

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA  
Faculté des nouvelles technologies de l'information et de la communication  
Département d'électronique et des télécommunications



Mémoire du projet de fin d'étude  
En vue de l'obtention du diplôme de

## **MASTER PROFESSIONNEL**

Domaine : Sciences et technologies  
Filière : Automatique  
Spécialité : Instrumentation Industrielle

Présenté par :  
**BENZINE TAREK**  
**DEROUICHE AHMED AMINE**  
**ZERROUKI SADEK**

**Thème:**

# **Commande par Hystérésis du Courant d'un Filtre Actif Parallèle à Quatre-Bras**

Soutenu publiquement, le /10/2020, devant le jury composé de :

M<sup>r</sup> BOUZIDI MANSOUR

MAA Encadreur

UKM Ouargla

**Année universitaire 2019/2020**

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## *Remerciements*

*Tout d'abord, nous remercions notre Dieu le tout puissant de nous avoir donné la force d'atteindre notre objectif et accomplir notre travail.*

*Nous remercions vivement et particulièrement notre encadreur Monsieur **BOUZIDI Mansour** pour sa disponibilité, son aide, ses conseils, sa patience et ses encouragements qui nous ont aidés à bien mener ce travail.*

*Nos sincères remerciements vont à tous les personnes qu'on n'a pas citées et qui*

*Nous sont aidés de près ou de loin pour réaliser ce travail.*

# *Sommaire*

Titre	Page
<b>Introduction Générale</b>	01
<b>Chapitre. I : Perturbation des réseaux électrique et leurs remèdes</b>	
I.1.Introduction	04
I.2. Les Caractéristiques de perturbation électrique	05
I.3. Les Perturbations harmoniques	06
I.3.1. Définition	06
I.3.2. Origine des harmoniques	07
I.3.3. Conséquences des harmoniques	09
I.4. Déséquilibre du courant et de la tension	10
I.4.1. Origine du déséquilibre	10
I.4.2. Conséquences du déséquilibre	10
I.5. Les Creux de tension	11
I.5.1. Origine des creux de tension	11
I.5.2. Conséquences des creux de tension	11
I.6. Solution de dépollution du courant dans les réseaux électrique	12
I.6.1. Filtre actif parallèle à quatre files	12
I.7. Conclusion	14
<b>Chapitre. II : Stratégies de commande appliquées au FAP à quatre bras</b>	
II.1. Introduction	16
II.2. Principe du filtre actif parallèle à quatre bras	16
II.2.1. Avantages et inconvénients de filtre actif de puissance parallèle relié à un réseau électrique à quatre fils	17
II.3. Étude du filtre actif parallèle à quatre bras	18
II.3.1.la partie puissance du FAP	18
II.3.1.1. Description de l'onduleur triphasé à quatre bras	18

II.3.1.2. Filtre de découplage	20
II.3.1.3. Stockage de l'énergie	20
II.4. Présentation du système étudié	20
II.4.1. Type de la source d'alimentation	21
II.4.2. Type de la charge	21
II.5. Étude de la partie commande	22
II.5.1. Commande de l'onduleur par hystérésis	22
II.5.2. Identification des courants de références	24
II.5.2.1. Méthode du repère synchrone	25
II.6. Conclusion	27

### **Chapitre. III : Résultats de simulations**

III.1. Introduction	29
III.2. Résultats de simulation	29
III.2.1. Système sans filtre actif	30
III.2.2. Système avec filtre actif pour une charge non-linéaire équilibrée	31
III.2.3. Système avec filtre actif pour une charge non-linéaire déséquilibrée	31
III.3. Conclusion	36
<b>CONCLUSION GENERALE</b>	<b>38</b>

## Liste des figures

Titre	Page
Figure.I.1 : Image d'une onde déformée	07
Figure.I.2 : Différentes solutions utilisées dans le filtrage du courant	12
Figure.I.3 : Différentes topologies utilisées dans un FAP d'un réseau triphasé à quatre fils	13
Figure.II.1 : Principe du filtre actif parallèle	17
Figure.II.2 : Onduleur triphasé à quatre bras	18
Figure.II.3 : Type de la source d'alimentation	21
Figure.II.4 : Type de la charge	21
Figure.II.5 : Bande d'hystérésis et signal de commande d'un interrupteur	22
Figure.II.6 : Commande des courants de filtre par hystérésis	23
Figure.II.7 : Extraction des harmoniques dans le repère synchrone	26
Figure.II.8 : Schéma block de la commande hystérésis du courant d'un FAP à quatre-bras	27
Figure III-1 : Principe du filtrage actif parallèle d'un réseau triphasé à quatre bras	29
Figure III-2 : Performances du filtre actif à quatre bras, (a) courant de charge, (b) courant de source, (c) tension continue, (d)-(f) Courant de filtre injecté, (g) tension de source réduite et sa courant correspondant, (h) courant de neutre injecté, (i) courant de neutre de la source	32-33- 34-35
Figure III-3 : Spectre d'harmonique de courant de source avant et après le filtrage	35

## Liste des tableaux

Titre	Page
Tableau.I.1 : Conséquences des creux de tension sur quelques équipements électriques sensibles	11
Tableau.II.1 : Avantages et inconvénients du FAP à quatre bras	17
Tableau.II.2 : Les états de commutation de l'onduleur	19
Tableau.III.1 : Tableau de paramètre de simulation	30

## Liste des acronymes et symboles

$i_{s123}$	Courant de source triphasé
$i_{c123}$	Courant de charge triphasé
$i_{f123}$	Courant injecté par le filtre triphasé
$l_{c123}$	L'inductance de ligne triphasée
$r_{c123}$	Résistance de ligne triphasé
$l_{f123}$	L'inductance de filtre de découplage triphasé
$r_{f123}$	Résistance de filtre de découplage triphasé
$l_{s123}$	L'inductance de source triphasée
$r_{s123}$	Résistance de source triphasé
$l_d$	L'inductance de la charge
$r_d$	Résistance de la charge
$i_n$	Courant de neutre
$V_{s123}$	Tension de source triphasée
$C$	Capacité du condensateur
$V_{dc}$	Tension aux bornes du condensateur
$i_f^*$	Courant de référence
$i_f$	Courant produit par l'onduleur
<b>FAP</b>	Filtre actif parallèle
<b>THD</b>	Taux de distorsion harmonique
<b>FMV</b>	Filtre multi variable
$\omega$	La pulsation
$f$	La fréquence
$P$	Puissance active
$Q$	Puissance réactive
<b>IGBT</b>	Insolated Gate Bipolar Transistor



***Introduction  
générale***

Dans une grande variété d'applications industrielles, il existe une demande croissante pour améliorer la qualité du système électrique. Outre la fiabilité et la disponibilité de la puissance électrique, la qualité de la puissance devient maintenant un problème important. Il y a de nombreux inconvénients causés par la mauvaise alimentation électrique depuis la défaillance de l'appareil sensible jusqu'à la défaillance du service public. La perte financière causée par ces pannes varie en fait selon l'industrie soutenue par la source d'alimentation, mais selon le rapport, il y a eu des millions de dollars de perte à cause de la panne de courant électrique [17].

Parmi les causes de la mauvaise qualité de la puissance, les harmoniques sont inclus comme la raison qui contribue à la majorité de panne de courant. 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 [11].

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 [11].

Dans ce cas, de nombreux efforts ont été proposés pour résoudre le problème des harmoniques. Ces efforts peuvent être classés comme [10] :

- La réduction de l'impédance de court-circuit,
- La modification du convertisseur statique polluant,
- Les dispositifs de filtrage.

Parmi ces solutions citer l'installation de filtres actifs ou passifs est plus préférable pour un système établi. Les filtres passifs sont faciles à concevoir et à installer. L'inconvénient est qu'en général, ils sont trop volumineux et donc encombrants. En outre, ils étaient conçus pour certaines harmoniques [17]. Pour garantir une meilleure qualité de la puissance, le filtrage actif de puissance a été choisi comme solution -avancée- de dépollution harmonique, et en particulier le filtrage actif de puissance parallèle. Au cours de ses dernières années, plusieurs travaux ont été réalisés avec expérimentation appliqués pour la plupart aux systèmes triphasés à trois fils, or il se trouve que dans les réseaux basse tension, le neutre existe, ce qui fait apparaître des composantes homopolaires, il en résulte la circulation de courant harmonique dans le neutre, notamment à cause des charge non linéaires monophasées [10]. 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 [11].

Dans ce contexte, l'objectif de ce travail sera l'étude de Commande d'un filtre actif parallèle à quatre bras par la commande hystérésis de courant. 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 a 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.

Le dernier chapitre sera consacré à la présentation des résultats de la simulation sous différents tests dans le but d'évaluer notre topologie du filtre actif parallèle à quatre-bras.

Enfin, une conclusion générale de ce travail sera fournie.

# *Chapitre I*

## *Perturbation des réseaux électrique et leurs remèdes*

## I.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 [1], [2].

Dans ce chapitre, nous présenterons les caractéristiques des perturbations électriques, les harmoniques continues, les conséquences et les normes imposées aux utilisateurs, et à la fin nous proposerons des solutions pour nettoyer le réseau électrique.

## I.2. Les caractéristiques de perturbation électrique

L'énergie électrique est délivrée sous forme d'un système de tensions, alternatif, triphasé, qui est caractérisé par : [3]

- 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.

Les perturbations aléatoires et les perturbations présentes affectent en permanence la qualité de la tension, et ces effets apparaissent sous la forme de divers déséquilibres qui affectent les réglages prédéterminés.

Nous résumons les troubles en quatre possibilités :

- **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 ou de 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. Pour effectuer une pollution du réseau électrique basse tension correctement analysée, afin d'obtenir les meilleures méthodes de décontamination, nous trouverons deux types de perturbations, les perturbations de courant et de tension. Courants de tension tels que les courants harmoniques et les courants asymétriques. Perturbations de tension telles que diminutions, déséquilibres et harmoniques. Ces perturbations affectent l'équipement électrique et peuvent entraîner sa destruction.

### **I.3. Les perturbations harmoniques**

#### **I.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  $h=40$ ) [04],[05].

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 [4],[5].

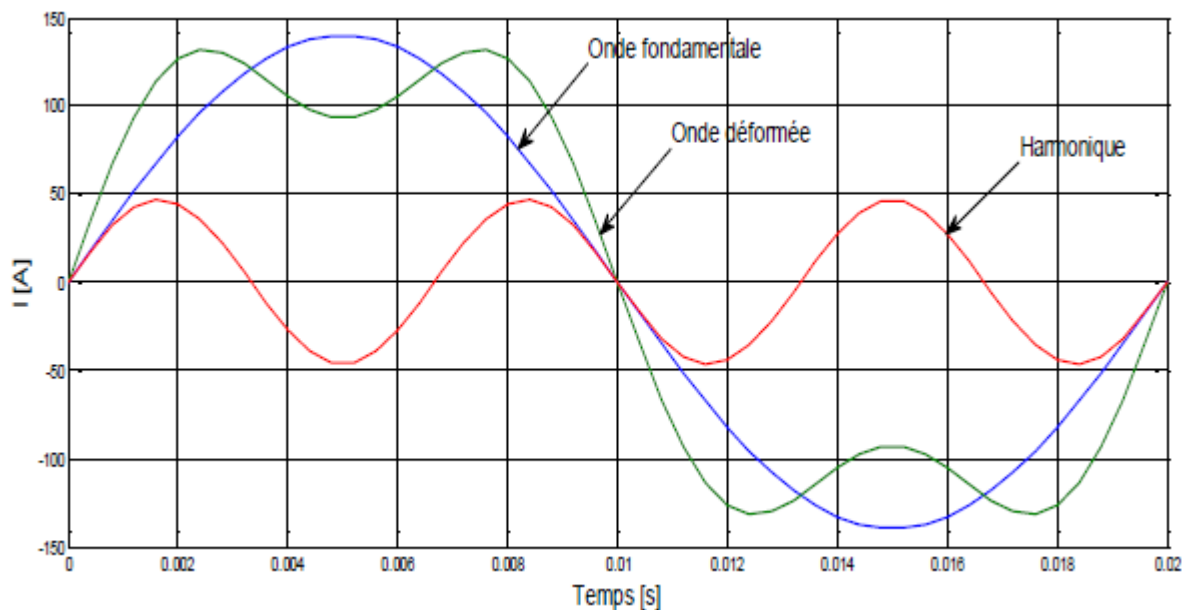


Figure.I.1 Image d'une onde déformée

### I.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 [6],[5].



**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 [5].

**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 un spectre semblable à celui d'un redresseur, et un spectre continu de niveau inférieur à celui d'un four à courant alternatif [5].

**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 [7], [5].

### I.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 : [3]

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

$$I^2 \cdot R = \sum_{h=1}^{\infty} I_h^2 \cdot R$$

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 [3].

- 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 [3],[8].

- **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 [3].

## I.4. Déséquilibre du courant et de la tension

### I.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 [3].

### I.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 [3].
- 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 [3] :
- 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).

- 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 [3].

## I.5. Les Creux de tension

### I.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 [3], [9].

### I.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 (I.1) résume les conséquences néfastes causées par les creux de tension sur quelques matériels industriels et tertiaires sensibles [3], [10].

Tableau. I.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

## I.6. Solutions de dépollution du courant dans les réseaux électriques

Afin de réduire les harmoniques des courants, il existe des solutions traditionnelles comme les filtres passifs et des solutions modernes comme les filtres actifs (Voir figure I.2).

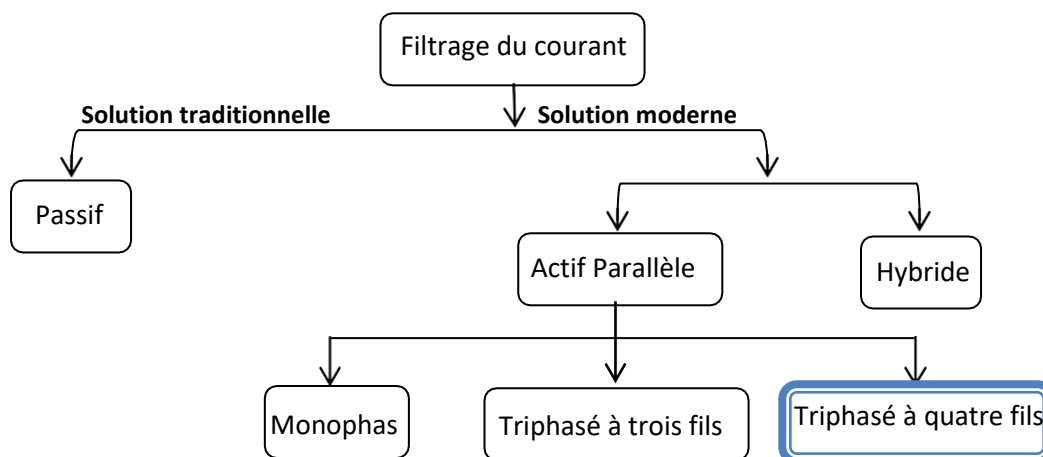


Figure. I.2 : Différentes solutions utilisées dans le filtrage du courant.

### I.6.1. Filtre actif parallèle à quatre fils

Face aux évolutions de la charge et du réseau électrique, les filtres actifs parallèles (FAP) sont considérés comme une solution avancée de dépollution du réseau électrique, puisqu'ils peuvent s'adapter aux variations de la charge et du réseau électrique et ceci sans imposer un changement aux installations du fournisseur d'énergie et du consommateur.

Trois topologies principales sont disponibles pour les systèmes triphasés à quatre fils : topologie de condensateur à point milieu, topologie à trois ponts en H, et topologie à quatre bras. Cette dernière s'est avérée être la meilleure topologie pour les onduleurs fonctionnant dans des systèmes triphasés à quatre fils.

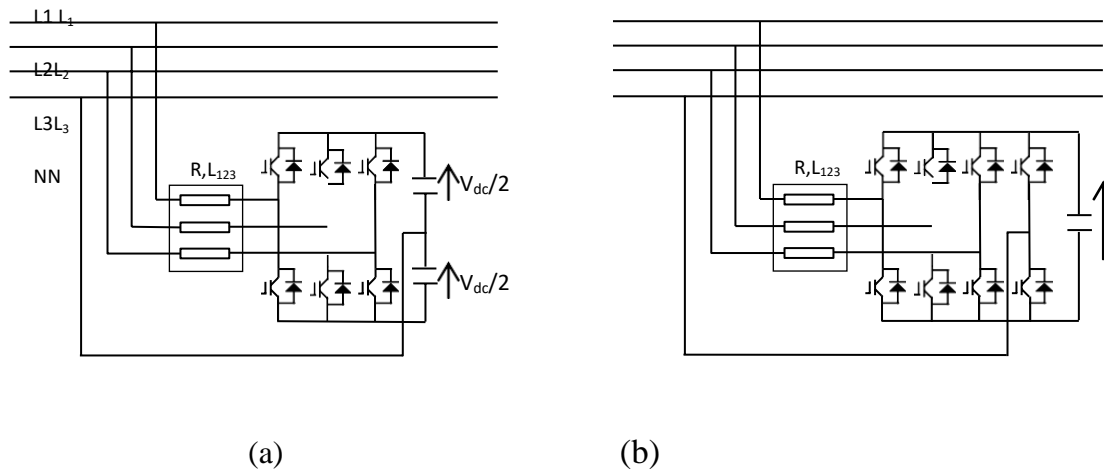
#### a. Topologie de condensateur à point milieu

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 [5].

**b. Filtre actif de type source de tension à quatre fils avec quatre bras**

La Figure 1.3 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 [5].

Des autres configurations du FAP à quater fils peuvent être citées (Voir figure I.3) [5] .



*Figure. I.3 : Déférentes topologies utilisées dans un FAP d’un réseau triphasé à quatre fils ;  
 (a) : condensateur à point milieu ; (b) : topologie à quatre bras.*

## I.7. Concluions

Dans ce chapitre, nous avons présenté diverses perturbations qui affectent la forme d'onde, la capacité et la tension du réseau électrique, et qui endommagent l'équipement électrique et peuvent entraîner ses dommages.

Nous avons également cité quelques solutions pour dépolluer le réseau électrique.

Le filtre actif à quatre bras présente la meilleure solution pour les réseaux électriques à quatre files, qui peut assurer le filtrage des harmoniques, la compensation de la puissance réactive et l'élimination du courant neutre.

Le prochain chapitre sera axé sur la modélisation et contrôle du filtre actif à quatre bras.

## **Chapitre II**

### ***Commande par hystérésis du courant d'un filtre actif parallèle à quatre bras***



## II.1. Introduction

Nous venons de voir dans un premier chapitre les différentes perturbations susceptibles de nuire au bon fonctionnement des systèmes électriques, en particulier les harmoniques, ainsi que les solutions appropriées pour la dépollution notamment le filtrage actif.

Dans ce chapitre, nous présenterons le principe de fonctionnement du filtre actif parallèle à quatre bras, ainsi que ses avantages et inconvénients, ensuite nous étudierons sa structure générale, laquelle a été divisé en deux : la partie puissance et la partie contrôle-commande. Nous détaillerons d'abord la partie puissance, puis nous présenterons le système qu'on désire étudier. Enfin, dans la partie contrôle-commande, nous aborderons l'identification des courants perturbés, donc, nous présenterons les méthodes qu'on a appliquées pour extraire les courants de référence du filtre actif parallèle à quatre bras.

## II.2. Principe du filtre actif parallèle à quatre bras

Le filtre actif parallèle est commandé comme un générateur de courant, il génère des courants harmoniques, en opposition de phase avec les courants harmoniques produites par la charge ce qui permet d'avoir des courants sinusoïdaux côté source.

En général, le filtre actif parallèle est utilisé pour la dépollution des réseaux Basse Tension et Moyenne Tension. Son impédance totale vis-à-vis de la source et de la charge lui confère une bonne auto-adaptabilité avec des performances appréciables.

Actuellement, les filtres actifs parallèles sont essentiellement installés par les consommateurs industriels. Nous spécifions deux types de filtres actifs parallèles, le filtre actif à structure tension et le filtre actif à structure courant. Nous nous intéressons dans notre étude uniquement au filtrage actif parallèle à structure tension.

De plus nous nous intéressons aux topologies de filtre actif parallèle à quatre bras qui sont relié aux réseaux électriques quatre fils.

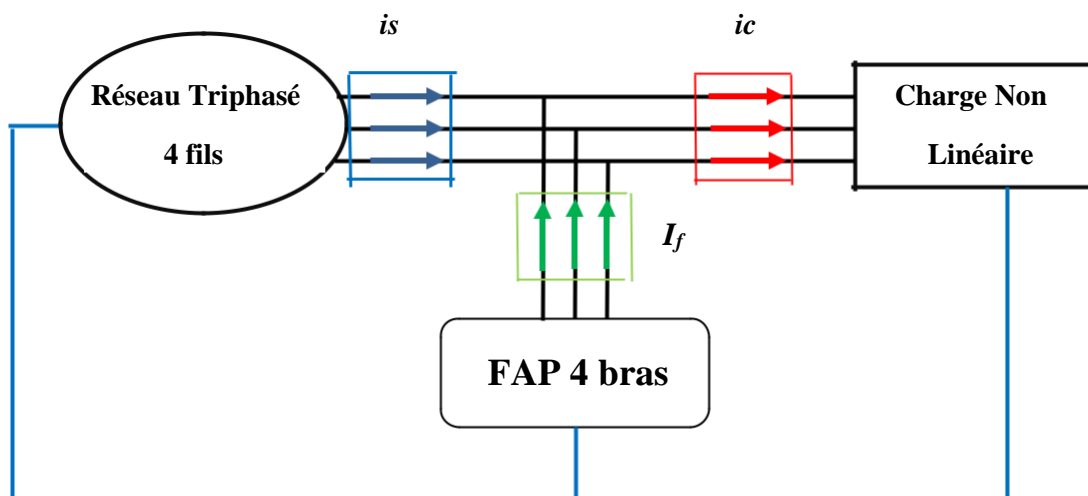


Figure.II.1 : Principe du filtre actif parallèle.

### II.2.1. Avantages et inconvénients de filtre actif de puissance parallèle relié à un réseau électrique à quatre fils

Le tableau suivant présente quelques avantages et inconvénients d'un filtre actif parallèle connecté à un réseau électrique à quatre fils : [13]

Tableau.II.1 :

Avantages et inconvénients du FAP à quatre bras

Avantages	Meilleure contrôlabilité de courant Faible condensateur côté bus continu Plus de degré de liberté
Inconvénients	16 composants semi-conducteurs Plus de pertes par conduction et par commutation

### II.3. Étude du filtre actif parallèle à quatre bras

Un filtre actif de puissance est essentiellement constitué de deux parties :

- Partie puissance.
- Partie commande – contrôle.

Le circuit de puissance du filtre actif à quatre bras est constitué par un onduleur de tension triphasé à quatre bras, dont chaque bras est constitué d'IGBT et le quatrième bras est relié au neutre, et est connecté en parallèle sur le réseau par un filtre de découplage. La capacité  $C$  côté continue de l'onduleur se comporte comme une source de tension continue. La tension aux bornes du condensateur doit être positive et maintenue constante par la commande. Ainsi, on distingue trois éléments dans la partie puissance :

- Un onduleur de tension.
- Un filtre de découplage.
- Système de stockage d'énergie

#### II.3.1. La partie puissance du FAP

##### II.3.1.1. Description de l'onduleur triphasé à quatre bras

Dans notre étude, nous utilisons un onduleur de tension comprenant quatre bras constitués de huit interrupteurs réversibles en courant (IGBT) en antiparallèle avec une diode. Comme l'illustre la figure ci-après :

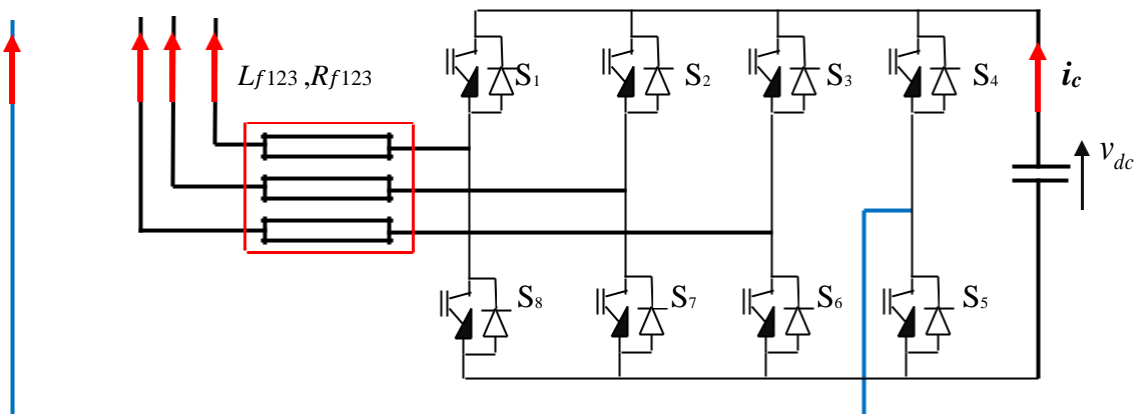


Figure.II.2 : Onduleur triphasé à quatre bras.

Les états de commutation pour ce type d'onduleur sont présentés dans le tableau.II.2 et sont obtenus grâce aux expressions suivantes :

$$v_{f1} = (S_1 - S_4) v_{dc} \tag{II.5}$$

$$v_{f2} = (S_2 - S_4) v_{dc} \tag{II.6}$$

$$v_{f3} = (S_3 - S_4) v_{dc} \tag{II.7}$$

$$i_{dc} = S_1 \times i_1 + S_2 \times i_2 + S_3 \times i_3 - S_4 \times i_N \tag{II.8}$$

Tableau.II.2 : Les états de commutation de l'onduleur.

K	S <sub>4</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>1</sub>	v <sub>f3</sub>	v <sub>f2</sub>	v <sub>f1</sub>
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	0	0	v <sub>dc</sub>
2	0	0	1	0	0	v <sub>dc</sub>	0
3	0	0	1	1	0	v <sub>dc</sub>	v <sub>dc</sub>
4	0	1	0	0	v <sub>dc</sub>	0	0
5	0	1	0	1	v <sub>dc</sub>	0	v <sub>dc</sub>
6	0	1	1	0	v <sub>dc</sub>	v <sub>dc</sub>	0
7	0	1	1	1	v <sub>dc</sub>	v <sub>dc</sub>	v <sub>dc</sub>
8	1	0	0	0	-v <sub>dc</sub>	-v <sub>dc</sub>	-v <sub>dc</sub>
9	1	0	0	1	-v <sub>dc</sub>	-v <sub>dc</sub>	0
10	1	0	1	0	-v <sub>dc</sub>	0	-v <sub>dc</sub>
11	1	0	1	1	-v <sub>dc</sub>	0	0
12	1	1	0	0	0	-v <sub>dc</sub>	-v <sub>dc</sub>
13	1	1	0	1	0	-v <sub>dc</sub>	0
14	1	1	1	0	0	0	-v <sub>dc</sub>
15	1	1	1	1	0	0	0

### II.3.1.2. Filtre de découplage

Le but du filtre de découplage est de permettre la connexion de l'onduleur de tension au réseau électrique qui est très souvent considéré comme une source de courant qui génère des courants harmoniques à partir de la différence des tensions entre la sortie du pont onduleur et le réseau. Ce filtre réduit la propagation sur le réseau électrique des composantes harmoniques dues aux commutations. Nous avons utilisé un filtre entre l'onduleur et le réseau électrique qui se compose d'une inductance  $L_c$  et de résistance interne  $R_c$  [10].

### II.3.1.3. Stockage de l'énergie

Le stockage de l'énergie du côté continu se fait souvent par un système de stockage capacitif représenté par le condensateur qui joue le rôle d'une source de tension continue. Dans les applications de compensation d'harmoniques, une tension  $V_{dc}$  élevée améliore la dynamique du filtre actif, par ailleurs, le critère commun pour le choix de la capacité  $C_{dc}$  est en générale la limitation des ondulations de la tension continue. Ces ondulations sont d'autant plus élevées que les harmoniques à compenser sont de basses fréquences et d'amplitudes importante. Un dimensionnement adéquat de la capacité peut être établi à partir d'un courant type que doit générer le filtre actif, ceci n'est pas toujours facile à réaliser car on ne connaît pas souvent tous les harmoniques qu'on doit compenser, ainsi une méthode de dimensionnement consiste à calculer la capacité à partir du courant harmonique du rang le plus faible  $I_h$  [12].

$$C_{dc} = \frac{I_h}{\tau \cdot V_{dc} \cdot \omega_h} \quad (\text{II.9})$$

Avec  $\tau$  : Taux d'ondulation admissible généralement de l'ordre de 5% de  $v_{dc}$

$\omega_h$  : Pulsation du rang h.

## II.4. Présentation du système

Le système qu'on désire utiliser est une source de tension triphasée à quatre fils, trois charges non linéaires monophasées, et d'un filtre actif parallèles à quatre bras avec sa commande.

### II.4.1. Type de la source d'alimentation

La source de tension que nous allons utiliser est un système triphasé à quatre fils (Trois phases + neutre) ayant une inductance  $l_s$  et une résistance  $r_s$  comme le montre la figure suivante :

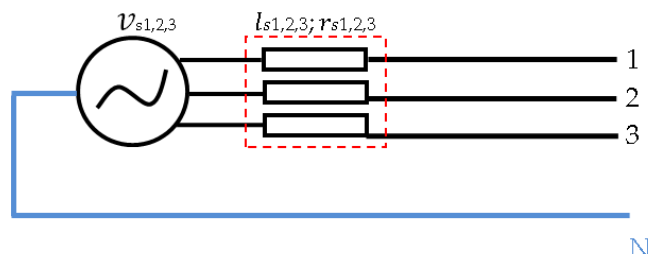


Figure.II.3 : Type de la source d'alimentation.

### II.4.2. Type de la charge

La charge utilisée dans notre système est une charge non linéaire constituée de trois charges monophasée de type pont redresseur monophasée à diode débitant chacune d'elles sur une charge  $l, r$ , comme illustre la figure ci-dessous.

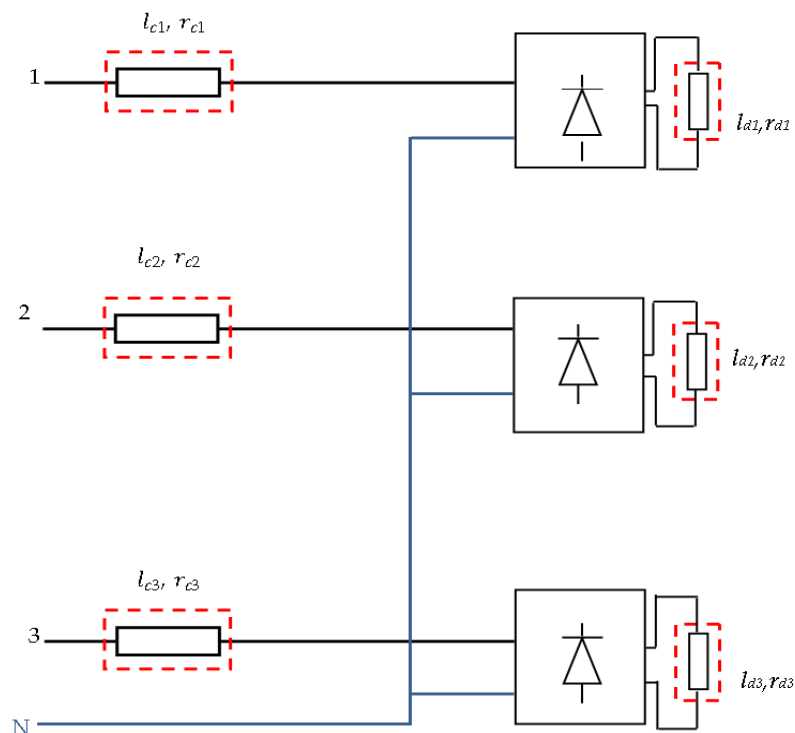


Figure.II.4 : Type de la charge.

La charge non linéaire produit des harmoniques de courant et les transmet sur le réseau. Nous aurons ainsi au point de raccordement de la charge au réseau une pollution harmonique.

## II.5. Étude de la partie commande

### II.5.1. Commande de l'onduleur par hystérésis

C'est une commande non-linéaire à fréquence de commutation variable permettant de fixer les ondulations de courants. Cette stratégie de commande assure un contrôle satisfaisant du courant sans exiger une connaissance poussée du modèle du système à contrôler ou de ses paramètres [10].

La commande par hystérésis permet la commutation des interrupteurs du filtre actif lorsque l'erreur entre le signal (courant ou tension) et sa consigne excède une amplitude prédéfinie. Cette amplitude est communément appelée fourchette ou bande d'hystérésis. Cette technique ne demande qu'un comparateur à hystérésis par phase.

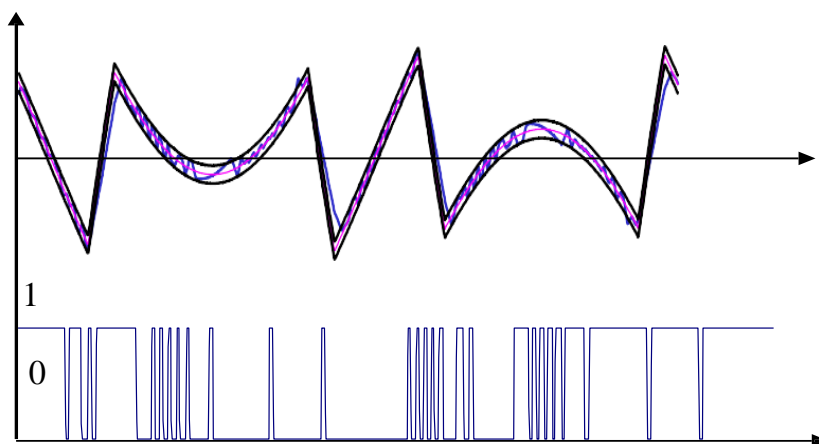


Figure.II.5 : Bande d'hystérésis et signal de commande d'un interrupteur

Le comparateur à hystérésis fonctionne selon le principe suivant [10] :

On a la valeur  $H$  que représente la fourchette (ou largeur) d'hystérésis, dans l'intervalle  $[-H H]$ . L'interrupteur s'ouvre si l'erreur devient inférieure à  $-H/2$ , il se ferme si cette dernière est supérieure à  $+H/2$ .

Si l'erreur est maintenant comprise entre  $-H/2$  et  $+H/2$  (c.-à-d. qu'elle varie à l'intérieur de la fourchette d'hystérésis), l'interrupteur ne commute pas. Par exemple, dans le cas d'un filtre actif parallèle, si l'erreur du courant généré se situe à l'intérieur de la bande, pas de réaction

enregistrée de la part de la commande ; si l'erreur est trop élevée, la commande est positive et entraîne l'interrupteur à la fermeture.

Par conséquent, la tension générée est supérieure ou égale à zéro, condition nécessaire pour l'accroissement du courant. Analogiquement, lorsque le courant de sortie est trop élevé, ceci incite l'interrupteur à l'ouverture, donc la tension sera inférieure ou égale à zéro et ainsi le courant va décroître. L'interaction entre les trois phases de l'onduleur constituant le filtre actif est un inconvénient. En effet, si la commande est positive dans l'une des phases dans l'objectif d'accroître le courant, la tension s'accroît également sur cette phase, tandis qu'elle diminue dans les deux autres phases. La commande par hystérésis est excellente dans la mesure où elle assure une bonne réponse de l'onduleur vis-à-vis des changements rapides des courants de référence, puisque les comparateurs à hystérésis ont une inertie et un retard négligeables.

Le schéma synoptique de la commande des courants du filtre actif par des régulateurs à hystérésis est donné par la figure ci-dessous :

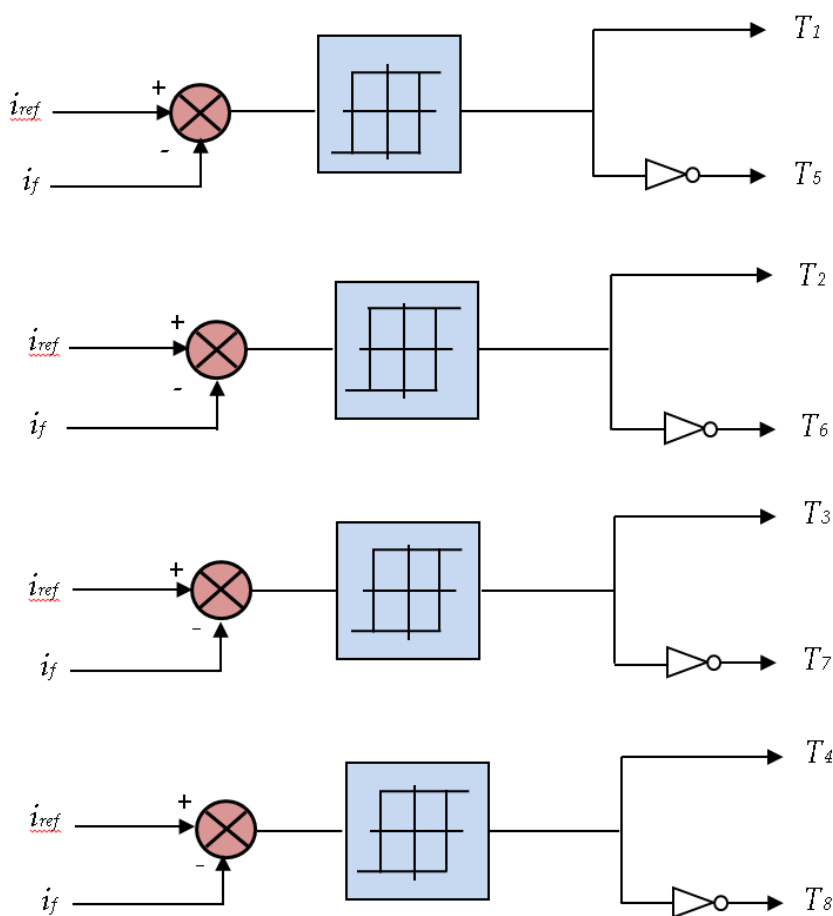


Figure.II.6 : Commande des courants de filtre par hystérésis.



En revanche, les commutations évoluent librement à l'intérieur de la bande d'hystérésis. On ne peut pas maîtriser correctement le spectre haute fréquence dû aux fréquences de commutation.

### II.5.2. Identification des courants de références

La charge polluante absorbe un courant constitué d'une composante fondamentale et de composantes harmoniques. Le but du filtrage actif parallèle est la génération de courants harmoniques de même amplitude mais en opposition de phase avec ceux générés par la charge. Ainsi, le courant fourni par le réseau sera sinusoïdal. Il est nécessaire d'identifier avec précision les courants harmoniques de la charge polluante. Le choix de la méthode utilisée pour isoler la composante harmonique du courant de charge est un facteur déterminant quant aux performances obtenues par le filtre actif (précision, dynamique, ...) [14].

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 afin de générer les signaux de référence servant à la commande du filtre actif, nous avons opté pour les lois de commande suivantes :

- Méthode directe dite théorie p-q-r.
- Méthode des puissances instantanées réelles, imaginaires et homopolaires Modifié p-q-o.
- Identification par la méthode des puissances instantanées avec FMVs.
- Méthode du repère synchrone.

Dans ce travail nous nous intéressons à la technique d'identification par la Méthode du repère synchrone.

### II.5.2.1. Méthode du repère synchrone

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 afin d'extraire la composante harmonique [15]. Elle permet d'obtenir des meilleures performances même si la tension du réseau est perturbée ou déséquilibrée [16]. La figure (II.7) représente le schéma de principe de cette méthode. La transformation est définie comme suit :

$$\begin{bmatrix} i_{ld} \\ i_{lq} \\ i_{l0} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin\theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{la} \\ i_{lb} \\ i_{lc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

Où  $\theta$  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. La référence harmonique sera extraite des courants dans le repère synchrone à l'aide d'un filtre passe bas de quatrième ordre à fréquence de coupure  $f_c = 25\text{Hz}$  avec un soustracteur. Les courants sur les axes  $d$  et  $q$  peuvent être décomposés en deux composantes comme suit :

$$\begin{cases} i_{ld} = \bar{i}_{ld} + i_{ld} \\ i_{lq} = \bar{i}_{lq} + i_{lq} \end{cases} \quad (\text{II.11})$$

En l'absence du neutre, seule les composantes alternatives seront présentées à la sortie du Système filtre-soustracteur. En plus, en insérant ce système-là uniquement sur l'axe  $d$ , tout le courant sur l'axe  $q$  sera disponible comme référence. Par conséquent, la puissance réactive de la charge sera compensée en plus des harmoniques, les courants de référence deviennent alors :

$$\begin{bmatrix} i_{fd}^* \\ i_{fq}^* \\ i_{f0}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{i}_{ld} \\ i_{lq} \\ i_{l0} \end{bmatrix} \tag{II.12}$$

Utilisons la transformation inverse de Park, les références dans le repère triphasé seront :

$$k_{cp}^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \tag{II.13}$$

Cette méthode est sensible aux variations de la fréquence, Ce qui signifie le besoin d'une boucle de verrouillage de phase (PLL). La méthode montre des meilleures performances dans des conditions imparfaites du système de tentions.

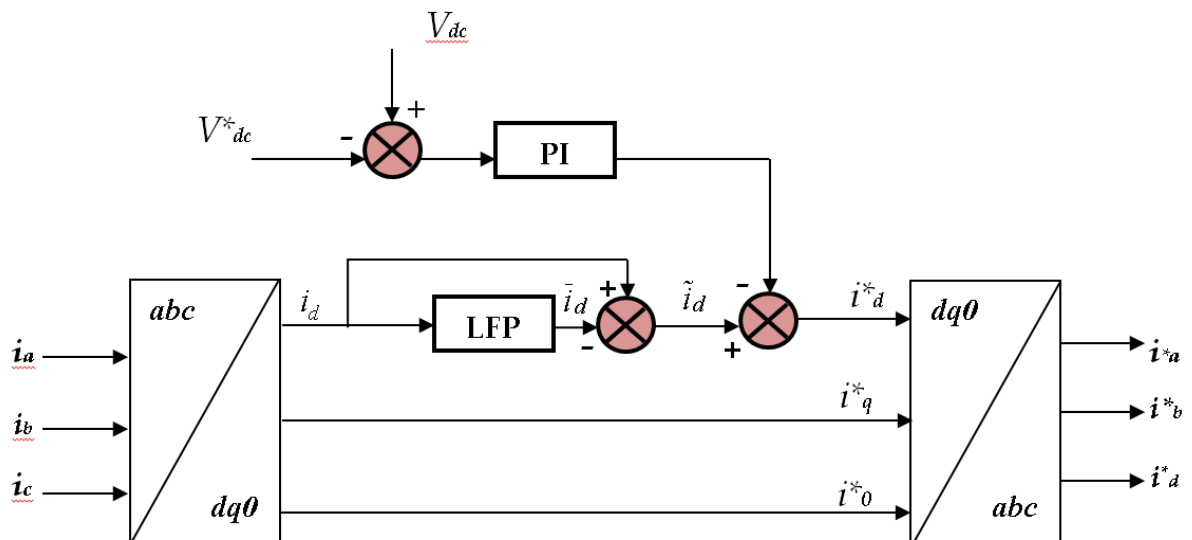


Figure.II.7 : Extraction des harmoniques dans le repère synchrone.

En fin, le schéma bloc du FAP à quatre-bras avec la commande par hystérésis du courant en utilisant la méthode d'identification par repère synchrone est résumé par la Figure.II.8.

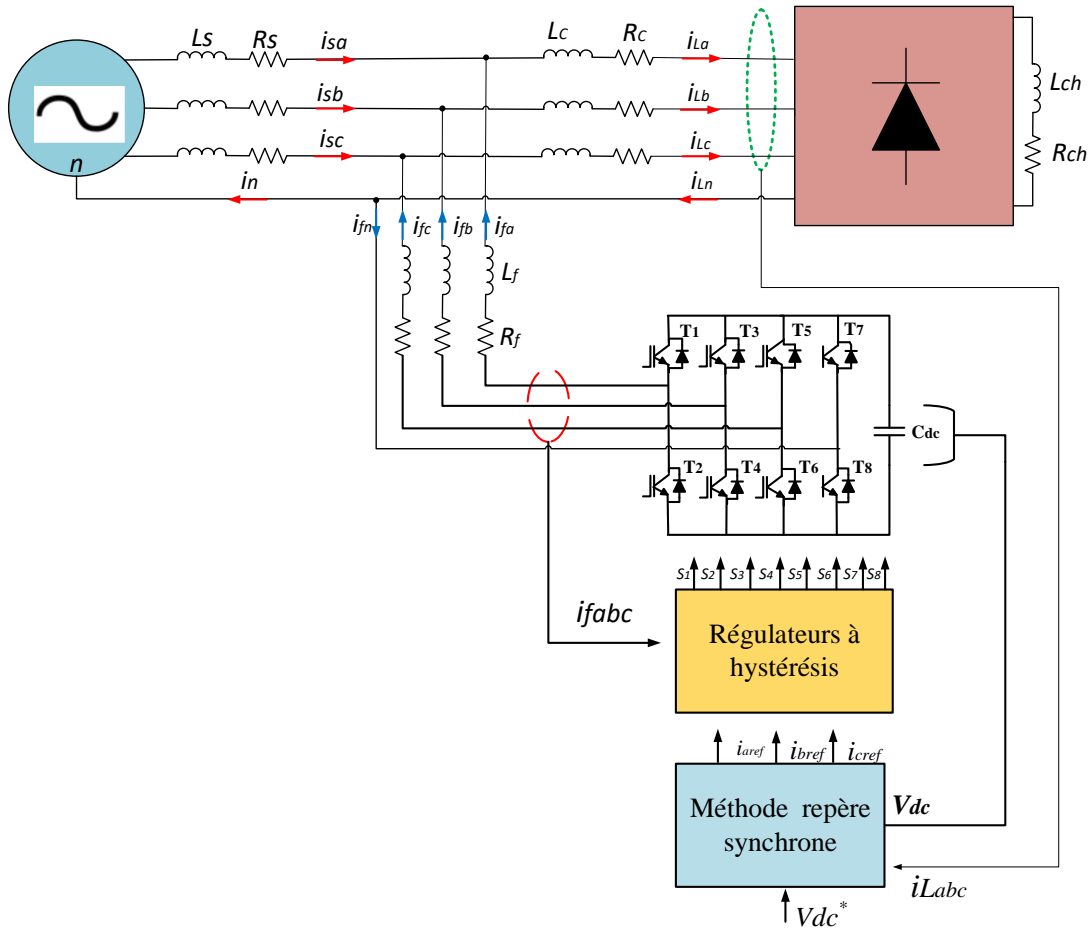


Figure.II.8 : Schéma bloc de la commande hystérésis du courant d'un FAP à quatre-bras

## II.6. Conclusion

Dans ce chapitre, le principe de fonctionnement du filtre actif parallèle à quatre-bras est présentée, sa partie puissance et sa partie commande sont expliquées en détail. Dans la partie puissance, la topologie d'onduleur à quatre-bras est utilisée, sa modélisation et son principe de contrôle sont fournis. Le courant de filtre injecté est contrôlé à l'aide du contrôleur de courant de bande d'hystérésis, tandis que la méthode de repère synchrone est utilisée pour générer les courants de référence du filtre. Généralement, la méthode de contrôle présentée pour le filtre actif parallèle à quatre-bras est simple et efficace et leurs performances seront évaluées par simulation dans le chapitre suivant.

## **Chapitre III**

### ***Résultats de simulations***

### III.1. Introduction

Afin d'éliminer les harmoniques de courant, le courant de neutre ainsi que l'énergie réactive produite par les charges non linéaires, on doit exploiter des techniques de dépollution très performantes. Le filtrage actif parallèle à quatre bras est l'une des solutions modernes et efficaces. Cette technique pouvant être appliquée que ce soit en mode équilibré ou déséquilibré.

Dans ce chapitre nous allons présenter les résultats obtenus lors de nos simulations pour la commande hystérésis du courant utilisant la méthode repère synchrone d'extraction des courants de référence qui sera suivies par une étude comparative

### III.2. Résultats de simulation

Avant l'application de nos lois de commande sur notre système, il est important de connaître les performances de notre réseau sans filtre, de cet effet, nous considérons le model de simulation composée par une source triphasé équilibré alimentant trois charges monophasées non linéaire (redresseur en pont a diode monophasé) présenté dans la figure ci-dessous :

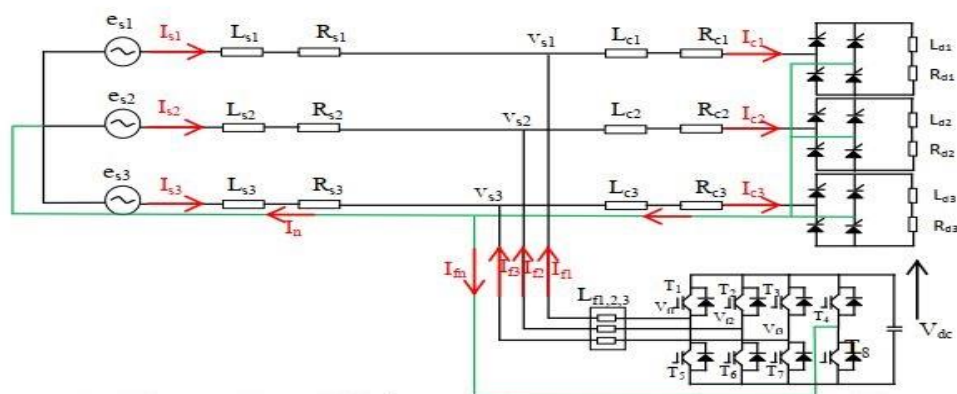


Figure. III.1 : Principe du filtrage actif parallèle d'un réseau triphasé à quatre bras

Les paramètres de simulation sont cités dans le tableau suivant :

Tableau.III.1 Tableau de paramètre de simulation

<i>Paramètre</i>	<i>Valeur</i>
Source triphasé RMS, $f$	220V, 50 Hz
Impédance de source $R_s, L_s$	0.001 $\Omega$ , 1 mH
Impédance de la ligne coté charge $R_c, L_c$	0.001 $\Omega$ , 10 mH
Charge des redresseurs monophasé $R_{ch}, L_{ch}$	30 $\Omega$ , 50 mH
Impédance de raccordement $R_f, L_f$	0.001 $\Omega$ , 10 mH
Condensateur de bus continu $C_{dc}$	5 mF
Référence de la tension continue	600 V

Pour évaluer les performances du filtre active parallèle à quatre bras sont, on doit utiliser les tests suivants :

- Système sans filtre actif parallèle  $t \in [0 \text{ } 0.2\text{s}]$  ;
- Le filtre actif est connecté à  $t=0.2\text{s}$ , dans l'intervalle  $[0.2\text{s} \text{ } 0.4\text{s}]$  la charge est équilibrée.
- On introduire une charge dans la phase-a pour rendre les courant de charge déséquilibrés.

La figure III.2 montre les différentes formes d'ondes du filtre actif parallèle quatre-bras commandé par la commande par hystérésis du courant.

### III.2.1. Système sans filtre actif

Avant connecter le filtre actif parallèle, à partir de la figure (III.2.b), le courant de source est totalement déformé avec un THD égale à 11.99% (voire la figure (III.3.a)). Les figures (III.2.a) et (III.2.b) montre que les courants de charge et celle de la source sont égaux avant la connexion du filtre. Les courant injectés par le filtre sont presque zéro avant la connexion du filtre comme illustré la figure (III.2.d-f). La tension du bus continu est maintenue constant avant la compensation comme la montre la figure (III.2.c).

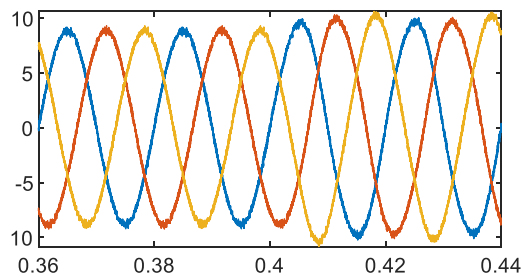
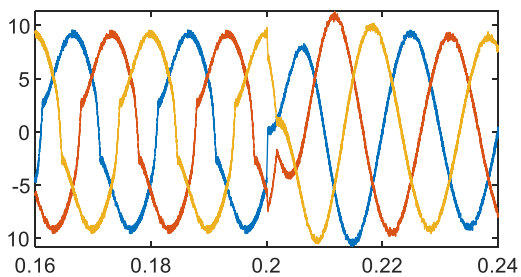
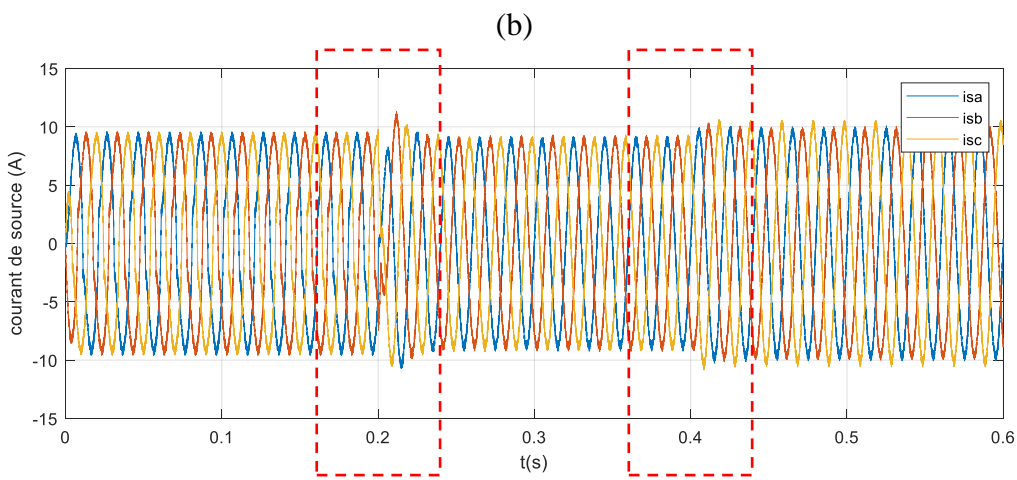
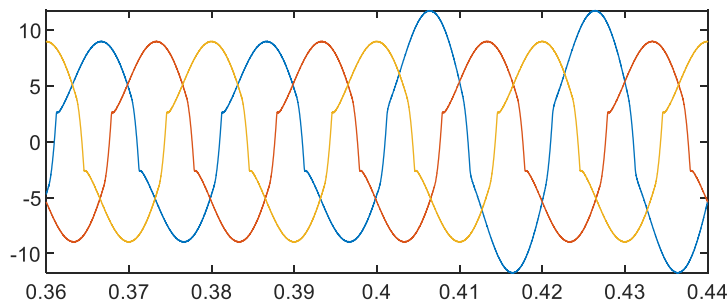
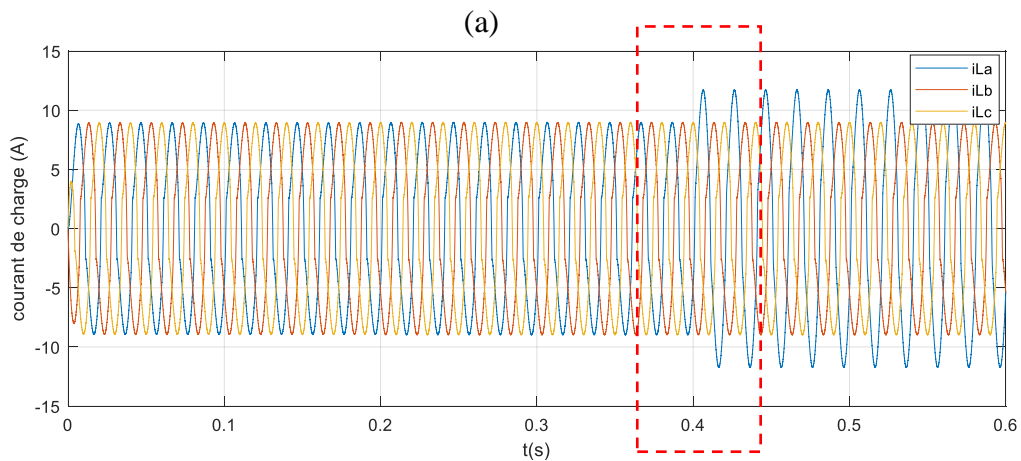
### III.2.2. Système avec filtre actif pour une charge non-linéaire équilibrée

A  $t=0.2s$ , le filtre actif est connecté et commence à injecter les courants nécessaires pour rendre le courant source exempt d'harmoniques (Figure (III.2.b)). Le THD du courant source est réduit de 11.99% à 0,61% (voire la figure (III.3.a et III.3.b)). On observe également que le courant neutre de la source est compensé (Figure (III.2.i)). Le courant de source est en phase avec sa tension de phase correspondante comme illustré sur la figure (III.2.g), qui signifie que l'opération de facteur de puissance unitaire est réalisée avec succès. D'après la figure (III.2.c), la tension continue est principalement régulée à sa valeur de référence.

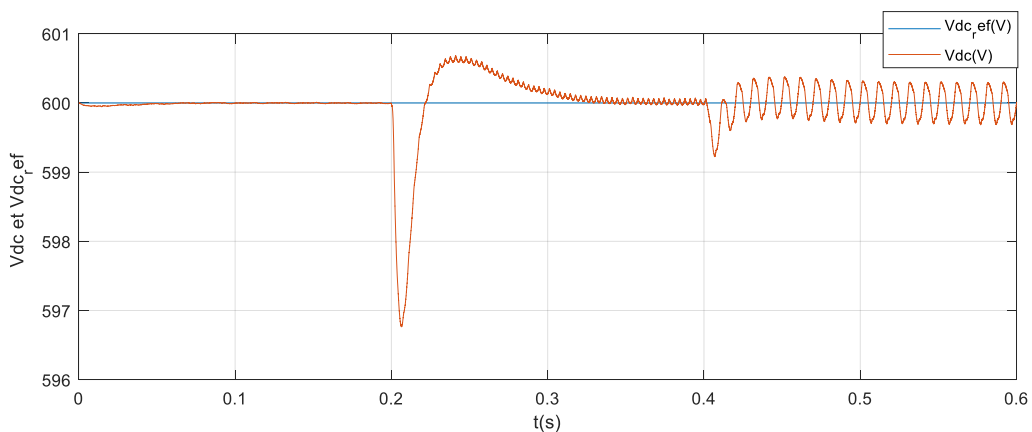
### III.2.3. Système avec filtre actif pour une charge non-linéaire déséquilibrée

Afin de créer des courants de charge non linéaires déséquilibrés, une charge linéaire supplémentaire est connectée en phase (a) à  $t = 0,4 s$ . Les figures (III.2.b) et (III.2.i) montrent que le filtre actif parallèle remplit efficacement sa fonction ; il compense bien les composantes négatives et homopolaires du courant de charge nécessaires pour rendre le courant source sinusoïdal et équilibré. De plus, comme le montre les figures (III.2.c, III.2.g, III.2.i), le filtre actif parallèle peut également corriger le facteur de puissance, compenser le courant neutre de la source et maintenir la tension continue du condensateur au niveau souhaité.

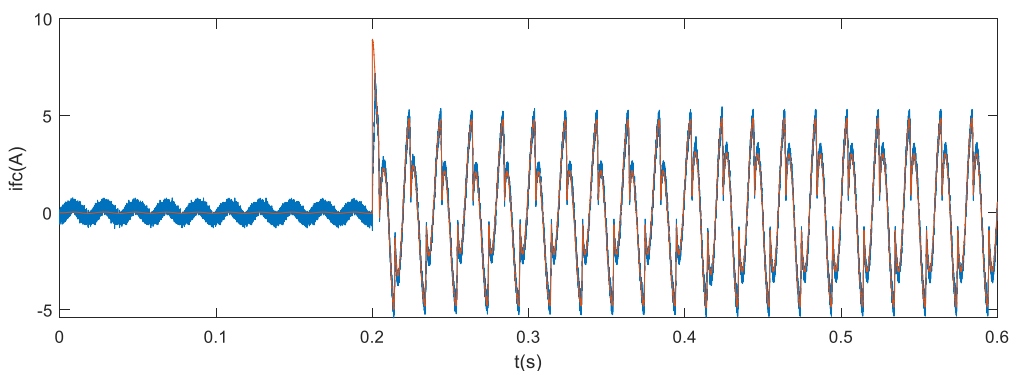




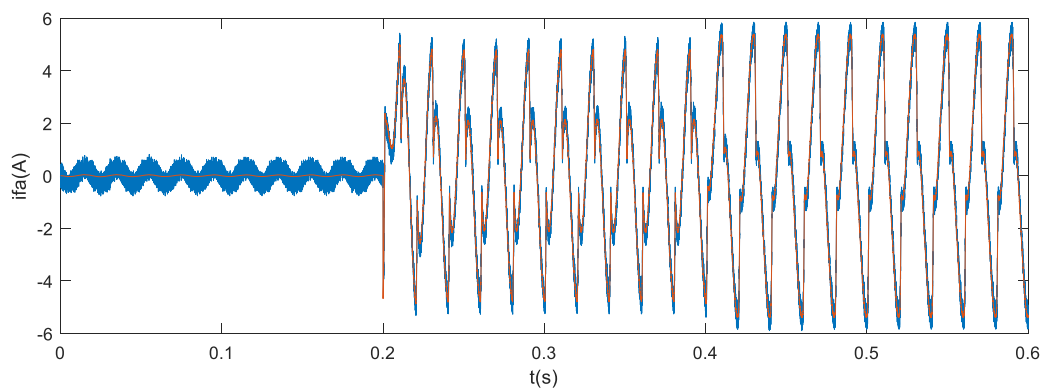
(c)



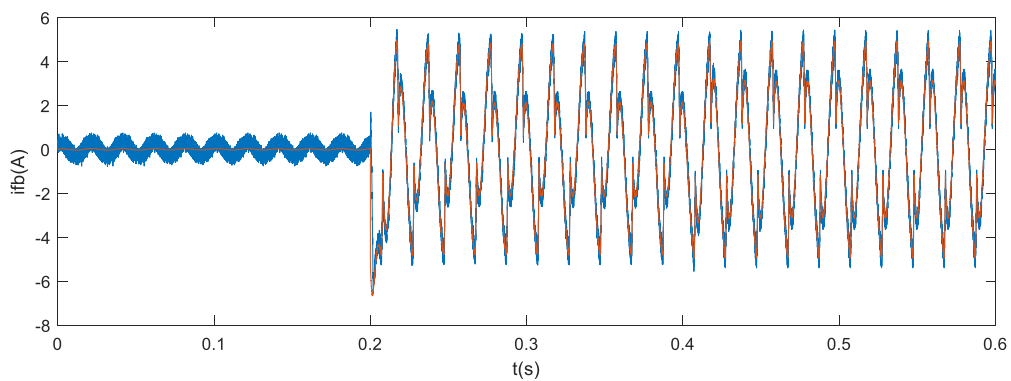
(d)



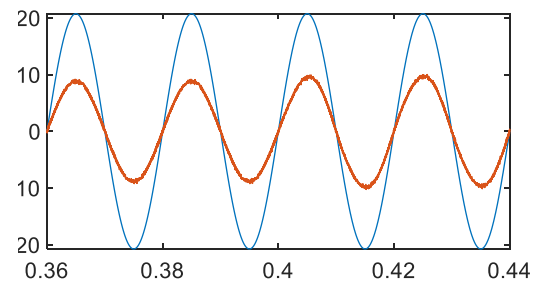
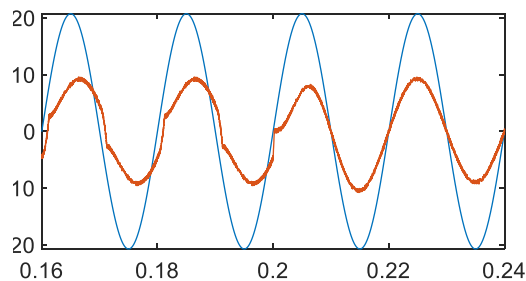
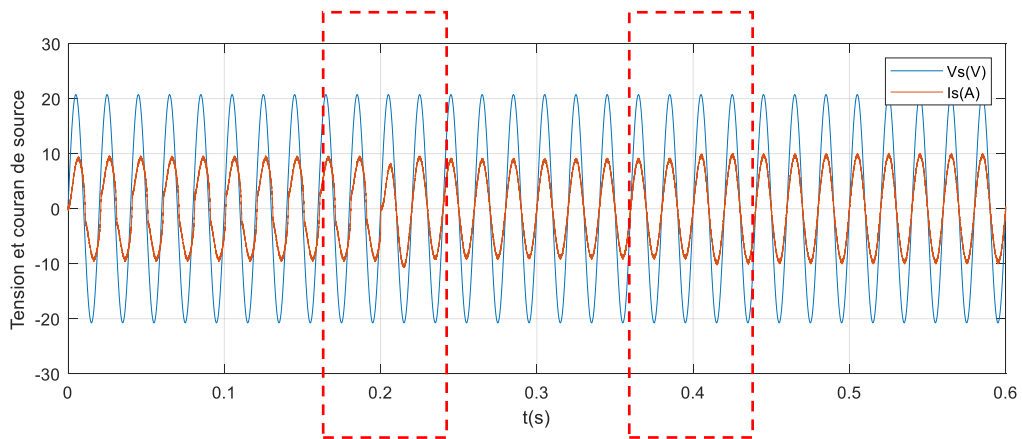
(e)



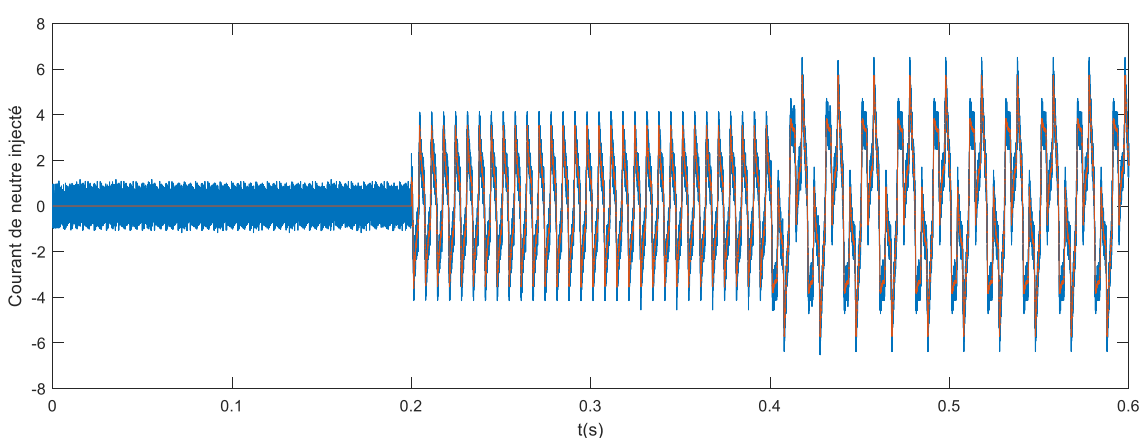
(f)



(g)



(h)



(i)

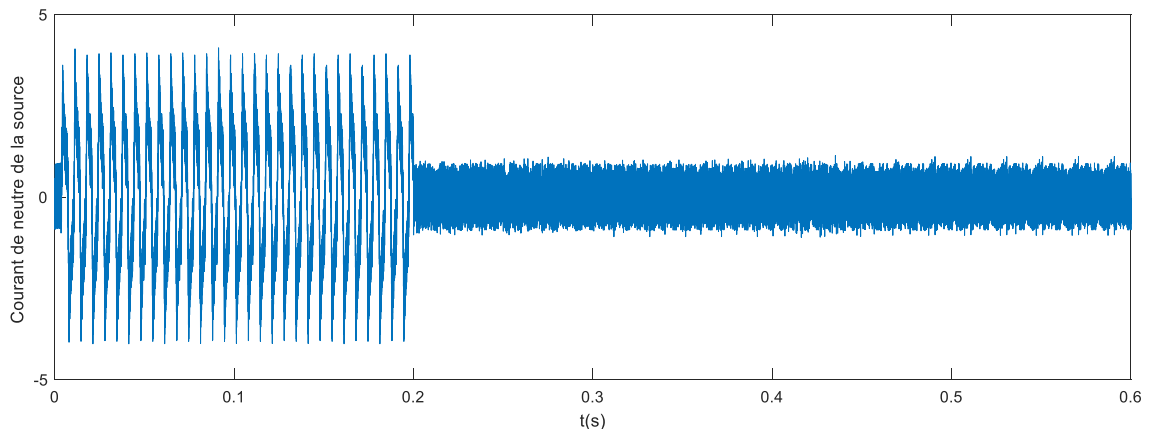


Figure (III.2) : Performances du filtre actif à quatre bras, (a) courant de charge, (b) courant de source, (c) tension continue, (d)-(f) Courant de filtre injecté, (g) tension de source réduite et sa courant correspondant, (h) courant de neutre injecté, (i) courant de neutre de la source

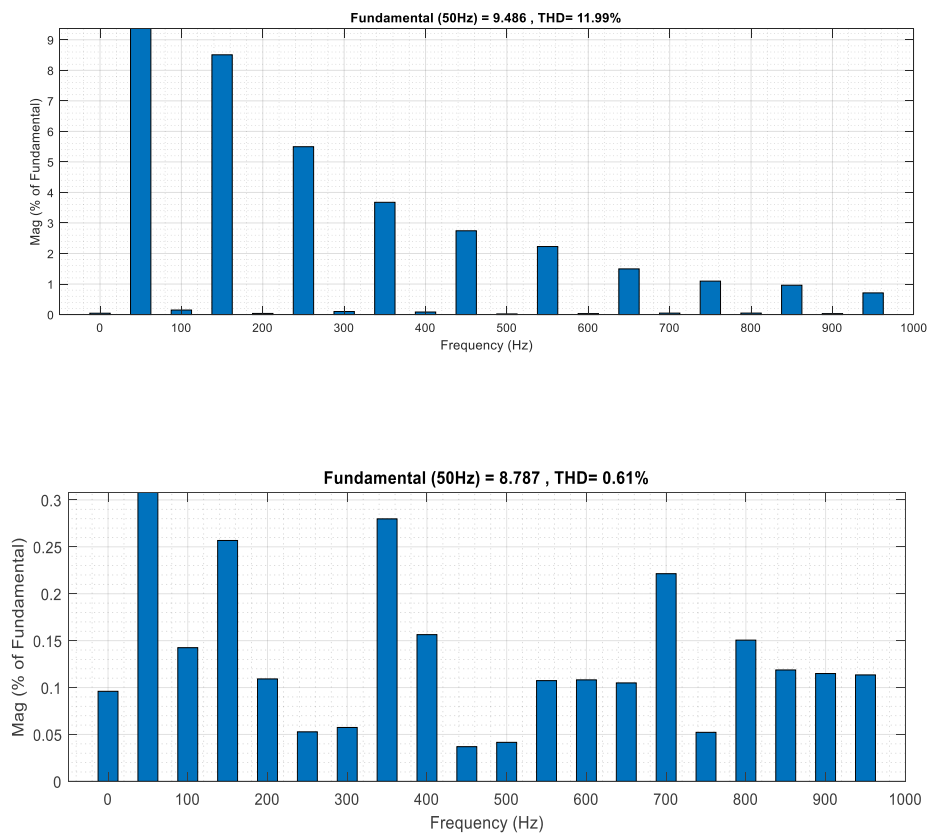


Figure (III.3) Spectre d'harmonique de courant de source avant et après le filtrage

### III.3. Conclusion

Dans ce chapitre, des résultats de simulation ont été présentés pour le filtre actif à quatre bras. Les performances de filtre sont examinées sous des conditions des charges équilibrés et déséquilibrés. L'ensemble des résultats de simulation montrent l'efficacité du filtre en termes d'élimination des harmoniques, de compensation de puissance réactive et de suppression de courant neutre.

# *Conclusion Générale*

Dans ce travail, nous avons tenu à améliorer les performances d'un filtre actif à quatre bras pour assurer la qualité de l'énergie électrique dans le réseau basse tension avec la distribution de fils neutres. Le filtre actif parallèle vise à compenser les courants perturbateurs harmoniques, réactifs et déséquilibrés afin de maintenir un système de courant triphasé côté sources sinusoïdal, équilibré ou en ligne, séparant les perturbations causées par des charges non linéaires du réseau.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté les caractéristiques des perturbations électriques des réseaux électriques connectés à des charges dites polluantes, et présenté les origines des harmoniques. Différentes solutions ont été présentées quels soient conventionnelles ou modernes (le filtrage actif série, parallèle ou hybride ...). Ensuite, nous avons présenté les normes imposées sur le taux de distorsion harmonique (THD) pour les utilisateurs selon certaines organisations de normalisation.

Nous nous sommes fixés comme objectif d'éliminer les perturbations de types courant provenant des charges non linéaires, pour cela, nous nous sommes limités à étudier et analysé la solution de filtrage actif parallèle à quatre-bras.

Dans le second chapitre, nous avons étudié la structure générale du filtre actif parallèle à quatre bras et présenté le principe de ce filtre comme solution de dépollution des harmoniques de courant et de l'énergie réactive générée par les charges polluantes. Pour cela, nous avons présenté l'onduleur ainsi que le filtre de découplage. Nous avons utilisé la technique de repère synchrone pour extraire les références des courants harmonique et la commande hystérise pour contrôler les courants injectés par filtre actif parallèle quatre-bras.

Dans le dernier chapitre, des résultats de simulation ont été présentés pour le filtre actif parallèle à quatre bras. Les performances de filtre sont examinées sous des conditions des charges équilibrés et déséquilibrés. L'ensemble des résultats de simulation montrent l'efficacité du filtre en termes d'élimination des harmoniques, de compensation de puissance réactive et de suppression de courant neutre.

A titre de perspectives, ce travail peut être étendu suivant les axes ci-dessous :

- Application des techniques de commandes non-linéaires pour améliorer les performances du filtre actif parallèle quatre-bras ;
- Utilisation des onduleurs multiniveaux quatre-bras ;
- Implémentation pratique des algorithmes de commande.



## ***Références et Bibliographie***

- [1] 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.
- [2] I. GHADBANE, « Commande d'un Filtre Actif Triphasé Parallèle Par Différents Régulateurs », Thèse de magistère, Université Mohamed Kheider-Biskra, 2009.
- [3] M. ALALALI, « Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension », Thèse Doctorat de l'Université Louis Pasteur-Strasbourg I, 2002.
- [4] T. DEFLANDRE et P. MAURS, « Les Harmoniques sur les Réseaux Électriques », Direction des Etude et Recherche en France -Edition EYROLLES, 1998.
- [5] M. Tidjani, « Stratégies de Commande d'un Filtre Actif Parallèle à Quatre Fils », Thèse de magistère, CENTRE UNIVERSITAIRE D'EL-OUED, 2012.
- [6] J. SCHONEK, « Les Singularités de l'Harmonique 3 », Extrait du Collection technique en° 202, Schneider Electric, p. 3, 2000.
- [7] 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.
- [8] G. Desquilbet, C. Foucher, P. Fauquembergue, « Statistical analysis of voltage dips Notes EDF, 96NR00102, 1995.
- [9] 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.
- [10] Karim KHELIFI, Mohamed TIENTI. « Etude comparative de techniques d'extraction de courants de référence pour un filtre actif parallèle à quatre bras », Université Abou Bekr Belkaid .Tlemcen, 2017.
- [11] H. Salem, « Commande d'un Filtre Actif Parallèle à 4 bras par des techniques avancées », Université de Biskra, Mémoire de Magister, 2015.

- [12] A.Chaghi, A.Guettafi, A.Benoudjit, « Four legged active power filter compensation for autility distribution system.», Journal of ELECTRICAL ENGINEERING, VOL. 55, NO.1-2, 2004.
- [13] K.Djazia , « Etude des filtres actifs pour réseaux déséquilibrés et distordus » , Université Ferhat Abbas – Setif , Thèse de Doctorat , 2015.
- [14] N.K.Nguyin , « Approche neuromimétrique pour l'identification et la commande des système électrique : Application aux filtrage actif et aux actionneurs synchrones.» ,Université Haute Alsace – Mulhouse, 2010.
- [15] N. Hanna Mandalek, “Qualité de L’onde Electrique et Moyens de Mitigation”, Thèse de Doctorat, Ecole de Technologie Supérieure Univ. Québec, 2003.
- [16] Amaia Lopez de Heredia Bermeo, “Commandes Avancées des Systèmes Dédies à l’Amélioration de la Qualité de l’Energie : de la Basse Tension a la Montée en Tension”, Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, Novembre. 2006.
- [17] Tri Desmana RACHMILDHA, "La Commande Hybride Prédictive d'un Convertisseur Quatre Bras", Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique Univ .Toulouse, 1<sup>er</sup> Octobre 2009.

## **Résumé**

Les réseaux de distribution sont soumis à des problèmes de pollution harmonique de plus en plus préoccupants avec l'augmentation de l'utilisation des charges non linéaires. Dans ce travail, une étude théorique avec simulation a été présentée du contrôleur de courant de bande d'hystérésis pour un filtre active parallèle à quatre-bras pour améliorer la qualité de puissance d'un réseau électrique triphasé à quatre fils dans des conditions équilibrées et déséquilibrées. Les résultats de la simulation ont prouvé que la méthode de commande présentée pour le filtre active parallèle à quatre-bras peut assurer une compensation complète des courants harmoniques, de la puissance réactive et du courant neutre.

## **Mots-clés :**

Filtre active parallèle à quatre-bras, Compensation de la puissance réactive, Onduleur de tension, commande hystérésis, filtrage des harmoniques.

## **Abstract**

The distribution networks are subject to increasingly worrying harmonic pollution problems with the increase in the use of non-linear loads. In this work, a theoretical study with simulation have been presented of the hysteresis band current controller for four-leg shunt active power filter to improve the power quality of a three-phase four-wire electrical network in balanced and unbalanced conditions. The simulation results have proved that the presenting controller for four-leg shunt active power filter can ensure full compensation of harmonic currents, reactive power, and neutral current.

## **Keywords:**

Four-leg shunt active power filter, Reactive power compensation, Voltage source inverter, hysteresis control, harmonic filtering.

## **الملخص**

تتعرض شبكات التوزيع الكهربائية لمشاكل التلوث التوافقي بشكل متزايد مع الزيادة في استخدام الأحمال الغير الخطية. تم تقديم دراسة نظرية مع محاكاة لوحدة التحكم الحالية في نطاق التباطؤ لمرشح الطاقة النشط المحول بأربعة أرجل لتحسين جودة الطاقة للشبكة الكهربائية ثلاثية الأطوار بأربعة أسلاك في ظروف متوازنة وغير متوازنة. أثبتت نتائج المحاكاة أن وحدة التحكم الحالية لمرشح الطاقة النشطة التحويلة رباعية الأرجل يمكن أن تضمن التعويض الكامل للتيارات التوافقية والقوة التفاعلية والتيار المحايد.

## **الكلمات المفتاحية:**

مرشح طاقة نشط ذو أربعة أرجل ، تعويض الطاقة التفاعلية ، عاكس مصدر الجهد ، التحكم في التباطؤ ، التصفية التوافقية.