0	0	1	$-2\frac{V_{dc}}{3}$	$+\frac{V_{dc}}{3}$	$+\frac{V_{dc}}{3}$
4	0	1	0	$+2\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{3}$
5	0	1	0	$+\frac{V_{dc}}{3}$	$-2\frac{V_{dc}}{3}$	$+\frac{V_{dc}}{3}$
6	0	1	1	$+\frac{V_{dc}}{3}$	$+\frac{V_{dc}}{3}$	$-2\frac{V_{dc}}{3}$
7	0	1	1	0	0	0

Ils sont obtenus grâce aux expressions suivantes :

$$\begin{bmatrix} V_{f1} \\ V_{f2} \\ V_{f3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2S1 & -S2 & -S3 \\ -S1 & 2S2 & -S3 \\ -S1 & -S2 & 2S3 \end{bmatrix} \frac{V_{dc}}{3} \quad \text{II.2}$$

Nous utiliserons pour notre étude un onduleur de tension à 3 bras.

II.3 STRUCTURE GENERALE DE FAPP A TROIS BRAS

Le filtre actif parallèle est formé de deux parties : puissance et commande (voire *Figure II.4*).

La partie puissance constitué de :

- Onduleur de tension.
- Circuit de stockage d'énergie capacitif.
- Filtre de sortie de nature RL.

La partie commande constitué de :

- une méthode d'identification des courants perturbés.
- La régulation de la tension continue appliquée aux éléments de stockage d'énergie.
- une régulation des courants injectés au réseau.

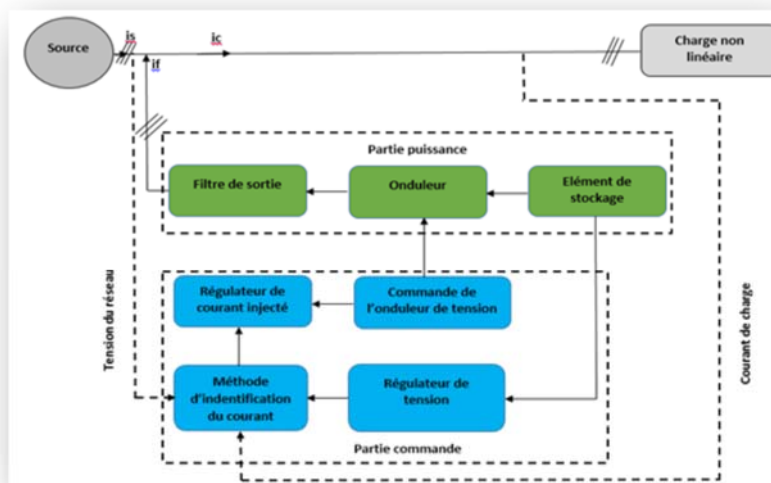


Figure II.4: structure générale de filtre actif parallèle d'onduleur de tension

II.3.1 Partie Puissance

La structure générale la plus utilisée d'un filtre actif de puissance connectée à un réseau électrique à trois fils est un onduleur à trois bras. Cet onduleur de tension est connecté en parallèle sur le réseau par un filtre de découplage (L_f, R_f) (Voire *Figure II.5*). L'élément de stockage est une capacité C côté continue de l'onduleur qu'il se comporte une source de tension continue qui doit être positive et maintenue constant.

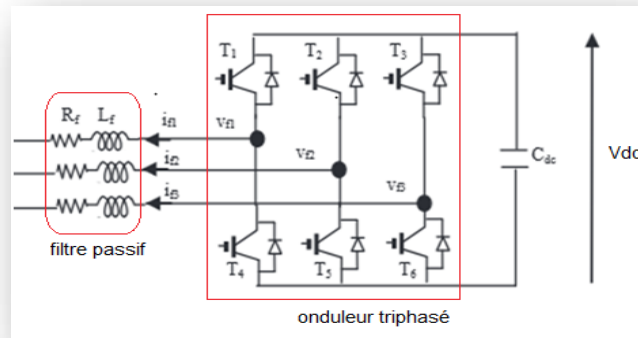


Figure II.5 : structure d'un filtre actif parallèle basée à onduleur de tension

On distingue les trois éléments de cette partie :

Onduleur de tension : constitue d'un convertisseur statique assurant la conversion continue alternative formée de six interrupteurs de puissance (IGBT, MOSFET, ...) commandé à l'ouverture et à la fermeture avec des diodes antiparallèles.

Système de stockage d'énergie : constitue de condensateur joue le rôle d'une source de tension continue

Filtre passif à la sortie de l'onduleur de tension : en générale il est de premier ordre relié au l'onduleur de tension au réseau.

Il est à noter que la commande de deux interrupteurs de même bras ne peut se faire simultanément mais de façon complémentaire. (Voir *Tableau II.3*) Les combinaisons possibles des tensions V_{f1} , V_{f2} et V_{f3} de l'onduleur :

Tableau II.3: Tensions générées par l'onduleur

Numéro de l'état	Interrupteurs fermées	V_{f1}	V_{f2}	V_{f3}
1	T4, T5, T6	0	0	0
2	T1, T5, T6	$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$
3	T2, T4, T6	$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$
4	T1, T2, T6	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$
5	T3, T4, T5	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$
6	T1, T3, T5	$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$
7	T2, T3, T4	$-2V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$
8	T1, T2, T3	0	0	0

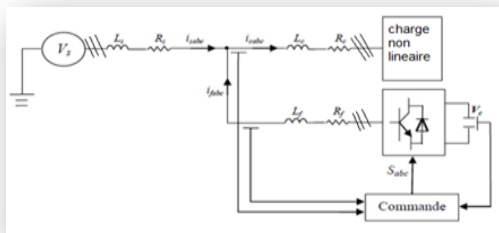
II.3.2 Partie de commande

La partie commande d'un filtre actif parallèle est constituée de :

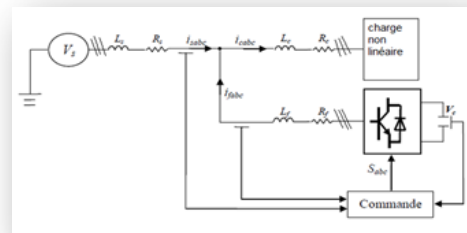
- Méthode d'identification des courants harmoniques ;
- Régulation du bus continu de l'onduleur de tension ;
- Commande de l'onduleur de tension pour générer des signaux de commutation des semi-conducteurs en utilisant hystérésis ou l'une de méthode MLI ;

Pour identifier les courants d'harmoniques des charges non-linéaires, il existe deux stratégies de commande, qui sont : commande directe & commande indirecte:

- La commande directe (*Figure II.6a*) est basée sur la mesure du courant de la charge polluante, puis de l'extraction des composantes harmoniques de ce courant. Le filtre actif de puissance injecte ainsi les courants harmoniques sur le réseau électrique pour les compenser.
- Commande indirecte (*Figure II.6b*) consiste à mesurer les courants coté source, et d'imposer la forme sinusoïdale sur ces courants.



(a) Schéma de commande directe



(b) schéma de commande indirecte

Figure II.6 : commandes d'un filtre actif parallèle de puissance

Nous allons utiliser dans notre étude la stratégie de commande directe. Cependant il faut un bon algorithme pour identifier les courants harmoniques de notre charge. Ainsi le choix de l'algorithme utilisé pour isoler la composante harmonique du courant de notre charge non linéaire sera un facteur déterminant quant aux performances obtenues par le filtre actif de puissance (précision, dynamique, etc.). [14]

Dans la littérature, nous avons trouvé plusieurs méthodes qui décrivent différents algorithmes d'identification possibles, tel que :

- La méthode de détection du référentiel lié au synchronisme d-q, reposant sur la transformée de Concordia. Cette méthode se base essentiellement sur le calcul de la pulsation fondamentale obtenue par une PLL. Cela exige une précision de calcul de cette pulsation afin de ne pas avoir des courants identifiés erronés.
- La méthode des puissances instantanées réelles et imaginaires. [14] [15]

II.3.2.1 Méthode des puissances instantanées réelles et imaginaires (p-q) : La méthode des puissances instantanées a été introduite par H. AKAGI [40 AKA]. Cette méthode exploite la transformation de Concordia (α - β) pour obtenir les puissances réelles et imaginaires. Notons par (V_α, V_β) et (I_α, I_β) les composantes orthogonales du repère $(\alpha\beta)$ associées respectivement aux tensions de raccordement du filtre actif de puissance parallèle (V_s) et aux courants absorbés par les charges polluantes (I_{ch}).

La transformation de Concordia notée transformation $(\alpha$ - $\beta)$ permet d'écrire les relations suivantes dans un système triphasé équilibré [15] [4]:

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ V_{s3} \end{bmatrix} \quad \text{II.3}$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s1} \\ i_{s2} \\ i_{s3} \end{bmatrix} \quad \text{II.4}$$

La puissance active instantanée en absence des harmoniques, notée $p(t)$, est définie par la relation suivante :

$$p(t) = V_\alpha I_\alpha + V_\beta I_\beta \quad \text{II.5}$$

Et la puissance imaginaire instantanée en absence des harmoniques peut s'écrire sous la forme suivante :

$$q(t) = V_\beta I_\alpha - V_\alpha I_\beta \quad \text{II.6}$$

La puissance instantanée q a une signification plus large que la puissance réactive habituelle. En effet, contrairement à la puissance réactive, qui ne considère que la fréquence fondamentale, la puissance imaginaire prend en compte toutes les composantes harmoniques du courant et de la tension. Nous pouvons ainsi établir la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad \text{II.7}$$

De cette expression on peut décomposer les puissances réelles et imaginaires instantanées en deux composantes:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{p} + \tilde{p} \\ \bar{q} + \tilde{q} \end{bmatrix} \quad \text{II.8}$$

Avec :

- \bar{p} Et \bar{q} les composantes continues de p et q
- \tilde{p} Et \tilde{q} les composantes ondulées de p et q

Pour une élimination satisfaisante de la composante continue, on utilise un filtre passe-bas avec soustraction entre l'entrée du filtre et sa sortie afin d'obtenir un filtre équivalent au filtre passe-haut. Comme montre la *Figure II.7* :

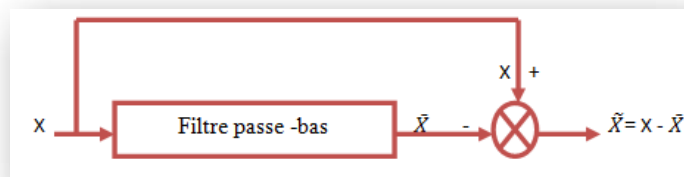


Figure II.7: Schéma de principe de la méthode de séparation des puissances.

Le filtre passe bas utilisée est de type Butterworth du second ordre, sa fonction de transfert est donnée par l'expression suivante :

$$H_{FBF} = \frac{\omega_c^2}{s^2 + 2\xi\omega_0s + \omega_c^2} \quad \text{II.9}$$

La régulation de la tension moyenne aux bornes du condensateur pour maintenir une tension à une valeur quasi-constante ce fera par la régulateur PI voire la *Figure II.8*. [14]

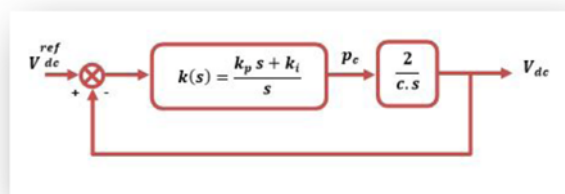


Figure II.8 : Boucle de régulation de la tension d'alimentation du filtre actif parallèle

Après avoir calculé la fonction de transfert en boucle fermée, puis avoir fait l'identification avec la fonction de transfert de deuxième ordre, nous obtenons :

$$K_p = \frac{C\omega_c^2}{2} \quad \text{II.10}$$

$$K_i = \frac{\xi\omega_c C}{2} \quad \text{II.11}$$

Avec :

- ξ : Le coefficient d'amortissement $\frac{\sqrt{2}}{2}$

L'équation II.7 nous permet ainsi de définir les composantes de courant comme suit :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad \text{II.12}$$

En introduisant l'équation II.8 dans II.12, les courants dans les axes (α - β) deviennent :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ \bar{q} \end{bmatrix} + \frac{1}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad \text{II.13}$$

Selon la fonction que nous donnons au filtre actif de puissance, nous pouvons compenser soit les harmoniques de courant soit l'énergie réactive ou les deux.

Le *Tableau II.4* résume les méthodes de compensation possibles [13].

**Tableau II.4 : Modes de compensation
De la commande des puissances instantanées [13]**

Compensations			
Paramètres de contrôle	Courants harmoniques $p_f = \tilde{p}$ et $q_f = \tilde{q}$	Energie réactive $p_f = 0$ et $q_f = \bar{q}$	Courants harmoniques et de l'énergie réactive $p_f = \bar{p}$ et $q_f = 0$

Notre objectif est de compenser les courants harmoniques et l'énergie réactive en même temps. Ainsi les courants de référence dans le repère $(\alpha\beta)$ obtenir à partir de l'équation II.13 devient :

$$\begin{bmatrix} i_{f\alpha}^{ref} \\ i_{f\beta}^{ref} \end{bmatrix} = \frac{1}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} \begin{bmatrix} V_{\alpha} & V_{\beta} \\ -V_{\beta} & V_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ q \end{bmatrix} \quad \text{II.14}$$

Les courants de référence sont exprimés par la matrice II.15 :

$$\begin{bmatrix} i_{f1}^{ref} \\ i_{f2}^{ref} \\ i_{f3}^{ref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{f\alpha}^{ref} \\ i_{f\beta}^{ref} \end{bmatrix} \quad \text{II.15}$$

La Figure II.9 présente la commande par la méthode de puissance instantanée p-q.

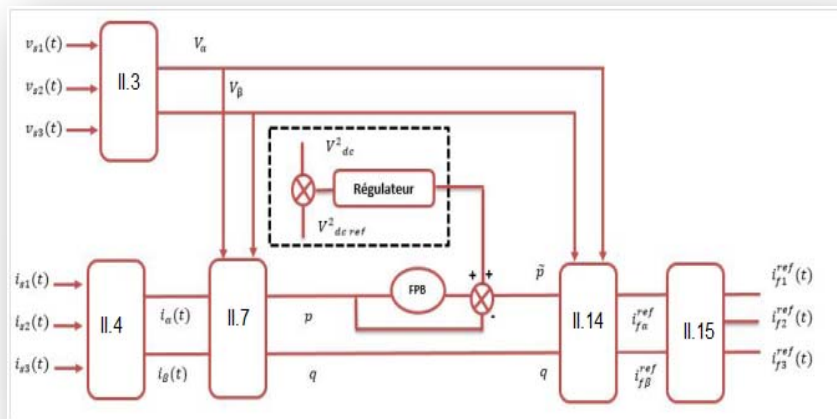


Figure II.9: Méthode des puissances instantanées pour identifier les courants de référence

II.4 SIMULATION D'UNE CHARGE TRIPHASEE EQUILIBREE

Nous nous proposons d'effectuer une série de simulation sous environnement MATLAB/Sim Power System pour valider notre filtre actif de puissance parallèle basé sur la commande directe en utilisons la méthode des puissances instantanées.

II.4.1 Avant filtrage

II.4.1.1 modèle de simulation : Considérons un réseau électrique à trois fils connecté à une charge triphasée, comme le montre la figure ci-dessous :

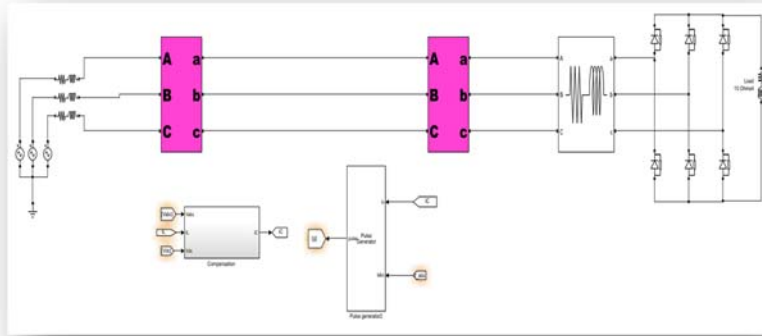


Figure II.10 : Schéma d'un réseau triphasé à trois fils alimenté une charge non linéaire

II.4.1.2 Paramètre de simulation : Les paramètres de ce système sont donnés comme suit :

Tableau II.5: paramètres de système avant filtrage.

V_s [V]	f [Hz]	R_s [m Ω]	L_s [μ H]	R_c [Ω]	L_c [μ H]
240	50	1	0.01	2.73	23.16
R Charge [Ω]		L Charge [mH]			
0.79		2.6			

II.4.1.3 Résultats de Simulation : Sous environnement MATLAB/Sim Power System, nous obtenons les résultats suivants :

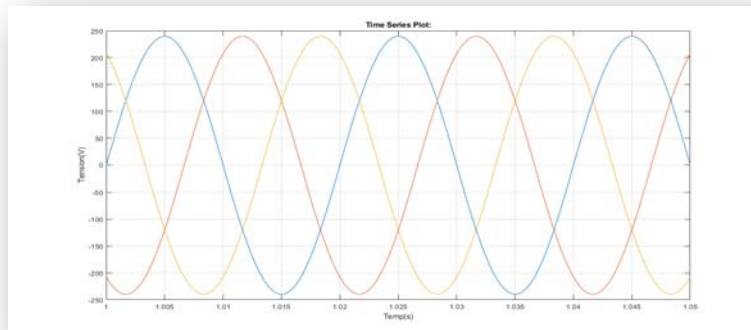


Figure II.11: courbe de Tension de source triphasée avant le filtrage.

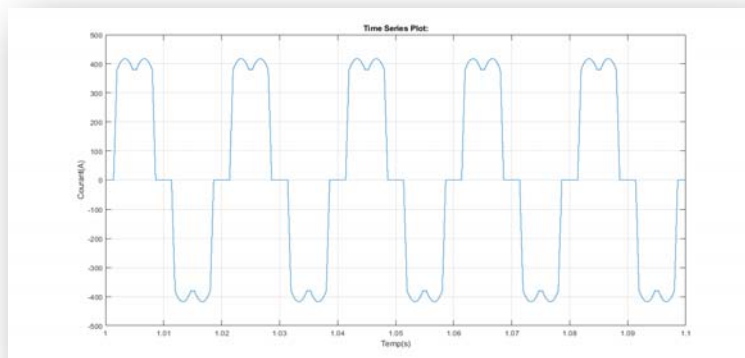


Figure II.12 : courbe de courant de charge phase (a) avant le filtrage.

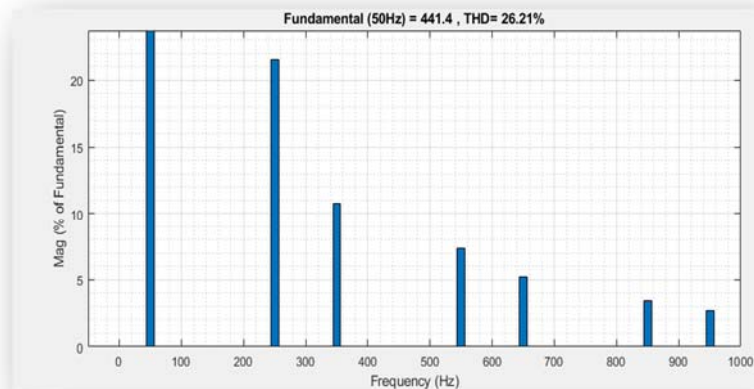


Figure II.13 : THD de courant de source phase (a) sans FAPP.

Nous remarquons les résultats suivants :

- Les courbes de la tension triphasée de source sont des signaux sinusoïdaux.
- A partir la *Figure II.12*, nous remarquons la présence de perturbation harmonique du courant de la phase (a), ce qui signifie que le courant de charge est très riche en harmonique avec un THD de 26.21 %.

II.4.2 Après filtrage

II.4.2.1 modèle de simulation : Dans cette partie, nous allons présenter les résultats de simulation de l'ensemble réseau triphasé à trois fils / charge non-linéaire/ filtre actif parallèle d'un onduleur de tension à 3 bras, La figure suivante présente le schéma de système étudiée :

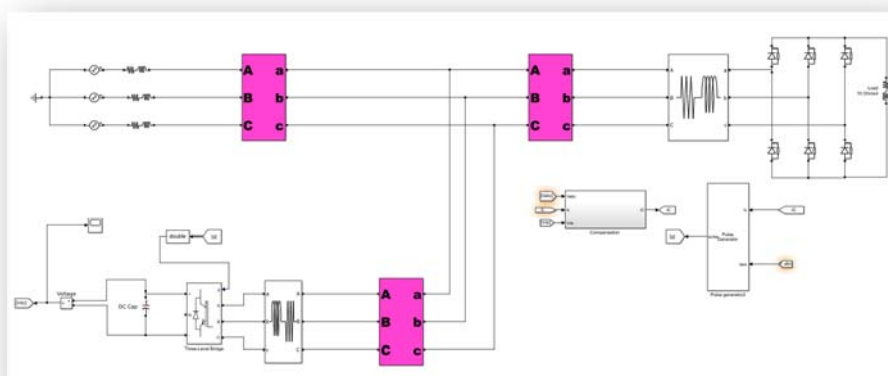


Figure II.14 : modèle de simulation de FAPP étudié.

II.4.2.2 Paramètre de simulation : Les paramètres de système à filtre actif parallèle de puissance à 3 bras sont :

Tableau II.6 : paramètres de simulation de FAPP.

V_s [V]	f [Hz]	R_s [m Ω]	L_s [μ H]	R_c [Ω]	L_c [μ H]
240	50	1	0.01	2.73	23.16
R Charge [Ω]	L Charge [mH]	V_{dc} [V]	C_{dc} [F]	R_f [m Ω]	L_f [mH]
0.79	2.6	700	0.008	5	0.2

II.4.2.3 Résultats de Simulation : Les résultats de simulation que nous avons obtenus sont comme suite :

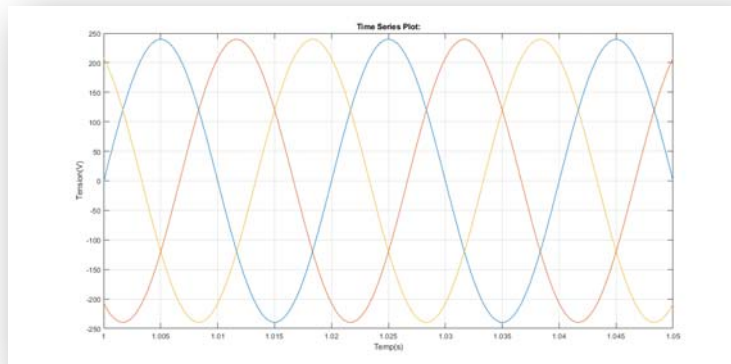


Figure II.15 : courbe de tension triphasée de source après le filtrage

Phase (a) :

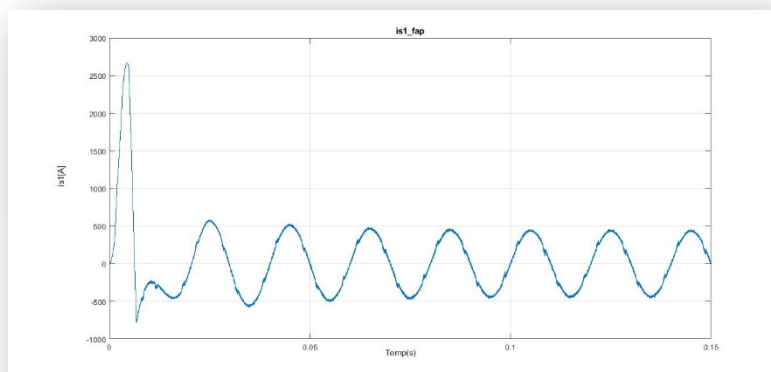


Figure II.16 : courbe de courant de source phase (a) après le filtrage.

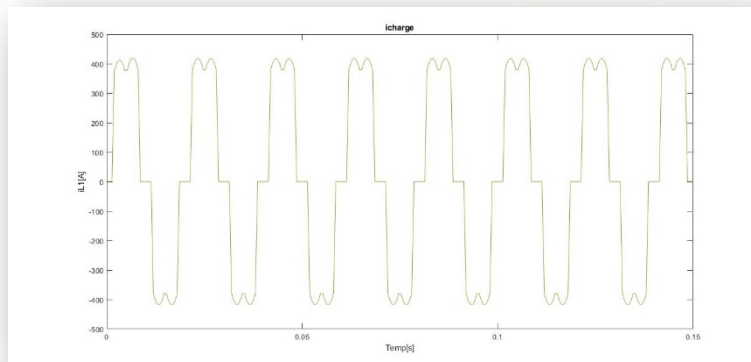


Figure II.17 : courbe de courant de charge phase (a) après le filtrage.

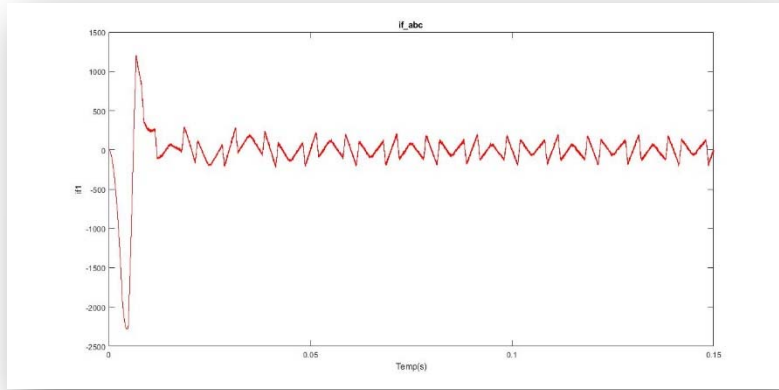


Figure II. 18 : courbe de courant de FAPP phase (a).

Phase (b) :

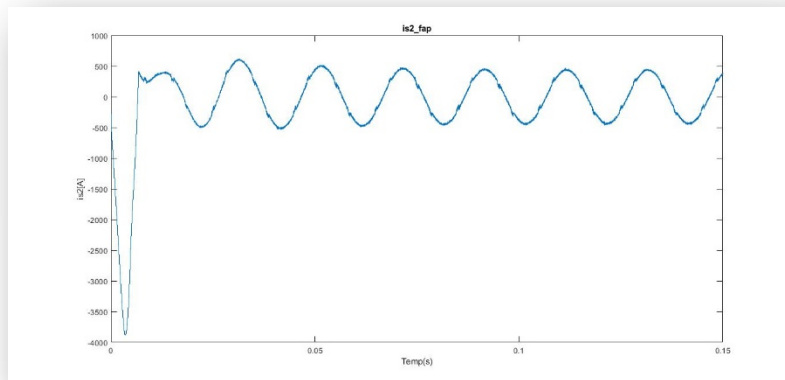


Figure II.19 : courbe de courant de source phase (b) après le filtrage.

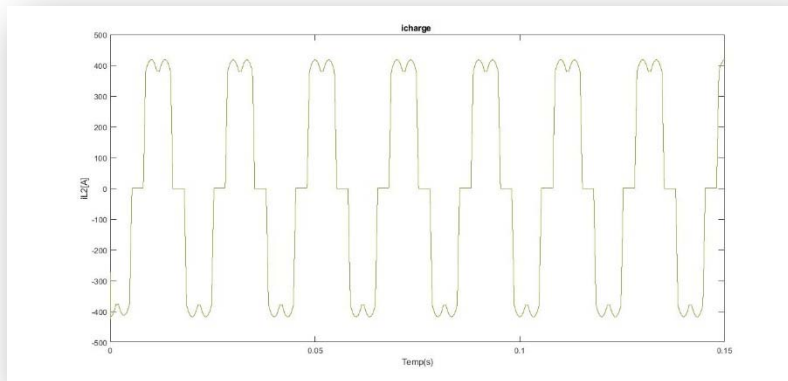


Figure II.20: courbe de courant de charge phase (b) après le filtrage.

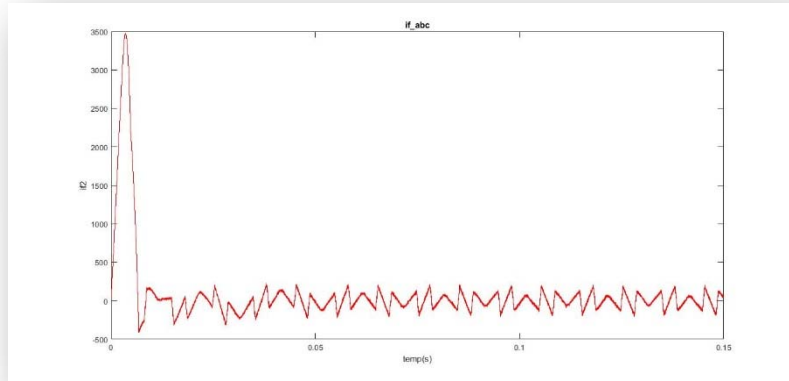


Figure II. 21 : courbe de courant de FAPP phase (b).

Phase (c) :

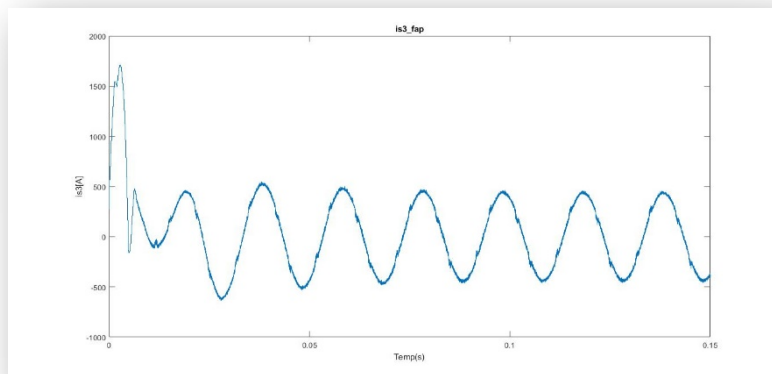


Figure II.22 : courbe de courant de source phase (c) après le filtrage.

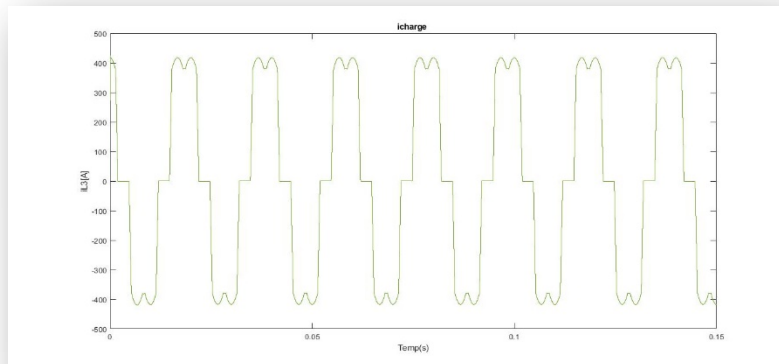


Figure II.23 : courbe de courant de charge phase (c) après le filtrage.

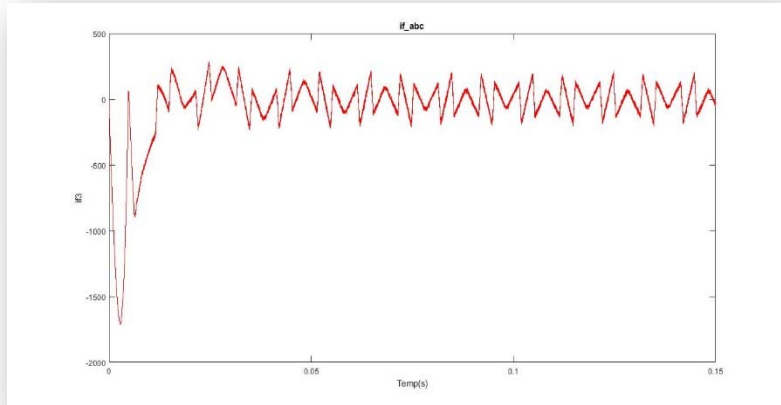


Figure II. 24 : courbe de courant de FAPP phase (c).

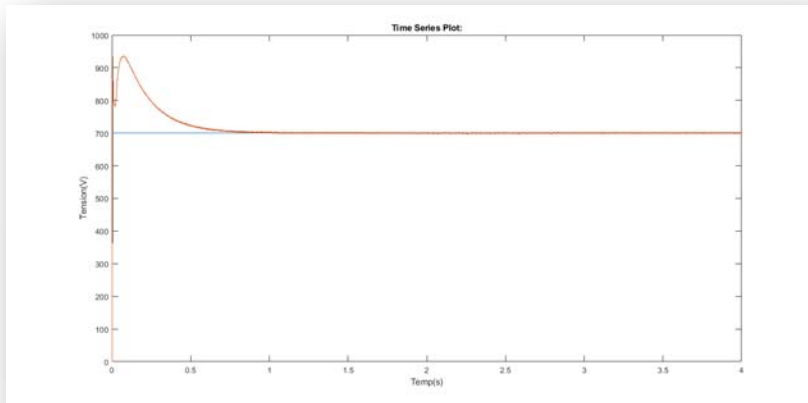


Figure II. 25 : courbe de tension à la borne de condensateur de FAPP.

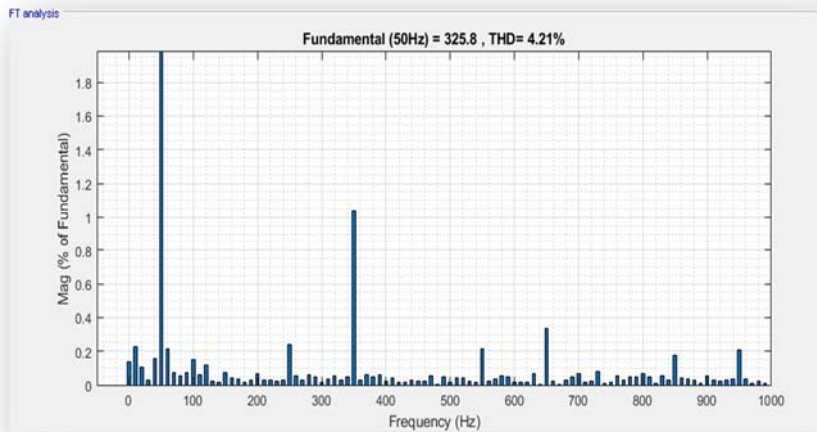


Figure II.26: THD de courant de source phase (a) après le filtrage.

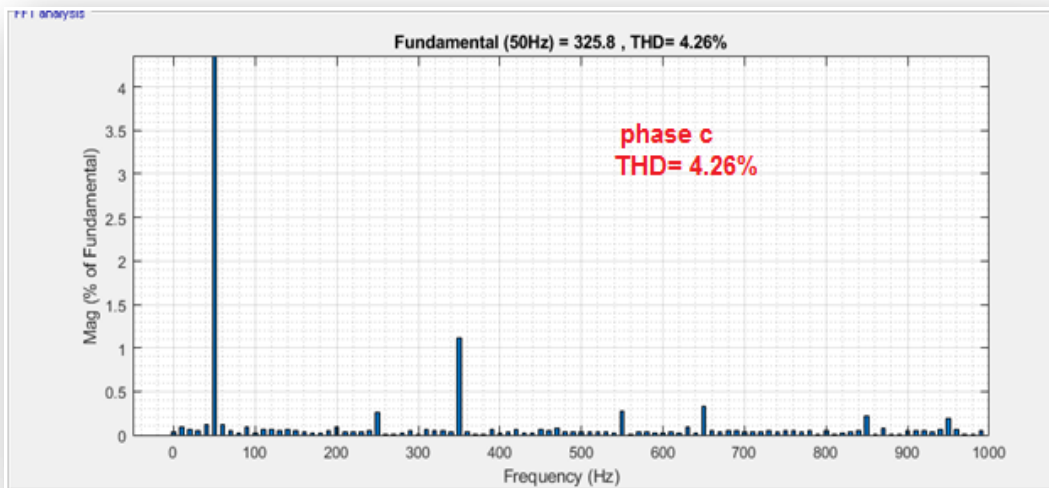
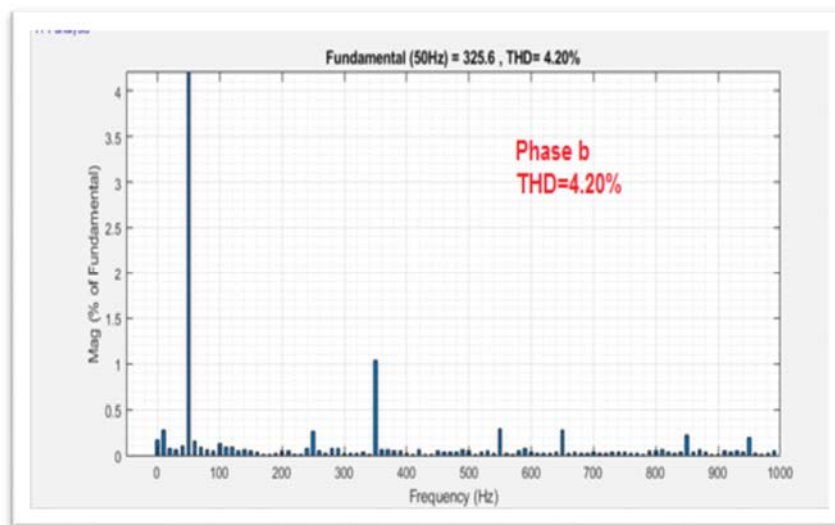
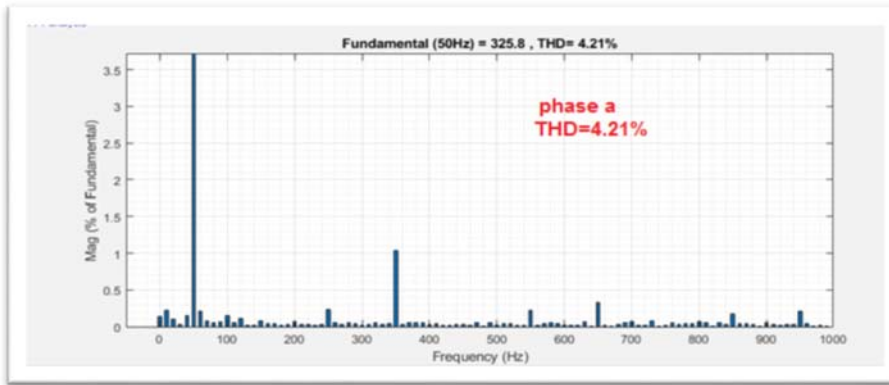


Figure II.27 : Les THD des trois phases de FAPP.

Récapitulatifs :

D'après ces figures, nous remarquons que :

- Le filtre actif de puissance élimine les harmoniques de courant dans chaque phase. Ainsi, les courants de source après filtrage sont sinusoïdaux et le **THD** est inférieur à 5%, comme montre le tableau suivant :

Tableau II.7: Les valeurs de THD après filtrage.

	Système	Phase a	Phase b	Phase c
THD	4.21%	4.21%	4.20%	4.26%

- Nous remarquons également de la *Figure II.25* que la tension V_{dc} est constante en régime permanent.

II.5 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté, les différents éléments constituant la structure du filtre actif parallèle, constitué de deux parties à savoir la partie puissance et la partie contrôle-commande. Le choix des éléments de la partie contrôle-commande, tels que les techniques d'extraction de courants de référence, les trois éléments de la partie puissance ont été fixés.

Notre objectif étant d'éliminer les harmoniques de courant et de compenser l'énergie réactive générée par les charges non linéaires. Pour cet effet, nous avons utilisé un filtre actif de puissance parallèle basé sur un onduleur de tension à trois bras avec l'utilisation de la méthode d'identification des puissances instantanées (p-q) pour la compensation des courants harmonique généré par la charge non-linéaire.

Cette méthode donne de bon résultats, ceci a été confirmé par les résultats de simulations où les THD obtenus étaient inférieur à 5% conformément aux normes CEI en plus de la compensation de l'énergie réactive.

Chapitre III
Onduleur Multi-Niveaux
de tension

III.1 INTRODUCTION

La technologie de conversion de l'énergie continu-alternatif à l'aide des convertisseurs statiques tel que les onduleurs de tension constituent un procédé incontournable de l'électronique de puissance en pleine croissance. Ils sont présents dans des domaines d'application les plus variés, dont le plus connu est sans doute celui de la variation de vitesse des machines à courants alternatif, ...etc [15].

Dans ce chapitre, on présentera la structure de l'onduleur, le principe général de fonctionnement des onduleurs ainsi que leur différente structure.

On abordera les types généraux des onduleurs multi-niveau de tension, de leur large utilisation en niveau de la moyenne tension de grande puissance à l'étude générale d'onduleurs de tension multi-niveaux. Parce que ils sont beaucoup utilisés dans les domaines d'application de moyenne tension et grande puissance, en raison de leurs avantages tels que, la bonne qualité de l'alimentation, une bonne compatibilité électromagnétique, les pertes de commutation faibles et leur capacité en haute tension, la diminution de contenu harmonique dans la tension et courant de sortie [15] [16].

Dans la dernière partie de ce chapitre nous aborderons les simulations des onduleurs multi-niveaux de cinq niveaux.

III.2 DEFINITION DE L'ONDULEUR

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continue-alternative, alimenté en continu, il modifie de façon périodique les connexions entre l'entrée et la sortie et permet d'obtenir l'alternatif à la sortie *Figure III.1*. [16]

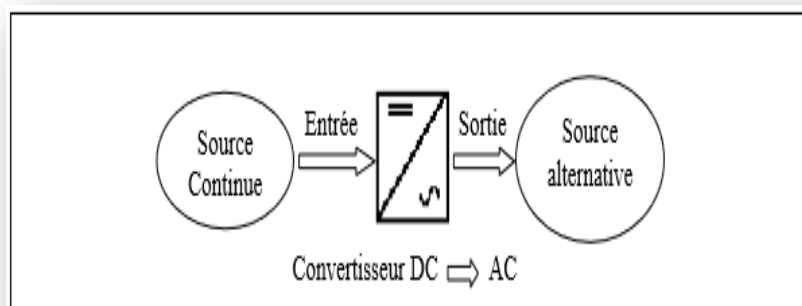


Figure III.1 : Schéma de principe de l'onduleur [16]

III.3 LES APPLICATIONS DES ONDULEURS

Ils sont utilisés en électrotechnique pour :

- Soit fournir des tensions ou courants alternatifs de fréquence et amplitudes variables.
- Soit fournir une ou des tensions alternatives de fréquence et d'amplitude fixes.

Nous citons quelques domaines d'application :

- Production des tensions sinusoïdales de fréquences moyennes (de quelques kHz à quelques dizaines de Khz) : soudage...
- Alimentations alternatives de secours fonctionnant sur batteries d'accumulateurs, chauffage à induction....
- Alimentation des moteurs à courant alternatif à fréquence variable [16].

III.4 PRINCIPE GENERALE DE FONCTIONNEMENT

Le principe de fonctionnement d'un onduleur est basé sur l'électronique de commutation, on génère une onde de tension alternative à partir d'une tension continue comme le montre la *Figure III.2*, On peut dire qu'il existe deux moyens pour réaliser cette conversion. L'utilisation directe d'une paire d'interrupteurs qui consiste à régler la fréquence et la durée des interconnexions de la source avec la sortie. Il est donc plutôt temporel et débouche sur les techniques de modulation de largeur d'impulsion. Contrôler l'amplitude soit de façon continue en créant une source réglable (ce qui suppose l'existence d'un autre étage de conversion), soit de façon discrète en disposant d'un nombre suffisant de sources. [17]

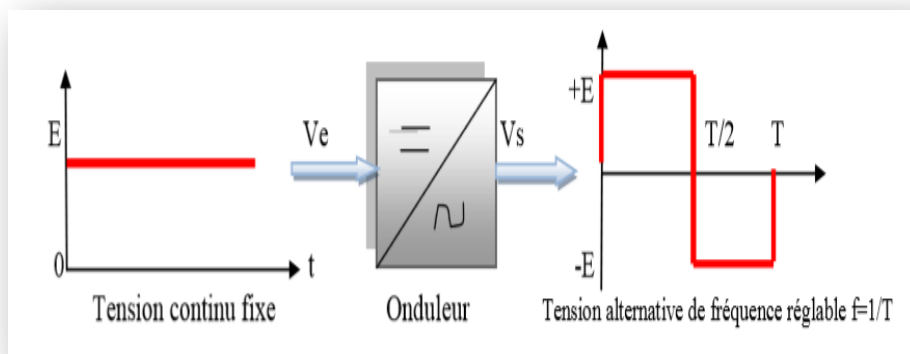


Figure III.2: Symbole et signal d'un onduleur [16]

Quand K_1 - K_2 sont fermés (On) et K_3 - K_4 sont ouverts (Off) pour $t_1 < t < t_2$, on obtient une alternance positif $U(t) = V_{dc}$ comme la montre la *Figure III.3*.

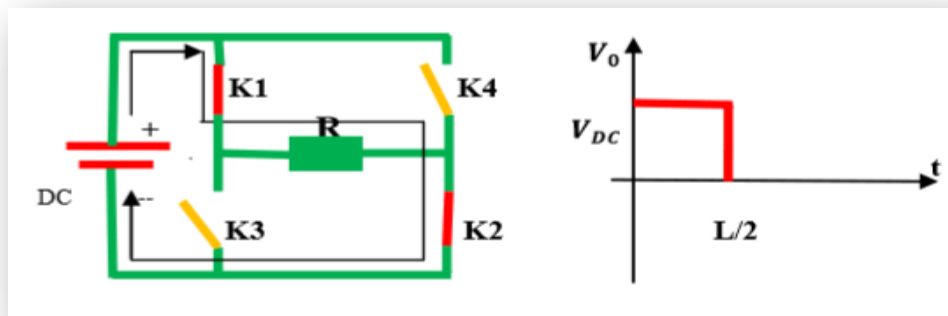


Figure III.3: Fonctionnement et signal de l'onduleur dans le 1er demi-cycle [16]

Pour obtenir le signal résultant sur la période complète qui est présenté sur la *Figure III.4*

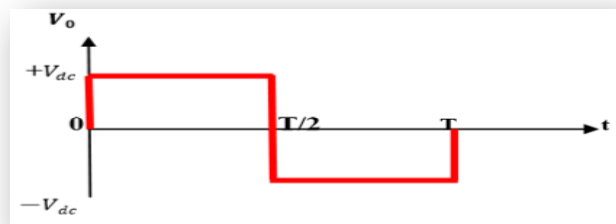


Figure III.4 : Signal complet de l'onduleur [16]

III.5 ONDULEUR DE TENSION

On appelle onduleur de tension, un onduleur alimenté par une source de tension continue. Son principe dans le cas où la sortie est monophasée avec un onduleur en pont à quatre interrupteurs : K_1 , K_2 , K_1' et K_2' . La *Figure III.5* représente le circuit de puissance d'un tel onduleur (pont monophasée) et la *Figure III.6* représente les signaux de commande et les formes d'ondes des tensions [16] [17]:

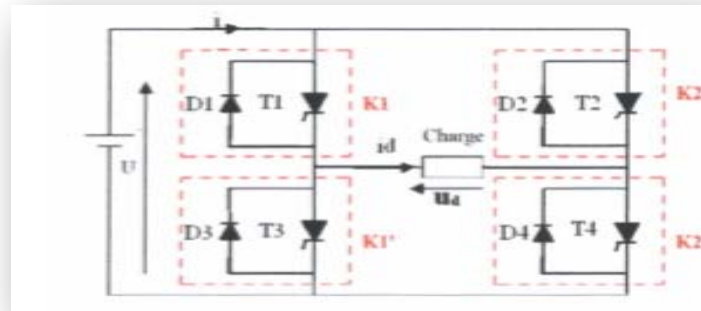


Figure III.5: Onduleur de tension en pont monophasé [16]

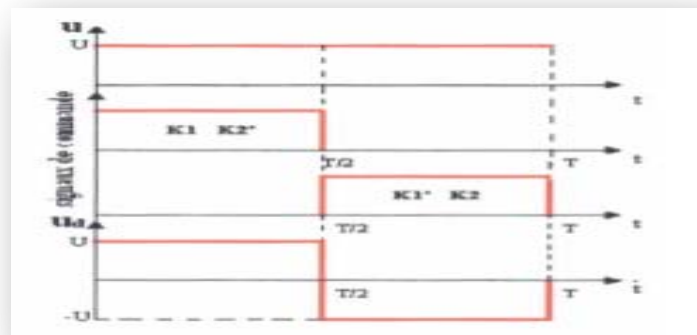


Figure III.6 : Signaux de commande et forme d'onde des tensions de sortie [16]

Les états des interrupteurs commandés nous permettent de donner l'expression d' $U_d(t)$ comme suit : Si la tension d'entrée de l'onduleur est constante et égale à U , quel que soit I on a :

- Pour $0 < t < T/2$: les interrupteurs, $K1, K2'$ sont fermés, et $K2, K1'$ sont ouverts :

D'où : $U_d = +U$

- Pour $T/2 < t < T$: les interrupteurs, $K2, K1'$ sont fermés, et $K1, K2'$ sont ouverts.

D'où: $U_d = -U$

Notant que les interrupteurs K_i de l'onduleur; *Figure III.8* sont formés par la mise en parallèle d'un semi-conducteur T_i commandé à l'ouverture et à la fermeture et d'une diode D_i . Cette dernière assure la continuité de courant permettant ainsi la conduction d'un courant négatif dans le cas où le courant est déphasé par rapport à la tension de sortie.

III.6 LES DIFFERENTS TYPES D'ONDULEURS DE TENSION

III.6.1 les onduleurs monophasés de tension

Ce type d'onduleur alimente des charges alternatives monophasées et destiné à deux configurations de base en demi-pont ou en pont complet : [18] [19] [21]

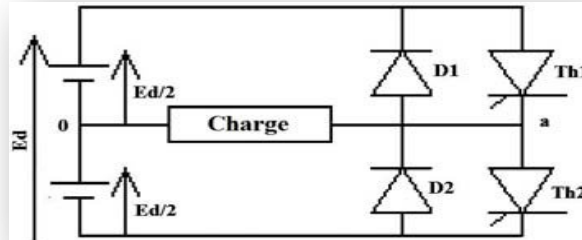


Figure III.7 : Schéma de l'onduleur de tension à demi-pont [18]

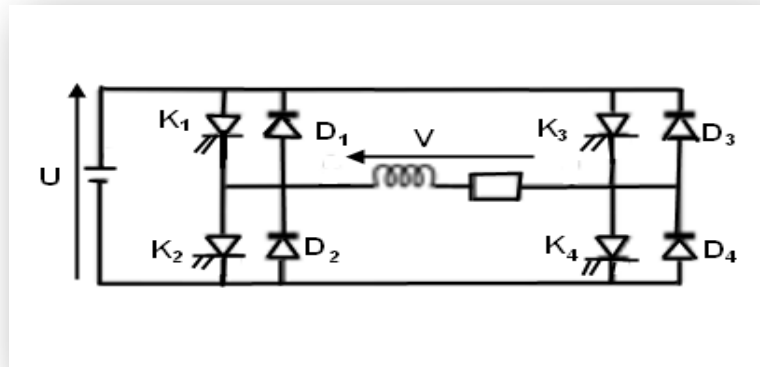


Figure III.8 : Schéma de l'onduleur de tension à deux niveaux en pont complet [19]

Pour obtenir une tension alternative à partir d'une tension continue en utilisant deux interrupteurs, il faut un point milieu, soit du côté de la sortie alternative, soit du côté de l'entrée continue, cela correspond à :

- L'onduleur monophasé avec transformateur de sortie à point milieu appelé **onduleur push-pull** Figure III 9.

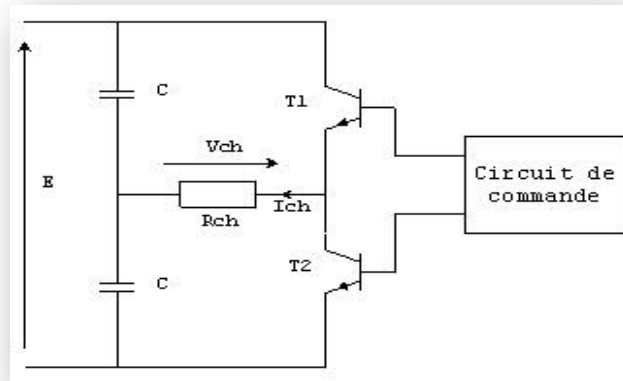


Figure III.9 : Onduleur monophasé avec diviseur Capacitif [21]

- L'onduleur monophasé avec diviseur capacitif à l'entrée appelé **onduleur en demi-pont** (voire Figure III.10).

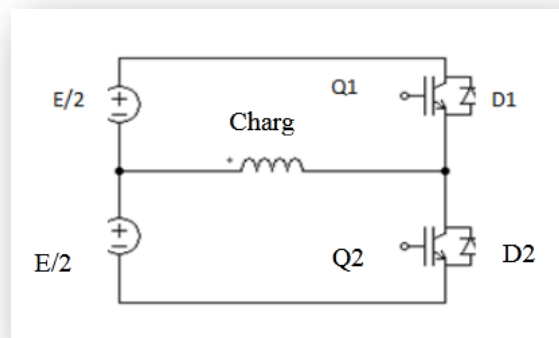


Figure III.10 : Onduleur monophasé en demi-pont [21]

Si on veut varier la largeur relative des créneaux formant les alternances de la tension de sortie, il faut quatre interrupteurs c'est : l'onduleur monophasé en pont Figure III.9

III.6.2 Les onduleurs de tension triphasée

L'onduleur de tension triphasé découle immédiatement de trois demi pont monophasé, on obtient l'onduleur triphasé à six interrupteurs Figure III.11. Chaque demi pont comprend un thyristor (ou un transistor) et une diode en antiparallèle. La source de tension continue est obtenue à partir d'un pont redresseur.

Pour assurer la continuité des courants de sortie alternatif I_a , I_b , I_c , les interrupteurs S_1 , $S'1$ et S_2 , $S'2$, S_3 et $S'3$ doivent être complémentaires deux à deux [22].

On définit $S_i = (T_i, D_i)$.

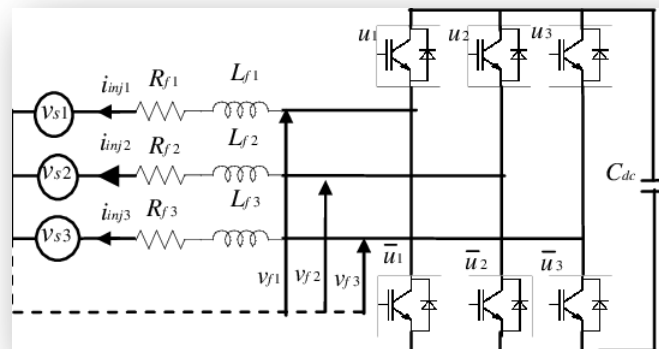


Figure III.11 : Schéma d'onduleur de tension triphasé [22]

III.6.3 Les onduleurs multi niveaux

Par définition, l'onduleur de tension multi-niveaux possède trois, cinq, sept etc. par leur structure. Les onduleurs à trois niveaux sont réversibles. Ils peuvent fonctionner en onduleur pour transférer l'énergie de la source de tension continue à la source de courant alternatif ou bien fonctionner en redresseur et assurer alors le transfert énergétique dans le sens inverse [23].

III.7 INTERET DES CONVERTISSEURS STATIQUES MULTI-NIVEAUX

Un convertisseur statique est dit « multi-niveaux » lorsqu'il génère une tension découpée de sortie composée d'au moins trois niveaux. Ce type de convertisseur présente essentiellement deux avantages. D'une part, les structures multi-niveaux permettent de limiter les contraintes en tension subies par les interrupteurs de puissance : chaque composant, lorsqu'il est à l'état bloqué, supporte une fraction d'autant plus faible de la pleine tension continue que le nombre de niveaux est élevé. D'autre part, la tension de sortie délivrée par les convertisseurs multi-niveaux présente d'intéressantes qualités spectrales. Le fait de multiplier le nombre de niveaux intermédiaires permet de réduire l'amplitude de chaque front montant ou descendant de la tension de sortie. L'amplitude des raies harmoniques est, par conséquent, d'autant moins élevée. [24] [25]

III.8 PRINCIPE DE L'ONDULEUR MULTI-NIVEAUX

La **figure 1** aide à mieux comprendre comment travaillent les convertisseurs Multi-niveaux. Un convertisseur à deux niveaux est représenté à la *Figure III.12 (a)*, dans laquelle les commutateurs semi-conducteurs ont été remplacés par un interrupteur idéal. La tension de sortie ne peut prendre que deux valeurs: 0 ou V_{dc} . Sur la *Figure III.12 (b)*, la tension de sortie de trois

niveaux peut prendre trois valeurs: 0, V_{dc1} ou $V_{dc1}+V_{dc2}$. Dans la *Figure III.12 (c)*. C'est le cas général de « m » niveaux est présenté par la *Figure III.12*. [26] [27] [28]

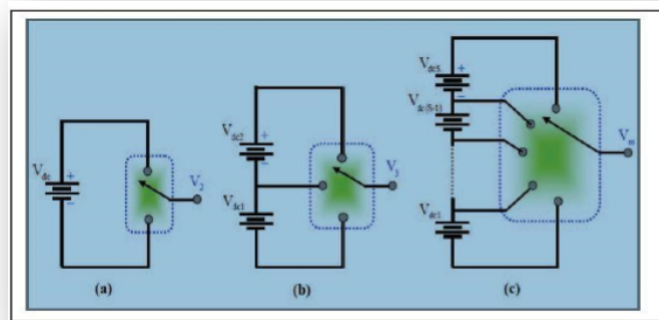


Figure III.12: Onduleur à niveaux multiples à deux (a), à trois (b) et à m niveaux (c) [27].

III.9 DIFFERENTES TOPOLOGIE DES ONDULEURS MULTI-NIVEAUX

Nous avons présenté les 3 topologies de base

III.9.1 Onduleur de tension à diode de bouclage

La première topologie, de l'onduleur de tension multi-niveaux est la structure NPC (Neutral Point Clamped). Elle a été proposée la première fois en 1981 par Nabae et al. En ce moment, c'est la topologie la plus utilisée dans l'industrie. [29] [30]

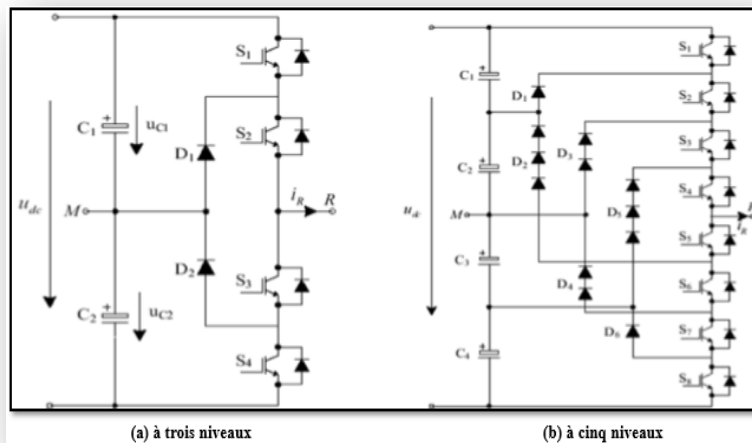


Figure III.13: Topologies d'onduleurs NPC [29]

Elle présente des avantages en comparaison avec celle à deux niveaux :

- les composants de puissance à semi-conducteur bloquent une tension inverse égale seulement à la moitié de la tension de la source continue;
- cette topologie peut être généralisée et les principes employés dans la topologie d'onduleur à trois niveaux peuvent être étendus pour l'utilisation dans des topologies avec n'importe quel nombre de niveaux.

Cependant, en utilisant cette topologie, l'expérience pratique a révélé plusieurs difficultés techniques qui compliquent ses applications dans le cas de la grande puissance.

Ce Sont:

- Pour les topologies avec plus de trois niveaux, les diodes de bouclage (clamping diodes) peuvent augmenter les contraintes en tension jusqu'à une valeur égale à E/m , où m est le nombre de niveaux. Donc, les connexions des diodes en série pourraient être exigées et cela complique la conception et soulève des questions de fiabilité et du coût de réalisation.
- Cette topologie exige des diodes de bouclage à vitesse de commutation élevée qui doivent être capable de supporter le courant de la pleine charge.
- Le maintien de l'équilibre de la charge des condensateurs demeure toujours une question ouverte pour les topologies des onduleurs NPC avec plus de trois niveaux. Bien que le NPC à trois niveaux fonctionne avec un facteur de puissance élevé, l'onduleur NPC à multi-niveaux est employé surtout dans les circuits de compensation. Cela est dû au problème d'équilibrage des capacités.

III.9.2 Onduleur de tension à condensateur flotteur

La topologie de l'onduleur multi-niveaux à condensateur flotteur (Flying Capacitor Multilevel Inverter), donnée par la *Figure III.14 a* été proposée en 1992.

L'avantage de cette topologie est qu'elle élimine le problème des diodes de bouclages présent dans les topologies des onduleurs NPC multi-niveaux. En plus, cette topologie limite naturellement les contraintes en tension imposées aux composants de puissance (faible valeur de dv/dt aux bornes des composants) et introduit des états de commutation additionnelles qui peuvent être utilisés pour aider à maintenir l'équilibre des charges dans les condensateurs. La

topologie de l'onduleur à condensateur flotteur a assez d'états de commutation pour contrôler l'équilibre des charges dans chaque bras d'onduleur ayant n'importe quel nombre de niveaux, ce qui n'est pas le cas dans l'onduleur NPC [31] [32].

Actuellement, il semble que cette topologie a quelques inconvénients. Néanmoins, quelques points faibles que doivent toujours être explorés :

- Le contrôleur de la charge du condensateur ajoute la complexité au contrôle du circuit entier ;
- La topologie de l'onduleur à condensateur flotteur à multi-niveaux peut exiger plus de condensateurs que la topologie de l'onduleur NPC. De plus, il est évident que des courants de grandes valeurs efficaces circuleront à travers ces condensateurs ;
- Il y a un potentiel de résonance parasite entre les condensateurs découplés.

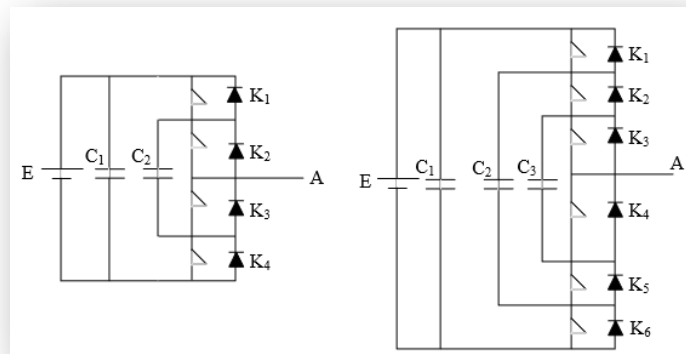


Figure III.14: Onduleurs à condensateurs flotteurs à trois et à quatre niveaux (phase A) [31]

III.9.3 Onduleur de tension en cascade

Une des premières applications des connexions en série des topologies des convertisseurs monophasés en pont était pour la stabilisation de plasma en 1988. Cette approche modulaire a été étendue pour inclure aussi les systèmes triphasés. Sans conteste, les complications et le coût des sources isolées pour chaque pont n'est pas un inconvénient sérieux parce qu'il est compensé par les avantages de la construction modulaire. L'avantage principal de cette approche est que la topologie de ce type d'onduleur facilite la maintenance en plus, elle permet de donner une façon très pratique pour augmenter le nombre de niveaux dans le système. La Figure III.15 représente un onduleur monophasé en cascade à cinq niveaux. [20] [21] [33] [34]

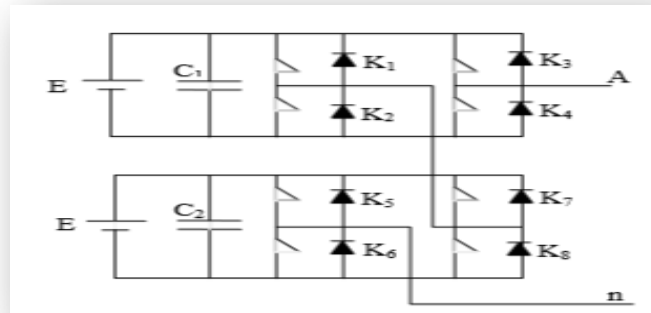


Figure III.15: Onduleur en cascade à 5 niveaux (phase A) [33]

Les sorties des onduleurs en pont sont connectées en série telle que l'onde de la tension synthétisée est la somme des tensions de sortie. Le nombre des niveaux de tension de sortie dans un onduleur en cascade est définie par :

$$m = 2s + 1$$

où « s » est le nombre des sources des tensions continues.

L'avantage majeur de cette approche hybride est que le nombre de sortie peut être augmenté davantage sans aucun ajout de nouveaux composants. Il faut seulement des sources de tensions continues avec différents niveaux de tensions. Probablement, le plus avantageux utilise des sources de tensions avec deux niveaux de tensions (E et 2E) comme le montre la Figure III.16 Cet arrangement peut générer une tension à sept niveaux (0, +/-E, +/-2E, +/-3E).

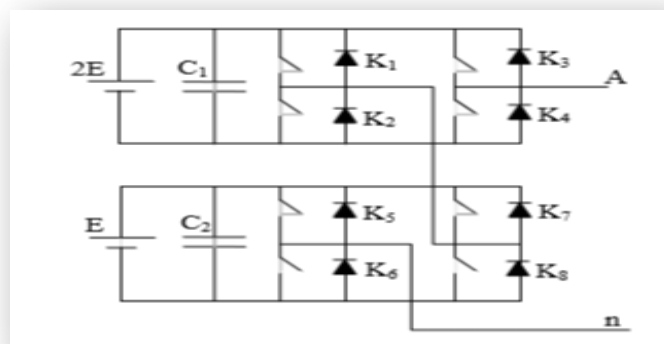


Figure III.16 : Onduleur en cascade à 7 niveaux [33]

III.10 FILTRE ACTIF DE PUISSANCE A CINQ NIVEAUX

III.10.1 Structure de FAP à cinq niveaux

Le filtre actif de puissance parallèle à cinq niveaux avec condensateurs à point milieu. Son schéma de principe est illustré sur la Figure III.17.

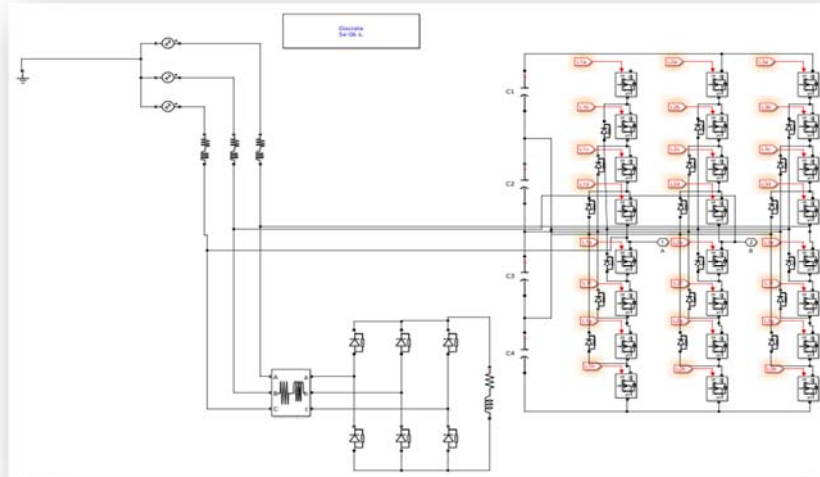


Figure III.17 : Circuit de puissance du filtre actif parallèle à cinq niveaux proposé

La *Figure III.17* présente l'onduleur triphasé à cinq niveaux à structure NPC dans lequel les diodes sont utilisées pour réaliser la connexion avec le point de référence O. [36]

Cet onduleur est dit à cinq niveaux, car il délivre cinq niveaux de tension ($+2U_c$, U_c , 0 , $-U_c$, $-2U_c$).

Pour obtenir un onduleur de tension de N-niveaux, N-1 capacités sont nécessaires. Les tensions aux bornes des condensateurs sont toutes égales à $E/(N-1)$. Chaque couple d'interrupteurs (S_{xy} , S'_{xy}) forme une cellule de commutation, ces deux interrupteurs sont donc commandés de façon complémentaire.

Donc il est constitué de trois bras et quatre sources de tension continue. Chaque bras comporte huit interrupteurs en série et douze diodes. Chaque interrupteur est composé d'un transistor et d'une diode montée en tête bêche.

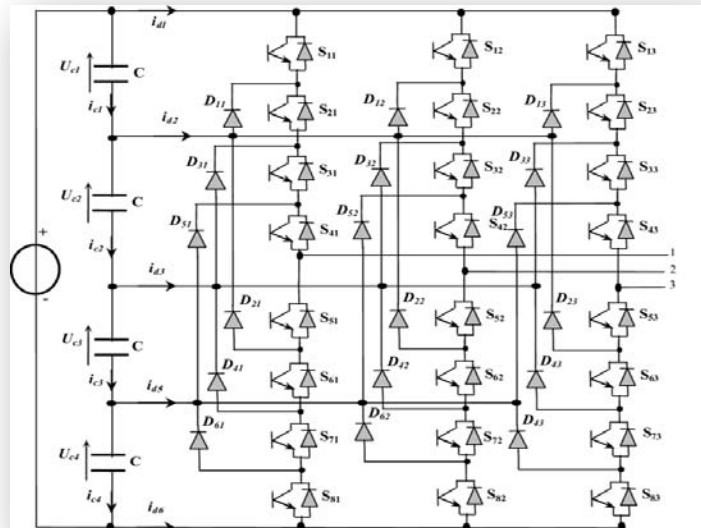


Figure III.18 : Schéma d'un onduleur à diode flottante à cinq niveaux [33]

Pour la simulation sous Matlab/Sim Power System, on a utilisé les paramètres du Tableau III.1 ci-dessous:

Tableau III.1 : les paramètres de système étudié

<i>Paramètre</i>		<i>Valeur numérique</i>
<i>Réseau électrique</i>	<i>Tension Vs</i>	240V
	<i>Fréquence f</i>	50HZ
	<i>Résistance Rs</i>	$10^{-3}M\Omega$
	<i>Inductance Ls</i>	$10^{-8}H$
<i>Charge non linéaire</i>	<i>Résistance Rcharge</i>	0.79Ω
	<i>Inductance Lcharge</i>	$2.6*10^{-6} H$
	<i>Résistance Rc</i>	$5*10^{-3} \Omega$
	<i>Inductance Lc</i>	$0.2*10^{-3} H$
<i>DC CAP</i>	<i>Cdc</i>	$80*10^{-4} F$

Maintenant nous allons présenter le filtre actif parallèle cinq niveaux structure NPC, qui est représenté sur la *Figure III.19*.

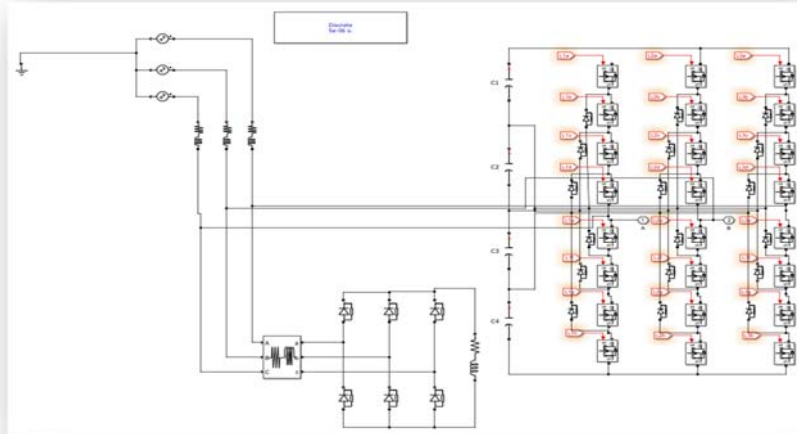


Figure III.19 : Circuit de puissance du filtre actif parallèle cinq niveaux proposé.

III.11 SIMULATION DU SYSTEME ET INTERPRETATIONS DES RESULTATS

Dans ce qui suit, nous allons présenter les résultats de simulation d'un filtre actif parallèle a cinq niveaux à structure tension, connecté en parallèle au réseau électrique triphasé à trois fils. Le réseau électrique est également connecté à une charge non linéaire triphasée (pont redresseur à diodes) alimentant une charge de type RL. La stratégie de commande utilisé pour ce filtre actif de puissance est celle de la méthode des puissances instantané p-q, utilisant un contrôle MLI à quatre porteuses. Dans un premier temps, nous avons simulé le réseau électrique triphasé et sa charge non linéaire, sans y connecter le filtre actif de tension multi-niveau *Figure III.20* dont le *Tableau III.2* donne les valeurs numériques de notre système.

III.11.1 Simulation du système sans filtre

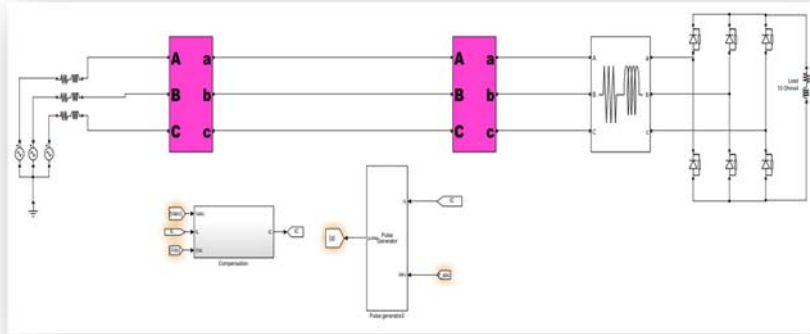


Figure III.20 : Réseau électrique triphasé Connecte à une charge non linéaire.

Tableau III.2 : Paramètres de simulation pour ce système.

<i>Tension [V]</i>	<i>f [Hz]</i>	<i>Rs [Ω]</i>	<i>Ls [μH]</i>	<i>Rcharge [Ω]</i>	<i>Lcharge [μH]</i>
240	50	0.001	0.01	0.79	2.6

Puisque tous les courants de lignes sont identiques, donc nous présentons les résultats de simulation pour une seule phase.

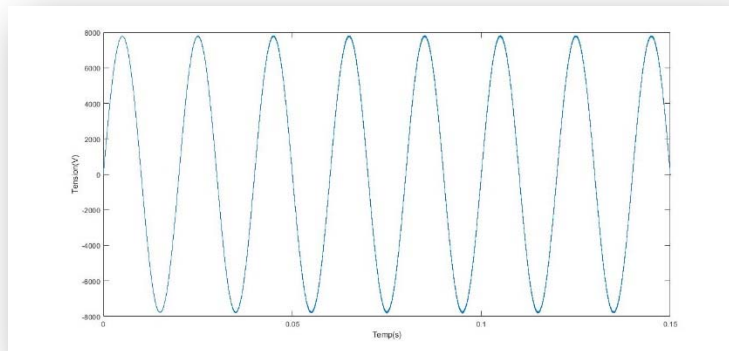


Figure III.21 : Tension monophasé de la source (Avant filtrage).

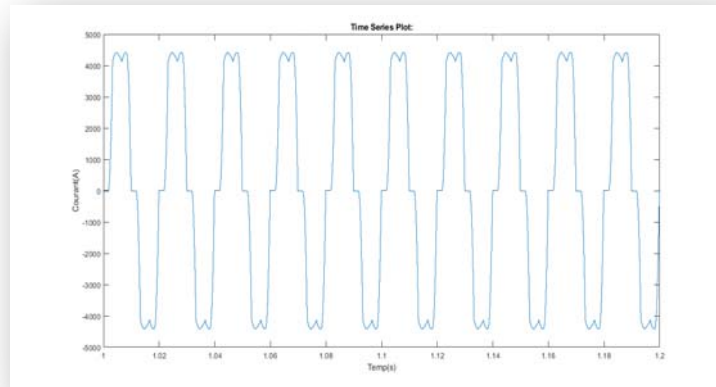


Figure III.22 : Courant de la charge non linéaire I_c (a) (Avant filtrage)

Remarque :

Courant de source et courant de charge est identique.

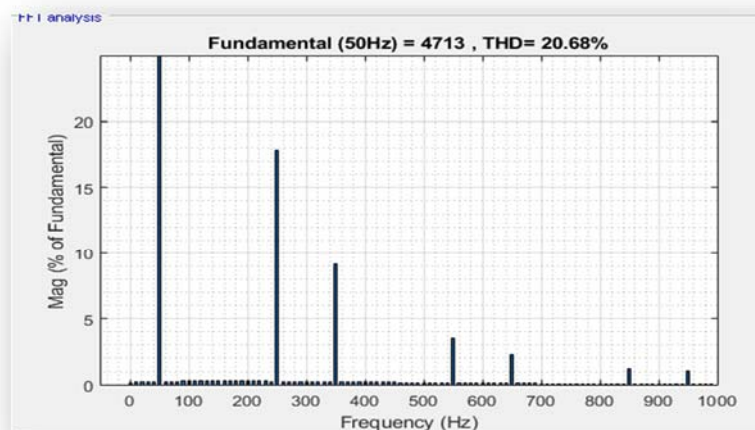


Figure III.23 : THD Avant filtrage.

Remarque

- La tension reste à sa valeur nominale.
- Le courant de source et le même que celui de la charge avant compensation.
- THD=20.78% cette valeur est élevée et qui dépasse les limites de la normalisation.

Pour y remédié, on se propose d'ajouter un filtre actif parallèle de tension à cinq niveaux dont la stratégie de commande utilisée est la technique de puissance instantané (p-q). Les paramètres des composants de ce filtre actif de tension sont donnés dans le *Tableau III.3*.

III.11.2 Simulation du système Après filtrage

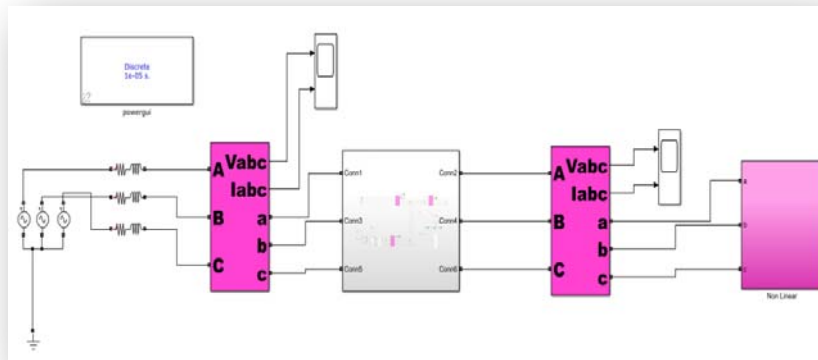


Figure III.24: Réseau électrique triphasé Connecte à une charge non linéaire.

Subsystem :

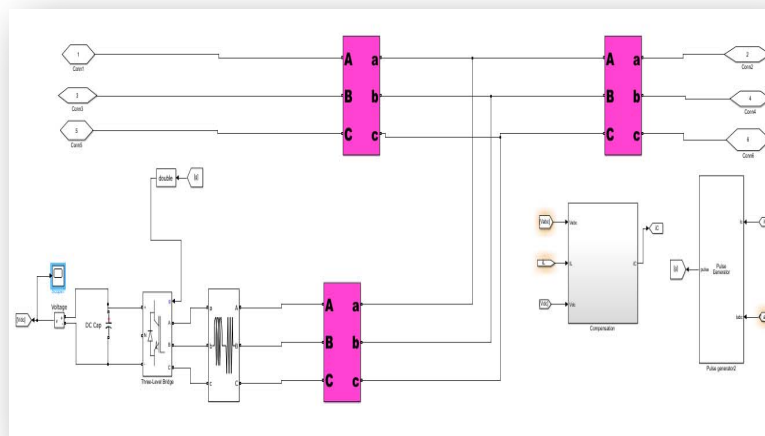


Figure III.25: Réseau électrique triphasé connectée à une charge Non-linéaire (dans subsystem).

Tableau III.3 : Paramètres du filtre actif de puissance parallèle.

$V_{dc}[V]$	$C_{dc}[\mu F]$	$R_f[m\Omega]$	$L_f [mH]$
700	0.008	5	0.2

Les résultats de simulation de notre système sont donnés sur les figures suivantes :

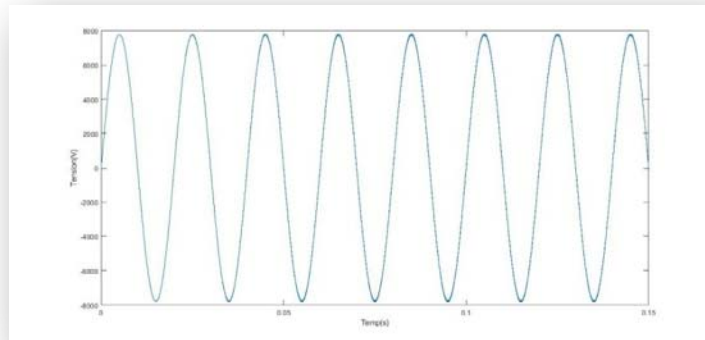


Figure III.26: Tension monophasé de la source (Après filtrage)

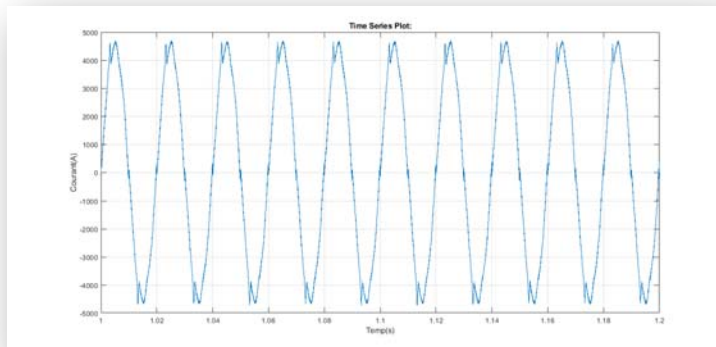


Figure III.27 : Courant de la source $I_s(a)$ (Après filtrage)

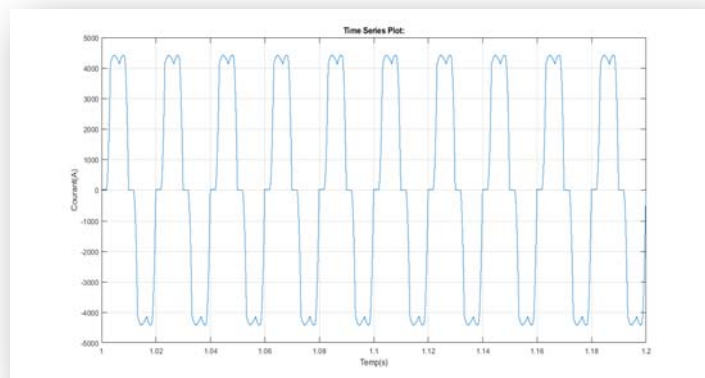


Figure III.28: Courant de la charge non linéaire $I_c (a)$ (Après filtrage).

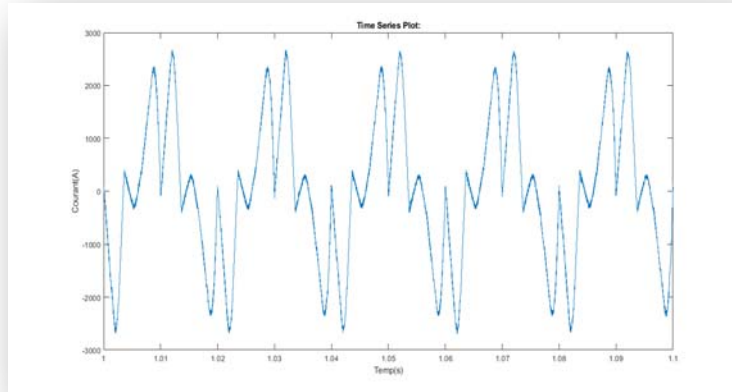


Figure III.29 : Courant de FAPP $I_f(a)$ (Après filtrage)

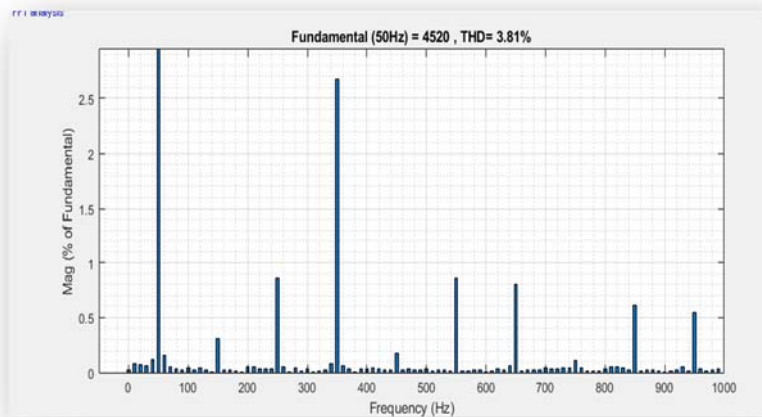


Figure III.30 : THD Après filtrage

Tableau III.4 : comparaison THD entre FAPP et FAPP +Cinq niveau

	<i>FAPP</i>	<i>FAPP+CINQ NIVEAU</i>
<i>THD Avant filtrage</i>	<i>26.21%</i>	<i>20.78%</i>
<i>THD Après filtrage</i>	<i>4.21%</i>	<i>3.81%</i>

Remarque :

Les résultats ont obtenu ont mis en évidence que filtre actif à cinq niveau est plus performant que filtre actif parallèle de puissance.

III.12 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons utilisé un filtre actif parallèle pour éliminer les harmoniques injecter par la charge non linéaire, l'onduleur de tension utilisé dans le filtre actif de puissance est un onduleur de tension à cinq niveau.

Nous avons montré que ce type de filtre actifs de tension est intéressant pour la compensation des harmoniques de courants générés par les charges dites non linéaires. La stratégie de commande utilisée est basée sur la technique de puissance instantanée (p-q).

Les résultats ainsi obtenus ont été très satisfaisants avec un THD inférieur à 5%, conformément aux normes CEI.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur l'étude et la simulation d'un Filtre actif parallèle multi-niveaux, pour se faire nous l'avons partagé en trois Chapitres. Avant d'aller au cœur de notre objectif, au premier chapitre nous avons Présenté les différentes sources de pollution des réseaux électriques, leurs Conséquences sur le réseau et l'ensemble du matériel électrique ainsi que les Différentes méthodes de dépollution proposées dans la littérature. Les normes et Recommandations données par les différents organismes que nous avons Présentées dans ce chapitre nous ont aussi servi comme référence sur la fiabilité Des résultats que nous avons obtenus lors des simulations.

Nous avons consacré le deuxième chapitre à l'étude du filtre actif parallèle deux niveaux, pour se faire nous l'avons partagé en deux parties : la partie puissance dans laquelle nous avons présenté les différents organes qui constituent le filtre actif parallèle et leurs rôles, et la partie commande qui consiste d'abord en l'identification des harmoniques générés par la charge non linéaire. Ce qui nous a mené à développer méthodes d'identification des courants perturbateurs (la méthode des puissances instantanées). Nous sommes ensuite passés à la régulation de la tension continue du fait que nous avons utilisé une source de tension flottante, pour cela nous avons utilisé un régulateur proportionnel intégral PI. A la fin, nous avons présenté et appliqué deux types de commande de l'onduleur (la commande par hystérésis et la commande par MLI), nous avons vu que la commande de l'onduleur par MLI nécessite aussi l'introduction de régulateurs PI pour chaque phase du courant.

Toutes nos simulations ont été faites sous environnement MATLAB, les résultats que nous avons obtenus révèlent que les deux types de commande (hystérésis et MLI) satisfont largement les normes imposées, mais nous nous sommes plus intéressés à la commande par MLI car elle donne des résultats encore meilleurs.

Au troisième chapitre, nous avons voulu élargir le domaine d'application des filtres actifs parallèles du simple niveau à un niveau multiple. Nous avons d'abord commencé par l'introduction des différents types d'onduleurs multi-niveaux et leurs structures.

Nous avons vu qu'on peut modéliser le filtre actif multi-niveaux en généralisant le modèle du filtre actif simple niveau à l'ordre n , mais il faut aussi généraliser la commande MLI, et bien

redimensionner le régulateur PI pour chaque niveau. À la fin nous avons abouti à une conclusion qu'il faut souligner, à chaque fois qu'on augmente le niveau on diminue l'inductance de sortie du filtre en la divisant par le niveau lui-même.

Les résultats de simulation ont montré l'intérêt des filtres actifs multi-niveaux à savoir dans la finesse des courbes de courant obtenues, la diminution des ondulations de courant, et l'amélioration remarquable du taux de distorsion harmonique.

Comme perspectives pour ce travail, remplacer les régulateurs conventionnels par des régulateurs prédictifs serait d'un grand intérêt et concrétiser cette étude par une réalisation pratique serait plus que souhaitable.

Référence bibliographique

[1] **B. AIT OUFQIR**, “filtrage d’harmoniques dans un réseau mixte photovoltaïque – électrique par estimation adaptative coupe Bande“, mémoire de fin d’étude, université du Québec à Montréal, Décembre 2017.

[2] **M.MAGHRAOUI**, “Validation de techniques de commande d’un filtre actif parallèle“, mémoire de master, école de technologie supérieure, 2007.

[3] **S. LARABI & J. SHABANI AMANI**, “Etude et simulation d’une commande d’un filtre actif de Puissance base sur les ondelettes“, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, Mémoire de fin d’étude de master, 14 Juin 2017.

[4] **H.SALEM**, “commande d’un filtre actif parallèle à quatre bras par des techniques avancées“, mémoire du diplôme magister, université Mohamed Khider_Biskra, 2005.

[5] **S.BEN ALI & S.BOUHANAK**, “Etude et simulation d’un filtre actif parallèle à quatre fils“, mémoire de master, université Echahid Hama Lakheder d’El-Oued, juin 2015.

[6] **A.TETBIRT & Aek. BOUGHAR**, “commande d’un filtre actif shunt trois niveaux par logique floue“, mémoire de master, université de Djilali Bounaama –Khemis Miliana, 2015.

[7] **F.EMMERI & Z.GHEMBAZA**, “ Etude et simulation d’un circuit de commande pour filtre actif de puissance à quatre bras pour un réseau à quatre fils“, mémoire de master, université Abou BEKR BELKAID de Tlemcen, 2015.

[8] **M.TAHRI & Z.DJEMAA**, “ Etude et simulation d’une commande robuste pour filtre actif de puissance à deux bras à point milieu pour la compensation de courant harmonique“, mémoire de master, UABB-Tlemcen, juin 2017.

[9] **A .ELAISSOUF & AeR. KHEBCHI**, “ Etude et simulation d’un filtre actif série“, mémoire de master, UABB-Tlemcen, 2016.

- [10] **T. BENNAIDJA**, “filtrage actif pour les réseaux déséquilibrés et distordus“, mémoire de magister, université Ferhat ABBAS-SETIF_1_, 2014.
- [11] **A.LOPEZ DE HEREDIA BERMEO**, “commandes avancées des systèmes dédiés à l'amélioration de la qualité de l'énergie : de la basse tension à la montée en tension“, thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble-Espagne, Novembre 2006.
- [12] **M. M.ABDUSALAM**, “Structures et Stratégies de Commande des Filtrés Actifs Parallèle et Hybride avec Validations Expérimentales“, Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré-Nancy-I-France, 29 mai 2008.
- [13] **A.AMARA & A.Y. BENGANA**, “ Etude et simulation d'un circuit de commande pour un filtre actif de puissance parallèle à deux bras à point milieu pour un réseau électrique à trois fils“, mémoire de master, université Abou BEKR BELKAID de Tlemcen, 25 juin 2015.
- [14] **W.ZIDANE & C. ZENDAGUI**, “Etude Technico économique d'une installation d'un système pour la contribution moderne de la maîtrise de l'énergie réactive“, mémoire de master, UABB_ Tlemcen, 1 juillet 2019.
- [15] **M.C. BENHABIB**, “Contribution à l'étude des différentes topologies et commandes des filtres actifs parallèles à structure tension : Modélisation, simulation et validation expérimentale de la commande“, Thèse de doctorat en génie électrique, Nancy-I, le 17 décembre 2004.
- [16] **Aek.YOUSFI**, “Amélioration de la qualité d'énergie électrique en utilisant un onduleur de tension à cinq niveaux“, mémoire de magister en Electrotechnique, Option Réseaux Electriques. Université Hassiba Ben Bouali de CHLEF, 2008.
- [17] **Aeb.TIAIBA**, “ Utilisation d'un onduleur multi niveau pour la compensation de l'énergie électrique“, UNIVERSITE DE MOHAMED BOUDIAF- M'SILA
- [18] Onduleurs et harmoniques, Cahiers techniques Merlin Gerin N°159.
- [19] **T. Wildi** : Electrotechnique, 3eme édition, éditions de Boeck université (1999)
- [20][21] https://www.google.com.tr/search?q=schéma+onduleur++pont+comlet+&tbm=isch&ved=2ahUKEwiT7dKj76brAhWC04UKHZABBYUQ2-cCegQIABAA&oq=schéma+onduleur++pont+comlet+&gs_lcp=CgNpbWcQA1CslgJY_8YC YPTJAmgCcAB4AIABIQGIAYcIkgEDMi43mAEAoAEBqgELZ3dzLXdpei1pbWfAAQE&sclien t=img&ei=eOU8X5PRKYKnlwSQg5SoCA&bih=627&biw=1326#imgrc=ATryAeSC-EPu-M&imgdii=x5qDv-tAzQNjZM.
- [22] **S.OKBA et W. BEDDIAR**, “ Etude et réalisation d'un onduleur de tension triphasé à MLI“, Université MOHAMED BOUDIAF - M'SILA.

- [23] **W. BOUCHERRITE**, “ Convertisseurs multi niveaux dans les systèmes PV Connectés au réseau “, mémoire de magister en Electrotechnique, Option de Energies renouvelables. Université Mohamed Khider_Biskra
- [24] **P. BARTHOLOMEUS, Ph. LE MOIGNE**, “A simple method for the valuation of the harmonics generated by multilevel converters”. *ELECTRIMACS'96* Saint Nazaire, 17-18-19 Sept 1996.
- [25] **P. BARTHOLOMEUS**, “Contribution à l'étude des redresseurs à facteur de puissance quasi unitaire fonctionnant en mode multi-niveaux. Application au chargeur de batterie”, Rapport de thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, 1996.
- [26] **J-P. Louis**, “Modélisation des machines électriques en vue de leur commande”
- [27] **L. BAGHLI**, “Modélisation et commande de la machine asynchrone”, 2005.
- [28] **B. LAKEHAL**, “ Modélisation et commande d'un onduleur triphasé à structure multi-niveau “, Université A/Mira - Bejaia Faculté de Technologie Département de Génie électrique.
- [29] **A. NABAE, I. TAKAHASHI and H. AKAGI**, “A New Neutral-Point-Clamped PWM Inverter”, *IEEE Trans. Ind. Application*, Vol. IA-17, pp. 518-523, Sep. /Oct. 1981.
- [30] **N. CELANOVIC**, “Space Vector Modulation and Control of Multilevel Converters“, Ph.D Thesis, Virginia Polytechnic Institute, 2000.
- [31] **K. YAKOUB**, “ Réduction des effets de la tension homopolaire dans les associations onduleur multi niveaux moteur à induction “, université de Batna.
- [32] **Y. SHAKWEH and E.A. LEWIS**, “Assessment of medium voltage PWM VSI topologies for multi-megawatt variable speed drive applications,” *IEEE-PESC Conference Record*, vol.2, pp. 965 –971, 1999.
- [33] **L. M. TOLBERT**, “Multilevel Converters for Large Electric Drives“, *IEEE Trans. on Ind Application*, Vol. 35, pp. 36-44, January/February 1999.
- [34] **N. CELANOVIC, D. BOROYEVICH**, “A Comprehensive Study of Neutral-Point Voltage Balancing Problem in Three Level Neutral-Point-Clamped Voltage Source PWM Inverters “, *IEEE-APEC Conference Record*, 1999.
- [35] **M. D. MANJREKAR, P. STEIMER and T. A. LIPO**, “Hybrid Multilevel Power Conversion System: A Competitive Solution for High Power Applications“, *IEEE-IAS Conference*, 1999.
- [36] **N. MESBAHI**, “Contribution à l'Etude des Performances des Onduleurs Multi-niveaux sur les Réseaux de Distribution», Thèse de Doctorat, Option Réseaux Electriques. Université Badji Mokhtar de Annaba, 2014.

[37] BEAULIEU.S, “Etude et mise au point d’un filtre actif d’harmonique en vue d’améliorer la qualité de l’alimentation électrique”, mémoire de Fin d’Etudes, Université Québec à Chicoutimi, Mai 2007.

[38] Abdelhamid. H, “Amélioration des performances du filtre actif : Application du régulateur proportionnel intégral et du régulateur floue”, mémoire de Magister, Ecole de Technologie Supérieure, Université Québec, Novembre 2004

[39] K.mohammed racim et B.karim , “Paramètres de la qualité de la tension d’un réseau électrique étude et analyse”, mémoire d’ingénieur, Ecole nationale Polytechnique, Alger2008.

[40 AKA] H. AKAGI, “Active Harmonic Filters,” Proceed. IEEE, vol. 93, No. 12, pp 2128-2141, Dec. 2005.

ملخص:

مشكلة التلوث التوافقي في شبكات توزيع الطاقة الكهربائية أصبحت مصدر قلق متزايد مع تزايد استخدام الأحمال غير الخطية.

نقدم في هذه الورقة، دراسة ومراقبة المصفي الفعال المتوازي ذو أربعة أذرع لتحسين نوعية الطاقة في الشبكة الكهربائية. لكي نتحكم في المصفي الفعال هناك ثلاث نقاط مهمة يجب الاهتمام بها : كيفية استخراج التيار المحمل بالتوافقيات والتحكم في التيارات المبعوثة من طرف المصفي الفعال في الشبكة الكهربائية، وكذلك كيفية تنظيم الجهد المستمر للقدرة.

هناك العديد من الطرق لاستخراج التيارات المحملة بالتوافقيات منها طريقة الاستطاعة اللحظية الكلاسيكية وطريقة الاستطاعة اللحظية باستعمال المصفي المتعدد المتغيرات وطريقة المرجع المتزامن , استعملنا نوع واحد للتحكم في التيار هو التحكم في الطريقة التخلفية الكلاسيكية وهي قوية وسهلة التنفيذ . واستعملنا نوعين من منظمات الجهد المستمر للقدرة: ANFIS ونتائج المحاكاة تبين متانة وحدة تحكم ، ANFIS الكلاسيكية و منظم عن طريق التقنيات الذكية PI وحدة تحكم بتطبيقها على المصفي الفعال ذو أربعة أذرع وقدمت لنا نتائج جيدة.

كلمات مفتاحية : الأحمال غير الخطية - المصفي الفعال المتوازي ذو أربعة أذرع - الاستطاعة اللحظية - العنصر الغامض

Résumé :

Les problèmes de la pollution harmonique dans les réseaux électriques de distribution deviennent très préoccupants à cause de l'accroissement de l'usage de charges polluantes (non linéaires).

*On présente dans ce mémoire, une étude de commande d'un filtre actif parallèle de puissance pour l'amélioration de la qualité d'énergie d'un réseau électrique. La commande de ce filtre basé sur trois axes distincts : l'un concerne l'identification des courants harmoniques et l'autre s'intéresse au contrôle des courants injectés dans le réseau par le filtre actif à trois bras, et le troisième pour régulation de la tension de bus continu. Il existe plusieurs méthodes d'identification des courants harmoniques tels que la méthode des puissances instantanées réels et imaginaires $p-q$ par une commande de type directe. On a utilisé un seul type de contrôleur de courant c'est la **MLI** avec un régulateur **PI** du bus continu. Ensuite nous avons étudiée et appliqué la commande pour ce filtre à base de l'onduleur de tension à cinq niveaux.*

Les résultats de simulations présentes démontrent bien les performances statiques et dynamiques du système de la commande étudié et offrant des bons résultats du THD du courant côté source.

Mots clés : Qualité d'énergie, filtre actif parallèle, onduleur multi-niveaux, techniques d'élimination d'harmoniques, charge non linéaire, puissances instantanées, commande MLI

Abstract :

The problems of harmonic pollution in electrical distribution networks are becoming of great concern due to the increase in the use of polluting (non-linear) loads.

This thesis presents a control study of an active parallel power filter for improving the energy quality of an electrical network. The control of this filter based on three distinct axes: one concerns the identification of harmonic currents and the other concerns the control of the currents injected into the network by the active three-arm filter, and the third for regulation of DC bus voltage. There are several methods of identifying harmonic currents such as the method of real and imaginary instantaneous powers $p-q$ by direct type control. Only one type of current controller was used, it was PWM with a DC bus PI regulator. Then we studied and applied the command for this five-level voltage inverter based filter.

The results of the simulations present clearly demonstrate the static and dynamic performances of the control system studied and offering good results for the THD of the source side current.

Keywords: Power quality, parallel active filter, multi-level inverter, harmonic elimination techniques, non-linear load, instantaneous powers, PWM control