

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique



Université d'EL-Oued
Faculté des Sciences et de la Technologie

Mémoire de Fin d'Etude
En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Réseaux Électriques

Thème

*Contrôle Direct de puissance applique au
Filtre Actif Parallèle*

Dirigé par :

Dr. MESBAHI Nadhir

Réalisé par :

BOUZEGAG Imane

SALHI Fadhila

Soutenu 23-24 Juin 2014

dédicaces

A l'âme de ma mère qui été pour mon corps mieux qu'un coeur ;

A mon cher père qui à sacrifié son temps pour nous ;

A tous ceux qui me sont chers ;

A tous les familles ;

A mes collègues de travail ;

A mes collègues des études ;

Et à tous mes amis.

Remerciement

Tout d'abord nous remercions Allah le tout puissant qui nous a éclairé le bon chemin.

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué dans le cadre du programme de maîtrise en Génie Électrique

Je tiens à remercier Dr Mesbahi Nadhir, Professeur à l'Université d'EL-OUED qui a accepté de m'encadrer, et je lui exprime particulièrement toute ma reconnaissance pour m'avoir fait bénéficier de ses compétences scientifiques, ses qualités humaines et sa constante disponibilité.

- *L'Université d'EL-OUED d'avoir accepter de faire partie du Jury.*
- *Mes remerciements à :*
- *Toutes nos gratitudes à nos enseignants.*
- *Et nos amis.*
- *A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

Liste des Tableaux

Chapitre I

Tableau. 1.1 Limite des composantes harmoniques en courant.....11

Chapitre II

Tableau. II.1. Tensions générées par l'onduleur.....19

Tableau. II.2 Les modes de compensation de la commande des puissances instantanées.....23

Chapitre III

Tableau III.1 Vecteurs de tension sélectionnée pour secteur 136

Tableau.III.2. Table de commutation de la DPC36

Tableau III.3. Paramètres de simulation du SAPF.....37

Liste des figures

Chapitre I

Figure. I.1. Alimentation d'une charge non linéaire.....8

Figure. I.2. Circuit électrique équivalent d'alimentation d'une charge non linéaire.9

Figure I.3. Schémas équivalents pour caractériser la déformation de la tension au point de
raccordement.....9

Figure. I.4. Différentes types de filtres harmoniques passifs.....11

Figure. I.5. Schéma bloc triphasé d'un filtre actif parallèle.....12

Figure. I.6. Schéma bloc triphasé d'un filtre actif série.13

Figure. I.7. Filtre combiné parallèle – série.13

Figure. I.8. Schéma bloc d'un exemple de filtre actif hybride.14

Chapitre II

Figure II.1. Circuit de puissance du filtre actif parallèle deux à niveaux proposé. 17

Figure. II.2. Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur 19

Figure II.3.Schéma représentation le principe de séparation des puissances. 22

Figure II.4. Schéma de principe de la méthode d'identification des puissances instantanées 22

Figure. II.5. Bloc fonctionnel de la régulation de la tension continue..... 24

Figure II.6. Principe de commande des courants par hystérésis 25

Figure II.7. Commande par hystérésis modulée. 26

Figure II.8. Principe de la commande par MLI 26

Figure. II.9. Schéma de la régulation des courants du F.A.P.....28

Chapitre III

Figure III.1. Configuration générale de la commande directe de puissance.....**32**

Figure III.2. Schéma de principe de génération des puissances de référence pour DPC classique**33**

Figure.III.3. Représentation du vecteur de la tension dans le plan de l'espace vectoriel (α, β)
divise en douze (12) secteurs.**34**

Figure.III.4. Résultats de simulation du transitoire lors de la fermeture du SAPF a $t_f = 0.1s$ pour
une charge non-linéair : (a) : courant de source, (b) : courant de charge, (c) : courant de source
triphasee, (d) : courant de charge triphasee, (e) : courant d'injectee, (f) : tension de source
triphasee.....**39**

Figure.III.5. Allures des puissances instantanées avant et après la mise en service du SAPF :
(a) : Puissance Active, (b) : Puissance Réactive..... **40**

Figure.III.6. Analyse spectacle des signaux après la mise en service du SAPF : (a) courant de la
charge N-L, (b) courant de source, (c) courant du filtre, (d) tension de source avec courant de
source..... **41**

Figure.III.7. Résultats de simulation du transitoire lors de la variation de la charge non
linéaire. (a) : courant de source, (b) : tension de source triphasee, (c) : courant d'injectee,
(d) : courant & tension de source.....**43**

Figure.III.8. Allures des puissances instantanées pour une variation de la charge non linéaire.
(a) : Puissance Active, (b) : Puissance Réactive.....**43**

Liste des symboles et Notations

Symboles

h	Range de l' harmonique
e_{sa}, e_{sb}, e_{sc}	Tension instantanées simples du réseau
v_{sa}, v_{sb}, v_{sc}	Tension instantanées au point de couplage
i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}	Courant débités par le réseau
$i_{cha}, i_{chb}, i_{chc}$	Courant de charge
i_{α}, i_{β}	Courant de charge dans le plan (α, β)
$i_{refa}, i_{refb}, i_{refc}$	Courant de référence
$i_{inja}, i_{inj b}, i_{inj c}$	Courant de 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 continu du bus continu
p	Puissance active
q	Puissance réactive
S	Puissance apparente
D	Puissance déformant
v_{dcref}	Tension continu de référence
S_1, S_2, S_3	Fonction de commutation

Notation

DTC	Direct Torque Control
DPC	Direct Power Control
FP	Facteur de Puissance
SAPF	Shunt Active Power Filtre
THD	Total Harmonic Distortion
IGBT	Insulated Gate Bipolar
UPQC	Unified Power Quality Conditioner
PCC	Point of Common Clamped
FPB	Filtre Passe-Bas
PI	Régulateur Proportionnel Intégral
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion

Sommaire

Introduction générale	1
-----------------------------	---

Chapitre I

I.1	Introduction.....	2
I.2	Historique.....	2
I.3	Qualité de l'énergie électrique:	4
I.4	Perturbation des réseaux	4
I.5	Problématique des harmoniques	5
I.5.1	Origine des harmoniques	6
I.5.2	Caractérisation des harmoniques	6
I.5.3	Conséquence des harmoniques.....	7
I.5.3.1	Les effets quasi-instantanés.....	8
I.5.3.2	Les effets à terme dus aux échauffements.....	8
I.5.4	Charge non linéaire raccordée au réseau	8
I.5.5	Les Normes et recommandations	10
I.6	Solutions possibles pour élimination des harmoniques	11
I.6.1	Solutions traditionnelles de dépollution	11
I.6.2	Solutions modernes.....	12
I.6.2.1	Le filtre actif parallèle.....	12
I.6.2.2	Le filtre actif série.....	13
I.6.2.3	Filtre combiné parallèle – série.....	13
I.6.2.4	Filtres actifs hybrides	14
I.7	Filtre actif parallèle.....	14
I.8	Conclusion	15

Chapitre II

II.1	Introduction.....	16
II.2	Structure de SAPF à deux niveaux.....	16

II.2.1	Onduleur de tension.....	17
II.2.1.1	Structure générale.....	17
II.2.1.2	Tension générées par l'onduleur.....	17
II.2.1.3	Représentation vectorielle des tensions générées.....	18
II.3	Contrôle du SAPF à deux niveaux.....	19
II.3.1	Identification des courants harmoniques.....	20
II.3.1.1	Méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées.....	20
II.3.2	Régulation de la tension continue.....	23
II.3.2.1	Principe de la régulation.....	23
II.3.3	Stratégie de commande l'onduleur à deux niveaux.....	25
II.3.3.1	Commande par hystérésis.....	25
II.3.3.2	Commande par hystérésis modulé.....	26
II.3.3.3	Commande MLI.....	26
II.3.4	La Régulation du courant du filtre actif parallèle.....	27
II.3.4.1	Structure de la boucle de régulation.....	27
II.4	Conclusion.....	29

Chapitre III

III.1	Introduction.....	30
III.2	Etat de l'art.....	30
III.3	Principe du DPC classique.....	32
III.4	Calcul des puissances instantanées.....	32
III.4.1	Calcul des puissances instantanées injectée par SAPF.....	32
III.4.2	Comparateurs à hystérésis.....	33
III.4.3	Détection de secteur.....	33
III.4.4	La table de commutation.....	34
III.5	Résultats de simulation.....	36
III.6	Conclusions.....	43
	Conclusions générale.....	44
	Référence Bibliographique.....	45

Introduction Générale

L'électronique de puissance est un domaine relativement nouveau et en pleine croissance. Durant ces dernières décennies, l'évolution technologique importante a impliqué une utilisation accrue des dispositifs d'électronique de puissance moderne dans diverses applications, comme la commande électrique des moteurs, les alimentations de secours de puissance, le chauffage par induction électrique, les applications dédiées la traction électrique, la compensation des harmoniques, etc.

- Dans le premier chapitre, nous identifions les différents problèmes affectant la qualité de l'énergie électrique dans les réseaux basse tension et leurs origines, nous présentons également les solutions traditionnelles et modernes de dépollution harmonique
- Au deuxième chapitre, nous étudions théoriquement la topologie du structure générale des FAP à deux niveaux et sa stratégie permettant de compenser les courants harmoniques et courant référence donc méthode des puissances réelles et imaginaires.
- En finalement commande directe de puissance (DPC) appliquée au filtre actif parallèle à deux niveaux elle est basée sur les valeurs des puissances active et réactive d'extractions classiques de types passe-bas. Les résultats obtenus sont nettement améliorés et le système d'excellentes performances comparativement à la technique de commande DPC classique.

Problématique des harmoniques

I.1 Introduction

Un réseau électrique est destiné à assurer la distribution de l'énergie électrique entre des producteurs et des consommateurs. Ces réseaux prennent des formes diverses, triphasées ou monophasées, à fréquence variable ou à fréquence fixe. La stabilité du réseau traduit la bonne conformité des tensions et fréquences par rapport à un cahier des charges fixé. Ceci constitue une donnée essentielle pour assurer le bon fonctionnement du dispositif de transport d'énergie.

Nous commencerons ce chapitre par un exposé des principaux défauts affectant la tension et le courant du réseau électrique. Nous parlerons également de leurs origines, des conséquences matérielles finalement nous discuterons ensuite des solutions traditionnelles et modernes utilisées pour pallier aux problèmes liés aux perturbations harmoniques.

I.2 Historique

Les notions des harmoniques est connue depuis longtemps dans le domaine musical. [1] Lorsqu'une corde d'une certaine longueur est mise en branle, elle émet un son dit fondamental et des harmoniques supérieurs. Ces harmoniques correspondent à des sons associés à des cordes dont les longueurs sont deux fois, trois ... plus courtes que la corde initiale. Cette relation entre son musical et longueurs était parfaitement maîtrisée dans la fabrication des instruments de musique. Par la suite, l'analogie avec le son musical servira à décrire d'autres grandeurs physiques. Dans ses études sur le mouvement des astres, **J.Kepler** (1571-1631) assimilera la vitesse des planètes à une hauteur musicale. Ce n'est qu'au XVII^{ème} siècle que le mathématicien et philosophe d'**Alembert** (1717-1783) établira une liaison entre la hauteur des planètes du son musical et une fréquence. Cette découverte s'applique à la musique mais également à tous les domaines concernés par des mouvements vibratoires. L'analyse harmonique sera plus approfondie plus tard par **J. Fourier** (1768-1830). Il démontrera que toute fonction périodique, de module

intégrable et à vibration bornée, peut se décomposer en une somme de composantes sinusoïdales, dénommées harmoniques.

Au début du siècle dernier les chercheurs commencèrent à étudier et à analyser les harmoniques dans les réseaux électriques, dans les circuits de redresseurs, la saturation et l'hystérésis dans des transformateurs et les générateurs. Mais avant tout s'était sur les sources de signaux harmoniques.

Les premiers ouvrages de Steinmetz, décrivaient les formes d'ondes résultantes de la saturation et de l'hystérésis dans les transformateurs. Il y a montré que bien que les ondes carrées ou triangulaires avaient des avantages dans certaines applications, néanmoins une onde sinusoïdale à la fréquence fondamentale était en général la plus désirable dans les transformateur ; de plus il a décrit la suppression des courants et des tensions harmoniques en utilisant des transformateurs à couplage étoile-triangle et l'utilisation des filtres pour réduire la distorsion harmonique.

Clinker, Fortescue et Curtis étaient les premiers à décrire la distorsion harmonique d'une manière qualitative et leurs résultats étaient souvent centrés sur l'utilisation des couplages étoile-triangle des transformateurs.

Le redresseur à vapeur succéda aux procédés mécaniques dans les années 1920 et 1930 pour devenir la principale méthode de redressement. Les premiers à présenter une méthode qui utilisait les circuits équivalents et les formules empiriques pour le calcul des tensions et courants dans les redresseurs étaient Blye et Kent.

Vers 1945, Christensen et al, publiaient une analyse complète sur les courants harmoniques générés par le redresseur à vapeur de mercure en fonction de la réactance du système, de l'angle d'amorçage et de l'angle de commutation.

L'ouvrage de Kimbark, décrit en détail les systèmes de transport d'énergie en continu. Gyugyi et al ont étudié le fonctionnement et les applications des compensateurs statiques d'énergie réactive.

Actuellement, les réseaux de distributions, délivrent l'énergie électrique et la transportent sous une tension donnée. Celle-ci constitue un système d'onde périodique, le plus souvent triphasé. Au même titre que les ondes sonores, les ondes de tensions et de courants peuvent être caractérisées par leurs harmoniques. Par analogie aux ondes sonores, le terme dont la fréquence est égale à celle du réseau (50 ou 60Hz) est appelé fondamental.

I.3 Qualité de l'énergie électrique:

La qualité d'énergie est un concept très large qui peut se définir par rapport à la continuité de la fourniture électrique et la forme de la tension disponible [2] et de classer les équipements sensibles d'une manière qui convient à l'opération de l'équipement [3].

La qualité de l'énergie électrique est considérée comme une combinaison de la qualité de la tension et de la qualité du courant [Iganova].

Les tensions d'un réseau électrique constituent un système alternatif triphasé, sauf dans des cas à utilisation particulière, les paramètres d'un tel système sont les suivants [4]:

- *la fréquence,*
- *l'amplitude des trois tensions,*
- *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.*

I.4 Perturbation des réseaux

Un récepteur d'énergie est considéré par le distributeur de l'électricité comme une charge perturbatrice s'il absorbe des courants non sinusoïdaux ou déséquilibrés et/ou il échange de l'énergie réactive.

Les courants non sinusoïdaux ou déséquilibrés peuvent déformer ou déséquilibrer les tensions du réseau lorsque son impédance n'est plus négligeable. L'échange de l'énergie réactive réduit la puissance active que les générateurs, les transformateurs ou les lignes peuvent produire ou transmettre [5].

Les récepteurs peuvent être classés en deux familles principales:

- Les récepteurs linéaires (ou charges linéaires);
- Les récepteurs non-linéaires (ou charges non-linéaires).

Une charge est dite linéaire si, alimentée par une tension sinusoïdale, elle consomme un courant sinusoïdal (résistances, capacités et inductances) [6].

Une charge est dite non-linéaire lorsque la relation entre la tension et le courant n'est plus linéaire. Un récepteur alimenté par une tension sinusoïdale, elle consomme un courant non-sinusoïdal [7]. Cette classe de charges englobe les convertisseurs statiques (gradateurs, redresseurs), les circuits magnétiques saturés, les lampes, ...etc.

On a donc quatre possibilités distinctes de perturbations [8] :

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

Ainsi, il est possible de distinguer :

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

I.5 Problématique des harmoniques

La problématique des harmoniques, également appelée pollution harmonique, n'est pas un phénomène nouveau. Néanmoins, du fait que de plus en plus de charges non linéaires se connectent au réseau, la problématique des harmoniques est devenue très répandue [9]. Les charges non linéaires provoquent une distorsion des courants et donc des tensions sinusoïdales, ce qui peut entraîner un mauvais fonctionnement des dispositifs raccordés au réseau [10]. Ces distorsions sont appelées les harmoniques d'où, l'intérêt d'éliminer ou de minimiser ces harmoniques.

I.5.1 Origine des harmoniques

Dans les secteurs industriel et domestique on constate une recrudescence de générateur d'harmonique. Il s'agit des dispositifs, tel que les convertisseurs statiques, [2] contenant des éléments de commutation ainsi que d'autres dispositifs à caractéristique tension-courant non linéaire :

- *convertisseurs statiques* : sont les sources d'harmoniques les plus gênantes du fait du nombre et de la puissance des dispositifs installés.
- *Dispositifs à caractéristique tension-courant non linéaire* : on distingue (les fours à arc et à induction, les transformateurs, les machines tournantes, inductances saturées, etc.)

I.5.2 Caractérisation des harmoniques

Le signal peut éventuellement contenir une composante continue qui présente la valeur moyenne du signal. Cette décomposition est connue sous le nom de la décomposition en série [11] proposée par le mathématicien Français **Jean-Baptiste Joseph Fourier** (1768-1830). [12] Cette décomposition s'écrit sous les formes suivantes :

$$Y_h = Y_0 + Y_1\sqrt{2} \sin(\omega t - \varphi_1) + Y_2\sqrt{2} \sin(2\omega t - \varphi_2) + \dots + Y_h\sqrt{2} \sin(h\omega t - \varphi_h) \quad (I. 1)$$

Avec:

- ♦ Y_0 : valeur moyenne ou composante continue du signal $y(t)$,
- ♦ h : rang de l'harmonique,
- ♦ Y_h : valeur efficace de l'harmonique au rang h ,
- ♦ ω : pulsation fondamentale ($2\pi \cdot f_i = 2\pi/T$),
- ♦ φ_h : phase de l'harmonique au rang h .

✚ **le taux de distorsion harmonique :**

La perturbation harmonique est généralement caractérisée par le taux de distorsion harmonique (*THD*) défini pour la tension ou le courant [13]. Le taux de distorsion harmonique de ce courant s'exprime sous la forme suivante :

$$THD_i = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2} \quad (I. 2)$$

Avec : I_1 valeur efficace du courant fondamental et I_h du courant harmonique de rang h ,
Le taux de distorsion harmonique en tension est un paramètre qui sert à évaluer la déformation de la tension et s'exprime sous la forme suivante :

$$THD_v = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{v_h}{v_1}\right)^2} \quad (I.3)$$

Avec : v_1 valeur efficace du courant fondamental et v_h du courant harmonique de rang h ,

✚ le facteur de puissance :

Le facteur de puissance $F.P$ est égal au rapport de la puissance active sur la puissance apparente. Il caractérise le dimensionnement d'un système électrique puisqu'il représente la puissance utile consommée par rapport à la puissance apparente au niveau de la source [12].

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{\sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos(\varphi_h)}{\sqrt{\sum_{h=0}^{\infty} V_h^2} \sqrt{\sum_{h=0}^{\infty} I_h^2}} \quad (I.4)$$

En présence des harmoniques, [8] la puissance apparente est composée de trois parties : active (P), réactive (Q) et déformante (D) comme le montre la relation I.5

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

Le facteur de puissance:

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (I.6)$$

On constate que le facteur de puissance est dégradé par la présence des harmoniques.

I.5.3 Conséquence des harmoniques

Les courants et les tensions harmoniques ont des effets néfastes sur le fonctionnement, la rentabilité et la durée de vie des équipements électriques. Bien que les susceptibilités des différents équipements et appareils électriques, raccordés à un réseau pollué, soient très diversifiées, on distingue deux sortes d'effets possibles :

1.5.3.1 Les effets quasi-instantanés

- les perturbations concernent principalement des dispositifs de régulation électronique. *Les tensions harmoniques* peuvent ainsi influencer les liaisons et les équipements « *courant faible* », entraînant des pertes d'exploitation.
- Vibrations, bruits : par les efforts électrodynamiques proportionnels aux courants instantanés en présence, *les courants harmoniques* généreront des vibrations, des bruits acoustiques, surtout dans les appareils électromagnétiques (transformateurs, inductances), entraînant dans certains cas leur destruction.
- La présence des harmoniques sur les signaux provoque le déplacement du passage par zéro et des modifications de la valeur crête de l'onde [2].

1.5.3.2 Les effets à terme dus aux échauffements

- Echauffement et vieillissement des condensateurs.
- Echauffement dû aux pertes supplémentaires des machines et des transformateurs et des câbles.
- Diminution de leur durée de vie par surcharge thermique.

Les harmoniques génèrent aussi des pertes supplémentaires dans les transformateurs, par effet Joule dans les enroulements, accentuées par l'effet de peau et des pertes par hystérésis et courants de Foucault dans les circuits magnétiques [14].

1.5.4 Charge non linéaire raccordée au réseau

Considérons une source de tension sinusoïdale V_s connectée à une charge non linéaire.

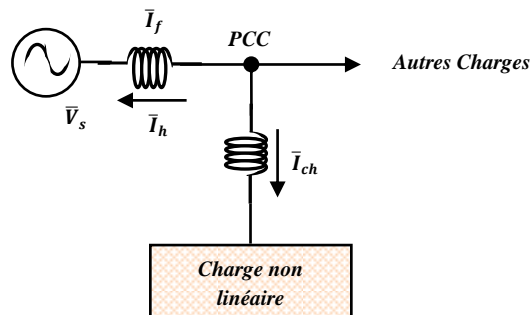


Figure. I.1. Alimentation d'une charge non linéaire.

La charge peut être une réactance saturable, une résistance non linéaire, un redresseur comportant une ou plusieurs diodes, ou un montage à interrupteurs mécaniques ou électroniques qui se ferment et s'ouvrent périodiquement.

A cause de non linéarité de la charge, le courant I_{ch} ne sera pas sinusoïdal même si la source de tension est parfaite. Il contient donc une composante fondamentale I_f et des

composantes harmoniques I_h . Ces harmoniques de courant circulent dans la source de tension, en même temps qu'ils parcourent la charge [12], [13].

En ce qui concerne le réseau électrique, ces courants harmoniques vont engendrer une détérioration de l'onde de tension au point de raccordement de la charge au réseau (P.C.C)

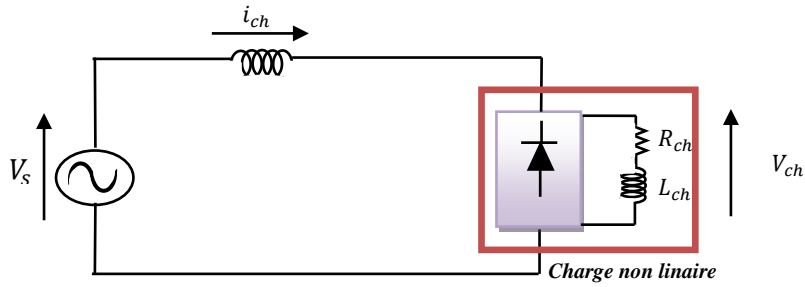


Figure. I.2. Circuit électrique équivalent d'alimentation d'une charge non linéaire.

Pour étudier la déformation de la tension du réseau provoquée par le prélèvement de courants distordus, nous représentons la source d'énergie par une f.e.m (V_s) à la fréquence fondamentale mise en série avec une impédance variable avec la fréquence comme le montre la figure I.4 [13]

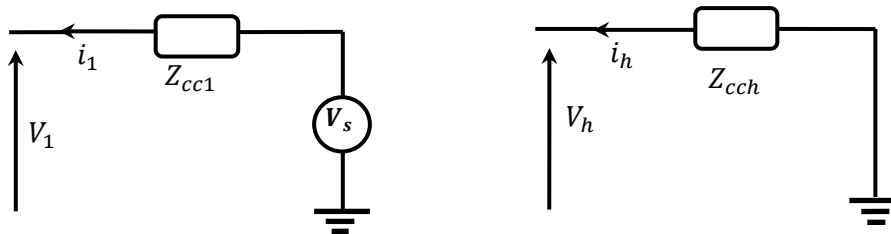


Figure I.3. Schémas équivalents pour caractériser la déformation de la tension au point de raccordement.

Sur ces schémas, les impédances représentent :

Z_{cc1} : impédance de court-circuit de la source à la fréquence fondamentale,

Z_{cch} : impédance de court-circuit de la source à la fréquence du rang h .

La tension au point de raccordement, $v(t)$, est composée de la somme ci-dessous :

Avec :

$$V_1(t) = V_s - |Z_{cc1}| \cdot I_1 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t + \varphi_1 - \varphi_{cc1}) \quad (I.7)$$

$$V_h(t) = -\sum_{n=2}^{\infty} |Z_{cch}| \cdot I_h \cdot \sqrt{2} \cdot \sin[(h\omega t + \varphi_h) - \varphi_{cch}] \quad (I.8)$$

Où :

$|Z_{cc1}|, |Z_{cch}|$: représente le module de Z_{cc1} et Z_{cch} respectivement.

$\varphi_{cc1}, \varphi_{cch}$: représente l'argument de Z_{cc1} et Z_{cch} respectivement.

De l'équation (I.8), on constate que la tension du réseau n'est plus sinusoïdale et est déformée par les courants harmoniques par l'intermédiaire de l'impédance de court-circuit. Pour la rendre sinusoïdale deux solutions sont possibles : modification de l'impédance du réseau ou annuler les harmoniques de courant.

I.5.5 Les Normes et recommandations

Pour limiter l'influence d'une charge polluante sur les autres charges connectées au réseau et en même temps éviter la modification des caractéristiques de ce dernier, les distributeurs d'énergie électrique ont été amenés à émettre des recommandations [15].

La C.E.I. (*Commission Electrotechnique Internationale*) et l'I.E.E.E (*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 [10].

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 16A. 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 [16].

Tableau. 1.1 Limite des composantes harmoniques en courant.

<i>Harmonique impaire</i>		<i>harmonique paire</i>	
rang	Courant harmonique admissible maximale(A)	rang	Courant harmonique admissible maximale(A)
3	2.3	2	1.08
5	1.14	4	0.43
7	0.77	6	0.3
9	0.40	$8 \leq h \leq 40$	$0.23 \cdot 8 / h$
11	0.33		
13	0.21		
$15 \leq h \leq 39$	$0.15 \cdot 15 / h$		

Les limitations en tension harmonique que doivent respecter les clients d'EDF sont :

- pour chaque rang pair, la tension harmonique est limitée à 0,6%,
- pour chaque rang impair, la tension harmonique est limitée à 1%,
- limitation du THD à 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 [8].

En ce qui concerne l'IEEE, la norme 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 ainsi que les limites recommandées de la pollution harmonique générée par les clients et de distorsion harmonique totale sur le réseau [17].

I.6 Solutions possibles pour élimination des harmoniques

Plusieurs solutions ont été envisagées pour limiter la propagation des harmoniques et améliorer la qualité et gestion de l'énergie électrique. Elles peuvent être classées en deux catégories, traditionnelles et modernes (à base de l'électronique de puissance) [18].

I.6.1 Solutions traditionnelles de dépollution

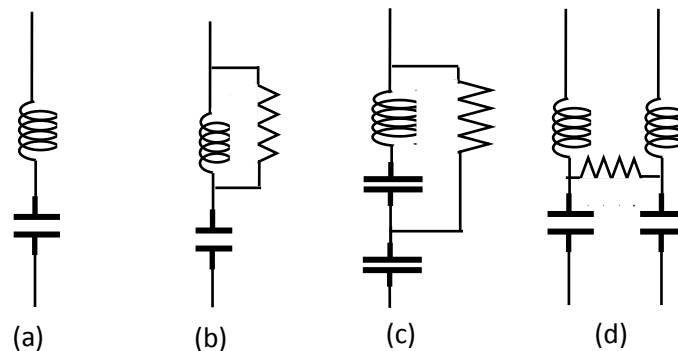


Figure. I.4. Différentes types de filtres harmoniques passifs.

Il s'agit des premiers dispositifs utilisés pour l'élimination d'harmoniques. Ils sont composés par des éléments passifs comme des inductances, des capacités et des résistances. En général, les filtres d'harmoniques sont connectés en parallèle avec les charges injectant des courants harmoniques (les redresseurs à diodes ou à thyristors, fours à arcs électrique, etc.). L'association d'éléments capacitifs et inductifs en parallèle

avec la charge polluante permet d'obtenir une résonance série accordée sur les rangs harmoniques à éliminer. Différents types possibles de filtres passifs destinés à compenser les courants harmoniques sont représentés sur la figure 1.4 [13].

I.6.2 Solutions modernes

Les filtres actifs de puissance FAP sont composés d'un onduleur connecté au réseau par l'intermédiaire d'un filtre passif. Le but de ces filtres est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à ce que le courant et la tension du réseau soient rendus sinusoïdaux et parfois avec un facteur de puissance unitaire [12]. Les avantages les plus importants de ces filtres actifs par rapport aux filtres passifs sont les suivants:

- Le volume physique du filtre est plus réduit.
- La capacité de filtrage est supérieure.
- La flexibilité et adaptabilité sont très supérieures.

Pourtant, ils ont aussi quelques inconvénients :

- Leur coût élevé a limité leur implantation dans l'industrie.
- Les pertes sont plus élevées.
- l'absence de réglementation spécifique n'incite pas leur intégration [13].

I.6.2.1 Le filtre actif parallèle

Ce filtre se comporte comme une source de courant qui compense les courants harmoniques des charges non linéaires, masi aussi les déséquilibres ou encore les courants réactifs (voir Figure I.6).

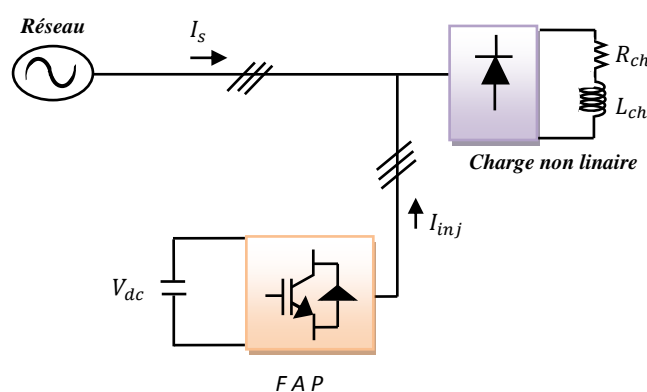


Figure. I.5. Schéma bloc triphasé d'un filtre actif parallèle.

I.6.2.2 Le filtre actif série

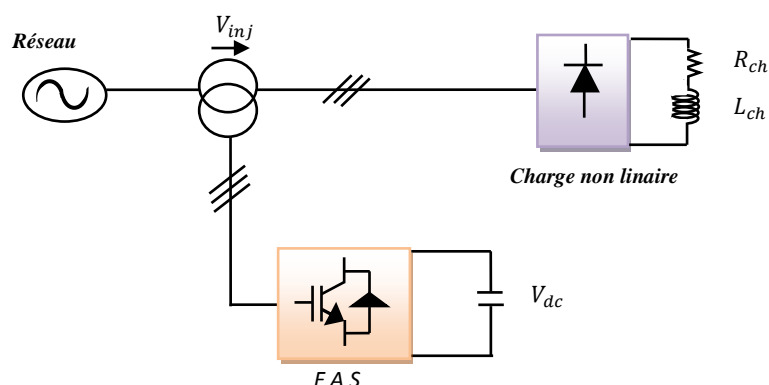


Figure. I.6. Schéma bloc triphasé d'un filtre actif série.

Ce filtre sert à filtrer les perturbations de tension provenant du réseau. Ce filtre se comporte comme une source de tension qui s'oppose aux perturbations de la tension (harmoniques, déséquilibres, creux) venant du réseau en protégeant la charge des imperfections de la tension du réseau.

I.6.2.3 Filtre combiné parallèle - série

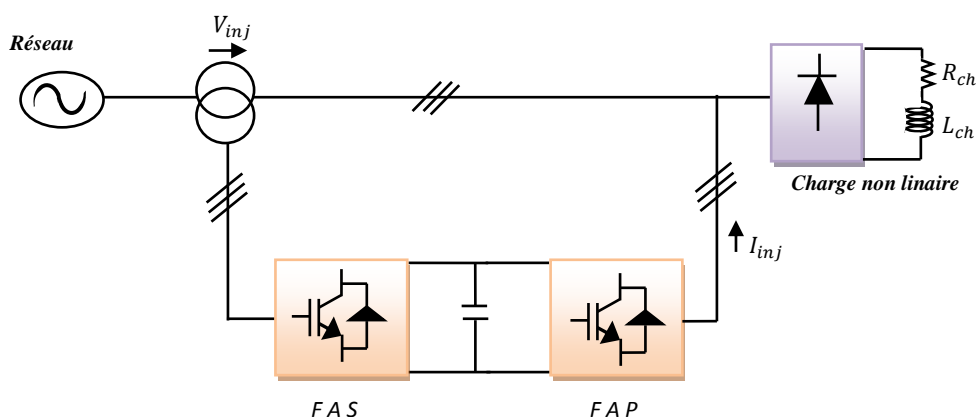


Figure. I.7. Filtre combiné parallèle – série.

La combinaison d'un filtre actif série et d'un filtre actif parallèle comme le montre la Figure. I.7 se nomme : conditionneur universel de la qualité d'onde (UPQC), de son origine anglaise, « *Unified Power Quality Conditionner* ». Cette structure permet d'aller chercher plusieurs fonctions simultanément servant à améliorer la qualité de la tension (compensation des harmoniques, de puissance réactive, régulation et stabilisation de tension,... etc.) [7].

Les tensions harmoniques provenant du réseau sont éliminées par le filtre série fonctionnant en générateur de tension tandis que les courants harmoniques absorbés par la charge polluante sont compensés par le filtre actif parallèle, générateur de courant [19].

1.6.2.4 Filtres actifs hybrides

Afin de réduire le dimensionnement et par conséquent le prix des filtres actifs (connectés avec ou sans transformateur triphasé ou trois transformateurs monophasé) [9], l'association de filtres actifs de faible puissance à des filtres passifs peut être une solution. Dans ce cas, les filtres passifs ont pour rôle d'éliminer les harmoniques prépondérants permettant de réduire le dimensionnement des filtres actifs qui ne compensent que le reste des perturbations [8]. Plusieurs configurations ont été présentées dans la littérature, les plus étudiées étant :

- *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.*

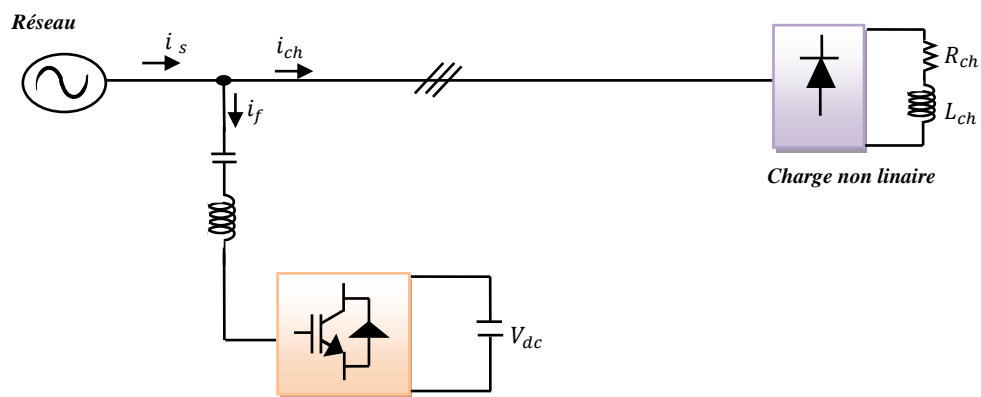


Figure. I.8. Schéma bloc d'un exemple de filtre actif hybride.

I.7 Filtre actif parallèle

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau, comme le montre la figure I.6, injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci. Le courant coté réseau est alors sinusoïdal. Ainsi l'objectif du filtre actif parallèle consiste à empêcher les courants perturbateurs (harmoniques et réactifs), [5] produits par des charges polluantes, de circuler à travers l'impédance du réseau, située en amont du point de connexion du filtre actif.

Le filtre actif parallèle peut être utilisé suivant deux modes de fonctionnement :

- **Filtre dédié:** Si la charge non linéaire est connue, les courants harmoniques ich sont calculables à priori. Par conséquent, le courant filtre ifa est connu. La commande du filtre actif est également stationnaire et elle est déterminée à priori pour engendrer ifa . La commande peut donc être dédiée à la charge (cas d'un redresseur alimentant une charge fortement inductive).
En revanche, l'adaptabilité du filtre actif vis-à-vis des variations de la charge est impossible.
- **Filtre adaptatif:** Ce filtre est capable d'identifier par lui-même les harmoniques et de s'adapter automatiquement à leurs éventuelles évolutions. [20] Sa commande, lui permet de générer en temps réel des courants harmoniques en opposition de phase.

I.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes perturbations affectant les réseaux électriques est les problématiques des harmoniques, les origines des harmoniques et leurs caractéristiques, leurs conséquences sur les différents éléments constitutifs du réseau et sur les récepteurs raccordés à un réseau pollué.

En suite, les solutions possibles avec les filtres actifs hybrides se présentent comme une bonne solution dans un futur proche.

Le prochain de cette mémoire le choix de la topologie et structure du filtre actif parallèle se présente comme la solution la plus standard pour le filtrage des courants harmoniques. Dans ce contexte et nous avons retenu l'application au filtrage actif parallèle.

Filtre actif parallèle :

Topologie et Stratégie de Commande

II.1 Introduction

Les objectifs de recherche que nous nous sommes fixés dans ce chapitre devront nous permettre d'améliorer les performances de compensation du filtre actif parallèle dans le cas de conditions sévères, ou même extrêmes, de fonctionnement des réseaux électriques. Les perturbations de courant que nous étudierons seront de type aussi bien harmonique, réactif, que déséquilibré. Dans le but d'atteindre une partie de ces objectifs, nous aborderons une structure de filtre actif parallèle associant un filtre du deuxième ordre, également appelé filtre en T, en sortie de l'onduleur.

Cette solution permet d'empêcher, sans entraîner d'effets secondaires, les composantes dues aux commutations de se propager sur le réseau électrique. Cependant, la structure avec un filtre en T entraîne une plus grande complexité de mise en œuvre du filtre actif parallèle. Il nous a paru important d'aborder ces problèmes qui restent encore peu abordés dans la littérature scientifique.

II.2 Structure de SAPF à deux niveaux

Donne la structure générale du filtre actif parallèle, laquelle se présente sous la forme de blocs la partie puissance est constituée comme on peut le voir sur la figure II.1:

- Un onduleur de tension,
- Un circuit capacitif de stockage de l'énergie,
- Un filtre de sortie.

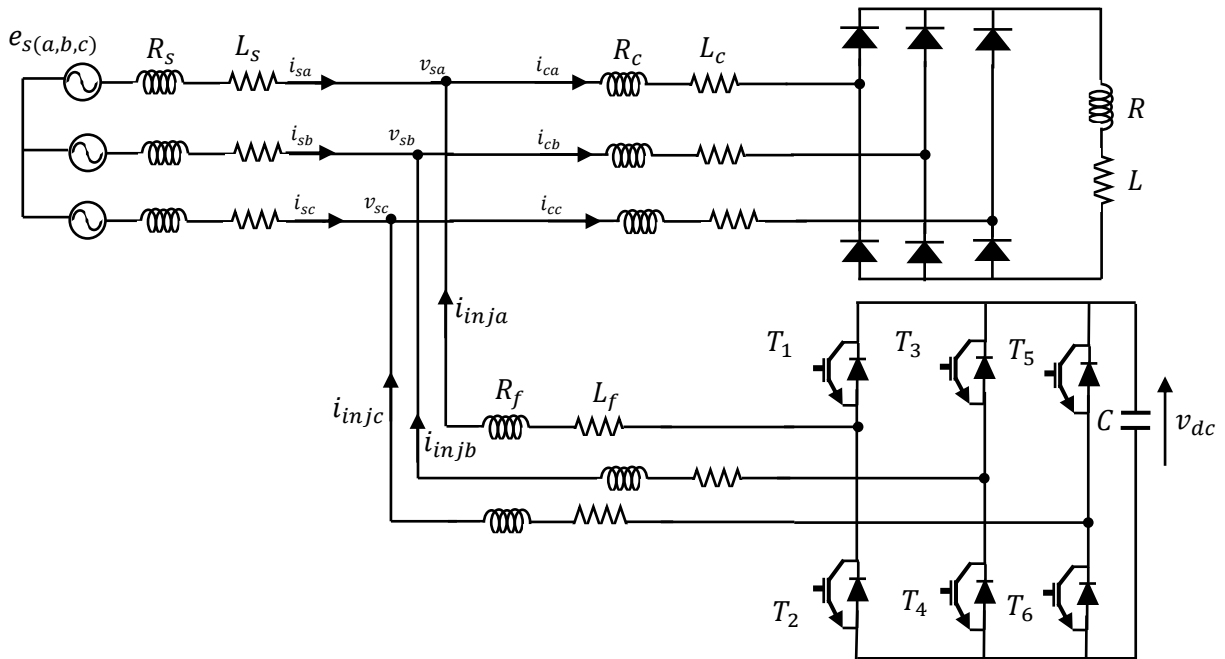


Figure II.1. Circuit de puissance du filtre actif parallèle deux à niveaux proposé.

II.2.1 Onduleur de tension

II.2.1.1 Structure générale

L'onduleur triphasé à structure de tension. Il se compose de trois bras à interrupteurs réversibles en courant, commandés à la fermeture et à l'ouverture, réalisés à partir d'un transistor (GTO ou IGBT) et d'une diode en antiparallèle. Le stockage de l'énergie du côté continu se fait par l'intermédiaire d'un condensateur C_{dc} de tension v_{dc} . Le filtre de sortie est un filtre passif habituellement du premier ordre (L_f, R_f) employé pour connecter l'onduleur de tension au réseau électrique.

II.2.1.2 Tension générées par l'onduleur

L'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur de la dépendent de l'état des signaux de commande (s_1, s_2, s_3) , comme d'équation (II.1) :

$$s_1 = \begin{cases} 1 & T_1 \text{ f\u00e9rme } T_4 \text{ ouvert} \\ 0 & T_1 \text{ ouvert } T_4 \text{ f\u00e9rme} \end{cases}$$

$$s_2 = \begin{cases} 1 & T_2 \text{ f\u00e9rme } T_5 \text{ ouvert} \\ 0 & T_2 \text{ ouvert } T_5 \text{ f\u00e9rme} \end{cases} \quad (II.1)$$

$$s_3 = \begin{cases} 1 & T_3 \text{ ferme } T_6 \text{ ouvert} \\ 0 & T_3 \text{ ouvert } T_6 \text{ ferme} \end{cases}$$

Ainsi, on pourra exprimer huit cas possibles de tension de sortie du filtre actif v_f (référéées au neutre n de la source), comme le montre le Tableau. II.1 [8].

De ce tableau, les tensions simples s'expriment en fonction des ordres de commande par la relation (II.2) [13] :

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \frac{v_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II. 2})$$

La variation des courants absorbés, dans le cas d'un réseau triphasé équilibré, est alors donnée par les équations (II.3) :

$$\begin{cases} L \frac{d i_a}{dt} = e_a(t) - v_a(t) \\ L \frac{d i_b}{dt} = e_b(t) - v_b(t) \\ L \frac{d i_c}{dt} = e_c(t) - v_c(t) \end{cases} \quad (\text{II. 3})$$

En remplaçant l'équation (II.2) dans l'équation (II.3) on obtient :

$$\begin{cases} L \frac{d i_a}{dt} = e_a(t) - \frac{v_{dc}}{3} (2S_a - S_b - S_c) \\ L \frac{d i_b}{dt} = e_b(t) - \frac{v_{dc}}{3} (-S_a + 2S_b - S_c) \\ L \frac{d i_c}{dt} = e_c(t) - \frac{v_{dc}}{3} (-S_a - S_b + 2S_c) \end{cases} \quad (\text{II. 4})$$

II.2.1.3 Représentation vectorielle des tensions générées

Dans le plan biphasé (α, β) , en considérant \vec{v}_f le vecteur correspondant aux tensions de l'onduleur, les huit cas possibles du vecteur \vec{v}_f sont donnés par la Figure. II.2

Tableau. II.1. Tensions générées par 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

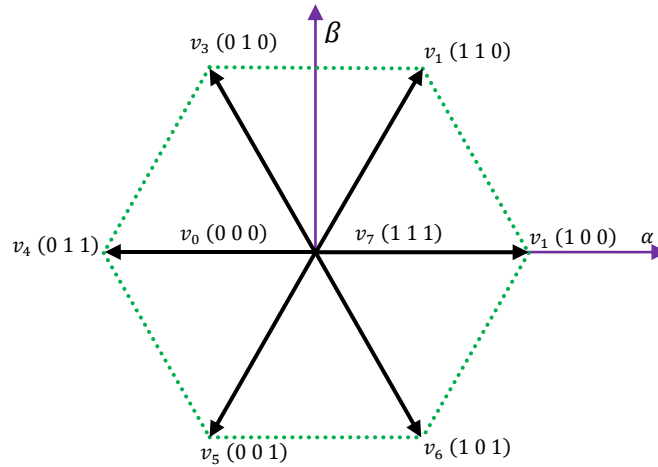


Figure. II.2. Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur

Où v_{fref} représente la tension de référence que doit produire l'onduleur pour pouvoir créer les courants perturbateurs identifiés. Ceci signifie que l'onduleur n'est capable de fournir des tensions égales aux tensions de référence que si le vecteur formé par ces derniers reste à l'intérieur de l'hexagone montré dans la Figure. II.2 [8].

II.3 Contrôle du SAPF à deux niveaux

La partie contrôle d'un SAPS réalise quatre fonctions principales

- L'identification des courants de référence,
- La régulation de la tension continue,
- La régulation du courant injecté sur le réseau à partir de l'onduleur de tension,
- La commande de l'onduleur de tension.

II.3.1 Identification des courants harmoniques

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. Dans le cas général, la partie parallèle de l'UPFC compense la puissance réactive au point de raccordement et régule la tension aux bornes du condensateur. La régulation de la tension continue compense la puissance active demandée par la partie série et bien évidemment les pertes des onduleurs et des transformateurs. Il faut déterminer les références pour commander le dispositif. Il existe plusieurs méthodes d'identification des références, parmi lesquelles nous pouvons citer :

- méthode basée sur le principe du courant actif,
- méthode Watt-Var Découplé,
- méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées. [20][21]

II.3.1.1 Méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées

En présence des harmoniques, la puissance apparente est composée de trois parties : active (P), réactive (Q) et déformante (D) comme le montre la relation (II.5)

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

Cette méthode exploite la transformation $(\alpha - \beta)$ pour obtenir les puissances réelles et imaginaires. Notons par (V_α, V_β) et (I_α, I_β) les composantes orthogonales du repère $(\alpha - \beta)$ associées respectivement aux tensions de raccordement du actif parallèle (V_s) et aux courants absorbés par les charges polluantes (i_s). La transformation $(\alpha - \beta - 0)$ triphasée permet d'écrire, la relation des tensions et courants en relation (II.6) [7].

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{s1} \\ v_{s2} \\ v_{s3} \end{bmatrix} ; \quad \begin{bmatrix} I_0 \\ I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

La puissance active instantanée p et la puissance réactive instantanée q sont définies par (II.7):

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

Les puissances actives et réactives instantanées peuvent s'écrire comme la somme d'une composante continue et d'une composante alternative (II.8) :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{p} + \tilde{p} \\ \bar{q} + \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

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

A partir de l'équation (II.7), nous pouvons déduire les expressions des composantes du courant de charge selon les axes (II.9):

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p \\ -q \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ -q \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

En remplaçant (II.8) dans (II.9), ces courants s'expriment selon les axes $\alpha\beta$ par (I.10):

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ -\bar{q} \end{bmatrix} + \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ -\tilde{q} \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

Suivant la fonction que nous souhaitons donner au FAP, nous pouvons compenser simultanément les harmoniques de courant et l'énergie réactive ou bien uniquement l'un des deux. Si nous voulons par exemple compenser simultanément les harmoniques de courant et l'énergie réactive, nous éliminons alors la composante continue de p à l'aide d'un simple FPB. Dans ce cas et après avoir ajouté à la composante alternative de la puissance active instantanée, la puissance active p_c nécessaire à la régulation de la tension continue v_{dc} , les courants de référence, notés $i_{ref\alpha}$ et $i_{ref\beta}$, s'expriment selon les axes (α, β) par (II.11) :

$$\begin{bmatrix} i_{ref\alpha} \\ i_{ref\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} + p_c \\ -\bar{q} \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

Enfin, il est aisé d'obtenir les courants de référence selon les axes abc par la transformation inverse de Concordia (II.12):

$$\begin{bmatrix} i_{ref1} \\ i_{ref2} \\ i_{ref3} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & \sqrt{3} \\ -1 & -\sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ref\alpha} \\ i_{ref\beta} \end{bmatrix} \quad (II. 12)$$

Après avoir identifié les pulsations des puissances instantanées, en utilisant deux filtre de puissance chargé \bar{p} d'isoler les puissances active \bar{q} et réactive conventionnelles peut être dimensionné. Un circuit constitué d'un filtre passe bas avec un soustracteur peut être employé, comme le présente la figure II.3.

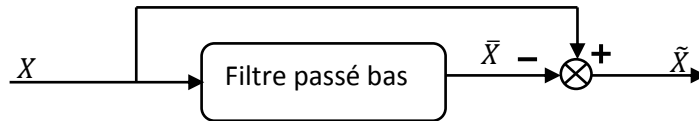


Figure II.3. Schéma représentation le principe de séparation des puissances.

$$F_{pb}(s) = \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\xi_0\omega_0s + \omega_0^2} \quad (II. 13)$$

Avec

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

s : L'opérateur de Laplace,

ξ_0 : Dépassement.

La figure II.4. illustre l'identification des courants de référence lors de la compensation simultanée des courants harmoniques et de l'énergie réactive par la méthode des puissances Instantanées [21].

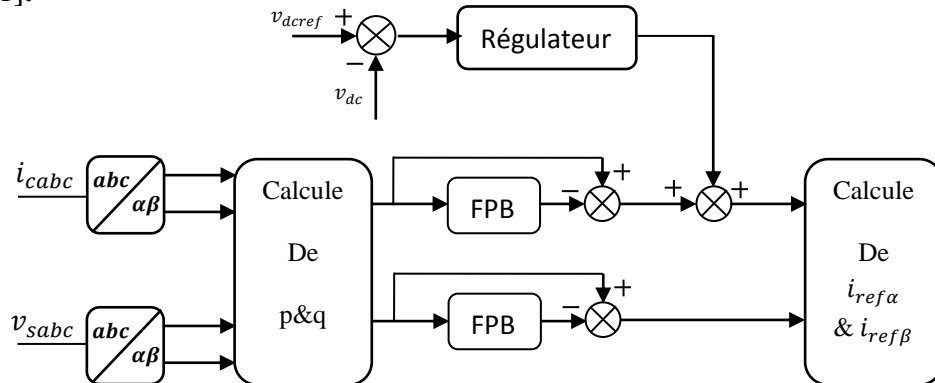


Figure II.4. Schéma de principe de la méthode d'identification des puissances instantanées

Suivant la fonction que nous donnons au filtre actif de puissance, nous pouvons compenser soit les harmoniques de courant et l'énergie réactive ou uniquement l'un des deux. Le Tableau II.2 résume les modes de compensations possibles [22].

Tableau. II.2 Les modes de compensation de la commande des puissances instantanées.

	Paramètre de contrôle
Compensation des harmoniques de courant	$p_f = \tilde{p}$ et $q_f = \tilde{q}$
Compensation de l'énergie réactive	$p_f = 0$ et $q_f = \bar{q}$
Compensation des harmoniques de courant et de l'énergie réactive	$p_f = \tilde{p}$ et $q_f = q$

II.3.2 Régulation de la tension continue

Pour les petites et moyennes puissances, l'élément de stockage de l'énergie le plus adapté est une capacité placée du côté continu de l'onduleur qui a deux tâches essentielles :

- en régime permanent, il maintient la tension du bus continu (v_{dc}) constante avec des faibles oscillations.
- Il sert comme élément stockage d'énergie pour compenser la différence de la puissance réelle entre la charge et la source lors des périodes transitoires [12].

II.3.2.1 Principe de la régulation

La tension aux bornes du condensateurs doit être maintenue à une valeur fixe. Les éléments à l'origine de la variation de la tension moyenne v_{dc} aux bornes du condensateurs sont les suivants:

- *Les pertes statique et dynamique dans les semi-conducteurs de puissance de l'onduleur,*
- *Les pertes dans les inductances de découplage L_f ,*
- *L'injection des courants fondamentaux pendant les régimes transitoires de la charge polluante.*

Pour que cette tension v_{dc} soit maintenue constante, nous ajoutons à la puissance réelle instantanée une consigne de puissance active P_c [23] [16]. Cette régulation est plus lente que celle des Courants harmoniques, ce qui permet de la considérer comme parfaite à l'échelle de la

régulation des harmoniques. La fonction de transfert de l'ensemble régulateur-filtre est donnée par :

$$R_f(s) = \frac{k_c}{1 + \tau_c s} \quad (\text{II. 14})$$

Avec :

k_c : Gain du régulateur.

τ_c : Constant de temps.

Pour écrire la relation entre la puissance absorbée par le filtre actif et la tension v_{dc} , on néglige l'énergie stockée dans le filtre de sortie ainsi que les pertes dues aux commutations. Nous avons alors :

$$P_{dc} = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} C v_{dc}^2 \right) \quad (\text{II. 15})$$

La linéarisation de l'équation II.15 au voisinage de la tension de référence $v_{dc\text{ref}}$ nous donne l'expression suivante :

$$P_{dc} = C v_{dc\text{ref}} \frac{d}{dt} (v_{dc}) \quad (\text{II. 16})$$

La fonction de transfert en boucle fermée pour la tension v_{dc} s'écrit (Figure II.17) :

$$F(s) = \frac{\omega_c^2}{s^2 + 2\xi\omega_c s + \omega_c^2} \quad (\text{II. 17})$$

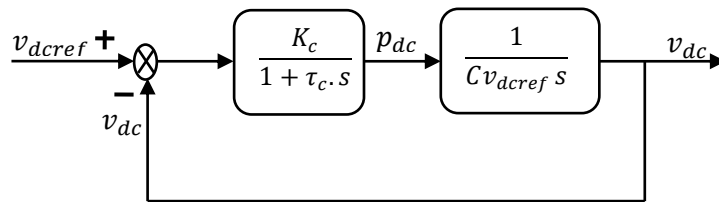


Figure II.5. Bloc fonctionnel de la régulation de la tension continue.

avec :

$$\omega_c = \sqrt{\frac{k_c}{C v_{dc\text{ref}} \tau_c}} \quad (\text{II. 18})$$

$$\xi_c = \sqrt{\frac{C v_{dc\text{ref}}}{k_c \tau_c}} \quad (\text{II.19})$$

La régulation est stable pour toutes les valeurs de k_c , néanmoins le produit $k_c \tau_c$ est choisi de façon à avoir un amortissement suffisant.

II.3.3 Stratégie de commande l'onduleur à deux niveaux

Le but de la commande de l'onduleur est de permettre la meilleure reproduction des courants Perturbés de référence, à travers les ordres de commande appliqués aux drivers interrupteurs de Puissance. Les deux principales familles de commande des convertisseurs statiques sont :

- La commande par hystérésis,
- L commande par Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI).

II.3.3.1 Commande par hystérésis

C'est une commande non-linéaire à fréquence de commutation variable permettant de fixer les ondulations de courants. Cette stratégie de commande assure un contrôle satisfaisant du courant sans exiger une connaissance poussée du modèle du système à contrôler ou de ses paramètres. Le schéma de principe de cette technique de commande est illustré sur la Figure II.6 Son principe consiste à établir dans un premier temps le signal d'erreur (différence entre le courant de référence i_{ref} et le courant du compensateur actif i_c) [24], [25] L'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. La simplicité de la mise en œuvre de cette stratégie est son avantage, tandis que la fréquence de commutation variable peut être son inconvénient. Celui-ci peut être remédié par une autre version de contrôle par l'hystérésis avec une fréquence de commutation fixe [20].

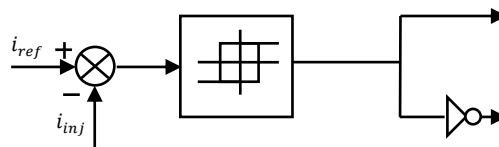


Figure II.6. Principe de commande des courants par hystérésis

II.3.3.2 Commande par hystérésis modulé

La commande par hystérésis modulée a pour objectif d'apporter une amélioration en résolvant l'inconvénient majeur de la commande par hystérésis conventionnelle par la fixation de la fréquence de commutation des semi-conducteurs. Cette amélioration consiste à ajouter au signal d'erreur ($\varepsilon = i_{ref} - i_{inj}$). Un signal triangulaire à la fréquence de commutation. La fréquence doit être choisie égale à la fréquence de commutation que Ton souhaite imposer aux composants de puissance. Le signal ainsi obtenu attaque alors l'entrée d'un régulateur à hystérésis de largeur de bande 2BH (Band Hystérésis) dont la sortie permet de commander les interrupteurs de puissance. Le schéma de cette commande est décrit à la figure II.7. [24].

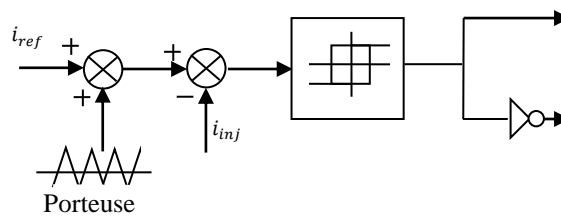


Figure II.7. Commande par hystérésis modulée.

II.3.3.3 Commande MLI

Le principe du contrôle par MLI est décrit à la figure II.8. Dans ce cas, la différence entre le courant référence i_{ref} et le courant réel i_{inj} est appliqué à l'entrée d'un régulateur. Le signal de sortie du régulateur, appelé modulatrice, est ensuite comparé à un signal triangulaire de fréquence fixe (porteuse) afin de déterminer les ordres de commutations des interrupteurs.

La fréquence de la porteuse triangulaire fixe donc la fréquence de découpage des semi-conducteurs de puissance.

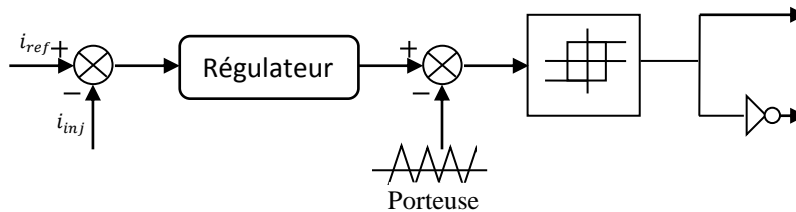


Figure II.8. Principe de la commande par MLI

II.3.4 La Régulation du courant du filtre actif parallèle

Le choix du régulateur du courant du filtre actif se fait en fonction des objectifs de régulation et de l'ordre du filtre de sortie. régulateurs *PI*, correspondant respectivement aux filtres de sortie du premier et du troisième ordre, ont été déjà proposés pour réguler le courant du *filtre actif parallèle* [8][20].

- la bande passante du régulateur doit être assez large afin de ne pas introduire un retard important
- le fonctionnement de la régulation ne doit pas être perturbé par les harmoniques du saut découpages de l'onduleur.

Ces harmoniques doivent être atténués à la sortie du régulateur.

II.3.4.1 Structure de la boucle de régulation

De la Figure. II.9. en négligeant les effets de la capacité C_f et des résistances du filtre de sortie sur le courant de référence I_{inj} (pour les harmoniques basses fréquences qui sont loin de la fréquence de commutation), nous pouvons écrire la relation suivante caractérisant le courant du filtre actif I_{inj} : A partir de cette équation nous avons:

$$v_f = v_s + L_f \frac{d}{dt} i_{ref} \quad (\text{II. 20})$$

$$\frac{d}{dt} i_{ref} = \frac{(v_f - v_s)}{L_f} \quad (\text{II. 21})$$

Avec: $L_f = L_{f1} + L_{f2}$.

Notons par $\Delta \vec{i}_f$ la différence entre le courant de référence et le courant mesuré à partir de la relation suivante :

$$\Delta \vec{i}_f = \vec{i}_{ref} - \vec{i}_{inj} \quad (\text{II. 22})$$

Des équations (II.21) et (II.22), nous obtenons l'expression ci relation (II.23) :

$$L_f \frac{d}{dt} \Delta \vec{i}_f = \left(v_s + L_f \frac{d}{dt} i_{ref} \right) - v_f \quad (\text{II. 23})$$

Le premier terme de la partie droite de la relation (II.23) peut être défini comme tension de référence (v_{f-ref}), ce qui nous donne l'expression suivante :

$$v_{f-ref} = v_s + L_f \frac{d}{dt} i_{ref} \quad (II.24)$$

En réalité, le vecteur v_{f-ref} est la tension permettant de générer un courant égal à i_{ref} .

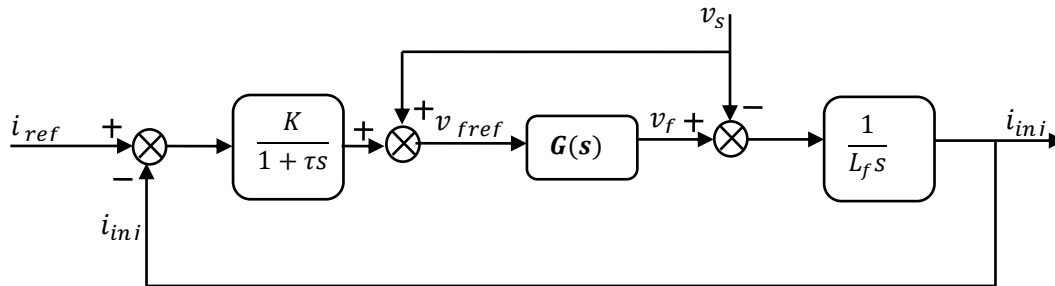


Figure. II.9. Schéma de la régulation des courants du F.A.P

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

$$\begin{cases} G(s) = k \frac{1}{1 + \tau s} \\ k = \frac{v_{dc}}{2v_p} \end{cases} \quad (II.25)$$

Avec :

- v_{dc} : tension coté continu de l'onduleur ;
- v_p : amplitude de la porteuse triangulaire.

II.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons d'abord présenté les différentes topologies et les éléments constitutifs d'un FAP triphasé à structure tension. Ce FAP permet de compenser les harmoniques de courant générés par des charges non-linéaires, connectées à un réseau électrique à trois fils.

Nous avons ensuite successivement étudié chacun des éléments de la partie contrôle du FAP :

- l'identification des courants de référence;
- la poursuite des courants de référence;
- la régulation de la tension continue.

De même, pour la partie puissance, nous avons étudié le dimensionnement de l'onduleur, de l'élément de stockage et du filtre de sortie.

Nous avons étudié et comparé les performances des méthodes classiques d'identification des courants perturbés (méthodes $p - q$), notamment lorsque les tensions de source sont d'équilibrées.

Commande Directe de Puissance du Filtre Actif Parallèle (DPC)

III.1 Introduction

De nos jours, deux différentes tendances sont identifiées par les chercheurs qui travaillent sur le Contrôle Direct de Puissance.

D'un côté, une définition générale décrit le DPC comme la structure de contrôle qui utilise directement les puissances instantanées comme variables de contrôle, en remplaçant les variables de courant utilisées dans les systèmes imbriqués. Cette définition inclut les deux types de correcteurs DPC principaux, le *DPC classique* et le *DPC avec modulation vectorielle*.

D'un autre côté, une définition plus restrictive analyse le DPC comme le contrôle qui utilise directement les puissances instantanées comme variables de contrôle et qui n'a pas besoin d'utiliser des blocs de modulation car les états de commutation de l'onduleur sont choisis directement par un tableau de commutation. Cette définition n'inclut que le *DPC classique*.

Dans ce chapitre on simule de fonctionnement de type de contrôle DPC.

III.2 Etat de l'art

Le principe du contrôle direct des convertisseurs d'électroniques de puissance à *MLI* a été proposé pour la première fois en 1986 par [13] et il a été développé plus tard dans plusieurs applications. Le but du contrôle direct de ces systèmes était d'éliminer le bloc de modulation de largeur d'impulsion et les boucles de régulations internes des variables contrôlées, en les remplaçant par une table de commutation prédéfinie, dont

les entrées sont les erreurs de suivi de référence des grandeurs contrôlées et la sortie est le vecteur de commande.

La première application développée dans cet axe était le contrôle des machines électriques à vitesse variable alimentées par un onduleur à *MLI* triphasé. La structure de contrôle était connue sous le nom de contrôle direct de couple (*DTC*). Dans cette application, le flux statorique et le couple électromagnétique sont contrôlés directement sans aucun bloc de modulation.

La grande similitude entre une machine électrique, alimentée par un onduleur de tension triphasé, et le redresseur à *MLI* triphasé connecté au réseau, a permis l'émergence d'une technique de contrôle analogue au *DTC*, appelée contrôle direct de puissance (*DPC*). La première configuration de ce type de contrôle a été proposée par, pour le contrôle direct des puissances instantanées actives et réactive du redresseur à *MLI* triphasé sans capteurs de tension du réseau. Ensuite, cette approche est développée et différentes configurations ont été proposées par. Le but commun de ce contrôle était d'assurer le prélèvement de courants sinusoïdaux tout en garantissant un facteur de puissance unitaire avec un contrôle découplé des puissances active et réactive. Les différentes configurations du *DPC*, définies dans la littérature, se subdivisent en deux catégories :

- ***DPC* utilisant le vecteur de tension (*V-DPC*)** : les références et établissent des configurations du *DPC* basées sur la position du vecteur de tension dans le repère stationnaire (α - β).
- ***DPC* utilisant le flux virtuel** : dans et, les configurations détaillées sont basées sur le calcul d'un flux virtuel. Dans, les auteurs suggèrent d'associer le principe du *DPC* avec une modulation de largeur d'impulsion vectorielle (*SVM*) afin d'obtenir une fréquence de commutation constante sans l'utilisation d'une table de commutation.

D'autres structures du *DPC* basées sur des approches prédictives ont été récemment publiées et. Le principe du contrôle direct de puissance est également étendu à d'autres applications. Dans ce contexte, les références et, exploitent le principe du *DPC* avec un onduleur de tension pour un système de filtrage actif, pour un moteur asynchrone à double alimentation et pour une interconnexion au réseau, respectivement.

III.3 Principe du DPC classique

La structure globale du *DPC*, utilisant une table de commutation prédéfinie, appliqué au pont triphasé est illustrée sur la figure III.1. Elle est analogue à celle du contrôle direct de couple (*DTC*) des machines à induction [26].

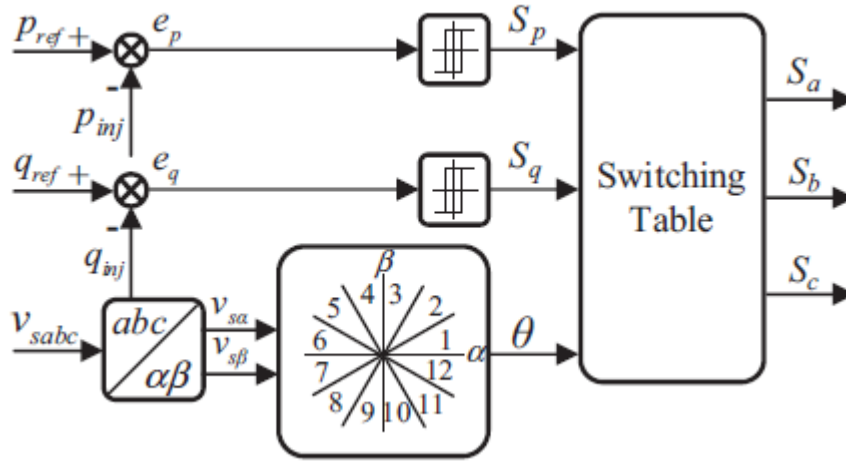


Figure III.1. Configuration générale de la commande directe de puissance.

La *DPC* consiste à sélectionner un vecteur de commande d'après une table de commutation. Cette dernière est fondée sur l'erreur numérisées, S_p et S_q qui sont limitées par une bande d'hystérésis à deux niveaux, aussi bien que sur la position angulaire de la tension au point de raccordement de la charge au réseaux PCC. Le plan (α - β) est divisé en douze secteurs pour déterminé le secteur de travail.

III.3.1 Calcul des puissances instantanées

III.3.1.1 Calcul des puissances instantanées injectée par SAPF

Basée sur la mesure des tensions et courants injecté, les puissances active et réactive instantanées peuvent être calculées par les expressions :

$$q_{inj}(t) = -\frac{1}{\sqrt{3}} [(i_{injb} - i_{injc}) \cdot v_{sa} + (i_{injc} - i_{inja}) \cdot v_{sb} + (i_{inja} - i_{injb}) \cdot v_{sc}] \quad (\text{III. 1})$$

$$p_{inj}(t) = v_{sa} \cdot i_{sa} + v_{sb} \cdot i_{sb} + v_{sc} \cdot i_{sc} \quad (\text{III. 2})$$

Toutefois, le nombre des capteurs requis augmente le coût et réduit la fiabilité du système. Par conséquent, afin d'estimer correctement la puissance et en même temps

de réduire le nombre de capteurs de tension, Noguchi propose l'utilisation d'un estimateur du vecteur tension [12].

III.3.1.2 Calcul des puissances instantanées de référence

Basée sur la mesure des tensions et courants de charge, les puissances active et réactive instantanées peuvent être calculées par les expressions :

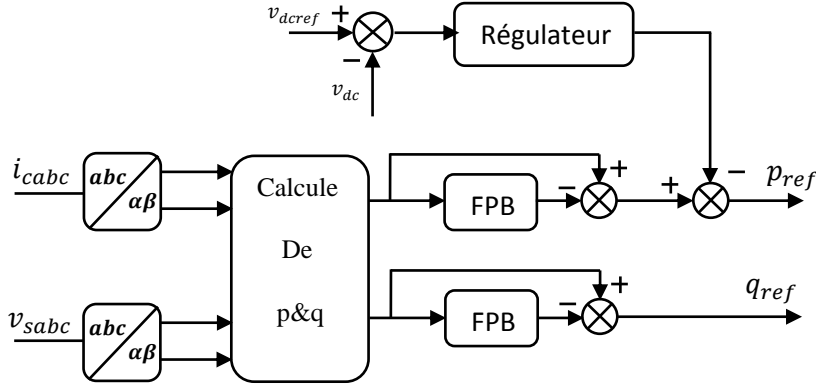


Figure III.2. Schéma de principe de génération des puissances de référence pour DPC classique.

III.3.2 Comparateurs à hystérésis

L'idée principale de la commande directe de puissance est de maintenir les puissances active et réactive instantanées dans une bande désirée. Ce contrôle est basé sur deux comparateurs à hystérésis qui utilisent comme entrée les signaux d'erreurs entre les valeurs de références et estimées des puissances actives et réactive.

$$e_p = p_{ref} - p_{inj} \tag{III. 3}$$

$$e_q = q_{ref} - q_{inj} \tag{III. 4}$$

La sortie des régulateurs à hystérésis donnée par les variables booléennes S_p et S_q , qui prennent l'état "1" pour une augmentation de la variable contrôlée (p ou q) et l'état "0" pour une diminution [26] , [13]:

$$\begin{cases} S_p = 1 & \text{si } p_{ref} - p_{inj} \geq h_p \\ S_p = 0 & \text{si } p_{ref} - p_{inj} \leq -h_p \end{cases} ; \quad \begin{cases} S_q = 1 & \text{si } q_{ref} - q_{inj} \geq h_q \\ S_q = 0 & \text{si } q_{ref} - q_{inj} \leq -h_q \end{cases} \tag{III. 5}$$

Où : h_p et h_q désignent les bandes d'hystérésis

III.3.3 Détection de 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(ω) , 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.

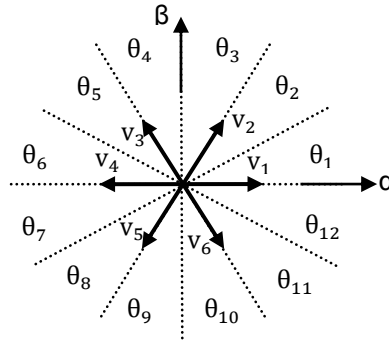


Figure.III.3. Représentation du vecteur de la tension dans le plan de l'espace vectoriel (α, β) divisé en douze (12) secteurs.

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° chacun (Figure. III.3), où le premier secteur est défini entre $(-\pi/3 < \theta_1 < 0)$ [12]. Les régions consécutives suivent dans le sens trigonométrique le même critère, qui peut être génériquement exprimé par :

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

Selon l'angle du vecteur de la tension de source référencé sur l'axe (a), 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 (a, b), indiquée par l'équation (7) :

$$\theta = \arctan \frac{v_\beta}{v_\alpha} \quad (\text{III. 7})$$

III.3.4 La table de commutation

Une fois les sorties booléennes des comparateurs à hystérésis établies, et suivant le numéro du secteur où se trouve le vecteur $v_{s\alpha\beta}$, le vecteur de la tension à appliquer à la sortie du SAPF est sélectionné à partir de la table de commutation. Les erreurs numérisées S_p, S_q et le secteur de travail sont les entrées de cette table, où les états de commutation S_{1i}, S_{2i}, S_{3i} du SAPF sont mémorisés [26],[27].

L'état optimal de commutation de l'onduleur est choisi à chaque état de commutation selon la commutation des signaux numériques S_p, S_q et secteur c'est-à-dire, que le choix s'effectue de sorte que l'erreur de la puissance active et réactive instantanée puisse être restreinte dans une bande désirée.

Sachant qu'un onduleur de tension à deux niveaux génère huit vecteurs de tension pour huit combinaisons différents. Chaque vecteur de tension est calculé en se basant sur une combinaison des interrupteurs respectifs et de la tension du bus continu. La sélection des vecteurs de tension de sortie du l'onduleur, pour construire la table de commutation, est basée sur des erreurs des puissances active et réactive et aussi sur la position du vecteur de la tension au point PCC dans chaque secteur. Le vecteur de tension de sortie du filtre actif v_f est contrôlé de telle sorte que le filtre actif injecte un courant i_{inj} égale et en opposition de phase à celui absorbé par la charge polluante. Ainsi, le courant fourni par la source, après compensation, devient sinusoïdal. Le meilleur suivi de v_f est obtenue quand deux des vecteurs de tension adjacents non nuls ($v_k, k = 1,2, \dots, 6$) et un des vecteurs nuls (v_0 ou v_7) sont sélectionnés.

L'application du vecteur de tension approprié parmi les huit vecteurs de tension possibles du filtre conduira la variation des puissances active et réactive à une direction spécifique. L'influence de chaque vecteur de tension sur la variation de la puissance instantanée est différente, ce qui induit des dynamiques de commande différentes. Supposons, à l'instant (t), la tension au point de couplage v_s est située dans le secteur1. La sélection des vectrices tensions de l'onduleur, pour construire la table de commutation, est basée sur le signe des erreurs des puissances active et réactive dans chaque secteur. Le Tableau V.1 résume les critères doivent être remplies pour la sélection du vecteur de tension approprié.

Tableau III.1 Vecteurs de tension sélectionnée pour secteur

Erreurs des puissances		Critères de sélection des vecteurs de tension	Exemples d'application
$e_q \geq 0$	$e_p \geq 0$	Vecteurs de tension qui agissent comme un effet capacitif et une source de puissance	Choix v_1 ou v_6
	$e_p < 0$	Vecteurs de tension qui agissent comme un effet capacitif et une charge	Choix v_0 , v_7 ou v_5
$e_q < 0$	$e_p \geq 0$	Vecteurs de tension qui agissent comme un effet capacitif et une source de puissance	Choix v_2
	$e_p < 0$	Vecteurs de tension qui agissent comme un effet capacitif et une charge	Choix v_0 , v_7 , v_3 ou v_4

Si l'erreur de puissance est $e_q \geq 0$ et $e_p \geq 0$, les vecteurs de tension qui doivent être sélectionnés sont des vecteurs de tension qui agissent comme un effet capacitif et une source de puissance comme v_1 ou v_6 . Si $e_q \geq 0$ et $e_p < 0$, les vecteurs de tension qui doivent être sélectionnés sont des vecteurs de tension qui agissent comme un effet capacitif et une charge comme v_0 , v_7 ou v_5 . Le contrôle de puissance réactive instantanée a une priorité plus élevée que le contrôle de puissance active. Le même raisonnement est utilisé pour la sélection des vecteurs de la tension pour les autres secteurs, ce qui donne la table de commutation présentée par le tableau.

Tableau.III.2. Table de commutation de la DPC

Sp	Sq	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11	V12
1	0	110	110	010	010	011	011	001	001	101	101	100	100
	1	100	100	110	110	010	010	011	011	001	001	101	101
0	0	010	011	011	001	001	101	101	100	100	110	110	010
	1	001	101	101	100	100	110	110	010	010	011	011	001

III.4 Résultats de simulation

Les essais expérimentaux effectués sur le même banc détaillé au chapitre deux, en appliquant la technique DPC au SAPF se résume par l'essai du régime permanent sur lequel est effectué l'analyse spectrale des signaux, l'essai de fermeture du SAPF sur le réseau et de modification de la charge non linéaire. Le *filtre actif parallèle*, lequel est

composé d'un onduleur de tension à deux niveaux. Dans la méthode d'identification, en cas sont envisagés tel que : tension de source sinusoïdales équilibrées.

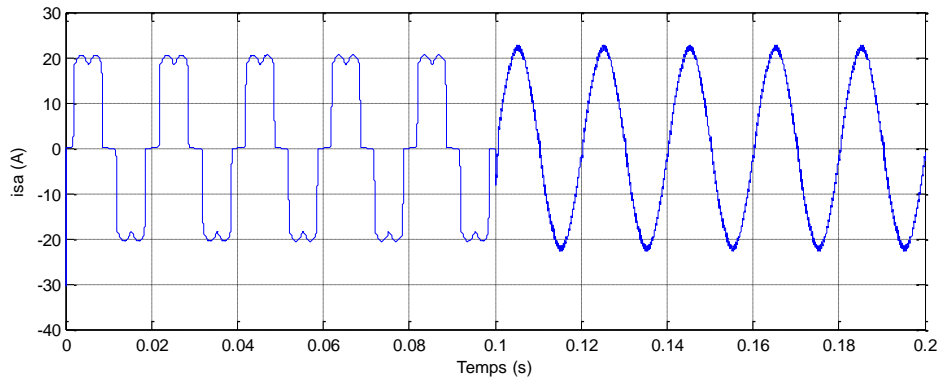
Tableau III.2. Paramètres de simulation du SAPF.

Paramètre		Valeur numérique
Réseau électrique	E_s	220 <i>v</i>
	Fréquence f	50 <i>Hz</i>
	Résistance R_s	0.25 <i>mohm</i>
	Inductance L_s	19.4 μH
Charge perturbatrice	Résistance R	26 <i>ohm</i>
	Inductance L	10 <i>mH</i>
	Résistance R_c	1.2 <i>mohm</i>
	Inductance L_c	0.3 <i>mH</i>
Filtre actif parallèle	Résistance R_f	5 <i>mohm</i>
	Inductance L_f	3 <i>mH</i>
	Tension v_{dc}	800 <i>V</i>
Charge polliont	Résistance R_1	30 <i>ohm</i>
	Inductance L_2	20 <i>mH</i>

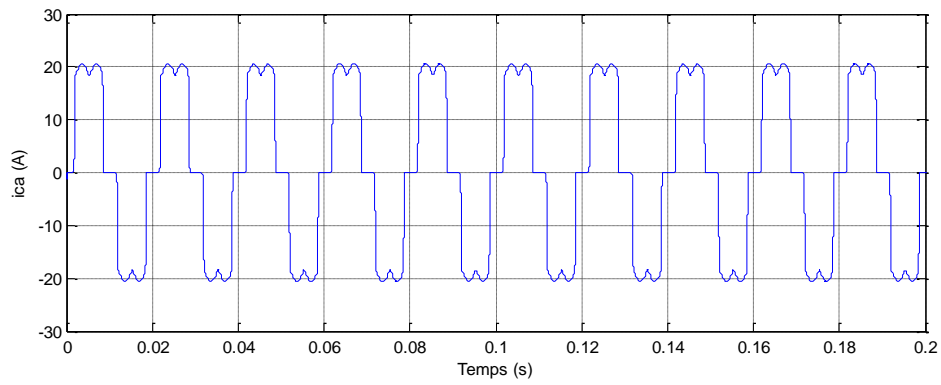
a. Fermeture du SAPF

Initialement le système fonctionne sans SAPF, les courants de source sont identiques à ceux de la charge non linéaire caractérisés par un spectre contenant que des harmoniques d'ordre impair (non multiples de trois) et un $THDi = 2.858\%$, le filtre ne produit aucun courant de compensation.

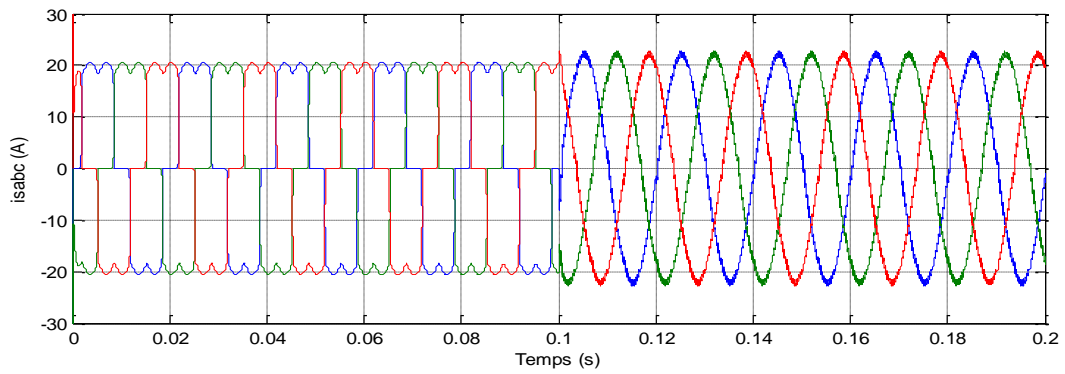
(a)



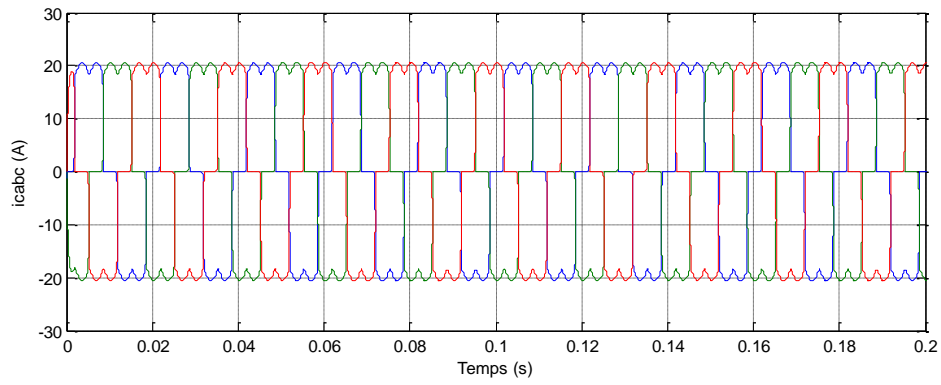
(b)



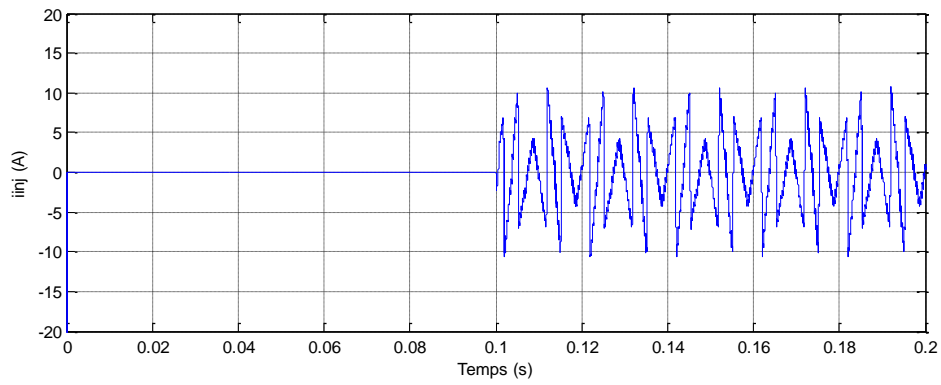
(c)



(d)



(e)



(f)

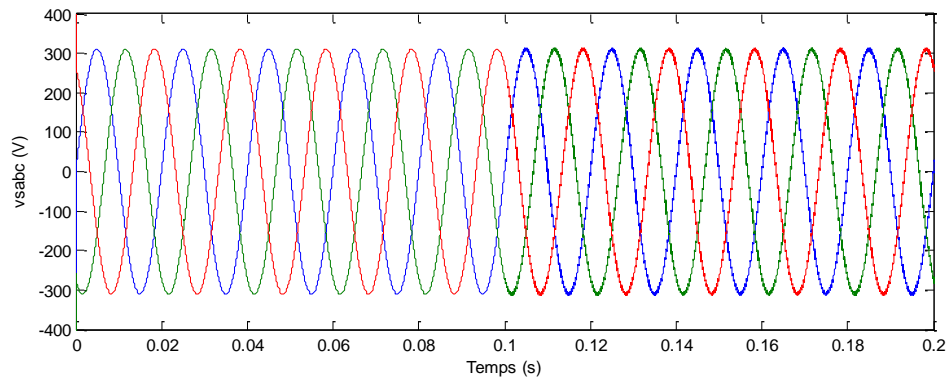


Figure.III.4. Résultats de simulation du transitoire lors de la fermeture du SAPF à $t_f = 0.1s$ pour une charge non-linéaire

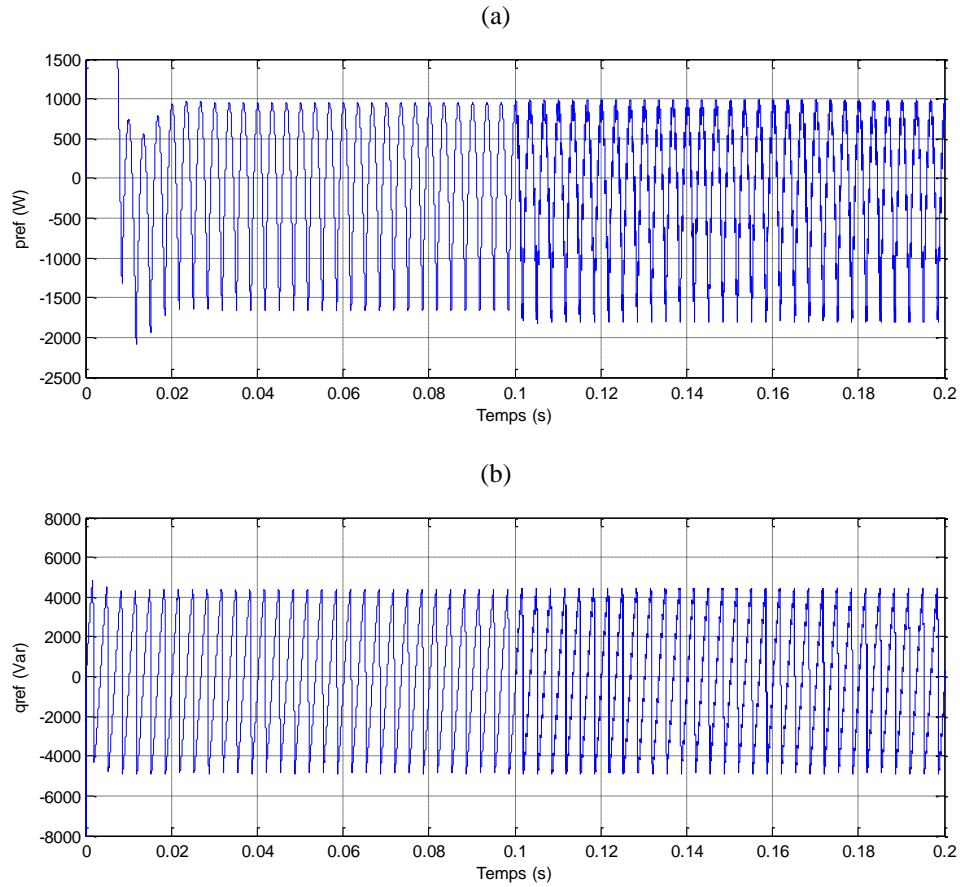
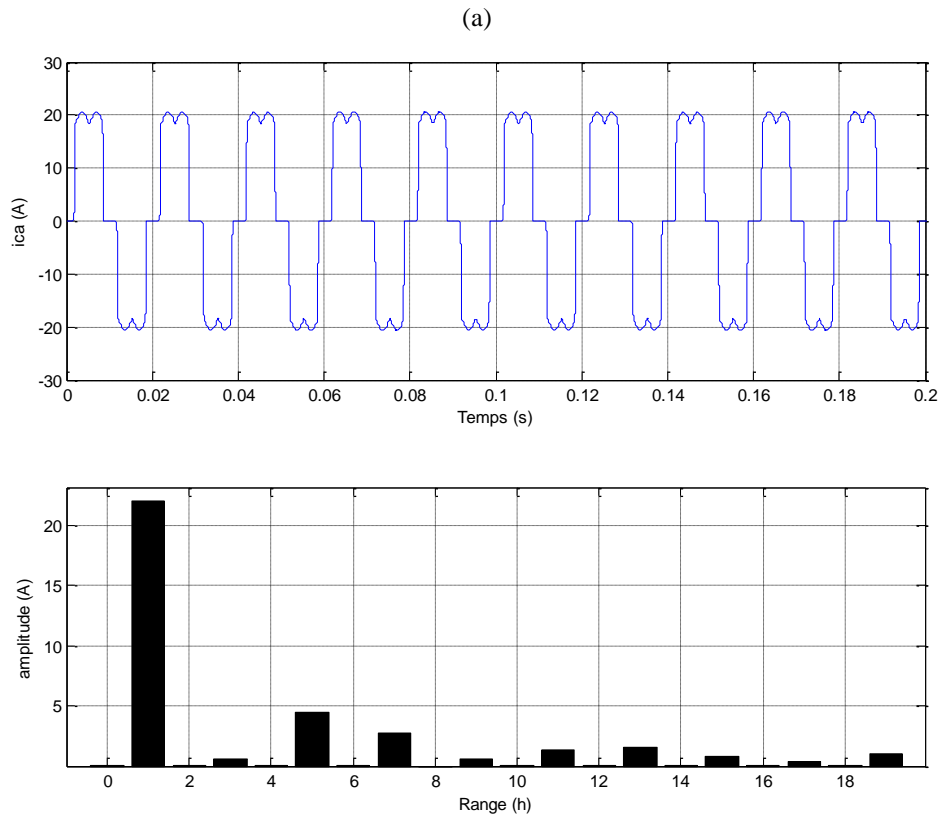


Figure.III.5. Allures des puissances instantanées avant et après la mise en service du SAPF.



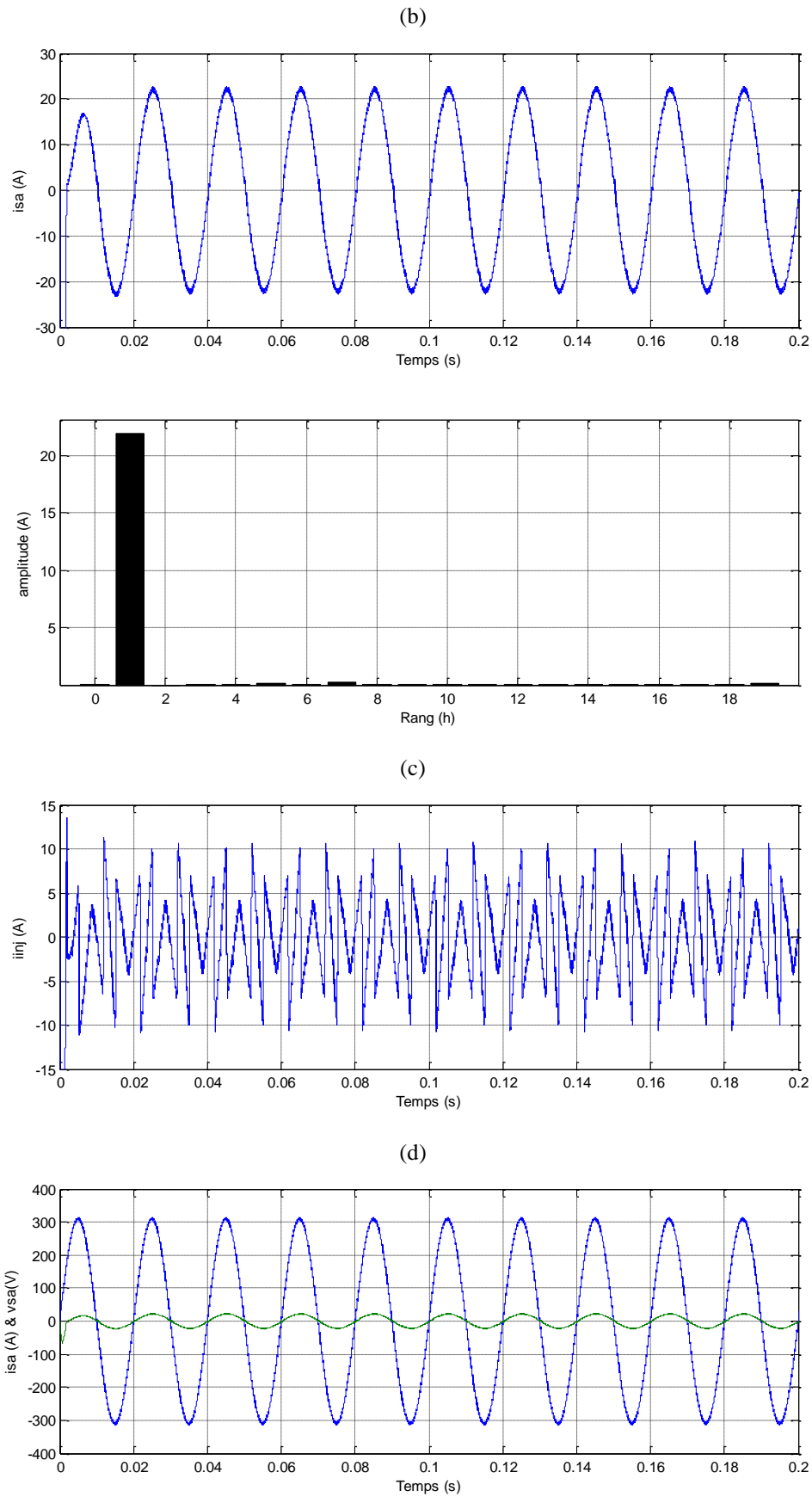
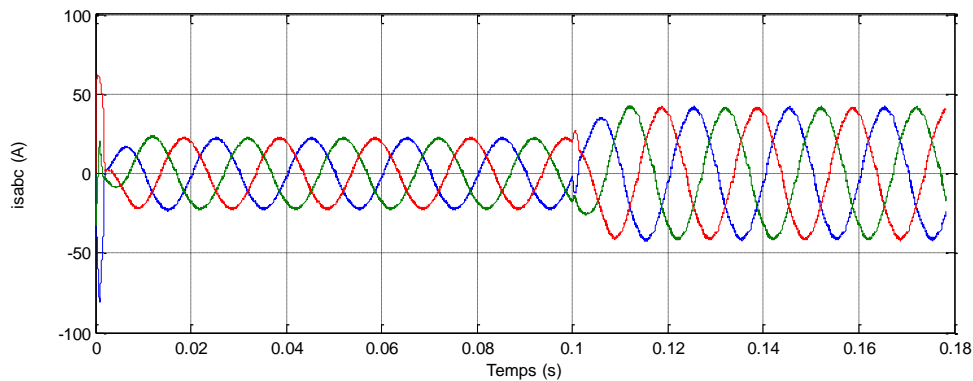


Figure.III.6. Analyse spectrale des signaux après la mise en service du SAPF : (a) courant de la charge N-L, (b) courant de source, (c) courant du filtre, (d) tension de source avec courant de source.

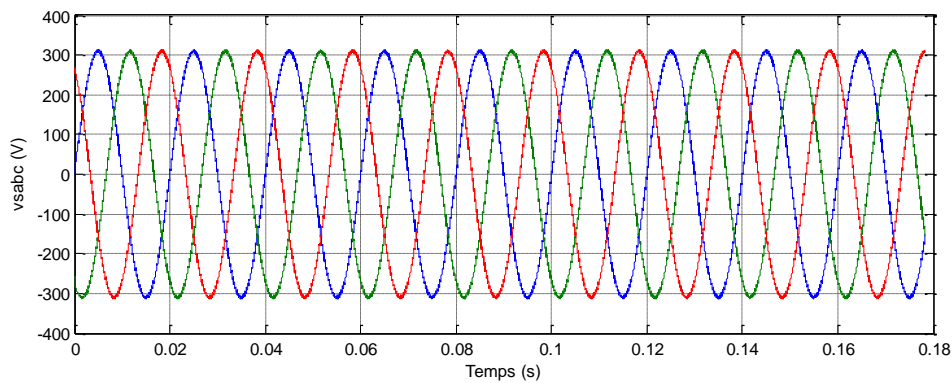
b. Variation de la charge non linéaire

Pour étudier la robustesse de la commande, nous procédons à une variation de la charge non linéaire, passage de RL à RL1 soit une diminution de presque 50%. La figure.III.8 montre qu'à $t = 0.1s$, les courants de charge subissent une augmentation brusque alors que ceux de la source conservent leur dynamique et leurs formes sinusoïdales, grâce à la robustesse des régulateurs, en ne provoquant aucune perturbation au niveau des tensions de la source.

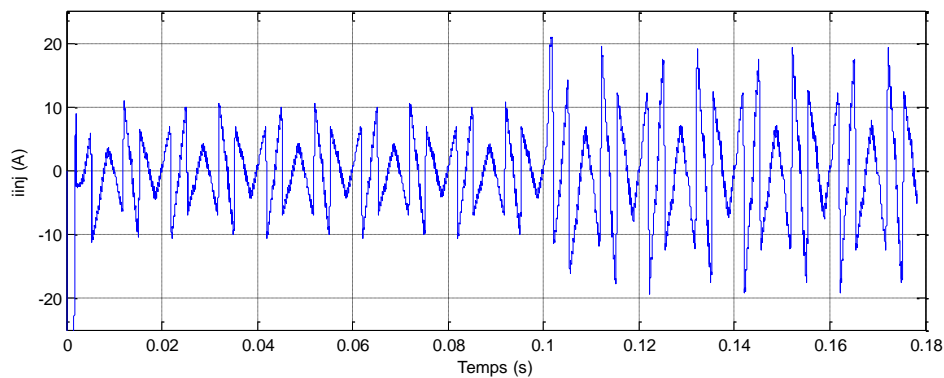
(a)



(b)



(c)



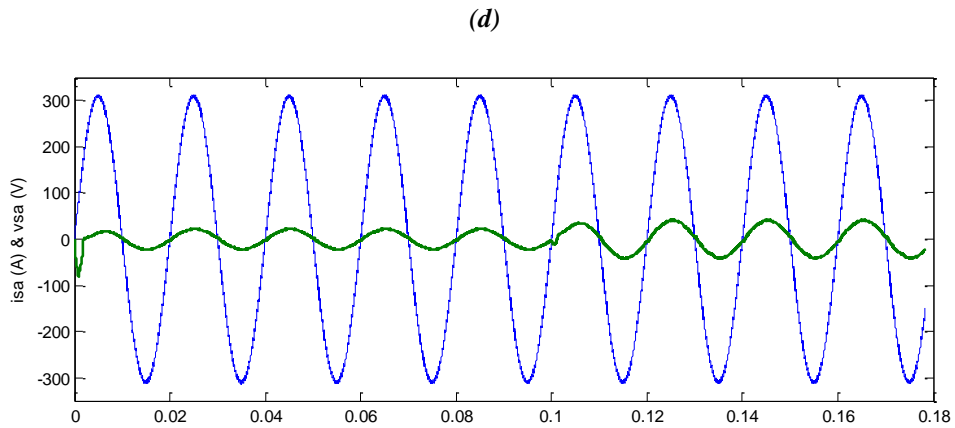


Figure.III.7. Résultats de simulation du transitoire lors de la variation de la charge non linéaire.

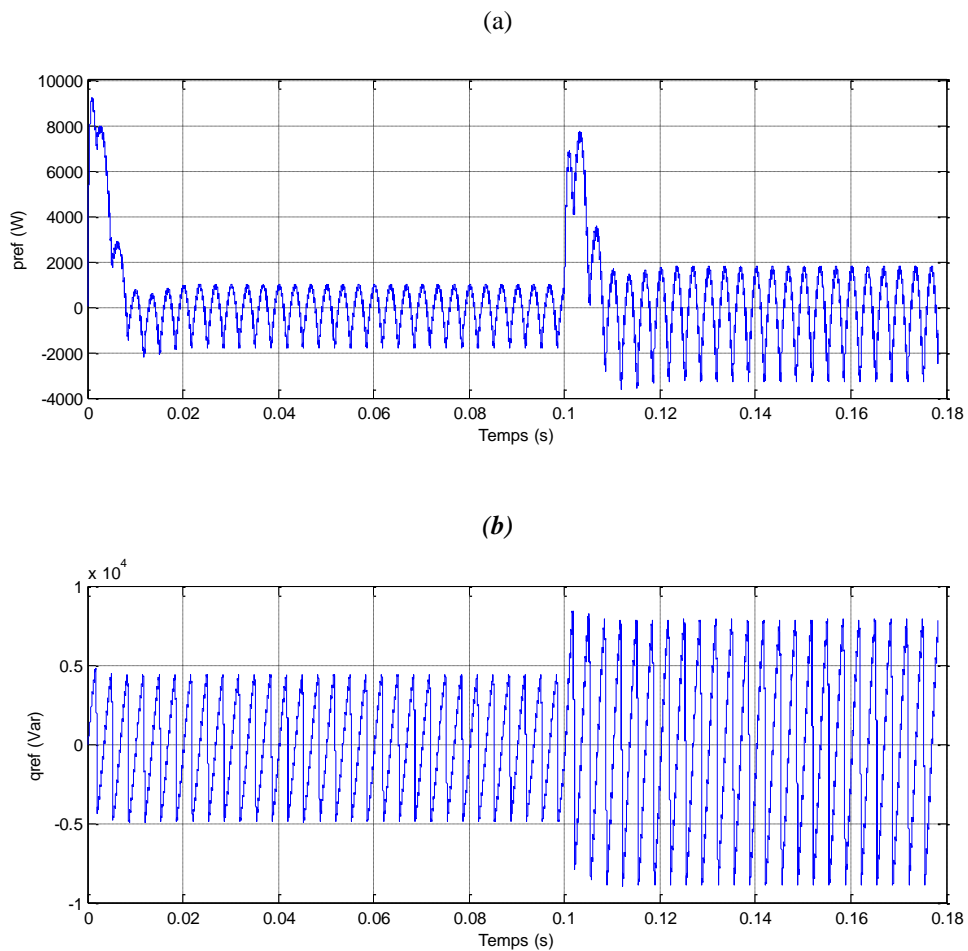


Figure.III.8. Allures des puissances instantanées pour une variation de la charge non linéaire.

Suite à cette variation de la charge, une puissance active nécessaire est délivrée par la source à partir de $t = 0.25s$, alors qu'aucun changement n'est effectué sur l'énergie réactive qui poursuit sa référence de valeur nulle pour assurer une bonne compensation du réactif.

III.5 Conclusions

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*.

Des travaux de recherche portant sur la commande directe de puissance. Ensuite, nous avons présenté stratégies de commande DPC du SAPF est basée sur l'utilisation d'un filtre passe-bas.

Conclusion Générale

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre de recherche de nouvelles solutions modernes, à base d'électronique de puissance, de dépollution harmonique du réseau électrique, plus particulièrement celui de distribution. Il est consacré à la réduction de l'injection de courants harmoniques dans le réseau, caractérisant les ponts redresseurs à diodes ou à thyristors largement exploités dans les secteurs industriels et domestiques. Ces convertisseurs, de nature non linéaire, représentent la principale source d'harmoniques affectant la forme d'onde de la tension du réseau. Ils peuvent ainsi prélever des courants distordus sur le réseau dont le taux d'harmonique (*THD*) dépasse grandement les limites contractuelles en vigueur. Afin de lutter contre la pollution harmonique provoquée par ces convertisseurs et limiter leur propagation dans le réseau, il est apparu nécessaire de développer dans le domaine industriel et sur le plan domestique des dispositifs curatifs tels que les filtres actifs d'une part et d'autre part de concevoir des convertisseurs statiques non polluants dans un cadre préventif. Nous nous sommes intéressés dans ce travail à cette dernière solution, basée sur la conception de nouvelles stratégies de commande des convertisseurs *DC/AC* à absorption de courant sinusoïdal [5].

Récemment, en plus du filtrage des harmoniques, les *filtres actifs parallèles*, et leur combinaison, sont étudiés pour la compensation de tous les types de perturbation susceptible d'apparaître dans un réseau électrique basse tension. En effet, profitant des progrès réalisés dans le domaine de l'électronique de puissance, ces solutions peu encombrantes n'occasionnent aucune résonance avec les éléments passifs du réseau et font preuve d'une grande flexibilité face à l'évolution du réseau électrique et de la charge polluante. Le *filtre actif parallèle* peut être installé pour compenser toutes les perturbations de courant comme les harmoniques, les déséquilibres et la puissance réactive [4].

Le contrôle direct de puissance (D.P.C.), en plus de sa simplicité une meilleure maîtrise des puissances active et réactive instantanées est obtenue mais les taux de distorsion du courant et de la tension s'avèrent légèrement supérieurs aux techniques précédentes. A ce propos, une piste de travail est en cours d'évaluation, elle concerne l'optimisation de la table de commutation afin de gérer de façon plus précise l'évolution des puissances instantanées [7].

Bibliographiques

1. **S. CHALAH**, « Analyse stochastique de la résultante de l'injection de courant harmonique dans un réseau électrique » Mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri de TIZI OUZOU, 17/05/2012.
2. **S. R. DZONDE NAOUSSI**, « Implantation de réseaux neuromimétiques sur cible FPGA-application à l'intégration d'un système de filtrage actif », Thèse de doctorat, Université de Strasbourg, 18 Novembre 2011.
3. **H. Kouara**, « Application d'un filtre actif série au contrôle de la tension d'un réseau basse tension », mémoire de magister, UNIVERSITE de Batna, 08/02/2006.
4. **A. KOUZOU**, « Compensation Active Des Perturbations Dans Un Réseau Basse Tension », Mémoire de magister, Université M'HAMED BOUGARA – BOUMARDAS 2004.
5. **M. MGRAOUI**, « Validation De Techniques De Commande D'un Filtre Actif Parallèle », Mémoire présenté à l'école de technologie supérieure, Université de Québec, Montréal, le 17/09/2007.
6. **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'Energie », Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas – Sétif 06/07/2011.
7. **N.D. HAMOUDA**, « Etude Comparative des Techniques de Filtrage des Harmoniques de Courant », Mémoire de magister, Université Ferhat Abbas – Sétif, 12/07/2010.
8. **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.
9. **AL. 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.
10. **R. Boubakeur**, « Commande d'un convertisseur multicellulaire pour une application de filtrage actif » mémoire de magister, Université Ferhat Abbas - Sétif(UFAS) –24/06/2012.
11. **S.A. Tadjer**, « Etude d'un système de compensation d'harmonique en utilisant un générateur photovoltaïque GPV », Mémoire de magister, Université M'hamed Bougara – Boumardas 2008.
12. **A. Chaoui**, « Filtrage actif triphasé pour charges non linéaires », Thèse de Doctorat, Université Ferhat Abbas – Sétif, Octobre 2010.

13. **A. Bouafia**, « Techniques de commande prédictive et floue pour les systèmes d'électronique de puissance: application aux redresseurs à MLI », *Thèse de Doctorat, Université Ferhat Abbas – Sétif, Octobre 2010.*
14. **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, Université de Haute – Alsace, Décembre 2005.*
15. **Sahli Abdeslem**, « Filtrage actif et contrôle de puissances : application aux systèmes photovoltaïques interconnectés au réseau », *Mémoire de magister, Université Ferhat Abbas – Sétif, 2012.*
16. **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.*
17. **I. E. Otadui**, « Sur les systèmes de l'électronique de puissance dédiés à la distribution électrique : application à la qualité de l'énergie », *Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, Septembre 2003.*
18. **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.*
19. **BOUKADOUM Aziz**, « Contribution à L'Analyse Et La Réduction De La Pollution Harmonique Dans Le Réseau Electrique », *Mémoire de magister, Université BADJI MOKHTAR – Annaba, 21/10/2007.*
20. **V. IGNATOVA**, « Méthodes d'analyse de la qualité de l'énergie électrique : application aux creux de tension et à la pollution harmonique », *Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier, Octobre 2006.*
21. **H. DJEGHLOUD**, « Filtrage actif de puissance », *Thèse de Doctorat, Université MENTOURI Constantine, Décembre 2007.*
22. **E. S. GHOLOPOUR**, « Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques », *Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, Octobre 2003.*
23. **Khezzar**, « Filtrage actif du couple de machines électriques de forte puissance », *Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, Novembre 1997.*
24. **Farid Hamoudi** « Commande Robuste d'un Filtre Actif Shunt `a Quatre Fils » *Mémoire magister Batna 2008.*
25. **F. Defay**, « 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.*

26. B.S.Chen and G.Joos, « Direct power contrôle of active filters with averaged switching frequency regulation », *IEEE Trans. Power Electron.* Vol. 23,no.6 pp. 2729 - 2737,Novembre 2008.
27. N.Mesbahi, A.Ouari, D.Ould Abdeslam, T.Djammah, and A “ Control of three-phase shunt active power filter using fuzzy logic”, in *Proc.International Review of Automatic Control (IREACO)*, vol. 2, no. 4, pp. 397 - 401,
28. *Abdelhamid.Hamadi*, « Contribution à l'étude des filtres hybrides de puissance utilisés pour améliorer la qualité de l'énergie dans le réseau électrique de distribution », *Thèse de doctorat présenté à l'école de technologie supérieure, Université de Québec, Montréal, le 14/09/2010.*
29. *N.Mesbahi*, « Contribution à l'étude des performances des onduleurs multiniveaux sur les réseaux de distribution », *Thèse de Doctorat, Université BADJI MOKHTAR – Annaba,2014.*