



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique
Université Ahmed Draïa Adrar
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département des Sciences Technologies



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER

Domaine : Sciences technologie

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Réseaux Electriques

Intitulé

Étude des harmoniques et techniques De Commandes du filtre actif

Présenté par :

- Abdallah Omar
- Ouenda Latifa

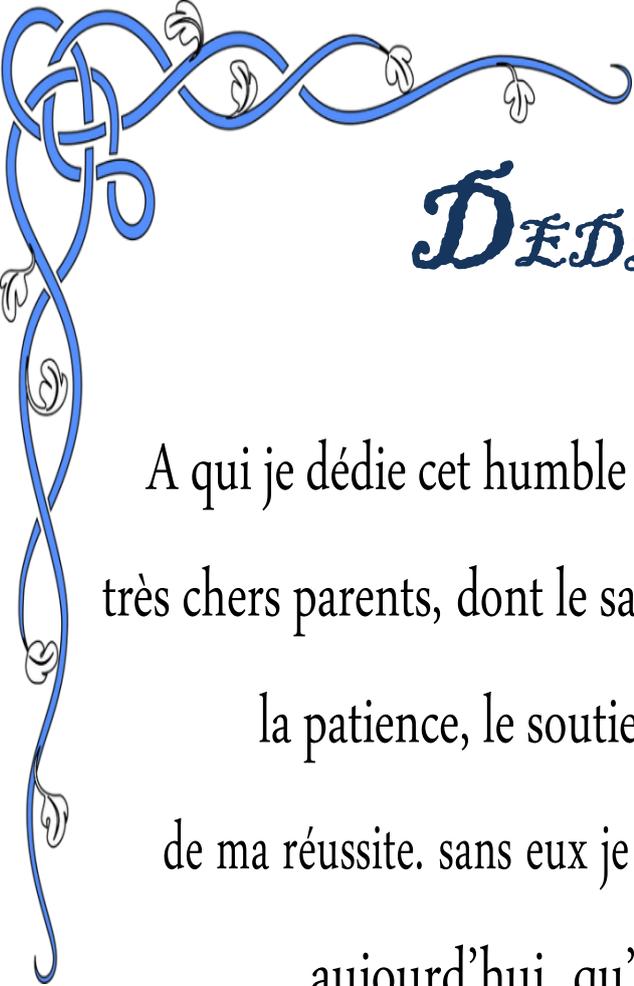
Soutenu publiquement le 20/06/2018

Devant le jury :

Président:	Dahbi Hassan	M.A.A	Univ. Adrar
Promoteur :	Berbaoui Brahim	M.R.A	URERMS. Adrar
Examineur :	Mouaedj rachid	M.R.A	URERMS. Adrar

Année Universitaire : 2017/2018

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



DEDICACE

A qui je dédie cet humble travail si ce n'est pas à mes
très chers parents, dont le sacrifice, la tendresse, l'amour,
la patience, le soutien, et l'encouragement,
de ma réussite. sans eux je ne serai pas ce que je suis
aujourd'hui. qu'allah les protège.

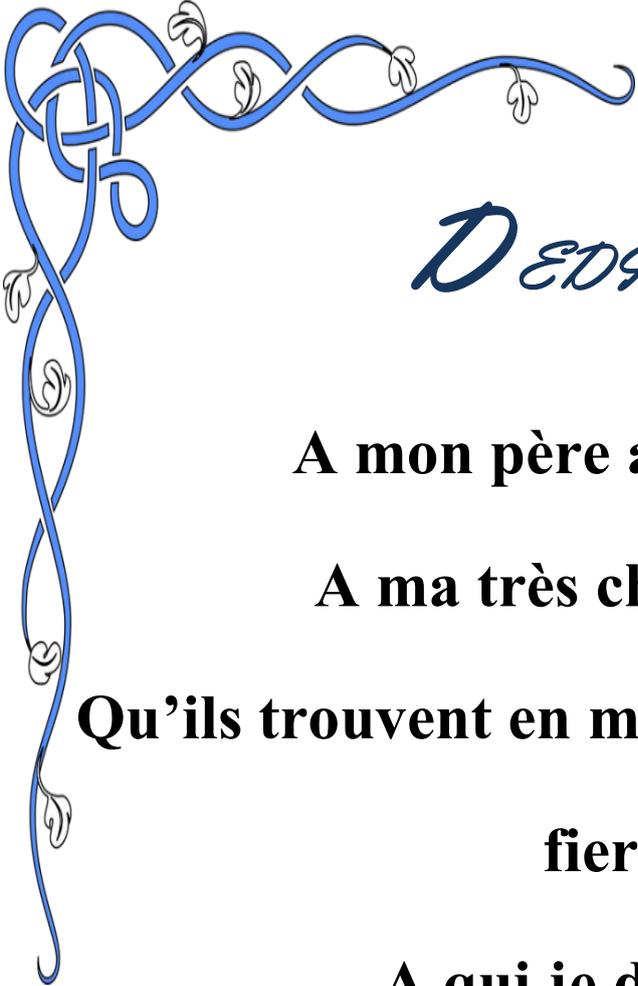
Je dédie ce travail également :
A mes très chers frères Chacun à son nom.

A tous mes chers amis.

A tous ceux qui me sont chers.

Omar





*D*EDICACE

A mon père abdalkadre

A ma très chère zohra

Qu'ils trouvent en moi la source de leur

fierté

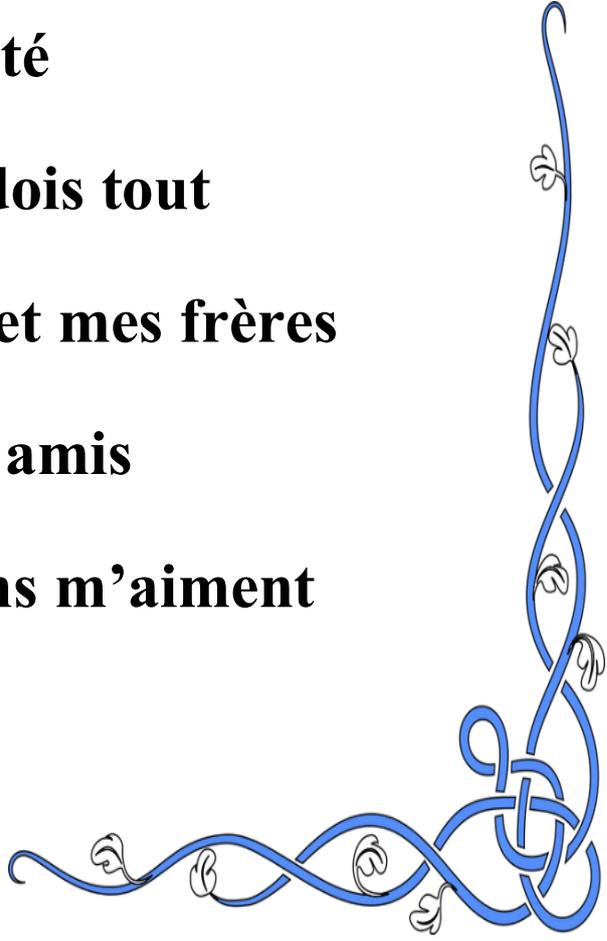
A qui je dois tout

A mes sœurs, et mes frères

A mes amis

A tous les gens m'aiment

Latifa



REMERCIEMENTS

Nous tenons à exprimer nos remerciement et nôtres profondes gratitudes avant tout à allah le tout puissant pour la volonté, la santé, le courage et la patience, qu'il nous a donné durant toutes ces longues années.

A ceux qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Je saisi cette occasion pour remercier tout le monde particulièrement M.R.A Berbaoui Brahim d'avoir accepté de m'encadré et pour ses conseils précieuses et le soutien affectif dont j'ai bénéficié tout au long de la période d'élaboration de ce mémoire.

Je remercie ceux qui ont contribué au soutien et aux conseils, en particulier M.A.A. Dahbi Hassan * M.R.A Mouaedj rachid M.A.A.Mansouri smail * M.A.A. Ouled Ali Omar * M.A.A. Yaichi Ibrahim

Nous tenons à remercier vivement toutes personnes qui nous ont aidé à élaborer et réaliser ce mémoire, ainsi à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin à accomplir ce travail.

En fin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos amis et collègues pour le soutien moral



Intitulé : Étude des harmoniques et techniques de commandes du filtre actif

Résumé :

Le problème de la pollution harmonique dans les réseaux électriques de distribution devient de plus en plus préoccupant avec l' accroissement de l' usage des charges non-linéaires.

Ce travail présente une étude du filtre actif parallèle triphasé et les différentes méthodes utilisées dans sa commande. La commande du filtre actif parallèle basé sur deux axes distincts : l' un concerne l' identification des courants harmoniques et l' autre s' intéresse au contrôle des courants injectés dans le réseau par le filtre actif. Il existe plusieurs méthodes d' identification des courants harmoniques tels que la méthode des puissances instantanées, après filtrage est obtenue pour comparer les résultats et déterminer l'efficacité du filtre actif. Les résultats obtenus par le programme de simulation par MATLAB SIMULINK nous montrent le bon filtrage en utilisant le contrôleur flou.

Mots clés :

Charge non linéaire, Filtre actif parallèle, puissances instantanées, logique floue. Calcule des courants harmoniques de référence.

Abstract :

The problem of harmonic pollution in the electrical network is increasingly worrying, especially with the progressive use of non-linear payloads.

This work represent an effective three-phase parallel and various control and control methods used in control, in order to control the effective filter there are two important points to consider: how to control the current loaded with harmonics and control the current transmitted by active filter in the electrical grid, there are many ways to extract current loaded with harmonics, including instantaneous power. After filtration we can compare the results and prove the effectiveness of the effective filter where the coefficient current deformation is much greater than after filtering.

The obtained results show by the program of simulation by MATLAB SIMILINK show a good filtering using Fuzzy logic controller then PI.

Key words:

Non-linear payloads shunt active filter, instantaneous power, fuzzy logic. Calculation of harmonic current references.

ملخص:

إن مشكلة التلوث بالتوافقيات في الشبكات الكهربائية هي في تفاقم مقلق خاصة مع تزايد استعمال الحمولات غير الخطية. هذا العمل يمثل دراسة مصفي فعال متوازي ثلاثي الطور و مختلف الطرق المستعملة في التحكم به، لكي نتحكم في المرشح الفعال هناك نقطتين هامتين يجب الاهتمام بهما: كيفية استخراج التيار المحمل بالتوافقيات و التحكم في التيارات المبعوثه من طرف المرشح الفعال في الشبكة الكهربائية، هناك العديد من الطرق لاستخراج التيارات المحملة بالتوافقيات منها طريقة الاستطاعة اللحظية وبعد الترشيح يمكننا من مقارنة النتائج و يثبت فعالية المرشح الفعال حيث معامل تشوه التيار قبل الترشيح اكبر بكثير منه بعد الترشيح.

النتائج المتحصل عليها من خلال برنامج المحاكات يمكننا من معرفة مدى فعالية استعمال منطقية فلو على استعمال المعدل التكاملية.

الكلمات المفتاحية: بحمولة غير خطية، مصفي فعال متوازي، الاستطاعة اللحظية، المنطق الغامض. كشف التيارات المرجعية.

Sommaire

Liste des figures.....	(i)
Liste des tableaux.....	(ii)
liste de symbole.....	(iii)
Introduction générale.....	1

Chapitre I: Perturbations harmonique dans les réseaux électriques

I.1.Introduction.....	4
I.2. Paramètres de la qualité de l'énergie électrique.....	4
I.3.Perturbations électromagnétiques et leurs origines.....	5
I.3.1.Surtension temporaires.....	6
I.3.2.Creux et coupures de tension.....	6
I.3.3. Fluctuations de tension.....	8
I.3.4 .Variation de fréquence.....	9
I.3.5. D'équilibre du système triphasé de tension.....	9
I.3.6. Phénomène transitoire.....	10
I.3.7 Perturbations harmoniques.....	11
I.4 .harmoniques et résonance.....	13
I.4.1 .Phénomène de résonance.....	13
I.4.2 . Types de résonance.....	14
I.4.3 . Problèmes liés aux résonances.....	15
I.5 : L'analyse de Fourier.....	18
I.6 : Problématique des harmoniques.....	20
I.6.1 Origine des harmoniques.....	20
I.6.2 : Conséquences des harmoniques.....	21
I.6.3 Effets des harmoniques.....	22
I.6.4 : Caractérisation des perturbations harmoniques.....	22
I.6.4.1 : Taux de distorsion harmonique.....	23
I.6.4.2 : Taux d'harmonique global de distorsion.....	23
I.6.4.3 : Facteur de puissance.....	23
I.6.5 : Sources de perturbations harmoniques.....	25
I.6.6 : Effets des harmoniques sur le réseau électrique.....	25
I.6.6.1: Aspect économique.....	25
I.6.6.2 Effets instantanés.....	25
I.6.6.3 Effets à terme.....	26
I.7 : Types de charges.....	26
I.7.1 : Charge linéaire.....	26
I.7.2 : Charges non linéaires.....	28
I.7.2.1 : Exemples de Charges Non-linéaires.....	28
I.7.3 : Principe de compensation.....	39
I.8.La propagation des harmoniques sur les réseaux.....	30
I.9 : Normes concernant les perturbations harmoniques.....	32
I.10. solutions de dépollution des réseaux électriques.....	33
I.10.1 Solutions traditionnelles de la dépollution.....	33
I.10.2 : Solutions modernes.....	35
I.11 : Conclusion.....	37

Chapitre II : Topologies de filtres actifs

II.1 :Introduction.....	39
II.2 : Les filtres actifs.....	39
II.3 : Principe de fonctionnement du filtre actif.....	40
II.4 : Coût du filtre actif.....	41
II.5 : Effet de l'impédance du réseau sur le filtre actif.....	42
II.6 : Classification des filtres actifs.....	42
II.6.1 :Filtres actif parallèle (shunt)	43
II.6.2 : Le Filtre Actif Série (F.A.S)	44
II.6.3 : Structure universelle (Combinaison Parallèle-Série UPQC)	45
II.6.4 : Structure hybride (Combinaison Filtre Actif et Filtre Passif)	46
II.6.4.1 Association Filtre actif série en parallèle avec un Filtre passif.....	47
II.6.4.2 Association filtre actif série en série avec un filtre passif.....	47
II.6.4.3 Filtre actif parallèle avec un Filtre passif en parallèle.....	48
II.7 : Filtre Actif Modulaire.....	48
II.8 : Comparaison entre les différentes topologies de filtrage actif.....	49
II.9 : Choix de filtre approprié à utiliser.....	50
II.10 : Conclusion.....	51

Chapitre III : Modélisation et régulation d'un filtre actif parallèle

III.1 Interdiction.....	53
III.2.Le choix du filtre actif parallèle.....	53
III.3.Filtre actif parallèle.....	54
III.4.Principe de filtrage actif parallèle.....	54
III.5. Structure générale du filtre actif parallèle.....	57
III.5.1 Topologie générale.....	57
III.5.2 Etude de la partie puissance.....	58
III.5.2.1 Onduleur de tension.....	58
III.5.2.2.Tension fournie par l'onduleur.....	59
III.5.2.3.Modèle mathématique du filtre actif parallèle dans le repère triphasé.....	61
III.5.2.4.Filtre de couplage.....	62
III.5.2.5. Système de stockage d'énergie.....	63
III.5.3. Contrôle des courants du filtre actif (partie commande)	64
III.5.3.1 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)	64
III.6.Filtre actif parallèle à structure de courant.....	65
III.6.1 Commande du filtre actif parallèle.....	68
a. Stratégies de commande directe.....	68
b. Stratégies de commande indirecte.....	69
III.6.2.Stratégies de commande.....	69
III.7. La régulation et l'adaptation du filtre actif	72
III.7.1 -Régulation de la tension continue.....	73
III.7.2.Régulation du courant du filtre actif parallèle.....	74
III.8. Méthode de régulation par PI.....	75
III.9 .Méthode de régulation par logique floues.....	76
III.9.1.Historique de la logique floue.....	76
III.9.2.Domains d application.....	77
III.9.3. Principe de la Logique Floue	77

III.9.4.Eléments de base de la logique floue.....	78
III.9.4.1. variables linguistiques et ensembles flous.....	78
III.9.4.2.Fonctions d'appartenance.....	79
III.9.4.3 .Opérateurs flous.....	80
III.9.5.La Commande par logique Floue.....	81
III.9.5.1. Interface de Fuzzification.....	82
III.9.5.2. Base de règles.....	82
III.9.5.3.Mécanisme inférence floue.....	82
III.9.5.4. Interface de Defuzzification.....	83
a. Méthode du maximum.....	83
b. Méthode de la moyenne des maxima.....	83
c. Méthode du centre de gravité.....	83
III.9.6. Avantages et Inconvénients du Réglage par Logique Floue.....	84
Avantages.....	84
Inconvénients.....	84
III.9.7.Régulateur à base de la logique Floue.....	84
III.10.Conclusion.....	87

Chapitre IV : Résultats de simulation sous Matlab-Simulink

IV .1 .Introduction.....	89
IV.2 .Simulation numérique sous matlab simulink.....	89
IV.3.Etape1 : réseau électrique alimente une charge non linéaire avant application de toute opération de filtrage.	90
IV.4.Etape2 : réseau électrique alimente une charge non linéaire avec filtre actif parallèle à π commande classique.	92
IV.5.Etape3 : réseau électriques alimente une charge non linéaire avec filtre actif parallèle à π commande intelligente (régulation par logique floues)	93
IV.6 .Etudes Comparatives Entre les Méthodes de Commande.....	96
IV.7 .Conclusion.....	97
Conclusion général.....	99
Bibliographie.....	102
Annexe	

LISTE DES FIGURES

Chapitre I : Perturbations harmonique dans les réseaux électriques

Figure(I.1) : Paramètres caractéristiques : a) forme d'onde d'un creux de tension, b) forme d'onde d'une coupure de tension.....	07
Figure (I.2) : La fluctuation de la tension.....	09
Figure (I.4) :Variation de fréquence.....	09
Figure (I.3) : Déséquilibres du système triphasé de tension.	10
Figure (I.5) : Phénomène transitoire.....	11
Figure(I.6) : Décomposition d'un signal périodique.....	12
Figure(I.7) : effets d'une self anti-harmonique sur l'impédance d'un réseau.....	13
Figure(I.8):Représentation des harmoniques, inter-harmonique et infra-harmonique.....	13
Figure (I.9): Les deux types de résonance.....	14
Figure (I.10): Résonance parallèle liée à la présence de condensateurs.....	15
Figure (I.11) : Diagramme de Fresnel des puissances.....	24
Figure(I.12) : Schéma de connexion du réseau avec une charge linéaire.....	26
Figure (I.13) : Charge linéaire.....	27
Figure (I.14) : Charge non-linéaire.....	28
Figure (I.15) : La propagation des harmoniques sur les réseaux.....	33

Chapitre II : Topologies de filtres actifs

Figure (II.1) : schéma généralisé pour le filtre actif.	40
Figure (II.2) : Principe de fonctionnement du filtre actif.	41
Figure (II.3) : Les différents types de filtres actifs.....	43
Figure (II.4) : Filtrage Filtre Actif Parallèle (shunt)	44
Figure (II.5) : Filtrage série à structure tension.	45
Figure (II.6): Schéma de principe d'un filtre universel.....	46
Figure (II.7): Filtre actif série en parallèle avec un filtre passif parallèle.....	47
Figure(II.8) : Filtre actif série en série avec un filtre passif.....	48
Figure(II.9) : Filtre actif parallèle avec un filtre passif en parallèle.....	48

Chapitre III : Modélisation et régulation d'un filtre actif parallèle

Figure(III.1): Schéma simplifié d'un filtre actif parallèle.....	55
Figure (III. 2) : les Courant de source, charge et filtre.....	56
Figure (III.3) Structure générale du FAP.....	57
Figure (III.4). Interrupteurs équivalents.....	58
Figure (III.5) : Onduleur de tension triphasé.	58
Figure (III.6) : Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur.....	61
Figure (III.7) : Principe de commande par MLI	65
Figure (III.8) : Signal de commande et référence.....	65
Figure (III.9) : Filtre actif parallèle à structure de courant.....	66
Figure (III.10) :Semi-conducteurs servant d'interrupteur au filtre actif en courant : a) transistor bipolaire, b) transistor IGBT.....	66

Figure(III.11) : Commande directe d'un filtre actif shunt.....	68
Figure(III.12) : Commande indirecte d'un filtre actif shunt.....	69
Figure (III.13) : Principe de la méthode des puissances instantanées pq.....	70
Figure(III.14) : Filtrage de la composante de la puissance continue.....	71
Figure(III.15) : Filtre actif commandé par la méthode des puissances instantanées.....	72
Figure (III.16) : Schéma fonctionnel pour une régulation de la tension continue.	73
Figure (III.17): Schéma de la régulation des courants du filtre actif parallèle.....	75
Figure (III.18) : Régulation du courant par PI.	76
Figure (III.19) : Comparaison de l'appartenance de la température en logique classique vs la logique floue.....	78
Figure (III.20) : Formes usuelles des fonctions d'appartenance.	79
Figure.(III.21) :Fonction d'appartenance singleton.....	80
Figure (III.22) : Exemple d'opérations sur des ensembles flous.....	81
Figure (II.23) Structure générale d'une commande floue.....	81
Figure(III.24) : Structure interne du régulateur flou.....	85
Figure (III. 25) : la fonction d'adhésion de l'entrée et sortie.....	86
Figure (III. 26) : Fonction d'adhésion des variables d'entrées (e,de) et de sortie (cde).	86
Figure (III. 27) : Diagramme synoptique du contrôleur logique floue.	86

Chapitre IV : Résultats de simulation sous Matlab-Simulink

Figure (IV.1) : réseau électrique alimente une charge non linéaire.....	90
Figure (IV.2) : Tensions trois phases de source pour une charge non linéaire.....	90
Figure (IV.3) : Courants des trois phases du réseau électrique avant l'injection du filtre.....	91
Figure (IV.4) : Courants des trois phases du charge non linéaire avant l'injection du filtre.....	91
Figure (IV.5) : Spectre de la courante source avant filtre.	91
Figure (IV.6) : réseau électrique alimente une charge non linéaire avec FAP à commande classique.....	92
Figure (IV.7) : Compensation des courants harmoniques utilisant le régulateur PI en présence d'une tension de source distordue et la décomposition spectrale.....	93
Figure(IV.8) : Réseau électrique alimente une charge non linéaire âpre FAP à commande par Régulation flou.....	94
Figure (IV.9) : Spectre de la courante du charge non linéaire avant filtre.....	94
Figure (IV.10) :courante source avact filtre.....	94
Figure (IV.11) : Courants harmonique ue injection par le FAP.....	95
Figure (IV.12) :courante source après filtre.....	95
Figure (IV.13) : Spectre de la courante source après filtre.....	95
Figure (IV.14) : Régulation de la tension continue V_c par la commande PI et floue.....	96

LISTE DES Tableaux

Chapitre I : Perturbations harmonique dans les réseaux électriques

Tableau (I.1) : Caractéristiques des différentes perturbations (origines et formes d'ondes)....	06
Tableau(I.2) : Conséquences des creux de tension sur quelques équipements électriques sensibles.....	07
Tableau (I.3) : Les quatre types de surtensions présentes les réseaux électriques.....	11
Tableau(I.4) : Vue d'ensemble sur les principaux phénomènes perturbateurs, avec mention de quelques mesures préventives ou curatives.....	17
Tableau(I.5) : Caractéristiques de quelques générateurs d'harmoniques.....	21
Tableau(I.6) : Spectres de courant harmonique émis par les équipements perturbateurs	29
Tableau (I.7): Limites des émissions de tensions harmoniques (la norme CEI 61000-2-2)....	30
Tableau (I.8) : Limites des composants harmoniques (la norme CEI 61000-3-2).....	31
Tableau (I.9): limites pour la distorsion harmonique de la tension (la norme IEEE 519-1992)	31
Tableau (I.10) : Limites des émissions de courants harmoniques (la norme IEEE 519-1992).	32
Tableau(I.11) : Avantages et inconvénients de filtre passif.....	34
Tableau(I.12) : Avantages et inconvénients de filtre actif.....	36

Chapitre II: Topologies de filtres actifs

Tableau(II.1) : Comparaisons entre le filtre passif et le filtre actif.....	42
Tableau(II.2) : Avantages et inconvénients de chaque topologie de filtrage.....	49

Chapitre III : Chapitre III : Modélisation et régulation d'un filtre actif parallèle

Tableau (III.1) : Tensions possibles à la sortie de l'onduleur.....	61
Tableau (III.2) : Courants générés par l'onduleur à structure de courant.....	67
Tableau (III.3) : Comparaison des deux structures d' onduleurs.....	67
Tableau (III.4) : Table des règles d'inférence.	85

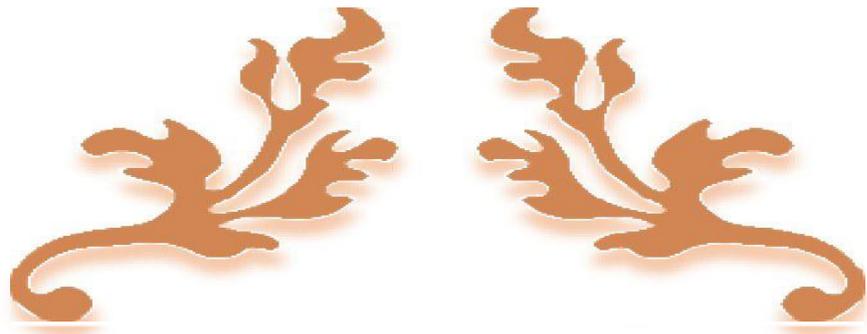
Chapitre IV : Résultats de simulation sous Matlab-Simulink

Tableau (IV.1) : Paramètres de simulation numérique concernées les modèles étudiés	90
Tableau IV.2 Comparaison des indexes de performance : entre le régulateur Flou et régulateur PI.....	96

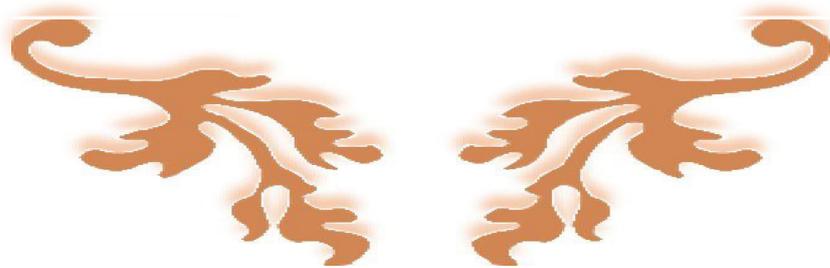
SYMBOLES

f_n :	fréquence fondamentale
V_s :	tension de source.
i_s :	Courant de source
P :	puissance active
S :	puissance apparente
Q :	la puissance réactive associée au courant fondamental
D :	la puissance déformante due aux harmoniques du courant
Φ_1 :	le déphasage entre le courant fondamental et la tension
I_h :	le courant harmonique du rang h
f_p :	Fréquence de la porteuse
f_r :	Fréquence du réseau
U_{ci}, U'_{ci} :	Tensions aux bornes des sources continues à l'entrée de l'onduleur
V_{km} :	Tension de sortie d'un bras k par rapport au point milieu M
V_i :	Tension simple de la phase i de l'onduleur
i_{di}, i'_{di} :	Courants continus d'entrée de l'onduleur
V_m :	Valeur maximale des tensions de référence
$V_{ref.}$:	Courant de référence
$I_{ref.}$:	Courant de référence
I_{α}, I_{β} :	Courants perturbateurs calculés dans le repère α - β
V_{α}, V_{β} :	Tensions perturbateurs calculés dans le repère α - β
p :	puissance instantané active.

q :	puissance instantané réactive.
\bar{p}, \bar{q} :	Puissance continue liée à la composante fondamentale active et réactive du courant.
\tilde{p}, \tilde{q} :	Puissance alternative liées à la somme des composantes harmonique du courant.
R_s :	Résistance de court circuit de réseau
L_s :	Inductance de court circuit de réseau
R_c :	Résistance de ligne
L_c :	Inductance de ligne
THD :	Taux de Distorsion Harmonique
γ :	déphasage entre la puissance apparente
F_c :	Le facteur de crête du courant est
IGBT :	Insolâtes Gâte Bipolaire Transistor
FAP :	Filtre actif parallèle
FAS :	Filtre actif série
MLI :	modulation de largeurs d'impulsions



**INTRODUCTION
GENERALE**



Introduction générale

Ces dernières années, l'utilisation croissante des dispositifs de l'électronique de puissance dans les systèmes électriques a entraîné d'énormes problèmes liés aux perturbations ou distorsions harmoniques des réseaux électriques. ce phénomène touche l'ensemble des secteurs industriels, tertiaire et domestique utilisant des charges non linéaires.

Ces charges non linéaires, d'une part, absorbent des courants non sinusoïdaux, qui à leurs tour circulent dans les lignes électriques et déforment la tension du réseau à travers l'impédance de court-circuit de celle-ci. et d'autre part, consomme de la puissance réactive qui a pour conséquence de dégrader le facteur de puissance. les déformations du courant et de la tension ont bien entendu des conséquences néfastes sur les équipements électriques, lesquelles peuvent aller d'un fort échauffement ou d'un arrêt soudain des machines tournantes jusqu'à la destruction totale de ces équipements.

Plusieurs solutions traditionnelles et modernes de dépollution ont été présentées. 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. Récemment, en plus du filtrage des harmoniques, les filtres actifs parallèles et séries, et leur combinaison, sont étudiés pour la compensation de tous les types de perturbation susceptible d'apparaître dans un réseau électrique basse tension. Le filtre actif parallèle peut être installé pour compenser toutes les perturbations de courant comme les harmoniques, les déséquilibres et la puissance réactive. Le filtre actif série peut compenser toutes les perturbations de tension comme les harmoniques, les déséquilibres et les creux de tension. la combinaison parallèle-série actif 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 (filtres hybrides) pour trouver un compromis entre l'efficacité de compensation et le cout. Ces solutions peuvent être des solutions futures très prometteuses.

Le travail présenté dans ce mémoire consiste à étudier par simulation un filtre actif parallèle destiné à compenser les courants harmoniques générés par une charge non linéaire (Pont de Greitz non commandé).

De manière à atteindre ces objectifs, ce mémoire sera divisé en quatre chapitres :

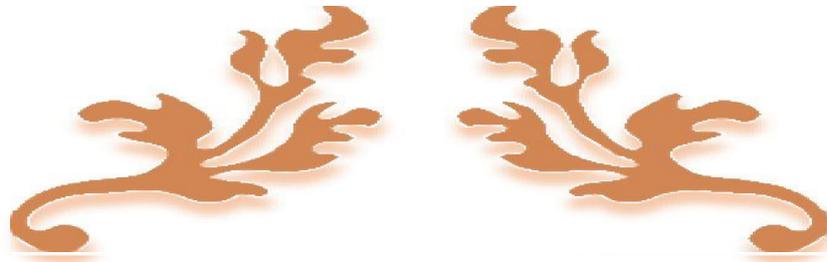
Dans le premier chapitre, nous abordons en premier lieu les différentes perturbations affectant la qualité de l'énergie électrique en particulier la pollution harmonique. Les origines, les conséquences et les normes inhérentes à cette dernière sont analysées. Nous présenterons aussi, les solutions traditionnelles et modernes de dépollution harmonique.

Dans le second chapitre nous exposerons la structure que nous avons présentée les différentes structures de filtrage actif, série, parallèle, universel, hybride, ces structures sont étudiées pour la compensation de tous les types de perturbation susceptible d'apparaître dans un réseau électrique. Nous avons noté les avantages de la structure shunt (parallèle) pour la dépollution des harmoniques de courant en raison de ses bonnes performances en compensation et de sa faisabilité expérimentale.

Au troisième chapitre, nous présentons une étude théorique sur la topologie de filtre actif parallèle (FAP) à la structure générale, les différentes stratégies de commande de l'onduleur triphasé à deux niveaux de tension et traiterons le problème des perturbations en courant et de leur identification. La méthode des puissances instantanées, utilisons deux types de régulateurs, le premier est un régulateur PI classique, et le second est basé sur la commande par la logique floue.

Au dernier chapitre, nous présentons les schémas du système simulé et les résultats de simulation à base de logiciel Matlab-Simulink et comparez de deux techniques de commande de le régulateur PI et le régulateur de logique floue.

Finalement une conclusion générale clôture notre travail.



Chapitre: I

**Perturbations harmonique dans les
réseaux électriques**

I.1.Introduction

Le réseau électrique alimente le consommateur avec une tension et une fréquence répondant aux normes.

Malheureusement ces grandeurs subissent, généralement des perturbations: Perturbation de la tension causées par les courants harmoniques, le déséquilibre des courants et des courants réactifs, qui circulent dans le réseau. et, des perturbations qui sont causées par les tensions harmoniques et le déséquilibre des tensions et les creux de tension [1]. Cependant ces perturbations sont généralement causées par la connexion au réseau de charges non linaires (Les onduleurs, les ponts redresseurs, les fours à arc et à induction, les variateurs de vitesse des machines électriques, les appareils domestiques que les téléviseurs et les lampes fluorescentes) qui provoquent une distorsion des courants et de la tension. ces dispositifs à base de composants semi-conducteurs sont les sources d'harmoniques ayant des conséquences indésirables sur le comportement du réseau électrique. donc il est d'intérêt de compenser ces harmoniques a fin de palier à leurs effets néfastes et par conséquent alimenter la qualité d'énergie électrique.

A cet effet, ce chapitre présente les principales perturbations de la tension, de courant, leurs origines, et conséquences. par ailleurs, on considère les solutions traditionnelles (filtrage passif) et modernes (filtrage actif) qui sont utilisées pour pallier aux problèmes liés aux perturbations harmoniques [2].

I.2.Paramètres de la qualité de l'énergie électrique

L'énergie électrique est fournie sous forme de tension constituant un système sinusoïdal triphasé dont la fréquence de base est de 50 Hz ou de 60 Hz. les paramètres caractéristiques sont les suivants:

- ❖ Les fluctuations.
- ❖ le déséquilibre.
- ❖ la fréquence.
- ❖ la forme d'onde.

La qualité de l'énergie peut être affectée, soit du fait de certains incidents inhérents à la nature physique et aux sujétions liées à l'exploitation du réseau, soit du fait de certains récepteurs [3] .

Qualité de l'énergie électrique = Continuité de la tension + Qualité de la Tension

L'alimentation est d'autant plus fiable que le nombre annuel d'interruptions est petit et que leur durée moyenne est faible.

Qualité est aptitude à alimenter de façon continue et satisfaisante les appareils qui utilisent l'électricité.

Cela dépend :

- ❖ des performances du réseau .
- ❖ de l'usage qui en est fait par un utilisateur donner.
- ❖ de l'usage qui en est fait par les autres utilisateurs raccordés sur le même circuit .

Ces défauts se manifestent sous forme de différentes perturbations affectant un ou plusieurs des quatre paramètres précédemment définis. on a donc quatre possibilités distinctes de perturbation:

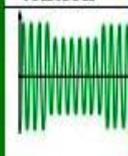
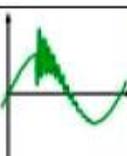
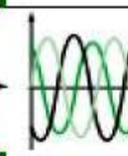
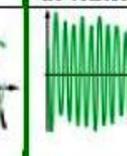
I.3 .Perturbations électromagnétiques et leurs origines

La mesure de qualité énergie électrique consiste habituellement à caractériser les perturbations électromagnétiques conduites basse fréquence (< 9 kHz), gamme élargie pour les surtensions transitoires et la transmission de signaux sur réseaux)

- ❖ Creux de tension et coupures.
- ❖ Harmoniques, inter harmoniques.
- ❖ Surtensions temporaires.
- ❖ Surtensions.
- ❖ Surtensions transitoires.
- ❖ Fluctuations de tension.
- ❖ Déséquilibres de tension.
- ❖ Variations de la fréquence d'alimentation.
- ❖ Tension continue dans les réseaux alternatifs.
- ❖ Tensions de signalisation.

Il n'est en général pas nécessaire de mesurer l'ensemble de ces perturbations. Elles peuvent être groupées en quatre catégories selon qu'elles affectent l'amplitude, la forme d'onde, la fréquence et la symétrie de la tension. Plusieurs de ces caractéristiques sont souvent modifiées simultanément par une même perturbation. Elles peuvent aussi être classées selon leur caractère aléatoire (foudre, court- circuit, manœuvre...) permanent ou semi permanent (voir tableau I.1) [4].

Tableau (I.1) : Caractéristiques des différentes perturbations (origines et formes d'ondes).

Perturbations	Creux de tension	Surintensions	Harmoniques	Déséquilibres	Fluctuations de tensions
Formes d'ondes caractéristiques					
Origine de la perturbation					
■ Réseau					
▪ Défauts d'isolement, rupture du conducteur de neutre...					
▪ Manœuvres et ferrorésonance					
▪ Foudre					
■ Equipements					
☐ Moteur asynchrone					
☐ Moteur synchrone					
☐ Machine à souder					
☐ Four à arc					
☐ Convertisseur					
☐ Charges informatiques					
☐ Eclairage					
☐ Onduleur					
☐ Batterie de condensateurs					
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> : Phénomène occasionnel : Phénomène fréquent </div>					

I.3.1. Surtension temporaires

Description : Les surtensions temporaires sont des hausses soudaines de la valeur efficace de la tension de plus de 110% de la tension nominale, laquelle se rétablit après une courte durée. Les surtensions temporaires comprennent des durées entre 8 millisecondes et une minute.

Causes : Les surtensions temporaires peuvent être attribuables à des défauts, à des délestages de charge ou à des phénomènes de résonance et de Ferro résonance. Le plus souvent, elles résultent des surtensions qui se produisent sur les phases saines lors de court circuit monophasé à la terre, par exemple.

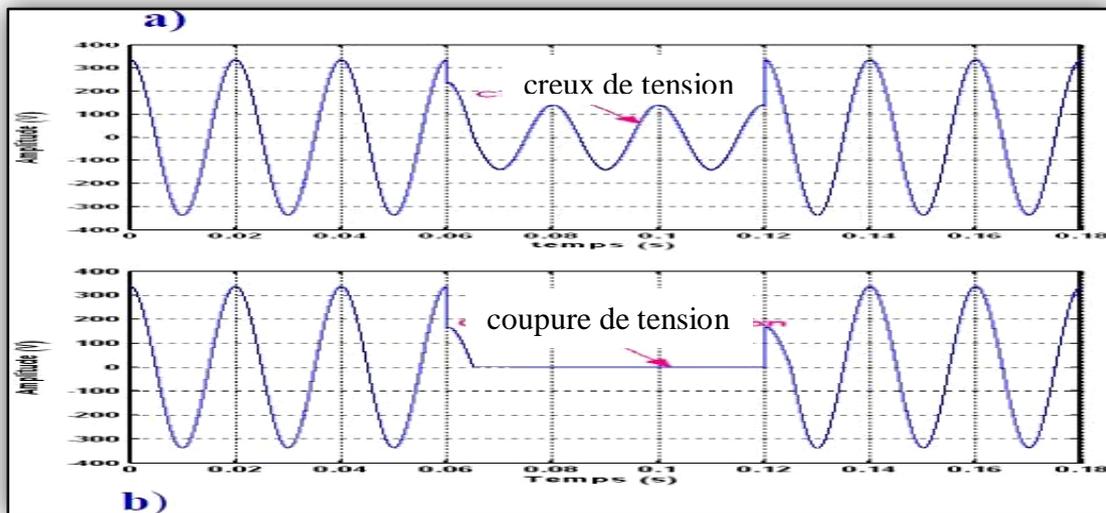
I.3.2 .Creux et coupures de tension

Le creux de tension est une diminution brutale de la tension à une valeur située entre 10 % et 90 % de la tension nominale pendant une durée allant de 10 ms jusqu'à quelques secondes.

Chapitre: I Perturbations harmonique dans les réseaux électriques

Les creux de tension sont dus phénomènes naturels comme la foudre, ou à des défauts sur l'installation ou dans les réseaux tant publics que ceux des utilisateurs. Ils apparaissent également lors de manœuvres d'enclenchement mettant en jeu des courants de fortes intensités (moteurs, transformateurs, etc.).

Une coupure de tension quand à elle est une diminution brutale de la tension à une valeur supérieure à 90 % de la tension nominale ou disparition totale pendant une durée généralement comprise entre 10ms et une minute pour les coupures brèves et supérieure à une minute pour les coupures longues. la plupart des appareils électriques admettent une coupure totale d'alimentation d'une durée inférieure à 10 ms. La figure(I.1) montre un exemple de creux et de coupure de tension. [3]



Figure(I.1) : Paramètres caractéristiques : a) forme d'onde d'un creux de tension, b) forme d'onde d'une coupure de tension.

Tableau(I.2) : Conséquences des creux de tension sur quelques équipements électriques sensibles

Type d'équipements	Conséquences néfastes
Systèmes d'éclairage	Moins de luminosité, extinction et rallumage
Systèmes à base d'électronique de puissance	Arrêt ou mauvais fonctionnement des équipements.
Dispositifs de protection	Déclenchement et ouverture des contacteurs
Moteurs asynchrones	Ralentissement, décrochage, surintensité au retour de la tension.
Moteurs synchrones	Perte de synchronisme, décrochage et arrêt du Moteur
Variateurs de vitesse pour un moteur à courant continu	➤ En mode onduleur : destruction des protections ➤ En mode redresseur : ralentissement de la machine.
Variateurs de vitesse pour un moteur Asynchrone	Ralentissement, décrochage, surintensité au retour de la tension, destruction éventuelle de matériel au niveau du convertisseur.

I.3.3 . Fluctuations de tension

Les fluctuations de tension sont des variations périodiques ou erratiques de l'enveloppe de la tension. Ce sont des variations brutales de l'amplitude de la tension situées dans une bande de 10 % et se produisent sur un intervalle de temps de quelques centièmes de secondes.

Elles sont en particulier dues à la propagation sur les lignes du réseau de courants d'appel importants. L'origine principale de ces courants est le fonctionnement d'appareil dont la puissance absorbée varie de manière rapide, comme les fours à arc et des machines à souder. Ces fluctuations se traduisent par des variations d'intensité, visible au niveau de l'éclairage causant une gêne visuelle perceptible pour une variation de 1 % de la tension. Ce phénomène de papillotement est appelé flicker. Un exemple de fluctuation de tension est montré dans la figure (I.2) [4].

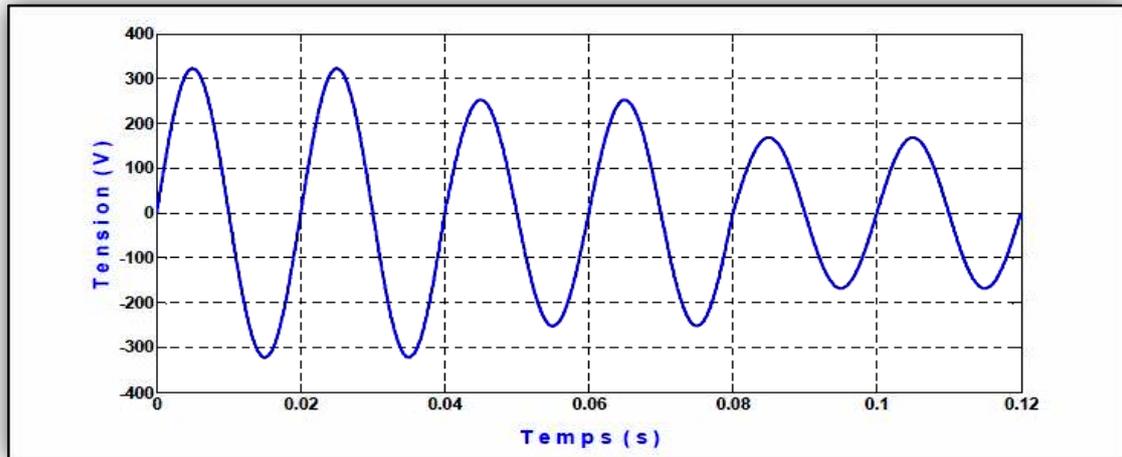


Figure (I.2) : La fluctuation de la tension

I.3.4 .Variation de fréquence

Une variation sensible de la fréquence du réseau peut apparaître sur les réseaux des utilisateurs non inter connectas ou alimentes par une source thermique autonome (voir la figure I.4). Au niveau des réseaux de distribution ou de transport, cette variation de la fréquence est très rare et n'est présente que lors de circonstances exceptionnelles, comme dans le cas de certains d'défauts graves sur le réseau. Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle $50 \text{ Hz} \pm 1\%$ [2] [5].

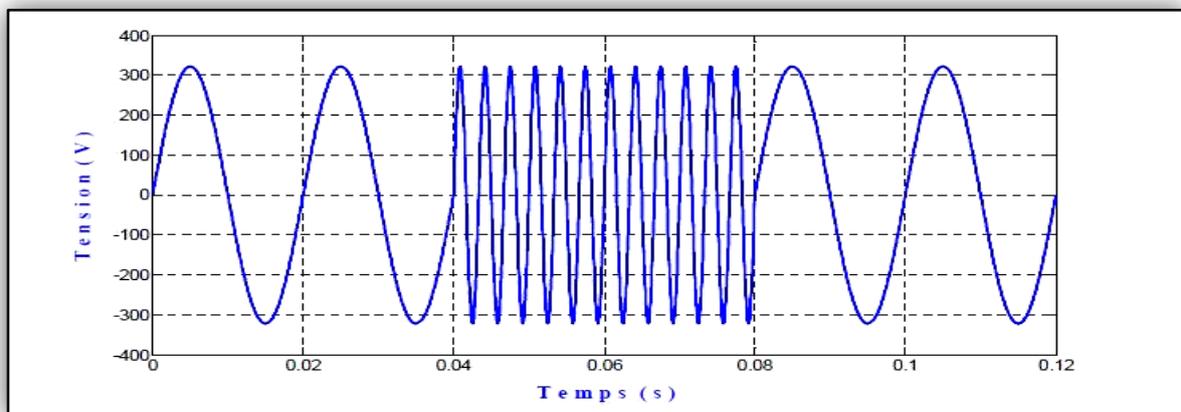


Figure (I.4) .Variation de fréquence

I.3.5 . Déséquilibre du système triphasé de tension

Un système triphasé est déséquilibré lorsque les trois tensions ne sont pas égales en amplitude et ou ne sont pas déphasées les unes par rapport aux autres de 120° [5].

Le degré de déséquilibre est défini en utilisant la méthode des composantes de Fortescue par le rapport de la composante inverse (U_{1_i}) (ou homopolaire (U_{1_0}) du fondamental à celui de la composante directe (U_{1_d}) du fondamental.

$$\Delta U_i = \frac{|U_{1i}|}{|U_{1d}|} \text{ et } \Delta U_0 = \frac{|U_{10}|}{|U_{1d}|} \quad (\text{I.1})$$

La formule approchée suivante peut aussi être utilisée :

$$\Delta U_i = \max_i \frac{V_i - V_{moy}}{V_{moy}} \quad (\text{I.2})$$

Avec V_i = tension de la phase i et

$$V_{moy} = \frac{V_1 + V_2 + V_3}{3} \quad (\text{I.3})$$

La tension inverse (ou homopolaire) est provoquée par les chutes de tension le long des impédances du réseau dues aux courants inverses (ou homopolaire) produits par les charges déséquilibrées qui conduisent à des courants non identiques sur les trois phases (charges BT connectées entre phase et neutre, charges monophasées ou biphasées MT telles que machines à souder et fours à induction).

Les défauts monophasés ou biphasés provoquent des déséquilibres jusqu'au fonctionnement des protections [6].

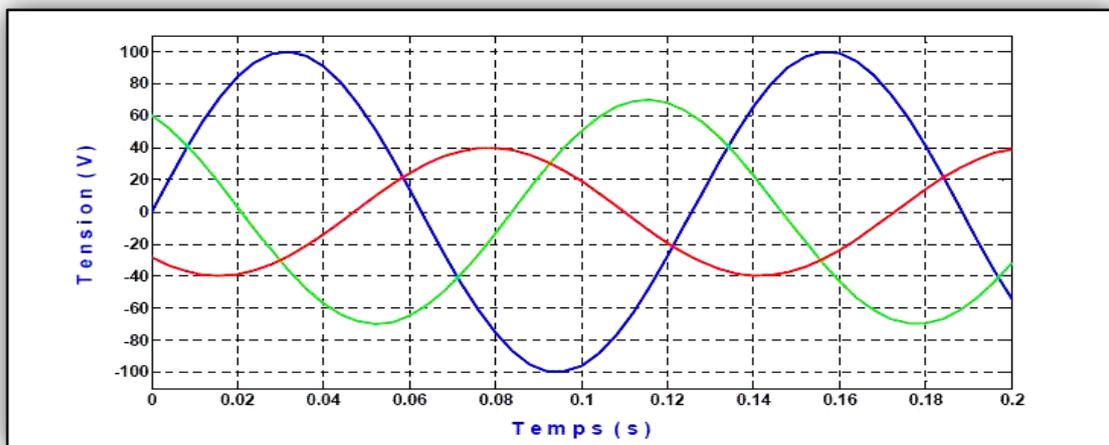


Figure (I.3) : Déséquilibres du système triphasé de tension.

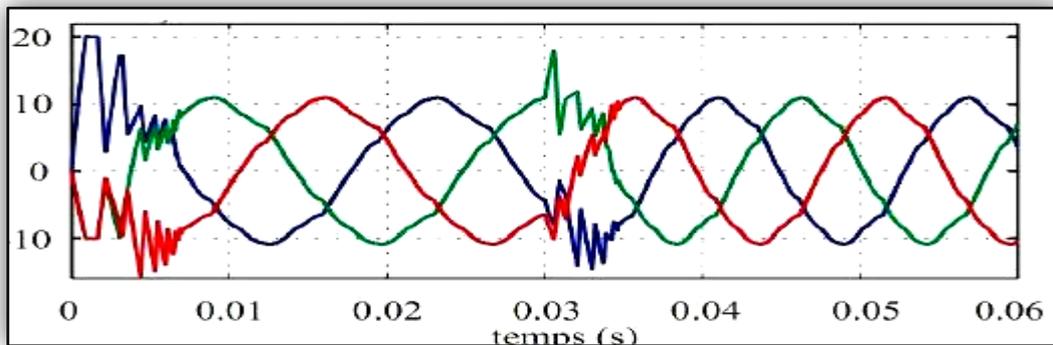
I.3.6 . Phénomène transitoire

Les perturbations électriques transitoires ont une durée de moins d'une demi-période Fondamentale. Elles ont pour principale origine les manœuvres d'ouverture et de fermeture sur le réseau de transport et de distribution, mais également des phénomènes naturels tels que la foudre.

Tableau (I.3) : Les quatre types de surtensions présentes les réseaux électriques :[7]

Surtension	Durée	Raideur du front de Montée, ou fréquence	Amortissement en Fonction de la distance
Atmosphérique	Très courte (μS)	Très élevée (1000kv / μS)	Fort
Décharge électrostatique	Très courte (ns)	Elevée (≈ 10 Mhz)	Très fort
Manœuvre	Courte (mS)	Moyenne (1 à 200 khz)	Moyen
Temporaire	Long (S), voire très longues (h)	Fréquence du réseau	Nul

Le phénomène transitoire Figure(I.5) est un des phénomènes parmi les plus importants dans l’analyse de la qualité d’un système électrique. Il est caractérisé par le temps de montée et le temps de réponse. Dans le réseau de distribution, la plupart des phénomènes transitoires sont causés par l’utilisation d’éclairage, de condensateurs stimulés et par des commutations de charges (le démarrage des moteurs par exemple), etc. Ce phénomène peut dégrader de manière transitoire le fonctionnement des équipements par des variations rapides [4].



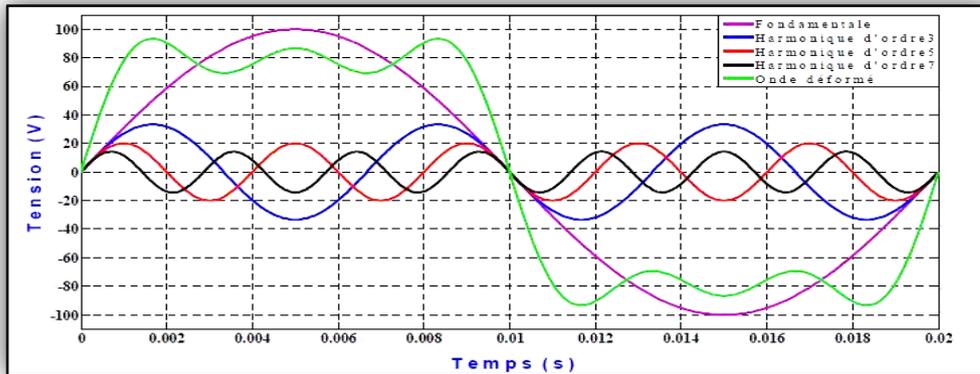
Figure(I.5) : Phénomène transitoire.

I.3.7 .Perturbations harmoniques

Un harmonique est une composante sinusoïdale d’un signal périodique, de fréquence (f_{hi}) Multiple de celle du signal fondamentale.

Le signal de rang (ordre) 1 est la composante fondamentale du signal périodique (50 Hz en Algérie). L’harmonique de rang zéro correspond à la composante directe du signal. Par ailleurs l’amplitude de chaque harmonique est inversement proportionnelle à son ordre. Donc, les premiers rangs harmoniques celles qui sont proches de la fondamentale tel que (3, 5 et 7)

ont des amplitudes élevées, d'où la raison de les limiter selon les normes.



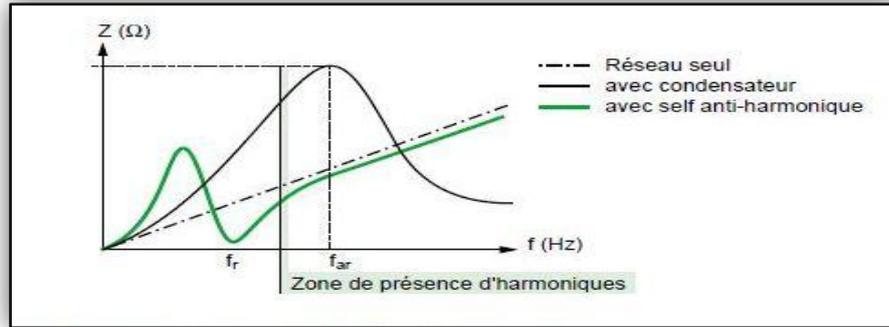
Figure(I.6) : Décomposition d'un signal périodique

Généralement le domaine fréquentiel correspondant à l'étude des harmoniques est entre le rang $h=2(100\text{Hz})$ et $h=50(2500\text{ Hz})$. En effet les harmoniques de fréquences plus élevées sont fortement atténuées par l'effet de peau et par la présence des inductances de ligne. De plus, les appareils générateurs d'harmoniques ont, en grande majorité, un spectre d'émission inférieur à 2500 Hz. En outre, des inter-harmoniques existent entre les harmoniques [7].

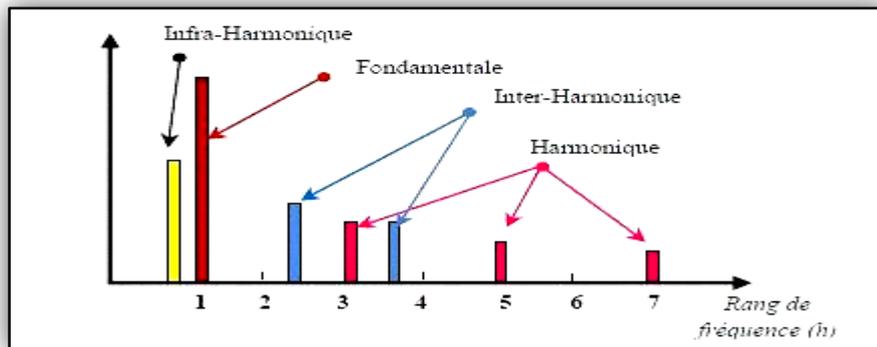
I.3.7.1. Inter-harmoniques et infra-harmoniques : Il est à noter qu'il existe aussi des perturbations sur des rangs harmoniques non multiple entier du fondamental. Ces derniers se dénomment inter ou infra-harmoniques. Les inter-harmoniques sont des composantes sinusoïdales qui ne sont pas des fréquences entières de celle du fondamental. Les infra-harmoniques sont des composantes qui sont a des fréquences inferieures a celle du fondamental. Ces deux catégories de perturbations sont dues a des variations périodiques et aléatoires de la puissance absorbée par certains appareils (commande par train d'ondes, ...). La figure (1.8) illustre cette répartition.

L'apparition des inter-harmoniques est en augmentation et leurs origines principales sont les convertisseurs statiques de fréquence, les variateurs de vitesse et d'autres équipements similaires de contrôle commande. Les inter-harmoniques peuvent être trouvés dans les réseaux de toutes les classes de tension (en basse et haute tension) . Ces perturbations ont d'ordinaire une amplitude relativement réduite, mais peuvent être gênants s'ils provoquent des résonances. Ils peuvent également avoir des effets très néfastes lorsque leur fréquence se situe dans les plages de fréquence réservées pour les signaux de commande.

En effet, les perturbations harmoniques feront l'objet de la section suivante et seront au cœur de nos préoccupations tout au long de ce mémoire [7].



Figure(I.7) : effets d'une self anti-harmonique sur l'impédance d'un réseau.



Figure(I.8):Représentation des harmoniques, inter-harmonique et infra-harmonique.

I.4 .harmoniques et résonance

Les harmoniques créées par les charges non linéaires comme les convertisseurs électroniques, peuvent engendrer des conditions de résonance. Afin de comprendre le phénomène, nous utiliserons d'abord un modèle monophasé, pour ensuite considérer un exemple triphasé [8].

I.4.1 .Phénomène de résonance

L'utilisation de condensateurs pour la correction d'un faible facteur de puissance et par conséquent la réduction des pénalités dues à une consommation excessive de l'énergie réactive est un moyen assez courant pour réduire la demande et les pertes du système de puissance.

Malheureusement de sérieux problèmes sont rencontrés avec l'installation des batteries de Condensateurs à cause de l'interaction avec des distorsions harmoniques causées par des charges non linéaires. Les condensateurs peuvent entraîner une ou plusieurs résonances harmoniques ou causer leur propre endommagement [9].

I.4.2 .Types de résonance

Certes, l'apparition de phénomènes de résonance est due à l'association sur les réseaux d'éléments capacitifs et inductifs. Ceux-ci se manifestent par des valeurs très élevées ou très faibles de l'impédance, des tensions et des courants harmoniques. Selon que les éléments capacitifs et inductifs sont associés en parallèle ou en série, on distingue deux types de résonance : [9]

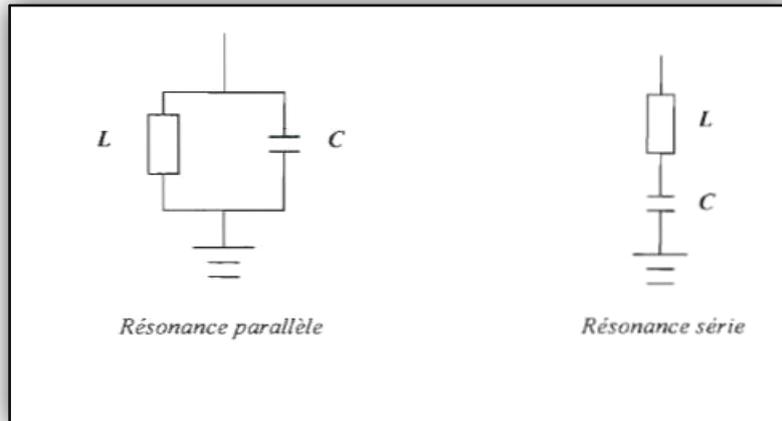


Figure (I.9): Les deux types de résonance

a. Résonance parallèle

La mise en parallèle d'une capacité et d'une inductance constitue une impédance donnée par :

$$Z_h = \frac{jL.h.\omega}{1-L.C.h^2.\omega^2} \quad (I.4)$$

Il y'a résonance lorsque le dénominateur $1 - L.C.h^2.\omega^2$ est nul, cette impédance est alors infinie.

La fréquence de résonance est donnée par :

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L.C}} \quad (I.5)$$

Ces tensions présentes au niveau du jeu de barres contribuent à la déformation de L'onde de tension sinusoïdale (augmentation du taux de distorsion harmonique en tension) et peuvent nuire au fonctionnement des équipements raccordés sur ce même réseau électrique.

b. Résonance série

L'analyse harmonique dans le cas de la résonance série doit être considérée en amont du transformateur, soit du côté HTA .

De même, l'association en série d'une capacité et d'une inductance constitue une impédance donnée par:

$$Z_h = \frac{1-L.C.h^2.\omega^2}{jL.h.\omega} \quad (I.6)$$

Il y'a résonance lorsque le numérateur est égal à zéro. L'impédance est alors nulle. La fréquence de résonance est donnée par [9]

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L.C}} \quad (I.7)$$

I.4.3 . Problèmes liés aux résonances

Soit le réseau de la figure ci-dessous, qui est le siège d'une résonance alimentée par une source de courant harmonique :

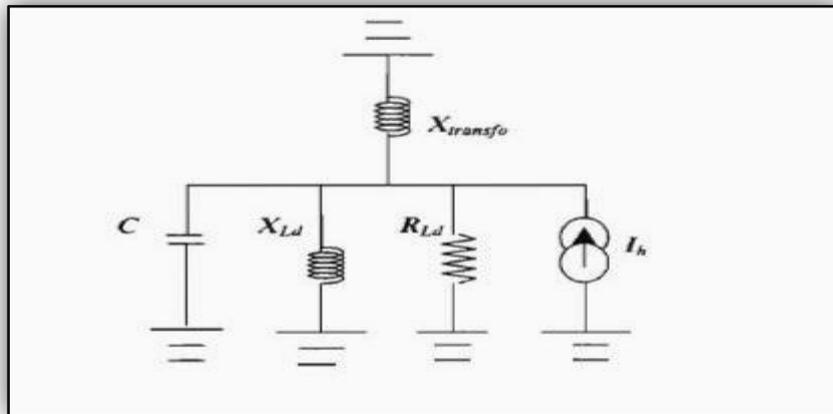


Figure (I.10): Résonance parallèle liée à la présence de condensateurs

X_{Ld} et R_{Ld} représentent les puissances réactive et active de la charge. C est une batterie de Condensateurs.

Si le réseau est à vide ($R_{Ld} = \infty$), l'impédance harmonique Z_h au niveau du jeu de barres est infinie à la résonance. Ceci entraîne une tension harmonique infinie aux bornes des différents éléments:

$$V_h = Z_h \cdot I_h \rightarrow \infty \quad (I.8)$$

V_h se retrouve aux bornes de l'inductance L représentant $X_{Ld} // X_{transfo}$ et la capacité C.

Les courants qui circulent dans ces éléments, respectivement I_{hl} et I_{hc} sont donc infinis:

$$I_{hc} = \frac{V_h}{Z_{hc}} \rightarrow \infty \quad (I.9)$$

Ceci signifie qu'une impédance harmonique infinie en cas de résonance parallèle dans un réseau, entraîne une tension harmonique infinie et par conséquent l'apparition de courants harmoniques infinis, ainsi les condensateurs peuvent être soumis à de fortes tensions harmoniques et se détériorer.

Cependant, dans la majorité des cas concrets, la résonance est amortie grâce à la présence de composantes résistives dans les charges. Dans ces conditions, les valeurs de

tension et de courant ne sont plus infinies. Elles peuvent toutefois demeurer préjudiciables à certains types de matériels.

En raison du risque de voir apparaître une ou plusieurs résonances, des précautions doivent être prises lors de l'installation des condensateurs. Aussi pour réduire l' amplification à la résonance, il faut éviter de laisser les condensateurs enclenchés sur un réseau faiblement chargé, d'où l'intérêt des gradins de condensateurs régulés par relais var- métriques.

Hors la zone de résonance, la présence de condensateurs sur le réseau a un effet favorable sur les tensions pannoniques en raison de la faible impédance qu'ils présentent aux fréquences élevées [9].

Chapitre: I Perturbations harmonique dans les réseaux électriques

Tableau(I.4) : Vue d'ensemble sur les principaux phénomènes perturbateurs, avec mention de quelques mesures préventives ou curatives

Type de perturbation	Origine	Conséquences	Solutions possibles
Coupure longue	Court-circuit, surcharge, déclenchement intempestif, (maintenance)	Arrêts d'équipements, pertes de production, dégâts	Alimentation de secours (réseau), alimentation sans interruption (ASI)
Creux de tension et coupure brève	Court-circuit, (enclenchement de gros moteur)	Arrêts d'équipements, pertes de production, dégâts	Conditionneur de réseau, conception de l'équipement sensible, alimentation sans interruption
Fluctuation rapider (flicker)	Installations fluctuantes (four à arc, soudeuse, moteur à démarrage fréquent, éolienne...)	Papillotement de l'éclairage	Compensateur synchrone, compensateur statique de puissance réactive, conditionneur actif, condensateur série
Harmonique	Installations non linéaires (électronique de puissance, arcs électriques...)	Effets thermiques (moteurs, condensateurs, conducteurs de neutre...), diélectriques (vieillessement d'isolant) ou quasi instantanés (automatismes)	Filtrage actif ou passif, self anti-harmonique, déclassement d'appareil
Inter harmonique	Installations non linéaires et fluctuantes (four à arc, soudeuse, éolienne), changeurs de fréquence, télécommande centralisée	Papillotement de l'éclairage fluorescent, dysfonctionnement d'automatismes, dégâts mécaniques sur machines tournantes	Filtrage actif ou passif, amortissement de filtres anti-harmoniques, conception de l'équipement sensible
Déséquilibre	Installations déséquilibrées (traction ferroviaire...)	Echauffement de machines tournantes, vibrations, Dys fonctionnement de protections	Dispositif d'équilibrage, conditionneur de réseau
Surtension transitoire	Court-circuit, commutations, foudre	Déclenchements, danger pour les personnes et pour les matériels	Séparation galvanique, para surtenseur, enclenchement "synchronisé", résistance de pré-insertio

I.5 . L’analyse de Fourier

L’analyse de Fourier permet la décomposition de la forme d’onde non sinusoïdale de courant en somme de signaux sinusoïdaux, avec différentes fréquences et amplitudes [4]. Tout signal périodique de période $T=1/f$, peut se décomposer en une somme infinie de termes sinus et cosinus de fréquences multiples de f .

$$i_{ch}(t) = I_0 + I_1 \sin(\omega t) + I_1 \cos(\omega t) + I_2 \sin(2\omega t) + I_2 \cos(2\omega t) + I_3 \sin(3\omega t) + I_3 \cos(3\omega t) + \dots + I_n \sin(n\omega t) + I_n \cos(n\omega t) \tag{I.10}$$

D’une manière générale, cette expression est appelé série de Fourier et peut être réécrite comme suit:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)) \tag{I.11}$$

Où : n est un entier naturel et $\omega = 2\pi/T$

a_0 est une constante qui représente la moyenne de la fonction On calcule les coefficients a_n et b_n avec les formules suivantes

$$\left\{ \begin{array}{l} a_0 = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T_0}{2}}^{\frac{T_0}{2}} f(t) dt \\ a_n = \frac{2}{T_0} \int_{-\frac{T_0}{2}}^{\frac{T_0}{2}} f(t) \cos(n\omega t) dt \\ b_n = \frac{2}{T_0} \int_{-\frac{T_0}{2}}^{\frac{T_0}{2}} f(t) \sin(n\omega t) dt \end{array} \right. \tag{I.12}$$

Avec : $\omega = 2\pi f_0$ où f_0 : fréquence fondamentale

Le calcul des coefficients de la décomposition en série de Fourier d’une fonction $f(t)$ se simplifie lorsque la fonction à décomposer est paire ou impair [4].

Pour les fonctions paire où $f(t)=f(-t)$, il en résulte que :

$$\left\{ \begin{array}{l} a_0 = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T_0}{2}}^{\frac{T_0}{2}} f(t) dt = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T_0}{2}} f(t) dt \\ a_n = \frac{2}{T_0} \int_{-\frac{T_0}{2}}^{\frac{T_0}{2}} f(t) \cos(n\omega t) dt = \frac{4}{T_0} \int_0^{\frac{T_0}{2}} f(t) \cos(n\omega t) dt \\ b_n = \frac{2}{T_0} \int_{-\frac{T_0}{2}}^{\frac{T_0}{2}} f(t) \sin(n\omega t) dt = 0 \end{array} \right. \tag{I.13}$$

La décomposition en série de Fourier d'une fonction paire ne contient que des termes en cosinus avec éventuellement la moyenne a_0 .

Pour le cas des fonctions impaires $f(-t)=-f(t)$, il en résulte que :

$$\left. \begin{aligned}
 a_0 &= \frac{1}{T} \int_{-\frac{T_0}{2}}^{\frac{T_0}{2}} f(t) dt = 0 \\
 a_n &= \frac{2}{T_0} \int_{-\frac{T_0}{2}}^{\frac{T_0}{2}} f(t) \cos(n\omega t) dt = 0 \\
 b_n &= \frac{2}{T_0} \int_{-\frac{T_0}{2}}^{\frac{T_0}{2}} f(t) \sin(n\omega t) dt = \frac{4}{T_0} \int_0^{\frac{T_0}{2}} f(t) \sin(n\omega t) dt
 \end{aligned} \right\} \quad (I.14)$$

La décomposition en série de Fourier d'une fonction impaire ne contient que des termes en sinus. De plus, elle ne possède pas la constante a_0 .

L'amplitude et le déphasage de l'harmonique de rang n est donné par les deux équations suivantes respectivement:

$$\left\{ \begin{aligned}
 I_{nm} &= \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \\
 \varphi_n &= \arctan \left[\frac{b_n}{a_n} \right]
 \end{aligned} \right. \quad (I.15)$$

D'après les expressions ci-dessus, le courant de la charge non-linéaire est donné par :

$$i_{ch}(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_{nm} \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (I.16)$$

Ce courant peut être subdivisé en une composante fondamentale et des composantes harmoniques comme suit :

$$i_{ch}(t) = I_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + \sum_{n=2}^{\infty} I_{nm} \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (I.17)$$

Avec :

$i_{ch}(t)$: Est le courant de la charge.

I_1 : Est la valeur maximale du courant fondamental.

Différentes grandeurs sont définies pour chiffrer ces perturbations.

Le THD (Taux global de Distorsion Harmonique) et le facteur de puissance (FP) sont les plus employés pour quantifier respectivement les perturbations harmoniques et la consommation de la puissance réactive [10].

I.6.Problématique des harmoniques

La problématique des harmoniques, également appelée pollution harmonique, n'est pas un Phénomène nouveau. Néanmoins, du fait que de plus en plus de charges non-linéaires se Connectent au réseau, la problématique des harmoniques 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 dispositifs raccordés au réseau. D'où, l'intérêt d'éliminer ou repousser ces harmoniques vers les fréquences les plus élevées .

Les harmoniques de courant, une fois injecté par des charges non-linéaires, se propagent à travers le réseau électrique en affectant la forme d'onde des tensions aux différents points du réseau. Cette propagation n'est limitée que par les bifurcations (points de division des courants) et les impédances du réseau qui dépendent généralement de la fréquence des courants harmoniques. La présence des harmoniques de courant se révèle essentiellement à travers leurs effets sur la tension du réseau [10].

Un récepteur d'énergie est considéré par le réseau électrique comme une charge perturbatrice s'il absorbe des courants non sinusoïdaux ou des courants déséquilibrés ou s'il consomme de la puissance réactive. Les deux premiers types de perturbations peuvent déformer ou déséquilibrer les tensions du réseau lorsque l'impédance de celui-ci n'est pas négligeable. Le troisième réduit la capacité de production ou de transmission de la puissance active des générateurs, des transformateurs et des lignes électriques [11].

I.6.1 . Conséquences des harmoniques

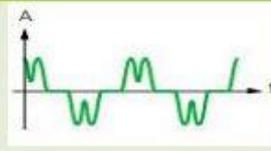
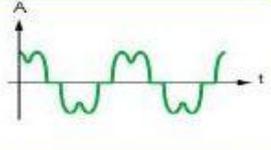
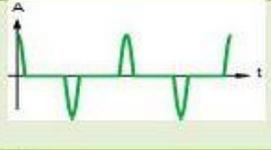
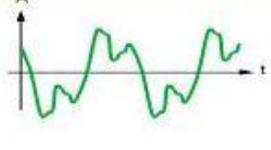
Les courants harmoniques se propagent dans le réseau électrique, déforme l'allure du courant de la source et polluent les consommateurs alimentés par ce même réseau.

Ils peuvent occasionner des incidents au niveau de l'appareillage du client et donner lieu à des surcoûts de production d'énergie importants. On peut classer les effets engendrés par les harmoniques en deux type : les effets instantanés et les effets à terme [12].

I.6.2. Origine des harmoniques

Les harmoniques proviennent des caractéristiques non linéaires des dispositifs et des charges connectés sur le système d'alimentation. Les principales sources d'harmoniques sont les dispositifs contenant des éléments qui commutent (les convertisseurs statiques), et les dispositifs à caractéristique tension- courant non linéaire (Tableau(I.5)) [4] [12].

Tableau(I.5) : Caractéristiques de quelques générateurs d'harmoniques.

Charge non linéaires	Forme d'onde	Spectre	THD
Variateur de vitesse			44%
Redresseur/ chargeur			28%
Charge informatique			115%
Eclairage fluorescent			53%

Les dispositifs suivants sont des sources d'harmoniques :

- ❖ Les convertisseurs statiques à base de composants d'électronique (diodes, transistors...etc.) sont générateurs de courants harmoniques [2], qui en conséquent le facteur de puissance. Toute fois rappelons que les charges symétriques ne génèrent pas d'harmoniques de rang pair. Et le spectre des harmoniques est décroissant dont l'harmonique de rang 3 la prépondérante pour les charges monophasées peuvent atteindre 80 % du fondamental [13].
- ❖ L'éclairage par lampes a décharge et tubes fluorescents, est générateur de courants harmoniques.
- ❖ Pour les fours à arc à courant alternatif, l'arc est non linéaire, dissymétrique et instable. Et les spectres possèdent des raies harmoniques impaires, paires et un spectre continu (bruit de fond à toutes les fréquences). On que les fours à arc à courant continu sont généralement alimentés par l'intermédiaire d'un redresseur, l'arc est plus stable qu'en courant alternatif.
- ❖ Les inductances saturées (cas des transformateurs à vide soumis à une surtension permanente) ont leurs impédances dépendantes de l'amplitude du courant qui les traverse et donc provoquent des déformations de ce courant.
- ❖ Les machines tournantes génèrent des harmoniques de rangs élevés et d'amplitudes négligeables [2] [13].

I.6.3. Effets des harmoniques

Plusieurs effets des harmoniques sur les installations et les équipements électriques peuvent être cités [2] [13] :

• **Echauffement** : les pertes totales par effet Joule sont la somme de celles du fondamental et des harmoniques :

$$RI^2 = \sum_{h=0}^{\infty} R I_h^2 \quad (\text{I.18})$$

Vécu I : le courant total, le courant harmonique de rang h qui représente le fondamental pour $h = 1$, et R la résistance traversée par le courant I . Les harmoniques augmentent aussi les pertes fer (pertes par courants de Foucault). Ils prennent de l'importance dans les matériels utilisant les circuits magnétiques (moteurs, transformateurs...).

• **Interférence avec les réseaux de télécommunication** : le couplage électromagnétique entre les réseaux électriques et de télécommunication peut induire dans ces derniers des bruits importants. Dans le cas de résonances, une partie des réseaux de télécommunication peut être rendue inutilisable.

• **Défauts de fonctionnement de certains équipements électriques** : en présence des harmoniques, la tension (ou le courant) peut changer plusieurs fois de signe dans une demi-période ; par conséquent, tout appareil dont le fonctionnement est basé sur le passage par zéro des grandeurs électriques (appareils utilisant la tension comme référence) peut être perturbé.

• **Risque d'excitation de résonance** : les fréquences de résonance des circuits formés par des inductances des transformateurs et des câbles sont normalement élevées. Ce n'est pas le cas lorsque des batteries de capacité sont raccordées au réseau pour relever le facteur de puissance; les fréquences de résonance peuvent devenir assez faibles et coïncider ainsi avec celles des harmoniques engendrées par les convertisseurs statiques ; dans ce cas, il y aura des phénomènes d'amplification d'harmoniques.

I.6.4. Caractérisation des perturbations harmoniques

Un récepteur d'énergie électrique se comporte comme une charge polluante s'il absorbe des courants non sinusoïdaux ou et déséquilibrés ou consomme de l'énergie réactive. Les perturbations harmoniques sont caractérisées par le taux de distorsion harmonique (*THD*) de la tension ou du courant, par rapport à leurs ondes fondamentales respectives. Et la consommation de l'énergie réactive est évoluée par le facteur de puissance $\cos(\phi)$ [14].

I.6.4.1. Taux de distorsion harmonique

Le taux de distorsion est un paramètre qui définit globalement la déformation de la grandeur alternative :

$$S_h = \frac{x_h}{x_1} \quad (\text{I.20})$$

Où,

X_h : composante harmonique de rang h ;

X_1 : composante fondamentale.

I.6.4.2 Taux d'harmonique global de distorsion

Le taux d'harmonique de distorsion global (*THD*) définit la déformation de la grandeur alternative :

$$THD(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} X_h^2}}{X_1} \quad (\text{I.21})$$

Il faut préciser s'il s'agit d'un THD de courant : THDI ou de tension : THDV.

Contrairement au niveau de courant, le niveau de tension est une valeur fixe et prédéfinie pour un réseau. On définit donc les contraintes en terme de THDV.

Le fait d'exprimer l'amplitude de chaque harmonique en valeur efficace permet de quantifier l'effet thermique de l'ensemble.

En effet, supposons que ce courant $i(t)$ traverse une résistance R , la puissance dissipée par effet Joule est :

$$P_j = R \cdot I^2 = R \cdot I_1^2 + R \cdot I_5^2 + R \cdot I_7^2 + R \cdot I_{11}^2 + \dots \quad (\text{I.22})$$

Ce qui permet de calculer :

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_1^{\infty} I_h^2} \quad (\text{I.23})$$

I.6.4.3 . Facteur de puissance

Le facteur de puissance ($\cos \varphi$) est exprimé par le rapport de la puissance active (P) sur la Puissance apparente (S). Les équipements électriques sont dimensionnés, généralement, pour les valeurs nominales de la tension et du courant.

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

$$\cos \varphi = \frac{P}{S_1} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (\text{I.24})$$

Où

Q : représente la puissance réactive.

Le facteur de puissance FP est une grandeur importante pour évaluer la qualité d'un signal Électrique telle que :

Pour une charge linéaire, nous avons un facteur de puissance égal au facteur de déphasage :

$$FP = \cos \phi \quad (I.25)$$

En présence des harmoniques, la puissance déformante (D) donnée par la relation (I.5) apparait.

$$D = 3.V \sqrt{\sum_{h=2}^{50} I_h^2} \quad (I.26)$$

Où,

v : Valeur efficace de la tension du réseau électrique.

La figure I.11 illustre le diagramme de *Fresnel* en présence d'harmoniques[15]

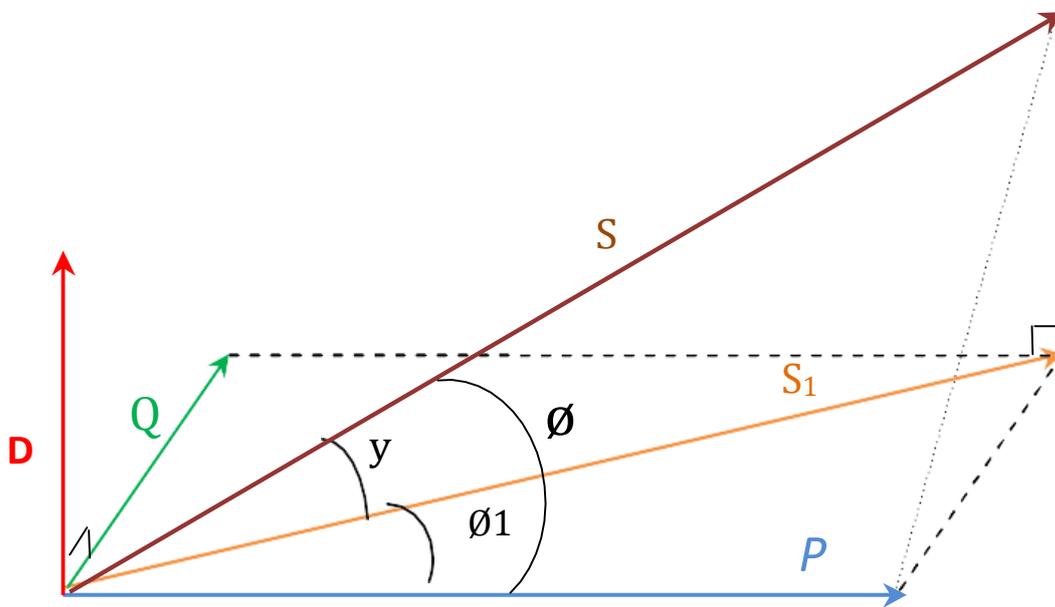


Figure (I.11) : Diagramme de Fresnel des puissances

Ainsi le facteur de puissance devient :

$$\cos \phi = \frac{p}{s} = \frac{p}{\sqrt{p^2 + Q^2 + D^2}} = \cos \phi_1 \cos y \quad (I.27)$$

- ✓ ϕ déphasage entre la puissance active(P) et la puissance apparente (S) ;
- ✓ ϕ_1 : déphasage entre la puissance active(P) et la puissance apparente (S_1) ;
- ✓ y : déphasage entre la puissance apparente dans le cas d'un système linéaire et celle-là dans le cas d'un système non-linéaire.

I.6.5 . Sources de perturbations harmoniques

L'injection des courants non-sinusoïdaux par des charges non-linéaires et le branchement de charges déséquilibrées branchées au réseau. Sont les causes principales des harmoniques, les convertisseurs statiques, les fours à arc et à induction, les téléviseurs, les lampes fluorescentes et les alimentations à découpage représentent la majorité des charges non linéaires sont donc des sources d'émission des harmoniques. [16] [2].

I.6.6 . Effets des harmoniques sur le réseau électrique

Leurs effets sont liés à l'augmentation des valeurs crêtes (claquage diélectrique) et efficaces (échauffement supplémentaire), ainsi qu'au spectre en fréquence (vibration et fatigue mécanique) des tensions et des courants. On distingue trois catégories :

I.6.6.1 . Aspect économique

- ❖ Dégradation du rendement énergétique de l'installation (pertes d'énergie) .
- ❖ Surdimensionnement des équipements.
- ❖ Perte de productivité (vieillesse accéléré des équipements déclenchements intempestifs).
- ❖ Influence sur les transformateurs du réseau (augmentation des pertes à vide à cause de l'effet particulier des courants harmoniques) .
- ❖ Influence sur les câbles de HT (diminution de la durée de vie du câble, dégradation du matériel isolant) .
- ❖ Pertes supplémentaires dans les condensateurs, les transformateurs etc.... .
- ❖ Bruit additionnel des moteurs et d'autres appareils.
- ❖ Influence sur le fonctionnement des redresseurs.
- ❖ Influence sur la télécommande dans les réseaux.
- ❖ Influence sur les condensateurs des réseaux.

I.6.6.2 . Effets instantanés

Les effets instantanés apparaissent immédiatement dans certains appareillages :

- ❖ Déclenchements intempestifs des protections.
- ❖ Perturbations induites des systèmes à courants faibles (télécommande, télécommunication, écran d'ordinateur, téléviseur, etc.....) .
- ❖ Vibrations et bruits acoustiques anormaux (tableaux BT, moteurs, transformateurs) .
- ❖ Destruction par surcharge thermique de condensateurs.
- ❖ Perte de précision des appareils de mesure.

I.6.6.3 . Effets à terme

Les effets à terme se manifestent après une exposition longue aux perturbations harmoniques. L'effet d'échauffement est le plus important car il cause une fatigue prématurée du matériel des lignes et amènent à un déclassement des équipements.

- **Echauffement des câbles et des équipements :** Ces effets peuvent être à moyen terme (de quelques secondes à quelques heures) ou à long terme (de quelques heures à quelques années) et concernent les câbles qui peuvent être, le siège dû au sur échauffement du neutre et les éléments bobinés (transformateurs, moteurs, etc..).

- **Echauffements des condensations :** Peuvent conduire au claquage, il est causé par les pertes dues au phénomène d'hystérésis dans le diélectrique.

- **Echauffements des pertes supplémentaires des machines et des transformateurs :**

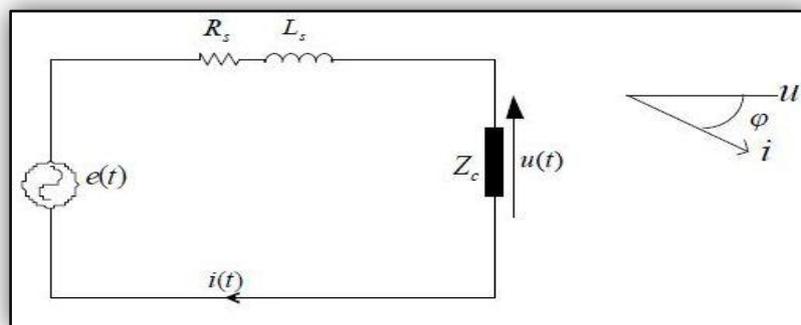
Ces échauffements sont causés par les pertes aux stators des machines et surtout au niveau des circuits rétorquent (cages, amortisseurs, circuits magnétisants) à cause des différences importantes de vitesses entre les champs tournants inducteurs et le rotor.

Les harmoniques génèrent aussi des pertes supplémentaires dans les transformateurs, par effet joule dans les enroulements, accentuées par l'effet de peau et des pertes par hystérésis et courant de Foucault dans les circuits magnétiques [16].

I.7 . Types de charges

I.7.1 . Charge linéaire

Le courant circulant dans cette charge linéaire alimenté par une tension sinusoïdale figure (I.12) est lui aussi sinusoïdal. Cependant, le courant peut être déphasé par rapport à la tension d'un angle φ



Figure(I.12) : Schéma de connexion du réseau avec une charge linéaire

R_s : Résistance de la source ; L_s : Inductance de la source ; Z_c : Impédance de la charge.

$$e(t) = V\sqrt{2} \sin(\omega t) \quad (I . 28)$$

$$i(t) = I\sqrt{2} \sin(\omega t) \quad (I . 29)$$

En représentation complexe, on a :

$$U = \bar{Z}I \quad (\text{I . 30})$$

Où, U et I sont la tension et le courant efficaces

Et,

$$I = \frac{U}{\bar{Z}} \quad (\text{I . 31})$$

Où,

Z : Impédance du circuit

La puissance active fournie à la charge est :

$$P = UI \cos \varphi \quad (\text{I . 32})$$

La puissance réactive fournie à la charge est :

$$Q = UI \sin \varphi \quad (\text{I . 33})$$

La puissance apparente de la charge est :

$$S = UI \quad (\text{I . 34})$$

Le facteur de puissance de la charge est :

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (\text{I . 35})$$

Le facteur de crête du courant est :

$$F_c = \frac{I_{\max}}{I} = \sqrt{2} \quad (\text{I . 36})$$

Remarque qu'ils sont tous les deux purement sinusoïdaux.

La figure I.13, présente l'analyse fréquentielle du courant de ligne et du courant de charge.

Dans ce cas, on remarque la présence de l'harmonique fondamentale 50 Hz de rang 1[2].

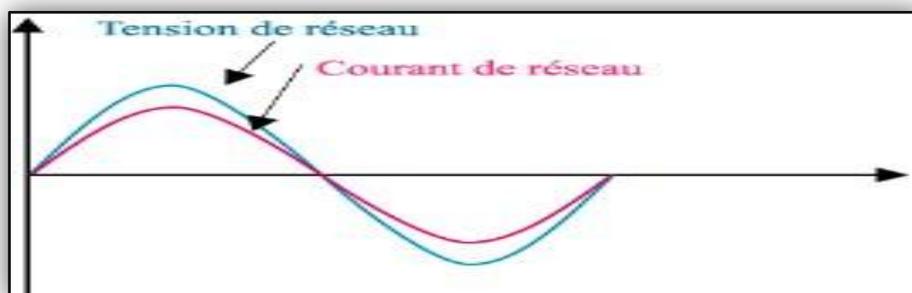


Figure (I.13) : Charge linéaire

I.7.2 . Charges non linéaires

Les récepteurs peuvent être classés en deux familles principales :

-les récepteurs non-linéaires (ou charges non-linéaires).

Une charge est dite non-linéaire si l'on alimente une charge non linéaire par une tension sinusoïdale, le courant circulant dans cette charge n'est plus sinusoïdal. Ce courant peut être Décomposé en une composante fondamentale et des harmoniques [2].

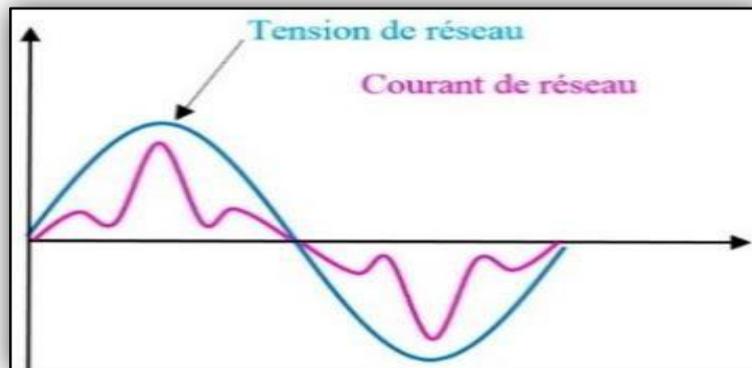


Figure (I.14) : Charge non-linéaire

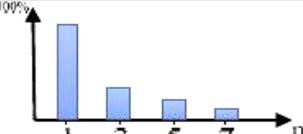
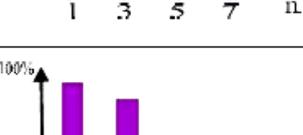
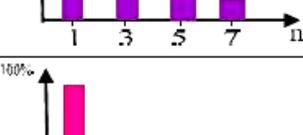
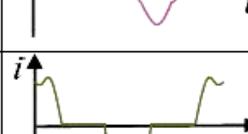
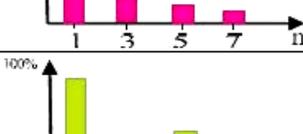
I.7.2.1 . Exemples de Charges Non-linéaires

Les principales sources des harmoniques sont :

- ❖ Les équipements industriels (machines à souder, fours à arc, fours à induction..).
- ❖ Les variateurs de vitesse pour moteurs asynchrones ou moteurs à courant continu.
- ❖ Les appareils de bureautique (ordinateurs, photocopieurs, fax, ...).
- ❖ Les appareils domestiques (TV, fours micro-onde, éclairage néon, ...).

Tous ces systèmes contribuent à la pollution harmonique du réseau auquel ils sont connectés. Comme par exemple Sur le (Tableau I.5) des charges non linéaires citées ci-dessus [17].

Tableau(I.6) : Spectres de courant harmonique émis par les équipements perturbateurs

<i>Type de charge</i>	<i>Appareils concernés</i>	<i>Courant absorbé</i>	<i>Spectre Harmonique</i>
Éclairage	- Tubes fluorescents - Lampes à vapeur HP		
Redresseur monophasé à diodes avec filtrage Alimentation à découpage	- Micro-informatique - Télévisions - Lampes à ballast électronique.		
Gradateur monophasé (commande par angle de phase)	- Régulation de puissance de fours à résistances - Modulation de puissance des lampes halogènes		
Moteur asynchrone	- Machines-outils - Appareils électroménagers - Ascenseurs.		
Redresseur triphasé à thyristors	-Variation de vitesse des moteurs à courant continu et des moteurs synchrones		

I.7.3 . Principe de compensation

Les perturbations engendrées par les charges peuvent être atténuées soit :

- ❖ avec un système auxiliaire de filtrage pour les perturbations harmonique
- ❖ en limitant la consommation de puissance réactive.
- ❖ en modifiant la topologie du convertisseur pour limiter l'amplitude des sources de
- ❖ Courante harmonious.
- ❖ en augmentant la puissance de court circuit du réseau par rapport à la puissance du générateur.

Alors, selon la littérature, les techniques de dépollution des réseaux électriques peuvent être classées en deux groupes :

- ❖ les techniques traditionnelles .
- ❖ les techniques modernes .

I.8 . Normes concernant les perturbations harmoniques

Les deux principaux organismes de normalisation internationaux dans le domaine électrotechnique sont la CEI (Commission Electrotechnique Internationale), et l'IEEE (Institute of Electricians and Electronics Engineers), ces deux organismes réalisent la principale activité de normalisation dans le domaine des perturbations électriques au niveau mondial.

L'objectif des normes et des réglementations est de limiter les dysfonctionnements occasionnés par les harmoniques. Nous contentons de donner les normes CEI et en particulier les normes [3] [17] :

La norme CEI 61000-2-2 : elle définit les niveaux de comptabilité de tensions harmoniques sur les réseaux publics basse tension, elle est représentée sur le tableau I.7. Cette norme vise à protéger les équipements raccordés sur un réseau basse tension déformé.

La norme CEI 61000-3-2 : cette norme 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.7): Limites des émissions de tensions harmoniques (la norme CEI 61000-2-2).

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

Tableau (I.8) : Limites des composants harmoniques (la norme CEI 61000-3-2).

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

Et les principales normes de l'IEEE sont :

La norme IEEE 519-1992 : cette norme détermine la procédure pour contrôler les harmoniques présents sur le réseau électrique ainsi que les limites recommandées de la pollution harmonique générée par les clients et de distorsion harmonique totale sur le réseau.

La norme IEEE 1159-1995 : cette norme réalise un bilan exhaustif et donne une définition de tous les phénomènes électromagnétiques qui ont lieu dans le réseau en fonction de leur contenu spectral, leur durée et leur amplitude [18].

Tableau (I.9): limites pour la distorsion harmonique de la tension (la norme IEEE 519-1992).

Tension au point de raccordement(Vn)	Distorsion Harmonique Individuelle (%)	THDv (%)
$V_n \leq 69 \text{ KV}$	3.0	5.0
$69 < V_n \leq 161 \text{ KV}$	1.5	2.5
$V_n > 161 \text{ KV}$	1.0	1.5

Tableau (I.10) : Limites des émissions de courants harmoniques (la norme IEEE 519-1992).

V_n ≤ 69 KV						
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20-50	7.0	20	3.5	2.5	1.0	0.8
50-100	10	4.5	4	1.5	0.7	12
100-1000	12		5	2	1	15
>1000	15	7	6	2.5	1.4	20
69 <V_n ≤ 161 KV						
<20	2	1	0.75	0.3	0.15	2.5
20-50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4
50-100	5	2.25	2	1.25	0.35	6
100-1000	6	2.75	2.5	1	0.5	7.5
>1000	7.5	3.5	3	1.25	0.7	10
V_n > 161 KV						
< 50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
≥ 50	3.5 1	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0

I.9 . La propagation des harmoniques sur les réseaux

Soit un transformateur HTB/HTA alimentant deux départs moyenne tension. L'un de ces départs comporte une source harmonique. Le réseau de distribution est composé par des lignes et des transformateurs. Comme l'impédance des charge est nettement grande que celle des lignes, une part importante du courant harmonique tend à circuler en direction des postes sources (les courants harmoniques remontent à la source car ils suivent le parcours le moins impudent). Aussi, le problème de propagation des harmoniques de courant se ramène à leude d'un simple diviseur de tension étant donné que le jeu de barre HTA vu de départ propre apparaît comme une source de tension [19].

La propagation des creux de tension en amont dépend de deux paramètres :
la puissance de court-circuit et la distance entre l'endroit de défaut et l'endroit de mesure. Plus la puissance de court-circuit n'est élevée et le défaut éloigné, plus le creux de tension est atténué [20].

La propagation des harmoniques sur le réseau est schématisée dans la figure :(I.15).

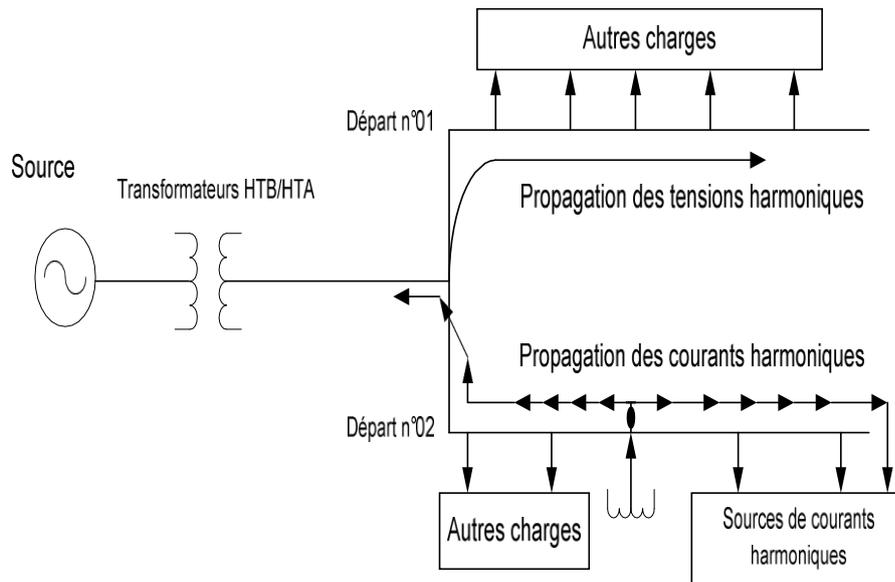


Figure (I.15) : La propagation des harmoniques sur les réseaux électrique

I.10. Solutions de dépollution des réseaux électriques

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 composantes harmoniques. La première classe de solutions s'intéresse à la conception 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 et les solutions modernes.

I.10.1. Solutions traditionnelles de la dépollution

Afin de dépolluer les réseaux électriques, plusieurs solutions ont été proposées dans la littérature, dont le but est de limiter la propagation et l'effet des harmoniques dans les réseaux électriques [20] [21].

- L'augmentation de la puissance de court-circuit du réseau et l'utilisation des Convertisseurs peu polluants qui ont pour effet de diminuer la distorsion harmonique.
- a. L'utilisation de dispositif du filtrage pour réduire la propagation des harmoniques produits par les charges non-linéaires.
 - b. Le pont do déca phase : La structure do déca phase présente des caractéristiques très intéressantes par rapport à celle hexa phase. Cependant, le nombre de semi-conducteurs utilisés et le transformateur à deux enroulements au secondaire rendent cette solution

Onéreuse.

- **Filtre passif** : le plus ancien pour le traitement des harmoniques de courant.

Il Consiste à piéger les courants harmoniques pour empêcher qu'ils ne se propagent dans le reste du réseau.

Les filtres harmoniques passifs ont l'avantage de pouvoir régler la tension au nœud de leur raccordement et corriger le facteur de puissance en dimensionnant correctement les condensateurs afin d'échanger une quantité déterminée de puissance réactive avec le réseau. Malgré sa large utilisation dans l'industrie, leur simplicité de conception et le faible cout de leur fabrication, ce dispositif simple a tout de même certains.

Ce courant harmonique s'oriente ainsi vers le filtre et non pas vers le reste du réseau.

On distinguera deux types de filtres assurant la limitation des tensions harmoniques :

- le filtre résonant (ou filtre de type shunt),
- le filtre amorti [14].

Tableau(I.11) : Avantages et inconvénients de filtre passif.

Filter passif	
Avantages	Inconvenient
<ul style="list-style-type: none"> • La plus simple. • La moans cheer • son adaptation pour des réseaux de forte puissance. 	<ul style="list-style-type: none"> • Elle est d'une efficacité moyenne. • Elle n'offre que très peu de flexibilité et quasiment aucune évolutivité. • S'adaptent mal aux variations du réseau et de la charge. • Equipments voluminous. • Problèmes de résonance avec l'impédance de réseau. • Le filtrage passif est une solution lourde et non exempte de risque. • Lorsqu'il ya plusieurs rangs harmoniques à filtrer, il est nécessaire de mettre autant de filtres accordés sur les rangs correspondants.

I.10.2 . Solutions modernes

Ces solutions sont proposées comme des solutions efficaces de dépollution des Réseaux électriques afin de traiter les inconvénients inhérents aux solutions traditionnelles Comme les filtres passifs (non adaptatifs aux variations de la charge et du réseau, phénomènes de résonance). Parmi toutes les solutions modernes, on trouve deux types de structures Classiquement utilisées :

Le but de ces filtres est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de maniera compenser en temps réel les perturbations responsables de la dégradation des performances des équipements et installations électriques (le courant et la tension du réseau soient rendus sinusoïdaux et parfois avec un facteur de puissance unitaire) .

Les filtres actifs peuvent être classes suivant leur circuit de puissance, les algorithmes de détection des grandeurs harmoniques, ou les techniques de commande. Il existe plusieurs familles de filtre actif :

- ❖ **Filtre Actif Série (FAS)** conçu pour compenser toutes les perturbations de tension comme les harmoniques, le déséquilibre et les creux de tension.

- ❖ **Filtre Actif Parallèle (FAP)** conçu pour compenser toutes les perturbations de courant

comme les harmoniques, le déséquilibre et la puissance réactive.

- ❖ **Filtre Actif Universel (FAU)** nomme aussi (UPQC) (Unifie Power Qualité Conditionner) solution universelle pour compenser les perturbations liées aux harmoniques de courant et de tension.

- ❖ **Filtre hybride active et passive** : Ces structures sont conçues dans le but d'optimiser le rapport performance coût [22].

Chapitre: I Perturbations harmonique dans les réseaux électriques

Le tableau ci-dessous présente les avantages et quelques inconvénients de filtre actif :

Tableau(I.12) : Avantages et inconvénients de filtre actif.

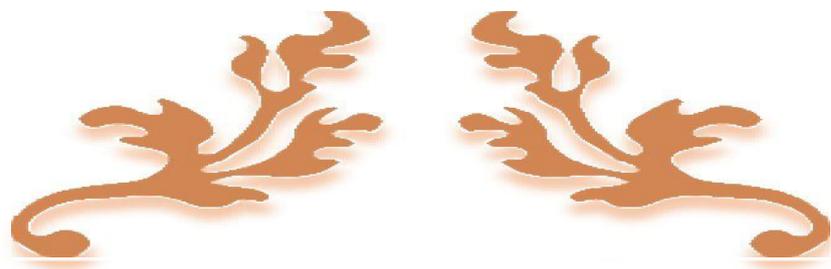
Filter actif	
Avantages	Inconvénient
<ul style="list-style-type: none">● Il s'adapte automatiquement à l'évolution des charges et du réseau :● Il peut compenser plusieurs rangs harmoniques (dans la limite de sa bande passante)● Il ne passe pas en surcharge lorsque le courant harmonique à compenser dépasse le dimensionnement du filtre actif.● Il limite son émission de compensation harmonique au maximum de ses capacités, mais il n'y a aucun risque de destruction.● Le risque de résonance entre le filtre et impédance du réseau, qui existe avec le filtre passif, est supprimé.● Il peut protéger des condensateurs de compensation par élimination des courants Harmoniques générés par une charge.	<ul style="list-style-type: none">● Le filtrage actif n'est possible que dans le cas des réseaux de faible puissance.● Il permet la compensation de l'énergie réactive, mais à un coût très élevé par rapport au filtrage passif.● Son coût est beaucoup plus élevé que celui du filtrage passif.

I.11 . Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté différents types de perturbations affectant l'onde de tension du réseau électrique. Comme nous avons pu le constater, les harmoniques et les déséquilibres de courant et de tension, les creux de tension ont des effets néfastes sur les Équipements électriques. Ces effets peuvent aller des échauffements et de la dégradation du Fonctionnement jusqu'à la destruction totale de ces équipements.

Nous avons donné des définitions dont la connaissance nécessaire pour comprendre L'ensemble des développements de ce mémoire. Nous avons constaté l'importance de différentes solutions du filtrage, il y'a des points positifs ainsi que des points négatifs pour chaque type de solution. En vue de leur importance, les filtres actifs du courant sont aujourd'hui au stade de la recherche. on trouve des nouvelles techniques d'identification des perturbations, de commande, et de régulation ; le domaine du filtrage actif est en plein évolution.

Nous avons s'intéressé dans la suite aux solutions modernes tel que le filtre actif qui sera détaillé dans le chapitre suivant.



Chapitre: II

Topologies de filtres actifs

I.1 . Introduction

Les solutions traditionnelles de dépollution ne répondant plus à l'évolution des réseaux électriques et des charges à protéger [2]. Pour fournir aux consommateurs une bonne qualité de l'énergie électrique, même dans les conditions de fonctionnement les plus perturbées, les filtres actifs de puissance sont proposés comme des solutions avancées de dépollution des réseaux électriques. En effet, ces solutions peuvent s'adapter aux évolutions de la charge et du réseau électrique et ceci sans toucher aux installations du fournisseur d'énergie et du consommateur [23] [24].

Un filtre passif accordé introduit de nouvelles résonances qui peuvent être à l'origine de problèmes d'harmoniques supplémentaires. Les nouveaux développements en électronique de puissance permettent de réaliser des produits qui peuvent contrôler la distorsion harmonique de manière active. Les filtres actifs compensent les harmoniques présents dans le réseau électrique sur la base des harmoniques générés à tout instant dans le temps .

Le but de ces filtres actifs est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à ce que le courant ou la tension redevienne sinusoïdal. Le filtre actif est connecté au réseau soit en série (F.A.S), soit en parallèle (FAP) suivant qu'il est conçu respectivement pour compenser les tensions ou les courants harmoniques, soit associé à des filtres passifs. Pour fournir aux consommateurs une énergie électrique de qualité, même dans les conditions de fonctionnement les plus perturbées, les filtres actifs sont proposés comme des solutions de dépollution des réseaux électriques [25].

I.2 . Les filtres actifs

Les filtres actifs sont des sources de courant ou de tension qui éliminent les perturbations harmoniques en injectant en série ou en parallèle sur le réseau des courants, des tensions, ou les deux à la fois, en opposition par rapport aux perturbations existantes : courants harmoniques créés par la charge, ou tensions harmoniques présentes sur le réseau. En raison de leur grande souplesse d'adaptation, ces filtres ne nécessitent pas, en général, une étude approfondie avant l'installation, et offrent de nombreux avantages :

- ❖ Ils peuvent compenser tous les courants harmoniques dans leur bande passante.
- ❖ Ils s'adaptent à la charge quelles que soient les modifications apportées à l'installation.
- ❖ Ils ne présentent pas de risque de surcharges.
- ❖ Le risque de résonance entre le filtre et l'impédance du réseau qui existe avec le filtre passif est supprimé.

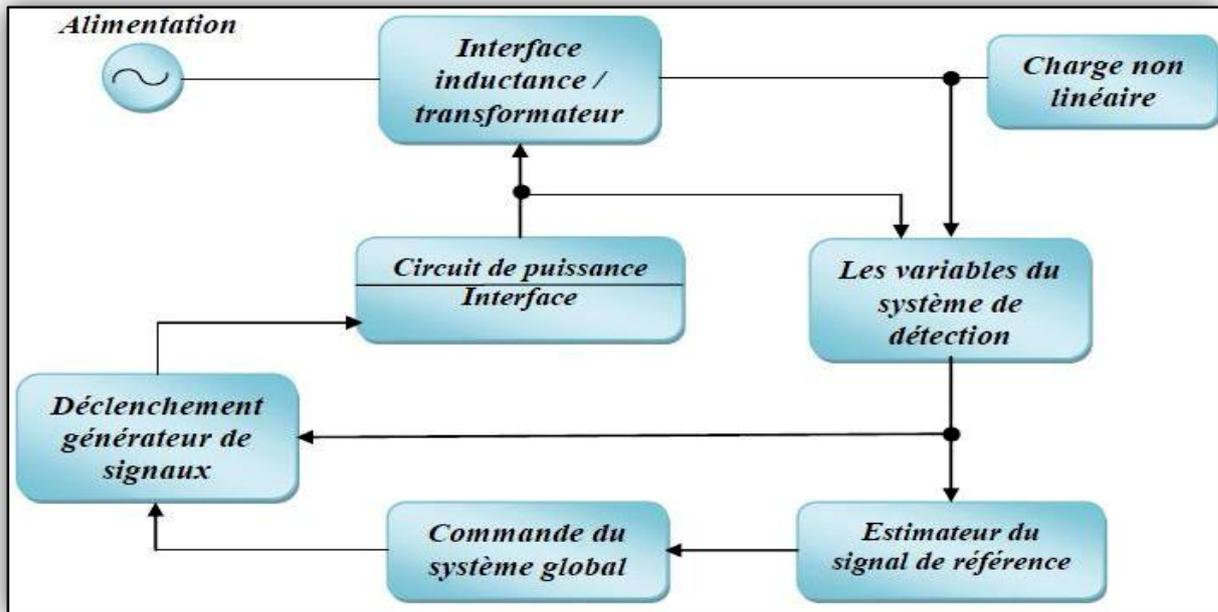


Figure (II.1) : schéma généralisé pour le filtre actif.

Le but de ce type de filtre est d'annuler les harmoniques de courant que la charge fournit à la source. Il peut également contribuer à la compensation de la puissance réactive et équilibrer les 3 phases du courant. Les filtres actifs parallèles ont l'avantage d'apporter seulement le courant de compensation et un peu du fondamental du courant fournit pour compenser les pertes du système. Il est aussi possible de connecter plusieurs filtres en parallèle pour approvisionner des courants importants, ce qui rend ce type de circuit adapté pour une large gamme de puissance [25].

II.3 . Principe de fonctionnement du filtre actif

Les filtres actifs sont composés d'onduleurs qui sont des convertisseurs statiques de puissance .Alimenté par une source de courant ou de tension continue , l'onduleur peut délivrer un courant ou une tension dont le contenu harmonique dépend uniquement de la loi de commande de commutation des interrupteurs .Les filtres actifs agissent donc Comme des sources de tension ou de courant harmoniques en opposition de phase avec ceux du réseau afin de rétablir un courant de source quasi sinusoïdal .

Le filtre actif peut être connecté au réseau en série ou en parallèle, suivant qu'il est conçu pour compenser les tensions ou les courant harmoniques [26].

Le principe de fonctionnement du filtre actif réside dans le fait que celui-ci produit des courants qui s'opposent aux courants harmoniques créés par les charges non linéaires, tendant ainsi à rétablir un courant appelé par la charge quasi sinusoïdal.

Ces filtres actifs, encore appelés compensateurs actifs, sont utilisés en parallèle ou en série au sein d'une installation nécessitant un traitement harmonique. Le filtre actif est d'une utilisation plus large que le filtre passif puisqu'il peut compenser plusieurs rangs d'harmoniques à la fois [27].

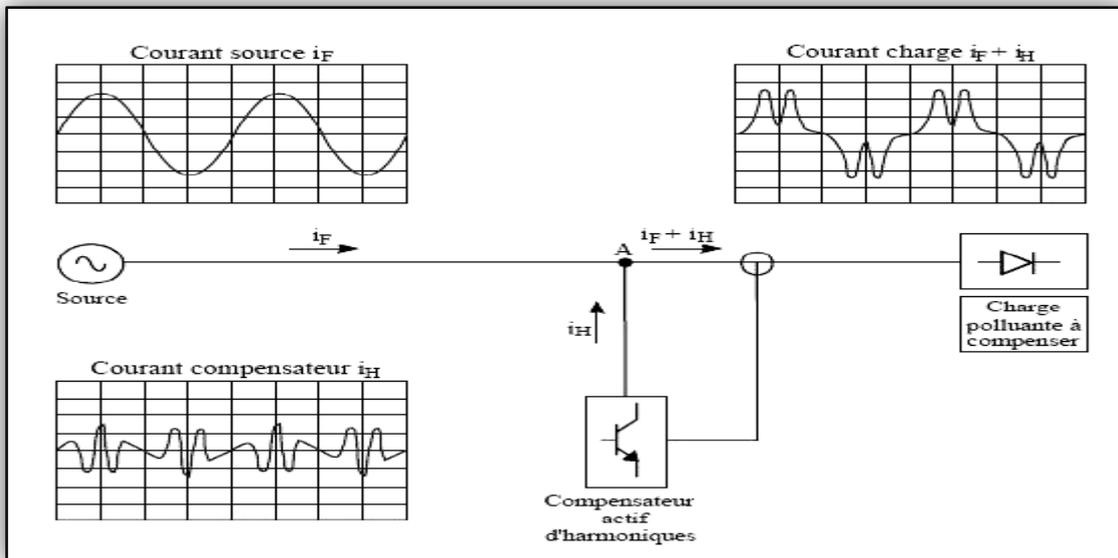


Figure (II.2) : Principe de fonctionnement du filtre actif.

Ou :

I_s : Courant de source sinusoïdale (fondamental).

I_{har} : Courants harmoniques.

II.4 . Coût du filtre actif

Le coût du filtre actif varie principalement en fonction de la taille de son élément de stockage d'énergie, du nombre de semi-conducteurs qu'il contient ainsi que de sa topologie. Pour les applications de faibles et moyennes puissances, l'élément de stockage d'énergie capacitif s'avère plus efficace et moins coûteux que l'élément de stockage d'énergie inductif. De façon complémentaire, l'élément de stockage d'énergie inductif, composé d'une bobine supraconductrice, est plus fiable dans les applications de haute puissance. Pour ce qui est du dernier point, il est à noter que des améliorations doivent encore être faites, car les bobines supraconductrices sont encore au stade de recherche.

Comme nous venons juste de le voir, la topologie du filtre actif joue un grand rôle dans le coût en amenant des économies potentielles du montage. La topologie hybride, de son côté, permet de réduire les coûts du filtre actif (réduction de la taille de l'élément de stockage d'énergie) puisque la majorité de la compensation harmonique est effectuée par le filtre passif [27].

II.5 . Effet de l'impédance du réseau sur le filtre actif

L'effet de l'impédance du réseau est moindre que dans le cas du filtre passif.

Le risque de résonance entre le filtre actif et l'impédance du réseau est inexistant. Ceci n'est pas un facteur aussi déterminant lors de la conception, mais l'efficacité de Comparaison générale entre le filtre passif et le filtre actif.

Le tableau ci-dessous illustre les différents avantages et inconvénients majeurs des deux types de dispositif de filtrage [27] :

Tableau(II.1) : Comparaisons entre le filtre passif et le filtre actif.

Caractéristiques	Filtre passif	Filtre actif
Adaptation à l'évolution de la charge et du réseau	Non	Oui, se fait automatique.
Limite de compensation de rang harmonique	-Le filtre résonant ne compense qu'un rang harmonique à la fois. -Le filtre amorti compense dans la limite de sa bande passante.	Compense dans la limite de sa bande passante qui est déterminée par la fréquence de commutation maximale des semi-conducteurs de son onduleur.
Risque de résonance entre le filtre et le réseau	Oui	Non
Compensation de puissance réactive	Oui	Oui, mais à coût plus élevé que pour le filtre passif.
Possibilité de surcharge lorsque le courant harmonique dépasse le dimensionnement du filtre	Oui	Non
Compensation dans les réseaux haute puissance	Oui	Oui, mais à coût très élevé

II.6 . Classification des filtres actifs

Les filtres actifs peuvent être classifiés à partir du type de convertisseur qu'ils utilisent, de leur topologie ou encore de leur nombre de phases. Nous nous limiterons ici à la classification selon leurs différentes topologies. Suivant leurs topologies, les FA peuvent être en série, en parallèle ou mixtes .

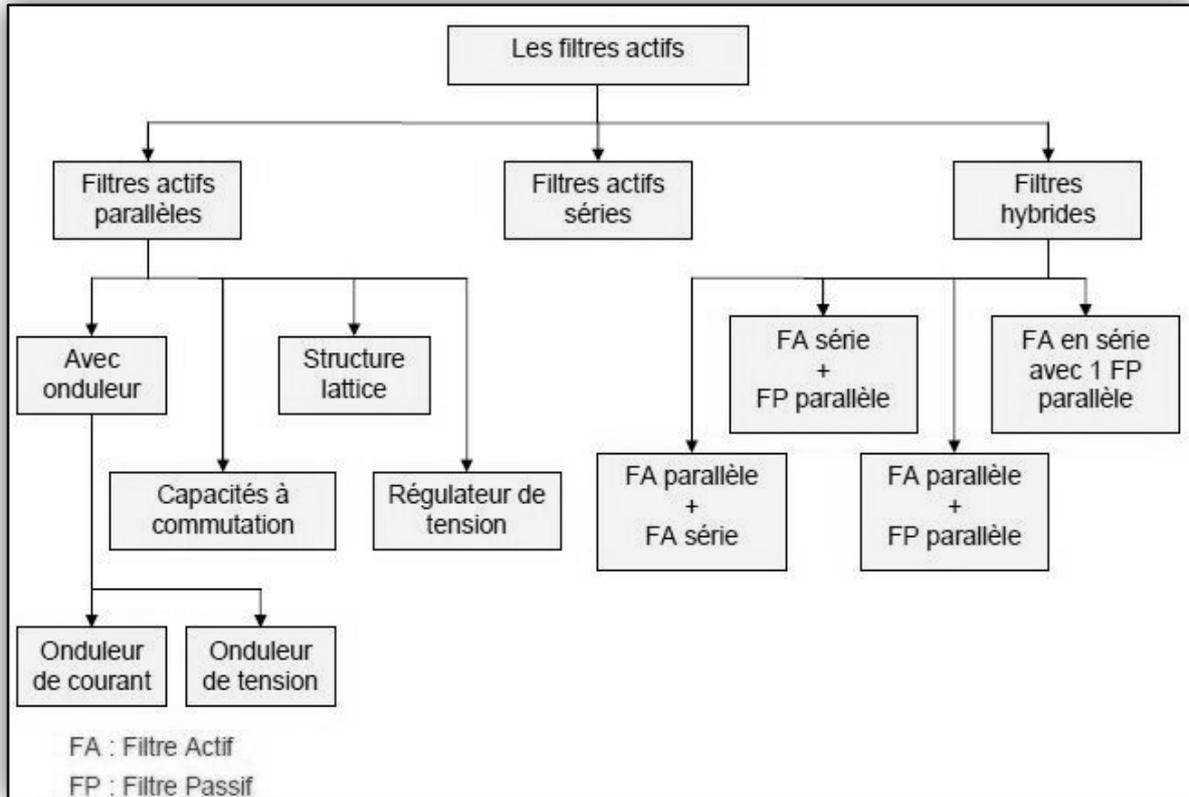


Figure (II.3) : Les différents types de filtres actifs

II.6.1 . Filtres actif parallèle (shunt)

Un FAP est un onduleur connecté en parallèle avec le réseau via un filtre de découplage (généralement une résistance TF en série avec une inductance UF), ce dispositif injecte en temps réel des courants harmoniques égaux et en opposition de phase avec ceux absorbés par les charges non-linéaires connectées au réseau. De ce fait, le courant côté réseau devient sinusoïdal. L'objectif du filtre actif parallèle (F.A.P) consiste à empêcher les courants perturbateurs (harmoniques, réactifs et déséquilibres), produits par des charges polluantes, de circuler à travers l'impédance du réseau, située en amont du point de connexion du filtre actif. Les caractéristiques techniques principales d'un filtre actif sont :

- ❖ Le nombre de phase (monophasé, triphasé, équilibré, déséquilibré).
- ❖ La composition globale ou rang par rang des harmoniques (exemple : de 2a25).
- ❖ La compensation du facteur de déphasage(DPF).
- ❖ Le calibre des capteurs de courant (TI).
- ❖ Le temps de réponse(exemple :40ms) [29].

Le schéma de principe d'un FAP est donné par la Fig.(II.4).

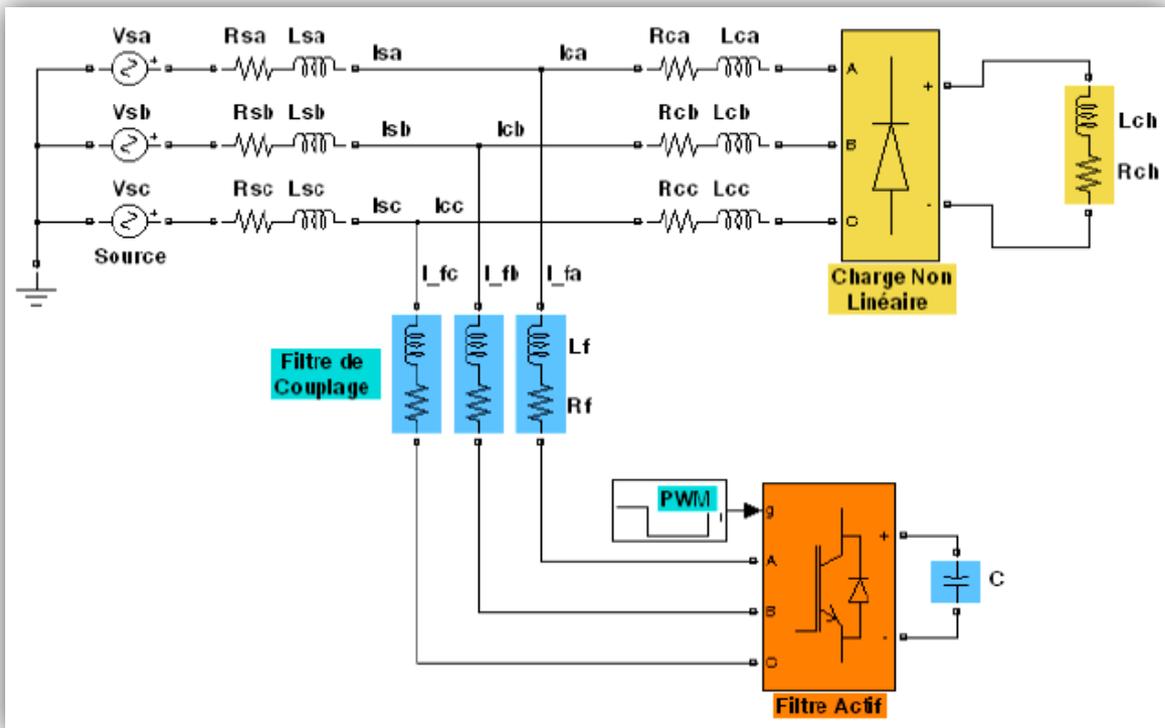


Figure (II.4) : Filtrage Filtre Actif Parallèle (shunt)

II.6.2 . Le Filtre Actif Série (F.A.S)

Le filtre actif série se comporte dans ce cas, comme le montre la figure (II.5), comme une source de tension qui s'oppose aux tensions perturbatrices (creux, déséquilibre, harmonique) 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. [30].

Le 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.

En 1976, une famille de FAS 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. La génération, par l'onduleur à thyristors, des composantes non désirées, ayant une faible fréquence de commutation, a découragé l'avancement pratique de cette solution.

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 la solution de compensation par le compensateur actif série [31].

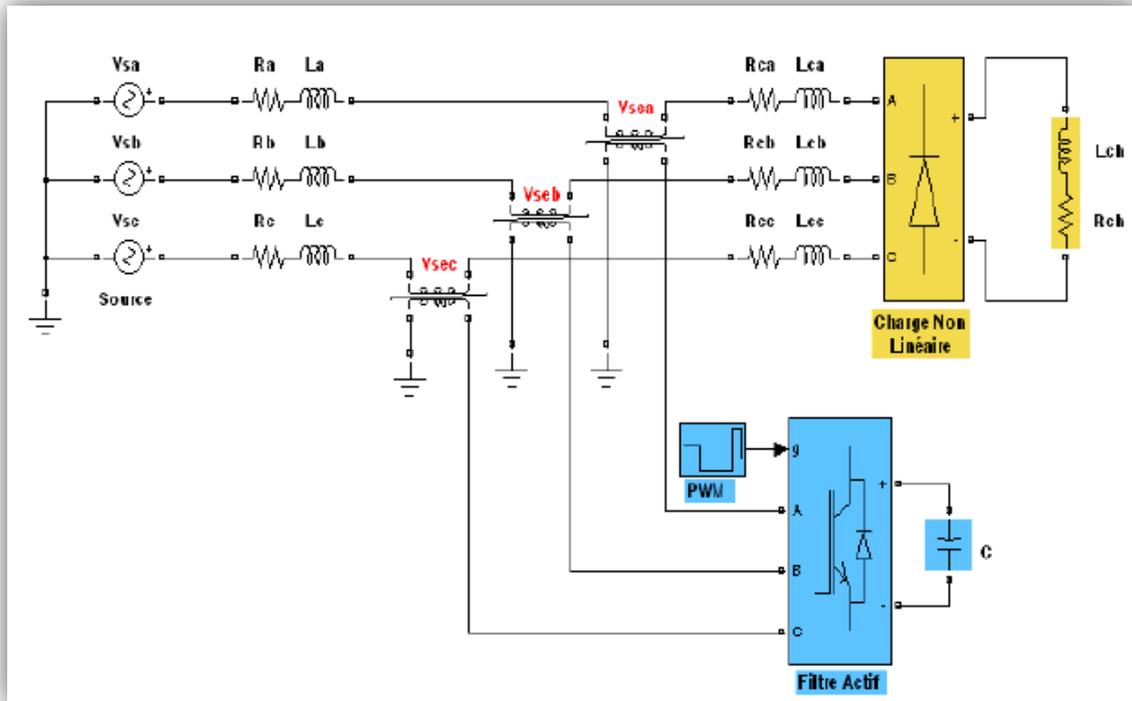


Figure (II.5) : Filtrage série à structure tension.

II.6.3 . Structure universelle (Combinaison Parallèle-Série UPQC) :

La figure (II .6) montre la configuration de base d'un conditionneur universel de la qualité d'onde ou UPQC, qui correspond au régulateur universel d'écoulement de puissance. Il est l'association du filtre actif série et du filtre actif parallèle via un élément de stockage d'énergie. Le rôle principal du FAS est d'isoler les harmoniques entre la source et la charge polluante, de compenser la puissance réactive et la variation ou déséquilibre de tension due à la fluctuation et la régulation de tension. L'objectif principal du F AP est d'absorber les courants harmoniques, de compenser la puissance réactive et les composantes inverses de courants, et de réguler la tension de la liaison continue entre les deux filtres actifs.

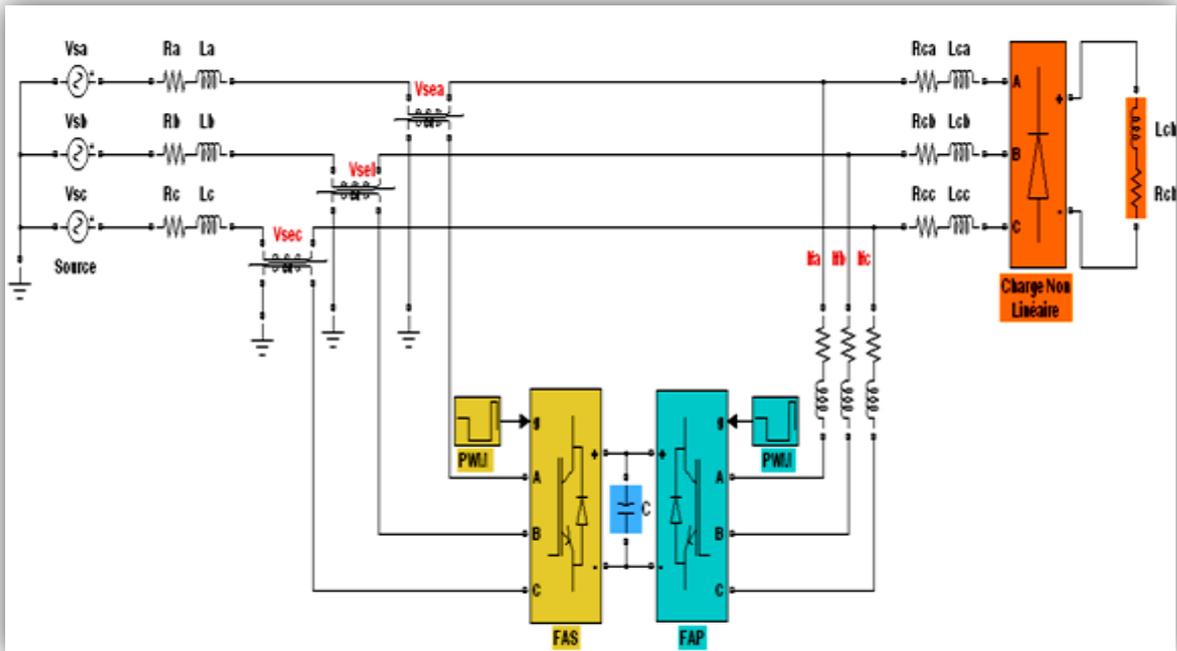


Figure (II.6): Schéma de principe d'un filtre universel

II.6.4 . Structure hybride (Combinaison Filtre Actif et Filtre Passif) :

La structure hybride résulte de l'association d'un filtre actif (série ou parallèle) au filtre passif. L'intérêt des filtres hybrides est que le filtre actif maintient et améliore les performances de filtrage en fonction de l'évolution de la charge et du réseau ; le filtre passif prend en charge la compensation d'une grande partie des harmoniques. Ainsi la puissance du convertisseur qui constitue le filtre actif est fortement diminuée grâce aux éléments passifs. Cette structure est née du besoin de l'amélioration du rendement et de la réduction des coûts des filtres à structure simple. De nombreuses variantes sont possibles, mais peu ont été réalisées industriellement.

Des performances élevées sont possibles, même avec un filtre actif de puissance réduite. Filtre hybride série présente la configuration du filtre hybride série, qui est obtenue par l'association d'un filtre actif série et un filtre passif parallèle. Le filtre actif dans cette combinaison fournit une tension qui s'oppose à la tension harmonique venant du côté source et à la chute de tension harmonique due à la charge non linéaire de façon à contrôler la tension harmonique aux bornes de la charge non linéaire. La tension fournie par le filtre impose un passage à haute impédance pour les harmoniques de courant en les forçant à traverser le filtre connecté en dérivation avec la charge. De même, les harmoniques existant dans les tensions de la source rencontrent une haute impédance au niveau du filtre actif série les empêchant d'atteindre le filtre passif et les charges [31].

En l'absence du filtre actif, ces harmoniques de tension peuvent surcharger les filtres passifs et causer leur échauffement et nuire au fonctionnement des charges.

II.6.4 .1 . Association Filtre actif série en parallèle avec un Filtre passif :

Cette configuration exploite le filtre actif série et le filtre parallèle passif (figure II.7). Généralement le FAS est utilisé afin de compenser les problèmes de la résonance et l'influence de l'impédance de source engendrés par le filtre passif et améliorer les performances de compensation, tandis que le deuxième filtre a pour rôle de piéger les courants harmoniques qui doivent être supprimés par sa capacité de modifier localement l'impédance du réseau. Cette topologie a la possibilité de réduire les harmoniques de tension et de courant à un prix raisonnable.

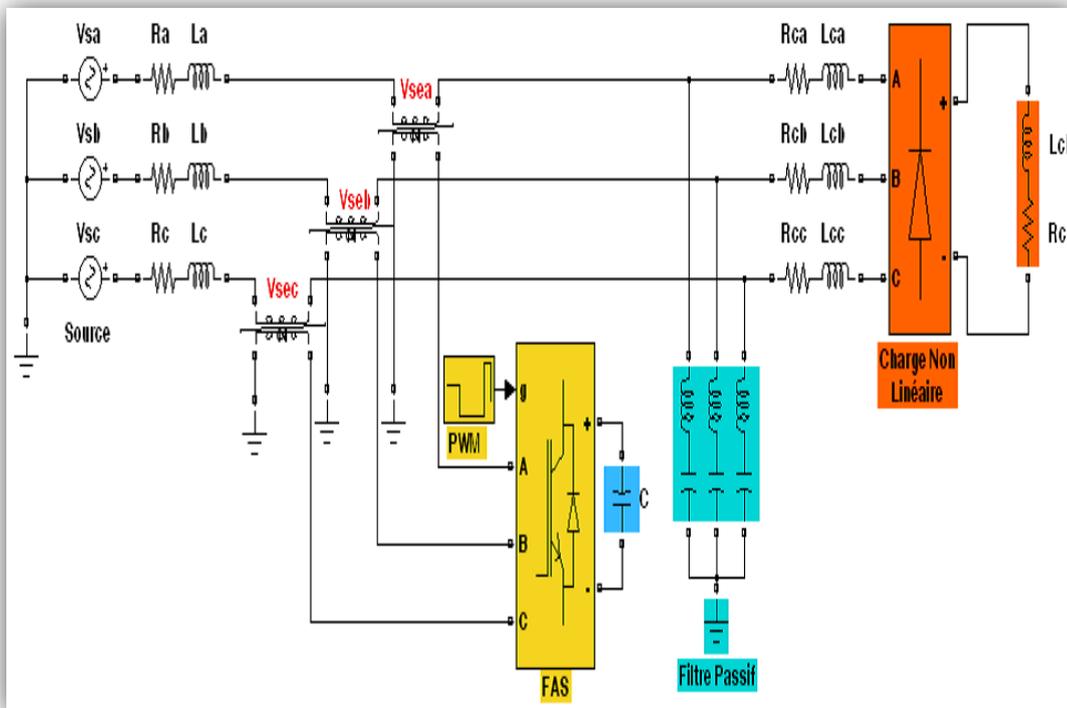
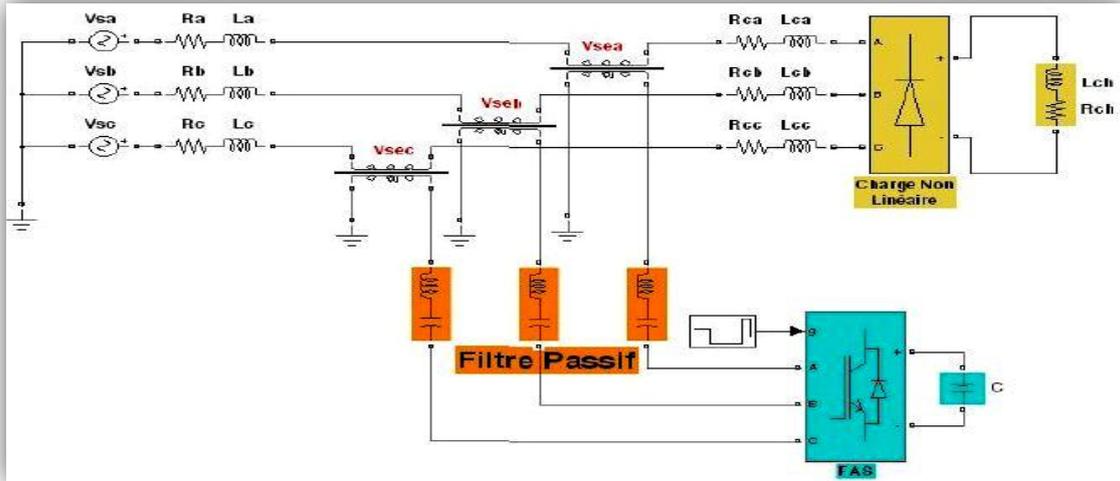


Figure (II.7): Filtre actif série en parallèle avec un filtre passif parallèle

II.6.4 .2 . Association filtre actif série en série avec un filtre passif

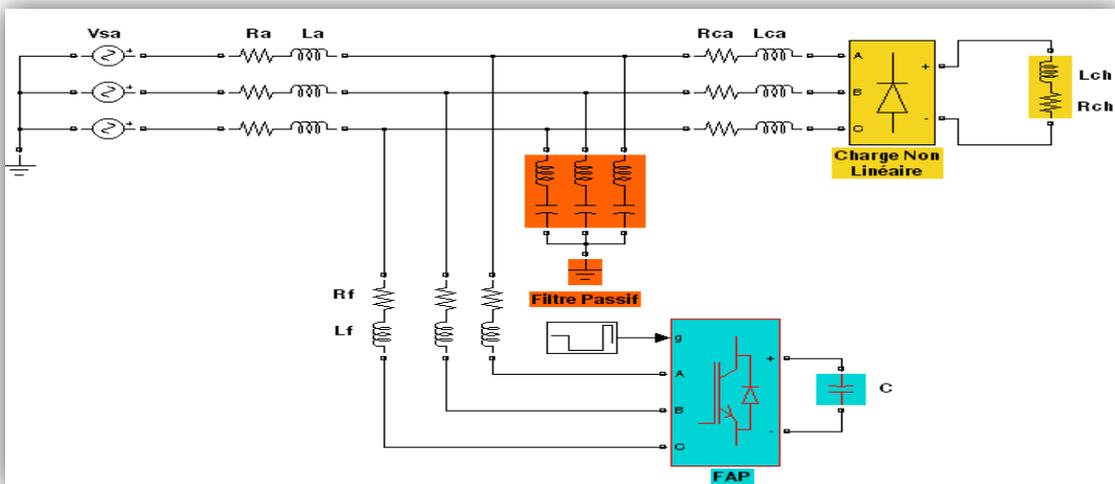
Le schéma de principe de cette configuration est représenté par la Figure(II.8), c'est pratiquement la même configuration que la précédente avec l'avantage de réduire encore le dimensionnement du filtre actif série car le courant qui le traverse est plus faible. De plus, le filtre actif série est à l'abri d'un éventuel court-circuit de la charge [32].



Figure(II.8) : Filtre actif série en série avec un filtre passif

II.6.4 .3 . Filtre actif parallèle avec un Filtre passif en parallèle :

Le schéma de son principe est donne par la figure(II.9) Dont lequel le filtre actif parallèle est pour but de compenser les courants harmoniques basses fréquences émis par la charge polluante. Tandis que le filtre passif est généralement accorde sur une fréquence élevée, élimine les harmoniques hautes fréquences y compris ceux créés par le filtre actif parallèle.



Figure(II.9) : Filtre actif parallèle avec un filtre passif en parallèle

II.7 . Filtre Actif Modulaire

Comme il est mentionne dans les paragraphes précédents, cette topologie est basée sur le concept de la mise en parallèle de plusieurs onduleurs. Elle conçu dans le but de compenser

les courants harmoniques dans les applications de grande puissance ou les réseaux confronte des courants harmoniques trop puissants.

Etant donne que cette topologie est la topologie maitresse de cette thèse, c'est pour ce la donc le deuxième chapitre sera consacre a une étude détaillée de ce type des filtres actifs. Il s'agit notamment de mettre en œuvre les topologies les plus utilisées dans les réseaux électriques a trois fils données comme suit:

- filtre actif modulaire constitue de deux onduleurs a trois bras.
- filtre actif modulaire constitue de deux onduleurs a deux bras avec Condensateur a point milieu [32].

II.8 . Comparaison entre les différentes topologies de filtrage actif

Le tableau (II.2) récapitule les avantages et les inconvénients des 3 configurations de filtrage actif. Le filtrage série présente l'avantage d'améliorer la qualité de l'onde de tension, et permet de fournir une énergie de qualité. Cependant, il ne permet pas d'éliminer les harmoniques engendrées par les charges non linéaires. Par contre, le filtrage shunt permet de les éliminer et de contrôler le courant absorbé du réseau. Par conséquent, il réduit les déformations de l'onde de tension causées par la circulation des composantes harmoniques de courant. Par ailleurs, le filtre universel permet de cumuler les avantages des 2 configurations. Cependant, il est difficile à réaliser en pratique. Par ailleurs, les normes de qualité de l'énergie sont plutôt portées sur la compensation des harmoniques. Pour ces raisons, le filtrage actif shunt est considéré le plus important dans ce sens [33].

Tableau(II.2) : Avantages et inconvénients de chaque topologie de filtrage

Topologie	Avantages	Inconvénients
Filtre actif série	<ul style="list-style-type: none"> • Amélioration de la forme de tension. 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas d'amélioration de la forme de courant.
Filtre actif shunt	<ul style="list-style-type: none"> • Amélioration de la forme de courant et de tension. • Amélioration du facteur de puissance. 	<ul style="list-style-type: none"> • Amélioration de la forme de tension pas toujours évidente.
Filtre universel	<ul style="list-style-type: none"> • Amélioration de la forme du courant, amélioration. • de la forme de la tension. • Adaptabilité aux variations de charges et du réseau. 	<ul style="list-style-type: none"> • Réalisation difficile.

II.9 . Choix de filtre approprié à utiliser :

- ❖ Le filtre passif permet à la fois :
 1. la compensation d'énergie réactive.
 2. une grande capacité de filtrage du courant.

L'installation où est placé le filtre doit présenter une stabilité suffisante, avec peu de fluctuations de charge. Si la puissance réactive fournie est importante, il est conseillé de mettre hors tension le filtre passif pendant les périodes de faible charge. L'étude de raccordement d'un filtre doit tenir compte de la présence éventuelle d'une batterie de compensation et peut conduire à sa suppression.

- ❖ Le filtre actif permet le filtrage des harmoniques sur une large bande de fréquence. Il s'adapte à n'importe quelle charge.
- ❖ Le filtre hybride réunit l'ensemble des performances des filtres passifs et actifs [34].

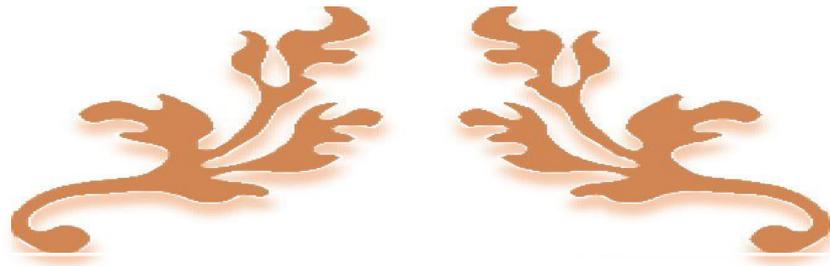
II.10 . Conclusion

Les convertisseurs de puissance consomment des courants non sinusoïdaux, même s'ils sont alimentés par une tension sinusoïdale. Se comportent donc comme des générateurs de courants harmoniques.

Les solutions classiques, notamment le filtrage passif, l'optimisation des topologies des convertisseurs, les transformateurs à couplage spécial et autres, ne sont plus suffisantes pour la dépollution. Ainsi, le filtre actif est de plus en plus souvent utilisé comme filtre harmonique en plus des solutions classiques.

Plusieurs topologies de filtres actifs sont réalisables. Ils peuvent être connectés en Parallèle ou en série avec le réseau, comme ils peuvent être seuls ou en association avec les filtres passifs pour former les filtres hybrides.

La structure du filtre actif parallèle(FAP), est considérée dans chapitre suivant. qui présente la structure du filtre actif parallèle ainsi que son principe de fonctionnement. Par ailleurs les différentes stratégies de commande.



Chapitre: III

*Modélisation et régulation d'un filtre
actif parallèle*

III.1. Introduction

Pour réduire les harmoniques a niveau de la source nous proposons dans ce travail le filtrage actif parallèle, vu ses avantages, tel que l'adaptation aux variations de la charge. Le filtre actif est un onduleur de tension qui traité l'élimination des harmoniques. Il doit donc, absorber des courants éliminant les harmoniques crée par le pont redresseur. Cette structure à pour vocation d'éliminer de façon active tout ou une partie des harmoniques de courant l'utilisation des onduleurs pour filtrage actif, suppose l'emploi des fréquences de découpages très supérieure aux fréquences harmoniques que l'on veut éliminer.

Nous commencerons ce chapitre par un exposé de la structure générale des filtres actifs parallèles, cette structure montre bien que ces compensateurs de puissance sont composés de deux parties, à savoir une partie puissance et une partie commande. La partie puissance est elle-même constituée d'un onduleur, d'un système de stockage et d'un filtre de découplage. Nous nous intéressons uniquement dans ce chapitre à la partie puissance coté convertisseur statique également à l'onduleur de tension. De ce fait, nous allons présenter dans un premier temps, les principales topologies des filtres actifs parallèles à structure tension utilisées dans la littérature scientifique avec leurs modélisations, pour pallier aux problèmes liés aux perturbations harmoniques dans les systèmes électriques de faible puissance. Ensuite, une étude théorique par modélisation de la topologie modulaire sera faite et nous nous intéressons uniquement dans cette partie à la modélisation de deux onduleurs à trois bras mis en parallèles. Cette modélisation est basée sur le modèle moyen des onduleurs qui nous permet de prédire les interactions entre les onduleurs triphasés mis en parallèles. Finalement, nous clôturons ce chapitre par une brève introduction au contrôle du filtre actif parallèle.

III.2. Le choix du filtre actif parallèle

Le filtre actif parallèle (FAP) joue un rôle efficace dans l'identification et l'élimination des harmoniques. En effet il offre de nombreux avantages :

- ❖ Il s'adapte automatiquement avec la variation des charges connectées au réseau électrique.
- ❖ Le risque de résonance entre le filtre et l'impédance du réseau est inexistant.
- ❖ Il peut compenser plusieurs rangs harmoniques vis-à-vis de la limite de sa bande passante.
- ❖ Il ne passe pas en surcharge lorsque le courant harmonique à compenser dépasse le

Dimensionnement du filtre. Il limite son émission de compensation au maximum de ses capacités, mais il n'y a aucun risque de destruction.

Néanmoins, le filtrage actif montre quelques inconvénients tels que :

- ❖ Le filtrage actif est conçu seulement pour des réseaux de faible puissance.
- ❖ La compensation de l'énergie réactive est possible, mais avec un coût très élevé par rapport au filtrage passif.

Le coût du filtre actif est proportionnel à la taille de son élément de stockage capacitif, du nombre de semi-conducteurs qu'il contient ainsi que de sa topologie. Comme nous arrivons juste de le voir, la topologie du filtre actif joue un rôle important dans le coût en commandant des économies potentielles du montage. La topologie hybride, à titre d'exemple, permet de diminuer les coûts du filtre actif (réduction de la taille de l'élément de stockage).

III.3.Filtre actif parallèle

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau, est le plus souvent commandé comme un générateur de courant. Il injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec Ceux-ci, à fin de rendre le courant du réseau électrique à la forme sinusoïdale .

Il empêche les courants perturbateurs (harmoniques, réactifs et déséquilibrés), produits par des charges polluantes, de circuler à travers l'impédance du réseau, située en amont du point de connexion du filtre actif. représente la structure générale du filtre actif parallèle, laquelle se présente sous forme de deux blocs : la partie puissance et la partie contrôle commande.

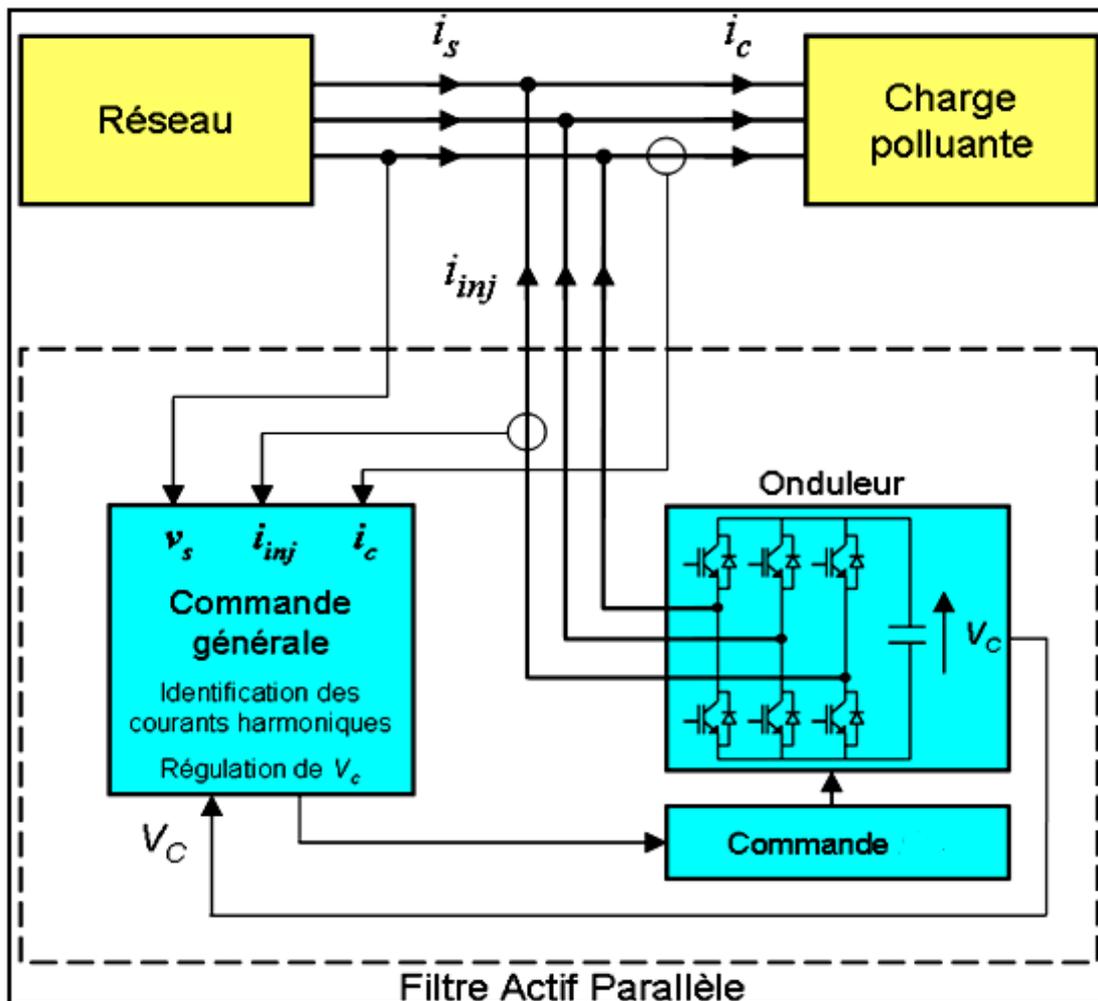
La partie puissance est constituée :

- 1- d'un onduleur de tension à base d'interrupteurs de puissance, commandés à l'amorçage et au blocage (GTO, IGBT,...etc.) avec des diodes en antiparallèles
- 2- d'un circuit de stockage d'énergie, souvent capacitif
- 3- d'un filtre de sortie

III.4.Principe de filtrage actif parallèle

Le principe du filtre actif parallèle consiste à générer des harmoniques en opposition de phase à ceux existant sur le réseau. Ceci peut être schématisé sur la figure III.1. Alors que le courant absorbé par la charge polluante est non sinusoïdal, le courant créé par le filtre actif est tel que le courant absorbé au réseau est sinusoïdal .

Ce filtre est le plus souvent commandé comme un générateur de courant, il génère des courants harmoniques, en opposition de phase avec le réseau, afin que la somme avec ceux-ci soit nulle. On obtient alors des courants alternatifs au niveau du réseau. Il permet donc de supprimer au point de raccordement tous les harmoniques de courants de charge non linéaire. En pratique, on ne peut pas obtenir un courant de ligne purement sinusoïdal comme dans le cas idéal mais le but est d'avoir un courant qui sera le plus proche possible de la sinusoïde, la simulation par Matlab permet de nous approcher de la réalité de la compensation. En générale, le filtre actif parallèle est utilisé pour la dépollution des réseaux BT et MT. Son impédance totale vis à vis de la source et de la charge lui confère une bonne auto-adaptabilité avec les performances appréciables [35].



Figure(III.1): Schéma simplifié d'un filtre actif parallèle

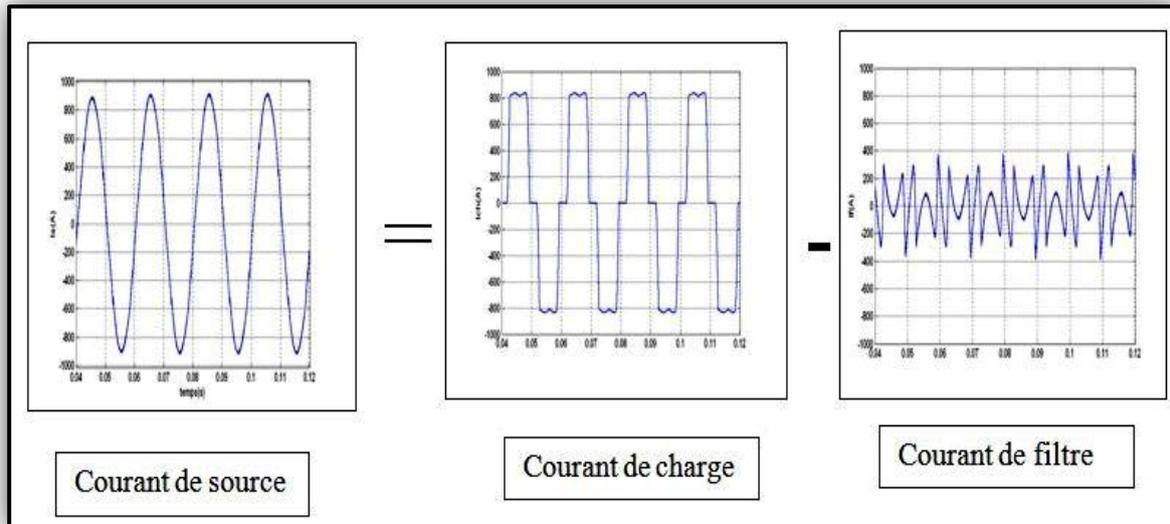


Figure (III. 2) : les Courant de source, charge et filtre.

Donc le filtre actif parallèle doit fournir la puissance déformante et où la puissance réactive. Ainsi, le réseau fournit uniquement la puissance fondamentale active et où réactive. Pour cela le circuit de contrôle en agissant sur les signaux de gâchette des semi-conducteurs (transistors, GTO, IGBT,..) doit imposer la valeur instantanée du courant débité par l'onduleur (I_{inj1} , I_{inj2} , I_{inj3}) de telle sorte que le courant fourni par le réseau (I_{s1} , I_{s2} , I_{s3}) soit sinusoïdale et en phase avec la tension du réseau.

Dans le cas général, le courant absorbé par la charge comporte une composante active (I_{ca}), une composante réactive (I_{cr}) et une composante harmonique (ΣI_{chn}).

Avec

$$I_c = I_{cr} + I_{ca} + \Sigma I_{chn} \tag{III.1}$$

($I_{cr} + \Sigma I_{chn}$), le courant réactive et déformant sera compensé par le filtre actif. Donc on obtient :

$$I_{ca} = I_s ; I_{inj} = I_{cr} + \Sigma I_{chn} \tag{III.2}$$

Le filtre actif se compose de deux parties distinctes de la partie puissance et la partie commande. La partie puissance est constituée d'un élément de stockage d'énergie, d'un pont onduleur triphasé et d'un filtre de sortie généralement du premier ordre. Pour la partie commande, on a le bloc d'identification des courants de références, le contrôle du courant réseau ainsi que la commande [35].

III.5. Structure générale du filtre actif parallèle

III.5.1 Topologie générale

La figure (III.3) donne la structure générale du FAP, laquelle se présente sous la forme de deux parties:

La partie puissance est constituée:

- ❖ d'un onduleur de tension à base d'interrupteurs de puissance, commandés 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 [6].

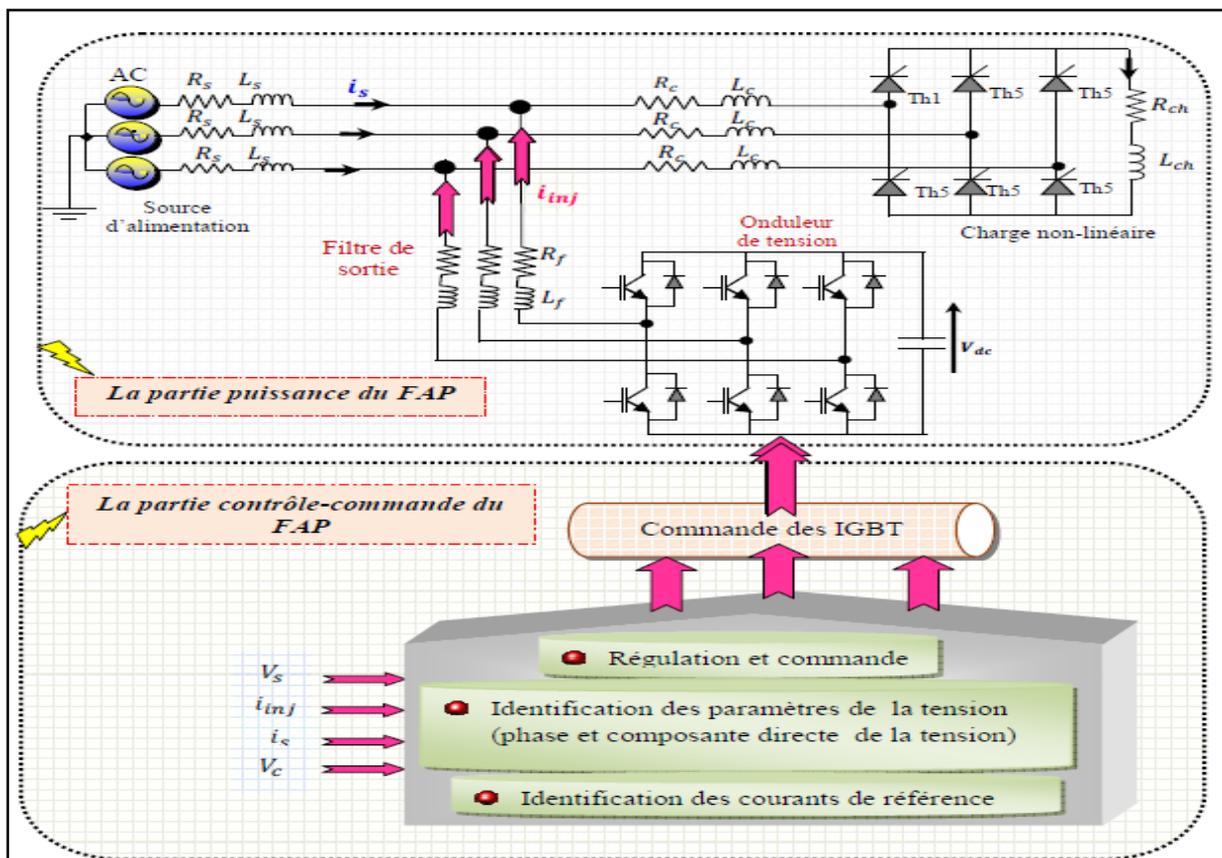


Figure (III.3) Structure générale du FAP

III.5.2 Etude de la partie puissance

III.5.2.1 Onduleur de tension

L'onduleur de tension est composé de trois bras chacun a deux interrupteurs bidirectionnels en courant commandés a l' amorçage et au blocage , ils sont réalisés avec un transistor (MOSFET,IGBT,GTO) associé a une diode antiparallèle pour réversibilité en courant.

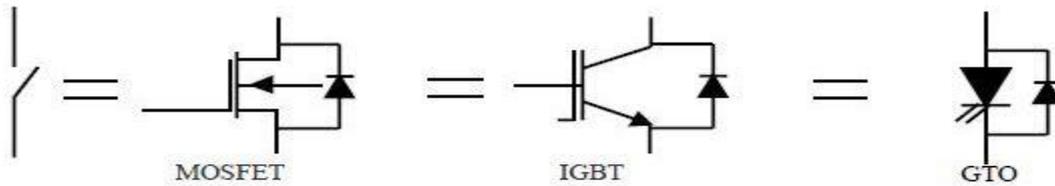


Figure (III.4). Interrupteurs équivalents.

L'onduleur triphasé est constitué d'interrupteurs bidirectionnels en courant. Ils sont réalisés par des semi-conducteurs command ables à l'ouverture et à la fermeture (de type IGBT dans la majorité des cas) montés en antiparallèle avec une diode. Pour cette structure, on doit respecter les contraintes suivantes :

- A un instant donné, un seul interrupteur d'un même bras doit conduire afin d'éviter tout court-circuit de la source de tension,
- Le courant de ligne doit toujours trouver un chemin possible d'où la mets-en Antiparallèle de diodes au niveau des interrupteurs.

Le stockage de l'énergie du côté continu se fait par l'intermédiaire d'un condensateur C_{dc} de tension V_{dc} . Le filtre de sortie est un filtre passif habituellement du premier ordre (L_f, R_f) employé pour relier l'onduleur de tension au réseau électrique [36].

La figure(III.5) présente un onduleur triphasé à structure de tension.

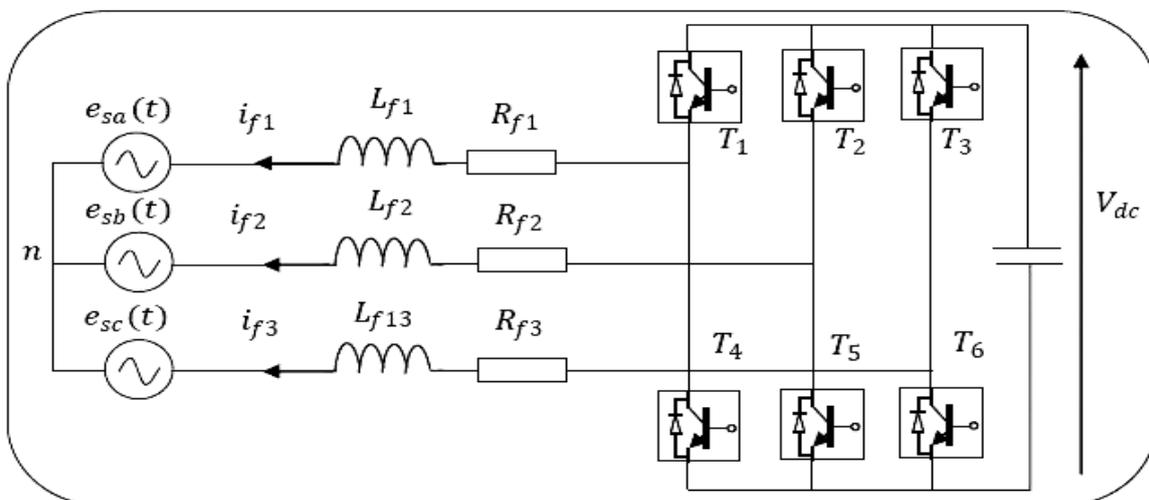


Figure (III.5) : Onduleur de tension triphasé.

Cette structure du FAP ne permet pas la fermeture simultanée des semi-conducteurs d'un même bras sous peine de court-circuiter le condensateur de stockage. Par contre, ils peuvent être tous les deux ouverts (pendant un temps mort). La continuité des courants est alors assurée par la mise en conduction d'une des diodes d'un même bras. En pratique, nous commandons les deux semi-conducteurs d'un même bras de façon complémentaire : la conduction de l'un entraîne le blocage de l'autre. En réalité, le mode, où les semi-conducteurs d'un même bras sont tous les deux fermés, n'existe que durant les commutations. Afin d'éviter un court-circuit à cause du délai de blocage des interrupteurs, il faut insérer sur un même bras, un temps d'attente, également appelé temps mort, entre la commande de blocage d'un interrupteur et la commande d'amorçage de l'autre. Avec l'hypothèse des commutations instantanées, ce mode de fonctionnement ne sera pas pris en compte et par conséquent, aucun risque de court-circuiter le condensateur n'est à craindre [36].

III.5.2.2. Tension fournie par l'onduleur

L'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur de la figure(III.5) dépendent de l'état des signaux de commande (S_1, S_2, S_3), comme défini ci-dessous :[37]

$$S_1 = \begin{cases} 1 & T_1 \text{ fermé et } T_4 \text{ ouvert} \\ 0 & T_1 \text{ ouvert et } T_4 \text{ fermé} \end{cases}$$

$$S_2 = \begin{cases} 1 & T_2 \text{ fermé et } T_5 \text{ ouvert} \\ 0 & T_2 \text{ ouvert et } T_5 \text{ fermé} \end{cases}$$

$$S_3 = \begin{cases} 1 & T_3 \text{ fermé et } T_6 \text{ ouvert} \\ 0 & T_3 \text{ ouvert et } T_6 \text{ fermé} \end{cases}$$

Les tensions entre phases, imposées par l'onduleur, sont alors définies par :

$$\begin{bmatrix} V_{f1} - V_{f2} \\ V_{f2} - V_{f3} \\ V_{f3} - V_{f1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1 & S_2 \\ S_2 & S_3 \\ S_3 & S_1 \end{bmatrix} V_{dc} \quad (III.3)$$

Les tensions de sortie de l'onduleur, notées V_{f1} , V_{f2} , V_{f3} , sont référencées par rapport au neutre du réseau et vérifient les équations suivantes :

$$\begin{bmatrix} V_{f1} \\ V_{f2} \\ V_{f3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ V_{s3} \end{bmatrix} + L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{f1} \\ i_{f2} \\ i_{f3} \end{bmatrix} \quad (III.4)$$

$$\begin{cases} V_{s1} + V_{s2} + V_{s3} = 0 \\ i_{f1} + i_{f2} + i_{f3} = 0 \end{cases} \quad (III.5)$$

On peut déduire des équations (III.4) et (III.5) la relation suivante :

$$V_{f1} + V_{f2} + V_{f3} = 0 \quad (III.6)$$

Les équations (2.8) et (2.11) peuvent être résolues et nous obtenons :

$$\begin{bmatrix} V_{f1} \\ V_{f2} \\ V_{f3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2S_1 & -S_2 & -S_3 \\ -S_1 & 2S_2 & -S_3 \\ -S_1 & -S_2 & 2S_3 \end{bmatrix} \frac{V_{dc}}{3} \quad (III.7)$$

Ainsi, on pourra exprimer huit cas possibles de tension de sortie du filtre actif Vf (référéés au neutre n de la source), comme le montre le tableau (III.1). Vf représente les vecteurs de tensions que doit produire l'onduleur afin de générer les tensions de référence, cela n'est possible que si le vecteur formé par ces dernières reste à l'intérieur de l'hexagone présenté par la figure (III.6) . Le filtre actif parallèle est relié au réseau électrique par un filtre inductif (Lf) pour fournir la contrôlabilité du courant de filtre de puissance et agit également en tant qu'un filtre passif du premier ordre pour supprimer les ondulations à hautes fréquences produites par les commutations de l'onduleur.

En négligeant les effets du condensateur C du filtre de sortie sur le courant de référence I_{inj} (pour les harmoniques basses fréquences qui sont loin de la fréquence de commutation des interrupteurs), on peut écrire la relation suivante caractérisant le courant du filtre actif I_{inj} :

$$L_f \frac{d}{dt} I_{inj} = V_f - V_s \quad (III.8)$$

Ainsi, on pourra exprimer huit cas possibles de tension de sortie du filtre actif Vf (par rapport au neutre n de la source), comme le montre le Tableau (III.1) .

Tableau (III.1) : Tensions possibles à la sortie de l'onduleur

N° du cas	S3	S2	S1	Vf3	Vf2	Vf1
0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	1	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$
2	0	1	0	$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$
3	0	1	1	$-2V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$
4	1	0	0	$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$
5	1	0	1	$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$
6	1	1	0	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$
7	1	1	1	0	0	0

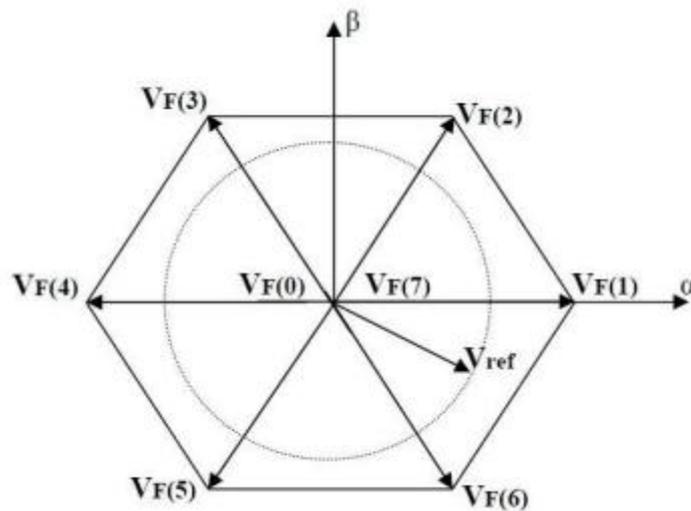


Figure (III.6) : Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur.

Où V_{f*} représente la tension de référence que doit produire l'onduleur pour pouvoir créer les courants perturbateurs identifiés. Ceci signifie que l'onduleur n'est capable de fournir des tensions égales aux tensions de référence que si le vecteur formé par ces derniers reste à l'intérieur de l'hexagone montré dans la Figure(III.6) [6] .

III.5.2.3.Modèle mathématique du filtre actif parallèle dans le repère triphasé

L'équation de tension par phase du filtre actif parallèle triphasé illustré par la figure (III.9) est donnée par :[38]

$$V_{sk} = V_{fk} - V_{Lfk} - V_{Rfk} = V_{fk} - L_f \frac{di_f}{dt} - R_f i_{fk} \quad K = a, b, c \quad (III.9)$$

Alors, les équations des trois phases sont données par :

$$L_f \frac{di}{dt} \begin{bmatrix} L_{fa} \\ L_{fb} \\ L_{fc} \end{bmatrix} = -R_f \begin{bmatrix} L_{fa} \\ L_{fb} \\ L_{fc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{fa} \\ V_{fb} \\ V_{fc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{III.10})$$

Et pour le coté continu :

$$C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = S_a i_{fa} + S_b i_{fb} + S_c i_{fc} \quad (\text{III.11})$$

Le système d'équation définissant le filtre actif dans le repère triphasé est donnée par :

$$\left\{ \begin{array}{l} L_f \frac{di_{fa}}{dt} = -R_f i_{fa} + V_{fa} - V_{sa} \\ L_f \frac{di_{fb}}{dt} = -R_f i_{fb} + V_{fb} - V_{sb} \\ L_f \frac{di_{fc}}{dt} = -R_f i_{fc} + V_{fc} - V_{sc} \\ C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = S_a i_{fa} + S_b i_{fb} + S_c i_{fc} \end{array} \right. \quad (\text{III.12})$$

III.5.2.4.Filtre de couplage

Le filtre de couplage est un filtre passif utilisé pour connecter l'onduleur de tension au réseau. Il est dimensionné pour satisfaire les deux critères suivants :[38]

assurer la dynamique du courant du filtre défini par :

$$\frac{di_f}{dt} = \frac{di_h}{dt} \quad (\text{III.13})$$

Où i_f : Courant du filtre

i_h : Courant harmonique de la charge

Empêcher les composantes dues aux commutations de se propager sur le réseau électrique .

Pour satisfaire ces deux conditions, on utilise un filtre de premier ordre, composé d'une inductance L_f avec une résistance interne R_f , une petite valeur de cette inductance assure la dynamique du courant. Contrairement, une valeur relativement grande de celle-là empêche les composantes dues aux commutations de se propager sur le réseau. En négligeant la résistance de ce filtre de couplage on obtient :

$$\left(\frac{di_f}{dt} \right)_{max} = \frac{V_{f\ max} - V_{s\ max}}{L_f} \quad (\text{III.14})$$

Avec $V_{f\ max}$: La valeur maximale de la tension à l'entrée de l'onduleur

$V_{s\ max}$: La valeur maximale de la tension simple au point de raccordement du filtre

Prenons la valeur maximale de tension $V_f = \sqrt{\frac{2}{3}}V_{dc}$ avec la valeur maximale de la tension du réseau, pour des petites variations du courant du filtre, on obtient :

$$\left(\frac{\Delta i_f}{\Delta T}\right)_{max} = \frac{\sqrt{\frac{2}{3}}V_{dc} - V_{smax}}{L_f} \quad (III.15)$$

avec : $\Delta T = \frac{1}{f_{ond}}$ la période de variation du courant du filtre

En supposant la variation maximale du courant du filtre égale à 25% de la valeur maximale du courant du réseau, la valeur de l'inductance de couplage est donnée par :

$$diftmax = Vfmax - VsmaxLf$$

$$L_f = \frac{\sqrt{\frac{2}{3}}V_{dc} - V_{smax}}{0.25i_{smax} f_{ond}} \quad (III.16)$$

III.5.2.5. 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 la qualité de compensation du FAP. 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 FAP. Ces fluctuations sont d'autant plus importantes que l'amplitude du courant du filtre est grande et que sa fréquence est faible. Pour cette raison, nous pouvons estimer que seuls les premiers harmoniques sont pris en compte dans le choix des paramètres du système de stockage. Pour démontrer ceci, deux méthodes peuvent être utilisées :

le calcul de l'énergie fournie par le FAP pendant une demi-période de la pulsation de puissance liée aux deux premiers harmoniques (5 et 7 pour un pont redresseur de Graetz) .

En choisissant un taux d'ondulation acceptable (ϵ), généralement de l'ordre de 5% de V_{dc} , nous pouvons calculer la capacité C_{dc} à partir de la relation suivante :[39]

$$C_{dc} = \frac{V_s \sqrt{I_5^2 + I_7^2 - 2I_5 I_7 \cos(5\alpha - 7\alpha)}}{2\omega\epsilon V_{dc}^2} \quad (III.17)$$

avec V_s la tension simple du réseau, I_h le courant harmonique du rang h et α l'angle d'allumage des thyristors du pont Graetz. Puisque l'augmentation de la valeur de la tension continue améliore la commandabilité du filtre actif et sachant que le choix de cette tension se

répercute en grande partie sur le choix des interrupteurs, la tension continue V_{dc} doit être choisie comme la plus grande tension respectant les contraintes des interrupteurs.

- La deuxième méthode, plus simple, se base sur la mesure du courant harmonique I_h du rang le plus faible. La capacité C_{dc} se calcule de la façon suivante .

$$C_{dc} = \frac{I_h}{\varepsilon V_{dc} \omega_h} \quad (\text{III.18})$$

avec ω_h la pulsation la plus faible des harmoniques à compenser [39].

III.5.3 . Contrôle des courants du filtre actif (partie commande)

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 se soit à MLI ou par hystérésis, est de générer les ordres d'ouverture et fermeture des interrupteurs de manière à ce que le courant du filtre actif soit le plus proche de sa référence [38].

III.5.3.1 . Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)

La technique de commande par MLI : la commande par modulation de largeur d'impulsion résout le problème de la maîtrise de la fréquence de commutation en 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 interjective. 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. [38].

Le Schéma de principe est donné par la figure (III.7).

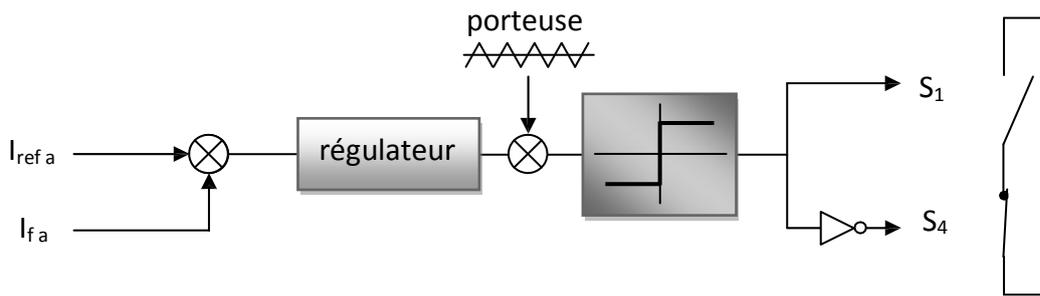


Figure (III.7) : Principe de commande par MLI

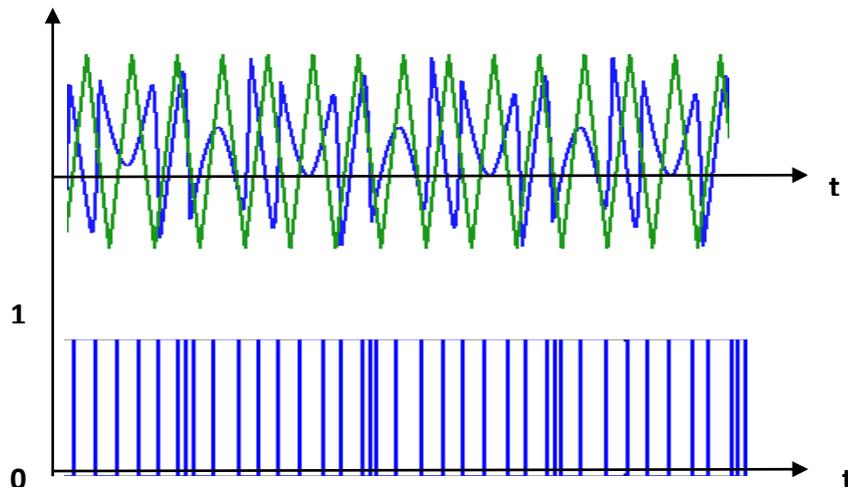


Figure (III.8) :Signal de commande et référence

III.6.Filtre actif parallèle à structure de courant

Sur la figure suivante est illustré le filtre actif parallèle à structure de courant.

L'inductance et le filtre passe-bas de deuxième ordre de sortie caractérisent cette structure.

L'élément servant de source d'énergie est l'inductance (L_{df}) qui doit délivrer un courant continu de valeur quasi constante. Tout comme le filtre à structure de tension, la présence du filtre de couplage sert à filtrer les tensions harmoniques générées par les courants de l'onduleur. Les harmoniques près de la fréquence de résonance du filtre passe-bas $L_j C_f$ sont amplifiés et peuvent causer de graves dommages au montage. Dans le but de prévenir ce phénomène indésirable, des résistances peuvent être insérées dans le filtre passe-bas ou un contrôle approprié du courant, qui tient en compte la dérivée du courant instantané du filtre actif, peut être adopté .

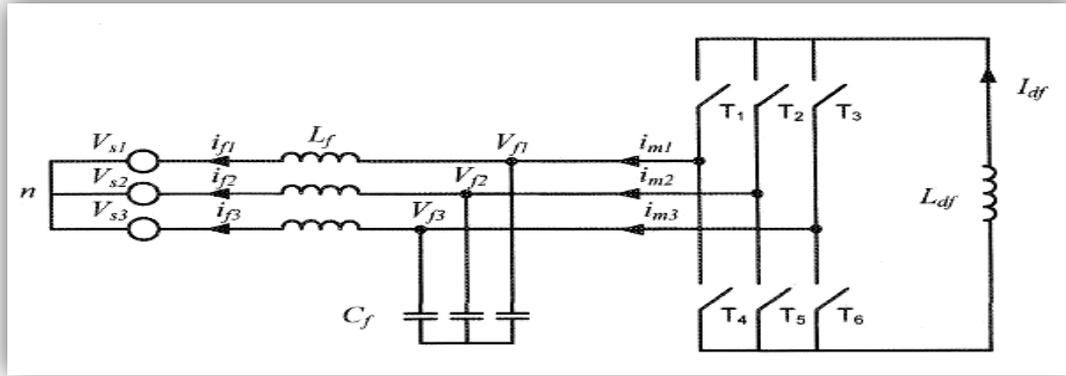


Figure (III.9) : Filtre actif parallèle à structure de courant

Les semi-conducteurs servant d'interrupteur à l'onduleur sont unidirectionnels en courant, mais bidirectionnels en tension. Ces semi-conducteurs se commandent en fermeture et en ouverture.



Figure (III.10) Semi-conducteurs servant d'interrupteur au filtre actif en courant : a) transistor bipolaire, b) transistor IGBT

Pour que les états des interrupteurs ne dépendent que des signaux de contrôle, il faut commander un seul composant par demi-point. Le mode où il y a deux composants d'un demi-point simultanément conducteurs existe uniquement lors des passages de courant d'une phase à l'autre. Des trois interrupteurs reliés à la même borne de la source de courant continu, il faut qu'il y en ait toujours un fermé pour que cette source de courant ne soit jamais en circuit ouvert [40].

Le tableau (III.2) : montre les combinaisons possibles des courants I_{m1}, I_{m2} et I_{m3} .

Tableau (III.2) : Courants générés par l'onduleur à structure de courant

Numéro de l'état	Interrupteurs fermés	I_{m1}	I_{m2}	I_{m3}
1	T1, T5	I_{df}	$-I_{df}$	0
2	T1, T6	I_{df}	0	$-I_{df}$
3	T2, T6	0	I_{df}	$-I_{df}$
4	T2, T4	$-I_{df}$	I_{df}	0
5	T3, T4	$-I_{df}$	0	I_{df}
6	T3, T5	0	$-I_{df}$	I_{df}
7	T1, T4	0	0	0
8	T2, T5	0	0	0
9	T3, T6	0	0	0

Tableau (III.3) : Comparaison des deux structures d' onduleurs

Onduleur de courant	Onduleur de tension
Utilise une inductance pour emmagasiner l'énergie cc	Utilise un condensateur pour emmagasiner l'énergie cc
Courant constant	Tension constante
Pertes plus élevées	Moins de pertes
Plus efficace pour les faibles puissances	Plus fiable pour les fortes puissances
Nécessite une protection contre les surtensions.	Doit être protégé contre les surintensités
Commande rapide et précise	Commande plus lente
Peut être commandé en courant ou en Tension	Peut être commandé en courant ou en tension

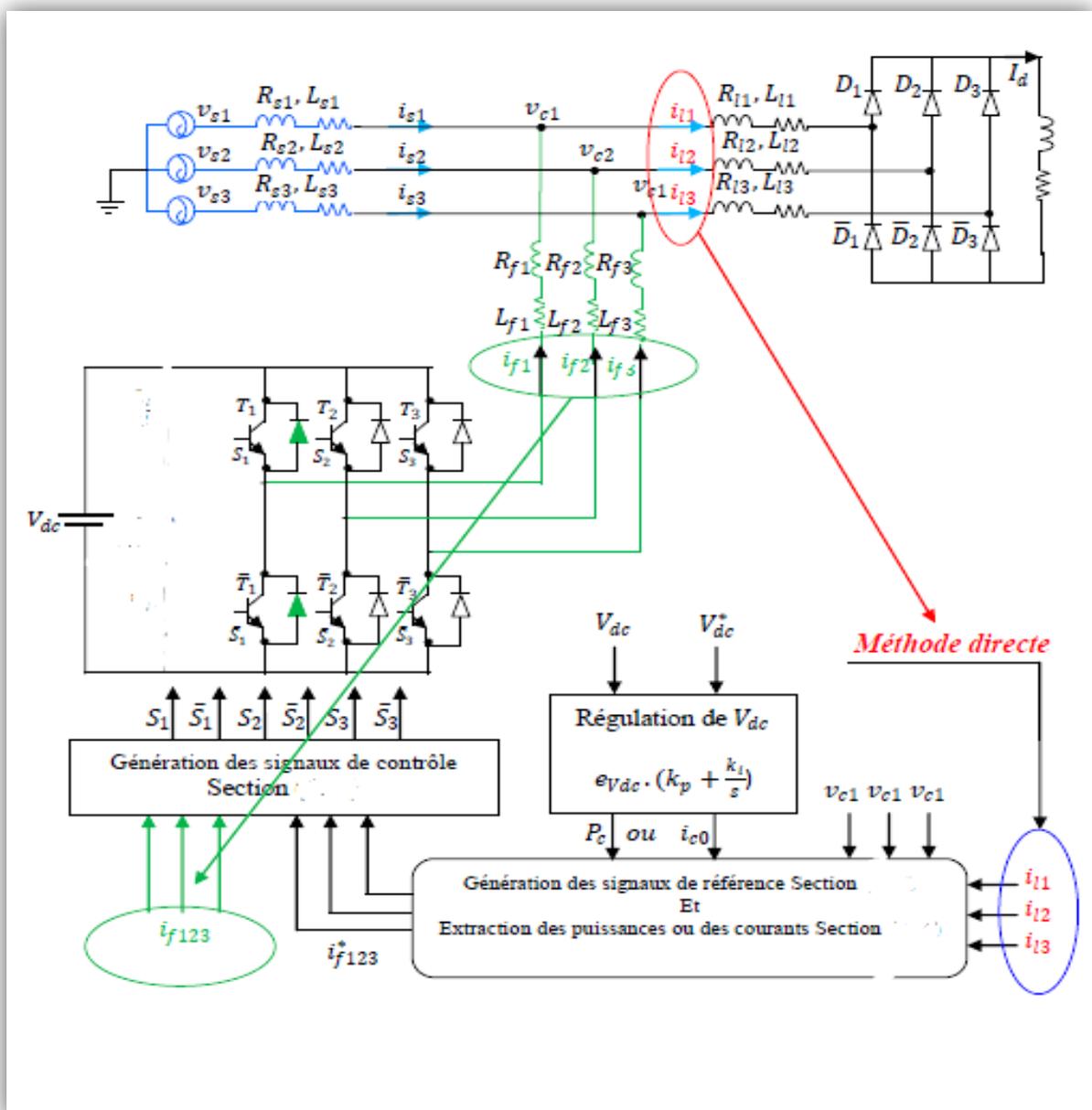
III.6.1. Commande du filtre actif parallèle

Il existe deux stratégies de commande, à savoir :

- Stratégies de commande directe
- Stratégies de commande indirecte

a. Stratégies de commande directe

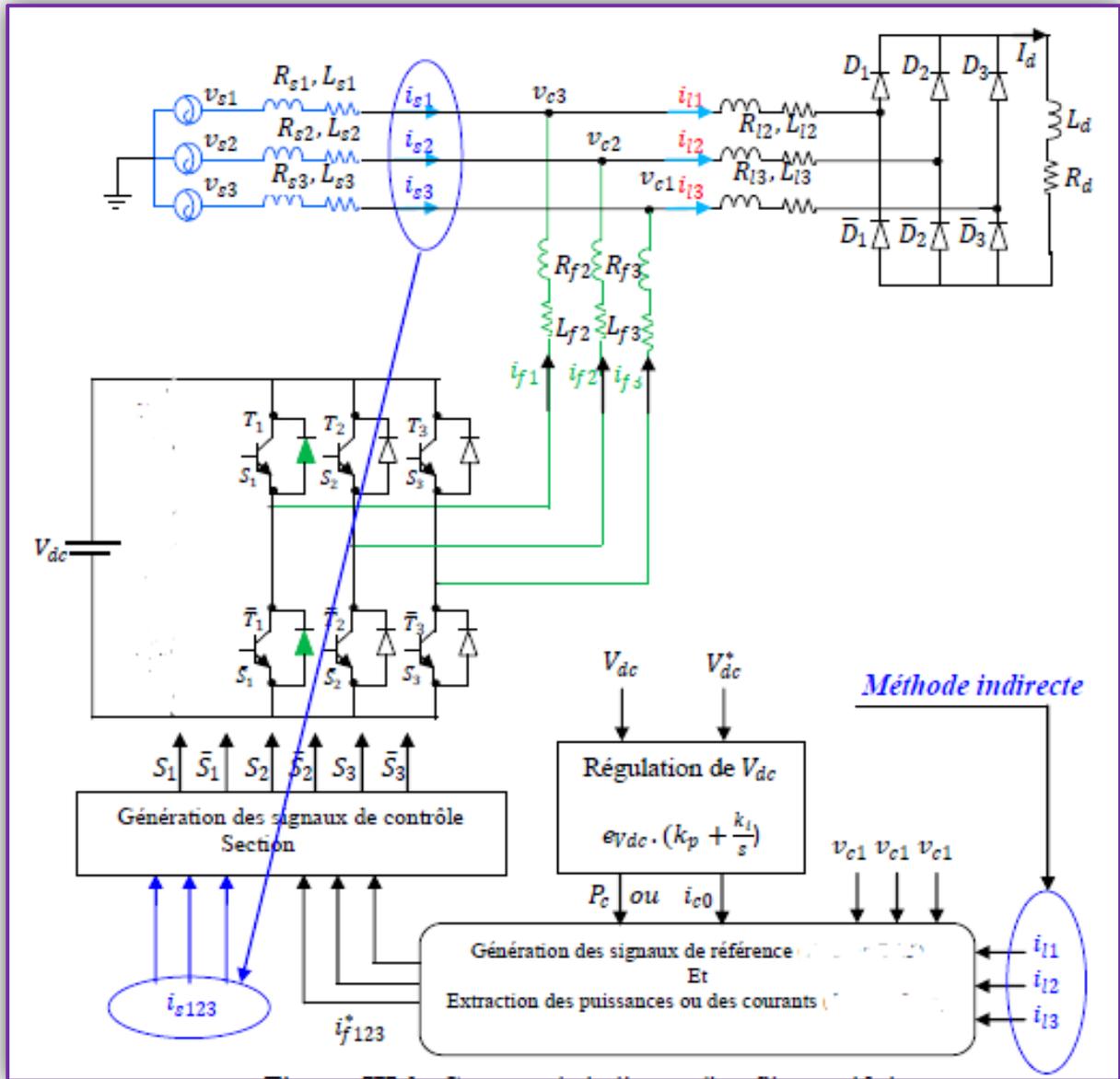
La commande dite directe, est basé sur la comparaison du courant de référence $i_{ref}(t)$ obtenu par une méthode appropriée à partir de la mesure du courant de la charge polluante (t) , au courant injecté par le filtre actif de puissance (t) , comme le montre la figure (III.11) .



Figure(III.11) : Commande directe d'un filtre actif shunt.

b. Stratégies de commande indirecte

La commande dite indirecte, à la différence de la précédente, compare les courants de référence $i_{ref}(t)$ produits par une méthode appropriée, avec le courant de source $i(t)$, comme l'illustre la figure (III.12).



Figure(III.12) : Commande indirecte d'un filtre actif shunt.

III.6.2.Stratégies de commande

La stratégie de commande se base sur la détection des courants perturbateurs dans le domaine temporel. Trois possibilités d'identification des courants perturbateurs ont déjà été proposées :

- Identification à partir de la détection du courant de la charge polluante
- Identification à partir de la détection du courant de la source
- Identification à partir de la détection tension de la source.

La méthode la plus utilisée est celle appelée méthode des puissances réelles et imaginaires instantanées, Cette méthode est valide aussi bien en régime permanent qu'en régime transitoire .

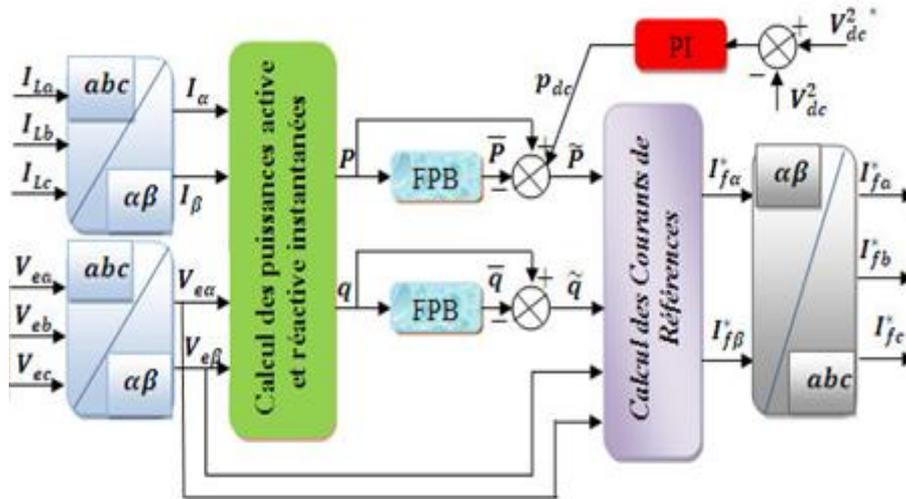


Figure (III.13) : Principe de la méthode des puissances instantanées pq.

En présence des harmoniques, la puissance apparente est composée de trois parties active, réactive et déformante.

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \tag{III.19}$$

Dans cette stratégie de contrôle, les mesures des tensions et des courants exprimés sous forme triphasée (*a-b-c*) sont converties en système biphasé (*α-β*) équivalent à l'aide de la transformée de Concordia qui laisse la puissance invariante :

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \tag{III.20}$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \tag{III.21}$$

La puissance réelle instantanée *p* et la puissance réactive instantanée *q* peuvent être exprimées de façon équivalente en système biphasé par :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \tag{III.22}$$

Ce qui nous donne :

$$\text{Puissance réelle instantanée } \mathbf{p} = V_{\alpha} * i_{\alpha} + V_{\beta} * i_{\beta} \quad (\text{III.23})$$

$$\text{Puissance imaginaire instantanée } \mathbf{q} = V_{\alpha} * i_{\beta} - V_{\beta} * i_{\alpha} \quad (\text{III.24})$$

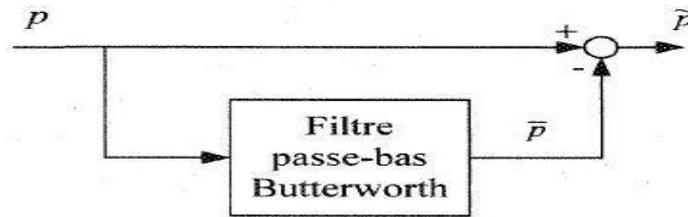
La puissance réelle instantanée ainsi que la puissance imaginaire instantanée peuvent être exprimées de la façon suivante

$$\begin{cases} \mathbf{p} = \bar{p} + \tilde{p} \\ \mathbf{q} = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad (\text{III.25})$$

Où p et q sont, de façon respective, les composantes des puissances moyennes actives et réactives correspondant au courant de charge fondamentale (50 Hz), alors que \tilde{p} et \tilde{q} correspondent aux composantes alternatives liées au courant harmonique. La compensation d'harmoniques par le filtre actif se fait par la génération de ces dernières :

$$\begin{cases} \mathbf{p}^* = \tilde{p} \\ \mathbf{q}^* = \tilde{q} \end{cases} \quad (\text{III.26})$$

En conséquence, l'élimination de la composante fondamentale dans les équations (III.25) et (III.26) s'effectue à l'aide de deux filtres passe-bas de Butterworth d'ordre deux [26].

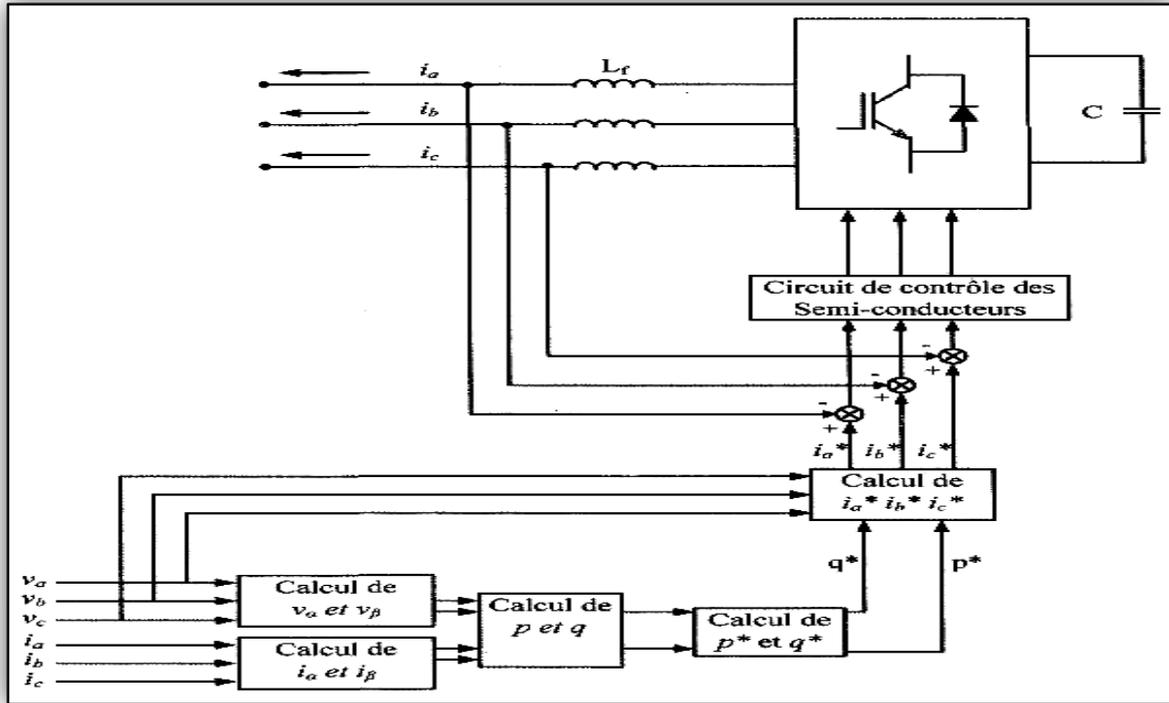


Figure(III.14) : Filtrage de la composante de la puissance continue

Les courants de compensation de référence se calculent par la formule suivante

$$\begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha}^* \\ i_{\beta}^* \end{bmatrix} \quad (\text{III.27})$$

$$\text{Ou : } \begin{bmatrix} i_{\alpha}^* \\ i_{\beta}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} \begin{bmatrix} V_{\alpha} & -V_{\beta} \\ V_{\beta} & V_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p^* \\ q^* \end{bmatrix} \quad (\text{III.28})$$



Figure(III.15) : Filtre actif commandé par la méthode des puissances instantanées

La méthode des puissances instantanées possède les quelques caractéristiques suivantes :

- Elle est une théorie inhérente aux systèmes triphasés.
- Elle peut être appliquée à tout type de systèmes triphasés (équilibré ou déséquilibré, avec ou sans harmonique).
- Elle est basée sur des valeurs instantanées, ce qui lui donne de bons temps de réponse dynamique.
- Le nombre d'harmoniques compensé dépend de la bande passante des semi-conducteurs composant l'onduleur du filtre actif.
- Méthode de calcul simple (elle n'est composée que d'expression algébrique et peut être implémentée à l'aide d'un processeur standard) .

III.7. La régulation et l'adaptation du filtre actif :

Pour que le filtre actif s'adapte aux variations de la charge on doit agir sur deux paramètres essentiels qui sont la tension continue à l'entrée de l'onduleur et le courant du filtre actif parallèle .

III.7.1 . Régulation de la tension continue

La tension moyenne V_{dc} aux bornes du condensateur doit être maintenue à une valeur fixe. Les principales causes susceptibles de la modifier sont les pertes dans le filtre actif (semi-conducteur et filtre de sortie). La régulation de la tension moyenne aux bornes du condensateur de stockage d'énergie doit se faire par l'adjonction des courants fondamentaux actifs dans les courants de référence .

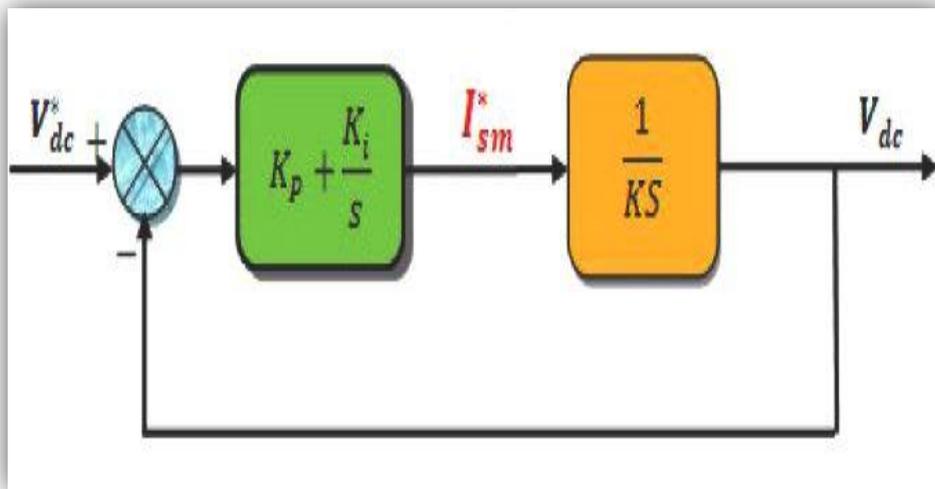


Figure (III.16) : Schéma fonctionnel pour une régulation de la tension continue.

De ce fait, la tension mesurée du bus continu V_{dc} est comparée à une tension de référence V_{dc}^* en appliquant l'erreur au contrôleur PI afin d'obtenir l'amplitude des trois courants de référence de la sources I_{sm}^* . •

Ensuite cette amplitude sera multipliée par trois signaux sinusoïdaux unitaires pour l'obtention des trois courants de référence instantanés de source $I_{dc-a}^*, I_{dc-b}^*, I_{dc-c}^*$.

En se basant sur le schéma fonctionnel de la régulation donne par la figure ci-dessous, la fonction de transfert du système en boucle fermée est de la forme :

$$FTBF(s) = \frac{K_p s + K_i}{Ks^2 + K_p s + K_i} = \frac{K_p/K(s + K_i/K_p)}{s^2 + K_p/Ks + K_i/K} \tag{III.29}$$

Cette fonction de transfert présente un système de deuxième ordre. Donc, en égalisant le dénominateur de cette dernière avec le polynôme caractéristique, on obtient :

$$s^2 + 2\varepsilon\omega_n s + \omega_n^2 = s^2 + \frac{K_p}{Ks} + K_i/K \tag{III.30}$$

Un calcul simple, nous permet d'obtenir les valeurs de régulateur PI comme suit :

$$\begin{cases} K_I = K\omega_n^2 \\ K_p = 2\varepsilon\omega_n K \end{cases} \quad (\text{III.31})$$

Un bon choix de ε et ω_n nous permet d'obtenir des bons résultats.[5]

III.7.2.Régulation du courant du filtre actif parallèle

En négligeant les effets du condensateur C_f et des résistances du filtre de sortie sur le courant de référence I_{inj} (pour les harmoniques basses fréquences qui sont loin de la fréquence de commutation), nous pouvons écrire la relation suivante caractérisant le courant du filtre actif I_{inj} .

$$L_f \frac{d}{dt} I_{inj} = V_f - V_s \quad (\text{III.32})$$

Notons par I_f la différence entre le courant de référence et le courant mesuré à partir de la relation suivante :

$$\Delta I_f = I_{ref} - I_{inj} \quad (\text{III.33})$$

A partir des équations (4.13) et (4.14), nous obtenons l'expression ci-dessous :

$$L_f \frac{d}{dt} \Delta I_f = (V_s + L_f \frac{d}{dt} I_{ref}) - V_f \quad (\text{III.34})$$

Le premier terme de la partie droite de la relation (4.15) peut être défini comme tension de référence (V_{f-ref}), ce qui nous donne l'expression suivante :

$$V_{f-ref} = V_s + L_f \frac{d}{dt} I_{ref} \quad (\text{III.35})$$

L'écart entre V_{f-ref} et V_f produit alors une erreur sur le courant. Selon la relation (III.35), la tension de référence est composée de deux termes à fréquences différentes. Le premier représente la tension du réseau V_s directement mesurable. Le second est égal à la chute de tension aux bornes de l'inductance L_f , lorsque celle-ci est traversée par un courant égale à celui de référence. Ce terme doit être élaboré par un régulateur de courant, comme le montre la figure (III.17) .

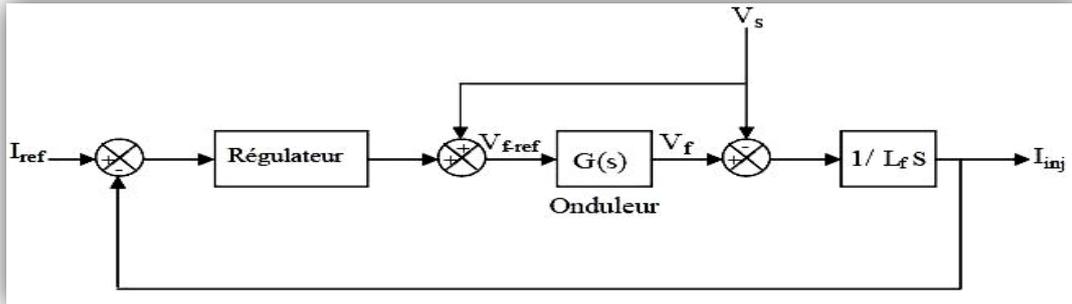


Figure (III.17): Schéma de la régulation des courants du filtre actif parallèle

Dans ce schéma, $G(s)$ représente l'onduleur qui peut être modélisé par la relation suivante

$$G(s) = K \frac{1}{1 + \tau \cdot s} \quad (\text{III.36})$$

$$K = \frac{V_{dc}}{2V_p} \quad (\text{III.37})$$

Avec :

V_{dc} la tension du côté continu de l'onduleur,

V_p l'amplitude de la porteuse triangulaire et (τ) représentant le retard causé par le calcul des courants perturbateurs.

Le régulateur doit satisfaire les objectifs généraux de la régulation ainsi les contraintes liées au rejet des perturbations .

III.8. Méthode de régulation par PI

Un régulateur doit satisfaire aux objectifs généraux de la régulation ainsi qu'aux contraintes liées au rejet des perturbations. Dans le cas d'un régulateur aussi simple que le régulateur *PI*, et à cause du manque de degré de liberté que nous impose ce dernier, seule la poursuite des références pour un point de fonctionnement fixe pourra être envisagée. A cela s'ajoute le problème du compromis à trouver dans le cas d'une structure de *filtre actif parallèle* avec un filtre de sortie du premier ordre (choix de l'inductance) . En effet, un régulateur *PI* ne peut pas assurer, avec les seuls paramètres de correction K_P et K_I , les objectifs de régulation en boucle fermée pour un système d'origine d'ordre supérieur a un [39].

La figure (III.18) représente la méthode de régulation par (PI).

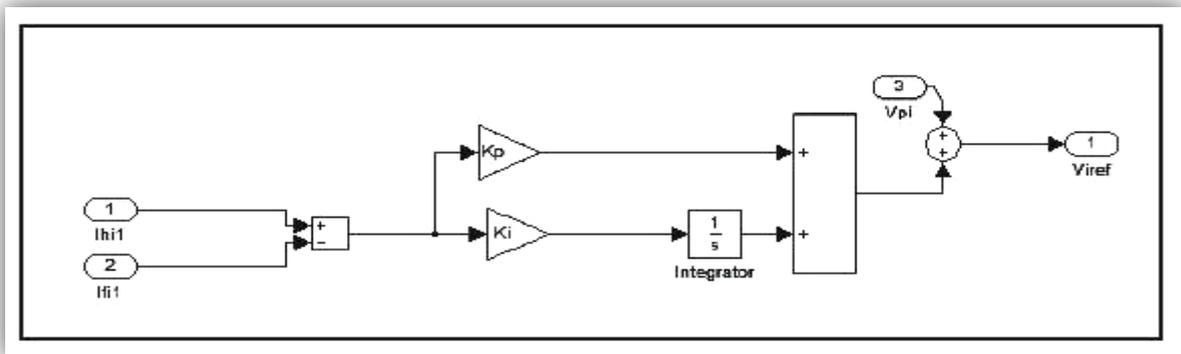


Figure (III.18) : régulation du courant par PI.

III.9 .Méthode de régulation par logique floues

III.9.1.Historique de la logique floue

Ce sont les premières approches du concept d'incertitude d'Heisenberg développées par des chercheurs américains dans les années 20 et 30 qui ont conduit à l'apparition de la logique floue. Mais ce n'est qu'en 1965 que les bases théoriques de cette logique sont proposées par le professeur Lotfi Zadeh, dans un article intitulé « Fuzzy sets » (Ensembles flous). Cet automaticien, de réputation internationale, a depuis réalisé de nombreuses avancées théoriques qui ont contribué à la modélisation de phénomènes sous forme floue, dans le but de palier les limitations dues aux incertitudes des modèles classiques à équation différentielle.

Voici l'essentiel de l'hystérique de la logique floue :

- En 1973, Lotfi Zadeh propose d'appliquer la logique floue pour résoudre les problèmes de réglage .
- En 1975, le professeur Mamdani propose à Londres, une première application très encourageante du réglage par la logique floue et développe une stratégie pour le contrôle d'une chaudière à vapeur .
- En 1978, c'est la société danoise F.L. Smidth-Fuller qui réalise le contrôle d'un four à ciment : c'est la première véritable application industrielle de la logique floue .
- En 1983, c'est un épurateur d'eau à commande par la logique floue qui est mis au point avec succès .

• A partir de 1985, la logique floue est introduite par le chercheur M. Suegno au Japon. Ce type de commande fut alors l'objet des premières réalisations remarquables développées à la fin des années 80 et au début des années 90 telles que le métro Sendai (1987) et le lave-linge Aïsaigo Pay Fuzzy de Matsushita (1990).

III.9.2. Domaines d'application

L'approche de traitement des problèmes par la logique floue est différente de celle adoptée, à priori dans une démarche scientifique.

Elle est beaucoup plus pragmatique que déterministe. La décision en logique floue est basée sur la notion d'expertise qui permet de quantifier le flou à partir de connaissance à priori ou acquise antérieurement.

Les domaines d'application de la logique floue dans un processus de prise de décision s'imposent dans les cas suivants :

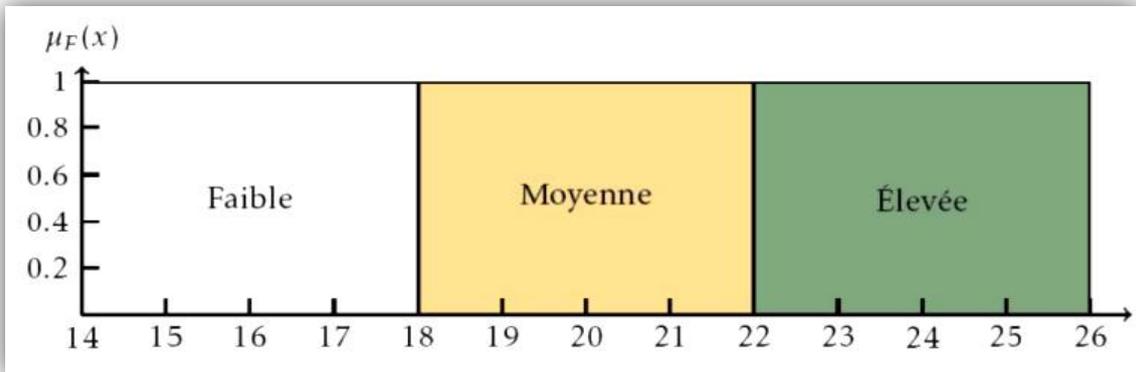
- pour les systèmes complexes dans lesquels la modélisation est difficile voire impossible .
- pour les systèmes contrôlés par des experts humains.
- quand l'observation humaine est à l'origine d'entrées ou de règles de contrôle du système .
- pour les systèmes ayant de nombreuses entrées et sorties continues ou discontinues .
- pour les systèmes ayant des réponses non linéaires .

III.9.3. Principe de la Logique Floue

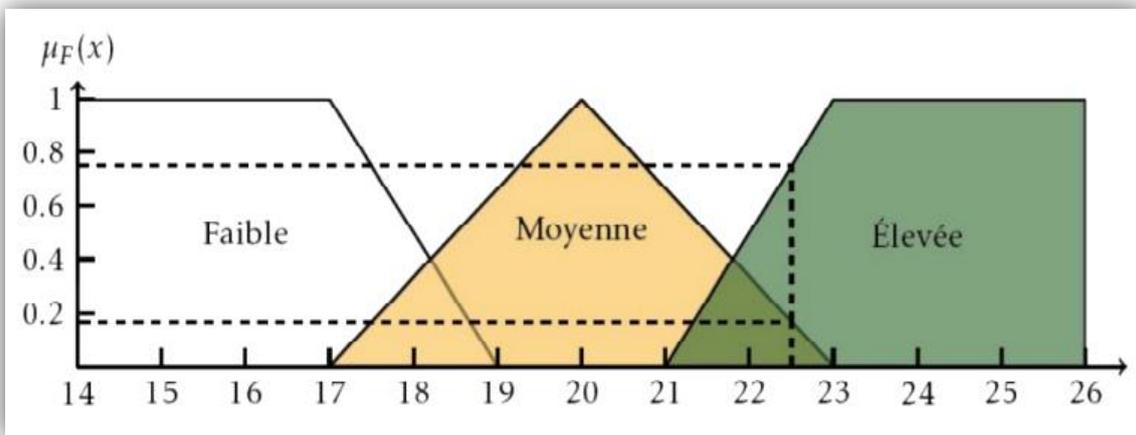
Le principe du réglage par logique floue s'approche de la démarche humaine dans le sens que les variables traitées ne sont pas des variables logiques (au sens de la logique binaire par exemple) mais des variables linguistiques, proches du langage humain de tous les jours. De plus ces variables linguistiques sont traitées à l'aide de règles qui font références à une certaine connaissance du comportement du système. Toute une série de notions fondamentales sont développées dans la logique floue. Ces notions permettent de justifier et de démontrer certains principes de base. Dans ce qui suit, on ne retiendra que les éléments indispensables à la compréhension du principe du réglage par logique floue.

Afin de mettre en évidence le principe de la logique flou, on présente deux exemples de représentation de la température, une en logique classique, et l'autre en logique floue la figure I.1. Selon cette figure, en logique classique, une température de 22.5° est considérée comme "élevée". En logique floue, une température de 22.5° appartient au groupe "moyenne" avec un degré d'appartenance de 0.167, et appartient au groupe "élevée"

avec un degré d'appartenance de 0.75, (et au groupe "faible" avec un degré d'appartenance de 0) [41].



a) Représentation classique



b) Représentation floue

μ : Degré d'appartenance.

Figure (III.19) : Comparaison de l'appartenance de la température en logique classique vs la logique floue

III.9.4.Éléments de base de la logique floue :

Dans cette partie ,on va exposer d'une façon non exhaustive les éléments de base de la logique floue.

III.9.4.1. variables linguistiques et ensembles flous :

La description imprécise d' une certaine situation, d' un phénomène ou d' une grandeur physique ne peut se faire que par des expressions relatives ou floues a' savoir, {grand, petit, positif, négatif, etc.....}.ces différentes d' expressions floues dites ensembles flous forment ce qu'on appelle des variables linguistiques.

Afin de pouvoir traiter numériquement ces variables linguistiques(normalisées généralement sur un intervalle bien déterminé appelé univers de discours) , il faut les soumettre à une définition mathématique à base de fonctions d'appartenance qui montrent le degré de vérification de ces variables linguistiques relativement aux différents sous-ensembles flous de la même classe [41].

III.9.4.2.fonctions d appartenance

Afin de pouvoir traiter numériquement les variables linguistiques, il faut les soumettre à une définition mathématique à base de fonctions d'appartenance qui montrent le degré de vérification de ces variables aux différents sous-ensembles.

Les fonctions d'appartenance peuvent théoriquement prendre n'importe quelle forme, mais en général, les fonctions d'appartenance les plus utilisées sont définies par des formes géométriques ou des fonctions, on cite les suivantes :

Les fonctions d'appartenance sont le plus souvent représentées par les fonctions triangulaire et trapézoïdale, donc par des segments de droite, les fonctions sont alors dites linéaires par morceaux.

Dans la plupart des cas, et en particulier pour le réglage par la logique floue, ces deux formes sont suffisantes pour délimiter des ensembles flous.

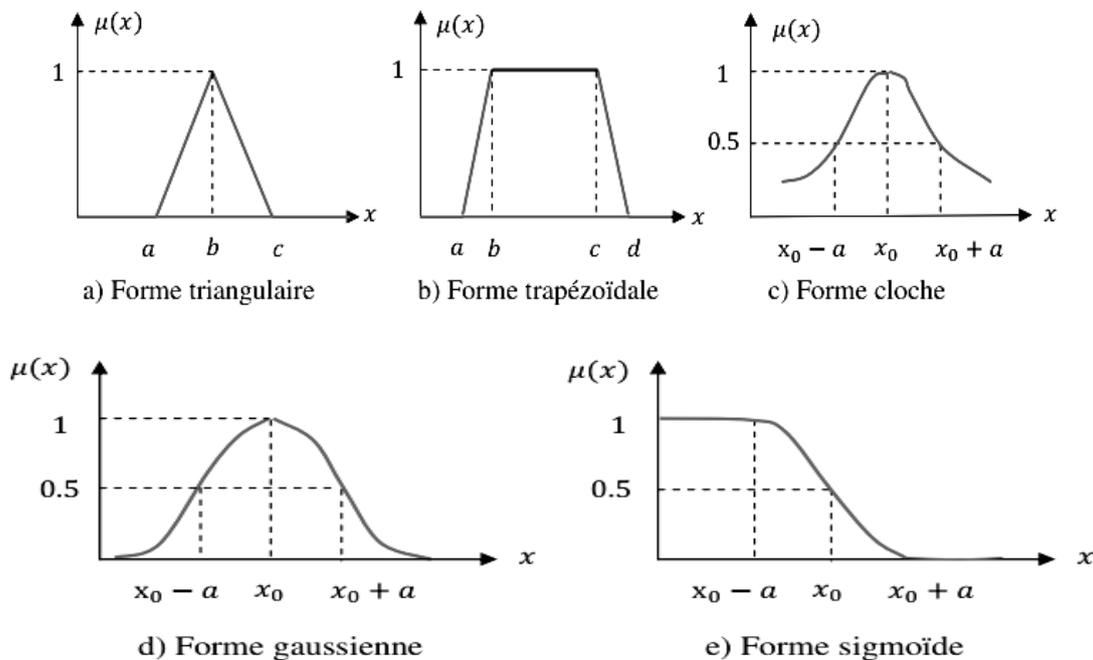


Figure (III.20) :Formes usuelles des fonctions d'appartenance.

Pour certaines situations, les fonctions d'appartenance sont égales à l'unité pour une seule valeur de la variable et égale à 0 pour les autres comme le montre la figure (III.20).

Elles prennent alors le nom de « fonction d'appartenance singleton ». Elle correspond dans le domaine flou à une valeur particulière de cette variable.

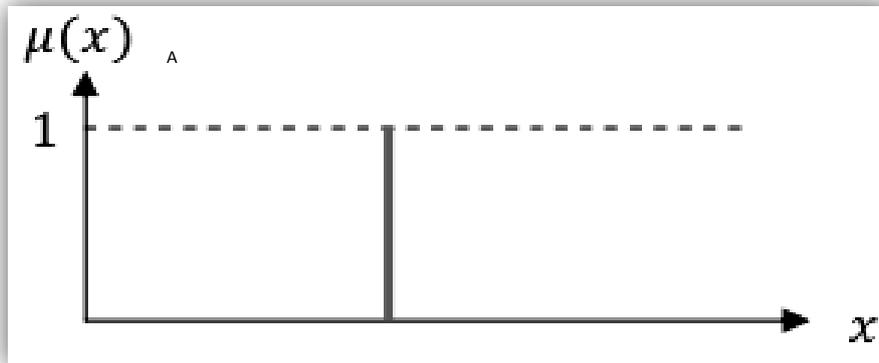


Fig.(III.21) :Fonction d'appartenance singleton.

III.9.4.3 . opérateurs flous :

Les opérateurs flous décrivent comment des ensembles flous interagissent ensemble. On regardera certaines opérations communes, comme le complément, l'intersection et l'union.

- Le complément permet de vérifier de combien un élément n'appartient pas à un ensemble. Comme exemple, si on a l'ensemble des températures élevées, le complément est l'ensemble des températures qui ne sont pas élevées. Si A est l'ensemble flou, son complément : A est

$$\mu_{\neg A}(x) = 1 - \mu_A(x) \tag{III.38}$$

- L'intersection de deux ensembles, en logique floue, est un peu différente des méthodes classiques. On cherche à savoir de combien un élément est-il dans les deux ensembles. On utilise alors la valeur minimale d'appartenance pour calculer l'intersection

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \tag{III.39}$$

- En logique floue, l'union est le contraire de l'intersection. On cherche à savoir de combien un est-il dans l'un des deux ensembles. On utilise la valeur maximale d'appartenance.

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \tag{III.40}$$

La figure III.22 résume ces opérations, de façon graphique :

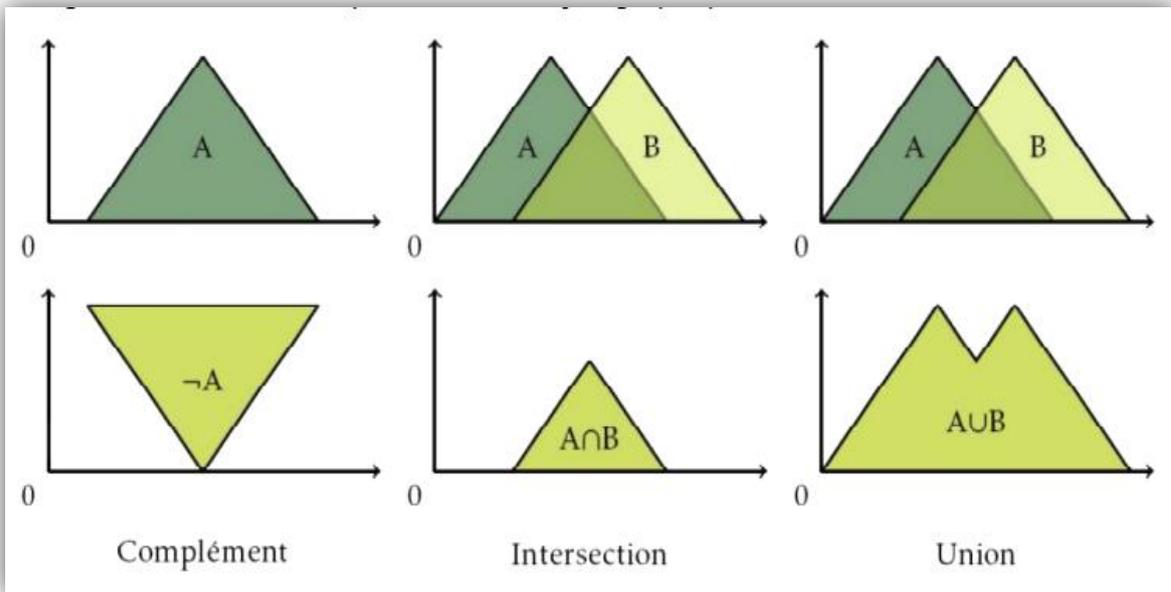


Figure (III.22) : Exemple d'opérations sur des ensembles flous

III.9.5. La Commande par logique Floue

La structure d'un asservissement par un contrôleur flou (fuzzy logic controller FLC) est représentée sur le schéma de la figure (III.23) où on a mis en évidence l'architecture du régulateur flou, celui-ci comprend essentiellement trois modules qui sont :

- Fuzzification ;
- Inférence floue ;
- Defuzzification

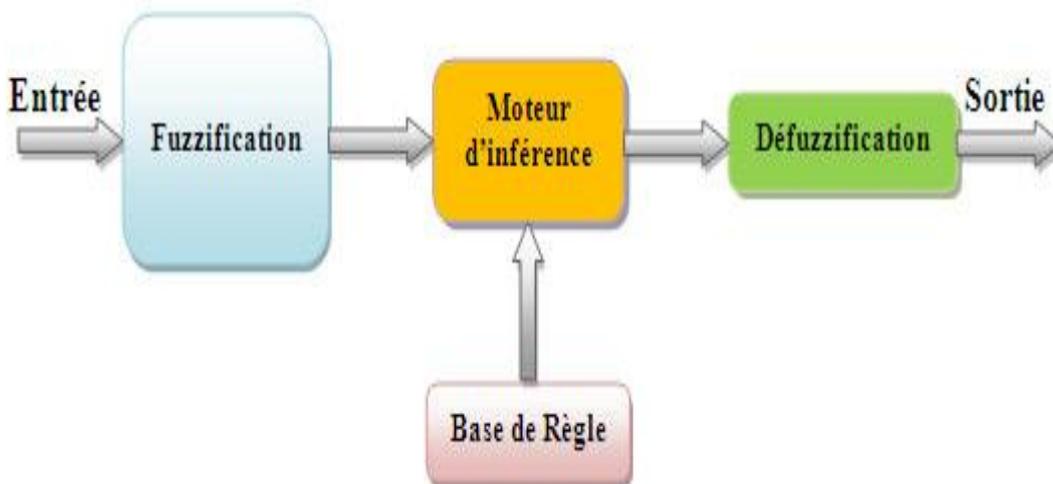


Figure (II.23) Structure générale d'une commande floue.

III.9.5.1. interface de Fuzzification

Cette interface accomplit les fonctions suivantes :

- La définition des fonctions d'appartenances pour les variables d'entrées.
- Le passage des grandeurs physiques en variables linguistiques qui peuvent être ainsi traitées par les règles d'inférences [40].

Il existe deux techniques de Fuzzification :

1. la Fuzzification singleton.
2. la Fuzzification non singleton.

La Fuzzification singleton est la plus utilisée en contrôle, elle interprète un point numérique

μ_0 comme un ensemble flou A dans X, ayant pour fonction d'appartenance $\mu_A(x)$.

Avec :

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x = x_0 \\ 0 & \text{si } x \neq x_0 \end{cases}$$

III.9.5.2. base de règles

La base de règles floues, ou base de connaissances, contient des règles floues décrivant le comportement du système, elle est le cœur du système entier dans le sens où tous les autres composants sont utilisés pour interpréter et combiner ces règles afin de former le système final elle est composée :

1. D'une base de données fournissant les informations nécessaires pour les fonctions de normalisation
2. la base de règle constitue un ensemble d'expressions linguistiques structurées autour d'une connaissance d'expert, et représentée sous forme de règles :

Si <condition> Alors <conséquence>

III.9.5.3.mécanisme inférence floue

L'inférence ou la prise de décision est le noyau du contrôleur flou. Elle a l'aptitude de simuler la prise de décision de l'être humain en se basant sur les concepts flous et l'expertise.

On peut décrire l'inférence de manière explicite par la description linguistique à l'aide d'un certain nombre de règles. Chaque règle possède une condition précédée du symbole SI et une conclusion, action ou opération, précédée du symbole ALORS. Selon la stratégie du réglage adopté. Pour la présentation des différentes possibilités d'exprimer les

inférences, on choisit un exemple de système à régler avec deux variables flou x_1 et x_2 qui forment les variables d'entrées de l'inférence, et une variable de sortie x_r exprimée elle aussi comme variable floue. Les règles d'inférences peuvent être décrites de plusieurs façons.

La description linguistique des inférences peut être écrite comme suit :

SI (x_1 est négatif grand ET x_2 est environ zéro) ALORS (x_r est négatif grand), Où

SI (x_1 est négatif grand ET x_2 est positif moyen) ALORS (x_r est positif moyen)

La condition d'une règle peut aussi contenir des opérateurs OU et NON, et les règles sont déterminées selon la stratégie de réglage adoptée [42].

III.9.5.4. interface de Defuzzification

La Defuzzification a pour rôle de fournir une action physique de contrôle à partir d'une action de contrôle flou, il existe plusieurs stratégie de Defuzzification, les plus utilisées sont :

- La technique du maximum.
- La technique de la moyenne pondérée.
- La technique du centre de gravité.

a. méthode du maximum

La méthode d'inférence max-min est réalisée, au niveau de la condition l'opérateur « ET » par la formulation du minimum. La conclusion dans chaque règle, introduite par « ALORS », lie le facteur d'appartenance de la prémisse avec la fonction d'appartenance de la variable de sortie est réalisé par la formation du minimum. Enfin l'opérateur «OU» qui lie les différentes règles est réalisé par la formation du maximum

b. méthode de la moyenne des maxima

Le défuzzificateur examine l'ensemble flou qui détermine les valeurs pour lesquelles la fonction d'appartenance est maximale, ensuite se fait le calcul de la moyenne des ces valeurs comme résultat de Defuzzification.

c. méthode du centre de gravité

Est plus performante et donne les meilleurs résultats. Elle consiste à déterminer le centre de gravité de la fonction d'appartenance de sortie à l'aide de la relation suivante :

$$\bar{X} = \frac{\int_{-1}^{+1} X \mu_B(X) dX}{\int_{-1}^{+1} \mu_B(X) dX} \quad (\text{III.41})$$

L'intégrale au dénominateur donne la surface, tandis que l'intégrale au numérateur correspond au moment de la surface. [43].

III.9.6. Avantages et Inconvénients du Réglage par Logique Floue: [41]

❖ **Avantage :**

- Pas besoin de modèle mathématique.
- Possibilité d'implémenter des connaissances linguistiques.
- Maîtrise de systèmes à régler avec un comportement complexe.
- Disponibilité des systèmes de développement efficaces, soit pour microprocesseur ou PC « solution logiciel », soit pour les circuits intégrés (processeurs dédiés, fuzzy processors), « solution matérielle »

❖ **Inconvénients :**

- Manque de directives précises pour la conception d'un réglage.
- Les règles doivent être disponibles.
- Approche artisanale et non systématique.
- Aucune méthode formelle pour l'ajustement.

III.9.7. Régulateur à base de la logique Floue.

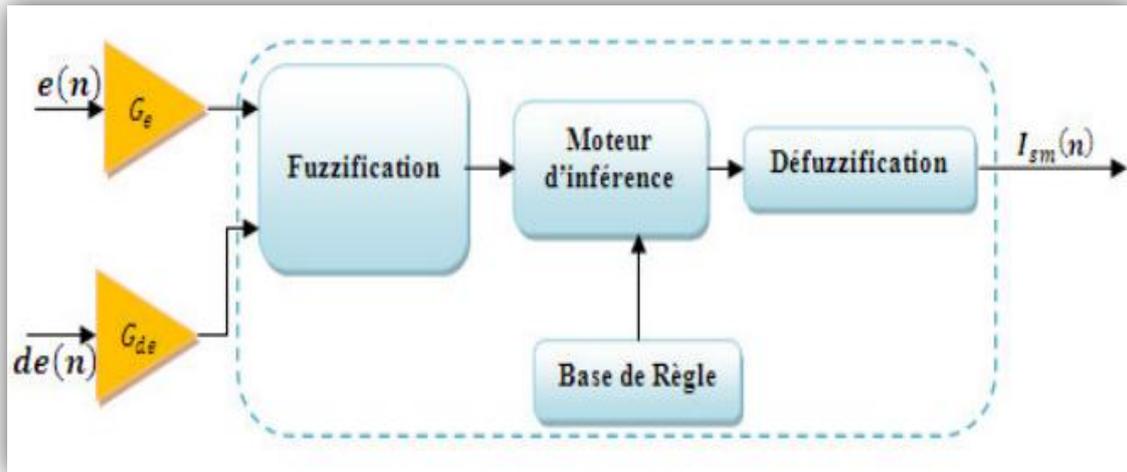
Dans notre travail, le principe de la régulation de la tension du bus continu est le même que celui du régulateur PI, mais cette fois-ci, l'erreur et sa variation sont appliquées à un régulateur intelligent basé sur la logique floue pour obtenir l'amplitude des trois courants de référence nécessaires pour contrôler la tension aux bornes du condensateur.

L'erreur de la tension du bus continu et sa variation sont utilisées comme des entrées du processus flou. Ces deux grandeurs d'entrée sont normalisées à l'aide des gains de normalisation G_e et G_{de} , la sortie du régulateur flou est considérée comme la variation de l'amplitude des courants de référence $I_{sm}(n)$.

Les caractéristiques principales de ce régulateur flou sont les suivantes :

- ❖ Sept ensembles flous pour $e(n)$, $de(n)$ et $I_{sm}(n)$.
- ❖ Les fonctions d'appartenance sont triangulaires.
- ❖ Pour la Fuzzification, nous utilisons l'univers de discours continu.
- ❖ Pour l'implication, nous utilisons l'opérateur minimum de Mamdani
- ❖ Pour la Defuzzification, nous utilisons la méthode de centre de gravité (centroid).

La structure interne du régulateur flou utilisé est montrée sur la figure (III.24) : [42] [43].



Figure(III.24) :Structure interne du régulateur flou

La logique floue sert à représenter incertain et la connaissance imprécise du système, tandis que contrôleur logique floue Laisse prendre une décision même si nous ne pouvons pas estimer des entrées et les sorties seulement des attributs incertains , [39].

Les règles linguistiques pour le contrôleur logique floue et la variation des entrées (e) et (de) qui fait la décision en sortie du contrôleur suivent les règles donner dans le tableau

Tableau (III. 4) : Table des règles d'inférence.

$e \backslash de$	NB	NS	Z	PS	PB
NB	NB	NB	NS	NS	Z
NS	NB	NS	NS	Z	PS
Z	NS	NS	Z	PS	PS
PS	NM	Z	PS	PS	PB
PB	Z	PS	PS	PB	PB

1. si l'erreur est négative grand (NB) et taux d'erreurs est négatif grand (NB) alors la production est grand négatif,

2. si est l'erreur négatif grand (NB) et le taux d'erreurs est négatif petit (NS) alors la production est négatif grand (NB), Comme dans ces deux cas le tableau (III.4) représente les 25 cas de la sortie.

La figure (III.25) et la figure (III.26) représente les fonctions d'adhésion des variables d'entrées (input1, input2) et de la sortie (output1).

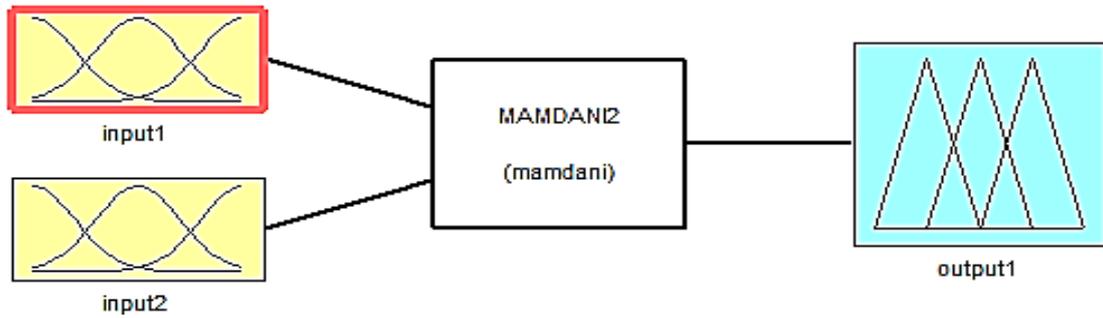


Figure (III. 25) : la fonction d'adhésion de l'entrée et sortie.

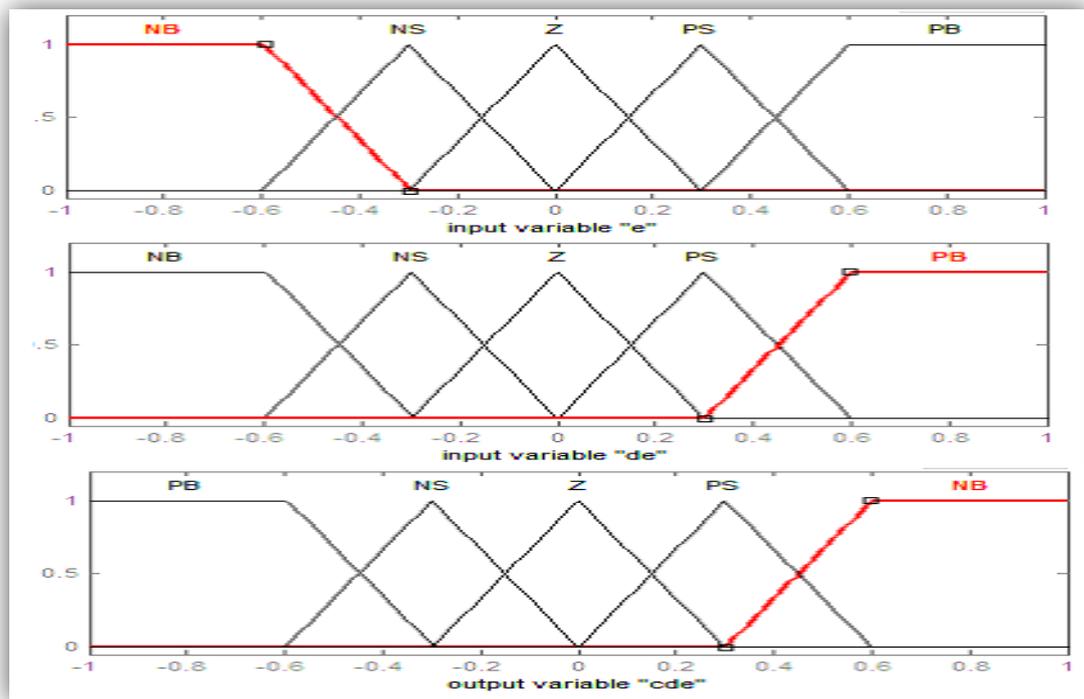


Figure (III. 26) : Fonction d'adhésion des variables d'entrées (e,de) et de sortie (cde).

Figure suivante montre le diagramme de bloc du contrôle proposé plan du filtre active parallèle Controller par la logique floue, qui possède deux entrées : [43] ..

L'erreur (e), ($e=I_{ref}-I_f$) et son dérivé (de/dt), et un produit : la commande (cde).

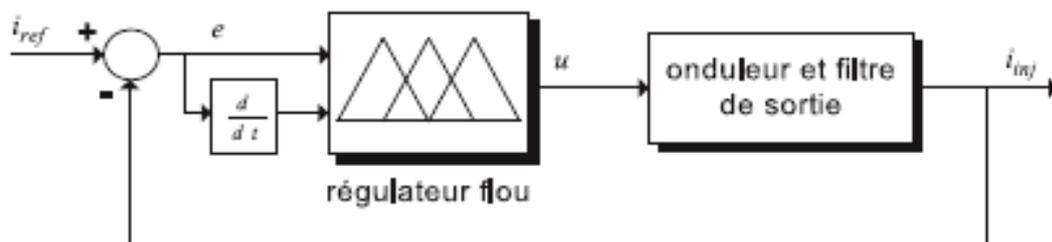
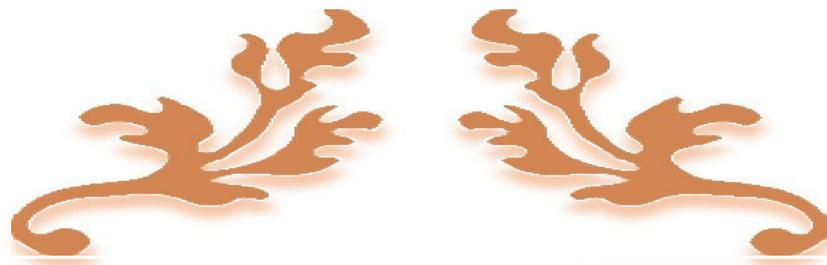


Figure (III. 27) : Diagramme synoptique du contrôleur logique floue.

III.10 . Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté le principe du filtre actif parallèle comme une solution de dépollution des réseaux électriques des courants perturbateurs comme le courant harmonique, la partie puissance et la partie commande ont été présentée d'une manière détaillée. Nous avons présenté successivement l'onduleur tension de deux niveaux ainsi que l'élément de stockage et le filtre de sortie pour la partie puissance et les techniques de commandes de l'onduleur pour la partie commande. constituée d'un circuit d'identification des courants perturbés d'une commande pour l'onduleur et de la partie régulation appliquée au élément de stockage d'énergie. Ainsi, nous avons présenté la méthode pour déterminer les courants d'harmonique pour le contrôle ou commande dans notre système, on a vu aussi la commande de l'onduleur alimenté de source continue de régulation de la tension continue, comme l'onduleur, l'élément de stockage et le filtre de sortie.

Nous avons modifié la méthode classique des puissances instantanées en application directement les FAP aux courants mesurés de la charge non linéaire et de remplacer le contrôleur PI du bus continu par un régulateur basé sur la commande par la logique floue. Les résultats de simulation de comparaison des deux méthodes, Ces résultats ont été obtenus à l'aide du logiciel Matlab/Simulink en utilisant également la toolbox « *SimPowerSystem* » qui est présenté dans ce chapitre suivant.



Chapitre: IV

*Résultats de simulation sous
Matlab-Simulink*

IV .1. Introduction

Après avoir étudié les différentes topologies, algorithmes de détection des grandeurs harmoniques de références, les stratégies de commande et de régulation de filtre actif parallèle et voir l'application de l'optimisation par l'intelligence artificielle comme l'algorithme de colonie des fourmis dans les chapitres précédents, on va présenter toutes les étapes d'applications ainsi que leurs simulations dans ce sujet

etape1 : réseau électrique alimente une charge non linéaire avant application de toute opération de filtrage.

Etape2 : réseau électrique alimente une charge non linéaire avec filtre actif parallèle a commande classique (régulateur pi).

Etape3 : réseau électrique alimente une charge non linéaire avec filtre actif parallèle a commande optimisée par l'intelligence artificiel(régulateur flou).

Etape4 : Etudes Comparatives Entre les Méthodes de Commande

IV.2. Simulation numérique sous Matlab Simulink

Dans cette partie, nous présenterons les résultats de simulation obtenus pour les trois méthodes d'identification des courants de référence précédemment étudiées, à savoir la théorie p.q.

La charge polluante est constituée par un pont redresseur triphasé à diodes et le réseau d'alimentation est un réseau triphasé. Le réseau d'alimentation est modélise par phase par une f.é.m. sinusoïdale en série avec une inductance (L_s) et une résistance (R_s) caractérisant l'impédance de court-circuit du réseau, voir Fig(IV.1) .

Le redresseur débite dans une charge (RL). L'inductance (L_c) et la résistance (R_c) a l'entrée du redresseur modélisent l'impédance de ligne et les éventuelles inductances additionnelles mises en œuvre pour limiter les variations de courant. Un filtre actif parallèle triphasé à structure tension, Pour la commande de l'onduleur du filtre actif parallèle, nous avons utilisé la commande par puissances instantanées.

Tableau (IV.1) : 1. Les paramètres de simulation sont rassemblés dans le

Réseau d'alimentation						
paramètre	Vs(v)	F(Hz)	Rs(mΩ)	Ls(mH)	Rc(mΩ)	Lc(mH)
valeurs	380	50	0.42	2.3	1	1
Charge non-linéaire						
paramètre	Rch(Ω)			Lch(mH)		
valeurs	20			0.8		
Filtre actif parallèle						
paramètre	Vdc(v)	Cdc(mF)	Lf(mH)	Rf(m)		
valeurs	850	300	0.55	1.1		

IV.3.etape1 : réseau électrique alimente une charge non linéaire avant application de toute opération de filtrage.

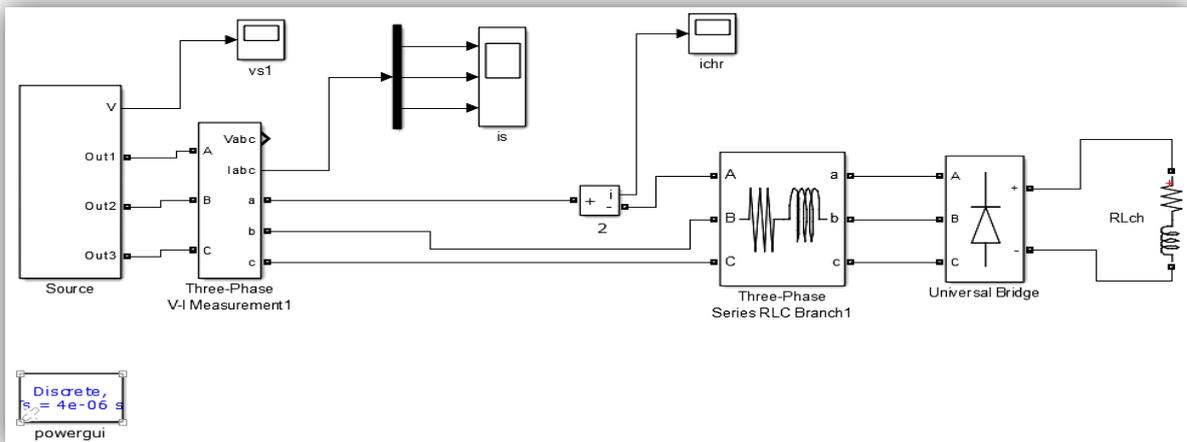


Figure (IV.1) : réseau électrique alimente une charge non linéaire

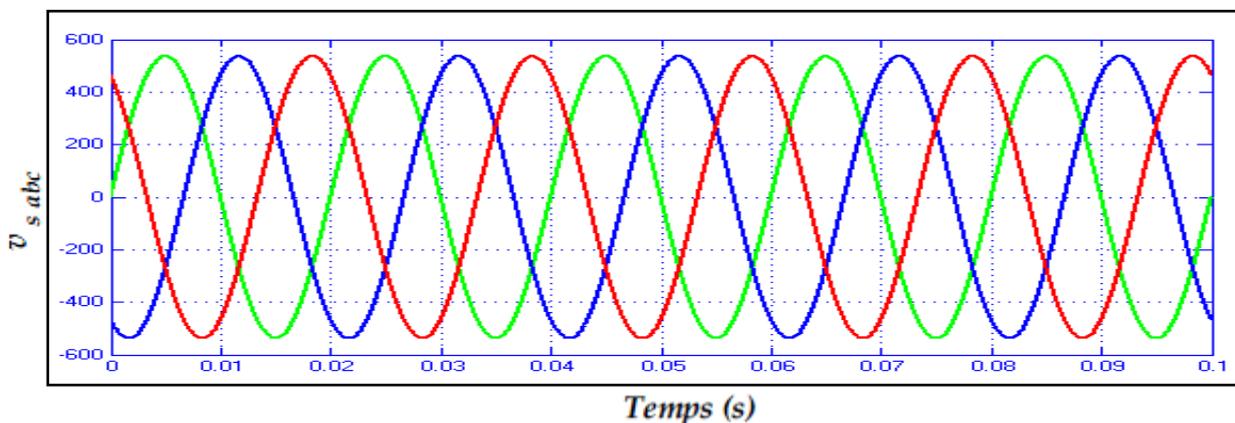


Figure (IV. 2)Tensions trois phases de source pour une charge non linéaire

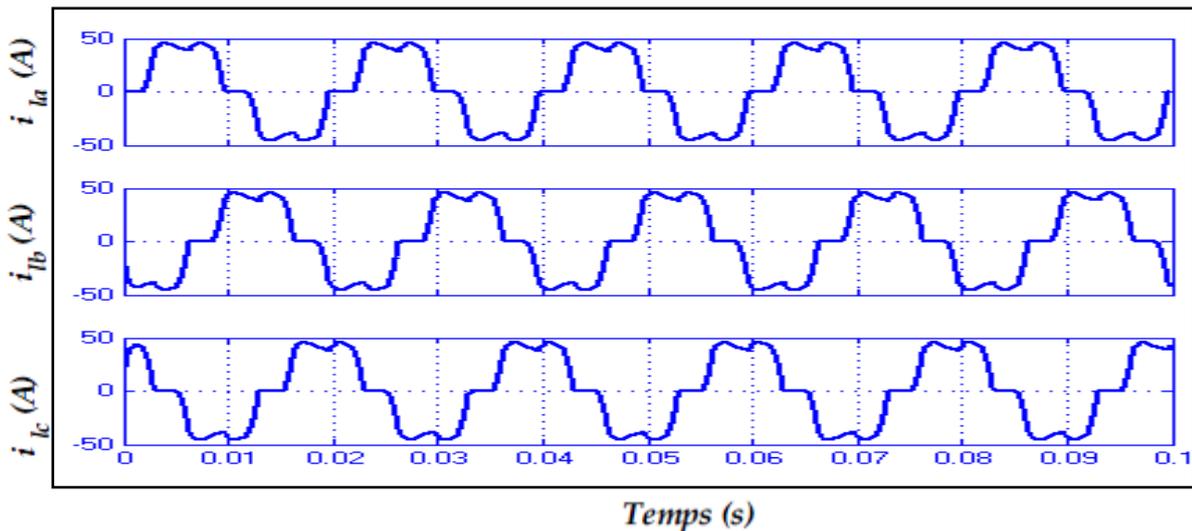


Figure (IV.3) Courants des trois phases du rése au électrique avant l’injection du filtre

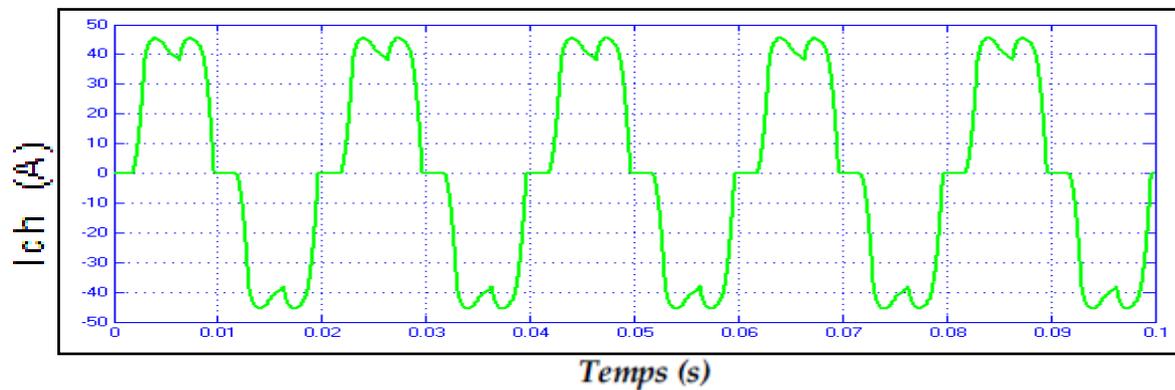


Figure (IV.4) : Courants des du char ge non linaire avant l’injection du filtre

On r emarque que la charge non linéaire génère des courants non sinusoïdaux qui provoquent La pollution du réseau étudié; En effet, on constate des déformations dans l’onde du courant de source qui perdre sa forme sinusoïdale.

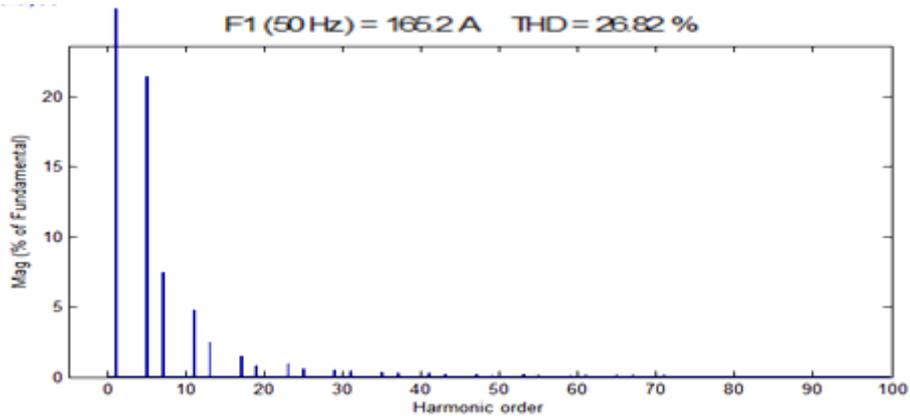


Figure (IV.5) : Spectre de la courante source avant filtre.

Le taux de distorsion d'harmonique a été mesuré sur deux périodes nous remarquons que le THD=26.82%

IV.4.Etape2 : réseau électrique alimente une charge non linéaire avec filtre actif parallèle à commande classique.

- ✓ Le régulateur PI classique qui est présenté par sa fonction de transfert $G_s(s)$ ce dernier est utilisé dans notre système de filtrage pour stabiliser la tension de Vdc .
- ✓ Les valeurs des paramètres K_p et K_i utilisés pour le régulateur PI ont été définies par la méthode classique de calcul de Nicolson-Zigler. $K_p=100$, $K_i=40$.

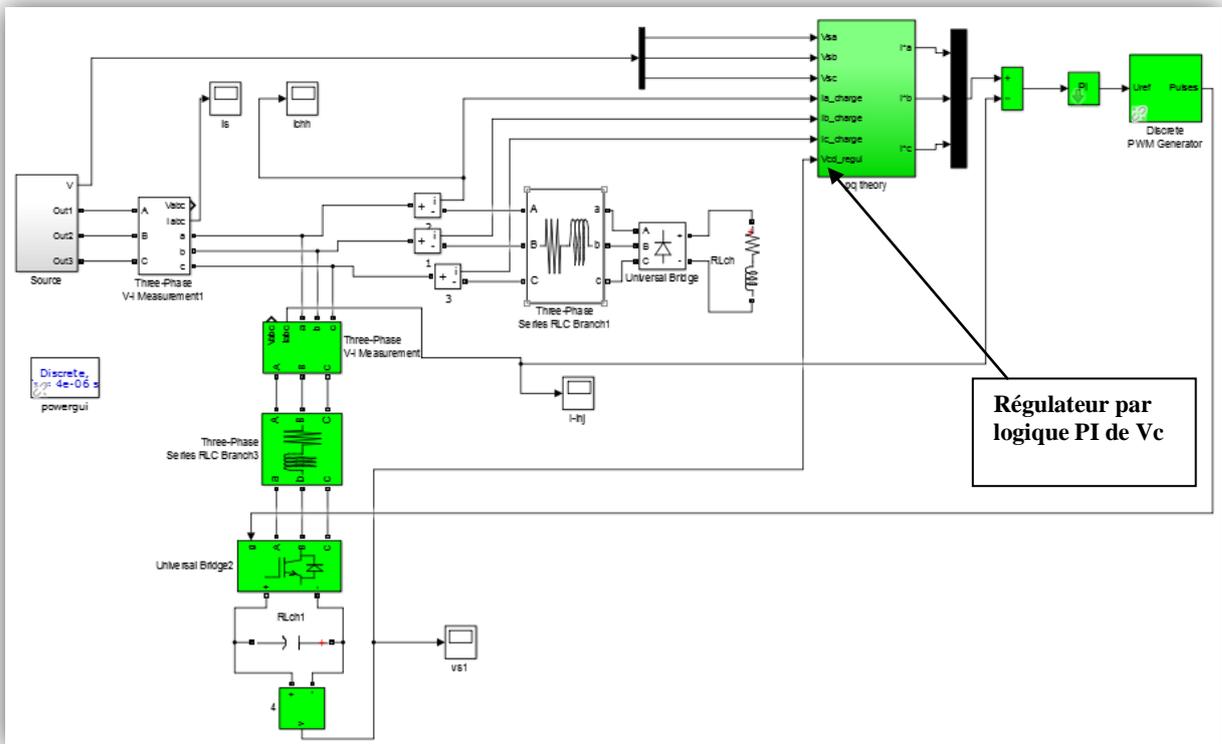


Figure (IV.6) : réseau électrique alimente une charge non linéaire avec FAP à commande classique

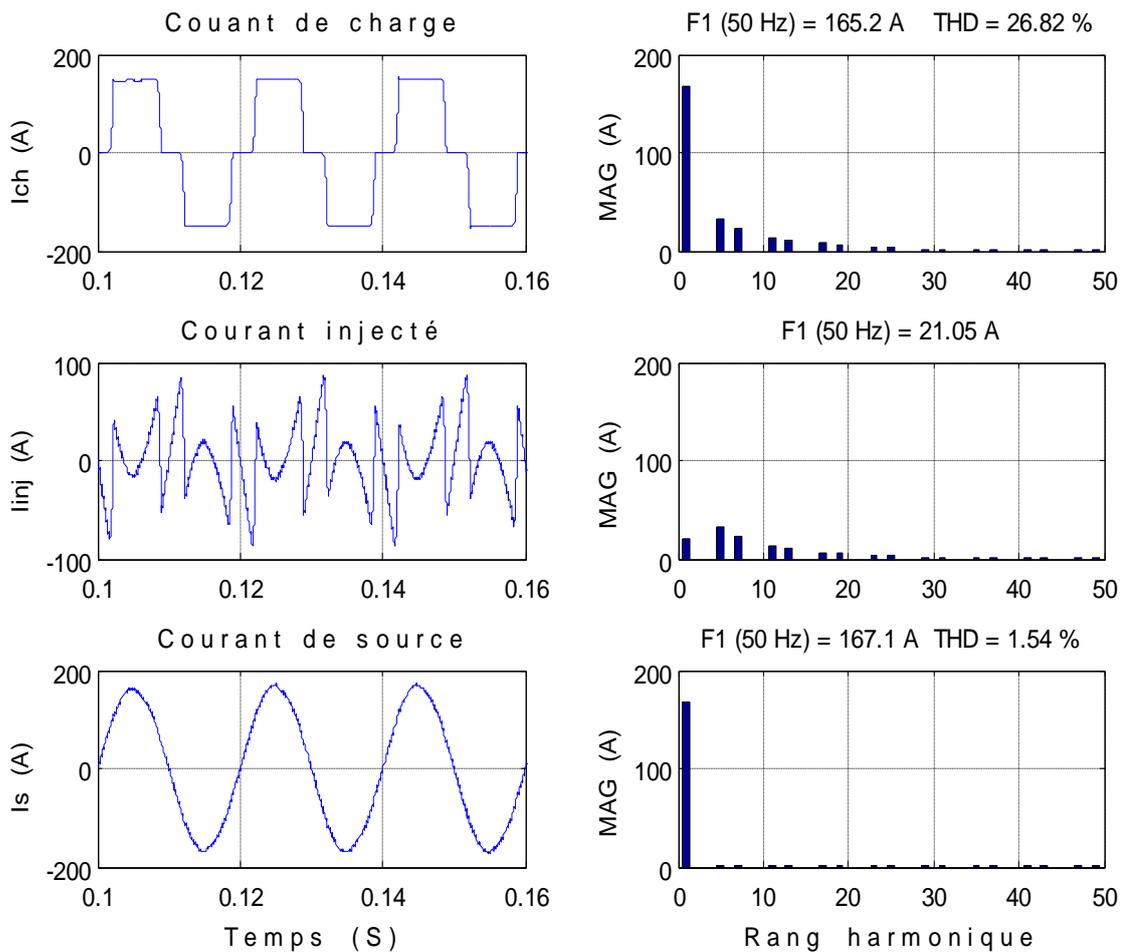
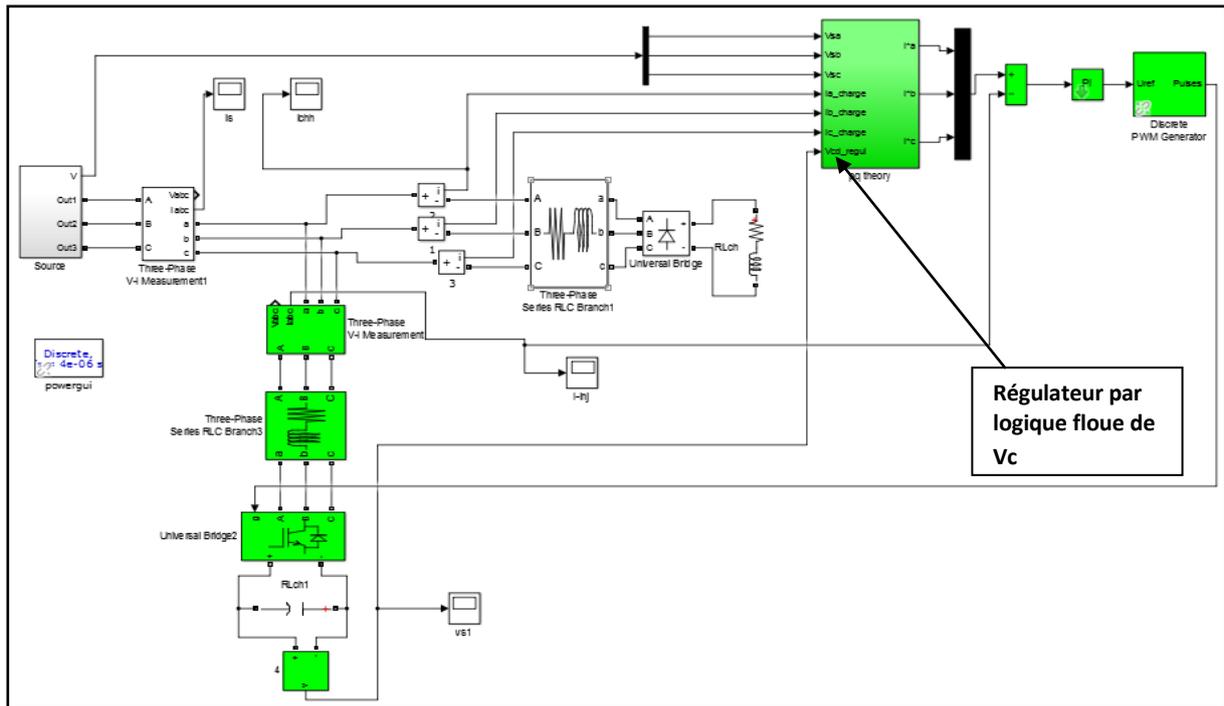


Figure. IV.7 : Compensation des courants harmoniques utilisant le régulateur PI en présence d'une tension de source distordue et la décomposition spectrale

Les figures (IV.7) présentent l'analyse spectrale des courants de la charge non linéaire et de source de la phase A. Le THD du courant de la charge non linéaire est de 26.82% et de 1.54% pour le courant de source, ce qui donne une bonne qualité de filtrage.

IV.5.Etape3 : réseau électriques alimente une charge non linéaire avec filtre actif parallèle à ω commande intelligente (régulation par logique floues)

- ✓ Le régulation par logique floues intelligente utilise dans notre système de filtrage pour stabiliser la tension de Vdc .
- ✓ Les valeurs des paramètres K_p et K_i utilisés pour le régulateur par logique floues ont été définies par la méthode classique de calcul nicol zigler. $K_p=130$, $K_i=15$



Figure(IV.8) : Réseau électrique alimente une charge non linéaire à par FAP à commande par Régulation flou

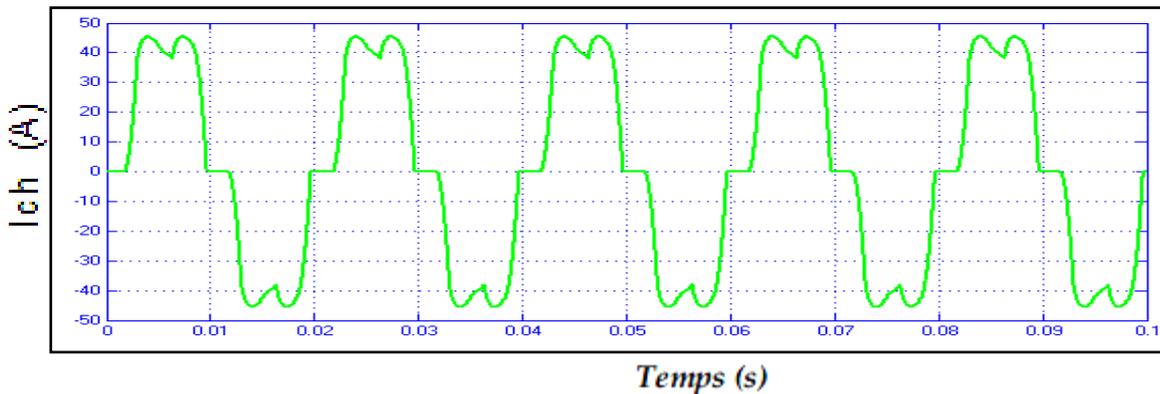


Figure (IV.9) : Courants des du char ge non linéaire avant l'injection du filtre

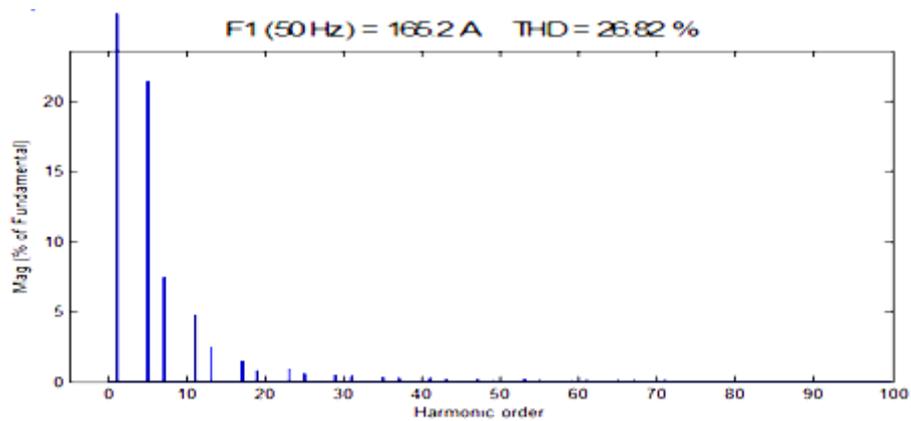


Figure (IV.10) : Spectre de la courante du charge non linéaire avant filtre.

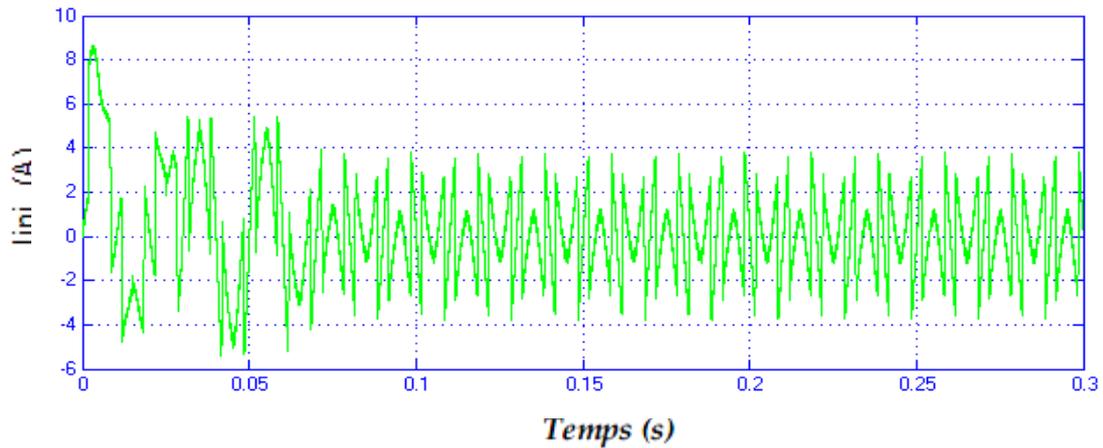


Figure (IV.11). Courant harmonique injecté par le FAP

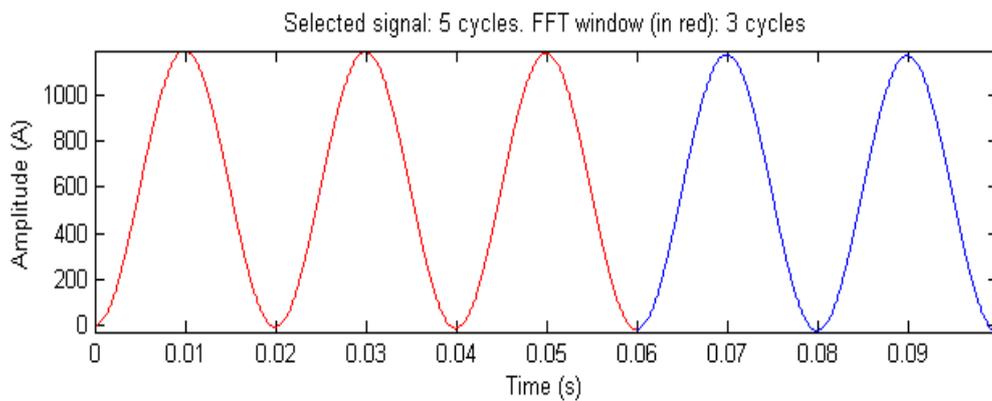


Figure (IV.12) : courante source après filtre.

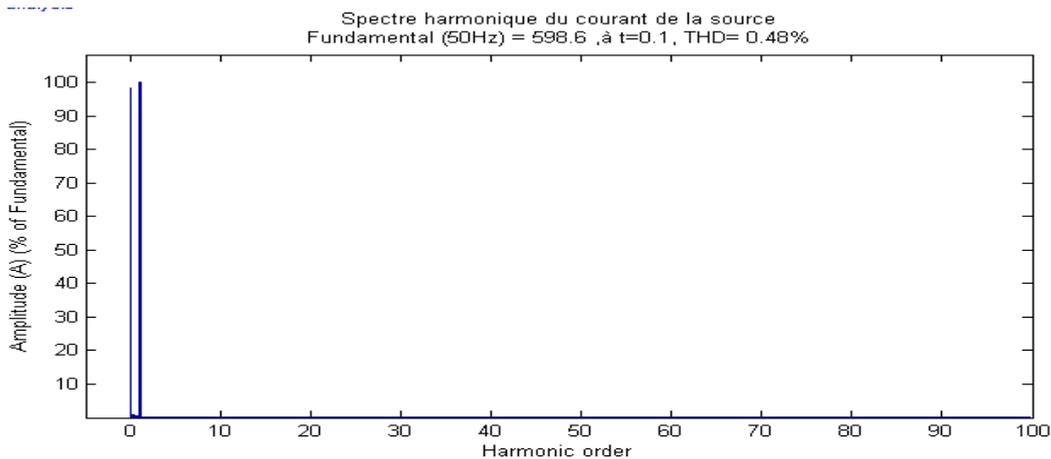
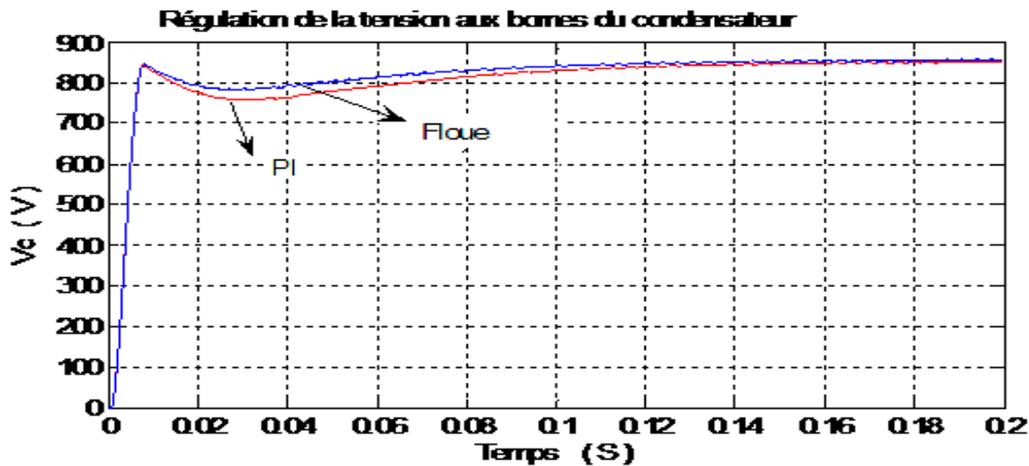


Figure (IV.13) : Spectre de la courante source après filtre.

Les figures (IV.9) et (IV.10) présentent l'analyse spectrale des courants de la charge non linéaire et de source de la phase A. Le THD du courant de la charge non linéaire est de 26.82% et de 0.48% pour le courant de source, ce qui donne une bonne qualité de filtrage.

IV.6. Etudes comparaison entre les deux stratégies de commande

La comparaison entre les deux stratégies de commande se fait en tenant compte que les paramètres du filtre actif parallèle sont identiques le changement se fait seulement par remplacer le régulateur PI par le Régulation flou.



Figure(IV.14) : Régulation de la tension continue V_c par la commande PI et floue.

Le dépassement de la tension V_{dc} (bus continu) est représenté dans l'allure de la figure 13 ou l'action du régulateur Flou est meilleure que celle du régulateur PI.

Tableau IV.2 Comparaison des indexes de performance : entre le régulateur Flou et régulateur PI.

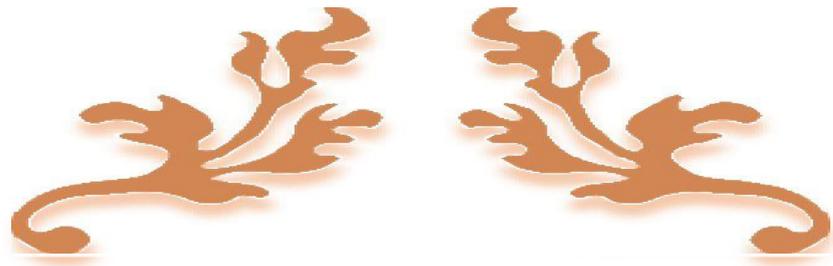
	Régulation PI	Régulation floue
THD Avant filtrage	26.82%	26.82%
THD après filtrage	1.54%	0.48%
Ki	40	15
Kp	100	130
Temps de réponse à 5% (sec)	10	6
Temps de montée (sec)	0.007	0.005
Dépassement	50.1	39

On remarque que le taux d'harmonique du courant du réseau avant le filtrage est très élevés par rapport au courant après le filtrage .

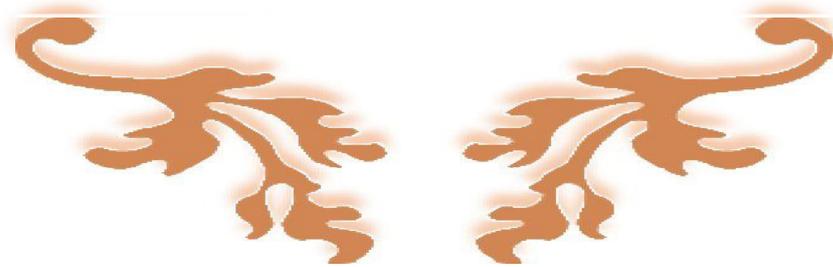
On constate que la compensation des courants harmoniques en commande logique a base logique floue est légèrement meilleure que celle de la commande à par régulateur PI dans le point de vue spectrale d'après le tableau (IV.1), la régulation par logique floue caractérise par un traitement stricte des signaux dans un intervalle courte.

IV.7.Conclusion

Dans ce chapitre, on a étudié les performances des algorithmes de commande du filtre actif parallèle appliqué sur la charge non linéaire. La méthode d'identifications des harmoniques est très important pour la qualité de filtrage du courant, Les résultats de simulation montrent l'efficacité de la „ méthode des puissances instantanées“ à identifier les courants harmoniques, afin qu'ils soient filtrés. La commande par logique floue est meilleur pour la qualité de filtrage par rapport au régulateur PI, la commande de l'onduleur une ou deux porteuse n influence pas beaucoup sur le courant après le filtrage.



CONCLUSION GENERALE



Conclusion générale

Ce travail a été consacré à l'application et l'amélioration des performances d'un filtre actif parallèles pour l'amélioration de la qualité de l'énergie dans un réseau électrique avec du filtre neutre, avec objectif de maintenir un système de courants triphasé du côté de source sinusoïdal et équilibré ou d'autres termes, découpler les perturbations causées par les charges non linéaire du réseau électrique.

Dans le premier chapitre nous avons présenté différents types de perturbations affectant l'onde de tension du réseau électrique comme nous avons pu le constater ensemble des phénomènes perturbations come les harmonique et les déséquilibres.... ; ont des effets néfastes sur les Équipements électriques.

Nous avons constaté l'importance de déférentes solutions du filtrage qui est solution classiques et traditionnelle et l'avantagé et l'in convions de chaque types de solution.

Le deuxième chapitre étudié le topologies de filtres actif, Ils peuvent être connectés en Parallèle ou en série avec le réseau.

Les solutions classiques, notamment le filtrage passif l'optimisation des topologies des convertisseurs, les transformateurs à couplage spécial et autres, ne sont plus suffisantes pour la dépollution. le filtre actif est de plus souvent utilisé comme filtre harmonique en plus des solutions classiques.

Dans le troisième chapitre nous avons présenté le principe du filtre actif parallèle comme une solution de dépollution des réseaux électriques des courants perturbateurs comme le courant harmonique, la partie puissance et la partie commande ont été présente d'une manière détaillé Nous avons modifié la méthode classique des puissances instantanées en application directement les FAP aux courants mesures de la charge non linéaire et de remplacer le contrôleur PI du bus continu par un régulateur base sur la commande par la logique floue .

les résultats de simulation de comparaisons deux méthode, ces résultats ont été obtenus à l'aide du logiciel Matlab/Simulink en utilisant également la tombaux « SimPowerSystem ».

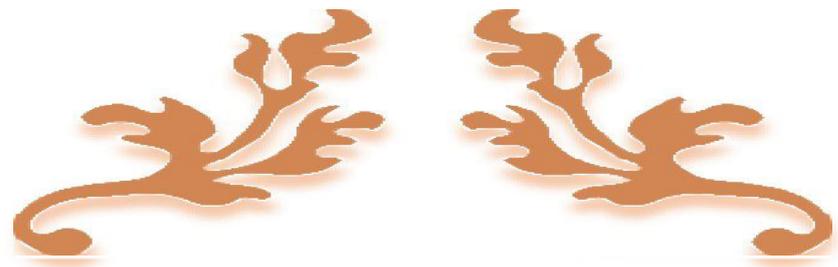
Dans le chapitre quatre on a étudié les performances des algorithmes de commande du filtre actif parallèle appliqué sur la charge non linéaire , la méthode d'identifications des harmoniques est très importante pour la qualité de filtrage du courant .

Le contrôle de courant par régulation PI et logique floue plus important pour bon courant donc bon qualité d'énergie.

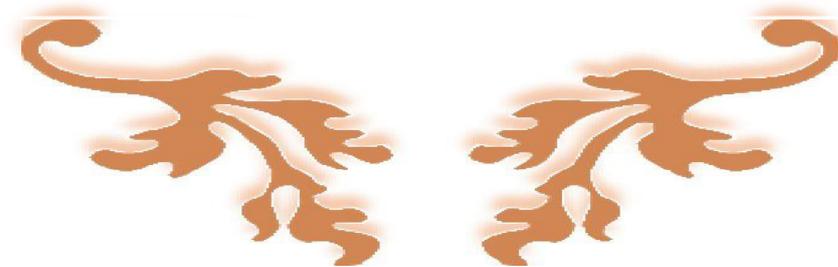
D'après les résultats de simulations nous avons constaté, quand changer la valeur de filtre active, le niveaux de résultat s'améliorent, le THD et le courant de ligne tend de plus en plus a une sinusoïde (THD=0,48) mais le mieux résultat c'est par régulation logique floue.

Le travail présenté dans ce mémoire ouvre un certain nombre de perspectives recherche qui nous apparait utile de citer :

- utiliser multi niveaux pour le filtrage lisation des ondule.
- utiliser commande adaptative dun filtre actif.
- Extension de cette étude vers les filtres hybrides.



BIBLIOGRAPHIE



Bibliographie

- [1] ALALI MOHAMED ALAA EDIN, «contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques», thèse de doctorat en génie électrique, université louis pasteur ulp, (france) 2002.
- [2] MOUSSA OUSSAMA « etude des harmoniques et techniques de commandes du filtre actif» thèse de magister en électrotechnique option : commande électrique ,université de batna 2
- [3] OMEIRI AMAR « simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant » thèse de doctorat en sciences option : commande électrique, université badji mokhtar- annaba , 2007.
- [4] LAHMADI OUARDA « contribution à l'identification et la commande d'un filtre actif parallèle par des techniques neuromimétiques » thèse de doctorat en sciences option : réseaux électriques, université de batna 2, 2017.
- [5] LAIB HICHEM « contribution par une nouvelle approche modulaire au filtrage actif des harmoniques dans les réseaux électriques de distribution » thèse de doctorat en sciences en électrotechnique option : réseaux électriques, université de batna 2017
- [6] PH. FERRACCI ' la qualité de l'énergie électrique 'cahier technique schneider electric n199,p.11
- [7] HARICI OTMANE « etude d'un filtre actif à commande intelligente » doctoral de génie électrique ,option : réseaux électriques, université des sciences et de la technologie d'oran, 2012
- [8] « electrotechnique theodore wildi » d' hydro québec 3eme édition, page739
- [9] SANAE RECHKA « étude de méthodes de filtrage harmoniques dans les réseaux électriques de distribution » université du québec à trois-rivières avril 2002
- [10] MIDOUNE NASREDDINE , HIKA EL-MEHDI «étude par simulation des effets des harmoniques et de la puissance réactive sur le réseau électrique» master académique spécialité : réseaux électriques université kasdi merbah ouargla 2016
- [11] AMAIA LOPEZ DE HEREDIA BERMEO, « commandes avancées des systèmes dédiés à l'amélioration de la qualité de l'énergie : de la basse tension à la montée en tension» thèse de doctorat, institut national polytechnique de grenoble, 14 novembre 2006.
- [12] DJAFFAR OULD ABDESLAM. « techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques: application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension» doctoral de génie électrique université de haute alsace - mulhouse, 2005.

Bibliographie

- [13] KEBIRI SAMIA «modélisation et simulation d'un filtre actif multi niveau», mémoire de magister, université mouloud mammeri, tizi-ouzou, 2009.
- [14] ROUABAH BOUBAKEUR «Commande d'un Convertisseur Multicellulaire Pour une Application de Filtrage Actif», Mémoire de Magister, Université ferhat abbas – setif-1, 2012.
- [15] BOUZIDI MANSOUR «Stratégies de contrôle direct de puissance associées des commandes non linéaires d'un filtre actif parallèle multiniveaux », Mémoire de Magister, Université Djilali Liabes de sidi-bel-Abbes.
- [16] MUSTAPHA SARRA «contribution a l'étude des filtres actifs hybrides», thèse de doctorat en sciences, l'université de setif.
- [17] S. Kerrouche, 'Développement et implémentation d'un système de filtrage actif de puissance à base d'onduleur triphasé ', Mémoire de magister, Université Ferhat Abbas Sétif (UFAS), Algérie, 2009.
- [18] DOUKHI NACER « contribution à l'étude de la qualité de l'énergie » mémoire de magister option : réseaux électriques , université el-hadj lakhder batna 2016
- [19] T.DEFLANDRE, P.MAURAS, « les harmoniques sur les réseaux électriques ».
- [20] SEDDIK BACHA « méthodes d'analyse de la qualité de l'énergie électrique. application aux creux de tension et à la pollution harmonique. » thèse docteur de université joseph-fourier - grenoble i, 2006.
- [21] TLILI ABDENACER BOUARI AHMED « etude et simulation d'un filtre actif parallèle en utilisant un onduleur à trois niveaux avec la commande mli vectorielle » mémoire master spécialité : machines électriques universite kasdi merbah ouargla09/06/2015
- [22] KHEIRA HEMICI « commande d'un compensateur actif série à base d'un onduleur à cinq niveaux » magister en electrotechnique ecole doctorale option : réseaux électriques universite hassiba ben bouali de chlef 2010/2011
- [23] MOHAMAD ALAA EDDIN ALALI « contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension » docteur de l'université louis pasteur – strasbourg i discipline : génie électrique
- [24] BELHAOUCHET NOURI «< fonctionnement à fréquence de commutation constante des convertisseurs de puissance en utilisant des techniques de commande avancées>> thèse de doctorat, universite ferhat abbas – setif, 2011.

Bibliographie

[25] GHADBANE ISMAIL « etude et réalisation d'un filtre actif parallèle en utilisant différentes stratégies de contrôle » thèse doctorat université mohamed khider – biskra 05/05/2016

[26] STEEVE BEAULIEU « etude et mise au point d'un filtre actif d'harmoniques en vue d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique » memoire presente comme exigence partielle de la maîtrise en ingénierie universite du quebec a chicoutiml mai 2007

[27] BENGOURINA MOHAMED RIDA « etude et mise au point d'un filtre actif parallele d'harmoniques en vue d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique » memoire magister option : reseaux electriques université des mohamed boudiaf oran 2012

[28] M. FATIHA, “étude et commande d'un filtre actif parallèle à structure de tension”, mémoire de magister, univ. oran, octobre 2001.

[29] MOHAMED MUFTAH ABDUSALAM, ‘ Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales ’ thèse de Doctorat de l'université de Poincaré Nancy-I, 2008.

[30] ABDELMADJID CHAOUI ‘ Filtrage actif triphasé pour charges non linéaire ’ thèse de Doctorat de l'université de Sétif, 2010.

[31] salim mouttou « nouvelles approches de commande d'un filtre actif parallèle à source de courant » thèse université du québec à trois-rivières octobre 2002.

[32] RAMADAN A. EL SHATSHAT, ‘A Novel Modular Approach to Active Power-Line Harmonic Filtering in Distribution Systems’, A thesis presented to the University of Waterloo in fulfillment of the thesis requirement for the degree of Doctor of Philosophy in Electrical and Computer Engineering Waterloo, Ontario, Canada, 2001.

[33] BOUROUROU FARES « adaptativité de la machine synchrone au filtrage actif des harmoniques de tension » magister specialite : électrotechnique universite du 20 août 1955 – skikda faculte de technologie2005

[34] Principes de Compensation des harmoniques, cours électronique de puissance avancée (année2008)http://elearning.univeloued.dz/courses/EPA02/document/Cours_Master2_Chapitr_eII.pdf

[35] B.SAMIR, « Filtrage actif parallèle des réseaux électriques avec compensation de l'énergie réactive » , Thèse ingénieur d'état en génie électrique Université Msila 2007.

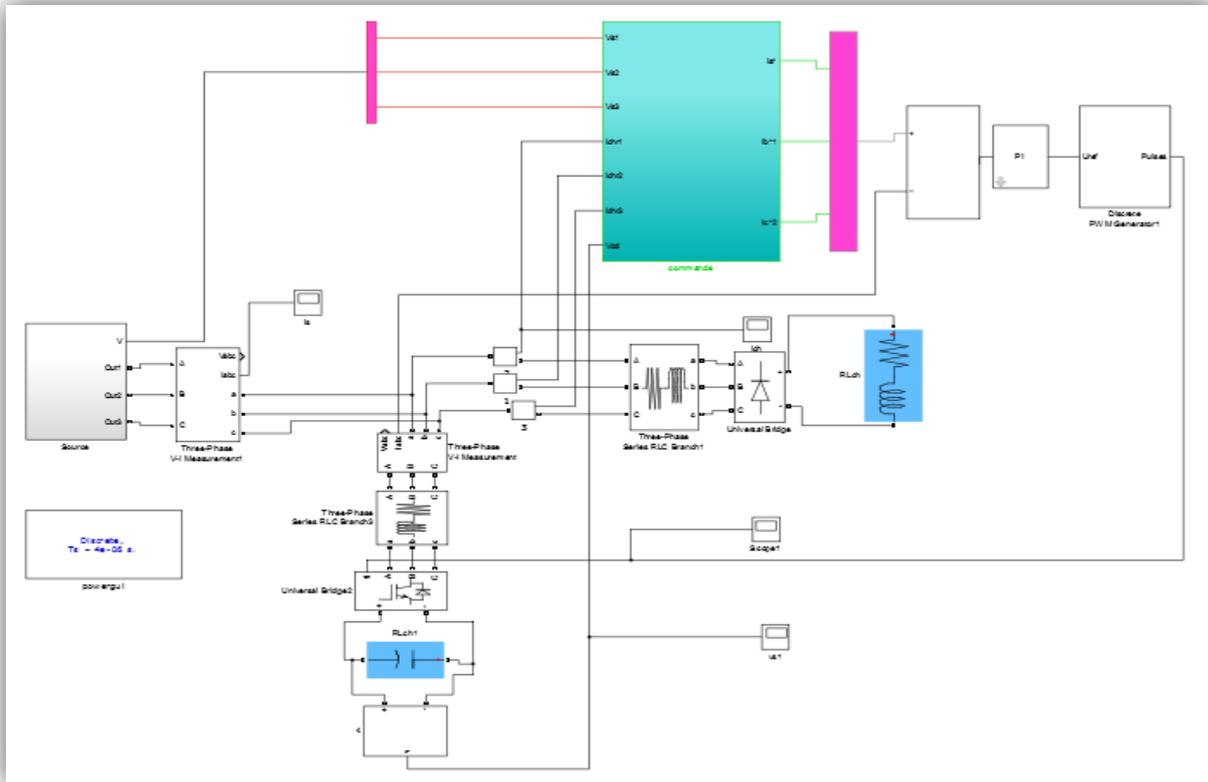
[36] KAMEL DJAZIA, « Etude des filtres actifs pour réseaux déséquilibrés et distordus ». THESE DE DOCTORA Electronique Université SETIF 1 , 2015

Bibliographie

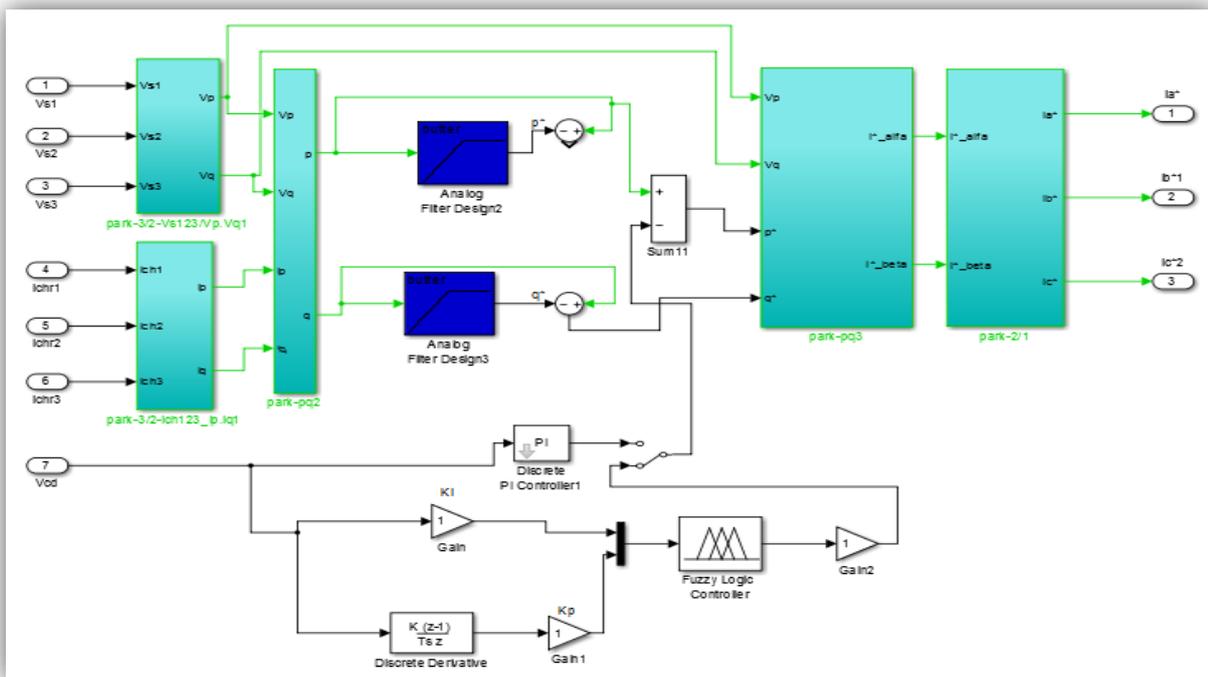
- [37] ABDELFETTAH BOUSSAID, «les Filtrage actif des harmoniques dans les réseaux électriques. Contribution à l'amélioration de l'énergie électrique », université des constantine these de doctora Electronique , 05n 01 n 2017
- [38] GHADBANE ISMAIL « etude et réalisation d'un filtre actif parallèle en utilisant différentes stratégies de contrôle » thèse doctorat en spécialité: electrotechnique université mohamed khider – biskra 2016
- [39] MOHAMAD ALAA EDDIN ALALI «contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux electriques basse tension » thèse doctorale spécialité electrotechnique l'université louis pasteur – strasbourg i septembre 2002
- [40] « qualité de la tension qualité de l'électricité» universite de liège copyright © 2008 véronique beauvois, ulg
- [41] DR. BEKAKRA YUCEF Cours : Techniques d'Intelligence Artificielle «Chapitre I La Logique Floue»
- [42] T. BENSLIMANE, « Commande numérique d'un filtre actif parallèle autonome », Mémoire de Magister, Ecole Militaire Polytechnique, 08 Février 2004.
- [43] JOSEPH MIGRAND CHRYSTEL PIN (professeur agrégé BTS écol la mach lyon) «Redresseurs polyphasés a'diodes a thyristors et mixtes cours et exercice corriges » Ellipses édition marketing S ;A,2010 ,32,rue bague75740 paris cedex15,Page 253

Annexe :A

la modélisation de filtre actif parallèle sous MATLAB

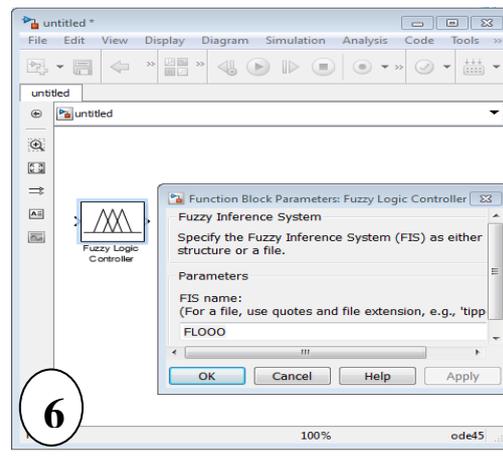
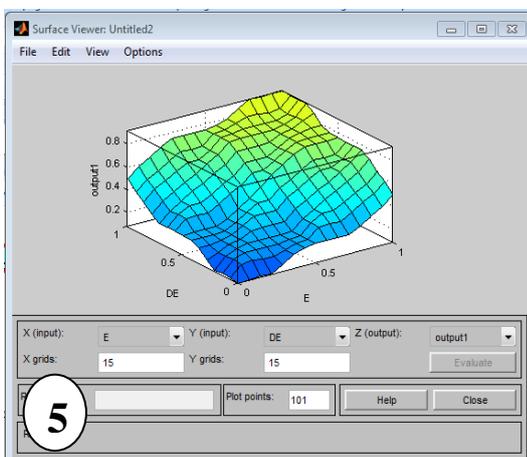
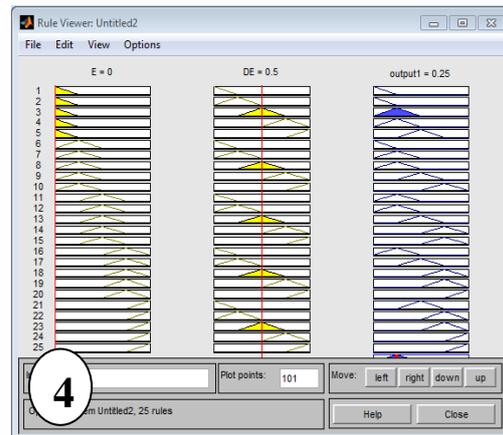
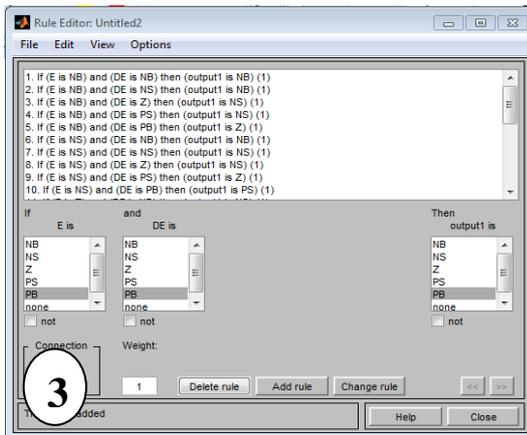
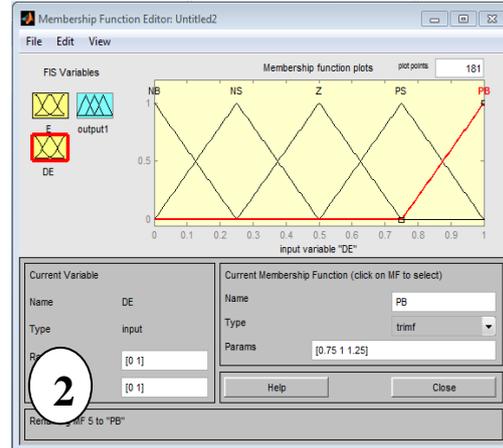
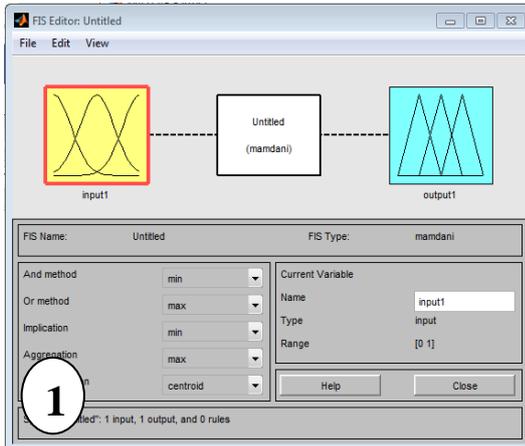


Bloc de Commande filtre actif parallèle



Annexe :B

Interface de la logique floue sous Matlab



Intitulé : Étude des harmoniques et techniques de commandes du filtre actif

Resume :

Le problème de la pollution harmonique dans les réseaux électriques de distribution devient de plus en plus préoccupant avec l' accroissement de l' usage des charges non-linéaires.

Ce travail présente une étude du filtre actif parallèle triphasé et les différentes méthodes utilisées dans sa commande. La commande du filtre actif parallèle basé sur deux axes distincts : l' un concerne l' identification des courants harmoniques et l' autre s' intéresse au contrôle des courants injectés dans le réseau par le filtre actif. Il existe plusieurs méthodes d' identification des courants harmoniques tels que la méthode des puissances instantanées, après filtrage est obtenue pour comparer les résultats et déterminer l'efficacité du filtre actif. Les résultats obtenus par le programme de simulation par MATLAB SIMULINK nous montrent le bon filtrage en utilisant le contrôleur flou.

Mots clés :

Charge non linéaire, Filtre actif parallèle, puissances instantanées, logique floue. Calcule des courants harmoniques de référence.

Abstract :

The problem of harmonic pollution in the electrical network is increasingly worrying, especially with the progressive use of non-linear payloads.

This work represent an effective three-phase parallel and various control and control methods used in control, in order to control the effective filter there are two important points to consider: how to control the current loaded with harmonics and control the current transmitted by active filter in the electrical grid, there are many ways to extract current loaded with harmonics, including instantaneous power. After filtration we can compare the results and prove the effectiveness of the effective filter where the coefficient current deformation is much greater than after filtering.

The obtained results show by the program of simulation by MATLAB SIMILINK show a good filtering using Fuzzy logic controller then PI.

Keywords:

Non-linear payloads shunt active filter, instantaneous power, fuzzy logic. Calculation of harmonic current references.

ملخص:

إن مشكلة التلوث بالتوافقيات في الشبكات الكهربائية هي في تفاقم مقلق خاصة مع تزايد استعمال الحمولات غير الخطية. هذا العمل يمثل دراسة مصفي فعال متوازي ثلاثي الطور و مختلف الطرق المستعملة في التحكم به، لكي نتحكم في المرشح الفعال هناك نقطتين هامتين يجب الاهتمام بهما : كيفية استخراج التيار المحمل بالتوافقيات و التحكم في التيارات المبعوثه من طرف المرشح الفعال في الشبكة الكهربائية ، هناك العديد من الطرق لاستخراج التيارات المحملة بالتوافقيات منها طريقة الاستطاعة اللحظية وبعد الترشح يمكننا من مقارنة النتائج و يثبت فعالية المرشح الفعال حيث معامل تشوه التيار قبل الترشح أكبر بكثير منه بعد الترشح.

النتائج المتحصل عليها من خلال برنامج المحاكات يمكننا من معرفة مدى فعالية استعمال منطقية فلو على استعمال المعدل التكاملية.

الكلمات المفتاحية:حمولة غير خطية، مصفي فعال متوازي، الاستطاعة اللحظية، المنطق الغامض. كشف التيارات المرجعية.