

**R épublique Alg érienne D éocratique et Populaire**

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la  
Recherche Scientifique**



**Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued**

**FACULTE DE TECHNOLOGIE**

**DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE**



**M émoire de Fin d'Etude**

Pr ésenté pour l'obtention du diplôme de

**MASTER ACADEMIQUE**

Domaine : Sciences et Technologie

Fili ère : G énie Electrique

Sp écialit é: Commande Electrique

**Th ème**

**Commande Directe de Puissance  
d'un Filtre Actif Parall èle en  
Conditions non Id éales**

Devant le jury compos é de :

Pr ésent é par :

.....

Pr éside nt

HEGUIG LAROUSI

.....

Examineur

ZEGHDI KHALIFA

.....

Examineur

Dr.MESBAHI NADHIR

Encadreur

**2019-2018**

# Dédicaces

*Je dédie ce travail à :*

*À ma mère **Mabrouka** et mon père **Ali***

*À mes sœurs et frères*

*À ma grande famille*

*À mes collègues*

*À ceux qui m'éprouvent une véritable amitié.*

**H.Laroussi**

# Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail en signe de respect et de  
reconnaissance :*

*À ma mère et mon père qui m'ont toujours encouragé durant ces  
années d'études.*

*À ma femme*

*À mes frères Et mes sœurs*

*À tous mes amis sans exception*

*À tous mes collègues durant les années d'études dans l'université*

**Z.Khalifa**

# Résumé

L'utilisation des équipements à charges non linéaire, absorbent des courants non sinusoïdaux et consomment de la puissance réactive. Ces équipements contribuent considérablement à la dégradation de la qualité de l'énergie électrique. Pour faire face à ce problème, le filtre actif parallèle est à ce jour la solution moderne et efficace de dépollution le plus adéquate. Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre de la recherche de nouvelles solutions qui permettent l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique lorsque le réseau est perturbé et déséquilibré en tension. Les résultats de simulation montrent les performances et efficacités de la commande proposée.

**Mots clé :** Qualité de l'Energie Electrique, Filtre Actif Parallèle, Commande Directe de Puissance, Réseau Perturbé.

## ملخص

استخدام المعدات ذات الأحمال غير الخطية ، وامتصاص التيارات غير الجيبية واستهلاك الطاقة التفاعلية. هذا الجهاز يساهم بشكل كبير في تدهور جودة الطاقة الكهربائية. لمواجهة هذه المشكلة ، يعد الفلتر الموازي النشط حالياً وفعالاً للحل الأكثر ملاءمة. يمثل العمل المقدم في هذه الرسالة جزءاً من البحث عن حلول جديدة تعمل على تحسين جودة الطاقة الكهربائية عندما تكون الشبكة مضطربة وغير متوازنة في الجهد. تظهر نتائج المحاكاة أداء وكفاءة الطلب المقترح

الكلمات المفتاحية: جودة الطاقة الكهربائية ، التصفية النشطة الموازية ، التحكم المباشر في الطاقة ، الشبكة المضطربة

# Remerciements

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

Je tiens à exprimer mon remerciement et ma gratitude à mon encadreur:

**Dr.MESBAHI NADHIR** qui a aidé pour rendre ce travail effectif.

Je tiens également à remercier vivement les membres de jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail.

J'exprime toute ma gratitude à mon père, ma mère, mes frères et sœurs qui m'ont apporté soutien et encouragements tout au long de mes études.

Enfin, merci à mes amis qui ont partagé au quotidien mes espoirs et mes inquiétudes, qui m'ont réconforté dans les moments difficiles et avec qui j'ai partagé d'inoubliables instants de détente.

Je vous remercie tous chaleureusement.

Un grand merci à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation sans exception.

# Liste des Figures

## Figures du Chapitre I

<b>Figure I.1:</b>	forme d'onde du courant absorbé par un ordinateur et spectre associé .....	7
<b>Figure I.2:</b>	Structure du filtre résonant.....	12
<b>Figure I.3:</b>	Montage du filtre amorti.....	12
<b>Figure I.4:</b>	Filtre actif parallèle.....	14
<b>Figure I.5 :</b>	Filtre actif série.....	15
<b>Figure I.6 :</b>	Filtre combiné parallèle-série (UPQC) .....	15
<b>Figure I.7 :</b>	Filtre actif hybride.....	16

## Figures du Chapitre II

<b>Figure II.1.</b>	Circuit de puissance du filtre actif parallèle .....	19
<b>Figure II.2.</b>	Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur.....	22
<b>Figure II.3.</b>	Schéma représentant le principe de séparation des puissances.....	25
<b>Figure II.4.</b>	Schéma de principe de la méthode d'identification des puissances instantanées.....	26
<b>Figure II.5.</b>	Schéma bloc du <i>FMV</i> .....	27
<b>Figure II.6.</b>	Identification des courants de référence par la méthode " <i>pq-modifié</i> " .....	28

## Figures du Chapitre III

<b>Figure III.1.</b>	Configuration générale de la commande directe de puissance .....	33
<b>Figure.III.2.</b>	Schéma de principe de génération des puissances de référence pour DPC classique.....	34
<b>Figure III.3.</b>	Représentation du vecteur de la tension dans le plan de l'espace vectoriel( $\alpha, \beta$ ) .....	35
<b>Figure.III.4.</b>	Schéma de principe de génération des puissances instantanées de référence pour DPC proposé.....	37
<b>Figure III.5. (I &amp; II)</b>	Performances de la compensation des harmoniques par les commandes DPC classique (tensions de source sinusoïdales équilibrées) .....	40

**Figure III.6. (III & IV)** Performances de la compensation des harmoniques par les commandes DPC proposé (tensions de source sinusoïdales équilibrées).....41

**Figure III.7.** Performances de la compensation des harmoniques par les commandes DPC classique (tensions de source sinusoïdales déséquilibrées) .....42

**Figure III.8.** Performances de la compensation des harmoniques par les commandes DPC proposé (tensions de source sinusoïdales déséquilibrées) .....43

**Figure III.9.** Performances de la compensation des harmoniques par les commandes DPC classique (tensions de source équilibrées contenant des harmoniques).....44

**Figure III.10.** Performances de la compensation des harmoniques par les commandes DPC proposé (tensions de source équilibrées contenant des harmoniques) .....45

# Liste des Tableaux

## Tableaux du Chapitre I

1. Limites des composantes harmoniques en courant.....10

## Tableaux du Chapitre II

1. Tensions en sortie de l'onduleur.....21

## Tableaux du Chapitre III

1. Table de commutation de la DPC.....37
2. Paramètres de simulation d'un filtre actif..... 38
3. Résultats de simulation du *DPC* (Cas A).....39
4. Résultats de simulation du *DPC* (Cas B).....39
5. Résultats de simulation du *DPC* (Cas C)..... 39

# Liste des Symboles et Notations

## Symboles

$h$	Rang de l'harmonique
$e_{sa}, e_{sb}, e_{sc}$	Tensions instantanées simples du réseau
$v_{sa}, v_{sb}, v_{sc}$	Tensions instantanées au point de couplage
$i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$	Courants d'entrée par le réseau
$i_{ca}, i_{cb}, i_{cc}$	Courants de charge
$i_{\alpha}, i_{\beta}$	Courants de charge dans le plan $(\alpha, \beta)$
$i_{refa}, i_{refb}, i_{refc}$	Courants de référence
$i_{fa}, i_{fb}, i_{fc}$	Courants du filtre
$R_s$	Résistance du réseau
$L_s$	Inductance du réseau
$R_f$	Résistance du filtre de sortie
$L_f$	Inductance du filtre de sortie
$C$	Capacité de stockage
$v_{dc}$	Tension continue du bus continu
$p$	Puissance active
$q$	Puissance réactive
$S$	Puissance apparente
$D$	Puissance déformante

**Notations**

<b>DTC</b>	Direct Torque Control
<b>DPC</b>	Direct Power Control
<b>FMV</b>	Filtre Multi-Variable
<b>FP</b>	Facteur de Puissance
<b>FPB</b>	Filtre Passe-Bas
<b>IGBT</b>	Insulated Gate Bipolar Transistor
<b>MLI</b>	Modulation de Largeur d'Impulsion
<b>PCC</b>	Point of Common Coupling
<b>SAPF</b>	Shunt Active Power Filter
<b>THD</b>	Total Harmonic Distortion
<b>UPFC</b>	Unified Power Quality Conditioner

# Sommaire

<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>I. Généralités sur la qualité d'énergie électrique</b>	
I.1 Introduction .....	4
I.2. Qualité de l'énergie électrique.....	4
I.2.1. Perturbations harmoniques.....	5
I.2.2. Origine des harmoniques .....	6
I.2.2.1. Sources harmoniques identifiables .....	6
I.2.2.2. Sources harmoniques non identifiables .....	6
I.2.3. Caractérisation des perturbations harmoniques.....	7
I.2.3.1. Taux de distorsion harmonique .....	7
I.2.3.2. Facteur de puissance .....	8
I.2.4. Conséquences de la distorsion harmonique .....	9
I.2.5. Normes et réglementations.....	10
I.3. Solutions de dépollution du réseau électrique .....	11
I.3.1. Solutions traditionnelles.....	11
I.3.1.1. Filtre résonant.....	12
I.3.1.2. Filtre amorti.....	12
I.3.2. Solutions modernes.....	13
I.3.2.1. Filtrage Actif .....	13
I.3.2.2. Filtre actif parallèle (SFAP) .....	14
I.3.2.3. Filtre actif série (FAS) .....	14
I.3.2.4. Combinaison parallèle-série actifs (UPQC).....	15
I.3.2.5. Filtre actif hybride .....	15
I.4. Conclusion.....	16
<b>II. Méthodes d'extraction des courants harmoniques</b>	
II.1. Introduction.....	19
II.2. Structure de SAPF .....	20
II.2.1. Onduleur de tension.....	20
II.2.1.1. Structure générale.....	20
II.2.1.2 Tension générée par l'onduleur .....	20
II.3. Généralités sur les méthodes d'identification .....	22
II.3.1. Identification dans le domaine fréquentiel.....	22
II.3.2. Identification dans le domaine temporel .....	23
II.4. Méthode des puissances active et réactive instantanées .....	23
II.4.1. Filtre passe bas .....	25
II.5. Méthode des puissance réelle et imaginaire instantanées modifiée .....	26
II.5.1. Principe du FMV .....	27
II.5.2. Méthode "pq-modifiée" .....	27
II.6. Conclusion .....	29

### III. Commande directe de puissance du filtre actif parallèle et résultats de simulation

III.1.Introduction .....	31
III.2.Etude du contrôle direct de puissance du SAPF (D.P.C.).....	31
III.3.Etat de l'art du contrôle direct de puissance .....	32
III.4. Principe du DPC classique .....	33
III.4.1.Calcul des puissances instantanées .....	34
III.4.1.1.Calcul des puissances instantanées injectées par SAPF.....	34
III.4.1.2.Calcul des puissances instantanées de référence .....	34
III.4.2.Comparateurs à hystérésis .....	34
III.4.3.Choix du secteur .....	35
III.4.4.Table de commutation.....	36
III.5.Principe du DPC proposé.....	37
III.5. Résultats de simulation .....	37
III.5.1. Tensions de source sinusoïdales équilibrées (Cas A) .....	38
III.5.2. Tensions de source sinusoïdales déséquilibrées (Cas B).....	39
III.5.3.Tensions de source équilibrées contenant des harmoniques (Cas C).....	39
III.6.Interprétation de résultats :.....	46
III.7.Conclusion .....	46
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>47</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>48</b>

# Introduction G é n é r a l e

A l'heure actuelle, l'utilisation des convertisseurs statiques (les redresseurs à diodes ou thyristors, les gradateurs, etc.), dans les installations de conversion d'énergie électrique a considérablement contribué aux progrès réalisés aux niveaux des performances et de l'efficacité de ces systèmes. Ces convertisseurs absorbent des courants non sinusoïdaux et entraînent de ce fait une augmentation sensible du niveau de pollution harmonique.

En effet, la présence d'harmoniques de courant ou de tension conduit à des perturbations au niveau des réseaux électriques. Les effets néfastes les plus connus de la pollution harmonique se résument dans le dysfonctionnement de certains équipements électriques : l'échauffement des conducteurs, l'interférence avec les réseaux de télécommunication, et les phénomènes de résonance avec les éléments composant le réseau.

Les filtres passifs sont traditionnellement placés pour absorber des courants harmoniques et pour relever le facteur de puissance. L'efficacité de ces derniers est limitée en terme de compensation. De plus, ils forment avec l'impédance du réseau, un circuit résonnant qui favorise l'amplification de tous les harmoniques ayant une fréquence voisine de celle de résonance.

Les filtres actifs de puissance sous leurs différentes structures à savoir le filtre actif parallèle, filtre actif série, et les filtres hybrides, répondent mieux aux contraintes industrielles, et s'adapte à l'évolution de l'impédance du réseau et de la charge.

Le filtre actif parallèle (SFAP) est à ce jour la solution moderne et efficace de dépollution la plus adéquate pour restaurer la forme sinusoïdale du courant dans un réseau de distribution électrique. Le SFAP est utilisé pour compenser les courants harmoniques, courants déséquilibrés ainsi que de la puissance réactive.

Le principal objectif visé dans ce mémoire est d'élaborer une stratégie d'identification des courants de référence permettant un filtrage actif de grande efficacité lorsque le réseau est fortement perturbé tenant compte du déséquilibre de tension, tensions équilibrées contenant des harmoniques et déséquilibre de courant de la charge non linéaire. Pour ce faire, on a réparti le manuscrit en trois chapitres comme suit.

Le premier chapitre est consacré à la description des perturbations en courant et en tension qui peuvent affecter un réseau électrique (causes et conséquences). On présente, également les solutions traditionnelles et modernes pour réduire la pollution harmonique. Finalement nous choisissons le filtre actif parallèle comme solution.

Dans le deuxième chapitre, nous étudions théoriquement la topologie du FAP à deux niveaux. Nous exposons, notamment, la méthode des puissances réelles et imaginaires instantanées pour identifier les courants de référence. Ensuite nous présentons une version modifiée de la méthode des puissances instantanées qui est basée sur des filtres multi-variables.

Le dernier chapitre de ce mémoire est consacré à la validation de la commande directe de puissance (DPC) appliquée au filtre actif parallèle à deux niveaux. Elle est basée sur les valeurs des puissances active et réactive comme grandeurs de commande qui est réalisée à l'aide d'un filtre multi-variable (FMV), au lieu des filtres d'extractions classiques de types passe-haut ou passe-bas. Une série de tests y est effectuée afin de confirmer l'efficacité de cette loi de commande lorsque le réseau est fortement perturbé.

Une conclusion générale de ce travail ainsi que des perspectives clôturent le document.

# **CHAPITRE I :**

## **Généralités sur la Qualité d'Énergie Electrique**

## I.1 Introduction

Généralement, le distributeur d'énergie délivre l'énergie électrique sous forme d'un système triphasé de tensions sinusoïdales. 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.

Dans ce chapitre, nous étudierons les caractéristiques générales des perturbations électriques, ainsi nous détaillerons les origines, les conséquences matérielles et les limites tolérées et imposées par les normes internationales de ces perturbations. A la fin de ce chapitre, nous présentons les solutions mises en œuvre pour dépolluer le réseau électrique.

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

La qualité de l'énergie est une notion assez large qui recouvre à la fois la qualité de la fourniture électrique, la qualité de l'onde de tension et la qualité des courants. Lorsque la tension est présente, les principaux phénomènes pouvant l'affecter sont d'une part les variations lentes : creux de tension, surtensions, coupures, déséquilibres et d'autre part des variations rapides : surtensions transitoires, flicker ainsi que les harmoniques. La qualité des courants reflète par contre la possibilité des charges à fonctionner sans perturber ni réduire l'efficacité du système de puissance. C'est pourquoi certains considèrent que la qualité de l'électricité se réduit à la qualité de la tension [1].

La qualité de l'alimentation électrique ou qualité de l'onde fait référence à la mesure du degré de conformité d'une source d'alimentation électrique par rapport à un certain nombre de critères ou de normes à caractère quantitatif et absolu. L'énergie électrique est délivrée

sous forme d'un système triphasé de tensions sinusoïdales. Les paramètres caractéristiques de ce système sont les suivants :

- la fréquence
- l'amplitude
- la forme d'onde qui doit être sinusoïdale
- la symétrie du système triphasé, caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et de leurs déphasages relatifs

Tout phénomène physique affectant une ou plusieurs de ces caractéristiques peut être considéré comme perturbation. En pratique, ces perturbations sont classées selon la durée du phénomène. Ainsi, il est possible de distinguer :

- les altérations de l'onde de tension (harmonique, déséquilibre, flicker).  
Ces phénomènes sont permanents ou durent au minimum plusieurs minutes.
- les creux de tension, surtension et coupures brèves d'une durée de l'ordre d'une à quelques secondes .
- les surtensions transitoires, de durée inférieure à une période.

Dans ce qui suit nous nous restreindrons à la présentation des perturbations provoquées par les harmoniques ainsi que leurs conséquences néfastes sur le réseau électrique.

### **I.2.1. Perturbations harmoniques**

Les perturbations sont tous les phénomènes internes ou externes au réseau ayant un pouvoir de modifier d'une manière transitoire ou permanente en amplitude et /ou en forme les grandeurs électriques du réseau. Ces perturbations résultent de la superposition, sur l'onde fondamentale à 50 Hz, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples de celle du fondamental. Le domaine de fréquence qui correspond à l'étude des harmoniques est généralement compris entre l'harmonique 2 et celui du rang 40 [2], mais on peut également observer des sous-harmoniques ou des inter-harmoniques à des fréquences non multiples entières de la fréquence fondamentale.

## **I.2.2. Origine des harmoniques**

Les harmoniques sont des perturbations permanentes affectant la forme d'onde de la tension du réseau. Ces perturbations résultent de la superposition, sur l'onde fondamentale, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples de celle du fondamental [2]. En général, les harmoniques pairs sont négligeables et seuls les harmoniques impairs existent [1]. Nous pouvons également observer des sous-harmoniques ou des inter-harmoniques à des fréquences non multiples de la fréquence fondamentale.

La cause principale de l'existence des harmoniques de tension, comme on le montrera ultérieurement, est l'injection dans le réseau des courants non sinusoïdaux par des charges non linéaires. Il s'agit alors de sources génératrices de courants harmoniques qui peuvent être classés en deux types :

### **I.2.2.1. Sources harmoniques identifiables**

Les équipements dotés de dispositifs à base d'électronique de puissance, notamment les redresseurs et les cycloconvertisseurs de puissances importantes, installés sur les réseaux haute et moyenne tension sont typiquement des sources harmoniques identifiables. Avec ce type de charge non linéaire, le distributeur d'énergie est capable d'identifier le point d'injection des harmoniques et de quantifier la perturbation provoquée. Dans ce cas, c'est l'utilisateur qui doit se procurer les moyens nécessaires afin de réduire cette perturbation au dessous du seuil exigé par le distributeur de l'énergie sous peine d'être pénalisé [2].

typiquement des sources harmoniques identifiables. Avec ce type de charge non linéaire, le distributeur d'énergie est capable d'identifier le point d'injection des harmoniques et de quantifier la perturbation provoquée. Dans ce cas, c'est l'utilisateur qui doit se procurer les moyens nécessaires afin de réduire cette perturbation au dessous du seuil exigé par le distributeur de l'énergie sous peine d'être pénalisé [2].

### **I.2.2.2. Sources harmoniques non identifiables**

Ce type de générateur de courants harmoniques est principalement représenté par les appareils utilisés dans les domaines électrodomestiques ou tertiaires tels que les téléviseurs et les micro-ordinateurs. Vu leur très large diffusion, ces équipements comportant souvent un redresseur monophasé à diodes avec un condensateur de lissage, produisent des courants harmoniques non négligeables. Dans ce cas, il est de la responsabilité du distributeur de l'énergie électrique d'empêcher la propagation de la perturbation harmonique sur le réseau

puisque individuellement chaque utilisateur génère un faible taux d'harmonique [2]. A titre d'exemple, la figure I.1 ci-dessous montre l'allure du courant absorbé par un ordinateur. Il est de forme impulsionnelle et riche en harmoniques et possède un taux de distorsion inadmissible.

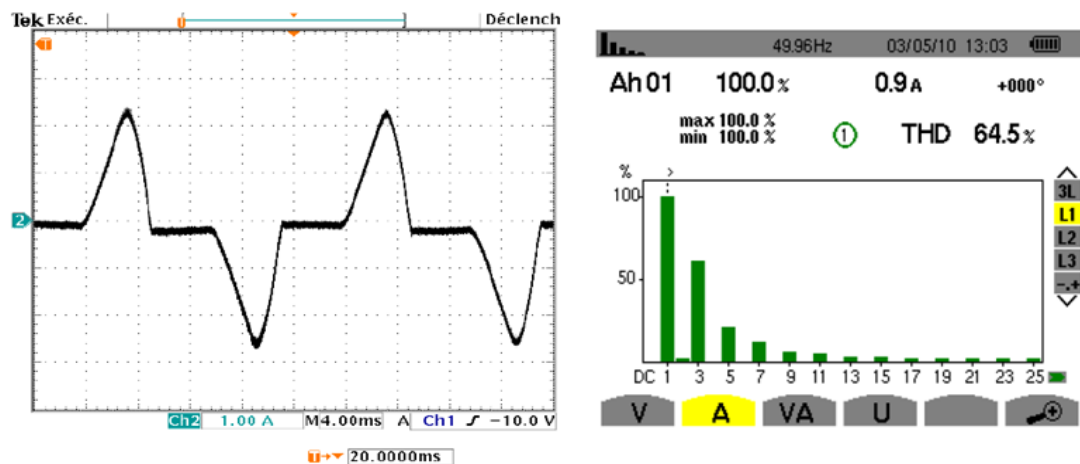


Figure I.1 forme d'onde du courant absorbé par un ordinateur et spectre associé

### I.2.3. Caractérisation des perturbations harmoniques

Plusieurs critères sont définis pour caractériser les perturbations. Le taux de distorsion harmonique et le facteur de puissance sont les plus employés pour quantifier respectivement les perturbations harmoniques et la consommation de puissance réactive. [4]

#### I.2.3.1. Taux de distorsion harmonique

On utilisera le terme THD (Total Harmonic Distortion) pour désigner le taux de distorsion harmonique. Le THD s'exprime par rapport à la fréquence fondamentale et caractérise l'influence des harmoniques sur l'onde de signal déformée.

Deux taux de distorsion harmonique sont distingués [5] :

- le taux de distorsion harmonique en courant, noté  $THD_i$
- le taux de distorsion harmonique en tension, noté  $THD_v$

Le premier s'exprime sous la forme :

$$THD_i = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \frac{I_h^2}{I_1^2}} \quad (\text{I.1})$$

Avec :  $I_1$  la valeur efficace du courant fondamental et  $I_h$  les valeurs efficaces des différentes harmoniques du courant.

Le  $THD_i$  ne dépend que des valeurs efficaces du courant de charge. En revanche, le  $THD_v$  est fonction des courants harmoniques, caractérisant la charge, et de l'impédance de court-circuit imposée par le réseau :

$$THD_v = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left( \frac{V_h}{V_1} \right)^2} = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left( \frac{|Z_{cc}^h| I_n}{V_1^2} \right)} \quad (\text{I.2})$$

$V_1$  : désigne la valeur efficace de  $v_1$ .

Ainsi, plus les impédances  $Z_{cc}^h$  ( $h > 1$ ) sont faibles, plus la distorsion en tension est faible

### I.2.3.2. Facteur de puissance

Le facteur de puissance est défini dans le cas général par le rapport de la puissance active sur la puissance apparente :

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \cos(\phi_n)}{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2} \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}} \quad (\text{I.3})$$

En présence des harmoniques, on définit la notion de puissance déformante  $D$  permettant de rendre compte des harmoniques. Son expression est donnée par l'équation suivante :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (\text{I.4})$$

L'expression du facteur de puissance peut alors se mettre sous la forme suivante :

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (\text{I.5})$$

On voit bien que la puissance déformante dégrade le facteur de puissance.

### I.2.4. Conséquences de la distorsion harmonique

De nombreux effets des harmoniques sur les installations et les équipements électriques peuvent être cités. Les effets les plus importants sont l'échauffement, l'interférence avec les réseaux de télécommunication, les défauts de fonctionnement de certains équipements électriques et le risque d'excitation de résonance [2], [6], [7] :

- **Echauffement**

Les pertes par effet Joule se décomposent en la somme des pertes issues du fondamental et de celles engendrées par les harmoniques :

$$P_j = RI^2 = RI^2 + R \sum_{h=2}^{\infty} I_h^2 \quad (\text{I.6})$$

Ces pertes supplémentaires occasionnées par la présence des courants harmoniques réduisent le rendement des équipements tels que les moteurs, les transformateurs, ... etc.

- **Dysfonctionnement de certains équipements**

En présence d'harmoniques, le courant et la tension peuvent changer plusieurs fois de signe au cours d'une demi-période. Par conséquent, les équipements sensibles au passage par zéro de ces grandeurs électriques sont perturbés.

- **Interférences dans les systèmes de communication**

Le couplage électromagnétique entre les réseaux électriques et de communication peut provoquer des interférences. Le courant circulant dans le réseau électrique engendre un champ magnétique qui induit un courant dans les conducteurs des réseaux de communication. L'importance des interférences est fonction de l'amplitude et de la fréquence des courants électriques ainsi que de l'importance du couplage électromagnétique entre les réseaux.

- **Excitation des résonances**

Des équipements constitués de capacités ou d'inductances peuvent avoir des fréquences de résonance proches de celles des harmoniques. Ainsi, les harmoniques sont amplifiés et il peut apparaître des surtensions ou des surintensités qui détériorent les câbles, font disjoncter les fusibles.

### I.2.5. Normes et réglementations

Afin de limiter les dysfonctionnements occasionnés par les harmoniques et en même temps pour limiter l'influence des charges sur le réseau de façon à éviter la modification de ses caractéristiques, des normes sur la qualité de l'énergie ont été imposées.

La *CEI* (*Commission Electrotechnique Internationale*) et l'*IEEE* (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) sont les deux principaux organismes de normalisation internationaux dans le domaine de l'électrotechnique. La *CEI* est un organisme officiel composé de comités nationaux de 63 pays, tandis que l'*IEEE* est une association professionnelle. Ces deux organismes réalisent la principale activité de normalisation dans le domaine des perturbations électriques au niveau mondial mais n'ont pas une uniformité de critères en ce qui concerne la définition des interactions entre le réseau et les charges connectés [8].

Afin de faciliter la connaissance des normes pour chaque domaine, les normes *CEI* qui couvrent tous les domaines de l'électrotechnique sont numérotées et référencées comme par exemple *CEI 61000* sur la compatibilité électromagnétique et *CEI 60063* qui définit les séries de valeurs normalisées pour les résistances et condensateurs.

Au niveau international (*CEI*), les normes *CEI-1000* définissent les niveaux des courants et des tensions harmoniques à respecter. Le Tableau I.1 présente la norme *CEI-1000-3-2* qui fixe la limitation des courants injectés dans un réseau public basse tension pour des équipements dont le courant par phase est inférieur à 16 A. Il s'agit là des appareils du domaine domestique. Aussi, du fait de leur puissance, les équipements industriels sont exclus du champ d'application de cette norme [9].

**Tableau I.1** Limites des composantes harmoniques en courant

Harmoniques impaires		Harmoniques paires	
Rang	Courant harmonique admissible maximal (A)	Rang	Courant harmonique admissible maximal (A)
3	2.30	2	1.08
5	1.14	4	0.43
7	0.77	6	0.30
9	0.40	8 < h < 40	0.23*8/h
11	0.33		
13	0.21		
15 < h < 39	0.15*15/h		

Les limitations en tension harmonique que les clients de *EDF* doivent respecter sont [8] :

- pour un harmonique pair :  $\frac{V_h}{V_1} \leq 0.6\%$
- pour un harmonique impair :  $\frac{V_h}{V_1} \leq 1\%$
- pour le taux de distorsion global de tension :  $THD < 1.6\%$

Il est d'usage de dire que, dans les installations industrielles, les tensions harmoniques dont le  $THD$  est inférieur à 5 % ne produisent pas d'effet notable. Entre 5 % et 7 % on commence à observer des effets, et pour plus de 10 % les effets sont quasi certains.

D'autre part, la norme principale, (*IEEE 519-1992, recommended practices and requirements for harmonic control in power systems*), détermine la procédure pour contrôler les harmoniques présents sur le réseau électrique. Elle impose également les limites recommandées de la pollution harmonique générée par les clients et de distorsion harmonique totale sur le réseau [10]. Cette norme limite la distorsion harmonique  $THD$  du courant des réseaux < 69 kV à 5 %.

### **I.3. Solutions de dépollution du réseau électrique**

Afin de compenser toutes les perturbations, deux méthodes de solution de dépollution, traditionnelle et moderne sont présentées. Le filtrage est une méthode de réduction des missions harmoniques au sein d'un site industriel, où la distorsion harmonique a graduellement augmenté ou comme solution globale pour un nouveau site, donc le filtre est un absorbeur de courants harmoniques. [11]

On distingue les techniques suivantes:

- a) les filtres passifs.
- b) les filtres actifs.
- c) les filtres hybrides.

#### **I.3.1 Solutions traditionnelles**

Afin de dépolluer les réseaux électriques, plusieurs solutions ont été proposées, dont le but est de limiter la propagation et l'effet des harmoniques dans les réseaux électriques. [12]

- L'augmentation de la puissance de court-circuit du réseau et l'utilisation des convertisseurs peu polluants qui ont pour effet de diminuer la distorsion harmonique.

- L'utilisation de dispositif du filtrage pour réduire la propagation des harmoniques produits par les charges non-linéaires.
- Les filtres passifs: cette solution de dépollution consiste à placer en parallèle sur le réseau d'alimentation une impédance très faible autour de la fréquence à filtrer et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau. Parmi les dispositifs du filtrage les plus répandus, On distinguera deux types de filtres assurant la limitation des tensions harmoniques:

- 1) Filtre passif résonnant.
- 2) Filtre passif amorti ou passe-haut

### I.3.1.1. Filtre résonant

Il est constitué par la mise en série d'une inductance, d'une résistance, et d'un condensateur. La figure (I.2) montre clairement le montage de ce dernier ainsi que leurs impédances en fonction de la fréquence [13]

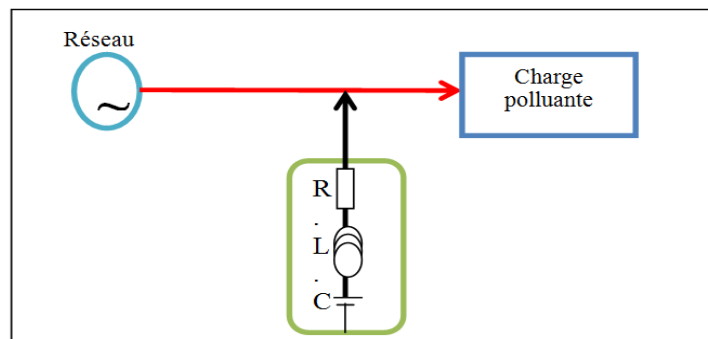


Figure I.2: Structure du filtre résonant.

### I.3.1.2. Filtre amorti

Le filtre passe-haut compense les harmoniques supérieurs ou égaux à sa fréquence propre. Il peut se connecter en parallèle avec d'autres filtres résonnants[13].



Figure I.3: Montage du filtre amorti.

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

- \* Manque de souplesse à s'adapter aux variations du réseau et de la charge.
- \* Equipements volumineux.
- \* Problème de résonance avec l'impédance du réseau.

### **I.3.2. Solutions modernes**

Deux raisons principales ont conduit à concevoir une nouvelle structure de filtrage moderne et efficace appelé filtre actif. La première raison est due aux inconvénients inhérents des solutions traditionnelles de dépollution qui ne répondent plus à l'évolution des charges et des réseaux électriques. La seconde raison fait suite à l'apparition de nouveaux composants semi-conducteurs, comme les thyristors GTO et les transistors IGBT. Le but de ces filtres est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à compenser les perturbations responsables de la dégradation des performances des équipements et installations électriques.

Nous citerons trois topologies possibles de filtres actifs :

- Le filtre actif parallèle (SFAP) : conçu pour compenser toutes les perturbations de courant comme les harmoniques, les déséquilibres et la puissance réactive.
- Le filtre actif série (FAS) : conçu pour compenser toutes les perturbations de tension comme les harmoniques, les déséquilibres et les creux de tension.
- La combinaison parallèle-série actifs : solution universelle pour compenser toutes les perturbations en courant et en tension[14].

#### **I.3.2.1. Filtrage Actif**

Le filtrage actif constitue aujourd'hui une solution plus sophistiquée que le filtrage passif, bénéficiant des technologies les plus performantes et constamment amélioré par les constructeurs. Le principe de fonctionnement du filtre actif réside dans le fait que celui-ci produit des courants qui s'opposent aux courants harmoniques créés par les charges non linéaires, tendant ainsi à rétablir un courant appelé du réseau quasi sinusoïdal. Ces filtres actifs sont encore appelés compensateurs actifs.

Ils sont utilisés en parallèle ou en série d'une installation nécessitant un traitement harmonique. Dans ce qui suit, nous donnons les structures les plus utilisées dans la littérature, à savoir les filtres parallèle série, combiné parallèle-série et les structures hybrides actifs -passifs[11].

### I.3.2.2. Filtre actif parallèle (SFAP)

Appelé aussi compensateur shunt, il est connecté en parallèle sur le réseau de distribution (figure 1.4). Il est le plus souvent commandé comme un générateur de courant. Il restitue dans le réseau électrique les courants harmoniques  $i_{inj}$  égaux à ceux absorbés par la charge non linéaire mais en opposition de phase, de telle sorte que le courant fourni par le réseau soit sinusoïdal et en phase avec la tension simple correspondante. Son indépendance vis-à-vis de la source et de la charge lui assure auto-adaptabilité, fiabilité et performance[14].

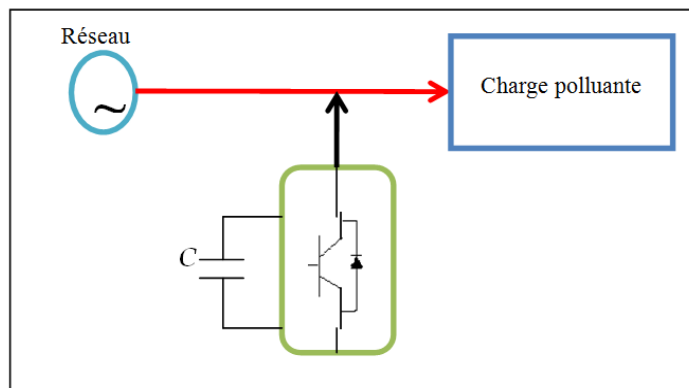


Figure I.4: Filtre actif parallèle.

### I.3.2.3. Filtre actif série (FAS)

Le filtre actif série engendre des tensions harmoniques  $V_h$  dont la somme avec la tension réseau  $V_s$  est une onde sinusoïdale (figure I.5). Il est destiné à protéger les installations sensibles aux perturbations provenant du réseau telles que les harmoniques en tension, les surtensions. En revanche, le filtrage série ne permet pas de compenser les courants harmoniques consommés par la charge[15].

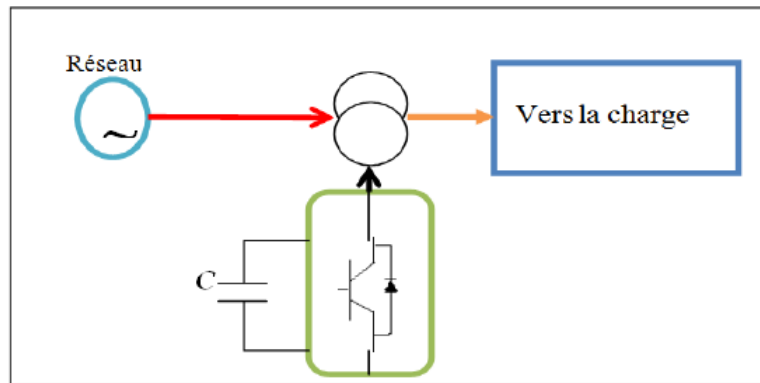


Figure I.5 : Filtre actif série.

#### I.3.2.4. Combinaison parallèle-série actifs (UPQC)

Cette combinaison parallèle-série actifs, aussi appelé (Unified Power Quality Conditioner) (UPQC), résulte de l'association des deux filtres actifs parallèle et série, comme le montre la Figure (I.6). Profitant des avantages des deux filtres actifs, l'UPQC assure un courant et une tension sinusoïdaux du réseau électrique à partir d'un courant et d'une tension perturbés de celui-ci [11].

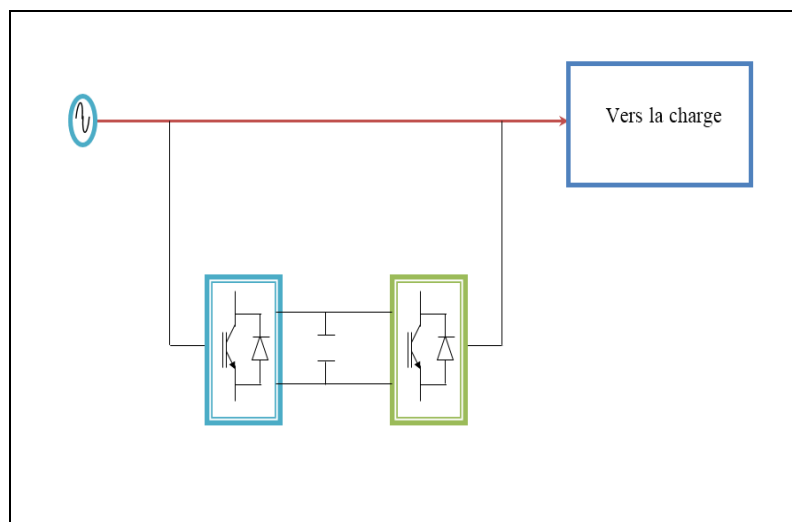


Figure I.6 : Filtre combiné parallèle-série (UPQC).

Il existe plusieurs autres groupes mixtes de filtres actifs avec cette fois des filtres passifs:

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

### I.3.2.5. Filtre actif hybride

Afin de réduire le dimensionnement et par conséquent le prix des filtres actifs l'association de filtres actifs de faible puissance à des filtres passifs peut être une solution. Plusieurs configurations sont possibles combinant éléments passifs et filtre actifs série ou

Parallèle :

- le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles ;
- le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles ;
- le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle;

La figure 1.7[4] montre l'une des configurations les plus récentes

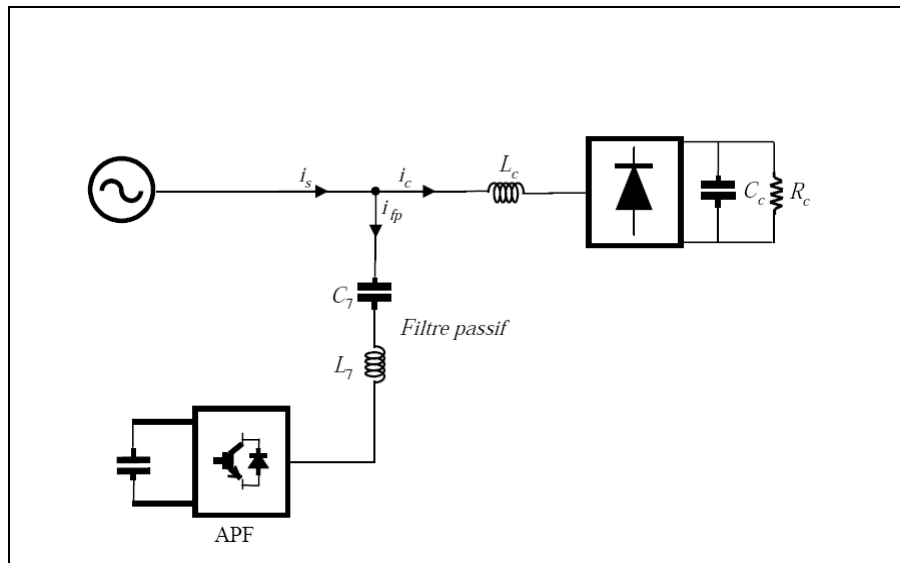


Figure I.7 : Filtre actif hybride.

## I.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la distorsion harmonique et les différentes sources de perturbation affectant la forme d'onde des tensions du réseau électrique ainsi que leurs effets néfastes sur les équipements électriques qui y sont connectés. Ces effets sont à l'origine d'échauffements et de dégradations du fonctionnement de ces équipements. Les normes imposées ont été également présentées. Elles fixent les limites de la génération d'harmonique. Ensuite, pour diminuer les effets de ces perturbations harmoniques, différentes solutions traditionnelles et modernes de dépollution ont été présentées. Les solutions classiques ne sont pas très efficaces pour traiter ce problème ; les technologies mises en œuvre, telles que les filtres passifs, sont souvent pénalisantes en termes

d'encombrement et de résonance. De plus, les filtres passifs ne peuvent pas s'adapter à l'évolution du réseau et des charges polluantes.

## **CHAPITRE II :**

### *Méthodes d'Extraction des Courants Harmoniques*

## II.1.Introduction

Dans ce chapitre nous allons étudier le filtre actif parallèle. Sa structure a été divisée en deux parties, la partie puissance et la partie contrôle-commande. Dans la partie puissance, on a retrouvé les trois principaux blocs de cette structure : l'onduleur de tension qui est un élément fondamental de ce filtre, l'élément de stockage d'énergie et le filtre de sortie. La partie contrôle-commande, comporte des blocs pour identifier des courants perturbateurs et la régulation du courant injecté par l'onduleur.

Deux méthodes d'identification sont utilisées : la méthode des puissances instantanées et la méthode des puissances instantanées modifiées. L'objectif de ce chapitre est de comprendre le fonctionnement du filtre actif parallèle et d'extraction des courants harmoniques.

## II.2. Structure de SAPF

La partie puissance d'un *SAPF*, comme on peut le voir sur la figure II.1[4] est constituée par :

- un onduleur de tension;
- un circuit capacitif de stockage de l'énergie;
- un filtre de sortie;

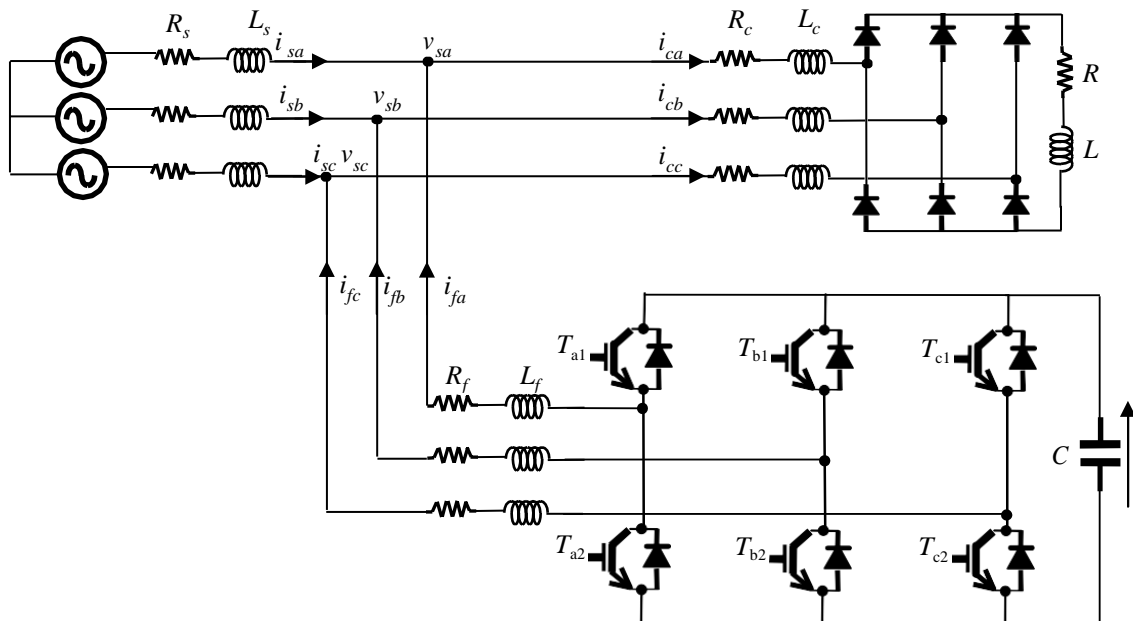


Figure. II.1. Circuit de puissance du filtre actif parallèle

## II.2.1. Onduleur de tension

### II.2.1.1. Structure générale

L'onduleur triphasé de tension à deux niveaux à base d'*IGBT* est constitué de six interrupteurs bidirectionnels en courant (commandés à l'amorçage et au blocage) conduisant le courant dans les deux directions grâce aux diodes en antiparallèles. Il est associé généralement à deux étages passifs l'un du côté continu et l'autre du côté alternatif. L'étage passif du côté alternatif, a comme fonction principale le filtrage, il est constitué d'inductance de sortie. Celui du côté continu assure le stockage de l'énergie par l'intermédiaire d'un condensateur  $C_{dc}$  de tension  $v_{dc}$  [4].

### II.2.1.2 Tension générée par l'onduleur

L'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur de la figure. II.1 dépendent de l'état des signaux de commande ( $S_a, S_b, S_c$ ), comme défini ci-dessous :

$$S_a = \begin{cases} 1 & T_1 \text{ ferm? et } T_4 \text{ ouvert} \\ 0 & T_1 \text{ ouvert et } T_4 \text{ ferm?} \end{cases}$$

$$S_b = \begin{cases} 1 & T_2 \text{ ferm? et } T_5 \text{ ouvert} \\ 0 & T_2 \text{ ouvert et } T_5 \text{ ferm?} \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

$$S_c = \begin{cases} 1 & T_3 \text{ ferm? et } T_6 \text{ ouvert} \\ 0 & T_3 \text{ ouvert et } T_6 \text{ ferm?} \end{cases}$$

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

$$\begin{bmatrix} V_{fa} - V_{fb} \\ V_{fb} - V_{fc} \\ V_{fc} - V_{fa} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_a - S_b \\ S_b - S_c \\ S_c - S_a \end{bmatrix} V_{dc} \quad (\text{II.2})$$

Les trois tensions simple de sortie de l'onduleur notées ( $v_{fa}, v_{fb}, v_{fc}$ ) sont référencées par rapport au neutre du réseau et vérifient les équations suivantes :

$$\begin{bmatrix} v_{fa} \\ v_{fb} \\ v_{fc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} + R_f \begin{bmatrix} i_{fa} \\ i_{fb} \\ i_{fc} \end{bmatrix} + L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{fa} \\ i_{fb} \\ i_{fc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.3})$$

On suppose que les trois tensions du réseau soient équilibrées et sachant que la somme des courants injectés par l'onduleur est nulle, on peut écrire :

$$\begin{aligned} v_{sa} + v_{sb} + v_{sc} &= 0 \\ i_{fa} + i_{fb} + i_{fc} &= 0 \end{aligned} \quad (\text{II.4})$$

Nous pouvons donc déduire la relation suivante :

$$v_{fa} + v_{fb} + v_{fc} = 0 \quad (\text{II.5})$$

A partir des équations (II.2) et (II.4), nous obtenons :

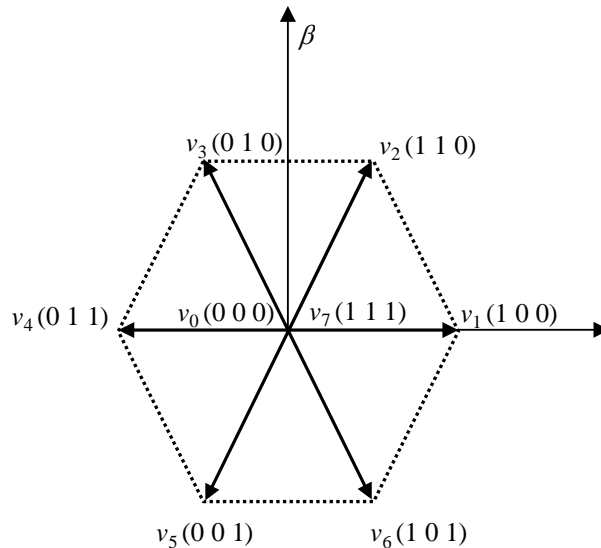
$$\begin{bmatrix} v_{fa} \\ v_{fb} \\ v_{fc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2s_a & -s_b & -s_c \\ -s_a & 2s_b & -s_c \\ -s_a & -s_b & 2s_c \end{bmatrix} \frac{V_{dc}}{3} \quad (\text{II.6})$$

Puisque les grandeurs  $s_a$ ,  $s_b$  et  $s_c$  peuvent prendre chacune deux valeurs (0 ou 1), on a donc, huit configurations possibles pour les tensions de sortie du filtre actif ( $v_{fa}$ ,  $v_{fb}$ ,  $v_{fc}$ ) référées au neutre  $n$  de la source, comme le montre le tableau II.1. Parmi elles, deux sont nulles. Dans ce tableau,  $\vec{v}_f$  est la représentation vectorielle des tensions ( $v_{fa}$ ,  $v_{fb}$  et  $v_{fc}$ ) fournies par l'onduleur dans le repère orthogonal ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) [7, 16,17]

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

vecteur	$S_{a1}$	$S_{b1}$	$S_{c1}$	$v_{fa}$	$v_{fb}$	$v_{fc}$
$v_0$	0	0	0	0	0	0
$v_1$	1	0	0	$2v_{dc}/3$	$-v_{dc}/3$	$-v_{dc}/3$
$v_2$	1	1	0	$v_{dc}/3$	$v_{dc}/3$	$-2v_{dc}/3$
$v_3$	0	1	0	$-v_{dc}/3$	$2v_{dc}/3$	$-v_{dc}/3$
$v_4$	0	1	1	$-2v_{dc}/3$	$v_{dc}/3$	$v_{dc}/3$
$v_5$	0	0	1	$-v_{dc}/3$	$-v_{dc}/3$	$2v_{dc}/3$
$v_6$	1	0	1	$v_{dc}/3$	$-2v_{dc}/3$	$2v_{dc}/3$
$v_7$	1	1	1	0	0	0

Dans le repère  $(\alpha, \beta)$ , en considérant  $\vec{v}_f$  le vecteur correspondant aux tensions de sortie du filtre actif, les 8 cas possibles de  $V_f$  sont donnés par la figure.II.2[4]. Le vecteur  $\vec{v}_f$  représente la tension de référence que doit produire l'onduleur. Ceci signifie, que l'onduleur ne peut être capable de fournir des tensions égales aux tensions de référence que si le vecteur formé par ces derniers reste à l'intérieur du polygone présenté dans la figure précédente [17]



**Figure. II.2.** Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur

### II.3.Généralités sur les méthodes d'identification

La qualité de la compensation des harmoniques de courant dépend fortement des performances de la méthode d'identification choisie. En effet, un système de commande, même très efficace, ne pourra pas à lui seul effectuer un filtrage satisfaisant si les courants harmoniques sont mal identifiés. Pour cette raison, de nombreuses méthodes d'identification ont été développées dans la littérature. Elles peuvent être regroupées selon deux approches[16]:

#### II.3.1. Identification dans le domaine fréquentiel

Ce type d'approche utilise la transformée de Fourier rapide, pour extraire les harmoniques du courant de charge. Cette méthode est particulièrement adaptée aux charges dont le contenu harmonique varie lentement. Elle présente également l'avantage de sélectionner chaque harmonique individuellement et permet ainsi de ne compenser que les courants

harmoniques prépondérants. Cependant, cette méthode nécessite des calculs lourds afin d'identifier ces courants harmoniques. Pour cette raison, les méthodes fréquentielles ne sont pas utilisées en pratique car la charge polluante peut généralement varier rapidement au cours du temps[16].

### II.3.2. Identification dans le domaine temporel

De nombreuses méthodes d'identification des courants de référence dans le domaine temporel ont été publiées dans la littérature scientifique. Les plus significatives feront l'objet des paragraphes suivants[16].

### II.4. Méthode des puissances active et réactive instantanées

La méthode des puissances active et réactive instantanées (couramment notée méthode *pq*) a été initialement développée par Akagi et exploite la transformation de Concordia des tensions simples et des courants de ligne, afin de calculer les puissances active et réactive instantanées. La composante fondamentale est transformée en une composante continue et les composantes harmoniques en composantes alternatives. En éliminant la composante continue de la puissance active instantanée (correspondant à la (FPB)), les composants harmoniques peuvent être identifiés. Le principe de cette méthode classique est maintenant succinctement décrit[16].

Soient respectivement les tensions simples d'un réseau triphasé sans homopolaire (connecté à une charge polluante) et les trois courants de charge, notés  $v_{s1}$ ,  $v_{s2}$ ,  $v_{s3}$  et  $i_{c1}$ ,  $i_{c2}$ ,  $i_{c3}$ . La transformation de Concordia permet de ramener ce système triphasé équilibré à un système diphasé dont les axes sont en quadrature[16] :

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c1} \\ i_{c2} \\ i_{c3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

$$\begin{bmatrix} v_{\alpha} \\ v_{\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{s1} \\ v_{s2} \\ v_{s3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

La puissance active instantanée  $p$  et la puissance réactive instantanée  $q$  sont définies par :

$$\begin{bmatrix} p \\ -q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

Les puissances active et réactive instantanées peuvent s'écrire comme la somme d'une composante continue et d'une composante alternative :

$$\begin{bmatrix} p \\ -q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{p} + \tilde{p} \\ \bar{q} + \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

Avec  $p$  et  $q$  les composantes continues de  $p$  et  $q$ , et  $\tilde{p}$  et  $\tilde{q}$  les composantes alternatives de  $p$  et  $q$ .

A partir de les équations (II.9), nous pouvons déduire les expressions des composantes du courant de charge selon les axes  $\alpha \beta$  :

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ -q \end{bmatrix} = \frac{1}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ -q \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

En remplaçant (II.10) dans (II.11), ces courants s'expriment selon les axes  $\alpha \beta$  par :

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ -\bar{q} \end{bmatrix} + \frac{1}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ -\tilde{q} \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

Maintenant, si on souhaite également compenser la puissance réactive, ainsi que les courants harmoniques générés par les charges non linéaires, le signal de référence du filtre actif parallèle doit inclure,  $\tilde{p}$ ,  $\tilde{q}$  et  $\tilde{q}$ . Dans ce cas, les courants de référence sont calculés par:

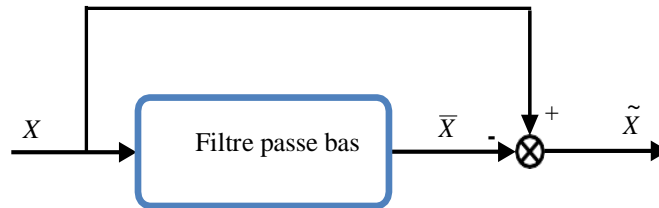
$$\begin{bmatrix} I_{ref\alpha} \\ I_{ref\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} + p_c \\ -q \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

Enfin, il est aisé d'obtenir les courants de référence selon les axes  $abc$  par la transformation inverse de Concordia :

$$\begin{bmatrix} i_{ref1} \\ i_{ref2} \\ i_{ref3} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ref\alpha} \\ i_{ref\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

### II.4.1. Filtre passe bas

Il est évident, d'après la relation (II.14), que pour identifier une des trois composantes, par exemple les courants harmoniques, les parties alternatives des puissances réelles et imaginaires doivent être séparées des parties continues. Cette séparation peut être réalisée en utilisant deux filtres, le premier pour isoler la partie  $p$  de la puissance active instantanée, le second pour isoler la partie  $q$  de la puissance réactive instantanée, comme le présente la Figure II.3[4].



**Figure.II.3.** Schéma représentant le principe de séparation des puissances.

La relation suivante donne l'expression générale d'un filtre passe-bas du deuxième ordre :

$$F_{pb}(s) = \frac{\omega_0^2}{S^2 + 2\xi_0\omega_0 S + \omega_0^2} \quad (\text{II.15})$$

$\omega_0 = 2\pi f_0$  : est la fréquence de coupure du filtre .

S: l'opérateur de Laplace.

$\omega_0$  : déphasement.

Le schéma de la figure II.4[16] illustre les différentes étapes permettant l'obtention des courants de référence par la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées.

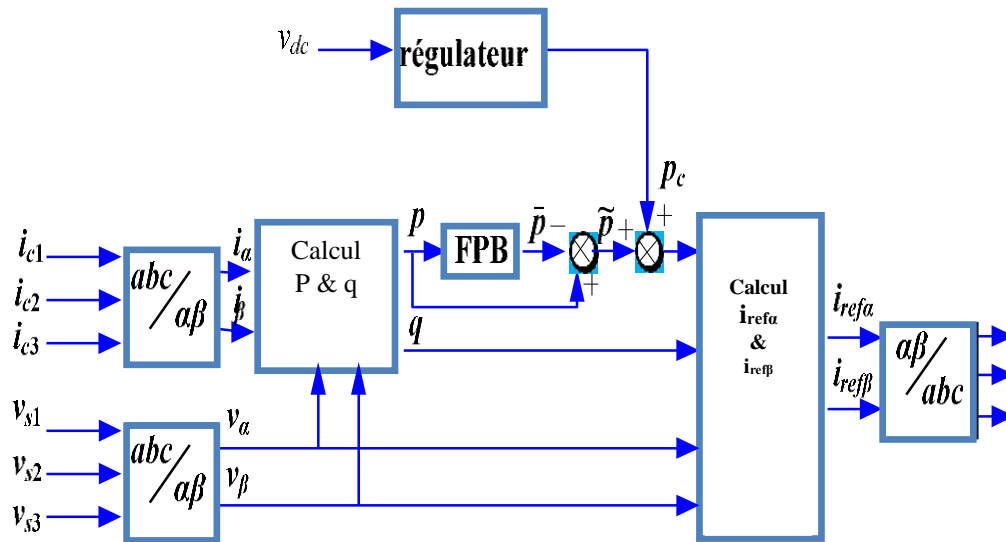


Figure. II.4. Schéma de principe de la méthode d'identification des puissances instantanées.

## II.5. Méthode des puissance réelle et imaginaire instantanées modifiée

### II.5.1.Principe du FMV

Son principe de base s'appuie sur les travaux de Song Hong-Scok. Il est basé directement sur l'extraction de la composante fondamentale des signaux d'entrée (tension ou courant), suivant les axes  $(\alpha, \beta)$  [4]. La fonction de transfert de ce filtre est alors la suivante :

$$H(s) = \frac{\hat{X}_{\alpha\beta}(s)}{X_{\alpha\beta}(s)} = K \frac{(S + K) + j\omega_c}{(S + K)^2 + j\omega_c^2} \quad (II.16)$$

Où  $\omega_c$  est défini par :

$$\omega_c = \xi \cdot n \cdot \omega_f \quad (II.17)$$

$\omega_c$  : la pulsation de coupure du filtre .

$\xi$  : la pulsation de la composante fondamentale du signal d'entrée .

$n$  : le rang de la composante du signal à filtrer.

$\omega_f$  : une constante égale à  $\pm 1$  (composante directe ( $\xi=1$ ) ou inverse ( $\xi=-1$ ))

$K$  : une constante positive

$X_{\alpha\beta}$  : les signaux d'entrée du FMV (tension ou courant).

$\hat{X}_{\alpha\beta}$  : les signaux de sortie du FMV.

A partir de l'équation (II.16) et après un court développement, nous pouvons établir les deux expressions suivantes :

$$\hat{X}_\alpha(s) = \frac{K(S+K)}{(S+K)^2 + \omega_c^2} X_\alpha(s) - \frac{K\omega_c}{(S+K)^2 + \omega_c^2} X_\beta(s) \quad (\text{II.18})$$

$$\hat{X}_\beta(s) = -\frac{K(S+K)}{(S+K)^2 + \omega_c^2} X_\alpha(s) + \frac{K\omega_c}{(S+K)^2 + \omega_c^2} X_\beta(s) \quad (\text{II.19})$$

Les équations (II.18) et (II.19) peuvent également être exprimées sous la forme :

$$\hat{X}_\alpha(s) = \frac{K}{S} \left[ X_\alpha(s) - \hat{X}_\alpha(s) \right] - \frac{\omega_c}{S} \hat{X}_\beta(s) \quad (\text{II.20})$$

$$\hat{X}_\beta(s) = \frac{K}{S} \left[ X_\beta(s) - \hat{X}_\beta(s) \right] - \frac{\omega_c}{S} \hat{X}_\alpha(s) \quad (\text{II.21})$$

La Figure II.5[4] présente le schéma bloc du filtre multi-variable

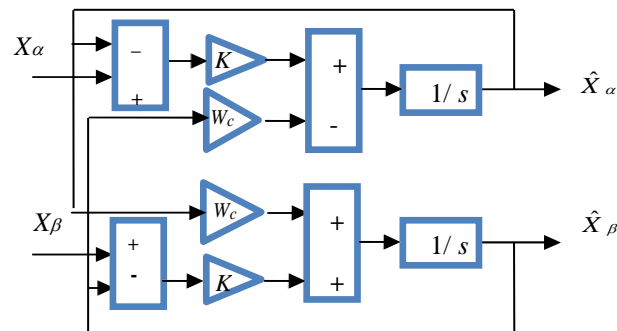


Figure II.5. Schéma bloc du FMV.

### II.5.2. Méthode "pq-modifiée"

La figure II-6[4] présente le principe proposé pour identifier les courants de référence. Dans la nouvelle méthode proposée, les courants de référence sont identifiés en utilisant une version modifiée de la méthode  $p-q$ , associée à deux FMVs.

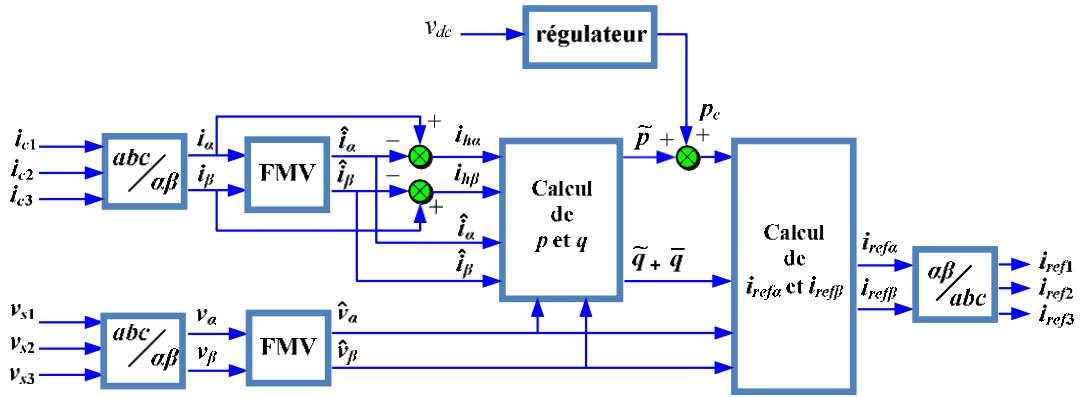


Figure II-6. Identification des courants de référence par la méthode "p-q-modifiée".

Les composantes alternatives des puissances active et réactive instantanées sont obtenues par la relation :

$$\begin{bmatrix} \tilde{p} \\ -\tilde{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{v}_\alpha & \hat{v}_\beta \\ -\hat{v}_\beta & \hat{v}_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{h\alpha} \\ i_{h\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{II.22})$$

Avec  $i_{h\alpha}$  et  $i_{h\beta}$  définis par:

$$i_{h\alpha} = \left( i_{\alpha d} - \hat{i}_{\alpha d} \right) + \left( i_{\alpha inv} - \hat{i}_{\alpha inv} \right) \quad (\text{II.23})$$

$$i_{h\beta} = \left( i_{\beta d} - \hat{i}_{\beta d} \right) + \left( i_{\beta inv} - \hat{i}_{\beta inv} \right) \quad (\text{II.24})$$

A partir des équations présentées à la section précédente (section II.5.2), on peut remarquer que les termes  $i_{h\alpha}$  et  $i_{h\beta}$  contiennent les composantes harmoniques, directes et inverses. La composante fondamentale de la puissance réactive instantanée est définie par :

$$\bar{q} = \hat{v}_\beta \hat{i}_\alpha - \hat{v}_\alpha \hat{i}_\beta \quad (\text{II.25})$$

les courants de référence selon les axes ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) sont calculés par :

$$i_{ref\alpha} = \frac{\hat{v}_\alpha}{\hat{v}_\alpha^2 + \hat{v}_\beta^2} (\tilde{p} + p_c) + \frac{\hat{v}_\beta}{\hat{v}_\alpha^2 + \hat{v}_\beta^2} (\tilde{q} + \bar{q}) \quad (\text{II.26})$$

$$i_{ref\beta} = \frac{\hat{v}_\beta}{\hat{v}_\alpha^2 + \hat{v}_\beta^2} (\tilde{p} + p_c) + \frac{\hat{v}_\alpha}{\hat{v}_\alpha^2 + \hat{v}_\beta^2} (\tilde{q} + \bar{q}) \quad (\text{II.27})$$

En substituant les équations (II.22) et (II.25) dans les équations (II.26) et (II.27), nous obtenons :

$$\mathbf{i}_{ref\alpha} = \mathbf{i}_{h\alpha} + \mathbf{i}_{q\alpha} + \mathbf{i}_{c\alpha} \quad (\text{II.28})$$

$$\mathbf{i}_{ref\beta} = \mathbf{i}_{h\beta} + \mathbf{i}_{q\beta} + \mathbf{i}_{c\beta} \quad (\text{II.29})$$

Où  $\mathbf{i}_{q\alpha}$ ,  $\mathbf{i}_{q\beta}$ ,  $\mathbf{i}_{c\alpha}$  et  $\mathbf{i}_{c\beta}$  sont définis par :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{i}_{q\alpha} \\ \mathbf{i}_{q\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\hat{v}_\alpha^2 + \hat{v}_\beta^2} \begin{bmatrix} 0 & -\hat{v}_\beta \\ 0 & \hat{v}_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -\bar{q} \end{bmatrix} \quad (\text{II.30})$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{i}_{c\alpha} \\ \mathbf{i}_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\hat{v}_\alpha^2 + \hat{v}_\beta^2} \begin{bmatrix} \hat{v}_\alpha & 0 \\ \hat{v}_\beta & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_c \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.31})$$

Les courants de référence obtenus à partir des équations (II.28) et (II.29) contiennent trois termes :

- \* le premier terme correspond aux composantes harmoniques, directes et inverses.
- \* le deuxième terme est le courant réactif destiné à compenser la puissance réactive.
- \* le troisième terme est le courant actif destiné à maintenir la tension  $v_{dc}$  égale à sa valeur de référence  $v_{dc-ref}$ .

Les trois courants de référence selon les axes  $abc$ , notés  $i_{ref1}$ ,  $i_{ref2}$  et  $i_{ref3}$ , sont finalement obtenus en transformant les équations (II.28) et (II.29) à l'aide de la transformation inverse de Concordia[4].

## II.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié en détail la structure de SAPF à deux niveaux. Puis, nous avons présenté généralités sur les méthodes d'identification, ensuite nous avons présenté méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées pour l'identification des courants de référence. La tension appliquée dans la méthode d'identification est une tension triphasée fournie par le réseau. La tension du réseau doit être saine (sinusoïdale et équilibrée), pour que la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées soit applicable. Dans sa forme classique, cette ne permet pas la détermination d'un courant

harmonique d'un rang particulier. Etant donné que la tension du réseau est souvent déséquilibrée et/ou déformée et afin de généraliser l'application de cette méthode pour l'adopter à tout type de tension, nous proposons une méthode d'extraction des courants harmoniques basée sur l'utilisation d'un *FMV*, cette nouvelle méthode appelée "méthode p-q modifiée".

# **CHAPITRE III :**

## ***Commande Directe de Puissance : Théorie & Simulation***

### III.1.Introduction

Après avoir insisté, dans le chapitre précédent, sur l'importance de l'étape l'extraction des courants (puissances) harmoniques sur l'efficacité du filtre actif parallèle, nous allons présenter ici, la façon de poursuivre ces courants ou puissances dans notre cas. Nous présenterons dans ce chapitre le principe de commande du SAPF par deux techniques. La première approche est basée sur l'utilisation d'un filtre passe-bas. La deuxième approche est basée sur l'utilisation d'un filtre multi-variable. Enfin, des résultats de simulation sont présentés et commentés.

### III.2.Commande direct de puissance du SAPF

Le principe du contrôle direct a été proposé à la référence et il a été développé plus tard dans de nombreuses applications. Le but était d'éliminer le bloc de modulation et les boucles internes en les remplaçant par un tableau de commutation dont les entrées sont les erreurs entre les valeurs de références et les mesures.

La première application développée visait le contrôle d'une machine électrique et la structure de contrôle est connue sous la dénomination de Contrôle Direct de Couple (D.T.C). Dans ce cas, le flux statorique et le couple électromagnétique de la machine sont contrôlés sans aucun bloc de modulation. Par la suite, une technique similaire de commande en puissance (D.P.C.) était proposée par pour une application de contrôle des redresseurs connectés au réseau. Dans ce cas, les grandeurs contrôlées sont les puissances active et réactive instantanées [18]. Avec la D.P.C. il n'y a pas de boucle de régulation en courant ni d'élément de modulation MLI, car les états de commutation de l'onduleur, pour chaque période d'échantillonnage, sont sélectionnés à partir d'une table de commutations, basée sur l'erreur instantanée entre les valeurs de références et celles mesurées ou estimées des puissances active et réactive, et la position angulaire du vecteur de tension de source. Généralement avec cette stratégie de commande, la tension du bus continu est régulée pour un contrôle de la puissance active et le fonctionnement avec un facteur de puissance unitaire est obtenu en imposant la puissance réactive à une valeur nulle.

### III.3.Etat de l'art du contrôle direct de puissance

Le principe de base de commande directe de puissance a été originalement présenté par Takahashi *et al.* en 1986 et il a été développé plus tard pour plusieurs applications. Le but était d'éliminer le bloc de modulation de largeur d'impulsion et les boucles internes des

variables contrôlées en les remplaçant par une table de commutation dont les entrées sont les erreurs entre les valeurs de référence et les mesures. En 1998, Noguchi *et al.* ont introduit la première application pratique du concept de la commande directe de puissance. Cette application est utilisée pour contrôler les puissances instantanées active et réactive du redresseur à *MLI* triphasé sans capteurs de tension du réseau. En 2001, Malinowski *et al.* ont introduit une nouvelle configuration de *DPC* basée sur un estimateur de flux virtuel. Cependant, les deux dernières structures présentent un inconvénient majeur réside dans sa fréquence de commutation variable. Pour surmonter ce problème, dans Malinowski *et al.*, ont présenté un nouveau schéma de commande direct de puissance utilisant une modulation de largeur d'impulsion vectorielle (*SVM*) afin d'obtenir une fréquence de commutation constante où les régulateurs à hystérésis et la table de commutation sont remplacés par des régulateurs *PI* et une commande *SVM*. Par conséquent, les performances de la commande dépendent fortement de l'aptitude de la boucle des régulateurs *PI*. Récemment, d'autres structures du *DPC* basées sur des approches prédictives ont fait l'objet de publications internationales. Dans ce sens, en 2008, Cortes *et al.*, ont exposé une structure de *DPC* basée sur la commande prédictive. Les avantages principaux de cette stratégie consistent dans l'absence de régulateurs *PI* pour le courant, de transformation de repères et de modulation *MLI*.

Une année plus tard, dans [19], une commande basée sur l'application des règles floues des règles floues a été proposée. Dans ce cas, les erreurs de suivi de référence des puissances active et réactive, converties en variables floues, sont utilisées directement pour la sélection du vecteur de commande adéquat. Plus récemment encore, Portillo *et al.*, ont proposé d'appliquer la commande directe de puissance pour le convertisseur triphasé *NPC* à trois niveaux. Par ailleurs, il est intéressant de mentionner que la majorité des travaux utilisant la commande *DPC* est appliquée aux redresseurs à *MLI* et peu s'intéressent aux filtres actifs [20], [21].

#### III.4. Principe du DPC classique

La figure III.4[4] montre la configuration globale de la commande directe de puissance appliquée au *SAPF*. Elle est analogue à celle du contrôle direct de couple (*DTC*) des machines à induction.

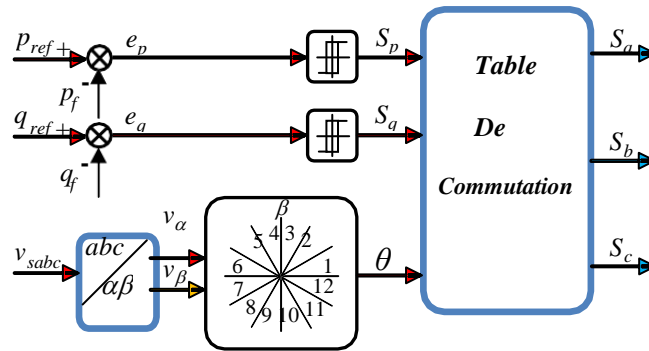


Figure III.1. Configuration générale de la commande directe de puissance.

La DPC consiste à sélectionner un vecteur de commande d’après une table de commutation. Cette dernière est fondée sur l’erreur numérisée  $S_p, S_q$  qui sont limitées par une bande d’hystérésis, aussi bien que sur la position angulaire de la tension au point de raccordement de la charge au réseau PCC. Le plan  $(\alpha, \beta)$  est divisé en douze secteurs pour déterminer le secteur de travail [22].

### III.4.1. Calcul des puissances instantanées

#### III.4.1.1. Calcul des puissances instantanées injectées par SAPF

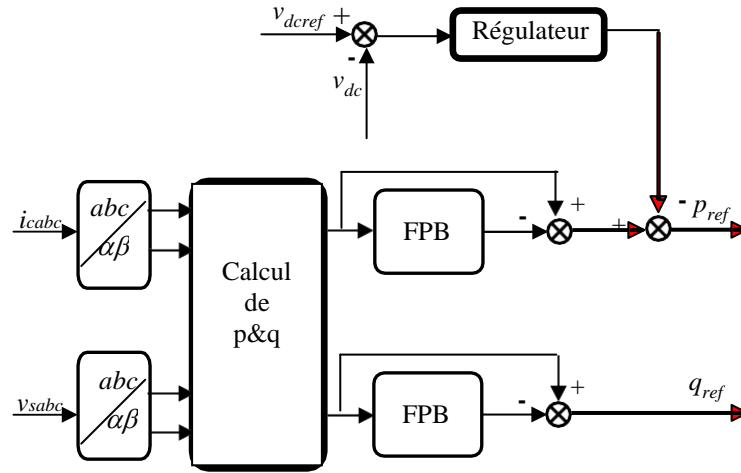
En se basant sur la mesure des tensions au point PCC :  $v(t)_{sa}, v(t)_{sb}, v(t)_{sc}$  et des courants injectés  $i(t)_{fa}, i(t)_{fb}, i(t)_{fc}$  par SAPF, les puissances injectées active et réactive instantanées peuvent être calculées respectivement par les relations[4].

$$p_s(t) = V_{sa} \cdot i_{fa} + V_{sb} \cdot i_{fb} + V_{sc} \cdot i_{fc} \tag{III.1}$$

$$q_s(t) = \frac{1}{\sqrt{3}} [(V_{sa} - V_{sb}) i_{fc} + (V_{sb} - V_{sc}) i_{fa} + (V_{sc} - V_{sa}) i_{fb}] \tag{III.2}$$

#### III.4.1.2. Calcul des puissances instantanées de référence

Pour la détection des puissances instantanées de référence, on a appliqué une méthode similaire à la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées étudiée globalement dans le **Chap. II § II.4**. Le schéma de la Figure III.2 illustre les différentes étapes permettant l’obtention des composantes active et réactive de puissances de référence[4].



**Figure.III.2.** Schéma de principe de génération des puissances de référence pour DPC classique.

### III.4.2. Comparateurs à hystérésis

Le contrôle par hystérésis est le contrôle de base pour des convertisseurs statiques. Les instants de fermeture et d'ouverture des interrupteurs sont déterminés directement à partir de l'erreur entre la puissance de référence et la puissance injectée par un comparateur à hystérésis caractérisé par une bande fixée au préalable comme le montre la Figure III.1. Le contrôleur proposé dans la *DPC* est le comparateur à deux niveaux pour les puissances active et réactive. Le comparateur à hystérésis à trois niveaux peut être envisagé pour plus d'amélioration [21],[23]

$$e_p = P_{ref} - P_{inj} \quad (III.2)$$

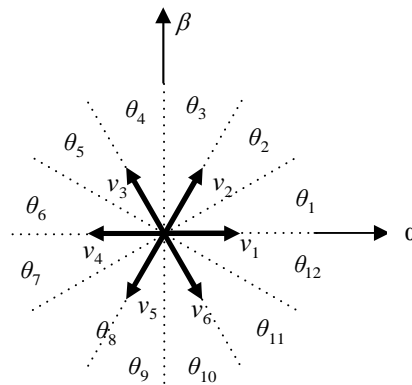
$$e_q = q_{ref} - q_{inj} \quad (III.3)$$

La sortie des régulateurs à hystérésis donnée par les variables booléennes  $p S$  et  $q S$ , qui prennent l'état "1" pour une augmentation de la variable contrôlée ( $p$  ou  $q$ ) et l'état "0" pour une diminution :

$$\begin{aligned} S_p &= 1 \quad \text{si } P_{ref} - P_{inj} \geq h_p \quad ; S_p = 0 \quad \text{si } P_{ref} - P_{inj} \leq -h_p \\ S_q &= 1 \quad \text{si } q_{ref} - q_{inj} \geq h_q \quad ; S_q = 0 \quad \text{si } q_{ref} - q_{inj} \leq -h_q \end{aligned} \quad (III.4)$$

### III.4.3.Choix du secteur

L'influence de chaque vecteur de sortie résultant du SAPF sur les puissances active et réactive est très dépendante de la position réelle du vecteur de la tension de source. Ainsi, outre les signaux des deux contrôleurs à hystérésis, la table de commutation fonctionne selon la position du vecteur de la tension de source, qui tourne à la pulsation( $\omega$ ) , dans le plan complexe. Toutefois, au lieu d'introduire à la table de commutation la position exacte du vecteur de la tension, le bloc du choix de secteur nous informe dans quel domaine est localisé l'actuel vecteur de la tension de source



**Figure III.3.** Représentation du vecteur de la tension dans le plan de l'espace vectoriel ( $\alpha, \beta$ ).

Afin d'augmenter la précision et aussi pour éviter les problèmes rencontrés aux frontières de chaque vecteur de commande, le plan de l'espace vectoriel est divisé en 12 secteurs de  $30^\circ$  chacun figure III.3[4] où le premier secteur est défini entre ( $0 < \theta_1 < \pi/6$ ) . Les régions consécutives suivent dans le sens trigonométrique le même critère, qui peut être génériquement exprimé par :

$$(n-1)\frac{\pi}{6} \leq \theta_n \leq n\frac{\pi}{6}, \quad n = 1, 2, 3, \dots, 12 \quad (\text{III.5})$$

Selon l'angle du vecteur de la tension de source référencé sur l'axe ( $\alpha$ ) , le secteur où le vecteur est localisé sera sélectionné. L'angle est calculé en utilisant la fonction trigonométrique inverse, basée sur les composantes du vecteur de la tension dans le repère ( $\alpha, \beta$ ) , indiquée par l'équation (III.6) :

$$\theta = \arctan \frac{v_\alpha}{v_\beta} \quad (\text{III.6})$$

### III.4.4. Table de commutation

Les signaux d'erreur numérisés et la position angulaire sont introduits dans une table de commutation dans laquelle sont mémorisés tous les états de commutation dp et dq du convertisseur qui prennent l'état "1" pour une augmentation de la variable contrôlée (P ou q) et l'état "0" pour une diminution. La largeur de la bande d'hystérésis a une influence sur la performance du filtre actif parallèle en particulier, sur la distorsion du courant harmonique, et sur la fréquence moyenne de commutation. Les régulateurs à hystérésis à deux niveaux pour les puissances active et réactive instantanées peuvent être décrits comme suit :

- Pour la puissance active :

$$\begin{cases} \text{si } P^* - P \geq HBp & sp = 1 \\ \text{si } P^* - P \leq -HBp & sp = 0 \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

- De même manière pour la puissance réactive :

$$\begin{cases} \text{si } q^* - q \geq HBq & sq = 1 \\ \text{si } q^* - q \leq -HBq & sq = 0 \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

En utilisant cette table de commutation ; les états de commutation optimales du convertisseur peuvent être sélectionnés de manière unique à chaque instant spécifique selon la combinaison des signaux d'entrée numérisés comme il est montré sur

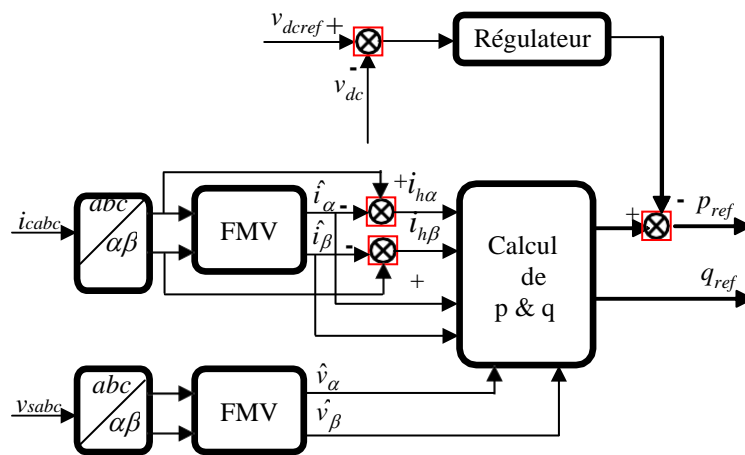
le tableau III.1 :

**Tableau III.1** : Table de commutation de la DPC

$S_p$	$S_q$	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_4$	$\theta_5$	$\theta_6$	$\theta_7$	$\theta_8$	$\theta_9$	$\theta_{10}$	$\theta_{11}$	$\theta_{12}$
1	0	$v_2$	$v_2$	$v_3$	$v_3$	$v_4$	$v_4$	$v_5$	$v_5$	$v_6$	$v_6$	$v_1$	$v_1$
	1	$v_1$	$v_1$	$v_2$	$v_2$	$v_3$	$v_3$	$v_4$	$v_4$	$v_5$	$v_5$	$v_6$	$v_6$
0	0	$v_3$	$v_4$	$v_4$	$v_5$	$v_5$	$v_6$	$v_6$	$v_1$	$v_1$	$v_2$	$v_2$	$v_3$
	1	$v_5$	$v_6$	$v_6$	$v_1$	$v_1$	$v_2$	$v_2$	$v_3$	$v_3$	$v_4$	$v_4$	$v_5$

### III.5.Principe du DPC proposé

Afin d'améliorer les performances de la *DPC* en conditions non idéales, une nouvelle *DPC* sera développée dans ce chapitre. Nous présentons dans cette section, une configuration du *DPC* pour le *SAPF* triphasé utilisant une nouvelle approche pour l'identification des puissances de référence. Dans ce cas, l'extraction des puissances de référence n'est plus basée sur le filtre passe-bas, mais elle est basée sur le filtre multi-variable qui déjà étudié dans le *Chap. II § II.4*. De manière similaire à la méthode précédente avec deux filtres passe-bas, notre démarche consiste à remplacer les deux filtres passe-bas par deux filtres multi-variables selon le schéma présenté sur la figure III.4[4] [20].



**Figure.III.4.** Schéma de principe de génération des puissances instantanées de référence pour DPC proposée

### III.5. Résultats de simulation

Afin de valider la nouvelle commande du *SAPF*, ci-dessus développée, nous avons effectué des simulations à l'aide des outils **Matlab/Simulink** et de la bibliothèque **SymPowerSystems**. Dans cette section, nous présentons les résultats pour les deux commandes dans les trois différents cas [4]:

- \* Tensions de source sinusoïdales équilibrées (Cas A);
- \* Tensions de source sinusoïdales déséquilibrées (Cas B);
- \* Tensions de source équilibrées contenant des harmoniques (Cas C).

Pour prouver l'efficacité de la nouvelle structure en faisant une comparaison par rapport à la structure classique. La simulation est effectuée pour les mêmes paramètres du modèle de la Figure II.1 qui sont rassemblés dans le Tableau suivant :

**Tableau III.2.** Paramètres de simulation d'un filtre actif.

Paramètre		Valeur numérique
Réseau électrique	$E_s$	220 V
	Fréquence $f$	50 Hz
	Résistance $R_s$	0.25 m $\Omega$
	Inductance $L_s$	19.4 $\mu$ H
Charge perturbatrice	Résistance $R$	24 $\Omega$
	Inductance $L$	5 mH
	Résistance $R_c$	1.2 m $\Omega$
	Inductance $L_c$	0.3 mH
Filtre actif parallèle	Résistance $R_f$	5 m $\Omega$
	Inductance $L_f$	3 mH
	$V_{dc}$	800 V

### III.5.1. Tensions de source sinusoïdales équilibrées (Cas A)

En premier lieu, nous allons voir le comportement de la *DPC* vis-à-vis des tensions sinusoïdales triphasées équilibrées de valeur efficace  $E_s = 220$  V. Les Figures III.5 et III.6 présente les résultats obtenus. Le Tableau III.3 présente la synthèse des résultats des différentes simulations obtenus pour les deux stratégies de commande appliquées au filtre actif parallèle de puissance.

**Tableau III.3** Résultats de simulation du *DPC* (Cas A).

Phase	Tension de source	Courants de charge	Courants de source	
	rms (V)	THD (%)	THD (%)	THD (%)
			DPC classique	DPC proposée
a	220	28.58	1.29	0.65
b	220	28.58	1.29	0.65
c	220	28.58	1.29	0.65

### III.5.2. Tensions de source sinusoïdales déséquilibrées (Cas B)

Afin de valider le fonctionnement du filtre actif parallèle sous une tension perturbée du réseau électrique, on étudie le cas d'un réseau déséquilibré ; les valeurs efficaces des tensions des trois phases sont les suivantes :  $E_a = 242$  V,  $E_b = 220$  V et  $E_c = 198$  V. Les

résultats de simulation pour ce test sont donnés à les figures III.7 et III.8. Les principaux résultats de cette simulation sont récapitulés dans le Tableau suivant :

**Tableau III.4** Résultats de simulation du *DPC* (Cas B).

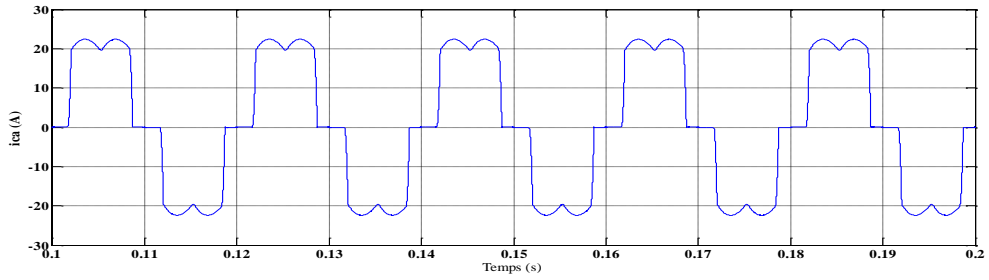
Phase	Tension de source	Courants de charge	Courants de source	
	rms (V)	THD (%)	THD (%)	THD (%)
			DPC classique	DPC proposée
a	242	26.12	7.14	1.60
b	220	28.39	8	2.17
c	198	31.52	7.11	1.56

### III.5.3. Tensions de source équilibrées contenant des harmoniques (Cas C)

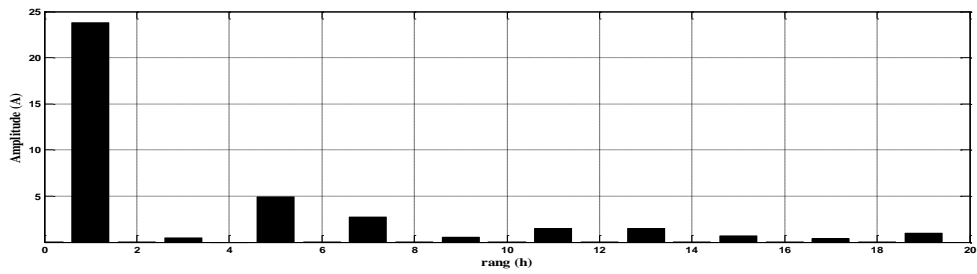
Considérons maintenant une source de tensions triphasées équilibrées et contiennent de l'harmonique d'ordre 7. Les résultats de simulation pour ce test sont donnés à les figures III.9 et III.10 Les principaux résultats de cette simulation sont rassemblés dans le Tableau suivant :

**Tableau III.5** Résultats de simulation du *DPC* (Cas C).

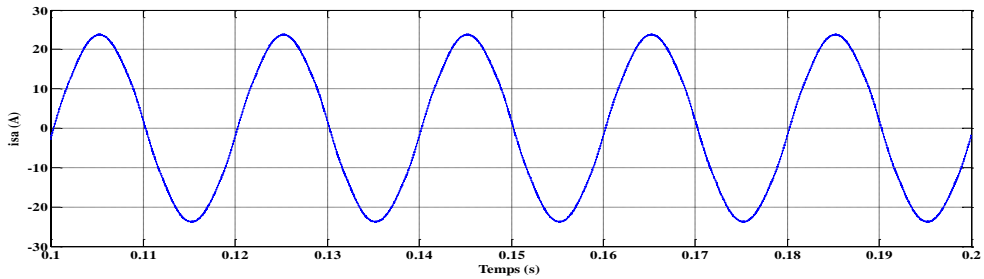
Phase	Tension de source	Courants de charge	Courants de source	
	rms (V)	THD (%)	THD (%)	THD (%)
			DPC classique	DPC proposée
a	222.23	30.70	16.20	4.65
b	222.23	30.47	16.20	4.90
c	222.23	30.50	16.20	4.70



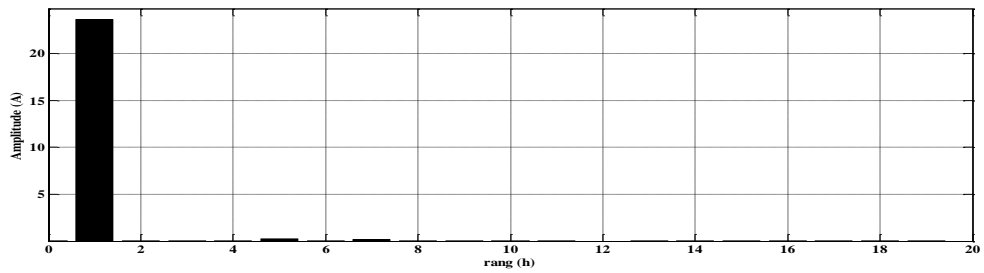
Courant de la charge de la phase (a).



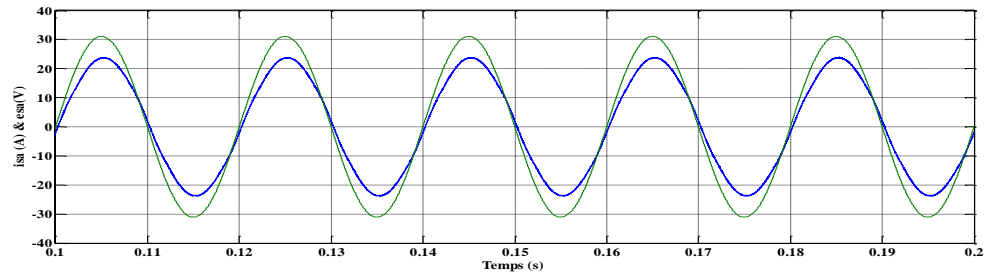
spectre harmonique de Courant de la charge de la phase (a).



courant de source de la phase (a)

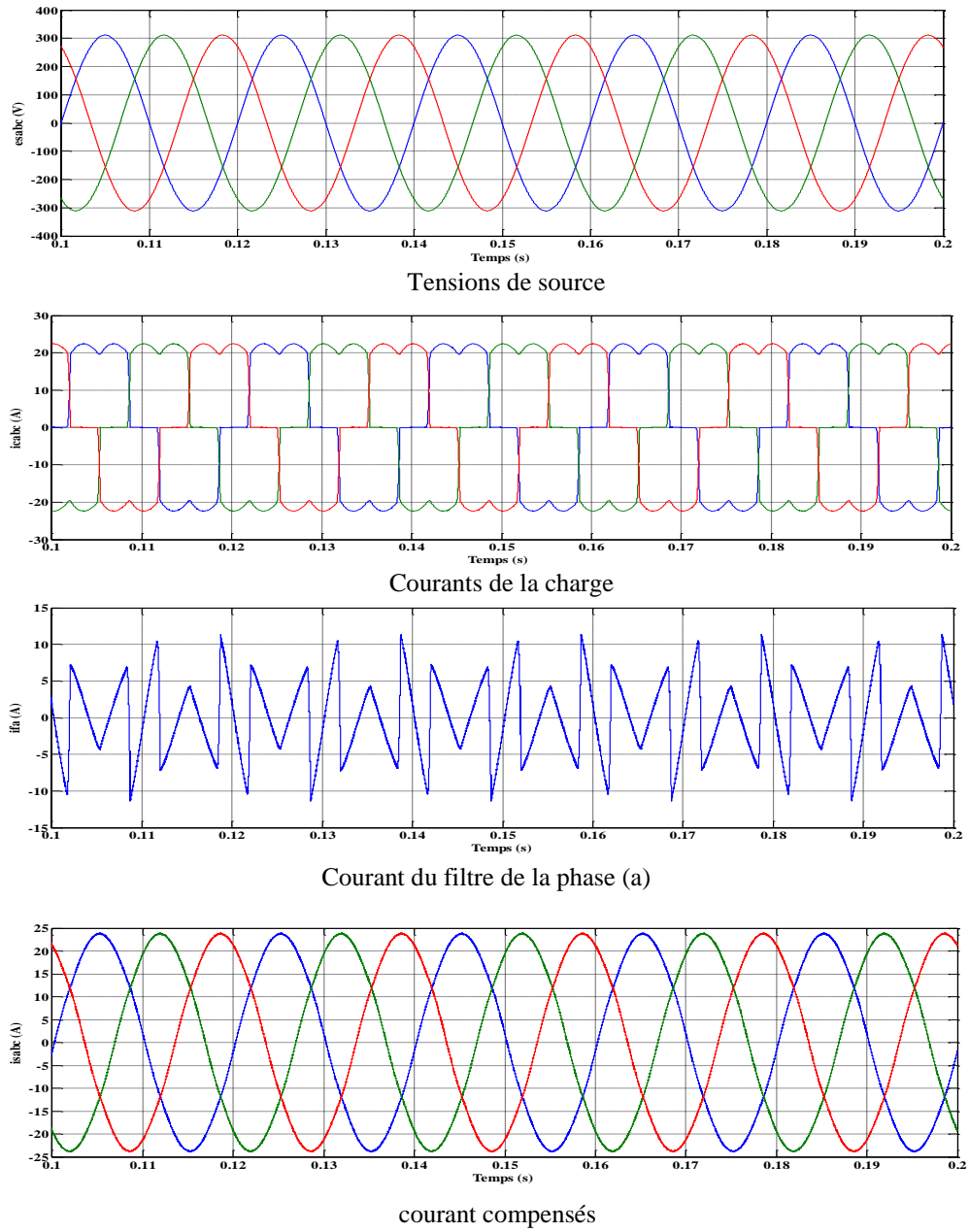


(5) Spectre harmonique de courant de source de la phase (a)



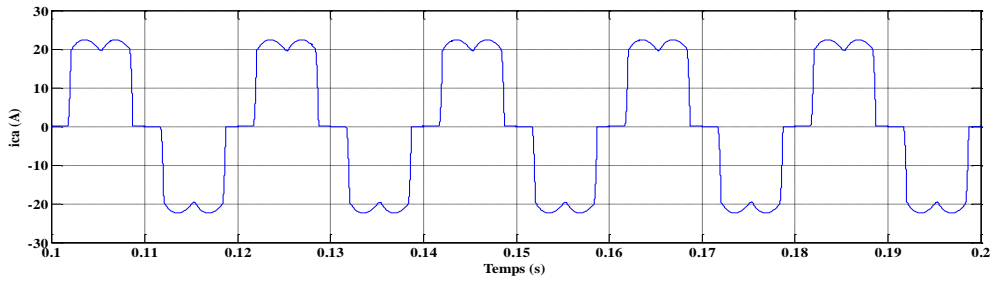
tension de source & courant de source de la phase (a)

**(I)**

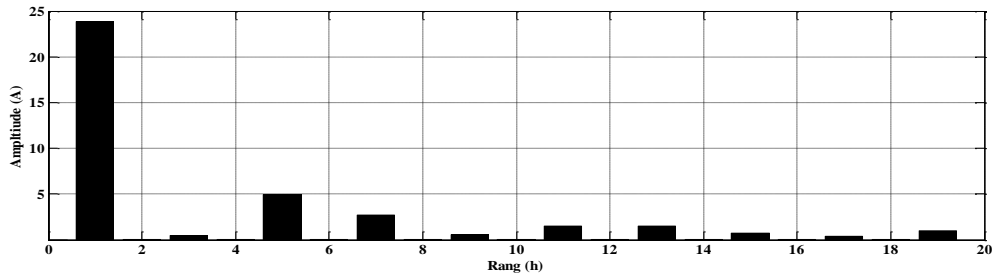


**(II)**

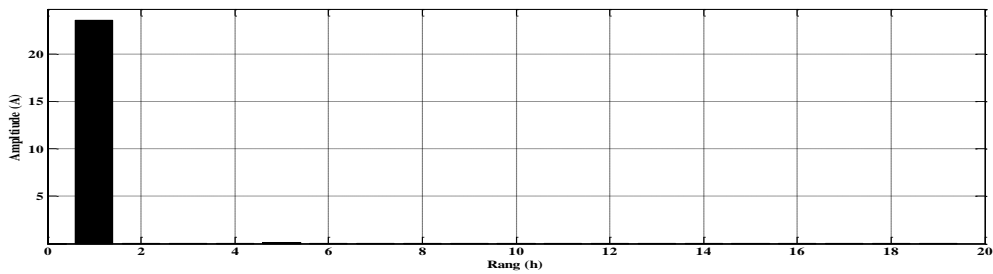
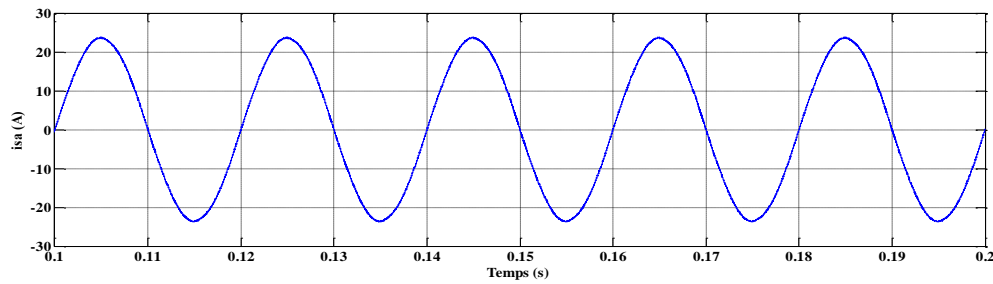
**Figure III.5.(I & II)** Performances de la compensation des harmoniques par les commandes DPC classique (tensions de source sinusoïdales équilibrées)



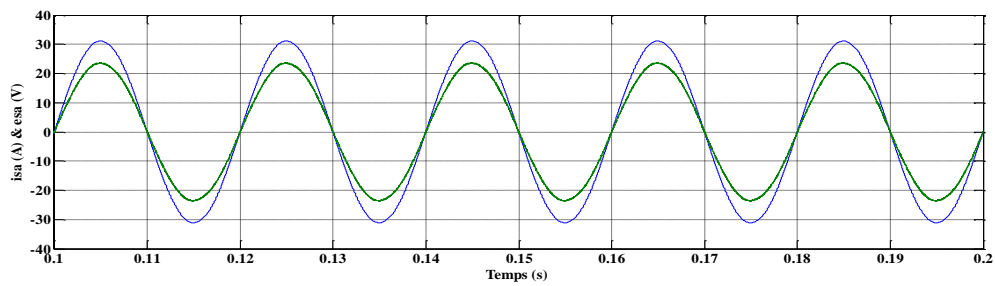
Courant de la charge de la phase (a).



spectre harmonique de Courant de la charge de la phase (a).

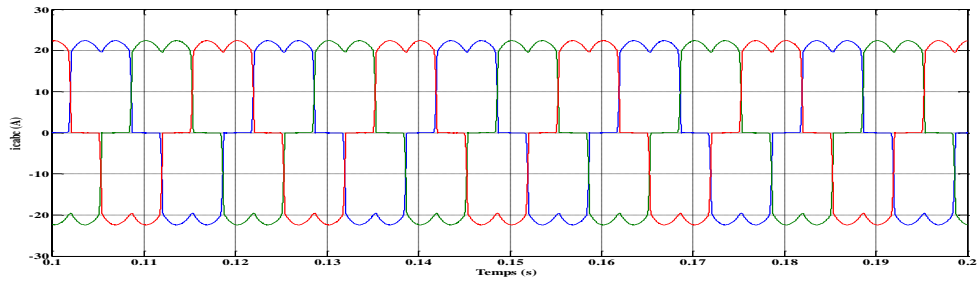
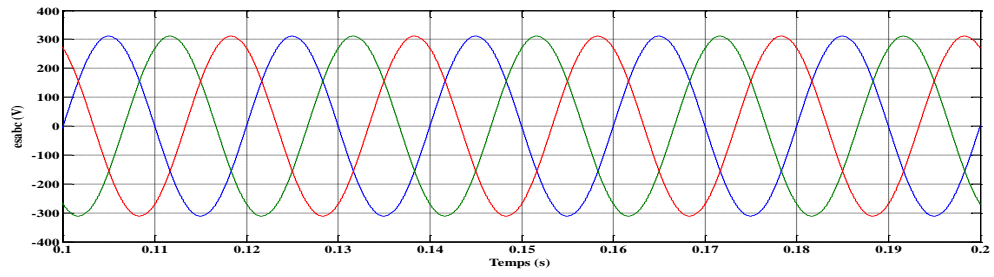


(5) Spectre harmonique de courant de source de la phase (a)

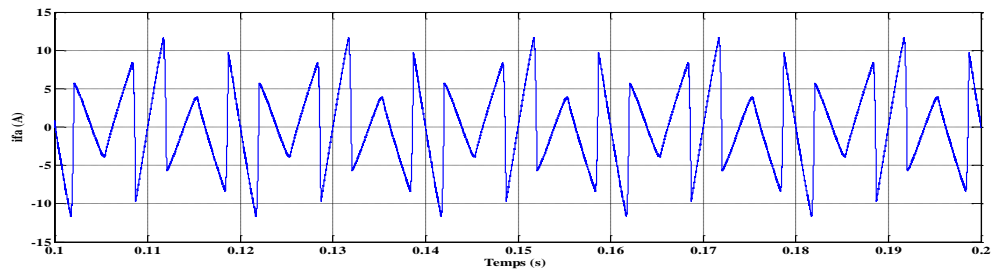


tension de source & courant de source de la phase (a)

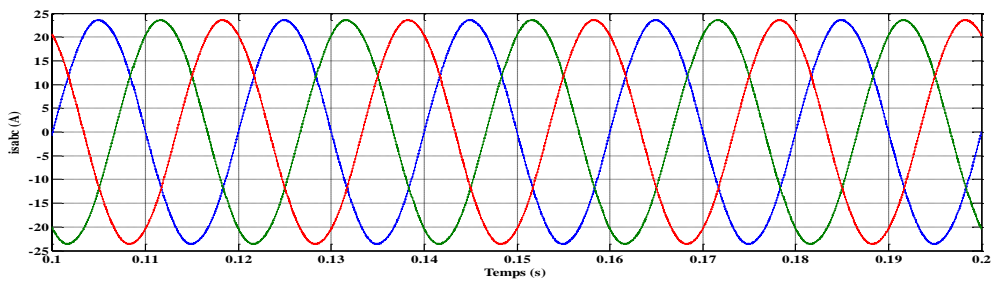
(III)



Courants de la charge



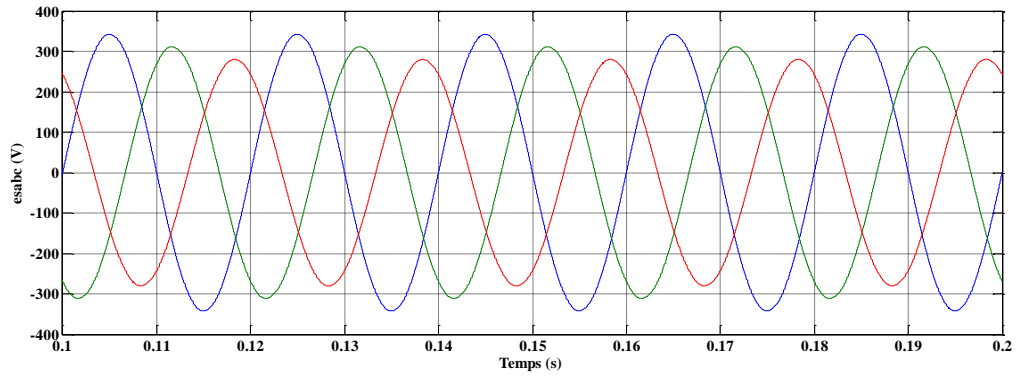
Courant du filtre de la phase (a)



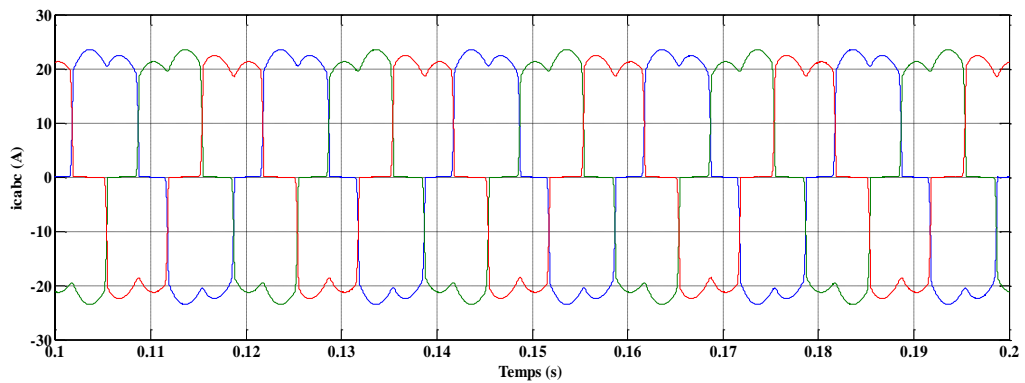
courant compensés

**(IV)**

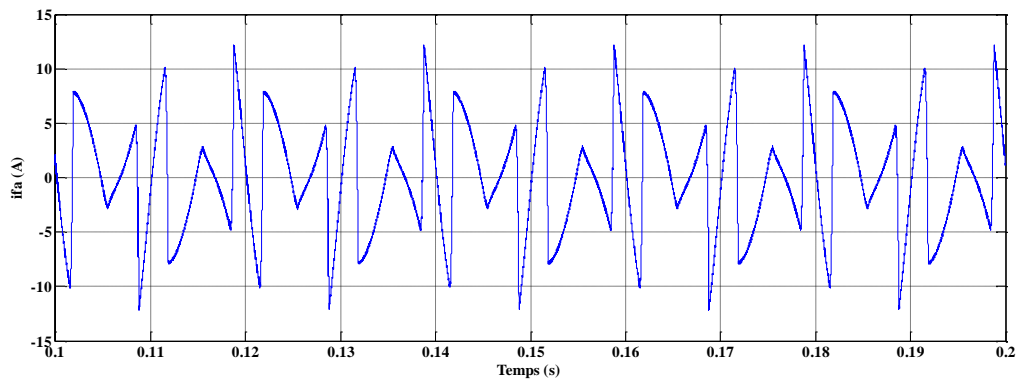
**Figure III.6. (III & IV)** Performances de la compensation des harmoniques par les commandes DPC proposé(tensions de source sinusoïdales équilibrées)



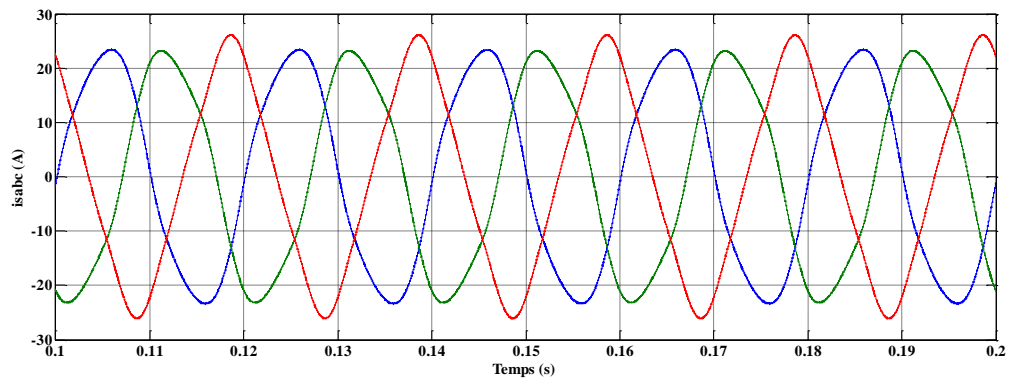
Tensions de source.



Courants de la charge

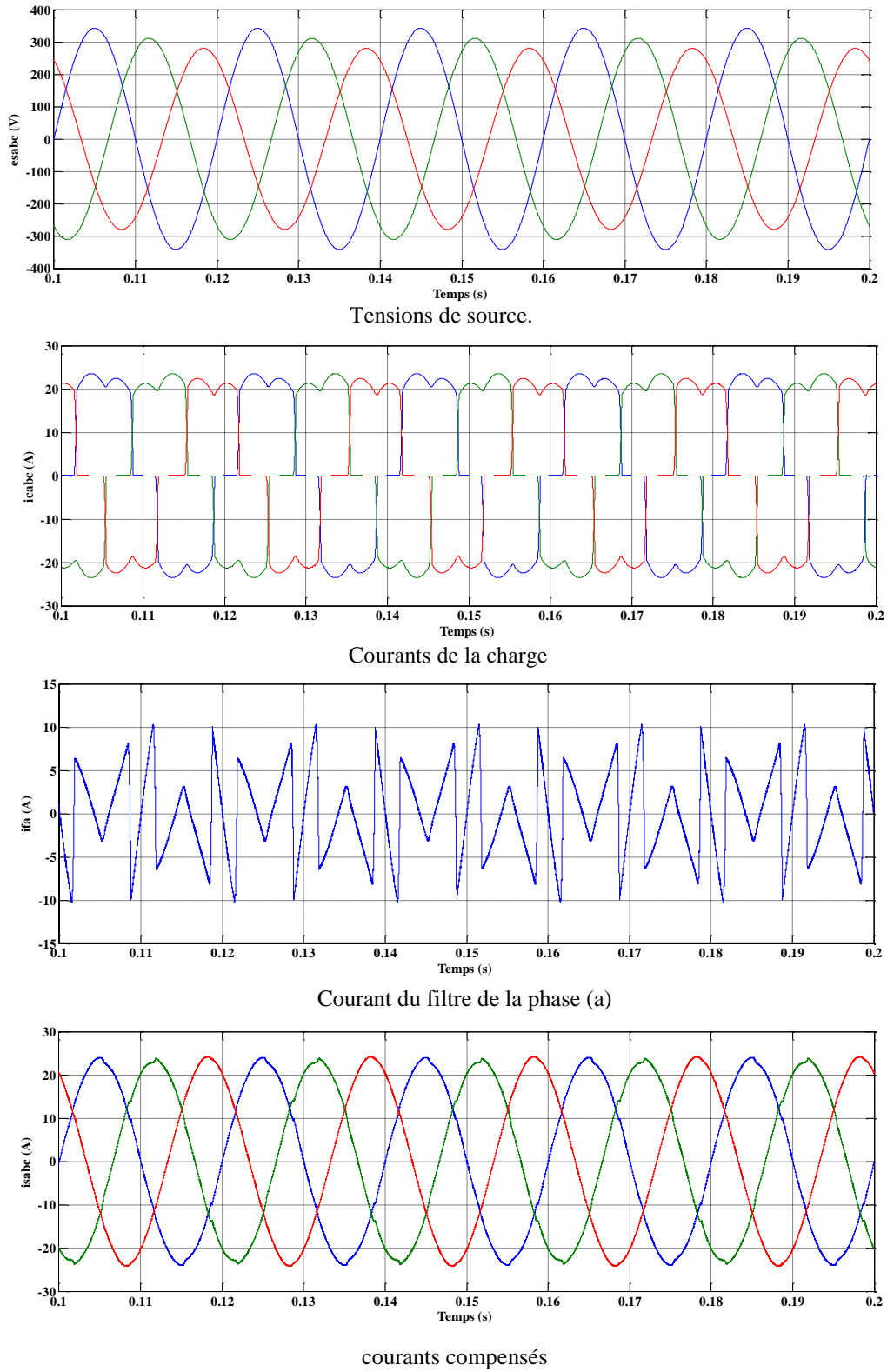


Courant du filtre de la phase (a)

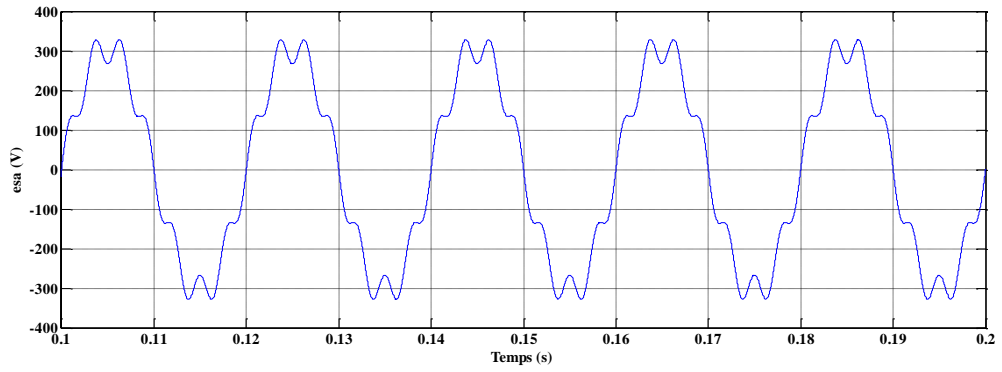


Courants compensés

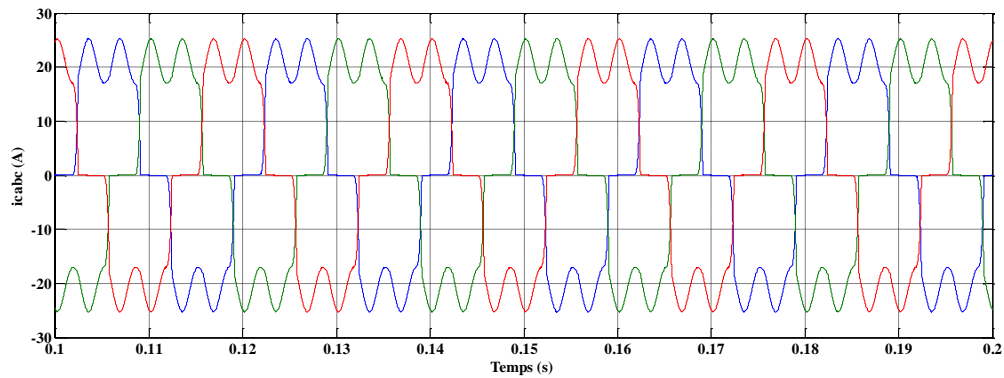
**Figure III.7.** Performances de la compensation des harmoniques par les commandes DPC classique (tensions de source sinusoïdales déséquilibrées)



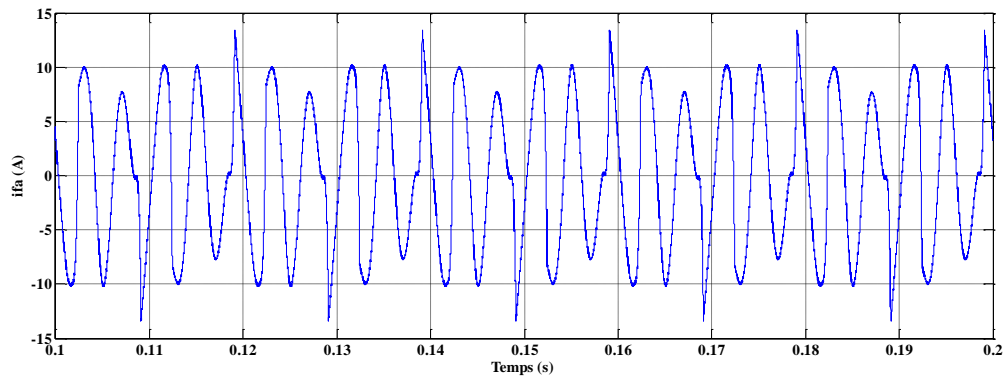
**Figure III.8.** Performances de la compensation des harmoniques par les commandes DPC proposé  
(tensions de source sinusoïdales déséquilibrées)



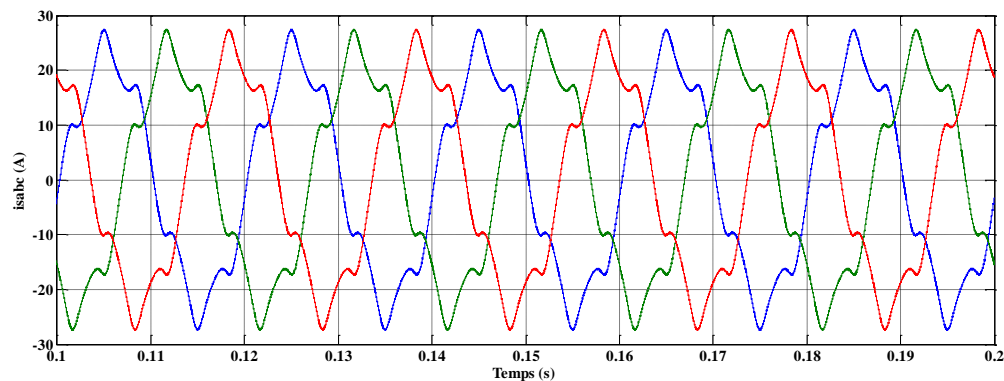
Tension de source de la phase (a).



Courants de la charge

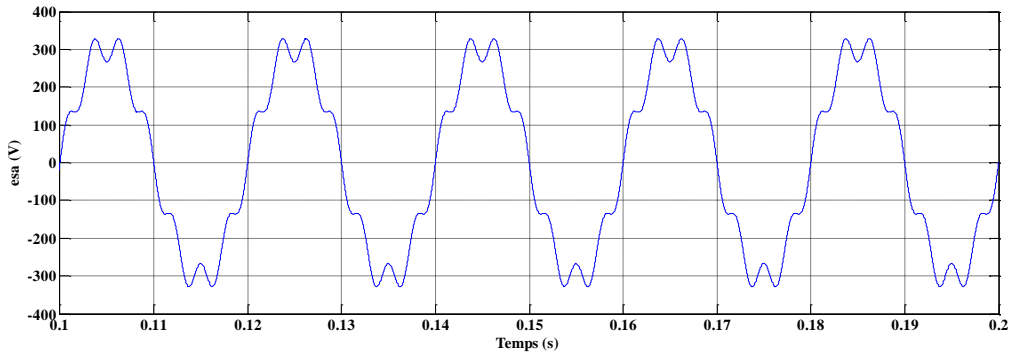


Courant de filtre de la phase (a)

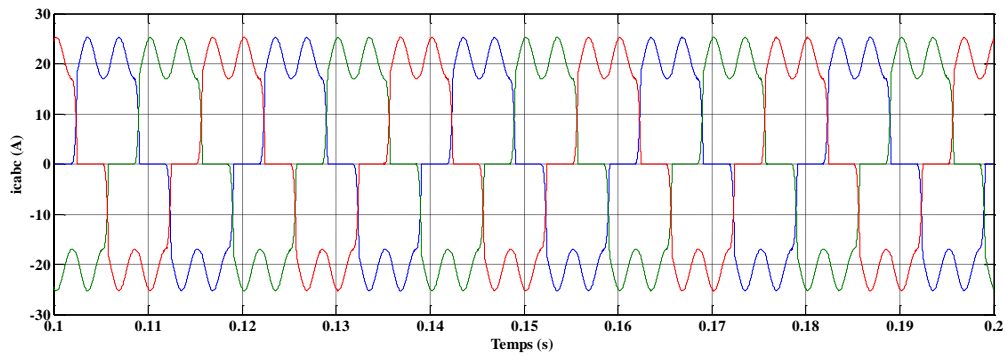


courants compensés

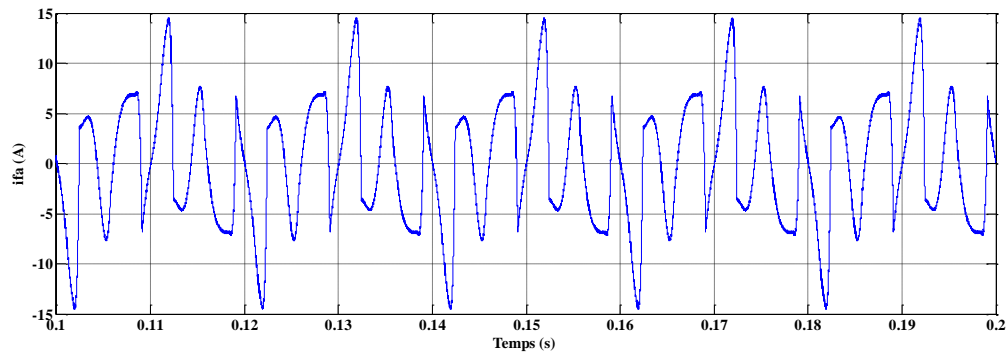
**Figure III.9.** Performances de la compensation des harmoniques par les commandes DPC classique  
(tensions de source équilibrées contenant des harmoniques)



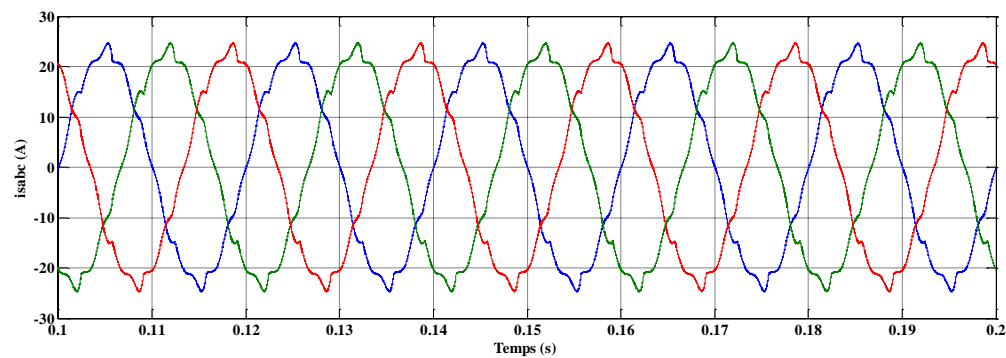
Tension de source de la phase (a).



Courants de la charge



Courant de filtre de la phase (a)



courants compensés

**Figure III.10.** Performances de la compensation des harmoniques par les commandes DPC proposé  
(tensions de source équilibrées contenant des harmoniques)

### III.6. Interprétation de résultats

En conclusion, nous comparerons les performances de ces deux méthodes pour contrôler ces trois cas :

- Pour le cas A, nous constatons qu'après filtrage les courants de la source sont équilibrés et sinusoïdaux. Les résultats de la simulation montrent que dans des conditions idéales, les performances des deux techniques de commande sont presque identiques.
- Pour le cas B, nous notons que la *DPC* basée sur les filtres multi-variables donne d'excellents résultats par rapport à la *DPC* utilisant des filtres passe-bas.
- Pour le cas C, à partir du tableau III.5 et les figures III.9 et III.10 Le THD du signal (*is*) est égal à 16.20% pour la méthode *p-q*, et 4.65% pour la méthode dite "*p-q modifiée*". On peut alors en conclure que dans ces conditions, la méthode *p-q* n'est pas adaptée et ne permet pas d'identifier correctement les composantes harmoniques des courants de charge par rapport à méthode *p-q modifiée*.

### III.7. Conclusion

Dans ce chapitre, pour contribuer à l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique dans les réseaux électriques de distribution, nous avons proposé une nouvelle configuration de la commande directe de puissance appliquée au filtre actif parallèle.

En premier, nous avons exposé une partie des travaux de recherche portant sur la commande directe de puissance. Ensuite, nous avons présenté deux stratégies de commande *DPC* du *SAPF*. La première approche est basée sur l'utilisation d'un filtre passe-bas. La deuxième approche est basée sur l'utilisation d'un filtre multi-variable. En dernier, pour évaluer la commande *DPC* proposée nous présentons des résultats de simulation, du courant coté source après compensation, obtenus dans diverses conditions. Les résultats obtenus par cette approche ont confirmé sa bonne performance tout en effectuant les compensations désirées dans des conditions de sévères perturbations.

## Conclusion Générale

Dans le cadre de ce travail, nous avons étudié théoriquement et évalué par le biais des outils de simulation, en l'occurrence Matlab-Simulink / SimPower Systems Blockset, l'efficacité de commande directe de puissance, destinée à la commande d'un filtre actif parallèle. Le principe de la commande directe de puissance consiste à sélectionner une séquence des ordres de commutation des semi-conducteurs constituant le filtre actif parallèle, à partir d'une table de commutation prédéfinie.

Le premier chapitre a été consacré à la problématique des perturbations harmoniques générées par les charges non linéaires connectées aux réseaux électriques. Les origines et les effets néfastes de ces perturbations ont été abordés.

Dans le deuxième chapitre, on a présenté la topologie du filtre actif parallèle étudié ainsi que les deux méthodes (méthodes  $pq$  et  $pq$  modifiée), utilisées pour l'extraction des courants de référence, notamment lorsque les tensions de source sont perturbées.

Dans le troisième chapitre, on s'est intéressé à la commande directe de puissance appliquée au filtre actif parallèle. Ensuite, nous avons présenté la synthèse des résultats des différentes simulations obtenus pour les deux commandes appliquées au filtre actif de puissance.

En conclusion, la commande directe de puissance basée sur les filtres multi-variables appliquée au pilotage de l'onduleur monté en filtrage actif, a donné des résultats très satisfaisant en matière de filtrage dans diverses conditions.

Au rang des perspectives il devient envisageable d'appliquer cette commande pour le filtrage avec des structures multiniveaux ou des topologies à quatre fils.

## Références Bibliographiques

- [1] M. Shafiee Khor : "Amélioration de la qualité de l'énergie à l'aide de compensateurs actifs : série, parallèle ou conditionneurs unifiés de réseaux électriques", Thèse de doctorat de l'école Polytechnique de l'université de Nantes, Nantes, 2006.
- [2] L. Benchaita : "Etude, par simulation numérique et expérimentation, d'un filtre actif parallèle à structure courant avec une nouvelle méthode de contrôle - commande", Thèse de docteur de l'université Henri Poincaré, Nancy 1, 1998.
- [3] S.H. Shahalami : "Filtrage hybride des perturbations harmoniques produites par des systèmes d'entraînement asynchrone à vitesse variable", Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré Nancy-I, Novembre 2001.
- [4] N. Mesbahi : "Contribution à l'Etude des Performances des Onduleurs Multiniveaux sur les Réseaux de Distribution", Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba, 2014.
- [5] T. Gouraud : "Identification et rejet de perturbations harmoniques dans des réseaux de distribution électrique", Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes, Université de Nantes, Janvier 1997.
- [6] A. L. D. H. Bermeo : "Commandes avancées des systèmes dédiés à l'amélioration de la qualité de l'énergie : de la basse tension à la montée en tension", Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, Novembre 2006.
- [7] M.A. Alali : "Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension", Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg I, Septembre 2002.
- [8] F. Defaj : "Commande prédictive directe d'un convertisseur multicellulaire triphasé pour une application de filtrage actif", Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Université de Toulouse, Décembre 2008.
- [9] 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, Mai 2008.
- [10] Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, IEEE Std. 519, 1992.
- [11] A. Med Elhadi : " Étude comparative de différentes méthodes de compensation active d'énergie électrique ", mémoire de Master. Université de M'sila, 2013.
- [12] R. Chebabhi & M. Boudraf : " Modélisation et commande des différentes topologies des filtres actifs parallèles "mémoire d'ingénieur d'état. Université de M'sila, 2011.

- [13] H. Bakhi : "Commande d'un filtre actif triphasé shunt par logique floue" mémoire de Master. Université de M'sila, 2015.
- [14] H. Djeghloud : "Filtrage actif de puissance", Thèse de Doctorat, Université de Constantine, 2007.
- [15] S. Bouguerra & I. BOURENNANE : "Filtrage actif parallèle des réseaux électriques avec compensation de l'énergie réactive", mémoire d'ingénieur. Université de M'sila, 2007.
- [16] S. Karimi : "Continuité de service des convertisseurs triphasés de puissance et prototypage "FPGA in the loop": application au filtre actif parallèle", Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré Nancy-I, Janvier, 2009.
- [17] A. Gaillard, "Système éolien basé sur une MADA : contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service", Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré Nancy-I, Avril 2010.
- [18] A. Ouari and N. Mesbahi : "Improvement of the electrical energy quality using a direct power control for shunt active power filters", The Mediterranean Journal of Measurement and Control, vol. 9, no. 1, pp. 16– 21, January 2013.
- [19] A. Lopez De Heredia Bermeo : "Commandes avancées des systèmes dédiés à l'amélioration de la qualité de l'énergie : de la basse tension à la montée en tension". Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, Génie électrique, Novembre 2006.
- [20] N. Mesbahi, A. Ouari, D. Ould Abdeslam, T. Djamah, and A. Omeiri, "Direct power control of shunt active filter using high selectivity filter (HSF) under distorted or unbalanced conditions", Electric Power Systems Research, vol. 108, pp. 113–123, March 2014.
- [21] A. Chaoui, F. Krim, J.P. Gaubert, and L. Rambault : "DPC controlled three-phase active filter for power quality improvement", Electrical Power and Energy Systems vol. 30, no. 8, pp. 476– 485, October 2008.
- [22] N. Mesbahi and A. Ouari : "Direct power control of three-phase PWM rectifier without line voltage sensors", in Proc. 2èmes Journées Internationales d'Electrotechnique, de Maintenance et de Compatibilité Electromagnétique (JIEMCEM2010), ENSET Oran, Algeria, 25-27 May 2010.
- [23] T. Mesbahi, T. Ghennam, N. Mesbahi, and E.M. Berkouk : "Simulation study on decoupled power control of doubly fed induction generator", in Proc. Intern. Conf. on Power Electronics and Electrical Drives (ICPEED'10), USTO Oran, Algeria, 26-27 October 2010.