

Université Mohamed Khider – Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département: Génie Electrique

Ref : .....



جامعة محمد خيضر بسكرة

جامعة محمد خيضر بسكرة  
كلية العلوم و التكنولوجيا  
قسم: الهندسة الكهربائية  
المرجع: .....

Mémoire présenté en vue de l'obtention  
Du diplôme de  
**Magister**

**Option**  
**Commande et motorisation**  
**des véhicules électriques**

**Commande d'un Filtre actif parallèle à quatre  
bras par des techniques avancées**

Présenté par :

**Salem Hafsia**

Soutenu publiquement le 03/03/2015

**Devant le jury composé de :**

Président	Dr. Srairi Kamel	Professeur	Université de Biskra
Rapporteurs	Dr. Benchouia Med Toufik	Professeur	Université de Biskra
Examineur	Dr. Goléa Amar	Professeur	Université de Biskra
Examineur	Dr. Rabhi Boualagua	Maitre de Conférences 'A'	Université de Biskra

## Remerciements

---

---

Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire ont été réalisés au sein du Laboratoire d'électrotechnique (LGEB) de l'université de BISKRA.

Je tiens d'abord à exprimer toute ma gratitude et ma reconnaissance à :

**Monsieur. BENCHOUIA Med Toufik**, Professeur de l'université de BISKRA, pour m'avoir encadré et soutenu durant le travail de ce mémoire. Je le remercie aussi pour son aide précieuse, les conseils et les connaissances dont il a su me faire profiter. Il m'est difficile d'exprimer en quelques mots toute l'admiration que je lui porte .

**Monsieur Srairi Kamel**, Professeur de l'université de BISKRA a accepté la présidence de mon jury de ce mémoire .

**Monsieur Goléa Amar**, Professeur de l'université de BISKRA, de m'avoir honoré en acceptant d'être examinateur.

**Monsieur Rabhi Boualagua**, maître de conférences de l'université de BISKRA pour l'intérêt qu'il a voulu porter à ce travail en acceptant de l'examiner.

Finalement, je tiens à exprimer ma très profonde gratitude à **mes parents** pour leur soutien morale et mon frère, et mes sœurs, mes amis .

# Sommaire

---

# Sommaire

Introduction Générale	I
-----------------------	---

## **Chapitre 01    Perturbations des réseaux électriques et leurs remèdes**

1.1 Introduction	4
1.2. Les Caractéristiques de perturbation électrique	5
1.3. les Perturbations harmoniques	6
1.3.1. Définition	6
1.3.2. Origine des harmoniques	7
1.3.3. Conséquences des harmoniques	8
1.4. Déséquilibre du courant et de la tension	9
1.4.1. Origine du déséquilibre	9
1.4.2. Conséquences du déséquilibre	9
1.5. Les Creux de tension	10
1.5.1. Origine des creux de tension	10
1.5.2. Conséquences des creux de tension	11
1-6. Normes imposées sur le THD	12
1-6-1. THD en courant ou en tension	12
1-6-2. Relation entre facteur de puissance et THD	13
1-6-3. Intérêt du THD	13
1.7. Solutions de dépollution du courant dans les réseaux électriques	15
1.7.1. Solution traditionnelle	15
1.7.2. Solution moderne	16
1.8. Concluions	21

## **Chapitre 02 Modélisation contrôle-commande du filtre actif à quatre bras**

2.1. Introduction	22
2.2. Constituants d'un filtre actif parallèle à quatre Bras	23
2.3. Étude de la partie de la puissance	23
2.3.1. Description d'un onduleur triphasé à quatre bras	24
2.3.2. Filtre de couplage	25
2.3.3. Système de stockage d'énergie	26
2.4. Étude de la partie commande- contrôle	28
2.4.1 Identification des courants de référence	28
2.4.1.1 Identification par la méthode des puissances instantanées classique	28
2.4.1.2 Identification par la méthode des puissances instantanées avec FMVs	32
2.4.1.3 Identification par la méthode Référentiel synchrone SRF	33
2.4.2. Régulation de la tension continue	35
2.4.3. Contrôle de l'onduleur par hystérésis	36
2.5. Résultats des simulations	37
2.6. Interprétations des résultats	45
2.7. Conclusion	47

## **Chapitre 03 Commande par l'ANFIS d'un filtre actif parallèle à quatre bras**

3.1. Introduction	48
3.2. Définition	49
3.3. Les avantages de l'ANFIS	49
3.4. Architecture de l'ANFIS	50
3.5. Algorithme d'apprentissage de l'ANFIS	54
3.6. Application de contrôleur ANFIS à la commande d'un filtre actif parallèle à quatre Bras.	56
3.7. Synthèse d'un contrôleur ANFIS pour la régulation de la tension du bus continue	56
3.7.1. Description et structure du contrôleur ANFIS proposé	56
3.7.2. Apprentissage du contrôleur "Entraînement d'un réseau ANFIS "	57

3.8. Résultats de simulation	59
3.9. Interprétations des résultats	67
3.10. Etude de courant du neutre	69
3.11. Influence des paramètres du FAP a quatre bras sur le THD	70
3.12. Conclusion	71
Conclusions Générales et Perspectives	72
Annexe A	74
Annexe B	77
Bibliographie	78-82

# Liste des Figures

---

# Liste des Figures

---

Figure : 1.1	Décomposition d'un signal	7
Figure : 1.2	Déférentes solutions utilisées dans le filtrage du courant	15
Figure : 1.3	Figure 1.3 : les filtres passifs	16
Figure : 1.4	Principe du filtrage actif parallèle	17
Figure : 1.5	Déférentes configurations d'un filtre actif monophasé	17
Figure : 1.6	Configuration d'un FAP à trois fils	18
Figure : 1.7	Déférentes topologies utilisées dans un FAP d'un réseau triphasé à quatre fils	19
Figure : 1.8	Classification des filtres hybrides	20
Figure : 2.1	Principe du filtrage actif parallèle d'un réseau triphasé à quatre Bras	23
Figure : 2.2	Filtre actif parallèle à quatre bras pour un réseau triphasé à quatre Fils.	24
Figure : 2.3	Filtres d'extraction	31
Figure : 2.4	Identification par la méthode des puissances instantanées classique	31
Figure : 2.5	Principe du FMV	32
Figure : 2.6	Identification par la méthode des puissances instantanées avec FMVs.	33
Figure : 2.7	Extraction des harmoniques par méthode de référentiel synchrone	34
Figure : 2.8	Boucle de régulation de la tension continue	36
Figure : 2.9	Principe de la commande par hystérésis	36
Figure : 2.10	Filtrage AP d'un réseau triphasé à quatre fils alimentant trois charges non-linéaires.	37
Figure : 2.11	Simulation du réseau à trois charges monophasées alimentées par redresseurs à diode	38
Figure : 2.12	Simulation du FAP par la méthode des puissances instantanées	39
Figure : 2.13	Simulation du FAP par la méthode de puissances instantanées utilisant des FMVs	40
Figure : 2.14	Simulation du FAP par la méthode Référentiel synchrone (phase 1).	41
Figure : 2.15	Simulation du FAP à 4 bras dans le cas les charges sont déférentes	43

---

Figure : 2.16	Simulation du FAP à 4 bras dans le cas de variation brusque des charges non linéaire	45
Figure : 3.1	Principe du système Neuro-flou.	49
Figure : 3.2	L'Architecture de l'ANFIS	50
Figure : 3.3	Exemple ANFIS à 2 entrées avec 9 règles	53
Figure : 3.4	Réseau d'ANFIS	54
Figure : 3.5	Commande par contrôleur ANFIS avec identification par la méthode des p,q avec FMV	56
Figure : 3.6	Organigramme d'un système ANFIS	57
Figure : 3.7	Structure neuronale du modèle proposé sous Matlab	58
Figure : 3.8	Simulation du FAP à 4 bras dans le cas où $\alpha = 0$ .	60
Figure : 3.9	Simulation du FAP à 4 bras dans le cas les charges sont déférentes.	62
Figure : 3.10	Simulation du FAP à 4 bras dans le cas les charges sont déférentes	63
Figure : 3.11	Simulation du FAP à 4 bras dans le cas les charges sont déférentes	65
Figure : 3.12	Simulation du FAP à 4 bras dans le cas de variation brusque des charges non linéaire.	67
Figure : 3.13	Courants et spectres d'harmoniques du neutre.	69
Figure : 3.11	Influence des déférents paramètres sur le THD.	70
Figure: A.1	Principe du FMV	75
Figure: A.2	Diagramme de Bode d'un FMV.	75

# Liste des tableaux

---

## Liste des tableaux

---

Tableau.1.1	Conséquences des creux de tension sur quelques équipements électriques sensibles	11
Tableau.1.2	Classification de la CEI des équipements dont la consommation ne dépassant pas 6A.	14
Tableau.1.3	Niveaux des THD limite de courants pour les équipements absorbant moins de 16A	14
Tableau.2.1	Tensions générées par l'onduleur de tension à quatre bras	25
Tableau.3.1	les différentes couches d'un système ANFIS	53
Tableau.3.2	l'une des techniques d'ajustement des paramètres de l'ANFIS	55
Tableau.B.1	Les caractéristiques du modèle ANFIS utilisé pour la régulation de la Bus continu	77

# Liste des Acronymes et Symboles

---

# Listes des Acronymes et Symboles

---

BT	Basse tension
$C_{dc}$	Condensateur du bus continue
CEI	Commission Electrotechnique Internationale
FAP	Filtre Actif Parallèle
FMV	Filtre Multi-Variable
F.P	Facteur de puissance
FPB	Filtre Passe Bas
FPH	Filtre Passe Haut
$I_c$	Valeur efficace du courant de la charge
$I_f$	Valeur efficace du courant injecté par le FAP
$I_h$	Valeur efficace du Courant harmonique du rang h
IGBT	Insolated Gate Bipolar Transistor
$i_n$	Courant instantané du neutre
$i_o$	Courant instantané homopolaire
$I_s$	Valeur efficace du courant de la source
$\alpha$ - $\beta$	Axes $\alpha$ et $\beta$ du repaire de Concordia
$V_\alpha, \bar{V}_\alpha, \tilde{V}_\alpha$	Tensions instantanés suivant l'axe $\alpha$
$V_\beta, \bar{V}_\beta, \tilde{V}_\beta$	Tensions instantanés suivant l'axe $\beta$
$i_\alpha, \bar{i}_\alpha, \tilde{i}_\alpha$	Courants instantanés suivant l'axe $\alpha$
$i_\beta, \bar{i}_\beta, \tilde{i}_\beta$	Courants instantanés suivant l'axe $\beta$
K	Constante du FMV
$L_c$	Inductance du réseau coté charge
$L_f$	Inductance de couplage
$L_s$	Inductance du réseau coté source
MOSFET	Metal oxide Semiconductor Field Effect Transistor
$P_{dc}$	Puissance absorbée par le condensateur
PI	Proportionnel-Intégral
$p(t)$	Valeur instantanée de la puissance réelle
$q(t)$	Valeur instantanée de la puissance Imaginaire
$R_c$	Résistance du réseau coté charge
$R_f$	Résistance de couplage
$R_s$	Résistance du réseau coté source

THD	Taux de Distorsion Harmonique
$T_i$	Etat de l'interrupteur $i$ (ouvert ou fermé)
$V_{dc}$	Tension aux bornes du condensateur
$V_f$	Tension simple efficace à la sortie du filtre
$V_s$	Tension simple efficace de la source
ANFIS	Les systèmes neuro-flous (Adaptive Network Based Fuzzy Inference System)
RN	réseaux de neurone
$x, y$	les entré de système Anfis
$f_i$	La fonction d'activation des neurones $i$
$W_{ij}$	les poids de règles
$a_i, b_i, c_i$	Paramètre de fonction d'appartenance non linéaire
$p, q, r$	Paramètre de coefficient linéaire

**Introduction**

**Générale**

# Introduction Générale

---

---

Ces dernières années, l'utilisation croissante des dispositifs d'électronique de puissance dans les systèmes électriques a entraîné de plus en plus de problèmes liés aux perturbations ou distorsions harmoniques des réseaux électriques. Ce phénomène touche l'ensemble des secteurs industriels (utilisation de gradateurs, de redresseurs, de variateurs de vitesse,...), tertiaire (informatique ou éclairage des bureaux, commerce,...) et domestique (téléviseurs, appareils électroménagers grand public,...) [01-02-03].

La distorsion harmonique est générée par les charges non linéaires connectées au réseau et qui absorbent des courants non sinusoïdaux. Ces harmoniques de courant vont à leur tour générer des tensions harmoniques aux différents points de connexion au réseau. Pour les autres équipements électriques connectés en ces points, cette pollution harmonique a des effets nocifs. Parmi ces effets, on peut notamment citer la déformation de la tension réseau au point de raccordement alors que le distributeur d'énergie est tenu de fournir une tension propre. Cette pollution peut également conduire à l'échauffement des câbles et des équipements électriques ou bien encore à l'arrêt soudain de machines tournantes, voire la destruction totale de tous ces équipements [02].

De ce fait, les distributeurs de l'énergie électrique se voient donc obligés d'imposer des normes et de se protéger contre ces perturbations. Des normes sur les harmoniques ont été proposées par la commission internationale d'électrotechnique IEC61000, et par les recommandations IEEE Std. 519-1992 [01-02-03].

Pour garantir les normes de qualité, le filtrage actif d'harmonique, et en particulier le filtrage actif shunt a prouvé son efficacité comme une alternative aux solutions traditionnelles basée sur les filtres passifs, en raison notamment de la flexibilité. Au cours des dernières années, plusieurs travaux ont été réalisés et sanctionnés par des réalisations pratiques de tels systèmes, mais la majorité des cas pour des systèmes triphasés à trois fils (sans distribution du fil neutre)[05-06], or, il se trouve que dans les réseaux basse tension, le fil neutre est souvent distribué, ce qui fait apparaître des composantes homopolaires (harmonique 3 et ces multiples impaires), ce qui résulte, en un grand courant harmonique

circulant dans le conducteur neutre, notamment à cause des charge non linéaires monophasées [07]. A cet effet, le filtre actif à quatre fils est plus adéquat, du fait de la distribution du quatrième fil, qui permet de compenser le courant du neutre.

Dans ce contexte, l'objectif de ce travail sera l'étude de Commande d'un filtre actif parallèle à quatre bras par des techniques avancées.

Nous avons à cet effet focalisé le premier chapitre, pour la présentation de différentes perturbations, en courant et en tension, des réseaux électriques connectés à des charges polluantes. Ces perturbations sont les harmoniques, le déséquilibre, les creux de tension, leurs conséquences, et des normes internationales imposées aux utilisateurs, puis une récapitulation des solutions de filtrages des courants sera faite.

Au second chapitre, sera étudiée la topologie de filtre actif parallèle à quatre bras à structure tension et sa stratégie de commande et contrôle générale, par laquelle a été divisé en deux parties: la partie puissance et la partie contrôle-commande, dans la partie puissance, nous introduirons les trois principaux blocks de cette structure, à savoir l'onduleur de tension à quatre bras, le circuit de stockage d'énergie et le filtre de découplage. Dans la partie contrôle-commande, nous aborderons l'identification des courants perturbés, la régulation de la tension continue on utilisons le régulateur Proportionnel-Intégral (PI), et la commande par hystérésis du courant du filtre actif parallèle. Les résultats de simulation obtenus à l'aide de PSB de MATLAB-SIMULINK sont présentés et commentés.

Dans le troisième chapitre, nous étudierons la méthode de commande par neuro flou (ANFIS) qui est une technique intelligence et qui est devras être appliqué sur le filtre actif parallèle à quatre bras, on utilise la méthode de puissance instantané avec FMVs, par la suite nous présenterons les résultats de simulation pour :

- Trois charges monophasées identiques alimentées par trois ponts redresseurs commandées.
- Trois charges différentes mais alimentées par trois ponts redresseurs commandées.
- Des angles d'amorçages différents de thyristors pour les trois redresseurs alimentant trois charges identiques.
- Et aussi lors d'utilisation un gradateur et deux redresseurs alimentant trois charges différentes.

- variation brusque des charges non linéaires.

Les contributions de ce travail seront :

- L'étude du FAP à quatre bras qui est considérée un peu plus complexe que celui du FAP à trois bras.
- L'utilisation d'une méthode d'identification de courant d'harmonique c'est une méthode Référentiel synchrone (SRF) utilisant les FMVs.
- L'utilisation du contrôleur intelligent neuro flou (ANFIS) pour le réglage de la tension du bus continu du la FAP à quatre bras.

# Chapitre 01

# Chapitre 01

## Perturbations des réseaux électriques et leurs remèdes

---

### 1.1. Introduction

Généralement, le distributeur d'énergie délivre l'énergie électrique sous forme de trois tensions constituant un système sinusoïdal triphasé. Les paramètres caractéristiques de ce système sont la fréquence, l'amplitude, la forme d'onde, qui doit être sinusoïdale et la symétrie du système triphasé. Mais depuis quelques années, avec l'évolution technologique des composants d'électronique de puissance les distributeurs d'énergie rencontrent plusieurs problèmes liés à l'accroissement du nombre de convertisseurs statiques raccordés aux réseaux de distribution d'énergie. En effet, ces convertisseurs sont des sources polluantes qui absorbent des courants non sinusoïdaux et consomment pour la plupart de la puissance réactive. Les harmoniques générés sont des perturbations permanentes affectant la forme d'onde de la tension du réseau. Ces perturbations se superposent à l'onde fondamentale. Elles ont donc pour conséquence de modifier l'onde de tension ou de courant ce qui se traduit par une dégradation du facteur de puissance et/ou par la génération de courants et de tensions alternatives de fréquence différente de celle du fondamental [02-03].

Dans ce chapitre, nous allons présenter les caractéristiques des perturbations électriques, les origines des harmoniques, les conséquences, et des normes internationales imposées aux utilisateurs, et enfin on présentera les solutions traditionnelles et modernes utilisées pour dépolluer les réseaux électriques.

## 1.2. Les Caractéristiques de perturbation électriques

L'énergie électrique est délivrée sous forme d'un système de tensions, alternatif, triphasé, qui est caractérisé par : [04]

- la fréquence,
- l'amplitude des trois tensions,
- la forme d'onde qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde,
- la symétrie du système triphasé, caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et de leur déphasage relatif.

La qualité de la tension peut être affectée, soit par des perturbations aléatoires à caractère accidentel, soit par des perturbations existantes en permanence ou pendant des instants de durées bien déterminées. Ces défauts se manifestent sous forme de différentes perturbations affectant un ou plusieurs des quatre paramètres précédemment définis. On a donc quatre possibilités distinctes de perturbations :

- **les fluctuations de la fréquence à 50 Hz** : elles sont rares et ne sont observées que lors de circonstances exceptionnelles, par exemple certains défauts graves du réseau, au niveau de la production ou du transport.
- **les variations de l'amplitude** : il ne s'agit pas des variations lentes de tension qui sont corrigées par les transformateurs de réglage en charge, mais de variations rapides de tension ou de creux de tension se présentant souvent sous forme d'à-coups brusques. Les creux de tension peuvent être soit isolés, soit plus ou moins répétitifs, de forme régulière ou non.
- **la modification de la forme d'onde de la tension** : cette onde n'est alors plus sinusoïdale, et peut être considérée comme représentable par une onde fondamentale à 50 Hz, associée soit à des harmoniques de fréquence multiple entier de 50 Hz, soit même parfois à des ondes de fréquence quelconque.
- **la dissymétrie du système triphasé** : que l'on appelle déséquilibre. On peut, en plus, mentionner un type particulier de perturbations difficile à classer puisqu'il concerne tout à la fois l'amplitude et la forme d'onde : ce sont les variations transitoires d'amplitudes dont la durée est inférieure à 10 ms.

Afin de bien analyser les pollutions des réseaux électriques en basse tension et, par conséquent, de trouver les meilleures méthodes de dépollution, on va distinguer deux types de perturbations, à savoir les perturbations de courant et celles de tension.

Les courants perturbateurs comme les courants harmoniques, les courants déséquilibrés et la puissance réactive sont majoritairement émis par des charges non linéaires, à base d'électronique de puissance, les circuits magnétiques. La puissance réactive peut être aussi consommée par des charges linéaires inductives comme les moteurs asynchrones qui sont largement présents dans les sites industriels.

Les perturbations de tension comme les creux, les déséquilibres et les harmoniques de tension trouvent généralement leurs origines dans le réseau électrique lui-même mais parfois également dans les charges.

Ces types de perturbation ont des effets très néfastes sur les équipements électriques. Ces effets peuvent aller des échauffements ou de l'arrêt des machines tournantes jusqu'à la destruction totale de ces équipements.

## **1.3. Les perturbations harmoniques**

### **1.3.1. Définition**

Un harmonique est défini comme étant une composante sinusoïdale d'un signal périodique, ayant une fréquence multiple de l'onde fondamentale. Le domaine des fréquences qui correspond à l'étude des harmoniques est généralement compris entre 100 Hz et 2000 Hz (entre les harmoniques de rangs  $h=2$  et  $h=40$ ) [09-11].

L'amplitude de rang 1 est appelée la composante fondamentale du signal électrique périodique; dans notre cas c'est la (50 HZ).

L'amplitude de chaque harmonique est inversement proportionnelle à son ordre.

Les premiers rangs harmoniques tel que (3, 5, 7,9) ont des amplitudes élevées, d'où l'importance des courants injectés, raison pour laquelle il faut limiter ces harmoniques dans les normes [09-11].

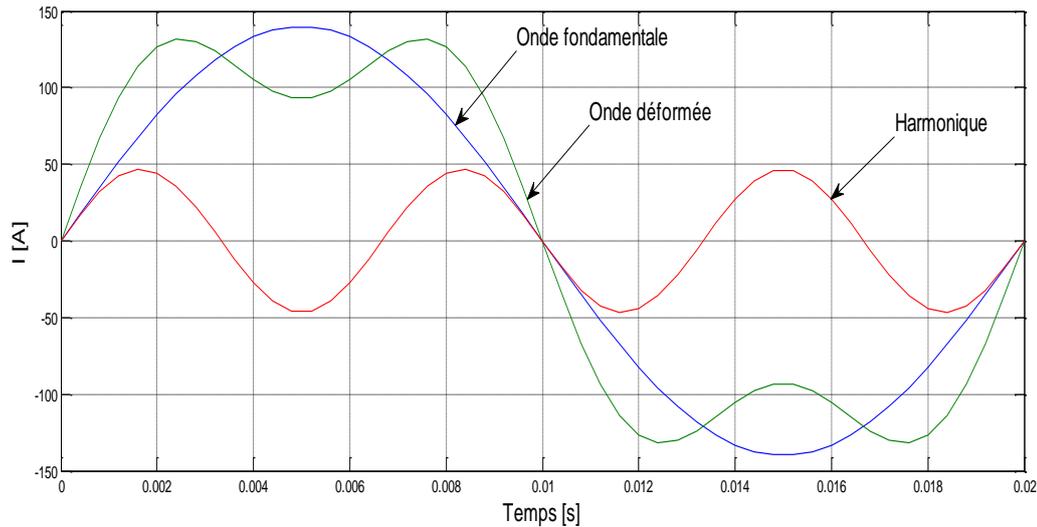


Figure.1.1 Image d'une onde déformée [11].

### 1.3.2. Origine des harmoniques

#### a. Les convertisseurs statiques

Les ponts redresseurs et en général les convertisseurs statiques ( diodes et thyristors ) sont générateurs de courants harmoniques. Dans le cas de ponts monophasés, sujet de notre travail, rappelons que les charges symétriques ne génèrent pas d'harmoniques de rang pair. Le spectre étant en général décroissant, l'harmonique de rang 3 est donc l'harmonique prépondérant pour les charges monophasées. Ainsi, pour les charges très répandues de type redresseur monophasé à diodes avec filtrage capacitif, l'harmonique de rang 3 peut atteindre 80 % du fondamental [12-11].

#### b. L'éclairage

L'éclairage, par lampes à décharge et tubes fluorescents, est générateur de courants harmoniques. Le taux individuel d'harmonique 3 peut même dépasser 100 % pour certaines lampes fluo-compactes modernes, d'où une attention particulière à porter à la détermination de la section et de la protection du conducteur neutre qui, véhiculant la somme des courants d'harmoniques 3 des trois phases, risque un échauffement important [11].

#### c. Les fours à arc

Dans le cas du four à arc à courant alternatif : l'arc est non linéaire, dissymétrique et instable. Il va induire des spectres possédant des raies impaires, paires et un spectre continu

(bruit de fond à toutes les fréquences). Le niveau spectral est en fonction du type de four, de sa puissance, de la période de fonctionnement considérée : fusion, affinage...Aussi seules des mesures peuvent déterminer le spectre de façon précise.

Dans le cas du four à arc à courant continu : l'arc est alors alimenté par l'intermédiaire d'un redresseur. L'arc est plus stable qu'en courant alternatif. Le courant absorbé se décompose en un spectre semblable à celui d'un redresseur, et un spectre continu de niveau inférieur à celui d'un four à courant alternatif [11].

#### d. Les inductances saturées

De telles inductances ont leur impédance fonction de l'amplitude du courant qui les traverse, et de fait elles provoquent des déformations notables de ce courant. C'est le cas, dans une certaine mesure, des transformateurs à vide soumis à une surtension permanente.

#### e. Les machines tournantes

Les machines tournantes donnent des harmoniques de denture de rangs élevés et d'amplitudes souvent négligeables [08-11]. .

### 1.3.3. Conséquences des harmoniques

De nombreux effets des harmoniques sur les installations et les équipements électriques peuvent être cités. Les effets les plus importants sont l'échauffement, les défauts de fonctionnement de certains équipements électriques et le risque d'excitation de résonance : [04]

- **L'échauffement** : Les pertes totales par effet Joule sont la somme de celles du fondamental et des harmoniques :

$$I^2 \cdot R = \sum_{h=1}^{\infty} I_h^2 \cdot R \quad (1.1)$$

Avec :

- ✓  $I$  : le courant total.
- ✓  $I_h$  : le courant harmonique de rang  $h$  qui représente le fondamental pour  $h=1$ .
- ✓  $R$  : la résistance traversée par le courant  $I$ .

Les harmoniques augmentent aussi les pertes fer (pertes par courants de Foucault). Ils prennent de l'importance dans les matériels utilisant les circuits magnétiques (moteurs, transformateurs...).

Le vieillissement des isolants est souvent dû à une contrainte en tension consécutive à la présence de la tension harmonique, et donc à une augmentation locale du courant de fuite, ou encore à l'échauffement exagéré dans les conducteurs [04].

- **Les défauts de fonctionnements de certains équipements électriques :** En présence des harmoniques, la tension (ou le courant) peut changer plusieurs fois de signe dans une demi-période; par conséquent, tout appareil dont le fonctionnement est basé sur le passage par zéro des grandeurs électriques (appareils utilisant la tension comme référence) peut être perturbé [04-10].
- **Le risque d'excitation de résonance :** Les fréquences de résonance des circuits formés par des inductances du transformateur et des câbles sont normalement élevées. Ce n'est pas le cas lorsque des batteries de capacité sont raccordées au réseau pour relever le facteur de puissance; les fréquences de résonance peuvent devenir assez faibles, et coïncider ainsi avec celles des harmoniques engendrés par les convertisseurs statiques. Dans ce cas, il y aura des phénomènes d'amplification d'harmoniques [04].

## 1.4. Déséquilibre du courant et de la tension

### 1.4.1. Origine du déséquilibre

Un récepteur triphasé électrique qui n'est pas équilibré et que l'on alimente par un réseau triphasé équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau. Ceci est fréquent pour les réceptrices monophasées basses tensions. Mais cela peut également être engendré, à des tensions plus élevées, par des machines à souder, des fours à arc ou par la traction ferroviaire [04].

### 1.4.2. Conséquences du déséquilibre

En général le déséquilibre engendre des dégradations des performances des machines électriques, un vieillissement accéléré des isolants, la production de courants de ligne ayant des fréquences non caractéristiques [04].

Il est plus intéressant d'aborder le problème du déséquilibre par type d'équipement. Le déséquilibre d'une installation triphasée peut entraîner un dysfonctionnement des appareils de basses tensions connectés [04] :

- Mauvais fonctionnement d'un appareil monophasé alimenté par une tension très faible (lampe à incandescence qui fournit un mauvais éclairage),
- Destruction d'un appareil monophasé alimenté par une tension trop élevée, il peut être détruit (claquage d'un filament de lampe par surtension).

Concernant les dispositifs triphasés d'électronique de puissance, principalement les ponts redresseurs, le fonctionnement en présence de déséquilibre entraîne l'apparition de composantes harmoniques non caractéristiques, notamment des harmoniques de rang multiple de 3. L'apparition de ces courants harmoniques peut poser des problèmes, comme la génération d'une antirésonance lors du filtrage de l'harmonique de rang 5. Outre les effets classiques des harmoniques, ces fréquences non caractéristiques peuvent conduire, dans certains cas, au blocage de la commande[04].

La conséquence des composantes inverses sur les machines tournantes est la création d'un champ tournant en sens inverse du sens de rotation normal, d'où un couple de freinage parasite et des pertes supplémentaires qui provoquent l'échauffement de la machine.

Concernant l'effet du déséquilibre homopolaire, il faut signaler le risque d'échauffement du conducteur neutre dans un réseau BT qui, lorsque le conducteur est d'un diamètre trop faible, peut provoquer une rupture du conducteur ou un incendie [04].

## **1.5. Les Creux de tension**

### **1.5.1. Origine des creux de tension**

Un creux de tension est une diminution brusque de la tension de fourniture. Cette diminution, située entre 90% et 10% de la tension nominale  $U_n$ , est suivie du rétablissement de la tension après un court laps de temps. Un creux de tension peut durer de 10 ms à 3 mn [04-13]. La plupart des appareils électriques admettent une coupure totale d'alimentation d'une durée inférieure à 10 ms [04].

Il y a deux types de phénomène à l'origine des creux de tension :

- Les creux provenant du fonctionnement d'appareils à charge fluctuante ou de la mise en service d'appareils appelant un courant élevé au démarrage (moteurs, transformateurs...etc).

- Les creux liés aux phénomènes aléatoires, comme la foudre ou tous les courts circuits accidentels sur les réseaux de distribution ou les réseaux internes des clients (défaut d'isolation, protection de branches sur les lignes aériennes...etc).

Les creux de tension sont caractérisés par leur amplitude et par leur durée. Ils sont monophasés, biphasés ou triphasés suivant le nombre de phases concernées.

### 1.5.2. Conséquences des creux de tension

Les creux de tension sont susceptibles de perturber le fonctionnement de certaines installations industrielles et tertiaires. En effet, ce type de perturbation peut causer des dégradations de fonctionnement des équipements électriques qui peuvent aller jusqu'à la destruction totale de ces équipements. Le tableau (1.1) résume les conséquences néfastes causées par les creux de tension sur quelques matériels industriels et tertiaires sensibles [04-14]

Tableau. 1.1. Conséquences des creux de tension sur quelques équipements électriques sensibles

Types d'appareils	Conséquences néfastes
Eclairage	Moins de luminosité, extinction et réallumage (lampes à arc)
Systèmes à base d'électronique de puissance	Arrêt du dispositif
Dispositifs de protection	Ouverture des contacteurs
Moteurs asynchrones	Ralentissements, blocage, surintensité au retour de la Tension
Moteurs synchrones	Perte de synchronisme, décrochage et arrêt du moteur
Variateurs de vitesse pour un moteur à courant continu	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ En mode onduleur : destruction des protections</li> <li>▪ En mode redresseur : ralentissement de la machine</li> </ul>
Variateurs de vitesse pour un moteur asynchrone	Ralentissement, blocage, surintensité au retour de la tension, destruction éventuelle de matériel au niveau du convertisseur

## 1-6. Normes imposées sur le THD

Différentes grandeurs sont définies pour chiffrer ces perturbations. Parmi celles-ci les plus utilisées sont : [04-16]

- Le taux harmonique de rang h :

$$S_h = C_h / C_1 \quad (1.2)$$

- ✓  $C_h$  : la composante harmonique de rang h
  - ✓  $C_1$  : la composante fondamentale,
- Le taux de distorsion harmonique:

$$\text{THD} = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} C_h^2 / C_1^2} \quad (1.3)$$

Le terme THD correspond au (Total Harmonic Distortion), représente le rapport entre la valeur efficace des harmoniques et la valeur efficace du fondamental. Le taux de distorsion harmonique est une notion très utilisée pour définir l'importance du contenu harmonique d'un signal alternatif.

### 1-6-1. THD en courant ou en tension

Il existe deux sortes de THD : en tension (apparaît à la source) ou en courant (dû aux charges non linéaires) [15-11].

Lorsqu'il s'agit des harmoniques de courant, l'expression devient:

$$\text{THD}_i = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2 / I_1^2} \quad (1.4)$$

- ✓  $I_h$  : Valeur efficace du Courant harmonique du rang h
- ✓  $I_1$  : la valeur efficace du Courant fondamental

Lorsqu'il s'agit des harmoniques de tension, l'expression devient:

$$\text{THD}_V = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2 / V_1^2} \quad (1.5)$$

- ✓  $V_h$  : Valeur efficace du Tension harmonique du rang h
- ✓  $V_1$  : la valeur efficace du Tension fondamental

## 1-6-2. Relation entre facteur de puissance et THD

En présence des harmoniques, l'expression de facteur de puissance (PF) devient :

$$PF = \frac{\cos\varphi}{\sqrt{1+THD^2}} \quad (1.6)$$

## 1-6-3. Intérêt du THD

Afin de garantir un niveau de qualité de l'énergie satisfaisant en limitant les effets des perturbations harmoniques, les distributeurs d'énergie et les utilisateurs sont amenés à respecter des normes et des recommandations qui définissent les règles relatives à la compatibilité électromagnétique (CEM) définies [02-03-04]:

- au niveau international par la CEI,
- au niveau européen par le CENELEC,
- au niveau français, par l'UTE et le CEF,

En effet, ces normes ont été établies par des groupes d'experts internationaux, qui représentent les constructeurs, les utilisateurs de matériels, ainsi que par des représentants de laboratoires d'essais, des consultants et des universitaires spécialistes du domaine considéré.

Afin de faciliter la connaissance des normes pour chaque domaine, les normes CEI qui couvrent tous les domaines de l'électrotechnique sont numérotées et référencées comme par exemple CEI 61000 sur la compatibilité électromagnétique et CEI 60063 qui définit les séries de valeurs normalisées pour les résistances et condensateurs,...etc. Les normes internationales publiées par la CEI dans les domaines de l'électricité et de l'électronique ont pour objectifs de :

- faciliter les échanges dans le monde en supprimant les barrières techniques,
- assurer la qualité des produits.
- garantir l'interopérabilité des produits et des systèmes.
- contribuer à la sécurité lors de l'utilisation des produits.
- contribuer à la protection de l'environnement et à la qualité de vie.

La norme CEI 61000-3-2 (Ed. 3 2005), annonce les limites de THD en courant admissibles pour les équipements dont le courant absorbé ne dépasse pas 16 A. Les membres de la Commission Electrotechnique Internationale ont groupé ces équipements, selon différentes critères, en quatre classes. Ces classes ainsi que leurs THDs limites sont montrées dans les tableaux (1.2)et (1.3) [11-17] :

Tableau.1.2 Classification de la CEI des équipements dont la consommation ne dépassant pas 16 A.

<b>Classe A</b>	Equipements triphasés équilibrés Appareils électroménagers, excluant le matériel de la classe D Outils excluant les outils portatifs Gradateurs pour lampes à incandescence Equipements audio Autres équipements qui n'appartiennent pas à B, C ou D
<b>Classe B</b>	Appareils portable Matériel de soudage électrique qui n'est pas du matériel professionnel
<b>Classe C</b>	Equipements d'éclairage
<b>Classe D</b>	Ordinateurs et moniteurs d'ordinateur TVs
<b>Remarque :</b> Seuls les équipements qui consomment une puissance entre 75 W et 600 W dans la classe D.	

Tableau.1.3 Niveaux des THDs limite de courants pour les équipements absorbant moins de 16 A

Ordre d'harmonique	Classe A [A]	Classe B [A]	Classe C [% de fond]	Classe D [mA/W]
<b>Harmoniques impairs</b>				
<b>3</b>	2.3	3.45	$30 \times \lambda$	3.4
<b>5</b>	1.14	1.71	10	1.9
<b>7</b>	0.77	1.155	7	1.0
<b>9</b>	0.40	0.60	5	0.5
<b>11</b>	0.33	0.495	3	0.35
<b>13</b>	0.21	0.315	3	3.85/13
<b><math>15 \leq n \leq 39</math></b>	$0.15 \times 15/n$	$0.225 \times 15/n$	3	$3.85/n$
<b>Harmoniques pairs</b>				
<b>2</b>	1.08	1.62	2	-
<b>4</b>	0.43	0.645	-	-
<b>6</b>	0.30	0.45	-	-
<b><math>8 \leq n \leq 40</math></b>	$0.23 \times 8/n$	$0.345 \times 8/n$	-	-

## 1.7. Solutions de dépollution du courant dans les réseaux électriques

Afin de compenser les perturbations du courant, deux groupes de solution de dépollution, traditionnelle et moderne existent (Voir figure 1.2).

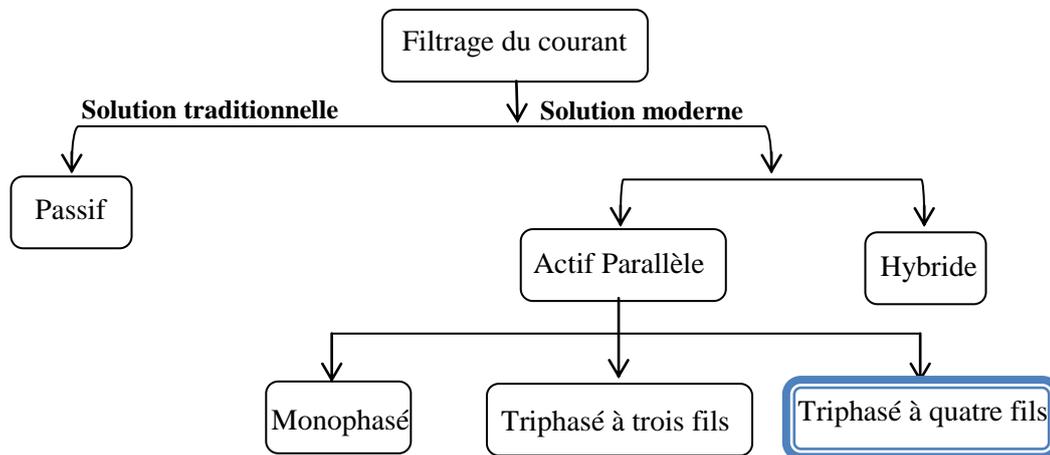


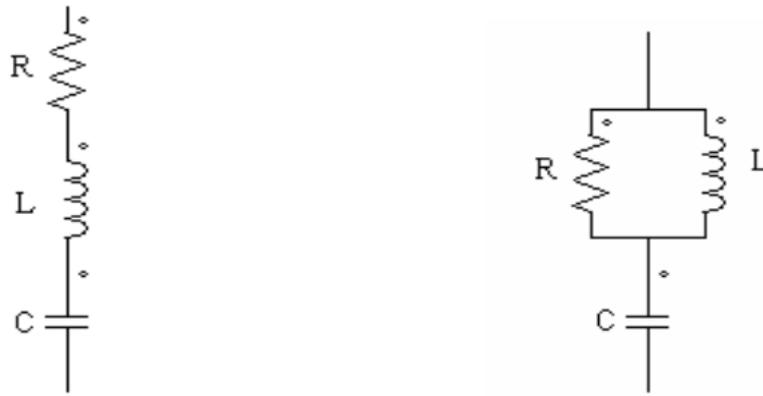
Figure.1.2 : Différentes solutions utilisées dans le filtrage du courant.

### 1.7.1. Solution traditionnelle

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. Plusieurs solutions existent pour limiter la propagation et l'effet des harmoniques dans les réseaux électriques [16] :

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

Le filtrage consiste à placer en parallèle sur le réseau d'alimentation une impédance de valeur très faible autour de la fréquence à filtrer et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau. Parmi les dispositifs de filtrage les plus répandus, on distingue le filtre passif résonnant et le filtre passif amorti ou passe-haut figure 1.3



a- Filtre passif résonnant

b- Filtre passif amorti

Figure 1.3 : les filtres passifs

Ces dispositifs sont utilisés pour empêcher les courants harmoniques de se propager dans les réseaux électriques. Ils peuvent aussi être utilisés pour compenser la puissance réactive. Malgré leur large utilisation dans l'industrie, ces dispositifs peuvent présenter beaucoup d'inconvénients :

- manque de souplesse à s'adapter aux variations du réseau et de la charge.
- équipements volumineux.
- problèmes de résonance avec l'impédance du réseau.

### 1.7.2. Solution moderne

La première solution de dépollution consiste à fabriquer la charge la moins polluante possible, comme le pont redresseur dodécaphasé, de manière à réduire le taux d'émission d'harmoniques. Les appareils à prélèvement sinusoïdal sont aussi proposés pour la compensation des harmoniques et de la puissance réactive. Cependant, ces solutions entraînent un coût supplémentaire et demandent plus que le savoir-faire habituel pour les mettre en œuvre. De plus, ces solutions ne résolvent pas les problèmes causés par les charges polluantes qui existent sur le marché [11].

Afin d'accompagner l'évolution des contraintes du fournisseur et du consommateur sans imposer un changement aux installations, une famille de filtres a été proposée comme une solution de dépollution des perturbations en courant.

### 1.7.2.1. Filtre actif parallèle

Le filtre actif parallèle composé d'un onduleur connecté au réseau par l'intermédiaire d'un filtre passif L-R. Il se connecte en parallèle avec le réseau triphasé et injecte en temps réel les composantes harmoniques des courants absorbés par les charges non linéaires connectées au réseau. Ainsi, le courant fourni par la source d'énergie devient sinusoïdal. Ces filtres actifs shunt présentent des avantages et des inconvénients par rapport aux filtres passifs [11-19-20].

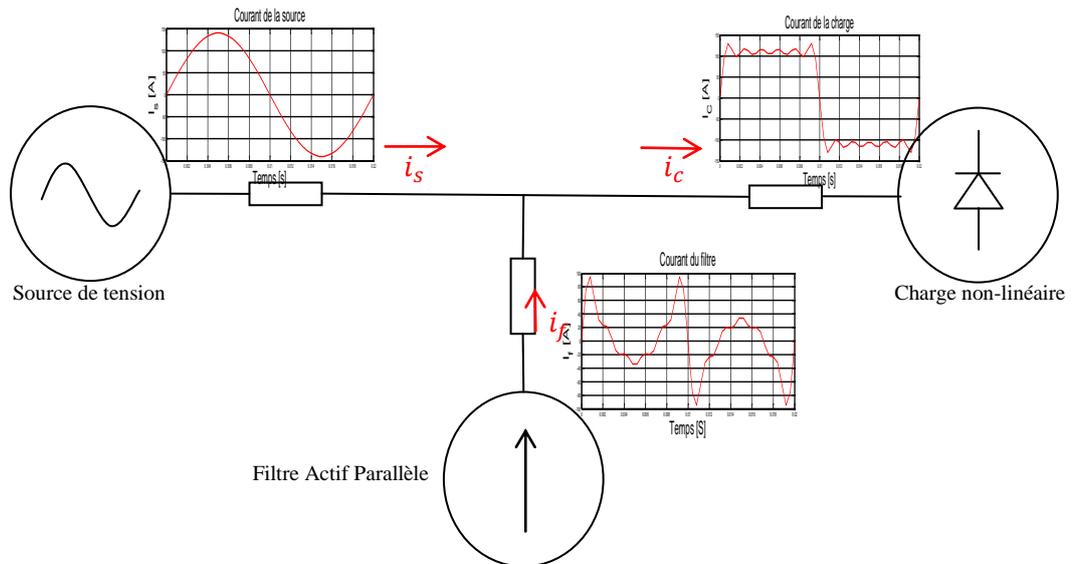
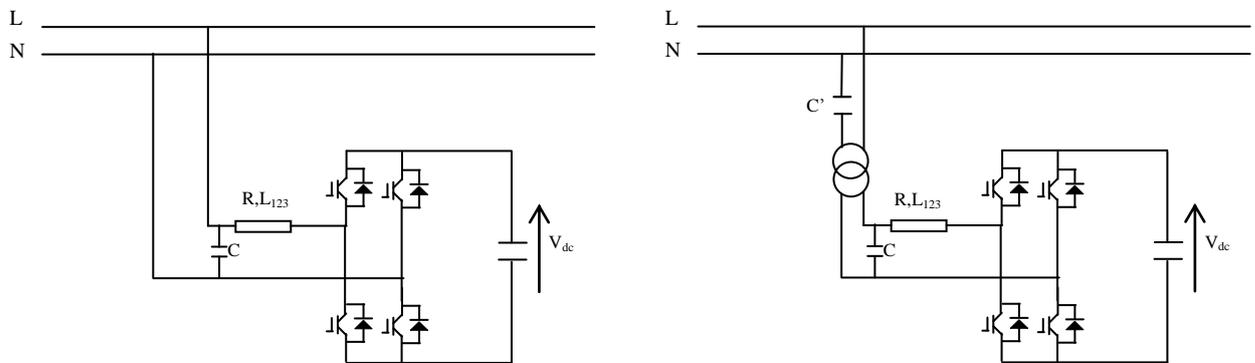


Figure.1.4 Principe du filtrage actif parallèle.

On peut distinguer trois configurations du filtre actif parallèle à structure tension :

#### a. Filtre monophasé

Deux différentes configurations du filtre actif parallèle monophasé sont présentées par la figure 1.5 ci-dessous [11-21].



-a- FA parallèle monophasé

-b- FA hybride monophasé

Figure.1.5 Déférentes configurations d'un filtre actif monophasé.

### b. Filtre actif parallèle à trois fils

Il se connecte en parallèle avec le réseau triphasé et injecte en temps réel les composantes harmoniques des courants absorbés par les charges non linéaires connectées au réseau. Ainsi, le courant fourni par la source d'énergie devient sinusoïdal [02-11].

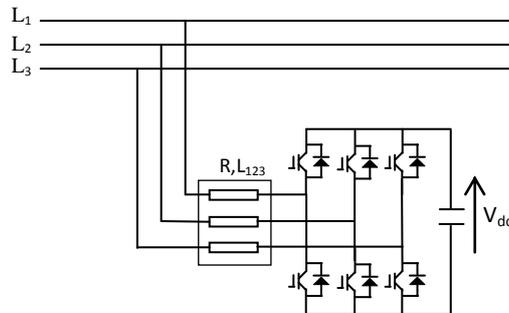


Figure.1.6 Configuration d'un FAP à trois fils.

### c. Filtre actif parallèle à quatre fils

Un grand nombre de charges monophasées peuvent être alimentées à partir d'un système triphasé avec le neutre. Elles peuvent causer un courant harmonique excessif dans le neutre, un déséquilibre des courants de source. Pour ces problèmes, des compensateurs à quatre fils ont été présentés [11-19-22-23].

#### - Filtre actif de type source de tension à quatre fils avec un condensateur à point milieu

La figure 1.7.a illustre le schéma d'un filtre actif shunt de type source de tension à quatre fils avec un condensateur à point milieu. Cette topologie est employée pour des puissances réduites car le courant du neutre traverse les condensateurs [11-19-23- 24-25-26].

#### - Filtre actif de type source de tension à quatre fils avec quatre bras

La Figure 1.7.c montre une configuration du filtre actif shunt de type source de tension à quatre fils et qui est connue sous le nom filtre actif à quatre bras, ou le quatrième bras est utilisé pour stabiliser et contrôler le courant du neutre du filtre actif [11-19-23-27-28].

Des autres configurations du FAP à quatre fils peuvent être citées (Voir figure 1.7) [11-29].

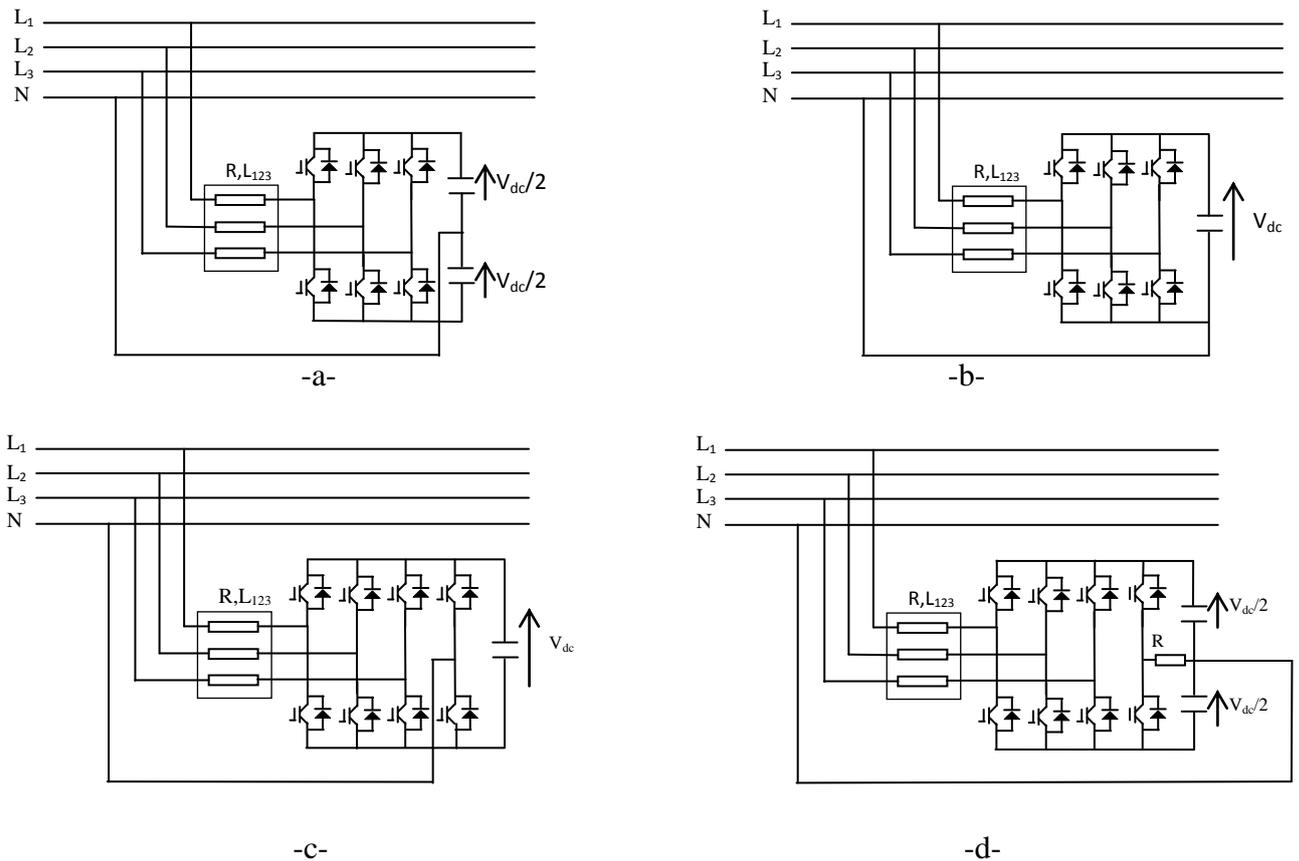


Figure.1.7 : Différentes topologies utilisées dans un FAP d'un réseau triphasé à quatre fils.

- a- Onduleur à trois bras avec condensateurs à point milieu ;
- b- Onduleur à trois bras avec connexion asymétrique du neutre ;
- c- Onduleur à quatre bras ;
- d- Onduleur à quatre bras amélioré de type FLSC.

### 1.7.2.2. Filtre hybride

Le filtre hybride est une topologie de filtre qui combine les avantages des filtres passifs et des filtres actifs. Pour cette raison, il est considéré comme l'une des meilleures solutions pour filtrer les harmoniques de courant des réseaux de distribution. Une des principales raisons de l'utilisation du filtre actif hybride est liée au développement des semi conducteurs de puissance tels que les transistors de puissance de types MOSFET ou IGBT. De plus, du point de vue économique, le filtre hybride présente un atout majeur : il permet de réduire le coût du filtre actif [02-16-30].

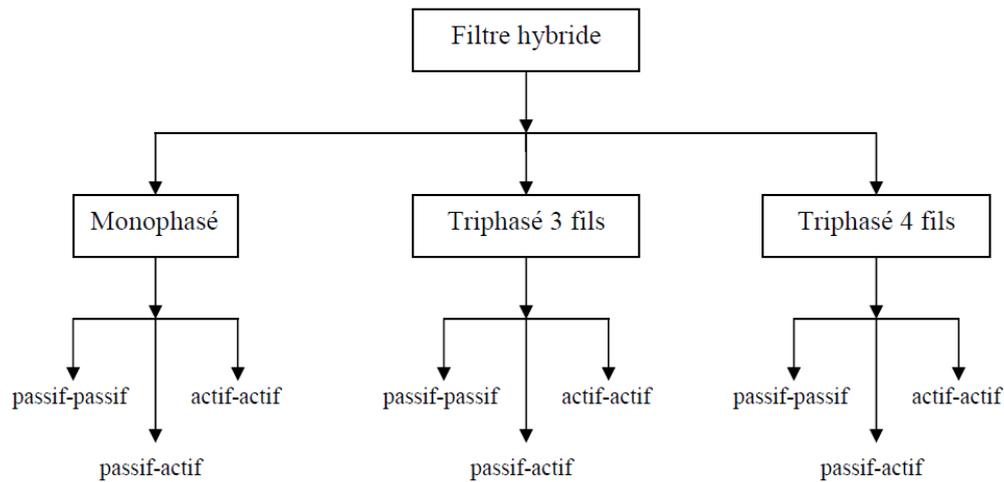


Figure.1.8 : Classification des filtres hybrides.

La configuration traditionnelle du filtre hybride comprend un filtre actif et un filtre passif. Le filtre passif doit avoir une impédance aussi faible que possible pour les harmoniques de rangs 5, 7, 11 et 13 afin d'atteindre de bonnes caractéristiques de filtrage [11-30-31]. L'association de ces deux filtres peut avoir plusieurs formes (Voir figure 1. 8).

#### a. Association série d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif

Dans cette configuration, les deux filtres actif et passif sont directement connectés en série, sans l'intermédiaire d'un transformateur. L'ensemble est connecté en parallèle sur le réseau.

Dans ce cas, le filtre passif se comporte comme une impédance faible à la fréquence d'accord et comme une grande impédance à la fréquence fondamentale. Ce système présente deux avantages : le dimensionnement en puissance du filtre actif est encore plus réduit du fait que le courant qui le traverse est plus faible et le filtre actif est à l'abri d'un éventuel court-circuit de la charge [02-11-32].

#### b. Association parallèle d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif

Dans cette topologie, le filtre actif est connecté en parallèle avec le filtre passif. Tous deux sont également en parallèle avec la charge. Le filtre actif parallèle sert à compenser les courants harmoniques basses fréquences émis par la charge polluante alors que le filtre passif, accordé sur une fréquence harmonique élevée, permet de compenser les harmoniques hautes fréquences [32-11].

### **c. Association d'un filtre actif série et d'un filtre passif**

Cette structure permet de réduire les risques d'antirésonance entre les éléments des filtres passifs et l'impédance du réseau. Dans ce cas, le filtre actif série agit comme une résistance vis-à-vis des courants harmoniques et les oblige à circuler dans le filtre passif, tout en restant transparent à la fréquence fondamentale [01-11].

## **1.8. Concluions**

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

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

Dans ce cadre, le chapitre suivant sera consacré au Modélisation -contrôle-commande du filtre actif parallèle à quatre bras.

# Chapitre 02

# Chapitre 02

## Modélisation contrôle-commande du filtre actif à quatre bras

---

---

### 2.1. Introduction

Comme il a été présenté dans le chapitre précédent, un filtre actif est essentiellement constitué d'un onduleur de tension. Les objectifs de recherche est d'améliorer les performances de compensation du filtre actif parallèle. Dans ce chapitre, nous étudierons la structure générale du filtre actif parallèle à quatre bras, laquelle a été divisé en deux : la partie puissance et la partie contrôle-commande. Dans la partie puissance, nous introduirons les trois principaux blocks de cette structure, à savoir l'onduleur de tension à quatre bras, le circuit de stockage d'énergie et le filtre de découplage. Dans la partie contrôle-commande, nous aborderons l'identification des courants perturbés, la régulation de la tension continue et du courant du filtre actif parallèle.

Plusieurs algorithmes d'identification des grandeurs harmoniques de référence et de nombreuses techniques de commande et de régulation ont été développés depuis la mise en place des 1<sup>ers</sup> filtres actifs [03-33].

## 2.2. Constituants d'un filtre actif parallèle à quatre Bras

Un filtre actif parallèle à quatre bras est essentiellement constitué de deux parties (Voir la figure 2.1) [11] :

- Partie puissance,
- Partie commande – contrôle.

Ces deux parties vont être détaillées dans les deux sections qui suivent.

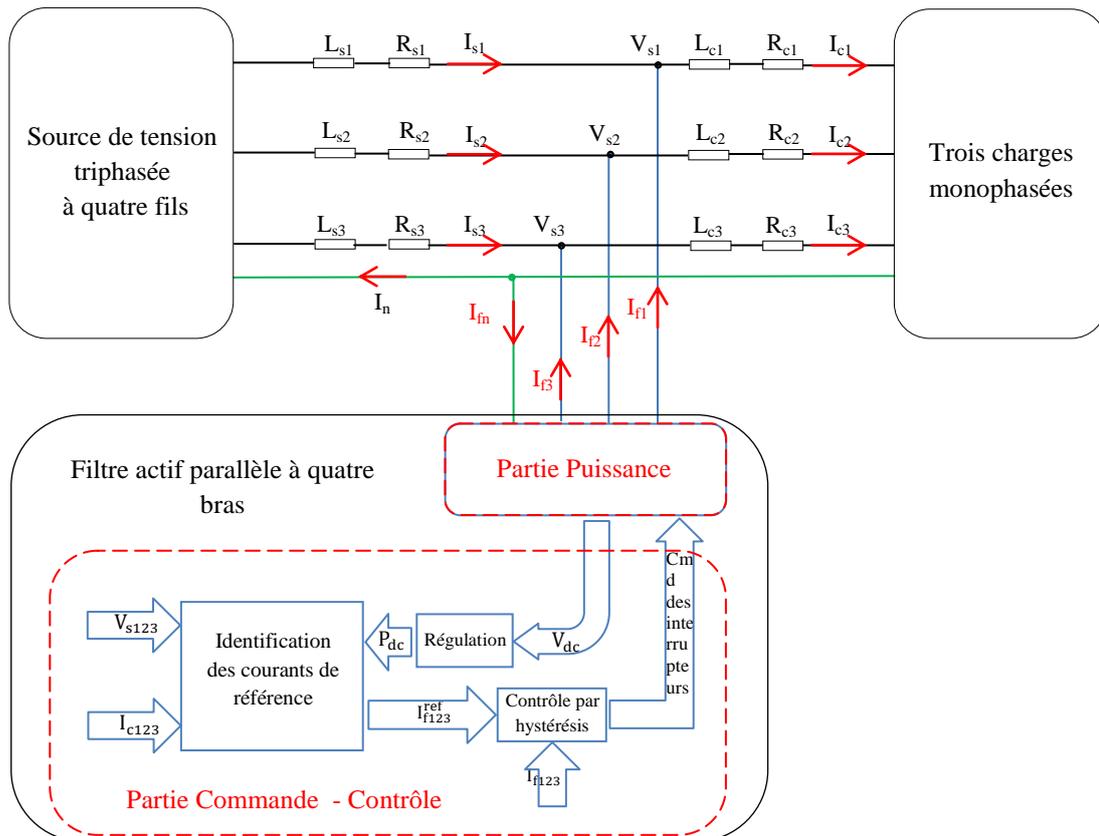


Figure.2.1 Principe du filtrage actif parallèle d'un réseau triphasé à quatre bras

## 2.3. Étude de la partie puissance

Dans cette section nous nous sommes intéressés à la partie puissance du FAP dont les composants sont les suivants :

- L'onduleur à quatre bras.
- Le filtre de couplage.
- Le système de stockage de l'énergie.

### 2.3.1. Description d'un onduleur triphasé à quatre bras

Dans cette topologie, nous utilisons un onduleur comprenant quatre bras constitués de huit interrupteurs réversibles en courant (transistors bipolaires, IGBT, GTO) en antiparallèle avec une diode. Comme l'illustre la figure 2.2.

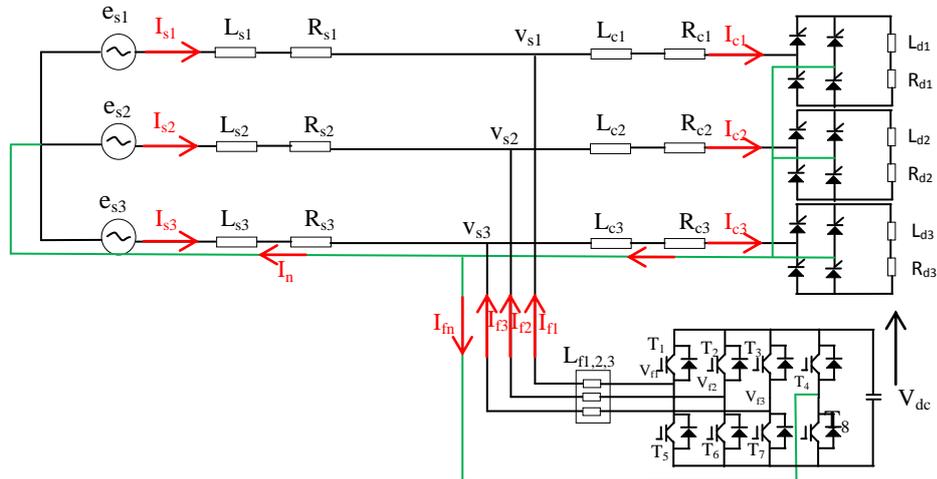


Figure.2.2 : Filtre actif parallèle à quatre bras pour un réseau triphasé à quatre Fils.

Les états de commutation pour ce type d'onduleur sont présentés dans le tableau 2.1. Ils sont obtenus grâce aux expressions suivantes :

$$V_{f1} = (T_1 - T_4)V_{dc} \tag{2.1}$$

$$V_{f2} = (T_2 - T_4)V_{dc} \tag{2.2}$$

$$V_{f3} = (T_3 - T_4)V_{dc} \tag{2.3}$$

$$\text{et } i_{dc} = T_1 i_1 + T_2 i_2 + T_3 i_3 - T_4 i_n \tag{2.4}$$

Avec :  $T_i = 1$  si  $T_{i+4}$  est fermé,

$T_i = 0$  si  $T_{i+4}$  est ouvert

$i = 1$  à 4.

Tableau.2.1 : Tensions générées par l'onduleur de tension à quatre bras.

<b>k</b>	<b>T<sub>1</sub></b>	<b>T<sub>2</sub></b>	<b>T<sub>3</sub></b>	<b>T<sub>4</sub></b>	<b>V<sub>f1</sub></b>	<b>V<sub>f2</sub></b>	<b>V<sub>f3</sub></b>
<b>0</b>	0	0	0	0	0	0	0
<b>1</b>	1	0	0	0	V <sub>dc</sub>	0	0
<b>2</b>	0	1	0	0	0	V <sub>dc</sub>	0
<b>3</b>	1	1	0	0	V <sub>dc</sub>	V <sub>dc</sub>	0
<b>4</b>	0	0	1	0	0	0	V <sub>dc</sub>
<b>5</b>	1	0	1	0	V <sub>dc</sub>	0	V <sub>dc</sub>
<b>6</b>	0	1	1	0	0	V <sub>dc</sub>	V <sub>dc</sub>
<b>7</b>	1	1	1	0	V <sub>dc</sub>	V <sub>dc</sub>	V <sub>dc</sub>
<b>8</b>	0	0	0	1	- V <sub>dc</sub>	- V <sub>dc</sub>	- V <sub>dc</sub>
<b>9</b>	1	0	0	1	0	- V <sub>dc</sub>	- V <sub>dc</sub>
<b>10</b>	0	1	0	1	- V <sub>dc</sub>	0	- V <sub>dc</sub>
<b>11</b>	1	1	0	1	0	0	- V <sub>dc</sub>
<b>12</b>	0	0	1	1	- V <sub>dc</sub>	- V <sub>dc</sub>	0
<b>13</b>	1	0	1	1	0	- V <sub>dc</sub>	0
<b>14</b>	0	1	1	1	- V <sub>dc</sub>	0	0
<b>15</b>	1	1	1	1	0	0	0

### 2.3.2. Filtre de couplage

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

1. Assurer la dynamique du courant du filtre défini par :

$$\frac{di_f}{dt} = \frac{di_h}{dt} \quad (2.5)$$

Où

$i_f$  : Courant du filtre

$i_h$  : Courant harmonique de la charge

2. Empêcher les composantes dues aux commutations de se propager sur le réseau électrique [04].

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

$$\left(\frac{di_f}{dt}\right)_{\max} = \frac{V_{C\max} - V_{F\max}}{L_f} \quad (2.6)$$

Avec

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

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

Pour des petites variations du courant du filtre, on obtient :

$$\left(\frac{\Delta i_f}{\Delta T}\right)_{\max} = \frac{V_{C\max} - V_{F\max}}{L_f} \quad (2.7)$$

Avec  $\Delta T = \frac{1}{f_{\text{ond}}}$  : La période de variation du courant du filtre.

En supposant la variation maximale du courant du filtre égale à 25 % de la valeur maximale du courant du réseau, la valeur de l'inductance de couplage est donnée par [03-11] :

$$L_f = \frac{V_{C\max} - V_{F\max}}{0.25i_{s\max}f_{\text{ond}}} \quad (2.8)$$

### 2.3.3. Système de stockage d'énergie

L'utilisation des batteries de condensateurs est effective dans les petites et moyennes puissances. Dans le cas des grandes puissances on utilise des bobines supraconductrices [03].

Le choix de la tension  $V_{dc}$  et de la capacité de condensateur  $C_{dc}$  affecte la dynamique et la qualité de compensation du filtre actif parallèle. En effet, une tension  $V_{dc}$  élevée améliore la dynamique du filtre actif. De plus, les ondulations de la tension continue  $V_{dc}$  causées par les courants engendrés par le filtre actif et limitées par le choix de  $C_{dc}$ , peuvent dégrader la qualité de compensation du filtre actif parallèle [11-34]. Ces fluctuations sont d'autant plus importantes que l'amplitude du courant du filtre est grande et que sa fréquence est faible. Pour cette raison, nous pouvons estimer que seuls les premiers harmoniques sont pris en compte dans le choix des paramètres du système de stockage. Pour démontrer ceci, deux méthodes peuvent être utilisées [11-34]:

\*La première méthode est basée sur le calcul de l'énergie fournie par le filtre actif et celle de la charge polluante comme suit [11]:

La valeur efficace du courant de la charge coté alternatif dans les trois phases est :

$$I_s = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I_d^2 d(\omega t)} = I_d \quad (2.9)$$

où  $I_d$  représente le courant de charge coté continu.

Le fondamental du courant de la charge est donné par :

$$I_{s1} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_s = 0.9I_d \quad (2.10)$$

Les courants harmoniques produits par la charge représentent la différence entre le fondamentale et la valeur efficace du courant coté alternatif de la charge. Ces courants sont donnés par :

$$\sum_{h=2}^{\infty} I_{sh} = \sqrt{I_s^2 - I_{s1}^2} = 0.43I_s \quad (2.11)$$

Le filtre actif doit fournir la puissance correspondante aux harmoniques produite par la charge. En choisissant la période de l'ondulation de la tension aux bornes du condensateur six fois inférieure à celle de la tension du réseau électrique, on peut trouver :

$$C_{dc} \geq \frac{0.43I_s}{6f_s(V_{dcmax}^2 - V_{dcmin}^2)} \quad (2.12)$$

avec  $f_s$  : la fréquence fondamentale du réseau électrique.

On choisit un taux d'ondulation  $\Delta V_{dc}$  acceptable, généralement de l'ordre de 2%  $V_{dc}$ .

\*La deuxième méthode, plus simple, se base sur la mesure du courant harmonique  $I_h$  du rang le plus faible. La capacité  $C_{dc}$  se calcule de la façon suivante [04-11-36].

$$C_{dc} = \frac{I_h}{V_{dc}\Delta V_{dc}\omega_h} \quad (2.13)$$

Avec  $\omega_h$  : la pulsation la plus faible des harmoniques à compenser.

## 2.4. Étude de la partie commande- contrôle

### 2.4.1 Identification des courants de référence

La charge polluante absorbe un courant constitué d'une composante fondamentale et de composantes harmoniques. Le but du filtrage actif est la génération de courants harmoniques de même amplitude mais en opposition de phase avec ceux absorbés par la charge. Ainsi, le courant absorbé au réseau sera sinusoïdal. Il est donc nécessaire d'identifier avec précision les courants harmoniques de la charge polluante.

Plusieurs algorithmes d'identification des grandeurs harmoniques de référence et de nombreuses techniques de commande et de régulation ont été développés depuis la mise en place des premiers filtres actifs. Génération de signaux de référence afin de générer les signaux de référence servant à la commande du filtre actif, nous avons opté pour les algorithmes de commande suivants :

- Identification par la méthode des puissances instantanées classique avec FPB.
- Identification par la méthode des puissances instantanées avec FMVs.
- Identification par la méthode Référentiel synchrone (SRF).

#### 2.4.1.1 Identification par la méthode des puissances instantanées classique avec FPB

Cette méthode introduit par H. Akagi qui est une méthode temporelle. Elle était utilisée afin d'éviter les difficultés dues au nombre élevé de calcul lors de la mise en œuvre de méthodes fréquentielles telle que la transformée de Fourier (Transformées de Fourier rapide ou discrète), exploite la transformation de Concordia de tensions simples et courants de ligne, afin de calculer les puissances réelle, imaginaire et homopolaire instantanées. Elle permet de transformer la composante fondamentale en une composante continue et les composantes harmoniques en composantes alternatives. Cette transformation est nécessaire si nous voulons éliminer facilement la composante continue. Le principe de la méthode de puissances réelle, imaginaire et homopolaire instantanées est énoncé ci-dessous [04-11] :

Soient respectivement les tensions simples et les courants de ligne d'un système triphasé avec homopolaire,  $v_{s1}(t)$ ,  $v_{s2}(t)$ ,  $v_{s3}(t)$  et  $i_{c1}(t)$ ,  $i_{c2}(t)$ ,  $i_{c3}(t)$ . La transformation de Concordia

permet de ramener ce système triphasé des axes 1-2-3 aux axes  $\alpha$ - $\beta$ -0, comme le montre les deux relations suivantes :

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ V_{s3} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c1} \\ i_{c2} \\ i_{c3} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

La composante homopolaire de la tension source équilibrée, nous pouvons écrire alors :

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ V_{s3} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

**Remarque** : Il est à noter que le courant du neutre  $i_n$  et le courant homopolaire  $i_o$  sont liés par la relation ci-dessous [11]:

$$i_n = i_{c1} + i_{c2} + i_{c3} \quad (2.17)$$

$$i_o = \frac{1}{\sqrt{3}}(i_{c1} + i_{c2} + i_{c3}) = \frac{1}{\sqrt{3}}i_n \quad (2.18)$$

Dans le repaire de Concordia, la puissance réelle et la puissance imaginaire sont données par la matrice suivante :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Avec

$\bar{p}$  et  $\bar{q}$  : Composantes continues de la puissance réelle et imaginaire respectivement,

$\tilde{p}$  et  $\tilde{q}$  : Composantes Alternatives de la puissance réelle et imaginaire respectivement.

Nous voulons compenser les harmoniques de courant. Après isolation des composantes fondamentales en tension notées  $\bar{V}_{\alpha\beta}$ , et des courants harmoniques  $\tilde{i}_{\alpha\beta}$ . Nous pouvons alors calculer les composantes alternatives des puissances réelle (p) et imaginaire (q) instantanées par :

$$\begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{V}_{\alpha} & \bar{V}_{\beta} \\ -\bar{V}_{\beta} & \bar{V}_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_{\alpha} \\ \tilde{i}_{\beta} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Les composantes harmoniques du courant  $\tilde{i}_{\alpha\beta}$  sont alors définies par :

$$\begin{bmatrix} \tilde{i}_{\alpha} \\ \tilde{i}_{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{V}_{\alpha} & \bar{V}_{\beta} \\ -\bar{V}_{\beta} & \bar{V}_{\alpha} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Donc :

$$\begin{bmatrix} \tilde{i}_{\alpha} \\ \tilde{i}_{\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\bar{V}_{\alpha}^2 + \bar{V}_{\beta}^2} \begin{bmatrix} \bar{V}_{\alpha} & -\bar{V}_{\beta} \\ \bar{V}_{\beta} & \bar{V}_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Soit :

$$\tilde{i}_{\alpha} = \frac{\bar{V}_{\alpha}}{(\bar{V}_{\alpha}^2 + \bar{V}_{\beta}^2)} \tilde{p} - \frac{\bar{V}_{\beta}}{(\bar{V}_{\alpha}^2 + \bar{V}_{\beta}^2)} \tilde{q} \quad (2.23)$$

$$\tilde{i}_{\beta} = \frac{\bar{V}_{\beta}}{(\bar{V}_{\alpha}^2 + \bar{V}_{\beta}^2)} \tilde{p} + \frac{\bar{V}_{\alpha}}{(\bar{V}_{\alpha}^2 + \bar{V}_{\beta}^2)} \tilde{q} \quad (2.24)$$

Nous remarquons de ces équations que dans les expressions de  $i_{\alpha}$  et de  $i_{\beta}$  la puissance homopolaire est absente.

Nous prenons :

$$i_{f\alpha}^{ref} = \tilde{i}_{\alpha}, \quad i_{f\beta}^{ref} = \tilde{i}_{\beta}, \quad \text{et pour l'homopolaire : } i_{f0}^{ref} = i_0 \quad (2.25)$$

Maintenant, il est aisé de remonter aux courants de référence par la transformation inverse de Concordia [11]:

$$\begin{bmatrix} i_{f1}^{ref} \\ i_{f2}^{ref} \\ i_{f3}^{ref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{f\alpha}^{ref} \\ i_{f\beta}^{ref} \\ i_{f0}^{ref} \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

### ❖ Filtres d'extraction

Les deux types de filtre d'extraction sont présentés à la figure suivante [02] :



Fig.2.3 Filtres d'extraction.

Comme cela est exposé dans la littérature, ces filtres d'extraction permettent d'obtenir une élimination plus ou moins satisfaisante de la composante continue, car leurs caractéristiques concernant le résidu harmonique sont différentes. Ils n'ont pas donné entière satisfaction car[02] :

- Pour obtenir une extraction satisfaisante, le régime dynamique est lent. En générale, la fréquence de coupure est choisie assez basse, entre 5 Hz et 35 Hz, ce qui engendre alors une instabilité du filtre actif lors de variations rapides de la charge.
- Dans le cas contraire, si l'on choisit une fréquence de coupure plus élevée, la précision de la détermination de la composante alternative est altérée et peut s'avérer insuffisante.

La figure 2.4 illustre l'algorithme d'identification:

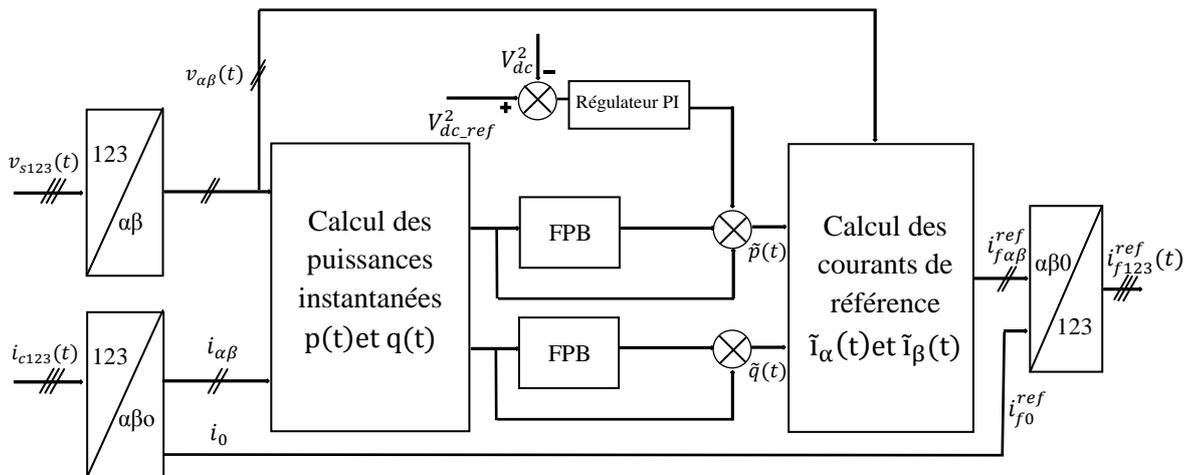


Figure.2.4 : Identification par la méthode des puissances instantanées classique avec FPB.

### 2.4.1.2 Identification par la méthode des puissances instantanées avec FMVs

Cette méthode utilise le même principe de la méthode des puissances instantanées classique. Elle exploite la transformation de Concordia de tensions simples et courants de ligne, afin de calculer les puissances réelle, imaginaire et homopolaire instantanées.

mais les filtres d'extractions (Passe Bas Ou Passe Haut) permettent d'obtenir une élimination plus ou moins satisfaisante. Pour ces raisons, un nouveau type de filtre d'extraction nommé ici Filtre Multi Variable (FMV) a été développé. Son principe de base s'appuie sur les travaux de Song Hong-Scok [02-11-37], et est basé sur l'extraction de la composante fondamentale des signaux, directement selon les axes  $\alpha, \beta$  comme cela est présenté à la figure 2.5.

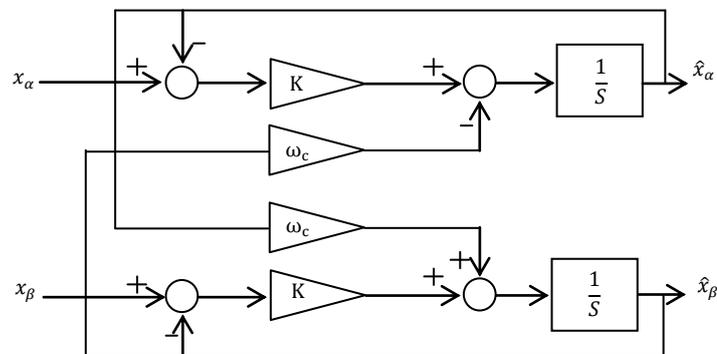


Figure .2.5 Principe du FMV.

Selon les axes  $\alpha$ - $\beta$ , les expressions liant les composantes  $\hat{X}_{\alpha\beta}$  en sortie du FMV aux composantes d'entrée  $X_{\alpha\beta}$  sont les suivantes :

$$\hat{x}_{\alpha}(s) = \left(\frac{K}{s} [x_{\alpha}(s) - \hat{x}_{\alpha}(s)] - \frac{\omega_c}{s} \hat{x}_{\beta}(s)\right) \quad (2.27)$$

$$\hat{x}_{\beta}(s) = \left(\frac{K}{s} [x_{\beta}(s) - \hat{x}_{\beta}(s)] + \frac{\omega_c}{s} \hat{x}_{\alpha}(s)\right) \quad (2.28)$$

Où sont représentés par :

$x_{\alpha\beta}$ : Le signal électrique d'entrée selon les axes  $\alpha - \beta$  de nature tension ou courant.

$\hat{x}_{\alpha\beta}$ : Les composantes fondamentales de  $x_{\alpha\beta}$ .

$K$ : Constante à fixer [Annexe A].

$\omega_c = 2\pi f$ : Pulsation fondamentale du réseau [03-11-37].

La figure 2.6 illustre l’algorithme d’identification

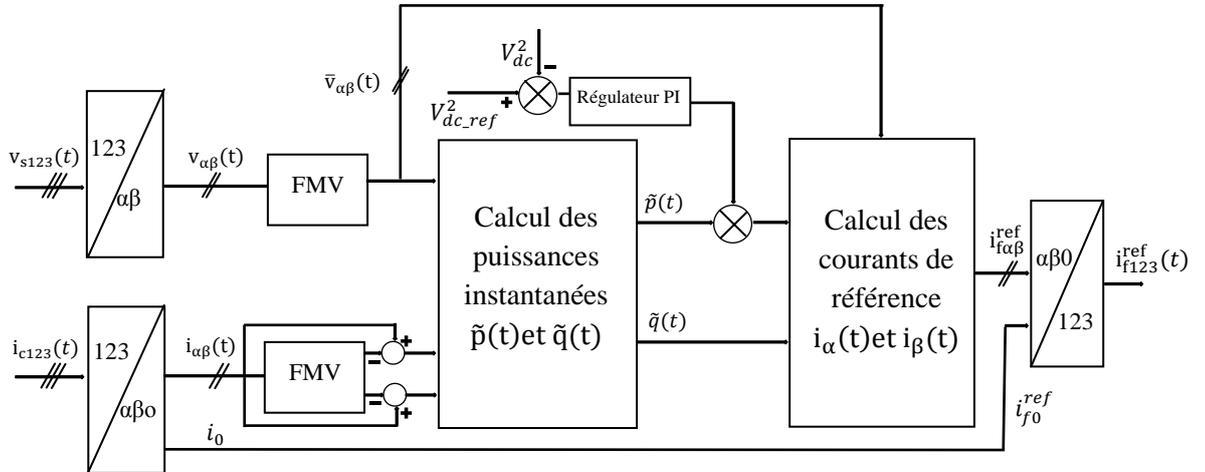


Figure .2.6 Identification par la méthode des puissances instantanées avec FMVs.

### 2.4.1.3 Identification par la méthode Référentiel synchrone SRF

Dans la méthode du repère synchrone, appelée aussi méthode des courants instantanés d et q, les courants de la charge sont transformés dans le repère synchrone. Elle permet d’obtenir des meilleures performances même si la tension du réseau est perturbée ou déséquilibrée[03]. La figure (2.7) représente le schéma de principe de cette méthode [03].

La transformation de Concordia est définie comme suit :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c1} \\ i_{c2} \\ i_{c3} \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

les courants  $i_\alpha$  ,  $i_\beta$  sera extraite de la composante harmonique des courants à l’aide d’un FMV .

Dans ce cas, les courants  $\tilde{i}_\alpha$  ,  $\tilde{i}_\beta$  sont transformés dans un référentiel synchrone d-q. Ce dernier étant synchronisé avec les tensions de source, et tournant à la même fréquence. Cette transformation est définie par :

$$\begin{bmatrix} \tilde{i}_d \\ \tilde{i}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos (wt) & \sin (wt) \\ -\sin (wt) & \cos (wt) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_\alpha \\ \tilde{i}_\beta \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

Où  $(\omega t)$  qui représente la position angulaire du repère tournant est une fonction linéaire de la pulsation angulaire. Ce repère de référence tourne à une vitesse constante en synchronisme avec les tensions triphasées [03-38].

Enfin, les courants de référence sont générés dans le plan triphasé 1-2-3 est définie comme suit :

$$\begin{bmatrix} i_{f1}^{ref} \\ i_{f2}^{ref} \\ i_{f3}^{ref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{f\alpha}^{ref} \\ i_{f\beta}^{ref} \\ i_{f0}^{ref} \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

L'une des caractéristiques les plus remarquables de cet algorithme est que les courants de référence sont directement obtenus à partir des courants de la charge polluante, sans tenir compte des tensions du réseau. Ceci est un avantage important puisque la génération des courants de compensation ne sera affectée ni par les distorsions, ni par les déséquilibres présents dans les tensions de source, renforçant ainsi la robustesse et la performance de la compensation. Cependant, la transformation du plan  $\alpha\beta$  vers le référentiel d-q des signaux en sinus et cosinus, synchronisés avec les tensions simples du réseau, est indispensable. Ces derniers sont créés en utilisant, dans chaque phase, une boucle à verrouillage de phase, plus connue sous la nomination anglo-saxonne PLL (Phase Locked Loop) [33].

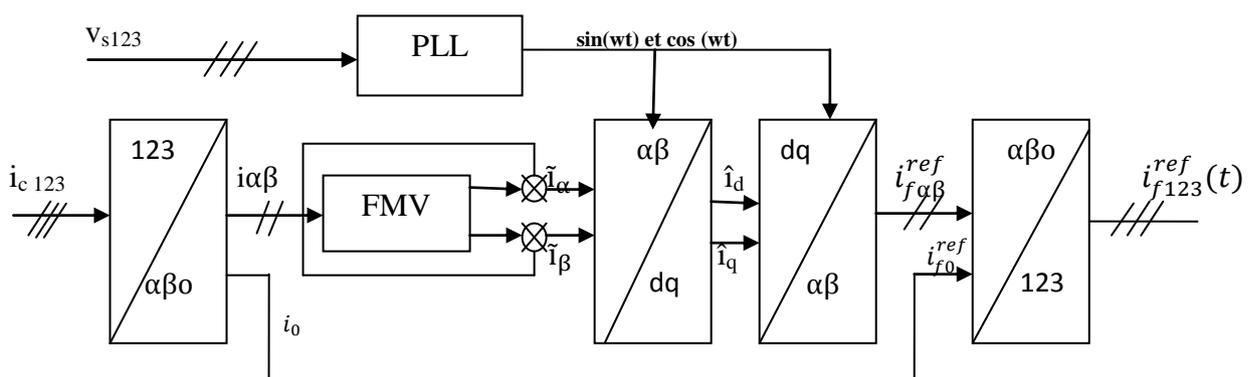


Figure. 2.7 : Extraction des harmoniques par méthode de référentiel synchrone (SRF)

### 2.4.2. Régulation de la tension continue

La source d'alimentation du filtre n'est pas une source de tension autonome mais une capacité qui se charge et se décharge. La tension aux bornes de cette dernière n'est pas constante, à cause de sa sensibilité aux échanges de puissance active entre la charge polluante et le réseau. Les pertes dans les composantes de puissance font aussi varier la tension aux bornes de la capacité, d'où la nécessité de réguler cette tension de la maintenir à un niveau constant.

Les principales causes susceptibles de modifier cette tension sont [39-40] :

- Les pertes dans le filtre actif.
- L'injection des courants fondamentaux pendant les régimes transitoires de la charge polluante.
- Les pertes de commutation et par conduction des interrupteurs de puissance.

Afin d'assurer le rôle de source de tension continue, une régulation de cette tension est nécessaire [11]. Pour cela, nous pouvons utiliser un régulateur PI. Si nous négligeons les pertes au niveau de l'onduleur et dans le filtre de sortie, la relation entre la puissance absorbée par le condensateur et la tension à ses bornes peut s'écrire sous la forme suivante :

$$P_{dc} = \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} C_{dc} V_{dc}^2 \right) \quad (2.32)$$

Appliquons la transformation de Laplace sur cette relation, nous obtenons :

$$P_{dc}(s) = \frac{1}{2} s C_{dc} V_{dc}^2(s) \quad (2.33)$$

La tension aux bornes du condensateur est donnée par :

$$V_{dc}^2(s) = \frac{2P_{dc}(s)}{C_{dc}s} \quad (2.34)$$

A partir de la relation (2.34), et en tenant compte du régulateur PI, la boucle de régulation de tension continue peut être représentée par la figure 2.8. Le choix des paramètres  $K_{pdc}$  et  $K_{idc}$  aura pour objectif d'obtenir un temps de réponse minimal afin de ne pas nuire la dynamique du filtre actif.

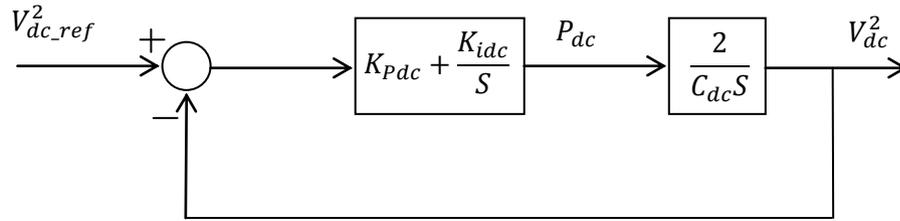


Figure.2.8 : Boucle de régulation de la tension continue.

A partir de la figure 2.8, la fonction de transfert représentant la régulation en boucle fermée de la tension continue est donnée par :

$$G_{BF} = \frac{(1 + \frac{K_{pdc}s}{K_{idc}})}{s^2 + 2\frac{K_{pdc}}{C_{dc}}s + 2\frac{K_{idc}}{C_{dc}}} \tag{2.35}$$

Comparant cette équation avec la forme générale d’une fonction de transfert de deuxième ordre, on trouve [11] :

$$K_{idc} = \frac{1}{2}C_{dc}\omega_c^2 \quad \text{tel que: } \omega_c = 2\pi f_c \quad \text{et} \quad K_{pdc} = \xi\sqrt{2C_{dc}K_{idc}} \tag{2.36}$$

### 2.4.3. Contrôle de l’onduleur par 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 2.9 expose son principe qui consiste à établir dans un premier temps le signal d’erreur, différence entre le courant de référence  $i_f^{ref}$  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 [02-11].

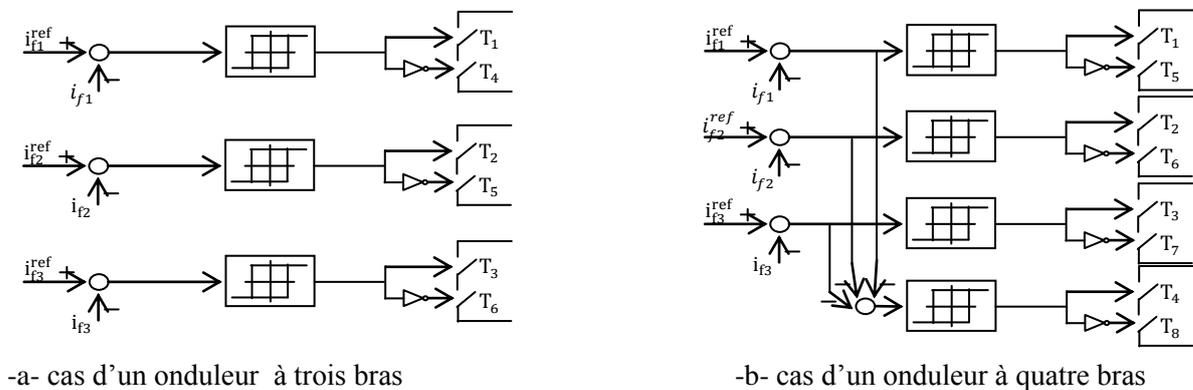


Figure.2.9 : Principe de la commande par hystérésis.

## 2.5. Résultats des simulations

Nous nous sommes intéressés à l'étude du système présenté par la figure 2.10.

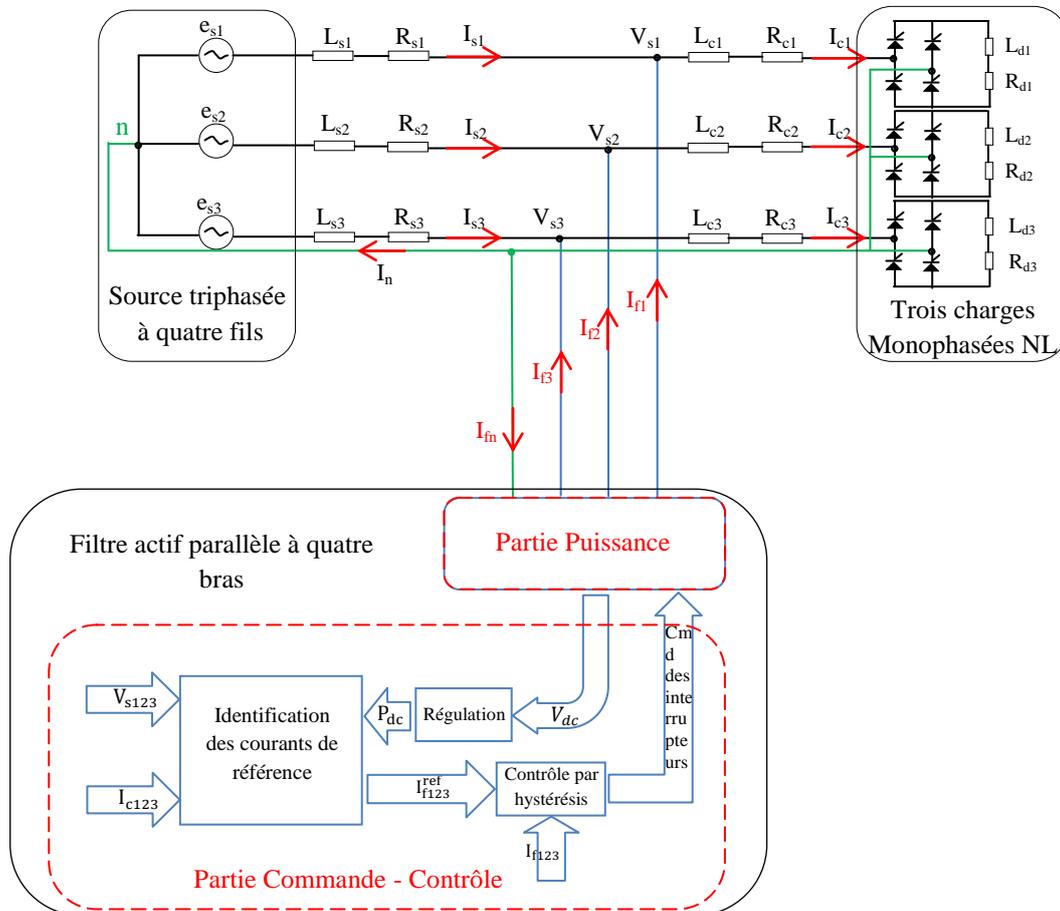


Figure.2.10 Filtrage AP a 4 bras d'un réseau triphasé à quatre fils alimentant trois charges non-linéaires avec régulateur PI.

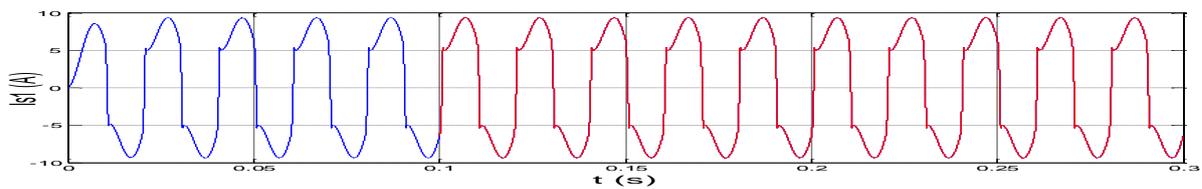
**Les valeurs de ces paramètres du système étudié sont présentées ci-dessous :**

- $V_{seff} = 220V$  ,  $f = 50Hz$ ,  $L_s = 2.3mH$ ,  $R_s = 0.42\Omega$ ,  $L_c = 1 mH$ ,  $R_c = 1 m\Omega$
- Cas où les trois charges sont identiques :  $R_{d1} = R_{d2} = R_{d3} = 26 \Omega$  et,  $L_{d1} = L_{d2} = L_{d3} = 90 mH$ .
- Pour les paramètres du FAP nous prenons :  $L_f = 3 mH$ ,  $C_{dc} = 1000 \mu F$  et  $V_{dc} = 700 V$ .
- bande d'hystérésis :  $\Delta H = 0.02 A$ .
- On prend pour le Filtre Multi Variable (FMV):  $K = 50$ , pour le Filtre Passe Bas (FPB) : il est de premier ordre et sa fréquence de coupure est de 30 Hz.

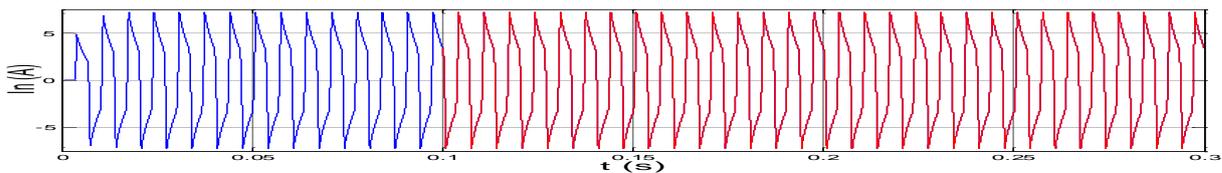
## 2.5.1-cas de charges identiques

### ❖ Simulation de l'ensemble source-charges non linéaires

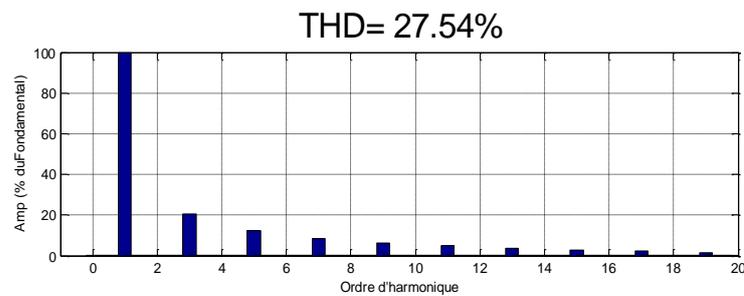
Les résultats suivant représentent la réponse pour un cas de charge identique (équilibré) et on considère que l'angle d'amorçage  $\alpha$  est le même pour tous les thyristors, on prend  $\alpha = 0$ . C'est la raison pour laquelle nous ne tracerons que la courbe du courant de source de la phase 1, ainsi que le spectre d'harmonique de cette phase, les deux autres phases ont la même courbe de courant et le même spectre d'harmonique que ceux de la première phase.



-a- Courant de la source



-b- Courant du neutre



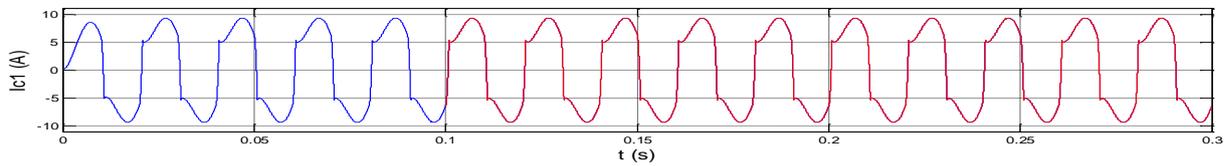
-c- Spectre d'harmonique du courant de la source.

Figure.2.11 Simulation du réseau à trois charges monophasées alimentées par redresseurs à diode (phase 1).

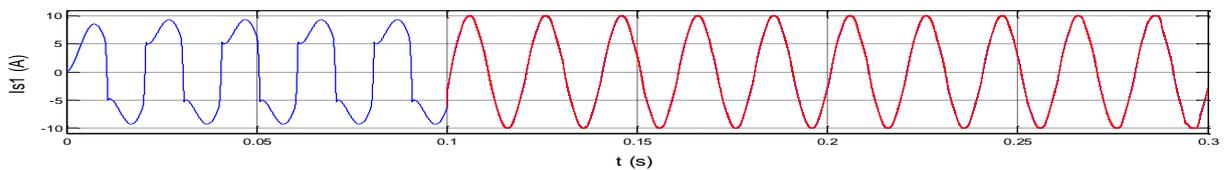
\*Le taux de distorsion d'harmonique a été mesurée sur 10 périodes (colorés en rouge) entre l'instant 0.1 et 0.3 s, nous remarquons que THD = 27.54 %.

### ❖ Filtrage par la méthode de puissances instantanées classique avec FPB

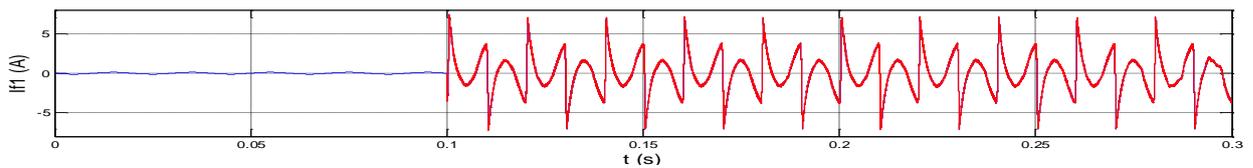
Dans ce qui suit, nous allons insérer le FAP à l'instant  $t = 0.1$  s, la mesure du THD sera à partir de cet instant, c.à.d. compris le régime transitoire due à l'injection du FAP.



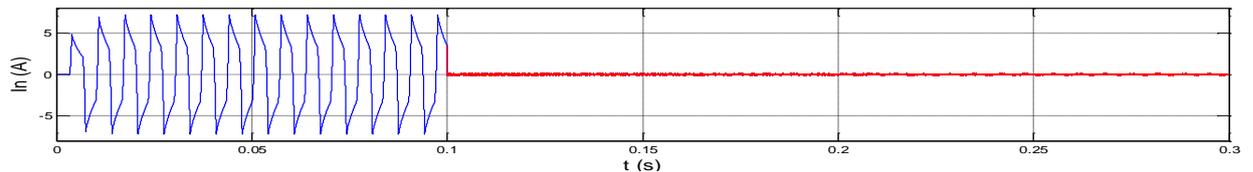
-a- Courant du coté charge (phase 1)



-b- Courant de la source avant et après le filtrage (phase 1)

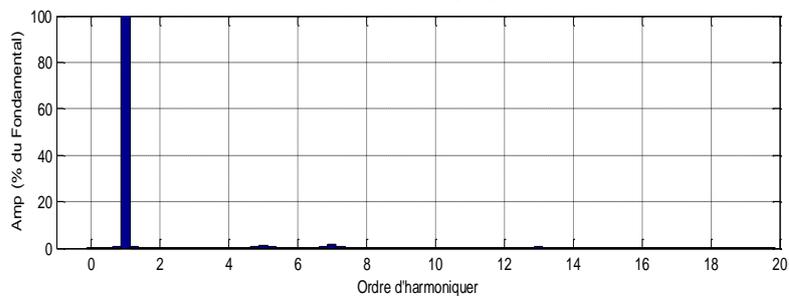


-c- Courant injecté par le filtre (phase 1)



d- Courant du neutre avant et après le filtrage..

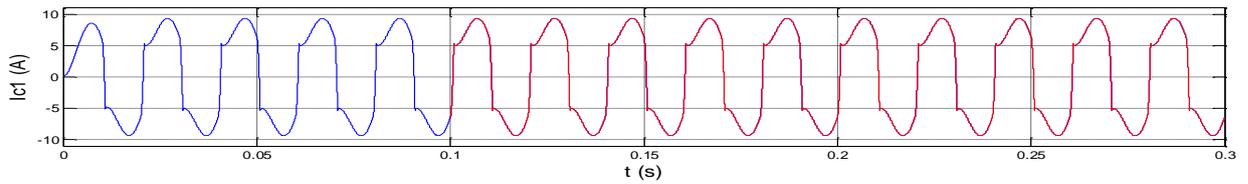
THD= 2.34%



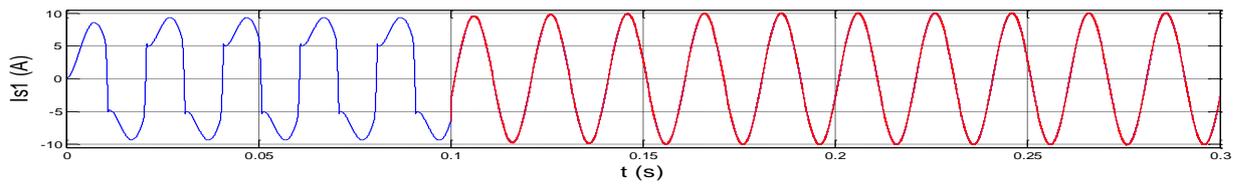
-e- Spectre d'harmonique Courant de la source après le filtrage

Figure.2.12 Simulation du FAP à 4 bras par la méthode des puissances instantanées avec FPB

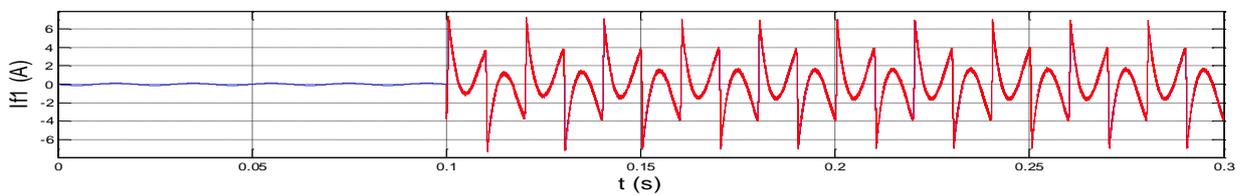
❖ Filtrage par la méthode des puissances instantanées utilisant des FMVs



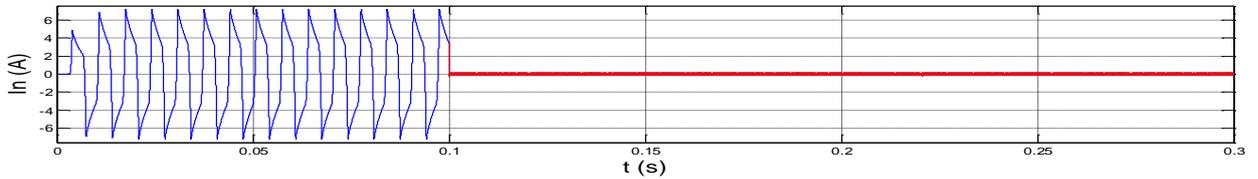
-a- Courant du coté charge (phase 1)



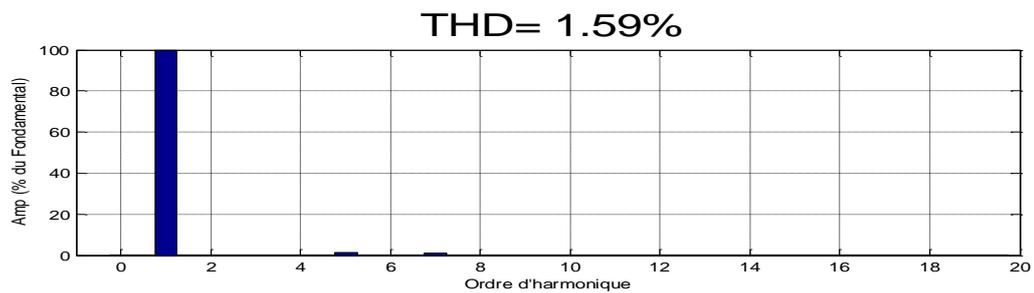
-b- Courant de la source avant et après le filtrage (phase 1)



-c- Courant injecté par le filtre (phase 1)



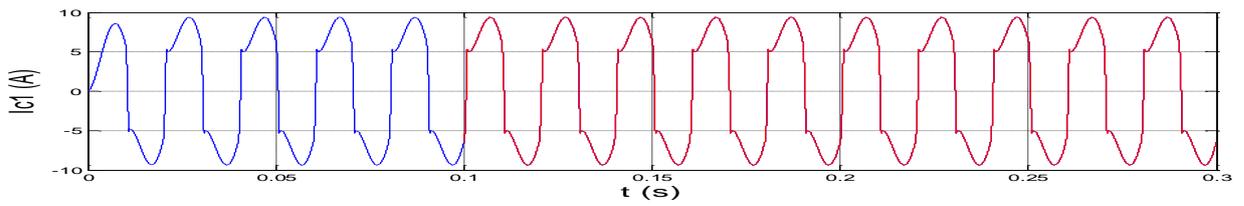
-d- Courant du neutre avant et après le filtrage.



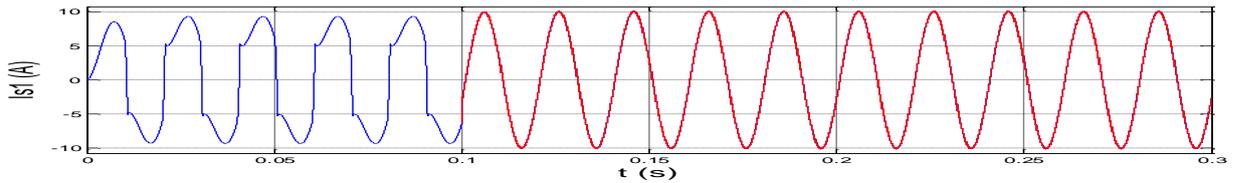
-e- Spectre d'harmonique

Fig.2.13 Simulation du FAP à 4 bras par la méthode de puissances instantanées utilisant des FMVs.

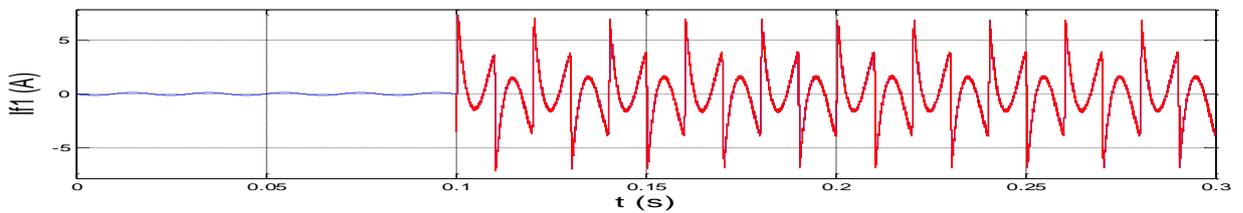
❖ Filtrage par la méthode Référentiel synchrone SRF



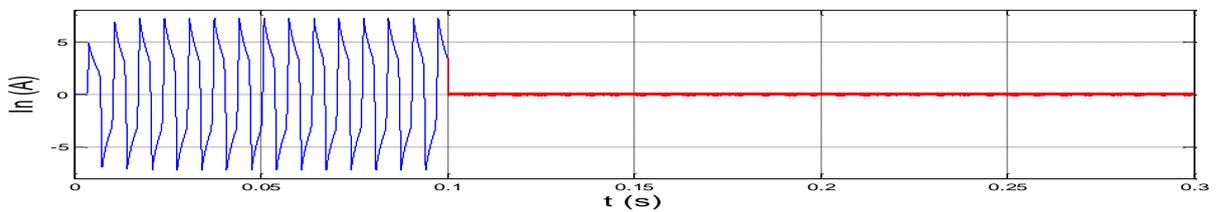
-a- Courant de coté charge (phase 1)



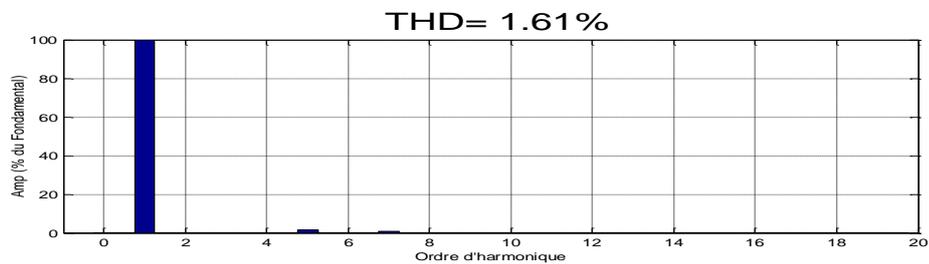
-b- Courant de la source avant et après le filtrage (phase 1)



-c- Courant injecté par le filtre (phase 1)



d- Courant du neutre avant et après le filtrage.



-e- Spectre d'harmonique

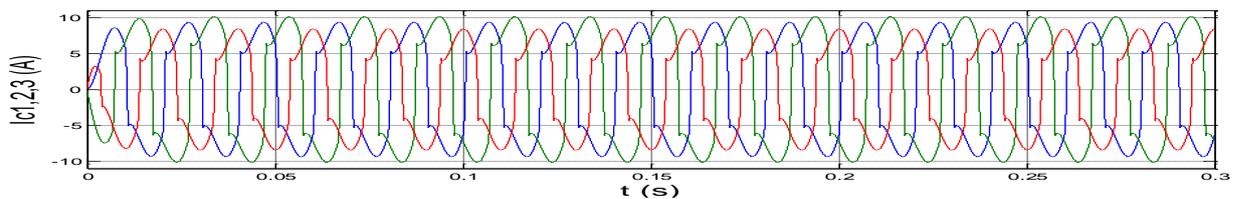
Fig.2.14 Simulation du FAP à 4 bras par la méthode Référentiel synchrone

## 2.5.2-cas de charges non- identiques

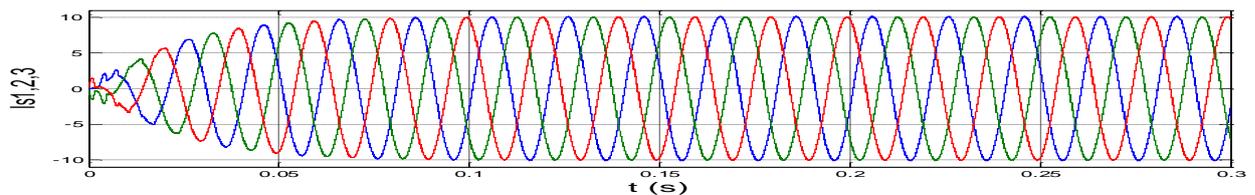
### ❖ Filtrage par la méthode des puissances instantanées utilisant des FMVs

#### a- Trois charges déferentes alimentées par trois ponts redresseurs commandées

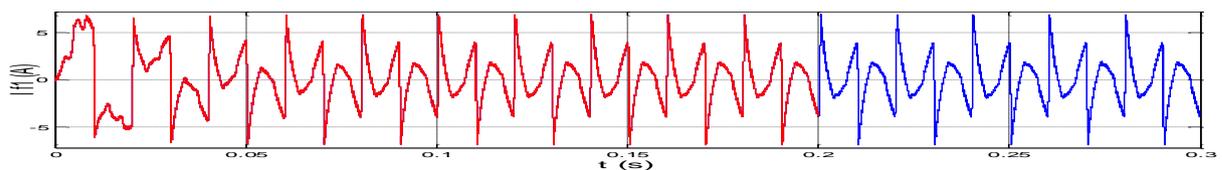
On considère que l'angle d'amorçage  $\alpha$  est identique pour tous les thyristors, on prend  $\alpha = 0$ ,  $R_{d1} = 26 \Omega$ ,  $R_{d2} = 23 \Omega$ ,  $R_{d3} = 30 \Omega$  et,  $L_{d1} = 90 \text{ mH}$ ,  $L_{d2} = 100 \text{ mH}$ ,  $L_{d3} = 85 \text{ mH}$ . Dans ce cas les charges sont déferentes. Les résultats de simulation du système étudié sont présentés sur la figure ci-dessous.



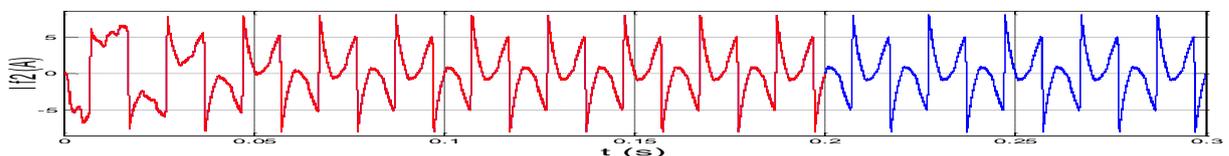
-a- Courants coté charge ( $I_{c1,2,3}$ )



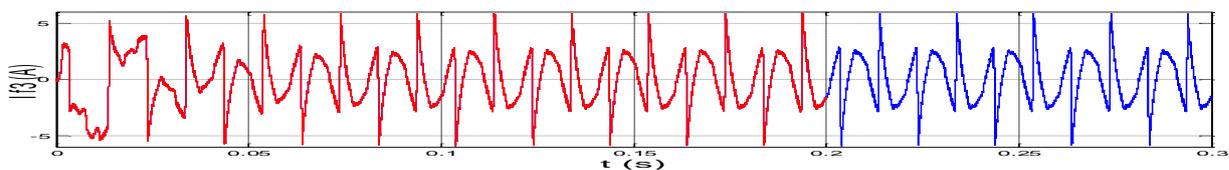
-b- Courants de la source ( $I_{s1,2,3}$ )



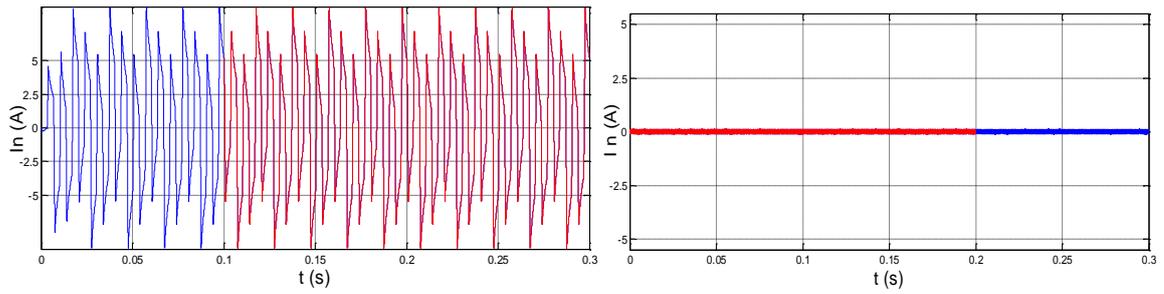
-c- Courant injecté par le filtre (phase 1)



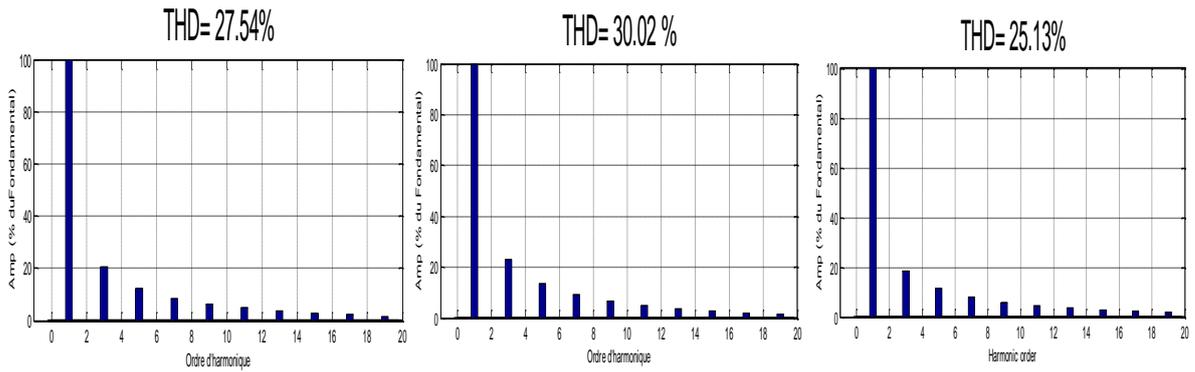
-d- Courant injecté par le filtre (phase 2)



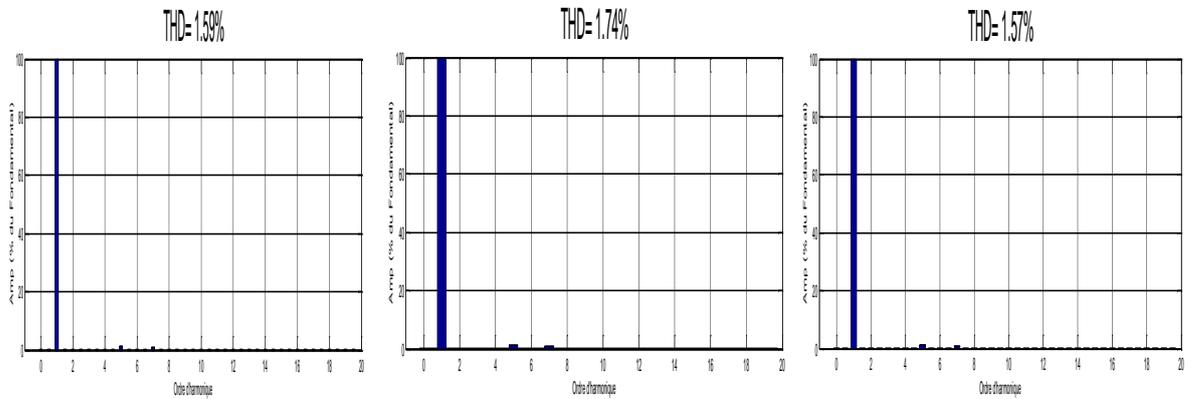
-e- Courant injecté par le filtre (phase 3)



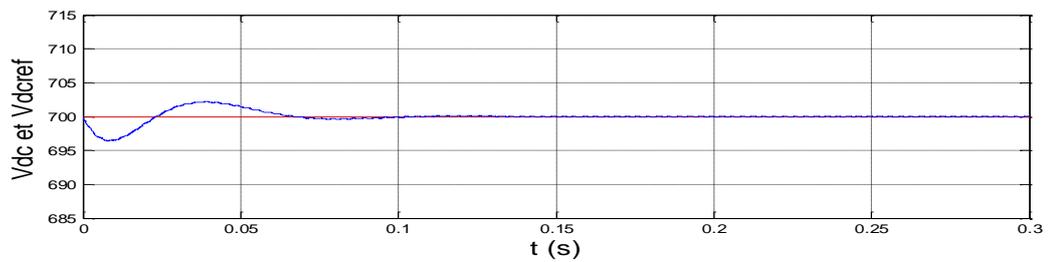
-f- Courant du neutre avants et après le filtrage.



-g- Spectres d'harmonique avant le filtrage (3 phases respectivement)



-h- Spectres d'harmonique après le filtrage (3 phases respectivement)

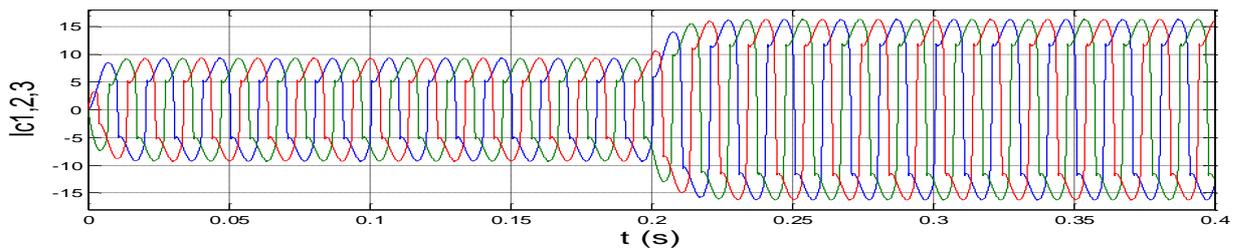


-i- Tension aux bornes du condensateur

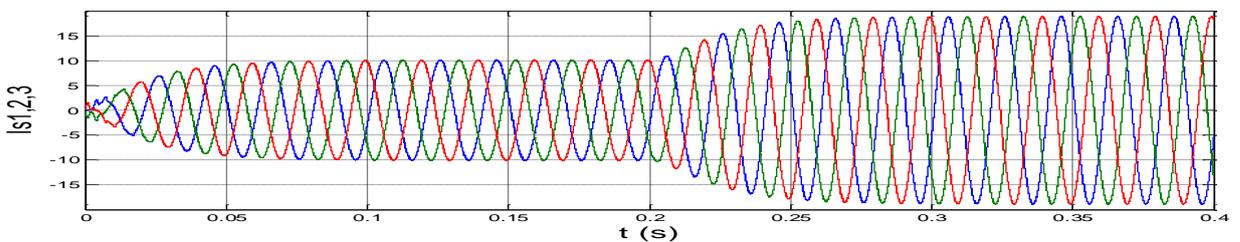
Figure.2.15 : Simulation du FAP à 4 bras dans le cas les charges sont déférentes

### 2.5.3- variation brusque des charges non linéaire

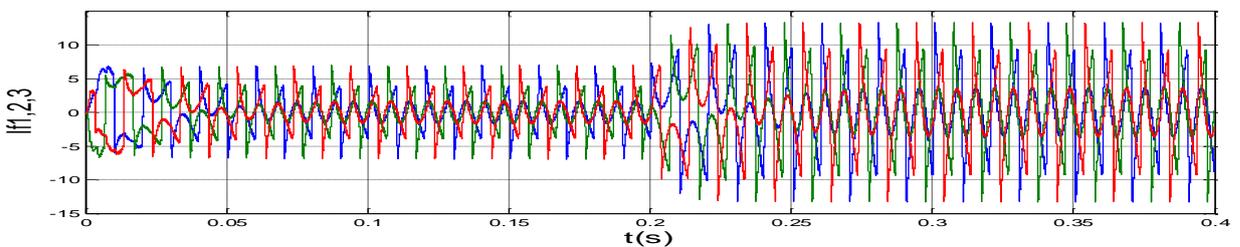
On considère que l'angle d'amorçage  $\alpha$  est le même pour tous les thyristors, on prend  $\alpha = 0$  et un système de charges équilibré pour  $R_{d1,2,3} = 26 \Omega$ ,  $L_{d1,2,3} = 90 \text{ mH}$ , pour étudier le comportement au démarrage aussi bien que lors de variation de la charge à l'instant 0.2s on a varier les résistance des charges polluante à la moitié, la méthode des puissances instantanées avec FMV est utilisée.



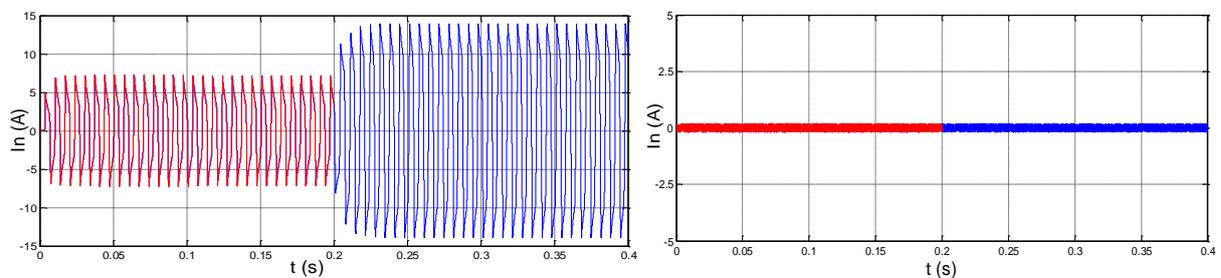
-a- Courants du coté charge ( $I_{c1,2,3}$ )



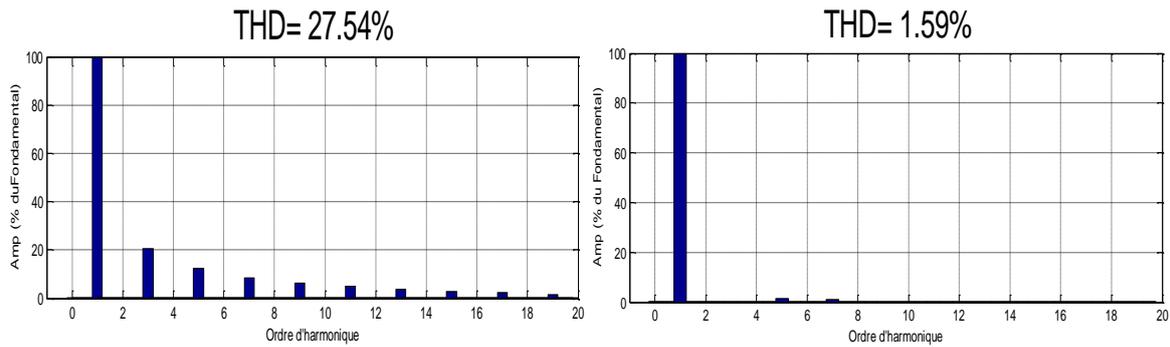
-b- Courants de la source ( $I_{s1,2,3}$ )



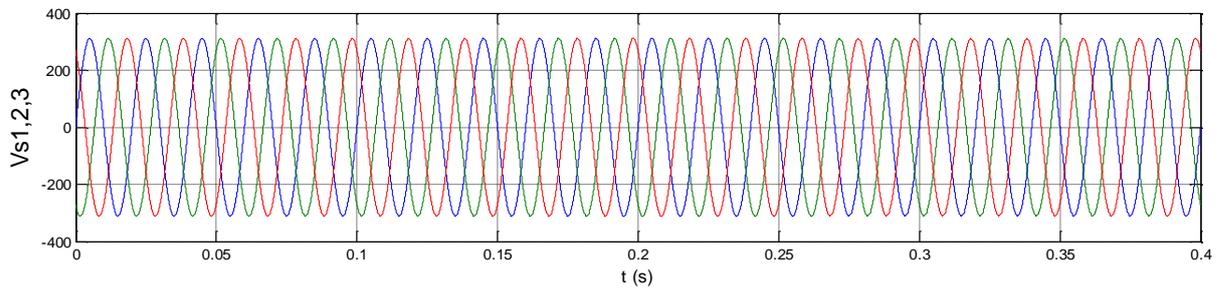
-c- Courants injecté par le filtre (3 phase)



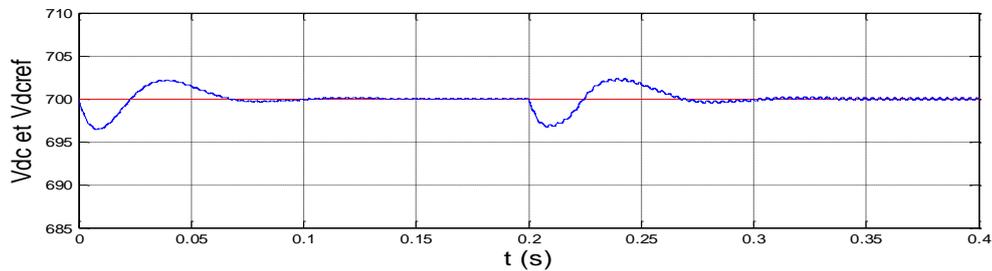
-d- Courant du neutre avant et après le filtrage



-e- Spectres d'harmonique avants et après le filtrage



f-Tensions du réseau



-g- Tension aux bornes du condensateur

Figure.2.16 : Simulation du FAP à 4 bras dans le cas de variation brusque des charges non linéaire

## 2.6. Interprétations des résultats

Les figures (2.11), (2.12), (2.13), (2.14), (2.15), (2.16) présente les résultats obtenus :

- les figures (2-11-a-b-c) illustres les réponses du l'ensemble source-charge non linéaires, on remarque que le courant de la source sont pollués et déformé avec un THD sont

27.54 figure (2-11-c), et la figure (2.11-b) montre qu'il ya un courant excessif dans le neutre a cause de surcharge importantes par la présence des courants d'harmonique.

- Les figures (2.12-a),(2.13.-a),(2.14-a) montre que les forme des courants du coté charge sont pollués déformé, Les figures (2.12-b),(2.13.-b),(2.14-b) montre que les forme des courants est sinusoïdale après le filtrage (coté source), et on remarque que le THD obtenu par la méthode de puissance instantané classique avec FPB ( THD = 2.34%) est supérieure, que celui de THD obtenu par la méthode de puissance instantanées utilisant des FMVs (THD =1.59%) et par la méthode référentiel synchrone (THD = 1.61%), et le courant de neutre devient nul après le filtrage dans tous les différent technique d'identification .
- Les figures (2-15) dans le cas des charges non identiques utilisant la méthode des puissances instantanés avec FMVs , montre que les forme générale des courants de la source après le filtrage est sinusoïdale et le THD et bien inferieur à 5 % , et le courant du neutre nul après le filtrage pour assurer la protection du conducteur du neutre, et la figure (2 .15.i) présente que la tension aux bornes du condensateur suite parfaitement sa référence de 700 V avec une chute de tension de 3.5 V.
- Afin de vérifier le comportement dynamique du régulateur PI des charges supplémentaire à été connectée en parallèle avec les ponts redresseur a l'instant 0.2 secondes, la figure (3.16.b) montre que la forme des courant sont sinusoïdale après le filtrage et sont équilibré, avec des spectres d'harmonique d'une THD inferieur à 5 % ,lors da la variation de charge, ce courant passe par un transitoire de 0.05s avant qu'il reprenne sa forme en régime permanent ,la figure (3.16.d) montre que le courant du neutre nul après le filtrage et pondant variation brusque des charges non linéaire, et les tensions de réseau sont équilibre avant et après variation de charge comme montre dans la figure (3.16.f) . La tension aux bornes du condensateur suite parfaitement sa référence avec une régime transitoire lors du changement de résistance est inferieur 0.07s comme illustrée dans la figure (3.16 .g).

## 2.7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté en détail le fonctionnement du filtre actif shunt à quatre bras comme une solution de dépollution des réseaux électriques à quatre fils, puisque ce filtre donne toujours de meilleurs résultats car ce l'onduleur pilote les trois courants de phase et celui du neutre.

Les résultats obtenus avec régulateur de tension PI et avec déférent technique d'identification qui permet de réduire considérablement le contenu harmonique du courant de source, ce qui se traduit par la diminution du THD après le filtrage bien en dessous de 5% , et permet de rendre le courant du neutre qui est la somme des courants des trois phases nul , et la source ce comporte alors comme un système équilibré dont le neutre n'a aucun roue, et on remarque que le THD obtenu par la méthode de puissance instantané classique avec FPB est supérieure, que celui de THD obtenu par la méthode de puissance instantanées utilisant des FMVs et par la méthode référentiel synchrone.

Dans le chapitre suivant, un nouveau régulateur de la tension du bus continu appelé régulateur par L'ANFIS sera utilisé.

# Chapitre 03

## Chapitre 03

# Commande par l'ANFIS d'un filtre actif parallèle à quatre bras

---

---

### 3.1. Introduction

Les systèmes ANFIS permettent de combiner les avantages des techniques floues et neurones, fournissant une bonne représentation de connaissance. L'intégration de réseau neurones au sein de ces systèmes améliore leurs performances grâce à la capacité d'apprentissage de réseaux de neurones, qui permet de générer des fonctions d'appartenance avec une haute précision pour les relations entrées sortie de contrôleur, permet de concevoir des contrôleurs qui s'adaptent aux toutes situations de fonctionnement du réseau électrique. Des contrôleurs conventionnels (type PI, mode glissant, ...etc.) sont calculés autour d'un point de fonctionnement donné. Par conséquent, si le point de fonctionnement change, le contrôleur risque de ne pas fonctionner correctement.

Dans ce chapitre, un contrôleur neuro-flou basé sur l'architecture ANFIS [41-42] est développé et calculé par apprentissage sur des couples d'entrées/sortie enregistrés depuis une simulation avec un filtre actif parallèle à quatre bras.

### 3.2. Définition

Les systèmes neuro-flous (Adaptive Network Based Fuzzy Inference System -ANFIS-) sont des systèmes flous formés par un algorithme d'apprentissage inspiré de la théorie des réseaux de neurones. La technique d'apprentissage opère en fonction de l'information locale et produit uniquement des changements locaux dans le système flou d'origine. Les règles floues codées dans le système neuro-flou représentent les échantillons imprécis et peuvent être vues en tant que prototypes imprécis des données d'apprentissage [43-44].

Un système neuro-flou ne devrait par contre pas être vu comme un système expert (flou), et il n'a rien à voir avec la logique floue dans le sens stricte du terme. On peut aussi noter que les systèmes neuro-flous peuvent être utilisés comme des approximateurs universels [44-45].

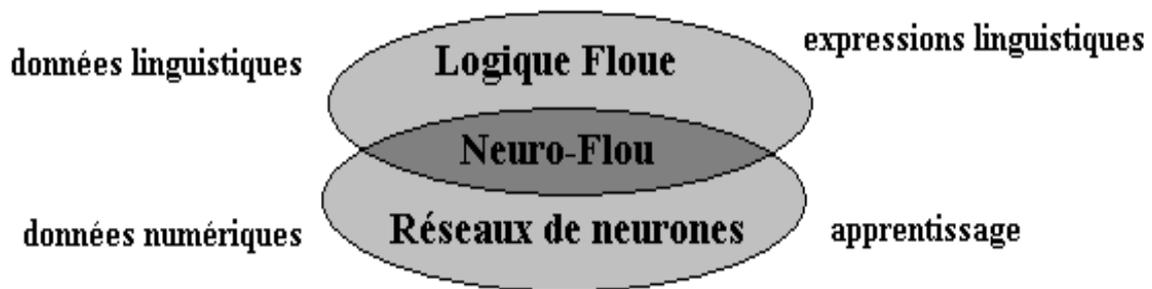


Figure 3.1 : Principe du système Neuro-flou.

### 3.3. Les avantages de l'ANFIS

Les avantages de cette technique sont :

- Réduction de la taille de la base de règles : il suffit d'avoir des règles générales, les détails seront par le RN.
- Réduction de la complexité de l'apprentissage : le RN doit simplement apprendre les cas particuliers ou les exceptions, pas le problème complet.
- Efficacité immédiate dès le début de l'apprentissage et possibilité d'éviter des comportements initiaux erratiques.
- Exploitation de la connaissance disponible, grâce à la base de règles.

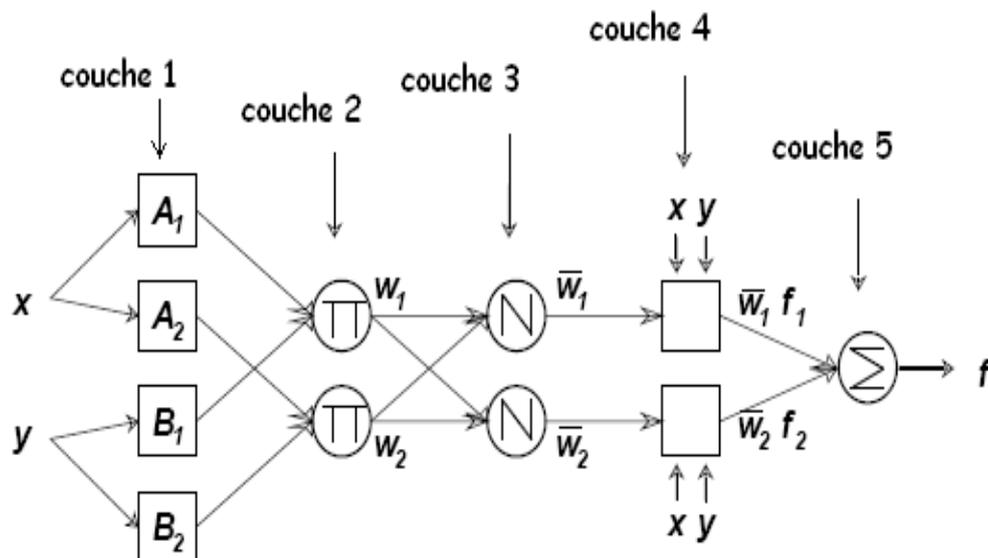
### 3.4. Architecture de l'ANFIS

ANFIS c'est un système d'inférence adaptatif neuro-flou qui consiste à utiliser un réseau neurone de type MLP à 5 couches pour lequel chaque couche correspond à la réalisation d'une étape d'un système d'inférence floue de type Takagi Sugeno. Pour la simplicité, nous supposons que le système d'inférence flou à deux entrées  $x$  et  $y$ , et à comme une sortie  $f$ . Supposer que la base de règle contient deux règles floues de type Takagi-Sugeno.

$$\text{Règle1 : SI } x \text{ est } \mathbf{A}_1 \text{ et } y \text{ est } \mathbf{B}_1 \text{ ALORS } f_1 = p_1 x + q_1 y + r_1 \quad (3.1)$$

$$\text{Règle2 : SI } x \text{ est } \mathbf{A}_2 \text{ et } y \text{ est } \mathbf{B}_2 \text{ ALORS } f_2 = p_2 x + q_2 y + r_2 \quad (3.2)$$

L'ANFIS à une architecture posée par cinq couches comme représenté sur la figure (3.2) [46]



**Figure 3.2 :** L' Architecture de l' ANFIS.

Une architecture classique peut être décrite de la manière suivante :

**1. La première couche** d'une architecture de type ANFIS comporte autant de neurones qu'il y'a de sous ensembles flous dans le système d'inférence représenté. Chaque neurone calcule le degré de vérité d'un sous ensemble flou particulier par sa fonction de transfert. La seule

restriction sur le choix de cette fonction concerne sa dérivabilité. En retrouve dans la littérature, l'utilisation, de fonctions gaussiennes et les paramètres modifiables sont le centre et la pente de la gaussienne (variance).

La fonction d'activation des neurones  $i$  de la première couche :

$$f_i^1 = \mu_{A_i}(x) \quad (3.3)$$

Tel que  $x$  est l'entrée au neurone  $i$ , et  $A_i$  est un sous ensemble floue correspondant au variable  $x$ . En d'autres termes,  $f_i^1$  est la fonction d'appartenance du  $A_i$  et il indique le degré auquel donné  $x$  satisfait le quantifier  $A_i$ . Nous choisissons  $\mu_{A_i}(x)$  pour être en forme de (Gaussien, triangle, trapézoïdal) avec le maximum égal à 1 et le minimum égal à 0, tel que les fonctions généralisée de ces formes sont :

$$\text{Triangle :} \quad \mu(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right) \quad (3.4)$$

$$\text{Trapézoïdale :} \quad \mu(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-b}\right), 0\right) \quad (3.5)$$

$$\text{Gaussienne :} \quad \mu(x) = \exp\left[-\frac{(x-c)^2}{\sigma^2}\right] \quad (3.6)$$

Où  $\{a, b, c, d, \sigma\}$  est l'ensemble des paramètres. Pendant que les valeurs de ces paramètres changent, les fonctions en forme précédente changent en conséquence, de ce fait présenter de diverses formes de fonction d'appartenance sur la variable linguistique  $A_i$ . Les paramètres dans cette couche désigné sous le nom des paramètres de fonction d'appartenance [47-48].

**2. La deuxième couche cachée** sert à calculer le degré d'activation des prémisses. Les neurones de la cette couche représentent chacun la prémisse d'une règle. [48] Ils reçoivent en entrée le degré de vérité des différents sous-ensembles flous composant cette prémisse et ont en charge le calcul de son propre degré de vérité. Les fonctions d'activation utilisées pour ces neurones dépendant des opérateurs présents dans les règles (ET ou OU).

La fonction d'activation des neurones  $i$  de la deuxième couche :

$$W_k = \mu_{A_i}(x) \times \mu_{B_j}(y) \quad (3.7)$$

Où  $k$  : représente le nombre de règle,  $i$  : représente le nombre de partition de  $x$ , et  $j$  : le nombre de partition de  $y$ .

**3. La troisième couche cachée** normalise de degré d'activation des règles.

Chaque neurone dans cette couche est un neurone de cercle noté  $N$ . le  $i^{\text{ème}}$  neurone calcule le rapport entre  $i^{\text{ème}}$  poids de règles et la somme de toutes les poids des règles. Cette opération est appelée *la normalisation des poids*.

$$\overline{W}_k = \frac{W_k}{\sum W_i} \quad (3.8)$$

L'ensemble des sorties de cette couche seront appelées les poids normalisé.

**4. La quatrième couche cachée** sert à déterminer les paramètres la partie conséquence des règles ( $p$ ,  $q$ ,  $r$ ). La fonction de chaque neurone dans cette couche est la suivante

$$f_k^4 = \overline{W}_k \times f_k = \overline{W}_k \times (p_k x + q_k y + r_k) \quad (3.9)$$

Où  $\overline{W}_k$  est la sortie de la troisième couche, et  $\{p_i, q_i, r_i\}$  est l'ensemble des paramètres. Ces paramètres désigné sous le nom les paramètres conséquents [48].

**5. La couche de sortie** contient un seul neurone dans cette couche, est un neurone de cercle noté  $S$  qui calcule la sortie globale comme addition de tous les signaux entrants, c'est-à-dire :

$$f^5 = \sum_k \overline{W}_k \times f_k^4 \quad (3.10)$$

La figure (3.3) représente un système ANFIS, à 2 entrées chaque entrée repartie en trois sous ensemble floue et 9 règles.

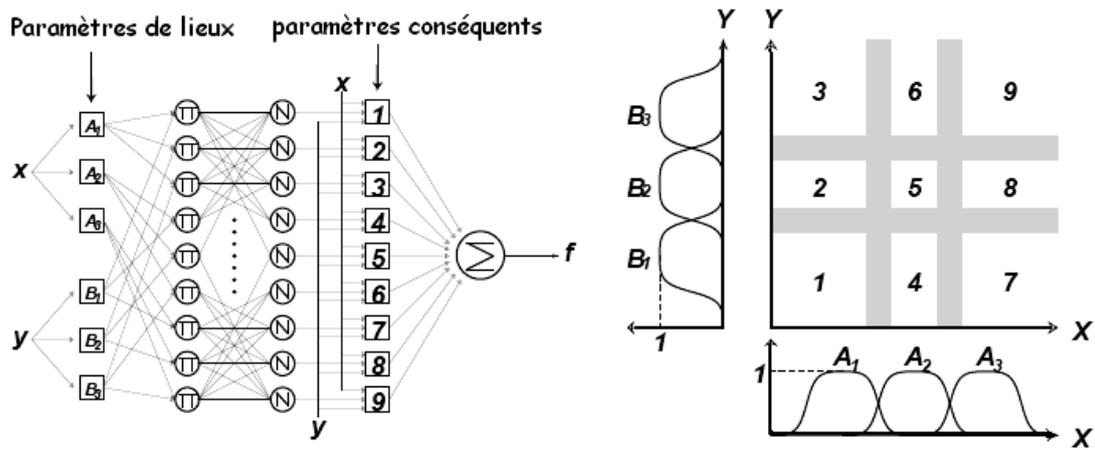


Figure 3.3 : Exemple ANFIS à 2 entrées avec 9 règles.

Tableau 3.1 : les différentes couches d'un système ANFIS.

Les différentes couches	Type des couches	Le nombre de neurone dans la couche
Couche 0	Les entrées	n
Couche 1	Les valeurs	(p.n)
Couche 2	Les règles	$p^n$
Couche 3	La normalisation	$p^n$
Couche 4	Linéarisation des fonctions	$p^n$
Couche 5	Somme (sortie)	1

Tel que :

n : le nombre des entrées.

p : le nombre des sous ensembles flous d'entrée (partition flou).

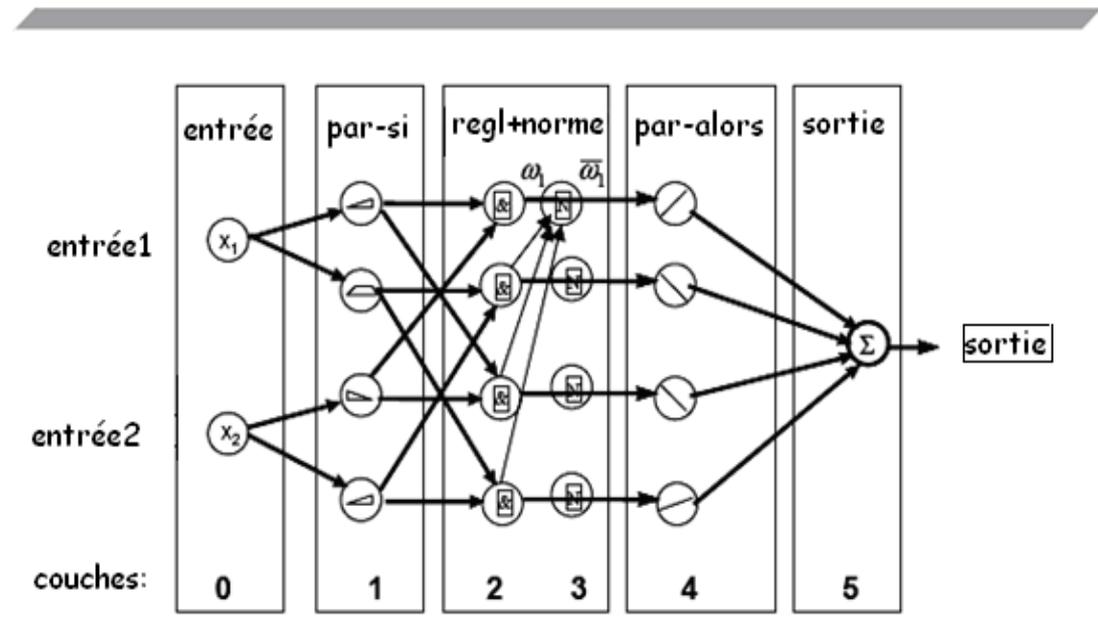


Figure 3.4 : Réseau d'ANFIS.

Noter que les neurones dans ANFIS ont différentes structures:

- Valeurs [fonction d'appartenance définie par différentes formes].
- Règles [habituellement produit].
- Normalisation [division de somme et d'arithmétique].
- Fonctions [régressions linéaires et multiplication avec  $\bar{w}$ , tel que  $\bar{w}$  est la normalisation du poids  $w$ ].
- la sortie [Somme Algébrique].

### 3.5. Algorithme d'apprentissage de l'ANFIS

Le système ANFIS exploite le mécanisme d'apprentissage des réseaux de neurone sur des techniques d'inférence floues. D'une autre façon, L'ANFIS est un système d'inférence floue (SIF), dont l'ajustement des paramètres des fonctions d'appartenances est confié au algorithme d'apprentissage proprement dite " retro propagation ", ou en combinaison avec d'autre type d'algorithmes tel que le moindre carré.

Dans l'architecture ANFIS proposée sur la figure 3.3, la sortie globale peut être exprimée en tant que des combinaisons linéaires des paramètres conséquents. Avec plus de précision, la conclusion

(la sortie) sur la figure 3.3 peut être réécrite comme :

$$f = \frac{W_1}{W_1+W_2} f_1 + \frac{W_2}{W_1+W_2} f_2$$

$$= (\overline{W_1 X})p_1 + (\overline{W_1 Y})q_1 + (\overline{W_1})r_1 + (\overline{W_2 X})p_2 + (\overline{W_2 Y})q_2 + (\overline{W_2})r_2$$
(3.11)

La sortie est une fonction linéaire des paramètres conséquents (p, q, r). ANFIS est une représentation paramétrique de deux ensembles de paramètres : S1 et S2 tel que :

- **S1** représente les paramètres des ensembles flous utilisés pour la fuzzification dans la première couche de système ANFIS

$$S1 = \{ \{a_{11}, b_{11}, c_{11}\}, \{a_{12}, b_{12}, c_{12}\}, \dots, \{a_{1p}, b_{1p}, c_{1p}\}, \dots, \{a_{np}, b_{np}, c_{np}\} \}$$

Où **p** est le nombre de partitions floues de chacune des variables d'entrées et **n** est le nombre de variables d'entrées.

- **S2** représente les coefficients des fonctions linéaires (les paramètres conséquents)

$$S2 = \{p_1, p_2, p_3, \dots, q_1, q_2, q_3, \dots, r_1, r_2, r_3\}$$

**Tableau 3.2 :** l'une des techniques d'ajustement des paramètres de l'ANFIS

Type de passage \ Paramètres affectés	Passage Vers l'avant	Passage En arrière
Paramètre de fonction d'appartenance (non linéaire $a_i, b_i, c_i$ )	Fixe	Retro propagation
Paramètre de coefficient (linéaire $p, q, r$ )	Moindres carrés	Fixe

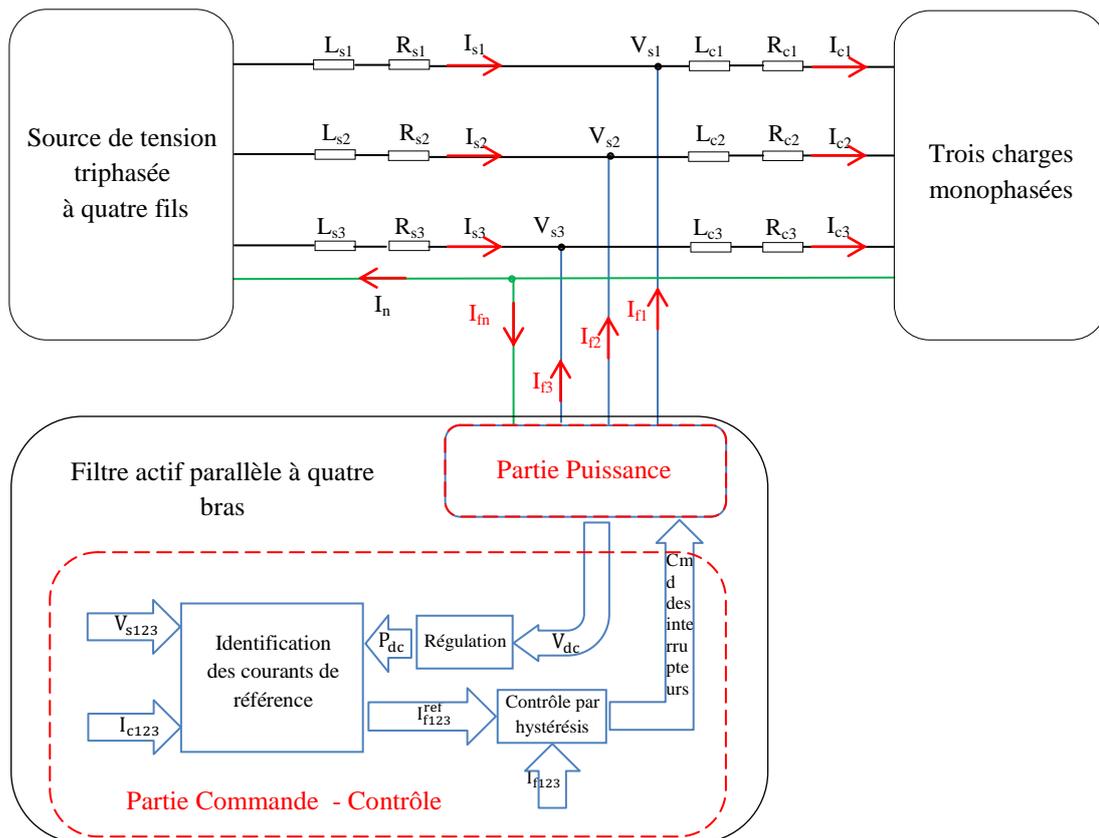
- Le passage en avant : **S1** est fixe et **S2** est calculé en utilisant l'algorithme de **moindre carré**

Sur l'erreur (LES). (le LES est appliqué seulement une fois lorsque commencer à obtenir les valeurs initiales des paramètres conséquents).

- Le passage en arrière : **S2** est fixe et **S1** est calculé en utilisant l'algorithme de **Retro-Propagation** qui est basé sur l'algorithme de gradient.

### 3.6. Application de contrôleur ANFIS à la commande d'un filtre actif parallèle à quatre Bras.

Dans cette section nous intéresserons à l'application de la commande par l'ANFIS (régulation de la tension du bus continue) dans le filtre actif parallèle à 4 bras, on utilise la méthode de puissance instantanée avec FMVs.



**Figure.3.5** : Commande par contrôleur ANFIS avec identification par la méthode des puissances instantanées utilisant FMVs

### 3.7. Synthèse d'un contrôleur ANFIS pour la régulation de la tension du bus continue

#### 3.7.1. Description et structure du contrôleur ANFIS proposé

Le contrôleur ANFIS développé dans cette partie comprend deux entrées 'E' et 'dE' et une seule sortie 'U' qui représentent :

- En entrée : l'erreur normalisée de la tension carré aux borne du condensateur  $E(k) = V_{dc\ ref}^2 - V_{dc}^2$   
Et sa variation  $dE(k) = E(k+1) - E(k)$ .
- En sortie : la sortie c'est la puissance absorbée par le condensateur  $U(k) = P_{dc}$ .

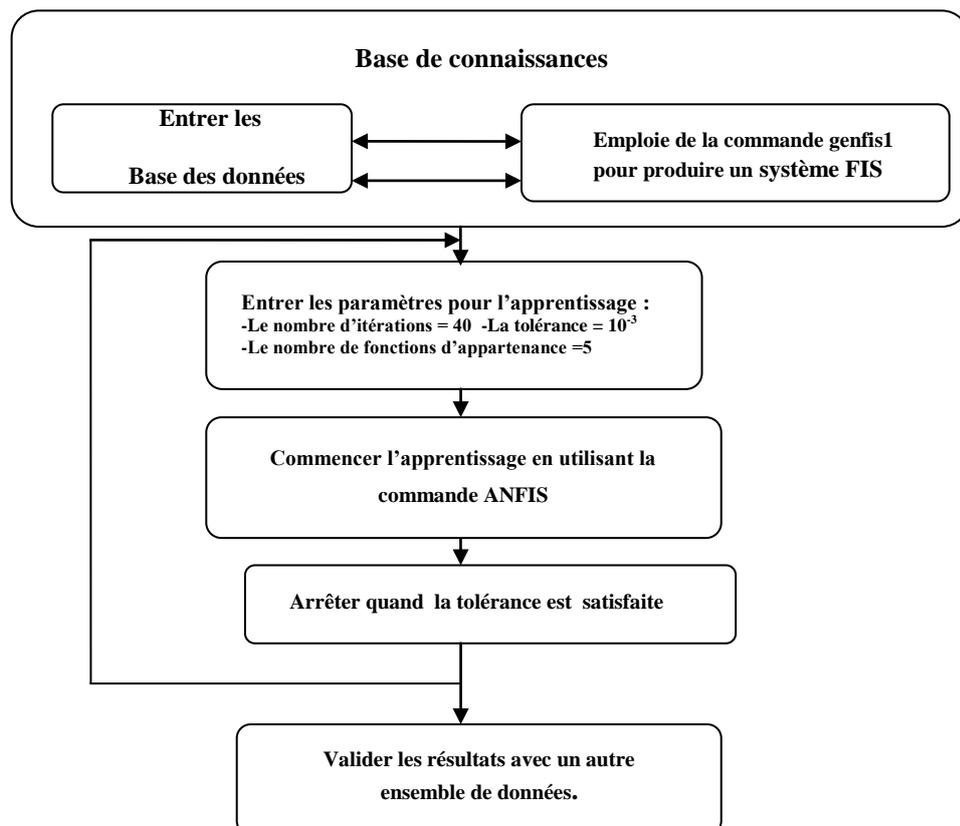
Nous avons utilisé un contrôleur ANFIS pour que la tension moyenne aux bornes du condensateur soit maintenue à une valeur quasi constante, ce contrôleur permet une génération automatique de règles floues à cinq ensembles basées sur le modèle d'inférence de sugeno.

### 3.7.2. Apprentissage du contrôleur "Entraînement d'un réseau ANFIS "

L'apprentissage du notre contrôleur est effectué par le biais de l'algorithme de rétro - propagation, afin de déterminer les paramètres des prémisses (ajustement des paramètres liés aux fonctions d'appartenance) et l'estimation des paramètres conséquents par la méthode des moindres carrés. Ce qui a pour appellation "apprentissage hybride"[49-50] .

Le réseau ANFIS utilisé dans ce travail (Annexe B) a été programmé par la boite à outil de la logique floue Toolbox dans le logiciel Matlab (version 7), avec lequel on a construit les règles floues (Si-Alors) avec leurs fonctions d'appartenances appropriées à cinq ensembles, tout en respectant les étapes suivantes :

**Figure.3.6 : Organigramme d'un système ANFIS**



La structure neuronale équivalente proposée sous Matlab est représentée à la figure 3.7

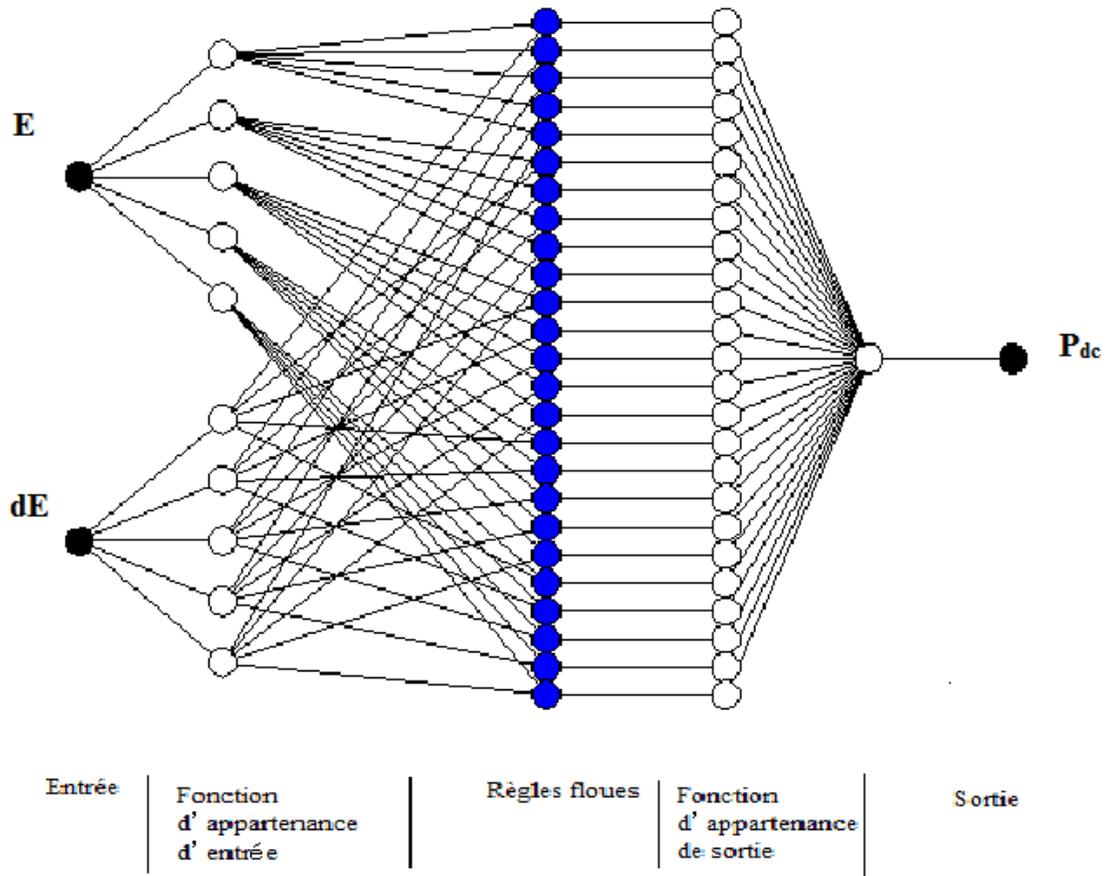
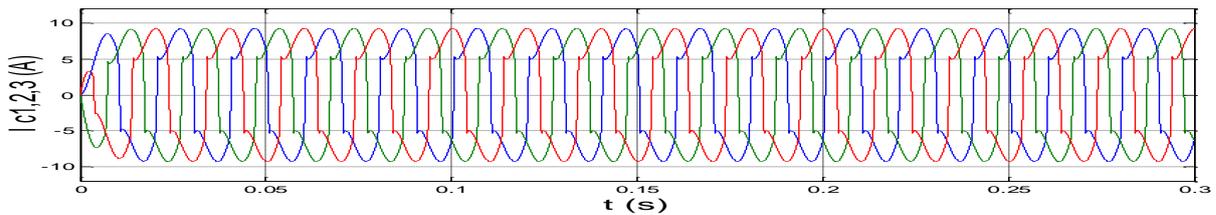


Figure 3.7 : Structure neuronale du modèle proposé sous Matlab

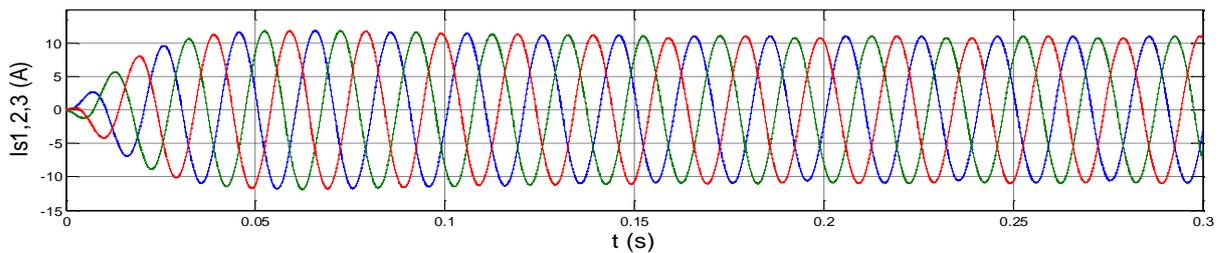
### 3.8. Résultats de simulation

#### 3.8.1- cas des charges identiques

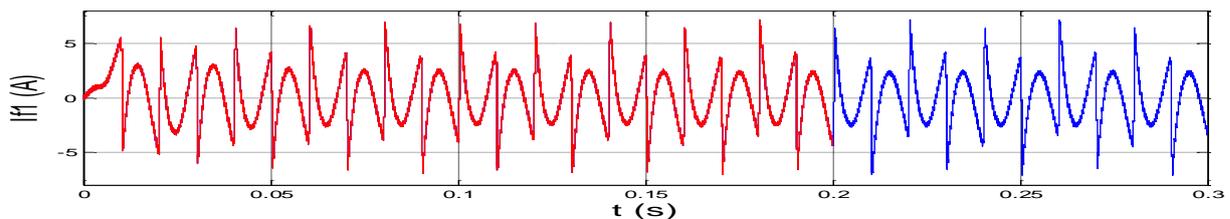
La simulation de la commande par contrôleur ANFIS a été réalisée sous les conditions suivantes, La référence de la tension continue est fixée à 700V , bande d'hystérésis  $\Delta i=0.02$  A, On considère que l'angle d'amorçage  $\alpha$  est le même pour tous les thyristors, on prend  $\alpha = 0$  et un système de charges équilibré pour  $R_{d1,2,3} = 26 \Omega, L_{d1,2,3} = 90$  mH. Pour étudier les performances du FAP à 4 bras commandé par ANFIS, il est inséré au démarrage.



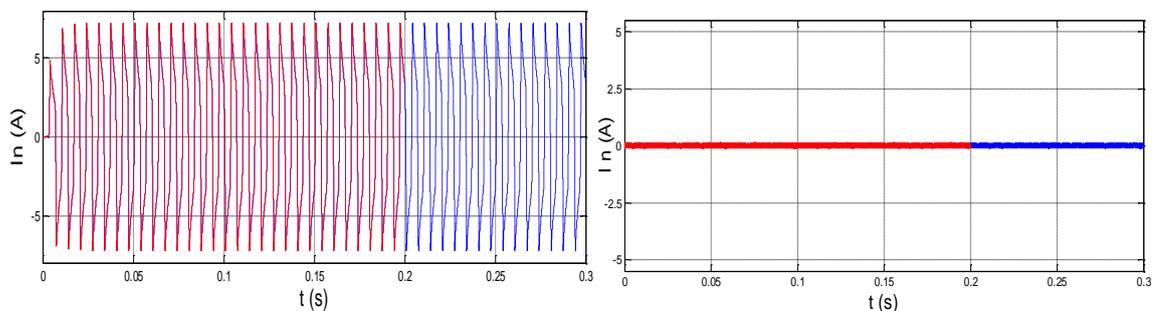
-a- Courants du coté charge ( $I_{c1,2,3}$ )



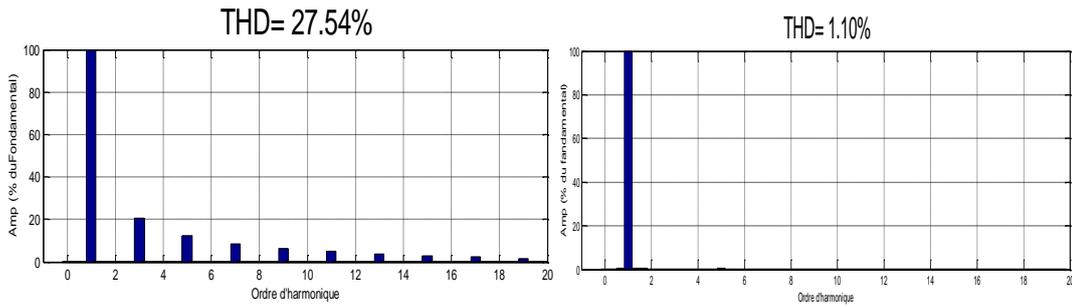
-b- Courants de la source ( $I_{s1,2,3}$ )



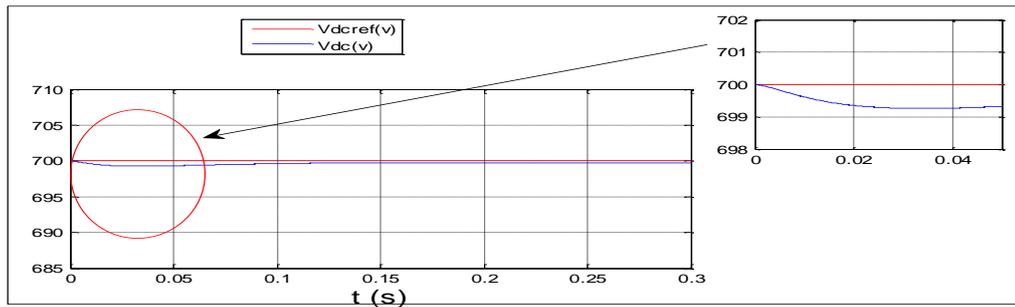
-c- Courant injecté par le filtre (phase1).



-d- Courant du neutre avant et après le filtrage



e- Spectre d'harmonique (avant et après le filtrage)



- f- Tension aux bornes du condensateur

Figure.3.8 Simulation du FAP à 4 bras dans le cas où  $\alpha = 0$ .

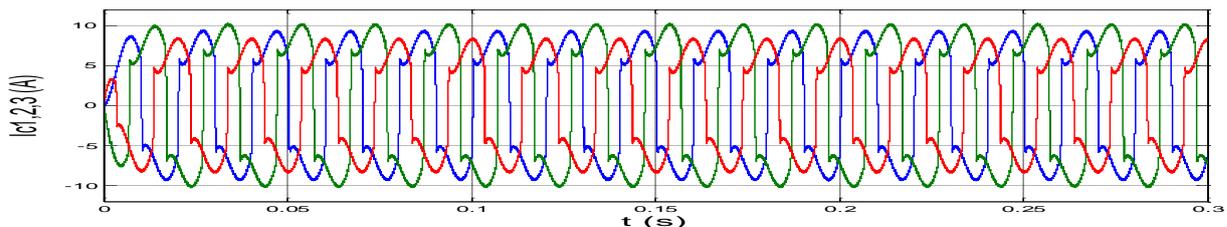
\* Le taux de distorsion d'harmonique a été mesuré sur 10 périodes (colorés en rouge) entre l'instant 0 et 0.2 s.

### 3.8.2- cas de charges non- identiques

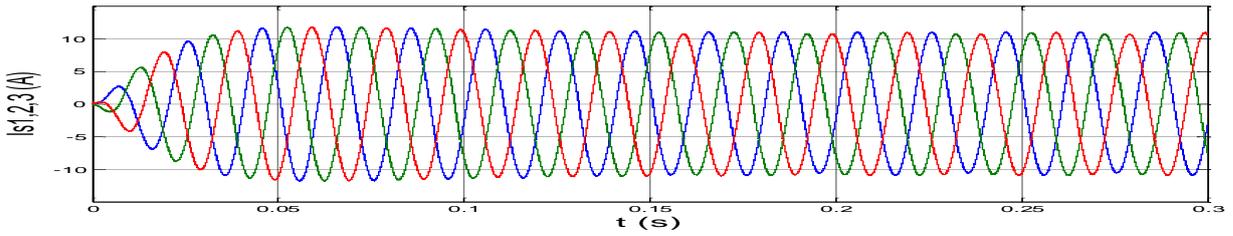
#### a- Trois charges différentes alimentées par trois ponts redresseurs commandés

On considère que l'angle d'amorçage  $\alpha$  est identique pour tous les thyristors, on prend  $\alpha = 0$ ,  $R_{d1} = 26 \Omega$ ,  $R_{d2} = 23 \Omega$ ,  $R_{d3} = 30 \Omega$  et,  $L_{d1} = 90 \text{ mH}$ ,  $L_{d2} = 100 \text{ mH}$ ,  $L_{d3} = 85 \text{ mH}$ .

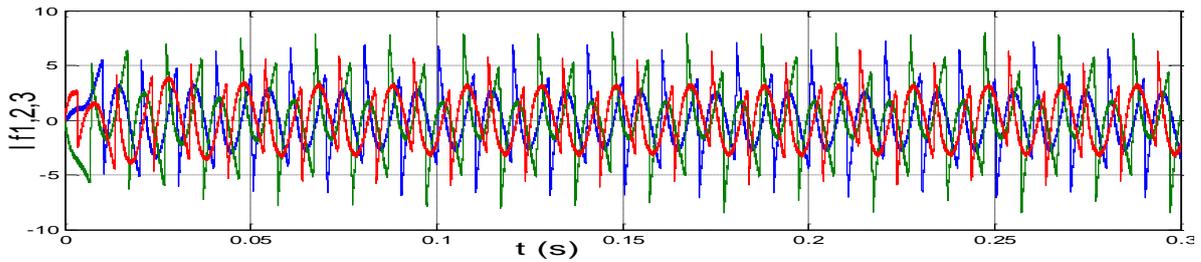
Dans ce cas les charges sont différentes. Les résultats de simulation du système étudié sont présentés sur les figures suivantes.



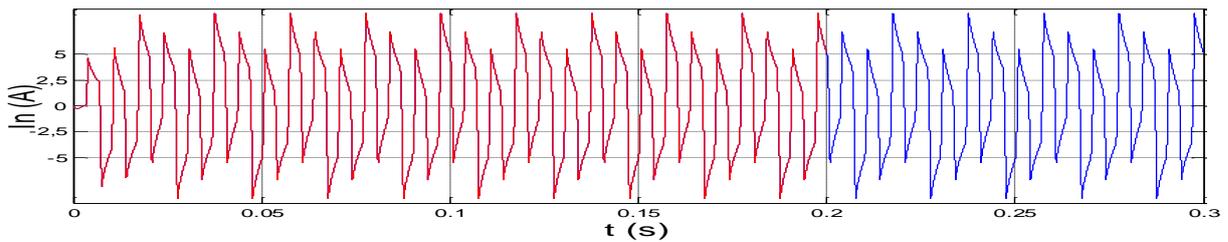
-a- Courants coté charge ( $I_{c1,2,3}$ )



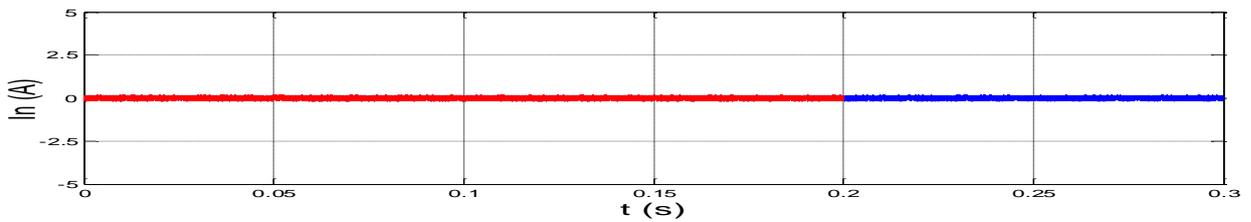
-b- Courant de la source (phase 1,2,3)



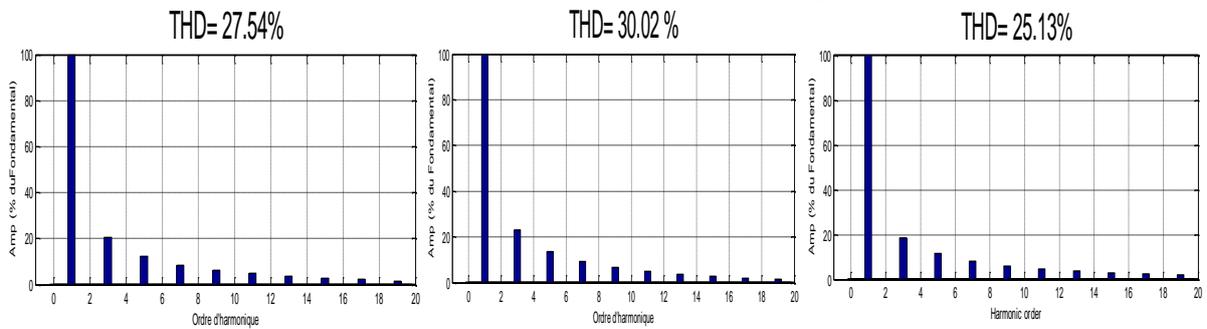
-c- Courants injecté par le filtre (3 phases)



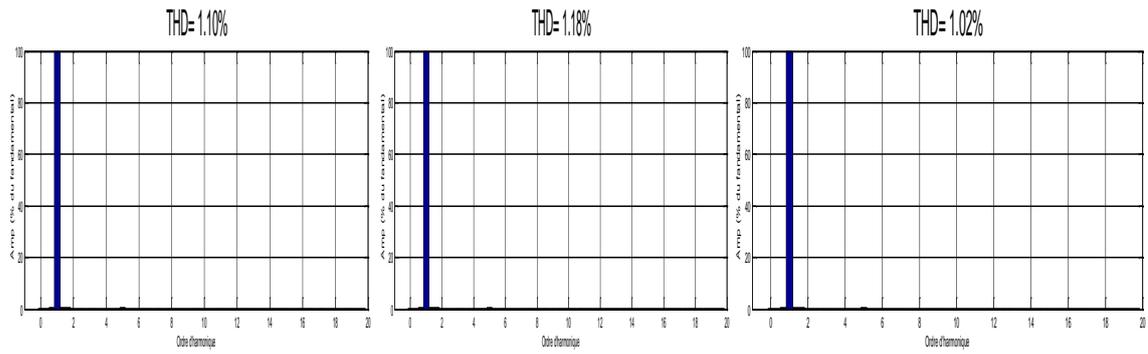
-d- Courant du neutre avant le filtrage



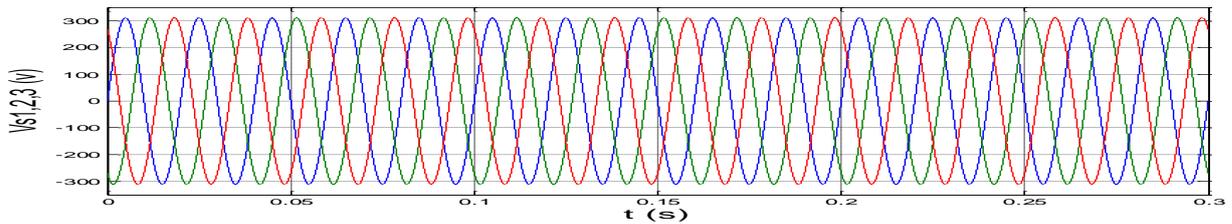
-e- Courant du neutre après le filtrage



-f- Spectres d'harmonique avant le filtrage (3 phases respectivement).



g- Courant injecté par le filtre (3 phases respectivement).

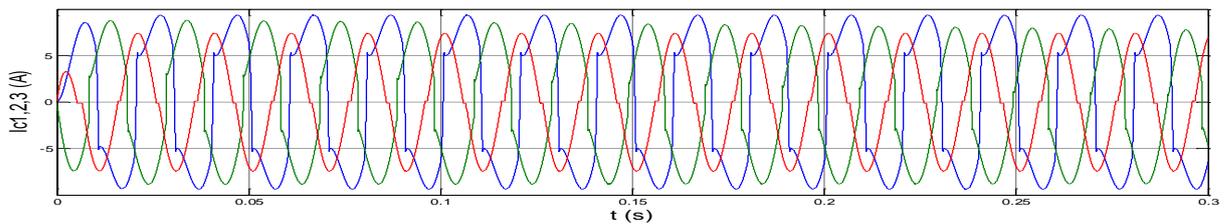


h- la tension de la source

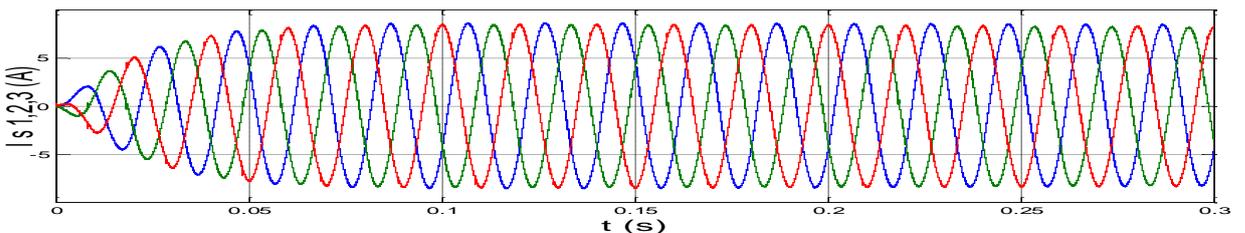
Figure.3.9 : Simulation du FAP à 4 bras dans le cas les charges sont déférentes.

**b- les angles d'amorçages déférents de thyristors pour les trois redresseurs alimentant trois charges identiques,**

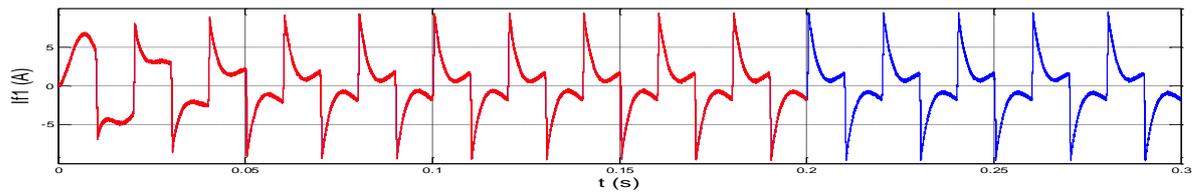
Nous considérons maintenant que l'angle d'amorçage  $\alpha$  défère pour chaque redresseur. Nous prenons :  $\alpha_1 = 0$ ,  $\alpha_2 = \pi/6$ ,  $\alpha_3 = \pi/3$ ,  $R_{d1,2,3} = 26 \Omega$ ,  $L_{d1,2,3} = 90 \text{ mH}$ . Les résultats de simulation du nouveau système sont présentés sur les figures suivant.



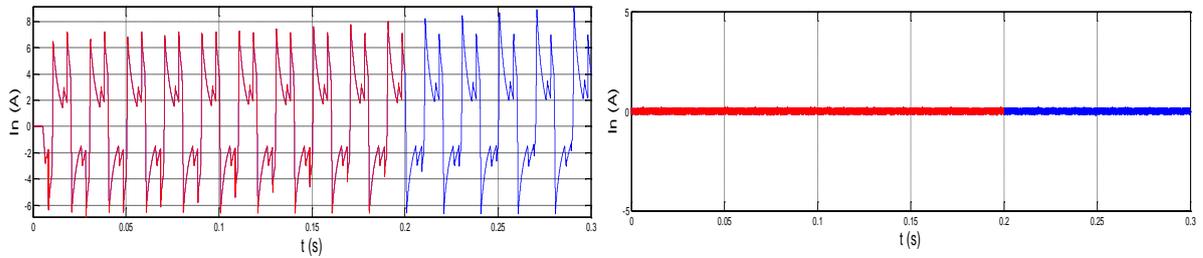
-a- Courants coté charge ( $I_{c1,2,3}$ )



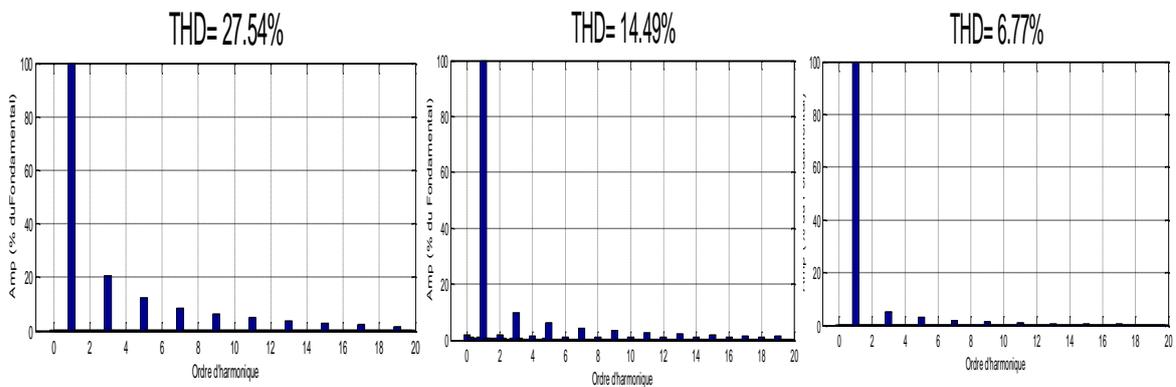
-b- Courants coté source (phase 1,2,3)



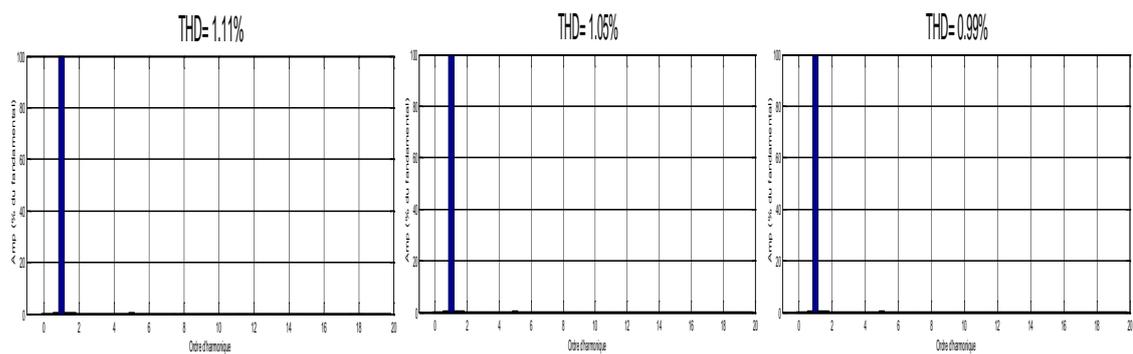
c- Courant injecté par le filtre(phase 1)



-d- Courant du neutre avant et après le filtrage



-e- Spectres d'harmonique avant le filtrage (3 phases respectivement)



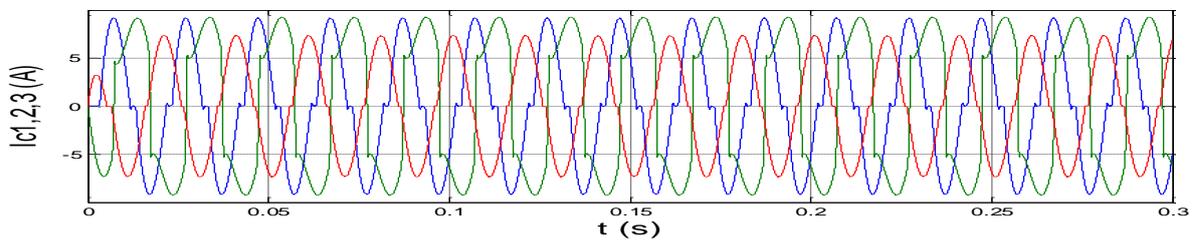
-f- Spectres d'harmonique après le filtrage (3 phases respectivement)

Figure.3.10 Simulation du FAP à 4 bras dans le cas les charges sont déférentes

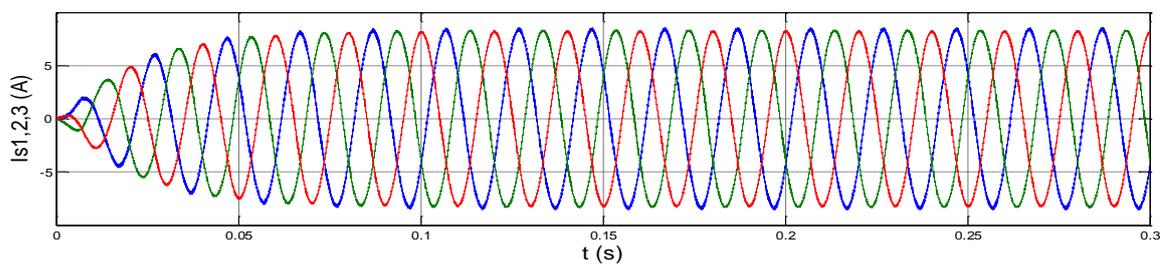
### c - un gradateur et deux redresseurs alimentant trois charges déférentes.

Les charges pour ce système sont les suivantes :

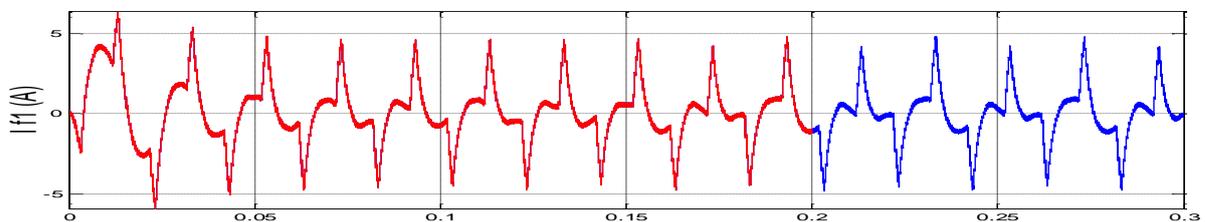
- Une charge inductive ( $R_{d1} = 26 \Omega$  et  $L_{d1} = 50 \text{ mH}$ ) alimentée par un gradateur monophasé, connectée entre la phase une et le neutre. L'angle d'amorçage est  $\alpha = \pi/3$ ,
- Une charge inductive ( $R_{d2} = 26 \Omega$  et  $L_{d2} = 90 \text{ mH}$ ) alimentée par un pont redresseur à diode, connectée entre la phase deux et le neutre,
- Une charge inductive ( $R_{d2} = 26 \Omega$  et  $L_{d2} = 90 \text{ mH}$ ) alimentée par un pont redresseur connectée entre la phase trois et le neutre,  $\alpha_3 = \pi/3$ .



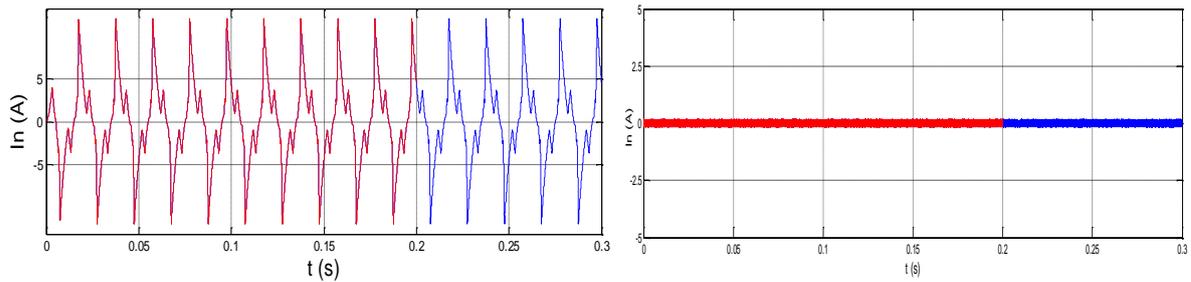
-a- Courants coté charge ( $I_{c1,2,3}$ )



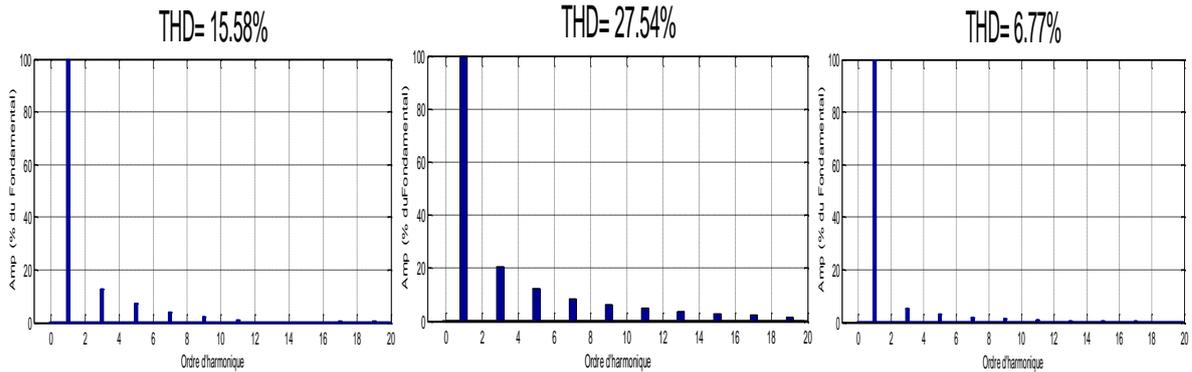
-b- Courant coté source (phase 1,2,3).



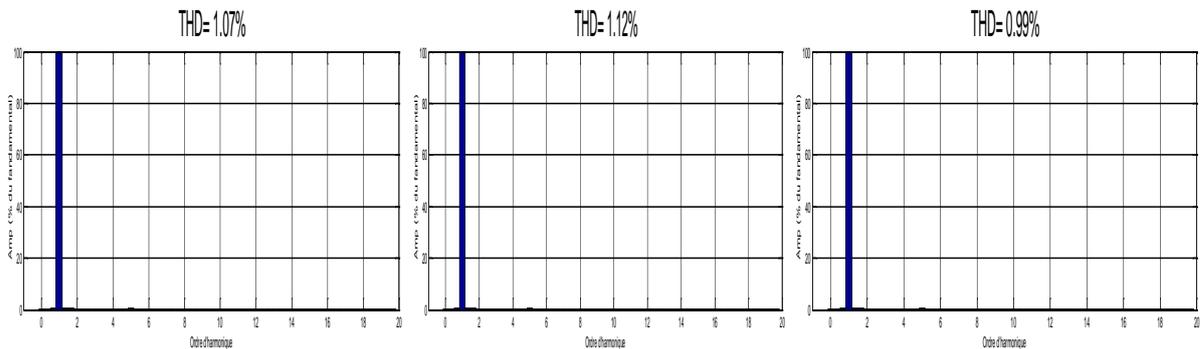
-c- Courant injecté par le filtre (phase 1)



-d- Courant du neutre avant et après le filtrage



-e- Spectres d'harmonique avant le filtrage (3 phases respectivement).

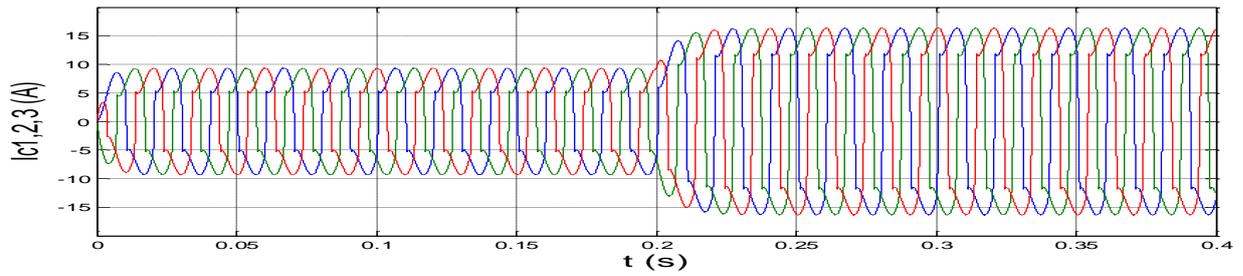


-f- Spectres d'harmonique après le filtrage (3 phases respectivement).

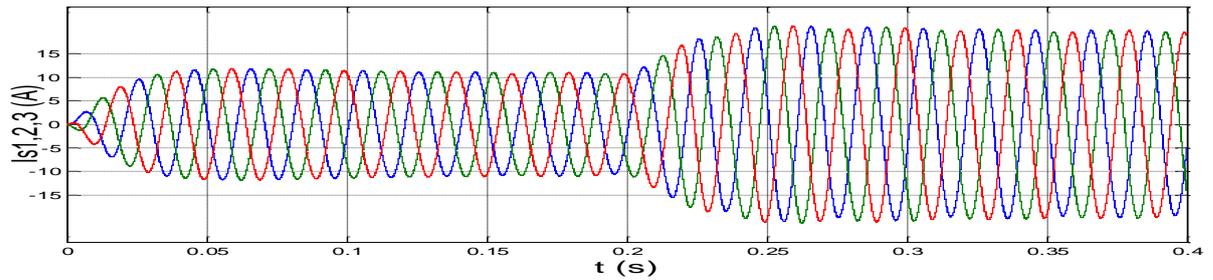
Figure.3.11 Simulation du FAP à 4 bras dans le cas les charges sont déférentes

### 3.8.3- variation brusque des charges non linéaire

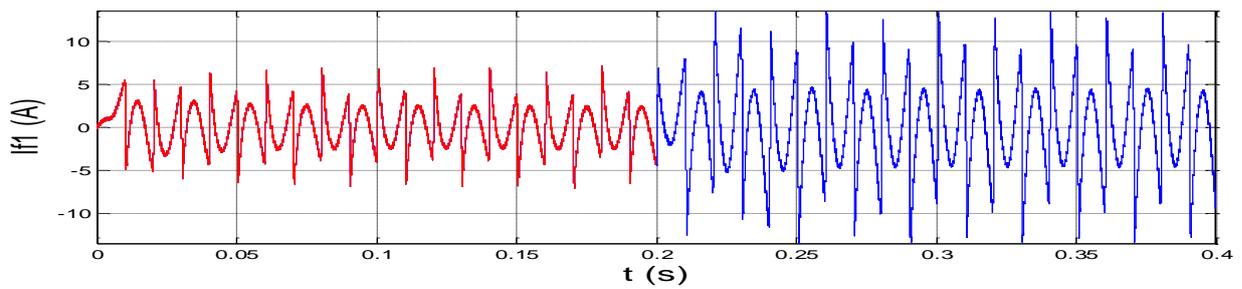
On considère que l'angle d'amorçage  $\alpha$  est le même pour tous les thyristors, on prend  $\alpha = 0$  et un système de charges équilibré pour  $R_{d1,2,3} = 26 \Omega$ ,  $L_{d1,2,3} = 90 \text{ mH}$ , pour étudier le comportement au démarrage aussi bien que lors de variation de la charge à l'instant 0.2s on a varier les résistance des charges polluante à la moitié, la méthode des puissances instantanées avec FMV est utilisée.



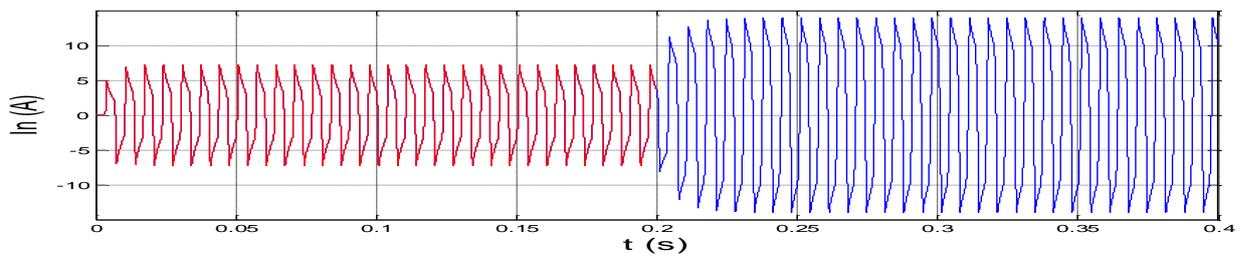
-a- Courants du coté charge ( $I_{c1,2,3}$ )



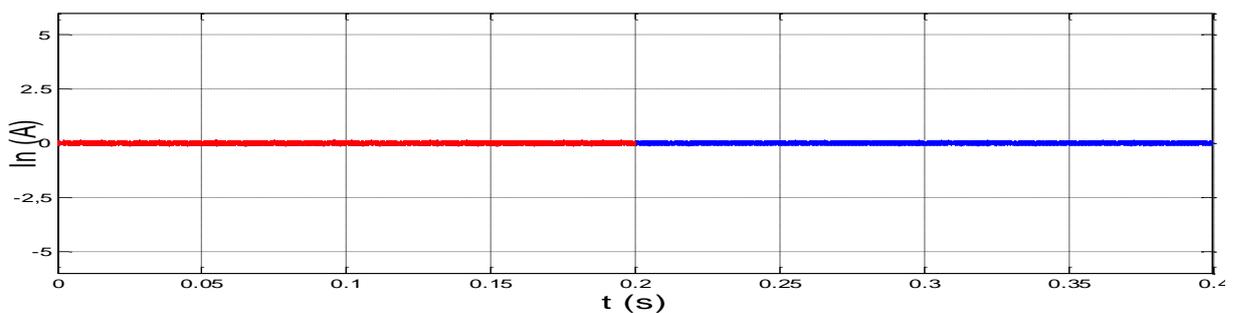
-b- Courant de la source (phase 1,2,3).



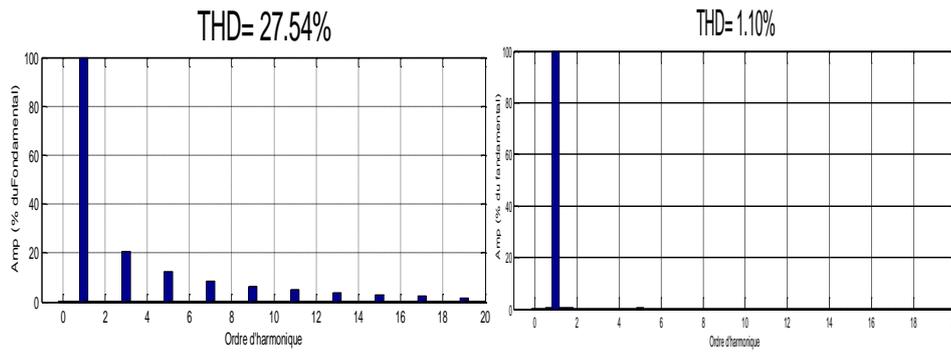
-c- Courant injecté par le filtre (phase 1)



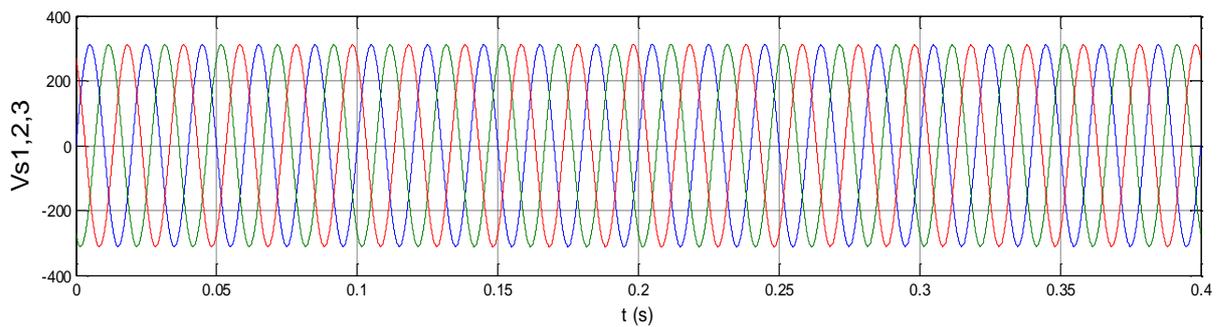
-d- Courant du neutre avant le filtrage



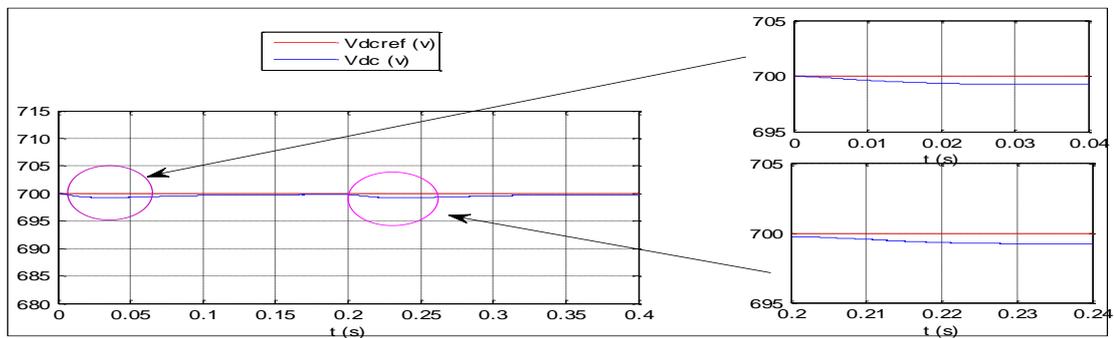
-e- Courant du neutre après le filtrage



-f- Spectres d'harmonique avants et après le filtrage



g-Tensions du réseau



h- Tension aux bornes du condensateur

Figure.3.12 : Simulation du FAP à 4 bras dans le cas de variation brusque des charges non linéaire.

### 3.9. Interprétations des résultats

Les figures (3.8), (3.9), (3.10), (3.11), (3.12) présente les résultats obtenus en utilisant l'extraction des courants harmoniques basée sur la méthode de puissance instantanée avec FMV, et en utilisant le régulateur de bus continue ANFIS, nous avons pris un système des charges identiques et non identiques.

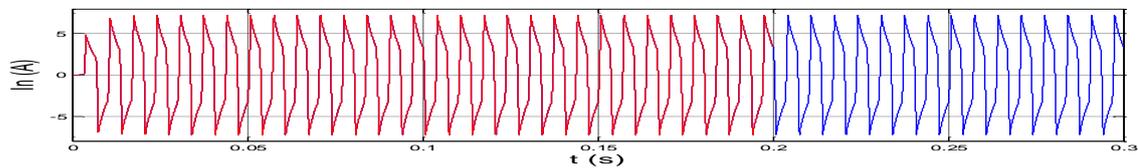
- Les figures (3.8) dans le cas des charges équilibrés montrent la forme des courants de côté charge sont pollués et déformés, la forme des courants de côté source devient sinusoidales et équilibré, et la figure (3.8.c) montre le courant injecté par le filtre, la figure (3.8.d) représente le courant du neutre avant le filtrage est pleine d'harmonique, il devient nul après le filtrage, et les figures (3.8.e) montre l'analyse spectrale qui présente un THD de 27.54% avant filtrage et un THD de 1.10% après filtrage à cause de l'amélioration de réponse de tension aux bornes du condensateurs qui suit parfaitement sa référence figure avec une chute de tension de 0.9 V (3.8.f).

- Les figures (3.9), (3.10), (3.11), dans le cas des charges non identiques (différente charge) montre que les formes des courants du côté charge sont pollués et déséquilibrés et les formes générales des courants de source après le filtrage est sinusoidales et équilibrés et le THD est bien inférieur à 5 % pour les 3 cas des charges et pour toutes les phases (ceci indique que l'implantation de la commande de contrôleur ANFIS offre une amélioration remarquable en termes de THD), et le courant du neutre nul après le filtrage pour assurer la protection du conducteur du neutre, et les tensions de réseau sont équilibrées.

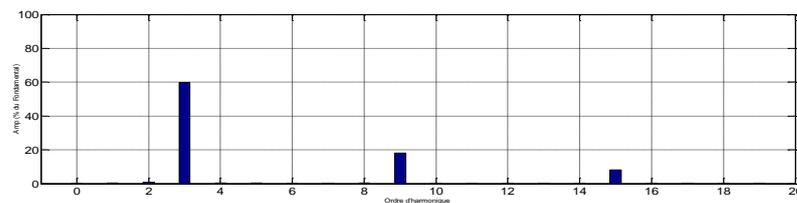
Afin de vérifier le comportement dynamique du régulateur ANFIS des charges supplémentaire a été connectée en parallèle avec les ponts redresseurs du système à l'instant 0.2 secondes, La figure (3.12.b) montre que les formes des courants sont sinusoidales après le filtrage et sont équilibrés, avec des spectres d'harmonique d'un THD inférieur à 5 %, Lors de la variation de charge, ce courant passe par un transitoire de 0.04 s avant qu'il reprenne sa forme en régime permanent, la figure (3.12.e) montre que le courant du neutre nul après le filtrage et pendant la variation brusque des charges non linéaires, et les tensions de réseau sont équilibrées avant et après la variation de charge comme montre par la figure (3.12.g). La tension aux bornes du condensateur suit parfaitement sa référence avec un régime transitoire lors du changement de résistance est inférieur 0.03 s comme illustrée dans la figure (3.12.h) qui explique l'intérêt de régulateur l'ANFIS au niveau de la régulation de tension.

### 3.10. Etude de courant du neutre

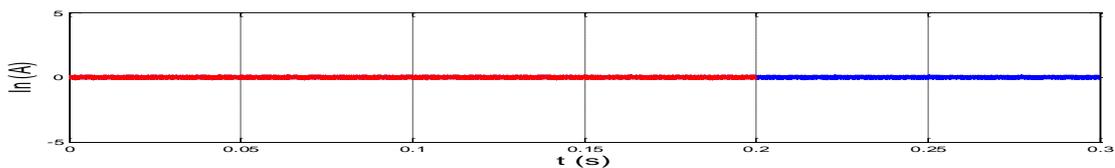
La figure ci-dessous présente le courant du neutre et son spectre d'harmoniques avant et après filtrage. On considère que l'angle d'amorçage  $\alpha$  est le même pour tous les thyristors, on prend  $\alpha = 0$  et un système de charges équilibré pour  $R_{d1,2,3} = 26 \Omega, L_{d1,2,3} = 90 \text{ mH}$ .



-a- Courant du neutre avant le filtrage



-b- Spectres d'harmonique avant le filtrage



-c- Courant du neutre après le filtrage

Fig.3.13 : Courants et spectres d'harmoniques du neutre.

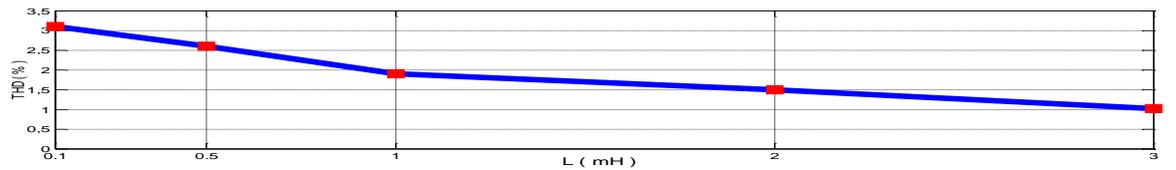
De la figure 3.13 -a-b- nous remarquons avant filtrage que :

- le courant du neutre avant le filtrage est plein de courant d'harmonique excessif.
- Le spectre d'harmoniques du neutre contient les harmoniques 3, 9, et 15. Le courant harmonique d'ordre 3 est dominant, il est de 60 % du fondamental de la source, le courant harmonique d'ordre 9 est moins dominant, il est de 19 % du fondamental de la source, et le courant harmonique d'ordre 15 est le plus faible, il présente 10 % du courant fondamental de la source. Donc ces résultats correspondent aux informations qui dit « le courant dans le neutre étant égal à la somme des courants des phases, la composante de rang 3 du courant neutre est égal à la somme des composantes de rang 3. D'une manière générale, pour des charge équilibrées, les courants harmoniques de rang multiple de 3 sont en phase et s'additionnent arithmétiquement dans le conducteur de neutre, alors que les composantes fondamentales et les harmoniques de rang non multiple de 3 s'annulent [12]».

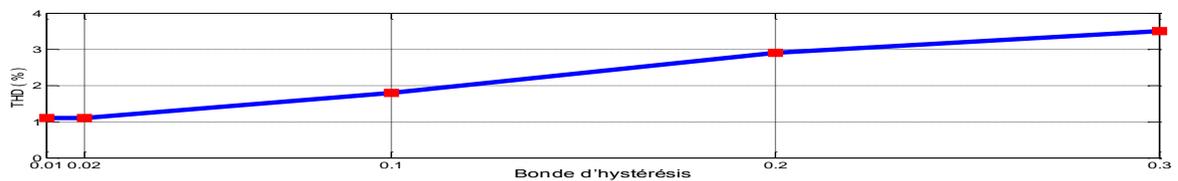
De la figure 3.12 -c- nous remarquons après filtrage que :- Le courant total du neutre est pratiquement nul, et les courants harmoniques sont nuls aussi.

### 3.11. Influence des paramètres du FAP à 4 bras sur le THD

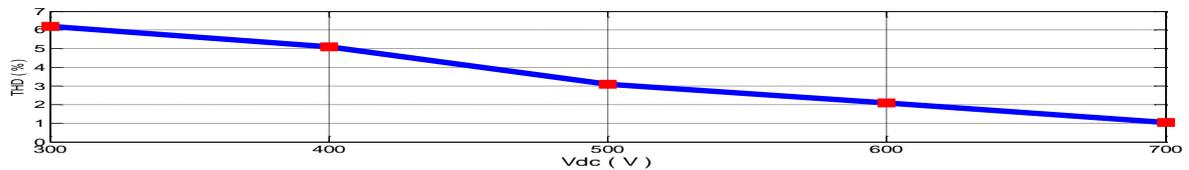
Les performances du filtre actif dépendent du type de commande mis en oeuvre ainsi que des paramètres du système. Dans cette partie, nous allons étudier l'influence sur le THD des paramètres suivants : inductance de découplage  $L_f$ , bande d'hystérésis et la tension aux bornes du condensateur  $V_{dc}$  et Ces influences sont décrites respectivement sur les figures (3.14.a.b.c) pour le filtre actif parallèle à 4 bras avec régulateurs ANFIS .



-a- THD en fonction de l'inductance de couplage



-b- THD en fonction de  $\Delta H$ .



-c- THD en fonction de la tension continue.

Figure.3. 14 : Influence des différents paramètres sur le THD.

La figure (3.14.a) illustre l'influence de l'inductance de découplage sur le THD du courant de source. Pour cela, nous fixons la tension de référence  $V_{dc}$  (700V), il montre qu'une augmentation de cette inductance engendre une diminution du THD.

La figure (3.14.b) montrent qu'une diminution de largeur de la Bande d'hystérésis, engendre une amélioration du THD des courants dans la source après filtrage.

La figure (3.14-c) montre que l'augmentation de la tension aux bornes de la capacité engendre une amélioration du THD des courants dans la source après filtrage.

### **3.11. Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté un outil intelligent pour le réglage de la tension du bus continu de la filtre actif Parallèle à quatre bras, on a vu que le contrôleur ANFIS présente une poursuite très satisfaisante de la référence et une très bonne maîtrise du régime dynamique grâce aux avantages des outils neuronaux et de la logique floue qui ont été mis à l'œuvre conjointement dans le cadre du système neuro-flou.

Les résultats de simulation avec différentes charges ont montrés que l'exploitation de la technique ANFIS dans la commande du filtre actif parallèle à quatre bras améliore remarquablement ces performances, Il donne de bons résultats en termes de THD.

# **Conclusions Générales et Perspectives**

---

# Conclusions Générales et Perspectives

---

Ce travail a été consacré à l'application et l'amélioration des performances d'un filtre actif à quatre bras pour l'amélioration de la qualité d'énergie électrique dans un réseau électrique basse tension avec distribution du fil neutre. Le filtre actif parallèle avait pour objectif compenser les courants perturbateurs harmoniques, réactifs et déséquilibrés afin de maintenir un système de courants triphasé du côté de source sinusoïdal et équilibré ou en d'autres termes, découpler les perturbations causées par les charges non linéaire du réseau amont.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté les caractéristique des perturbations électrique des réseaux électriques connectés à des charges dites polluantes ,et présenté les origines des harmonique, et des normes internationales imposées aux utilisateurs, et enfin on présenté les solutions traditionnelles et modernes utilisées pour dépolluer les réseaux électriques.

Dans le deuxième chapitre nous avons étudié la structure générale du filtre actif parallèle à quatre bras composé en deux partie : la partie puissance et la partie contrôle-commande , la partie puissance constituer en trois blocks sont onduleur de tension à quatre bras , le circuit de stockage d'énergie et le filtre de couplage, et dans la partie contrôle-commande nous avons étudié trois algorithmes d'identification des grandeurs harmoniques de référence : Identification par la méthode des puissances instantanées classique avec FPB, Identification par la méthode des puissances instantanées avec FMVs et l'identification par la méthode Référentiel synchrone SRF, on peut dire que la qualité de la compensation des harmoniques de courant dépend des performances de la méthode d'identification choisie. En effet, un système de commande, même très efficace, ne pourra pas à lui seule effectuer un filtrage satisfaisant si les courants harmonique sont mal identifiés, donc est important de noter que l'Identification par la méthode des puissances instantanées avec FMVs et Référentiel synchrone SRF qui permettant d'améliorer les performances de compensation du filtre actif parallèle d'un réseau triphasé à quatre fils. La commande par hystérésis, utilisée

dans ce travail, est robuste et simple à mettre en œuvre, et pour avoir une tension constante du côté continue de l'onduleur et éviter sa diminution à cause des pertes dans le filtre actif (interrupteur et filtre de sortie) nous avons utilisé le régulateur traditionnel PI.

Le troisième chapitre a été consacré à l'étude d'une nouvelle technique d'intelligence appelée contrôleur ANFIS (Neuro flou), qui permet de combiner les avantages des techniques floues et neurones et qui génère des fonctions d'appartenance avec une haute précision pour les relations entrées sortie de contrôleur, pour améliorer la régulation de la tension continue, nous avons examiné le filtrage des harmoniques générées par différents types de charges non linéaires (équilibrées et déséquilibrées, variation brutale des charges), et utilisé la méthode des puissances instantanées avec FMVs qui a donné de très bonnes performances de compensation, et les résultats de simulation ont montré l'efficacité et la robustesse de ce contrôleur ANFIS appliqué dans le filtre actif à quatre bras et offrant de bons résultats du THD du courant côté source.

Nous comptons dans le futur faire des essais pratiques sur ce type de filtre, au Laboratoire de Génie Electrique de Biskra LGEB, ce qui va permettre de confirmer les résultats obtenus théoriquement. Enfin, comme perspectives associées à ce travail, plusieurs axes d'études et de recherche complémentaires peuvent être envisagés :

- ❖ utilisation d'un autre type de commande pour la régulation de courant injecté sur les réseaux tels que MLI sinusoïdale, et la MLI vectorielle.
- ❖ Utiliser la Stratégie neuromimétique pour l'identification des courants harmoniques dans le filtre actif parallèle à quatre bras.

# Annexes

## Annexe A – Filtre Multi-Variable (FMV)

L'utilisation d'un filtre passe-bas ou passe-haut pour l'extraction des composantes harmoniques, permet d'obtenir une élimination plus ou moins suffisante de la composante continue, car : Pour obtenir une extraction satisfaisante, le régime dynamique est lent. En général, la fréquence de coupure est choisie basse, entre 5 et 35 Hz, ce qui engendre une instabilité du filtre actif lors de variation rapide de la charge. Dans le cas contraire, si l'on choisit une fréquence de coupure plus élevée, la précision de détermination de la composante alternative est altérée et peut s'avère insuffisante. Pour ces raisons, un nouveau type de filtre nommé FMV (filtre multi-variable) est utilisé, son principe de base s'appuie sur les travaux de *Song Hong Scok*, il est basé sur l'extraction de la composante fondamentale des signaux, directement selon les axes  $\alpha$ - $\beta$ .

Le filtre multi-variable est très important pour construire une méthode d'extraction insensible dans le cas de déséquilibre de tension d'alimentation, soit pour le calcul des puissances instantanées, ou pour l'utilisation d'un circuit à PLL [03-11].

### Principe de fonctionnement :

Dans [51] l'auteur avait démontré comment obtenir la fonction de transfert d'une intégration dans un référentiel lié au synchronisme. Il obtient l'expression suivante :

$$H(s) = \frac{V_{xy}(s)}{U_{xy}(s)} = \frac{s+j\omega}{s^2+\omega^2} \quad (\text{A.1})$$

En fait, si nous traçons le diagramme de Bode de cette fonction de transfert nous remarquons que c'est un filtre passe bande (Voire figure A.2). Si maintenant, nous remplaçons  $V_{xy}(s)$  par  $X_{\alpha\beta}(s)$  et  $U_{xy}(s)$  par  $\hat{X}_{\alpha\beta}(s)$  et que nous introduisons une constante K. nous obtenons :

$$H(s) = \frac{\hat{X}_{\alpha\beta}(s)}{X_{\alpha\beta}(s)} = K \frac{(s+K)+j\omega}{(s+K)^2+\omega^2} \quad (\text{A.2})$$

Cette expression peut être réécrite de la manière suivante [11-51] :

$$H(s) = \frac{\hat{X}_\alpha(s) + j\hat{X}_\beta(s)}{X_\alpha(s) + jX_\beta(s)} = K \frac{(s+K) + j\omega_c}{(s+K)^2 + \omega_c^2} \quad (\text{A.3})$$

Dans le repère stationnaire, les expressions des composantes fondamentales sont données par :

$$\hat{x}_\alpha(s) = \left(\frac{K}{s}\right)[x_\alpha(s) - \hat{x}_\alpha(s)] - \frac{\omega_c}{s}\hat{x}_\beta(s) \quad (\text{A.4})$$

$$\hat{x}_\beta(s) = \left(\frac{K}{s}\right)[x_\beta(s) - \hat{x}_\beta(s)] + \frac{\omega_c}{s}\hat{x}_\alpha(s) \quad (\text{A.5})$$

Où :  $\omega_c$  est la pulsation du fondamental.

Le schéma de ce filtre est représenté par la figure A.1.

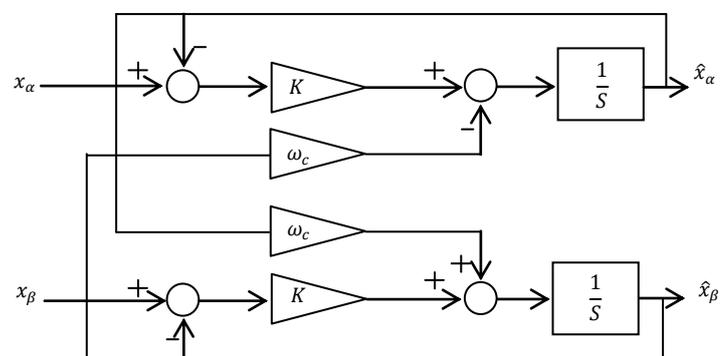


Figure :A.1 Principe du FMV.

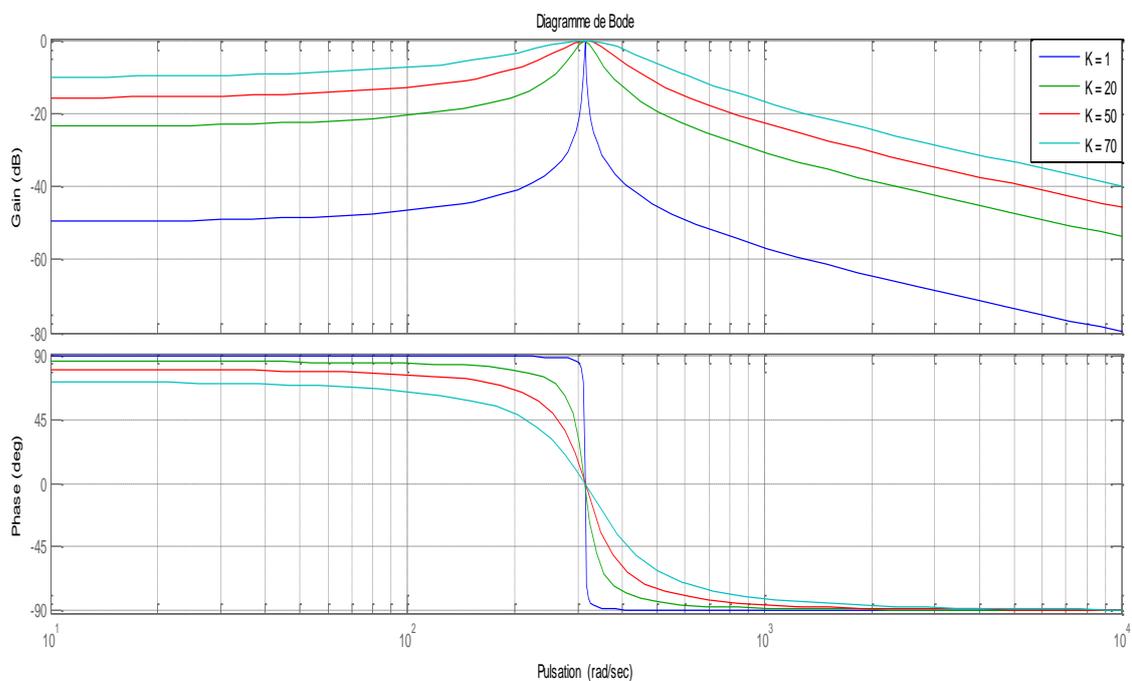


Figure :A.2 Diagramme de Bode d'un FMV.

Le tracé de la fonction de transfert du FMV (Equation A.3), pour différentes valeurs de  $K$ , a donné la figure A.2, cette figure illustre les performances du FMV accordé sur la fréquence fondamentale. Nous remarquons qu'il n'y a pas de déphasage à la pulsation fondamentale. Nous pouvons noter aussi que la sélectivité augmente lorsque  $K$  diminue.

---

## Annexe B – Les caractéristiques du modèle ANFIS

---

Les caractéristiques du modèle ANFIS utilisé pour la régulation de la Bus continu sont :

Tableau : B.1

Nombres de neurones	75
Nombres des paramètres linéaires	75
Nombres des paramètres non linéaires	20
Nombres total des paramètres	95
Nombres des paires de données d'apprentissages	4862
Nombres des paires de données de test	0
Nombres des règles floues	25

# **Références**

# **Bibliographiques**

# Références Bibliographiques

---

---

- [01] N. BRUYANT, « Etude et commande généralisées de filtres actifs parallèles, compensation global ou sélective des harmoniques, régime équilibré ou déséquilibré ». Thèse de doctorat de l'université de Nantes, France, (1999).
- [02] M. M. ABDUSALAM, « Structures et Stratégies de Commande des Filtres Actifs Parallèle et Hybride avec Validations Expérimentales », Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré-Nancy-I-France, 2008.
- [03] I. GHADBANE, « Commande d'un Filtre Actif Triphasé Parallèle Par Différents Régulateurs », Thèse de magistère, Université Mohamed Kheider-Biskra, 2009.
- [04] M. Al. ALALI, « Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension », Thèse Doctorat de l'Université Louis Pasteur-Strasbourg I, 2002.
- [05] H. Akagi, «New trends in active filters for power conditioning, » IEE trans. Ind. Appl., Vol. 32, no. 6, pp. 133138, Feb. 1998.
- [06] F Hamoudi «Contribution aux stratégies de commande avancées d'un filtre actif shunt à quatre fils» Thèse de doctorat de l'université El hadj lakhdhar Batna 2012
- [07] Chaghi Saci «Contrôle d'un filtre actif à quatre bras», Thèse de magistère, de l'université El hadj lakhdhar Batna 2012.
- [08] C. COLLOMBET J. M. LUPIN Et J. SCHONEK, « Perturbations Harmoniques dans les Réseaux Pollués, et Leur Traitement », Extrait du Cahier technique n° 152, Schneider Electric.
- [09] T. DEFLANDRE et P. MAURS, « Les Harmoniques sur les Réseaux Électriques », Direction des Etude et Recherche en France -Edition EYROLLES, 1998.
- [10]T. Deflandre, P. Mauras, « Les harmoniques sue les réseaux électriques » Edition Eyrolles, 1998.
- [11] M Tidjani, «Stratégies de Commande d'un Filtre Actif Parallèle à Quatre Fils», Thèse de magistère, CENTRE UNIVERSITAIRE D'EL-OUED, 2012.
- [12] J. SCHONEK, « Les Singularités de l'Harmonique 3 », Extrait du Collection technique n° 202, Schneider Electric, p. 3, 2000.

- [13] G. Desquilbet, C. Foucher, P. Fauquembergue, « Statistical analysis of voltage dips » Notes EDF, 96NR00102, 1995.
- [14] P. Meynaud, « Qualité de la tension dans les réseaux électriques – creux de tension, flicker et harmoniques » Techniques de l'ingénieur, traité Génie électrique, D 4 260, pp. 1-25, 1990.
- [15] Ch. ARNOUX, « Les Harmoniques », Fiche d'application, Ed 1, Service Communication, France, Mai 2008.
- [16] Abdelmalek BOULAHIA, « Etude des Convertisseurs Statiques destinés à la Qualité de l'Energie Electrique », Thèse de magistère, Université de Constantine, 2009.
- [17] M. NAZARUDIN et Z. ABIDIN, « IEC 61000-3-2 Harmonics Standards Overview », Schaffner EMC Inc, Edsion, NJ, USA.
- [18] S. BERNARD et G. TROCHAIN, « Deuxième Génération de Compensateur Actif d'Harmoniques Forte Capacité Basé sur le Mode d'Injection du Courant », MGE UPS SYSTEMS MGE0121UKI, p. 3, 1998.
- [19] A. HAMADI, « Contribution à l'Etude des Filtres Hybrides de Puissance Utilisés pour Améliorer la Qualité de l'Energie dans le Réseau Electrique de Distribution », Thèse de doctorat, Ecole de Technologie Supérieure-Québec, Canada, 2010.
- [20] H. AKAGI, « Active Harmonic Filters », IEEE, vol. 93, n°12, p. 2128-2141, 2005.
- [21] S. RAHMANIA, K. AL-HADDA, H. Y. KANAAN, « A Comparative Study of Shunt Hybrid and Shunt Active Power Filters for Single-Phase Applications: Simulation and Experimental Validation », Ecole de Technologie Supérieure-1100 Notre-Dame West Street-Montreal, Canada.
- [22] B. SINGH et K. AL-HADDAD, « A Review of Active Filters for Power Quality Improvement ». IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 46, n° 5, p. 960-971, 1999.
- [23] Y. PAL et A. SWARUP, « A Review of Compensating Type Custom Power Devices for Power Quality Improvement », Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference (POWERCON), p. 1-8, 2008.
- [24] M. AREDES et J. HAFNER, « Three-Phase Four-Wire Shunt Active Filter Control Strategies », IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 12, n° 2, p. 311-318, 1997.

- [25] R. ZHANG et R. V. H. Prasad, «Three-Dimensional Space Vector Modulation for Four-Leg Voltage-Source Converters », IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 17, n°3, p. 314-326, 2002.
- [26] G. ESCOBAR et G. A. A. VALDEZ, « A Model-Based Controller for A Three-Phase Four-Wire Shunt Active Filter With Compensation of the Neutral Line Current », IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 22. n° 6, p. 2261-2270, 2007.
- [27] A. ELMITWALLY et A. S. ABDELKADER, « Neural Network Controlled Three-Phase Four Wire Shunt Active Power Filter ». Generation, IEE Proceedings on Transmission and Distribution, vol. 147. n° 2. p. 87-92, 2000.
- [28] R. R. SAWANT et M. C. CHANDORKAR, « A Multifunctional Four-Leg Grid-Connected Compensator », IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 45, n° 1, p. 249-259, 2009.
- [29] H. AKAGI, S. OGASAWARA and H. KIM, « The theory of instantaneous power in three-phase four-Wire Systems », IEEE, 1999.
- [30] Q. CHEN, Z. CHEN et M. MCCORMICK, « The Application and Optimization of C-type Filter in a Combined Harmonic Power Filter », 35th Annual IEEE, Power Electronics Specialists Conference, Aachen, Germany, 2004.
- [31] J. C. Das, « Passive Filters- Potentialities and Limitations », IEEE, Transactions on Industry Applications, Vol. 40, p. 345-362, 2004.
- [32] L. BENCHAITA, « Etude, par Simulation Numérique et Expérimentation, d'un Filtre Actif Parallèle à Structure Courant avec une Nouvelle Méthode de Contrôle-Commande », Thèse de doctorat de l'université Henri Poincaré-Nancy-France, 1998.
- [33] H DJEGHLOUD «FILTRAGE ACTIF DE PUISSANCE» Thèse de doctorat de l'université UNIVERSITÉ MENTOURI CONSTANTINE 2007
- [34] F. MEKRI, « Etude et Commande d'un Filtre Actif Parallèle à Structure de Tension », Thèse de Magister, Université d'Oran, 2001.
- [35] H. Farid, « Commande Robuste d'un Filtre Actif Shunt à Quatre Fils », Thèse de Magister, Université de Batna, 2008.
- [36] F. MEKRI, « Etude et Commande d'un Filtre Actif Parallèle à Structure de Tension », Thèse de Magister, Université d'Oran, 2001.
- [37] M. C. BENHABIB, E. JACQUOT et S. SAADATE, « An Advanced Control Approach for a Shunt Active Power Filter », Groupe de Recherche en Electrotechnique et Electronique-Nancy-France.

- [38] S. Beaulieu, M. Ouhrouche « real-time modelling and simulation of an active power filter » IASTED International Conference on Power and Energy Systems PES 2007, Clearwater, Florida U.S.A.
- [39] T. BENSLIMANE, « Commande Numérique d'un Filtre Actif Parallèle Autonome », Thèse de Magister, Ecole Militaire Polytechnique-Alger, 2004.
- [40] S. A. TADJER, « Etude d'un Système de Compensation d'Harmonique en Utilisant un Générateur Photovoltaïque, GPV », thèse de magistère, Université M'Hamed Bougar-Boumerdès, 2008.
- [41] M. Aliyari Shoorehdeli and M. Teshnehla, "Identification using ANFIS with intelligent hybrid stable learning algorithm approaches and stability analysis of training methods," Applied Soft Computing , vol. 9, pp. 833-850, 2009.
- [42] TOUAFEK Mohamed Yaakoub, «Amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques par un contrôle neuro-flou des systèmes FACTS», Thèse de Magister, UNIVERSITE FERHAT ABBAS — SETIF, 2012.
- [43] Nauck. D, et R. Kruse, «What are Neuro-Fuzzy Classifiers», Seventh International Fuzzy Systems Association World Congress IFSA'97, Vol. IV, pp. 228-233, Academie de Prague, 1997.
- [44] AZEDDINE CHAIBA, «COMMANDE DE LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION PAR DES TECHNIQUES DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE», Thèse de doctorat de l'université Batna 2010.
- [45] Ould abdeslam. D, «Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension », thèse de doctorat, université de Haute-Alsace, France, 2005.
- [46] Pierre Borne, Mohamed Benerejeb, Joseph Haggège, « les réseaux de neurones » -livre de méthodes pratiques de l'ingénieur-Édition Technip 2007.
- [47] D. Taïbi, A. Golea « commande vectorielle directe sous capteur d'un moteur à induction associée à un observateur d'état par filtre de Kalman étendue ». First international conference on electrical systems PCSE 05 May 9-11 2005 O.E. Bouaghi Univ. Algeria
- [48] T. Gurbaz « commande d'une machine asynchrone en utilisant le concept neurone flou et la commande adaptative » Thèse de magistère, Université Mohamed Kheider-Biskra, 2009

- [49] G.Lindfield, J.Penny "Numerical Methode using MATLAB", Aston University Birmingham 1994.
- [50] Math works Inc, Fuzzy logic Toolbox User's Guide. 1998.
- [51] M. C. BENHABIB, «Contribution à l'Etude des Différentes Topologies et Commandes des Filtres Actifs Parallèles à Structure Tension, Modélisation, Simulation et Validation Expérimentale de la Commande », Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré-Nancy-France, 2004.

## ملخص :

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

نقدم في هذه الورقة، دراسة ومراقبة المصفي الفعال المتوازي ذو أربعة أذرع لتحسين نوعية الطاقة في الشبكة الكهربائية. لكي نتحكم في المصفي الفعال هناك ثلاث نقاط مهمة يجب الاهتمام بها : كيفية استخراج التيار المحمل بالتوافقيات والتحكم في التيارات المبعوثة من طرف المصفي الفعال في الشبكة الكهربائية، وكذلك كيفية تنظيم الجهد المستمر للقدر. هناك العديد من الطرق لاستخراج التيارات المحملة بالتوافقيات منها طريقة الاستطاعة اللحظية الكلاسيكية وطريقة الاستطاعة اللحظية باستعمال المصفي المتعدد المتغيرات وطريقة المرجع المتزامن , استعمالنا نوع واحد للتحكم في التيار هو التحكم في الطريقة التحلفية الكلاسيكية وهي قوية وسهلة التنفيذ. واستعملنا نوعين من منظمات الجهد المستمر للقدر : وحدة تحكم PI الكلاسيكية و منظم عن طريق التقنيات الذكية ANFIS ، و نتائج المحاكاة تبين متانة وحدة تحكم ANFIS بتطبيقها على المصفي الفعال ذو أربعة أذرع وقدمت لنا نتائج جيدة.

**كلمات مفتاحية :** الأحمال غير الخطية - المصفي الفعال المتوازي ذو أربعة اذرع- الاستطاعة اللحظية- العصبي الغامض .ANFIS

## Résumé :

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

On présente dans ce travail, une étude de contrôle d'un filtre actif à quatre bras pour l'amélioration de la qualité d'énergie d'un réseau électrique. La commande du filtre actif parallèle basé sur trois axes distincts : l'un concerne l'identification des courants harmoniques et l'autre s'intéresse au contrôle des courants injectés dans le réseau par le filtre actif à quatre bras, et l'autre pour régulation de la tension de bus continu. Il existe plusieurs méthodes d'identification des courants harmoniques tels que la méthode des puissances instantanées classique avec FPB, la méthode des puissances instantanées basée sur un FMVs et la méthode Référentiel synchrone SRF. On utilisé un seule type de contrôleur de courant c'est la hystérésis classique, il robuste et simple à mettre en œuvre, et on utilisé deux type de régulateurs du bus continu sont régulateur classique PI et régulateur par technique intelligence l'ANFIS, et les résultats de simulation ont montres l'efficacité et la robustesse de ce contrôleur ANFIS appliqué dans le filtre actif à quatre bras et offrant des bons résultats du THD du courant coté source.

**Mots clés :** Charges non-linéaires -filtre actif parallèle triphasé à quatre bras-puissances instantanées- neuro flou (ANFIS).