



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique



Projet de Fin d'Étude

Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique

Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Spécialité : Machines électriques

Thème

**Etude de la commande par logique floue
d'un filtre actif parallèle à trois fils.**

Présenté par :

- ATEF Ghouli
- AHMED BACHIR Karmia

Devant le jury composé de :

Président : Lammouchi zakaria

Examineur : Bekakra youcef

Encadreur : MAHNI Tidjani

Année universitaire : 2022/2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Nous rendons nos profondes gratitudee à Dieu le tout puissant qui nous a aidés à réaliser ce modeste travail.

Nous somme très reconnaissant à Monsieur mahni tidjani pour nous avoir encadré et en particulier son soutien, ses conseils et sa patience. Son expérience et sa connaissance ont contribué à notre formation scientifique.

Nous tenons à remercier vivement les membres de jury d'examen pour avoir accepté d'évaluer ce travail.

Nous exprimons toute nos gratitudee à nos parents, nos frères, nos sœurs qui nous ont apporté soutien et encouragements tout au long de nos études. Nous leurs réservons une pensée toute particulière.

Enfin, merci à nos amis qui ont partagé au quotidien nos espoirs et nos inquiétudes, qui nous ont réconforté dans les moments difficiles et avec qui nous avons partagé d'inoubliables instants de détente.

Résumé

Dans un réseau électrique basse tension, les harmoniques, la puissance réactive, les déséquilibres de courant et de tension ont des effets néfastes sur les équipements électriques. Ce mémoire présente l'étude et la commande d'un filtre actif parallèle pour l'amélioration de la qualité de l'énergie d'un réseau électrique. A cet effet, un rappel des différents types de perturbations électriques a été réalisé. L'identification est faite par la méthode des puissances instantanées, la commande est réalisée par hystérésis et la régulation de la tension du bus continu par logique floue. Les résultats de simulation obtenus ont montrés de bonnes performances pour le contrôle proposé.

les mots clés: logique floue -filtre actif parallèle.

Abstract

In a low voltage electrical network, harmonics, reactive power, current and voltage imbalances have adverse effects on electrical equipment. This memory presents the study and the control of a parallel active filter for the improvement of the quality of the energy of an electrical network. To this end, a reminder of the different types of electrical disturbances has been produced. The identification is made by the instantaneous power method, the control is carried out by hysteresis and the regulation of the DC bus voltage by fuzzy logic. The simulation results obtained have shown good performance for the proposed control.

keywords: fuzzy logic -parallel active filter.

الملخص

في الشبكة الكهربائية ذات الجهد المنخفض ، يكون للتوافقيات ، والاستطاعة التفاعلية ، والاختلالات الحالية تأثيرات سلبية على المعدات الكهربائية. تقدم هذه المذكرة الدراسة والتحكم في مرشح نشط متوازي لتحسين جودة الطاقة في الشبكة الكهربائية. تحقيقا لهذه الغاية ، تم إصدار تذكير بأنواع مختلفة من الاضطرابات الكهربائية. يتم التحديد بواسطة طريقة الاستطاعة اللحظية ، ويتم التحكم عن طريق التباطؤ وتنظيم جهد ناقل التيار المستمر بواسطة المنطق الضبابي ، وقد أظهرت نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها أداءً جيدًا للتحكم المقترح.

الكلمات الرئيسية: المنطق الضبابي - عامل التصفية النشط المتوازي.

Sommaire

Sommaire

Remerciements.....	I
Résumé.....	II
Sommaire.....	IV
Liste des figures	VII
Liste des Tableau	IX
Liste des symboles.....	X
Introduction générale.....	1

Chapitre I : Perturbation et pollution harmonique des réseaux électriques

Introduction.....	3
1.2.Origines des perturbations dans le réseau électrique	3
1.2.1Influences sur l'amplitude.....	3
1.2.2.La Influence sur la fréquence	5
1.2.3.Influence sur l'équilibre du système triphasé.....	6
1.2.4.Les harmoniques et inter-harmoniques	7
1.3.Les solutions traditionnelles.....	17
1.3.1.Utilisation d'inductances anti-harmoniques.....	17
1.3.2.Augmentation de la puissance de court-circuit	17
1.3.3.Les filtres passifs	17
1.4.Solutions modernes	18
1.4.1.Filtres actifs	19
1.5.Conclusion	22

Chapitre II : STRUCTEUR ET COMMANDE D'UN FILTER ACTVE PARALLELE

INTRODUCTION	24
II.1 Principe de filtre actif parallèle	24
II.2 structure générale du filtre actif parallèle :.....	25
II.3Etude de la partie puissance :	26
II.3.1 Onduleur de tension à deux niveaux.....	26
II.3.2 Filtre de découplage.....	29
II.3.3 Système de stockage de l'énergie	29
II.4 Etude de la partie de commande.....	29

II.4.1 Identification des courants harmoniques de référence.....	29
II.4.2 Stratégie d'identification	30
II.5 Comparaison entre les méthodes d'identification des courants harmoniques.....	30
II.5.1 La méthode de puissances instantanées	31
II.5.2 Séparation des puissances perturbatrices	34
II.5.3. Calcul des courants perturbateurs	34
II.5.4 Algorithme d'identification	35
II.6 Contrôle des courants du filtre actif	35
II .6.1 Commande à hystérésis	36
II .6.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)	36
II.7 Conclusion.....	38

Chapitre III : COMMANDE PAR LOGIQUE FLOUE DU FILTRE ACTIF PARALLELE

III.1 Introduction.....	40
III.2 La logique floue	40
III.2.1 Domaine d'application	40
III.3 Principe de la logique floue	40
III.4 Eléments de base de la logique floue	42
III.4.1 Variables linguistiques	42
III.4.2 Ensembles floue	42
III.4.3 Fonctions d'appartenance.....	42
III.4.4 Operateurs de la logique floue.....	43
III.4.5 Règles floues	44
III.5 Commande par logique floue.....	44
III.5.1 Constitution d'un système floue.....	44
III.6 Stratégies de commande de l'onduleur deux niveaux.....	47
III.6.1 Commande de l'onduleur par hystérésis à bande fixe.....	47
III.6.2 Commande par hystérésis à bande floue	48
Conclusion	50

Chapitre IV : Modélisation du filtre actif parallèle et résultats de simulation

IV.1 Introduction	52
-------------------------	----

IV.2 Tableau des paramètres du réseau	52
IV.3 Modélisation de l'association réseau- filtre actif- charge polluante :.....	52
IV.3.1 Description du système :	52
IV.3.2 Modélisation de la charge polluante (Redresseur triphasé) :	53
IV.4 Modélisation du filtre actif (l'onduleur) :.....	53
IV.4.1 Commande par hystérésis :	54
IV.5 Modélisation des méthodes d'identification des harmoniques :.....	54
IV.5.1 Méthode de puissance instantanée :.....	54
IV.6 Résultat de Simulation après le filtrage :.....	55
IV.6.1 Variation de charge:	56
IV. Conclusion.....	59
Conclusion générale.....	61
Références bibliographique	63

Liste des figures

Figure 1. 1 : Creux et coupure de tension.	4
Figure 1. 2 : Fluctuation de tension.	4
Figure 1. 3 : Surtension transitoire.....	5
Figure 1. 4 : Surtension permanente.	5
Figure 1. 5 : Variation de la fréquence.	6
Figure 1. 6 : Déséquilibre de réseau.	6
Figure 1. 7 : Tension et courant d'une charge linéaire	7
Figure 1. 8: Tension et courant d'une charge non linéaire.	8
Figure 1. 9 : Décomposition harmonique d'un signal déformé.	9
Figure I.10 : Filtre passif résonnant.	18
Figure I.11 : Filtre amorti	18
Figure I.12 : Filtre actif parallèle	19
Figure I.13 : Filtre actif série.	20
Figure I.14 : Combinaison Filtre parallèle-série UPQC	20
Figure II.1 : Principe du filtre actif parallèle.	24
Figure II.2 : schéma synoptique d'un filtre actif parallèle.....	25
Figure II.3: schéma du circuit de puissance d'un filtre actif parallèle à structure tension.	26
Figure II.4: Onduleur de tension triphasé.	27
Figure II.5: Schéma représentant le principe de séparation des puissances ($Y= p$ ou q).....	34
Figure II.6.: Principe de la méthode (pq).....	35
Figure II.7: Principe de la commande des courants par hystérésis.	36
Figure II.8: Principe de commande des courants par MLI.	37
Figure II.9: commutations sur un bras d'un Figure IV.5 Répartition des onduleur.	37
Figure III.1 : Classification des personnes en trois ensembles selon la logique classique.	41
Figure III.2 : Classification des personnes en trois ensembles selon la logique floue.....	42
Figure III.3 : Différentes formes des fonctions d'appartenance.	43
Figure III.4 : Schéma général d'un système floue.....	45
Figure III.5 : Défuzzification par centre de gravité.	47
Figure III.6 : Commande par hystérésis pour l'onduleur.	48
Figure III.7 : Principe de contrôle des courants par la technique d'hystérésis.	48
Figure III.8 : Les fonctions d'appartenance des variables.....	49
Figure IV.1: Schéma global du système de compensation	53
Figure IV.2 charge polluante	53
Figure IV.3 : Présentations d'un onduleur triphasé.....	54

Figure IV.4 : Model Simulink de la commande hystérésis	54
Figure IV.5 : Model Simulink de la méthode (pq)	55
Figure IV.6: Courant de source.....	56
Figure IV.7: Spectre harmonique de courant de source.....	56
Figure IV.8: Courant de charge	55
Figure IV.9: Spectre harmonique de courant de charge	55
Figure IV.10: Courant de filtre	55
Figure IV 11 : Courant de source après filtrage.....	57
Figure IV.12: Courant de charge apres filtrage	56
Figure IV 13 : Courant injecté par le filtre I_f	57
Figure IV 14 : Régulation V_{dc} par logique floue	57

Liste des Tableaux

Tableau 1. 1 : Exemples de représentations spectrales et temporels de différentes charges.....	11
Tableau 1. 2 : Exemple d'harmoniques homopolaires, inverses et directes.....	12
Tableau 1. 3 : Les équipements utilisés dans chaque secteur d'utilisation.	15
Tableau II.1: Tensions en sortie de l'onduleur.....	28
Tableau II.2 Comparaison entre les méthodes d'identification des harmoniques.....	31
Tableau III.1 : Implication floue.	43
Tableau III.2 : Règles de la commande floue.....	49
Tableau IV.1 : Paramètres de simulation d'un filtre actif	52

Liste des symboles

a-b-c : Axedu repaire triphasé

Aefficace : Valeur efficace

Afondamental : Valeur efficace du fondamental

Ahn : Valeur efficace d'un harmonique donné

AMax: Valeur crête

BT : Basse tension

FAP : Filtre Actif Parallèle

FC: Facteur de crête

FD : Facteur de déformation

P: Puissance active

Q: Puissance réactive

Rs : Résistance du réseau électrique

ih : Courant harmonique

THD : Total Harmonic Distorsion

THDF : Taux de distorsion harmonique (par rapoet à la valeur efficace du fondamental)

THDG : Taux de distorsion harmonique (par rapport à la valeur efficace du signal d'origine)

Uh : Tensions harmoniques

τn : Taux d'harmonique individuel

φ : Déphasage entre courant et tension

T : Transformée de Concordia

x*: centre de gravite

Δh(A): Bande d'hystérésis

μA, μB: fonctions d'appartenance

If (A): Courant du filtre.

Introduction générale

Introduction générale

La prolifération de perturbations électriques est due à un nombre croissant de charges non linéaires présentes dans les lignes électriques (tels que les convertisseurs, les ordinateurs personnels, les appareils à tubes fluorescents, etc...). La problématique relevée de la pollution harmonique dans les réseaux électriques de distribution devient de plus en plus préoccupante avec l'accroissement de l'usage des charges non-linéaires. Tous ces appareils possèdent la particularité d'absorber des courants non sinusoïdaux et donc d'introduire dans les lignes électriques des pollutions harmoniques en courant. Les composantes harmoniques générées se propagent dans l'ensemble du réseau de distribution électrique sous la forme de courants qui peuvent sérieusement affecter d'autres appareils en allant parfois même jusqu'à les détériorer.

Depuis quelques années, les Filtres Actifs Parallèles (FAP) se sont révélés être des techniques efficaces pour la compensation des composantes harmoniques. Ces filtres cherchent à identifier les composantes harmoniques afin de les réinjecter efficacement dans le réseau électrique en opposition de phase. Ils sont également capables de corriger le facteur de puissance et de compenser l'éventuel déséquilibre d'un système triphasé. De plus, les FAP peuvent être insérés aisément dans les installations existantes de distribution électrique sans nécessiter de grandes modifications. Reconnus pour leur facilité de mise en œuvre, pour leur robustesse et leur fiabilité, ils représentent aujourd'hui la technique la plus largement employée pour dépolluer les systèmes électriques.

Ce mémoire est composé de quatre chapitres:

➤ Dans le premier chapitre, nous étudierons les perturbations et la pollution harmonique du réseau électrique et l'application des solutions classiques et modernes pour dépolluer les réseaux électriques.

➤ Dans le deuxième chapitre, nous présenterons la structure générale pour étudier le filtre actif parallèle.

➤ Dans le troisième chapitre, nous présenterons les outils de base de la logique floue et son application pour la compensation des courants harmoniques.

Dans le quatrième chapitre nous étudions la simulation sur le filtre actif parallèle et présentons les résultats.

Chapitre I: Perturbation et pollution harmonique des réseaux électriques

Introduction

Le distributeur d'énergie doit fournir à l'ensemble de ses clients et utilisateurs une énergie de bonne qualité sous la forme de trois tensions sinusoïdales constituant un réseau triphasé équilibré. La qualité de cette énergie dépend de celle de la tension aux points de raccordement. Toutefois, cette tension subit généralement des altérations durant son transport jusqu'à son arrivée chez le client industriel ou particulier. Les origines de ces altérations sont nombreuses; outre les incidents relatifs à la nature physique et matérielle des organes d'exploitation du réseau, il existe aussi des causes intrinsèques spécifiques au fonctionnement de certains récepteurs particuliers. Afin d'éviter le dysfonctionnement, voire la destruction des composants du réseau électrique ou des récepteurs finaux, il est indispensable de comprendre l'origine des harmoniques et de chercher les solutions adéquates pour les supprimer [1]. Nous commencerons ce chapitre par un exposé sur les paramètres de la qualité de l'énergie électrique. Nous parlerons également de la perturbation harmonique, l'effet des harmoniques sur les récepteurs électriques. Ensuite, nous présentons les solutions classiques et modernes pour dépolluer les réseaux électriques

1.2. Origines des perturbations dans le réseau électrique

Les perturbations affectent différentes caractéristiques de la tension du réseau électrique:

1.2.1 Influences sur l'amplitude

Il y a une plage de variation nominale de la tension du réseau fixée à +/- 10% de la tension nominale, conformément à la norme EN 50160 élaborée par le Cenelec (Comité européen de normalisation électrotechnique).

1.2.1.1. Creux de tension et coupures

On appelle creux de tension, toute chute brutale de l'amplitude de la tension au-delà du seuil inférieur de cette plage, c'est-à-dire entre 10% et 90% de la tension de référence. Le signal se rétablit après un laps de temps de 10ms à quelques secondes (figure 1.1) [2].

Les courts-circuits non-permanents sont la principale cause de creux de tension, ainsi que la mise en service d'un appareil appelant un fort courant de démarrage tel que les moteurs, ou la variation brusque de la charge, ou encore des phénomènes naturels aléatoires tel que la foudre, le contact avec la végétation ...etc.

On appelle coupure de tension, un creux d'une profondeur supérieure à 90% de la tension de référence. Elle est provoquée généralement par des manœuvres des automatismes liées aux réseaux de distributions (figure 1.1) [2].

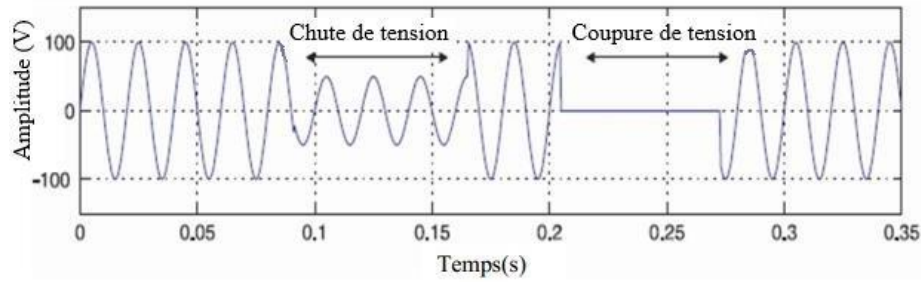


Figure 1. 1 : Creux et coupure de tension.

1.2.1.2.Fluctuation de tension

On appelle fluctuation de tension, toute diminution brusque de courtes durées (quelques millièmes de secondes) de la valeur efficace de la tension d'alimentation à des valeurs inférieure à 10% de la tension nominale (Figure 1.2) [2].

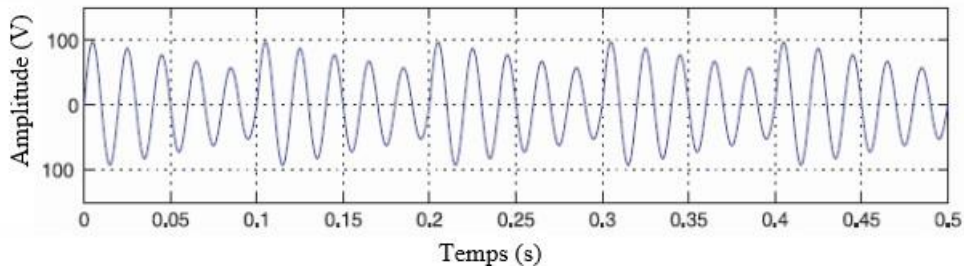


Figure 1. 2 : Fluctuation de tension.

Les variations lentes de tension sont causées par la variation lente des charges connectées au réseau. Ils ne présentent pratiquement pas d'inconvénients insupportables pour les appareils usuels tant qu'ils sont dans la plage de tolérance.

Les variations rapides de la tension (appelée flicker en anglais) sont causées soit par des perturbations électromagnétiques ou par des variations de puissance sur le réseau porteur de cette tension, comme par exemple la mise en service ou hors service des appareils dont la puissance absorbée varie de façon rapide.

L'effet flicker affecte évidemment certains appareils qui lui sont sensibles tel que le téléviseur, l'écran d'ordinateur, les tubes fluorescents ou toute source lumineuse présente sur le réseau sur lequel les sources du flicker sont connectés ou déconnectés.

1.2.1.3.Surtension

Selon la durée de leur cycle, on distingue deux types de surtension :

Transitoire

On appelle surtension transitoire, tout dépassement brusque de l'amplitude de la tension fondamentale de fréquence de 50 Hz. C'est un phénomène bref (de durée de moins de 1s),

d'une apparition aléatoire (Figure 1.3) [3].

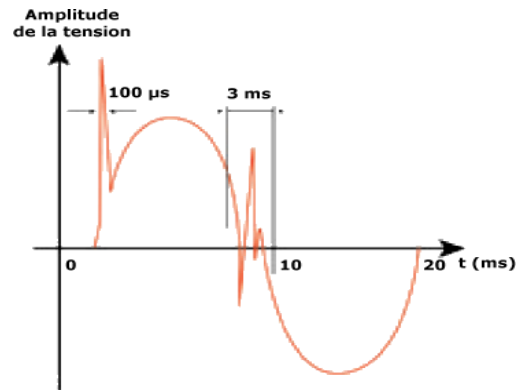


Figure 1. 3 : Surtension transitoire

Permanente

On appelle surtension permanente, toute augmentation de la tension au-dessus de 10% de valeur nominale qui est maintenue pendant plusieurs cycles de façon permanente (Figure 1.4) [1][4].

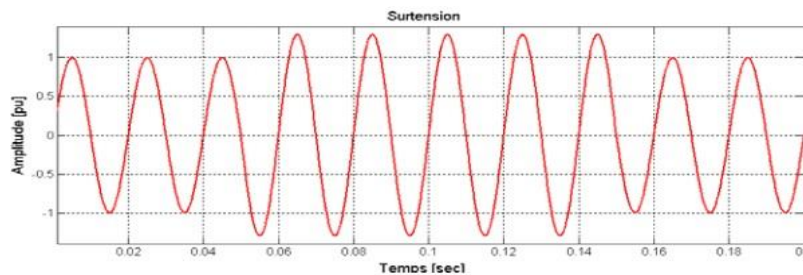


Figure 1. 4 : Surtension permanente.

Les surtensions causent la défaillance des équipements électriques bien que ceux-ci soient bien protégés, la destruction de l'équipement est provoquée lorsque le pic de tension atteint une valeur supérieure à celle supportée par l'appareil.

Les surtensions sont de trois natures :

- Les surtensions temporaires,
- Les surtensions de manœuvres,
- Les surtensions atmosphériques

1.2.2.La Influence sur la fréquence

fréquence du réseau est directement liée à la vitesse de rotation des générateurs utilisés pour la production de l'énergie électrique. Or, le déséquilibre entre l'offre et la demande entraîne des variations de cette vitesse, conduisant par conséquent à des variations de la fréquence : si la demande est supérieure à l'offre, la fréquence baisse, et vice versa (Figure 1.5) [2].

La fréquence du système électrique est donc un bon indicateur de l'équilibre entre la production et la consommation, Le point d'équilibre est de 50 Hz ou 60 Hz.

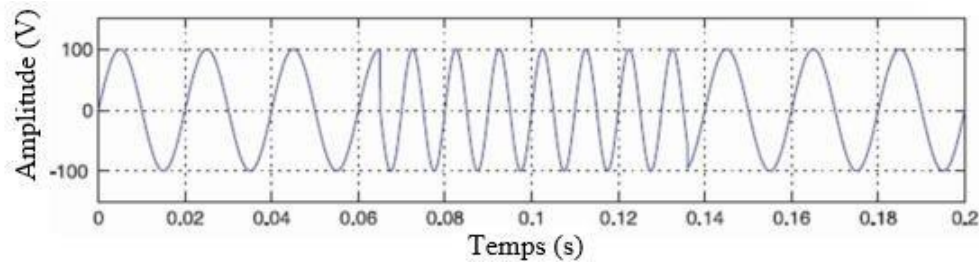


Figure 1. 5 : Variation de la fréquence.

La fréquence est mesurée et contrôlée en temps réel avec précision afin de la maintenir dans une zone acceptable $\pm 0,5$ Hz autour de 50 Hz ou 60Hz [5].

La fréquence d'un réseau doit être constante pour plusieurs raisons :

- Pour un bon fonctionnement des transformateurs et les moteurs alternatifs (machines à laver, outils, etc.),
- Pour certains systèmes électroniques où la fréquence est utilisée pour l'horloge.

Les variations de fréquence peuvent être causées par des évolutions continues de la consommation, l'arrêt d'une centrale de production ou par des courts circuits.

1.2.3. Influence sur l'équilibre du système triphasé

Lorsque des charges monophasées du système triphasé ne sont pas réparties uniformément sur le réseau, les courants absorbés sur les trois phases sont d'amplitude et/ou de phase différente [4]. Par conséquent, les trois tensions du système triphasé n'auront pas la même valeur efficace, et on parle dans ce cas d'un déséquilibre d'amplitude. Ou, le décalage entre les trois phases ne va pas être égale à 120° , on parle dans ce cas d'un déséquilibre de phase. Si l'un de ces deux types de déséquilibres apparaît, le système triphasé n'est plus équilibré (Figure 1.6) [3].

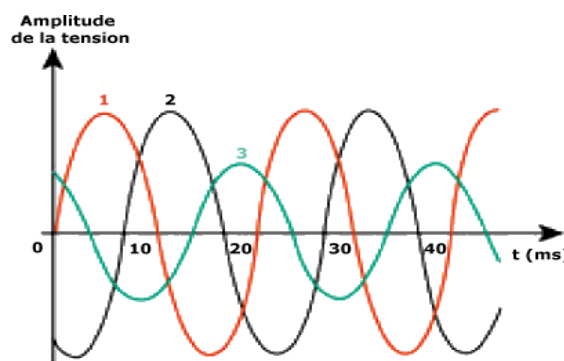


Figure 1. 6 : Déséquilibre de réseau.

Le déséquilibre de réseau peut entraîner un dysfonctionnement des appareils de basses

tensions connectés. En effet, si la tension est très faible les appareils ne fonctionnent pas correctement, et si elle est très élevée les appareils peuvent être détruits [6].

1.2.4. Les harmoniques et inter-harmoniques

La démystification de la déformation du signal électrique nécessite la mise en évidence d'un aspect mathématique de la distorsion appelé « **harmoniques** », qu'on obtient à partir de la décomposition en série de Fourier du signal électrique périodique. Ce sont donc des composants sinusoïdaux d'une fréquence multiple de la composante fondamentale du signal de 50 Hz ou 60 Hz.

Dans le cas où la fréquence des harmoniques n'est pas multiple entier de la fréquence fondamentale, on parle d'**inter-harmoniques** (par exemples : 110Hz, 130Hz) [1]. Ces distorsions apparaissent comme des pertes électriques et des dysfonctionnements sur le réseau électrique. Elles sont provoquées par des variations aléatoires de la puissance absorbée [7].

1.2.4.1. Notion de charge linéaire et charge non linéaire

a) Charge linéaire

Avant l'apparition des technologies des semi-conducteurs, les charges utilisées étaient de type récepteur classique connu dans le domaine de distribution électrique, tel que les lampes à incandescences, les convecteurs électriques ou tout simplement des éléments purement résistifs qui, lorsqu'ils sont soumis à une tension d'alimentation sinusoïdale, absorbent un courant de même allure, il y a donc une proportionnalité entre courant et tension. On parle ainsi de **charge linéaire**, et la puissance absorbée est le simple produit de ces deux grandeurs.

Un élément capacitif ou inductif, est aussi considéré comme charge linéaire, la différence réside dans l'existence d'un décalage dans le temps entre le courant et la tension qu'on appelle le déphasage φ (Figure 1.7). En plus du produit du courant et tension, la puissance absorbée par le récepteur en monophasé considère un nouveau terme appelé **facteur de puissance** dû à la différence de phase constatée.

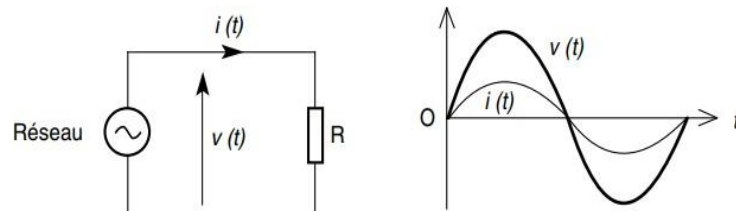


Figure 1. 7 : Tension et courant d'une charge linéaire [1]

-**Le facteur de puissance** : est le rapport entre la puissance active P et la puissance apparente S . S étant la somme trigonométrique de la puissance active P et réactive Q et s'écrit :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Le facteur de puissance s'écrit donc :

$$F_p = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad 1.1$$

Pour un signal purement sinusoïdal (absence de distorsion), on peut utiliser le terme « $\cos \varphi$ » pour dire facteur de puissance.

Pour résumer, la notion de charge linéaire est valable pour :

- Un récepteur résistif, capacitif ou inductif.
- Un récepteur qui conserve la proportionnalité entre courant et tension.

b) Charge non linéaire

Avec l'apport de la technologie des semi-conducteurs à l'électronique, et le développement connu par les dispositifs de puissance, les charges alimentées par une tension sinusoïdale absorbent un courant qui est déformé, le courant et la tension ne sont donc plus proportionnels, on parle dans ce cas de **charge non linéaire** (figure 1.8).

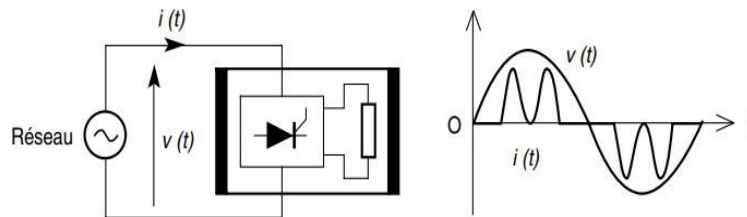


Figure 1. 8: Tension et courant d'une charge non linéaire.[1]

La notion « $\cos \varphi$ » n'est plus valide pour un signal distordu, cette distorsion est traduite par un nouveau terme D représentant la puissance déformante qui est introduite dans l'expression du facteur de puissance comme suit, causant sa dégradation :

$$F_p = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad 1.2$$

On cite comme exemples d'éléments déformateurs de signaux électriques et producteurs d'harmoniques : Les variateurs de vitesses, les redresseurs dans le domaine industriel, les onduleurs de tension et les alimentations à découpage dans les ordinateurs.

1.2.4.2. Démystification des harmoniques

Lorsque les grandeurs électriques s'éloignent de l'allure sinusoïdale, ces derniers se trouvent donc composées d'un fondamental, et un nombre d'harmoniques, dont la somme est le signal distordu. Ainsi, la fréquence de chacun de ces harmoniques est un multiple entier 'n' du fondamental. Ce multiple entier 'n' est appelé « rang » de l'harmonique (Figure 1.9) [8].

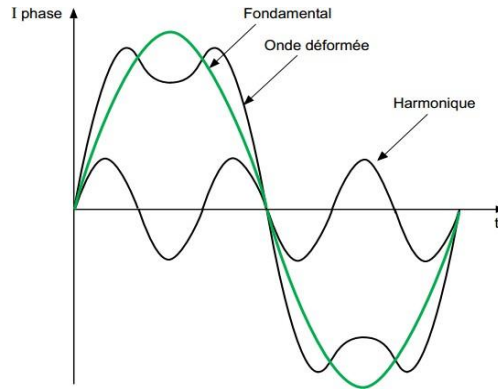


Figure 1. 9 : Décomposition harmonique d'un signal déformé.

Afin de quantifier la déformation du signal mesuré on utilise le développement mathématique en séries de Fourier, un moyen pratique et précis.

a) Développement en série de Fourier

D'après le théorème de Fourier, tout signal périodique de période T et de variable réelle t , peut s'écrire comme une somme infinie de sinusoides dont la fréquence est multiple de la fréquence fondamentale $\frac{1}{T}$. A ces termes purement sinusoidaux peut se rajouter une éventuelle composante continue [9] :

$$S(t) = a_0 + \sum_0^{\infty} [a_n \cdot \cos(n\omega t) + b_n \cdot \sin(n\omega t)] \quad 1.3$$

Pour $n=1$, on parle du signal fondamental. Avec:

- a_0 est la valeur moyenne du signal. Elle est souvent nulle en distribution puisque le signal distribué est alternatif symétrique :

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T S(t) dt \quad 1.4$$

- a_n et b_n sont dits les coefficients de Fourier, ils représentent les amplitudes des harmoniques de rang n (valeurs efficaces), et sont définis par :

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T s(t) \cdot \cos(n\omega t) dt \quad \text{et} \quad b_n = \frac{2}{T} \int_0^T s(t) \cdot \sin(n\omega t) dt \quad 1.5$$

Propriétés des séries de Fourier :

- Si (t) est **paire** \rightarrow Les coefficients b_n sont nuls.
- Si (t) est **impaire** \rightarrow Les coefficients a_n sont nuls.
- Si $S(t)$ présente une **symétrie de glissement**, $f\left(t + \frac{T}{2}\right) = -f(t) \rightarrow$ Les a_n sont nuls.

Dans un réseau électrique le signal est symétrique, en tenant compte des propriétés de séries de Fourier ci-dessus, les harmoniques de rang paires sont donc nulles [10]. Par contre les harmoniques de rang impairs (3, 5, 7 ...) sont fréquemment rencontrés sur le réseau électrique.

Selon la norme internationale EN 50160, les harmoniques au-delà du rang 25 sont souvent négligeables, pour certaines charges.

b) L'analyse spectrale

Les signaux sont généralement présentés dans le domaine temporel, cette représentation nous fournit un certain type d'informations tel que l'amplitude, la valeur crête, La valeur moyenne...etc. [11]. Cependant, cette représentation ne permet pas de voir le contenu fréquentiel du signal, pour cela une autre approche est constatée dite représentation fréquentielle ou spectrale. C'est un outil sous forme d'histogramme qui représente l'importance des harmoniques par rapport au fondamental en fonction du rang ou de la fréquence, ce qui assure une bonne interprétation d'un signal tout en indiquant ses différentes caractéristiques que nous découvrirons dans ce qui suit.

Dans le tableau suivant (tableau 1.1), on effectue une analyse spectrale d'un signal d'abord, issu d'une charge linéaire et donc sans harmoniques, ensuite de signaux distordus issus des charges non linéaires décomposées en différentes composantes harmoniques :

Tableau 1. 1 : Exemples de représentations spectrales et temporels de différentes charges.

Type de charge	Courant absorbé	Spectre harmonique correspondant
Récepteur restif		
Gradateur monophasé		
Redresseur triphasé à thyristors		

Les charges non linéaires causent trois types de courants harmoniques qui, selon leur rang n , sont réparties de manière uniforme sur les trois phases, ils forment des systèmes triphasés homopolaires, directs ou indirects [4].

L'harmonique est dite **homopolaire**, lorsque son rang est de la forme $n=3k$ (k est un entier). Dans un système bien équilibré, la somme instantanée des courants fondamentaux des trois phases est nulle, ce qui n'est pas le cas pour les harmoniques de rang $3k$ car ils sont égaux à chaque instant, ils sont en phase les uns avec les autres. On les nomme aussi **séquence zéro**.

L'harmonique est dite **directe**, pour un rang de forme $n=3k+1$. L'harmonique de seconde phase présente un retard de $\frac{2\pi}{3}$ par rapport à la 1^{ère} phase, et celle de la troisième phase présente un retard de $\frac{4\pi}{3}$ par rapport à la 1^{ère} phase, ce qui annule leur somme instantanée. Ces harmoniques (tel que la septième) tournent avec la même séquence que la fondamentale. Ils sont appelés aussi **séquences positives**.

L'harmonique est dite **indirecte**, lorsque le rang s'écrit sous la forme $n=3k+2$. La somme instantanée de ces harmoniques est nulle, ils tournent dans une séquence opposée de la fondamentale (tel que la cinquième harmonique). Ils sont appelés aussi **séquence négative**.

Le tableau suivant (tableau 1.2) [12] prête concision et récapitulation aux différents types d'harmoniques les plus prédominants :

Tableau 1. 2 : Exemple d'harmoniques homopolaires, inverses et directes.

La fondamentale	A0°	B 120°	C 240°	A-B-C
Harmonique de rang 3	A' (3 × 0°) 0°	B' (3 × 120°) 0°	C' (3 × 240°) 0°	Pas de rotation
Harmonique de rang 5	A'' (5 × 0°) 0°	B'' (5 × 120°) -120°	C'' (5 × 240°) -240°	C-B-A
Harmonique de rang 7	A''' (7 × 0°) 0°	B''' (7 × 120°) 120°	C''' (7 × 240°) 240°	A-B-C

1.2.4.3.Éléments d'identification des harmoniques

L'allure du signal électrique est un critère indispensable pour une bonne analyse de la qualité de l'énergie électrique sur un réseau, et pour l'analyser soigneusement, en plus de la valeur efficace, autres indicateurs de qualité doivent être définis.

a) Facteur de déformation

Quand on a introduit le facteur de puissance (F_P) ci-dessus, on avait deux cas :

- En absence de distorsion (sinusoïde pure), le " F_P " défini comme le " $\cos \varphi$ " où φ est le déphasage entre courant et tension qui sont proportionnels.
- En présence de distorsion, une nouvelle puissance déformante D apparaît directement

proportionnelle à la présence d'harmonique, qui dégrade la valeur du "F_P".

Le rapport entre le facteur de puissance de la charge non linéaire et celui de la charge linéaire est dit **Facteur de déformation** (F_D), tel que :

$$F_D = \frac{F_p}{\cos \varphi} \quad 1.6$$

"cos φ" Ici est le cosinus du déphasage entre les fondamentales de courant et de tension.

b) Facteur de crête

Le facteur de crête est le résultat du rapport entre une valeur crête "A_{MAX}" d'une onde et une valeur efficace de ce même signal. Pour un signal sinusoïdal, ce facteur est égal à $\sqrt{2}$.

$$F_c = \frac{A_{MAX}}{A_{efficace}} = \sqrt{2} \approx 1,41421 \quad 1.7$$

Lorsque le signal est déformé, le "F_c" atteint des valeurs supérieures ou inférieures à $\sqrt{2}$ et prouve ainsi la présence d'une charge non linéaire. C'est un bon indicateur qualitatif de déformation.

c) Taux d'harmoniques

Un signal distordu est composé d'harmoniques. Chaque harmonique de rang "n" possède une valeur efficace. On appelle **Taux d'harmonique individuel**, le rapport entre la valeur efficace d'un harmonique donné (A_{h_n}) et la valeur efficace du fondamental (A_{fondamental}) :

$$\tau_n = \frac{A_{h_n}}{A_{fondamental}} \quad 1.8$$

C'est un pourcentage qui reflète l'importance de l'harmonique considéré par rapport au signal non pollué.

On appelle **Taux d'harmonique global** ou **taux de distorsion harmonique**, le rapport entre la racine de la somme quadratique des valeurs efficaces des harmoniques de rang "2" jusqu'à "n" et la valeur efficace du fondamental :

$$THD_F = \frac{\sqrt{A_{h_2}^2 + A_{h_3}^2 + \dots + A_{h_n}^2}}{A_{fondamental}} \quad 1.9$$

"THD" Acronyme de « Total Harmonic Distorsion » en anglais, il représente la déformation globale d'un signal car il tient compte de l'ensemble des harmoniques considérés, il est directement proportionnel à la richesse du signal en harmoniques.

On définit aussi le taux d'harmonique par rapport à la valeur efficace du signal d'origine:

$$THD_G = \frac{\sqrt{A_{h_2}^2 + A_{h_3}^2 + \dots + A_{h_n}^2}}{A_{\text{efficace}}} \quad 1.10$$

avec

$$A_{\text{efficace}} = \sqrt{A_{\text{fondamental}}^2 + A_{h_2}^2 + A_{h_3}^2 + \dots + A_{h_n}^2} \quad 1.11$$

Pour un signal purement sinusoïdal, le THD est nul.

1.2.4.4. Harmoniques de tension

Quand les récepteurs pollueurs appellent des courants riches en harmoniques qui, en circulant dans des conducteurs et des équipements électriques, rencontrent des impédances, des tensions harmoniques sont engendrées tout en obéissant à la loi d’Ohm [1] :

$$U_h = Z \times i_h \tag{1.12}$$

Les tensions harmoniques sont négligeables pour des charges de faible puissance puisque le courant appelé par ces dernières et les impédances rencontrées sont faibles. Par contre si les charges déformantes sont massivement présentes, les harmoniques se prolifèrent et s’accumulent, ce qui conduit à une pollution significative.

1.2.4.5. Quelques équipements pollueurs

Les courants harmoniques sont générés par différents types d’appareillage, le tableau ci-dessous (tableau 1.3) récapitule le type d’équipement employé selon le secteur d’utilisation [8] [13].

Tableau 1. 3 : Les équipements utilisés dans chaque secteur d’utilisation.

Le Secteur d’utilisation	Types d’équipements et matériels pollueurs	
Production, transport, ou distribution d’électricité	-Les alternateurs et les générateurs asynchrones. -Les transformateurs. -Les convertisseurs.	Détérioration de forme d’onde faible, due notamment aux : -Imperfections de construction. -La saturation du circuit magnétique du transformateur. -Choix de la distribution enroulements et du nombre d’encoches par pôle pour les alternateurs [14].
Industrie	-Les convertisseurs d’électronique de puissance et outils de commande des machines (redresseurs, gradateurs, onduleurs, cyclo-convertisseurs). -Les postes à souder. -Les fours à arc...etc.	Sont les producteurs majeurs d’harmoniques.
Tertiaire	-Les climatiseurs. -Les redresseurs monophasés : Les ordinateurs et leurs périphériques, Les lampes à fluorescence etc.	La commutation des éléments semi-conducteurs.
Domestique	-Matériel électroménager. -Outillage de bricolage.- Climatisation.- Téléviseur -Redresseurs des chargeurs etc.	Équipements à faible puissance, mais l’utilisation massive est perturbatrice.

On constate que non seulement la commutation des composants semi-conducteurs génère des harmoniques, mais aussi le mode de fonctionnement de quelques charges tel que les moteurs et les transformateurs.

1.2.4.6. Effets néfastes de la pollution harmonique

Les perturbations causées par la pollution harmonique sont de plus en plus présentes dans les installations (effet joule, diminution de facteur de puissance, vieillissement prématuré etc.) menant à des pertes techniques et économiques qu'on voudrait éviter. Ces effets se manifestent de deux manières :

a) Les effets instantanés : ils sont instantanément visibles sur les équipements, dus aux phénomènes de résonnances et de déformation de l'onde, et se présentent sous forme de :

- Vibrations et bruits acoustiques anormaux au niveau des moteurs et transformateurs.
- Augmentation des facteurs de crête causant le déclenchement intempestif des disjoncteurs qui assurent la protection des équipements.
- Diminution de la précision des appareils de mesure.
- Destruction du matériel tel que les condensateurs à cause de la résonance. (Plus le signal est chargé d'harmonique de rang et fréquences élevés, plus le courant consommé par le condensateur est important, les pertes qui en découlent l'échauffe et le détruit [15]).
- Dégradation du facteur de puissance, car les harmoniques ne contribuent pas au transfert de la puissance active.
- La dégradation de la qualité d'image projetée sur les écrans.

b) Les effets à long terme : leurs conséquences se manifestent au fur et à mesure après plusieurs expositions aux harmoniques, ils sont de nature thermique et affectent la durée de vie du matériel, ils se présentent sous forme de :

- Échauffement des conducteurs.
- Échauffement supplémentaire au niveau des transformateurs et les moteurs.
- Fatigue mécanique du matériel industriel.
- Vieillissement prématuré des équipements etc.

Des conséquences économiques découlent évidemment. En effet, afin de pallier aux problèmes techniques les équipements et les conducteurs doivent être surdimensionnés, et la production d'énergie doit augmenter pour subvenir aux besoins. En plus, la dégradation du

rendement et la durée de vie des machines, nécessite des maintenances régulières, menant à des surcoûts économiques.

1.3. Les solutions traditionnelles

Ce sont des techniques qui doivent être connues par tous les électriciens. Elles apportent une solution facile et rapide pour certains cas de perturbations bien localisées et utilisent des composants passifs (inductances, condensateurs, transformateurs) et/ou des branchements qui modifient le schéma de l'installation [2].

1.3.1. Utilisation d'inductances anti-harmoniques

Cette disposition consiste à protéger les condensateurs, destinés à améliorer le facteur de puissance, en plaçant une inductance en série. Cette inductance est calculée de façon à ce que la fréquence de résonance ne corresponde à aucun des harmoniques présents [6].

1.3.2. Augmentation de la puissance de court-circuit

La puissance harmonique augmente lorsque la puissance de court-circuit diminue si l'on ne prend pas en compte les phénomènes de résonance. La diminution de l'impédance totale en amont de la charge non-linéaire permet de réduire la tension créée par les harmoniques de courant, et donc de diminuer le taux de distorsion harmonique en tension au point de raccordement. En revanche, les courants harmoniques ne sont pas atténués [7].

1.3.3. Les filtres passifs

Cette solution de dépollution consiste à placer en parallèle sur le réseau d'alimentation une impédance très faible autour de la fréquence à filtrer et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau. Parmi les dispositifs du filtrage les plus répandus, On distinguera deux types de filtres assurant la limitation des tensions harmoniques :

- filtre passif résonnant.
- filtre passif amorti ou passe-haut.

1.3.3.1. Filtres passifs résonants

Il est constitué par la mise en série d'une inductance, d'une résistance, et d'un condensateur. La figure I.10 montre clairement le montage de ce dernier ainsi que leurs impédances en fonction de la fréquence. Ce type de filtre est caractérisé par l'emplacement de trois filtres, deux pour les harmoniques d'ordre inférieurs et un filtre pour les harmoniques

d'ordres supérieurs, c'est-à-dire pour un pont triphasé nous avons besoin d'un filtre passe bas pour le cinquième et l'autre pour le septième harmonique et d'un filtre passe haut pour tous les harmoniques au-delà de la 11ème [8].

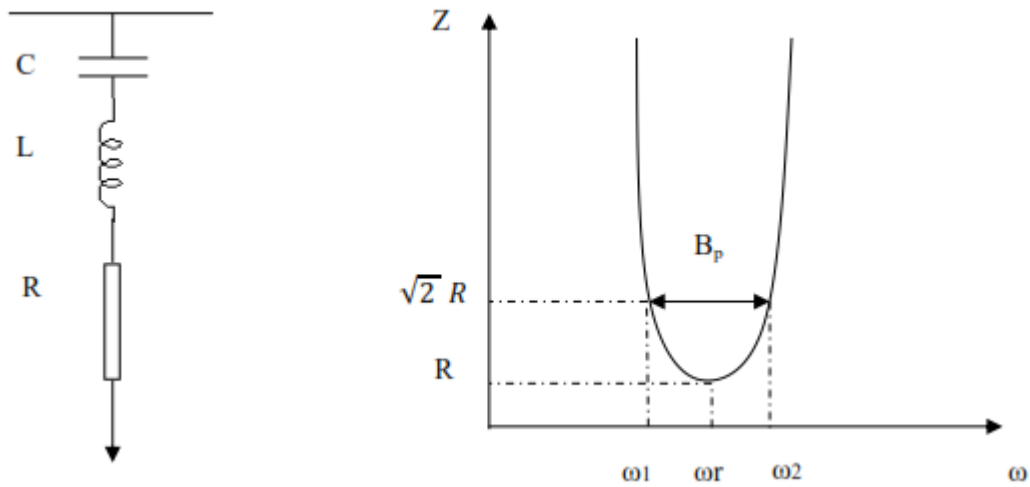


Figure I.10 : Filtre passif résonnant.

1.3.3.2. Filtres passifs amortis

Le filtre amorti peut réduire le risque de résonance non souhaitée, et permet de réduire considérablement la taille du filtre passif [12], comme le montre la figure I.11.

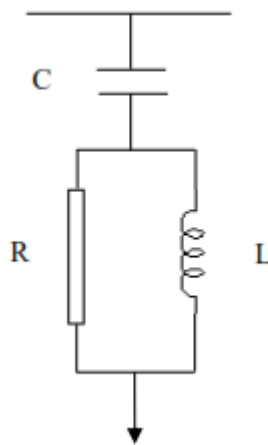


Figure I.11 : Filtre amorti

1.4. Solutions modernes

Les solutions de dépollution traditionnelle ne répondant plus à l'évolution des réseaux électriques et des charges à protéger, comme nous venons de le décrire précédemment, d'autres solutions modernes ont été proposées. Pour fournir aux consommateurs une bonne qualité de l'énergie électrique, même dans les conditions de fonctionnement les plus

perturbées, les filtres actifs sont proposés comme des solutions avancées de dépollution des réseaux électriques [11].

1.4.1.Filtres actifs

Le filtrage actif constitue aujourd'hui une solution plus sophistiquée que le filtrage passif, bénéficiant des technologies les plus performantes et constamment améliorée par les constructeurs. 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 du réseau quasi sinusoïdal. Ces filtres actifs sont encore appelés compensateurs actifs. Ils sont utilisés en parallèle ou en série d'une installation nécessitant un traitement harmonique. Dans ce qui suit, nous donnons les structures les plus utilisés dans la littérature, à savoir les filtres parallèle série, combiné parallèle-série et les structures hybrides actifs -passifs [12].

1.4.1.1.Filtre actif parallèle

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 sinusoïdaux au niveau du réseau. Il permet donc de supprimer au point de raccordement tous les harmoniques de courants de charge non linéaire. Il peut aussi fonctionner comme un compensateur de tensions harmoniques dont il permet de maintenir sinusoïdale la tension au point de raccordement quel que soit le courant absorbé par la charge ou la qualité de la source de tension. En générale, le filtre actif parallèle est utilisé pour la dépollution des réseaux BT et MT [13]. Ce type de configuration est indiqué par la figure I.10:

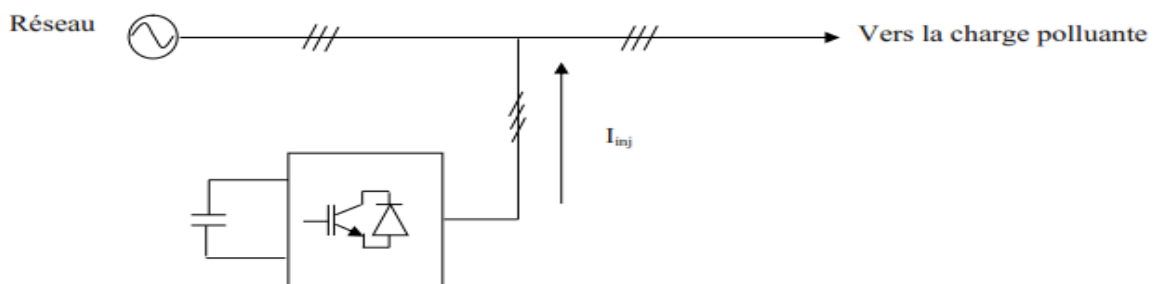


Figure I.12 : Filtre actif parallèle

1.4.1.2 Filtre actif série

C'est une solution pour protéger les charges sensibles contre les perturbations de tension du réseau électrique. Donc l'objectif (compensateur de tension harmonique) est de jouer le rôle d'une source de tension qui fournit la tension harmonique [13]. Ce type de configuration

est indiqué par la figure I.13 :

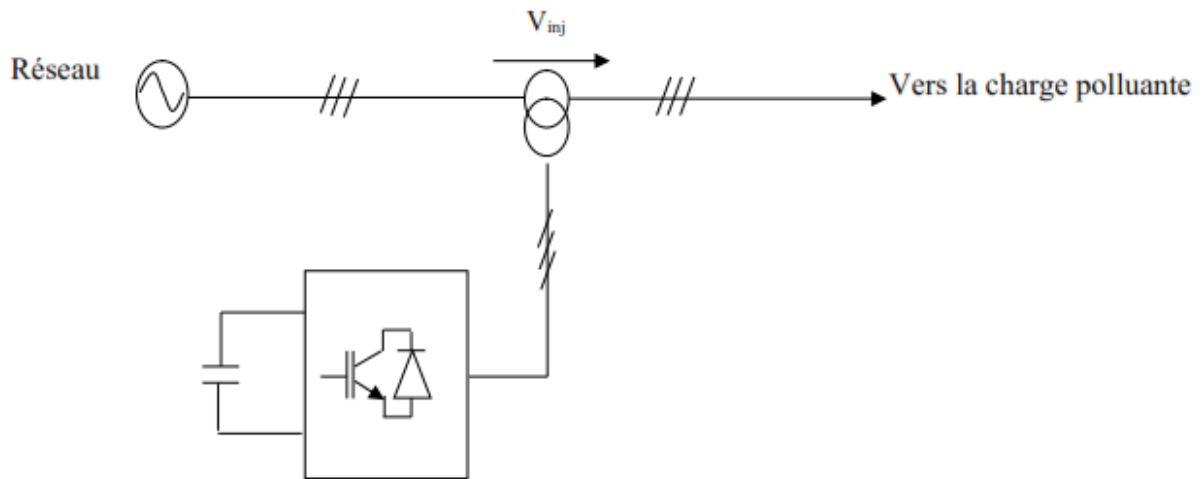


Figure I.13 : Filtre actif série.

1.4.1.3. Combinaison filtre actif série-parallèle (UPQC)

Cette combinaison parallèle-série actifs, aussi appelée Unified Power Quality Conditioner (UPQC), résulte de l'association des deux filtres actifs parallèle et série, comme le montre la figure I.14. Profitant des avantages des deux filtres actifs, l'UPQC assure un courant et une tension sinusoïdaux du réseau électrique à partir d'un courant et d'une tension perturbés de celui-ci.

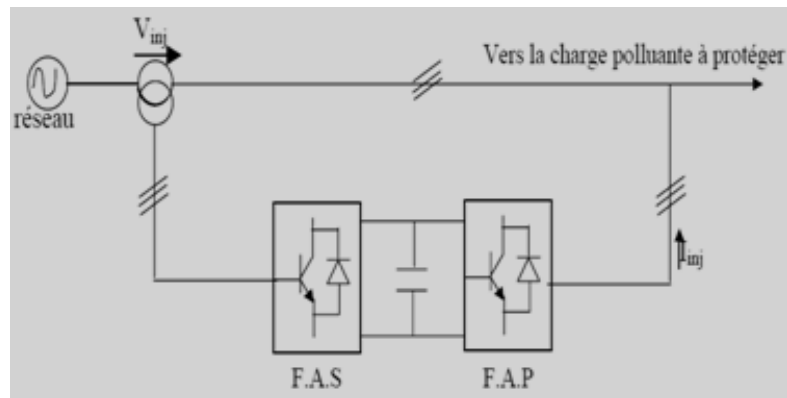


Figure I.14 : Combinaison Filtre parallèle-série UPQC

1.4.1.4. Filtrage hybride

Le filtrage mixte ou hybride résulte de l'association d'un filtre passif et d'un filtre actif.

L'intérêt des filtres mixtes est que le filtre passif prend en charge la compensation d'une grande partie des harmoniques, le filtre actif maintient les performances de filtrage en fonction de l'évolution de la charge du réseau. Ainsi la puissance du convertisseur qui constitue le filtre actif est fortement diminuée grâce aux éléments passifs. Ces structures permettent donc

d'optimisé le rapport performance / coût et d'avoir une meilleure tenue en tension [2]. On a plusieurs structures de filtre actif par exemple :

- * Le filtre actif série avec filtres passifs parallèles.
- * Le filtre actif série connecter en série avec des filtres passifs parallèles.
- * Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.

Filtrage hybride

Le filtrage mixte ou hybride résulte de l'association d'un filtre passif et d'un filtre actif.

L'intérêt des filtres mixtes est que le filtre passif prend en charge la compensation d'une grande partie des harmoniques, le filtre actif maintient les performances de filtrage en fonction de l'évolution de la charge du réseau. Ainsi la puissance du convertisseur qui constitue le filtre actif est fortement diminuée grâce aux éléments passifs. Ces structures permettent donc d'optimisé le rapport performance / coût et d'avoir une meilleure tenue en tension [2]. On a plusieurs structures de filtre actif par exemple :

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

1.5.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents types de perturbations qui peuvent polluer les réseaux électriques. En plus nous avons parlé des harmoniques et des déséquilibres de courant et de tension et la puissance réactive qui ont des effets néfastes sur les équipements électriques. Ensuite, pour diminuer les effets de ces perturbations harmoniques, Plusieurs solutions traditionnelles et modernes ont présenté. 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. En effet, profitant des progrès réalisés dans le domaine de l'électronique de puissance. 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 être installé pour compenser toutes les perturbations de tension comme les harmoniques. La combinaison parallèle-série actifs est la solution universelle pour compenser toutes les perturbations en courant et en tension. D'autres solutions de dépollution consistent à associer des filtres actifs et passifs pour trouver un compromis entre l'efficacité de compensation et le coût. Ces solutions peuvent être des solutions futures très prometteuses. Les filtres hybrides étant conçus essentiellement pour dépolluer les réseaux électriques des courants harmoniques. Dans le prochain chapitre, nous présenterons l'étude du filtre actif parallèle, la charge non linéaire et l'identification des courants harmoniques.

**Chapitre II :
STRUCTEUR ET
COMMANDE DU FILTER
ACTVE PARALLELE**

INTRODUCTION

La prolifération de perturbations électriques est due à un nombre croissant de charges non linéaires présentes dans les lignes électriques. Tous ces appareils possèdent la particularité d'absorber des courants non sinusoïdaux et donc d'introduire dans les lignes électriques des pollutions harmoniques en courant.

Les filtres actifs parallèles se sont révélés être des techniques efficaces pour la compensation des composantes harmoniques. Dans ce chapitre nous allons étudier le filtre actif parallèle. Sa structure a été divisée en deux parties, la partie puissance et la partie commande.

Dans la partie puissance on a les trois principaux blocs de cette structure, l'onduleur de tension, l'élément de stockage d'énergie et le filtre de sortie. Dans la partie commande, on a l'identification des courants perturbateurs, la régulation du courant injecté par l'onduleur et la régulation de la tension continue. Aussi nous présenterons la modélisation du réseau électrique et la charge non linéaire.

II.1 Principe de filtre actif parallèle

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 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 générale, le filtre actif parallèle est utilisé pour la dépollution des réseaux BT MT. Son impédance totale vis à vis de la source et de la charge lui confère une bonne auto adaptabilité avec les performances appréciables [10]. Sa structure est la suivante :

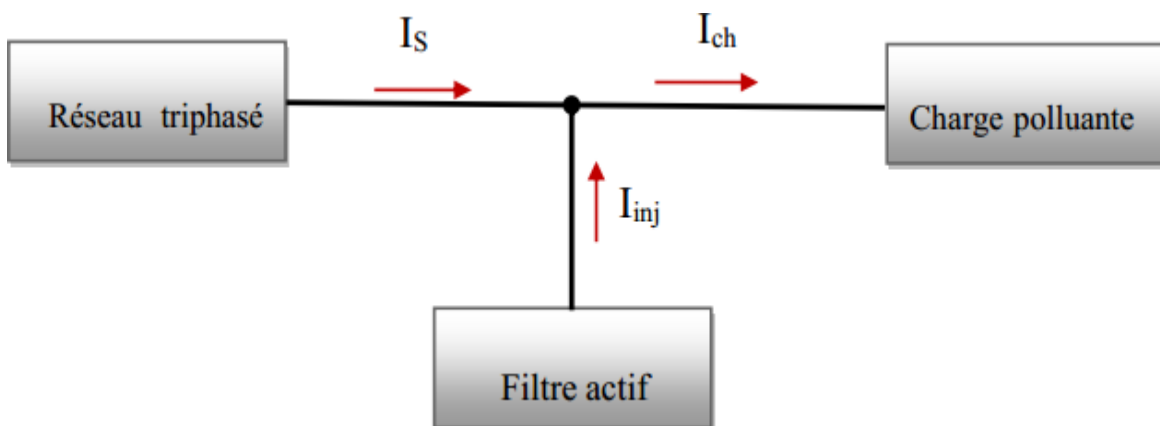


Figure II.1 : Principe du filtre actif parallèle.

II.2 structure générale du filtre actif parallèle :

La Figure(II.2) donne la structure générale du filtre actif parallèle, laquelle se présente sous la forme de deux blocs : la partie puissance et la partie contrôle-commande.

a) 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.

b) 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.

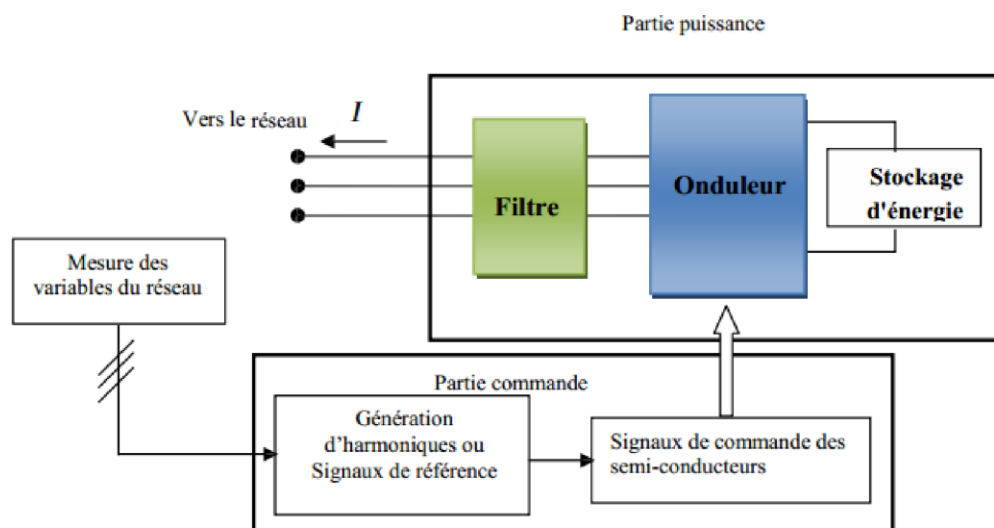


Figure II.2 : schéma synoptique d'un filtre actif parallèle.

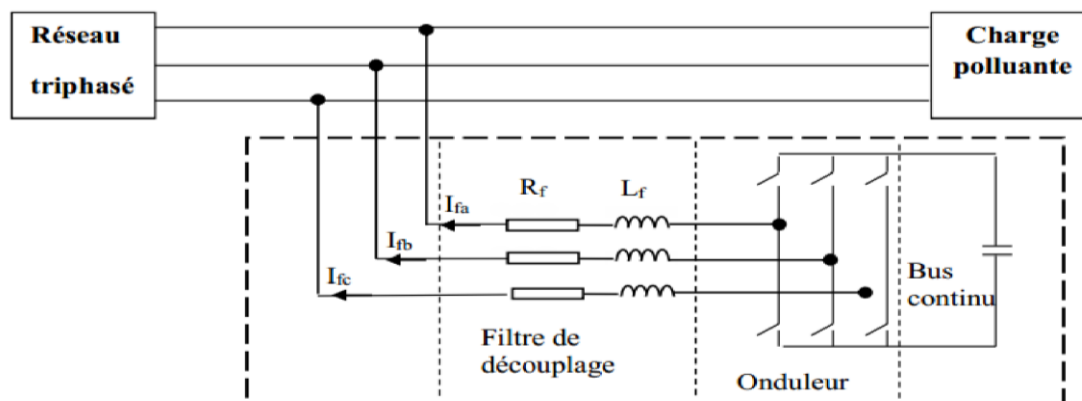


Figure II.3: schéma du circuit de puissance d'un filtre actif parallèle à structure tension.

II.3 Etude de la partie puissance :

Le schéma du circuit de puissance d'un filtre actif parallèle à structure tension est donné sur la figure (II.3). On y distingue trois éléments :

- un onduleur de tension.
- un filtre de découplage.
- un élément de stockage capacitif.

II.3.1 Onduleur de tension à deux niveaux

II.3.1.1 Structure générale

La Figure II.4 présente un onduleur triphasé à structure de tension. Il se compose de trois bras à interrupteurs réversibles en courant, commandés à la fermeture et à l'ouverture, réalisés à partir d'un transistor (GTO ou IGBT) et d'une diode en antiparallèle. 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 connecter l'onduleur de tension au réseau électrique.

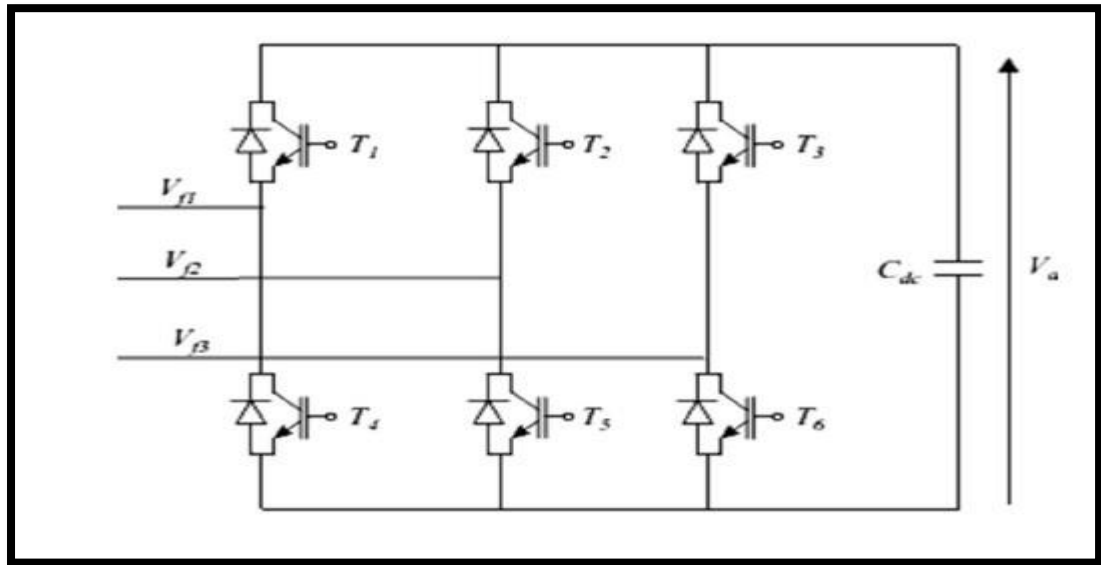


Figure II.4: Onduleur de tension triphasé.

Cette structure du filtre actif parallèle 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 [23]. 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.

II .3.1.2 Tension générées par l'onduleur

L'onduleur de tension deux niveaux délivre, en sortie, deux niveaux de tensions V_{dc} et 0, en fonction des états des interrupteurs. En théorie, nous commandons les deux semi-conducteurs d'un même bras de façon complémentaire : la conduction de l'un entraîne le blocage de l'autre. Avec cette hypothèse, l'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur de la Figure (II.1) dépendent de l'état de trois signaux de commande [23].

Pour chaque interrupteur T_{ki} ($K=a, b, c$ $i=1, 2$), on définit une fonction de commutation

$$S_{ki} = \begin{cases} 1 & \text{Si } T_{ki} \text{ est fermé} \\ 0 & \text{Si } T_{ki} \text{ est ouvert} \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

La complémentarité entre les deux interrupteurs de chaque bras impose l'équation suivante:

$$S_{k2} = 1 - S_{k1} \quad (\text{II.2})$$

Les tensions triphasées de sortie par rapport à la référence de la source continue « o » peuvent être exprimées par :

$$\begin{bmatrix} V_{A0} \\ V_{B0} \\ V_{C0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{a1} \\ S_{b1} \\ S_{c1} \end{bmatrix} V_{dc} \quad (\text{II.3})$$

Les tensions composées entre les phases sont données par:

$$\begin{bmatrix} V_{Ab} \\ V_{Bc} \\ V_{Ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bo} - V_{co} \\ V_{co} - V_{ao} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{a1} - S_{b1} \\ S_{b1} - S_{c1} \\ S_{c1} - S_{a1} \end{bmatrix} V_{dc} \quad (\text{II.4})$$

Ainsi, on peut facilement exprimer les tensions V_{kn} ($k=a, b, c$) en fonction des fonctions de commutation S_{ki} comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} V_{ab} - V_{ca} \\ V_{bc} - V_{ab} \\ V_{ca} - V_{bc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2S_{a1} - S_{b1} - S_{c1} \\ -S_{a1} - 2S_{b1} - S_{c1} \\ -S_{a1} - S_{b1} - 2S_{c1} \end{bmatrix} V_{dc} \quad (\text{II.5})$$

Puisque les variables S_{ai} , S_{bi} et S_{ci} prennent chacune deux valeurs, il en résulte huit combinaisons de commande, qui sont présentées dans le Tableau (II.1)

Tableau II.1: Tensions en sortie de l'onduleur

vecteur	S_{a1}	S_{b1}	S_{c1}	V_{fa}	V_{fb}	V_{fc}
V_0	0	0	0	0	0	0
V_1	1	0	0	$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$
V_2	1	1	0	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$
V_3	0	1	0	$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$
V_4	0	1	1	$-2V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$
V_5	0	0	1	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$
V_6	1	0	1	$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$
V_7	1	1	1	0	0	0

V ₇	1	1	1	0	0	0
----------------	---	---	---	---	---	---

II.3.2 Filtre de découplage

Le but du filtre de découplage est de permettre la connexion de l'onduleur de tension au réseau électrique qui est très souvent considéré comme une source de courant qui génère des courants harmoniques à partir de la différence des tensions entre la sortie du pont onduleur et le réseau [4]. Ce filtre est un filtre qui limite certes la dynamique du courant mais réduit en même temps la propagation sur le réseau électrique des composantes dues aux commutations.

Dans ce travail, nous avons utilisé un filtre entre l'onduleur et le réseau électrique qui se compose d'une inductance L_f de résistance interne R_f , comme le montre la figure (II.4)

Notons toutefois que des filtres de découplage du troisième ordre, de type L-C-L, pourraient également être utilisés. Dans notre étude, nous emploierons ce filtre du premier ordre.

II.3.3 Système de stockage de l'énergie

Le stockage de l'énergie est réalisé côté continu à l'aide d'un système de stockage capacitif, représenté par un condensateur C_{dc} jouant le rôle d'une source de tension continue. Le choix des paramètres du système de stockage (v_{dc-ref} et C_{dc}) a une influence directe sur la dynamique du FAP et sur ses performances de compensation. D'une part, une tension v_{dc-ref} élevée améliore la dynamique du FAP. D'autre part, les ondulations de la tension continue v_{dc} , causées par les courants engendrés par le FAP et limitées par le choix de la valeur de C_{dc} , peuvent dégrader la qualité de compensation du FAP. Une valeur élevée de C_{dc} réduit les ondulations de v_{dc} mais augmente le coût et la taille du FAP Sachant que l'augmentation de la valeur de la tension continue améliore la marge de commandabilité du FAP 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 la plus élevée possible tout en respectant les contraintes nominales des semi-conducteurs et la contrainte de commandabilité de l'onduleur.

II.4 Etude de la partie de commande

II.4.1 Identification des courants harmoniques de référence

✓ Méthodes du domaine fréquentiel

Cette méthode utilise la transformée de Fourier rapide dans le domaine fréquentiel, pour extraire les harmoniques du courant. Cette méthode est bien adaptée aux charges où le

contenu harmonique varie lentement. Elle donne aussi l'avantage de sélectionner les harmoniques individuellement et de ne choisir de compenser que les plus prépondérants. Il est à noter que cette méthode nécessite une grande puissance de calcul afin de réaliser, en temps réel, toutes les transformations nécessaires pour extraire les harmoniques.

Les inconvénients les plus importants de ces méthodes sont des résultats moyens en régime transitoire et un volume de calcul et une allocation de mémoire très considérables [24].

✓ **Méthode du domaine temporel**

Les méthodes du domaine temporel permettent une réponse plus rapide et requièrent moins d'opérations que les méthodes précédentes. Le principe de ce type de méthodes est la séparation du fondamental ou de certains harmoniques du reste des harmoniques par filtrage.

Les méthodes les plus importantes sont [25] :

- La théorie P-Q de la puissance instantanée.
- Algorithme du Repère de Référence Synchronisé (SRF).
- Algorithme de la détection synchronisée (SDA).
- Algorithme Fryze-Bucholz Depenbanck (FBD).
- La méthode sinusoïdale Généralisée de Fryze (SGF).
- La méthode basée sur le courant actif.
- La méthode tri-monophasée.
- La méthode basée sur la régulation de la tension.

II.4.2 Stratégie d'identification

La stratégie de commande se base sur la détection des courants perturbateurs dans le domaine temporel. Il existe 3 possibilités d'identification des courants perturbateurs.

- ✓ 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 de la tension de la source.

La première méthode est la plus utilisée pour le filtre actif parallèle pour compenser les courants perturbateurs causés par les charges polluantes. Cette méthode de détection sera employée dans cette étude [26].

II.5 Comparaison entre les méthodes d'identification des courants harmoniques

La méthode de la théorie (P-Q) a l'avantage d'être assez simple pour la mettre en

application sous forme analogique puisqu'elle a besoin seulement des opérations de multiplication et de filtrage simple.

L'inconvénient le plus évident de la méthode (P-Q) est qu'elle s'exécute mal dans des conditions non équilibrées de tension d'alimentation, parce que l'algorithme suppose que les tensions d'alimentation sont sinusoïdales et équilibrées.

Un avantage de la méthode SRF est qu'elle s'exécute bien avec n'importe quelle forme d'onde du courant. Un inconvénient est que l'algorithme est assez complexe et exige un circuit PLL pour fonctionner correctement.

Dans la méthode SDA, l'exécution est bonne pour les conditions de la tension d'alimentation en cas de déséquilibre. Un inconvénient de cette méthode est qu'elle suppose que les courants dans chaque phase sont égaux, ou la charge est équilibrée.

Tableau II.2 Comparaison entre les méthodes d'identification des harmoniques.

La méthode	Analogique	Numérique	Avantages	Inconvénient
Théorie P-Q	Oui	Oui	Simple	Bonne pour des tensions sinusoïdales uniquement.
SRF	Non	Oui	Utilisé pour une source déséquilibré avec/sans distorsion	Exige un circuit PLL.
SDA	Oui	Oui	Utilisé pour une source déséquilibré.	Suppose que les courants dans les phases sont équilibrés.
SGF	Non	Oui	Utilisé pour une source déséquilibré avec/sans distorsion	Exige un circuit PLL.

II.5.1 La méthode de puissances instantanées

Cette méthode exploite la transformation des paramètres du système dans le repère triphasé *abc* en biphasé dans le repère stationnaire $\alpha\beta$, pour obtenir les puissances réelles et

imaginaires. Notons par (V_α, V_β) et (I_α, I_β) les composantes orthogonales du repère α - β associées respectivement aux tensions de raccordement du filtre actif parallèle (V_s) et aux courants absorbés par les charges polluantes (I_s). La transformation α - β -0 triphasée permet d'écrire la relation des tensions suivante [15].

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a1} \\ V_{b2} \\ V_{c3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.1})$$

Et la relation des courants ci-dessous

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a1} \\ I_{b2} \\ I_{c3} \end{bmatrix} \quad \text{II (.2)}$$

Les composantes avec l'indice (0) représentent les séquences homopolaires du système triphasé du courant et de tension.

La puissance active instantanée, notée $P(t)$, est définie par la relation suivante

$$\begin{cases} P(t) = V_{a1}I_{a1} + V_{b2}I_{b2} + V_{c3}I_{c3} = P(t) + P_0(t) \\ P(t) = V_\alpha I_\alpha + V_\beta I_\beta \\ P_0(t) = V_0 I_0 \\ P(t): \text{ la puissance réelle instantanée.} \\ P_0(t) : \text{ la puissance homolaire instantanée.} \end{cases} \quad \text{II3}$$

L'avantage de la transformation α - β -0 est la séparation des séquences homopolaires du système triphasé de courant ou de tension. De la même manière, la puissance imaginaire instantanée peut s'écrire sous la forme suivant [10] :

$$q(t) = 1/\sqrt{3} [(V_{a1}-V_{b2})I_{1c} + (V_{b2}-V_{c3})I_{1a} + (V_{c3}-V_{a1})I_{1b}] = V_\alpha I_\beta - V_\beta I_\alpha \quad (\text{II.4})$$

La puissance q a une signification plus large que la puissance réactive habituelle. En effet, contrairement à la puissance réactive, qui ne considère que la fréquence fondamentale, la puissance imaginaire prend en compte toutes les composantes harmoniques de courant et de tension. C'est pourquoi on lui donne une autre dénomination (puissance imaginaire) avec comme unité le volt-ampère imaginaire (VAI).

A partir des relations (II.1) et (II.2), nous pouvons établir la relation matricielle suivante:

$$\begin{bmatrix} P \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

Dans le cas général, chacune des puissances p et q comporte une partie continue et

une partie alternative, ce qui nous permet d'écrire l'expression ci-dessous :

$$\begin{cases} p = \bar{p} + \tilde{p} \\ q = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

- \bar{P} Une puissance continue liée à la composante fondamentale active du courant et de la tension.
- \bar{q} Une puissance continue liée à la composante fondamentale réactive du courant et de la tension.
- et \tilde{q} des puissances alternatives liées à la somme des composantes perturbatrices du courant et de tension.

II.5.2 Séparation des puissances perturbatrices

Après avoir identifié les pulsations des puissances instantanées, le filtre de puissance chargé d'isoler les puissances active et réactive conventionnelles peut être dimensionné. Pour avoir la composante alternative, on utilise un filtre passe haut.

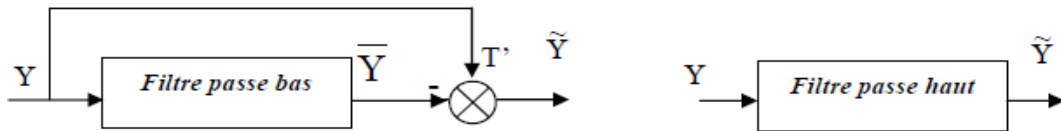


Figure II.5: Schéma représentant le principe de séparation des puissances (Y= p ou q)

II.5.3. Calcul des courants perturbateurs

En inversant la relation (II.5), nous pouvons recalculer les courants dans le repère $(\alpha-\beta)$ comme le montre l'équation (II.8).

$$\begin{bmatrix} i\alpha \\ i\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{V_{s\alpha}^2 + V_{s\beta}^2} \begin{bmatrix} V\alpha & -V\beta \\ V\beta & V\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (II.7)$$

En considérant les équations (II.7) et (II.8), nous pouvons séparer le courant dans le repère $(\alpha-\beta)$ en trois composantes, active et réactive à la fréquence fondamentale et les harmoniques. Ceci conduit à [36]:

$$\begin{bmatrix} i\alpha \\ i\beta \end{bmatrix} = \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} p}_{\text{Courant actif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ q \end{bmatrix}}_{\text{courant réactif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix}}_{\text{courants harmoniques}} \quad (II.8)$$

Avec $\Delta = V_\alpha^2 + V_\beta^2$, supposé constant dans l'hypothèse d'une tension sinusoïdale équilibrée du réseau électrique.

Cette expression montre donc que l'identification des différentes composantes du courant dans le repère $(\alpha-\beta)$ revient à séparer des termes continus des puissances réelle et imaginaire. On appliquant la transformation inverse de Concordia on trouve les courants produits par charge non linéaire comme suit :

$$\begin{bmatrix} i_{1h} \\ i_{2h} \\ i_{3h} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} i_{\alpha h} \\ i_{\beta h} \end{bmatrix} \quad (II9)$$

On trouve la relation globale des courants harmoniques :

$$\begin{bmatrix} i_{1h} \\ i_{2h} \\ i_{3h} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{1}{\sqrt{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{\alpha} & -V_{\beta} \\ V_{\beta} & V_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (II10)$$

II.5.4 Algorithme d'identification

Le schéma de la figure (II.6) illustre les différentes étapes permettant l'obtention des composantes harmoniques du courant d'une charge non linéaire.

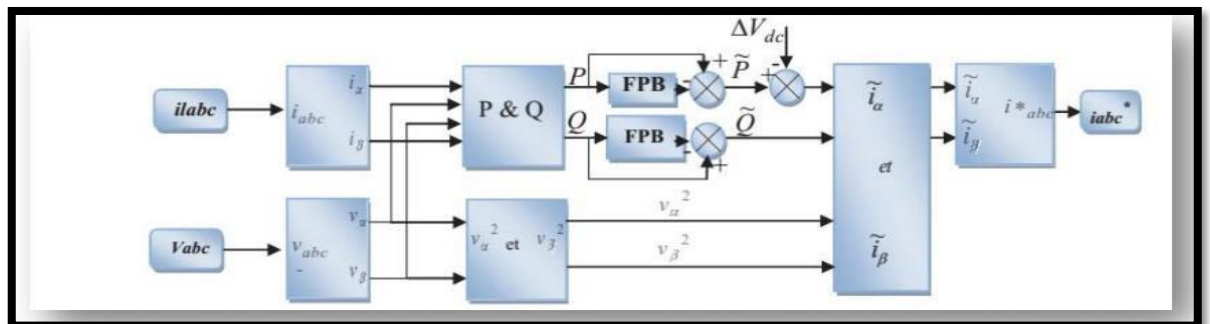


Figure II.6.: Principe de la méthode (pq).

II.6 Contrôle des courants du filtre actif

Pour maintenir le courant à la sortie du filtre actif autour de sa référence calculée au chapitre précédent, deux techniques de commande peuvent être utilisées :

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

L'objectif de la commande, que se soit à MLI, ou par hystérésis, est de générer les ordres d'ouverture/fermeture des interrupteurs de manière à ce que le courant du filtre actif soit le plus proche de sa référence [21].

II .6.1 Commande à hystérésis

La commande conventionnelle par hystérésis est très couramment utilisée de par sa simplicité d'utilisation et sa robustesse. En fait, cette stratégie assure un contrôle satisfaisant du courant sans exiger une connaissance poussée du modèle du système à contrôler ou de ses paramètres.

La figure (II.5) expose son principe qui consiste à établir dans un premier temps le signal d'erreur, différence entre le courant de référence i_{refk} et le courant produit par l'onduleur i_f . Cette erreur est ensuite comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis afin de fixer les ordres de commande des interrupteurs. Cette commande présente cependant un inconvénient majeur : elle ne permet pas de contrôler la fréquence de commutatif des semi-conducteurs, d'où la présence d'un nombre important d'harmoniques dans les courants générés.

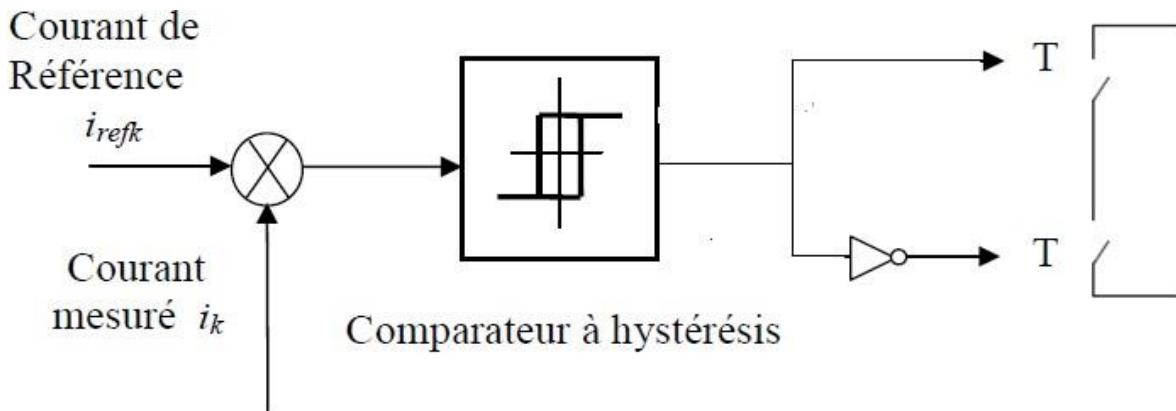


Figure II.7: Principe de la commande des courants par hystérésis.

II .6.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)

Afin de contourner les problèmes précédents, nous introduirons une deuxième famille de commande de l'onduleur :

la commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI). La technique de commande par MLI résout le problème de la maîtrise de la fréquence de commutation en fonctionnant avec une fréquence fixe facile à filtrer en aval de l'onduleur.

La plus simple et la plus connue des modulations de largeur d'impulsion est sans doute la MLI à échantillonnage naturel, dite MLI intersective. Cette technique de commande met en œuvre d'abord un régulateur qui détermine la tension de référence de l'onduleur (modulatrice) à partir de l'écart entre le courant mesuré et sa référence. Cette dernière est ensuite comparée avec un signal triangulaire (porteuse à fréquence élevée fixant la fréquence de commutation). La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs. Le schéma de

principe est donné par la figure (II.8) [21].

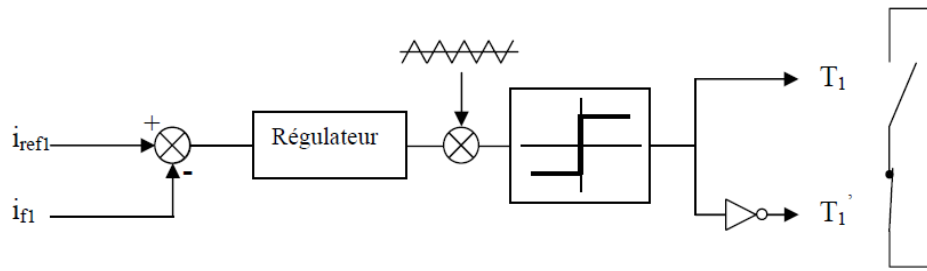


Figure II.8: Principe de commande des courants par MLI.

Les signaux logiques C qui en résultent donnent l'ordre de commutation des interrupteurs du filtre (Figure II.9) :

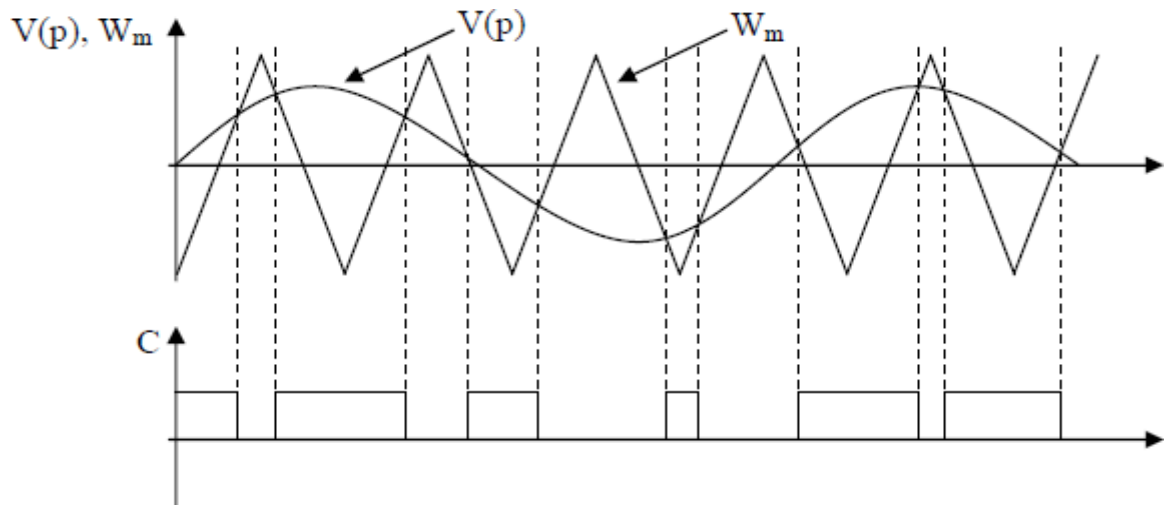


Figure II.9: commutations sur un bras d'un Figure IV.5 Répartition des onduleur.

Cette -MLI- sert à remédier ces problèmes et elle a les avantages suivantes : 1)- Variation de la fréquence de la tension de sortie.

2)- Elimination de certaines harmoniques de tension.

3)- Elle repousse les harmoniques vers des fréquences plus élevées .

II.7 Conclusion

Dans ce chapitre, on a évoqué la structure générale d'un FAP triphasé permettant de compenser les harmoniques de courant d'un réseau électrique triphasé à trois fils. on a étudié les performances des algorithmes de commande du filtre actif parallèle appliqué sur la charge non linéaire. On a montré l'intérêt d'utiliser des convertisseurs (onduleurs) pour la dépollution des réseaux électriques .

Chapitre III :
COMMANDE PAR LOGIQUE
FLOUE DU FILTRE ACTIF
PARALLELE

III.1 Introduction

Dans le domaine du génie électrique, la commande à logique floue a fait l'objet de plusieurs travaux : dans la commande des convertisseurs statiques et dans la commande des machines électriques dans la navigation de robots mobiles . Toutes ces applications ont démontré qu'un régulateur à logique floue est plus robuste qu'un régulateur conventionnel.

Les performances que la commande floue peut apporter par comparaison avec les commandes classiques, sont essentiellement dues à la méthode de conception de ces régulateurs. En effet, ces derniers ne nécessitent pas la connaissance des modèles mathématiques du système. Par contre ils ont besoin d'un ensemble de règles basées essentiellement sur les connaissances d'un opérateur qualifié manipulant le système.

III.2 La logique floue

Aujourd'hui, la logique floue (en anglais fuzzy logic) est de grande actualité. Il s'agit d'une nouvelle méthode de traitement pour les problèmes de réglage ou de commande.

III.2.1 Domaine d'application

Les systèmes flous ont été utilisés dans une large variété d'applications industrielles, gestionnaires et médicales. Parmi ses applications on peut citer [23] :

- Systèmes audio-visuels (appareils de photos autofocus, caméscope à stabilisateur d'images, photocopieurs, ...).
- Appareils électroménagers (lave-linge, aspirateurs, autocuiseurs, ...etc.).
- Systèmes autonomes mobiles.
- Systèmes de transport (train, métro, ascenseur, ...).
- Systèmes de contrôle/commande dans la plupart des domaines industriels de production.

III.3 Principe de la logique floue

La logique floue repose sur la théorie des ensembles flous développée par LOTFIA ZADEH début des années 1960, (automaticien contemporain de kalman de l'université de Californie de Berkeley) [21]. A côté d'un formalisme mathématique fort développé, nous préférons aborder la présentation de manière intuitive [12]. Le terme «logique floue » a deux

aspects :

✓ Le premier correspond à tous les développements concernant la théorie des ensembles flous.

✓ Le deuxième représente une extension de la logique classique dans le but de raisonner sur des connaissances imparfaites.

Pour le cas de la logique classique (logique de Boole) qui admet deux valeurs 0 ou 1, la classification des personnes selon leurs âges pourrait se faire comme illustré dans la figure III.1.

Toutes les personnes âgées de moins de 30 ans appartiennent à l'ensemble jeune et toutes les personnes âgées de plus de 50 ans sont considérées comme appartenir à l'ensemble « âgé ».

Cependant une telle logique de classification n'est même pas logique car la question qui se pose : pourquoi une personne âgée de 50 ans doit être considérée comme appartenant à l'ensemble « âgé » ? En réalité un tel passage se fait progressivement et individuellement. En outre lors de la classification par logique classique on ne prend pas en considération des personnes situées dans la zone « entre deux âges ».

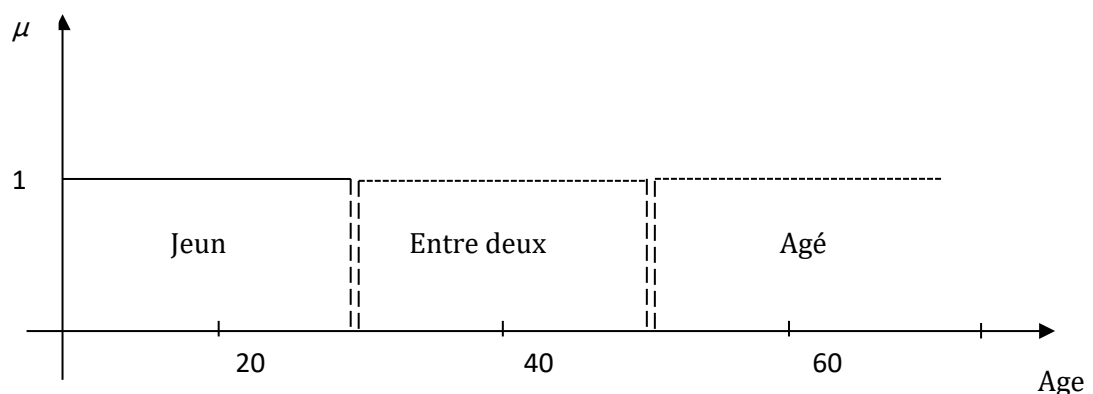


Figure III.1 : Classification des personnes en trois ensembles selon la logique classique.

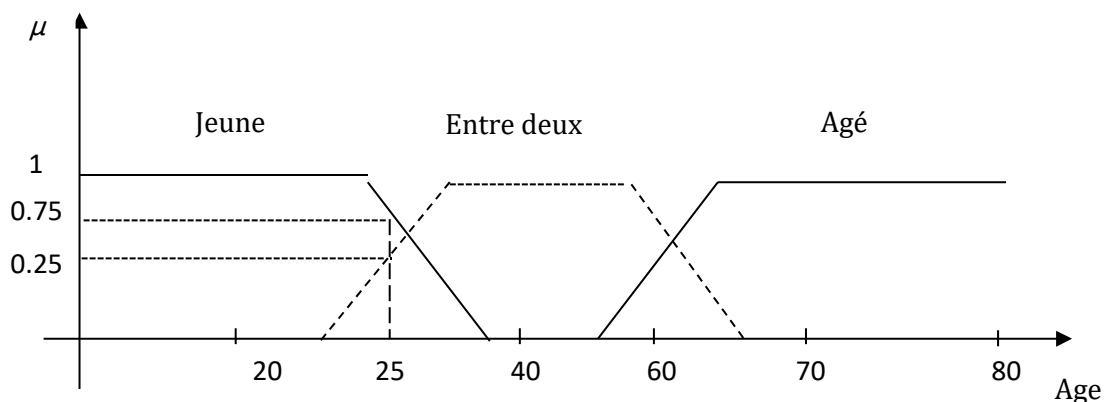


Figure III.2 : Classification des personnes en trois ensembles selon la logique floue.

La logique floue, dont la fonction d'appartenance peut prendre n'importe quelle valeur entre 0 et 1 permet de tenir compte de cette réalité. Il est donc possible de trouver une autre classification pour l'exemple précédent à l'aide de la logique floue. Les limites ne varient pas soudainement mais progressivement comme le montre la figure III.2.

III.4 Eléments 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.4.1 Variables linguistiques

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 à savoir: grand, petit, positif, négatif, nul, chaud, froid, etc. Ces différentes classes d'expressions floues dénommées ensembles flous constituent ce que on appelle les 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 [22].

III.4.2 Ensembles floue

Dans la théorie classique des ensembles, c'est la fonction caractéristique qui définit l'ensemble. Cette fonction ne prend que les deux valeurs discrètes 0 (l'élément n'appartient pas ...) ou 1 (l'élément appartient à l'ensemble). Par contre l'élément de base de la logique floue est l'ensemble flou ; défini par une fonction d'appartenance qui peut prendre toutes les valeurs réelles comprises entre 0 et 1 et qui joue un rôle fondamental pour le passage du qualitatif au quantitatif. Le concept de ce dernier a pour but d'éviter le passage brusque d'une classe à une autre et de permettre des graduations dans l'appartenance d'un élément à une classe ; c'est-à-dire d'autoriser un élément à appartenir plus ou moins fortement à une classe [17].

III.4.3 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 [23].

Généralement, les plus souvent utilisées sont les fonctions de forme trapézoïdale ou triangulaire ou gaussiennes.

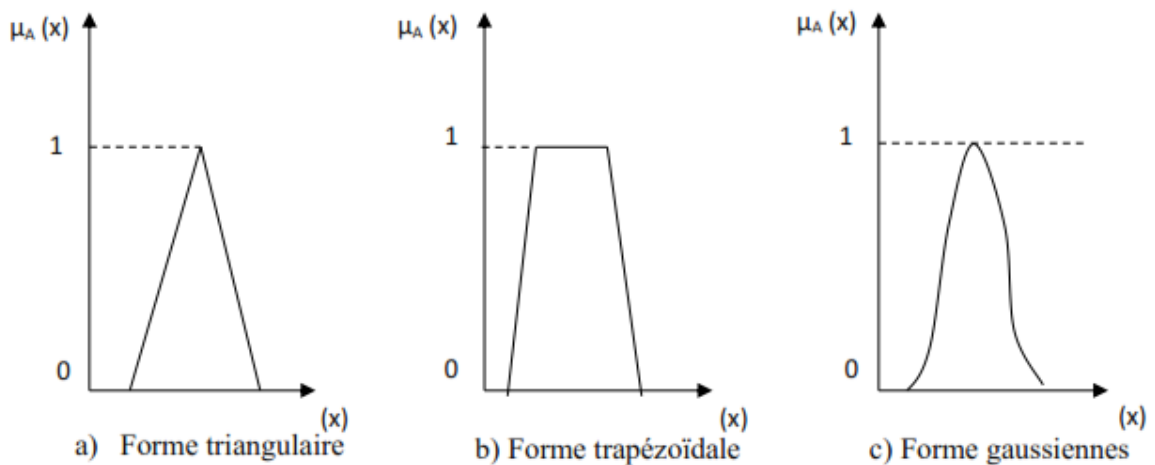


Figure III.3 : Différentes formes des fonctions d'appartenance.

III.4.4 Opérateurs de la logique floue

Une fois les ensembles flous définis, des opérations mathématiques concernant ce type d'ensembles ont été développées. Les opérateurs mathématiques élaborés ressemblent beaucoup à ceux reliés à la théorie des ensembles conventionnels. Les opérateurs de l'intersection, l'union, la complémentation et l'implication sont traduites, par les opérations « *ET*, *OU*, *NON* et *ALORS* »

» respectivement .soient *A* et *B* deux ensembles flous, dont les fonctions d'appartenance sont μ_A et μ_B respectivement, le tableau suivant résume quelques fonctions utilisées pour réaliser les différentes opérations. D'autre part, Pour cette opération, il existe encore plusieurs méthodes. Les plus souvent utilisées sont données par le tableau suivant [16].

Tableau III.1 : Implication floue.

Différents appellations	Implication flou
Zadeh	$\text{Max} \{ \min((\mu_A(x), \mu_B(y)), 1 - \mu_A(x)) \}$
Mamdani	$\text{Min}(\mu_A(x), \mu_B(y))$
Reichenbach	$1 - (\mu_A(x) + \mu_A(y)) \cdot \mu_B(y)$
Willmott	$\text{Max} \{ 1 - \mu_A(x), \min((\mu_A(x), \mu_B(y)), 1 - \mu_A(x)) \}$
Diénes	$\text{Max} (1 - \mu_A(x), \mu_B(y))$
Brown goldi	$\mu_A(x) \leq \mu_B(y)$
Lukasiewicz	$\text{Min} (1, 1 - \mu_A(x) + \mu_B(y))$
Larsen	$(\mu_A(x), \mu_B(y))$

III.4.5 Règles floues

La règle floue est une relation exprimée à l'aide d'une implication entre deux propositions floues, par exemple, considérons deux variables linguistiques (V_1, U, T_{V1}) (V_2, U, T_{V2}) et les deux propositions suivantes 'V1 est A', 'V2 est B', ou A et B sont deux ensembles flous de V1 et V2. On peut définir la règle floue par l'expression, si V1 est A Alors V2 est B.

Généralement, plusieurs règles floues sont nécessaires pour prendre une décision face à une situation donnée. On s'intéresse au cas de plusieurs règles floues dans le domaine de la commande et la régulation. Les règles floues peuvent être décrites de plusieurs façons [17]:

*Linguistiquement * Symboliquement * Par matrice d'inférence

III.5 Commande par logique floue

La commande floue est certainement le domaine d'application de la logique floue le plus utilisé. Son but est, comme en automatique classique de gérer un processus selon une consigne désirée, par action sur des grandeurs physiques. Sa particularité est de reproduire le comportement d'un opérateur humain, plutôt que de réaliser un modèle mathématique du système [24].

III.5.1 Constitution d'un système floue

Un système flou est composé de quatre parties essentielles [25]:

- La base de connaissance constituée d'une base de données et d'une base de règles.

- Le système d'inférence.
- L'interface de fuzzification.
- L'interface de défuzzification.

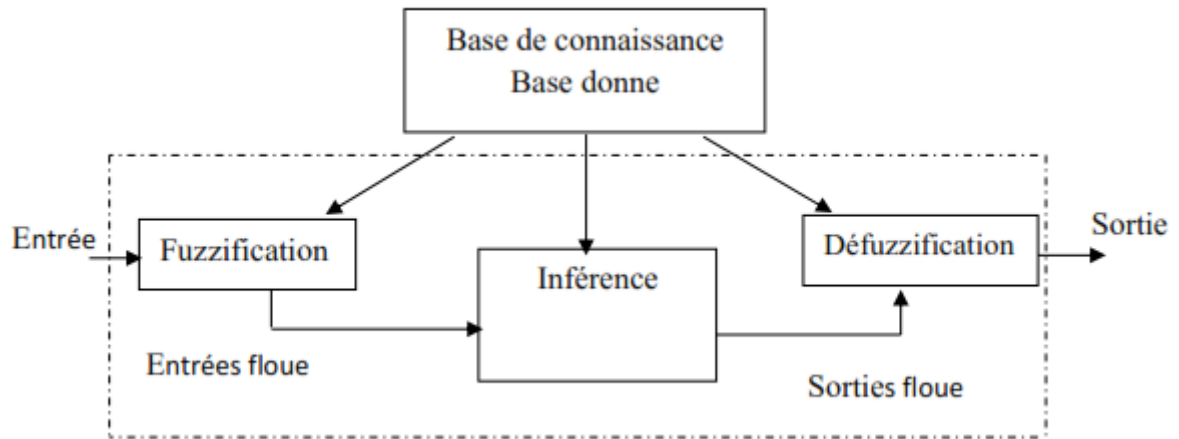


Figure III.4 : Schéma général d'un système flou [25].

III.5.1.1 Interface de fuzzification

La fuzzification est l'opération de projection des variables physiques réelles sur des ensembles flous caractérisant les valeurs linguistiques prises par ces variables. Le bloc de fuzzification effectue les fonctions suivantes [23]:

➤ établit les plages de valeurs pour les fonctions d'appartenance à partir des valeurs des variables d'entrées.

➤ effectue une fonction de fuzzification qui convertit les données d'entrée en valeurs linguistiques convenables qui peuvent être considérées comme l'étiquette des ensembles flous. Cette opération doit être effectuée dans un domaine normalisé généralement par l'intervalle $[-1,1]$ afin de faciliter le calcul.

III.5.1.2 Base de règles

C'est la collection de règle qui permet de lier les variables floues d'entrée et de sortie, elles ont la forme: "if- then" ou "si-alors", elles peuvent être écrites textuellement faisant appel à des entrées et à des sorties et elles sont données par des experts d'une manière directe numériques ou par des termes ou variables linguistique à travers des fonctions d'appartenance [25].

III.5.1.3 Mécanisme d'inférence floue

Le principe de cette opération consiste à établir la liaison entre les grandeurs d'entrée du régulateur exprimées par des termes linguistiques et la variable de sortie sous sa forme

linguistique à partir d'une parfaite connaissance du système à régler et d'une expertise concernant le fonctionnement du processus à régler. Les trois méthodes d'inférence les plus usuelles sont :

- Max-Produit.
- Somme-produit.
- Max-Min (Implication de Mamdani).

III.5.1.4 Interface de Défuzzification

Comme nous avons vu dans la section précédente, les méthodes d'inférence fournissent un résultat qui est une fonction d'appartenance. Or, la sortie du contrôleur est en général une grandeur continue, prenant sa valeur dans un intervalle. La défuzzification est le traitement qui permet de définir une correspondance entre le résultat de l'inférence et la grandeur continue fournie en sortie [26].

Plusieurs stratégies de Défuzzification ont été développées. Les plus utilisées sont :

a) Méthode du maximum

Comme son nom l'indique, la commande en sortie est égale à la commande ayant la fonction d'appartenance maximale.

La méthode du maximum simple, rapide et facile mais elle introduit des ambiguïtés et une discontinuité de la sortie (parfois on trouve deux valeurs maximales).

b) Méthode de la moyenne des maxima

Elle considère, comme valeur de sortie, la moyenne de toutes les valeurs pour lesquelles la fonction d'appartenance issue de l'inférence est maximale.

c) Méthode du centre de gravité

La méthode du centre de gravité c'est la méthode de Défuzzification la plus utilisée, son principe repose sur la détermination de l'abscisse du centre de gravité x^* de la fonction d'appartenance résultante de l'inférence $\mu_C(z)$. Cette abscisse correspond à la valeur de sortie du régulateur [17].

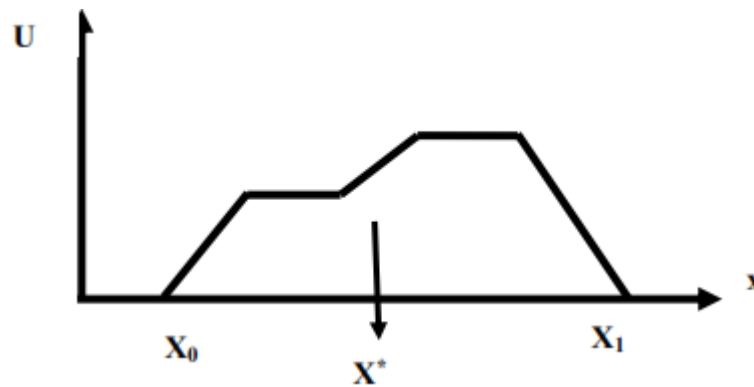


Figure III.5 : Défuzzification par centre de gravité.

$$X^* = \frac{\int_{x_0}^{x_1} x.U(x).dx}{\int_{x_0}^{x_1} U(x).dx}$$

III.6 Stratégies de commande de l'onduleur deux niveaux

Le but de la commande de l'onduleur est de permettre la meilleure reproduction des courants ou des tensions perturbés de référence, à travers les ordres de commande appliqués aux drivers interrupteurs de puissance, on peut commander les convertisseurs statiques par deux stratégies différentes qui sont :

- ✓ La commande par hystérésis à bande fixe.
- ✓ La commande par hystérésis à bande floue.

Ces études ont montrées également que les onduleurs triphasés offrent une grande amélioration sur la qualité des tensions de sortie.

Dans ce chapitre, on étudiera l'onduleur de tension triphasé et les stratégies de commandes et technique d'hystérésis avec les deux types de commande de la bande fixe et de la bande floue [12].

III.6.1 Commande de l'onduleur par hystérésis à bande fixe

La commande par hystérésis permet de fixer un courant de référence dans les lignes du réseau électrique, c'est une commande non linéaire qui utilise l'erreur existant entre les courants de références et le courant produit par l'onduleur, cette erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis. [12]. Dès que l'erreur atteint la bande inférieure ou supérieure, un ordre de commande est envoyé de manière à rester à l'intérieur de la bande, comme le montre la figure III.5.

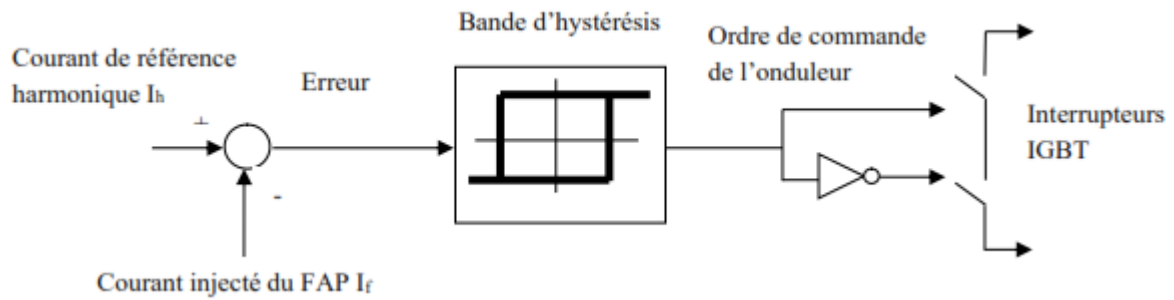


Figure III.6 : Commande par hystérésis pour l'onduleur.

- Si : $\Delta I \geq h$ la tension est forcé à son niveau minimal pour faire décroître le courant.
- Si : $\Delta I \leq -h$ la tension est forcé à son niveau maximal pour faire accroître le courant.

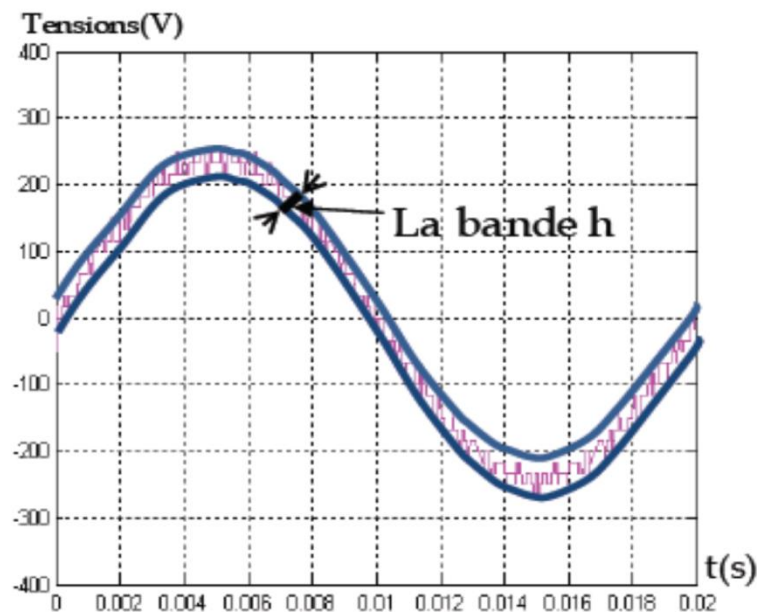


Figure III.7 : Principe de contrôle des courants par la technique d'hystérésis.

III.6.2 Commande par hystérésis à bande floue

Cette technique de modulation consiste également à réduire les écarts entre les courants de références et les courants générés par le filtre actif et cela à fréquence constante. Les variables de l'équation peuvent être facilement implantées avec la logique floue tout en améliorant les performances du filtre actif. Dans cette étude, on prend comme variable de sortie la bande hystérésis et comme variable d'entrée, la dérivée du courant du filtre injecté di_f^*/dt et de la tension du réseau $V_s(t)$. On notera que pour la variable de sortie les fonctions d'appartenance correspondant aux sous-ensembles flous sont : TPP : Très Petit Positif, PP : Petit Positif, PM : Moyen Positif, PG : Grand Positif, TPG : Très Grand Positif. Chaque variable d'entrée est transformée en grandeur linguistique à cinq sous-ensemble floue PG : Grand Positif, PM : Moyen Positif, EZ : Environ Zéro, NM Négatif Moyen, NG : Négatif Grand, comme le montre la figure (III.8). Les règles de commande sont résumées dans la

matrice d'inférence en tableau III.2 [18].

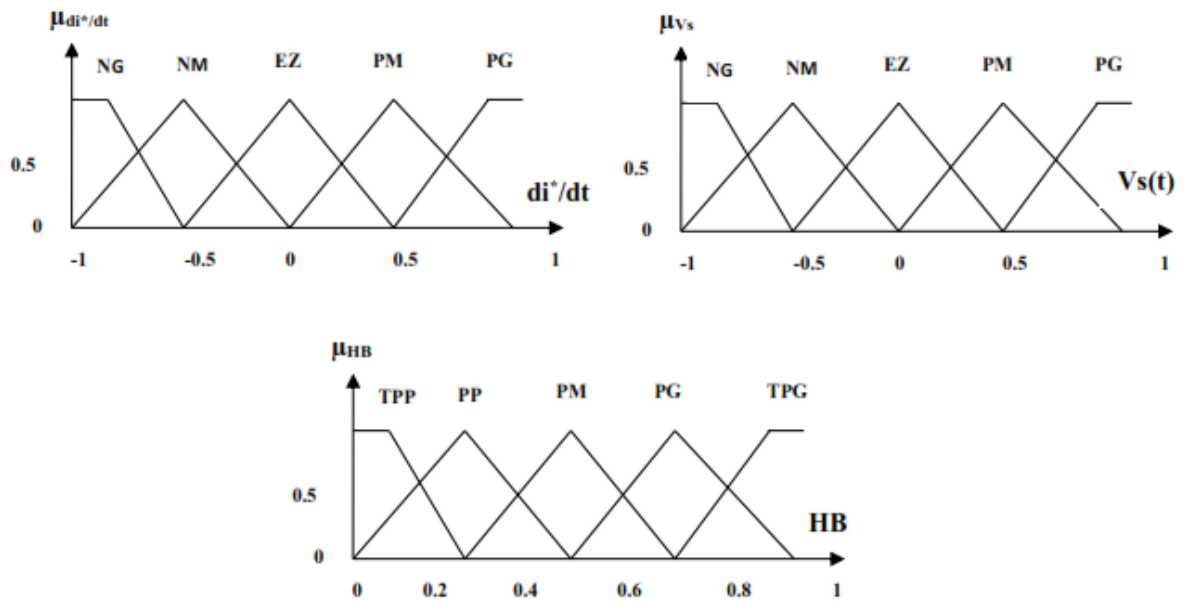


Figure III.8 : Les fonctions d'appartenance des variables.

Tableau III.2 : Règles de la commande floue.

di^*/dt	NG	NM	EZ	PM	PG
$V_s(t)$					
NG	PP	PP	PM	PP	PP
NM	PP	PM	PG	PM	PP
EZ	TPP	PM	TPG	PM	TPP
PM	PP	PM	PG	PM	PP
PG	PP	PP	PM	PP	PP

III 7 Conclusion

La logique floue est une technique pour le traitement de connaissances imprécises basées, sur des termes linguistiques; elle donne les moyens de convertir une commande linguistique basée sur le raisonnement humain, en une commande automatique, permettant ainsi la commande des systèmes complexes dont les informations sont exprimées d'une façon vague et mal définie.

Chapitre IV :
Modélisation du filtre
actif parallèle et résultats
de simulation

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter la simulation de la commande du filtre actif parallèle à base d'un onduleur de tension, par la méthode des puissances instantanées (pq). À la fin, et après l'établissement de notre modèle sous Simulink de Matlab, plusieurs essais vont être apportés afin de prouver son bon fonctionnement et tester sa performance.

IV.2 Tableau des paramètres du réseau

Nous avons modélisé puis simulé le réseau électrique triphasé à trois fils, et sa charge non linéaire, sans connecter le filtre actif.

Le tableau (IV.1) regroupe l'ensemble des paramètres du réseau, Filtre actif parallèle et de la charge polluante utilisés dans la simulation.

Tableau IV.1 : Paramètres de simulation d'un filtre actif

Paramètre		Valeur numérique
Réseau électrique	V_s	70.66 V
	Fréquence f	50 Hz
	Résistance R_s	0.42 Ω
	Inductance L_s	0.1mH
Charge perturbatrice	Résistance R_c	11 Ω
	Inductance L_c	0.1mH
Filtre actif parallèle	Inductance L_f	0.1mH
	Tension V_{dc}	200V

IV.3 Modélisation de l'association réseau- filtre actif- charge polluante :

IV.3.1 Description du système :

Le système utilisé dans cette partie est composé d'une source triphasée, d'une charge non linéaire et d'un filtre actif parallèle formé par un onduleur de tension à trois bras avec des semi-conducteurs (IGBT) et sans neutre raccordé. Le stockage de l'énergie du côté continu est réalisé par un condensateur. Pour raccorder l'onduleur au réseau et le commander, il est nécessaire d'utiliser un filtre de raccordement de nature inductive pour filtrer les courants de hautes fréquences. Bien sûr, un système de commande s'ajoutera dans le système global pour commander le filtre actif parallèle.

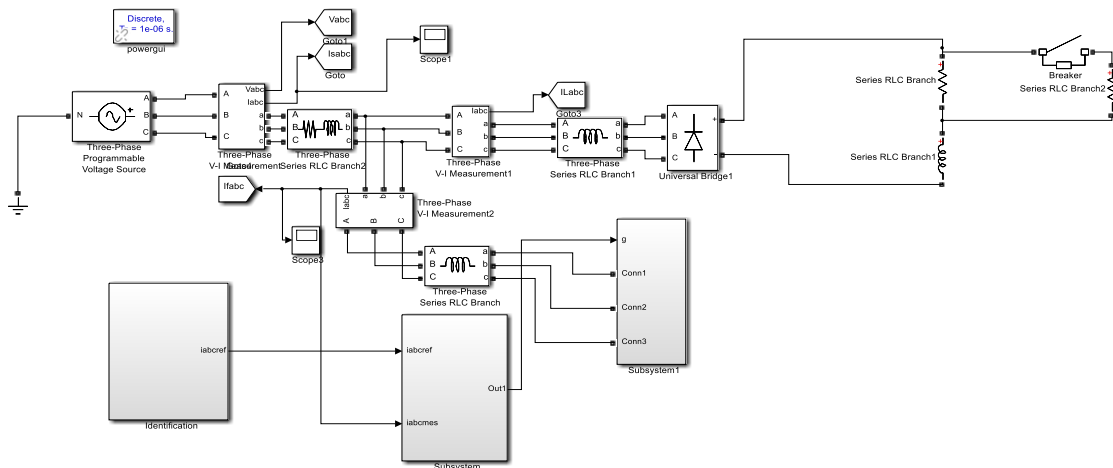


Figure IV.1: Schéma global du système de compensation

IV.3.2 Modélisation de la charge polluante (Redresseur triphasé) :

Pour tester le filtre actif on a opté pour une charge polluante qui est un pont redresseur triphasé, représenté par la figure.

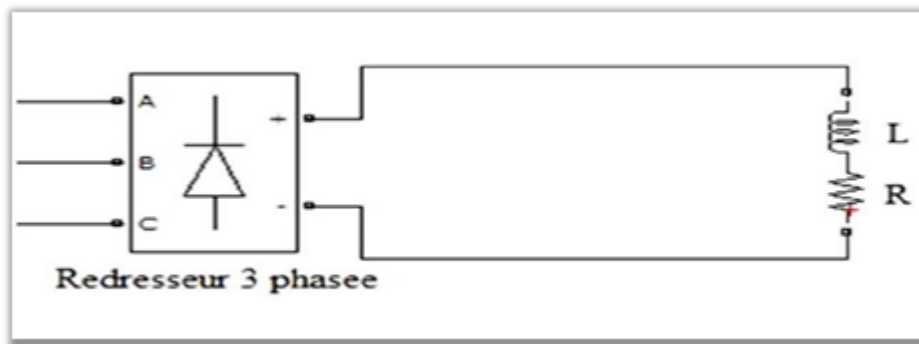


Figure IV.2 charge polluante

IV.4 Modélisation du filtre actif (l'onduleur) :

On peut réaliser un onduleur de tension triphasé en groupant trois demi ponts monophasé la figure(IV.3) représente un onduleur triphasé de tension. Il se compose de trois bras à interrupteurs réversible en courant, commandé à la fermeture et à l'ouverture ,réalisé à partir d'un (GTO ou IGBT) et une diode en antiparallèle.

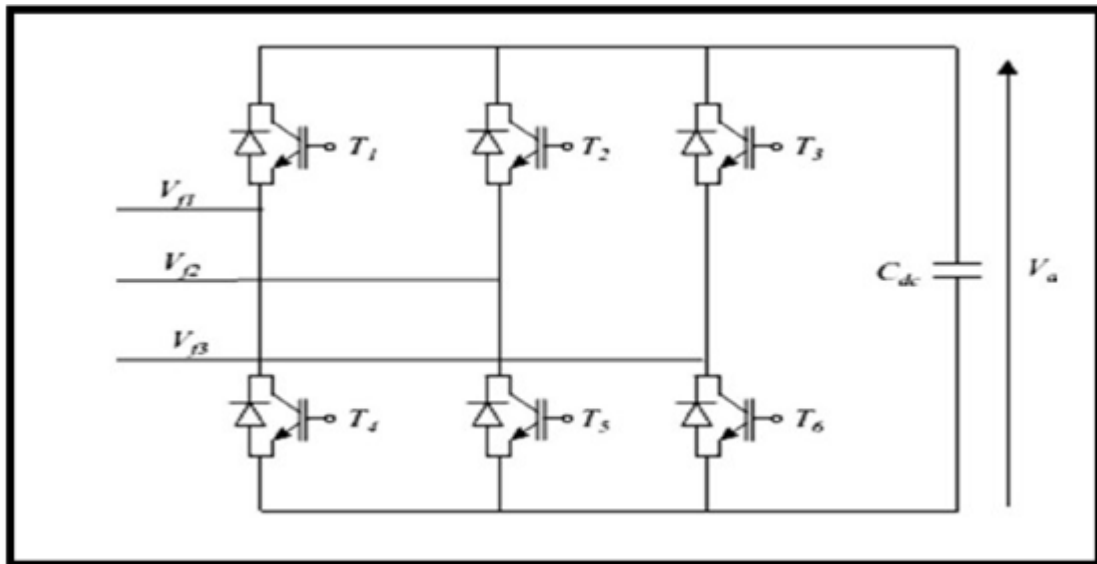


Figure IV.3 : Présentations d'un onduleur triphasé

IV.4.1 Commande par hystérésis :

La commande par hystérésis, contribue à la dénomination de commande en tout ou rien, et à un but de contrôler les courants de compensation en les forçant à suivre ceux de référence. Un système de base pour le contrôle de la bande d'hystérésis est représenté sur la Figure (IV.9)

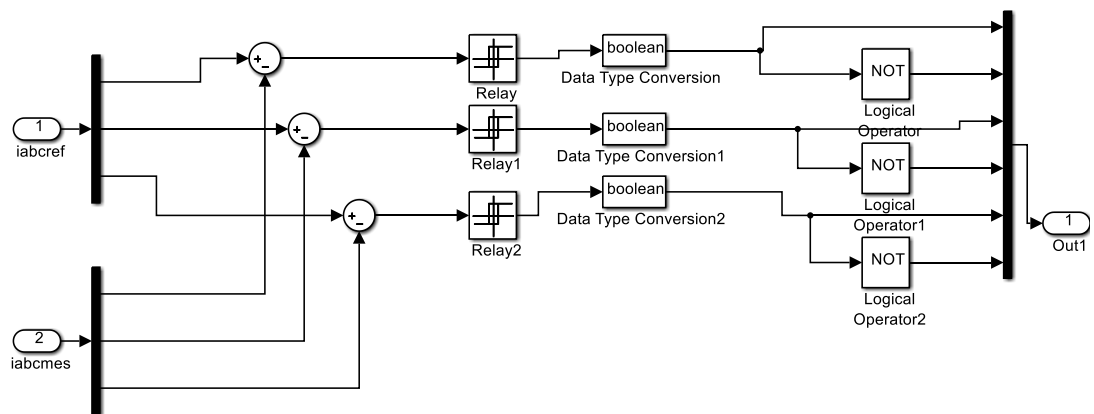


Figure IV.4 : Model Simulink de la commande hystérésis

IV.5 Modélisation des méthodes d'identification des harmoniques :

IV.5.1 Méthode de puissance instantanée :

Elle est basée sur les valeurs instantanées dans les systèmes d'alimentation triphasés avec ou sans neutre, en plus elle est valable pour les opérations en régime permanent ou transitoire. La théorie (pq) met en œuvre une transformation d'un système de référence stationnaire en coordonnées abc, à un système de coordonnées (α - β). Elle correspond à une transformation algébrique, connu sous le nom de la transformation de Clark, qui produit

également un système de référence fixe, où les coordonnées $(\alpha-\beta)$ sont orthogonales les une saux autres

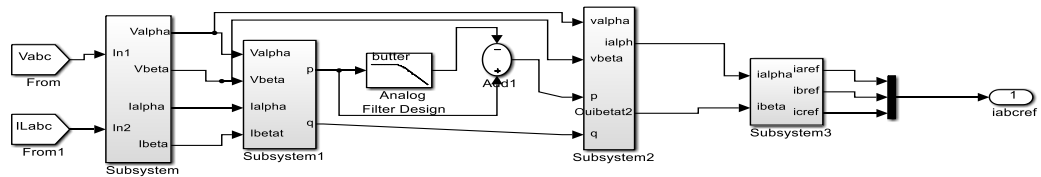


Figure IV.5 : Model Simulink de la méthode (pq)

IV.6 Résultat de Simulation apres le filtrage :

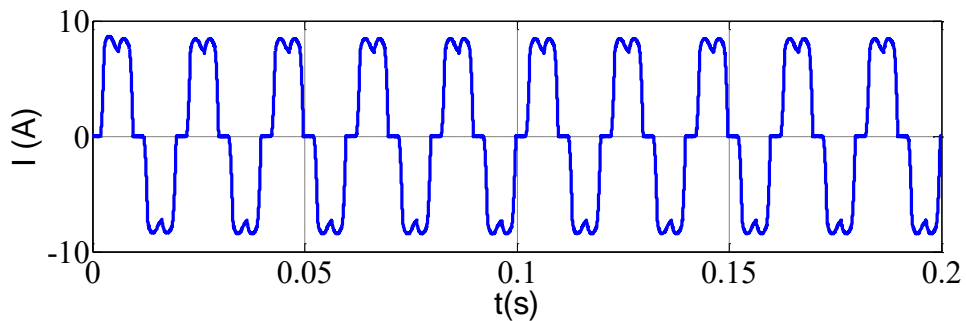


Figure IV.6: Courant de charge

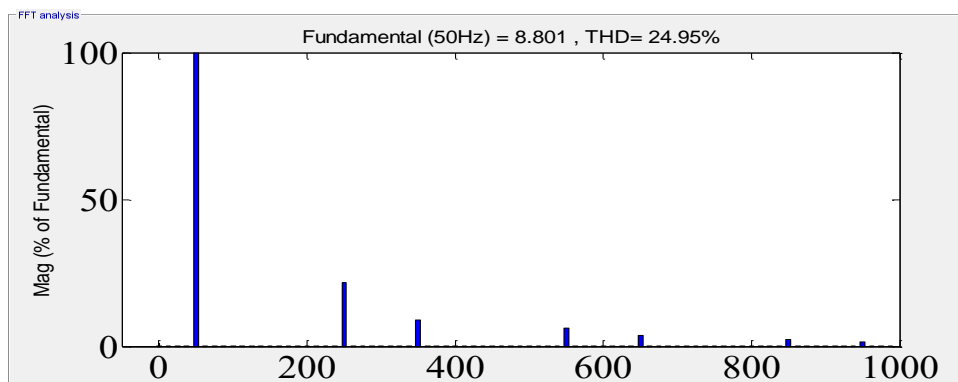


Figure IV.7: Spectre harmonique de courant de charge

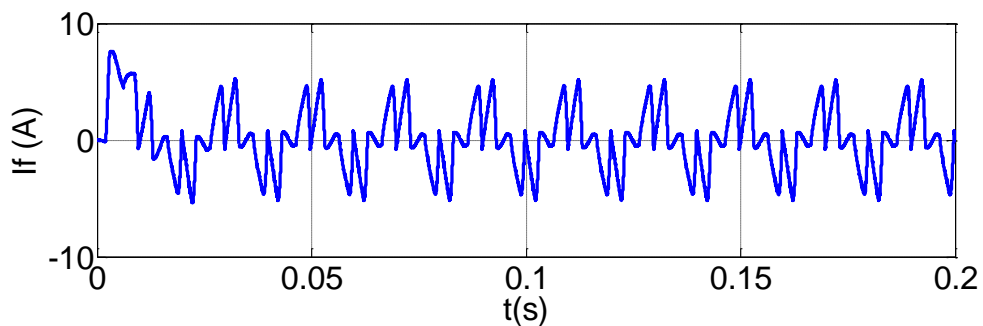


Figure IV.8: Courant de filtre

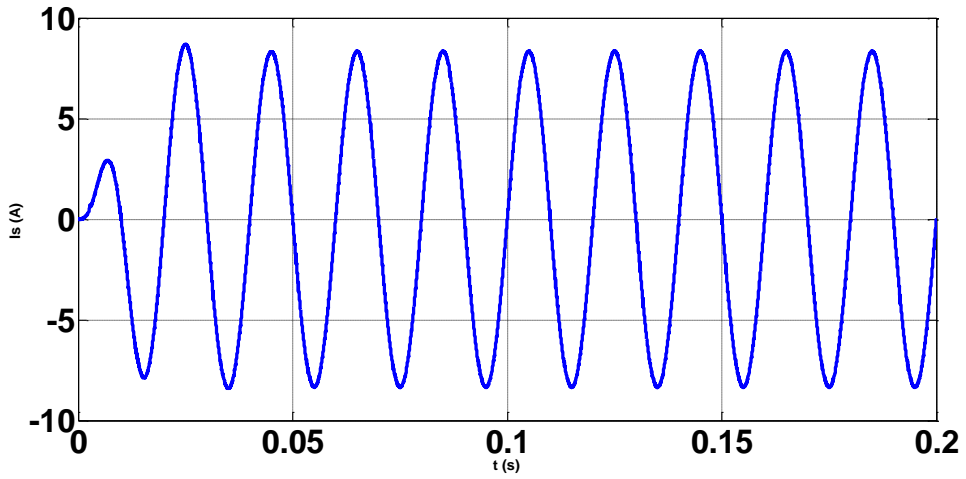


Figure IV.9: Courant de source

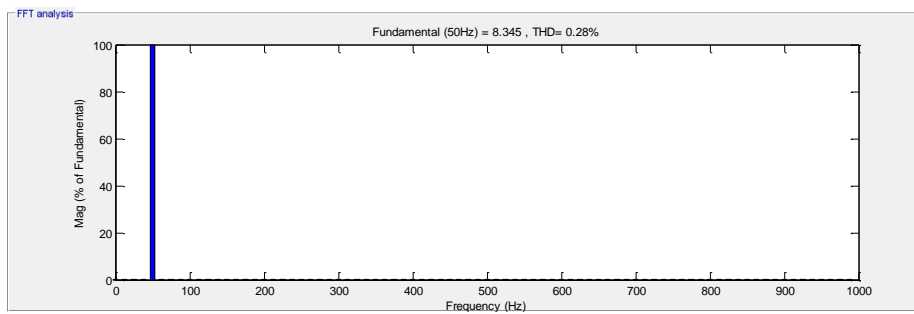


Figure IV.10: Spectre harmonique de courant de source

IV.6.1 Variation de charge:

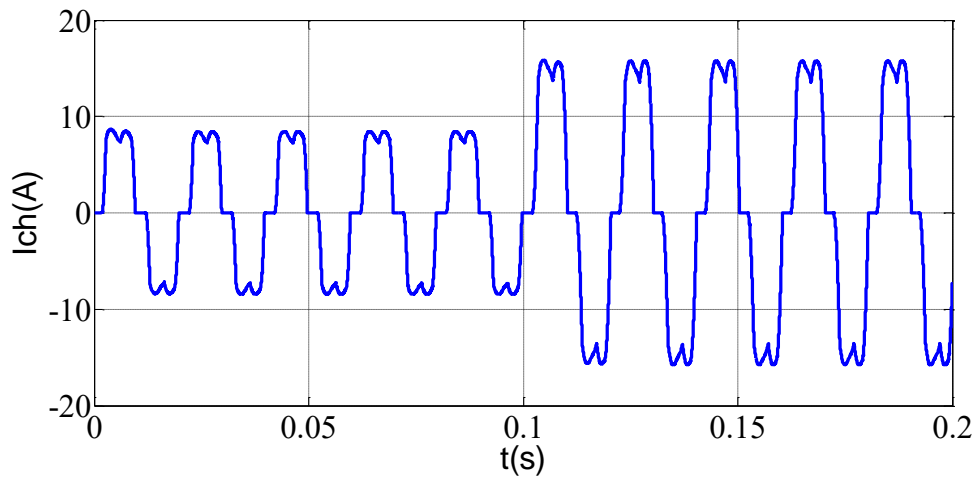


Figure IV.11: Courant de charge après filtrage

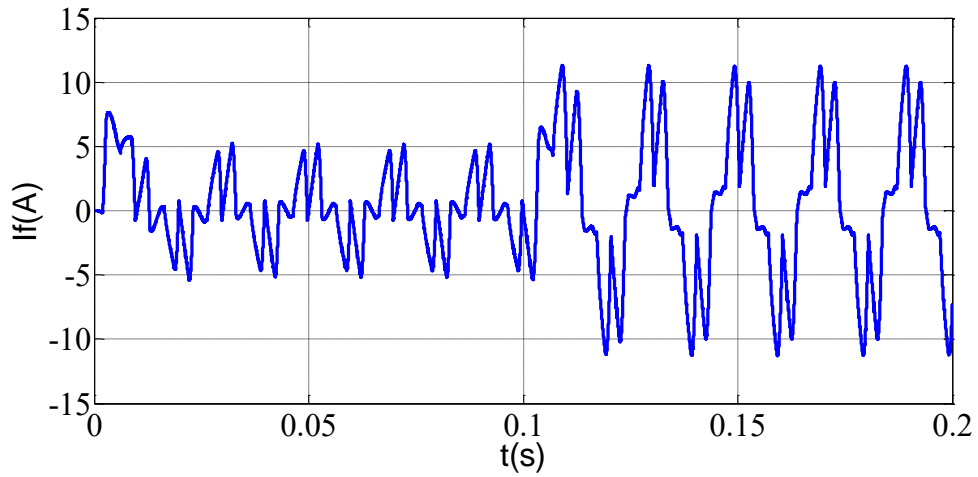


Figure IV 12 : Courant injecté par le filtre If

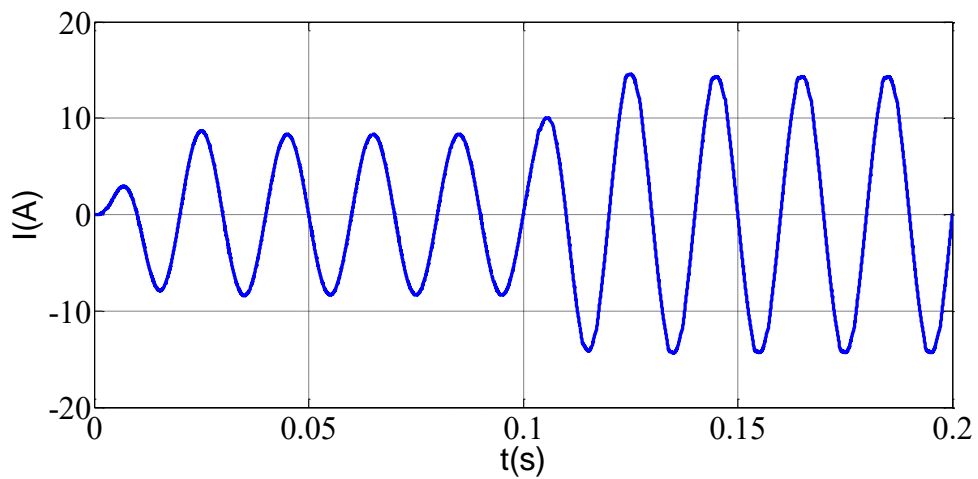


Figure IV 13 : Courant de source après filtrage.

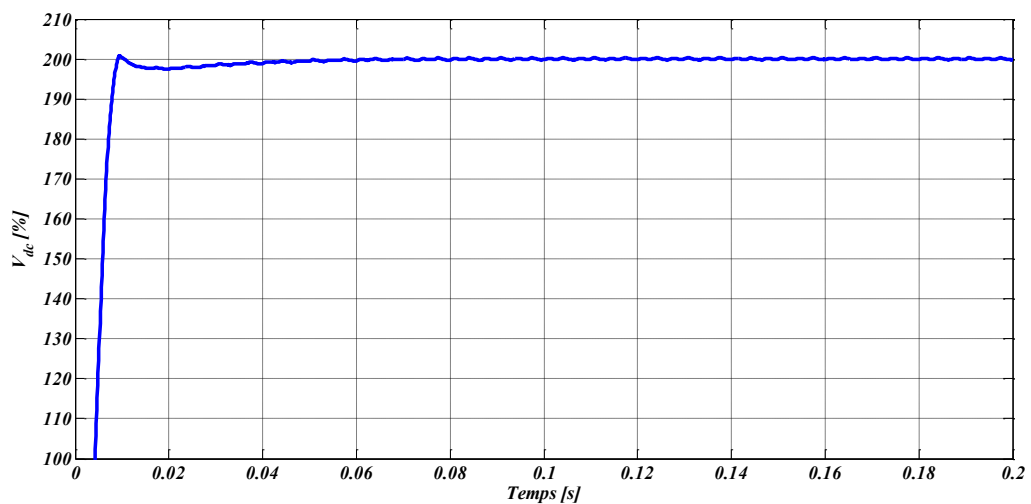


Figure IV 14 Régulation Vdc par logique floue

IV. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le rôle du filtre actif parallèle commandé par logique floue pour supprimer les courants harmoniques. On note que la commande floue nous a permis d'obtenir des meilleurs résultats, et cela est montré à travers le THD obtenu et le courant sinusoidal..

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans le présent travail, nous avons étudié le rôle du filtre actif parallèle commandé par la logique floue pour la dépollution des réseaux électriques. La pollution en harmonique est l'un des problèmes majeurs qui dégrade la qualité d'énergie électrique dans les réseaux de distribution. La circulation des courants harmoniques dans les lignes et entre les charges est difficile à prédire et à contrôler. Dans cette situation, il existe des méthodes classiques qui peuvent diminuer les effets néfastes des harmoniques et des méthodes modernes qui les éliminent complètement tel que le filtrage actif.

Notre travail s'articule autour de quatre chapitres dont le premier a été consacré à la présentation des différents types de perturbations qui peuvent polluer le réseau électrique et à la définition des harmoniques et des équilibres de courants et de tensions.

Dans le deuxième chapitre, nous nous sommes focalisés sur la structure générale des filtres actifs parallèles. Cette structure est divisée en deux parties : la partie puissance constituée de l'onduleur de tension à deux niveaux, la source de tension continue et le filtre de sortie (filtre R L). La deuxième partie est la partie commande incluant l'identification du courant harmonique par la méthode de puissances instantanées et la régulation du courant injecté sur le réseau.

Le troisième chapitre nous parle du principe et du rôle de la logique floue dans le contrôle de filtre actif parallèle

Dans le quatrième et dernier chapitre, nous avons présenté le rôle du filtre actif parallèle commandé par la logique floue avec compensation de l'énergie réactive. Il est à noter que la commande hystérésis à bande floue nous a permis d'obtenir de meilleurs résultats, et cela a été montré à travers le THD obtenu.

La logique floue est une technique de l'intelligence artificielle qui ne nécessite pas la connaissance exacte du modèle mais elle se repose sur l'expertise humaine.

Enfin les résultats de simulation obtenus sont satisfaisants. Le filtrage actif parallèle s'adapte au changement de la charge et permet de rendre le réseau plus stable avec un facteur de puissance unitaire.

Afin d'améliorer les performances de la commande du filtre actif parallèle par logique floue, nous proposons comme perspectives :

- La réalisation pratique de ce travail.

L'utilisation d'autres structures d'onduleurs tels que les onduleurs trois niveaux afin d'améliorer les performances du filtre actif parallèle.



Références
bibliographiques

Références bibliographique

[1] **OMEIRI Amar**, « Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant », thèse de doctorat, université d'Annaba, 2007.

[2] **BOUGUERRA Samir et BOURENNANE Ibrahim**, « Filtrage actif parallèle des réseaux électriques avec compensation de l'énergie réactive », mémoire d'ingénieur, université de M'sila, 2007.

[3] **BEN MEDDOUR Mostefa**, « Contribution à l'étude du filtrage actif parallèle des harmoniques dans les réseaux électriques », mémoire d'ingénieur, université Biskra, 2011.

[4] **GHASSOULI Nabil et RAOUACHE Noui**, « application du filtrage actif parallèle sur une charge dynamique non linéaire », mémoire d'ingénieur, université de M'sila, 2007.

[5] **BOUCIF Abdelmalek**, « Filtrage actif d'un réseau électrique », mémoire de master, université de Biskra, 2014.

[6] **Eric BETTEGA et Jean Noël FIORINA**, « Harmoniques, convertisseurs propres et compensateurs actifs », Cahier Technique Schneider Electric n° 183, 2000.

[7] **M.A.E ALLALI**, « Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension », thèse de doctorat, ULP Strasbourg, 2002.

[8] **BENKECHIDA Noureddine**, « Identification de courant harmonique généré par une charge non linéaire », mémoire d'ingénieur, université de M'sila, 2005.

[9] **BOUDJEDAIMI Madjid**, « Commande d'un onduleur avec des approches neuromimétiques pour la compensation des courants harmoniques dans les réseaux électriques », International Conference on Electrical Engineering and its Applications (ICEEA), Sidi Bel-Abbes, 2008.

[10] **DJEGHLOUD HIND**, « Filtrage actif de puissance », université de Constantine, thèse de doctorat, 2007.

[11] **D. OULD ABEDSLAM**, « Technique neurométrique pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux basse tension », thèse de doctorat, université de Haut Alsace, 2005.

[12] **BAKHI Hamza**, « Commande d'un Filtre Actif Triphasé Shunt par Logique Floue », mémoire de master, universitaire de M'sila, 2015.

[13] **GAOUAR Fateh et Ouled Dje Sidi**, « Commande d'un filtre actif série », mémoire d'ingénieur, université de M'sila, 2010.

[14] **KEBIRI Samia**, « Modélisation et simulation d'un filtre actif multiniveaux », mémoire de magister, université Tizi-ouzou, 2009.

[15] **ABDUSALAM Mohamed Muftah**, « Structures et stratégies de commande des filtres

Références bibliographique

actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales », thèse de doctorat, université de Lorraine, Nancy, 2008

[16] **M. Fodil**, « Commande Adaptative par Logique Floue de la Machine Asynchrone », mémoire de magister, université de M'sila, 2007.

[17] **M. MEKKI Idriss**, « Commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation MADA à base d'un régulateur flou », mémoire de master, université de M'sila, 2014.

[18] **F. Mekri, B. Mazari**, « Etude et simulation des différents type de contrôle d'un Filtre Actif de Puissance », article d'un séminaire à Oran, 2002.

[19] **ALLAHOUM Rabie**, « Contribution à l'étude du filtre actif parallèle de puissance à troisniveaux», mémoire de magister, université d'El-Oued, 2012.

[20] **ABBEDELLI Youcef, KROUMA Mohammed Issam**, « Filtrage actif parallèle à trois niveaux: principe, réglage et stabilisation », mémoire d'ingénieur, école nationale polytechnique d'Alger, 2009

[21] **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.

[22] **MIDOUNE Nasreddine**, « *Étude par simulation des effets des harmoniques et de la puissance réactive sur le réseau électrique* », UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA 2016

[23] **I. Etxeberria.otadui**, « *Les systèmes de l'électronique de puissance dédiés à la distribution électrique. Application à la qualité de l'énergie électrique* ». Thèse de doctorat, 2003, Institut National Polytechnique de Grenoble, France, 2003

[24] **R.Kiffouche**, « *Identification des Harmoniques et Génération de Courant de Référence, Application au Convertisseur Statiques* », Mémoire de Magister, Université de M'Hamed Bougara, Boumerdes, 2006.

[25] **Routel Dalila**, « *Technique intelligente pour la commande d'un filtre actif parallèle dédié à l'amélioration de la qualité de l'énergie dans un réseau électrique* », Mémoire de Master, Université Ibn-Khaldounde Tiaret, 2016

[26] **B.Ketem, N.Mehenni**, « *Application des onduleurs multi niveaux au filtrage actif des réseaux* ». Mémoire d'ingénieur d'état, l'USTHB, 2005.

[27] **KEBIRI Samia**, « *Modélisation et simulation d'un filtre actif multi*

Références bibliographique

niveaux »

Mémoire de Magister, Université MOULOUD MAMMERI, TIZI-OUZOU, 2009

[28] **C. LOTT, O. LAPIERRE, H. POULIQUEN, S. SAADATE**, « *Filtrage actif des harmoniques en courant et en tension des réseaux électriques: Modélisation, Simulation numérique et expérimentation* », *Journal de physique III, France7* (1997).

[29] **A. Bouafia**, « *Techniques de commande prédictive et floue pour les systèmes d'électronique de puissance: application aux redresseurs à MLI* », *Thèse de Doctorat, Université Ferhat Abbas –Sétif, Octobre 2010.*

[30] **C. Tan Perng**, « *A single-phase hybrid active power filters with photovoltaic application* », *Thèse de Master en Génie Electrique, Université de Technologie Malaysia 2006.*

[31] **M.M. Swamy**, « *Passive techniques for reducing input current harmonics* », *WP.AFD.01 Copyright by Yaskawa Electric America, Inc. 2005.*

[32] **A. Hamadi**, « *Contribution à l'étude des filtres hybrides de puissance utilisés pour améliorer la qualité de l'énergie dans le réseau électrique de distribution* », *Thèse Doctorat. Université du Québec 2010.*