

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**Université A.MIRA-BEJAIA**



**Faculté de Technologie**  
**Département de Génie Electrique**  
**Spécialité: Electrotechnique**

# **Mémoire de Fin de Cycle**

En vue d'obtention d'un diplôme Master en Electrotechnique  
Spécialité:  
Electrotechnique Industrielle.

**Sous le thème**

---

**Commande d'un filtre actif d'harmonique à trois fils**

---

**Réalisé par :**

Mr HAMITI Tarik.  
M<sup>lle</sup> GAOUA Celia.

**Encadré par :**

Mr BOUDRIES Zoubir.

---

**Année Universitaire : 2017/2018**

---

# Remerciements

*Nous remercions DIEU, le tout-puissant de nous avoir donné la foi qui nous a guidée jusqu'à la réalisation et l'aboutissement de ce travail.*

*Nous tenons à remercier notre encadreur Mr Boudries zoubir pour son orientation.*

*Nous adressons nos plus sincères remerciements à Mr FELLA et à Mr ALOUI d'avoir accordé de leur temps et d'avoir accepté de juger notre travail.*

*Nos remerciements pour Mr ABDOUNE Kaddour.*

*Nos remerciements les plus sincères vont à tous les professeurs du département d'Electrotechnique de l'université de Béjaia qui n'ont pas hésité un instant pour nous orienter, et d'être à notre disposition à tout moment pour la réussite et la réalisation de notre travail.*

*Nos chers parents, pour leurs patiences et leurs sacrifices pour voir ce jour. Ils ont tout donné pour notre réussite.*

*Nos fidèles amis(es), tous nos remerciements pour vous, pour avoir participé soit de près soit de loin à la réalisation de ce travail.*

*Mlle. Celia*

*Mr. Tarik*

# Dédicaces

*Je dédie ce fruit de travail :*

*A ma très chère maman, pour sa tendresse, sa bienveillance, son encouragement, pour ce qu'elle a fait depuis mon enfance jusqu'à ce jour.*

*A mon cher père pour sa générosité, sa bonté, je vous remercie cher père du fond du cœur pour tout ce que vous avez fait pour moi.*

*A mes frères et A ma chère sœur*

*Et mon grand père, ma grande mère que dieu vous garde tout près de moi.*

*A ma chère binôme SINOUH*

*A tous mes amis sans exception en particulier la promotion 2<sup>ème</sup> Année électrotechnique industriel 2018 et les résidents de RUTO.*

*En fin à tous ceux qui nous aime et qu'on aime.*

*TARIK,*

# DEDICACES

*Je dédie ce travail à*

*Mes parents :*

*Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.*

*Mon père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit ; Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de vous.*

*Ma grande mère que dieu vous garde pour nous.*

*Toute la famille GAOUA et la famille KHOUKHI.*

*Mes frères et sœurs qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité.*

*Mon cher binôme Tarik*

*Mes chers amis(es), à qui je souhaite le succès et le bonheur, Pour l'amitié qui nous a toujours unis et les bons moments que nous avons passés ensemble.*

*Toute la promotion Electrotechnique 2018*

*Mes professeurs, qui doivent voir dans ce travail la fierté d'un savoir bien acquis.*

*Celia*

---

**Symboles**

$h$	Rang de l'harmonique.
$i_{ch}$	Courant de charge.
$I_{c1}$	La valeur efficace du fondamentale.
$I_n$	La valeur maximale du courant fondamental.
$n$	Nombre entier.
$\varphi_n$	Le déphasage de la composante harmonique à l'instant initial ( $t=0$ ).
$Y_h$	La composante harmonique de rang $h$ .
$Y_1$	La composante fondamentale.
$P$	Puissance active.
$Q$	Puissance réactive.
$D$	Puissance déformante.
$I_c$	La valeur efficace du courant de la charge
$F_{dis}$	Facteur de distorsion
$\varphi$	Déphasage entre le courant fondamental et la tension.
$F_p$	Facteur de puissance.
$i_s$	Courant de la source.
$i_{inj}$	Courant injecté par l'onduleur.
$V_{dc}$	Tension du bus continu.
$C_{dc}$	Condensateur de stockage.
$P_{dc}$	Puissance absorbé par le condensateur.
$S$	Interrupteur.
$L_f$	Inductance du filtre de sortie.
$r_f$	Résistance du filtre de sortie.
$C_f$	Capacité du filtre de sortie.
$L_s$	Inductance de la ligne.
$R_s$	Résistance de la ligne.

---

$Z_s$	Impédance du réseau.
$\varepsilon$	Le taux d'ondulation admissible.
$v_\alpha, v_\beta$	Tensions dans le repère $(\alpha, \beta)$ .
$i_\alpha, i_\beta$	Courants dans le repère $(\alpha, \beta)$ .
$p, q$	Puissance réelle, imaginaire.
$\bar{p}, \bar{q}$	Puissances continues.
$\tilde{p}, \tilde{q}$	Puissances alternatives.
$\hat{\theta}_d$	Angle de rotation instantané.
$v_d, v_q$	Projections des tensions instantanées sur les axes tournants d et q.
$\omega_h$	La pulsation du rang h.
$\theta$	Ange de la transformée de Park.
$m$	Indice de modulation.
$r$	Taux de modulation.
$f_p$	Signal de modulation triangulaire.
$f_r$	Signal de référence sinusoïdale.
$K_i$	Coefficient d'action intégral.
$K_p$	Coefficient d'action proportionnel.
Th	Thyristor
$\omega$	Pulsation de réseau.
$V_m$	L'amplitude de la tension simple.
$i_{ref}$	Courant de référence.

### Abréviations

THD	Taux de distorsion harmonique.
CEI	Commission Electrotechnique International.
FAP	Filtre Actif Parallèle.
FAS	Filtre Actif Série.
IGBT	Transistor bipolaire à grille isolée.
MLI	Modulation de la largeur d'impulsion.
PIRI	Puissance instantanée réelles et imaginaire.
FPB	Filtre passe bas.
PI	Correcteur proportionnel intégral.

**Liste des figures**

**Figure I.1.** Creux et coupure de tension.....3

**Figure I.2.** Fluctuation de tension.....3

**Figure I.3.** Déséquilibre de tension.....4

**Figure I.4.** Fluctuation de fréquence.....4

**Figure I.5.** Harmoniques et inters harmoniques.....5

**Figure I.6.** Distorsion harmonique.....7

**Figure I.7.** Charge linéaire.....10

**Figure I.8.** Charge non linéaire.....10

**Figure I.9.** Filtre résonnant.....11

**Figure I.10.** Filtre passif amorti.....11

**Figure I.11.** Filtre actif série.....12

**Figure I.12.** Filtre actif parallèle.....12

**Figure I.13.** Combinaison parallèle-série actifs.....13

**Figure I.14.** Filtre actif hybride.....13

**Figure II.1.** Schéma électrique d'un réseau triphasé..... 15

**Figure II.2.** Gradateur triphasé.....16

**Figure II.3.** Principe du filtre actif parallèle.....17

**Figure II.4.** Structure générale du FAP..... 18

**Figure II.5.** Onduleur de tension triphasé..... 19

**Figure II.6.** Onduleur de tension avec filtre de sortie L et LCL.....23

**Figure II.7.** Représentation graphique de la transformation  $abc - \alpha\beta$ .....24

**Figure II.8.** Principe de séparation des puissances..... 25

**Figure II.9.** Algorithme d'identification par la méthode des puissances instantanée..... 27

**Figure II.10.** Algorithme d'identification des courants par la méthode synchrone..... 28

<b>Figure II.11.</b>	Boucle de régulation de la tension continue.....	29
<b>Figure II.12.</b>	Boucle de régulation des courants du filtre actif parallèle.....	30
<b>Figure II.13.</b>	Commande par hystérésis.....	31
<b>Figure II.14.</b>	Commande des interrupteurs par hystérésis.....	32
<b>Figure II.15.</b>	Commande MLI.....	32
<b>Figure II.16.</b>	Principe de la commande MLI.....	33
<b>Figure III.1.</b>	Schéma synoptique de l'association filtre actif-réseau-charge polluante.....	34
<b>Figure III.2</b>	Courant de source triphasé avant le filtrage.....	35
<b>Figure III.3.</b>	Courant de source pour la phase a.....	36
<b>Figure III.4.</b>	Spectre d'harmonique du courant de source avant le filtrage.....	36
<b>Figure III.5.</b>	Courant identifier par la méthode des PIRI.....	37
<b>Figure III.6.</b>	Courant identifié pour la phase a.....	37
<b>Figure III.7.</b>	Courant injecté par le FAP.....	38
<b>Figure III.8.</b>	Courant injecté par le FAP pour la phase a.....	38
<b>Figure III.9.</b>	Courant de référence et courant injecté par le FAP.....	39
<b>Figure III.10.</b>	Courants de source après le filtrage.....	39
<b>Figure III.11.</b>	Courant de source phase a.....	40
<b>Figure III.12.</b>	Spectre harmonique du courant de source après le filtrage.....	40

**Liste des tableaux**

**Tableau I.1.** Niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles sur les réseaux publics basse tension (norme CEI 61000-2-2).....9

**Tableau I.2.** Limite des composantes harmoniques en courant (norme CEI 61000-3-2).....9

**Tableau II.1.** Tensions générées par l'onduleur.....21

**Tableau III.1.** Paramètre de simulation.....35

**Remerciements**

**Dédicaces**

**Symboles**

**Abréviations**

**Liste des figures**

**Liste des tableaux**

**Table des matières**

**Introduction générale..... 1**

**Chapitre I: Généralités sur la pollution harmonique et les méthodes de dépollution**

**I.1 Introduction ..... 2**

**I.2 Qualité de l'énergie électrique..... 2**

**I.3 Perturbations électriques ..... 2**

I.3.1 Creux et coupure de tension..... 2

I.3.2 Fluctuation de tension ..... 3

I.3.3 Déséquilibre des systèmes électriques triphasés ..... 3

I.3.4 Fluctuation de fréquence ..... 4

I.3.5 Harmoniques et inter harmoniques ..... 4

**I.4 Les perturbations harmoniques ..... 5**

I.4.1 Origine des harmoniques ..... 5

I.4.2 Conséquences des harmoniques ..... 5

I.4.3 Analyse des harmoniques ..... 5

I.4.3.1 Développement mathématiques ..... 6

I.4.3.2 Taux de distorsion harmonique THD(%) ..... 7

I.4.3.3 Facteur de puissance ..... 8

**I.5 Normes ..... 8**

**I.6 Types de charges ..... 10**

<b>I.7 Solutions de dépollution des réseaux électriques</b> .....	10
I.7.1 Filtrage passif.....	10
I.7.1.1 Filtre passif résonant .....	11
I.7.1.2 Filtre passif amorti .....	11
I.7.1.3 Inconvénients des filtres passifs.....	11
I.7.2 Filtrage actif .....	12
I.7.2.1 Filtrage actif série.....	12
I.7.2.2 Filtre Actif parallèle .....	12
I.7.2.3 La combinaison parallèle-série actifs.....	13
I.7.2.4 Filtre actif hybride.....	13
<b>Conclusion</b> .....	14

## **Chapitre II: Modélisation et commande du filtre actif parallèle**

<b>II.1 Introduction</b> .....	15
<b>II.2 Modélisation du réseau électrique</b> .....	15
<b>II.3 Modélisation de la charge</b> .....	15
<b>II.4 Principe du filtre actif parallèle</b> .....	16
<b>II.5 Structure générale d'un filtre actif parallèle</b> .....	17
<b>II.6. Etude de la partie puissance</b> .....	18
II.6.1 Onduleur de tension triphasé .....	18
II.6.1.1 Structure générale .....	18
II.6.1.2 Tension fournie par l'onduleur.....	19
II.6.2 Circuit de stockage d'énergie.....	21
II.6.3 Filtre de sortie .....	22
II.6.3.1 Filtre du premier ordre .....	22
II.6.3.2 Filtre du troisième ordre .....	22
<b>II.7 Etude de la partie commande</b> .....	23
II.7.1 Détermination des références harmoniques.....	23
II.7.2 Puissance en présence des harmoniques .....	23
II.7.2.1 Séparation des puissances perturbatrices.....	25
II.7.2.2. Algorithme d'identification basé sur la méthode des puissance instantanées ....	27

II.7.3 Méthode de détection synchrone .....	27
II.7.4 Régulation de la tension continue.....	28
II.7.5 Régulation du courant de filtre actif parallèle .....	30
<b>II.8 La commande de l'onduleur</b> .....	<b>31</b>
II.8.1 Commande par hystérésis .....	31
II.8.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI).....	32
II.8.2.1 Principe de la commande MLI sinus-triangle.....	33
<b>Conclusion</b> .....	<b>33</b>

### Chapitre III: Simulation et interprétation des résultats

<b>III.1 Introduction</b> .....	<b>34</b>
<b>III.2 Schéma synoptique de l'association filtre actif-réseau-charge polluante</b> .....	<b>34</b>
<b>III.3 Paramètres de simulation</b> .....	<b>35</b>
<b>III.4 Résultats de simulation</b> .....	<b>35</b>
III.4.1 Avant le filtrage.....	35
III.6.2 Après le filtrage .....	37
<b>Conclusion</b> .....	<b>40</b>
<b>Conclusion générale</b> .....	<b>41</b>

# INTRODUCTION GENERALE

### Introduction générale

Les perturbations de courant et de tension dans les réseaux de distribution sont causées par l'utilisation des charges non linéaires, telles que les convertisseurs statiques (les redresseurs, les gradateurs, etc.), le matériel informatique, les éclairages à base de tubes fluorescents et les appareils électroménagers. Ces appareils absorbent des courants non sinusoïdaux et introduisent de ce fait des pollutions harmoniques. Ces harmoniques de courant génèrent des tensions harmoniques aux différents points de connexion au réseau. Cette pollution perturbe le fonctionnement normal de certains équipements électriques et peut même engendrer leur destruction [1].

Plusieurs solutions de dépollution traditionnelles et modernes sont proposées pour faire face aux phénomènes des perturbations harmoniques. Les solutions traditionnelles à base de circuits passifs LC calculés en concordance avec les rangs d'harmonique à filtrer, sont souvent pénalisées en termes d'encombrement et de résonance. L'évolution de l'électronique de puissance a favorisé la mise en œuvre de filtres actifs qui sont moins encombrants, n'occasionnent aucune résonance avec les éléments du réseau et font preuve d'une grande flexibilité face à l'évolution du réseau électrique et de la charge polluante [2].

Le travail présenté dans ce mémoire consiste en l'étude d'un filtre actif parallèle pour la compensation des harmoniques de courant générés par une charge polluante connecté au réseau électrique.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté les perturbations harmoniques, leurs origines, leurs effets sur le réseau d'alimentation et les normes inhérentes à ces perturbations. Nous avons également présenté les solutions de dépollution.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude du filtre actif parallèle à base de l'onduleur de tension. Nous avons présenté les méthodes d'identification des courants harmoniques, la régulation de la tension continue et la commande de l'onduleur.

Au dernier chapitre, nous présenterons la simulation de l'ensemble réseau d'alimentation, filtre actif parallèle et la charge polluante sous Matlab/Simulink/SimPowerSystemes. Les résultats obtenus seront présentés.

Finalement, nous terminerons par une conclusion générale.

# CHAPITRE I

## I.1 Introduction

L'objectif des réseaux électriques est de fournir une énergie électrique propre aux consommateurs, sous forme d'une tension sinusoïdale et de fréquence constantes.

Lorsqu'on connecte sur le réseau des convertisseurs tels que les gradateurs et les redresseurs, il doit faire face à de nombreux types de perturbations. Pour éliminer ces perturbations il faut bien comprendre les caractéristiques, les origines et les effets de ces dernières afin de trouver les solutions qui conviennent [3].

Dans ce chapitre nous allons exposer les différentes perturbations harmoniques et leurs effets sur la qualité de l'énergie électrique. Nous présentons ensuite les différentes solutions utilisés pour pallier aux problèmes liés aux perturbations harmoniques.

## I.2 Qualité de l'énergie électrique

La qualité de l'énergie électrique délivrée aux utilisateurs dépend de ces quatre paramètres:

- L'égalité de l'amplitude des trois tensions.
- La fréquence constante.
- La forme d'onde qui doit être sinusoïdale.
- La symétrie du système triphasé, caractérisé par l'égalité des modules des trois tensions et leurs déphasages relatifs [4].

## I.3 Perturbations électriques

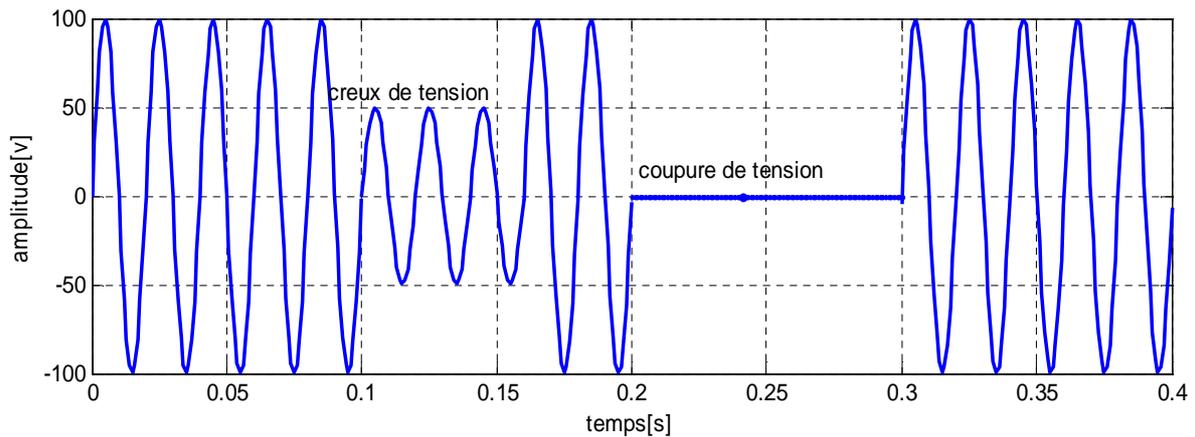
Toute perturbation électrique se manifestant dans les tensions ou les courants peut causer des dégâts importants sur les équipements électriques. Elles sont de différentes origines et de diverses natures :

- Longues ou permanentes : harmoniques, fluctuation de tension...etc.
- Brèves : creux de tension, coupures brèves et surtensions [4].

### I.3.1 Creux et coupure de tension

Le creux de tension est une diminution brusque de la tension d'alimentation de 10% à 90% de la tension nominale pendant une période variant de 10 ms jusqu'à quelques secondes.

Les creux de tension sont dus à des phénomènes naturels comme la foudre ou aléatoires comme tous les courts circuits sur les réseaux de distribution. Ils apparaissent aussi lors de manœuvre d'enclenchement mettant en jeu des courants de fortes intensités (moteurs, transformateurs, etc.). Une coupure de tension est la diminution de la tension à une valeur inférieure à 10% de la tension nominale ou l'interruption de la tension pendant une période qui ne dépasse pas une minute [5].

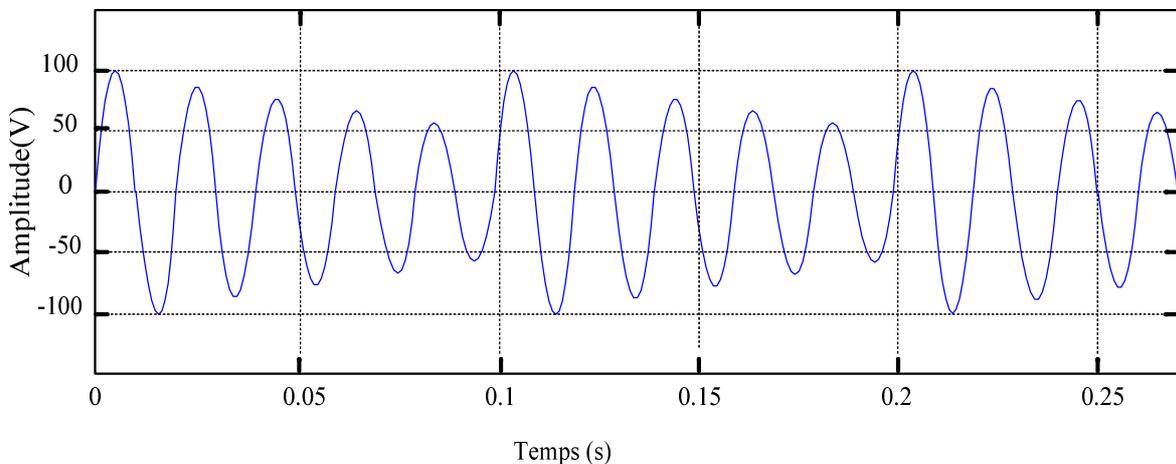


**Figure I.1.** Creux et coupure de tension.

### I.3.2 fluctuation de tension

Les fluctuations de tension sont une suite de variation de tensions ou des variations cycliques ou aléatoires. Ces variations ont une amplitude généralement de 10% de sa valeur nominale, mais peuvent se produire plusieurs fois par seconde.

Les fluctuations de tension sont principalement causées par les charges dont l'appel en courant varie rapidement et d'une manière continue [3].

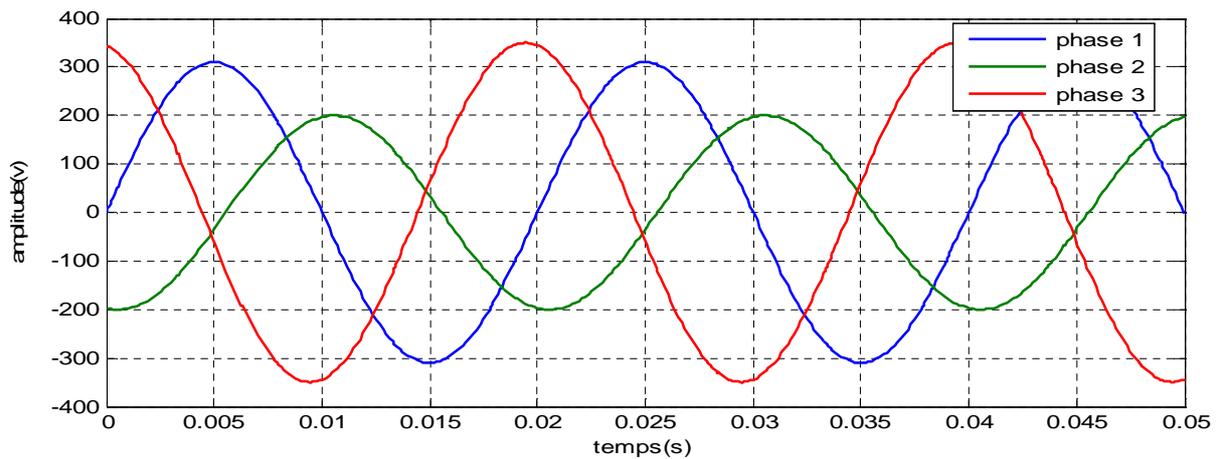


**Figure I.2.** Fluctuation de tension.

### I.3.3 Déséquilibre des systèmes électriques triphasés

On dit qu'un système électrique triphasé est déséquilibré lorsque l'amplitude des tensions n'est pas identique et/ou leurs phases ne sont pas décalées d'un angle de  $120^\circ$  les unes par rapport aux autres.

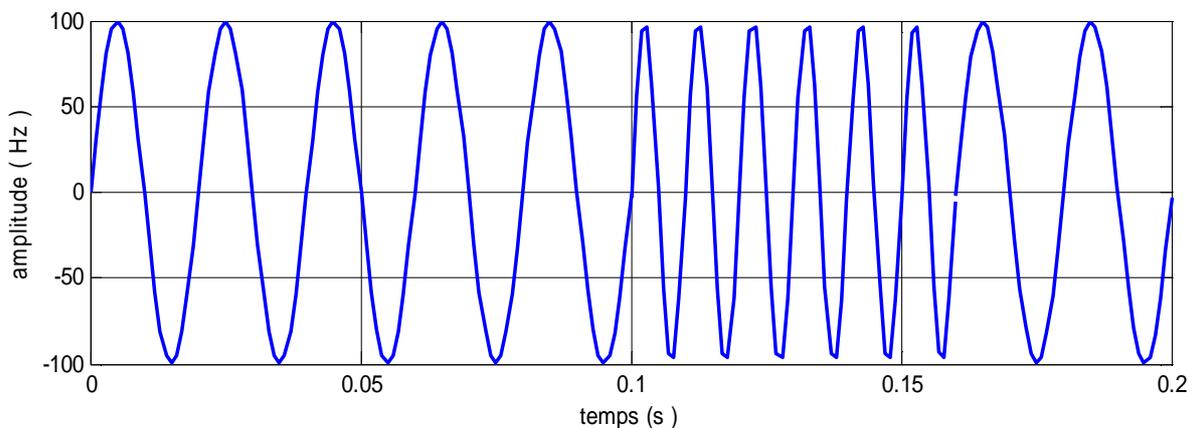
Un réseau électrique triphasé équilibré alimentant un récepteur électrique triphasé non équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation des courants non équilibrés dans les impédances du réseau [6].



**Figure I.3.** Déséquilibre de tension.

### I.3.4 Fluctuation de fréquence

Les réseaux de distribution ou de transport ont une fréquence constante, sa variation est très rare sauf dans des circonstances exceptionnelles, comme dans les cas de certains défauts graves sur le réseau. Dans les conditions normales d'exploitations, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle de 50 Hz  $\pm 1\%$  [6].



**Figure I.4.** Fluctuation de fréquence.

### I.3.5 Harmoniques et inters harmoniques

Les harmoniques sont des signaux sinusoïdaux dont la fréquence est un multiple de la fréquence fondamental (50 Hz ou 60 Hz). La superposition de ces ondes sur l'onde fondamentale provoque une déformation du signal.

Les inters harmoniques sont des signaux également sinusoïdaux dont la fréquence n'est pas un multiple de la fréquence fondamentale. Les causes principales des inters harmoniques sont les convertisseurs statiques de fréquence, les fours à arc... etc. [7].

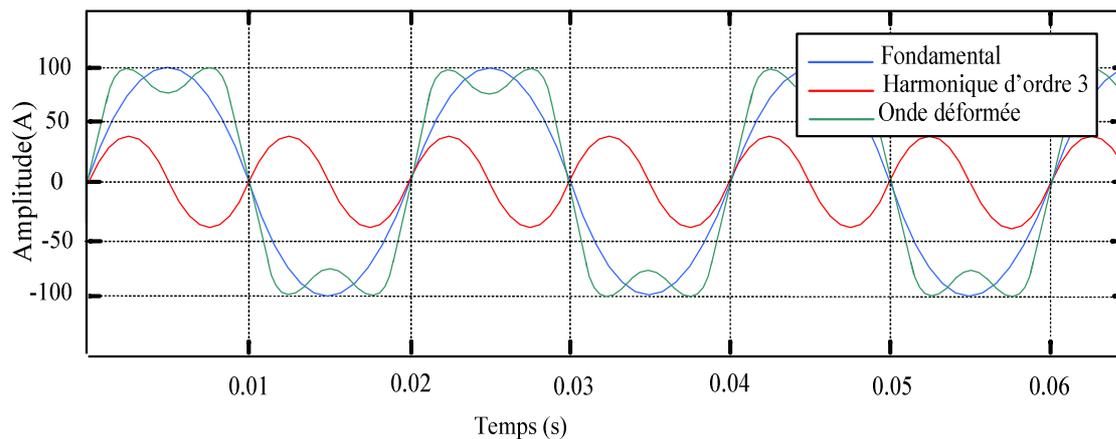


Figure I.5. Harmoniques et inters harmoniques.

## I.4 les perturbations harmoniques

### I.4.1 Origine des harmoniques

Les principales causes des harmoniques sont les appareils d'éclairage fluorescent, variateurs de vitesse, les appareils domestiques (téléviseurs, ordinateurs, etc.), tout les convertisseurs statiques connectés aux réseaux (redresseurs, gradateurs, etc.).

Les harmoniques sont générés par ces équipements électriques qui sont considérés comme des charges non linéaires absorbant un courant non sinusoïdal [8].

### I.4.2 Conséquences des harmoniques

Les courants harmoniques se propagent dans le réseau électrique, ils conduisent à des effets néfastes sur le réseau de distribution. On peut classer ces effets en deux types : les effets immédiats (instantanés) et les effets à terme [5].

#### a. Effets immédiats :

Ils apparaissent immédiatement dans certains appareillages.

- ✓ Défauts de fonctionnement de certains équipements électriques.
- ✓ Troubles fonctionnels des micro-ordinateurs.
- ✓ Erreurs dans les appareils de mesure.
- ✓ Vibrations et bruits.

#### b. Effets à terme :

Ils apparaissent après une exposition plus ou moins longue à la perturbation harmonique.

- ✓ Echauffement des câbles et des équipements.
- ✓ Echauffement des condensateurs.
- ✓ Echauffement dû aux pertes supplémentaires des machines et des transformateurs.

### I.4.3 Analyse des harmoniques

L'analyse des signaux perturbés est basée sur la notion mathématique de la série de Fourier, qui permet de décomposer les signaux électriques non sinusoïdaux en composantes fondamentale et harmonique.

#### I.4.3.1 Développement mathématique

Tout signal périodique (tension, courant, flux), admet une décomposition en série de Fourier. Le courant absorbé par une charge non linéaire est de la forme suivante [9] :

$$i_{ch} = I_1 \sin(\omega t) + I_1 \cos(\omega t) + I_2 \sin(2\omega t) + I_2 \cos(2\omega t) + I_3 \sin(3\omega t) + I_3 \cos(3\omega t) + \dots + I_n \sin(n\omega t) + I_n \cos(n\omega t). \quad (I.1)$$

Cette expression est appelé série de Fourier. D'une manière générale on peut l'écrire comme suit :

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t) \quad (I.2)$$

Mathématiquement les coefficients  $a_0$ ,  $a_n$ ,  $b_n$  sont exprimés par les relations suivantes :

$$\begin{cases} a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) d(t) \\ a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(n\omega t) d(t) \\ b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(n\omega t) d(t) \end{cases} \quad (I.3)$$

L'expression du courant de la charge non linéaire est donné par :

$$i_{ch}(t) = \sum_{n=2}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (I.4)$$

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

$$i_{ch}(t) = I_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + \sum_{n=2}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (I.5)$$

Avec

$i_{ch}(t)$ : Le courant de charge.

$I_n$ : La valeur maximale du courant fondamental.

$n$ : Nombre entier.

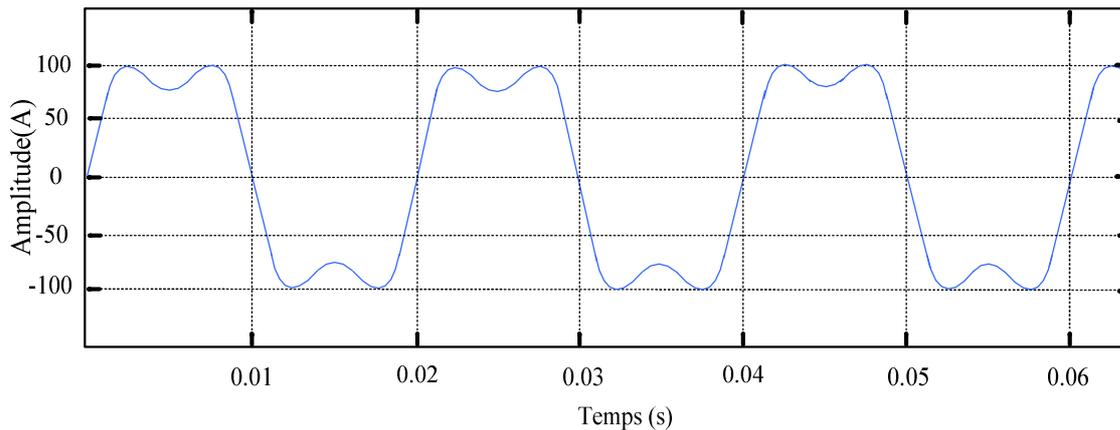
$\varphi_n$ : Le déphasage de la composante harmonique à l'instant initial ( $t=0$ ).

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

$$\begin{cases} I_n = \sqrt{(a_n^2 + b_n^2)} \\ \varphi_n = \tan^{-1} \left( \frac{b_n}{a_n} \right) \end{cases} \quad (\text{I.6})$$

### I.4.3.2 Taux de distorsion harmonique THD (%)

On appelle distorsion harmonique toute déviation en régime permanent, de la forme sinusoïdale idéale, de l'onde de tension ou de courant. Une distorsion harmonique est caractérisée par le taux de distorsion harmonique total [3].



**Figure I.6.** Distorsion harmonique.

Le taux individuel d'harmoniques est défini par le rapport entre l'amplitude de l'harmonique au rang  $n$  et l'amplitude du fondamental [10]:

$$THD = \frac{Y_h}{Y_1} \times 100\% \quad (\text{I.7})$$

$Y_h$  : La composante harmonique de rang  $h$ .

$Y_1$  : La composante fondamentale.

Le taux global de distorsion harmonique est défini par le rapport entre la valeur efficace des harmoniques et celle du fondamental [10]:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} Y_h^2}}{Y_1} \times 100\% \quad (\text{I.8})$$

$Y_h$  : La valeur efficace d'harmoniques du rang  $h$ .

$Y_1$  : La valeur efficace du fondamental.

**I.4.3.3 Facteur de puissance**

En présence des harmoniques, la puissance apparente  $S$  est composée de trois parties :  
Puissance active  $P$ , réactive  $Q$  et déformante  $D$ .

Son expression est donnée comme suit [11] :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (\text{I.9})$$

La puissance déformante  $D$  est dû aux harmoniques de courant avec :

$$D = 3V\sqrt{I_c^2 + I_{c1}^2} \quad (\text{I.10})$$

Ou

$I_c$  : La valeur efficace du courant de la charge ;

$I_{c1}$  : La valeur efficace du fondamentale.

Le facteur de puissance  $F_p$  est égal au quotient de la puissance active  $P$  par la puissance apparente  $S$  :

$$F_p = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (\text{I.11})$$

En posant

$$P = 3VI_{c1} \cos \varphi \quad (\text{I.12})$$

On aura

$$F_p = \frac{I_{c1}}{I_c} \cos \varphi = F_{dis} \cos \varphi \quad (\text{II.13})$$

$F_{dis}$  : représente le facteur de distorsion. Il vaut 1 lorsque le courant est parfaitement sinusoïdal.

$\varphi$  : représente le déphasage entre le courant fondamental et la tension.

**I.5 Normes**

Les normes et les réglementations ont pour but de limiter les dysfonctionnements occasionnés par les harmoniques. La Commission Electrotechnique International (CEI) définit le niveau des courants et des tensions harmoniques à ne pas dépasser par une série de normes de compatibilité électromagnétique (CEI 61000).

Nous pouvons citer à titre d'exemple [1] :

**La norme CEI 61000-2-2 :** Elle définit les niveaux de compatibilité de tensions harmoniques sur les réseaux publics basse tension. Elle est représentée sur le tableau I.1. Cette norme vise à protéger les équipements raccordés sur un réseau basse tension déformé, Et elle limite à 8% le THD jusqu'au 40<sup>ème</sup> rang.

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

Harmoniques impaires				Harmoniques paires	
Non multiples de 3		Multiple de 3		Rangs	Taux (%)
Rangs	Taux (%)	Rangs	Taux (%)		
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.3	6	0.5
13	3	21	0.2	8	0.5
17	2	>21	0.2	10	0.5
19	1.5			12	0.2
23	1.5			>12	0.2
25	1.5				
>25	0.2+1.3*25/h				

**Tableau I.1.** Niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles sur les réseaux publics basse tension (norme CEI 61000-2-2).

Harmoniques impaires		Harmoniques paires	
Rangs	Taux (%)	Rangs	Taux (%)
3	2.3	2	1.08
5	1.14	4	0.43
7	0.77	6	0.3
9	0.40	8 ≤ h ≤ 40	0.23*8/h
11	0.33		
13	0.21		
15 ≤ h ≤ 39	0.15*15/h		

**Tableau I.2.** Limite des composantes harmoniques en courant (norme CEI 61000-3-2).

## I.6 Types de charges

Les récepteurs peuvent être classés en deux familles principales [12]:

- ✓ Charges linéaires ;
- ✓ Charges non linéaires.

### I.6.1 Charge linéaire

Une charge est dite linéaire si alimentée par une tension sinusoïdale, elle consomme un courant sinusoïdal. Cependant, le courant peut être déphasé par rapport à la tension d'un angle  $\varphi$ .

### I.6.2 Charge non linéaire

Une charge est dite non linéaire lorsque la relation entre la tension et le courant n'est plus linéaire. Cette charge alimentée par une tension sinusoïdale, consomme un courant non sinusoïdal.

Un exemple de charges non linéaires est les charges utilisant de l'électronique de puissance.

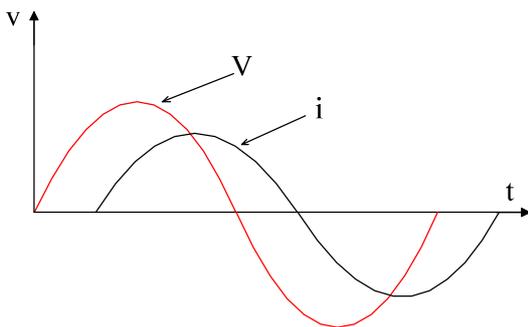


Figure I.7. Charge linéaire.

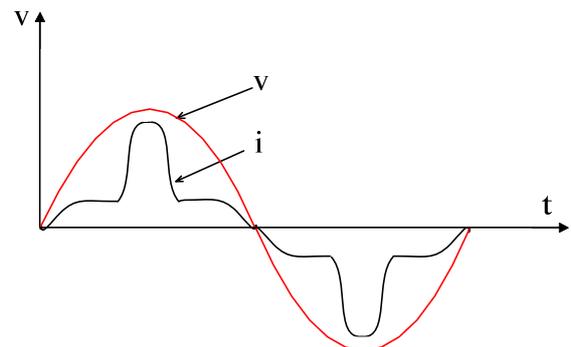


Figure I.8. Charge non linéaire.

## I.7 Solutions de dépollution des réseaux électriques

### I.7.1 Filtrage passif

Un filtre passif est constitué d'éléments passifs tels que les inductances, les condensateurs et les résistances. Il 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. On connecte alors le filtre passif en parallèle avec le réseau de manière à absorber un harmonique de courant donné.

Il existe différents types de filtres passifs destinés à compenser les courants harmoniques. On distingue le filtre passif résonnant et le filtre passif amorti [13] :

### I.7.1.1 Filtre passif résonnant

Le filtre résonnant est constitué d'un ensemble RLC en série accordés sur la fréquence de l'harmonique que l'on veut éliminer comme montré par la figure II.8.

Ce filtre possède une impédance faible pour l'harmonique concerné et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau. Par conséquent il faut autant de circuits résonnants que d'harmoniques à supprimer [14].



Figure I.9. Filtre résonnant.

### I.7.1.2 Filtre passif amorti

Le filtre passif amorti compense les harmoniques supérieurs ou égaux à sa fréquence propre, il peut se connecter en parallèle avec d'autres résonants. On distingue trois types de filtres amortis : filtre amorti de 1<sup>er</sup> ordre, 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> ordre [8].

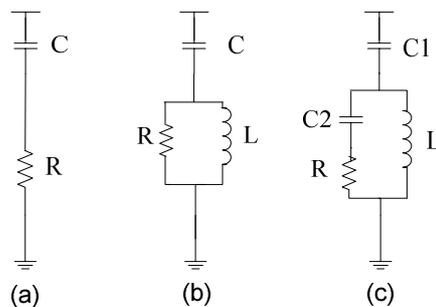


Figure I.10. Filtre passif amorti : (a) filtre amorti de 1<sup>er</sup> ordre, (b) filtre amorti de 2<sup>ème</sup> ordre, (c) filtre amorti de 3<sup>ème</sup> ordre.

### I.7.1.3 Inconvénients des filtres passifs

- ✓ Manque de souplesse à s'adapter aux variations du réseau et de la charge,
- ✓ Equipements volumineux,
- ✓ Problèmes de résonance avec l'impédance du réseau [8].

## I.7.2 Filtrage actif

Les inconvénients des solutions classiques comme les filtrages passifs ont conduit à la conception de nouvelles structures pour l'élimination des harmoniques appelées filtres actifs.

Le principe de ce filtre est l'injection de courants harmoniques de même amplitude et en opposition de phase avec les harmoniques que l'on désire compenser [14].

### I.7.2.1 Filtre actif série

Le FAS est connecté en série sur le réseau, il se comporte comme une source de tension qui génère des tensions harmoniques. Il est destiné à protéger les installations sensibles aux tensions perturbatrices (harmoniques, creux, déséquilibre). Cette topologie ne permet pas de compenser les courants harmoniques consommés par la charge [5].

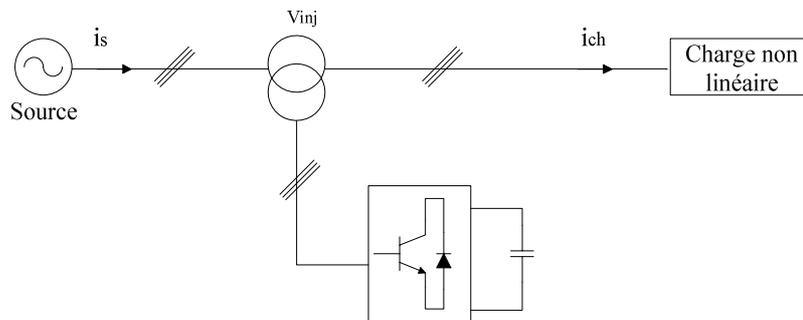
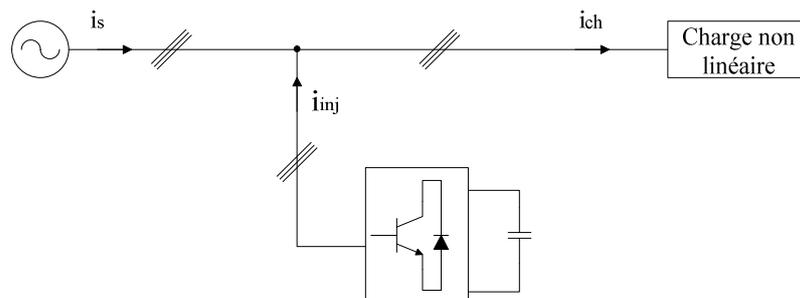


Figure I.11. Filtre actif série.

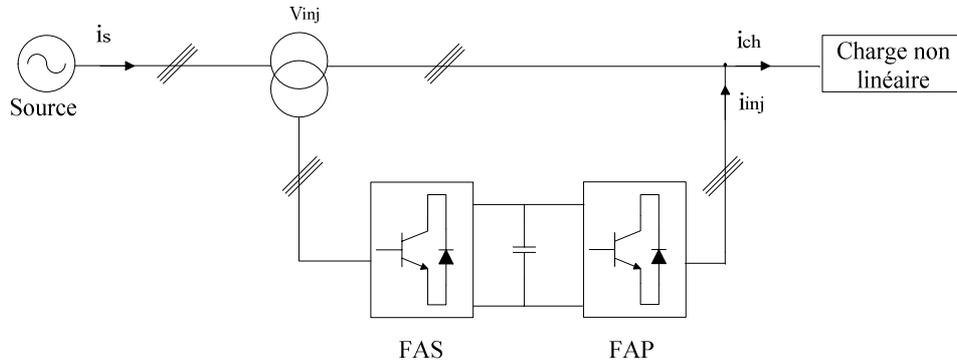
### I.7.2.2 Filtre actif parallèle

Le FAP est connecté en parallèle au réseau, il est souvent commandé comme un générateur de courant. Il injecte des courants harmoniques dans le réseau égaux à ceux absorbés par la charge non linéaire, mais en opposition de phase avec ceux-ci. L'objectif du FAP est d'empêcher les courants perturbateurs produits par les charges non linéaires de circuler à travers l'impédance du réseau, située en amont du point de connexion du filtre actif [12].



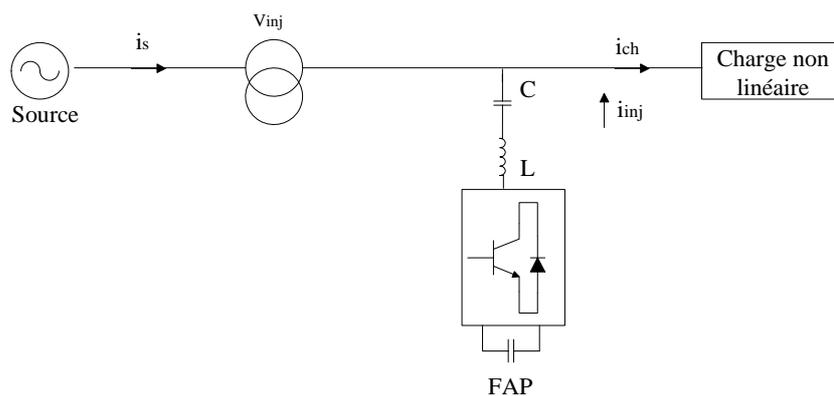
**Figure I.12.** Filtre actif parallèle.**I.7.2.3 La combinaison Parallèle- série actifs**

La combinaison du filtres actifs parallèle- série permet de réaliser simultanément un courant sinusoïdal et une tension du réseau également sinusoïdale [15].

**Figure I.13.** Combinaison parallèle-série actifs.**I.7.2.4 Filtre actif hybride**

Le filtre actif hybride combine les avantages des filtres passifs et des filtres actifs. Pour cela, il est considéré comme l'une des meilleures solutions pour filtrer les harmoniques de courants. On distingue trois configurations du filtre actif hybride [12]:

- ✓ Combinaison du filtre actif série et du filtre passif parallèle ;
- ✓ Combinaison du filtre actif parallèle et du filtre passif parallèle ;
- ✓ Filtre actif parallèle connecté en série avec un filtre passif.

**Figure I.14.** Filtre actif hybride.

## CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons présenté les différentes perturbations affectant l'onde de tension du réseau électrique, leurs origines et leurs conséquences sur les équipements du réseau.

En suit, les solutions possibles pour éliminer ces perturbations sont présentées, chaque solution présente des avantages et des inconvénients. Le filtre actif parallèle est la solution la plus adéquate pour éliminer ces perturbations. Ce dernier fera l'objet du prochain chapitre.

# CHAPITRE II

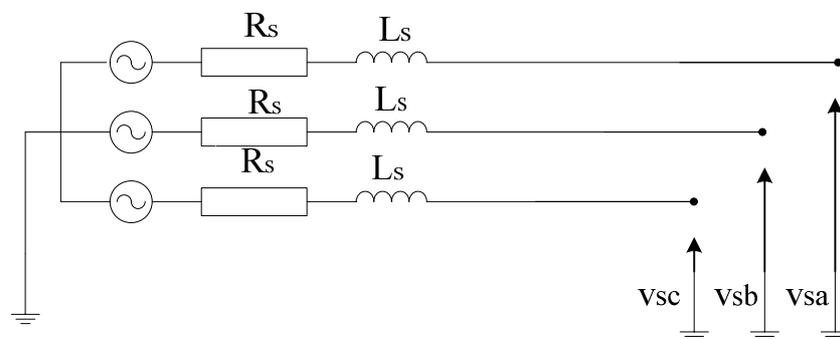
## II.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons étudier une des solutions de dépollution étudiés dans le chapitre précédent qui est le filtre actif parallèle basé sur un onduleur de tension triphasé.

Cette étude contient deux parties, la première partie est consacrée à l'étude de la structure et le fonctionnement du filtre ou nous parlerons aussi sur le circuit de stockage et le filtre passif de sortie. Puis nous présenterons les méthodes d'identification des courants harmoniques, la régulation de la tension et les techniques de commande de l'onduleur.

## II.2 Modélisation du réseau électrique

Le réseau est assimilable à une tension sinusoïdale en série avec une impédance  $Z_s$ . La figure II.1 montre le schéma de principe d'un réseau électrique triphasé [2].



**Figure II.1.** Schéma électrique d'un réseau triphasé.

Les tensions sont exprimées par le système d'équation suivant :

$$\begin{cases} e_a = \sqrt{2}v \sin(\omega t) \\ e_b = \sqrt{2}v \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ e_c = \sqrt{2}v \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

Où,  $\omega = 2\pi f_s$  est la pulsation du réseau et  $v$  la valeur efficace de sa tension.

$$Z_s = R_s + jL_s\omega \quad (\text{II.2})$$

## II.3 Modélisation de la charge

La charge utilisée dans notre système est une charge non linéaire constituée d'un gradateur triphasé débitant sur une charge résistive  $R$  comme illustre par la figure ci-dessous :

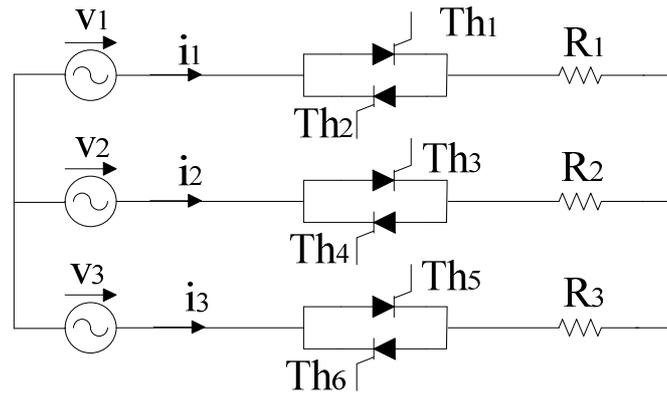


Figure II.2. Gradateur triphasé.

La charge non linéaire appelle au réseau des courants harmoniques.

Le courant circulant dans la charge se décompose en une composante fondamentale  $i_{chf}$  et une composante harmonique  $i_{chh}$  [16]:

$$i_{ch} = i_{chf} + i_{chh} \quad (\text{II.3})$$

La composante fondamentale :

$$i_{chf}(t) = I_1 * \sqrt{2} * \sin(\omega t + \varphi_1) \quad (\text{II.4})$$

La composante harmonique :

$$i_{chh}(t) = \sum_{h=2}^{\infty} I_h * \sqrt{2} * \sin(h\omega t + \varphi_h) \quad (\text{II.5})$$

#### II.4 Principe du filtre actif parallèle

Le principe du FAP est de générer des courants harmoniques identiques à ceux détectés dans le réseau mais de phases opposées. L'objectif est de compenser les courants harmoniques générés par la charge non linéaire [17]. Ceci peut être schématisé par la figure suivante :

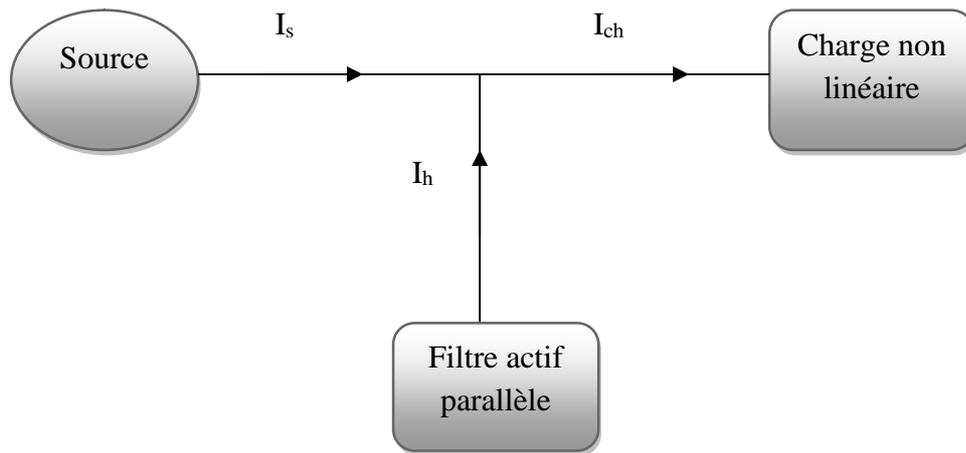


Figure II.3. Principe du filtrage actif parallèle.

## II.5 Structure générale d'un filtre actif parallèle

Le FAP est constitué de deux parties principales, la partie puissance et la partie commande.

La partie puissance est constituée :

- D'un onduleur de tension à base d'interrupteurs électroniques de puissance, commandables à l'amorçage et au blocage (GTO, IGBT,... etc.) avec des diodes en antiparallèle,
- D'un circuit de stockage d'énergie,
- D'un filtre de sortie.

La partie commande est constituée de :

- ✓ La méthode d'identification des courants harmoniques,
- ✓ La régulation de la tension continue appliquée aux éléments de stockage d'énergie,
- ✓ La régulation du courant injecté sur le réseau à partir de l'onduleur de tension,
- ✓ La commande de l'onduleur de tension [8].

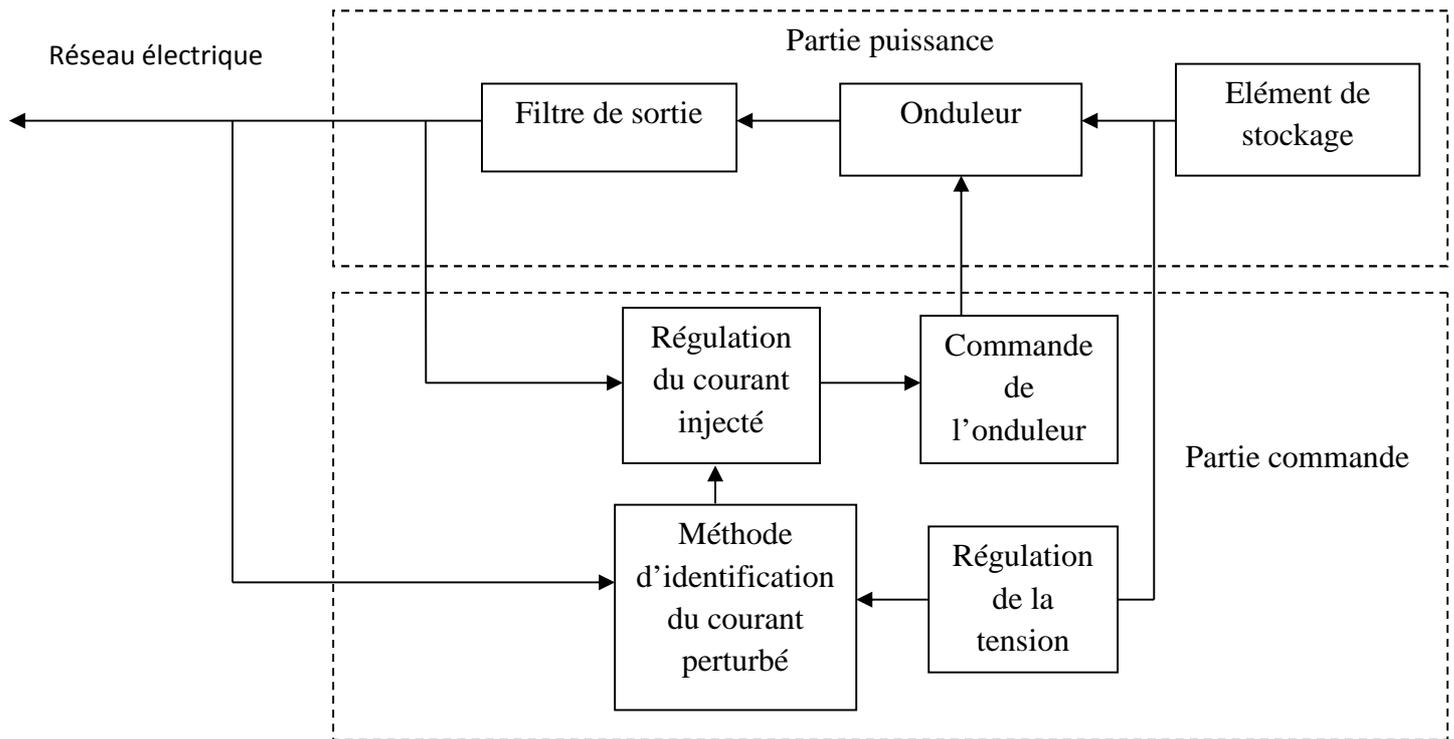


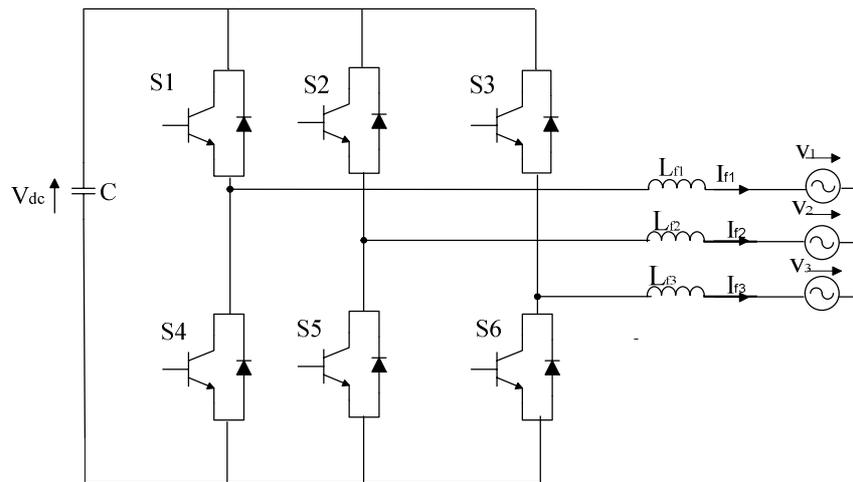
Figure II.4. Structure générale du FAP.

## II.6 Etude de la partie puissance

### II.6.1 Onduleur de tension triphasé

#### II.6.1.1 Structure générale

L'onduleur structure tension est représenté sur la figure II.5. IL se compose de trois bras à interrupteurs réversibles en courant qui sont réalisés par des composants semi-conducteurs commandés à la fermeture et à l'ouverture (IGBT, GTO...) et une diode en antiparallèle. Le condensateur  $C_{dc}$  joue le rôle d'une source de tension continue, la tension à ses bornes  $V_{dc}$  est maintenue à une valeur positive quasi-constante. Le filtre de sortie est un filtre passif de premier ordre ( $L_f$ ) employé pour connecter l'onduleur de tension au réseau électrique [18].



**Figure II.5.** Onduleur de tension triphasé.

Pour cette structure, les interrupteurs d'un même bras ne doivent pas conduire simultanément afin d'éviter tout court-circuit de la source de tension. Ils peuvent être tout les deux ouverts (pendant un temps mort) d'où la mise en conduction de l'une des diodes d'un même bras pour assurer la continuité des courants.

En pratique, on commande les deux interrupteurs d'un même bras de façon complémentaire : la conduction de l'un entraîne le blocage de l'autre. Le mode où les semi-conducteurs d'un même bras sont tous les deux ouverts n'existe que durant les commutations afin d'éviter des courts-circuits [18].

### II.6.1.2 Tensions fournies par l'onduleur

L'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur dépendent de l'état des signaux de commande ( $S_1, S_2, S_3$ ), comme définit ci-dessous [18] :

$$S_1 = \begin{cases} 1 & S_1 \text{ fermé et } T_4 \text{ ouvert} \\ 0 & S_4 \text{ ouvert et } T_4 \text{ fermé} \end{cases}$$

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

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

Dans l'hypothèse d'un système équilibré, l'amplitude de la tension côté alternatif est définie comme suit :

$$v_{si} = V_m \sin \left( \omega t - (i - 1) \frac{2\pi}{3} \right) \quad (\text{II.6})$$

$i = 1, 2, 3$ .

Avec  $V_m$  l'amplitude de la tension simple et  $\omega$  la pulsation du réseau.

En appliquant la loi de Kirchhoff coté alternatif, on obtient :

$$v_{si} = -L_{fi} \frac{di_{fi}}{dt} + v_{fi} \quad (\text{II.7})$$

$i= 1, 2, 3.$

Les tensions simples  $v_{f1}$ ,  $v_{f2}$  et  $v_{f3}$  sont référées au neutre de la source et vérifient l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} v_{f1} \\ v_{f2} \\ v_{f3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{s1} \\ v_{s2} \\ v_{s3} \end{bmatrix} + L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{f1} \\ i_{f2} \\ i_{f3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

Les trois tensions composées à la sortie de l'onduleur sont données par :

$$\begin{bmatrix} v_{f1} - v_{f2} \\ v_{f2} - v_{f3} \\ v_{f3} - v_{f1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1 - S_2 \\ S_2 - S_3 \\ S_3 - S_1 \end{bmatrix} V_{dc} \quad (\text{II.9})$$

Sachant que les tensions du réseau sont supposées équilibrées et que la somme des courants du filtre actif est nulle :

$$\begin{cases} v_{s1} + v_{s2} + v_{s3} = 0 \\ i_{f1} + i_{f2} + i_{f3} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

On déduit des équations (II.6) et (II.8) :

$$v_{f1} + v_{f2} + v_{f3} = 0 \quad (\text{II.11})$$

A partir des équations (II.7) et (II.9), nous obtenons :

$$\begin{bmatrix} v_{f1} \\ v_{f2} \\ v_{f3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2S_1 - S_2 - S_3 \\ -S_1 \quad 2S_2 - S_3 \\ -S_1 - S_2 \quad 2S_3 \end{bmatrix} \frac{V_{dc}}{3} \quad (\text{II.12})$$

Les variables  $S_1$ ,  $S_2$  et  $S_3$  prennent chacune deux valeurs (0, 1), alors en résulte huit combinaisons possibles pour les tensions  $v_{f1}$ ,  $v_{f2}$  et  $v_{f3}$  (tableau II.1).

T	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	$v_{f1}$	$v_{f2}$	$v_{f3}$
0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	$\frac{2V_{dc}}{3}$	$\frac{-V_{dc}}{3}$	$\frac{-V_{dc}}{3}$
2	0	1	0	$\frac{-V_{dc}}{3}$	$\frac{2V_{dc}}{3}$	$\frac{-V_{dc}}{3}$
3	1	1	0	$\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{-2V_{dc}}{3}$
4	0	0	1	$\frac{-V_{dc}}{3}$	$\frac{-V_{dc}}{3}$	$\frac{2V_{dc}}{3}$
5	1	0	1	$\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{-2V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{3}$
6	0	1	1	$\frac{-2V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{3}$
7	1	1	1	0	0	0

Tableau II.1. Tensions générées par l'onduleur.

### II.6.2 Circuit de stockage d'énergie

Le stockage de l'énergie du côté continu se fait souvent par un système de stockage capacitif représenté par un condensateur  $C_{dc}$  qui joue le rôle d'une source de tension continue  $V_{dc}$ . Le choix de la tension  $V_{dc}$  et la capacité de condensateur  $C_{dc}$  affecte la dynamique et la qualité de compensation harmonique. En effet, une tension  $V_{dc}$  élevée améliore la dynamique du filtre actif, par ailleurs, le choix de la capacité  $C_{dc}$  est généralement la limitation des ondulations de la tension continue. Ces ondulations sont d'autant plus importantes que l'amplitude du courant du filtre est grande et que sa fréquence est faible. Un dimensionnement adéquat de la capacité peut être établi à partir d'un courant type que doit générer le filtre actif, mais ce n'est pas toujours facile à le réaliser parce qu'on ne connaît pas souvent les harmoniques à compenser, ainsi une méthode plus simple pour le dimensionnement consiste à calculer la capacité à partir du courant harmonique du rang le plus faible  $I_h$  [19].

$$C_{dc} = \frac{I_h}{\varepsilon V_{dc} \omega_h} \quad (\text{II.13})$$

Avec :

$\varepsilon$  Le taux d'ondulation admissible généralement 5% de  $V_{dc}$ .

$\omega_h$  La pulsation du rang h.

### II.6.3 Filtre de sortie

Le filtre de sortie est un filtre passif utilisé pour connecter l'onduleur de tension au réseau électrique. Il est dimensionné pour satisfaire les deux critères suivants [8]:

- ✓ Assure la dynamique du courant du filtre défini par :

$$\frac{dI_f}{dt} = \frac{dI_h}{dt} \quad (\text{II.14})$$

Avec :

$I_f$  : courant du filtre ;

$d_h$  : courant harmonique de la charge.

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

Deux types du filtre de sortie peuvent être employés : un filtre de sortie du premier ordre et un filtre de sortie du troisième ordre.

#### II.6.3.1 Filtre du premier ordre

Ce type de filtre est le plus utilisé. Il est composé d'une inductance  $L_f$  et d'une résistance  $R_f$  comme le montre la figure II.6. Une valeur relativement faible de l'inductance peut réaliser une bonne dynamique du filtre actif en satisfaisant. Malheureusement, une valeur faible de  $L_f$  permet à la majorité des composantes dues aux commutations de se retrouver coté réseau et par conséquent d'affecter les installations et les équipements électriques. Inversement, une valeur relativement élevée de  $L_f$  va empêcher ces composantes de se propager sur le réseau électrique mais affectera la dynamique du filtre actif et dégradera alors la qualité de compensation [8].

#### II.6.3.2 Filtre de troisième ordre

Ce filtre de sortie souvent appelé filtre en T, se compose de deux inductances ( $L_{f1}, L_{f2}$ ), de deux résistances ( $R_{f1}, R_{f2}$ ) et d'une capacité  $C_f$  comme le montre la figure II.6 [8].

Un filtre LCL est une combinaison de deux filtres (LC-L). La présence du filtre LC à la sortie de l'onduleur de tension, qui se comporte comme un générateur de tensions harmoniques, permet l'élimination des composantes hautes fréquences due aux découpages.

L'association d'un filtre L et LC transforme la source de tension en une source de courant et améliore la qualité des grandeurs de sorties [13].

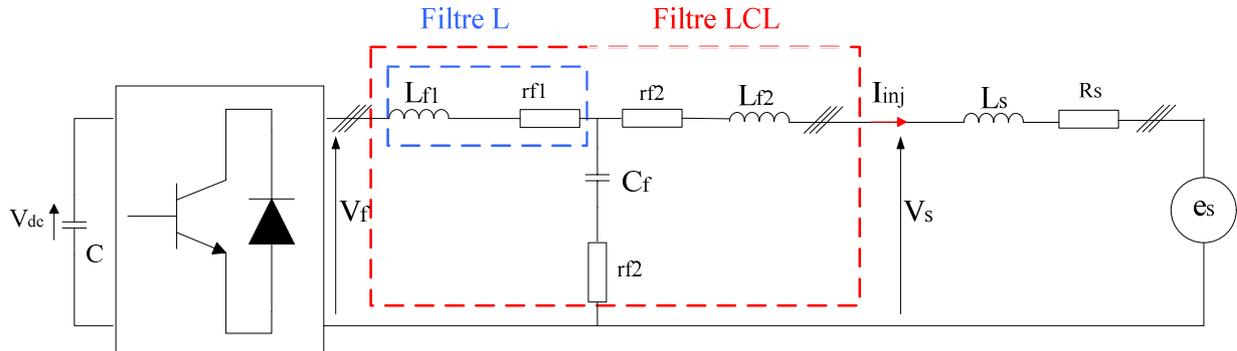


Figure II.6. Onduleur de tension avec filtre de sortie L et LCL.

## II.7 Etude de la partie commande

### II.7.1 Détermination des références harmoniques

Il existe plusieurs méthodes d'identifications des courants harmoniques, elles peuvent être regroupées en deux familles [8]:

- La première utilise la transformée de Fourier rapide dans le domaine fréquentiel, pour extraire les harmoniques du courants. Cette méthode est bien adaptée aux charges où le contenu harmonique varie lentement. Elle donne l'avantage de sélectionner les harmoniques individuellement et de ne choisir de compenser que les plus prépondérants. Cette méthode nécessite une grande puissance de calcul afin de réaliser en temps réel toutes les transformations nécessaires pour extraire les harmoniques.
- La deuxième est basée sur le calcul des puissances instantanées dans le domaine temporel. Certaines de ces méthodes se basent sur le calcul des puissances harmoniques de la charge non linéaire. D'autres peuvent être utilisés pour compenser à la fois les courants harmoniques et la puissance réactive, en se basant sur la soustraction de la partie fondamentale active du courant total.

### II.7.2 Puissance en présence des harmoniques

Le principe de la théorie des puissances instantanées consiste à transformer les grandeurs électriques alternatives (tensions, courants), données dans le repère  $abc$  vers un repère fixe  $\alpha\beta 0$  par la transformée de Concordia donnée par :

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{s1} \\ v_{s2} \\ v_{s3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

Et la relation des courants ci-dessous :

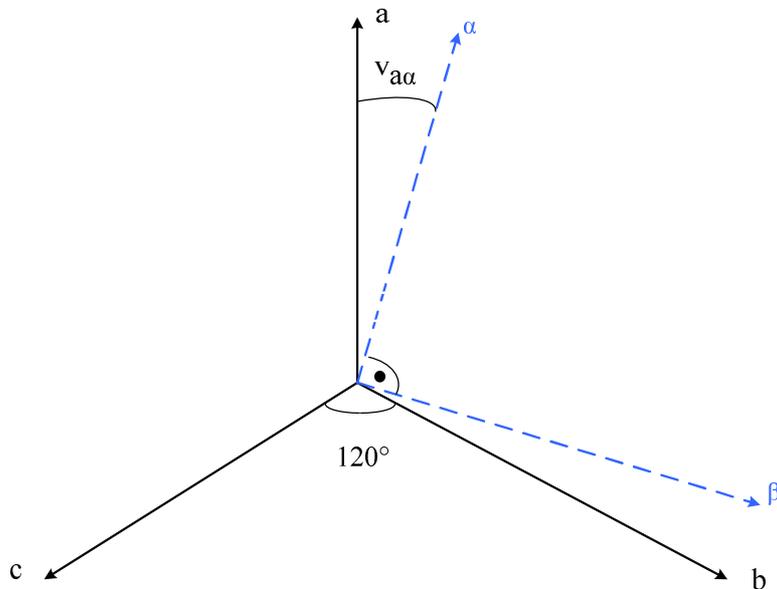
$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{S1} \\ I_{S2} \\ I_{S3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.17})$$

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

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

$$\begin{cases} P(t) = v_{S1}I_{S1} + v_{S2}I_{S2} + v_{S3}I_{S3} = p(t) + p_0(t) \\ p(t) = V_\alpha I_\alpha + V_\beta I_\beta \\ p_0(t) = V_0 I_0 \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

Avec  $p(t)$  la puissance réelle instantanée,  $p_0(t)$  la puissance homolaire instantanée.



**Figure II.7.** Représentation graphique de la transformation  $abc - \alpha\beta$ .

L'avantage de transformation  $\alpha\beta\mathbf{0}$  est la séparation des séquences homolaire du système triphasé de courant ou de tension. De la même manière, la puissance imaginaire instantanée peut s'écrire sous la forme suivante :

$$q(t) = -\frac{1}{\sqrt{3}} [(v_{S1} - v_{S2}) I_{S3} + (v_{S2} - v_{S3}) I_{S1} + (v_{S3} - v_{S1}) I_{S2}] = V_\alpha I_\beta - V_\beta I_\alpha \quad (\text{II.19})$$

La puissance  $q$  a une signification plus large que la puissance réactive habituelle. En effet, contrairement à la puissance réactive, qui ne considère que la fréquence fondamentale, la puissance imaginaire prend en compte toutes les composantes harmoniques du courant et de

tension. C'est pourquoi on lui donne une autre dénomination (puissance imaginaire) avec comme unité le volt-ampère imaginaire (VAI). [6] A partir des relations (II.21) et (II.22), nous pouvons établir la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & V_{s\beta} \\ -V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\alpha} \\ I_{\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{II.20})$$

Dans le cas général, chacune des puissances  $p$  et  $q$  comporte une partie continue et une partie alternative, ce qui nous permet d'écrire l'expression ci-dessous :

$$\begin{cases} p = \bar{p} + \tilde{p} \\ q = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

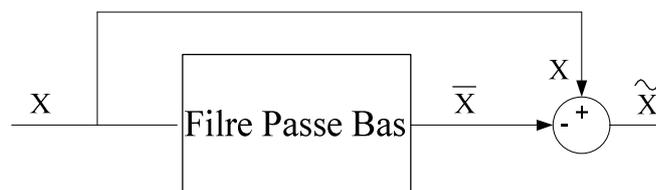
Avec :

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

Afin d'isolé les puissances actives et réactives conventionnelles, il faut connaître avec précision les fréquences des pulsations des puissances formées à partir de la relation (II.23). Pour cela, nous baserons notre étude sur l'analyse fréquentielle des puissances instantanées données dans différents cas de courant et tension. [8]

### II.7.2.1 Séparation des puissances perturbatrices

Pour l'isolation des puissances actives et réactives conventionnelles, un circuit constitué d'un filtre passe bas avec un soustracteur peut être employé, comme le présente la figure (II.6).



**Figure II.8.** Principe de séparation des puissances.

La fréquence de coupure du filtre est choisie, selon que la charge soit équilibrée ou déséquilibrée [8], de manière à ce qu'il puisse bloquer le passage des composantes harmoniques des puissances instantanées, et de permettre uniquement le passage des composantes continues représentant les puissances active et réactive à la fréquence fondamentale.

Le calcul des courants perturbateurs dans le repère  $\alpha\beta$  se fait en se servant de l'expression (II.25) comme suit :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (\text{II.22})$$

Avec :

$$\Delta = V_\alpha^2 + V_\beta^2 \quad (\text{II.23})$$

$\Delta$  : supposé constant dans l'hypothèse d'une tension sinusoïdale équilibrée du réseau électrique.

On utilise les équations (II.24) et (II.25) pour séparer le courant dans le repère  $(\alpha-\beta)$  en trois composantes, active et réactive à la fréquence fondamentale et harmonique. Ceci conduit à :

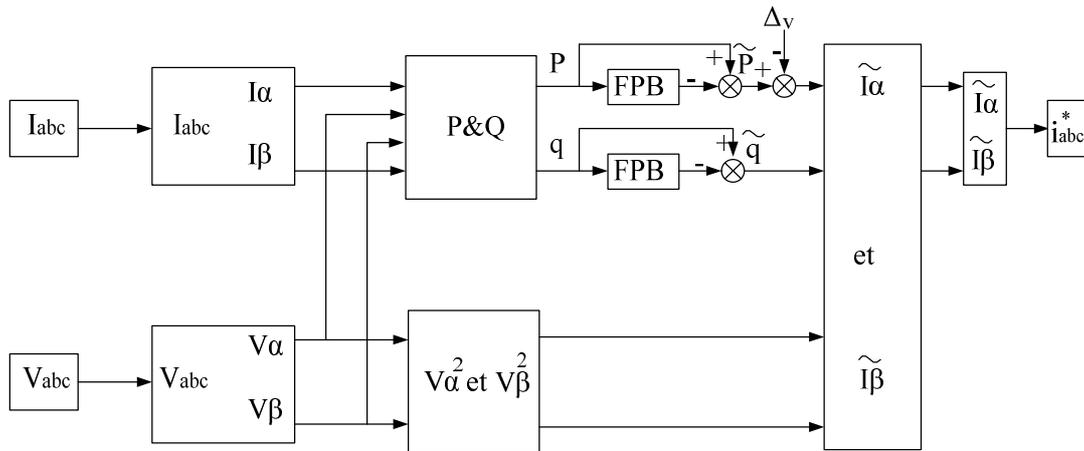
$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ 0 \end{bmatrix}}_{\text{courant actif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{q} \end{bmatrix}}_{\text{courant réactif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix}}_{\text{courants harmoniques}} \quad (\text{II.24})$$

Les courants perturbateurs triphasés qui représentent les courants identifiés ou courants de référence ( $I_{ref}$ ), sont calculés à partir de la transformée inverse de CONCORDIA, donné par la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} I_{ref1} \\ I_{ref2} \\ I_{ref3} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{p\alpha} \\ I_{p\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{II.25})$$

Avec  $I_{p\alpha}$ ,  $I_{p\beta}$  courants perturbateurs calculés dans le repère  $(\alpha-\beta)$  à partir des courants réactifs et harmoniques de la relation (II.25).

**II.7.2.2 Algorithme d'identification basé sur la méthode des puissances instantanées**



**Figure II.9.** Algorithme d'identification par la méthode des puissances instantanée.

**II.7.3 Méthode de détection synchrone**

La méthode de détection synchrone dit courants instantanées est basé sur la transformée de Park (dq), elle requiert de ce fait moins de calcul tout en étant plus précise et plus robuste la méthode des courants instantanées n'est applicable que si la tension du réseau est parfaitement sinusoïdale et équilibrée. [5]

On ramène tout d'abord les courants triphasés de la charge polluante dans le domaine de Park en utilisant la transformée de Park comme suit :

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \sin \theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} \tag{II.26}$$

$\theta$  est l'ange de la transformée de Park.

Dans le domaine de la dépollution des réseaux électriques, la pulsation de référence est fixe : c'est la pulsation du réseau notée  $\omega$ . L'angle de la transformation de Park est défini par :

$$\theta = \omega t \tag{II.27}$$

Les courants harmoniques sont composés en deux composantes :

- Composante continue liée au fondamental
- Composante alternative liée aux harmoniques

$$\begin{cases} i_d = \bar{i}_d + \tilde{i}_d \\ i_q = \bar{i}_q + \tilde{i}_q \end{cases} \tag{II.28}$$

Pour séparer ces courants on utilise un filtre passe bas et un soustracteur.

On utilise la transformée de Park inverse pour calculer les courants perturbateurs triphasés qui représentent les courants de référence  $i_{ref}$ , ces courants sont donnés par l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} i_{refd} \\ i_{refq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_0 - \tilde{i}_d \\ -\tilde{i}_q \end{bmatrix} \quad (II.29)$$

Avec  $I_0$  : l'amplitude du courant actif fondamental nécessaire à la régulation de la tension continue. les références de phases étant prises selon la tension de la phase(1) et le courant actif, donc en phase avec cette tension, sa composante de Park selon l'axe q est nulle.

D'où :

$$\begin{bmatrix} i_{ref1} \\ i_{ref2} \\ i_{ref3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{refd} \\ i_{refq} \end{bmatrix} \quad (II.30)$$

La méthode des courants instantanés permet la compensation de l'énergie réactive en utilisant l'expression suivante :

$$\begin{bmatrix} i_{refd} \\ i_{refq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\tilde{i}_q \end{bmatrix} \quad (II.31)$$

Et pour la compensation de la puissance réactive et l'ensemble des harmoniques simultanément, on utilise la relation donnée :

$$\begin{bmatrix} i_{refd} \\ i_{refq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_0 & -\tilde{i}_d \\ -\tilde{i}_q & \tilde{i}_q \end{bmatrix} \quad (II.32)$$

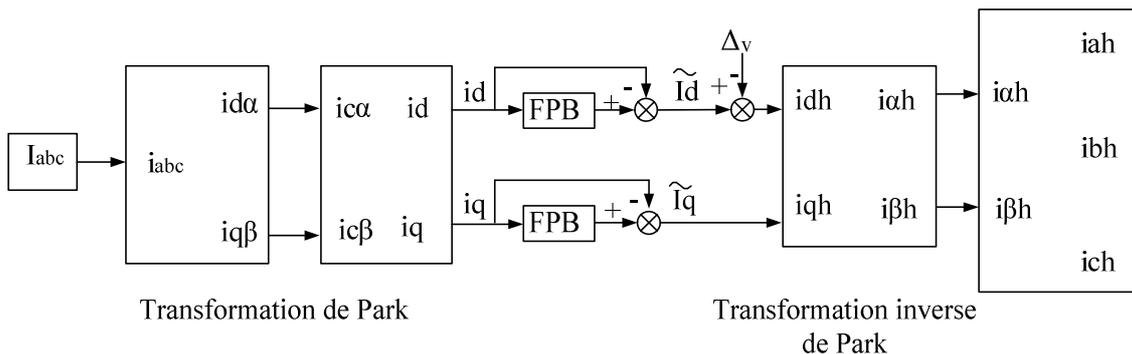


Figure II.10. Algorithme d'identification des courants par la méthode synchrone.

### II.7.4 Régulation de la tension continue

La tension continue  $V_{dc}$  aux bornes du condensateur doit être régulée pour qu'elle soit maintenue constante. Les éléments à l'origine de la variation de cette tension sont les suivants [21]:

- ✓ Les pertes statiques et dynamiques dans les semi-conducteurs de puissance de l'onduleur,
- ✓ Les pertes dans les inductances de couplage  $L_f$ ,
- ✓ L'injection des courants fondamentaux pendant les régimes transitoires de la charge polluante.

La correction de la tension continue aux bornes du condensateur doit se faire par l'adjonction des courants fondamentaux actifs dans les courants de référence. La puissance  $P_{dc}$  à la sortie du régulateur s'ajoute à la puissance active harmonique et donne lieu à un courant fondamental actif corrigeant ainsi la tension  $V_{dc}$  [8].

En supposant que les pertes de commutations dans l'onduleur ainsi que l'énergie stockée dans l'inductance du filtre de sortie soient négligeable. La relation entre la puissance absorbée par le condensateur et la tension aux bornes de celui-ci s'écrit [12]:

$$P_{dc} = \frac{d}{dt} (C_{dc} V_{dc}^2) \quad (\text{II.33})$$

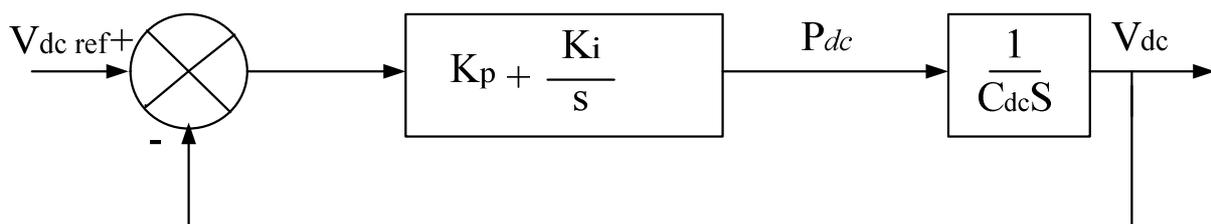
Avec la transformation de Laplace l'équation (II.27) devient :

$$P_{dc}(s) = C_{dc} V_{dc}^2 \cdot s \quad (\text{II.34})$$

Alors, on déduit la tension aux bornes de condensateur :

$$V_{dc}^2 = \frac{P_{dc}}{C_{dc} s} \quad (\text{II.35})$$

A partir de cette relation (II.35), la boucle de régulation de tension continue du FAP à l'aide de régulateur PI est montrée dans la figure suivante :



**Figure. II.11.** boucle de régulation de la tension continue.

A partir de la figure II.7, la fonction de transfert en boucle fermée de la régulation de la tension continue est donnée comme suit :

$$F_{BF}(s) = \frac{1 + \frac{K_p}{K_i} s}{s^2 + 2 \frac{K_p}{C_{dc}} s + 2 \frac{K_i}{C_{dc}}} \quad (\text{II.36})$$



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

$$G(S) = K \frac{1}{1+\tau S} \quad (\text{II.44})$$

$$K = \frac{V_{dc}}{2V_p} \quad (\text{II.45})$$

Avec

$V_{dc}$  : La tension du coté continu de l'onduleur,

$V_p$  : L'amplitude de la porteuse triangulaire,

$\tau$  : Le retard causé par le calcul des courants perturbateurs.

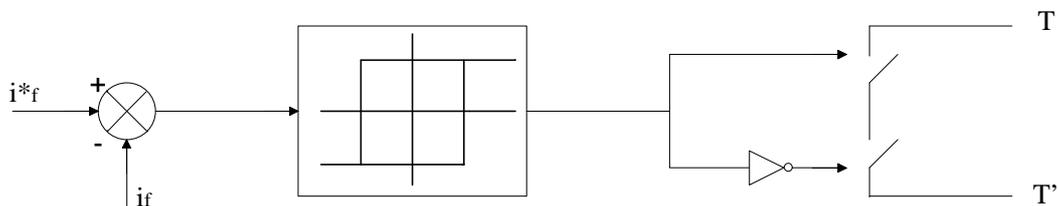
## II.8 La commande de l'onduleur

Les deux principales familles de commande des convertisseurs statiques sont :

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

### II.8.1 Commande par hystérésis

La commande par hystérésis est une commande non linéaire qui utilise l'erreur existant entre le courant de référence et le courant injecté par l'onduleur, cette erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis. Dès que l'erreur atteint la bande inférieure ou supérieure, un ordre de commande est envoyé de manière à rester à l'intérieur de la bande. Cette technique de commande est utilisée pour sa simplicité de mise en œuvre et sa robustesse, mais elle présente cependant un inconvénient majeur : elle ne permet pas de contrôler la fréquence de commutation des semi-conducteur, d'où la présence d'un nombre important d'harmoniques dans les courants générées [12].



**Figure II.13.** Commande par hystérésis.

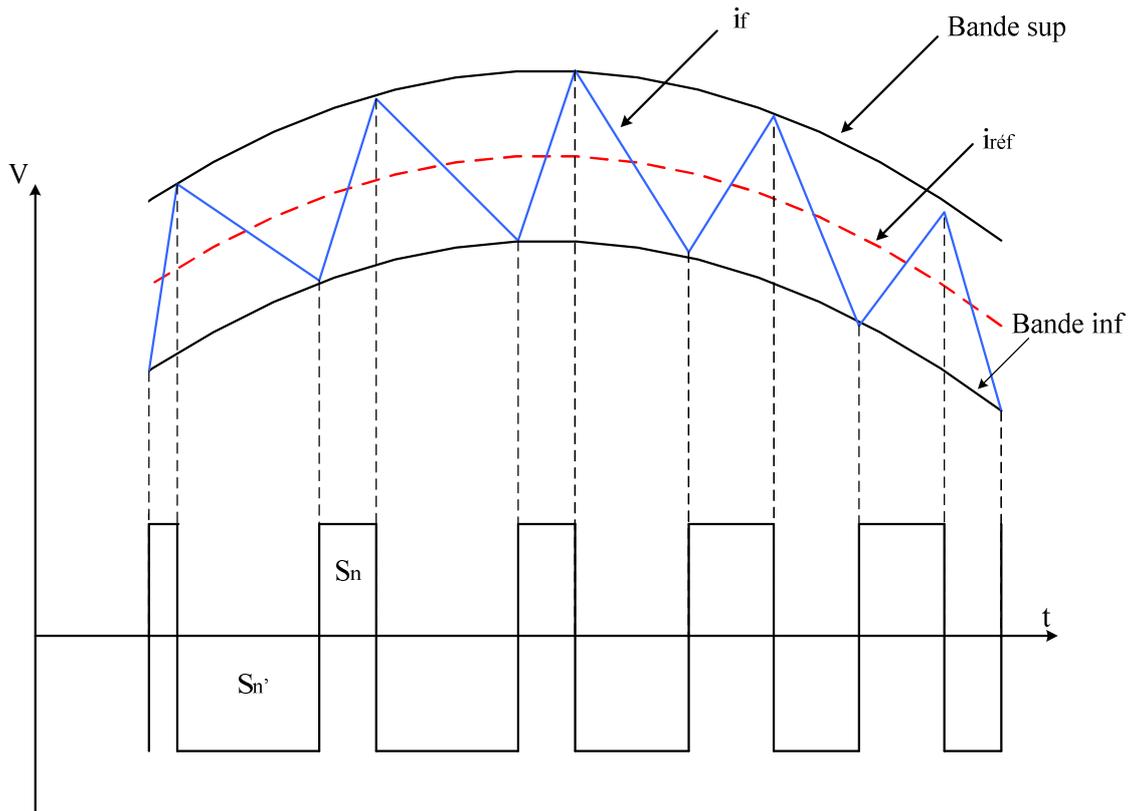


Figure II.14. Commande des interrupteurs par hystérésis.

**II.8.2 Commande par modulation de largeur d’impulsion (MLI)**

La Modulation de Largeur d’Impulsion (MLI) consiste à adopter une fréquence de commutation suffisamment élevée par rapport à la fréquence maximale du signal de sortie souhaité. L’objectif de cette commande est de diminuer les harmoniques supplémentaires du courants générées par l’onduleur [22].

Cette technique de commande met en œuvre d’abord un régulateur qui détermine la tension de référence de l’onduleur à partir de l’écart entre le courant mesuré et sa référence. Cette tension est comparée avec un signal triangulaire (porteuse). La sortie du comparateur fournit l’ordre de commande des interrupteurs [11].

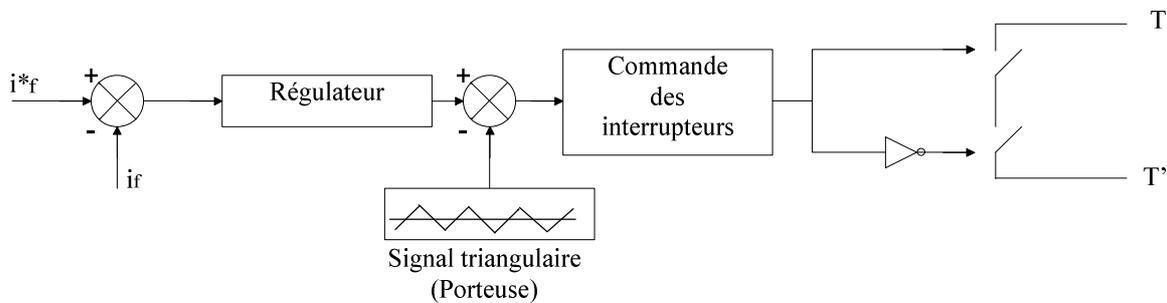


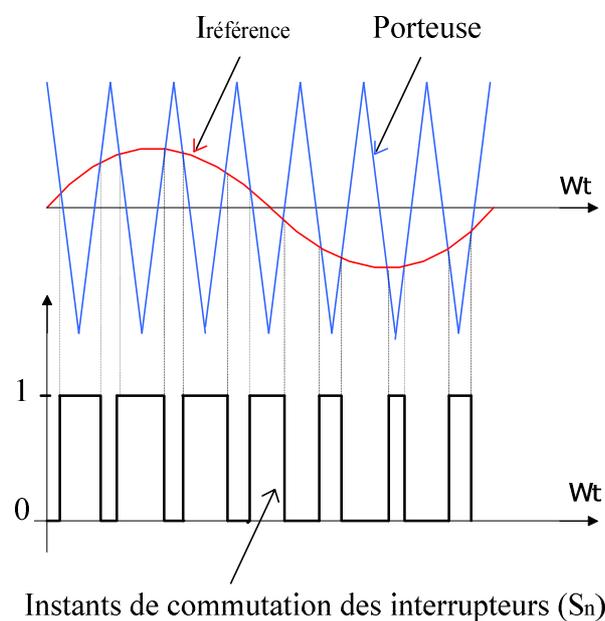
Figure II.15. Commande MLI

### II.8.2.1 Principe de la commande MLI sinus-triangle

A partir de la comparaison du signal de référence sinusoïdale de fréquence  $f_r = \frac{1}{T_r}$  et du signal de modulation triangulaire de fréquence  $f_p = \frac{1}{T_p}$ .

Deux paramètres principaux caractérisent la commande MLI :

- L'indice de modulation :  $m = \frac{f_p}{f_r}$ , avec  $m \gg 1$ ,
- Le coefficient de réglage :  $r = \frac{V_r \max}{V_p \max}$ ,  $0 < r < 1$ .



**Figure II.16.** Principe de la commande MLI.

## Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la partie puissance du FAP dans laquelle plusieurs éléments sont présentés tels que : l'onduleur de tension, le circuit de stockage de l'énergie et le filtre de sortie. Nous avons également présenté dans la commande l'identification des courants harmoniques, la régulation de la tension continue et celle du courant du FAP. Nous avons enfin donné un bref aperçu sur les stratégies de commandes de l'onduleur : hystérésis et MLI.

# CHAPITRE III

### III.1 Introduction

Après avoir étudié dans le chapitre précédent l'algorithme des courants harmoniques de références et les stratégies de commande du filtre actif, nous allons présenter dans ce chapitre, la simulation sous Matlab/Simulink/SimPowerSystemes, le schéma global de notre étude basée sur la méthode des puissances instantanées et commande par hystérésis, dans le but d'assurer la compensation des courants harmoniques.

### III.2 Schéma synoptique de l'association filtre actif-réseau-charge polluante

La figure III.1 donne le schéma global du système à étudier. Il est composé de trois parties principales suivantes :

- ✓ Source d'alimentation triphasée ;
- ✓ Charge non linéaire (Gradateur) ;
- ✓ Un filtre actif parallèle à trois fils.

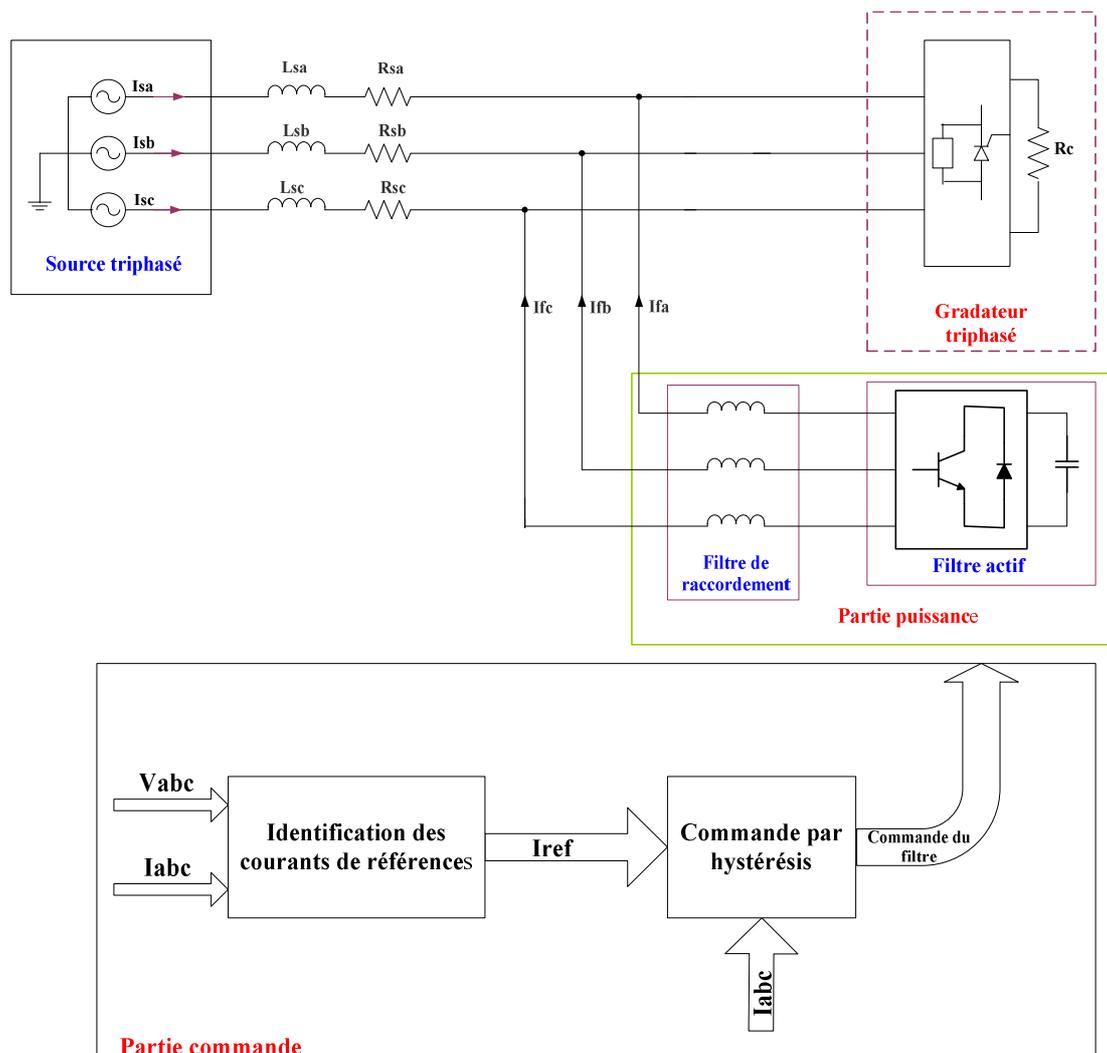


Figure III.1. Schéma synoptique de l'association filtre actif-réseau-charge polluante.

Le raccordement de la charge polluante au réseau s'effectue par l'intermédiaire de l'impédance du réseau  $L_s$  et  $R_s$ . Le gradateur débite sur une charge résistive  $R_c$ . Le couplage du filtre actif parallèle avec le réseau s'effectue par un filtre de sortie L.

### III.3 Paramètres de simulation

Pour simuler le modèle de l'association filtre actif-réseau-charge polluante sous Matlab-Simulink-SimPowerSystems, on a utilisé les paramètres suivants :

<b>Réseau électrique</b>
$V_s = 220 \text{ V}$ , $f = 50 \text{ Hz}$ , $R_s = 0.1 \Omega$ , $L_s = 30 \text{ mH}$
<b>Charge polluante</b>
$R_{ch} = 20 \Omega$ , $\alpha = 60^\circ$
<b>Filtre parallèle</b>
$V_{dc} = 600 \text{ V}$ , $C = 100 \mu\text{F}$ , $L_f = 5 \text{ mH}$
<b>Commande hystérésis</b>
$\Delta I = \pm 1 \text{ mA}$

Tableau III.1. Paramètres de simulation.

### III.4 Résultats de simulation

#### III.4.1 Avant le filtrage

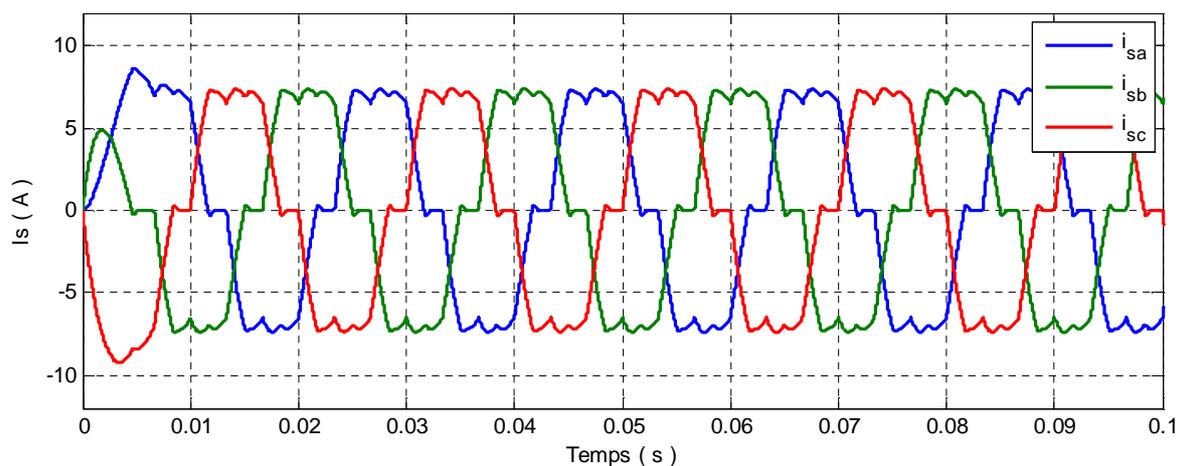
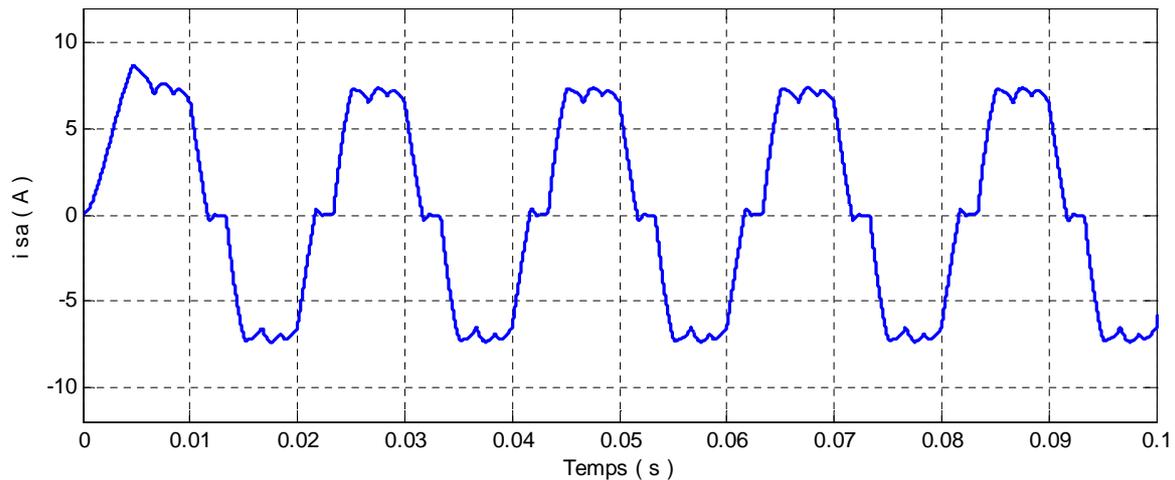
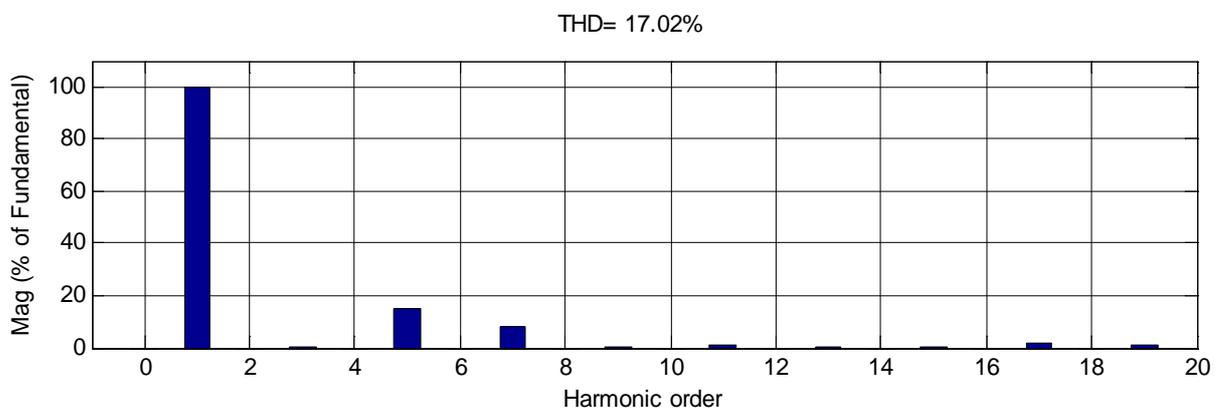


Figure III.2 courant de source triphasé avant le filtrage.



**Figure III.3.** Courant de source pour la phase a.

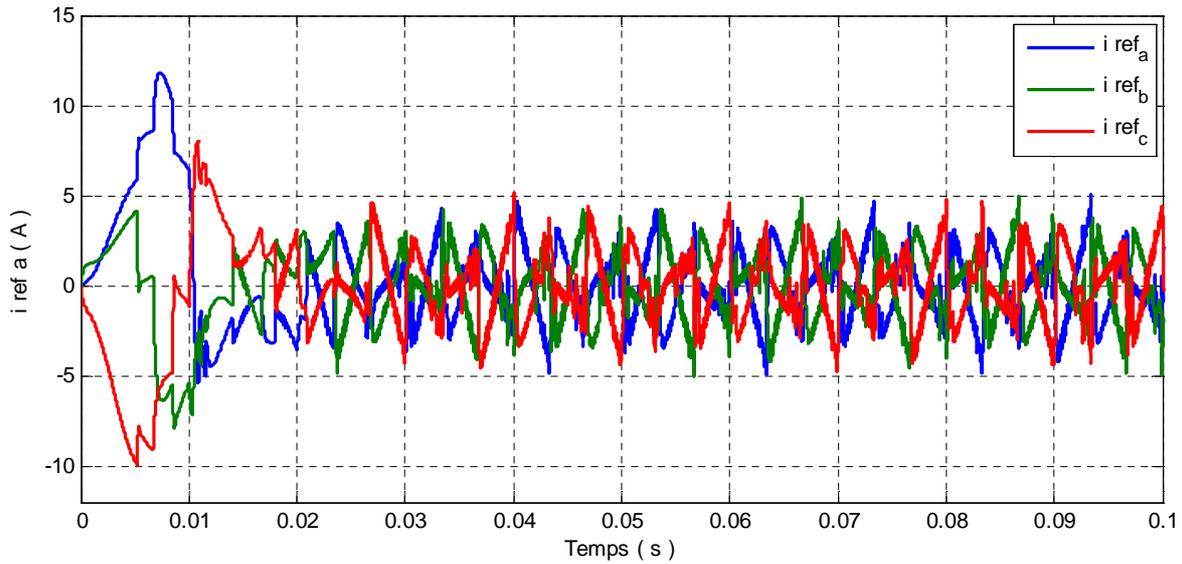
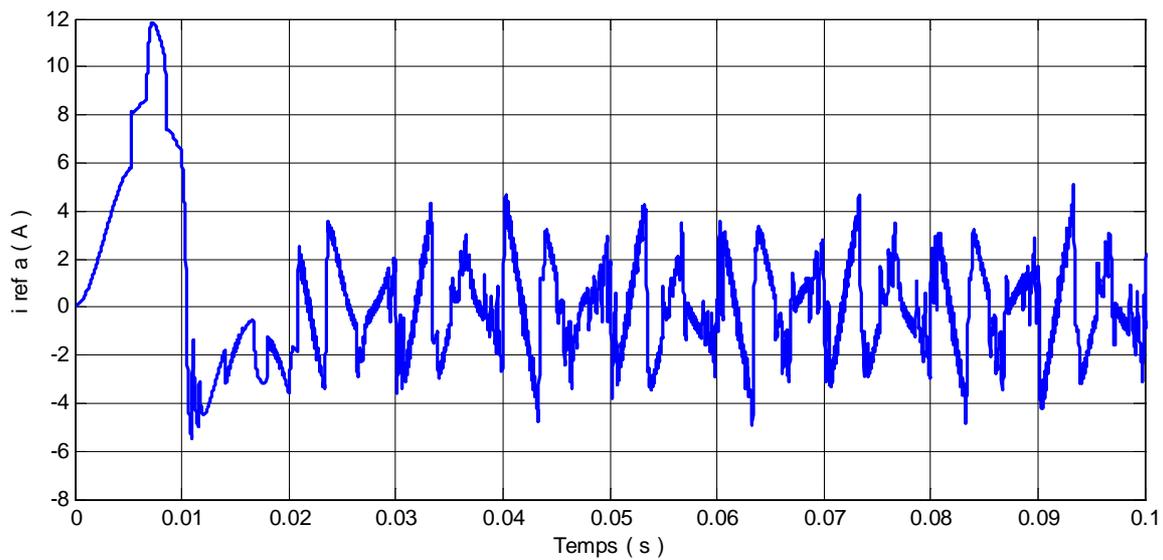


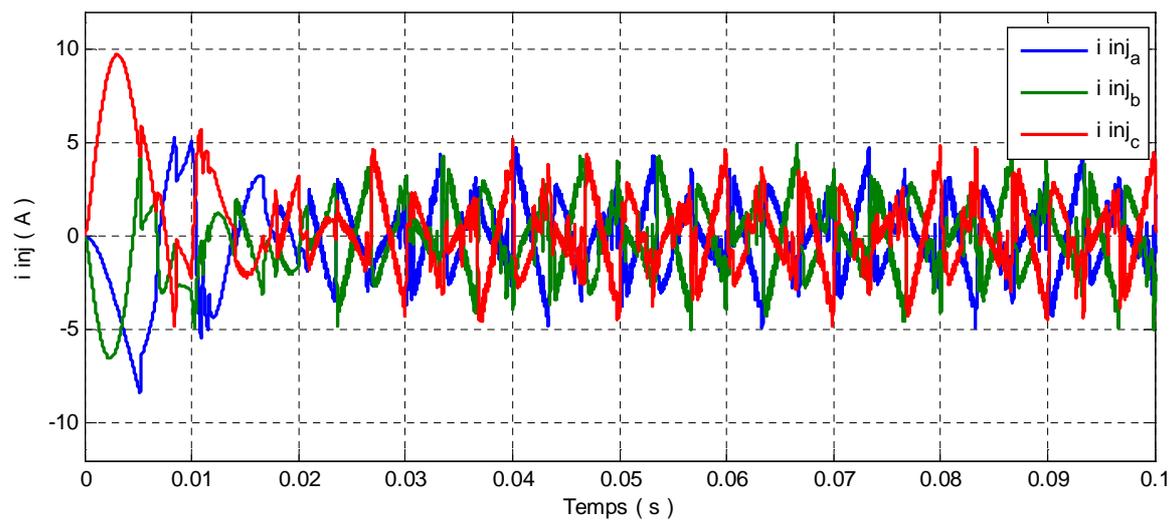
**Figure III.4.** Spectre d'harmonique du courant de source avant le filtrage.

La figure III.2 montre les courants de source avant le filtrage, ces courants sont déformés à cause des courants harmoniques générés par le gradateur.

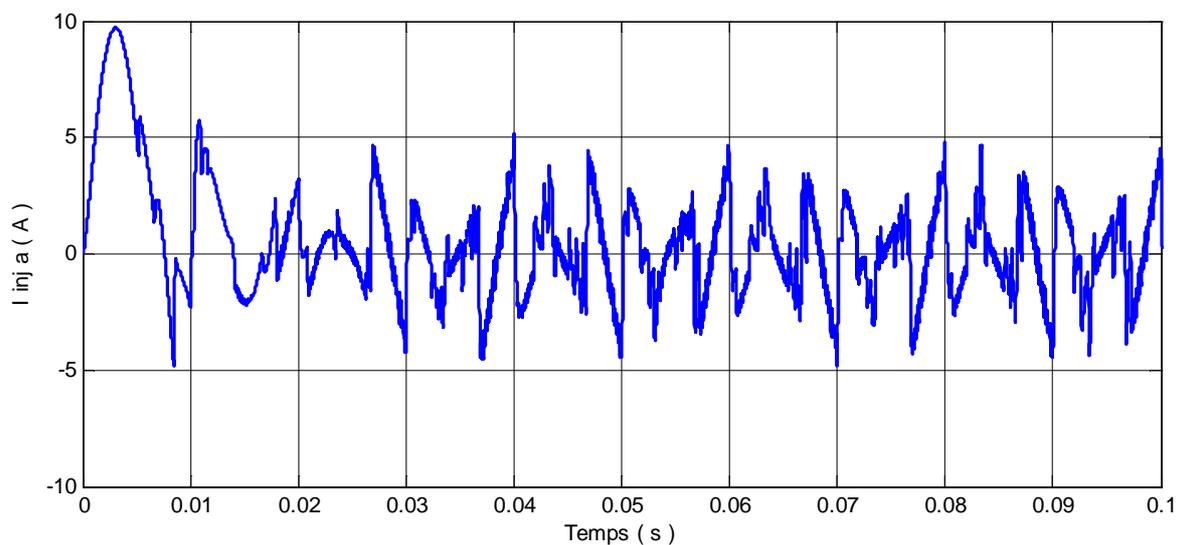
La figure III.4 représente le taux de distorsion du courant de source avant le filtrage, ce taux a été mesuré sur une période. On remarque que le courant de la source est très riche en harmoniques du rang impaires d'ordre 5, 7, 11, 13..., avec un THD égale à 17.02%. Si nous comparons ce THD avec celui imposé par la norme (CEI 621000-3-2), nous remarquons qu'il est très supérieur. Il est donc nécessaire d'insérer un filtre actif pour améliorer la qualité des courants.

## III.4.2 Après le filtrage

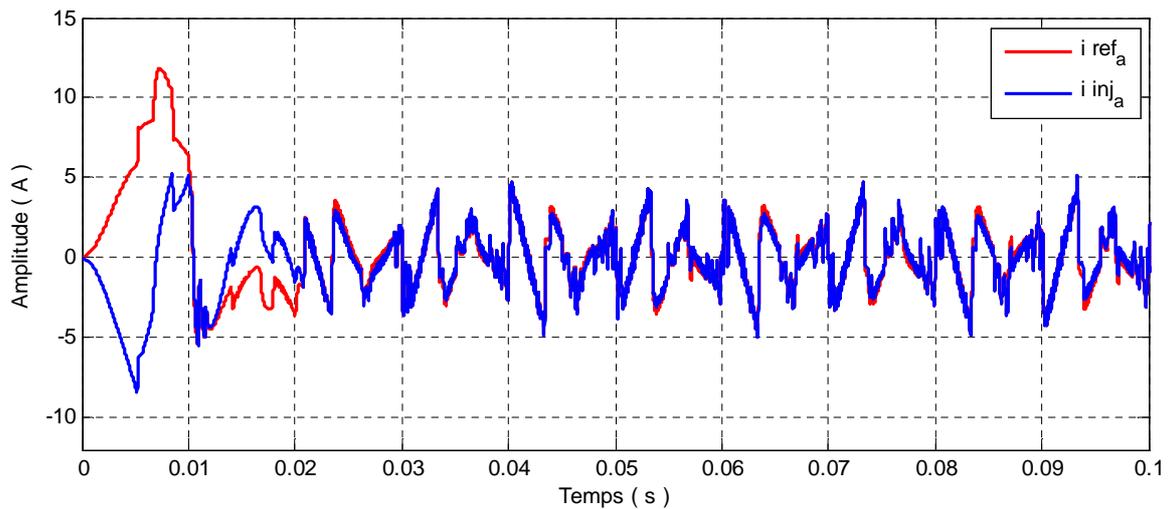
**Figure III.5.** Courant identifier par la méthode des PIRI.**Figure III.6.** Courant identifié pour la phase a.



**Figure III.7.** Courant injecté par le FAP.



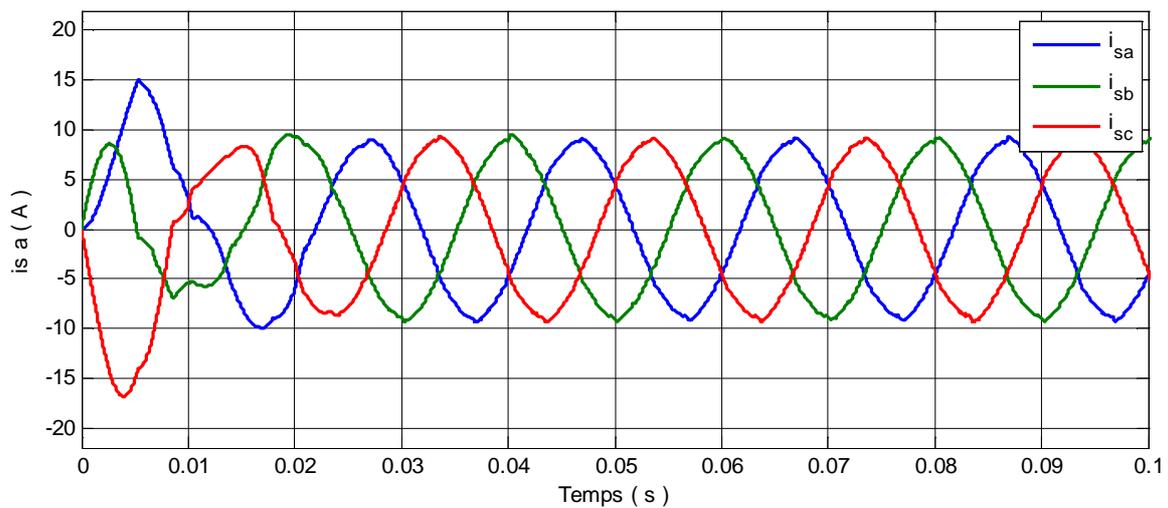
**Figure III.8.** Courant injecté par le FAP pour la phase a.



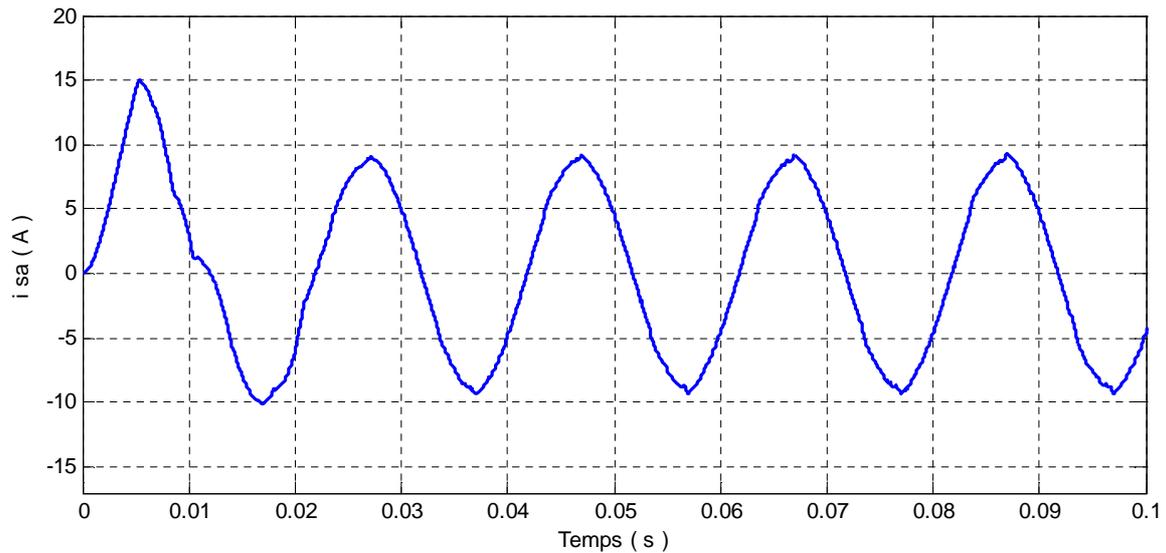
**Figure III.9.** Courant de référence et courant injecté par le FAP.

La figure III.9 montre les courants de référence et les courants injectés par le FAP.

On remarque que les courants injectés par le filtre suivent parfaitement les courants de référence.

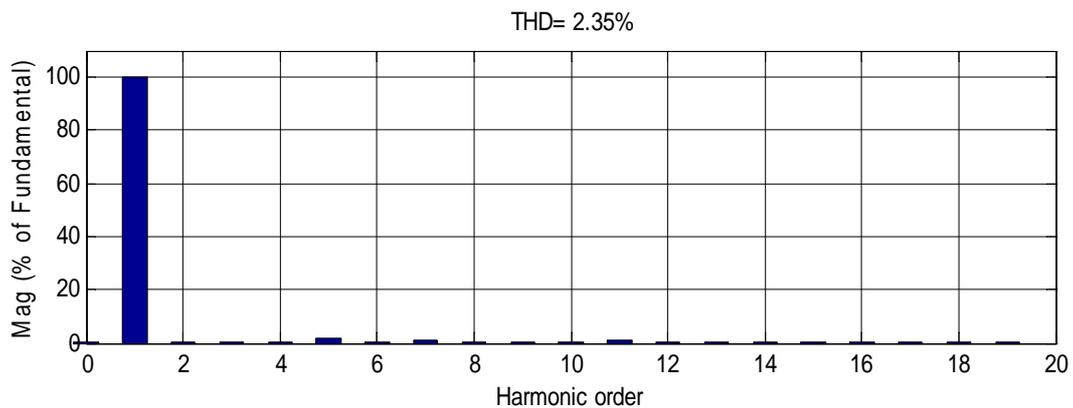


**Figure.III.10.** courants de source après le filtrage.



**Figure.III.11.** Courant de source phase a.

La figure III.10 donne les courants de source après le filtrage, on remarque que les harmoniques du courant sont éliminées et la forme d'onde du courant de source est proche de la sinusoïde.



**Figure II.12.** Spectre harmonique du courant de source après le filtrage.

La figure III.12 représente le spectre harmonique du courant de source après le filtrage, on remarque que le THD est amélioré de 17.02% à 2.35%. Cela montre l'efficacité du FAP.

## Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons simulé l'ensemble réseau-charge polluante-filtre actif, d'après les résultats obtenus nous concluons que le filtre actif parallèle réduit d'une manière efficace les harmoniques dans le réseau électrique.

# CONCLUSION GENERALE

## Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire a pour objectif d'étudier une solution aux perturbations des réseaux électriques qui est le filtre actif parallèle à base d'un onduleur de tension. Ces perturbations sont principalement causées par des charges non linéaires.

Nous avons étudié les différentes sources de perturbation électrique, leurs origines ainsi que leurs conséquences sur les équipements électriques. Les solutions proposées pour éliminer ces perturbations ont été présentées. Pour identifier les courants harmoniques nous avons choisi la méthode des puissances instantanées, la commande par hystérésis a été choisie pour commander l'onduleur grâce à sa simplicité de mise en œuvre et sa robustesse.

La simulation de l'ensemble réseau, filtre actif et charge non linéaire sous l'environnement Matlab/Simulink/SimPowerSystems a été effectué. Les résultats obtenus montrent que les courants injectés par le FAP suivent parfaitement les courants de références et le taux de distorsion harmonique pour le courant de source est réduit de 17.02% à 2.35%, cela montre l'efficacité du FAP dans la compensation des courants harmoniques.

En perspective, il serait intéressant de reprendre le travail en vue de son amélioration par l'emploi d'autres techniques avancées d'identification des courants harmoniques et de la commande du filtre.

# BIBLIOGRAPHIE

## Bibliographie

- [1] **M.M.ABDUSALAM** « structure et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales », thèse de doctorat en génie électrique, université Henri Poincaré, Nancy-I, 29/05/2008.
- [2] **O.MOUSSA** « Etude des harmonique et techniques de commandes du filtre actif», mémoire Magister en électrotechnique Université de Batna 2.
- [3] **F. HAMOUDI** « contribution aux stratégies de commande avancées d'un filtre actif shunt à quatre fils», thèse de doctorat en sciences, université El-Hadj Lakhder Batna, 27/06/2012.
- [4] **I. EI-BAAKLINI** « outil de simulation de propagation des creux de tension dans les réseaux industriels », thèse de doctorat en Electronique, Electrotechnique et Automatique, Télécommunication et Signal, Institut National Polytechnique de Grenoble, 23/03/2001.
- [5] **D.OULD ABDESLAM** « Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension », thèse de doctorat en Electronique, Electrotechnique et Automatique, université de Haute-Alsace, 08 décembre 2005.
- [6] **A. OMEIRI** « Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant », thèse de doctorat en électrotechnique, université Badji Mokhtar Annaba, 2007.
- [7] **S.KEBIRI** « Modélisation et simulation d'un filtre actif multi niveaux », mémoire de magister en électrotechnique, université Mouloud Mammer, Tizi-Ouzou, 12/04/2009
- [8] **M.A.ALALI** « Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension », thèse de doctorat en Automatisation des systèmes de puissance électriques, université de Louis Pasteur – Strasbourg I, 12 Septembre 2002.
- [9] **H.LAIB** « Contribution par une Nouvelle Approche Modulaire au Filtrage Actif des Harmoniques dans les Réseaux Electriques de Distribution », thèse de doctorat en sciences en électrotechnique, Université de Batna, 25 /05/2017.
- [10] **A.SAHLI** « Filtrage actif et contrôle de puissances: application aux systèmes photovoltaïques interconnectés au réseau », mémoire de magister en contrôle, université Ferhat Abbas- Sétif, 2012.
- [11] **A. YOUSFI** « Amélioration de la qualité d'énergie électrique utilisant un onduleur de tension a cinq niveaux », mémoire de magister en électrotechnique, université Hassiba Benbouali de Chlef, 2008.

- [12] **N.BELHAOUCHET** « Fonctionnement à fréquence de commutation constante des convertisseurs de puissance en utilisant des techniques de commande avancées, Application : Amélioration de la qualité de l'énergie », thèse de doctorat en science, option : machines électrique et leurs commandes, université Ferhat Abbas-Sétif, 06/07/2011.
- [13] **CHAOUI Abdelmadjid** « Filtrage actif triphasé pour charges non linéaires », thèse de doctorat, université de Sétif, 2010.
- [14] **M.MAGRAOUI** « Validation de techniques de commande d'un filtre actif parallèle », mémoire comme exigence partielle à l'obtention de la maîtrise en génie électrique, université du Québec, 17/09/2007.
- [15] **S.CHENNAI** « Etude, modélisation et commande des filtres actifs : apport des techniques de l'intelligence artificielle », thèse de doctorat en électrotechnique, université Mohamed Khider—Biskra, 19/09/2013.
- [16] **DJ.NEKKAR** « Contribution à l'étude des stratégies de commande des filtres actifs triphasés », mémoire de magister en électrotechnique, option : commande des machines électriques, université Mohamed Chérif Messaadia de Souk\_Ahras, 2013-2014.
- [17] **S.BEAULIEU** « Etude et mise au point d'un filtre actif d'harmoniques en vue d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique », mémoire présenté comme exigence partielle de la maîtrise en ingénierie, université du Québec à Chicoutimi, Mai 2007.
- [18] **J.XU** « Filtrage actif parallèle des harmoniques des réseaux de distribution d'électricité », thèse de doctorat en génie électrique, l'Institut National Polytechnique de Lorraine, 20/01/1994.
- [19] **F.HAMOUDI** « Commande robuste d'un filtre actif shunt à quatre fils », mémoire de magister en électrotechnique, université El-Hadj Lakhder Batna, 01/07/2008.
- [20] **I.GHADBANE** « Etude et réalisation d'un filtre actif parallèle en utilisant différentes stratégies de contrôle », thèse de doctorat en électrotechnique, université Mohamed Khider Batna, 05/05/2016.
- [21] **S.HAFSIA** « Commande d'un filtre actif parallèle à quatre bras par des techniques avancées », mémoire de magister, université Mohamed Khider Biskra, 03/03/2015.
- [22] **K.DJAZIA** « Etude des filtres actifs pour réseaux déséquilibrés et distordus », thèse de doctorat en science, spécialité instrumentation, université Ferhat Abbas-Sétif, 21/10/2015.