

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Mémoire de Fin d'Étude

Présenté à

L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

En Commande Electrique

Présenté par

DJEDIDI tarek & DJOUADI abdelkader

Thème

Commande Prédictive d'un Filtre Actif

Parallèle

Soutenu le 27/05/2017. Devant le jury composé de :

Dr. BEKAKRA youcef

Maitre de conférences Président

Dr. MESBAHI nadhir

Maitre de conférences Rapporteur

Dr. KECHIDA reda

Maitre de conférences Examineur

Année Universitaire 2016/2017

REMERCIEMENT

*Nous tenons à remercier tout d'abord et avant
tout 'Dieu tout grand'.*

*Nous tenons à remercier chaleureusement tous se
qui avait la mains, de près ou de loin pour la mise en œuvre de ce fruit
intellectuelle.*

*nous présentons mes vastes et profonds remerciements
pour tous ceux qui ont participé à faire cette étude et à accomplir ce
travail, on citant l'encadreur*

*DR. MESBAHI NADHIR, qui ma fait l'honneur d'être promoteur de
notre travail, et nous nous adressons notre remerciements pour son
aide et ses conseils.*

*Enfin nous remercions chaleureusement; ensemble des amis et collègues qui ont
contribués à l'aboutissement de notre travail.*



Dédicace

Parce qu'il y a des choses plus faciles à écrire qu'à dire, je dédie ce

Modeste travail de fin d'étude :

A mes symboles d'affection et de tendresse Ma

chère maman et mon cher père

A ma femme

A Mon fils Mohamed raed

A mes frères

A ma chère sœur

A tous qui m'ont encouragé et aidé dans la réalisation de ce projet

A tous mes amis chacun de son nom

A tous mes collègues de promotion 2017

A tous les enseignants de ma période d'étude .

Tarek

Dédicace

Parce qu'il y a des choses plus faciles à écrire qu'à dire, je dédie ce

Modeste travail de fin d'étude :

A mes symboles d'affection et de tendresse Ma

chère maman et mon cher père

A mes frères

A ma grande famille

A tous qui m'ont encouragé et aidé dans la réalisation de ce projet

A tous mes amis chacun de son nom

A tous mes collègues de promotion 2017

A tous les enseignants de ma période d'étude .

Abdelkader

Sommaire

Liste des figures.....	I
Liste des tableaux.....	II
Liste des Symboles et Notations.....	III
Résumé.....	IV
Introduction générale	1

Chapitre I : Problématique des Harmoniques et les Solutions de Dépollution Harmonique

I.1 Introduction	4
I.2 Qualité de l'énergie électrique	4
I.2.1 Creux et coupures de tension.....	5
I.2.2 Fluctuations de tension.....	5
I.2.3 Déséquilibre du système triphasé de tension.....	6
I.2.4 Variation de fréquence.....	6
I.2.5 Harmoniques et inter harmoniques.....	7
I.2.6 Rang de l'harmoniques	8
I.2.7 Limites normalisées des harmoniques	8
I.3 Origine des harmoniques.....	9
I.3.1 Convertisseurs statiques	9
I.3.2 Eclairage.....	10
I.3.3 Fours à arc.....	10
I.3.4 Inductances saturées	10
I.3.5 Machines tournantes	10
I.4 Taux de distorsion harmonique	10
I.5 Facteur de puissance	11
I.6 Solution de dépollution des réseaux électrique.....	12
I.6.1 Solutions de dépollution traditionnelles	12
I.6.1.1 Dépollution des courants perturbateurs.....	12
I.6.1.2 Dépollution des tensions perturbatrices.....	12
I.6.1.3 Rééquilibrage des courants du réseau électrique.....	13
I.6.1.4 Compensation de la puissance réactive	13
I.6.1.5 Compensation des courants harmoniques	13
I.6.2 Solutions de dépollution moderne	14
I.6.2.1 Dépollution des courants perturbateurs.....	14
I.6.2.2 Solution de dépollution adoptée.....	15

I.7 Filtres actifs.....	15
I.7.1 Filtre actif parallèle (F.A.P).....	16
I.7.1.1 Principe de fonctionnement.....	16
I.7.2 Le filtre actif série.....	16
I.7.2.1 Principe de fonctionnement.....	16
I.7.3 La combinaison parallèle-série actifs (UPQC).....	17
I.8 Conclusion.....	18

Chapitre II : Filtre Actif Parallèle : Principe de Fonctionnement et Modélisation

II.1 Introduction	20
II.2 Principe du filtrage actif parallèle	20
II.3 Description d'un onduleur de tension	21
II.3.1 Représentation vectorielle.....	23
II.3.2 Etude de la partie commande du FAP triphasée.....	24
II.3.3 Détermination des courants harmoniques de référence.....	24
II.3.4 Méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées.....	25
II.3.5 Séparation des puissances perturbatrices.....	27
II.4 Commande de l'onduleur.....	29
II.5. Résultats de simulation	30
II.6 Interprétation des résultats.....	32
II.7 Conclusion	33

Chapitre III : Commande Prédictive de Courants Générés par le Filtre Actif

III.1 Introduction	35
III.2 Philosophie de la commande prédictive	36
III.3 Principe et la stratégie générale de la commande prédictive	36
III.4 Intérêts de la commande prédictive	37
III.5 Commande prédictive de courants du FAP.....	37
III.6 Commande prédictive de courants avec optimisation.....	38
III.7 Algorithme de la commande prédictive d'un FAP	40
III.8 Résultats de simulation	42

III.8	Interprétation des résultats.....	45
III.9	Conclusion	46
	Conclusion générale	47
	Références Bibliographiques.....	48

Liste des figures

Chapitre I

Figure .I.1.	Creux et coupures de tension	5
Figure .I.2.	Fluctuation de tension	6
Figure .I.3.	Déséquilibre du système de tension triphasé	6
Figure .I.4.	Variation de fréquence	7
Figure .I.5.	Harmoniques et interharmoniques	8
Figure .I.6.	Les principaux convertisseurs statiques qui absorbent des courants non-sinusoïdaux.	9
Figure .I.7.	Filtre passif résonnant	14
Figure .I.8.	Filtre passif amorti	14
Figure .I.9.	Filtre actif parallèle	16
Figure .I.10.	Filtre actif série	17
Figure .I.11.	Combinaison parallèle-série actifs (UPQC)	17

Chapitre II

Figure .II.1.	Circuit de puissance du filtre actif parallèle.	21
Figure. II.2.	Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur	23
Figure. II.3.	Séparation des puissances perturbatrices	28
Figure. II.4.	Schéma d'extraction des courants de référence.	29
Figure. II.5.	Principe de commande des courants par hystérésis	29
Figure. II.6.	Résultats de simulation	32

Chapitre III

Figure III.1.	Evolution temporelle de la prédiction à horizon fini	36
Figure III.2.	Schéma de la commande prédictive d'un FAP triphasé deux à niveaux connecté	38
Figure III.3.	schéma de principe de la commande prédictive	41
Figure III.4.	Résultats de simulation en régime permanent	43
Figure III.5.	Résultats de simulation en régime dynamique	45

Liste des tableaux

Chapitre. I

Tableau I.2	Limites normalisées des harmoniques	8
-------------	-------------------------------------	---

Chapitre. II

Tableau II.1	Tensions de sortie de l'onduleur.	23
--------------	-----------------------------------	----

Tableau II.2	Paramètres de simulation d'un filtre actif parallèle.	30
--------------	---	----

Liste des Symboles et Notations

Liste des Symboles

h	Rang de l'harmonique
p	Puissance active
q	Puissance réactive
S	Puissance apparente
D	Puissance déformante
R	Résistance
I	Courant
e_{sa}, e_{sb}, e_{sc}	Tensions instantanées simples du réseau
v_{sa}, v_{sb}, v_{sc}	Tensions instantanées au point de couplage
i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}	Courants débités par le réseau
R_f	Résistance du filtre de sortie
L_f	Inductance du filtre de sortie
v_{dc}	Tension continue du bus continu
S_{ki}	Fonction de commutation
i_α, i_β	Courant de charge selon les axes (α, β)
$i_{ref\alpha}, i_{ref\beta}$	Courants de référence
\tilde{p}, \tilde{q}	Composantes alternatives de p et q

Liste des Notations

THD	Total Harmonic Distortion
CEI	La Commission Electrotechnique Internationale
EDF	Electricité De France
FP	Facteur de Puissance
FPB	Filtre Passe-Bas
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
UPFC	Unified Power Quality Conditioner

ملخص

إن مشكلة التلوث بالتوافقيات في شبكات التوزيع الكهربائية هي في تقادم مقلق خاصة مع تزايد إستعمال الحمولات غير الخطية .

تمثل هذه المذكرة مساهمة في توضيح طريقة تحسين نوعية التيار الكهربائي في مثل هذه الشبكات . ندرس المصفي الفعال المتوازي ونكشف عن التيار الملوث باستعمال طريقة التحكم التنبؤي وقد أعطت هذه الأخيرة نتائج ممتازة .

أعطت المحاكاة التي أجريت خلال هذا العمل نتائج ممتازة تدل على أهمية هذا العمل في الترشيح التوافقي للتيار الكهربائي وكذلك في تحسين معامل الاستطاعة .

الكلمات المفتاحية : المصفي المتوازي ، التوافقات ، تيار محمل بالتوافقات .

Résumé

Dans l'objectif d'améliorer les performances des filtre actif, ce travail propose l'étude de la commande prédictive du filtre actif parallèle triphasé. En effet, ce mémoire traite cette problématique dans trois chapitres. Cette étude est initiée par la présentation et la définition des perturbations qui dégradent la qualité de l'énergie sur le réseau électrique, puis par une description des différentes solutions, traditionnelles et modernes, de dépollution harmonique.

La modélisation et l'identification des perturbations ont été ensuite présentées. Ensuite, nous abordons l'application de la commande prédictive en courant au filtre actif parallèle en vue de compenser les harmoniques de courants et la puissance réactive susceptibles d'apparaître dans les réseaux électrique. Les performances de compensation du filtre actif ont été, également, évaluées par simulation, à cet effet, de très bonnes performances ont été observées pour la stratégie proposée.

Mots clés

Commande prédictive, Filtre actif parallèle, Qualité de l'énergie électrique, Compensation des harmoniques.

Introduction générale

Une des branches de l'électronique en pleine expansion est l'électronique de puissance qui contrôle la qualité de l'énergie électrique ainsi que sa conversion en d'autres formes d'énergie afin de fournir des tensions et des courants aux différents types de charges selon les applications. En effet, les charges non linéaires perturbent le réseau qui les alimente en y injectant des courants harmoniques, ce qui est très mauvais pour le réseau électrique, car une dégradation de la qualité de l'énergie électrique sera une conséquence directe de l'utilisation d'équipements à convertisseurs statiques.

Cependant, grâce aux récents progrès réalisés sur les semi-conducteurs, l'électronique de puissance permet de compenser et de corriger tous ces indésirables. Il consiste à utiliser un convertisseur de puissance, assimilable à une source de courant, qui compense la perturbation harmonique provenant de la charge en injectant dans le réseau un courant harmonique en opposition de phase par rapport à celui de la charge [1].

Dans ce travail, nous avons opté pour un filtre actif parallèle de puissance destiné au filtrage des courants harmonique et la compensation de l'énergie réactive. L'objectif de cette mémoire est d'analyser en détail la commande prédictive en courant du filtre actif parallèle.

Ce rapport de mémoire est composé de trois chapitres distincts.

Dans le premier chapitre, nous présentons les différentes origines des perturbations affectant les réseaux électriques basse tension et les solutions de réduction des harmoniques, notamment le filtre actif parallèle.

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons le principe de fonctionnement et la modélisation du filtre actif parallèle. Ensuite, nous étudions les techniques d'identifications des courants harmoniques, en particulier, la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées.

Dans le troisième chapitre, nous montrons, par simulation numérique l'efficacité de la commande prédictive en courant appliquée au filtre actif parallèle.

Nous terminons par une conclusion sur l'ensemble de cette étude et nous proposons des perspectives à ce travail.

Chapitre I

*Problématique des Harmoniques
et les Solutions de Dépollution
Harmonique*

I.1.Introduction

La problématique des harmoniques, également appelée pollution harmonique, n'est pas un phénomène nouveau. Néanmoins, du fait que de plus en plus de charges non-linéaires se connectent au réseau, la problématique des harmoniques est devenue très répandue. Les charges non-linéaires provoquent une distorsion dans le courant, et donc dans la tension, ce qui peut entraîner un mauvais fonctionnement des dispositifs raccordés au réseau. D'où, l'intérêt d'éliminer ou repousser ces harmoniques vers les fréquences les plus élevées.

Un récepteur d'énergie est considéré par le réseau électrique comme une charge perturbatrice s'il absorbe des courants non sinusoïdaux ou des courants déséquilibrés ou s'il consomme de la puissance réactive. Les deux premiers types de perturbations peuvent déformer ou déséquilibrer les tensions du réseau lorsque l'impédance de celui-ci n'est pas négligeable. Le troisième réduit la capacité de production ou de transmission de la puissance active des générateurs, des transformateurs et des lignes électriques.

I.2.Qualité de l'énergie électrique

L'énergie électrique est fournie sous forme de tension constituant un système sinusoïdal triphasé dont les paramètres caractéristiques sont les suivants:

- Les fluctuations.
- le déséquilibre.
- la fréquence.
- la forme d'onde.

N'importe quelle perturbation affecte un ou plusieurs paramètres suivants du système:

Amplitude de tension ou de courant;

- Fréquence.
- Contenu spectral.

Deux facteurs ont une influence directe sur l'effet de la perturbation [2,3]:

- Durée de la perturbation.
- Impédance de la source.

La qualité de l'énergie 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. On a donc quatre possibilités distinctes de perturbation:

I.2.1. Creux et coupures de tension

Le creux de tension est une diminution de la tension à une valeur entre 10 % et 90 % de la tension nominale [3,4] pendant une durée allant de 10 ms jusqu'à quelques secondes.

Les creux de tension sont dus à des phénomènes naturels comme la foudre, ou à des défauts sur l'installation ou dans les réseaux tant publiques que ceux des utilisateurs.

le apparaissent également lors de manœuvres d'enclenchement mettant en jeu des courants de fortes intensités (moteurs, transformateurs etc.).

Une coupure de tension quant à elle est une diminution brutale de la tension à une valeur supérieure à 90 % de la tension nominale ou disparition totale pendant une durée généralement comprise entre 10 ms et une minute pour les coupures brèves et supérieure à une minute pour les coupures longues. La plupart des appareils électriques admettent une coupure totale d'alimentation d'une durée inférieure à 10 ms. La figure I.1 montre un exemple de creux et de coupure de tension [4] .

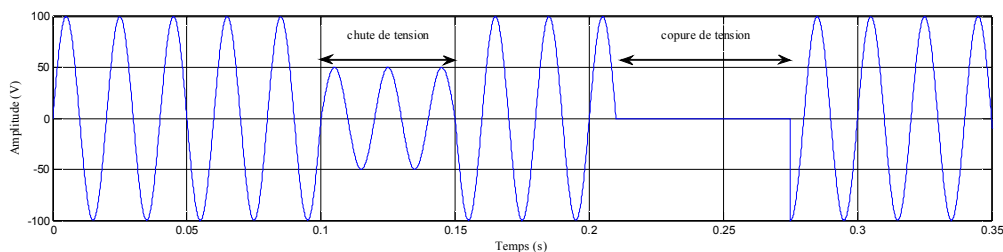


Fig. I.1. Creux et coupures de tension

I.2.2. Fluctuations de tension

Les fluctuations de tension sont des variations périodiques ou erratiques de l'enveloppe de la tension. Ce sont des variations brutales de l'amplitude de la tension situées dans une bande de 10 % et se produisent sur un intervalle de temps de quelques centièmes de secondes.

Elles sont en particulier dues à la propagation sur les lignes du réseau de courants d'appel importants.

L'origine principale de ces courants est le fonctionnement d'appareil dont la puissance absorbée varie de manière rapide, comme les fours à arc et des machines à souder. Ces fluctuations se traduisent par des variations d'intensité, visible au niveau de l'éclairage causant un gêne visuel perceptible pour une variation de 1 % de la tension.

Ce phénomène de papillotement est appelé flicker. La figure I.2 montre un exemple de fluctuation de tension [5].

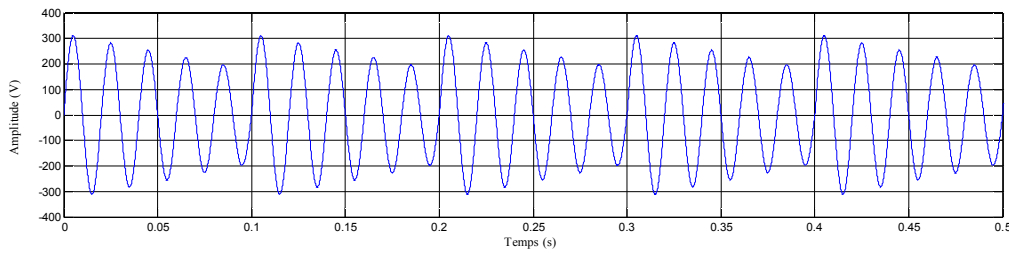


Fig. I.2. Fluctuation de tension

I.2.3. Déséquilibre du système de tension triphasé

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

Lorsque les trois tensions ne sont pas identiques en amplitude et/ou ne sont pas décalées d'un angle de 120° les unes par rapport aux autres, on parlera de déséquilibre du système triphasé comme le montre la figure I.3[5].

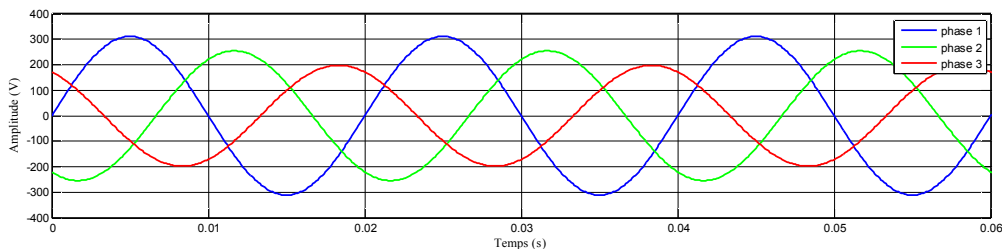


Fig. I.3. Déséquilibre du système de tension triphasé

I.2.4. Variation de fréquence

Une variation sensible de la fréquence du réseau peut apparaître sur les réseaux des utilisateurs non interconnectés ou alimentés par une source thermique autonome comme le montre la figure I.4. Au niveau des réseaux de distribution ou de transport, cette variation de la fréquence est très rare et n'est présente que lors de circonstances exceptionnelles, comme dans le cas de certains défauts graves sur le réseau. Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle $50 \text{ Hz} \pm 1\%$ [6,3].

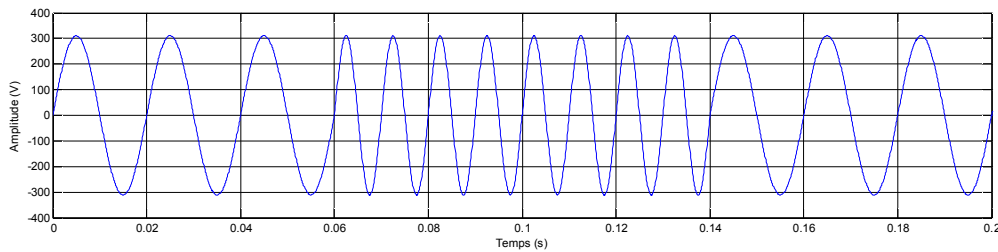


Fig. I.4. Variation de fréquence

I.2.5. Harmoniques et interharmoniques

Les harmoniques sont une superposition sur l'onde fondamentale à 50 Hz, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples entières de celle du fondamental. La principale source de la présence des harmoniques dans les réseaux électrique est l'utilisation de plus en plus croissante d'équipement de l'électronique de puissance à base de thyristors et de transistors.

Les interharmoniques sont superposées à l'onde fondamentale mais ne sont pas des multiples entières de la fréquence du réseau. L'apparition des inter harmoniques est en augmentation et leurs origines principales sont les convertisseurs de fréquence les variateurs de vitesse et d'autres équipements similaires de commande électrique.

La présence d'harmoniques de courant ou de tension conduit à des effets néfastes sur le réseau de distribution, comme par exemple [4,7]:

- L'échauffement des conducteurs, des câbles, des condensateurs et des machines dû aux pertes cuivre et fer supplémentaires,
- L'interférence avec les réseaux de télécommunication, causée par le couplage électromagnétique entre les réseaux électriques et les réseaux de télécommunication qui peut induire dans ces derniers des bruits importants,
- Le dysfonctionnement de certains équipements électriques comme les dispositifs de commande et de régulation
- En présence d'harmoniques, le courant et la tension peuvent changer plusieurs fois de signe au cours d'une demi-période. Par conséquent, les équipements sensibles au passage par zéro de ces grandeurs électriques sont perturbés,
- Les fréquences de résonance des circuits formés par les inductances du transformateur et les capacités des câbles sont normalement assez élevées, mais celles-ci peuvent coïncider avec la fréquence d'un harmonique; dans ce cas, il y

aura une amplification importante qui peut détruire les équipements raccordés au réseau,

- La dégradation de la précision des appareils de mesure.

La figure I.4 montre la superposition de l'harmonique sur un courant fondamental de fréquence 50 Hz.

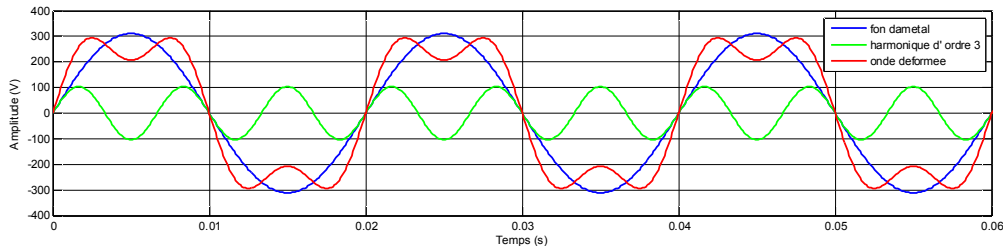


Fig. I.5. Harmoniques et interharmoniques

I.2.6. Rang de l'harmonique

C'est le rapport de sa fréquence (f_n) à celle du fondamentale [8] :

$$n = \frac{f_n}{f_1} \quad (I.1)$$

I.2.7. Limites normalisées des harmoniques

La série des normes de compatibilité électromagnétique (CEI 61000) définissent certaines limites concernant les harmoniques .

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

Tableau. I.1. Limites normalisées des harmoniques

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

I.3.Origine des harmoniques

I.3.1.Convertisseurs statiques

Les ponts redresseurs et en général les convertisseurs statiques (diodes et thyristors) sont générateurs de courants harmoniques[6,10].

La figure I.2 montre les principaux convertisseurs statiques qui provoquent la pollution harmonique des réseaux électriques.

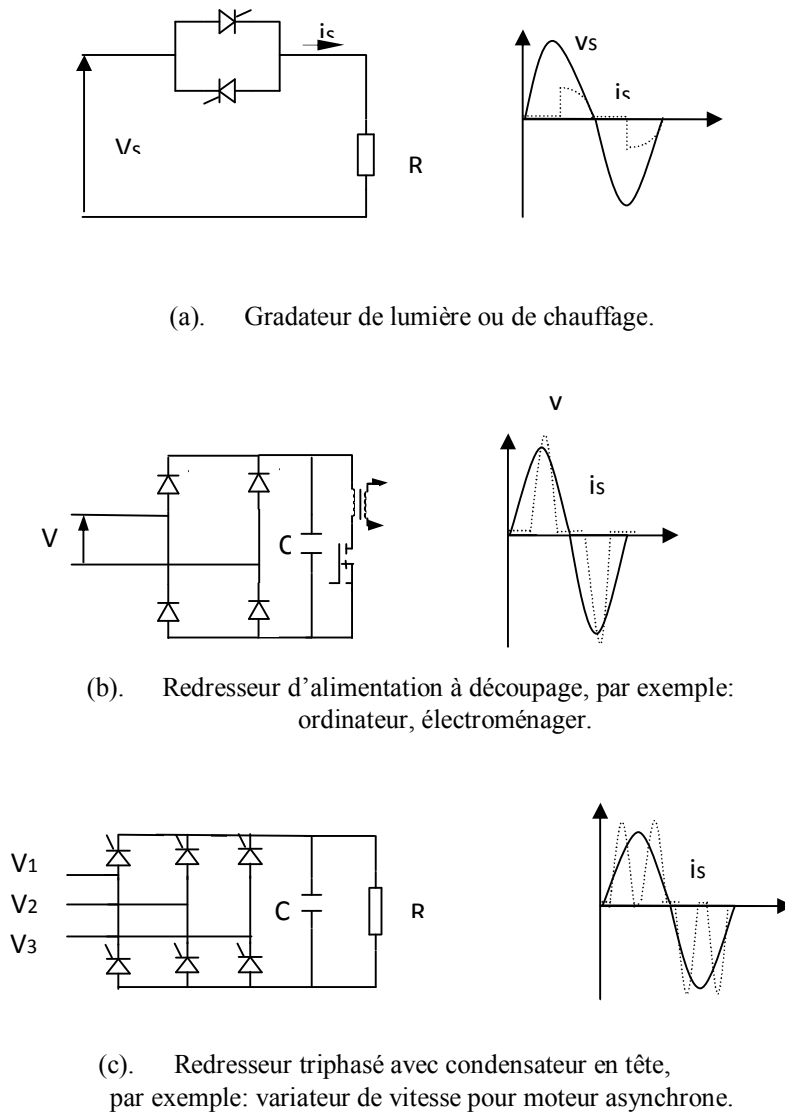


Fig .I.6. Les principaux convertisseurs statiques qui absorbent des courants non-sinusoïdaux.

I.3.2.Eclairage

L'éclairage, par lampes à décharge et tubes fluorescents, est générateur de courants harmoniques. Le taux individuel d'harmonique 3 peut même dépasser 100 % pour certaines lampes fluo-compactes modernes, d'où une attention particulière à porter à la détermination de la section et de la protection du conducteur neutre qui, véhiculant la somme des courants d'harmoniques 3 des trois phases, risque un échauffement important.

I.3.3.Fours à arc

Dans le cas du four à arc à courant alternatif : l'arc est non linéaire, dissymétrique et instable. Il va induire des spectres possédant des raies impaires, paires et un spectre continu (bruit de fond à toutes les fréquences). Le niveau spectral est en fonction du type de four, de sa puissance, de la période de fonctionnement considérée : fusion, affinage.. Aussi seules des mesures peuvent déterminer le spectre de façon précise.

Dans le cas du four à arc à courant continu : l'arc est alors alimenté par l'intermédiaire d'un redresseur. L'arc est plus stable qu'en courant alternatif. Le courant absorbé se décompose en un spectre semblable à celui d'un redresseur, et un spectre continu de niveau inférieur à celui d'un four à courant alternatif.

I.3.4.Inductances saturées

De telles inductances ont leur impédance fonction de l'amplitude du courant qui les traverse, et de fait elles provoquent des déformations notables de ce courant. C'est le cas, dans une certaine mesure, des transformateurs à vide soumis à une surtension permanente.

I.3.5.Machines tournantes

Les machines tournantes donnent des harmoniques de denture de rangs élevés et d'amplitudes souvent négligeables.

I.4.Taux de distorsion harmonique

On utilisera le terme THD (Total Harmonique Distorsion) pour désigner le taux de distorsion harmonique. Le THD s'exprime par rapport à la fréquence fondamentale et caractérise l'influence des harmoniques sur l'onde de signal déformée. Deux taux de distorsion harmonique sont distingués [9,11] :

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

Le premier s'exprime sous la forme :

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

- I_h : Les valeur efficace des différentes harmoniques du courant.
- I_1 : La valeur efficace du Courant fondamental.

Le terme THD correspond au (Total Harmonic Distortion), représente le rapport entre la valeur efficace des harmoniques et la valeur efficace du fondamental. Le taux de distorsion harmonique est une notion très utilisée pour définir l'importance du contenu harmonique d'un signal alternatif.

$$THD_v = \sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} \left(\frac{V_h}{V_1} \right)^2} = \sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} \left(\frac{|z_{cc}^h| I_n}{V_1^2} \right)^2} \quad (I.3)$$

V_1 : désigne la valeur efficace de v_1 .

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

I.5.Facteur de puissance

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

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

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

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

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

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

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

I.6.Solution de dépollution des réseaux électriques

Afin de compenser toutes les perturbations, séparées en deux types : courant et tension, deux groupes de solution de dépollution, traditionnelle et moderne, vont être étudiées. L'approche de la dépollution la mieux adaptée à notre objectif de recherche sera détaillée par la suite[6,9,10,12,13].

I.6.1.Solutions de dépollution traditionnelles

Suivant les types de perturbation, courant et tension, deux solutions traditionnelles de dépollution sont analysées.

I.6.1.1.Dépollution des courants perturbateurs

Afin de dépolluer les réseaux électriques de ce type de perturbation, plusieurs solutions ont été introduites dans la littérature.

I.6.1.2.Dépollution des tensions perturbatrices

Les tensions perturbatrices dans un réseau électrique basse tension sont principalement les creux de tension, les tensions harmoniques et les tensions déséquilibrés. Ces deux dernières sont généralement causées par la circulation des courants harmoniques et/ou déséquilibrés.

Pour dépolluer les réseaux électriques de ces deux types de perturbation, on peut limiter la circulation des courants perturbateurs en utilisant les solutions traditionnelles présentées précédemment dans le cas des perturbations de courant.

Quant aux creux de tension, la solution la plus fréquente dans les milieux sensibles (hôpitaux, sites industriels...etc.) est d'utiliser des groupes électrogènes qui se substituent au

réseau électrique. Mais la limitation de la puissance de ces groupes ainsi que la qualité médiocre de l'énergie électrique fournie restent un problème .

I.6.1.3. Rééquilibrage des courants du réseau électrique

Puisque les courants déséquilibrés dans un réseau électrique basse tension résultent généralement des charges monophasées et biphasées mal réparties, la première solution est la répartition égale des charges sur les trois phases.

Une autre solution est l'installation d'un compensateur passif composé d'inductance et de condensateur. Ce montage permet de présenter à 50 Hz une impédance équilibrée. Cependant, le montage de Steinmetz provoque un fort déséquilibre pour des fréquences différentes de 50 Hz, avec des résonances qu'il faut éviter d'exciter à proximité d'un générateur d'harmoniques.

I.6.1.4. Compensation de la puissance réactive

La puissance réactive est majoritairement consommée par les moteurs asynchrones et plus récemment par des dispositifs à base d'électronique de puissance. Différentes méthodes de compensation sont utilisées pour relever le facteur de puissance. La plus simple consiste à placer des batteries de condensateurs en parallèle avec le réseau. L'inconvénient de cette méthode réside dans le fait que la puissance réactive fournie par les condensateurs est constante et qu'elle ne s'adapte pas à l'évolution du besoin.

I.6.1.5. Compensation des courants harmoniques

Plusieurs solutions existent pour limiter la propagation et l'effet des harmoniques dans les réseaux électriques [6,9,13]:

- l'augmentation de la puissance de court-circuit du réseau et l'utilisation de convertisseurs peu polluants qui ont pour effet de diminuer la distorsion harmonique,
- l'utilisation de dispositifs de filtrage pour réduire la propagation des harmoniques produits par des charges non linéaires.
- 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. Parmi les dispositifs de filtrage les plus répandus, on distingue le filtre passif résonnant (Fig. I.6) et le filtre passif amorti ou passe-haut (Fig. I.7).



Fig. I.7. Filtre passif résonnant

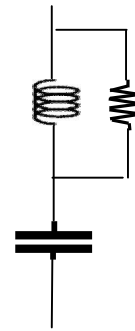


Fig. I.8. Filtre passif amorti

Le filtre résonnant est un filtre très sélectif. Il peut se connecter en parallèle avec d'autres filtres résonnants.

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

Ces dispositifs sont utilisés pour empêcher les courants harmoniques de se propager dans les réseaux électriques. Ils peuvent aussi être utilisés pour compenser la puissance réactive.

Malgré leur large utilisation dans l'industrie, ces dispositifs peuvent présenter beaucoup d'inconvénients :

manque de souplesse à s'adapter aux variations du réseau et de la charge, équipements volumineux, problèmes de résonance avec l'impédance du réseau.

I.6.2. Solutions de dépollution modernes

Les solutions de dépollution traditionnelle ne répondant plus à l'évolution des réseaux électriques et des charges à protéger, comme nous venons de le décrire précédemment, d'autres solutions modernes ont été proposées[6,9,13,14].

I.6.2.1. Dépollution des courants perturbateurs

La première solution de dépollution consiste à fabriquer la charge la moins polluante possible, comme le pont redresseur, de manière à réduire le taux d'émission d'harmoniques.

Les appareils à prélèvement sinusoïdal sont aussi proposés pour la compensation des harmoniques et de la puissance réactive. Cependant, ces solutions entraînent un coût supplémentaire et demandent plus que le savoir-faire habituel pour les mettre en œuvre. De plus, ces solutions ne résolvent pas les problèmes causés par les charges polluantes qui existent sur le marché.

Afin d'accompagner l'évolution des contraintes du fournisseur et du consommateur sans imposer un changement aux installations, une famille de filtres actifs parallèles a été proposée comme une solution de dépollution des perturbations en courant[6,9,8,13].

I.6.2.2.Solution de dépollution adoptée

Pour fournir aux consommateurs une bonne qualité de l'énergie électrique, même dans les conditions de fonctionnement les plus perturbées, les filtres actifs sont proposés comme des solutions avancées de dépollution des réseaux électriques. En effet, ces solutions peuvent s'adapter aux évolutions de la charge et du réseau électrique et ceci sans toucher aux installations du fournisseur d'énergie et du consommateur.

I.7.Filtres actifs

L'apparition de nouveaux composants semi-conducteurs, comme les thyristors GTO et les transistors IGBT, a permis d'envisager de nouvelles solutions de compensation des perturbations du réseaux électriques.

Les filtres actifs constituent une alternative intéressante aux solutions classiques. Flexibles car auto-adaptatifs, ils viennent s'ajouter à des structures déjà existantes de convertisseurs. Ils peuvent également être utilisés comme complément aux solutions traditionnelles de dépollution. Le rôle d'un filtre actif est de compenser en temps réel les perturbations, en tout ou en partie, présentes dans les réseaux électriques.

Les avantages de ces filtres actifs par rapport aux filtres passifs sont les suivants [5,6,9,10] :

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

Pourtant, ils possèdent aussi quelques inconvénients :

- leur coût élevé a limité leur implantation dans l'industrie .
- l'absence de réglementation spécifique n'incite pas leur intégration .
- les pertes sont légèrement plus élevées.

Le but de ces filtres est d'engendrer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à ce que le courant et la tension soient rendus sinusoïdaux. Le filtre actif est connecté en série ou en parallèle suivant qu'il est conçu respectivement pour compenser les tensions ou les courants harmoniques.

Dans cette partie du chapitre, nous allons introduire les principales structures, proposées dans la littérature, à savoir les filtres actifs parallèle, série, combiné parallèle-série et les structures hybrides actif-passif.

I.7.1.Filtre actif parallèle (F.A.P)

I.7.1.1.Principe de fonctionnement

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau, comme le montre la Fig. I.8, est le plus souvent commandé comme un générateur de courant. Il injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci. Le courant côté réseau est alors sinusoïdal. Ainsi l'objectif du filtre actif parallèle (F.A.P) consiste à empêcher les courants perturbateurs (harmoniques, réactifs et déséquilibrés), produits par des charges polluantes, de circuler à travers l'impédance du réseau, située en amont du point de connexion du filtre actif.

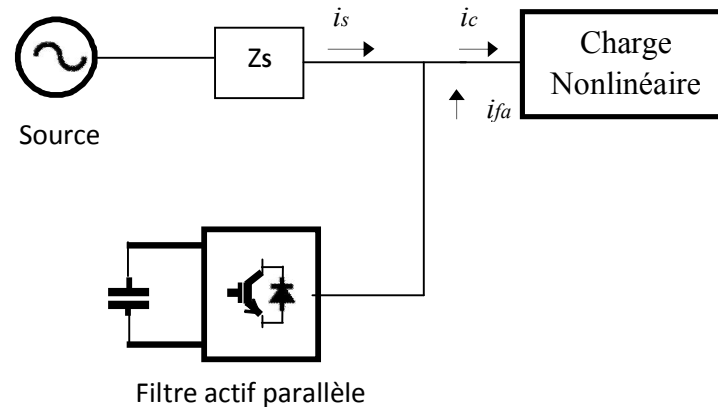


Fig I.9. Filtre actif parallèle

I.7.2.Filtre actif série

I.7.2.1.Principe de fonctionnement

Le filtre actif série se comporte dans ce cas, comme le montre la Fig. I.9, comme une source de tension qui s'oppose aux tensions perturbatrices (creux, déséquilibre, harmonique) venant de la source et également à celles provoquées par la circulation des courants

perturbateurs à travers l'impédance du réseau . Ainsi la tension aux bornes de la charge à protéger est purement sinusoïdale.

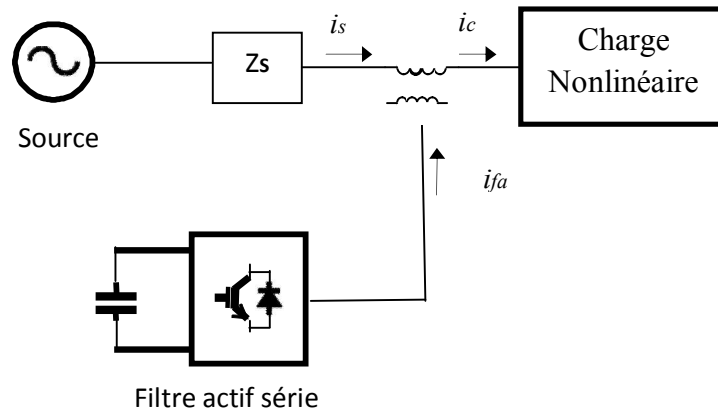


Fig. I.10. Filtre actif série

I.7.3. Combinaison parallèle-série actifs (UPQC)

La combinaison parallèle-série actifs, aussi appelée Unified Power Quality Conditioner (UPQC), résulte de l'association des deux filtres actifs parallèle et série, comme le montre la Fig. I.7. Profitant des avantages des deux filtres actifs, l'UPQC assure un courant et une tension sinusoïdaux du réseau électrique à partir d'un courant et d'une tension perturbés de celui-ci [2,3,4,7,8].

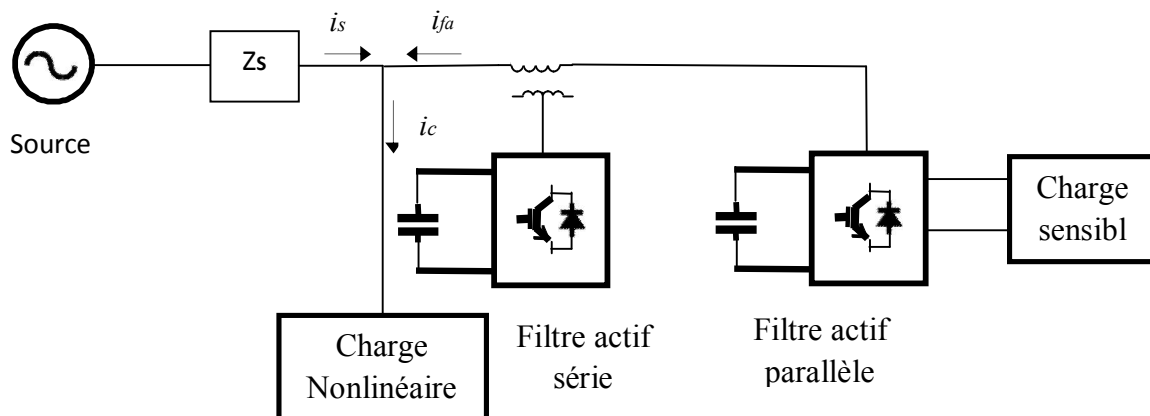


Fig. I.11. Combinaison parallèle-série actifs (UPQC)

I.8.Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les divers problèmes de pollution du réseau électrique engendrés par les charges polluantes (non-linéaires) et les différents moyens de dépollution.

Les harmoniques de courant ne peuvent pas être supprimés : c'est la charge qui les génère !

Il va donc falloir les confiner au plus près des charges polluantes pour éviter qu'elles ne remontent sur la totalité du réseau. Les principales méthodes utilisées correspondent à la mise en place de système de filtrage .

Cette méthode limitera la dégradation de l'énergie (déqualification de la tension de source) ainsi que leurs autres effets nocifs.

Une fois les harmoniques « maîtrisés », les pertes de puissance associées disparaissent. La totalité de la puissance fournie par le réseau est alors disponible pour les autres charges.

La puissance fournie par le réseau sera donc optimisée entraînant une réduction des coûts énergétiques.

Chapitre II

Filtre Actif Parallèle : Principe de Fonctionnement et Modélisation

II.1.Introduction

Dans ce chapitre, nous étudions la structure générale d'un FAP triphasé permettant de compenser les harmoniques de courant d'un réseau électrique triphasé à trois fils. Tout d'abord, nous introduirons les trois blocs principaux de la partie puissance et une partie commande, sert à contrôler la commutation des semi-conducteurs formant l'onduleur. Ensuite, nous examinons les trois blocs principaux de la partie contrôle, à savoir l'identification des courants de référence, la poursuite des courants de référence et la régulation de la tension continue.

Diverses méthodes ont été proposées par les auteurs pour déterminer les courants de source de référence.

II.2. Principe du filtrage actif parallèle

Le principe du filtrage actif des courants harmoniques consiste à ajouter en parallèle avec la charge polluante un dispositif constitué d'un onduleur de tension à deux niveaux commandé en temps réel de telle sorte que le courant de source soit sinusoïdal.

Pour ce faire, il faut premièrement identifier le courant de charge pour pouvoir connaître le courant harmonique i_h qu'il faut ajouter pour avoir un courant délivré par le réseau sinusoïdal.

Facilement expliquer le fonctionnement du filtre pour un courant de charge i_c imposé. Le courant harmonique i_h que doit fournir le filtre doit être égal à la différence entre le courant d'entrée i_c de la charge polluante et le courant sinusoïdal i_s fourni par la source [7].

Les filtres actifs parallèles sont les plus utilisés et les plus sujets aux recherches depuis plus de 30 ans. Le principe consiste à mettre en œuvre une source de courant qui permettra d'injecter un courant de compensation en opposition de phase avec les courants harmoniques créés par la charge [15].

Un filtre actif parallèle à deux niveaux est essentiellement constitué de trois parties (Voir la figure II.1) [9] :

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

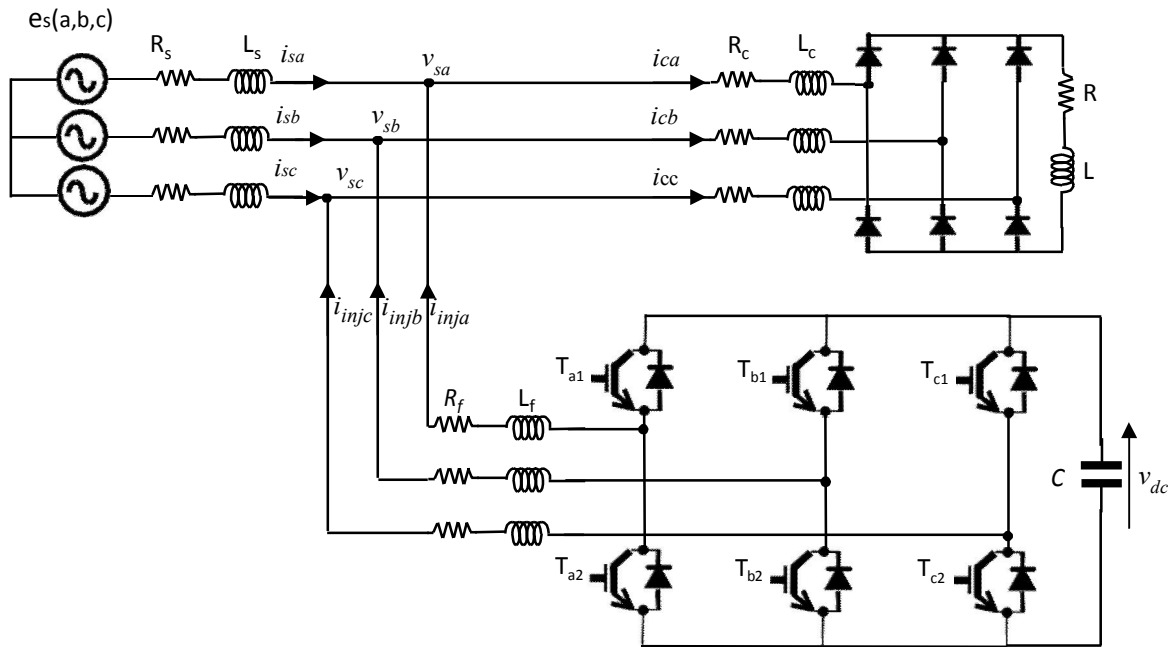


Fig. II.1. Circuit de puissance du filtre actif parallèle.

II.3.Description d'un onduleur de tension

L'onduleur triphasé de tension à deux niveaux à base d'IGBT est constitué de six interrupteurs bidirectionnels en courant (commandés à l'amorçage et au blocage) conduisant le courant dans les deux directions grâce aux diodes en antiparallèles. Il est associé généralement à deux étages passifs l'un du côté continu et l'autre du côté alternatif. L'étage passif du côté alternatif, a comme fonction principale le filtrage, il est constitué d'inductance de sortie [9,16,17] .

Pour la modélisation de l'onduleur, on considère un fonctionnement idéalisé :

Interrupteurs parfaits : La commutation des interrupteurs est instantanée (temps de fermeture et ouverture nul) et sans pertes. Enfin, la chute de tension dans les interrupteurs est considérée nulle en conduction.

Sources parfaites : La tension aux bornes du bus continu est constante et ne varie pas avec la puissance échangée.

Temps morts négligés : Le but de notre étude étant de réduire la fréquence de découpage, les temps mort seront donc peu influents.

L'objectif de la modélisation est de trouver une relation entre les grandeurs de commande et les grandeurs électriques de la partie alternative et continue de l'onduleur. Ainsi, comme les grandeurs de commande agissent sur les interrupteurs commandables, on peut définir l'état des interrupteurs T_{ki} ($k = a, b, c$ $i=1, 2$), on définit une fonction de commutation S_{ki} :

$$S_{ki} = \begin{cases} 1 & \text{Si } T_{ki} \text{ est fermé} \\ 0 & \text{Si } T_{ki} \text{ est ouvert} \end{cases} \quad (\text{II. 1})$$

Les tensions triphasées de sortie par rapport à la référence de la source continue peuvent être exprimées par :

$$S_{K2} = 1 - S_{K1} \quad (\text{II. 2})$$

$$\begin{bmatrix} V_{ao} \\ V_{bo} \\ V_{co} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{a1} \\ S_{b1} \\ S_{c1} \end{bmatrix} V_{dc} \quad (\text{II. 3})$$

Les tensions composées entre les phases sont données par:

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = 3 \begin{bmatrix} V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bo} - V_{co} \\ V_{co} - V_{ao} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{a1} - S_{b1} \\ S_{b1} - S_{c1} \\ S_{c1} - S_{a1} \end{bmatrix} V_{dc} \quad (\text{II. 4})$$

Ainsi, on peut facilement exprimer les tensions V_{kn} ($K=a,b,c$) en fonction de commutation S_{ki} Ski comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} V_{ab} - V_{ca} \\ V_{bc} - V_{ab} \\ V_{ca} - V_{bc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2S_{a1} - S_{b1} - S_{c1} \\ -S_{a1} + 2S_{b1} - S_{c1} \\ -S_{a1} - S_{b1} + 2S_{c1} \end{bmatrix} V_{dc} \quad (\text{II.5})$$

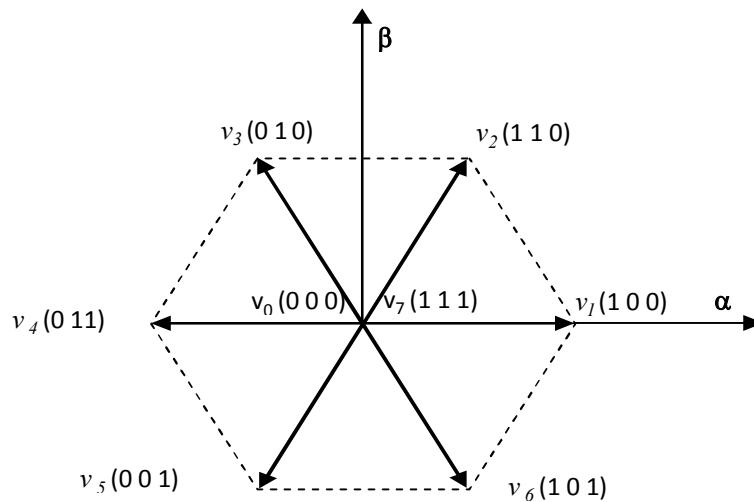
Puisque les variables S_{ai} , S_{bi} et S_{ci} prennent chacune deux valeurs, il en résulte huit combinaisons de commande, qui sont présentées dans le Tableau II.1.

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

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

II.3.1. Représentation vectorielle

Dans le plan biphasé (α , β), en considérant V_f le vecteur correspondant aux tensions de l'onduleur, les huit cas possibles du vecteur V_f sont donnés par la Fig. II.2.

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

Ou 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 références que si le vecteur formé par ces derniers reste à l'intérieur de l'hexagone montré dans la Fig. II.2[17].

II.3.2. Etude de la partie commande du FAP triphasé

Les performances des filtres actifs dépendent très fortement de plusieurs facteurs :

L'algorithme de commande utilisé pour identifier les références de courants ou de tensions ;

Les performances de la boucle de régulation de la tension du réservoir capacitif ;

Le mode de contrôle utilisé pour la génération des ordres de commande des interrupteurs de puissance.

Puisque, le but étant d'améliorer les caractéristiques du filtrage tout en utilisant une méthode de commande de complexité réduite. Pour ce dernier facteur, la stratégie de commande qui fait l'objet de notre étude sur le FAP triphasé est la commande par hystérésis classique. Pour cela, nous donnons dans cette section un détail approfondi sur cette technique.

II.3.3 Détermination des courants harmoniques de référence

Notre travail consiste à étudier un système électrique composé d'un réseau triphasé alimentant une charge polluante caractérisée par redresseur triphasé à base des thyristors et un filtre actif connecté en parallèle avec le réseau. Dans ce cas le filtre actif parallèle se comporte comme un générateur de courant, il est commandé de façon à injecter au réseau des courants harmoniques de même amplitude mais en opposition de phase avec ceux absorbés par la charge, le courant de source sont de ce fait sinusoïdaux.

Afin d'obtenir une bonne compensation des courants de la charge non linéaire, l'unité de contrôle doit fournir à la source de courant commandée une consigne qui correspond au courant harmonique du courant de la charge. Différentes méthodes d'identification des courants de compensation peuvent être employées, les trois méthodes les plus couramment utilisées sont [18,19,20] :

La première méthodes consiste à extraire le courant fondamental de charge à l'aide d'un filtre passe bande. Sachant que les fréquences des harmoniques ne sont pas assez éloignées de celle du fondamental, il est donc nécessaire d'employer un filtre très sélectif. Mais ce sera difficile d'obtenir une atténuation importante du signal fondamental sans que les harmoniques ne soient affectés ni en module, et surtout, ni en argument.

Une autre méthode est basée sur l'analyse spectrale du courant polluant. Lorsque la charge polluante crée des courants non stationnaires, la Transformée de Fourier Glissante peut être utilisée. Cette méthode permet de calculer les amplitudes et les phases de tous les harmoniques, mais le temps de calcul, pour un processus numérique en temps réel, peut être trop important.

La troisième méthode utilise les notions des puissances réelle et imaginaire instantanées afin de séparer le fondamental dans le domaine fréquentiel. L'élimination de la composante fondamentale sera à ce moment là facile à mettre en œuvre. Cette méthode qui réalise dans la plupart des filtres actifs actuellement en service dans le monde. C'est cette méthode que nous allons utiliser tout au long de ce mémoire.

II.3.4. Méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées

Cette méthode introduit par H. Akagi qui est une méthode temporelle. Elle était utilisée afin d'éviter les difficultés dues au nombre élevé de calcul lors de la mise en œuvre de méthodes fréquentielles telle que la transformée de Fourier (Transformées de Fourier rapide ou discrète), exploite la transformation de Concordia de tensions simples et courants de ligne, afin de calculer les puissances réelle, imaginaire et homopolaire instantanées. Elle permet de transformer la composante fondamentale en une composante continue et les composantes harmoniques en composantes alternatives.

Cette transformation est nécessaire si nous voulons éliminer facilement la composante continue. Le principe de la méthode de puissances réelle, imaginaire et homopolaire instantanées est énoncé ci-dessous [9,21] :

$$\begin{bmatrix} V_{\alpha} \\ V_{\beta} \end{bmatrix} = [C_{32}] \cdot \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} = [C_{32}] \cdot \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

Avec C_{32} la matrice de transformation développée par Concordia.

$$[C_{32}] = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \begin{bmatrix} -1 & -1 \\ 1 & 2 \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

A partir des vecteurs $V_{s\alpha\beta}$ et $i_{c\alpha\beta}$ décrivant le système des tensions et le système des courants dans le repère (α, β) , on applique le concept des puissances instantanées défini par akagi [4,8,12] valable aussi bien en régimes transitoires que dans le cas des régimes permanents. Cette théorie introduit une décomposition de puissances instantanées dans le plan (α, β) . Les puissances réelle et imaginaire instantanées, notées respectivement p et q , sont définies par la relation matricielle suivante :

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

En remplaçant les tensions et les courants diphasés par leur homologues triphasés, nous tenons :

$$p = V_\alpha \cdot i_\alpha + V_\beta \cdot i_\beta = V_{sa} \cdot i_{ca} + V_{sb} \cdot i_{cb} + V_{sc} \cdot i_{cc} \quad (\text{II.10})$$

$$q = -V_\alpha \cdot i_\beta + V_\beta \cdot i_\alpha = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[(V_{sc} - V_{sb}) \cdot i_{ca} + (V_{sa} - V_{sc}) \cdot i_{cb} + (V_{sb} - V_{sa}) \cdot i_{cc} \right] \quad (\text{II.11})$$

A partir des équations (II.10) et (II.11), p et q peuvent être exprimées en composantes AC et DC, telles que: [5,20]

$$\begin{cases} p = \bar{p} + \tilde{p} \\ q = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad (\text{II.12})$$

\bar{p} : Composante DC de p liée au courant actif fondamental conventionnel

\bar{q} : Composante AC de p , dépourvue de valeur moyenne et liée aux courants harmoniques causés par les composantes AC de la puissance instantanée réelle

De la relation (II.9) donnant les puissances réelle et imaginaire instantanées découle l'expression suivante pour les courants i_α et i_β :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \cdot \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

En considération les équations (II.13) (II.12), on sépare le courant de charge dans le plan α - β en trois composantes active et réactive à la fréquence fondamentale et la somme des harmoniques. Ceci conduit à :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \cdot \left\{ \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{p} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \right\} \quad (\text{II.14})$$

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

$$\begin{bmatrix} i_{ref\alpha} \\ i_{ref\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \cdot \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ V_\beta & -V_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{p} \\ \bar{q} + \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

Les courants triphasés sont obtenus à partir des courants diphasés $i_{ref\alpha}$ et $i_{ref\beta}$ par la transformation inverse de Concordia. Ces courants représentent les perturbations et deviennent les courants de référence qui sont à injecter en opposition de phase sur le réseau électrique pour éliminer les harmoniques.

$$\begin{bmatrix} i_{refa} \\ i_{refb} \\ i_{refc} \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & \sqrt{3} \\ 2 & 2 \\ -1 & -\sqrt{3} \\ \sqrt{2} & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ref\alpha} \\ i_{ref\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

II.3.5. Séparation des puissances perturbatrices

le filtre de puissance chargé d'isoler les puissances active et réactive comme montre la Figure II.3 et leurs caractéristiques concernant le résidu harmonique sont différentes. Ils n'ont pas donné entière satisfaction car :

- Pour obtenir une extraction satisfaisante, le régime dynamique est lent. En générale, la fréquence de coupure est choisie assez basse, entre 5 Hz et 35 Hz, ce qui engendre alors une instabilité du filtre actif lors de variations rapides de la charge.
- Dans le cas contraire, si l'on choisit une fréquence de coupure plus élevée, la précision de la détermination de la composante alternative est altérée et peut s'avérer insuffisante [20].

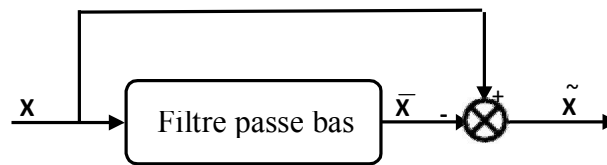


Fig .I.3. Séparation des puissances perturbatrices

L'ordre du filtre passe-bas définit la dynamique et l'efficacité d'atteindre l'objectif de compensation. L'inconvénient majeur d'utilisation d'un filtre d'ordre élevé et le temps de calcul plus long, mais dans notre cas ce temps est relativement très faible en contre part la précision de séparation des composantes alternatives est remarquablement très élevée [22].

Dans notre étude on a choisi deux filtres d'ordre 2. Les relations suivantes donnent les expressions générales des fonctions de transferts d'un filtre passe-bas du deuxième ordre :

$$F_{pb}(S) = \frac{W_0^2}{S^2 + 2\xi_0 \omega_0 S + \omega_0^2} \quad (\text{II.17})$$

Avec :

- $\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f_0$, f_0 est la fréquence de coupure du filtre ;
- S : l'opérateur de Laplace ;
- ξ_0 : dépassement.

Le schéma de Figure II.4 illustre les différentes étapes permettant l'obtention des composantes harmoniques du courant d'une charge non linéaire. La théorie (p-q) présentée

auparavant est valable uniquement pour les systèmes triphasés dépourvus de composante homopolaire.

L'extraction des courants des harmoniques dans des applications monophasées ne peut pas être réalisée par cette méthode. Elle est applicable dans le cas où les tensions V_{sabc} sont déformées [23].

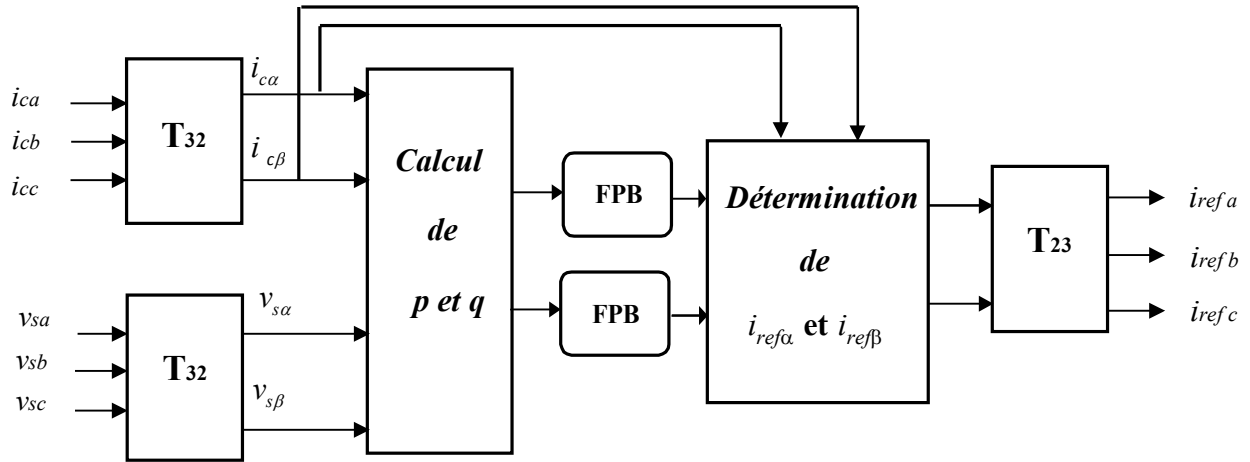


Figure. II.4. Schéma d'extraction des courants de référence.

II.4. Commande de l'onduleur

Le but de la commande de l'onduleur est de permettre la meilleure reproduction des courants perturbés de référence, à travers les ordres de commande appliqués aux drivers interrupteurs de puissance. Parmi elles on a la commande par hystérésis [18].

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 et le courant produit par l'onduleur. 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 [24].

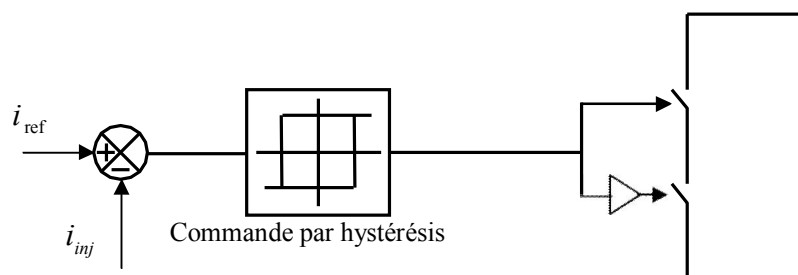


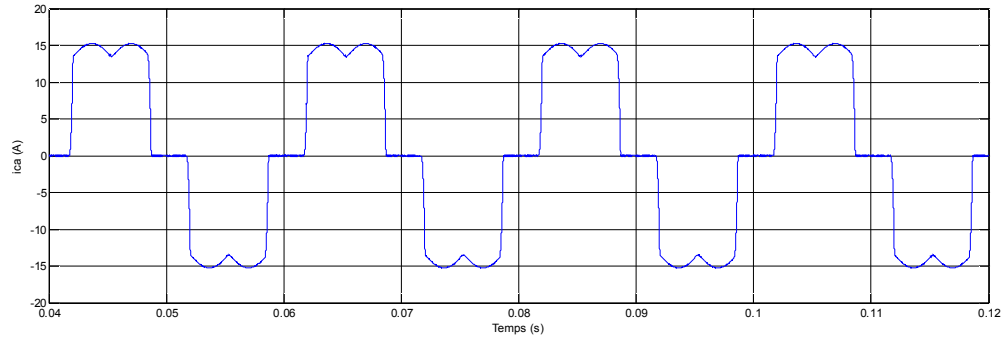
Fig. II.5. Principe de commande des courants par hystérésis

II.5 .Résultats de simulation

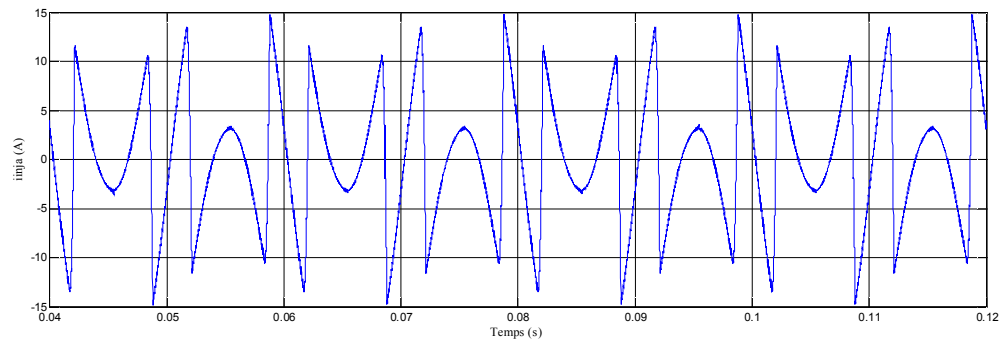
On premier lieu en commence par voir le comportement en régime permanent du filtre actif parallèle commandé en courant par hystérésis. Les simulations ont été effectuées sous Matlab/Simulink. Les paramètres du système utilisés dans ces simulations sont donnés dans le Tableau II.1. La tension de source est multipliée par un facteur de $k = 1/10$ pour bien visualiser les autres signaux.

Tableaux. II. Paramètres de simulation d'un filtre actif parallèle.

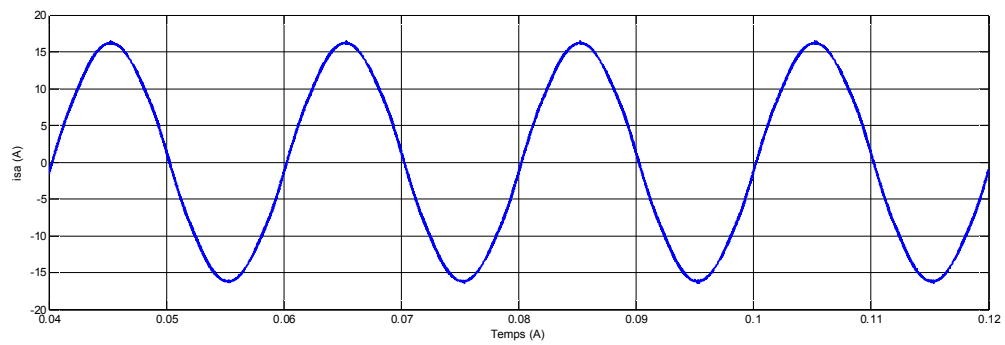
Paramètre		Valeur numérique
Réseau électrique	E_s	220 V
	Fréquence f	50 Hz
	Résistance R_s	0.25 m Ω
	Inductance L_s	19.4 μ H
Charge perturbatrice	Résistance R	35.27 Ω
	Inductance L	10 mH
	Résistance R_c	1.2 m Ω
	Inductance L_c	0.3 mH
Filtre actif parallèle	Résistance R_f	0.2 m Ω
	Inductance L_f	4.75 mH
	Tension v_{dc}	800 V
	Condensateur C	8.8 mF



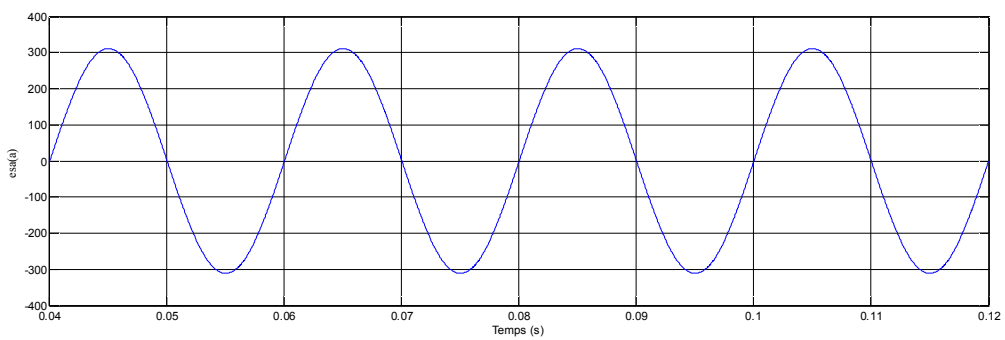
A) Courant de la charge



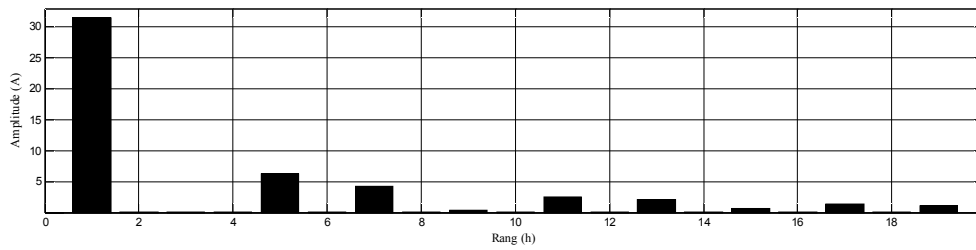
B) Courant du filtre



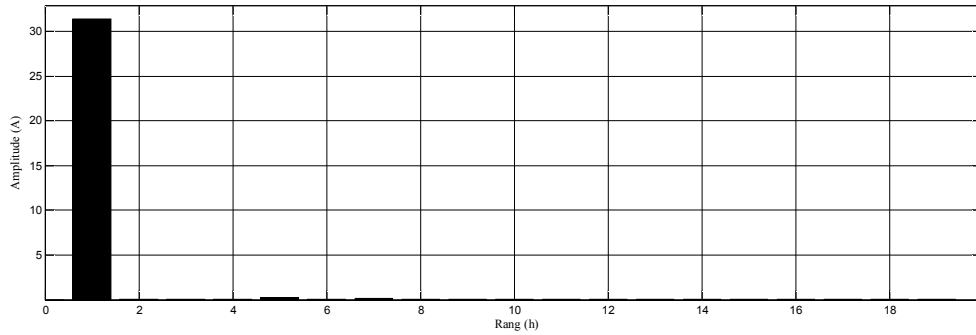
C) courant de source



D) tension de source



E) Spectre harmonique du courant de source avant compensation



F) Spectre harmonique du courant de source après compensation.

Fig.II.5. Résultats de simulation

II.6. Interprétation des résultats

L'association de la charge polluante avec un réseau provoque une déformation des courants de ligne (forme créneau) .

Le filtre est commandé par la stratégie de commande par hystérésis. On l'applique pour une charge non linéaire constituée d'un redresseur triphasé débitant sur une charge RL.

On remarque que les courants harmoniques générés par le filtre suivent leurs références. Ce qui valide l'algorithme de commande que l'on a utilisé.

L'application de la méthode de puissance instantanée pour la détermination des courants harmoniques de référence, permet d'avoir un courant de source sinusoïdal non décalé par rapport au courant de source réel.

II.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présentés le filtre actif parallèle comme un compensateur très efficace contre les différentes perturbations provoquées par les charges polluées, à savoir :

- Les composantes harmoniques injectées par la charge ;
- Les courants réactive générés par la charge ;
- Le déséquilibre dans les courants de la charge.

Le filtre actif parallèle permet face à ces perturbation d'injecté dans le réseau les composantes suivantes :

- Les courant harmoniques de la charge en opposition de phase ;
- Les courants réactives ;
- La composante homopolaire et inverse des courant de la charge.

On a trouvé que le dimensionnement du filtre actif parallèle repose sur l'objectif de compensation. La méthode d'identification utilisée la théorie p, q , donne une grande flexibilité et bonne précision avec un temps de réponse relativement très faible. L'inconvénient majeur de cette méthode qu'elle n'était pas adaptée au cas d'une tension déséquilibrée et/ou déformée du réseau.

Chapitre III

Commande Prédicative de Courants Générés par le Filtre Actif

III.1.Introduction

La commande prédictive est une technique de commande avancée de l'automatique. Elle a pour objectif de commander des systèmes industriels complexes. Le principe de cette technique est d'utiliser un modèle dynamique du processus à l'intérieur du contrôleur en temps réel afin d'anticiper le futur comportement du procédé.

La commande prédictive se différencie des autres techniques de commande par le fait que doit être résolu en ligne, elle consiste à optimiser, à partir des entrées/sorties d'un système, le comportement futur prédit du système considéré. La prédiction est faite à partir d'un modèle interne du système sur un intervalle de temps fini appelé horizon de prédiction. La solution du problème d'optimisation est un vecteur de commande dont la première entrée de la séquence optimale est injectée au système. Le problème est à nouveau résolu sur l'intervalle de temps suivant en utilisant les données du système actualisé.

III.2.philosophie de la commande prédictive

La philosophie de la commande prédictive est donc, connaissant la sortie du processus à commandé, de déterminer la commande permettant de lui faire rallier la consigne selon une trajectoire prédéfinie (trajectoire de référence) sur la sortie du processus en accord avec la figure (III-1). Il s'agit donc déterminer la séquence future de commande à appliquer à l'entrée du processus afin de réaliser le ralliement. Seule la première commande est appliquée, les autres commandes seront oubliées car à la période d'échantillonnage suivante, les séquences sont décalées, une nouvelle sortie est mesurée et la séquence d'opération est alors recommencée à chaque période d'échantillonnage selon le principe de l'horizon fuyant.

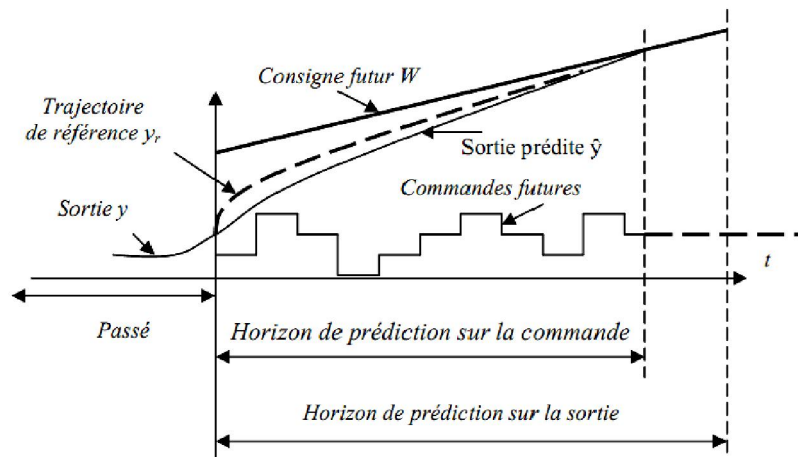


Fig.III.1 Evolution temporelle de la prédiction à horizon fini

En réalité, le modèle du processus dit modèle interne (implanté dans le calculateur numérique) ne permet de prédire que l'évolution de sa propre sortie, puisque le modèle adopté est imparfait à cause des erreurs d'identification des perturbations non prises en compte et des simplifications effectuées permettant une utilisation en temps réel. Il en résulte que la sortie du processus est différente de celle du modèle [25,26,27].

III.3.Principe et la stratégie générale de la commande prédictive

Le principe de base de la commande prédictive consiste de prendre en compte, à l'instant actuel, le comportement futur, par le biais d'utilisation explicite d'un modèle numérique du système dans le but de prédire la sortie dans le future, sur un horizon fini. Un des intérêts des méthodes prédictive réside dans le fait que, pour une consigne pré calculée sur un certain horizon, il est ainsi possible d'exploiter les informations de trajectoire

prédéfinies situées dans le futur ,étant donné que le but est de faire correspondre la sortie du système avec consigne sur un horizon fini[28].

III.4.Intérêts de la commande prédictive

La plupart des régulations industrielles sont réalisées souvent avec des régulateurs PID analogiques, avec une efficacité remarquable et un rapport prix/performance avec lequel il est difficile de les rivaliser. Toutefois, ce type de régulateur ne couvre pas tous les besoins et ses performances souffrent dans un certain champ d'applications dont on cite [27,29]:

- Les processus difficiles, notamment non linéaires, instables, non stationnaires, à grand retard purs et aussi multi variables.

- Lorsque les performances sont tendues par l'utilisateur, notamment : forte atténuation des perturbations, erreur de traînage nulle en poursuite, réponse en temps minimal, ce qui amène à fonctionner sous contraintes qui affectent soit les variables de commande, soit les variables internes du processus.

- Ces limitations ont favorisé l'éclosion de la commande prédictive à base de modèle numérique puisque sur le plan technique, l'accessibilité est plus aisée aux calculateurs numériques susceptibles de réaliser des traitements algorithmiques, intégrant calcul et logique qu'aux régulateurs purement analogiques. En conséquence, le régulateur prédictif va être construit sur la base d'un modèle interne, qu'il va utiliser sur le site, en temps réel.

- La richesse de la commande prédictive provient du fait qu'elle n'est pas seulement capable de contrôler des processus simples du premier et du second ordre, mais aussi des processus complexes, notamment les processus avec temps de retard assez long, processus instable en boucle ouverte sans que le concepteur prenne trop des précautions spéciales.

Pendant les dernières années, différentes structures du contrôleur prédictif ont été développées, on peut citer la commande prédictive généralisée (GPC), qui a connu un grand essor en tant que technique de commande avancée depuis le milieu des années 80 .

III.5.Commande prédictive de courants du FAP

La stratégie de commande prédictive de courants est basée sur la recherche de l'optimum d'une fonction de performance (fonction cout) permettent de déterminer le vecteur de commande optimal , parmi l'ensemble des vecteurs possibles , à appliquer à l'entrée du

redresseur durant chaque période de commutation . elle consiste donc à appliquer un seul vecteur de commande durant cette période .

Le schéma fonctionnel de la commande prédictive d'un FAP est présenté sur la figure (III-2):

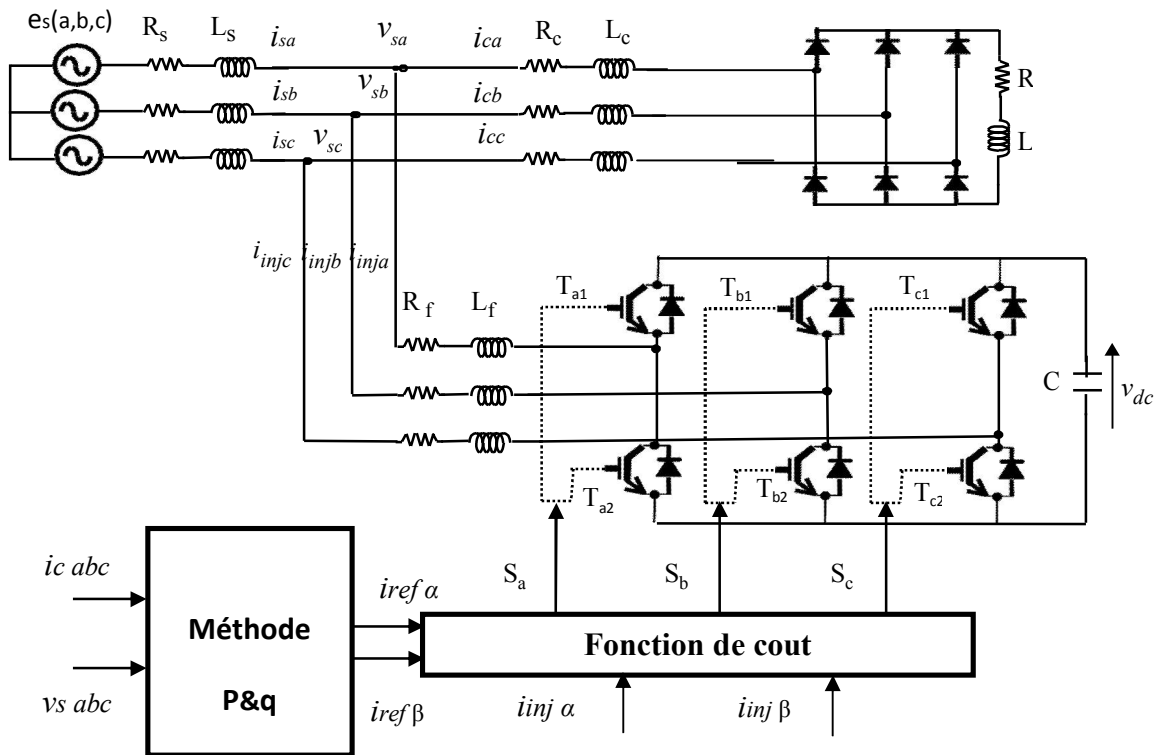


Fig.III.2.Schéma de la commande prédictive d'un FAP triphasé deux à niveaux connecté à une charge non-

III.6.Commande prédictive de courants avec optimisation

Puisqu'elle basée sur la recherche du vecteur de commande optimal, cette stratégie de commande prédictive nécessite tout d'abord de déterminer l'expression analytique des variations provoquées par l'application de chacun des vecteurs de commande sur les courants absorbés par la charge , et ce durant un intervalle de temps égale à la période de commutation .la dynamique de ces courants est géré par le système d'équation différentielles de premier ordre ci-dessous [13,30,31] :

$$\begin{cases} v_{fa} = R_f i_{inja} + \frac{L_f di_{inja}}{dt} + e_{sa} \\ v_{fb} = R_f i_{inj b} + \frac{L_f di_{inj b}}{dt} + e_{sb} \\ v_{fc} = R_f i_{inj c} + \frac{L_f di_{inj c}}{dt} + e_{sc} \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

Dans le repère α - β et pour tensions de réseau équilibré, le système d'équations précédent est équivalent au système d'équation ci-après :

$$\begin{cases} v_{f\alpha} = R_f i_{inj\alpha} + \frac{L_f di_{inj\alpha}}{dt} + e_{s\alpha} \\ v_{f\beta} = R_f i_{inj\beta} + \frac{L_f di_{inj\beta}}{dt} + e_{s\beta} \end{cases} \quad (\text{III. 2})$$

Pour simplifier l'équation précédent, l'effet de la résistance " R_f " est considéré négligeable et une discrétisation du premier ordre, sur la période de commutation T_s est appliquée à l'équation résultante. La variation des deux composantes du vecteur de courants entre deux instants d'échantillonnage successifs est alors donnée par la formule :

$$\begin{cases} \Delta i_{\alpha} = i_{inj\alpha}(k+1) - i_{inj\alpha}(k) = \frac{T_s}{L} [e_{s\alpha}(k) - v_{f\alpha}(k)] \\ \Delta i_{\beta} = i_{inj\beta}(k+1) - i_{inj\beta}(k) = \frac{T_s}{L} [e_{s\beta}(k) - v_{f\beta}(k)] \end{cases} \quad (\text{III. 3})$$

Cependant, le vecteur de tension à la sortie du filtre, " $v_{\alpha\beta}$ " ne peut avoir que sept valeurs en fonction des différents états possibles des interrupteurs constituant le pont triphasé. En prenant en compte cette propriété et si le même vecteur de commande est maintenu à la sortie du filtre pendant la période T_s , uniquement sept variations du vecteur de courants sont envisageables. L'équation (III.3) précédente peut donc s'écrire sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \Delta i_{\alpha i}(k) = \frac{T_s}{L} [e_{\alpha}(k) - v_{\alpha i}] \\ \Delta i_{\beta i}(k) = \frac{T_s}{L} [e_{\beta}(k) - v_{\beta i}] \end{cases} \quad i=0,1,2,\dots,7 \quad (\text{III.4})$$

L'objectif de la commande prédictive de courant consiste à sélectionner le vecteur de commande adéquat minimisant l'erreur des courants générés à chaque instant d'échantillonnage. Le vecteur de courant au prochain échantillon "k+1", dû à l'application du i éme vecteur de commande, est donné par l'expression ci-après :

$$\begin{cases} i_{\alpha}(k+1) = i_{\alpha}(k) - \Delta i_{\alpha i}(k) \\ i_{\beta}(k+1) = i_{\beta}(k) - \Delta i_{\beta i}(k) \end{cases} \quad i=0,1,2,\dots,7 \quad (\text{III.5})$$

Tenant compte de cette dernière équation, l'erreur de suivi de référence des deux composantes du vecteur de courants au prochain instant d'échantillonnage est exprimée par l'équation (III.6) :

$$\begin{cases} i_{ref\alpha}(k+1) - i_{\alpha}(k+1) = i_{ref\alpha}(k+1) - i_{\alpha}(k) - \Delta i_{\alpha i}(k) \\ i_{ref\beta}(k+1) - i_{\beta}(k+1) = i_{ref\beta}(k+1) - i_{\beta}(k) - \Delta i_{\beta i}(k) \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

Pour aboutir à une commande performante et simultanée des deux courants i_{α} et i_{β} , il est indispensable de définir une fonction de performance, relative aux deux erreurs de courant à optimiser. Cette dernière peut avoir plusieurs expressions analytiques. Dans notre travail, nous proposons une expression pour cette fonction. Elle est définie par la relation suivante :

$$g = \left| i_{ref\alpha} - i_{\alpha}^p \right| + \left| i_{ref\beta} - i_{\beta}^p \right| \quad (\text{III.7})$$

III.7 Algorithme de la commande prédictive d'un FAP

La schéma de principe de la commande prédictive est illustré sur la figure (III-3) [31]:

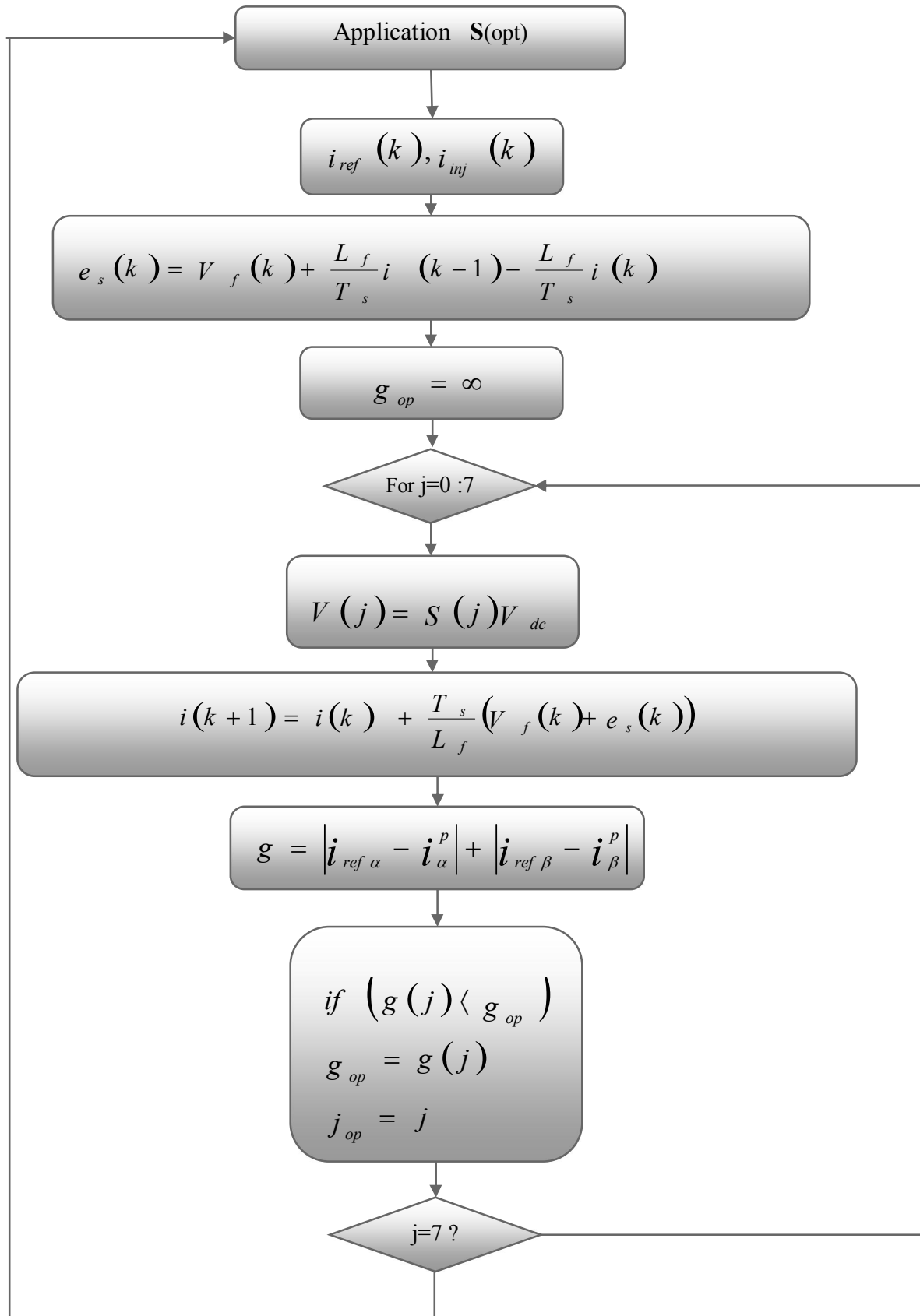
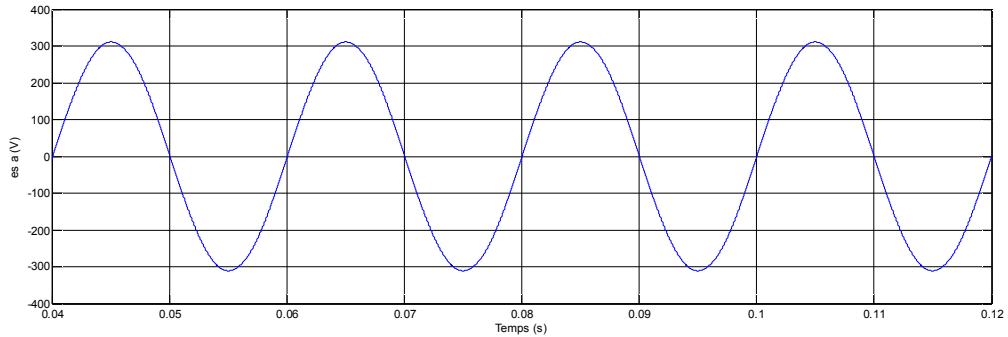


Figure III.3. Schéma de principe de la commande prédictive

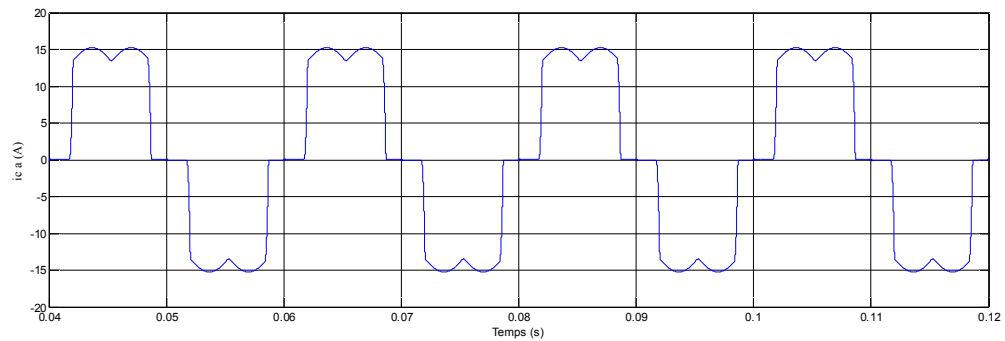
III.8 Résultats de simulation

La commande prédictive de courants générés par le filtre actif parallèle a été simulée à l'aide du logiciel Matlab/Simulink. Les paramètres du système utilisés dans ces simulations sont identiques à celles indiquées au Tableau II.1.

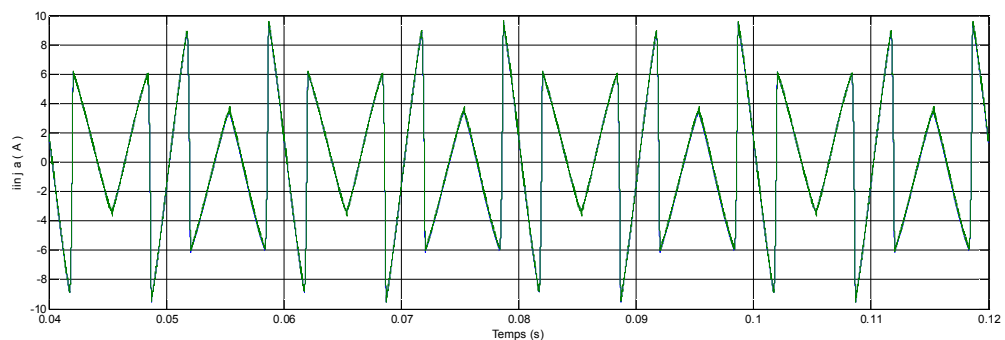
a. Régime permanent



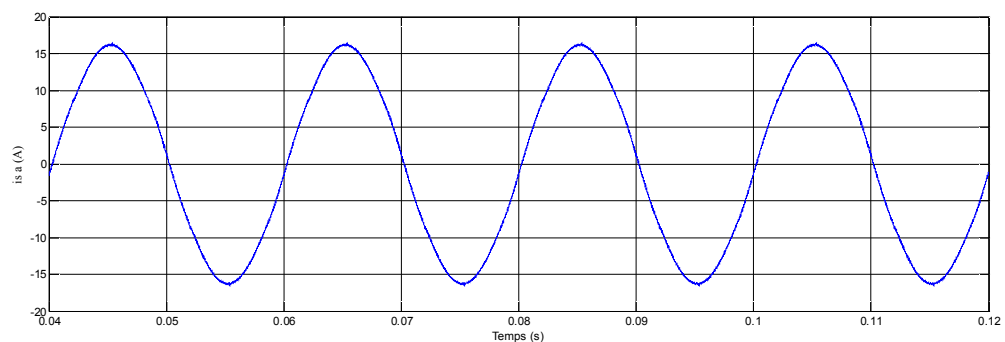
A) Tension de source



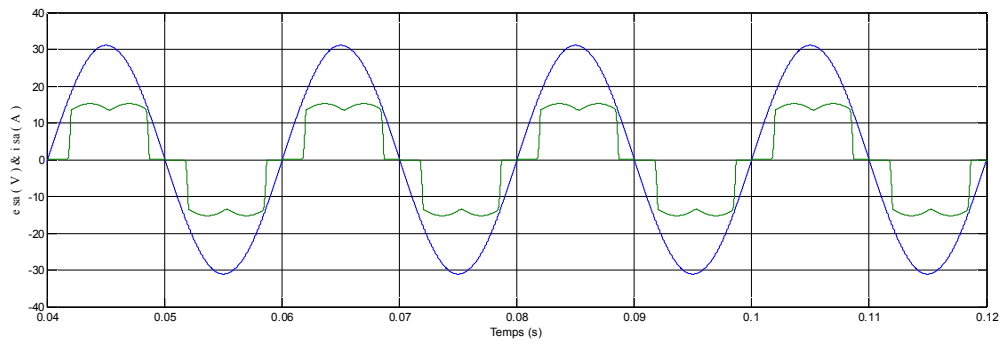
B) Courant de la charge



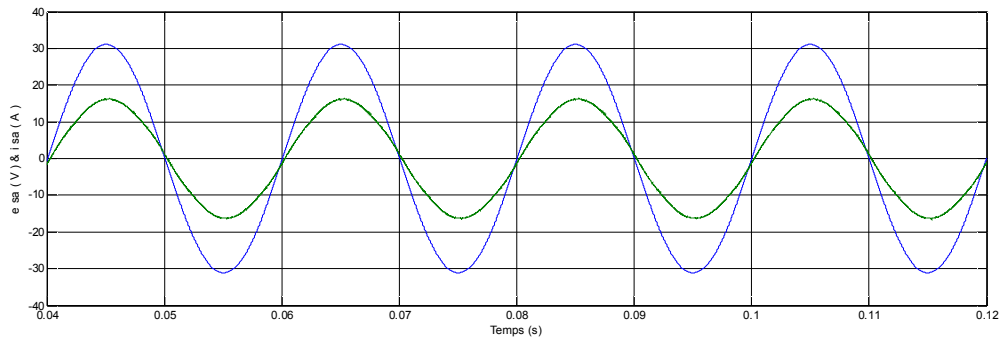
C) Courant du filtre



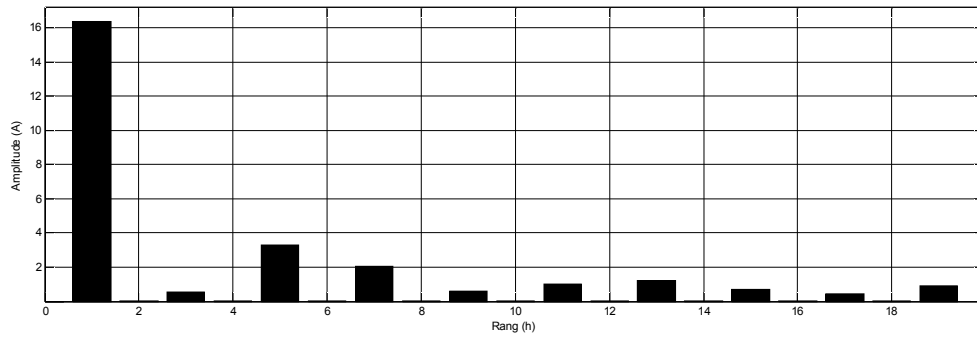
D) Courant de source



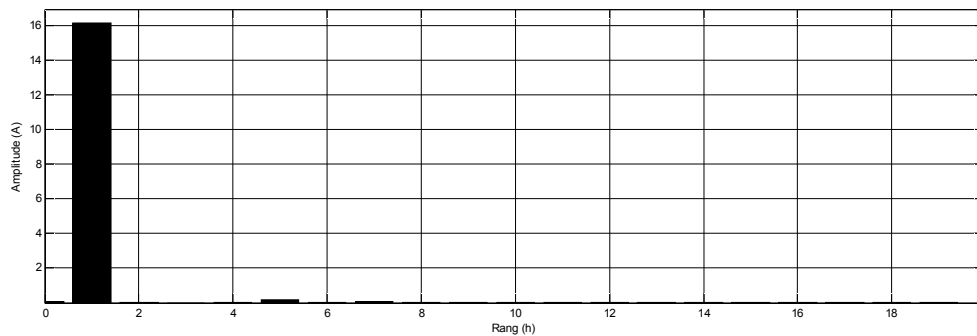
D) Courant de source et tension de source avant filtrage



E) Courant de source et tension de source après filtrage



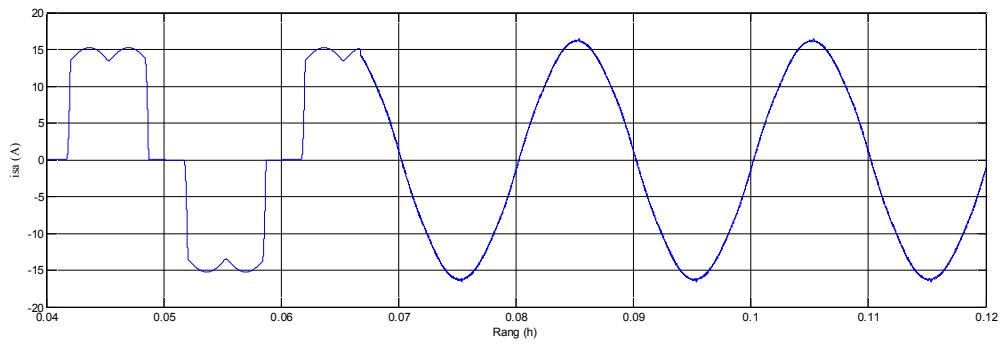
E) Spectre harmonique du courant de source avant compensation



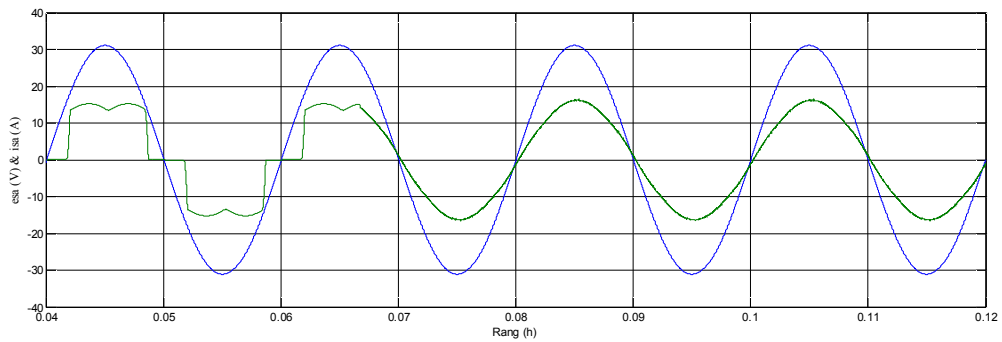
F) Spectre harmonique du courant de source après compensation.

Figure. III.4. Résultats de simulation en régime permanent .

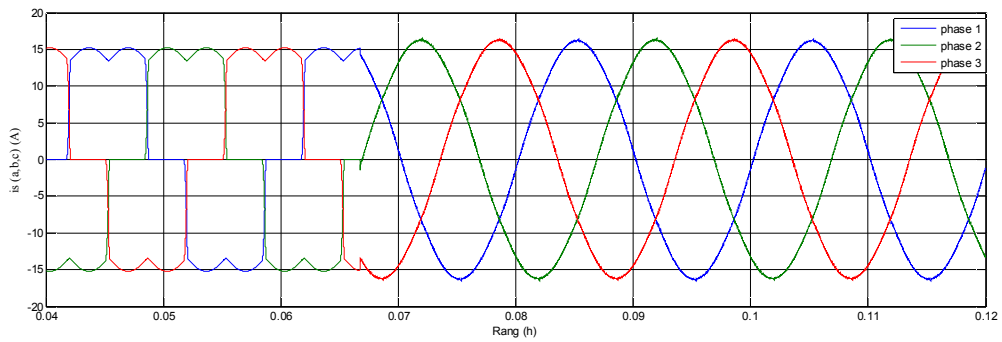
b . Fermeture du FAP



A) Courant de source

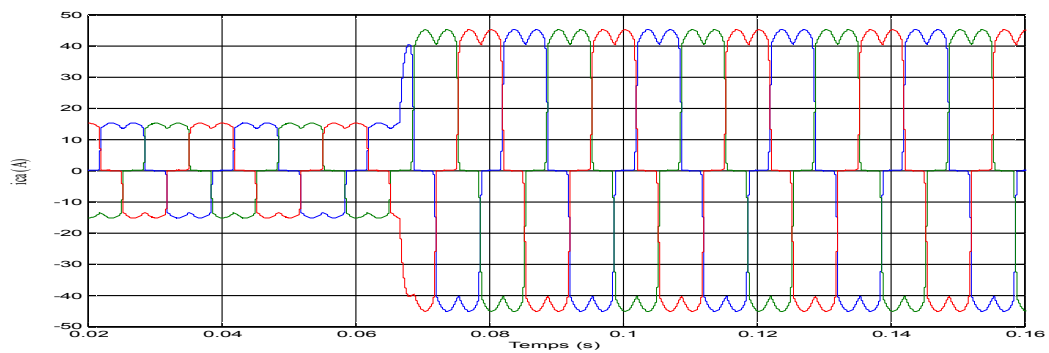


B) Courant de source et tension de source

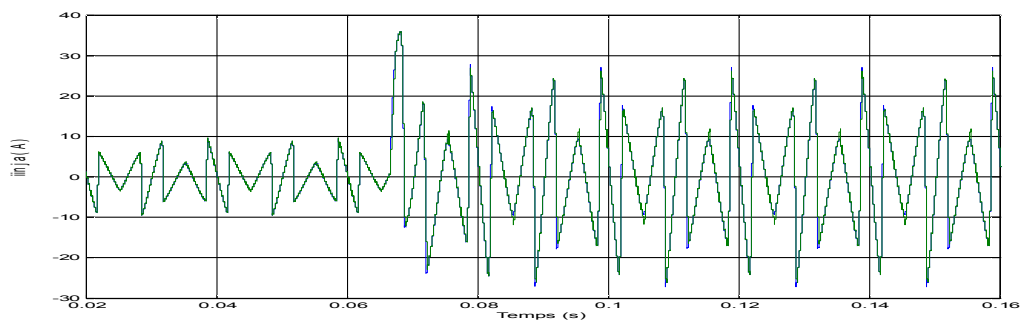


C) Courants de source

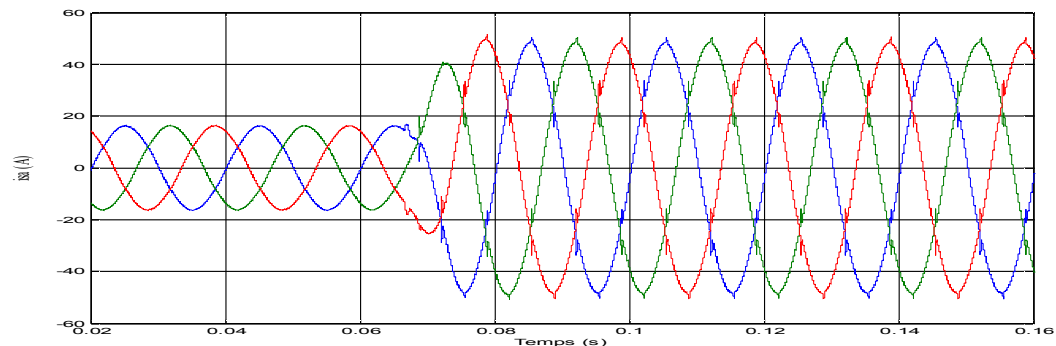
c . Variation de la charge non linéaire



A) Courants de charge



B) Courant de filtre



C) Courants de source

Fig.III.5. Résultats de simulation en régime dynamique

II.9. Interprétation des résultats

Ces résultats valident l'algorithme de commande prédictive développée. différents tests ont été effectués en régime transitoire et permanent, il résumé par les points suivants :

Régime permanent

Après application du filtre actif parallèle, on enregistre une nette amélioration dans l'allure du courant de source, comme illustre à la figure III .4 le courant de source est dépollué à un niveau satisfait, ceci est confirmé par le spectre harmonique de la figure III .4 avec un THD_i de 1.18 %.

D'autre part on constate que le $\cos(\varphi)$ est nettement amélioré, en effet i_{sa} et V_{sa} sont sinusoïdales prouve que le filtre actif génère un courant i_{fa} qui suit parfaitement bien sa référence i_{refa} comme le montre la figure III .4.

Régime dynamique

Afin d'analyser le comportement dynamique et tester la robustesse de la commande prédictive du FAP, une variation brusque de la charge (100% à 50%) à l'instant ($t = 0,065$ s), la figure III .5 montre respectivement la forme du courant de source i_{sa} , courant de filtre i_{fa} injecté par le FAP après compensation .

le courant source et la tension source correspondante avant et après compensation sont représentées dans la figure III .5 Selon les résultats de simulation obtenus, on remarque que le facteur de puissance est presque unitaire, la tension et le courant source sont parfaitement en phase (compensation de la puissance réactive). Le contenu harmonique de courant est considérablement réduit, ceci se traduit par la diminution du taux harmonique de distorsion THD_i de 28.86% à 1.17% une valeur nettement inférieure à 5% (Norme IEEE Standard 519). la réponse du FAP en régime dynamique est satisfaisante en particulier lors de l'introduction d'une perturbation soudaine dans la charge.

II.10.Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié la philosophie et le principe de la commande prédictive. Cette dernière est basée sur la sélection du vecteur de commande optimal qui doit être appliqué durant chaque période d'échantillonnage, nous avons élaboré un algorithme de commande basée sur l'approche prédictive . Les résultats de simulation obtenus montrent que la commande prédictive donne des performances très satisfaisantes.

En effet, le taux de distorsion harmonique des courants de source ont été réduit à des valeurs respectant les normes en vigueur. Par ailleurs, il a été remarqué que la commande prédictive permet de forcer les courants générés par le filtre actif à suivre les courants de référence avec une dynamique très satisfaisante en cas de variation de la charge non linéaire.

Conclusion générale

Ce travail présenté dans ce mémoire consiste à l'étude et simulation numérique de la commande prédictive en courant appliquée au filtre actif parallèle. L'objectif de ce dernier est la compensation des perturbations du courants générées par les charges dites non linéaires, tels que les courants harmoniques, les courants réactifs et le déséquilibre du courant.

Nous avons effectuée, dans un premier temps, une étude théorique sur la problématique des perturbations harmoniques générées par des charges non linéaires connectées aux réseaux électriques. Nous avons alors présenté, de manière générale, les solutions traditionnelles et modernes utilisées dans le filtrage. Dans le second chapitre, nous avons présenté le principe de fonctionnement du filtre actif parallèle et son modélisation. D'autre part, l'efficacité du filtre actif dépend fortement de la méthode d'identification des courants de référence. La méthode choisie pour identifier les courants harmoniques est celle de l'identification des puissances réelle et imaginaire instantanée.

Dans le troisième chapitre on a étudié la commande prédictive appliquée au filtre actif parallèle. Les résultats de simulation ont été très satisfaisants, en effet, les objectifs de compensations ont été correctement achevés avec de taux de distorsion harmonique (THD) du courant de la source dans des limites très acceptables.

A l'issue de ce travail de mémoire, il se dégage quelques perspectives :

- Synthèse de la commande en puissance avec une approche prédictive (Commande Directe de Puissance Prédictive du filtre actif parallèle).
- Extension de la commande prédictive utilisée dans cette mémoire pour le filtre actif parallèle multiniveaux.
- Exploitation d'une commande prédictive avec les techniques intelligentes.



Références Bibliographiques

- [1] G. Tarek , “Etude et réalisation d’un compensateur actif de puissance commandé par DSP”, Mémoire de Magister, Ecole Militaire Polytechnique, Janvier 2005.
- [2] T. Deflandre, P. Mauras, “ Les harmoniques sue les réseaux électriques”, Edition Eyrolles, 1998
- [3] G. Desquilbet, C. Foucher, P. Fauquembergue, “Statistical analysis of voltage dips”, Notes EDF, 96NR00 102, 1995.
- [4] N. Djamel. “Contribution à l’étude des stratégies de commande des filtres actifs triphasés ” ,Mémoire de magister .Université de Souk-Ahras 2013_2014.
- [5] O. Amar. “Simulation d’un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant ” Thèse Doctorat. Université Annaba 2007.
- [6] M.A.ALALI, “Contribution à l’Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension (Automatisation des systèmes de puissance électriques) ”, Thèse de doctorat de l’Université Louis Pasteur – Strasbourg I, Strasbourg 12 Septembre 2002.
- [7] C. Fetha, “Analyse et amélioration de l’indice de la non-symétrie de tension dans la qualité de l’énergie électrique”, Thèse Doctorat. Université de Batna 2006.
- [8] N. BELHAOUCHET , “Fonctionnement à Fréquence de Commutation Constante des Convertisseurs de Puissance en Utilisant des Techniques de Commande Avancées ”, Thèse de doctorat Université setif, 2011.
- [9] N. Mesbahi, “Contribution à l’étude des performances des onduleurs multiniveaux sur les Réseaux de Distribution”, Thèse de Doctorat, Université annaba ,2014.
- [10] M. M. ABDUSALAM, “ Structures et Stratégies de Commande des Filtres Actifs Parallèle et Hybride avec Validations Expérimentales ”, Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré-Nancy-I-France, 2008.
- [11] Ch. ARNOUX, “Les Harmoniques”, Fiche d’application, Ed1, Service Communication, France, Mai 2008
- [12] K. Aliouane, “ Contribution à l’étude du filtrage des harmoniques des réseaux de distribution à l’aide de l’association des filtres passifs et filtres actifs ”, Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, Janvier 1995.
- [13] A. Bouafia, “ Techniques de commande prédictive et floue pour les systèmes d’électronique de puissance: application aux redresseurs à MLI”, Thèse de Doctorat, Université Ferhat Abbas – Sétif, Octobre 2010.

- [14] M. Shafiee Khor, “Amélioration de la qualité de l’énergie à l’aide de compensateurs actifs : série, parallèle ou conditionneurs unifiés de réseaux électriques”, Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique de l’Université de Nantes, Nantes, 2006.
- [15] F. Defaÿ, “ Commande prédictive directe d’un convertisseur multicellulaire triphasé pour une application de filtrage actif ”, Thèse Doctorat. Université De Toulouse 2008.
- [16] M. Aredes, “Active Power Line Conditioners”, Thèse de doctorat, Technische universtat Berlin ,D83, 11 Marz 1996.
- [17] H. Akagi, Y. Tsukamoto, A. Nabae, “alysis and design of an active power filter using quad-series voltage source PWM converters”, IEEE Trans. on Industry applications, vol. 26, No. 1, pp. 93-98, 1990.
- [18] E.S. Gholipour, “Apport de l’UPFC à l’amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques”, Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, Octobre 2003.
- [19] A. Chaoui, “Filtrage actif triphasé pour charges non linéaires”, Thèse de Doctorat, Université Ferhat Abbas – Sétif, Octobre 2010.
- [20] D. Ould Abdeslam, D.WIRA, P.FLIELLER, D.AND MERCKLE, “Une nouvelle approche neuromimétique pour l'identification et la compensation des harmoniques dans les systèmes électriques” , International Conference on Electrical Engineering and its Applications, Sidi Bel-Abbes, Algeria, 2006.
- [21] M. C. Benhabib, “Contribution à l’étude des différentes topologies et commandes des filtres actifs parallèles à structure tension : modélisation, simulation et validation expérimentale de la commande”, Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, Décembre 2004.
- [22] H. Akagi, S. Atoli, A. Nabae, “Control Strategy of Active Power Filters using Multiple Voltage Source PWM Converters”, IEEE Trans on Ind. Appl., Vol. IA-22,pp. 460-465, 1986
- [23] H. Akagi, Y. Kanazawa, 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.
- [24] N. Hamouda, “Etude Comparative des Techniques de Filtrage des Harmoniques de Courant”, Mémoire Magister, université SETIF, 2010.
- [25] J. Bouchard, “ Commande prédictive basée sur la simulation ”, Thèse philosophia doctor (ph. D), Faculté des sciences et de génie, université lavale, Québec, Janvier 1995.
- [26] D. Ould Abdeslam, “Techniques neuromimétique pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension”, Thèse de doctorat, université de Haute Alsace, 2005.
- [27] B. Nicolas, “Contribution à la commande des convertisseurs statiques”, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse (INPT), Toulouse, 25 Septembre 1996.

- [28] G. Ramond, “Contribution à la Commande Prédictive Généralisée Adaptative Directe et Application”, Université Paris XI U.F.R. Scientifique D’Orsay, thèse doctorat , Sept 2001.
- [29] K . Barra, “Commande Prédictive Généralisée (GPC) des Associations Convertisseurs - Machines à Induction ” Thèse de doctorat science en électrotechnique, université de batna 2008.
- [30] R. Panigrahi, Bidyadhar Subudhi, Prafulla Chandra Panda, “Model predictive-based shunt active power filter with a new reference current estimation strategy” IET Power Electronics, Vol. 8, Iss. 2, pp. 221–233,2015.
- [31] J. Rodriguez et al. “ Commande Prédictive current control of a voltage source inverter ” IEEE transaction on industrial electronics .vol.54 ,N1 ,february 2007.