

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIF-1-
UFAS (ALGERIE)

MEMOIRE

Présenté à la faculté de Technologie
Département d'Electronique

Pour l'obtention du Diplôme de

MAGISTER

Option : Contrôle

Par

Mr. BENNAIDJA Tarek

Thème

Filtrage actif pour les réseaux déséquilibrés et distordus

Soutenue le :/...../2014 devant la commission d'examen :

M^r : L. KHAOUNI

Prof à l'Université de Sétif-1-

Président

M^r : N. KHANFER

Prof à l'Université de Sétif-1-

Examineur

M^d : N. CHEMS EDDINE

Prof à l'Université de Sétif-1-

Examineur

M^r : F. Krim

Prof à l'Université de Sétif-1-

Rapporteur

REMERCIEMENT

Ce travail a été réalisé au sein du laboratoire d'électronique de puissance et commande industrielle sous la direction de Monsieur Fateh Krim.

Nous le remercions en sa qualité d'encadreur, pour sa gentillesse, sa bonne humeur, ses précieux conseils et pour la confiance qu'il nous a témoignée en dirigeant ce travail et surtout pour sa patience.

Nous exprimons notre profonde gratitude à Mr L.KHAOUNI et Mr N.Khanfer et Md N.CHEMSEDDINE qui nous ont fait l'honneur d'examiner ce modeste travail.

Nous tenons à témoigner notre plus vive reconnaissance à toutes les personnes qui ont participé à l'élaboration de ce travail.

"Hamza Afgoul, Abd essalam Balaout, Badreddine".

Nous remercions tous ceux, qui de près ou de loin, nous ont soutenus et aidés dans la réalisation de ce travail.

DEDICACE

A mes très chers parents...

*Témoignage d'affection et de grande reconnaissance pour tous
leurs sacrifices*

Que Dieu les garde pour moi.

A toute ma famille. Mes frères. Mes sœurs.

A tous mes amis Chouaib, Aness, Yahia.

Avec l'expression de tous mes sentiments

Je dédie ce modeste travail.

Table des matières

INTRODUCTIO GENERALE	1
CHAPITRE I: POLLUTION HARMONIQUE, SOLUTIONS DE DEPOLLUTION.	
Introduction.....	4
I.1 Perturbations électriques et leurs origines	5
I.1.1 Perturbations dans les réseaux de distribution électrique	5
• Les variations de la fréquence à 50 Hz.....	5
• Les variations de l'amplitude.....	5
• La modification de la forme d'onde de la tension.....	5
• Le déséquilibre du système triphasé.....	6
I.1.2 Perturbations harmoniques	6
I.1.2.1 Généralités sur l'analyse harmonique	6
I.1.2.2 Caractérisation d'un contenu harmonique pour un signal	7
• Expression de la valeur efficace.....	8
• Taux de distorsion harmonique THD (%).....	8
• Facteur de puissance.....	8
I.1.2.3 Effets des perturbations harmoniques	9
a) les effets instantanés ou à court terme.....	10
b) les effets à long terme.....	10
I.1.2.4 Normes et recommandations	11
I.2 Réduction de la pollution harmonique	12
I.2.1 Absorption sinusoïdale	12
I.2.2 Ajout d'une inductance de lissage du courant	12
I.2.3 Confinement des harmoniques	13
I.2.4 Filtrages passifs	13
I.2.4.1 Filtre passif résonant	14
I.2.4.2 Filtre passif amorti	14
I.2.4.3 Phénomène de l'antirésonance	14
I.2.5 Filtrages actifs	15

I.2.5.1 Filtre actif série.....	15
I.2.5.2 Filtre actif parallèle.....	16
I.2.5.3 Filtre combiné parallèle-série (UPQC).....	16
I.2.5.4 Filtre actif série avec un filtre passif parallèle.....	17
I.2.5.5 Filtre actif hybride.....	17
I.3 Conclusion	18

CHAPITRE II : IDENTIFICATION DES COURANTS HARMONIQUES

Introduction.....	20
II.1. Identification des courants harmoniques de référence	20
II.1.1. Généralités sur les méthodes d'identification	20
II.1.2. Théorie généralisée de l'énergie électrique	21
II.1.3 Théorie énergétique sous distorsion harmonique et déséquilibres	23
II.2. La méthode des puissances instantanées	26
II.2.1. Généralités sur les puissances instantanées	26
II.2.2. Séparation des puissances perturbatrices	28
II-2-3 Calcul des courants perturbateurs	29
II.2.4 Algorithme d'identification.....	30
II.3 La boucle de synchronisation PLL.....	30
II.4 Conclusion.....	32

CHAPITRE III : Modélisation et simulation

Introduction.....	34
III.1 Structure générale du Filtre actif parallèle	34
III.1.1 Topologie générale	34
III.1.2 Etude de la partie puissance	35
III.1.2.1 Onduleur de tension	35

III.1.2.1.1 Structure générale	35
III.1.2.1.2 Tension fournie par l'onduleur	36
III.1.2.1.3 Représentation vectorielle.....	38
III.1.2.2 Système de stockage d'énergie.....	38
• Estimation de la valeur de la capacité du condensateur de stockage (Vdc).....	39
III.1.2.3 Filtre de sortie	39
• Estimation de L_f	40
III.1.3 Etude de la partie contrôle commande	40
III.1.3.1 Identification des courants perturbés	40
III.1.3.2 La régulation de la tension continue	41
III.1.3.3 La commande de l'onduleur	42
• Commande par hystérésis.....	42
• Commande par hystérésis modulée.....	42
• Commande MLI intersective.....	43
III.2 Conclusion.....	44

CHAPITRE IV : Résultats de simulation

Introduction.....	46
IV.1 Logiciel utilisé	46
IV.2 Structure générale de simulation de SAPF	47
IV.2.1 La source de tension triphasée	48
IV.2.2 La charge non linéaire	48
IV.2.3 Le SAPF	48
IV.2.4 La commande de SAPF	49
IV.3 Résultat de simulation	50
• Avant le filtrage.....	50
• Après le filtrage.....	52
• Charge variable (Rch1 // Rch2).....	54
IV.4 Résumé des résultats.....	56

IV.5. Interprétation des résultats.....	56
• Avant le filtrage.....	56
• Apres le filtrage.....	56
• Charge variable (Rch1 // Rch2).....	57
IV.6 Conclusion.....	57

CHAPITRE V : RESULTATS EXPERIMENTAUX

Introduction.....	59
V.1 Structure générale	59
V.2 Analyse du système avant la mise en service du filtre	61
V.3 Analyse du système après la mise en service du filtre	63
V.4 Mise en service du filtre	66
V.5 Variation de la charge non linéaire	67
V.6 Conclusion.....	68

CONCLUSION GENERALE.....	70
---------------------------------	-----------

INTRODUCTION GENERALE

La qualité de l'électricité est devenue un sujet stratégique pour les compagnies d'électricité, les personnels d'exploitation, de maintenance ou de gestion de sites tertiaires ou industriels, et les constructeurs d'équipements.

L'une des propriétés particulières de l'électricité est que certaines de ses caractéristiques dépendent à la fois du producteur / distributeur d'électricité, des fabricants d'équipements et du client. Parmi les principaux phénomènes qui dégradent la Qualité de l'Energie Electrique du client, on trouve les distorsions harmoniques.

La problématique des harmoniques dans le réseau électrique, également appelée pollution harmonique, n'est pas un phénomène nouveau. La distorsion harmonique est générée par les charges non linéaires connectées au réseau et qui absorbent des courants non sinusoïdaux. Ces harmoniques de courant vont à leur tour générer des tensions harmoniques aux différents points de connexion au réseau.

Dans les systèmes triphasés, Un récepteur triphasé qui n'est pas équilibré et que l'on alimente par un réseau triphasé équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau et provoque des courants excessifs au niveau du neutre.

Ces courants excessifs, les harmoniques injectés, la présence de puissance réactive, les déséquilibres et autres problèmes générés par ce type de charge conduit à un affaiblissement du rendement global du système et du facteur de puissance.

Pour faire face à ce problème, la solution classique qui est connue depuis bien longtemps consiste en l'utilisation des filtres passifs. Cette solution est la plus répandue et pratiquement la plus simple et la moins chère mais le filtrage passif pose certains problèmes : manque d'adaptabilité lors de variations de l'impédance du réseau, de la charge et résonance possible avec l'impédance du réseau et dans certains cas défavorables où cette résonance est excitée, celle-ci peut entraîner une tension harmonique élevée et un courant harmonique important dans la capacité du filtre et dans le réseau.

Une autre solution consiste à mettre en œuvre un filtrage actif afin d'éviter les inconvénients des filtres passifs. Une première solution consiste à connecter le filtre actif en parallèle avec le système polluant : ainsi, il injecte au réseau un courant de même amplitude que celle du courant harmonique à éliminer mais en opposition de phase.

Dans le cadre de ce mémoire on s'intéresse à limiter cette pollution dans le cas où le réseau est dit pollué par composantes harmoniques (distordis) et à la présence du déséquilibre.

A cet effet, nous avons structuré notre étude de la manière suivante :

Le premier chapitre débute avec la problématique des harmoniques, leur origine, leur caractérisation et leurs conséquences néfastes sur le réseau et sur les récepteurs, est ensuite présentée. Ensuite, nous présentons également les solutions classiques et modernes de dépollution avant de faire un choix sur le filtre actif parallèle qui est notre sujet de discussion dans les prochains chapitres.

Dans le second chapitre on propose la stratégie de commande qui se base sur les calculs des puissances instantanées. Et à la fin nous étudierons la boucle de verrouillage de phase PLL.

Au troisième chapitre, nous étudions la topologie de filtre actif parallèle Pur (SAPF) à structure tension et sa stratégie de commande.

Le quatrième chapitre concerne les résultats de l'étude en simulation du filtre actif parallèle sous l'environnement Matlab Simulink.

Le dernier chapitre concerne les Résultats expérimentaux du filtre actif parallèle et les comparer avec les résultats de simulation.

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

CHAPITRE I

Pollution Harmonique, Solutions De Dépollution

Introduction

Comme tout générateur d'énergie électrique, un réseau de puissance fournit de l'énergie aux appareils utilisateurs par l'intermédiaire des tensions qu'il maintient à leurs bornes.

Il apparaît évident que la qualité de cette énergie dépend de celle de la tension au point de livraison. Cette tension subit généralement beaucoup de perturbations de deux origines distinctes :

- Les perturbations de tension causées par des tensions perturbatrices comme les tensions harmoniques et déséquilibrées et les creux de tension.
- Les perturbations de tension causées par le passage, dans les réseaux électriques, des courants perturbateurs comme les courants harmoniques, déséquilibrés et réactifs,

Par ailleurs, l'utilisation de plus en plus fréquente de charge polluante produit des effets négatifs considérables sur le réseau. Ces charges polluantes absorbent des courants non sinusoïdaux tout en étant alimentées par des sources sinusoïdales, elles se comportent par conséquent comme des générateurs d'harmoniques et échangent en plus de l'énergie réactive. Ceci a pour effet, la déformation de la tension réseau via son impédance de court-circuit, et une réduction de la puissance active disponible par les générateurs, les transformateurs ou les lignes de distribution d'électricité. Cette préoccupation, qui s'accompagne d'une législation de plus en plus sévère en matière de pollution harmonique, justifie le développement de nouvelles solutions à base de composants actifs afin de préserver toutes pollutions du réseau électrique.

Dans ce premier chapitre, nous présentons les perturbations dans le réseau de distribution, après des notions élémentaires d'analyse harmonique, les origines et les conséquences de la pollution harmonique sont exposés. Par suite, les normes et la réglementation en vigueur seront présentées avant de répertorier les solutions possibles assurant une action prédictive

par une absorption sinusoïdale du courant ou curative par une compensation de cette pollution harmonique [1].

I.1 Perturbations électriques et leurs origines

I.1.1 Perturbations dans les réseaux de distribution électrique

L'énergie électrique est fournie sous forme de tension constituant un système sinusoïdal triphasé dont les paramètres caractéristiques sont la fréquence, l'amplitude, la forme d'onde, le déséquilibre.

La mesure de ces paramètres permet de juger la qualité de la tension. Une détérioration de l'un d'entre eux ou de plusieurs à la fois laisse supposer la présence d'une anomalie dans le réseau électrique [25].

La qualité de la tension peut être affectée, soit du fait de certains incidents inhérents à la nature physique et aux sujétions liées à l'exploitation du réseau, soit du fait de certains récepteurs. Ces défauts se manifestent sous forme de différentes perturbations affectant un ou plusieurs des quatre paramètres précédemment définis. Quatre possibilités distinctes de perturbations peuvent être alors citées:

- **Les variations de la fréquence à 50 Hz** : Bien qu'elles soient rares et qu'elles ne soient observées que lors de circonstances exceptionnelles, par exemple certains défauts graves du réseau, au niveau de la production ou du transport, elles peuvent apparaître sur les réseaux des utilisateurs non interconnectés ou alimentés par une source thermique autonome.
- **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;

- **Le déséquilibre du système triphasé** : Dans ce cas, les trois tensions ne sont pas identiques en amplitude et/ou ne sont pas déphasées de 120° les unes par rapport aux autres.

I.1.2 Perturbations harmoniques

I.1.2.1 Généralités sur l'analyse harmonique

Les harmoniques sont des perturbations permanentes affectant la forme d'onde de la tension du réseau. Ces perturbations résultent de leur superposition sur l'onde fondamentale à 50Hz, mais à des 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 de rang 40. Mais on peut également observer des sous-harmoniques ou des inter-harmoniques à des fréquences non multiples entières de la fréquence fondamentale [11]. L'amplitude du rang 1 est appelée la composante fondamentale du signal électrique périodique ; dans notre cas il correspond à la fréquence 50Hz. L'harmonique d'ordre zéro correspond à la composante directe du signal, l'amplitude de chaque harmonique est inversement proportionnelle à son ordre [4].

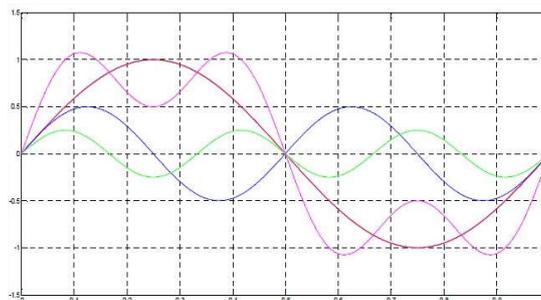


Figure I.1 Un signal et les harmoniques.

Avec :

_____ : le signal.

_____ : la fréquence fondamentale.

_____ : harmonique d'ordre 2.

_____ : harmonique d'ordre 3.

Les premiers rangs harmonique tel que (5,7) ont des amplitudes élevées, d'où l'importance des courant injectés, raison pour laquelle il faut limiter ces harmoniques dans les normes. L'amplitude de l'harmonique de rang (h) du côté de la source est donnée par [4]:

$$= - \quad (1.1)$$

h : L'harmonique d'ordre h.

I_1 : L'amplitude du courant fondamental.

I_h : L'amplitude de l'harmonique de rang (h).

I.1.2.2 Caractérisation d'un contenu harmonique pour un signal

Tout signal $y(t)$ déformé et périodique de période ' T ' peut se décomposer en une somme d'ondes sinusoïdales et d'une composante continue éventuelle grâce à la décomposition en série proposée par le mathématicien Français Jean-Baptiste Joseph Fourier (1768-1830) [1].

Cette décomposition s'écrit sous les formes suivantes :

$$y(t) = + \sqrt{2} (\cdot \sin(-) + \cdot \sin(2 \cdot -) + \dots + \cdot \sin(h \cdot -)) \quad (1.2)$$

Qui peut s'écrire sous forme de somme :

$$() = + \sum \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(h \cdot -) \quad (1.3)$$

Avec :

- Y_0 : valeur moyenne ou composante continue du signal $y(t)$,
- h : rang de l'harmonique,
- Y_1 : valeur efficace de l'harmonique au rang h,
- ω : pulsation fondamentale ($2 \cdot \pi \cdot f_1 = 2\pi/T$),
- φ_h : phase de l'harmonique au rang h.

Dans l'écriture de l'équation (1.2), il est possible d'identifier le terme fondamental, correspondant au rang 1, qui est une composante sinusoïdale de fréquence égale à f_1 , généralement 50 Hz ou 60 Hz. Puis des composantes harmoniques sinusoïdales de rang h de fréquences multiples de celle du fondamental. Le rang harmonique est donc le rapport entre la fréquence du signal harmonique et du fondamental. En règle générale, une distinction est opérée entre les harmoniques de rangs pairs (2, 4, 6, 8..etc.) et les harmoniques de rangs impairs (3, 5, 7, 9 ...etc.) plus répandus et influents dans les réseaux industriels [1].

• **Expression de la valeur efficace**

La valeur efficace vraie (TRMS values: True Root Mean Square values) conditionne les échauffements. Pour une grandeur périodique non sinusoïdale, son expression est :

$$= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T ()^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \left(\int_0^T \dots + \dots + \dots \right)} \quad (1.4)$$

Cette définition est valable aussi bien pour les tensions que pour les courants. Il est à noter que pour une grandeur purement sinusoïdale, la valeur efficace correspond à sa valeur maximale divisée par la racine carrée de deux [12].

• **Taux de distorsion harmonique THD (%)**

Le taux individuel d'harmonique est défini comme le rapport (en %) de l'amplitude de l'harmonique au rang h ramenée à celle du fondamental :

$$(h) = 100 \frac{U_h}{U_1} (\%) \quad (1.5)$$

La notion la plus couramment utilisée est le taux global de distorsion harmonique THD (Total Harmonic Distorsion) pour caractériser le taux de déformation d'une onde électrique [2]. C'est le rapport entre la valeur efficace des harmoniques à celle du fondamental seul (norme IEC 61000-2-2) :

$$(h) = 100 \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2}}{U_1} (\%) \quad (1.6)$$

Il est possible, de façon moins usuelle, de définir le rapport entre la valeur efficace des harmoniques à celle de la grandeur déformée :

$$(h) = 100 \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2}}{\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} U_h^2}} (\%) \quad (1.7)$$

Dans la plupart des applications, il suffit de considérer les harmoniques entre le rang 2 et 25, même si pour la norme EN 50160 l'analyse des données doit s'effectuer jusqu'au rang 50[12].

• **Facteur de puissance**

Dans le cas d'un réseau équilibré, la puissance apparente S est définie par :

$$= \frac{P}{\cos \phi} = \frac{P}{\sqrt{1 - \sum_{h=2}^{\infty} (h)^2}} \quad (1.8)$$

La puissance active P conséquence d'un déphasage entre les fondamentaux du courant et de la tension est alors :

$$P = U \cdot I \cdot \cos(\phi) \quad (1.9)$$

Le facteur de puissance F_p , défini par le rapport entre la puissance active et la puissance apparente s'exprime par :

$$F_p = \cos(\phi) \quad (1.10)$$

La puissance réactive Q est quant à elle définie par :

$$Q = U \cdot I \cdot \sin(\phi) \quad (1.11)$$

Afin d'estimer la participation des harmoniques dans la puissance apparente, on utilise la notion de puissance fluctuante D définie par :

$$D = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} S_n^2} \quad (1.12)$$

La puissance apparente peut donc se mettre sous la forme :

$$S = \sqrt{P^2 + D^2} \quad (1.13)$$

Le facteur de puissance s'écrit alors :

$$F_p = \frac{P}{S} \quad (1.14)$$

D'où, on peut constater que le facteur de puissance se dégrade par la présence d'harmoniques d'une part et la consommation d'énergie réactive d'autre part [7].

I.1.2.3 Effets des perturbations harmoniques

De nombreux effets des harmoniques sur les installations et les équipements électriques peuvent être cités tels que les déformations des formes d'ondes entraînant des dysfonctionnements, l'augmentation des valeurs crêtes créant des claquages de diélectriques ou des valeurs efficaces induisant des échauffements et donc des pertes supplémentaires aussi bien en courant qu'en tension, ainsi qu'un étalement spectral provoquant des vibrations et des fatigues mécaniques. L'ensemble de ces effets ont un impact économique non négligeable à cause des surcoûts, de la dégradation du rendement énergétique, du surdimensionnement, des pertes de productivité ou des déclenchements intempestifs qu'ils entraînent. Blés effets de ces perturbations peuvent se classer en deux types [2] :

a) *Les effets instantanés ou à court terme* [1]

- Dysfonctionnements des dispositifs de commande ou de régulation (détection du passage par zéro, ...),
- Pertes de précision dans les appareils de mesure (compteur d'énergie, instrumentation,...),
- Vibrations dans les moteurs électriques alternatifs à cause des couples mécaniques pulsatoires dus aux champs tournants harmoniques,
- vibrations, bruits acoustiques dans les transformateurs ou les inductances dus aux efforts électrodynamiques proportionnels aux courants harmoniques,
- perturbations induites dans les liaisons par courant faible sous forme de bruits par couplage électromagnétique (contrôle-commande, télécommunication, téléphonie, réseaux locaux, ...).
- Interférences avec les systèmes de télécommande à distance utilisés par les distributeurs d'énergie,
- Déclenchement intempestif des circuits de protection,
- Effets de papillotement (flicker) au niveau des éclairages et des affichages des appareils électroniques.

b) *Les effets à long terme* [1]

- Vieillesse prématuré des moteurs électriques alternatifs du fait des pertes cuivre et fer supplémentaires, dû à la différence importante de la vitesse entre les champs tournants inducteurs harmoniques et le rotor,
- échauffements et pertes joules supplémentaires des câbles et des équipements entraînant des déclassements du matériel avec des surdimensionnements,
- surchauffe du neutre. En effet dans un système triphasé équilibré, les tensions sont déphasées de 120° si bien que lorsque les charges sont égales, le courant résultant dans le neutre est nul. Toutefois, si les courants de phases s'annulent, ce n'est pas le cas des courants harmoniques. Ces courants qui sont des multiples impairs de la fréquence du courant de phase s'ajoutent dans le conducteur neutre. Ainsi le courant résultant dans le neutre représente l'addition des courants harmoniques de rang trois et multiple de trois,

- échauffements supplémentaires des condensateurs par conduction et par hystérésis dans le diélectrique qui peuvent conduire au claquage,
- pertes supplémentaires dans les transformateurs ou les inductances dues à l'effet de Peau dans le cuivre, à l'hystérésis et aux courants de Foucault dans le circuit magnétique.
- fatigue mécanique des équipements à cause des vibrations et des couples pulsatoires,
- risque d'excitation de résonance : Les fréquences de résonance des circuits formés par les inductances du transformateur et les câbles sont normalement élevées. Ce n'est pas le cas lorsque des batteries de condensateurs sont raccordées au réseau pour relever le facteur de puissance. Les fréquences de résonance peuvent devenir assez faibles et coïncider avec celles des harmoniques engendrés par les convertisseurs statiques. Dans ce cas, il y aura des phénomènes d'amplification d'harmoniques qui peuvent entraîner des destructions [3].

I.1.2.4 Normes et recommandations [1]

Afin de 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. Ces recommandations concernent les exigences au point de raccordement de l'utilisateur sur le réseau électrique dans le but :

- D'épargner à l'utilisateur de l'énergie électrique, les désagréments engendrés par la présence des harmoniques.
- D'assurer la longévité et la sécurité des différents équipements constituant le réseau et ceux qui sont branchés à ce dernier.

Des normes fixant un seuil d'injection harmonique maximale à ne pas dépasser, ces normes ont été élaborées par différents organismes, ils peuvent être soit nationaux, notamment UTE-CEF (Union Technique de l'Electricité- Comité Electrotechnique Français), régionaux, notamment le CENELEC (Comité de normalisation Electrotechnique(EN 50160)) en Europe ou internationaux, notamment CEI (Comité Electrotechnique International).

Le tableau 1.1, repris de la norme CEI 61000-2-2, présente les caractéristiques et le niveau de compatibilité pour les harmoniques au point de raccordement du client pour un réseau satisfaisant la norme CEI 1000-2-4.

Rangs impairs non multiple de3		Rangs impairs multiple de3		Rangs pairs	
Rang	Tension harm (%)	Rang	Tension harm (%)	Rang	Tension harm (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.3	6	0.5
13	3	21	0.2	8	0.5
17	2	>21	0.2	10	0.5
19	1.5			12	0.2
23	1.5			>12	0.2
25	1.5				
>25	0.2+1.3*25/h				

Tableau 1.1 : Niveau de compatibilité pour les tensions harmoniques sur les réseaux basse tension (Norme CEI 61000-2-2).

I.2 Réduction de la pollution harmonique

I.2.1 Absorption sinusoïdale

Le prélèvement sinusoïdal est une technique qui permet aux convertisseurs statiques d'absorber un courant très proche d'une sinusoïde avec un facteur de puissance unitaire. Dans ce cas, ces structures se positionnent dans une stratégie préventive et non curative. Ces techniques de prélèvement sinusoïdal s'appliquent aux structures monophasées et triphasées. Ces convertisseurs propres utilisent la technique MLI (Modulation de Largeur d'Impulsions) également appelée PWM (Pulse Width Modulation) comme principe de pilotage des interrupteurs commandés [1].

I.2.2 Ajout d'une inductance de lissage du courant

L'ajout d'inductances de lissage en amont des dispositifs polluants est une solution communément utilisée afin d'atténuer les harmoniques de rangs élevées puisque leurs impédances augmentent avec la fréquence. Ces inductances réduisent donc la distorsion de la tension au point de raccordement mais induisent un coût supplémentaire [1].

I.2.3 Confinement des harmoniques

Il s'agit de limiter la circulation des courants harmoniques à une partie de l'installation la plus limitée possible. Si le montage est un montage équilibré, les harmoniques de rang 3w sont en phase et en l'absence de conducteur neutre connecté, ces courants ne peuvent pas circuler. Pour éviter la circulation de ces courants de rang 3 sur l'ensemble du réseau, il est possible d'effectuer un découplage par transformateur. Par exemple l'utilisation d'un transformateur dont le primaire est couplé en étoile et le secondaire en zigzag (couplage Yzn) permet d'éliminer au primaire les courants de pulsation 3 [1].

I.2.4 Filtrages passifs

Le filtrage consiste à placer en parallèle sur le réseau d'alimentation une impédance de valeur très faible autour de la fréquence à filtrer et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau. Un filtre passif est constitué d'éléments passifs tels que des inductances, des condensateurs et des résistances, qui forment une impédance dont la valeur varie en fonction de la fréquence. On connecte alors le filtre passif en parallèle avec le réseau de manière à absorber un harmonique de courant donné [1]. Si on veut par exemple éliminer le courant harmonique de rang 5, on dimensionne alors les éléments passifs de manière à ce que l'impédance équivalente du filtre soit la plus petite possible à la fréquence 5x fondamental, le courant circulera alors dans l'impédance la plus faible, c'est à dire dans le filtre passif et donc plus dans l'impédance de court-circuit du réseau comme l'illustre la figure 1.2.

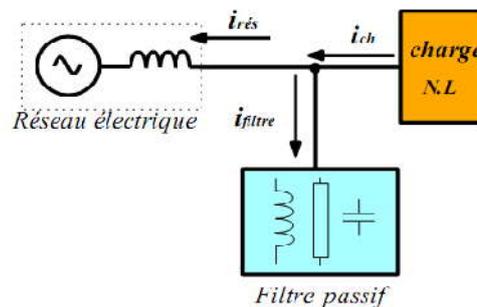


Figure I.2 Raccordement d'un filtre passif.

Equation des courants :

$$= + _ + _ + _ + _ + \dots \quad (1.15)$$

$$= \dots \quad (1.16)$$

$$= \dots + \dots + \dots + \dots + \dots \quad (1.17)$$

Parmi les dispositifs de filtrage les plus répandus, on distingue le filtre passif résonnant et le filtre passif amorti ou passe-haut [1].

1.2.4.1 Filtre passif résonnant

C'est un filtre sélectif constitué d'une résistance, d'un condensateur et d'une bobine en série, comme décrit sur la figure 1.3, son impédance équivalente est :

$$Z(\omega) = \dots \quad (1.18)$$

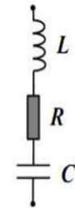


Figure 1.3 Filtre passif résonnant.

Le rang d'accord 'h_a' correspond au multiple, entier ou non, de la fréquence nominale du réseau. La pulsation de résonance du filtre est : $\omega_r = 2\pi \cdot f_r = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ [1].

1.2.4.2 Filtre passif amorti

C'est un filtre passe haut constitué d'une inductance en parallèle avec une résistance, le tout en série avec un condensateur comme décrit sur la figure 1.4[1]. Son impédance équivalente est :

$$Z(\omega) = \dots \quad (1.19)$$

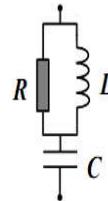


Figure 1.4 Filtre passif amorti.

1.2.4.3 Phénomène de l'antirésonance

Le phénomène de l'antirésonance (fig.1.5) se rencontre dans les réseaux électriques quel que soit leur niveau de tension. L'impédance vue par le réseau et le filtre passif résonnant est:

$$Z(\omega) = \frac{\dots}{Z(\omega)} \quad (1.20)$$

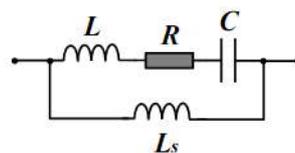


Figure 1.5 Filtre passif parallèle anti-résonnant.

Dans ce cas, les variations de l'impédance du réseau peuvent détériorer les performances du filtre. Finalement, cette solution est dédiée à un type de charge et une configuration réseau et perd de son efficacité lorsque les caractéristiques de ceux-ci évoluent [1].

I.2.5 Filtrages actifs :

Les inconvénients inévitables aux filtres passifs et l'apparition de nouveaux composants semi-conducteurs, comme les thyristors GTO et les Transistors IGBT, ont conduit à concevoir une nouvelle structure de filtres appelée filtres actifs de puissance (A.P.F). 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. Le filtre actif est connecté en série, en parallèle, en combinant ces deux dernières structures ensemble ou associé avec des filtres passifs en fonction des grandeurs électriques harmoniques (courants ou tensions) à compenser [6] [5][1].

Les avantages de ces filtres actifs par rapport aux filtres passifs sont les suivants [8] :

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

Pourtant, ils présentent quelques inconvénients :

- Leur coût élevé a limité leur implantation dans l'industrie.
- Les pertes sont plus élevées.

Deux types de convertisseurs connus dans la littérature constituent APF: convertisseur à source de courant (CSI) ou à source de tension (VSI).

I.2.5.1 Filtre actif série

Le but du filtre actif série (fig.1.6) est de créer une impédance en série avec le réseau qui sera nulle pour le fondamental et de valeur élevée pour les harmoniques. Il est destiné à protéger les installations sensibles aux perturbations provenant du réseau telles que les harmoniques en tension, les surtensions, déséquilibres et creux de tension. En revanche, le filtrage série ne permet pas de compenser les courants harmoniques consommés par la charge. En plus, ce filtre nécessite une protection complexe contre les courts-circuits des

réseaux. En effet, lors d'un court-circuit côté réseau, ce dernier peut être amené à supporter tout le courant de court-circuit [12].

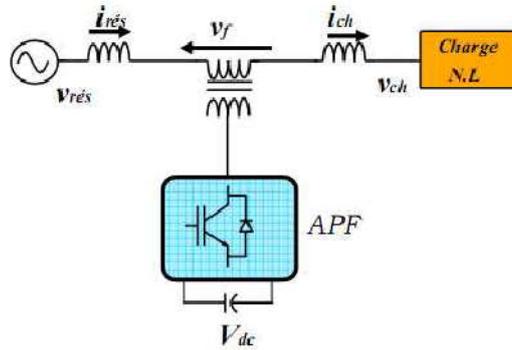


Figure I.6 Filtre actif série.

I.2.5.2 Filtre actif parallèle

Sur la figure 1.7 apparaît le synoptique d'un filtre actif parallèle. Le filtre actif est constitué d'un onduleur de tension et d'un filtre inductif en sortie. Ainsi, l'inductance en sortie de l'onduleur donne la nature de source de courant au filtre actif. Dans le cas où le réseau alimente plusieurs charges polluantes, il est préférable d'utiliser un seul filtre actif pour toutes les charges car, dans ce cas, le coût du filtrage est moindre.

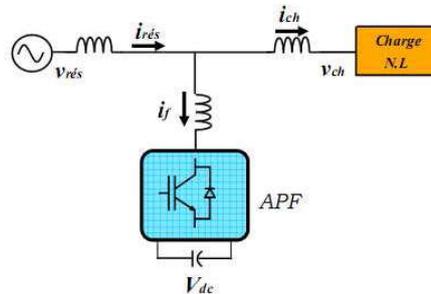


Figure I.7 Filtre actif parallèle.

Cependant, lorsque la puissance des charges polluantes est élevée, la solution d'un filtre actif par charge s'avère nécessaire. Cette dernière méthode est bien sûr plus coûteuse mais elle possède l'avantage d'éviter que la stabilité des harmoniques vienne perturber le réseau dans le cas où un filtre actif est défectueux [12].

I.2.5.3 Filtre combiné parallèle-série (UPQC)

L'UPQC (fig.1.8) est principalement la combinaison de deux filtres actifs série et parallèle qui partagent la même capacité sur le bus continu. Ce type de dispositif est capable à la fois de régler la tension du réseau et d'éliminer les harmoniques. Il est considéré comme le plus

puissant dispositif et il est capable d'effectuer efficacement toutes les tâches de conditionnement de puissance [9] [10] [1]. Cependant, son prix important et la complexité des commandes des nombreux interrupteurs limitent son utilisation à des applications critiques comme l'équipement médical.

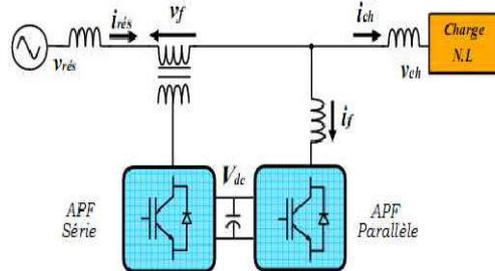


Figure I.8 Filtre combiné parallèle-série (UPQC).

I.2.5.4 Filtre actif série avec un filtre passif parallèle

Une version moins chère de la structure précédente est illustrée par la figure 1.9 où un filtre actif série et un filtre parallèle passif sont exploités. Principalement, le filtre série régule la tension au point PCC tandis que le filtre parallèle est réglé sur quelques harmoniques de courant (rangs inférieurs) qui doivent être supprimés. Cette topologie a la possibilité de réduire les harmoniques de tension et de courant à un prix raisonnable [1].

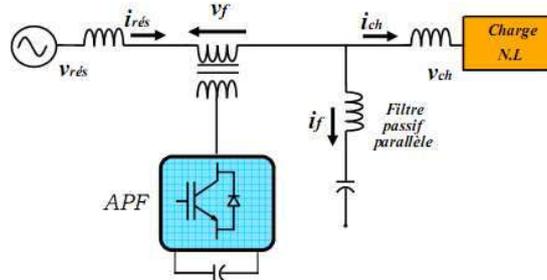


Figure I.9 Filtre actif série avec un filtre passif parallèle.

I.2.5.5 Filtre actif hybride

Connecté avec ou sans transformateurs au réseau, le filtre actif hybride (Fig. 1.10) est constitué d'un filtre passif connecté directement en série avec le filtre actif, ce qui entraîne une diminution de la tension du bus continu comparativement à celle d'un filtre actif pur et une réduction du dimensionnement du filtre hybride. En plus, le filtre passif évite les oscillations dues à la commutation (HF) car il présente une haute impédance à cette fréquence [3][1].

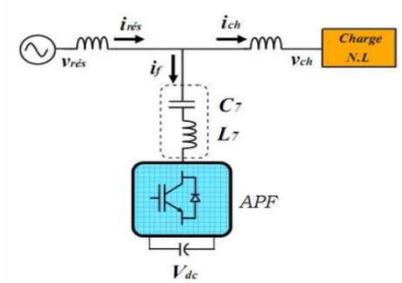


Figure 1.10 Filtre actif hybride.

I.3 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons illustré, le phénomène des harmoniques, leurs caractéristiques, leurs sources et leurs conséquences. Par conséquent, un domaine de recherche a émergé pour les scientifiques afin d'élaborer des solutions de compensation pour cette pollution harmonique. Plusieurs solutions traditionnelles et modernes de dépollution ont été présentées. Nous avons montré que la solution classique à base de filtres passifs est souvent pénalisée en termes d'encombrements et de résonance. En revanche, la solution des filtres actifs parallèles et séries avec leurs combinaisons se présente comme la meilleure jusqu'à ce jour pour tous types de perturbations susceptibles d'apparaître dans le réseau électrique.

CHAPITRE II

Identification des courants harmoniques

Introduction :

La stratégie de commande se base sur la détection des courants perturbateurs dans le domaine temporel. Trois possibilités d'identification des courants perturbateurs ont déjà été proposées [14].

- identification à partir de la détection du courant de la charge polluante.
- identification à partir de la détection du courant de la source.
- identification à partir de la détection de la tension de la source.

La première méthode est la plus appropriée au filtre actif parallèle installé par le consommateur pour compenser les courants perturbateurs causés par ses charges polluantes. C'est pourquoi cette méthode de détection sera employée dans ce travail.

II.1 Identification des courants harmoniques de référence

II.1.1 Généralités sur les méthodes d'identification

Les différentes méthodes d'identification de courant perturbateur peuvent être regroupées en deux familles d'approche.

La première utilise la transformée de Fourier rapide dans le domaine fréquentiel, pour extraire les harmoniques du courant. Cette méthode est bien adaptée aux charges où le contenu harmonique varie lentement. Elle donne aussi l'avantage de sélectionner les harmoniques individuellement. Il est à noter que cette méthode nécessite une grande puissance de calcul afin de réaliser, en temps réel, toutes les transformations nécessaires pour extraire les harmoniques.

La deuxième famille est basée sur le calcul des puissances instantanées dans le domaine temporel. Certaines de ces méthodes se basent sur le calcul des puissances harmoniques de la charge non linéaire. D'autres peuvent être utilisées pour compenser à la fois les courants

harmoniques et la puissance réactive, en se basant sur la soustraction de la partie fondamentale active du courant total.

Récemment, des nouvelles méthodes d'identification ont été présentées pour donner le choix de compenser un, plusieurs ou voire même tous les types de courants perturbateurs. En effet, en se basant sur la régulation de la tension continue et sur celles du réseau électrique aux points de raccordement, nous pouvons compenser à la fois tous les courants perturbateurs, tout en offrant la possibilité de réguler la tension de la charge. Cette méthode, qui ne peut être implantée que numériquement, ne garantit pas une compensation parfaite de la puissance réactive, de même que la régulation de tension n'assure pas toujours une bonne qualité à la tension de la charge [14].

Une autre méthode, appelée la méthode de détection synchrone et repose sur la transformée de Park, a été proposée [15]. Cette méthode se base essentiellement sur le calcul de la pulsation fondamentale obtenue par une PLL. Cela exige une précision parfaite du calcul e cette pulsation afin de ne pas avoir des courants identifiés erronés.

Enfin, la méthode d'identification la plus utilisée est celle appelée méthode des puissances réelles et imaginaires instantanées [16]. Cette méthode offre l'avantage de choisir la perturbation à compenser avec précision, rapidité et facilité d'implantation. Pour toutes ces raisons nous avons retenu cette méthode d'identification pour le reste de notre étude. En effet, afin de pouvoir compenser les courants harmoniques, les courants déséquilibrés et la puissance réactive conjointement ou individuellement, cette méthode nous a semblé la mieux appropriée.

II.1.2 Théorie généralisée de l'énergie électrique

La théorie classique de l'énergie ne tient compte que des systèmes électriques basés sur des signaux sinusoïdaux et équilibrés. Cependant les signaux électriques présentent sur les réseaux (surtout les courants) sont souvent perturbés et ils ne sont pas parfaitement sinusoïdaux ni équilibrés. Dans le domaine de la qualité de l'énergie, il est indispensable de bien connaître tous les échanges d'énergie entre le réseau et les différentes charges de façon à pouvoir compenser les éventuelles perturbations.

L'analyse des signaux non sinusoïdaux et déséquilibrés est basée sur deux concepts mathématiques qui sont les harmoniques et les composantes symétriques, qui permettent la décomposition des signaux électriques perturbés (non sinusoïdaux et déséquilibrés) en composantes idéales et perturbations.

Le concept d'harmonique a été introduit au début du XIX^{ème} siècle par JOSEPH FOURIER, en démontant que tout signal périodique non sinusoïdal peut être représenté par une somme ou série des sinusoïdes de fréquence discrète. La composante zéro de la série de FOURIER est dite composante continue, tandis que la première composante est appelée composante fondamentale.

Dans le cas des systèmes raccordés au réseau, celle-ci est une composante à la fréquence nominale du réseau (50Hz). Le reste des composantes de la série sont appelés harmoniques et sont multiples de la fréquence fondamentale.

L'outil principal pour étudier les déséquilibres est les composantes symétriques. Cette théorie a été développée par CHARLES L. FORTESCUE à la fin de 1913 [17]. La principale propriété des composantes symétriques réside dans le fait que n'importe quel système triphasé déséquilibré peut être décomposé en trois composantes équilibrées : la composante directe, la composante inverse, la composante homopolaire (figure 2.1). Cette décomposition est applicable à n'importe quel système triphasé. Dans le cas particulier du réseau électrique, on l'applique à la tension et au courant.

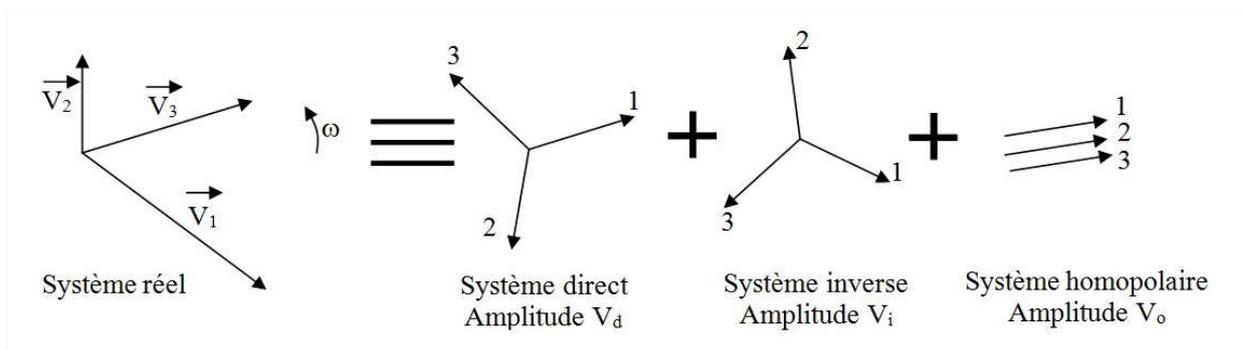


Figure II.1 Décomposition en composantes symétriques.

Ainsi, ces deux concepts ont permis l'élargissement de la théorie énergétique classique basée en principe sur des signaux parfaitement sinusoïdaux et équilibrés. Les définitions de puissance et d'énergie pour ce type signaux sont universellement acceptées. Dans un

pour un système électrique quelconque, on peut définir les grandeurs de puissance suivantes : la puissance instantanée($p(t)$), la puissance active (P) et la puissance apparente(S) :

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) \quad (2.1)$$

$$P = -\int_{-\infty}^{+\infty} p(t) dt \quad (2.2)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.3)$$

Où

$$P = -\int_{-\infty}^{+\infty} p(t) dt \quad \text{Et} \quad Q = -\int_{-\infty}^{+\infty} q(t) dt \quad (2.4)$$

II.1.3 Théorie énergétique sous distorsion harmonique et déséquilibres

La théorie énergétique généralisée, introduite par Akagi [16] tient compte explicitement non seulement de l'effet de la distorsion mais aussi des déséquilibres. La figure 2.2 montre la représentation spatiale d'un système harmonique déséquilibré quelconque, avec ses composantes tournantes (directe et inverse) et fixe (homopolaire).

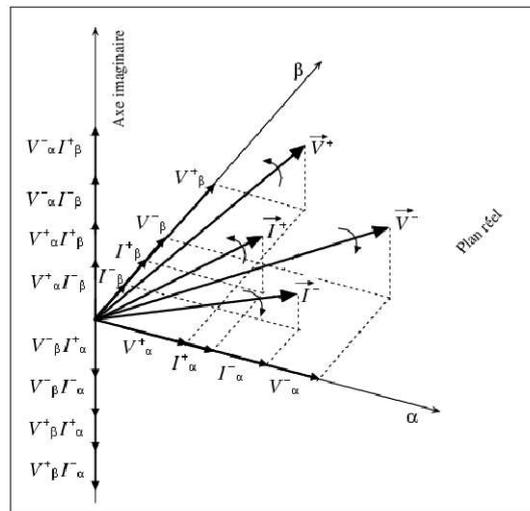


Figure II.2 Représentation spatiale d'une composante harmonique déséquilibrée.

D'après cette théorie, on a en général 3 types de puissances dans un système :

- la puissance réelle(P), qui est la composante réelle de la puissance transmise par les composantes tournantes (directe et inverse) de tous les harmonique (y compris le fondamental).

- La puissance imaginaire(), qui est la composante imaginaire de la puissance transmise par les composantes tournantes (directe et inverse) de tous les harmoniques (y compris le fondamental).
- La puissance homopolaire (p₀), qui est la puissance transmise par les composantes homopolaires.

Ces puissances contiennent une partie continue et une partie oscillatoire, résultats du produit entre harmonique et séquences de diverses caractéristiques. Dans le cas de la puissance réelle instantanée sa partie continue () est obtenue à partir de la partie réelle du produit entre harmoniques de même fréquence et de même séquence :

$$= \sum 3 \cdot \cdot \cdot \cos(\emptyset - \emptyset) + \sum 3 \cdot \cdot \cdot \cos(\emptyset - \emptyset) \quad (2.5)$$

La partie oscillatoire de la puissance réelle correspond à la partie réelle du produit entre harmoniques de nature différente :

- Même fréquence et séquence différente : la pulsation résultante et le double de celle des harmoniques.
- Même séquence et fréquence différente : la pulsation résultante est égale à la différence de pulsation entre deux harmoniques.
- Séquence et fréquence différentes : la pulsation résultante est égale à la somme de deux pulsations.

$$= \begin{cases} \sum \sum 3 \cdot \cdot \cdot \cos (-) + \emptyset - \emptyset \\ + \sum \sum 3 \cdot \cdot \cdot (-) + \emptyset - \emptyset \\ + \sum \sum -3 \cdot \cdot \cdot (-) + \emptyset - \emptyset \\ + \sum \sum -3 \cdot \cdot \cdot (-) + \emptyset - \emptyset \end{cases} \quad (2.6)$$

La même analyse est applicable au cas de la puissance imaginaire (q). Ainsi sa partie continue () sera :

$$= \sum - \cdot \cdot \cdot \sin(\emptyset - \emptyset) + \sum 3 \cdot \cdot \cdot \cos(\emptyset - \emptyset) \quad (2.7)$$

Et la partie oscillatoire () aura comme expression :

$$= \begin{cases} \sum \sum -3 \cdot \cdot \cdot \sin (-) + \emptyset - \emptyset \\ + \sum \sum 3 \cdot \cdot \cdot \sin (-) + \emptyset - \emptyset \\ + \sum \sum 3 \cdot \cdot \cdot \sin (-) + \emptyset - \emptyset \\ + \sum \sum -3 \cdot \cdot \cdot \sin (-) + \emptyset - \emptyset \end{cases} \quad (2.8)$$

Le cas pour la puissance homopolaire est différent car il n'y pas de différence de séquence entre les harmoniques, mais tout simplement une différence de fréquence. Donc la partie continue sera (p_0) :

$$= \sum 3 \cdot \cdot \cdot \cos(\emptyset - \emptyset) \quad (2.9)$$

Et la partie oscillatoire () :

$$= \begin{cases} \sum \sum 3 \cdot \cdot \cdot \cos (-) + \emptyset - \emptyset \\ + \sum \sum -3 \cdot \cdot \cdot (+) + \emptyset + \emptyset \end{cases} \quad (2.10)$$

Les expressions explicitées ci-dessus ont, de plus de leur signification mathématique, une signification physique. Ainsi, on peut démontrer que la puissance triphasée instantanée (p_3) est la somme des puissances réelle et homopolaire :

$$= \cdot + \cdot + \cdot = + \quad (2.11)$$

Cette puissance représente le flux total instantané d'énergie échangée entre la source et la charge. Sa valeur moyenne () correspond à la puissance active (P) transitant entre les deux sous-systèmes, et la partie alternative () représente les variations de la puissance instantanée par rapport à sa moyenne. On constate que la puissance active consommée dans un système n'est pas seulement portée par le fondamental, mais aussi par l'échange harmonique (s'il y a coïncidence de fréquence et de séquence) auquel s'ajoute un éventuel échange homopolaire.

La puissance imaginaire (q) ne contribue pas au flux de puissance instantanée entre la source et la charge, mais il s'agit plutôt d'un échange entre les différentes phases du système [18]. Le meilleur exemple physique de ce phénomène est le cas d'un condensateur triphasé équilibré ou l'énergie totale stocké dans le système est constante (+ + =), mais l'énergie stockée dans le chaque condensateur varie dans le temps (avec la

variation de la valeur instantanée de la tension). On considère donc que cette énergie s'écoule entre les différentes phases sans échange avec l'extérieur.

II.2 La méthode des puissances instantanées

II.2.1 Généralités sur les puissances 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 2.12.

$$= \overline{} + \overline{} + \overline{} \quad (2.12)$$

Cette méthode exploite la transformation α - β pour obtenir les puissances réelles et imaginaires. Notons par (V_α, V_β) et (I_α, I_β) les composantes orthogonales du repère α - β associées respectivement aux tensions de raccordement du filtre actif parallèle (V_s) et aux courants absorbés par les charges polluantes (I_s). La transformation α - β -0 triphasée permet d'écrire, la relation des tensions suivante :

$$= \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \sqrt{3} & \sqrt{3} & \sqrt{3} \\ 1 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Et la relation des courants ci-dessous :

$$= \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \sqrt{3} & \sqrt{3} & \sqrt{3} \\ 1 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

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

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

$$\begin{aligned} P(t) &= \overline{v(t)} \cdot i(t) + \overline{v(t)} \cdot i(t) + \overline{v(t)} \cdot i(t) = P(t) + Q(t) + D(t) \\ Q(t) &= \overline{v(t)} \cdot i(t) + \overline{v(t)} \cdot i(t) \\ D(t) &= \overline{v(t)} \cdot i(t) \end{aligned} \quad (2.15)$$

avec $p(t)$ la puissance réelle instantanée, $p_0(t)$ la puissance homopolaire instantanée.

L'avantage de la transformation α - β -0 est la séparation des séquences homopolaire du système triphasé de courant ou de tension. De la même manière, la puissance imaginaire instantanée peut s'écrire sous la forme suivante :

$$q(t) = -\sqrt{3} [(v_{\alpha} i_{\beta}) + (v_{\beta} i_{\alpha}) + (v_0 i_0)] = q_{\alpha\beta} + q_0 \quad (2.16)$$

La puissance q a une signification plus large que la puissance réactive habituelle. En effet, contrairement à la puissance réactive, qui ne considère que la fréquence fondamentale, la puissance imaginaire prend en compte toutes les composantes harmoniques de courant et de tension. C'est pourquoi on lui donne une autre dénomination (puissance imaginaire) avec comme unité le *voltampère imaginaire (VAI)*. A partir des relations (2.15) et (2.16), nous pouvons établir la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dots \\ \dots \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

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

$$\begin{aligned} p &= p_c + p_a \\ q &= q_c + q_a \end{aligned} \quad (2.18)$$

Avec :

- p_c une puissance continue liée à la composante fondamentale active du courant et de la tension,
- q_c une puissance continue liée à la composante fondamentale réactive du courant et de la tension,
- et p_a et q_a des puissances alternatives liées à la somme des composantes perturbatrices du courant et de la tension.

Afin d'isoler les puissances actives et réactives conventionnelles, il faut connaître avec précision les fréquences des pulsations des puissances instantanées formées à partir de la

relation (2.18). Pour cela, nous baserons notre étude sur l'analyse fréquentielle des puissances instantanées données dans différents cas de courant et tension.

Il est à noter qu'on considère désormais que le réseau étudié est composé de trois fils ce qui empêche les composantes homopolaires d'y circuler.

II.2.2 Séparation des puissances perturbatrices

Après avoir identifié les pulsations des puissances instantanées, le filtre de puissance chargé d'isoler les puissances active 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 2.3.

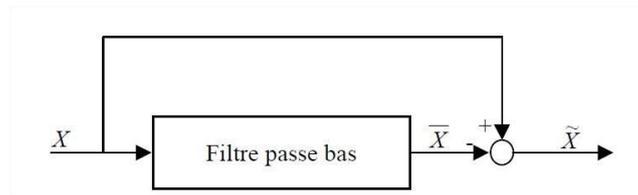


Figure II.3 Schéma représentant le principe de séparation des puissances.

L'ordre de ce filtre passe-bas définit la dynamique et l'efficacité de la méthode d'identification. Des filtres de puissance du quatrième ou cinquième ordre ont été proposés [AK-86]. Dans notre étude, nous avons choisi un filtre passe-bas du deuxième ordre en vue de simplifier l'approche d'implantation numérique de ce dernier. En effet, un ordre plus élevé entraînerait des temps de calcul plus longs ce qui peut être préjudiciable dans notre étude. La relation suivante donne l'expression générale d'un filtre passe-bas du deuxième ordre :

$$\text{-----} \quad (2.19)$$

La fréquence de coupure, $\omega_c = \frac{1}{T_c}$ est choisie pour que le filtre de puissance puisse bloquer toute composante perturbatrice des puissances instantanées \tilde{X} . Elle doit aussi permettre aussi le passage des composantes continues représentant les puissances active et réactive à la fréquence fondamentale (ω). Cette fréquence est donc choisie selon le type de la charge, soit :

- 60 Hz pour un courant de charge équilibré avec un temps de réponse du filtre de 20 ms,
- 20 Hz pour un courant de charge déséquilibré avec un temps de réponse du filtre de 60 ms.

II.2.3 Calcul des courants perturbateurs

En inversant la relation (2.17), nous pouvons recalculer les courants dans le repère α - β comme le montre l'équation (2.20) :

$$= \frac{\dots}{\dots} \quad (2.20)$$

En considérant les équations (2.18) et (2.20), nous pouvons séparer le courant dans le repère (α - β) en trois composantes, active et réactive à la fréquence fondamentale et les harmoniques. Ceci conduit à :

$$= \underbrace{\frac{\dots}{\Delta}}_{\text{courant actif}} + \underbrace{\frac{\dots}{\Delta}}_{\text{courant réactif}} + \underbrace{\frac{\dots}{\Delta}}_{\text{courant harmoniques}} \quad (2.21)$$

Avec $\Delta = \dots + \dots$ supposé constant dans l'hypothèse d'une tension sinusoïdale équilibrée du réseau électrique.

Cette expression montre donc que l'identification des différentes composantes du courant dans le repère (α - β) revient à séparer des termes continus des puissances réelle et imaginaire instantanées. Les courants perturbateurs triphasés qui représentent les courants identifiés, dits courants de référence (I_{ref}), sont calculés à partir de la transformation α - β inverse (transformation C_{2-3}) donnée par la relation (2.22) :

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \dots & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \dots & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Avec $I_{p\alpha}$, $I_{p\beta}$ courants perturbateurs calculés dans le repère (α - β) à partir des courants réactifs et harmoniques de la relation (2.21).

II.2.4 Algorithme d'identification

Finalement, l'algorithme d'identification que nous avons défini peut être représenté par le synopsis de la Figure 2.4. Par souci de simplification, nous décrivons les matrices des relations (II.11 et II.12), après avoir enlevé les composantes homopolaires, et (II.20) respectivement par les blocs notés C32 et C23.

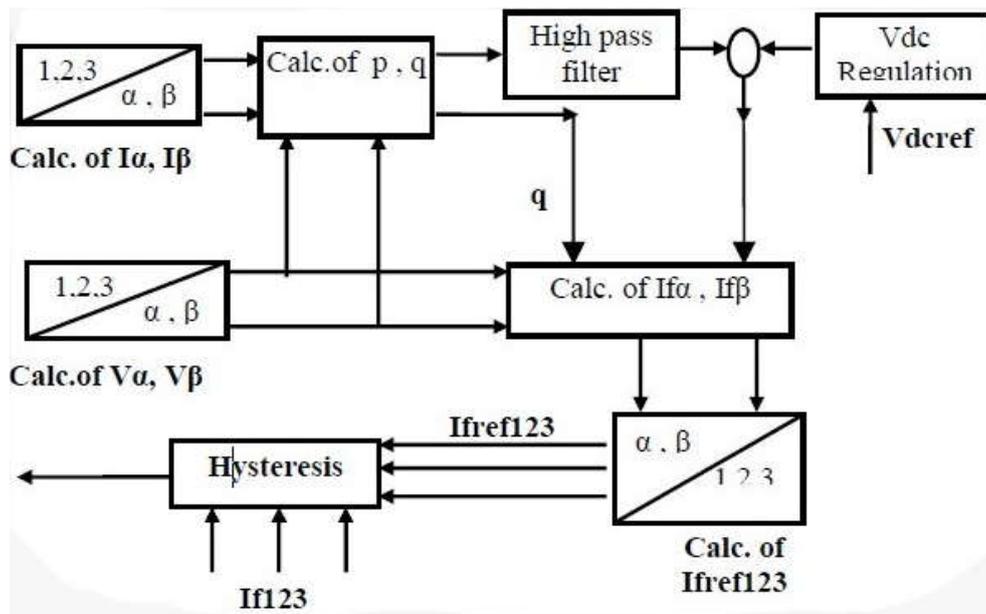


Figure II. 4 Schéma de principe de la méthode d'identification.

II.3 La boucle de synchronisation PLL

La boucle à verrouillage de phase PLL (Phase Locked Loop) est un élément très utilisé en électronique de puissance. Elle est utilisée pour extraire la phase du composant fondamental directe de tension. Son fonctionnement se base sur la transformation de Park dans le repère (d,q). Les tensions $V_{s1,2,3}$ subissent dans un premier temps la transformation $(\alpha-\beta)$. Les tensions ainsi obtenues sont exprimées dans le repère de Park par une rotation. L'angle de cette rotation issu de l'intégration de l'estimation de la pulsation déterminée par le régulateur, représente l'angle de la composante directe de tension. Nous souhaitons que l'angle de rotation estimé soit égal à l'angle réel de la tension directe. Cela peut être réalisé en choisissant la valeur de V_{dref} qui satisfait cette condition. La PLL sera verrouillée lorsque l'angle estimé sera égal à celui de la tension directe.

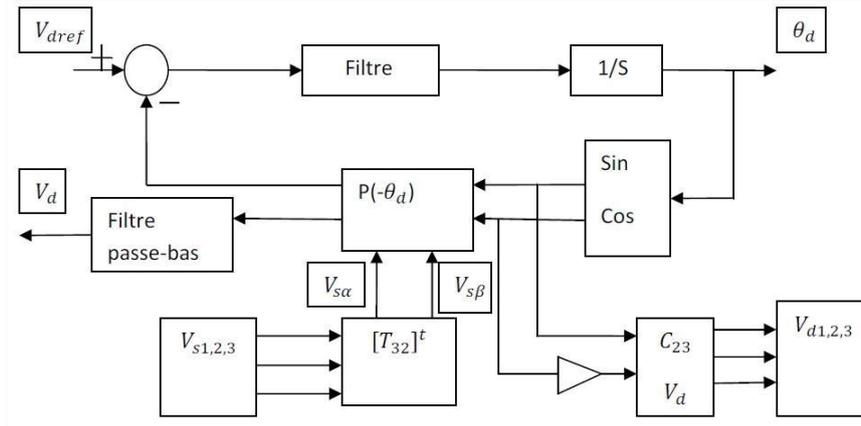


Figure II. 5 Méthode d'identification basée sur la PLL.

Les tensions simples mesurées au point de raccordement dans le repère α - β sont données par l'équation suivante :

$$\begin{pmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 2 & 2 \\ 0 & \sqrt{3} \\ 2 & -\sqrt{3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{s1,2,3} \end{pmatrix} \quad (2.23)$$

Puis en appliquant la transformée de Park (d, q) avec un angle de rotation θ donnée par :

$$= \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (2.24)$$

Nous obtenons alors la relation suivante :

$$= \sqrt{3} \begin{pmatrix} \sin \theta - \theta \\ -\cos \theta - \theta \end{pmatrix} \approx \sqrt{3} \begin{pmatrix} \sin(\theta) \\ -\cos(\theta) \end{pmatrix} \quad (2.25)$$

Où V_m est la valeur efficace la tension du réseau.

La PLL sera verrouillé lorsque l'angle estimé $\hat{\theta}$ sera égal à l'angle θ du réseau, ce qui implique que $\hat{\theta} - \theta = 0$, nous pouvons ainsi écrire :

$$\begin{pmatrix} \hat{\theta} - \theta \\ \hat{\theta} - \theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -\sqrt{3} \end{pmatrix} \quad (2.26)$$

II.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vu, en premier lieu que La théorie classique de l'énergie ne tient compte que des systèmes électriques basés sur des signaux sinusoïdaux et équilibrés par contre les signaux électriques présentent sur les réseaux sont souvent perturbés et ils ne sont pas parfaitement sinusoïdaux ni équilibrés. Ensuite, nous avons présenté les deux concepts mathématiques qui traitent les réseaux non sinusoïdaux et déséquilibrés qui sont les harmoniques et les composantes symétriques. Ensuite, nous avons présenté Le principe d'identification des courants perturbés par la méthode des puissances instantanées. Enfin, nous présentons la boucle de verrouillage de phase PLL qui a pour rôle de synchroniser et de filtrer les tensions de source pour les utiliser dans la construction des références.

CHAPITRE III

Modélisation et simulation

Introduction

Le filtre actif a l'avantage d'être capable de compenser à la fois l'énergie réactive et réduire les harmoniques, et peut surmonter les inconvénients du filtre passif, comme la résonance.

L'APF présente l'avantage de s'adapter en temps réel aux variations de la charge. Il est aussi auto-adaptable.

Dans ce chapitre, nous présentons l'APF shunt (ou parallèle) à base d'onduleur de tension, son mode de fonctionnement, et ses paramètres.

III.1 Structure générale du Filtre actif parallèle

III.1.1 Topologie générale [19]

La figure 3.1 présente la structure générale du filtre actif parallèle, laquelle se présente sous la forme de deux blocs : la partie puissance et la partie contrôle commande.

❖ **La partie puissance est constituée :**

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

❖ **La partie contrôle-commande quant à elle est constituée :**

- De l'identification des courants perturbés,
- Du système à base de PLL,
- De la régulation de la tension continue appliquée aux éléments de stockage d'énergie,
- De la régulation du courant injecté sur le réseau à partir de l'onduleur de tension,
- De la commande de l'onduleur de tension.

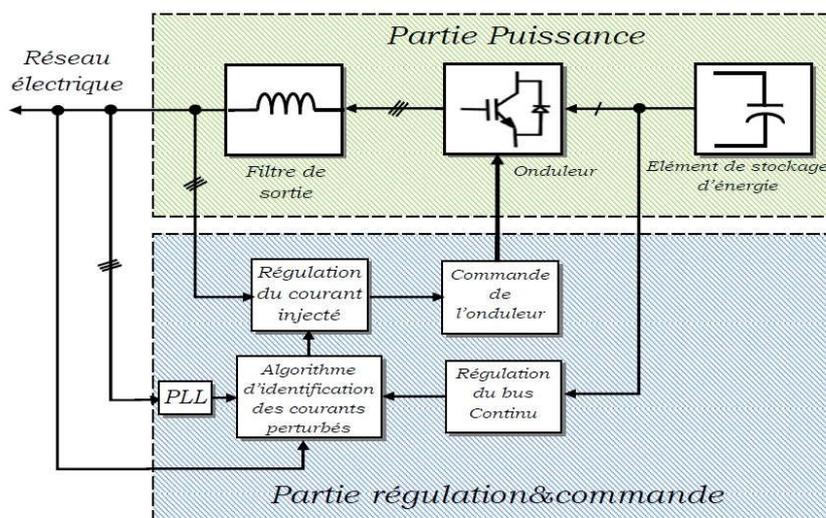


Figure III.1 Structure générale du FAP pur à structure tension.

III.1.2 Etude de la partie puissance

III.1.2.1 Onduleur de tension

III.1.2.1.1 Structure générale

La figure 3. 2 présente un onduleur triphasé à structure de tension. Il se compose de trois bras à interrupteurs réversibles en courant, commendes 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, R) employé pour connecter l'onduleur de tension au réseau électrique.

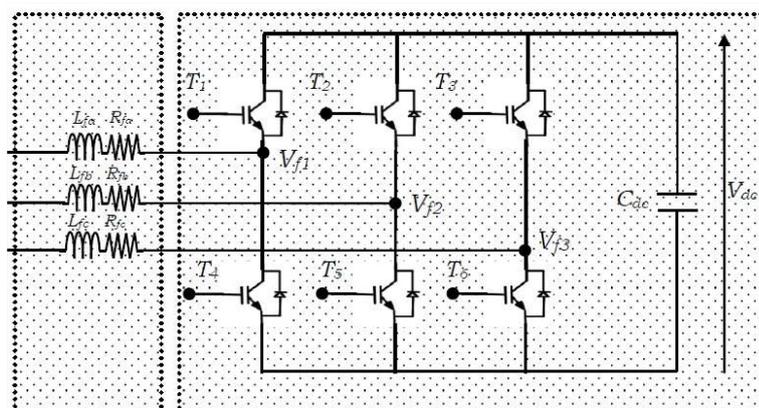


Figure III.2 Onduleur de tension triphasé à structure tension.

Cette structure du filtre actif parallèle ne permet pas la fermeture simultanée des semi-conducteurs d'un même bras sous peine de court-circuiter le condensateur de stockage. Par contre, ils peuvent être tous les deux ouverts (pendant un temps mort). La continuité des courants est alors assurée par la mise en conduction d'un des diodes d'un même bras.

En pratique, nous commandons les deux semi-conducteurs d'un même bras de façon complémentaire : la conduction de l'un entraîne le blocage de l'autre. En réalité, le mode, où les semi-conducteurs d'un même bras sont tous les deux fermés, n'existe que durant les commutations [20].

Afin d'éviter un court-circuit à cause du délai de blocage des interrupteurs, il faut insérer sur un même bras, un temps d'attente, également appelé temps mort, entre la commande de blocage d'un interrupteur et la commande d'amorçage de l'autre [21]. Avec l'hypothèse des commutations instantanées, ce mode de fonctionnement ne sera pas pris en compte et par conséquent, aucun risque de court-circuit le condensateur n'est à craindre.

III.1.2.1.2 Tension fournie par l'onduleur

L'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur de la Figure 3.2 dépendent de l'état des signaux de commande (S_1, S_2, S_3), comme défini ci-dessous :

$$\begin{aligned}
 S_1 &= \begin{matrix} 1 & 1 & \text{é} & 4 & \text{é} \\ 0 & 1 & & 4 & \end{matrix} \\
 S_2 &= \begin{matrix} 1 & 2 & \text{é} & 5 & \text{é} \\ 0 & 2 & & 5 & \end{matrix} \\
 S_3 &= \begin{matrix} 1 & 3 & \text{é} & 6 & \text{é} \\ 0 & 3 & & 6 & \end{matrix}
 \end{aligned}$$

Ainsi, à partir des états des interrupteurs présentés par les variables S_1, S_2 et S_3 , on pourra examiner huit configurations possible de l'onduleur de, comme c'est récapitulé dans la figure 3.3 Chaque configuration est déterminée par l'état des interrupteurs du commutateur du haut, et ceux du commutateur du bas étant à l'état opposé par principe de complémentarité.

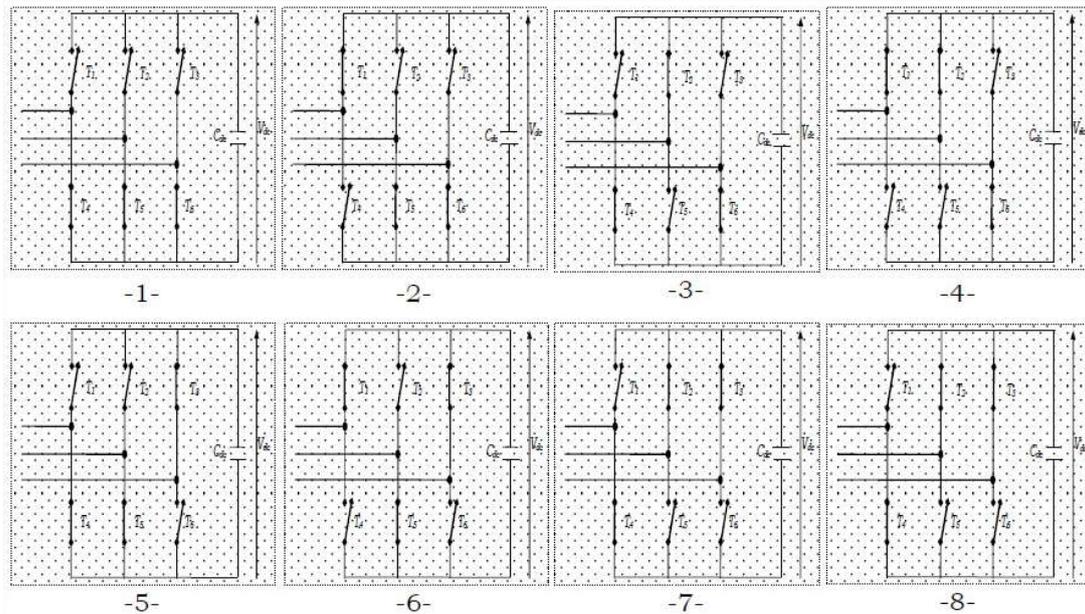


Figure III.3 Les huit configurations de l'onduleur de tension.

On peut désigner ainsi une combinaison binaire sachant que l'état 1 correspond à un interrupteur fermé et l'état 0 à un interrupteur ouvert, par exemple : la combinaison 010 correspond à la configuration 3 de la figure 3.3.

N° du cas	S ₃	S ₂	S ₁	V _{f3}	V _{f2}	V _{f1}
0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	1	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$
2	0	1	0	$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$
3	0	1	1	$-2V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$
4	1	0	0	$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$
5	1	0	1	$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$
6	1	1	0	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$
7	1	1	1	0	0	0

Tableau III.1 Tensions générées par l'onduleur.

Par conséquent, on peut exprimer huit cas possible de tensions de sortie du filtre actif V_{fi} ($i=1,2$ ou 3) référencées par rapport au point neutre de la source, comme c'est indiqué dans le tableau 3.1. [22]

III.1.2.1.3 Représentation vectorielle

Dans le plan biphasé ($\alpha - \beta$), 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 3.4.

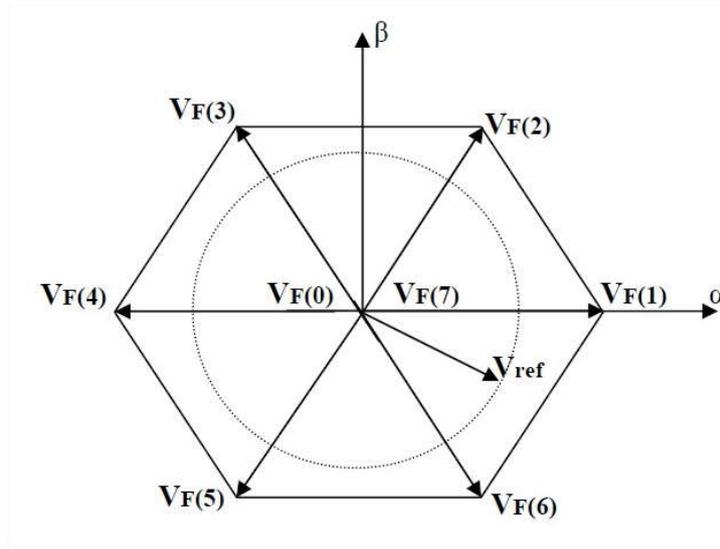


Figure III.4 Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur.

Où V_f 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 Fig.3.3 [22,15].

III.1.2.2 Système de stockage d'énergie

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 Q 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 [1].

En régime permanent, la puissance réelle générée par la source est égale à celle imposée par la charge ajoutée à une petite quantité de puissance pour compenser les pertes dans le SAPF. Donc, la tension du bus continu peut être maintenue constante à sa référence.

❖ Estimation de la valeur de la capacité du condensateur de stockage (V_{dc}) :

La détermination de la valeur de la capacité du condensateur de stockage d'énergie peut C_{dc} être estimée en se basant sur le principe de l'échange instantané de l'énergie nécessaire pour subvenir à une augmentation ou une diminution d'un échelon de puissance imposé par la charge (régime transitoire), en appliquant le concept de l'équilibre d'énergie [1].

A partir de la puissance réelle maximale de la charge P_{max} la valeur de la capacité est donnée par :

$$= \frac{\dot{\cdot} \cdot \cdot}{\cdot (\cdot)} \quad \text{Ou} \quad = \quad (3.1)$$

La tension V_{dcmin} doit être choisie judicieusement pour assurer la contrôlabilité du courant en tous points de fonctionnement.

III.1.2.3 Filtre de sortie

Afin de connecter l'onduleur de tension en parallèle avec le réseau, il est nécessaire de disposer entre les deux un filtre de raccordement ou dit de sortie de nature inductive. La fonction de ce filtre permet d'une part de convertir le compensateur en un dipôle de courant du point de vue du réseau, et d'autre part à limiter la dynamique du courant, de façon à le rendre plus facile à contrôler [1].

La figure 3.5 représente la topologie filtre du premier ordre L_f . Supposons R la résistance série d'inductance.

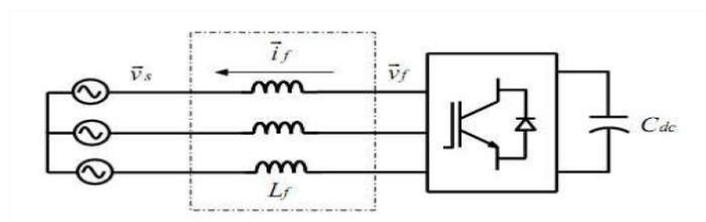


Figure III. 5 Connexion de l'onduleur à la source via un filtre de couplage.

Le schéma équivalent monophasé du système du point de vue des grandeurs fondamentales sera celui de la figure 3.6.

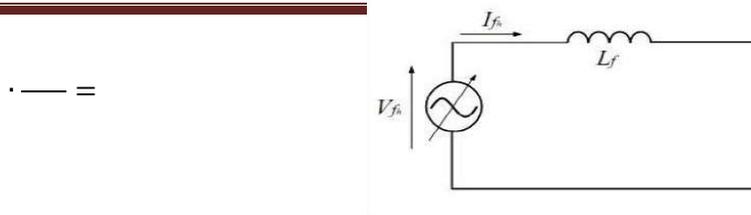


Figure III.6 Schéma équivalent harmonique d'un SAPF raccordé à un réseau parfait.

❖ Estimation de L_f :

Dans cette méthode, la valeur de l'inductance est limitée par un maximum L_{fmax} et un minimum L_{fmin} [1]. Pour maintenir l'ondulation du courant à un niveau réduit, la valeur d'inductance utilisée ne doit pas être inférieure à L_{fmin} . Une possibilité d'estimation de cette valeur minimale à partir du courant maximal I_{fmax} que le SAPF doit fournir pour compenser toute la charge inductive, est la relation suivante :

$$\Delta V = \Delta V / \omega L_f \quad (3.2)$$

Tel que ΔV : la différence de potentielle entre la tension de source et la tension de l'onduleur.

$$\Delta V = \left(\frac{V_m}{2} + 0.5 \right) \cdot \omega L_f \cdot I_{fmax} \quad (3.3)$$

Tel que f_m : fréquence de la porteuse d'un commande MLI

A: Amplitude de signal

$$\Delta V = \left(\frac{V_m}{2} + 0.5 \right) \cdot \omega L_f \cdot I_{fmax} < \Delta V \quad (3.4)$$

III.1.3 Etude de la partie contrôle commande

III.1.3.1 Identification des courants perturbés

L'algorithme d'identification que nous avons défini est représenté par le synopsis de la Figure 2.4. Par souci de simplification, nous décrirons les matrices des relations (II.11 et II.12), après avoir enlevé les composantes homopolaires, et (II.20) respectivement par les blocs notés C32 et C23.[4]

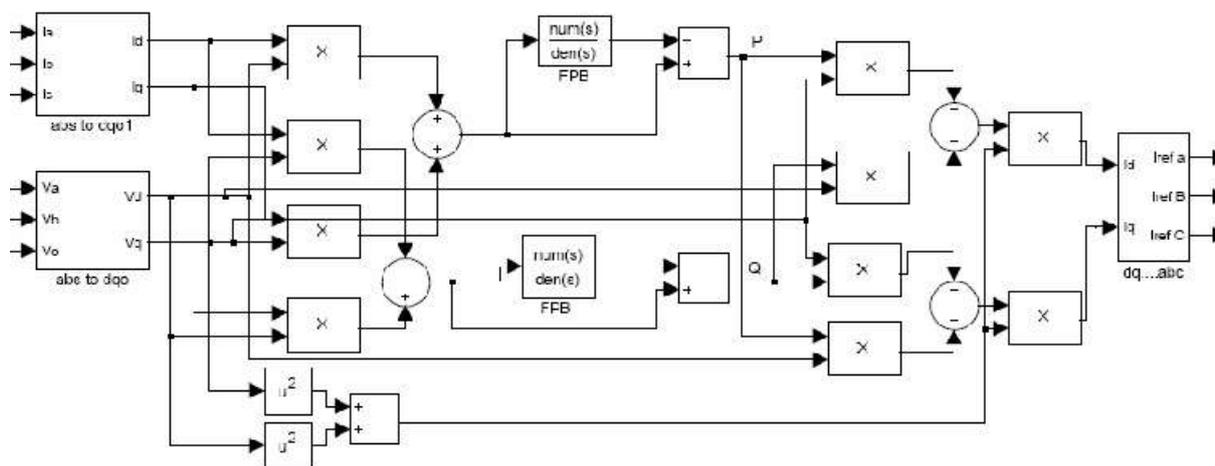


Figure III.7 Schéma de principe de la méthode d'identification.

III.1.3.2 La régulation de la tension continue

La tension moyenne V_{dc} aux bornes du condensateur doit être maintenue à une valeur fixe. La principale cause susceptible de la modifier est les pertes dans le filtre actif (interrupteurs et filtre de sortie). La régulation de la tension moyenne aux bornes du condensateur de stockage d'énergie doit se faire par l'adjonction des courants fondamentaux actifs dans les courants de référence. La sortie du régulateur P_c s'ajoute, à un signe près, à la puissance active perturbatrice et donne lieu à un courant fondamental actif corrigeant ainsi V_{dc} . La puissance P_c représente la puissance active nécessaire pour maintenir la tension V_{dc} égale à la valeur de la tension de référence souhaitée ($V_{dc\text{ref}}$). Le régulateur employé ici est un régulateur proportionnel simple (K_c).

En négligeant les pertes de commutations dans l'onduleur ainsi que l'énergie stockée dans l'inductance du filtre de sortie, la relation entre la puissance absorbée par le filtre actif et la tension aux bornes du condensateur peut s'écrire sous la forme suivante :

$$P = \frac{3}{2} V_{dc} I_d \quad (3.5)$$

Notons que la relation (IV-11) est non linéaire. Pour des faibles variations de la tension V_{dc} autour de sa référence $V_{dc\text{ref}}$, elle peut être linéarisée à travers les relations suivantes :

$$P = \frac{3}{2} V_{dc\text{ref}} I_d - (\quad) \quad (3.6)$$

$$\Rightarrow (\quad) = \frac{ \quad }{ \quad } \quad (3.7)$$

A partir de la relation (IV-12), et en prenant en compte le régulateur proportionnel (K_c), la boucle de régulation de la tension continue peut être représentée par le schéma de la figure (IV-2). Le choix du paramètre K_c aura pour objectif d'obtenir un temps de réponse minimal [16;19;22].

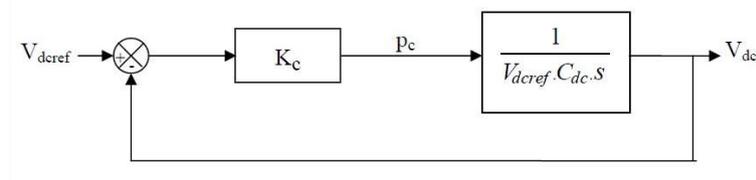


Figure III.8 Boucle de régulation de la tension continue.

III.1.3.3 La commande de l'onduleur

- **Commande par hystérésis**

La commande par hystérésis, appelée aussi commande en tout ou rien, est une commande non linéaire qui utilise l'erreur existant entre le courant de référence (I_{fref}) et le courant produit par l'onduleur (I_f). 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, comme le montre la Figure 3.23, est le principal atout de cette technique. En revanche, les commutations évoluant librement à l'intérieur de la bande d'hystérésis. On ne peut pas maîtriser correctement le spectre haut fréquence dû aux fréquences de commutation [12].

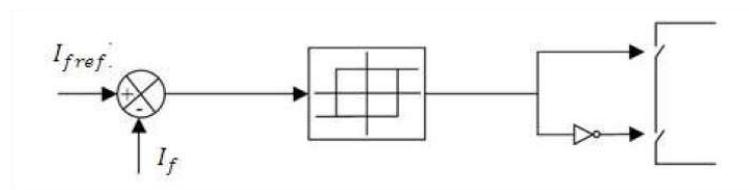


Figure III.9 Commande par hystérésis.

- **Commande par hystérésis modulée**

La commande par hystérésis modulée a pour objectif de résoudre l'inconvénient majeur de la commande par hystérésis conventionnelle en fixant la fréquence de commutation des semi-conducteurs. Cette commande consiste à ajouter au signal d'erreur ε un signal triangulaire (S_{tr}) de fréquence f_{tr} et d'amplitude (A_{tr}). La fréquence f_{tr} doit être choisie égale à la fréquence de commutation que l'on souhaite imposer aux composants de puissance. Le signal ainsi obtenu attaque alors l'entrée d'un

régulateur à hystérésis d largeur de bande 2Bh dont la sortie permet de commander les interrupteurs de puissance. Le schéma de cette commande est décrit à la figure (3.10). [12]

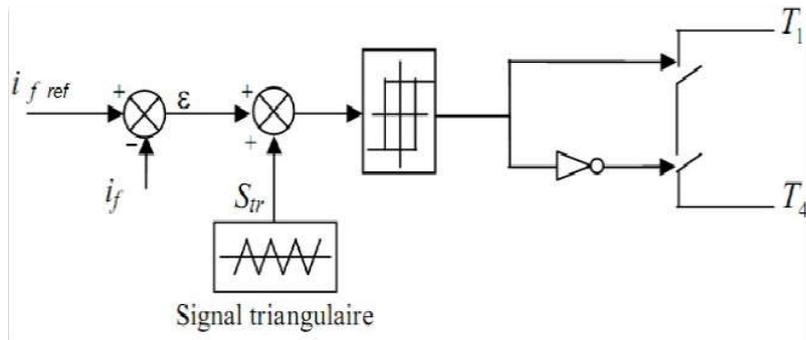


Figure III.10 Commande par hystérésis modulée.

- **Commande MLI intersective**

Dans la figure II.7, le signal de commande des interrupteurs est généré à partir de la comparaison du signal de référence sinusoïdal, (de fréquence ω) et du signal de modulation triangulaire ou porteuse (de fréquence ω_c) [4].

Les deux paramètres caractérisent la commande sont :

- L'indice de modulation : $m = \frac{\omega}{\omega_c} \gg 1$.
- Le coefficient de réglage : $r = \frac{A_m}{A_c}$, généralement r est compris entre 0 et 1.

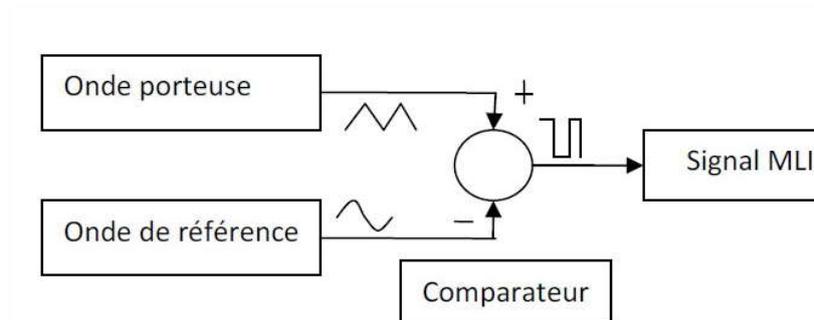


Figure III.11 Commande MLI intersective.

III.2 Conclusion

Nous avons présenté et défini, dans ce chapitre, la plupart des éléments constituant la structure du filtre actif parallèle. Cette structure a été partagée en deux parties à savoir la partie puissance et la partie contrôle-commande. Le choix des éléments de la partie contrôle commande, tels que la méthode d'identification des courants perturbés, la commande de l'onduleur et la régulation de la tension continue, de même que ceux de la partie puissance, comme l'onduleur, l'élément de stockage et filtre de sortie ont été fixés.

Nous avons présenté aussi les trois stratégies de commande de l'onduleur, hystérésis, hystérésis modulée et MLI, couramment utilisées dans les applications des filtres actifs. La commande hystérésis est très simple et très rapide tandis que la fréquence instantanée des commutations n'est pas contrôlable.

CHAPITRE IV

Résultats de simulation

Introduction

Dans les systèmes modernes la conception et l'implémentation à l'aide de l'outil de simulation jouent un rôle très essentiel en réduisant les erreurs fatales et le cout et améliorent la qualité de la conception. Dans le but de tester les performances du SAPF telle que le taux d'harmonique et le facteur de puissance [19]. Dans ce chapitre on se propose d'étudier la simulation de l'ensemble réseau, redresseur, filtre actif sous l'environnement Matlab/Simulink. On donne ensuite les résultats de simulations obtenus.

IV.1 Logiciel utilisé [20]

La modélisation et la simulation d'un système physique sont une étape essentielle qui précède toute implémentation matérielle. Dans les langages évolués cette tâche est réalisée par l'élaboration de programmes informatiques spécifiques qui décrivent le comportement du système aussi bien à l'état dynamique (régime transitoire) qu'à l'état statique (régime permanent). Cette opération devient plus complexe dès qu'il s'agit des systèmes physiques d'ordre élevé, ou ayant des non linéarités.

La dernière décennie a été surtout marquée par le développement de nombreux logiciels appelés solveurs, pour l'aide à la modélisation et la simulation numérique des systèmes dynamiques, parmi ces logiciels on trouve : MATLAB/SIMULINK, ce logiciel est destiné à la modélisation et à la simulation des systèmes continus et discrets.

Compte tenu des possibilités offertes en matière de modélisation et de simulation pour des systèmes mixtes (continus et discrets) et la simplicité d'implantation des modèles (linéaires et non linéaires) grâce à son interface graphique, ainsi que la possibilité d'échange de données entre Simulink et l'espace de travail Matlab, dans lequel le système modélisé sous Simulink peut recevoir des données de l'espace de travail ou y envoyer des données de sortie.

Simulink est donc un programme additionnel à Matlab pour la modélisation et la simulation des systèmes dynamiques continus et discrets. Il offre d'innombrables outils, spécifiques aux systèmes dynamiques, tout en conservant la puissance et les fonctionnalités de Matlab. [11].

IV.2 Structure générale de simulation de SAPF

La figure 4.1 présente l'ensemble de la structure du SAPF et de son environnement fonctionnel, lequel se compose :

- D'une source de tension triphasée.
- D'une charge non linéaire : pont redresseur triphasé à diode.
- Du filtre actif, le quel est composé d'un onduleur de tension à trois bras à interrupteur réversible en courant et bi-commandable (IGBT avec des diodes antiparallèles). L'élément de stockage de l'énergie continue est une capacité C_{dc} qui joue le rôle d'une source de tension V_{dc} . Le filtre de sortie est une bobine (filtre du premier ordre) représenté par L_f .
- D'une commande de SAPF, qui génère les signaux de commande de l'onduleur.

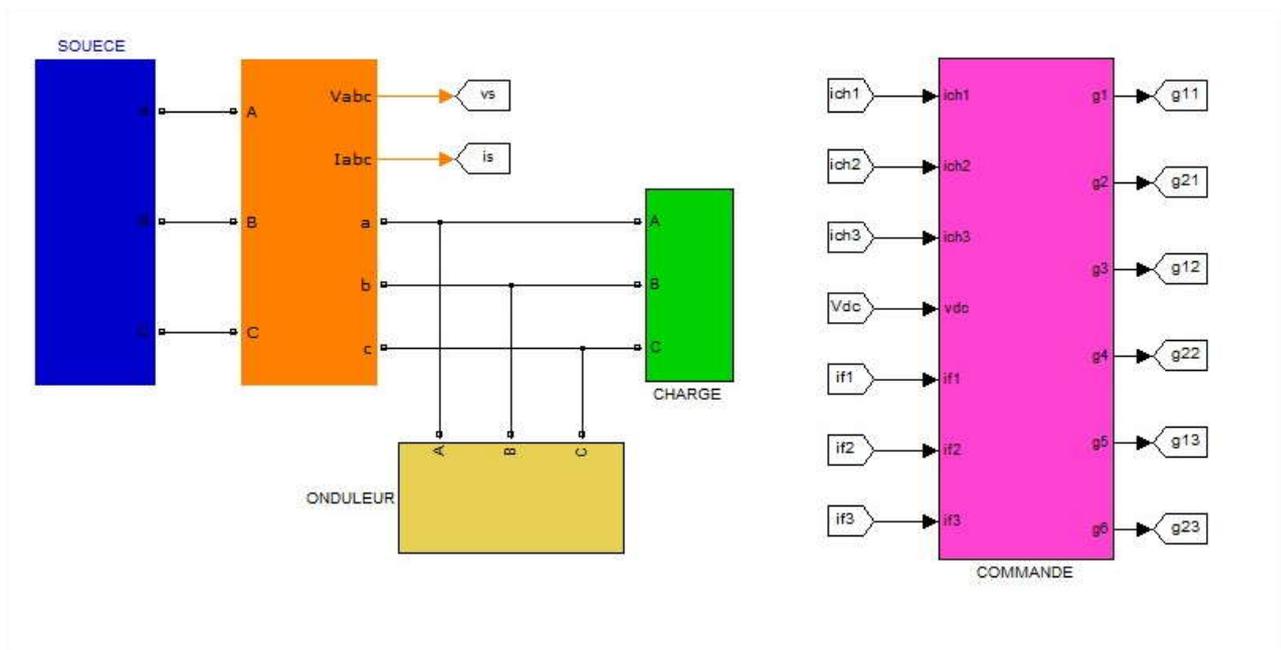


Figure IV. 1 Structure générale du SAPF sous SIMULIK (SimPowerSystems).

IV.2.1 La source de tension triphasée

La figure 4.2 présente le schéma bloc de la source de tension triphasée.

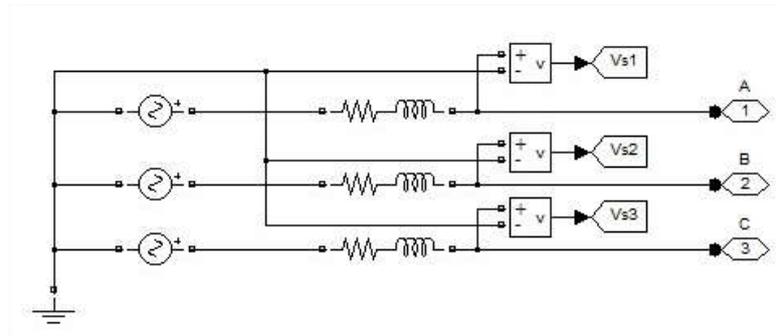


Figure IV. 2 Source de tension triphasée.

IV.2.2 La charge non linéaire

La figure suivante présente la charge non linéaire : pont redresseur triphasé à diode.

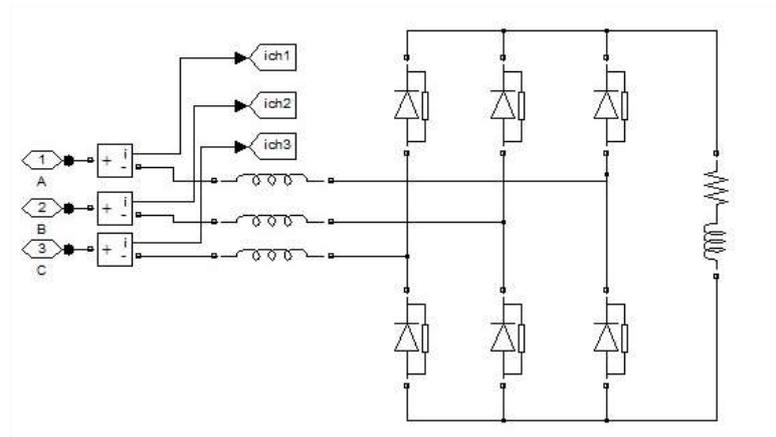


Figure IV. 3 La charge non linéaire.

IV.2.3 Le SAPF

La figure suivante présente l'onduleur triphasé et son alimentation continue V_{dc} , et le filtre de sortie L_f .

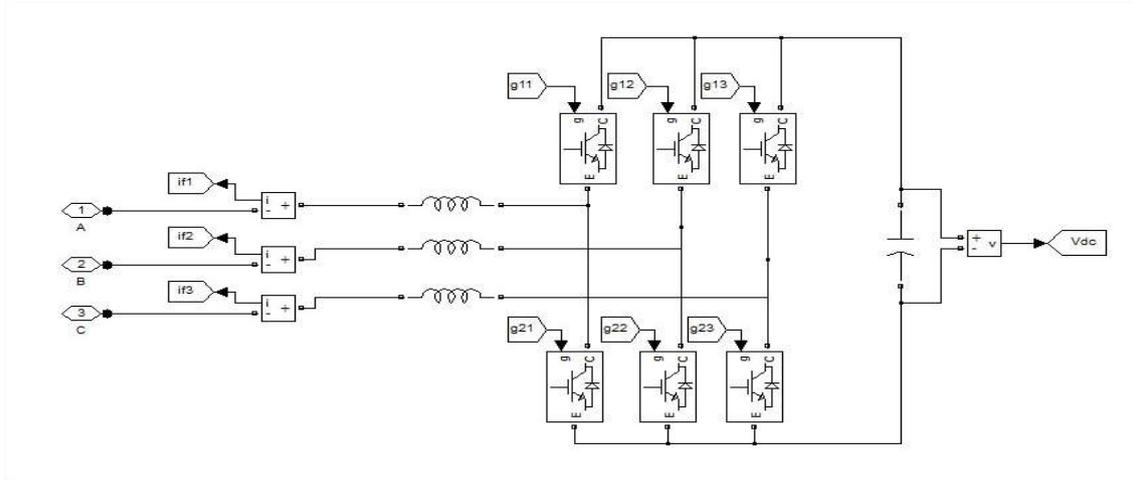


Figure IV. 4 Le filtre actif.

IV.2.4 La commande de SAPF

La figure 4.5 présente la commande des interrupteurs de l'onduleur, et la régulation du bus continu.

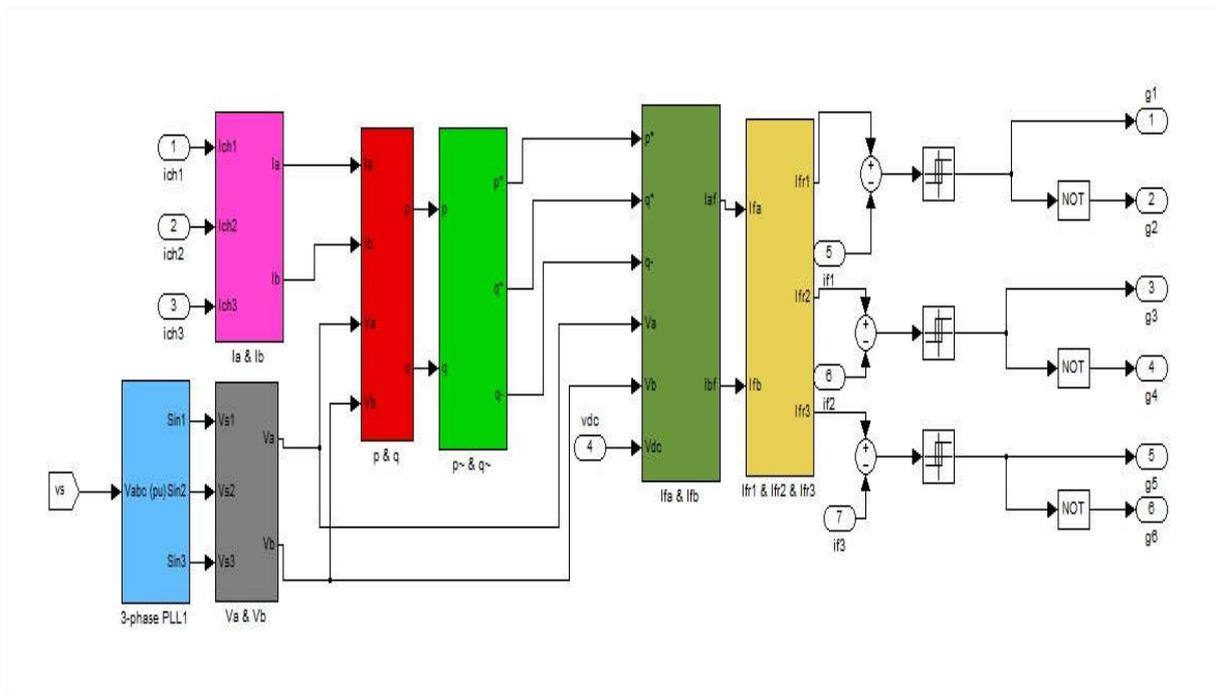


Figure IV. 5 La partie commande de SAPF.

IV.3 Résultat de simulation

Les paramètres de simulation sont donnés dans le tableau 4.1 :

Réseau électrique
$V_s=50v$; $f=50$ Hz ; $R_s=0.1m\Omega$; $L_s=0.1mH$
Charge polluante
$L_c=1mH$; $R_{ch1}=12.5\Omega$; $R_{ch2} = 20 \Omega$; $L_{ch}= 50mH$
Filtre parallèle
$V_{dc} = 250v$; $C_{dc} = 1.1$ mF ; $L_f=10$ mH
Commande hystérésis
$\Delta I = \pm 0.01A$
Commande MLI
F_p 5KHz

Tableau IV.1 Paramètres de simulation.

❖ Avant le filtrage

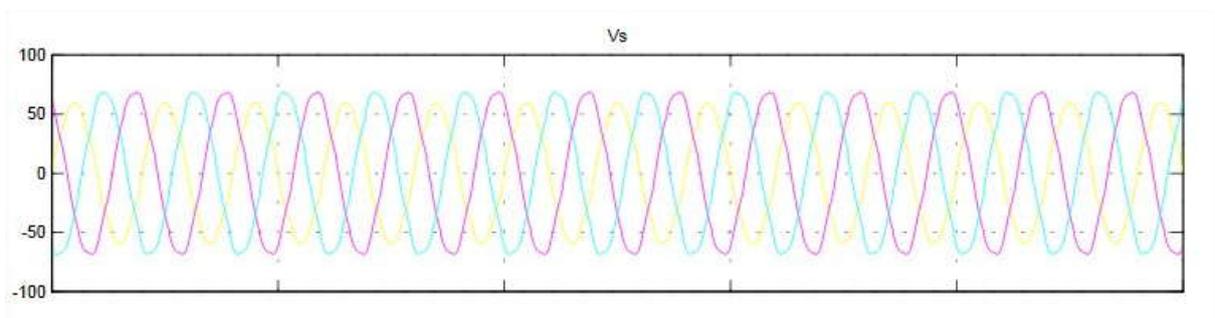


Figure IV. 6 Les tensions de sources.

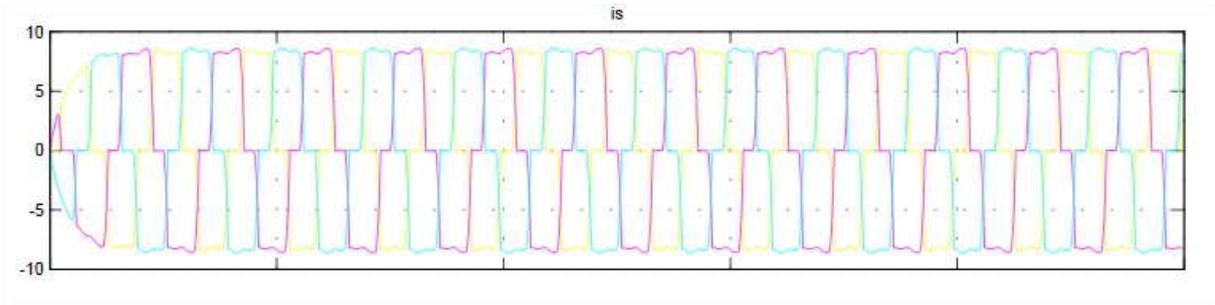


Figure IV. 7 Les courants de sources.

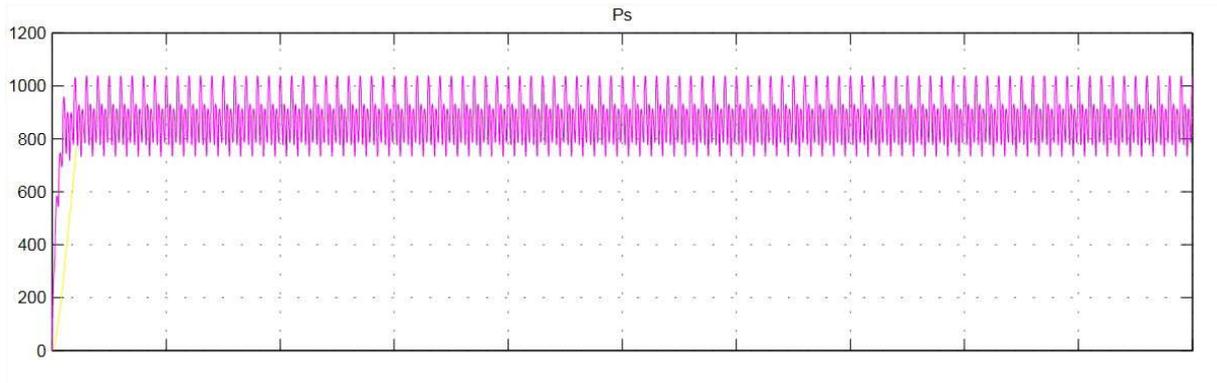


Figure IV.8 La puissance actif et sa valeur moyenne.

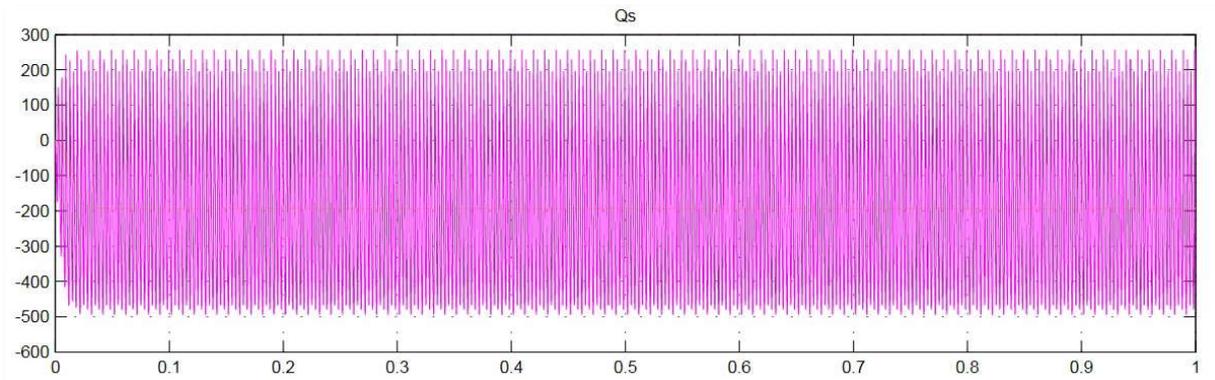


Figure IV.9 La puissance réactif et sa valeur moyenne.

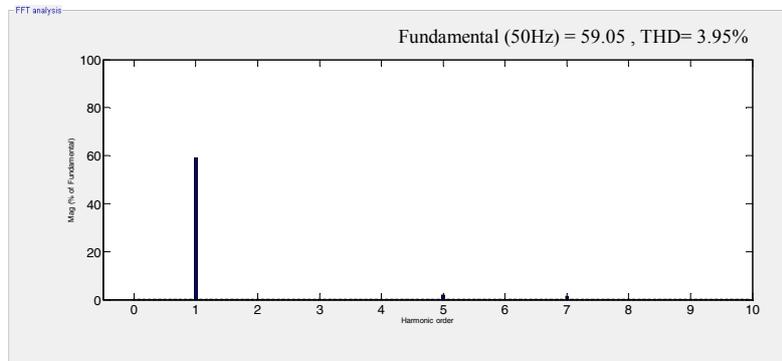


Figure IV. 10 Spectre de tension de source.

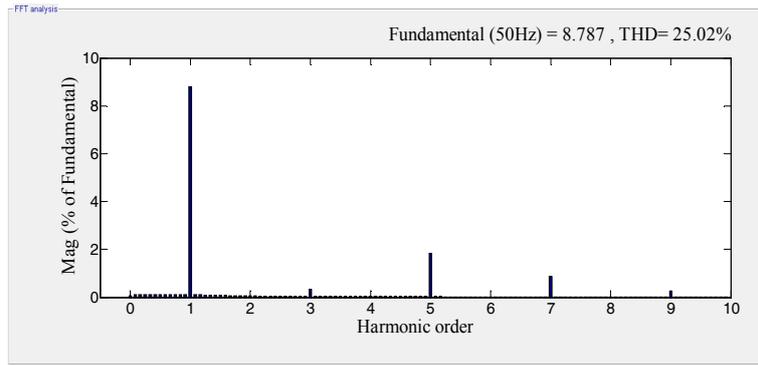


Figure IV. 11 Spectre de courant de source.

❖ Après le filtrage

- **Commande à hystérésis :**

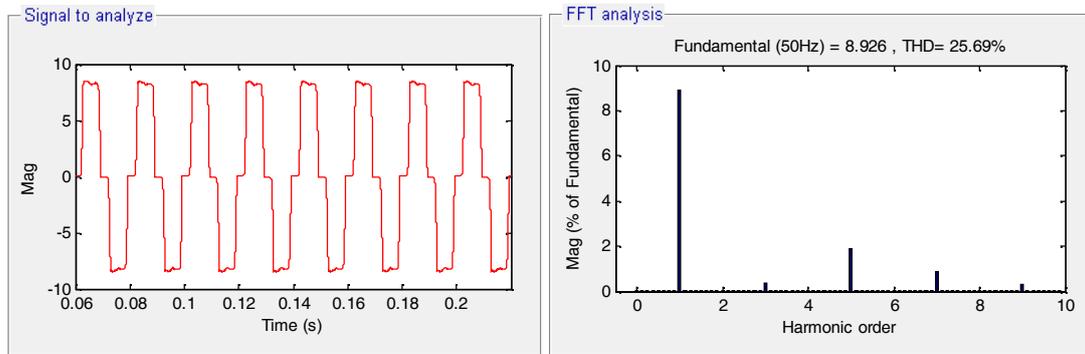


Figure IV. 12 Courant de charge et son spectre.

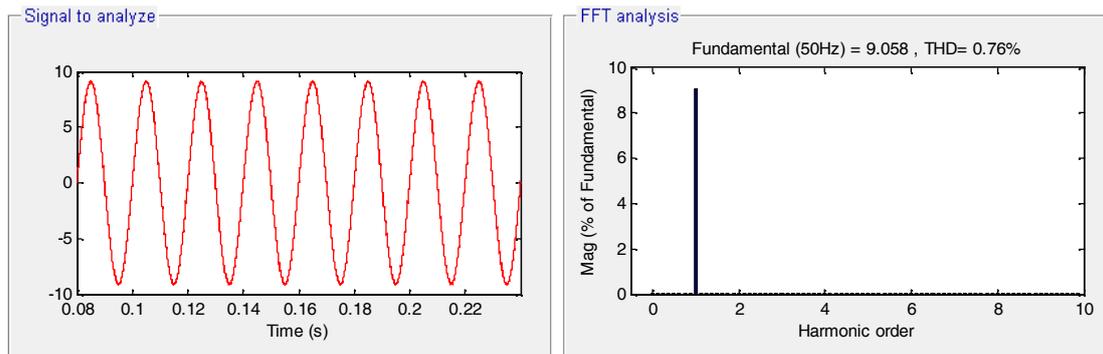


Figure IV. 13 Courant de source et son spectre.

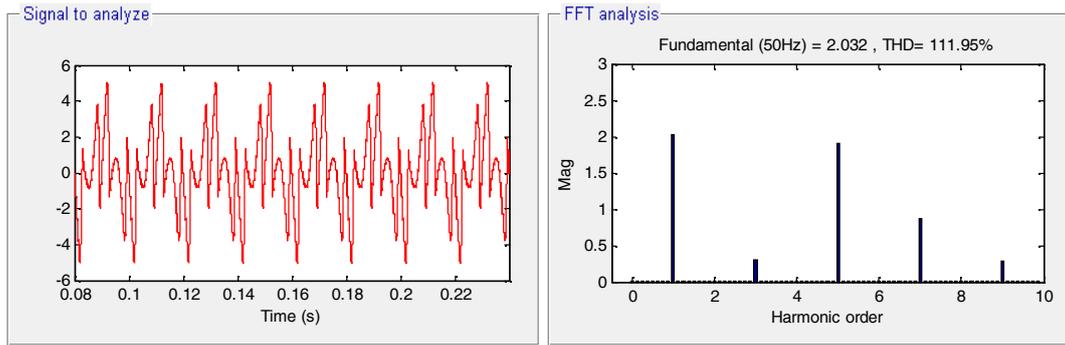


Figure IV. 14 Courant de filtre et son spectre.

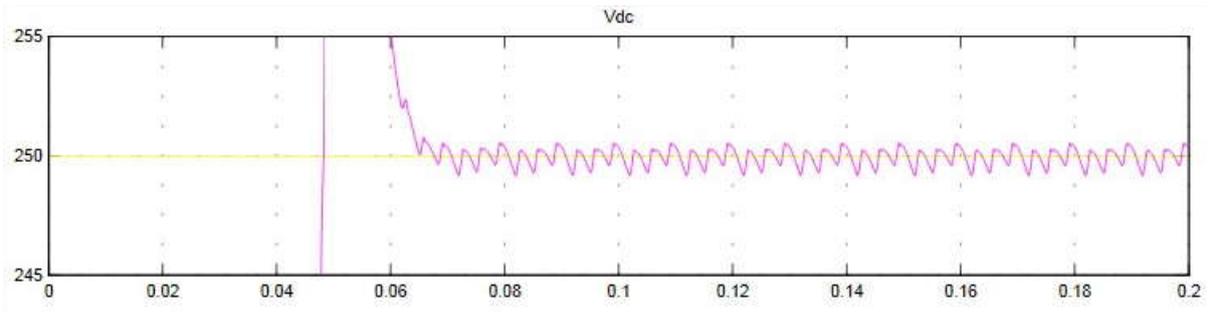


Figure IV. 15 La tension V_{dc} et sa référence.

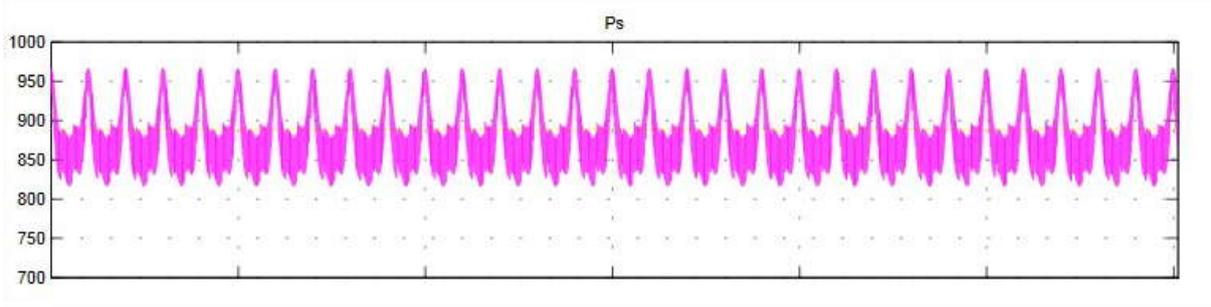


Figure IV.16 La puissance actif et sa valeur moyenne.

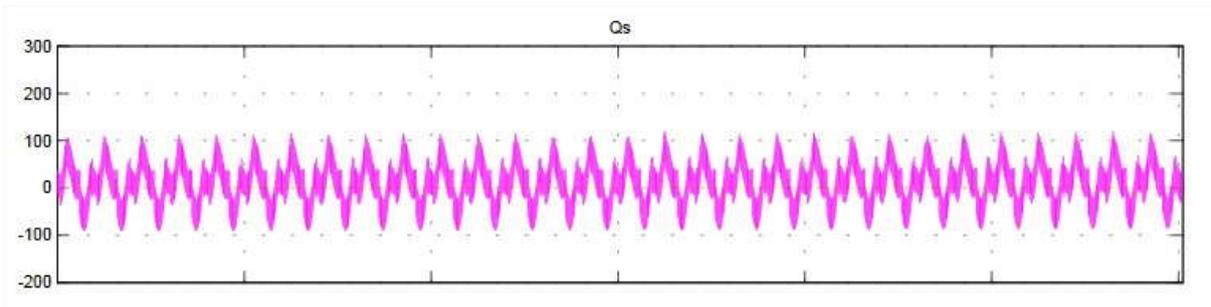


Figure IV.17 La puissance réactif et sa valeur moyenne.

❖ **Commande à MLI interséctive :**

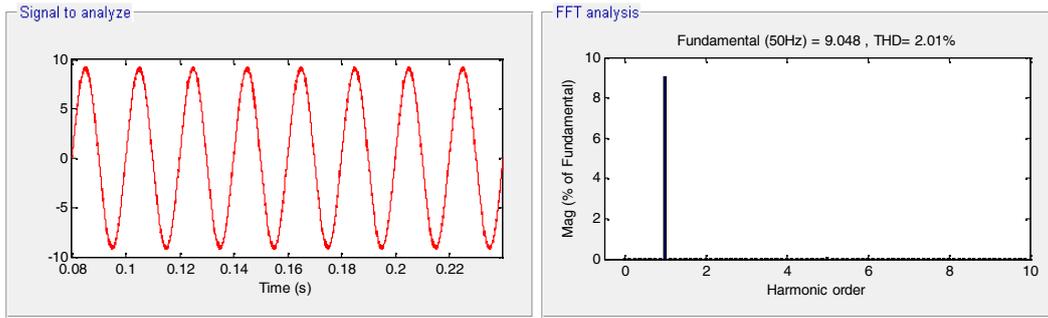


Figure IV. 18 Courant de source et son spectre.

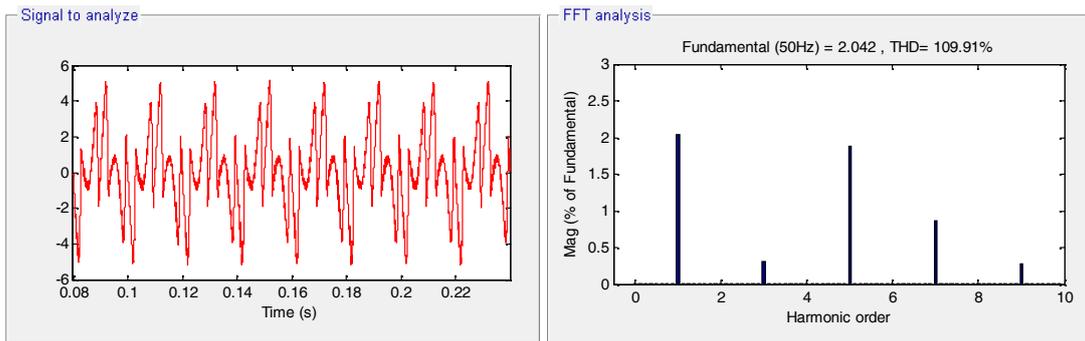


Figure IV. 19 Courant de filtre et son spectre.

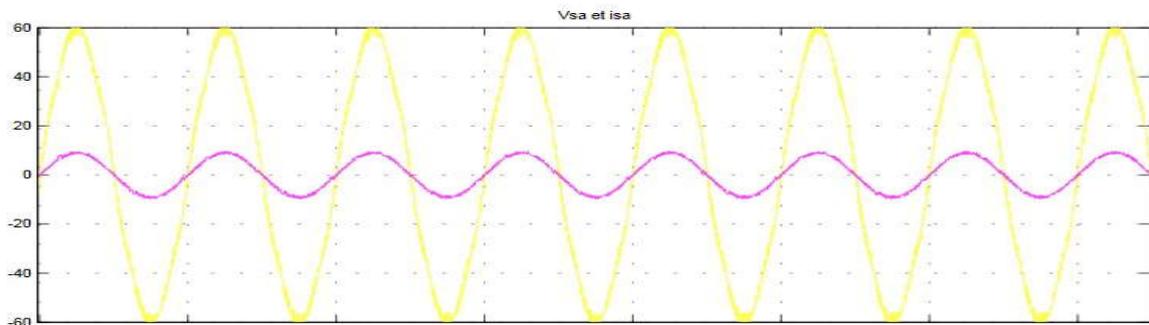


Figure IV. 20 La tension et du courant du réseau.

❖ Charge variable (R_{ch1} // R_{ch2})

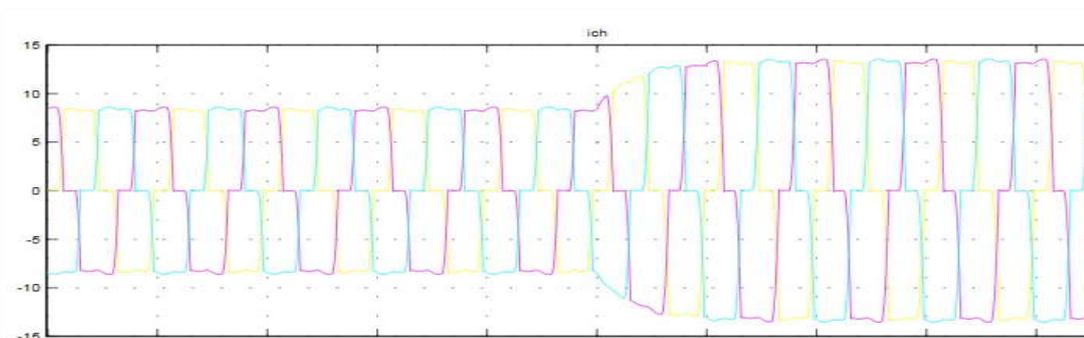


Figure IV. 21 Les courants de charge.

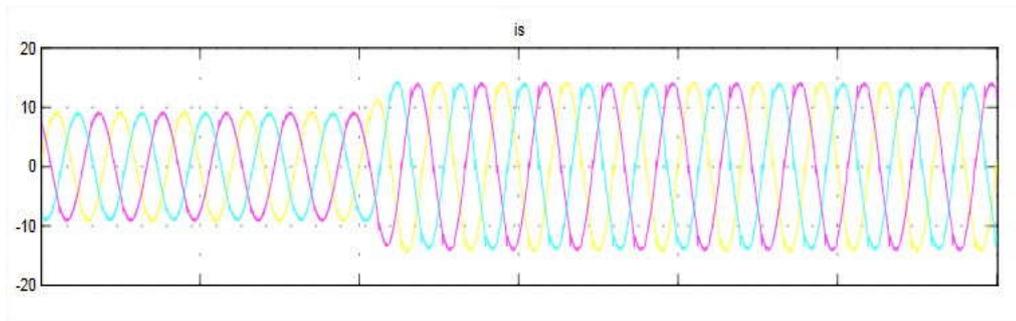


Figure IV. 22 Les courants de source.

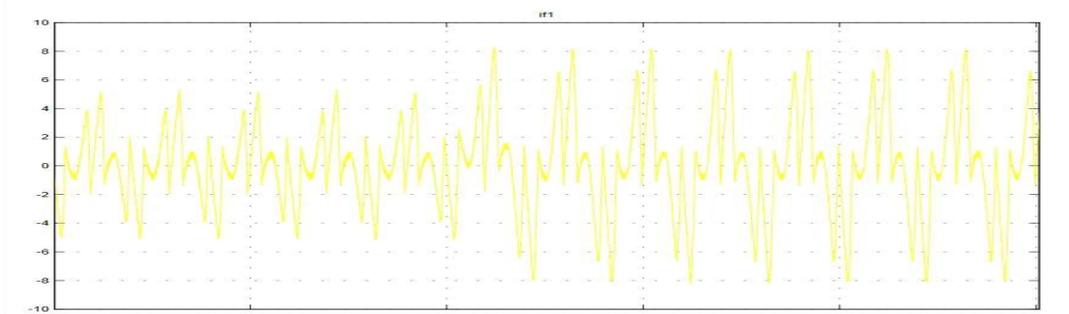


Figure IV. 23 Le courant du filtre.

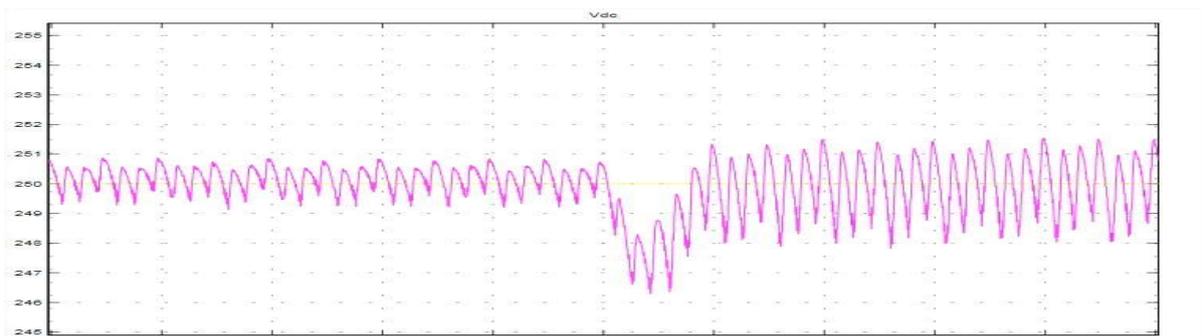


Figure IV. 24 La tension V_{dc} .

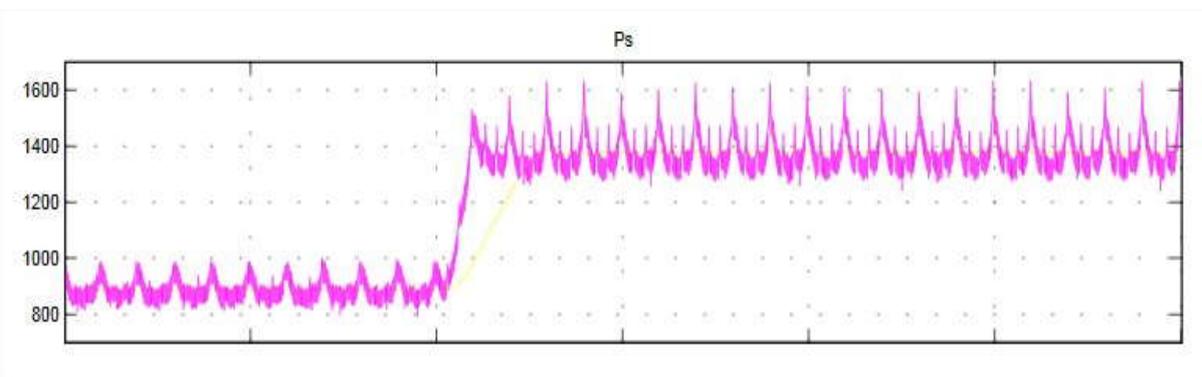


Figure IV.25 La puissance actif.

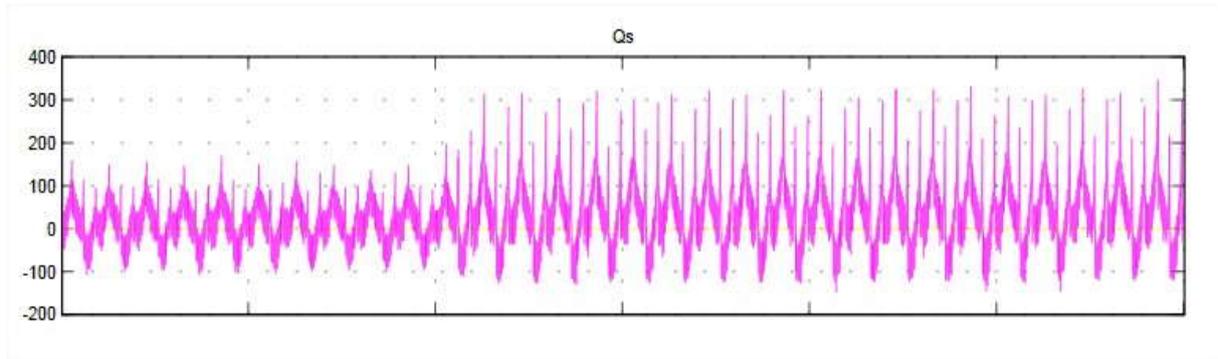


Figure IV. 26La puissance réactive.

IV.4 Résumé des résultats

On peut résumer tous les résultats de simulation avec et sans PLL dans le tableau 4.2 :

	Commande	THDi%
Sans PLL	Hystérésis	9.07 %
	SPWM	9.24 %
Avec PLL	Hystérésis	0.76%
	SPWM	2.01 %

Tableau IV. 2 Résumé des résultats.

IV.5 Interprétation des résultats

Premièrement on fixe la charge en utilisant différentes stratégies de commande, on peut mettre en évidence l'importance de la PLL par ces résultats; si on prend comme exemple une commande de courant à hystérésis sans PLL on trouve que le THD=9.07% par contre avec PLL le THD=0.76%, donc l'importance de la PLL est claire. C'est pourquoi désormais la PLL est utilisée dans la simulation.

❖ Avant le filtrage

Les figures (IV.7 et IV.11) présentent la forme d'onde du courant du réseau avec son spectre fréquentiel avant la mise en service du FAPP. D'après ces résultats, nous constatons que le courant du réseau is est loin d'être sinusoïdal, car il est riche en harmoniques d'ordre impair et non multiples de trois, générés par la charge non linéaire avec un taux de distorsion de 25.02% .Il en est identique au courant de charge

ich. Par conséquent, la puissance réactive consommée par cette charge non linéaire est importante (figure IV.8) donc un facteur de puissance inférieur à un (1).

❖ Apres le filtrage

Après la mise en service du FAPP (connexion au système), il commence à injecter les courants de compensation i_f (figure IV.14) (nous ne présentons que la phase a), ce qui permet, après un transitoire, aux courants du réseau de redevenir quasi-sinusoidaux avec un THDi qui décroît de 25.02% à 0.76%, et en phase avec leurs tensions correspondantes (figure IV.13).

À partir des Figures IV.16 et IV.17, sur lesquelles sont illustrés les résultats de simulation concernant les puissances instantanées active $P(W)$ et réactive $Q(Var)$, nous déduisons que le filtre arrive à compenser l'énergie réactive qui a été consommée par la charge non linéaire, ce qui n'est pas le cas avant la connexion du SAPF au réseau électrique. Par ailleurs, sur la figure IV.20, nous pouvons constater que le courant i_s et la tension V_s du réseau deviennent instantanément en phase.

❖ Charge variable ($R_{ch1} // R_{ch2}$)

Pour étudier la robustesse de la commande, on applique une variation de la charge non linéaire. La figure IV.21 montre l'augmentation brusque des courants de charge, et sur la figure IV.22 on constate que le courant de source i_s reste quasi-sinusoidal et in affecté par ce changement brusque de la charge non linéaire. D'autre part, nous constatons aussi que la tension V_{dc} du bus continue demeure régulée à sa valeur de consigne $V_{DC_réf.}$ (Figure. IV.24).

Suite à cette variation de la charge, une puissance active nécessaire est délivrée par la source (Figure IV.25), 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 (Figure IV.26).

IV.3 Conclusion

En conclusion, tous ces résultats de simulations obtenues sont très satisfaisants et montrent bien le bon fonctionnement, l'efficacité et la robustesse du SAPF et confirment la bonne réponse dynamique de la stratégie de commande appliquée.

Toutefois, une validation expérimentale est nécessaire pour confirmer tous les résultats de simulation obtenus.

CHAPITRE V

Résultats expérimentaux

Introduction

Dans cette partie, nous allons présenter la validation expérimentale des résultats de simulations que nous avons déjà obtenus.

IV.1 Structure générale [25]

Avant de présenter ces résultats, nous avons jugé utile de rappeler les étapes nécessaires à la réalisation d'un essai expérimental à l'aide du système dSPACE. Les étapes sont les suivantes:

1 - La carte dSPACE et le logiciel Matlab/Simulink doivent être installés dans le PC. En effet, le système de développement de la société dSPACE est intégré à l'environnement Simulink afin de bénéficier d'un chaînage complet de la simulation à la validation expérimentale.

2 - Un modèle Simulink du système étudié doit être réalisé à l'aide des blocs de la bibliothèque Matlab/Simulink. Ce modèle ne doit pas inclure les éléments de puissance (charge, résistance, inductance, IGBTs,....etc.) mais seulement modéliser la partie commande à tester expérimentalement (identification des courants harmoniques et régulation de la tension aux bornes du condensateur). Ensuite, on ajoute des blocs entrées/sorties d'interface (CAN, CNA) de la bibliothèque dSPACE au modèle Simulink précédent afin de faire la liaison entre le système physique et la carte dSPACE.

3 - Le modèle précédent doit alors être implanté sur la carte DS1104. Cela est réalisé à l'aide de l'outil d'interface temps réel RTI (Real-Time Interface). Cet outil traduit d'abord le modèle Simulink en code C, puis le code C est compilé afin de générer un fichier exécutable pour le processeur résidant sur la carte dSPACE (DS1104). Enfin, le fichier exécutable est téléchargé. Cette étape associe le modèle Simulink au système dSPACE à travers le bloc RTI Data qui apparaît alors au niveau du fichier Simulink.

4 - Le modèle précédent doit alors être implanté sur la carte DS1104. Cela est réalisé à l'aide de l'outil d'interface temps réel RTI (Real-Time Interface). Cet outil traduit d'abord le modèle Simulink en code C, puis le code C est compilé afin de générer un fichier exécutable pour le processeur résidant sur la carte dSPACE (DS1104). Enfin, le fichier exécutable est téléchargé. Cette étape associe le modèle Simulink au système dSPACE à travers le bloc RTI Data qui apparaît alors au niveau du fichier Simulink.

La carte dSPACE DS1104 est mise en œuvre, d'une part, pour la génération directe des impulsions de commande (commande numérique). Ainsi, pour la commande numérique, les signaux de courants et de tensions mesurés par les capteurs adéquats sont convertis par les C.A.Ns et exploités numériquement par les algorithmes. La carte contrôleur génère alors trois signaux MLI en utilisant soit les sorties numériques de la prise sub-D (37 pins) de la DSP esclave (Slave DSP Output), comme il est schématisé sur la figure IV.23.

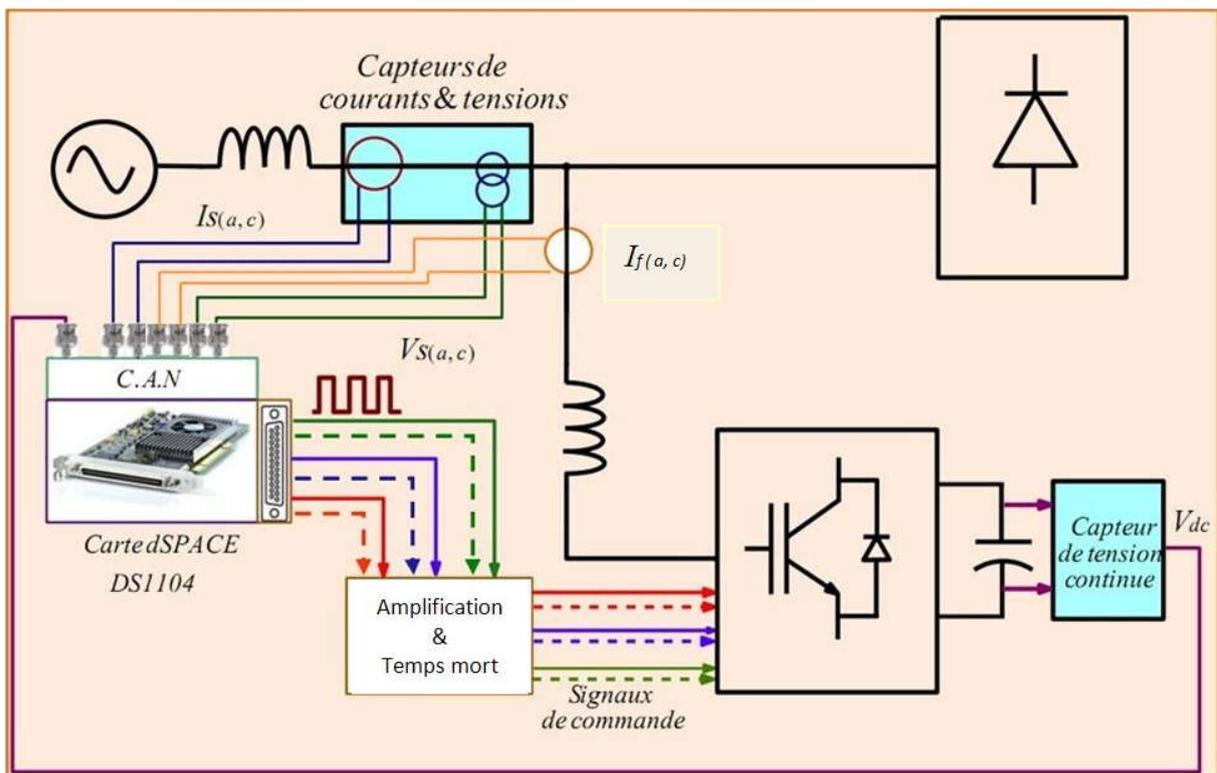


Figure V. 1 Schéma représentant la commande du filtre.

Les paramètres de teste sont donnés dans le tableau 4.3 :

Réseau électrique
$V_s=50v$; $f=50$ Hz
Charge polluante
$L_c=1mH$; $R_{ch1}=12.5m\Omega$; $R_{ch2}=20m\Omega$; $L_{ch}= 50mH$
Filtre parallèle
$V_{dc} = 250v$; $C_{dc} = 1.1$ mF ; $L_f=10$ mH
Commande hystérésis
$\Delta I = \pm 0.01A$

IV.4.1 Analyse du système avant la mise en service du filtre

La figure V. 2 illustre les résultats expérimentaux avant la mise en service du FAPP (réseau électrique triphasé, charge non linéaire). Sur cette figure nous avons représenté la forme d'onde de la tension du réseau V_{sa} (pour la phase a) ainsi que les courants de source i_s qui est identique dans ce cas là aux courants i_{ca} consommé par la charge polluante, du moment que le filtre n'est pas encore mis en marche.

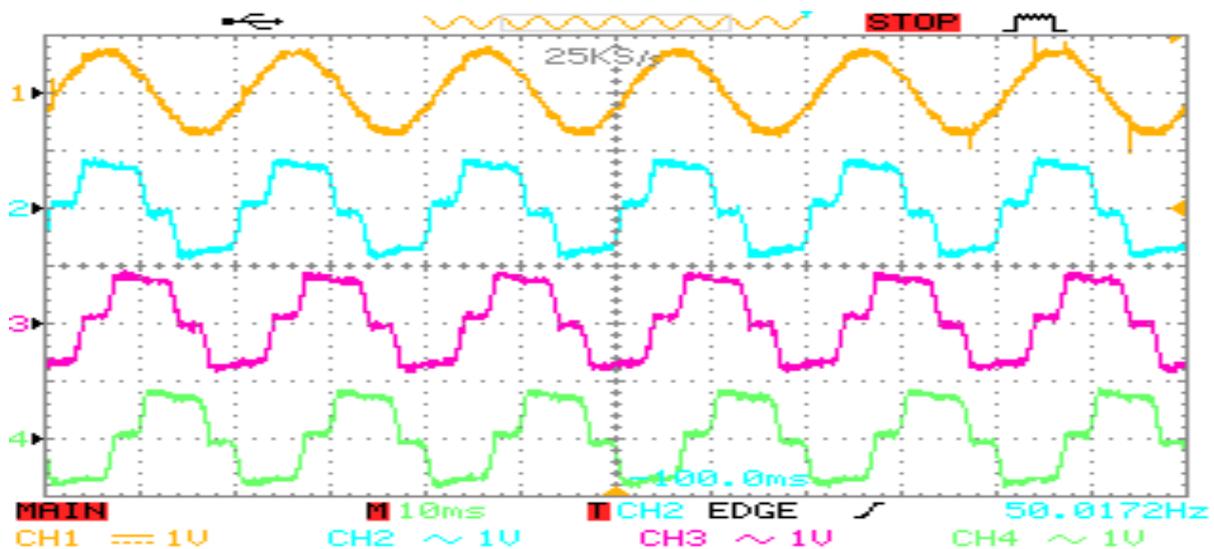


Figure V. 2 Tension et courants de source.

La figure V.3 représente les formes d'onde des puissances instantanées active P et réactive Q fournies par le réseau.

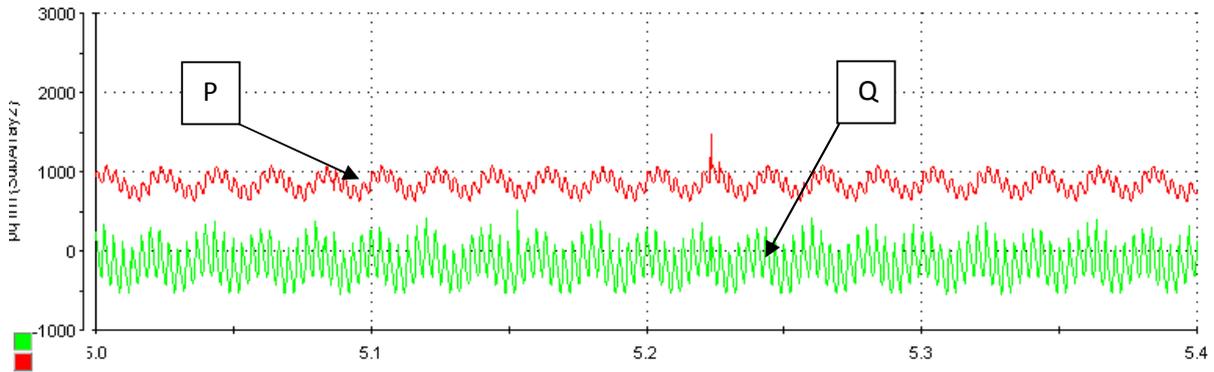


Figure V. 3 Les puissances instantanées active P et réactive Q.

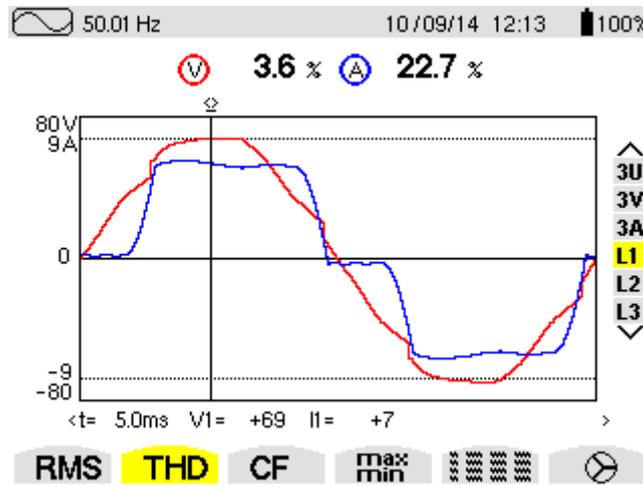


Figure V. 4 Tension et courant de source avant le filtrage.

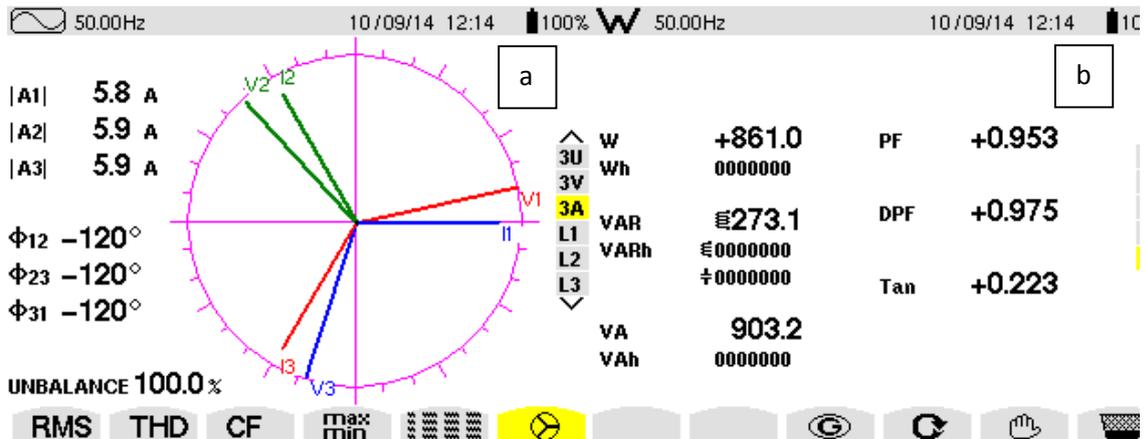


Figure V. 5 : (a) Diagramme vectoriel tension-courant, (b) Bilan des puissances.

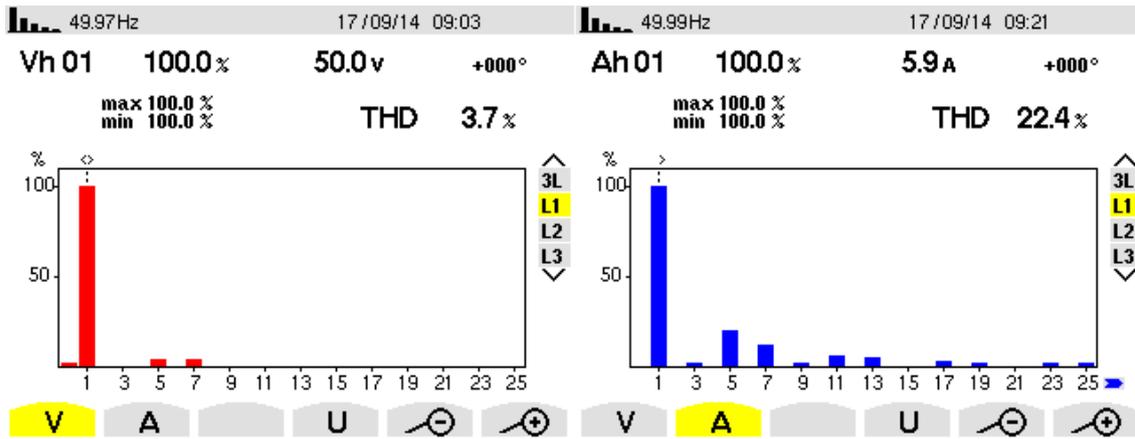


Figure V. 6 spectre de tension et de courant.

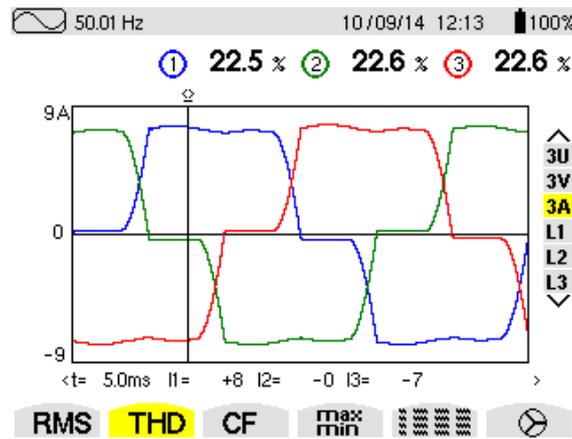


Figure V. 7 Les courants de sources avant le filtrage.

La mesure du THD et la décomposition harmonique du courant réseau et de la tension au point de raccordement sont mesurés à l’aide d’un analyseur de réseaux électriques triphasés. Celui-ci nous indique le déphasage entre le système courant-tension triphasé (Figure V.4), le bilan des puissances consommées par la charge polluante (Figure V.5 a), un THDi de 22,4% pour le courant dans la charge polluante (Figure. V.6) et un THDv de 3,7% pour la tension réseau aux bornes de la charge (Figure. V.6) avant le raccordement du filtre.

IV.4.2 Analyse du système après la mise en service du filtre

Nous allons présenter les résultats expérimentaux concernant le comportement du filtre en utilisant la méthode (p q), avec une commande de courant à hystérésis avec PLL. Le système global est composé dans ce cas du réseau électrique, de la charge non linéaire et du filtre. La

figure v.8 illustre la tension du bus continu V_{dc} (1), le courant de source i_{sa} (2), le courant de charge i_{ca} (3) le courant de compensation i_{fa} (4) après mise en marche du filtre.

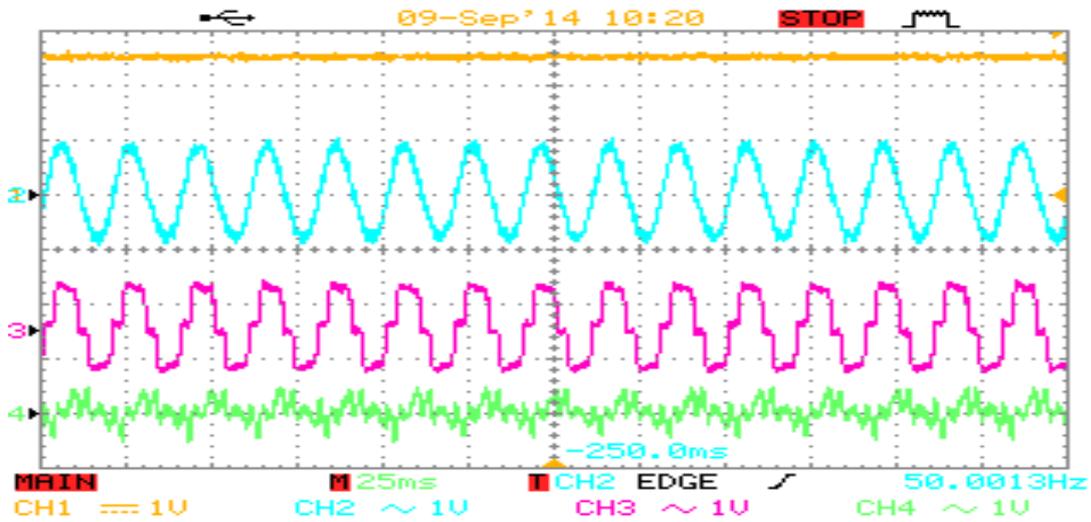


Figure V. 8 tension du bus continu v_{dc} (1),
courant de source i_{sa} (2),
courant de charge i_{ca} (3) courant de compensation i_{fa} (4).

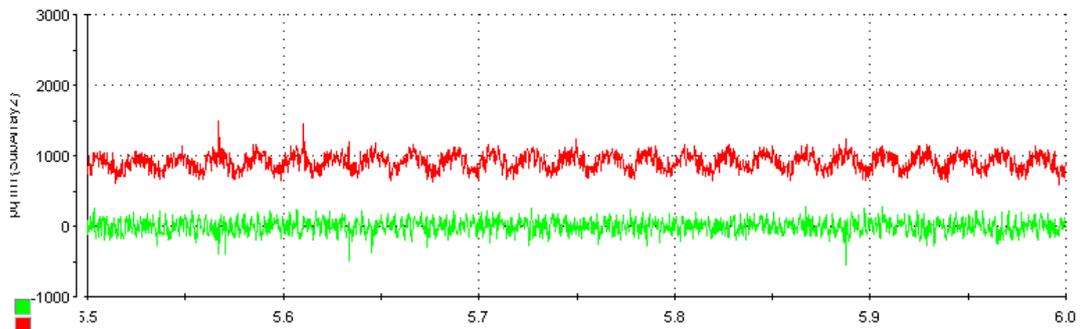


Figure V. 9 Les puissances instantanées active P et réactive Q.

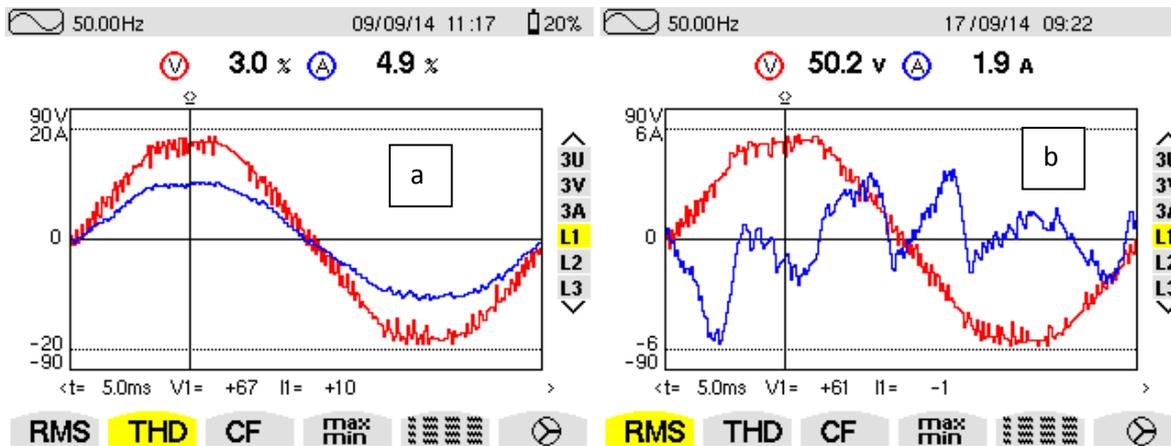


Figure V. 10 (a) Tension et courant de source, (b) Tension et courant du filtre.

La figure V.10-(a) montre les résultats de la compensation, en régime permanent, du courant de l'alimentation ($I_s = 6 \text{ A}$) qui est devenu sinusoïdal et en phase avec la tension du réseau. Par contre la figure V.10-(b) représente le courant du filtre avec la tension de la phase (a). Nous pouvons constater que le courant et de la tension de source ce sont fortement améliorés et leurs valeurs ont chutées respectivement à ($\text{THD}_v=3\%$, $\text{THD}_i=4.9\%$) .

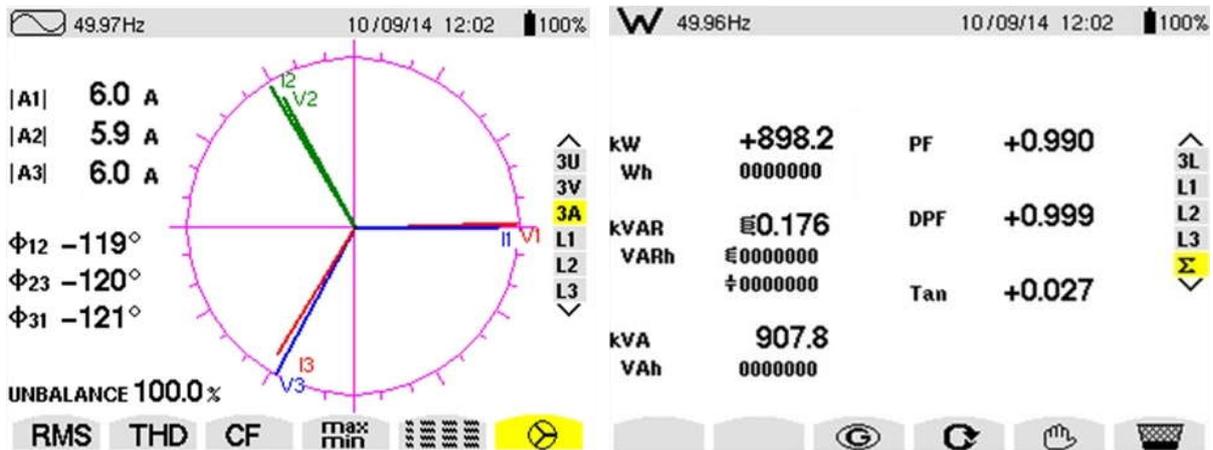


Figure V. 11 Diagramme vectoriel des tensions et courants et bilan des puissances de la source après filtrage.

La figures V.11 montre bien que les courants sont quasi en phase avec leurs tensions et qu'un meilleur écoulement de la puissance active s'est effectué au niveau de la source, même si la totalité de l'énergie réactive n'est pas parfaitement compensée suite à la présence d'une large bande d'harmoniques, de faibles amplitudes, incluse dans les signaux de commande.

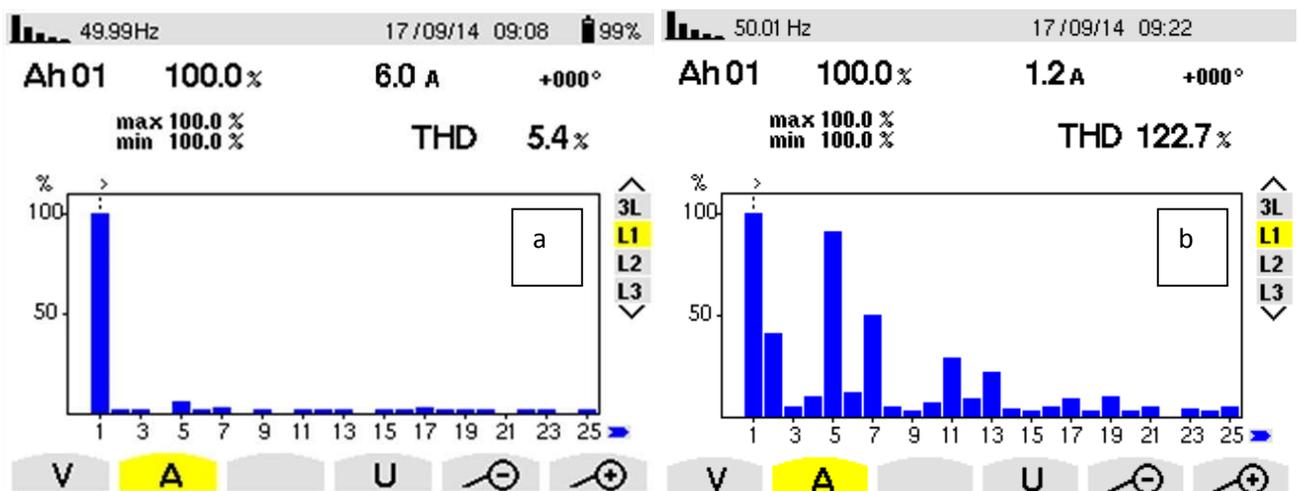


Figure V. 12 : Spectre de (a) courant de source, (b) courant du filtre.

D'un autre coté, l'amélioration de la qualité d'énergie est prouvée par les résultats présentés d'une part par la figure. V.12 où l'on peut déduire que les tensions et les courants sont en phase et d'autre part, par la figure. V.12 où l'on peut conclure que pratiquement la puissance réactive est compensée.

IV.4.3 Mise en service du filtre

Sur la figure V.12 est illustré respectivement de haut en bas et pour la phase a, le tension du bus continu V_{dc} (1), le courant de source i_{sa} (2), la courant de charge i_{ca} (3) et le courant de compensation i_{fa} (4), injecté par le filtre dans le réseau électrique.

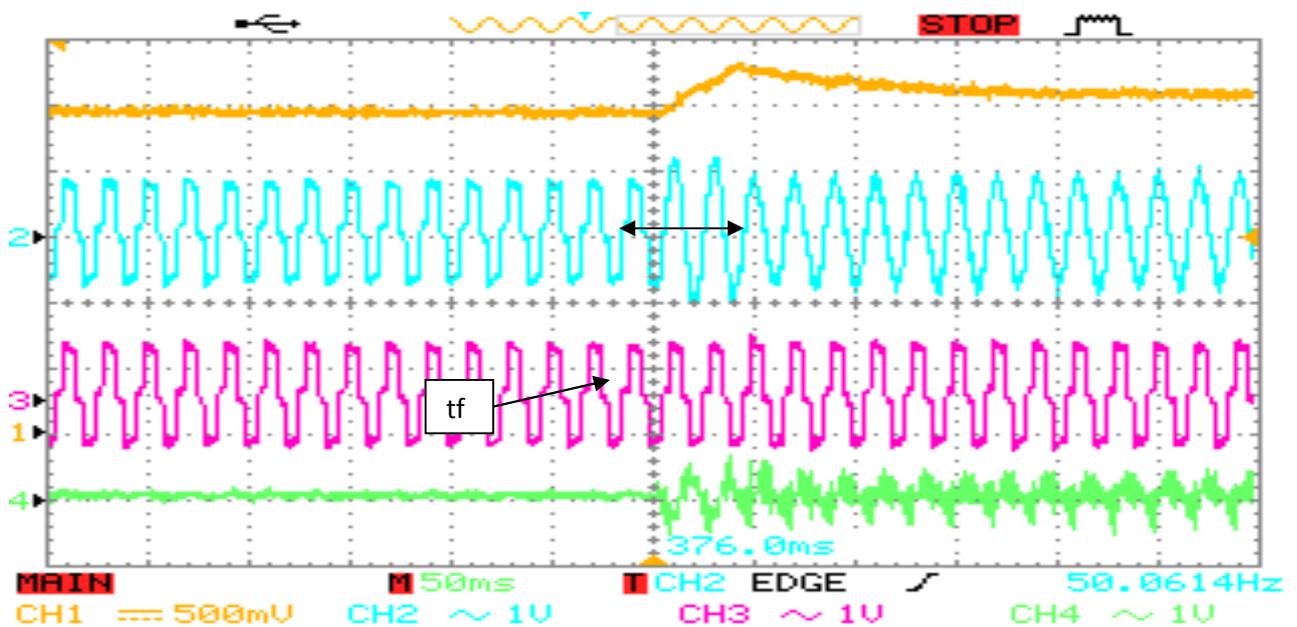


Figure V. 13 Tension du bus continu v_{dc} (1), courant de source i_{sa} (2),
courant de charge i_{ca} (3) courant de compensation i_{fa} (4).

A partir de la figure IV.31, il apparaît que dès l'activation de la commande du filtre à l'instant t_f le courant réseau devient sinusoïdal et en phase avec la tension avec un transitoire de 75ms pour atteindre le régime permanent d'une part et d'autre part, la tension du bus continu après ce transitoire suit sa référence ($V_{dc} = 251.35V$).

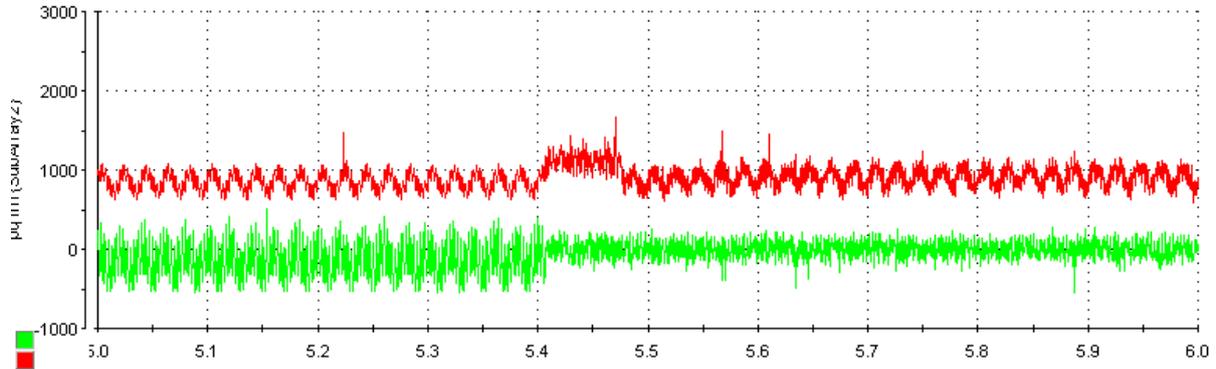


Figure V. 14 Les puissances instantanées active P et réactive Q.

D'après ces résultats, nous déduisons qu'à l'instant t correspondant à la mise en route du SAPF, la puissance instantanée P délivrée au niveau de la source reprend instantanément sa valeur initiale alors que l'énergie réactive Q tend vers zéro et continue à osciller autour de cette valeur.

IV.4.4 Variation de la charge non linéaire

Dans ce paragraphe, l'évaluation de la rapidité et la robustesse de la commande (p-q) appliquée au SAPF est étudiée. Nous allons tester expérimentalement le comportement du système lors d'un changement brusque de la charge non linéaire source de courant (variation de R).

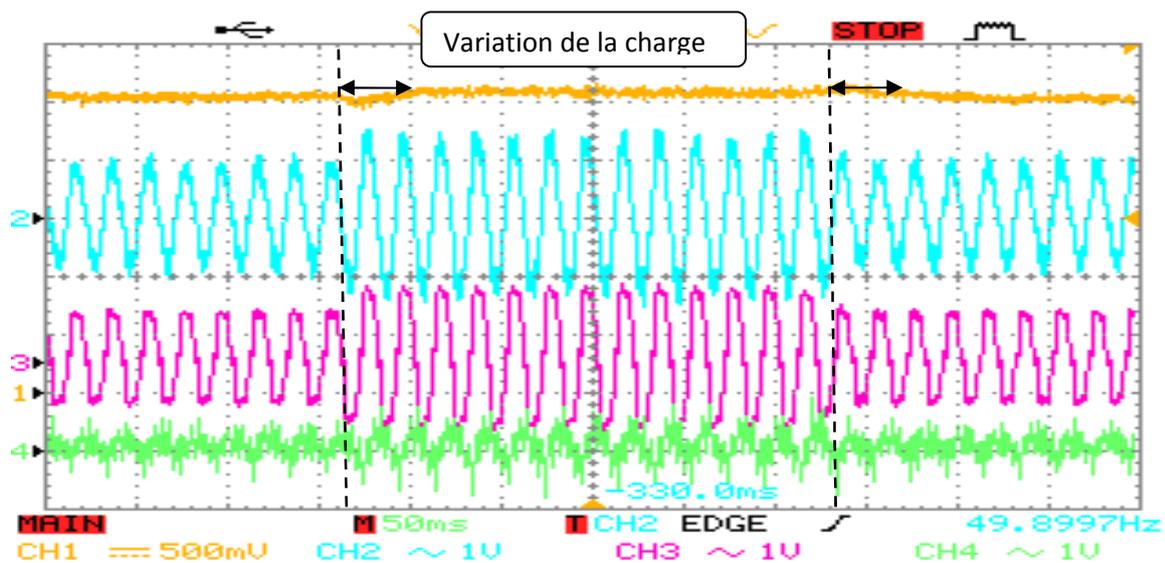


Figure V. 15 tension du bus continu vdc(1), courant de source isa(2),

Courant de charge ica(3) courant de compensation ifa(4).

La robustesse de cette méthode de commande appliquée au filtre est prouvée par le fait que le courant de source i_{sa} reste quasi-sinusoïdal et in affecté par ce saut de charge. Par ailleurs, nous constatons que la tension V_{dc} du bus continu demeure également régulée à sa valeur de consigne $V_{DC_réf} = 250$ V après un très court transitoire de 40ms, ce qui témoigne de la bonne dynamique de la commande p-q. Cette caractéristique compte parmi les points forts de cette méthode.

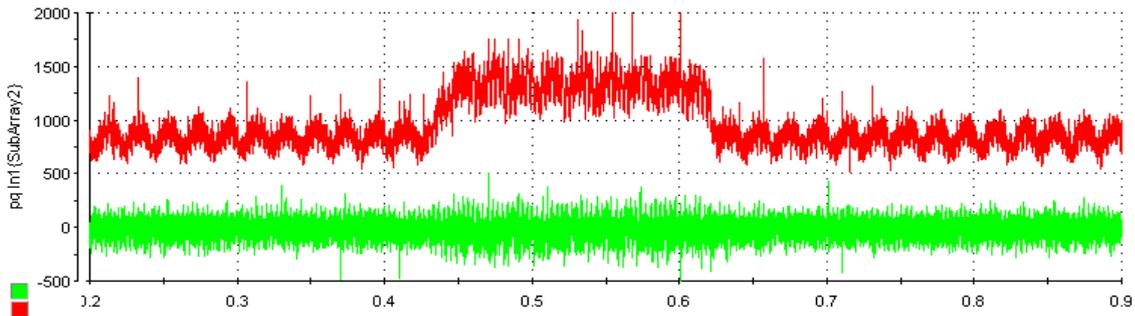


Figure V. 16 Puissance active P (W), Puissance réactive Q (VAR).

Par ailleurs, à partir des résultats expérimentaux de la Figure V.16, nous observons aussi que la puissance active P subit une augmentation relative à ce saut de charge, cependant l'énergie réactive Q continue à osciller autour de sa valeur moyenne nulle.

IV.5 Conclusion :

En résumé, tous ces résultats de simulations et expérimentaux obtenues pour cette stratégies de commande sont très satisfaisants et montrent bien le bon fonctionnement, l'efficacité et la robustesse du SAPF et confirment la bonne réponse dynamique de la stratégie de commande appliquée. Toutefois, il y a eu une légère différence concernant les taux de distorsions harmoniques (en simulation et en pratique) comme c'est illustré par le tableau suivant.

THDi % En simulation	THDi % En pratique
0.76%	4.9%

Tableau 4. 1 Résumé des THDi

Cependant, les résultats de simulation et d'expérimentation ont confirmé la bonne performance dynamique de la commande p-q en point de vu temps de réponse.

Conclusion générale

Ce mémoire est dédié à la dépollution harmonique dans les réseaux électriques de distribution industriels déséquilibrés et distordus en vue de l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique, pour ce faire on se doit de rechercher des solutions qui permettent aux charges non linéaires une absorption sinusoïdale avec facteur de puissance proche de l'unité.

Parmi ces solutions, nous avons opté pour la solution du filtrage actif de puissance de type shunt pour les nombreux avantages qu'il présente. Dans le cadre de notre étude la charge non linéaire est représenté par un pont redresseur triphasé débitant sur une charge R-L. dans ce cas le courant absorbé est de type alternatif et très riche en harmoniques.

Nous avons observé que la qualité du filtrage dépend essentiellement de la régulation du bus continu V_{dc} alimentant la capacité d'entrée de l'onduleur. Car cette dernière permet la compensation de l'énergie réactive. C'est pourquoi il est important de réaliser une régulation de ce bus continu. D'autre part il est essentielle de fabriquer des courants de référence de bonne qualité afin de rendre le filtrage plus efficace.

Il existe plusieurs techniques de constitution des courants de référence. Dans ce mémoire nous avons choisi la méthode des puissances instantanées réelles et imaginaires (p q). Et comme cette méthode n'est applicable que si la tension du réseau est saine (sinusoïdale et équilibrée), mais cette tension (du réseau) est souvent perturbée (déséquilibrés et distordus), et pour généraliser cette application, le système à base OLL est nécessaire pour extraire la composante fondamentale directe de la tension du réseau et la rendre sinusoïdale et équilibrée.

La méthode d'identification des courants harmoniques par l'intermédiaire des calculs des puissances réelle et imaginaire instantanées est la plus performante, et facile à réaliser et surtout la plus adaptée à identifier d'autre types de perturbation (déséquilibre du courant, puissance réactive).

Les résultats de simulation obtenu nous ont permis une compréhension approfondie du fonctionnement du filtre actif de puissance on vue de l'amélioration de la qualité de l'énergie.

En résumé, tous ces résultats de simulations et expérimentaux obtenues pour les deux stratégies de commande sont très satisfaisants et montrent bien le bon fonctionnement, l'efficacité et la robustesse du SAPF et confirment la bonne réponse dynamique des stratégies de commande appliquées.

Référence

[1] ABDELMADJID CHAOUI

FILTRAGE ACTIF TRIPHASE POUR CHARGES NON LINEAIRES

Thèse de doctorat, Université de Sétif, 2010.

[2] C. COLLOMBET, J.M. LUPIN & J. SCHONEK

« PERTURBATION HARMONIQUES DANS LES RESEAUX POLLUES ET LEUR TRAITEMENT »

Schneider Electric, cahier technique no. 152, Septembre 1999.

[3] C. Dewez,

MODELISATION D'UN FILTRE ACTIF PARALLELE TRIPHASE POUR LA DEPOLLUTION HARMONIQUE ET SYNTHESE D'UNE COMMANDE BASEE SUR LE REJET DE PERTURBATIONS

Thèse de doctorat, LAII-ESIP, Université de Poitiers, France, Décembre 2007.

[4] ZELLOUMA LAID

FILTRAGE ACTIF PARALLELE DES HARMONIQUES DU COURANT GENERES PAR UN PONT REDRESSEUR TRIPHASE NON COMMANDE

Thèse de Magister, Université BADJI Mokhtar Annaba, Algérie, 2006.

[5] M.A.E. ALALI

CONTRIBUTION A L'ETUDE DES COMPENSATEURS ACTIFS DES RESEAUX ELECTRIQUES BASSE TENSION

Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, ULP-Strasbourg 1, France, Septembre 2002.

[6] H. AKAGI

ACTIVE HARMONIC FILTERS

IEEE Trans. Of Power Electronics, vol. 93, no. 12, pp. 2128-2141, Dec. 2005.

[7] MOHAMED MAGRAOUI

VALIDATION DE TECHNIQUES DE COMMANDE D'UN FILTRE ACTIF PARALLELE

Thèse de doctorat, université du Québec, MONTREAL, Septembre 2007.

[8] L.D.H.B. AMAIA

COMMANDE AVANCEES DES SYSTEMES DEDIES A L'AMELIORATION DE LA QUALITE DE L'ENERGIE : DE LA BASSE TENSION A LA MONTEE EN TENSION

Thèse de doctorat, LEG, Institut National Polytechnique de Grenoble, France, Novembre 2006.

[9] M. AREDES, J. HÄFNER, K. HEUMANN

A COMBINED SERIES AND SHUNT ACTIVE POWER FILTER

IEEE/KTH Stockholm Power Tech. Conference, Stockholm, Sweden, Jun. 1995.

[10] H. FUJITA, H. AKAGI

THE UNIFIED POWER QUALITY CONDITIONER: THE INTEGRATION OF SERIES- AND SHUNT-ACTIVE FILTERS

IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 13, no. 2, pp.1312-1322, Mar. 1998.

[11] GHENAM TAREK

ETUDE ET REALISATION D'UN COMPENSATEUR ACTIF DE PUISSANCE COMMANDE PAR DSP

Thèse de Magister, Ecole Militaire Polytechnique, Algérie, Janvier 2005.

[12] SAHLI ABDESLEM

FILTRAGE ACTIF ET CONTROLE DE PUISSANCES : APPLICATION AUX SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES INTERCONNECTES AU RESEAU

Thèse de Magister, Université de Sétif, 2012.

[13] AFGHOUL HAMZA

SIMULATION D'UN SYSTEME DE FILTRAGE ACTIF A L'AIDE DE MATLAB/SIMULINK

Thèse de Master, Université de Sétif, 2011.

[14] M. GRANDPIERRE, B. TRANNOY

A STATIC POWER DEVICE TO REBALANCE AND COMPENSATE REACTIVE POWER IN THREE PHASE NETWORK: DESIGN AND CONTROL

IEEE Ind. Appl. Soc. Annual meeting, pp. 127-135, 1977.

[15] S. GUFFON

MODELISATION ET COMMANDES A STRUCTURE VARIABLE DE FILTRES ACTIFS DE PUISSANCE

Thèse de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 24 Juillet 2000.

[16] H. AKAGI, Y. KANAZAWA AND A. NABAE

GENERALIZED THEORY OF THE INSTANTANEOUS REACTIVE POWER IN THREE-PHASE CIRCUITS

Proceeding 1983 International power electronics conference. Tokyo, Japan, PP. 1375-1386, 1983.

[17] C.F.WAGNER AND R.D.EVANS

SYMMETRICAL COMPONENTS

Mc Graw-Hill Book Company , New York, 1933.

[18] M. AREDES

ACTIVE POWER LINE CONDITIONERS

Dr. Ing . Thesis technische universitat Berlin, Berlin. Germany March 1996.

[19] DJAZIA KAMEL

UNE APPROCHE ACTIVE DE FILTRAGE A BASE DE LA NOTION DE PUISSANCE REACTIVE INSTANTANEE

Thèse de Magister, Université DE Ferhat ABBAS De Sétif, Algérie, 2006.

[20] ZEBBICHE MOHAMED EL HADI

IMPLEMENTATION D'UN SYSTEME DE FILTRAGE ACTIF SOUS DSPACE

Thèse de Master, Université de Sétif, 2011.

[21] MOHAMED MAGRAOUI

VALIDATION DE TECHNIQUES DE COMMANDE D'UN FILTRE ACTIF PARALLELE

Thèse de doctorat, Université de Québec école de technologie nationale Canada, 2007.

[22] Mustapha KHELIFI et Ahmed SEKOUR

ETUDE DE LA CARTE DSPACE DS1104

Mémoire d'ingénieur, école nationale polytechnique, juin 2006.

[23] MAHESH K. MISHRA, AVINASH JOSHI, ARINDAM GHOSH

A NEW COMPENSATION ALGORITHM FOR BALANCED AND UNBALANCED DISTRIBUTION SYSTEMS USING GENERALIZED INSTANTANEOUS REACTIVE POWER THEORY

ELSEVIER Electric Power Systems Research 60 (2001) 42 (2012).

[24] NAIMISH ZAVERI, AJITSINH CHUDASAMA

CONTROL STRATEGIES FOR HARMONIC MITIGATION AND POWER FACTOR CORRECTION USING SHUNT ACTIVE FILTER UNDER VARIOUS SOURCE VOLTAGE CONDITIONS

ELSEVIER Electrical Power and Energy Systems

[25] MUSTAPHA SARRA

CONTRIBUTION A L'ETUDE DES FILTRES ACTIFS HYBRIDES

Thèse de doctorat, Université de Sétif, 2013.

[26] site internet : <http://www.dspace.fr/fr/fra/home/applicationfields.cfm>

[27] DS1104 R&D Controller Board Features, dSPACE.

المذكرة: تنفيذ نظام ترشيح فعال تحت مصدر جهد مشوه و غير متوازن
اللقب: **بن نعيجة** الاسم: **طارق** المؤطر: **كريم فاتح**
ملخص : هذه المذكرة تقدم مرشح فعال تفرعي للاستطاعة مقترح كحل لتصحيح عامل الاستطاعة, تخفيض قيمة التوافقيات, وتعويض الاستطاعة الرد فعلية في حالة مصدر الجهد مشوه و غير متوازن. هذا المرشح الفعال متحكم فيه بواسطة استر اتجبة مبنية علم, تقدير تيارات عن طريق نظرية الاستطاعة الحقيقية و التخيلية عن طريق استعمال Matlab/Simulink. نم ناكيد النتائج المحصلة في المحاكاة في المختبر باستعمال النموذج نفسه استخدم مع محيط dSPACE

كلمات مفتاحية: مرشح فعال, تقدير تيارات المصدر, dSPACE

Title : Active filter for an unbalanced and distorted distribution systems

Name : **BENNAIDJA** First Name: **Tarek** Directed by: **Krim Fateh**

Abstract: this memory presets a shunt active power filter proposed as solution for correction of the power-factor, reduction of the harmonic content, and compensation of reactive power Under Unbalanced and Distorted Voltages. The filter active is controlled by a strategy based on the the PQ theory to generate the signals necessary to this one, as the current of reference, and the control impulses of the inverter. A model of the filter is implemented by using Matlab/Simulink for evaluation of the filter performances. Afterward, this model is implemented under the dSPACE environment which confirmed the performances obtained from simulation.

A reel test has been done in labo to confirm the simulation results.

Key words: active power filter, estimation of source currents, dSPACE

Mémoire : Filtrage actif pour les réseaux déséquilibrés et distordus.

Nom : **BENNAIDJA** Prénom: **Tarek** Encadreur : **Krim Fateh**

Résumé : ce mémoire présente un filtre actif shunt de puissance comme solution pour la correction du facteur de puissance, réduction du taux d'harmonique, et la compensation de la puissance réactive dans le cas ou le réseau est déséquilibré et distordu. Ce filtre est commandes par une stratégie basé sur l'estimation des courants de références par la méthode des puissances instantanées pour la génération des signaux nécessaire à ce filtre comme le courant de référence, et les impulsion de commande de l'onduleur. Un modèle du filtre est implémenté à l'aide du Matlab/Simulink pour l'évaluation de ses performances. Ce modèle est en suit implémenté sous l'environnement du dSPACE et testé dans le laboratoire.

Mots clés : filtre actif de puissance, estimation des courants de références, dSPACE