

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

FACULTE : TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT: ELECTRONIQUE  
N° d'ordre : INST-15



DOMAINE: SCIENCES ET TECHNOLOGIES  
FILIERE : ELECTRONIQUE  
OPTION : INSTRUMENTATION

**Mémoire présenté pour l'obtention Du diplôme de Master Académique**

**Proposé et dirigé par:**

-Dr. Djazia Kamel

**Réalisé par:**

-Rezzig Maroua  
-Laib Lina

**Intitulé**

**Amélioration de la qualité d'énergie par filtrage actif  
utilisant la commande DPC**

**Soutenu devant le jury composé de:**

Dr.  
Dr. DJAZIA Kamel  
Dr.

Université de M'sila  
Université de M'sila  
Université de M'sila

Président  
Rapporteur  
Examineur

**Année universitaire: 2020 / 2021**



# Remerciements:

*Nous tenons à remercier Dieu avant tout, car c'est lui qui nous a donné force, patience et volonté pendant toutes ces années.*

*Au début, nous tenons à remercier notre directeur de thèse, le Dr Kamal Jazia, pour avoir suggéré ce sujet, et de l'avoir supervisé. Merci beaucoup.*

*Nous remercions également tous les professeurs du Département d'électronique qui ont contribué d'une manière directe ou indirecte à la réalisation de cette thèse, et nous adressons nos remerciements particuliers à l'habile professeur Bouzidi Riad, qui nous a aidé à terminer notre thèse. Merci beaucoup sincèrement. Enfin, nous tenons à exprimer nos remerciements à tous nos amis et collègues. Merci à tous.*



# *Dédicaces*

*Il m'est difficile d'exprimer tout ce que je dois à ma famille. Je pense particulièrement à mon père, qui a travaillé dur pour moi, à ma Mère pour l'incalculable soutien moral et logistique et les nombreux encouragements que j'ai toujours reçus de leur part.*

*à mes sœurs et frères avec tout mon amour,*

*à mon fiancé, merci de m'encourager,*

*à mon papillon, seule petite-fille de la famille "Maria",*

*à mes chers amis Lina et Khawla, le plus proche de mon cœur*

*à tous les Étudiants de la faculté de technologie.*



*R. Marwa*





# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail en signe de respect et d'appréciation :*

*à mon père, que Dieu ait pitié de lui,*

*à ma mère, qui m'a toujours encouragée pendant les années d'études*

*et m'asoutenu dans ma vie,*

*à mes sœurs et frères,*

*à mes chers amis Marwa et Khawla, qui ont été la plus belle chose de ma vie,*

*à tous mes amis pendant les années d'études*

*à Université Muhammad Boudiaf*



*L. Lina*



# Sommaire:

Introduction Générale

## **ChapitreI: Qualité de l'énergie et Les Perturbations harmoniques**

I. Introduction.....	05
I.1 Quality de l'énergie.....	05
I.1.1 Qualité de la tension.....	06
I.1.2 Qualité du courant.....	09
I.2 Problématique des harmoniques.....	09
I.2.1 Perturbations dans lesréseaux de distribution électrique.....	09
I.2.2 Harmoniques de courant & de tension.....	09
I.3 Les perturbations harmoniques.....	10
I.4 Sources des harmoniques.....	11
I.5 Effets des harmoniques.....	12
I.6 Caractérisations des harmoniques.....	13
I.7 Normes & Reglementation.....	16
I.8. Conclusion.....	17

## **ChapitreII :Solutions pour l'amélioration de la qualité d'énergie**

II. Introduction.....	19
II.1 Solution traditionnelles.....	19
II.1.1 Surdimensionnement de l'installation électrique.....	19
II.1.2 Renforcement de la puissance de court -circuit.....	20
II.1.3 Rééquilibrage des courants d u réseau électrique.....	20
II.1.4 Les filtres passifs.....	20
II.2 Solutions modernes.....	22
II.2.1 Le filtrage actif.....	23
II.2.1.1 Le principe de fonctionnement du filtre actif.....	24
II.2.2 Les principaux types de filtres.....	25
II.2.2.1 Le filtre actif à source de courant.....	25
I.2.2.2 Le filtre actif à source de tension.....	25
II.2.3 le filtre actif série.....	26
II.2.4 Filtre combiné parallèle-série (UPQC).....	27
II.2.5 Filtre actif hybride.....	27
II.2.6 Filtre actif parallèle.....	29
II.2.6.1 Les principes de fonctionnement.....	30

I.2.6.2 Comparatif et choix du filtrage actif parallèle (FAP) .....	30
II.3 Conclusion.....	32
<b>ChapitreIII: Commande directe de puissance du filtre actif parallèle et résultats de simulation</b>	
III. Introduction.....	34
III.1. Etat de l'art de filtre active parallèle.....	34
III.1.2. Principe de fonctionnement.....	35
III.1.3. Structure général du filtre active parallèle.....	35
III.1.4. Applications des filtres actifs parallèles.....	36
III.1.5. Classement des filtres actifs parallèles.....	37
III.1.5.1 Etudes de la partie puissance.....	39
III.1.5.2. Etudes de la Partie command.....	42
III.1.5.2.1. La commande par hystérésis.....	42
III.1.5.2.2. Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI).....	43
III.1.5.2.3 Commande par MLI vectorielle.....	44
III.1.5.3. Régulation de la tension continue.....	44
III.1.5.4. Principe.....	44
III.2. la commande directe de puissance DPC.....	45
III.2.1. Principe de la commande directe de puissance.....	45
III.2.2. Etat de l'art du contrôle direct de puissance.....	46
III.2.3. Principe Du Dpc Classique.....	47
III.2.4. Calcul des puissances instantanées.....	47
III.2.4.1. Calcul des puissances instantanées injectées par SAPF.....	48
III.2.4.2. Calcul des puissances instantanées de référence.....	48
III.2.5. La position angulaire $\theta_n$ .....	48
III.2.6. Table de commutation.....	49
III.3. Résultats de simulation.....	50
III.4. Conclusion.....	55
Conclusion générale.....	57

## Liste des Figures

### Figures du Chapitre I

<b>Figure I.1:</b> variation de Fréquence.....	7
<b>Figure I.2:</b> Source de tension harmonique .....	10
<b>Figure I.3:</b> Synthèse d'un signal à partir des harmoniques.....	10
<b>Figure I.4:</b> symbole d'un redresseur et pont de Graetz monophasé.....	11
<b>Figure I.5:</b> Schéma de charge linéaire avec une source de tension triphasée.....	11
<b>Figure I.6:</b> schéma de charge non linéaire .....	12
<b>Figure I.7:</b> Diagramme de Fresnel des puissances .....	15

### Figures du Chapitre II:

<b>Figure II.1:</b> Raccordement d'un filtre passif.....	20
<b>Figure II.2 :</b> Filtre passif résonant.....	21
<b>Figure II.3 :</b> Filtre passif amorti.....	21
<b>Figure II.4:</b> Filtre passif parallèle anti-résonant.....	22
<b>Figure II.5:</b> Schéma de principe d'un filtre actif.....	24
<b>Figure II.6:</b> Schéma de filtre actif à source de courant.....	25
<b>Figure II.7:</b> Schéma de filtre actif à source de tension.....	26
<b>Figure II.8:</b> Filtre actif série (FAS..) .....	26
<b>Figure II.9:</b> Combinaison parallèle-série actifs (UPQC).....	27
<b>Figure II.10:</b> Filtre actif série et filtre passif parallèle.....	28
<b>Figure II.11:</b> Filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle.....	28
<b>Figure II.12:</b> Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.....	28
<b>Figure II.13:</b> Filtre actif parallèle (FAP) .....	29

### Figures du Chapitre III:

<b>Figure III.1:</b> Filtre actif parallèle.....	34
<b>Figure III.2:</b> Courant pollué, courant harmonique et courant filtré.....	35
<b>Figure III.3:</b> Structure générale du filtre actif parallèle.....	36
<b>Figure III.4:</b> Filtre actif basé sur un onduleur de tension (à gauche) et sur un commutateur de courant (à droite).....	38
<b>Figure III.5:</b> Onduleur de tension deux niveaux.....	39
<b>Figure III.6:</b> commande par hystérésis.....	43
<b>Figure III.7:</b> Principe de commande des courants par MLI.....	43
<b>Figure III.8:</b> schéma synoptique de contrôle du FAP avec la commande DPC.....	45
<b>Figure III.9:</b> Configuration générale de la commande directe de puissance.....	47
<b>Figure III.10:</b> Schéma de principe de génération des puissances de référence pour DPC classique .....	48
<b>Figure III.11:</b> Plan $\alpha\beta$ divisé en douze secteurs pour détecter la phase du vecteur de tension .....	49
<b>Figure III.12:</b> Schéma de la commande DPC en MATLAB-SIMULINK .....	50
<b>Figure III.13:</b> Résultats de simulation de la tension de source (1), courant de filtre(2), courant de charge (3),et courant de source (4) avant et après la mise en service du FAP a $t=0.1s$ .....	50
<b>Figure III.14:</b> Résultats de simulation de tension du bus continu (vdc) .....	51
<b>Figure III.15:</b> Performances de la compensation des harmoniques par les commandes DPC.....	52
<b>Figure III.16:</b> Analyse spectrale des signaux.....	52
<b>Figure III.17:</b> Résultats de simulation de la tension de source (1), courant de filtre(2), courant de charge (3),et courant de source (4) .....	53
<b>Figure III.18:</b> Résultats de simulation de tension du bus continu (vdc) .....	53
<b>Figure III.19:</b> Performances de la compensation des harmoniques par les commandes Dp..	54

## Liste des Tableaux :

### Tableaux du Chapitre I :

Tableau I.1 :Les Principales Perturbations dans les Réseaux Electriques.....	8
TableauI.2:Caractéristiquesdequelquesgénérateursd'harmoniques.....	14
TAB. I.3 - Niveau de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles sur les réseaux électrique.....	16
Tableau I.4: Limite des composantes harmoniques en courant (norme CEI61000-3-2) .....	17

### Tableaux du Chapitre II :

Tableau II.14: Récapitulatif des méthodes de rejet des courants et de tensions harmoniques.....	31
---	----

### Tableaux du Chapitre III :

Tableau III.1: Tensions générées par l'onduleur de tension deux niveaux.....	40
TableauIII.2:Table de commutation de la command DPC.....	49

# Listes des Symboles et Acronymes:

## Symboles :

vdc, Idc:	Tension et courant du bus continu
vL:	Tension aux bornes de l'inductance de couplage
Ic:	Courant efficace de charge
ea, eb, ec:	Tensions simples du réseau
vsa, vsb, vsc:	Tensions simples à l'entrée du pont redresseur
ica, icb, icc:	Courants de charge
ifa, ifb, ifc:	Courants du filtre
isa, isb, isc:	Courants débités par le réseau
	Le déphasage du courant par rapport à la tension
h	Harmonique de rang
fn:	Fréquence de l'harmonique
f1 :	Fréquence du fondamental
Y0 :	Amplitude de la composante continue généralement nulle en distribution électrique en régime permanent
Yn :	Valeur efficace de la composante de rang n
$\alpha_n$ :	Déphasage de la composante harmonique au temps initial
Fd:	Le facteur de distorsion
Fp:	Le facteur de puissance
Lf:	Inductance
Rf:	Résistance interne
I1, Ih:	Valeur efficace du courant fondamental et du courant harmonique de rang h
V1, Vh:	Valeur efficace de la tension fondamentale et de l'harmonique de rang h
$\phi_1, \phi_h$ :	Déphasage du courant fondamental et du courant harmonique de rang h
S:	Puissance apparente
P:	Puissance active
Q:	Puissance réactive
D:	Puissance déformante
p(t):	Puissance réelle instantanée
q(t):	Puissance imaginaire instantanée
Pref, qref:	Référence de la puissance active et réactive
P, q:	Variation de la puissance active et réactive
:	Position du vecteur de tension dans le repère stationnaire
n:	Secteur numéro n
:	Pulsation fondamentale du réseau
- :	Repère stationnaire
d-q:	Repère synchrone tournant
$i, i$ :	Composantes du vecteur courant dans le repère stationnaire
id, iq:	Composantes du vecteur courant dans le repère synchrone
S1, S2, S3:	Signaux de commande des interrupteurs de puissance
T <sub>1</sub> , T <sub>2</sub> , T <sub>3</sub> , T <sub>4</sub> , T <sub>5</sub> , T <sub>6</sub> :	Interrupteurs de l'onduleur
Tsa, Tsb, Tsc:	Largeurs des impulsions des signaux MLI
dP, dq:	Sortie digitale des comparateurs à hystérésis des puissances P et q

## Acronymes

MLI:	Modulation de Largeur d'Impulsion
VSI:	Voltage Source Inverter
CSI:	Current Source Inverter
THD:	Total Harmonic Distortion
IEEE:	Institute of Electrical and Electronics Engineers
DSP:	Digital Signal Processors
FPGA:	Field Programmable Gate Arrays
SVM:	Space-Vector Modulation
FP:	Facteur de Puissance
HVDC:	High Voltage Direct Current
MT:	Moyenne Tension
BT:	Basse Tension
FAP:	Filtre Actif Parallèle
FAS:	Filtre Actif Série
SFAP:	Shunt Actif Power Filter
UPS:	Uninterruptible Power Supply
UPF:	Unit Power Factor
PLL:	Phase Locked Loop
PI:	Régulateur Proportionnel intégral
UPQC:	Unified Power Quality Conditioner
GTO:	Gate Turn off Thyristor
IGBT:	Insulated Gate Bipolar Transistor
DTC:	Direct Torque Control
AC/DC:	Conversion alternative continue
DPC:	Direct Power Control
UPFC:	Unified Power Flow Controller
VOC:	Voltage Oriented Control
PWM:	Pulse Width Modulation
VSC:	Voltage Source Converter

**INTRODUCTION**  
**GENERALE**

# INTRODUCTION GENERALE:

Le grand développement que connaissent les appareils électriques et électroniques (Appareils ménagers, machines industrielles, redresseurs, ordinateurs...) qui contiennent des semi-conducteurs énergétiques tels que (transformateurs, thyristors, diode...) indique leur importance et leur utilisation fréquente dans notre vie quotidienne, mais nous avons remarqué que le comportement non-linéaire de ces appareils génère des harmoniques qui absorbent un courant non sinusoïdal et ont un effet effectif négatif sur le fonctionnement des réseaux de distribution électrique, tels que : (surchauffe des transformateurs, arrêt brutal d'appareils et destruction, Une diminution du rendement de production, un dysfonctionnement du système ou des machines connectées à ce réseau électrique...) Afin de pallier ces problèmes et assurer la sécurité des appareils électriques, nous avons présenté dans ce travail proposé une solution qui contribue à améliorer la qualité de l'énergie, nous avons utilisé des filtres actifs car ils ont une taille et un coût inférieurs et sont plus flexibles dans l'application pratique que les filtres passifs, et le plus courant pour éliminer la pollution par le courant harmoniques et compensant la puissance réactive est le filtre actif parallèle. Il dépend de la structure du commutateur de tension en tant que source de tension et est connecté en parallèle avec la charge non linéaire.

Ce commutateur VSC (Voltage Source Converter) fonctionne comme un onduleur et agit comme un redresseur et donc peut être commandé pour fonctionner dans les deux sens, c'est-à-dire pour maintenir une tension continue constante dans sa sortie, et en même temps il annule les harmoniques de courant en injectant un courant égal aux harmoniques et opposé à celles-ci en pointant côté entrée.

Pour contrôler ce commutateur, nous avons utilisé la technologie de contrôle de puissance directe (DPC), qui contrôle directement la puissance réelle et réactive, et n'a pas besoin de boucle. Il est interne pour contrôler le courant, pas à l'unité PWM, et il n'utilise pas les coordonnées rotatives (d-q), il utilise uniquement la transformée de Clarke pour planer ( $\alpha - \beta$ ) il est donc facile à appliquer par rapport au contrôle dirigé VOC.

Cette these est organisée en trios chapitres, dans les paragraphes suivants, on explique brièvement le contenu de chacun

Le première chapitre Nous commencerons par un exposé des paramètres de la qualité de l'énergie électrique. Nous parlerons également de Problématique des harmoniques, Les perturbations, Sources et l'effet des harmoniques sur les récepteurs électriques. Finalement, nous exposerons les normes internationales imposées aux utilisateurs.

Dans le deuxième chapitre, nous décrivons les moyens de luttés et les différentes solutions traditionnelles et modernes de dépollution harmonique existantes.

Dans le troisième chapitre, nous l'avons divisé en deux partie:

**la première partie** de ce chapitre, nous présenterons une étude détaillée sur la structure du filtre actif parallèle ainsi que son fonctionnement général.

**la deuxième partie** nous exposerons la commande DPC . Nous présenterons le principe de commande du SAPF par deux techniques. La première approche est basée sur l'utilisation d'un filtre passe-bas. La deuxième approche est basée sur l'utilisation d'un filtre multi-variable. Enfin, des résultats de simulation sont présentés et commentés.



# **Chapitre I**

**Qualité de l'énergie et Les Perturbations  
harmoniques**

# I. Introduction:

Généralement, le distributeur d'énergie délivre l'énergie électrique sous forme d'un système triphasé de tensions sinusoïdales. Les paramètres caractéristiques de ce système sont la fréquence, l'amplitude, la forme d'onde, qui doit être sinusoïdale et la symétrie du système triphasé. Mais depuis quelques années, avec l'évolution technologique des composants d'électronique de puissance les distributeurs d'énergie rencontrent plusieurs problèmes liés à l'accroissement du nombre de convertisseurs statiques raccordés aux réseaux de distribution d'énergie. En effet, ces convertisseurs sont des sources polluantes qui absorbent des courants non sinusoïdaux et consomment pour la plupart de la puissance réactive. Les harmoniques générés sont des perturbations permanentes affectant la forme d'onde de la tension du réseau. Ces perturbations se superposent à l'onde fondamentale Elles ont donc pour conséquence de modifier l'onde de tension ou de courant ce qui se traduit par une dégradation du facteur de puissance et/ou par la génération de courants et de tensions alternatives de fréquence différente de celle du fondamental.

Nous commencerons ce chapitre par un exposé des paramètres de la qualité de l'énergie électrique. Nous parlerons également de Problématique des harmoniques, Les perturbations, Sources et l'effet des harmoniques sur les récepteurs électriques. Finalement, nous exposerons les normes internationales imposées aux utilisateurs.

## I.1 Quality de l'énergie:

La qualité de l'énergie désigne plus concrètement la qualité de la fourniture électrique. Celle-ci dépend de trois facteurs que sont la continuité d'alimentation, la qualité de l'onde de tension et la qualité de service.

La continuité d'alimentation recouvre les coupures ou interruptions du réseau. On distingue les coupures très brèves (entre 1 seconde et 3 minutes) des coupures longues (supérieures à 3 minutes).

La qualité de l'onde de tension désigne les perturbations liées à la forme de l'onde de tension délivrée par le réseau, susceptibles d'altérer le fonctionnement des appareils électriques raccordés au réseau, voire de les endommager. Les types de perturbations identifiés sont par exemple les creux de tension, les surtensions impulsionnelles, les variations de fréquence, les papillotements,... etc.

Enfin, la qualité de l'énergie dépend de la qualité de service qui caractérise la relation entre un utilisateur et son gestionnaire de réseau ou son fournisseur. Il s'agit par exemple des

délais de (re)mise en service, des délais d'intervention d'urgence, des délais de raccordement, des notifications de coupure programmée, etc.

Deux types d'acteurs agissent donc sur la qualité de l'énergie : le distributeur d'une part, et l'utilisateur d'autre part. Sur chacun de ces maillons, la responsabilité de l'un ou de l'autre est engagée. Côté distributeur, la qualité de fourniture du réseau est très encadrée, notamment par la norme EN50160. Cette norme européenne liste les différents types de perturbations et les paramètres à surveiller.[1]

### I.1.1 Qualité de la tension:

La qualité de tension alternative est étroitement liée aux caractéristiques de ses constituants représentés dans:

- ) La forme d'onde qui doit être sinusoïdale : sans de distorsions, de pics, de creux...
- ) L'amplitude.
- ) La fréquence.

la symétrie du système triphasé, caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et de leurs déphasages relatifs.[2]

Tout phénomène physique affectant une ou plusieurs de ces caractéristiques peut être considéré comme perturbation. En pratique, ces perturbations sont classées selon la durée du phénomène. Ainsi, il est possible de distinguer :

- ) les altérations de l'onde de tension (harmonique, déséquilibre, flicker). Ces phénomènes sont permanents ou durent au minimum plusieurs minutes.
- ) les creux de tension, surtension et coupures brèves d'une durée de l'ordre d'une à quelques secondes.
- ) les surtensions transitoires, de durée inférieure à une période. Dans ce qui suit nous nous restreindrons à la présentation des perturbations provoquées par les harmoniques ainsi que leurs conséquences néfastes sur le réseau électrique.[3]

#### ❖ Variation de l'amplitude:

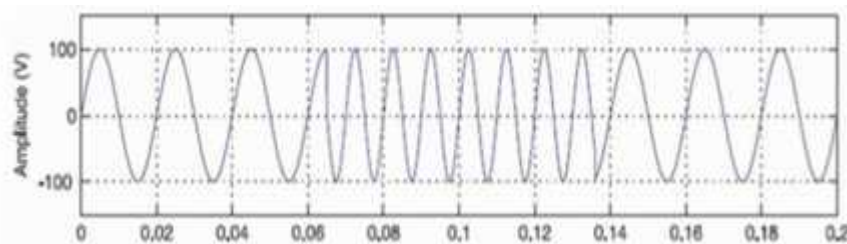
L'amplitude de la tension est un facteur crucial pour la qualité de l'électricité. Elle constitue en général le premier engagement contractuel du distributeur d'énergie. Généralement, les fluctuations de tension sont des variations de basses fréquences de valeur efficace de tension. Dans le cas idéal, les trois tensions ont la même amplitude. Cependant, plusieurs phénomènes perturbateurs peuvent affecter cette amplitude, en fonction de sa variation, on distingue deux grandes familles de perturbations :

) Les creux de tension, coupures et sursensions qui se caractérisent par des variations importantes de l'amplitude. Elles ont pour principale origine des courts circuits, et peuvent avoir des conséquences importantes pour les équipements électriques.

) Les variations de tension qui se caractérisent par des variations de l'amplitude de la tension inférieure à 10% de sa valeur nominale. Elles sont généralement dues à des charges fluctuantes ou des modifications de la configuration du réseau.[2]

❖ **Variation de Fréquence:**

Les variations de fréquence Dans les conditions normales, la fréquence du réseau de distribution doit être dans l'intervalle  $50 \pm 1$  Hz. Les variations de la fréquence du système de distribution apparaissent chez les clients qui emploient des sources électriques auxiliaires (on cite par exemple : système solaire, station thermique) ,voir la figure (I.1).Ces variations sont rares et se produisent dans des conditions exceptionnelles comme, les défauts dans les turbines des centrales de production.[4]



Figure(I.1) variation de fréquence

❖ **Forme d'onde:**

La forme d'onde des trois tensions formant un système triphasé doit être la plus proche possible d'une sinusoïde. En cas de perturbations au niveau de la forme d'onde, la tension n'est plus sinusoïdale et peut en général être considérée comme une onde fondamentale à 50Hz associée à des ondes de fréquences supérieures ou inférieures à 50 Hz appelées également harmoniques. Les tensions peuvent également contenir des signaux permanents mais non-périodiques, alors dénommés bruit.[5]

❖ **Symétrie:**

La symétrie d'un système triphasé se caractérise par l'égalité des modules des trois tensions et celle de leurs déphasages relatifs. [2]La dissymétrie de tels systèmes est communément appelé déséquilibre. Le tableau I.1 perturbations, leurs récapitule les remarques précédentes en présentant les principales origines ainsi que leurs conséquences. [5]

Tableau I.1 : Les Principales Perturbations dans les Réseaux Electriques.

Durée	Type de perturbation	Amplitude	Origine	Conséquences
<10ms	Transitoires (impulsion et oscillations)	-	Déclanchement des appareils, enclenchement des condensateur,	Dysfonctionnements gênants
10ms- 1min	Creux de tension	0.1-0.9pu	Courts-circuits, démarrage de gros moteurs	Arrêts d'équipements, pertes de production
	Coupures brèves	<0.1pu	Courts-circuits	Arrêts d'équipement, pertes de production
Régime établi	Surintensions	1.1-1.8pu	Courts-circuits, débranchement des charges importantes	Déclanchement, dangers pour les personnes et pour les matériels
	Déséquilibre	-	Charges asymétriques ou monophasées	Echauffements des machines tournantes, vibrations
	Variations rapides de tension (flicker)	0.1-7%	Charges fluctuantes	Papillotements de l'éclairage
	Harmoniques	0-20%	Charges non linéaires	Echauffements, vieillissements, pertes supplémentaires, troubles fonctionnels
	Inter harmoniques	0-2%	Charges non linéaires et fluctuantes	Papillotements de l'éclairage
	Bruit	0-1%	Fours à arc Charges non linéaires	Echauffements, pertes vieillissements
	Variations de la fréquence	-	Déséquilibre entre la production et la consommation	Dysfonctionnements d'équipement électriques

### **I.1.2 Qualité du courant:**

La qualité du courant est relative à une dérive des courants de leur forme idéale, et se caractérise de la même manière que pour les tensions par quatre paramètres, Le terme «qualité du courant » est rarement utilisé, car la qualité du courant est étroitement liée à la qualité de la tension et la nature des charges. Pour cette raison, « la qualité de l'énergie électrique » est souvent réduite à « la qualité de la tension ».[2]

### **I.2 Problématique des harmoniques:**

la problématique des harmoniques également appelée pollution harmonique, est devenue très répandue. Les charges non linéaires provoquent une distorsion dans le courant, et donc dans la tension, ce qui peut entraîner un mauvais fonctionnement des équipements raccordés au réseau. D'où l'intérêt d'éliminer ou de minimiser ces harmoniques.[6]

#### **I.2.1 Perturbations dans les réseaux de distribution électrique:**

Un réseau de puissance fournit de l'énergie aux appareils utilisateurs par l'intermédiaire des tensions qu'il maintient à leurs bornes. Ces tensions subissent généralement beaucoup de perturbations de deux origines distinctes :

- Les perturbations de tension causées par le passage des courants perturbateurs comme les courants harmoniques, déséquilibrés et réactifs.
- Les perturbations de tension causées par des tensions perturbatrices comme les tensions harmoniques, déséquilibrées et les creux de tension [7]

#### **I.2.2 Harmoniques de courant & de tension:**

##### **. Les courants harmoniques:**

sont les composantes sinusoïdales d'un courant électrique périodique décomposé en série de Fourier. Les harmoniques ont une fréquence multiple de la fréquence fondamentale, généralement de 50 ou 60 Hertz, dans les réseaux électriques. Autrement dit, les harmoniques sont une description mathématique de la distorsion d'un signal a priori sinusoïdal. De même, les tensions harmoniques sont les composantes sinusoïdales d'une tension électrique périodique décomposée en série Fourier.

Les courants harmoniques sont dus à la présence de charges électriques non linéaires dans un réseau électrique. Du fait des impédances du réseau, ces courants harmoniques sont la cause de l'apparition d'harmoniques de tensions qui affectent alors les autres clients du réseau de distribution.

Les courants harmoniques ont divers effets néfastes : augmentation des pertes, augmentation du bruit, interférences et couple vibratoire. Pour la bonne qualité de l'électricité,

il est donc important de limiter leur présence. Les gestionnaires de réseaux électriques garantissent la fourniture d'une électricité contenant peu d'harmoniques, en contrepartie, ils obligent leurs clients à limiter leur injection de courants harmoniques dans le réseau. L'installation de filtres, passifs ou actifs, le choix d'un couplage de transformateur adapté ainsi que de montage d'électronique de puissance produisant moins d'harmoniques sont autant de solution pour limiter le taux de distorsion du courant et de la tension électrique.[8]

▪ **Les tensions harmoniques:**

On peut parler de source de tension pour décrire l'état d'un réseau perturbé par une forte charge non linéaire. En effet, le raccordement d'un récepteur de faible puissance ne modifie presque pas le niveau préexistant (Fig. I.2)

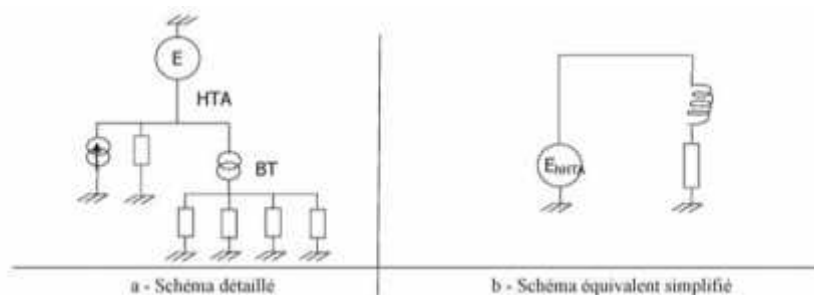


Fig. I.2- Source de tension harmonique

**I.3 Les perturbations harmoniques :**

Les perturbations sont tous les phénomènes internes ou externes au réseau ayant un pouvoir de modifier d'une manière transitoire ou permanente en amplitude et /ou en forme les grandeurs électriques du réseau. Ces perturbations résultent de la superposition, sur l'onde fondamentale à 50Hz, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples de celle du fondamental.[3]

les harmoniques pairs sont négligeables et seuls les harmoniques impairs existent. Le domaine des fréquences qui correspond à l'étude des harmoniques est généralement compris entre 100 Hz et 2000 Hz (entre les harmoniques de rangs h=2 et h=40),[2]

La Figure I.3 montre la superposition des harmoniques, l'onde d'une tension distordue contenant, en plus du terme fondamental de fréquence 50Hz, trois harmoniques de rang impair 5,7et 11.

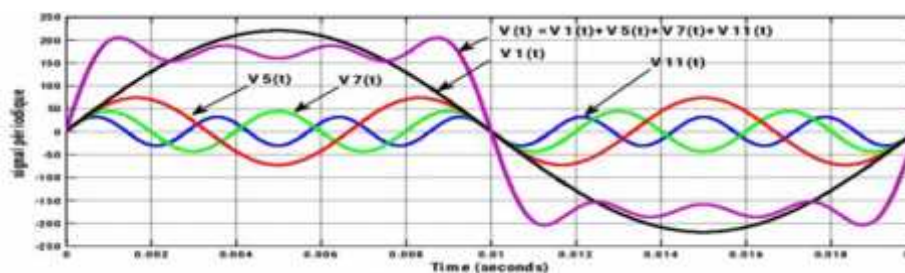


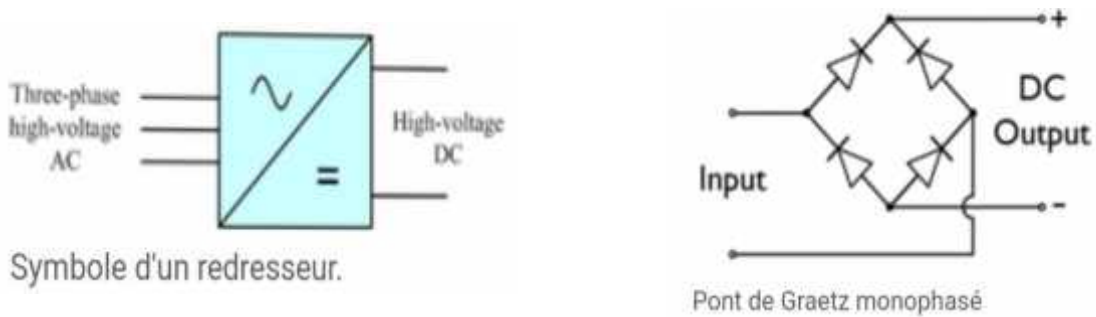
Figure I.3. Synthèse d'un signal à partir des harmoniques

Le taux de distorsion harmonique sert à quantifier les harmoniques présentes dans une tension ou un courant:

$$THD(\%) = 100 \cdot \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2 / I_1^2} \quad (I.1)$$

### I.4 Sources des harmoniques:

La cause principale des harmoniques est l'injection des courants non-sinusoidaux par des charges non-linéaires, ainsi que les charges déséquilibrées branchées au réseau. Les onduleurs, les ponts redresseurs, les fours à arc et à induction, les variateurs des vitesses des machines électriques, les appareils domestiques tels que les téléviseurs et les lampes fluorescentes, et les alimentations à découpages représentent la majorité des sources d'émission des harmoniques[10]



Figure(I.4):symbole d'un redresseur et pont de Graetz monophasé

#### ❖ Modélisation de la charge polluante (redresseur à diode) :

##### ✓ Notion de charge :

Les récepteurs peuvent être classés en deux familles principales :

- les récepteurs linéaires (ou charges linéaires) ;
- les récepteurs non-linéaires (ou charges non-linéaires) .[11]

##### ) Charge linéaire:

Une charge linéaire est un terme d'électricien pour désigner un récepteur constitué de dipôles électriques linéaires. Ce récepteur peut être monophasé ou triphasé.

De par sa constitution, le facteur de puissance d'une charge linéaire est forcément égal à cosinus  $\phi$ , avec  $\phi$  le déphasage du courant par rapport à la tension.

En régime sinusoïdal, la tension et l'intensité ont même forme (à un déphasage près), ce qui n'est pas le cas pour une charge électrique non linéaire.[12]

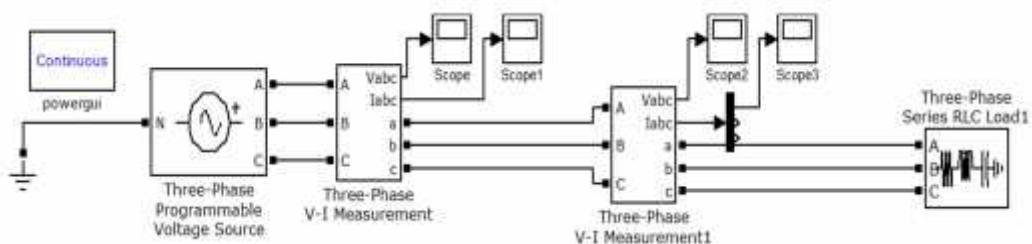
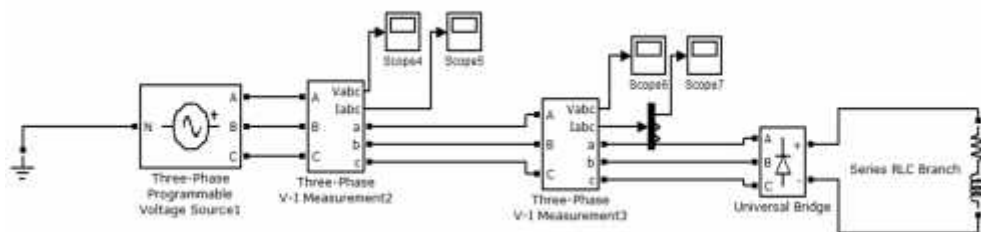


Figure (I.5). Schéma de charge linéaire avec une source de tension triphasée

)] **Charge non linéaire:**

Une charge est dite non-linéaire lorsque la relation entre la tension et le courant n'est plus linéaire. Un tel récepteur alimenté par une tension sinusoïdale, consomme un courant non-sinusoïdal, ce qui provoque une distorsion du courant et donc de la tension[9].elle peut être considérée comme une réactance saturable, une résistance non linéaire, un convertisseur à base des semi-conducteurs de puissance (redresseurs, hacheurs, gradateurs, onduleurs, variateurs de vitesse.....etc.)

Figure I.6, Ces harmoniques de courant circulent dans la source de tension, en même temps qu'ils parcourent la charge. En plus, ce qui concerne le réseau électrique, ces courants harmoniques vont engendrer une détérioration de l'onde de tension au point de raccordement d'autres charges connectées au même réseau.[2]



Figure( I.6).schéma de charge non linéaire

**I.5 Effets des harmoniques:**

Les effets des harmoniques Une fois que les sources d'harmoniques sont bien définies, elles doivent être interprétées en termes de leurs effets sur les installations et les équipements électriques.les plus connus et les plus spectaculaires sont la destruction des condensateurs ou des disjoncteurs sous l'effet des forts courants harmoniques amplifiés par des résonances. Un autre phénomène, de plus en plus rencontré, est l'échauffement des transformateurs et des conducteurs de neutre sous l'effet des courants harmoniques de rang 3 .[10]

Les différents types de résonances ont été discutés dans la littérature telles que résonances parallèle, résonances séries

❖ **Effetes instantanés:**

Défauts de fonctionnement de certains équipements électriques;

- Troubles fonctionnels des micro-ordinateurs;
- Erreurs dans les appareils de mesure;
- Déclenchements intempestifs des protections;

- Perturbations induites des systèmes à courants faibles (télécommande, téléviseur, écran d'ordinateur,...);
- Vibrations et bruits acoustiques anormaux ( moteurs, transformateurs...); - Destruction par surcharge thermique de condensateurs.

### ❖ Effets à long terme:

Ils se manifestent après une exposition plus ou moins longue à la perturbation harmonique. L'effet à terme le plus important est de nature thermique, il se traduit par l'échauffement. Il conduit à une fatigue prématurée du matériel, des lignes et amènent un déclassement des équipements.

- Une surcharge en courant provoque des échauffements supplémentaires donc un vieillissent prématuré des équipements;
- Echauffement des transformateurs et des alternateurs (par augmentation pertes Joule, des pertes fer...).
- Fatigue mécanique (couples pulsatiles dans les machines asynchrones.....).

### ❖ Echauffement des récepteurs :

des conducteurs de phases et du neutre par augmentation des pertes Joule et de électrique.

- Destruction de matériels (condensateurs, disjoncteurs,...).
- Rayonnement électromagnétique perturbant les écrans (micro-ordinateurs, appareils de laboratoire...) [10]

## I.6 Caractérisations des harmoniques:

### ❖ Rang de l'harmonique:

C'est le rapport de sa fréquence  $f_n$  à celle du fondamental (généralement la fréquence industrielle, 50 Hz) :

$$n = f_n/f_1 \text{ (I.2)}$$

$f_n$ : fréquence de l'harmonique  $f_1$  : fréquence du fondamental.[10]

### ❖ Expression de la grandeur déformée:

Le développement en série de FOURIER de tout phénomène périodique est de la forme :

$$Y(t)=Y_0+ \sum Y_n 2\sin(nt- \varphi_n) \quad \text{(I.3)}$$

- $Y_0$  : amplitude de la composante continue généralement nulle en distribution électrique en régime permanent
- $Y_n$  : valeur efficace de la composante de rang  $n$ ,

- $\phi_n$ : déphasage de la composante harmonique au temps initial. L'amplitude des harmoniques décroît généralement avec la fréquence.[13]

❖ **La distorsion harmonique totale (THD):**

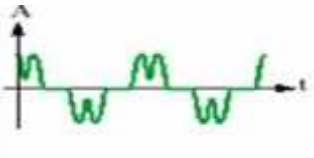

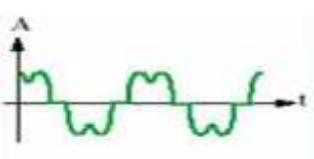

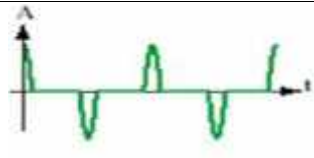



L'impact harmonique est caractérisé par le taux de distorsion harmonique globale (THD). C'est un indice important largement utilisé pour quantifier le contenu harmonique d'un signal distordu. Il mesure le degré de déformation du signal apporté par les harmoniques par rapport à une onde sinusoïdale. Le THD est défini comme la valeur efficace des harmoniques au-dessus de la fondamentale, divisée par la valeur efficace de cette dernière.[6] Le THD est défini pour les signaux de tension et de courant, respectivement, comme suit :

$$THD_v(\%) = \left[ \left( \sum_{h=2}^{\infty} V_n^2 \right) / V_1 \right] * 100 \quad (I.4)$$

$$THD_i(\%) = \left[ \left( \sum_{h=2}^{\infty} I_n^2 \right) / I_1 \right] * 100 \quad (I.5)$$

Le THD de quelques charges non linéaires est donné par le tableau I.2[14].

Tableau I.2: Caractéristiques de quelques générateurs d'harmoniques.

Charger non linéaires	Forme d'onde de courant	14Spectre14	THD%
Variateur de vitesse			44%
Redresseur chargeur			28%
Charge informatique ordinateur			115%
Eclairage fluorescent			53%

❖ **Le facteur de distorsion:**

Le facteur de distorsion  $F_d$  est défini comme étant le rapport entre la fondamentale et le signal en valeurs efficaces. Il est donné par l'expression suivante :  $F_d = I_1 / I_{eff}$  (I.6)

Il est alors égal à l'unité lorsque le courant est purement sinusoïdal et diminue lorsque la distorsion apparaît [6]

❖ **Facteur de puissance:**

Facteur de puissance Pour un signal sinusoïdal, le facteur de puissance est donné par le rapport entre la puissance active  $P$  et la puissance apparente  $S$ . Les équipements électriques sont dimensionnés généralement pour la tension et le courant nominaux.

Un faible facteur de puissance se traduit par une mauvaise utilisation de ces équipements. [10]

$$F.P = P/S = P / \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (I.5)$$

Où  $Q$  représente la puissance réactive.

Dans le cas où il y a des harmoniques, une puissance supplémentaire appelée la puissance Déformante  $D$  donnée par la relation (I.6) apparaît comme le montre le diagramme de Fresnel de la figure (I.7).  $D = 3V \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2$  (I.7)

La puissance apparente  $S$  peut alors s'exprimer comme suit :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (I.8)$$

Où,  $v$  représente la valeur efficace de la tension du réseau électrique. Le facteur de puissance devient :

$$F.P = P / \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} = \cos \alpha \cos \phi \quad (I.9)$$

On remarque qu'en régime sinusoïdal la puissance déformante est nulle. Le facteur de puissance

s'exprime alors simplement par :  $D=0 \quad F.P = \cos \phi$

On voit bien que les harmoniques affectent aussi le facteur de puissance. [11]

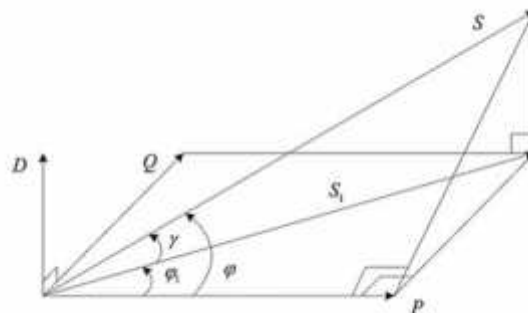


Figure (I.7) : Diagramme de Fresnel des puissances

## I.7 NORMES & REGLEMENTATION :

Normes et réglementations Les deux principaux organismes de normalisation (International Electrotechnical Commission (CEI), et IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers)). L'objectif des ces normes est de limiter les dysfonctionnements occasionnés par les harmoniques. La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) définit le niveau des courants et des tensions harmoniques à ne pas dépasser par une série de normes de compatibilité électromagnétique (CEI 61000)[5]. Ces normes sont appliquées suivant 4 règles:

- Limites d'émission: Elles sont fixées soit par installation, soit par appareil. Ces limites garantissent le maintien, en tout point, des niveaux de compatibilité.
- Niveaux d'immunité: Ils permettent de garantir à l'utilisateur un fonctionnement de l'équipement sur un réseau perturbé dans certaines limites.
- Niveaux de compatibilité : Ils sont, généralement, des taux de tension harmonique à ne pas dépasser en tout point du réseau. Le maintien de ces niveaux garantit un fonctionnement correct de tous les appareils.
- Niveaux de planification : Ils représentent des seuils de perturbations décidés par un gestionnaire de réseau, tel que le niveau de compatibilité qu'il ne soit pas dépassé.[9]

Par exemple, la norme CEI 61000-2-2 pour les équipements raccordés à un réseau basse tension permet de garantir à l'utilisateur un fonctionnement de l'équipement sur un réseau perturbé dans certaines limites. Un extrait de la norme CEI 61000-2-2 est donné au tableau I.3.

Tableau. I.3 - Niveau de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles sur les réseaux électriques [9].

Harmoniques impairs non multiples de 3		Harmoniques impairs multiples de 3		Harmoniques pairs	
Range harmonique h	Tension harmonique %	Range harmonique h	Tension harmonique %	Range harmonique h	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	12.7				

La norme CEI 61000-3-2: cette norme (tableau I.4) fixe la limitation des courants injectés dans le réseau public pour des équipements dont le courant par phase est inférieur à 16A. Il s'agit des appareils du domaine domestique.

Tableau I.4: Limite des composantes harmoniques en courant (norme CEI 61000-3-2).[14]

	Range harmonique	Courant harmonique maximal autorisé
Harmoniques impaires	3	2.3
	5	1.14
	7	0.77
	9	0.40
	11	0.33
	13	0.21
	15<h<39	0.15*15/h
Harmoniques paires	2	1.08
	4	0.43
	6	0.3
	8<h<40	0.23*8/h

## I.8. Conclusion:

L'énergie électrique, principalement produite et distribuée sous forme de tensions triphasées sinusoïdales, permet de fournir la puissance électrique nécessaire aux différentes charges sur le réseau électrique. Lorsque la forme d'onde n'est plus sinusoïdale, on rencontre des perturbations qui peuvent affecter le bon fonctionnement de nombreux équipements et de charges raccordés sur le réseau. Dans ces conditions, des problèmes de compatibilité électromagnétique peuvent survenir entre ces éléments connectés au réseau.

Dans ce chapitre, nous avons présenté différents types de perturbations affectant l'onde de tension du réseau électrique, nous avons illustré, en premier lieu, le phénomène des harmoniques, leurs caractéristiques, leurs sources, leurs conséquences et effets néfastes qui peuvent aller des échauffements et de la dégradation du fonctionnement jusqu'à la destruction de ces équipements.



# **Chapitre II**

**Solutions pour l'amélioration  
de la qualité d'énergie**

## II. Introduction:

L'objectif de l'amélioration de la qualité de l'énergie est l'élimination ou la minimisation des perturbations en tension et/ou en courant dans les réseaux électriques, là où le niveau de la qualité n'est pas suffisamment élevé pour une charge donnée, quand les coûts et les inconvénients de son dysfonctionnement sont inacceptables. L'aspect de la qualité de l'énergie est très large, par conséquent son amélioration peut s'étendre à l'amélioration de plusieurs facteurs comme : l'architecture du réseau, les automatismes de réalimentation, le niveau de fiabilité de ses ouvrages, leurs protections, et leurs maintenances.

Deux types de solutions sont envisageables, la première consiste à utiliser des convertisseurs statiques moins ou peu polluants, tandis que la seconde consiste en la mise en œuvre d'un filtrage des composants harmoniques. La première classe de solutions s'intéresse la conception des circuits, tandis que la seconde consiste à compenser les courants ou les tensions harmoniques. Deux groupes de solutions de dépollution pour compenser toutes les perturbations peuvent être distingués.

Les solutions traditionnelles (filtres passifs) qui sont les plus utilisés industriellement,

Les solutions modernes (filtre actifs) qui sont conçus afin de surmonter les limitations des filtres passifs.

### II.1 SOLUTIONS TRADITIONNELLES:

L'existence des perturbations dans un réseau électrique conduit à prendre, impérativement, des dispositions afin d'atténuer ou d'éliminer leurs conséquences sur les équipements électriques et sur les réseaux électriques. Sur cette base, il semble donc nécessaire de décrire de manière sommaire les principaux dispositifs et solutions existants utilisés pour le traitement de perturbations.[9]

#### II.1.1 Surdimensionnement de l'installation électrique:

Dans ce cas, les harmoniques ne subissent aucune action curative de la part de l'utilisateur. Les effets néfastes de la pollution harmonique sont à éviter pendant une durée limitée. Pour les installations nouvelles, on procède au surdimensionnement des équipements afin d'assurer leur tenue aux surcharges harmoniques. Dans le cas d'installations existantes, on décline les équipements de distribution électrique soumis aux harmoniques (câbles du neutre, transformateur). Cette méthode ne permet pas de tirer profit du potentiel réel de l'installation. Il en résulte un accroissement important du coût de l'installation.[9]

### II.1.2 Renforcement de la puissance de court -circuit:

La diminution de l'impédance totale en amont de la charge non linéaire permet de réduire la tension créée par les harmoniques de courant, et donc de diminuer le taux de distorsion harmonique en tension au point de raccordement. Cependant, les courants harmoniques ne sont pas atténués.[14]

### II.1.3 Rééquilibrage des courants d u réseau électrique:

C'est une solution qui permet de répartir les charges d'une manière identique sur les trois phases. En effet, les charges monophasées et biphasées mal réparties engendrent des courants déséquilibrés dans un réseau électrique basse tension.[14]

### II.1.4 Les filtres passifs :

Les filtres passifs parallèles et séries ont été mis en application depuis le milieu des années 1920, principalement pour compenser les harmoniques créés par les charges, fournir la puissance réactive demandée, et augmenter la capacité de transport des réseaux. Le principe du filtrage passif consiste à insérer en amont de la charge, un ou plusieurs circuits accordés sur les harmoniques à rejeter. Ainsi pour filtrer un courant à une fréquence particulière. Un filtre résonant série est placé en parallèle sur le réseau. Ce type de filtre est très sélectif. Pour atténuer toute une bande de fréquence, un filtre passif amorti du second ordre est préférable. Le dimensionnement de ces filtres dépend des harmoniques à éliminer, des performances exigées, de la structure du réseau et de la nature des récepteurs. Par cette technique, il est en général plus aisé de rejeter les harmoniques de rang élevé que celle de rang faible. [15]

Si on veut par exemple éliminer le courant harmonique de rang 5, on dimensionne alors les éléments passifs de manière à ce que l'impédance équivalente du filtre soit la plus petite possible à la fréquence  $5 \times$  fondamental, le courant circulera alors dans l'impédance la plus faible, c'est à dire dans le filtre passif et donc plus dans l'impédance de court-circuit du réseau comme l'illustre la Figure II.1.[2]

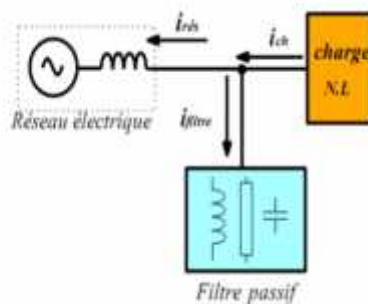


Figure II.1.Raccordement d'un filtre passif

**Filtre passif résonant :**

C'est un filtre sélectif constitué, d'une résistance, d'un condensateur et d'une bobine en série comme décrit sur la figure (II.2).



Figure II.2 : Filtre passif résonant

Son impédance est donnée par :

$$Z_{eq}(w) = (1 - lcw^2 + jRcw) / jcw. \quad (II.1)$$

Le rang d'accord 'ha' correspond au multiple, entier ou non, de la fréquence nominale du réseau. La pulsation de résonance du filtre est :

$$w_a = 2\pi \cdot f_a = 1 / lc \quad (II.2)$$

**Filtre passif amorti :**

C'est un filtre passe haut constitué, d'une inductance en parallèle avec une résistance, le tout en série avec un condensateur comme décrit sur la figure (I.3).

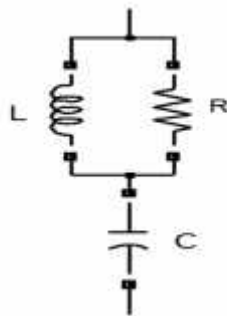


Figure II.3 : Filtre passif amorti

Son impédance est donnée par :

$$Z_{eq}(w) = (1 - lcw^2 + jL/Rw) / (L/R \cdot cw^2 + jcw) \quad (II.3)$$

**Filtre passif anti-résonant :**

Le phénomène de l'antirésonance se rencontre dans les réseaux électriques quel que soit leur niveau de tension (figure II.4)

L'impédance vue par le réseau et le filtre passif est :

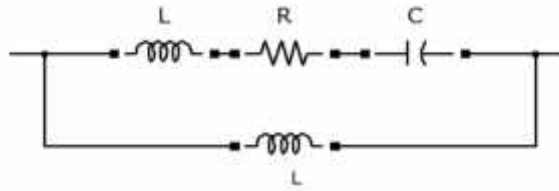


Figure II.4: Filtre passif parallèle anti-résonant

Son impédance est donnée par :

$$Z_{eq}(w) = j\omega L \cdot (1 - \omega^2 LC + j\omega RC) / (1 - (1 + Ls)\omega^2 LC + j\omega RC) \quad (II.4)$$

Dans ce cas, les variations de l'impédance du réseau peuvent détériorer les performances du filtre. De plus, l'impédance du réseau peut former un système résonant avec le filtre et les fréquences voisines de la fréquence de résonance seront alors amplifiées. Finalement, cette solution est dédiée à un type de charge et une configuration réseau et perd de son efficacité lorsque les caractéristiques de ceux-ci évoluent.[15]

**II.2\_Solutions modernes :**

Deux raisons principales ont conduit à concevoir une nouvelle structure de filtrage moderne et efficace appelée filtre actif. La première raison est due aux inconvénients inhérents des solutions traditionnelles de dépollution qui ne répondent plus à l'évolution des charges et des réseaux électriques. La seconde raison fait suite à l'apparition de nouveaux composants semi-conducteurs, comme les thyristors GTO et les transistors IGBT. 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.

Nous citerons trois topologies possibles de filtres actifs :

- Le filtre actif parallèle (SFAP) : conçu pour compenser toutes les perturbations de courant comme les harmoniques, les déséquilibres et la puissance réactive.
- Le filtre actif série (FAS) : conçu pour compenser toutes les perturbations de tension comme les harmoniques, les déséquilibres et les creux de tension.
- La combinaison parallèle-série actifs : solution universelle pour compenser toutes les perturbations en courant et en tension[3]

### II.2.1 Le filtrage actif:

Une grande partie de l'énergie électrique produite dans le monde alimente différents types de charges non linéaires, ces charges génèrent des fréquences dans le réseau d'alimentation qui sont multiples de la fréquence fondamentale. Les courants harmoniques ne peuvent pas contribuer à la puissance active, ils doivent être éliminés pour améliorer la qualité de puissance. Les filtres actifs de puissance sont conçus pour cet objectif.

La mise en œuvre de leur principe de base en 1970s, les filtres actifs des

harmoniques ont attiré l'attention des chercheurs de l'électronique de puissance qui se sont intéressés à la pollution harmonique dans les systèmes d'alimentation. Particulièrement, les filtres actifs ont été stimulés par l'apparition des IGBTs (insulated gate bipolar transistors), avec la disponibilité des cartes numériques DSPs (digital signal processors), FPGAs (field-programmable gate arrays), les sondes de courants et tension à effet Hall. Les filtres actifs modernes sont plus performants du point de vue qualité de filtrage, plus petits dans la taille physique, et plus flexibles dans l'application par rapport aux filtres passifs conventionnels qui utilisent les condensateurs, les inductances et les résistances. Cependant, les filtres actifs sont légèrement inférieurs dans le coût et l'efficacité par rapport aux filtres passifs, même actuellement.

En 1982, un filtre actif shunt de 800 KVA, composé d'un onduleur MLI à source de

courant et à base des thyristors GTO, a été mis dans l'utilisation pratique pour la première fois au monde [4]

Les avantages de ces filtres actifs par rapport aux filtres passifs sont les suivants :

- Le volume physique du filtre est plus réduit ;
- La capacité de filtrage est supérieure ;
- La flexibilité et adaptabilité sont très supérieures.

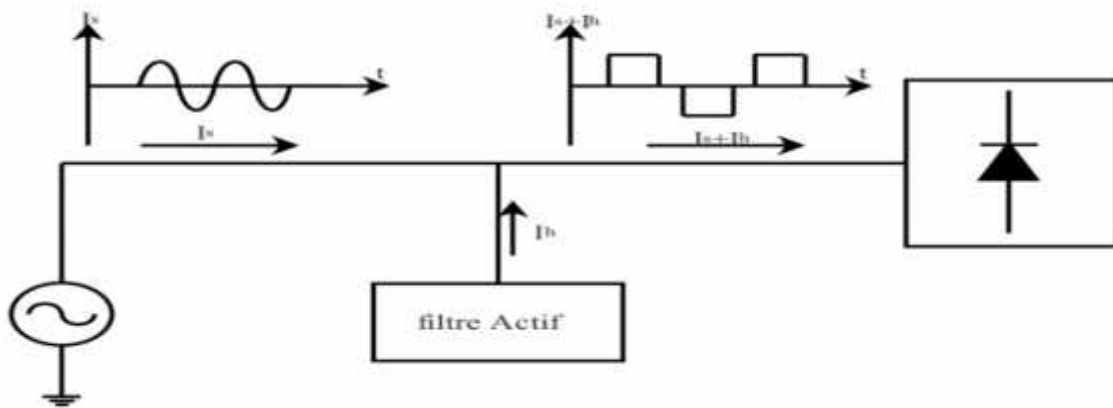
Pourtant, ils présentent quelques inconvénients :

- Leur coût élevé a limité leur implantation dans l'industrie ;
- Les pertes sont plus élevées;[10]

**II.2.1.1 Le principe de fonctionnement du filtre actif:**

Le principe de base des filtres actifs a été proposé dans les années 70s. Les filtres actifs sont souvent conçus pour la compensation des courants harmoniques et de la puissance réactive.

Ces filtres sont des onduleurs mono/tri-phasés agissant comme source de courant ou de tension en injectant en série ou en parallèle sur le réseau électrique des harmoniques en opposition de phase à ceux du réseau, par conséquent, les composantes harmoniques de la charge polluante s'éliminent et le courant de la source va acquérir une forme quasi sinusoïdale . Le schémarelatif à ce principe est montré dans la figure (II.5).



FigureII.5. Schéma de principe d'un filtre actif.

Dans le but d'imposer certaines grandeurs relatives au générateur ou au récepteur, les convertisseurs de puissance contenant des interrupteurs commandables en ouverture et fermeture tels que GTO, IGBT ou MOFSET sont utilisés. L'utilisation de réseaux de commutation avec les thyristors classiques limite la fréquence de l'onduleur à environ 100 Hz.

Ces interrupteurs diffèrent par la fréquence de commutation : 2 kHz pour les thyristors, 10 kHz pour les transistors bipolaire et 25 kHz pour les transistors MOS de puissance.

Ce principe s'applique à n'importe quel type de charge non linéaire qui crée des harmoniques.[4]

## II.2.2 Les principaux types de filtres:

Les filtres actifs peuvent être classifiés selon le type d'onduleur, de leur topologie, et le nombre de phases. Le type de convertisseur peut être à source de tension (Voltage Source Inverter (VSI)) ou à source de courant (Current Source Inverter (CSI)). Les topologies peuvent être parallèles, séries, ou une combinaison de tous les deux. La troisième classification est basée sur le nombre des phases, telles que les systèmes à deux fils (monophasé) et les systèmes triphasés à trois ou à quatre fils .[4]

### II.2.2.1 Le filtre actif à source de courant:

La structure du filtre actif à source de courant est montrée dans la figure (II.6), ce type de filtre est connecté au réseau d'alimentation par des transformateurs series dans l'objectif d'éliminer les petites variations de la fréquence causée par les courants d'onduleur . Le filtre actif à source de courant a une grande capacité de contrôle du courant pour une meilleure performance à base de la commande directe de courant de sortie. Cependant, il a une bobine qui assure la circulation du courant du bus continu, en plus, il exige des condensateurs parallèles de grandes valeurs côté alternatif pour enlever les harmoniques du courant non désirés .

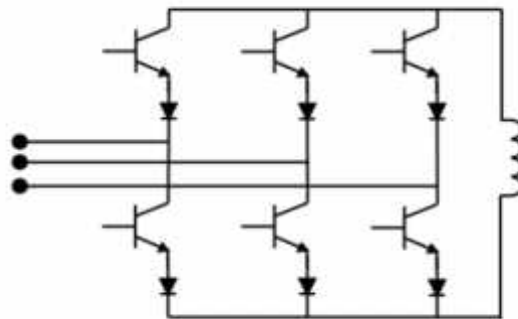


Figure II.6. Schéma de filtre actif à source de courant

### I.2.2.2 Le filtre actif à source de tension:

La structure du filtre actif à source de tension est montrée dans la figure (II.7). Ce type de filtres est plus commode pour les applications des filtres actifs parallèle, en raison de son poids léger, son bon prix, et sont applicables aux topologies à multi niveaux pour améliorer leur performance de compensation dans les systèmes de forte puissance avec une petite fréquence de commutation . Il est constitué par des transistors de puissance contrôlables avec des diodes montés en antiparallèles . L'onduleur à source de tension fonctionne en tant que source de courant commandé en tension, le filtre est connecté au réseau par l'intermédiaire d'un transformateur, une capacité pour maintenir la tension du bus continu constante est

nécessaire. Ce type de configuration est conçu pour compenser la charge non linéaire dans les systèmes de moyenne puissance (100 KVA) due aux limitations des semi-conducteurs.[4]

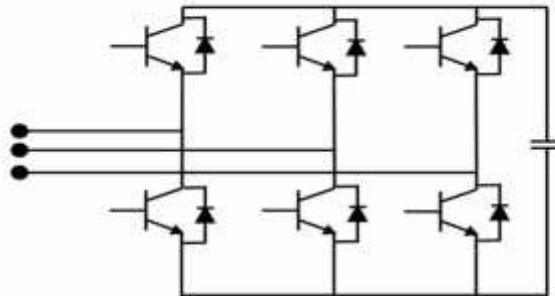


Figure II.7. Schéma de filtre actif à source de tension

### II.2.3 le filtre actif série:

Le filtre actif série se comporte comme une source de tension qui s'oppose aux tensions perturbatrices (creux, déséquilibre, harmonique), comme le montre la figure(II.8) , venant de la source et également à celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau . Ainsi la tension aux bornes de la charge à protéger est purement sinusoïdale.

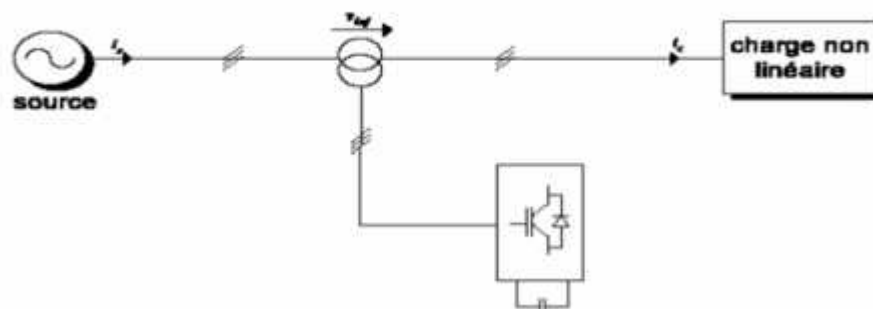


Figure II.8: Filtre actif série (FAS)

Le filtre actif Série (F.A.S) est une solution adaptée à la compensation des tensions perturbatrices, harmoniques, déséquilibrées et des creux de tension. Ces perturbations trouvent généralement leurs origines dans le réseau lui-même mais peuvent parfois être provoquées par les charges elles-mêmes.

En1976, une famille de filtres actifs séries avec des onduleurs à transistors contrôlés en MLI a été présentée . Un compensateur statique pour le rééquilibrage de la tension du réseau électrique a été proposé en 1985 .

En 1990, un compensateur de tension à base d'onduleur de tension triphasé a été proposé pour compenser le déséquilibre de tension de réseau électrique. Depuis, beaucoup de travaux ont été consacrés à l'amélioration de la qualité de compensation du déséquilibre de la tension du réseau. D'autres articles ont introduit le problème des creux de tension et leur compensation par le actif série.[14]

### II.2.4 Filtre combiné parallèle-série (UPQC) :

L'UPQC (Unified Power Quality Conditioner) est principalement la combinaison de deux filtres actifs série et parallèle (Figure II.9) qui partagent la même capacité sur le bus continu. Ce type de dispositif est capable à la fois de régler la tension du réseau et d'éliminer les harmoniques. Il est considéré comme le plus puissant dispositif et il est capable d'effectuer efficacement toutes les tâches de conditionnement de puissance.

Cependant, son prix important et la complexité de commandes de nombreux interrupteurs limitent son utilisation à des applications critiques comme l'équipement médical.[15]

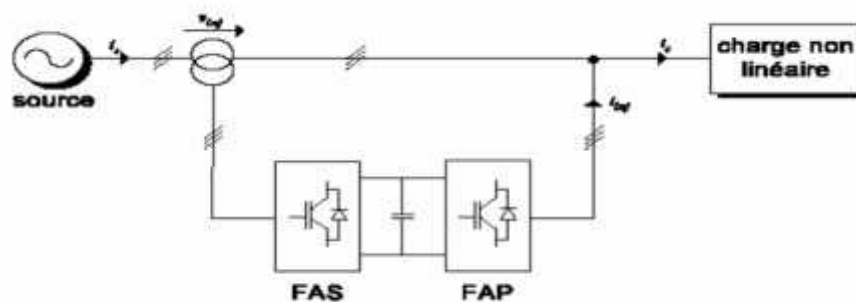


Figure II.9 : Combinaison parallèle-série actifs (UPQC)

### II.2.5 Filtre actif hybride:

#### a) filtres hybrides actifs et passifs:

Malgré la grande attention portée sur les filtres actifs, leur application industrielle reste limitée à certains pays où les solutions traditionnelles sont inefficaces face à la prolifération des équipements polluants de fortes puissances sur un réseau qui n'est pas assez puissant partout. L'application industrielle de ces nouveaux dispositifs de filtrage est freinée par leur coût. Afin de réduire le dimensionnement et par conséquent le prix des filtres actifs et ainsi augmenter leur potentialité d'application, l'association de filtres actifs de faibles puissances à des filtres passifs semble être une solution prometteuse. Donc on peut trouver plusieurs configurations, en voici quelque une :

- Filtre actif en série avec filtre passif parallèle ;
- Filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle
- Filtre actif parallèle associée à un filtre passif parallèle[16]

a) Filtre actif en série avec filtre passif parallèle:

Le rôle du filtre actif série dans ce cas est d'empêcher les courants harmoniques de circuler vers le réseau et de les obliger à passer par les filtres passifs raccordés à leurs fréquences comme le montre la figure(II.10) .

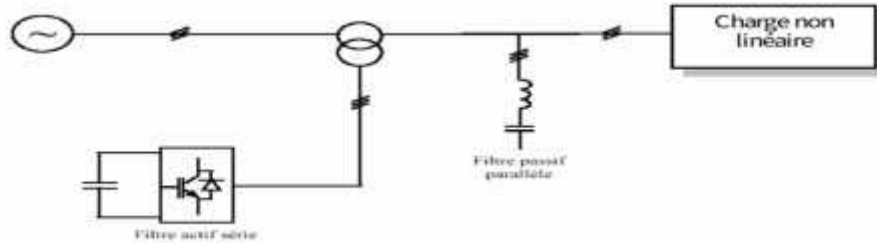


Figure II.10 : Filtre actif série et filtre passif parallèle

**b) Filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle:**

Le principe de fonctionnement de cette configuration, présentée en figure (II.11), est la même que la précédente avec l'avantage de réduire encore le dimensionnement du filtre actif série car le courant qui le traverse est plus faible.[14]

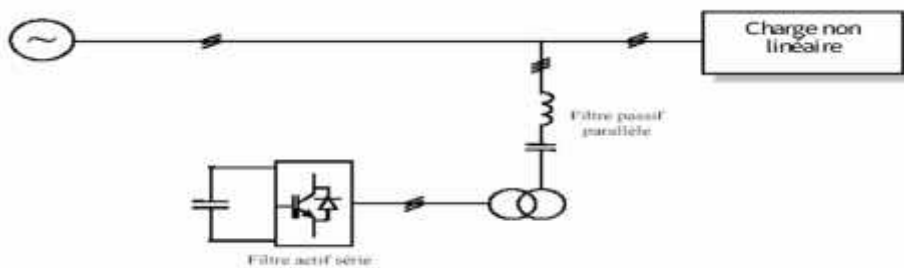


Figure II.11 : Filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle

**c) Filtre actif parallèle associée à un filtre passif parallèle:**

Le rôle du filtre actif parallèle dans cette configuration, montrée en figure (II.12), est la compensation des courants harmoniques basses fréquences émis par la charge polluante. Le filtre passif accordé sur une fréquence élevée, élimine les hautes fréquences y compris ceux créés par le filtre actif parallèle[2]. [15].

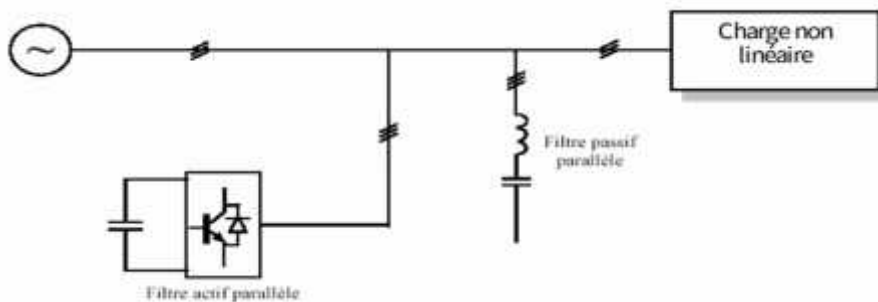


Figure II.12: Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle

❖ **Avantages des filtres actifs:**

- ❑ Un seul filtre peut éliminer tous les harmoniques indésirables;
- ❑ L'état de résonance est absent, augmentant ainsi la stabilité du système de puissance;
- ❑ La flexibilité et l'adaptabilité avec la variation de la charge.

❖ **Inconvénients des filtres actifs:**

- ❑ Le coût élevé a limité l'implémentation dans l'industrie;
- ❑ Les pertes sont plus élevées;
- ❑ Amélioration de la forme de la tension n'est pas toujours évidente; [6]

**II.2.6 Filtre actif parallèle:**

Le filtre actif parallèle (Fig.II.13) peut être considéré comme un générateur de courant ou de tension. Dans le cas de générateur de courant, ce filtre est commandé de façon à injecter au réseau des courants égaux à ceux générés par la charge, mais de phases opposées. Le courant de source après compensation est sinusoïdal. Par contre, la tension au point de connexion ne sera sinusoïdale que si la source de tension du réseau est exempte d'harmoniques. Le dimensionnement du filtre actif dépend du courant harmonique à fournir. En plus, le filtre peut aussi compenser le courant réactif mais avec un dimensionnement plus important.

Lorsque celui-ci se comporte comme un compensateur de courants harmoniques, il permet de supprimer au point de raccordement tous les harmoniques de courants de charges non linéaires. Par contre, lorsqu'il se comporte comme un compensateur de tension harmonique, il permet alors de maintenir sinusoïdale la tension au point de raccordement quel que soit le courant absorbé par la charge et quel que soit la qualité de la source de tension. En général, le filtre actif parallèle est utilisé pour la dépollution des réseaux BT et MT. Son indépendance totale vis-à-vis de la source et de la charge lui confère une bonne auto-adaptabilité avec des performances appréciables [9]

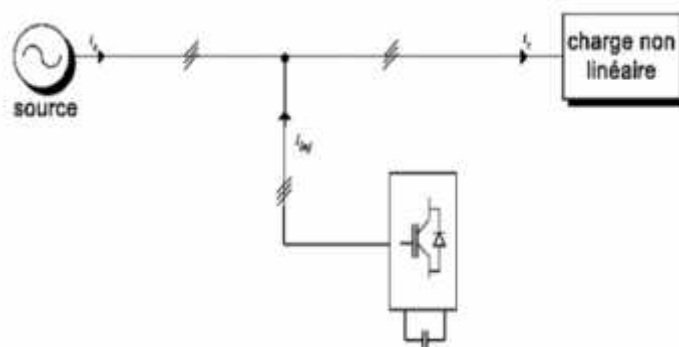


Figure II.13 : Filtre actif parallèle (FAP)

### II.2.6.1 Les principes de fonctionnement:

Les principes de fonctionnement des premiers filtres actifs parallèles ont été décrits dans la littérature dès le début des années 1970. En 1976, une première famille de filtre actif parallèle a été conçue à partir d'onduleurs à transistors de puissance commandés en MLI.

Premiers dispositifs de puissance étaient alors proposés pour la seule compensation des courants harmoniques. Cependant, à cette époque, il était encore difficile de concevoir ce type de système pour des applications industrielles. Cette barrière technologique sera franchie, dès 1977, lors de la conception d'un premier prototype de filtre actif parallèle à base de thyristors à commutations naturelles pour la compensation de courant harmonique.

Cependant, l'application des onduleurs à base de thyristor a tout de suite posé le problème de la génération non désirée de composantes injectées sur le réseau à la fréquence de commutation. La même raison a également empêché l'utilisation de compensateurs statiques parallèles à thyristors, lesquels avaient été conçus pour la compensation conjointe de la puissance réactive et des courants déséquilibrés .

Au cours des années 1980, des progrès importants dans le domaine des semi-conducteurs ont permis de développer de nouveaux composants de puissance associant hautes fréquences de commutation et fortes puissances. Profitant de ces avancées, et de l'avènement des interrupteurs de puissance du type GTO et IGBT, de nombreux onduleurs de puissance, commandés en MLI, ont pu être conçus en vue de répondre aux contraintes industrielles de conception des filtres actifs parallèles .

Ainsi, ces derniers ont commencé à être commercialisés et installés à travers le monde, et plus spécialement dans les pays les plus industrialisés comme le Japon. Actuellement, les filtres actifs parallèles sont essentiellement installés par les consommateurs industriels. [14]

### I.2.6.2 Comparatif et choix du filtrage actif parallèle (FAP):

Le tableau (II.14) résume les différentes techniques de filtrage passif et/ou actif, permettant l'atténuation des tensions et courants harmoniques. Le filtre actif parallèle compense les courants et donc les tensions harmoniques engendrées par une charge non-linéaire tout en s'adaptant aux évolutions du récepteur. Le filtre actif série compense uniquement les harmoniques de tension, l'UPQC est la solution universelle permettant la compensation des harmoniques courant et tension, ainsi que la compensation de l'ensemble des perturbations liées à la tension.[15]

Tableau II.14 : Récapitulatif des méthodes de rejet des courants et de tensions harmoniques

Méthodes	Avantages	Inconvénients
Filtrage passif	Amélioration du THDi	Risque de résonance pas d'adaptabilité
Filtrage actif parallèle	Amélioration du THDi Adaptabilité aux variations de la charge Et du réseau	pas d'amélioration de la forme de la tension
Filtrage actif série	Amélioration du THDv Adaptabilité aux variations de la charge Et du réseau	pas d'amélioration de la forme du courant
Filtrage universelle	Amélioration du THDi et du THDv Adaptabilité aux variations de la charge Et du réseau	réalisation difficile

## II.3\_Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons présenté plusieurs solutions traditionnelles et modernes de dépollution. La solution classique à base de filtres passifs est souvent pénalisée en termes d'encombrement et de résonance. De plus, les filtres passifs ne peuvent pas s'adapter à l'évolution du réseau et aux charges polluantes. L'utilisation des filtres actifs se présente comme une meilleure solution pour tous types de perturbations qui apparaissent dans le réseau électrique.

Le filtre actif parallèle (FAP) peut être installé pour compenser toutes les perturbations de courant comme les harmoniques et la puissance réactive. Le filtre actif série (FAS) peut être installé pour compenser toutes les perturbations de tension comme les harmoniques et les creux de tension. La combinaison parallèle-série actifs (UPQC) est la solution universelle pour compenser toutes les perturbations en courant et en tension.

D'autres solutions de dépollution consistent à associer des filtres actifs et passifs pour trouver un compromis entre l'efficacité de compensation et le coût. Ces solutions peuvent être des solutions futures très prometteuses.

La suite de ce mémoire sera consacrée à l'étude théorique et par simulation d'un filtre actif parallèle à structure tension, en vue d'une compensation globale des harmoniques de courant pour les systèmes triphasés trois fils.



# **Chapitre III:**

**Commande directe de puissance du filtre actif  
parallèle et résultats de simulation.**

### III. Introduction:

Au cours de ces dernières années, des travaux de recherche importants ont été menés sur les stratégies de contrôle des convertisseurs MLI triphasés. Ces stratégies proposées peuvent être classées selon l'utilisation des régulateurs de boucle de courant ou de régulateurs de puissances actives/réactive.

La commande DPC est une stratégie de contrôle de haute performance pour les convertisseurs MLI basés sur la théorie de la puissance instantanée, Bien que la DPC est comme étant le contrôle qui utilise directement les puissances instantanées comme variables de contrôle et qui n'a pas besoin d'utiliser des blocs de modulation car les états de commutation de l'onduleur sont choisis directement par un tableau de commutation.

Dans la première partie de ce chapitre, nous présenterons une étude détaillée sur la structure du filtre actif parallèle ainsi que son fonctionnement général.

Dans la deuxième partie nous exposerons la commande DPC . Nous présenterons le principe de commande du SAPF par deux techniques. La première approche est basée sur l'utilisation d'un filtre passe-bas. La deuxième approche est basée sur l'utilisation d'un filtre multi-variable. Enfin, des résultats de simulation sont présentés et commentés.

#### III.1. Etat de l'art de filtre actif parallèle:

Sur la figure (III. 1 ) [17] apparaît le synoptique d'un filtre actif parallèle. Il est constitué d'un onduleur de tension et d'un filtre inductif en sortie. Ainsi, l'inductance en sortie de l'onduleur donne la nature de source de courant au filtre actif. Dans le cas où le réseau alimente plusieurs charges polluantes, il est préférable d'utiliser un seul filtre pour toutes les charges car, le coût, du filtre est moindre. Cependant, lorsque la puissance des charges polluantes est élevée, la solution d'un filtre actif par charge s'avère nécessaire.

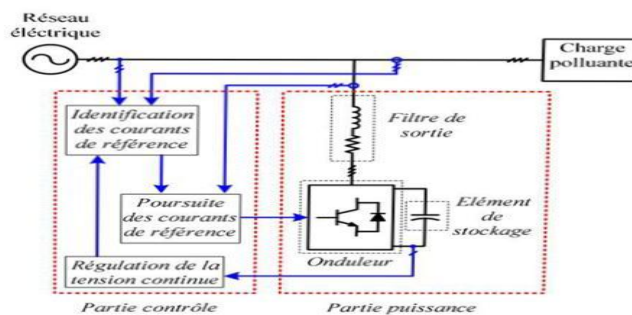


Figure (III.1): Filtre actif parallèle

Cette dernière méthode est bien sûr plus couteuse mais elle possède l'avantage d'éviter que des harmoniques viennent perturber la stabilité du réseau dans le cas où un filtre actif est défectueux.[18]

### III.1.2. Principe de fonctionnement:

Le filtre actif parallèle, également appelé compensateur shunt, est connecté en parallèle sur le réseau électrique. Les FAP sont constitués de convertisseurs statiques à base de semi-conducteurs de puissance (structures de type onduleur), associés à un dispositif de contrôle et de commande adapté. Ils peuvent être assimilés à des sources de courant qui compensent en temps réel les courants harmoniques en injectant au niveau du réseau des courants en opposition de phase avec les perturbations harmoniques identifiées. Un FAP est dit à structure courant ou à structure tension selon le type de stockage de l'énergie, réalisé par une inductance ou un condensateur. Cependant, les FAP à structure tension sont plus fréquemment mis en œuvre dans les applications industrielles pour la simplicité de leurs commandes, leur coût limité et leur taille physique réduite. Nous avons donc choisi de considérer la structure tension dans ce manuscrit.[19] En générale, le FAP 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 [20]. Sa structure est la suivante:

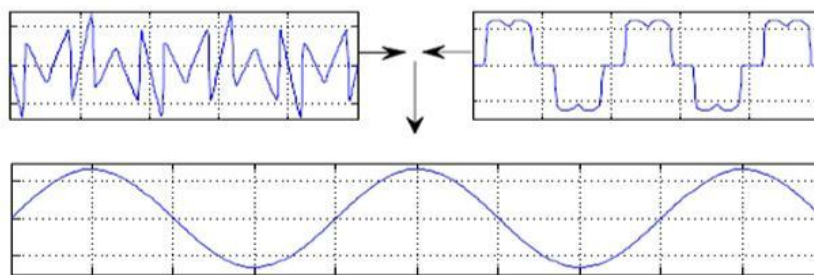


Figure (III.2) : Courant pollué, courant harmonique et courant filtré.

### III.1.3. Structure général du filtre actif parallèle:

La Figure (III.3) donne la structure générale du filtre actif parallèle, laquelle se présente sous la forme de deux blocs : la partie puissance et la partie contrôle-commande. La partie puissance est constituée :

- ✓ d'un onduleur de tension à base d'interrupteurs de puissance, commandables à l'amorçage et au blocage (GTO, IGBT, ...etc.) avec des diodes en antiparallèle,
- ✓ d'un circuit de stockage d'énergie, souvent capacitif,
- ✓ d'un filtre de sortie. La partie contrôle-commande quant à elle est constituée ,

- ✓ de la méthode d'identification des courants perturbés,
- ✓ du système à base de PLL qui sera intégré dans la méthode d'identification des courants,
- ✓ de la régulation de la tension continue appliquée aux éléments de stockage d'énergie,
- ✓ de la régulation du courant injecté sur le réseau à partir de l'onduleur de tension,
- ✓ de la commande de l'onduleur de tension. [21]

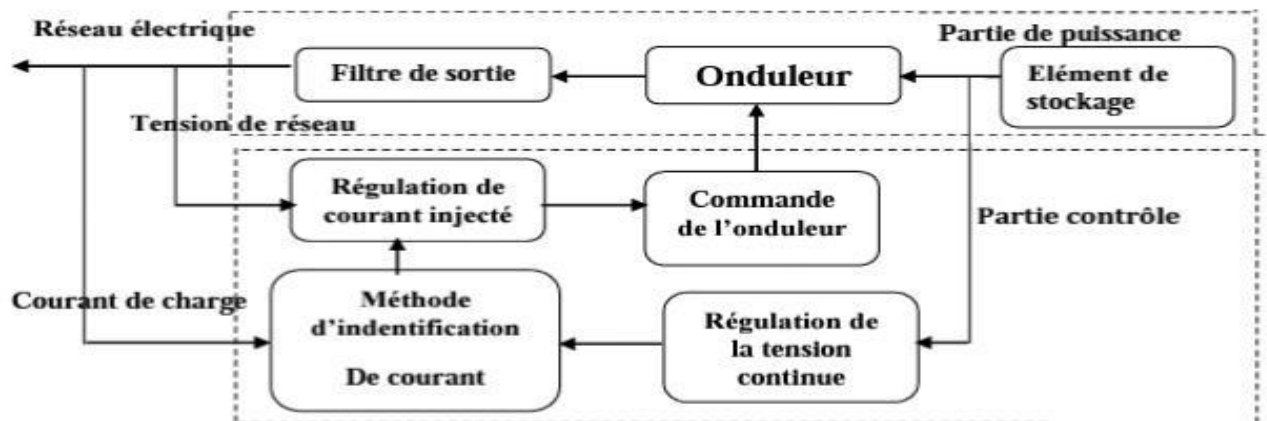


Figure. (III.3) : Structure générale du filtre actif parallèle

#### III.1.4. Applications des filtres actifs parallèles :

La principale charge polluante, le redresseur à diodes ou à thyristors, est très utilisée que cela soit pour alimenter des charges continues à partir du réseau ou comme un élément d'interfaçage au réseau dans une conversion à étage intermédiaire continu. De plus en plus de dispositifs de ce type se connectent au réseau électrique.

De ce fait, les filtres actifs parallèles ont un champ d'utilisation naturel dans les applications de réseau, notamment dans les réseaux faibles avec plusieurs charges polluantes et dans les réseaux à courant continu en haute tension (HVDC) [22].

Les filtres actifs sont également utilisés dans des applications industrielles, afin de dépolluer une zone avec plusieurs charges non linéaires (redresseurs, certains éclairages, etc.) [23].

En fin, le filtrage actif est également employé dans les applications tertiaires car les filtres actifs peuvent être intéressants dans les bâtiments commerciaux, hôpitaux, etc. dans lesquels il y a de nombreuses charges polluantes comme des ordinateurs, éclairage économique, imprimantes lasers, etc. [24]. Ces filtres actifs compensent les courants harmoniques, les courants réactifs et les déséquilibres des charges.

Les applications réseau, industrielles, tertiaires et en télécommunications apparaissent

comme des environnements particulièrement pollués par les harmoniques.

On peut tout de même préciser que quelques fabricants proposent sur leurs catalogues des filtres actifs parallèles: ABB, Siemens, MGE UPS, AIM Europe et Mesta Electronics.

Tous ces fabricants utilisent des composants suffisamment rapides comme les transistors IGBT. La puissance de ces filtres varie selon le fabricant et selon le modèle avec des gammes allant de 10 à 2000KVA. La quasi-totalité des filtres actifs sont triphasés, ils se connectent tous en basse tension ( $V < 690V$ ), supportent des courants entre 300-480A et donnent le choix de se connecter avec ou sans neutre raccordé. Les filtres permettent une compensation globale des harmoniques, souvent jusqu'à l'harmonique 50. Ces filtres actifs, en plus de réduire les courants harmoniques, améliorent le facteur de puissance et équilibrent les charges triphasées.

L'utilisation de ces filtres produit une réduction des coûts d'exploitation et une prolongation de la durée de vie des installations.

### III.1.5. Classement des filtres actifs parallèles:

Il existe une grande variété de types de filtres actifs parallèles. Ils sont classés de différentes manières selon le nombre de phases, la technologie de l'onduleur et la topologie [25] [26] [27].

- ✓ Filtres actifs monophasés ou triphasés.
- ✓ Filtres actifs avec ou sans neutre raccordé.
- ✓ Filtres actifs basés sur l'onduleur de tension ou sur le commutateur de courant.

Même si les filtres actifs monophasés ont été largement étudiés dans la littérature [28] [26], dans les applications industrielles, ce sont les filtres actifs triphasés qui sont les plus répandus (pour des applications de type variateurs ou redresseurs à dépolluer) du fait que les filtres monophasés sont normalement limités aux applications en basse puissance (les redresseurs des sources d'alimentation en continu), sauf dans le cas de la traction électrique [27].

La deuxième classification se fait autour de la topologie utilisée, avec ou sans neutre raccordé. Les filtres actifs avec neutre raccordé ont été développés afin de pouvoir injecter et compenser les composantes homopolaires. Dans la littérature la plupart des filtres sont connectés sans neutre raccordé. Toutefois, on trouve plusieurs filtres avec neutre raccordé : certains avec un onduleur à trois bras et d'autres avec un onduleur à quatre bras dans [26].

En ce qui concerne la technologie de l'onduleur, les filtres actifs sont soit basés sur l'onduleur de tension avec un condensateur côté du continu et un filtre de raccordement inductif du côté réseau, soit sur un commutateur de courant avec une inductance du côté continu et un filtre de raccordement capacitif du côté du réseau (voir Figure III.4)

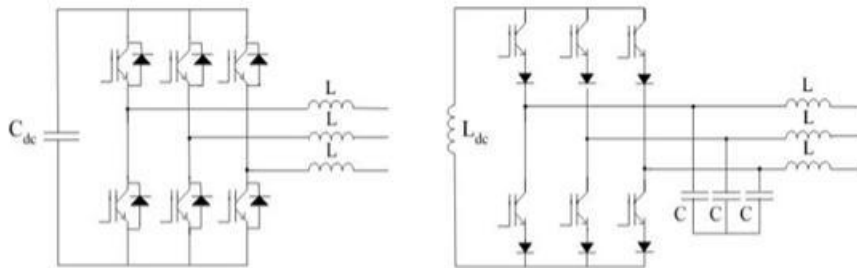


Figure (III.4) Filtre actif basé sur un onduleur de tension (à gauche) et sur un commutateur de courant (à droite)

Actuellement, même si l'on trouve des articles basés sur le commutateur de courant [29], l'onduleur de tension est généralement préféré à cause de son meilleur rendement, de son moindre coût et de son volume plus réduit (si l'on compare le condensateur et l'inductance du côté continu). Par ailleurs, les modules à IGBTs disponibles actuellement sur le marché sont bien adaptés aux onduleurs de tension car en général une diode en antiparallèle est rajoutée pour chaque IGBT.

Le commutateur de courant a quant à lui besoin de mettre en série avec chaque IGBT une diode anti-retour. De plus, un aspect vient clore provisoirement le choix : le commutateur de courant ne peut pas être utilisé avec des topologies multiniveaux classiques [30].

En conséquence, presque tous les filtres actifs qui sont sur le marché sont composés d'onduleurs de tension. Ainsi, le choix le plus commun dans la plupart des applications consiste à utiliser un filtre actif triphasé basé sur un onduleur de tension sans neutre raccordé.

### III.1.5.1. Etudes de la partie puissance:

- **Modélisation de l'onduleur de tension deux niveaux :**

L'onduleur de tension, contrairement à celui de courant est caractérisé par son élément d'alimentation en énergie qui est un condensateur (Figure III.5). La tension aux bornes de ce condensateur doit être maintenue constante [31]

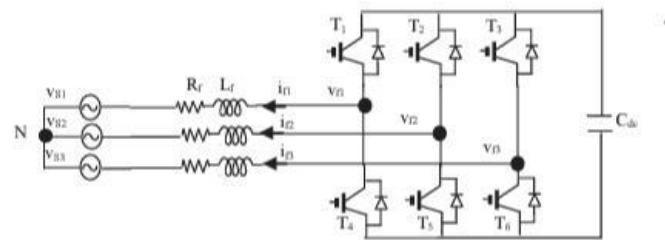


Figure III.5: Onduleur de tension deux niveaux

Les interrupteurs sont unidirectionnels en tension et doivent être réversibles en courant. Pour y parvenir, les éléments semi-conducteurs composant l'onduleur sont associés en parallèle avec des diodes. Ces semi-conducteurs sont commandés à la fermeture et à l'ouverture [32].

Les semi-conducteurs d'un même bras de l'onduleur sont commandés de façon alternée, la conduction de l'un entraînant le blocage de l'autre. Le fonctionnement de l'onduleur se déroule de manière à ce que les semi-conducteurs d'un même bras ne sont jamais fermés simultanément, au risque de court-circuiter le condensateur. En effet, les semi-conducteurs du même bras peuvent être ouverts pendant un temps défini comme étant un temps mort afin d'éviter ce risque [32]

L'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur de la Figure III.5 dépendent de l'état des signaux de commande (S1, S2, S3) comme il est défini par [33]:

$$S1 = \left\{ \begin{array}{ll} 1 & \text{T1 fermé} \quad \text{T4 ouvert} \\ 0 & \text{T4 fermé} \quad \text{T1 ouvert} \end{array} \right\}$$

$$S2 = \left\{ \begin{array}{ll} 1 & \text{T2 fermé} \quad \text{T5 ouvert} \\ 0 & \text{T5 fermé} \quad \text{T2 ouvert} \end{array} \right\}$$

$$S3 = \left\{ \begin{array}{ll} 1 & \text{T3 fermé} \quad \text{T6 ouvert} \\ 0 & \text{T6 fermé} \quad \text{T3 ouvert} \end{array} \right\}$$

Les tensions de ligne, imposées par l'onduleur, sont alors définies par :

$$\begin{pmatrix} V_{f1} - V_{f2} \\ V_{f2} - V_{f3} \\ V_{f3} - V_{f1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_1 - S_2 \\ S_2 - S_3 \\ S_3 - S_1 \end{pmatrix} V_{dc} \quad (\text{III.1})$$

Les tensions de sortie de l'onduleur, posés par  $V_{fx}$  ; avec ( $x = \{1, 2, 3\}$ ), sont référencées par rapport au neutre du réseau et vérifient l'équation suivante :

$$V_{fx} = V_{sx} + L_f \cdot \frac{di_{fx}}{dt} + R_f i_{fx} \quad (\text{III.2})$$

Les tensions du réseau étant supposées équilibrées et sachant que la somme des courants injectés par l'onduleur est nulle, on peut écrire :

$$V_{s1} + V_{s2} + V_{s3} = 0 \quad (\text{III.3})$$

$$i_{f1} + i_{f2} + i_{f3} = 0 \quad (\text{III.4})$$

Nous pouvons donc déduire des équations (III.2) et (III.3),(III.4) la relation suivante :

$$V_{f1} + V_{f2} + V_{f3} = 0 \quad (\text{III.5})$$

A partir des équations (III.1) et (III.5), nous obtenons :

$$\begin{pmatrix} V_{f1} \\ V_{f2} \\ V_{f3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2S_1 & -S_2 & -S_3 \\ -S_1 & 2S_2 & -S_3 \\ -S_1 & -S_2 & 2S_3 \end{pmatrix} V_{dc}/3 \quad (\text{III.6})$$

Puisque les grandeurs  $S_1$ ,  $S_2$  et  $S_3$  peuvent prendre chacune deux valeurs (0 ou 1), il en résulte huit commandes possibles, présentées dans le tableau III.1.

Tableau III.1: Tensions générées par l'onduleur de tension deux niveaux

État	S1	S2	S3	Vf1	Vf2	Vf3
0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	2Vdc/3	-Vdc/3	-Vdc/3
2	0	1	0	-Vdc/3	2Vdc/3	-Vdc/3
3	1	1	0	Vdc/3	Vdc/3	-2Vdc/3
4	0	0	1	-Vdc/3	-Vdc/3	2Vdc/3
5	1	0	1	Vdc/3	-2Vdc/3	Vdc/3
6	0	1	1	-2Vdc/3	Vdc/3	Vdc/3
7	1	1	1	0	0	0

- **Système de stockage d'énergie:**

Le stockage de l'énergie du côté continu se fait souvent par un système de stockage capacitif représenté par un condensateur  $C_{dc}$  qui joue le rôle d'une source de tension continue  $V_{dc}$ . Le choix des paramètres du système de stockage ( $V_{dc}$  et  $C_{dc}$ ) se répercute sur la dynamique et sur la qualité de compensation du filtre actif parallèle. En effet, une tension  $V_{dc}$  élevée améliore la dynamique du filtre actif. De plus, les ondulations de la tension continue  $V_{dc}$ , causées par les courants engendrés par le filtre actif et limitées par le choix de  $C_{dc}$ , peuvent dégrader la qualité de compensation du filtre actif parallèle. Ces fluctuations sont d'autant plus importantes que l'amplitude du courant du filtre est grande et que sa fréquence est faible. Le condensateur du côté continu a deux fonctionnalités principales :

- maintenir la tension avec un faible taux d'ondulation en régime permanent, être un réservoir qui sert à fournir la différence d'énergie de la charge et la source durant le régime transitoire.

En régime permanent, la puissance active fournie par la source doit être égale à la puissance active absorbée par la charge plus une faible puissance active qui sert à compenser les pertes dans le filtre.

La tension du côté continu peut être maintenue à une valeur de référence désirée. Néanmoins, quand les conditions de charge changent, la puissance transmise entre la source et la charge est perturbée et la différence d'énergie est compensée par le condensateur du côté continu ce qui éloigne cette tension de sa référence. Pour satisfaire les fonctionnalités du filtre actif, la valeur maximale du courant de référence doit être ajustée proportionnellement à l'énergie fournie par la source. Si la tension aux bornes du condensateur a été régulée et a atteint sa tension de référence, l'énergie fournie par la source est supposée être égale à l'énergie consommée par la charge.

La valeur maximale du courant de référence est obtenue par régulation de la tension côté continu.[34]

• **Filtre de sortie :**

Le filtre de sortie à pour rôle d'assurer la liaison entre le réseau et l'onduleur de tension. Le dimensionnement de ce filtre doit tenir compte les deux points important suivants:

✓ Il doit fournir une atténuation suffisante des rebondissements causés par la commutation des semi-conducteurs de l'onduleur du filtre actif,

✓ Il doit préserver les performances du filtre actif, définie par :  $\frac{di_f}{dt} = \frac{di_{ref}}{dt}$

Un filtre de sortie du premier ordre est le plus souvent utilisé dans la littérature, il est composé d'une inductance  $L_f$  et de résistance interne  $R_f$ . Une valeur relativement faible de  $L_f$  permet d'obtenir une bonne dynamique du FAP en satisfaisant l'égalité (2.9) [32][35]

**III.1.5.2. Etudes de la Partie command:**

Les performances du filtre actif et notamment la diminution du THD du courant de source sont certes liées aux performances de la génération des références de courants harmoniques, mais dépendent également de la stratégie de commande de l'onduleur de tension (poursuite des références de courant). Pour maintenir le courant à la sortie du filtre actif autour de sa référence, trois techniques de commande peuvent être utilisées :

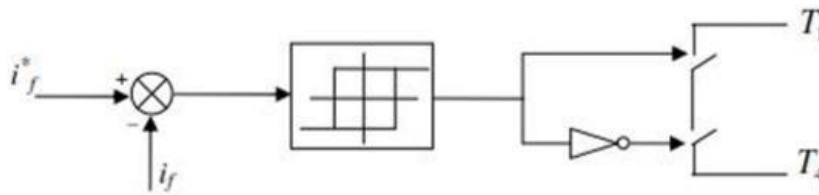
- La commande par hystérésis.
- La commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI).
- La commande par MLI vectorielle.

L'objectif de la commande, que ce soit à MLI ou par hystérésis, est de générer les ordres d'ouverture/fermeture des interrupteurs de manière à ce que le courant du filtre actif soit le plus proche de sa référence.[9]

**III.1.5.2.1. La commande par hystérésis:**

La commande conventionnelle par hystérésis est très couramment utilisée de par sa simplicité et sa robustesse. En fait, cette stratégie assure un contrôle satisfaisant du courant sans exiger une connaissance poussée du modèle du système à contrôler ou de ses paramètres. La figure (III-6) expose son principe qui consiste à établir dans un premier temps le signal d'erreur, différence entre le courant de référence  $i^*$  et le courant produit par l'onduleur  $i_f$ . Cette erreur est ensuite comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis afin de fixer les ordres de commande des interrupteurs. Cette commande présente cependant un inconvénient majeur: elle ne permet pas de contrôler la fréquence de commutation des semi-

conducteurs, d'où la présence d'un nombre important d'harmoniques dans les courants générés. [36]



Figure(III.6) :commande par hystérésis

Afin de résoudre le problème de maîtrise des fréquences de commutation, différentes solutions ont été proposées. On peut notamment citer les méthodes dites 'hystérésis à bande variables' ou 'hystérésis modulé' pour poursuivre les courants de référence[17]. Cette dernière méthode fera l'objet du paragraphe suivant.

### III.1.5.2.2. Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI):

Afin de contourner les problèmes précédents, nous introduirons une deuxième famille de commande de l'onduleur: la commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI). La technique de commande par MLI résout le problème de la maîtrise de la fréquence de commutation en (Figure III.7) fonctionnant avec une fréquence fixe facile à filtrer en aval de l'onduleur. La plus simple et la plus connue des modulations de largeur d'impulsion est sans doute la MLI à échantillonnage naturel, dite MLI intersective. Cette technique de commande met en œuvre d'abord un régulateur qui détermine la tension de référence de l'onduleur (modulatrice) à partir de l'écart entre le courant mesuré et sa référence. Cette dernière est ensuite comparée avec un signal triangulaire (porteuse à fréquence élevée fixant la fréquence de commutation). La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs. Le schéma de principe est donné par la Figure (III.7) [37]

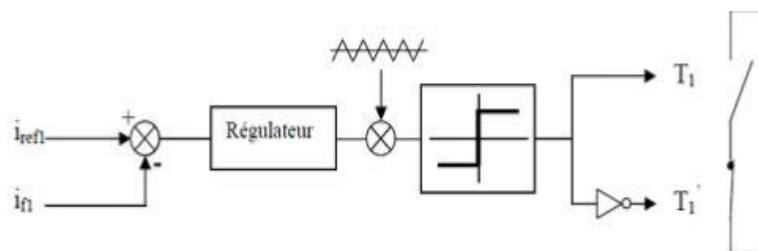


Figure (III.7) : Principe de commande des courants par MLI

### III.1.5.2.3. Commande par MLI vectorielle:

La méthode MLI vectorielle est largement utilisée dans la commande des onduleurs, elle peut augmenter la valeur maximale de la tension de sortie de l'onduleur avec un taux de distorsion harmonique réduit par rapport à ceux obtenus par la méthode MLI sinusoïdale. Il y a plusieurs algorithmes utilisant la MLI vectorielle pour commander l'onduleur ou le redresseur. Le but de toutes les stratégies de modulation est de réduire les pertes de commutation et les harmoniques, et d'assurer une commande précise [38].

### III.1.5.3. Régulation de la tension continue:

La source d'alimentation du filtre n'est pas une source de tension autonome mais une capacité qui se charge à travers le redresseur formé par la diode monté en antiparallèle aux bornes des transistors, cette source est dite source flottante.

La tension aux bornes de cette dernière n'est pas constante, à cause de sa sensibilité aux échanges de puissance active entre la charge polluante et le réseau. En cas de déséquilibre de puissance entre la charge polluante et le réseau, c'est le filtre actif qui fournira la puissance nécessaire pour rétablir l'équilibre. Les pertes dans les composantes de puissance font aussi varier la tension aux bornes de la capacité, d'où la nécessité de réguler cette tension de la maintenir à un niveau constant.

Les principales causes susceptibles de modifier cette tension sont [39] :

- Les pertes dans le filtre actif,
- L'injection des courants fondamentaux pendant les régimes transitoires de la charge polluante,
- Les pertes de commutation et par conduction des interrupteurs de puissance.
- Les pertes par effet Joule dans les composantes passifs  $L_f$  et  $C_f$ .

### III.1.5.4. Principe:

Les tensions de référence sont la tension simple désirée. Cette technique de MLI suit les principes suivants :

- ❖ le signal de référence est échantillonné à intervalles réguliers  $T$ .
- ❖ pour chaque phase, réalisation d'une impulsion de largeur  $T$  centrée sur la période dont la valeur moyenne est égale à la valeur de la tension de référence à l'instant d'échantillonnage.
- ❖ tous les interrupteurs d'un même demi-point ont un état identique au centre et aux deux extrémités de la période (pour une MLI discontinue, l'état d'un

des interrupteurs de chaque demi-point reste constant ce qui diminue les pertes de commutation mais augmente les harmoniques)[38].

### III.2. La Commande directe de puissance DPC:

Le contrôle direct de puissance (DPC) est basé sur le concept du contrôle direct du couple appliqué aux machines électriques. Le but est de contrôler directement la puissance active et réactive dans un redresseur MLI. Les erreurs entre les valeurs de référence des puissances active et réactive instantanées et leurs mesures sont introduites dans deux comparateurs à hystérésis qui déterminent l'état de commutation des semi-conducteurs, avec l'aide d'un tableau de commutation et la valeur du secteur où se trouve la tension de la génératrice [40]. La boucle de tension du bus continu est réglée avec un correcteur PI. L'idée principale du DPC classique est illustrée par la figure (III.8).

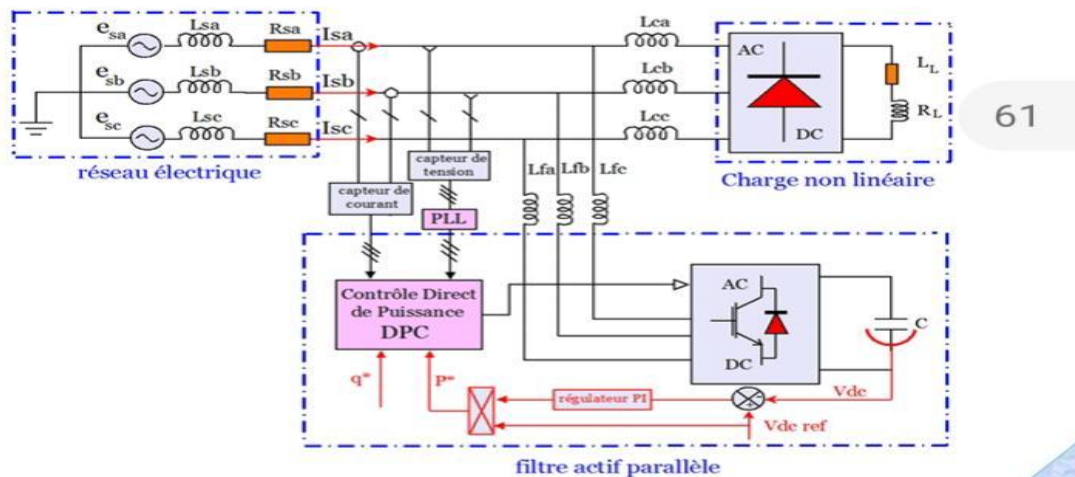


Figure III.8: schéma synoptique de contrôle du FAP avec la commande DPC

#### III.2.1. Principe de la commande directe de puissance :

La figure (III.8) montre la configuration globale de la commande directe de puissance sans capteur de tension pour un onduleur triphasé. La DPC consiste à sélectionner un vecteur de commande d'après une table de commutation. Cette dernière est fondée sur les erreurs numérisées  $S_p$ ,  $S_q$  des puissances active et réactive instantanées, fournies par les régulateurs à hystérésis à deux niveaux, aussi bien que sur la position angulaire du vecteur tension estime. En fonction de la valeur de cette position, le plan  $(\alpha-\beta)$  est divisé en douze secteurs ou on doit associer à chaque secteur un état logique du redresseur. La référence de la puissance active est obtenue par régulation de la tension continue, en utilisant un régulateur PI. Tandis que pour assurer un facteur de puissance unitaire un contrôle de la puissance réactive à zéro est effectuée.[41]

### III.2.2. Etat de l'art du contrôle direct de puissance:

Le principe de base de commande directe de puissance a été originalement présenté par Takahashi et al. en 1986 et il a été développé plus tard pour plusieurs applications. Le but était d'éliminer le bloc de modulation de largeur d'impulsion et les boucles internes des variables contrôlées en les remplaçant par une table de commutation dont les entrées sont les erreurs entre les valeurs de référence et les mesures. En 1998, Noguchi et al. ont introduit la première application pratique du concept de la commande directe de puissance. Cette application est utilisée pour contrôler les puissances instantanées active et réactive du redresseur à MLI triphasé sans capteurs de tension du réseau. En 2001, Malinowski et al. ont introduit une nouvelle configuration de DPC basée sur un estimateur de flux virtuel. Cependant, les deux dernières structures présentent un inconvénient majeur réside dans sa fréquence de commutation variable. Pour surmonter ce problème, dans Malinowski et al., ont présenté un nouveau schéma de commande direct de puissance utilisant une modulation de largeur d'impulsion vectorielle (SVM) afin d'obtenir une fréquence de commutation constante où les régulateurs à hystérésis et la table de commutation sont remplacés par des régulateurs PI et une commande SVM. Par conséquent, les performances de la commande dépendent fortement de l'aptitude de la boucle des régulateurs PI.

Récemment, d'autres structures du DPC basées sur des approches prédictives ont fait l'objet de publications internationales. Dans ce sens, en 2008, Cortes et al, ont exposé une structure de DPC basée sur la commande prédictive. Les avantages principaux de cette stratégie consistent dans l'absence de régulateurs PI pour le courant, de transformation de repères et de modulation MLI. Une année plus tard, dans [42], une commande basée sur l'application des règles floues des règles floues a été proposée. Dans ce cas, les erreurs de suivi de référence des puissances active et réactive, converties en variables floues, sont utilisées directement pour la sélection du vecteur de commande adéquat. Plus récemment encore, Portillo et al, ont proposé d'appliquer la commande directe de puissance pour le convertisseur triphasé NPC à trois niveaux. Par ailleurs, il est intéressant de mentionner que la majorité des travaux utilisant la commande DPC est appliquée aux redresseurs à MLI et peu s'intéressent aux filtres actifs [43], [44].

### III.2.3. Principe Du DPC Classique:

La figure III.9[45] montre la configuration globale de la commande directe de puissance appliquée au SAPF. Elle est analogue à celle du contrôle direct de couple (DTC) des machines à induction.

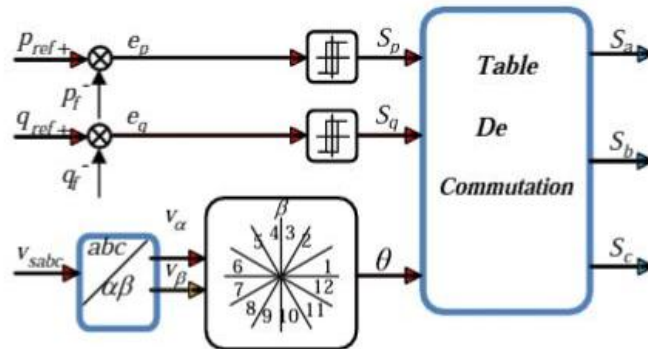


Figure III.9. Configuration générale de la commande directe de puissance.

La DPC consiste à sélectionner un vecteur de commande d'après une table de commutation. Cette dernière est fondée sur l'erreur numérisée  $S_p, S_q$  qui sont limitées par une bande d'hystérésis, aussi bien que sur la position angulaire de la tension au point de raccordement de la charge au réseau PCC. Le plan  $(\alpha, \beta)$  est divisé en douze secteurs pour déterminer le secteur de travail [46].

### III.2.4. Calcul des puissances instantanées:

Pour étudier la stratégie de contrôle directe de puissance (DPC), la théorie des puissances instantanées est utilisée pour calculer les valeurs instantanées des puissances active et réactive. Les valeurs instantanées des tensions et des courants triphasés sont respectivement :  $e_a, e_b, e_c$  et  $i_a, i_b, i_c$ . Après la transformation de Clark, on obtient les tensions  $e_\alpha, e_\beta$  et les courants  $i_\alpha, i_\beta$  sous le système de coordonnées stationnaires biphasés  $\alpha\beta$ . [6]

On sait que le calcul de la puissance active  $P$  est un produit scalaire entre les tensions et les courants, alors que la puissance réactive  $q$  peut être calculée par un produit vectoriel entre eux :

$$P = e_\alpha i_\alpha + e_\beta i_\beta \quad (III.7)$$

$$q = e_\alpha i_\beta - e_\beta i_\alpha \quad (III.8)$$

L'erreur de la puissance active  $\Delta P$  est la différence entre la valeur de la puissance active désirée  $P^*$  et la valeur réelle de la puissance active

$$P : \Delta p = P^* - P \quad (III.9)$$

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

$$\Delta q = q^* - q \quad (III.10)$$

### III.2.4.1. Calcul des puissances instantanées injectées par SAPF:

En se basant sur la mesure des tensions au point PCC :  $v(t)_{sa}$ ,  $v(t)_{sb}$ ,  $v(t)_{sc}$  et des courants injectés  $i(t)_{fa}$ ,  $i(t)_{fb}$ ,  $i(t)_{fc}$  par SAPF, les puissances injectées active et réactive instantanées peuvent être calculées respectivement par les relations[45].

$$P_s(t) = V_{sa} i_{fa} + V_{sb} i_{fb} + V_{sc} i_{sc} \quad (III.11)$$

$$q_s(t) = 1/\sqrt{3} [(V_{sa} - V_{sb})i_{fc} + (V_{sb} - V_{sc})i_{fa} + (V_{sc} - V_{sa})i_{fb}] \quad (III.12)$$

### III.2.4.2. Calcul des puissances instantanées de référence:

Le schéma de la Figure III.10 illustre les différentes étapes permettant l'obtention des composantes active et réactive de puissances de référence [46].

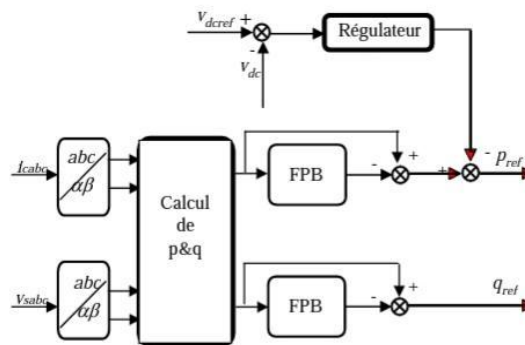


Figure.III.10. Schéma de principe de génération des puissances de référence pour DPC classique.

### III.2.5. La position angulaire $\theta_n$ :

La phase du vecteur tension du réseau est convertie en signal numérisé  $\theta_n$  (position angulaire).

Le calcul de cette position nécessite la connaissance des composantes  $e_\alpha$  et  $e_\beta$ , qui peuvent être calculées à partir de la transformation des tensions du réseau du plan triphasé abc au plan stationnaire  $\alpha$ - $\beta$  :

$$\theta_n = \arctan(e_\alpha / e_\beta). \quad (III.13)$$

A cet effet, les coordonnées stationnaires sont divisées en 12 secteurs pour optimiser les performances du FAP, comme il est montré sur la Figure III.11. Les secteurs peuvent être numériquement exprimés comme suit :[6]

$$(n-2)\pi/6 \leq (\theta_n - 1) \leq (n-1)\pi/6, n=1,2,3,\dots,12 \quad (III.14)$$

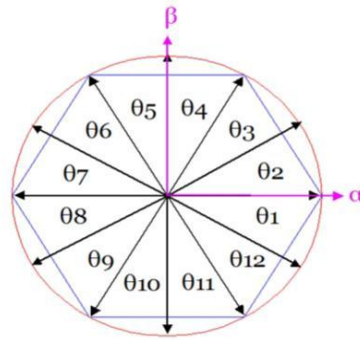


Figure.III.11: Plan  $\alpha\beta$  divisé en douze secteurs pour détecter la phase du vecteur de tension.

### III.2.6. Table de commutation:

Les signaux d'erreur numérisés et la position angulaire sont introduits dans une table de commutation dans laquelle sont mémorisés tous les états de commutation  $d_p$  et  $d_q$  du convertisseur qui prennent l'état "1" pour une augmentation de la variable contrôlée ( $P$  ou  $q$ ) et l'état "0" pour une diminution. La largeur de la bande d'hystérésis a une influence sur la performance du filtre actif parallèle en particulier, sur la distorsion du courant harmonique, et sur la fréquence moyenne de commutation.

Les régulateurs à hystérésis à deux niveaux pour les puissances active et réactive instantanées peuvent être décrits comme suit :

- Pour la puissance active :

$$\text{Si } P^* - P \geq HB_p \quad S_p = 1 \quad (\text{III.15})$$

$$\text{Si } P^* - P \leq -HB_p \quad S_p = 0 \quad (\text{III.16})$$

- De même manière pour la puissance réactive :

$$\text{Si } q^* - q \geq HB_q \quad S_q = 1 \quad (\text{III.17})$$

$$\text{Si } q^* - q \leq -HB_q \quad S_q = 0 \quad (\text{III.18})$$

En utilisant cette table de commutation ; les états de commutation optimales du convertisseur peuvent être sélectionnés de manière unique à chaque instant spécifique selon la combinaison des signaux d'entrée numérisés comme il est montré sur le tableau III.2 :[3]

Tableau III.2 : Table de commutation de la DPC

<b>Sp</b>	<b>Sq</b>	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_4$	$\theta_5$	$\theta_6$	$\theta_7$	$\theta_8$	$\theta_9$	$\theta_{10}$	$\theta_{11}$	$\theta_{12}$
<b>1</b>	<b>0</b>	<b>V2</b>	<b>V2</b>	<b>V3</b>	<b>V3</b>	<b>V4</b>	<b>V4</b>	<b>V5</b>	<b>V5</b>	<b>V6</b>	<b>V6</b>	<b>V1</b>	<b>V1</b>
	<b>1</b>	<b>V1</b>	<b>V1</b>	<b>V2</b>	<b>V2</b>	<b>V3</b>	<b>V3</b>	<b>V4</b>	<b>V4</b>	<b>V5</b>	<b>V5</b>	<b>V6</b>	<b>V6</b>
<b>0</b>	<b>0</b>	<b>V3</b>	<b>V4</b>	<b>V4</b>	<b>V5</b>	<b>V5</b>	<b>V6</b>	<b>V6</b>	<b>V1</b>	<b>V1</b>	<b>V2</b>	<b>V2</b>	<b>V3</b>
	<b>1</b>	<b>V5</b>	<b>V6</b>	<b>V6</b>	<b>V1</b>	<b>V1</b>	<b>V2</b>	<b>V2</b>	<b>V3</b>	<b>V3</b>	<b>V4</b>	<b>V4</b>	<b>V5</b>

$V_1(100); V_2(110); V_3(010); V_4(011); V_5(001); V_6(101); V_0(000); V_7(111).$

### III.3. Résultats de simulation:

Le schéma de technique DPC en l'environnement Matlab-Simulink est représenté par:

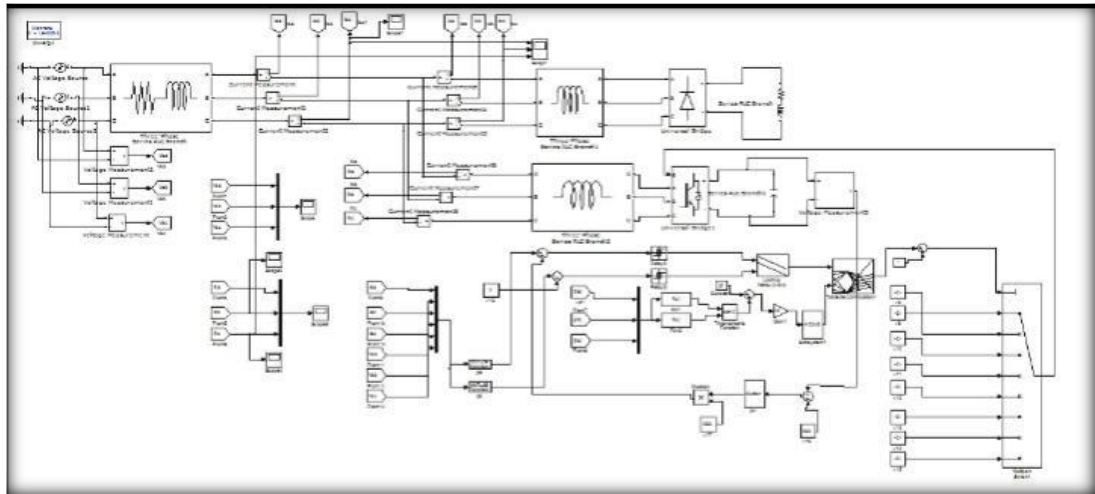
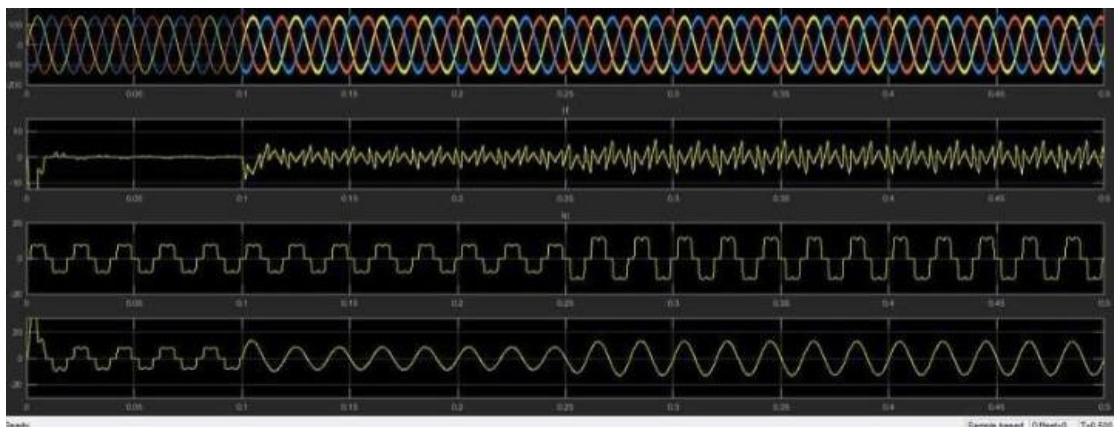


Figure III.12 : Schéma de la commande DPC en MATLAB-SIMULINK.

Nous avons développé un modèle sous l'environnement Matlab\Simulink après la mise en service à l'instant  $t_f=0.1s$

Figure.III.13: Résultats de simulation de la tension de source (1), courant de filtre(2), courant de charge (3),et courant de source (4) avant et après la mise en service du FAP a  $t=0.1s$ .



La Figure III.13 illustre les différentes formes d'onde avant et après la mise en service du FAP. Avant la mise en service (avant  $t=0.1$  ) nous remarquons que le courant de charge et de source ont la même forme (une forme distordue) et que le courant du filtre est nul. A l'instant  $t=0.01s$ , le FAP est mis en service il commence à injecter les courants de compensation  $i_f$ , ce qui permet, après un transitoire, aux courants du réseau de redevenir quasi-sinusoïdaux .

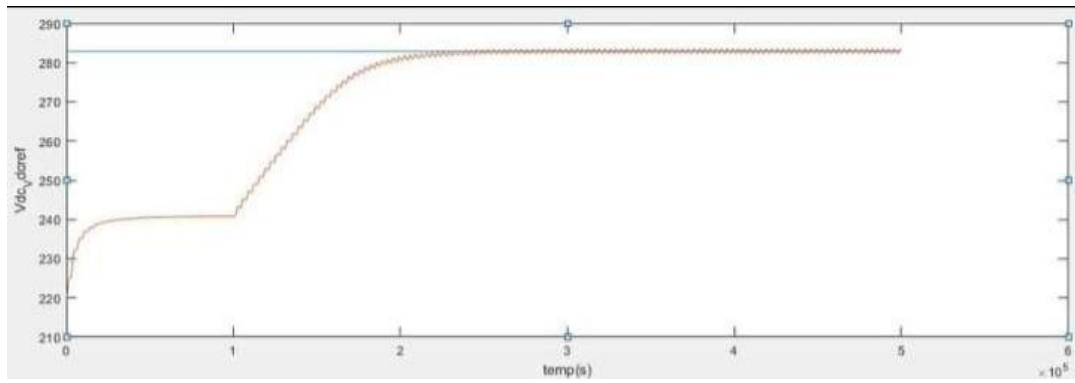
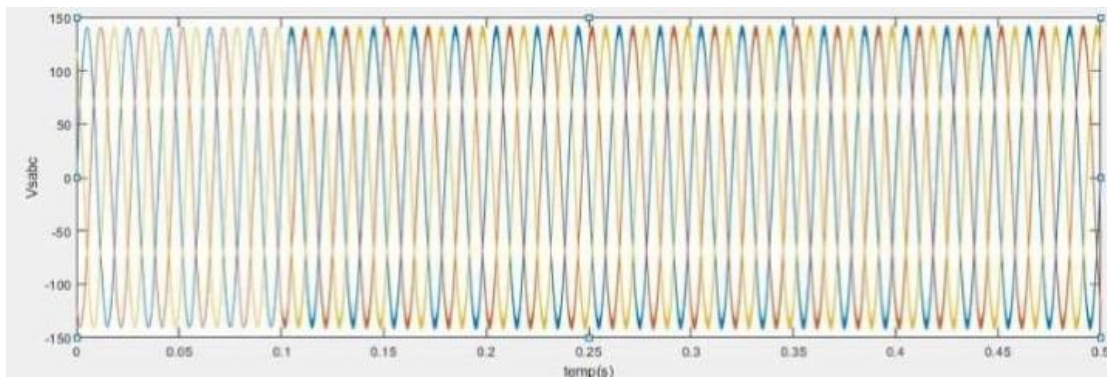
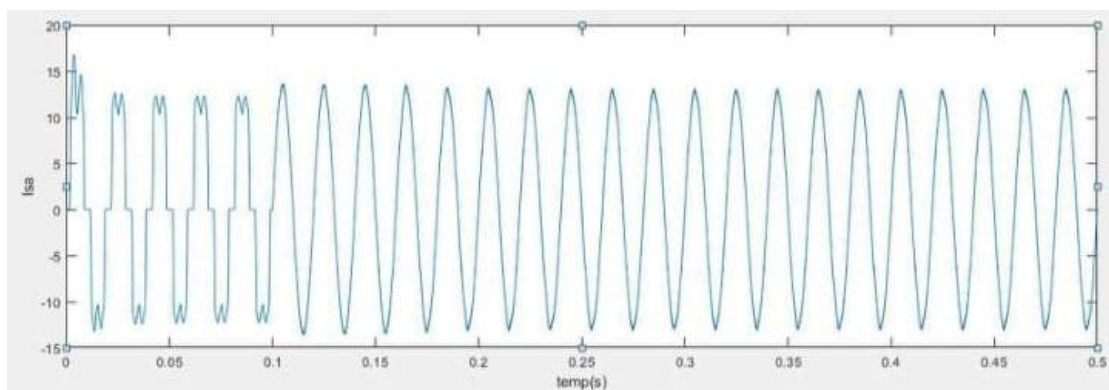


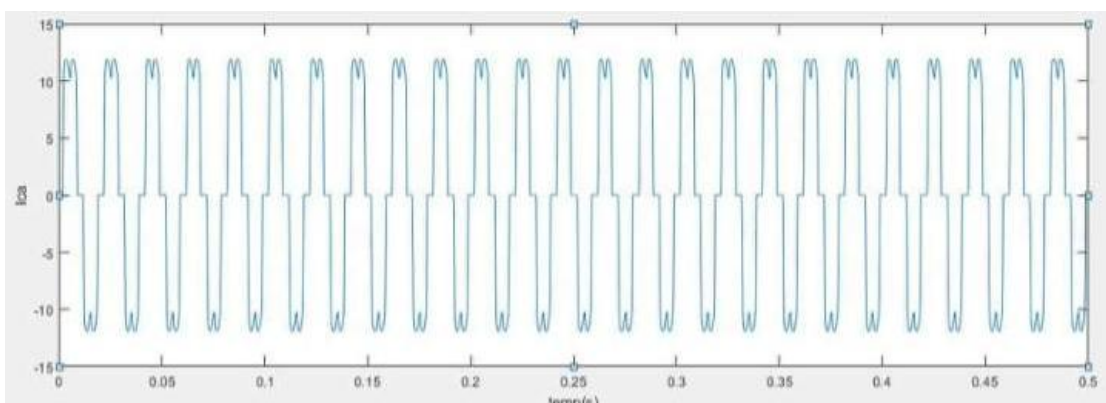
Figure.III.14: Résultats de simulation de tension du bus continu (vdc).



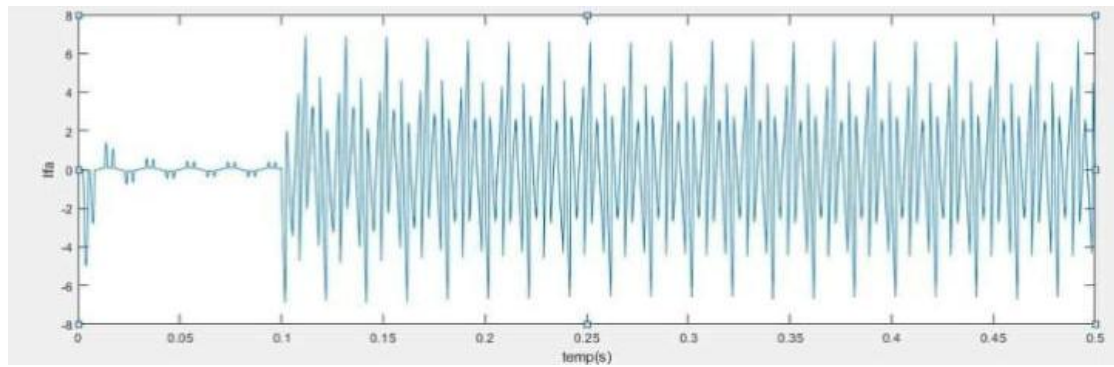
Tension de source ( $V_{sabc}$ )



Courant de source ( $I_{sa}$ )



Courant de charge ( $I_{ca}$ )



Courant du Filtre (ifa)

Figure III.15. Performances de la compensation des harmoniques par les commandes DPC

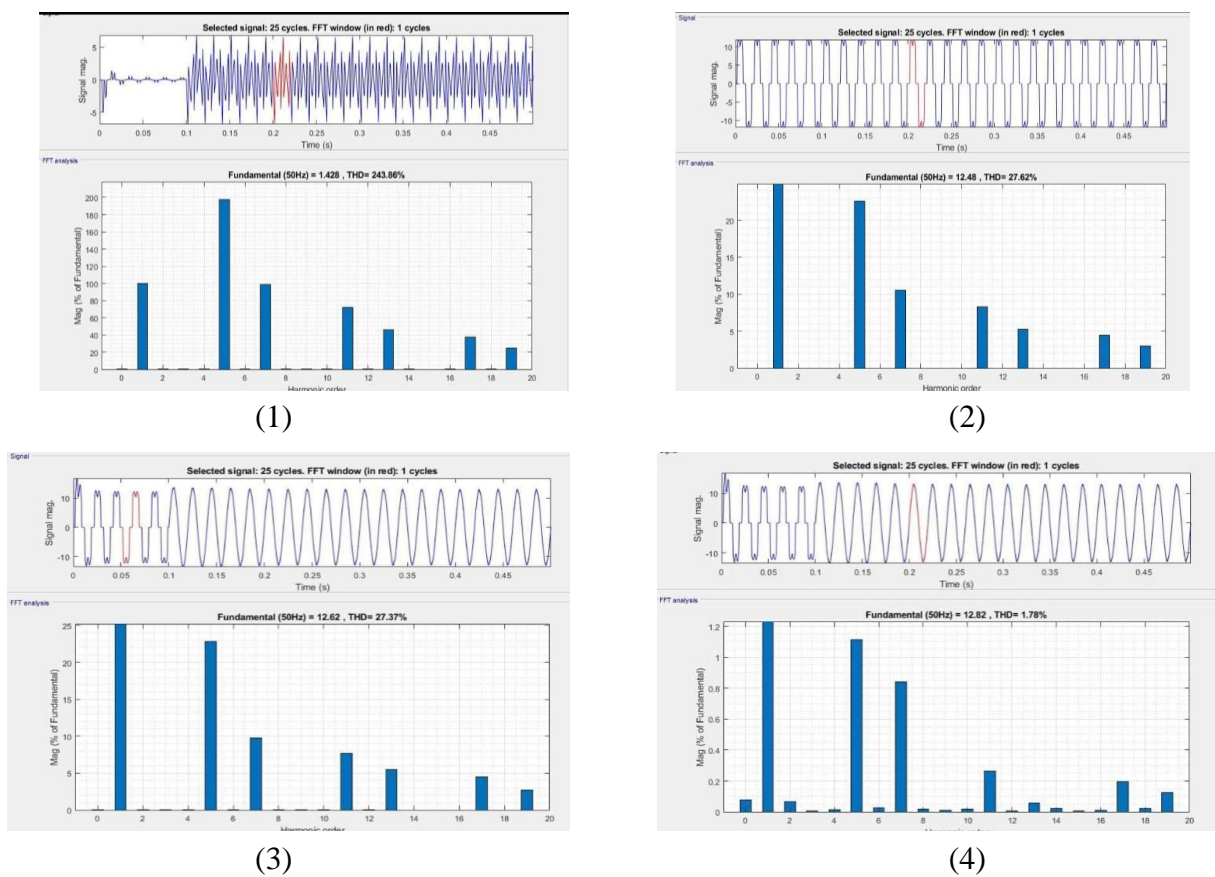


Figure III.16: Analyse spectrale des signaux

- (1) courant du filtre,  $\text{THD} = 243.86\%$
- (2) courant de charge,  $\text{THD} = 27.62\%$
- (3) courant de source en 0.05s,  $\text{THD} = 27.37\%$
- (4) courant de source en 0.2s,  $\text{THD} = 1.78\%$

### Après changer la charge:

La Figure III.17 montre qu'à  $t=0.3$  les courants de charge montrent une augmentation brusque alors que les courants de source conservent leurs formes sinusoidales.

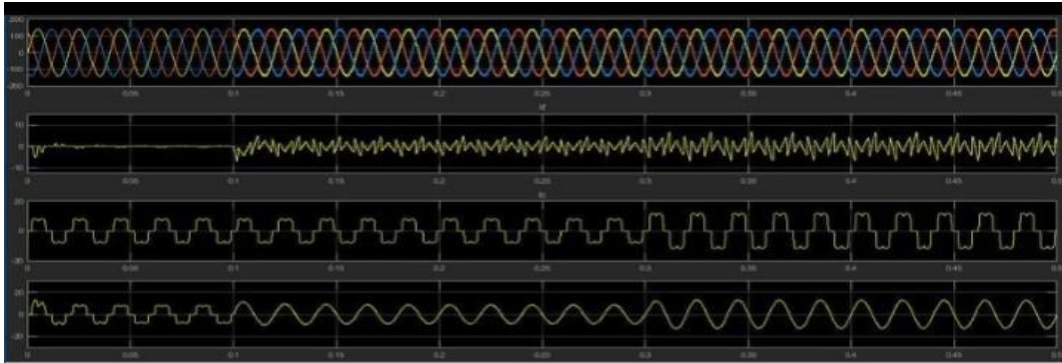


Figure.III.17: Résultats de simulation de la tension de source (1), courant de filtre(2), courant de charge (3),et courant de source (4)

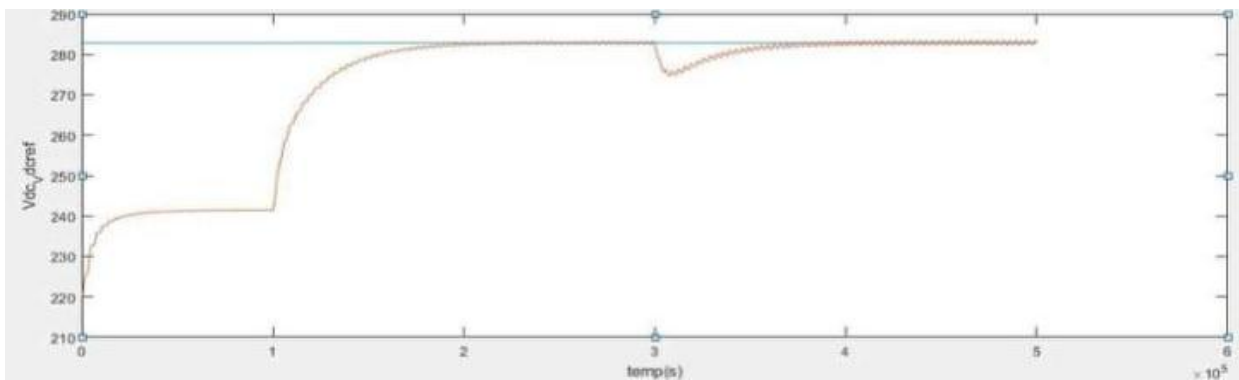
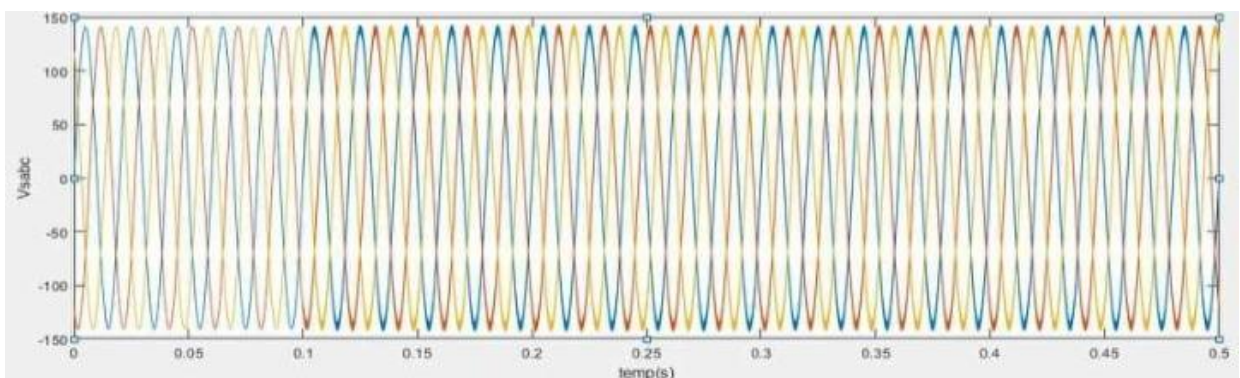
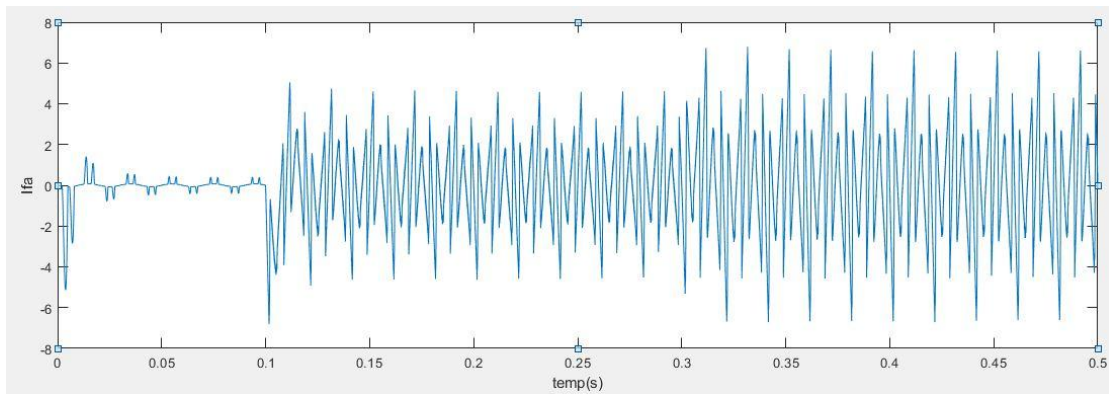


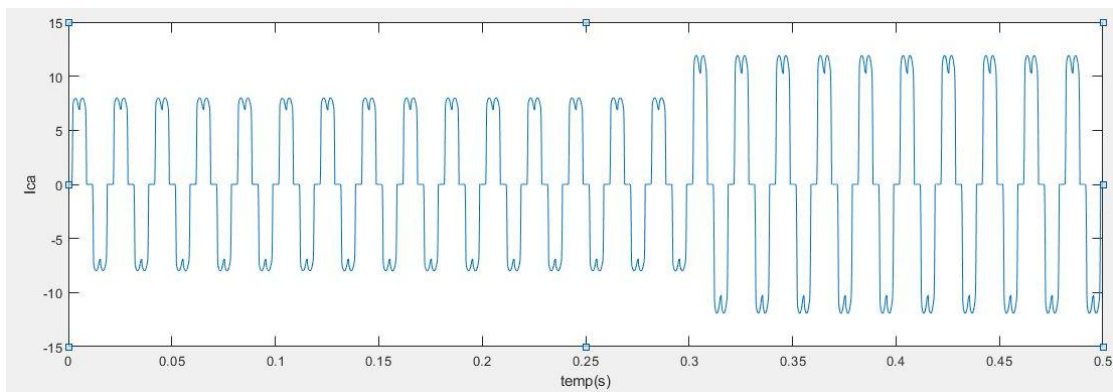
Figure.III.18: Résultats de simulation de tension du bus continu (vdc)

Tension de source (Vsabc)

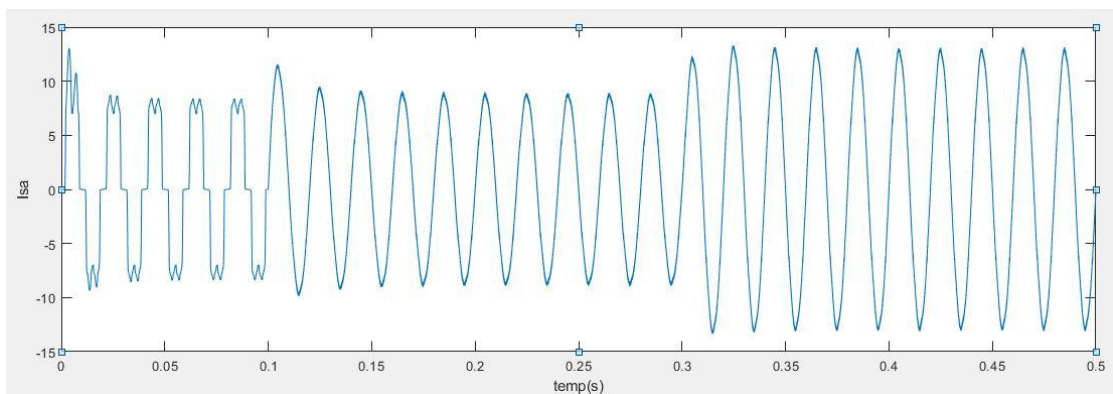




Courant du filter(ifa)



Courant de charge(ica)



Courant de source(isa)

Figure III.19.Performances de la compensation des harmoniques par les commandes DPC après changer la charge

### III.4. Conclusion:

Dans ce chapitre nous avons présenté la commande DPC comme solution de dépollution des réseaux électriques. Ce chapitre, expose les résultats de commande DPC, Elle se caractérise par la commande de l'onduleur (filtre actif, la commande en courant et la commande de puissance). Finalement, Les résultats obtenus par cette approche ont confirmé sa bonne performance tout en effectuant les compensations désirées dans des conditions de sévères perturbations.

**CONCLUSION  
GENERALE**

## Conclusion générale:

Ce projet de fin d'étude s'inscrit dans le cadre de la recherche de nouvelles solutions modernes, basées sur l'électronique de puissance, pour contrôler la pollution harmonique du réseau électrique. Dans cette thèse, nous nous intéressons à l'étude des dispositifs de nettoyage des réseaux électriques utilisant des filtres actifs. Le problème de la réduction de cette pollution harmonique est devenu l'un des enjeux majeurs pour la distribution de l'électricité, d'autant plus que leur comportement est moins prévisible, les risques d'interaction sont plus importants. Il existe toujours des techniques parallèles classiques modernes utilisées pour réduire les effets harmoniques, ces techniques visent à éliminer complètement ces perturbations. Les méthodes ultérieures offrent la possibilité de nettoyer les réseaux électriques pour absorber, compenser ou atténuer les harmoniques par des équipements électriques tels que des filtres, ou plutôt des filtres actifs parallèles.

Le premier chapitre a traité le problème des perturbations harmoniques causées par charges non linéaires connectées aux réseaux électriques.

Dans le deuxième chapitre, nous avons abordé différentes solutions, solutions anciennes et solutions modernes, dont notamment le filtre actif parallèle. L'industrie de plus en plus stricte sur la qualité de l'énergie développe de nouveaux filtres actifs plus performants structure. Afin d'obtenir de meilleurs résultats.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté les méthodes de contrôle utilisées pour déterminer les courants harmoniques et contrôler l'onduleur, afin d'introduire ces courants dans le réseau pour rendre les courants de source proches de la forme sinusoïdale, la proposition. Des stratégies de contrôle ont été étudiées dans la littérature, qui sont différents types de contrôle en courant. Ensuite, nous avons examiné le contrôle de puissance direct appliqué au filtre actif parallèle.

Nous avons présenté une synthèse des résultats des différentes simulations obtenues appliquées au filtre de puissance active.

En conclusion, le contrôle de puissance direct appliqué au filtre actif a donné des résultats efficaces dans différentes conditions.

**REFERENCES**  
**BIBLIOGRAPHIQUES**

## References:

- [1] Nurcan, S., Barrios, J., & Rolland, C. (2002). Une méthode pour la définition de l'impact organisationnel du changement. *INGENIERIE DES SYSTEMS D INFORMATION*, 7(4), 107-134.
- [2] Zikem hossem,tazia Mohammed elmabrouk (2016.2017). Amélioration de la qualité d'énergie électrique issue d'un système photo voltaïque utilisant la méthode du courant de source maximum(Ismax).
- [3] خليفة & زغدي, العروسي. Commande Directe de Puissance d'un Filtre Actif Parallèle en Conditions non Idéales (2019).
- [4] Boussaid, A., & Khezzar, A. (2017). Filtrage actif des harmoniques dans les réseaux électriques. Contribution à l'amélioration de l'énergie électrique (Doctoral dissertation, )
- [5] Anouar, N. (2019). La Commande prédictive d'un filtre parallèle.
- [6] Ouchen, S. (2017). Contribution a la commande directe de puissance dediee au filtrage actif, associe a une source photovoltaïque (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider-Biskra).
- [7] Guergah.M (2017). Amélioration de la qualité de l'energie electrique par un filter actif parallèle monophasé, ISSN 2356-5608.
- [8] Collombet, C., Lupin, J. M., & Schonek, J. (1999). Perturbations harmoniques dans les réseaux pollués, et leur traitement. *Cahier technique*, 152.( Harmonique (électricité)).
- [9] Zoubir, C. H. E. L. L. I. (2015). Amélioration de la qualité de l'énergie électrique par un filtre actif d'harmonique (Doctoral dissertation, Université Badji Mokhtar).
- [10] Mourad, A. M. R. O. U. N. E. (2016). Commande et diagnostic d'un filtre actif parallèle (Doctoral dissertation, UNIVERSITE DE MOHAMED BOUDIAF M'SILA FACULTE DE TECHNOLOGIE).
- [11] Djerioui, A. (2016). Commande non linéaire d'un filtre actif parallèle connecté à un réseau électrique et à un système photovoltaïque (Doctoral dissertation).
- [12] Chauveteau, G., & Thirriot, C. L. (1967). Régimes d'écoulement en milieu poreux et limite de la loi de Darcy. *La Houille Blanche*, (2), 141-148.
- [13] Bouacida, F., & Zebiri, M. (2009). Qualité de l'énergie electrique et norme IEEE-19.
- [14] E. Amar, O. (2007). Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant. These, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA.
- [15] DOUKHI, N. (2016). Contribution à l'Étude de la Qualité de L'Énergie (Doctoral dissertation, Université de Batna 2).
- [16] Boucif, A. (2014). Filtrage actif d'un réseau Électrique (Master's thesis).

- [17] « **Shahram KARIMI** : » Continuité de service des convertisseurs triphasés de puissance et prototypage 'EPGA in the loop' application au filtre actif parallèle Thèse de Doctorat, université Henri Poincaré, Nancy-I, 26/01/2009.
- [18] **Lounes, A.** (2014). Etude et simulation d'un filtre actif parallèle (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).
- [19] **S. KARIMI** " Continuité de service des convertisseurs triphasés de puissance et prototypage "FPGA in the loop". Application au filtre actif parallèle" Thèse de Docteur l'Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2009.
- [20] **B. Samir, B. Ibrahim** « filtrage active parallèle des réseaux électriques avec compensation de l'énergie réactive » mémoire de ingénierie université M'sila 2006-2007.
- [21] **M ,ALAA EDDIN ALALI** "Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension (Automatisation des systèmes de puissance)électriques" Thèse de Doctorat, Strasbourg 12 Septembre 2002 .
- [22] **Z. Wenyan, G. Asplund.** « Active DC Filter for HVDC Systems ». IEEE Trans. On Computer Applications in Power, vol. 7, n° 1, p. 40-44, Janvier 1994.
- [23] **S. Bhattacharya, D. Divan.** « Active Filter Solutions For Utility Interface of Industrial Loads ». Conférence Power Electronics, Drives and Energy Systems for Industrial Growth, vol. 2, p. 1078-1084, Janvier 1996.
- [24] **J.-S. Lai, T. S. Key.** « Effectiveness of Harmonic Mitigation Equipement for Commercial Office Buildings ». IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 33, n° 4, p. 1104-1110, JuilletAoût 1997.
- [25] **B.abdelouhab,**” TECHNIQUES DE COMMANDE PREDICTIVE ET FLOUE POUR LES SYSTEMES D'ELECTRONIQUE DE PUISSANCE: APPLICATION AUX REDRESSEURS A MLI “ Mémoire de Magistère, Université de setif,2010.
- [26] **L. Abbassen,** «Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque», Mémoire de Magistère, Université de Tizi Ouzou, Algérie, 2011.
- [27] **S. Bellakehal,** «Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables», thèse de Doctorat, Université de Constantine, Algérie, 2010.
- [28] **M.pinard** ,” Convertisseurs et électronique “ liver
- [29] **E.yang, G.chen,** “A new control approach for active power quality conditioner in synchronous signal processor-controlled shunt active filter”, power Quality and utilization journal,2006.

- [30] **Ahmed Lamine, A. Z. O. U. Z.** (2016). Amélioration de la qualité d'énergie électrique issue d'un système photovoltaïque utilisant la commande DPC (Doctoral dissertation, Faculte de technologie/UniversiteMohamed Boudiaf-M'sila).
- [31] **M.D. Epanya** « Application du filtrage actif pour une mise en œuvre de méthode de prédiction et de contrôle d'harmoniques dans un réseau de distribution électrique», Mémoire comme exigence partielle de la maîtrise en génie électrique. Université du Québec 2010.
- [32] **S. Beaulieu** « Etude et mise au point d'un filtre actif d'harmoniques en vue d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique », Mémoire présente comme exigence partielle de la maîtrise en ingénierie. Université du Québec a Chicoutimi 2007.
- [33] **A. Boukadoum** « Contribution à l'analyse et la réduction de la pollution harmonique dans le réseau électrique », Mémoire de Magister. Université d'Annaba 2007.
- [34] **Magraoui, M.** (2007). Validation de techniques de commande d'un filtre actif parallèle(Doctoral dissertation, École de technologie supérieure).
- [35] **S. Karimi** « Continuité de service des convertisseurs triphasés de puissance et prototypage "FPGA in the loop": application au filtre actif parallèle », Thèse Doctorat. Université Nancy-I 2009.
- [36] « **Mohamed Muftah ABDUSALAM** » Structure et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales Thèse de Doctorat, université Henri Poincaré, Nancy,I,28/05/2008.
- [37] **YAHIAOUI, A. L.** (2014). Détection de défaut des convertisseurs de puissance «Application au filtre actif parallèle» (Doctoral dissertation, Université Mohamed Boudiaf-M'Sila).
- [38] **A. Med elhadi** "Étude comparative de différent méthode de compensation actif d'énergie électrique" mémoire de ingénierie université M'sila 2012 / 2013.
- [39] **T. Benslimane**, “ Commande numérique d'un filtre actif parallèle autonome ”, Mémoire de Magister, Ecole Militaire Polytechnique. 08 Février 2004.
- [40] **C. BELFEDAL** « Commande d'une machine asynchrone à double alimentation en vue de son application dans le domaine de l'énergie éolienne- Etude etExpérimentation →» Thèse de doctorat, Université d'Oran MohamedBOUDIAF, 2007.
- [41] **BENGOURINA Mohamed Rida**, « Etude et mise au point d'un filtre actif parallèle d'harmoniques en vue d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique » Mémoire en vue de l'obtention du diplôme du Magister en électrotechnique, 2012.

- [42] **A. Lopez De Heredia Bermeo** : "Commandes avancees des systemes dedies a l'amelioration de la qualite de l'energie : de la basse tension a la montee en tension". These de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, Genie electrique, Novembre 2006.
- [43] **N. Mesbahi, A. Ouari, D. Ould Abdeslam, T. Djamah, and A. Omeiri**, "Direct power control of shunt active filter using high selectivity filter (HSF) under distorted or unbalanced conditions", *Electric Power Systems Research*, vol. 108, pp. 113–123, March 2014.
- [44] **A. Chaoui, F. Krim, J.P. Gaubert, and L. Rambault** : "DPC controlled three-phase active filter for power quality improvement", *Electrical Power and Energy Systems* vol. 30, no. 8, pp. 476– 485, October 2008.
- [45] **KHALED FERKOUS** «ETUDE D'UNE CHAINE DE CONVERSION D'ENERGIE EOLIENNE ». Thèse de magistère ; Université Mentouri Constantine 2009.
- [46] **N. Mesbahi and A. Ouari** : "Direct power control of three-phase PWM rectifier without line voltage sensors", in *Proc. 2èmes Journées Internationales d'Electrotechnique, de Maintenance et de Compatibilité Electromagnétique (JIEMCEM2010)*, ENSET Oran, Algeria, 25-27 May 2010.

ملخص

**Abstract-Résumé**

## **Résumé :**

Dans ce travail , une nouvelle méthode est présentée pour contrôler un filtre actif parallèle pour améliorer la qualité d'énergie et afin d'annuler les harmoniques de courant et de compenser la puissance réactive . Consiste à concevoir un contrôleur à puissance directe (DPC) pour contrôler un filtre actif parallèle en présence d'une charge non linéaire et étudier les performances du système et comment il répond lorsqu'un changement de charge se produit. Cette recherche a été réalisée en fonction de l'étude de nombreuses recherches menées dans ce domaine et en s'arrêtant à leurs résultats et recommandations L'environnement logiciel Matlab Simulink a été utilisé pour développer des modèles mathématiques pour la source la charge et le filtre concevoir le Contrôleur DPC. Les résultats ont montré que cette méthode a conduit à une réduction du facteur de distorsion total . Pour le courant et pour obtenir un courant sinusoïdal et améliorer le facteur de puissance de manière excellente.

**Motsclés :** Qualité de l'Énergie – les harmoniques – perturbation de réseau électrique – Filtre actif parallèle – charge non linéaire – Control Direct de la Puissance ( DPC ) .

## **Abstract :**

In this work, a new method is presented to control a parallel active filter to improve power quality and to cancel current harmonics and compensate reactive power. This involves designing a direct power controller (DPC) to control a parallel active filter in the presence of a nonlinear load and study the performance of the system and how it responds when a load change occurs. This research was carried out according to the study of many researches carried out in this field and stopping to their results and recommendations The Matlab Simulink software environment was used to develop mathematical models for the source, the load and the filter, design the DPC. The results showed that this method led to a reduction in the load factor. Total distortion. For the current and to obtain a sinusoidal current and to improve the power factor in an excellent way.

**Keywords :** Power Quality – harmonics – electrical network disturbance – Parallel active filter – non-linear load – Direct Power Control (DPC).

## **الملخص:**

في هذا العمل، تم تقديم طريقة جديدة للتحكم في مرشح نشط متوازي لتحسين جودة الطاقة وإلغاء التوافقيات الحالية وتعويض القدرة التفاعلية. يتضمن ذلك تصميم وحدة تحكم طاقة مباشرة (DPC) للتحكم في مرشح نشط متوازي في وجود حمل غير خطي ودراسة أداء النظام وكيفية استجابته عند حدوث تغيير في الحمل. وقد تم إجراء هذا البحث بناءً على دراسة العديد من الأبحاث التي أجريت في هذا المجال والتوقف عن نتائجها وتوصياتها. تم استخدام بيئة برمجة Matlab Simulink لتطوير نماذج رياضية للمصدر والحمل والمرشح وتصميم وحدة التحكم (DPC). وأظهرت النتائج أن هذه الطريقة أدت إلى تقليل عامل التشوه الكلي للتيار والحصول على تيار جيبي وتحسين عامل القدرة بطريقة ممتازة.

**الكلمات المفتاحية:** جودة الطاقة – التوافقيات – اضطراب الشبكة الكهربائية – المرشح النشط المتوازي – الحمل غير الخطي – التحكم المباشر في القدرة (DPC).