

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعلیم العالی و البعث العلمی

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان -

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



## MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

**En** : Electrotechnique

**Spécialité** : Commandes électriques

**Par** : LAKSARI ABDELKADER et SI TAYEB MUSTAPHA AYOUB ABDELNACER

### Sujet

**ETUDE ET SIMULATION D'UN FILTRE ACTIF DE PUISSANCE HYBRIDE  
CONSTITUE D'UN FILTRE PASSIF ET UN FILTRE ACTIF DE PUISSANCE  
PARALLELE A COMMANDE INDIRECTE**

Soutenu publiquement, le 21/06/2022, devant le jury composé de :

Mr. Mohammed Amine BRIKCI NIGASSA  
Mme. Sihem BOURI  
Mr. Mohamed Choukri BENHABIB

MAA  
MCA  
Professeur

Université de Tlemcen  
Université de Tlemcen  
Université de Tlemcen

Président  
Examineur  
Encadreur

Année universitaire 2021/2022

# Dédicace

Ce modeste travail est dédié à la source de mon  
inspiration mes très chers parents.

Mes chers frères REDA, ZINE EDDINE, et à toute ma  
famille.

Mes chères amies MOHAMMED, NADJIB, HICHEM,  
FAYCEL SAMIR, YASSER, ILYES, OMAR, SAID,  
DJAMEL ABDILLAH, AYOUB, ABDALLAH,  
MEHDI, ZAKI, HOUSSAME, YACINE, ALAA,  
FETHALAH

A mon cher binôme : SI TAYEB MUSTAPHA

LAKSARI ABDELKADER

# Dédicace

Avant tous, je remercie dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour réaliser ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées.

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents, que dieu les garde et les protège pour leurs soutien moral et financier, pour leurs encouragements et les sacrifices qu'ils ont endurés.

A mes frères sidi Ahmed, Madjid et Yamani et à mes sœurs qui m'avez toujours soutenu et encouragé durant ces années d'études.

A Asma qui m'a aidée et pour son soutien moral et son encouragement dans les moments difficiles

A mes chers amis, Karim, Abdsslem , Ilyes, Mortada, Mohamed et Yassine, Anes, Sido, Wissam, Hichem

A mon cher binôme LAKSARI ABDELKADER pour son entente et sa sympathie

A tous les amis (es) d'études surtout ceux d'électrotechnique promotion 2022

**SI TAYEB MUSTAPHA**

# Remerciements

Au terme de mon travail de mémoire, je tiens à exprimer toute ma reconnaissance en premier à Dieu ALLAH pour tout.

Je remercie sincèrement mon encadrant Pr. M.C. BENHABIB pour son aide et sa disponibilité.

Je remercie également le président Mr. M. A. BRIKCI NIGASSA et la membre de jury Mme. S. BOURI d'avoir accepté d'examiner notre travail.

Nous remercions également tous les responsables de l'université et les enseignants du département génie électrique.

À tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à mener à terme ce travail.

# Sommaire

Liste des figures.....	1
Liste des tableaux.....	5
Liste des symboles et abréviations.....	6
Introduction générale .....	8

## Chapitre I : Perturbation des réseaux électriques et leur solution.

Introduction.....	10
I.1 Perturbation harmonique.....	10
I.2 Sources des harmoniques et leurs effets.....	10
I.3 Les normes imposées sur le THD.....	11
I.4 Solutions de dépollution des réseaux électriques.....	11
I.4.1 Solutions traditionnelles.....	12
I.4.2 Solutions modernes.....	12
Conclusion.....	17

## CHAPITRE II : Filtre actif de puissance parallèle

II Introduction.....	19
II.1 Principe de filtre actif de puissance.....	19
II.2 Principe d'un filtre actif parallèle : .....	19
II.3 Topologie générale.....	20
II.3.1 Étude de la partie puissance.....	20
II.3.2 Étude de la partie commande.....	24
II.4 Résultat de Simulation de l'ensemble charge non-linéaire - filtre actif de puissance .....	31
II Conclusion.....	42

## CHAPITRE III : Filtre hybride de puissance parallèle

III. Introduction.....	44
III.1 Filtre actif de puissance parallèle à commande indirecte.....	44

<b>III.2 Filtre passifs d'harmoniques.....</b>	<b>48</b>
<b>III.3 Etude d'un Filtre résonnant.....</b>	<b>49</b>
<b>III.4 Simulation .....</b>	<b>51</b>
<b>III Conclusion .....</b>	<b>61</b>
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>62</b>
<b>RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE.....</b>	<b>63</b>
<b>Résume .....</b>	<b>66</b>

# Liste des figures

<b>Figure</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>CHAPITRE I</b>		
Figure I.1	Filtre actif série.....	13
Figure I.2	Filtre actif parallèle.....	13
Figure I.3	Combinaison de filtres actifs parallèles et séries.....	14
Figure I.4	Classification des filtres hybrides. ....	14
Figure I.5	Configuration du filtre passif avec filtre passe haut.....	15
Figure I.6	Configuration du filtre passif sans filtre passe haut.....	15
Figure I.7	Association série d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif.....	15
Figure I.8	Association parallèle d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif. ....	16
Figure I.9	Association d'un filtre actif série et d'un filtre passif. ....	16
<b>CHAPITRE II</b>		
Figure II.1	Schéma bloc du filtre actif connecte en parallèle sur le réseau. ....	19
Figure II.2	Structure générale du filtre actif parallèle. ....	20
Figure II.3	La partie puissance.....	21
Figure II.4	Filtre actif de puissance à structure tension à trois bras connectés en parallèle au réseau électrique.....	21
Figure II-5	Filtre actif de puissance à structure tension à deux bras connectés en parallèle au réseau électrique.....	23
Figure II.6	Stratégie de commande directe d'un filtre actif de puissance à trois fils.....	24
Figure II.7	Stratégie de commande indirecte d'un filtre actif de puissance à trois fils.....	27
Figure II.8	Principe du FMV.....	30
Figure II.9	PLL avec un filtre multi-variable FMV.....	30
Figure II.10	Commande d'un filtre actif de puissance par la méthode directe du Référentiel lié au synchronisme (SRF) avec FMV .....	31

<b>Figure II.11</b>	<b>Commande d'un filtre actif de puissance par la méthode indirecte du Référentiel lié au synchronisme (SRF) avec FMV.....</b>	<b>31</b>
<b>Figure II.12</b>	<b>Schéma de charge non-linéaire alimentant une charge RL connectée au Réseau triphasé à trois fils.....</b>	<b>31</b>
<b>Figure II.13</b>	<b>Courant de charge avant filtrage.....</b>	<b>32</b>
<b>Figure II.14</b>	<b>FAP avec sa commande directe par hystérésis (p-q).....</b>	<b>33</b>
<b>Figure II.15</b>	<b>tension de source( Vs).....</b>	<b>34</b>
<b>Figure II.16</b>	<b>Compensation des courants harmoniques d'un pont redresseur alimentant une charge R-L en utilisant un filtre actif de puissance à deux bras à point milieu et une commande directe p-q.....</b>	<b>34</b>
<b>Figure II.17</b>	<b>tensions aux bornes du condensateur .....</b>	<b>35</b>
<b>Figure II.18</b>	<b>Spectre du courant du réseau avant filtrage (THD=23.07%).....</b>	<b>35</b>
<b>Figure II.19</b>	<b>Spectre du courant du réseau après filtrage (THD=2.78%).....</b>	<b>35</b>
<b>Figure II.20</b>	<b>FAP avec sa commande directe par hystérésis (d-q).....</b>	<b>36</b>
<b>Figure II.21</b>	<b>Compensation des courants harmoniques d'un pont redresseur alimentant une charge R-L en utilisant un filtre actif de puissance à deux bras à point milieu et une commande directe d-q.....</b>	<b>37</b>
<b>Figure II.22</b>	<b>tensions aux bornes du condensateur .....</b>	<b>38</b>
<b>Figure II.23</b>	<b>Spectre du courant du réseau avant filtrage (THD=27.84%).....</b>	<b>38</b>
<b>Figure II.24</b>	<b>Spectre du courant du réseau après filtrage (THD=2.79%).....</b>	<b>38</b>
<b>Figure II.25</b>	<b>Onduleur triphasé a deux bras avec condensateur a point milieu.....</b>	<b>39</b>
<b>Figure II.26</b>	<b>Figure Tension de sources (Vs).....</b>	<b>40</b>
<b>Figure II.27</b>	<b>les courants d'Onduleur triphasé a deux bras avec condensateur a point milieu.....</b>	<b>40</b>
<b>Figure II.28</b>	<b>tensions aux bornes des condensateurs Vdc1 et Vdc2.....</b>	<b>41</b>
<b>Figure II.29</b>	<b>FFT du courant de charge (THD=27.53%).....</b>	<b>41</b>
<b>Figure II.30</b>	<b>FFT du courant de source (THD=4.64%).....</b>	<b>41</b>



## CHAPITRE III

Figure III.1 Structure globale du filtre actif parallèle.....	45
Figure III.2 Compensation des courants harmoniques filtrage (filtre actif de puissance).....	46
Figure III.3 Tension aux bornes du condensateur .....	47
Figure III.4 Spectre du courant du réseau avant filtrage (THD=25.26%).....	47
Figure III.5 Spectre du courant du réseau après filtrage (THD=1.13%).....	47
Figure III.6 Filtres passifs d'harmoniques ; (a) Filtre résonant, (b) Filtre passe haut, (c) Filtre à double résonance, (d) Filtre type C.....	48
Figure III.7 FAP à commande indirecte et filtre passif accordés sur les fréquences 5-ème harmoniques.....	52
Figure III.8 tensions de source $V_s$ .....	53
Figure III.9 Compensation des courants harmoniques par le filtre actif de Puissance et filtre passif.....	53
Figure III.10 tensions de source continue.....	54
Figure III.11 Spectre du courant du réseau avant filtrage (THD=22.09%).....	54
Figure III.12 Spectre du courant du réseau après filtrage (THD=2%).....	54
Figure III.13 FAP à commande indirecte et filtre passif accordés sur les fréquences 7-ème harmoniques .....	55
Figure III.14 tension de source $V_s$ .....	56
Figure III.15 Compensation des courants harmoniques par le filtre actif de puissance et filtre passif.....	56
Figure III.16 tensions de source continue.....	57
Figure III.17 Spectre du courant du réseau avant filtrage (THD=22.03%).....	57
Figure III.18 Spectre du courant du réseau après filtrage (THD=1.86%).....	57
Figure III.19 FAP à commande indirecte et filtre passif accordés sur les fréquences 5-ème et 7-ème harmoniques.....	58
Figure III.20 tension de source $V_s$ .....	59
Figure III.21 Compensation des courants harmoniques par le filtre actif de	

puissance et filtre passif.....	59
Figure III.22 tensions de source continue.....	60
Figure III.23 Spectre du courant du réseau avant filtrage (THD=22.01%).....	60
Figure III.24 Spectre du courant du réseau après filtrage (THD=1.89%).....	60

# Liste des tableaux

<b>Tableau</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
Tableau II.1	Tensions générées par l'onduleur de tension à trois bras.....	22
Tableau II.2	Tensions générées par l'onduleur de tension à deux bras.....	24
Tableau II.3	Table du Paramètres .....	32
Tableau II.4	Table du Paramètres .....	32
Tableau II.5	Table du Paramètres .....	40
Tableau III.1	Table du Paramètres .....	44
Tableau III.2	Table du Paramètres du banc de filtres.....	51
Tableau III.3	Table du Paramètres .....	51
Tableau III.4	Table spectre du courant .....	61

# Liste des symboles et abréviations

## Symboles

H : Etat de l'interrupteur S (ouvert ou fermé).

S : le composant semi-conducteur.

L : Inductance du réseau coté charge.

R : Résistance du réseau coté charge.

$L_f$  : Inductance de filtre de couplage.

$R_f$  : Résistance de filtre de couplage

$L_s$  : Inductance du réseau coté source.

$R_s$  : Résistance du réseau coté source.

$L_c$  : Inductance du réseau coté charge.

$R_c$  : Résistance du réseau coté charge.

$C_{dc}$  : Condensateur du bus continue.

$V_{dc}$  : Tension aux bornes du condensateur.

$P_{dc}$  : Puissance absorbée par le condensateur.

$V_S$  : Valeur efficace de tension de la source.

PI : Proportionnel-Intégral.

$K_i$  : Gain intégral du régulateur

$K_p$  : Gain proportionnel du régulateur

p : Valeur instantanée de la puissance réelle.

q : Valeur instantanée de la puissance Imaginaire.

$V_m$  : Tension simple efficace de la source.

$\alpha$ -  $\beta$  : Axes  $\alpha$  et  $\beta$  du repaire de Concordia.

$V_\alpha$  : Tensions instantanées suivant l'axe  $\alpha$ .

$V_\beta$  : Tensions instantanées suivant l'axe  $\beta$ .

$i_\alpha$  : Courants instantanés suivant l'axe  $\alpha$ .

$i_\beta$  : Courants instantanés suivant l'axe  $\beta$ .

$\hat{\theta}$  : Angle estimé.

$f_c$  : Fréquence de coupure.

$\xi$  : Coefficient d' amortissement.

## Abréviations

D Puissance Déformante

FP Facteur de puissance

HD Taux de Distorsion Harmonique.

FAP Filtre Actif Parallèle.

FAS Filtre Actif séré.

FPB Filtre Passe Bas.

FPH Filtre Passe Haut.

IGBT Insolated Gate Bipolar Transistor.

MOSFET Metal oxide Semiconductor Field Effect.

PLL Phase Locked Loop.

FMV Filtre multivariable.

SRF Synchronous référence frame.

# Introduction générale

L'électronique de puissance offre une grande souplesse d'utilisation et une économie d'énergie. Sa puissance unitaire installée est en constante augmentation. Cette augmentation pourrait causer de sérieux problèmes aux distributeurs d'électricité qui verraient ces convertisseurs agir comme autant de sources de pollution. Les perturbations causées par ces convertisseurs sont bien connues tel que la dégradation du facteur de puissance et la génération de courant harmoniques.

De plus, ces harmoniques sont la source de plusieurs autres problèmes comme la surchauffe, lignes téléphoniques interrompues, etc. Ainsi il faut s'intéresser à cette pollution harmonique pour pouvoir utiliser ces convertisseurs statiques dans les installations industrielles sans déranger les autres utilisateurs. Il est donc nécessaire de trouver la solution la plus adaptée pour réduire et limiter la pollution harmonique du réseau.

Plusieurs solutions existent pour corriger ce problème. L'utilisation de filtres passifs est une solution classique, mais l'efficacité de tels dispositifs dépend de l'impédance du réseau, qui elle-même peut varier. De plus, le filtre passif peut former un circuit résonnant avec le réseau électrique, ce qui contribue à amplifier les harmoniques dont les fréquences sont proches de la fréquence de résonance. [31]

Les progrès réalisés sur les semi-conducteurs de puissance entièrement contrôlable conduit à la conception de nouvelle structure. En premier, Les convertisseurs AC-DC pilotés en modulation de largeur d'impulsion peuvent contrôler le facteur de puissance et pénalise les perturbations harmoniques à basse fréquence. D'un autre côté, les dispositifs de filtrage actif de puissance ont été étudiés afin de résoudre efficacement les problèmes harmoniques. Mais il semble que des combinaisons de filtres actifs et passifs peuvent conduire à des solutions plus nombreuses améliorant leurs performances et leur potentiel d'application. Notre travail est basé sur cette idée. Ainsi, notre mémoire est divisé de la manière suivante : [32]

Le chapitre 1 est consacré à l'étude des harmoniques, ces origines, leurs conséquences sur le réseau électrique et les solutions traditionnelles et modernes existantes.

Le chapitre 2 portera sur l'étude d'un filtre actif de puissance parallèle ainsi que les différentes stratégies de commande existante. L'évaluation de l'efficacité de ces commandes est validée par des simulations.

Dans le chapitre 3, nous terminons notre étude par un filtre hybride constitué d'un FAP et d'un filtre passif. Les simulations (avec le logiciel MATLAB) montreront l'efficacité de cette solution pour l'élimination des harmoniques de courants du réseau électrique.

# **Chapitre I**

## **Perturbation des réseaux électriques et leur solution.**

## Introduction

Pour créer un réseau électrique de haute qualité, la tension doit être sinusoïdale triphasée et équilibré. Malheureusement, en raison de la présence de charges non linéaires sur le réseau électrique, il y a des perturbations de courant harmonique. Ces perturbations peuvent avoir un impact négatif sur l'équipement électrique à proximité, ce qui pourrait mener à une détérioration de son fonctionnement ou à sa destruction.

Par conséquent, dans ce chapitre, nous examinerons d'abord les perturbations qui pourraient se produire dans un réseau électrique et modifier les courants et les tensions. Par la suite, nous examinerons leurs origines, leurs conséquences et les normes internationales qui ont été imposées. Enfin, nous présenterons les méthodes traditionnelles et actuelles pour compenser ces harmoniques.

### I.1 Perturbation harmonique

La présence d'harmoniques dans les systèmes électriques signifie que le courant et la tension soient déformés et s'écartent de sa forme d'onde sinusoïdale. Les courants harmoniques sont causés par des charges non linéaires connectées au réseau de distribution. Une charge est dite non linéaire lorsque le courant qu'elle absorbe n'a pas la même forme d'onde que la tension d'alimentation. La circulation de courants harmoniques dans les impédances du réseau crée ensuite des harmoniques de tension, qui déforment la tension d'alimentation. [1]

### I.2 Sources des harmoniques et leurs effets

Ces dernières années, l'utilisation d'équipements électriques à convertisseurs statiques dans les dispositifs de conversion d'énergie a conduit à une augmentation des niveaux de pollution. Ils provoquent ainsi une détérioration de la qualité de l'alimentation et des chutes de tension dans le réseau de distribution.

Il y a plusieurs types de charges non linéaires. D'une part, il y a les lampes, les petits moteurs dans les secteurs tertiaire, domestique et industriel, ainsi que les fours électriques à la maison et dans le secteur industriel.

- **Concernant les lampes**, les courants harmoniques sont produits par deux types de lampes :

Les lampes fluorescentes et les lampes à vapeur haute pression en sont des exemples. Elles représentent les deux un tiers de l'énergie consommée par l'éclairage. La génération d'harmoniques dans ces lampes est liée au caractère fortement non linéaire du matériau. Un phénomène impliquant l'éclairage et la présence d'un ballast.

- **Concernant les appareils à arc électrique**, l'équipement électrique à arc combine des générateurs à arc avec un courant alternatif, qui peut produire plusieurs dizaines de mégawatts, et des machines à souder à arc à courant alternatif ou continu. [2][3]
- **Concernant les appareils à base d'électronique de puissance**, elles sont la cause en grande partie de la pollution du réseau électrique par les harmoniques de courant car ces charges sont fortement non linéaires. De plus elles sont énormément utilisées, on les trouve notamment dans tous les appareils électroménagers ainsi que dans les TV, ordinateurs, ...



Les harmoniques de tensions et de courants superposés sur l'onde fondamentale ont différents effets selon les récepteurs rencontrés. Si une résonance sur le réseau apparaît par exemple, nous auront alors une amplification du courant ce qui peut entraîner une détérioration du matériel.

### I.3 Normes imposées sur le THD

Différents critères sont définis pour caractériser ces perturbations. Le THD et le facteur de puissance sont les plus employés pour quantifier respectivement les perturbations harmoniques et la consommation de puissance non-active. Le THD représente le rapport de la valeur efficace des harmoniques à la valeur efficace du fondamental. Il est défini par la relation [4] :

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2(t)}}{I_1} \cdot 100 \quad (I.1)$$

Afin de garantir des niveaux satisfaisants de qualité de l'énergie en limitant les effets des interférences harmoniques, les distributeurs d'énergie et les utilisateurs doivent se conformer aux normes et recommandations définissant les règles liées à la compatibilité électromagnétique (CEM) [4], tel que :

- IEC au niveau international,
- CENELEC au niveau européen,
- IEEE au niveau international

En effet, ces normes sont élaborées par un panel d'experts internationaux représentant des fabricants, des utilisateurs d'équipements, ainsi que des représentants de laboratoires d'essais, des consultants et des universitaires spécialisés dans le domaine considéré. Pour faciliter la compréhension des normes dans divers domaines, les normes CEI couvrant tous les domaines de l'électrotechnique sont numérotées et référencées, comme par exemple la norme CEI 61000 qui porte sur la compatibilité électromagnétique et la norme CEI 60063 qui porte sur les dispositifs de protection (fusibles, disjoncteurs) : Déclenchement intempestif. La norme CEI publie des normes internationales dans les domaines électriques et électroniques pour :

- Favoriser les échanges mondiaux en supprimant les barrières techniques,
- Assurer la qualité des produits,
- Garantir l'interopérabilité des produits et des systèmes,
- Contribuer à la sécurité lors de l'utilisation du produit,
- Contribuer à la protection de l'environnement et à l'amélioration de la qualité de vie.

### I.4 Solutions de dépollution des réseaux électriques

Plusieurs solutions ont été envisagées pour limiter la propagation des harmoniques et améliorer la qualité et la gestion de l'énergie électrique. Ils peuvent être divisés en deux catégories, traditionnelles et modernes. [5].

## I.4.1 Solutions traditionnelles

Plusieurs stratégies ont été proposées pour dépolluer les réseaux électriques, dans le but de limiter la propagation et l'effet des harmoniques dans les réseaux électriques [6], en :

1. Augmentant la puissance de court-circuit du réseau et utiliser des convertisseurs peu polluants, qui ont pour effet de réduire la distorsion harmonique.
2. L'utilisation d'un dispositif de filtrage passif pour réduire la propagation des produits harmoniques par des charges non linéaires. Cette approche de dépollution consiste à connecter une impédance basse autour de la fréquence de filtrage et une impédance suffisamment grande à la fréquence fondamentale du réseau. Parmi les dispositifs de filtrage les plus utilisés, il existe deux types de filtres qui garantissent une limitation de la tension harmonique, à savoir le filtre passif résonnant et le filtre passif amorti ou passe-haut.
  - a. **Filtre résonant** Il est constitué par la mise en série d'une inductance, d'une résistance, et d'un condensateur. [7]
  - b. **Filtre amorti** qui est en général un filtre passe-haut qui compense les harmoniques supérieurs ou égaux à sa fréquence propre. Il peut se connecter en parallèle avec d'autres filtres résonnants. [7]

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, tel que :

- Un manque de souplesse à s'adapter aux variations du réseau et de la charge.
- Un équipement volumineux.
- Un problème de résonance avec l'impédance du réseau.

## I.4.2 Solutions modernes

Deux raisons principales ont conduit à la conception d'une nouvelle structure de filtrage moderne à haut rendement appelée filtre actif de puissance. La première est qu'en raison des lacunes inhérentes aux solutions de décontamination traditionnelles, elles sont plus réactives à l'évolution de la charge et du réseau. La deuxième est l'émergence de nouveaux composants semi-conducteurs tels que les thyristors, GTOs, les IGBTs et les MOSFETs. Ces filtres actifs de puissance ont pour but de générer des courants ou des tensions harmoniques pour compenser les perturbations qui dégradent les performances des équipements et des installations électriques. Parmi les filtres actifs de puissance qui existe nous avons :

### a. Filtre actif de puissance série (FAS)

Le FAS a pour effet de modifier localement l'impédance du réseau. Il agit comme une source de tension harmonique, éliminant les tensions perturbatrices (creux, déséquilibres, harmoniques) de la source et les tensions causées par les courants perturbateurs circulant dans l'impédance du réseau. Par conséquent, la tension aux bornes de la charge sera sous forme sinusoïdale pure, avec un contrôle parfait de l'amplitude et de la fréquence. [8]

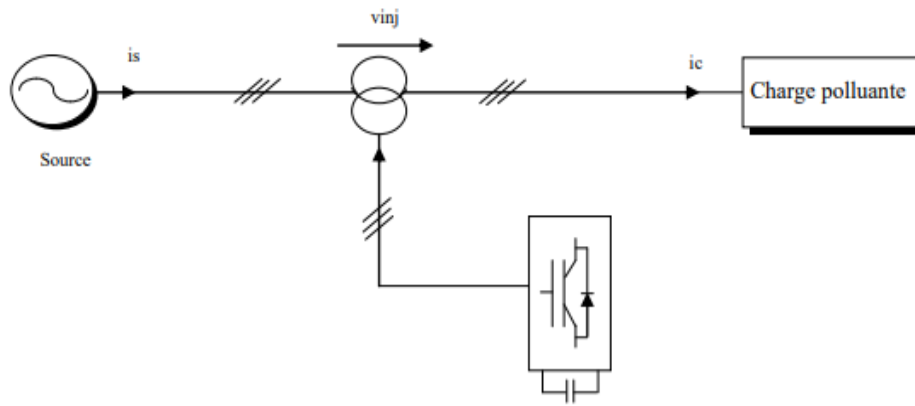


Figure I.1 Filtre actif série

**b. Filtre actif de puissance parallèle (FAP)**

Le FAP est connecté en parallèle au réseau et injecte en temps réel les composantes harmoniques inverses des courants harmoniques générés par les charges non linéaires connectées au réseau. Par conséquent, le courant fourni par la source devient sinusoïdal. En général, les filtres actifs de puissance parallèles sont utilisés pour la décontamination des réseaux basse et moyenne tension. Son impédance totale par rapport à la source et à la charge lui confère une bonne adaptabilité et des performances appréciables. Sa structure est illustrée sur la figure I.2.

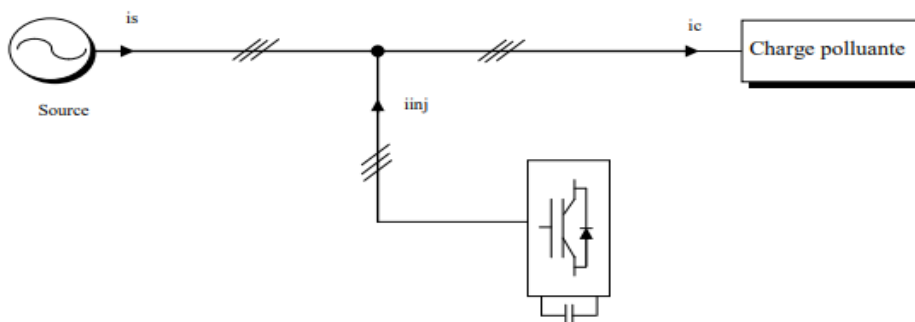


Figure I.2 Filtre actif parallèle

**c. Combinaison de filtres actifs de puissance parallèles et séries**

C'est une solution de compensation universelle basée sur le fonctionnement simultané de filtres actifs de puissance parallèle et série. Cette nouvelle topologie est appelée Unified Power Quality Conditioner (UPQC). L'UPQC présente les avantages combinés des filtres actifs de puissance parallèles et série. Comme le montre la figure ci-dessous, lorsque le filtre actif de puissance série est placé en amont du filtre actif de puissance parallèle, la source de tension perturbée peut être supprimée. Lorsqu'il est placé en aval, il isole la charge des sources perturbées.

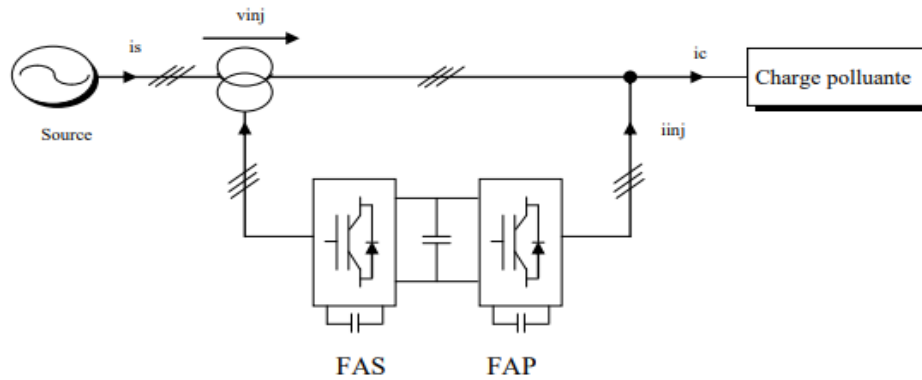


Figure I.3 Combinaison de filtres actifs parallèles et séries

#### d. Filtre hybride

Un filtre hybride est une topologie de filtre qui combine les avantages des filtres passifs et actifs. Par conséquent, il est considéré comme l'une des meilleures solutions pour filtrer les harmoniques de courant dans les réseaux de distribution. L'une des principales raisons d'utiliser les filtres actifs hybrides est liée au développement des semi-conducteurs de puissance, tels que les transistors de puissance de type MOSFET ou IGBT. De plus, d'un point de vue économique, le filtre hybride présente un avantage majeur : il permet de réduire le coût des filtres actifs de puissance, qui sont actuellement le principal frein à leurs utilisations [9].

Ces dernières années, de nombreuses topologies de filtres hybrides liées à différentes stratégies de contrôle ont été proposées dans la littérature scientifique pour améliorer la qualité de l'énergie, notamment pour réduire la taille et donc le coût des filtres actifs de puissance. Des filtres hybrides peuvent être réalisés en fonction du nombre d'éléments mis en œuvre dans la topologie étudiée (filtres actifs et passifs), du système traité (monophasé, triphasé 3 fils et triphasé 4 fils), et du type de filtre et d'ondulateur utilisé à structure tension ou courant. La figure suivante montre quelques configurations de filtres hybrides en fonction du type de système étudié [10].

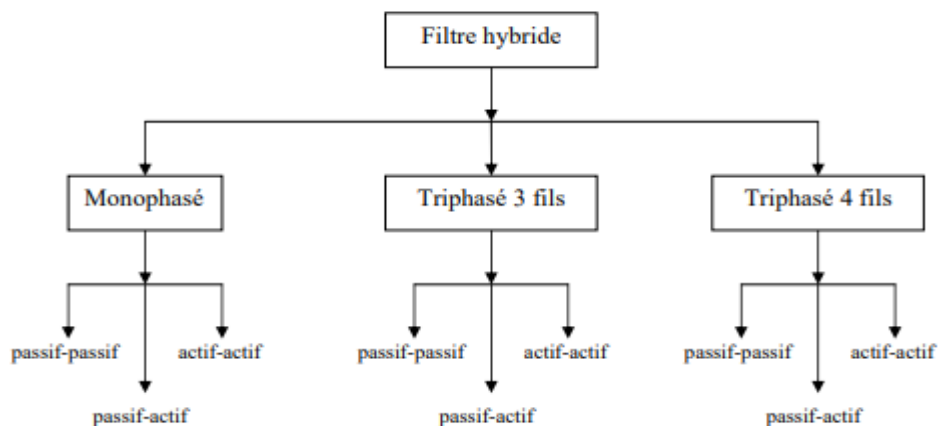
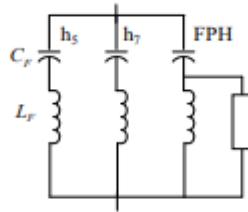


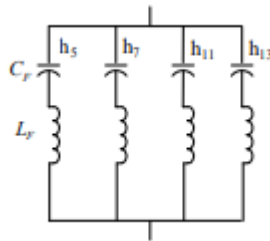
Figure I.4 Classification des filtres hybrides.

La configuration traditionnelle du filtre hybride comprend un filtre actif de puissance et un filtre passif. Le filtre passif doit avoir une impédance aussi faible que possible pour les harmoniques de rangs 5, 7, 11 et 13 afin d'atteindre de bonnes caractéristiques de filtrage [11], [12]. Pour cette raison le filtre passif se compose classiquement d'un premier filtre passif accordé sur l'harmonique cinq, d'un second filtre passif accordé sur l'harmonique sept et d'un troisième filtre passe haut. La configuration de ce filtre passif est présentée sur la figure.



**Figure I.5 Configuration du filtre passif avec filtre passe haut.**

La figure suivante présente une autre configuration de filtre passif où l'on utilise des filtres passifs accordés sur l'harmonique 11 et sur l'harmonique 13 au lieu du filtre passe haut.

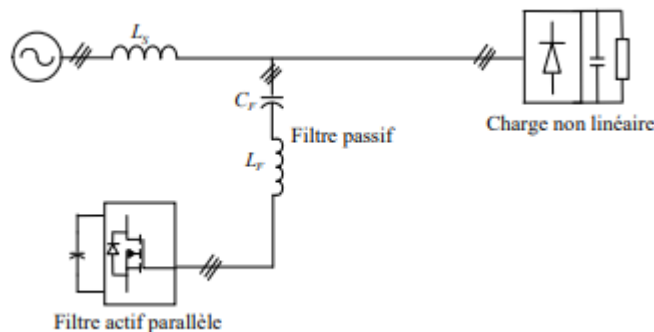


**Figure I.6 Configuration du filtre passif sans filtre passe haut.**

En effet, dans les deux configurations du filtre passif présentées ci-dessus, le coût et la complexité sont des inconvénients majeurs [11]. Ainsi ; les filtres hybride qui existe et dont nous présentons les architectures suivantes sont :

○ **Association série d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif**

Dans cette configuration, les deux filtres actif et passif sont directement connectés en série, sans l'intermédiaire d'un transformateur. L'ensemble est connecté en parallèle sur le réseau comme le montre la figure suivante :

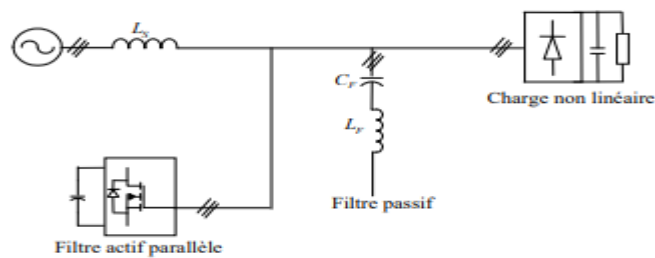


**Figure I.7 Association série d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif.**

Dans ce cas, le filtre passif se comporte comme une impédance faible à la fréquence d'accord et comme une grande impédance à la fréquence fondamentale. Ce système présente deux avantages : le dimensionnement en puissance du filtre actif est encore plus réduit du fait que le courant qui le traverse est plus faible et le filtre actif de puissance est à l'abri d'un éventuel court-circuit de la charge [15] et [13].

○ **Association parallèle d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif**

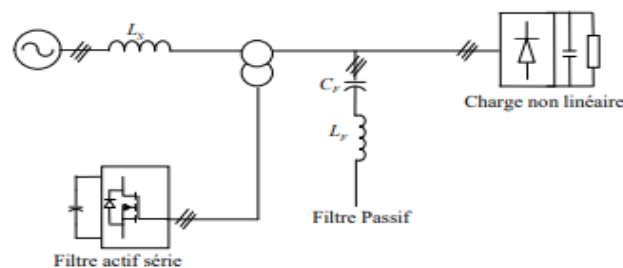
Pour cette topologie, le filtre actif de puissance est connecté en parallèle avec le filtre passif. Tous deux sont également en parallèle avec la charge. Le filtre actif de puissance parallèle sert à compenser les courants harmoniques basses fréquences émis par la charge polluante alors que le filtre passif, accordé sur une fréquence harmonique élevée, permet de compenser les harmoniques hautes fréquences [13].



**Figure I.8 Association parallèle d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif.**

○ **Association d'un filtre actif de puissance série et d'un filtre passif**

Cette structure permet de réduire les risques d'antirésonance entre les éléments des filtres passifs et l'impédance du réseau. Dans ce cas, le filtre actif de puissance série agit comme une résistance vis-à-vis des courants harmoniques et les oblige à circuler dans le filtre passif, tout en restant transparent à la fréquence fondamentale. La figure suivante illustre cette topologie [14].



**Figure I.9 Association d'un filtre actif série et d'un filtre passif.**

## Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit la distorsion harmonique et les différentes sources d'interférence qui affectent les formes d'onde de la tension du réseau, ainsi que leurs effets néfastes sur les équipements électriques qui y sont connectés. Ces effets sont responsables d'une surchauffe et d'une dégradation des performances de l'appareil. Les normes imposées sont également introduites. Ils fixent des limites pour la génération d'harmoniques.

Ensuite, pour réduire l'impact de ces perturbations harmoniques, diverses solutions de dépollution traditionnelles et modernes ont été proposées. Les solutions classiques sont peu efficaces pour traiter ce problème, les techniques mises en œuvre, telles que les filtres passifs, sont souvent pénalisantes en termes d'encombrement et de résonance. De plus, les filtres passifs ne peuvent pas s'adapter à l'évolution du réseau et aux charges polluantes.

Concernant les solutions modernes, nous décrivons deux topologies utilisées, les filtres actifs de puissance et les filtres hybrides. Ces topologies sont conçues pour générer des courants ou des tensions harmoniques afin que les courants et les tensions du réseau redeviennent sinusoïdaux. En effet, grâce aux progrès de l'électronique de puissance, ces solutions peu encombrantes ne résonnent pas avec les composants passifs du réseau et font preuve d'une grande flexibilité face aux évolutions du réseau et aux charges polluantes. Ces solutions modernes peuvent être installées pour compenser toutes les perturbations de courant telles que les harmoniques, les déséquilibres et la puissance réactive.

# Chapitre II

## Filtre actif de puissance parallèle



## II Introduction

Nous proposons dans ce chapitre de démontrer la performance de compensation d'un filtre actif de puissance parallèle à trois bras en utilisant deux méthodes pour identifier les courants de référence.

Nous allons commencer par présenter la construction générale d'un filtre actif de puissance parallèle à trois bras, ainsi que son circuit de contrôle. De plus, nous allons présenter les différentes méthodes d'identification des courants référence par diverses méthodes.

### II.1 Principe de filtre actif de puissance

Dans le cas idéal le rôle du filtre actif de puissance consiste à éliminer tous les harmoniques produits par la charge non linéaire en fournissant à tout instant des harmoniques égaux en amplitude et en opposition de phase à ceux produits par la charge non linéaire, et ceci afin que le courant dans la ligne reste sinusoïdal et égal au fondamental du courant de charge [16].

Un filtre actif de puissance est un dispositif qui utilise au moins un convertisseur statique pour remplir la fonction de dépollution harmonique. Les besoins en termes de dépollution harmonique sont divers, parce qu'on espère toujours garantir :

- La non pollution d'un réseau propre alimentant une charge sensible
- Le bon fonctionnement d'une charge sensible dans un environnement pollué.

### II.2 Principe d'un filtre actif de puissance parallèle

Les filtres actifs de puissance sont connectés en parallèle sur le réseau, comme le montre la figure ci-dessous. Le courant perturbateur injecté dans le réseau est égal au courant perturbateur absorbé par la charge la pollution, mais en opposition de phase. Le courant côté source est alors sinusoïdal. Par conséquent, le but des filtres actifs de puissance parallèles est d'empêcher les courants harmoniques et réactifs, générés par les charges non linéaires, de circuler à travers l'impédance du réseau, en amont du point de raccordement du filtre actif de puissance. [17].

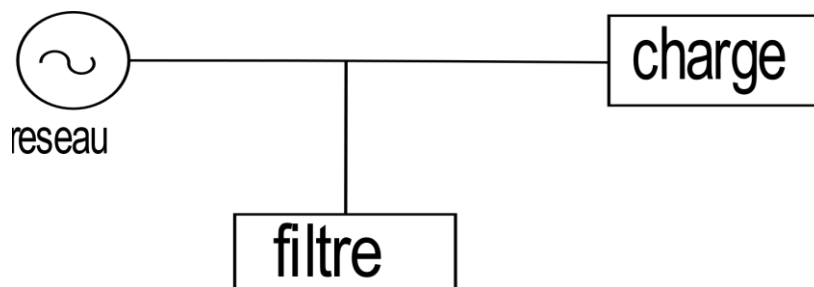


Figure II.1 Schéma bloc du filtre actif connecte en parallèle sur le réseau.

## II.3 Topologie générale

Généralement, les FAP sont utilisés pour le contrôle de la pollution en moyenne tension (MT). Il se compose de deux parties principales, la partie puissance et la partie commande.

La partie puissance comprend :

- Un onduleur de tension constitué d'interrupteurs d'alimentations,
- Un élément de stockage en général d'un condensateur,
- Et d'un filtre de sortie.

La partie de commande comprend les parties suivantes :

- Une méthode d'identification des courants perturbateurs,
- Une régulation de la tension continue appliquée à l'élément de stockage d'énergie,
- Une régulation du courant injecté dans le réseau à partir de l'onduleur de tension. [18]

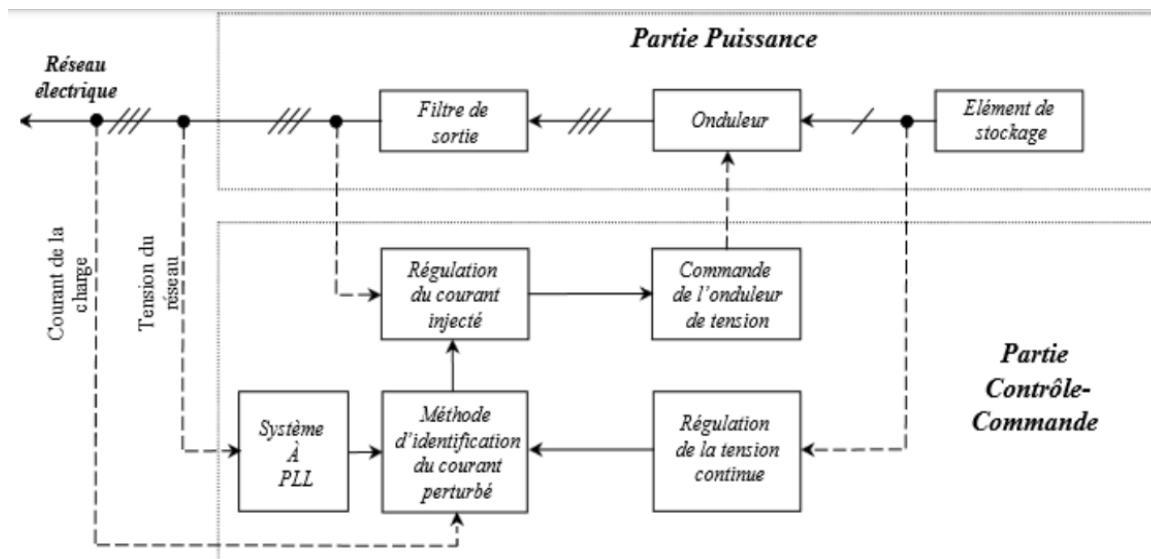


Figure II.2 Structure générale du filtre actif parallèle.

### II.3.1 Étude de la partie puissance

Dans cette section, nous nous intéressons à la partie puissance du filtre actif de puissance parallèle qui est composée d'un :

- L'onduleur de tension basé sur des interrupteurs à diodes antiparallèles pour l'ouverture et la fermeture (IGBT ou MOSFET).
- D'un système de stockage de l'énergie qui consiste en un circuit composé d'un condensateur  $C_{dc}$  et sert de source continue de tension  $V_{dc}$
- Et d'un filtre à la sortie de l'onduleur de tension, qui est habituellement un filtre passif de premier ordre utilisé pour relier l'onduleur de tension au réseau électrique.

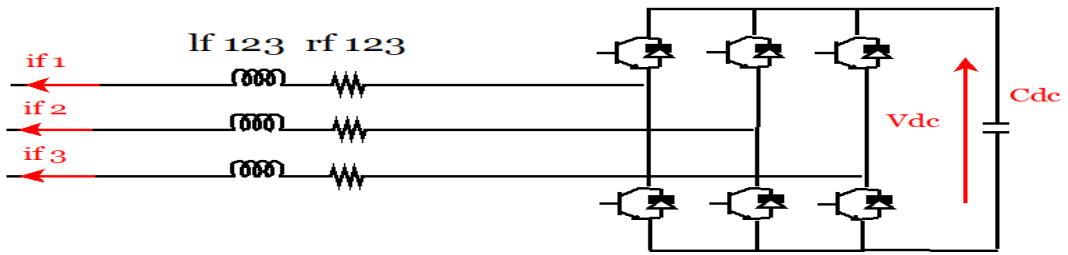


Figure II.3 Partie puissance

De la figure ci-dessus nous remarquons que filtre actif de puissance à trois bras est composé de six interrupteurs. Cet onduleur est connecté à un réseau électrique via un filtre d'entrée de premier ordre. Cependant, la source de tension continue est constitué d'une capacité  $C_{dc}$ , avec  $V_{dc}$  indiquant la tension a leurs bornes, qui est maintenue à une valeur positive quasi constante, comme le montre la figure II.4.

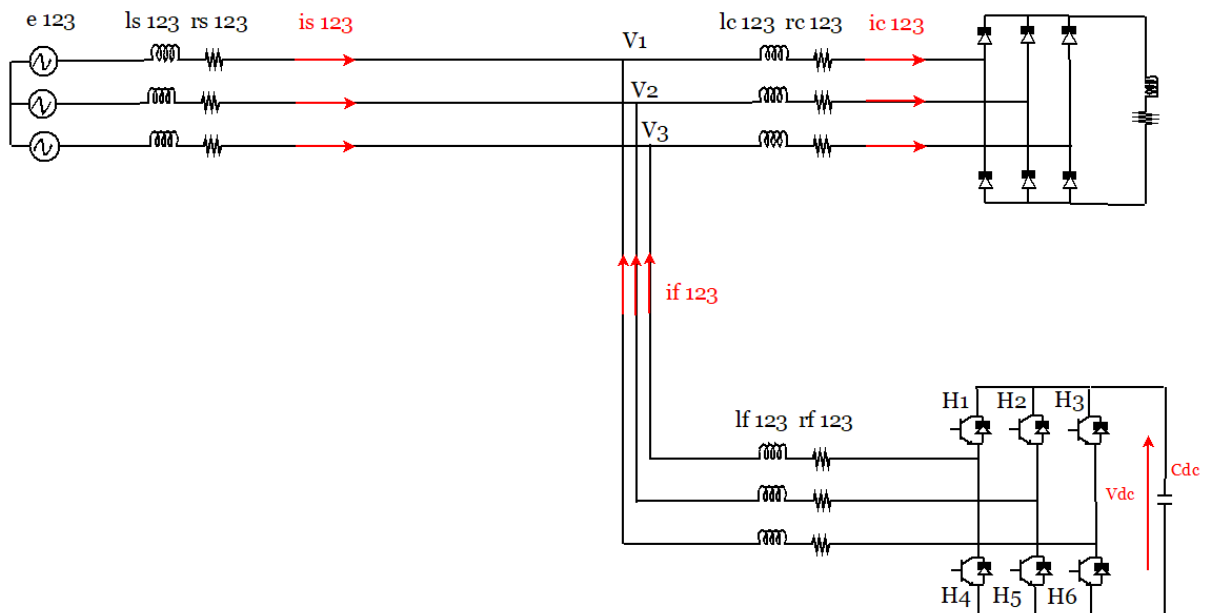


Figure II.4 Filtre actif de puissance à structure tension à trois bras connectés en parallèle au réseau électrique

L'état des signaux de commande détermine si les interrupteurs du filtre actif de puissance s'ouvrent et se ferment ( $S_1, S_2, S_3$ ). En conséquence, nous définissons les états de l'onduleur comme suit :

$$S_1 = \begin{cases} 1, & H_1 \text{ est fermé et } H_4 \text{ est ouvert} \\ 0 & H_1 \text{ est ouvert et } H_4 \text{ est fermé} \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

$$S_2 = \begin{cases} 1, & H_2 \text{ est fermé et } H_5 \text{ est ouvert} \\ 0 & H_2 \text{ est ouvert et } H_5 \text{ est fermé} \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

$$S_3 = \begin{cases} 1, & H_3 \text{ est fermé et } H_6 \text{ est ouvert} \\ 0 & H_3 \text{ est ouvert et } H_6 \text{ est fermé} \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

## CHAPITRE II : Filtre actif de puissance parallèle

Les tensions entre phases imposées par l'onduleur sont alors égales à :

$$\begin{bmatrix} V_{f1} - V_{f2} \\ V_{f2} - V_{f3} \\ V_{f3} - V_{f1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1 & -S_2 \\ S_2 & -S_3 \\ S_3 & -S_1 \end{bmatrix} V_{dc} \quad (\text{II.4})$$

Les tensions simples ( $V_{f1}, V_{f2}, V_{f3}$ ) sont référées au point neutre de la source et vérifiées à l'aide de l'équation :

$$\begin{bmatrix} V_{f1} \\ V_{f2} \\ V_{f3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ V_{s3} \end{bmatrix} + L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{f1} \\ i_{f2} \\ i_{f3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

En supposant que les contraintes du réseau électrique sont équilibrées et que le nombre total de courants circulant dans le filtre de puissance actif est nul. Nous avons maintenant les équations suivantes :

$$\begin{cases} V_{s1} + V_{s2} + V_{s3} = 0 \\ i_{f1} + i_{f2} + i_{f3} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

Nous déduisons des équations (II.5) et (II.6) :

$$V_{f1} + V_{f2} + V_{f3} = 0 \quad (\text{II.7})$$

En utilisant les équations (II.4) et (II.7), nous obtenons alors :

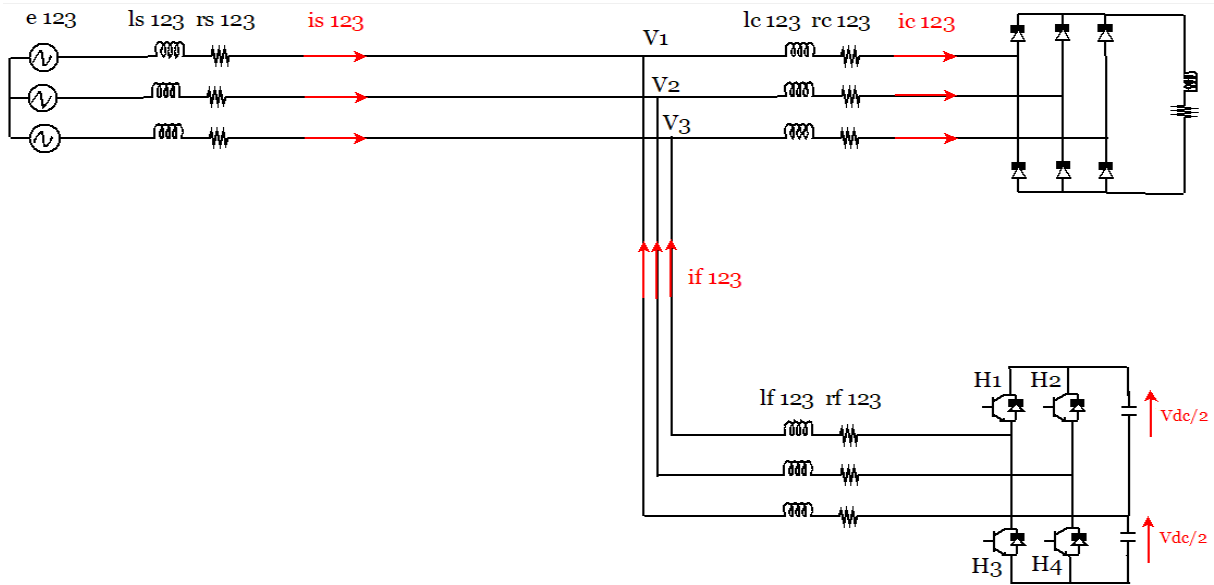
$$\begin{bmatrix} V_{f1} \\ V_{f2} \\ V_{f3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2S_1 & -S_2 & -S_3 \\ -S_1 & 2S_2 & -S_3 \\ -S_1 & -S_2 & 2S_3 \end{bmatrix} \frac{V_{dc}}{3} \quad (\text{II.8})$$

Nous pouvons exprimer huit tensions de sortie à partir du filtre actif de puissance  $V_{f1,2,3}$  (en référence au N neutre de la source), comme le montre le Tableau (II.1).

**Tableau II.1 : Tensions générées par l'onduleur de tension à trois bras**

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

Il existe un deuxième type de filtre actif de puissance à savoir le filtre actif de puissance parallèle à deux bras avec condensateurs point milieu, qui est composé de quatre interrupteurs. Ce type d'onduleur est relié à une phase par deux condensateurs ( $C_{dc1}$  et  $C_{dc2}$ ). La tension à leurs bornes est égale à  $V_{dc}/2$ . Cette tension est également maintenue à une valeur positive quasi constante, comme le montre la figure [19]-[20].



**Figure II.5 Filtre actif de puissance à structure tension à deux bras connectés en parallèle au réseau électrique**

L'état des signaux de commande détermine si les interrupteurs du filtre actif de puissance s'ouvrent et se ferment ( $S_1$  et  $S_2$ ). En conséquence, nous définissons les états de l'onduleur comme suit :

$$S_1 = \begin{cases} 1, & H_1 \text{ est fermé et } H_3 \text{ est ouvert} \\ 0 & H_1 \text{ est ouvert et } H_3 \text{ est fermé} \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

$$S_2 = \begin{cases} 1, & H_2 \text{ est fermé et } H_4 \text{ est ouvert} \\ 0 & H_2 \text{ est ouvert et } H_4 \text{ est fermé} \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

Les tensions entre phases imposées par l'onduleur sont alors égales à :

$$\begin{cases} V_{f1n} = V_{f10} + V_{0n} \\ V_{f2n} = V_{f20} + V_{0n} \\ V_{f3n} = V_{0n} \end{cases} \quad (\text{II.11})$$

A partir de l'équation (II.8) et en tenant compte de (II.12), nous obtenons :

$$V_{0n} = -\frac{(V_{f1} + V_{f20})}{2} \quad (\text{II.12})$$

En mettant l'expression (II.14) dans (II.13), nous avons :

$$\begin{bmatrix} V_{f1} \\ V_{f2} \\ V_{f3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2/3 & -1/3 \\ -1/3 & 2/3 \\ -1/3 & -1/3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{f1} \\ V_{f20} \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

Où

$$\begin{bmatrix} V_{f1} \\ V_{f20} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2S_1 - 1 \\ 2S_1 - 1 \end{bmatrix} \frac{V_{dc}}{2} \quad (\text{II.14})$$

Ainsi, nous avons quatre cas possibles de tension de sortie du filtre actif de puissance  $V_{f1,2,3}$  récapitulés dans le tableau suivant :

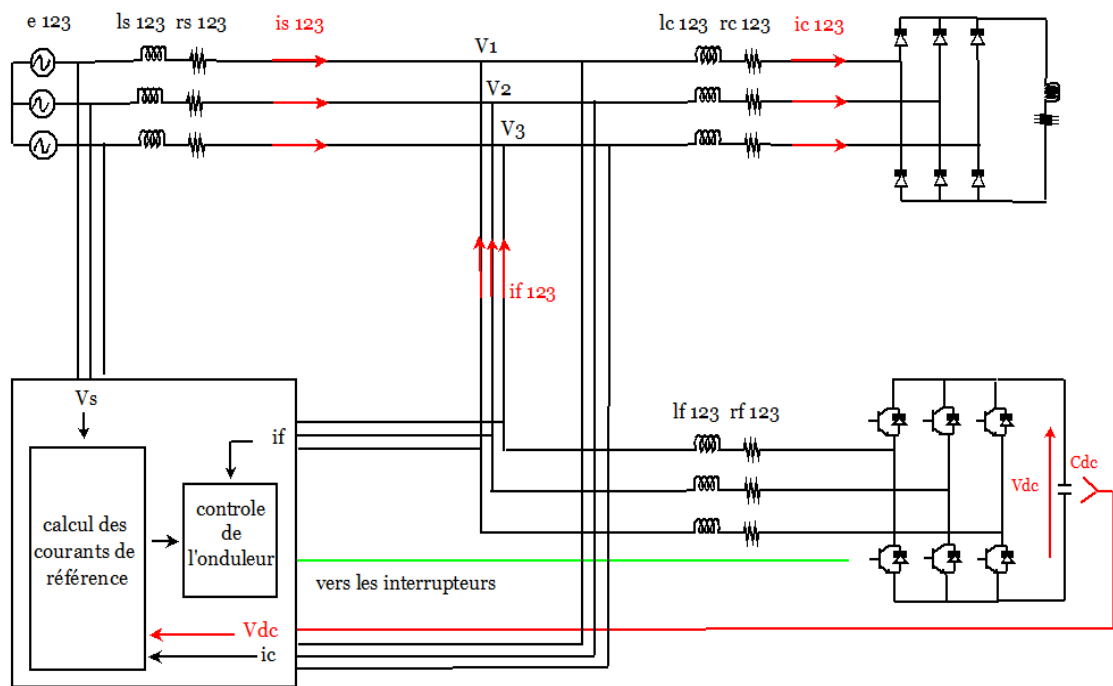
**Tableau II.2 : Tensions générées par l'onduleur de tension à deux bras**

N° du cas	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$V_{f1}$	$V_{f2}$	$V_{f3}$
0	0	0	0	$-V_{dc}/6$	$-V_{dc}/6$	$-V_{dc}/3$
1	0	0	1	$V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$	0
2	0	1	0	$-V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$	0
3	0	1	1	$V_{dc}/6$	$V_{dc}/6$	$-V_{dc}/3$

### II.3.2 Étude de la partie commande

L'objectif des filtres actifs de puissance parallèles est de compenser les harmoniques de courant et l'énergie réactive générée par les charges non linéaires. Il existe deux sortes de stratégies de commande : la commande directe et la commande indirecte.

- A. Concernant la commande qui est dite directe si son fonctionnement est basé sur la comparaison du courant de référence  $i_{ref}(t)$ , qui est obtenu par extraction des courants harmoniques de la charge, aux courants injectés par le filtre actif de puissance  $I_f(t)$ , comme illustré à la figure II.6



**Figure II.6 Stratégie de commande directe d'un filtre actif de puissance à trois fils**

Cette commande contient plusieurs stratégies de commande telles que :

- **Méthode basée sur les puissances réelles et imaginaires instantanées**

H. Akagi a été le premier à introduire cette méthode [21]. En transformant les tensions simples  $v_{s1}(t), v_{s2}(t), v_{s3}(t)$  de la source et les courants de ligne  $i_{c1}(t), i_{c2}(t), i_{c3}(t)$  dans le repère  $(\alpha, \beta)$ . Cette transformation dite de Concordia transforme un système équilibré triphasé en système biphasé, ce qui simplifie les équations mathématiques et réduit les coûts d'installation. Dans le diagramme  $(\alpha, \beta)$ , le vecteur général  $x_{abc}$  peut être représenté par l'expression :

$$\begin{bmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & \sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{s1} \\ v_{s2} \\ v_{s3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

Et pour les courants :

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & \sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c1} \\ i_{c2} \\ i_{c3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

Ensuite, nous faisons le calcul de la puissance instantanée réelle  $p$  et la puissance instantanée imaginaire  $q$  comme suite :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{\alpha} & v_{\beta} \\ -v_{\beta} & v_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

Dans le cas général, chacune des puissances réelle  $p$  et imaginaire  $q$  instantanées s'expriment comme la somme de deux parties, une partie continue et une partie alternative, ce qui nous permet d'écrire l'expression ci-dessous :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{p} + \tilde{p} \\ \bar{q} + \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (\text{II.17})$$

Avec :

$\bar{p}$  : Une puissance continue liée à la composante fondamentale active du courant et de la tension.

$\bar{q}$ : Une puissance continue liée à la composante fondamentale réactive du courant et de la tension.

$\tilde{p}$  Et  $\tilde{q}$ : des puissances alternatives liées à la somme des composantes harmoniques du courant et de la tension.

Parce que nous voulons compenser les harmoniques et l'énergie réactive, nous utilisons un filtre passe haut pour extraire la composante continue de la puissance, nous pouvons ainsi déduire l'expression en inversant la relation de l'équation (II.16).

$$\begin{bmatrix} i_{ref\ \alpha} \\ i_{ref\ \beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \begin{bmatrix} v_{\alpha} & -v_{\beta} \\ v_{\beta} & v_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \bar{q} + \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

Les courants perturbateurs triphasés qui représentent les courants identifiés, dits courants de référence  $i_{ref1}$ ,  $i_{ref2}$ ,  $i_{ref3}$ , sont alors calculés à partir de la transformation inverse de Concordia

$$\begin{bmatrix} i_{ref1} \\ i_{ref2} \\ i_{ref3} \end{bmatrix} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ref\alpha} \\ i_{ref\beta} \end{bmatrix} \quad (II.19)$$

○ **Méthode dite du référentiel liée au synchronisme (SRF)**

Cette méthode introduite par Bhattacharya [24] utilise les étapes suivantes :

Différemment à la méthode précédente, la transformation de Concordia sur le plant  $(\alpha, \beta)$  s'appliquera uniquement aux courants de charge  $(i_{c1}(t), i_{c2}(t), i_{c3}(t))$ .

L'avantage majeur de cette méthode est que les tensions harmoniques n'ont aucun effet sur les courants identifiés, ce qui permet un meilleur filtrage. En conséquence, nous obtiendrons l'expression suivante :

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c1} \\ i_{c2} \\ i_{c3} \end{bmatrix} \quad (II.20)$$

En utilisant une P.L.L insensible aux harmoniques de tension, on peut extraire les signaux  $\sin(\hat{\theta})$  et  $\cos(\hat{\theta})$  de la tension fondamentale du réseau, et ainsi obtenir l'expression des courants dans le repère d-q :

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\hat{\theta}) & -\cos(\hat{\theta}) \\ \cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} \quad (II.21)$$

Ces composantes peuvent alors être exprimées comme la somme d'une composante continue et d'une composante alternative :

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{i}_d & \tilde{i}_d \\ \bar{i}_q & \tilde{i}_q \end{bmatrix} \quad (II.22)$$

Avec :

$\bar{i}_d$  Étant le courant continu lié à la composante fondamentale active du courant

$\bar{i}_q$  Étant le courant continu lié à la composante fondamentale réactive du courant

$\tilde{i}_d$  Et  $\tilde{i}_q$  étant les courants alternatifs liés à la somme des composantes perturbatrices du courant.

Du fait que nous voulons compenser les harmoniques de courant et l'énergie réactive, Dans ce cas, nous également un filtre passe haut pour extraire la composante continue du curant  $i_d$ . Par conséquence, nous avons l'expression suivante :

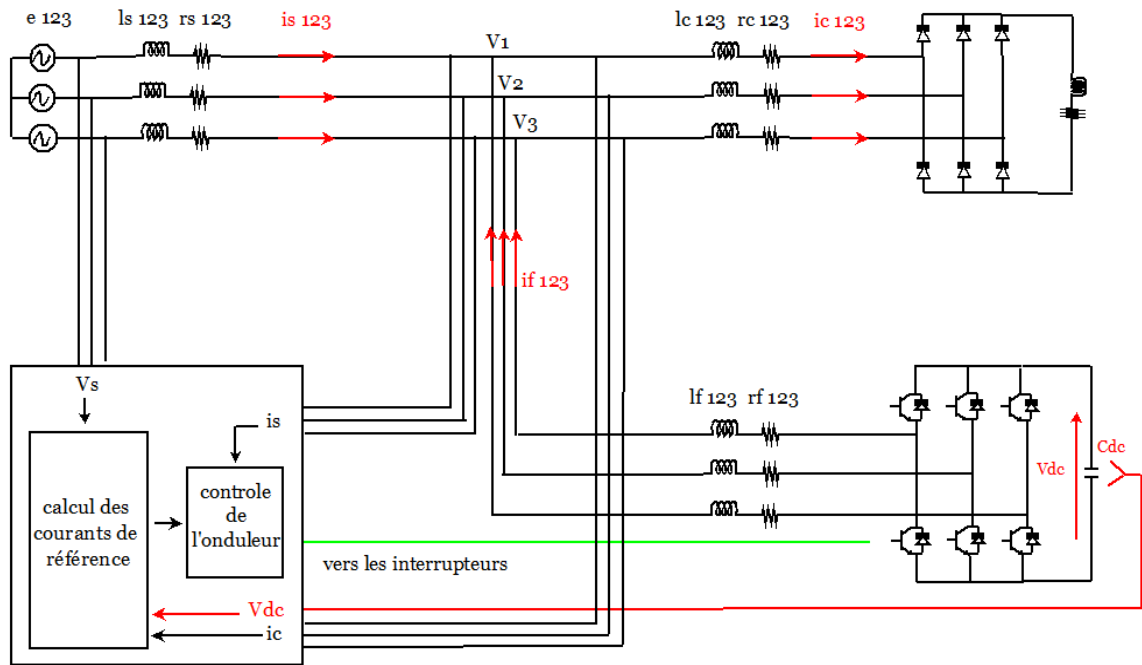
$$\begin{bmatrix} i_{ref\alpha} \\ i_{ref\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\hat{\theta}) & \cos(\hat{\theta}) \\ -\cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_d \\ \bar{i}_q + \tilde{i}_q \end{bmatrix} \quad (II.23)$$



Les courants perturbateurs triphasés qui représentent les courants identifiés, dits courants de référence ( $i_{ref1}$ ,  $i_{ref2}$ ,  $i_{ref3}$ ), sont alors calculés à partir de la transformation inverse de Concordia comme suite :

$$\begin{bmatrix} i_{ref1} \\ i_{ref2} \\ i_{ref3} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ref\alpha} \\ i_{ref\beta} \end{bmatrix} \quad (II.24)$$

B. Concernant la commande indirecte, elle est basée sur la comparaison du courant de référence  $i_{ref}$  avec le courant de source  $i_s(t)$ , comme l'illustre la figure (II.7) :



**Figure II.7 Stratégie de commande indirecte d'un filtre actif de puissance à trois fils**

Pour la commande indirecte, il existe également plusieurs stratégies de commande, parmi elles :

- **Méthode basée sur les puissances réelles et imaginaires instantanées**

Cette méthode utilise la théorie introduite également par H. Akagi [21]. Cependant, contrairement à la stratégie directe, le calcul ne tient compte que de la puissance instantanée. En outre, dans l'inverse de la théorie directe, les composants alternatifs de la puissance instantanée sont éliminés de sorte que seule la composante continue reste en utilisant cette fois-ci un filtre passe bas. Cette méthode permet la compensation indirecte des harmoniques de courant. Son principe est énoncé comme suit :

Soient les tensions simples et les courants linéaires d'un système triphasé sans homopolaire  $v_{s1}(t), v_{s2}(t), v_{s3}(t)$  et  $i_{c1}(t), i_{c2}(t), i_{c3}(t)$ . La transformation de Concordia permet d'obtenir :

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ V_{s3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.25})$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c1} \\ i_{c2} \\ i_{c3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.26})$$

En négligeant les harmoniques de tension, la puissance réelle  $p$  est exprimée par :

$$p = V_\alpha i_\alpha + V_\beta i_\beta$$

La puissance réelle instantanée peut alors être exprimée comme la somme d'une composante continue et d'une composante alternative :

$$p = \bar{p} + \tilde{p} \quad (\text{II.27})$$

Avec  $\bar{p}$  la composante continue de  $p$  et  $\tilde{p}$  la composante alternative de  $p$  :

Les composantes de courant en  $(\alpha - \beta)$  sont données par les expressions suivantes :

$$i_\alpha = \frac{V_\alpha}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} p \quad (\text{II.28})$$

$$i_\beta = \frac{V_\beta}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} p \quad (\text{II.29})$$

En introduisant l'équation 27 dans les équations (II.28) et (II.29), les courant dans les axes  $(\alpha - \beta)$  deviennent

$$i_\alpha = \frac{V_\alpha}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \bar{p} + \frac{V_\alpha}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \tilde{p} \quad (\text{II.30})$$

$$i_\beta = \frac{V_\beta}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \bar{p} + \frac{V_\beta}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \tilde{p} \quad (\text{II.31})$$

Dans ce cas, la seule fonction que nous pouvons assigner au filtre de puissance actif est la compensation des courants harmoniques lorsque  $p_f = \bar{p}$ . En conséquence, nous obtenons :

$$i_{\alpha \text{ref}} = \frac{V_\alpha}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} p_f \quad (\text{II.32})$$

$$i_{\beta \text{ref}} = \frac{V_\beta}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} p_f \quad (\text{II.33})$$

Les courants de référence sont alors donnés comme précédemment par la transformation inverse de Concordia :

$$\begin{bmatrix} i_{\text{ref}1} \\ i_{\text{ref}2} \\ i_{\text{ref}3} \end{bmatrix} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\text{ref}\alpha} \\ i_{\text{ref}\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{II.34})$$

- **Méthode du référentiel lié au synchronisme (SRF)**

Cette méthode utilise la théorie de référence liée au synchronisme décrite précédemment, mais elle est appliquée à une commande indirecte. Son principe est décrit comme suite :

Soient les courant de ligne d'un système triphasé sans homopolaire  $i_{c1}(t), i_{c2}(t), i_{c3}(t)$ . La transformation de Concordia permet d'obtenir :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c1} \\ i_{c2} \\ i_{c3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.35})$$

En générant avec une PLL insensible aux perturbations, les signaux  $\sin(\hat{\theta})$  et  $\cos(\hat{\theta})$  liés a la tension du réseau électrique sont obtenus, nous obtenons alors l'expression :

$$i_d = \sin(\hat{\theta}) i_\alpha - \cos(\hat{\theta}) i_\beta \quad (\text{II.36})$$

La composante  $i_d$  peut être exprimée comme la somme d'une composante continue et d'une composante alternative :

$$i_d = \bar{i}_d + \tilde{i}_d \quad (\text{II.37})$$

Avec  $\bar{i}_d$  la composante continue de  $i_d$  et  $\tilde{i}_d$  la composante alternative de  $i_d$ .

En éliminant la composante alternative du courant par un filtre passe base nous obtenons les courants de référence qui sont alors donnés par l'expression suivante :

$$\begin{bmatrix} i_{ref1} \\ i_{ref2} \\ i_{ref3} \end{bmatrix} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ref\alpha} \\ i_{ref\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{II.38})$$

○ **Commande directe ou indirecte par filtre d'extraction multi-variable (FMV)**

Il existe une autre commande liée au synchronisme qui utilise au lieu d'un filtre passe haut classique pour la commande directe ou un filtre passe bas pour la commande indirecte, un filtre sélectif dit multi variable pour extraire instantanément les harmoniques du courant au niveau de la puissance active et réactive [22] avant de calculer la puissance instantanée. Son principe fondamental est basé sur le travail de Song Hong-Scok [28], qui est basé sur l'extraction de la composante fondamentale des signaux après la transformation de Concordia. Ce filtre multi-variable produit un meilleur résultat que celui des filtres traditionnels.

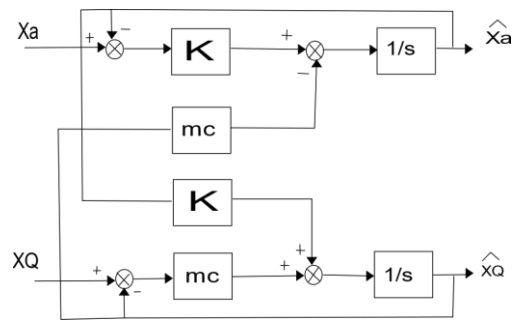
Ce filtre multi-variable à comme expression [22] :

$$\hat{x}_\alpha = \frac{K}{s} (x_\alpha(s) - \hat{x}_\alpha(s)) - \frac{w_c}{s} \hat{x}_\beta(s) \quad (\text{II.39})$$

$$\hat{x}_\beta = \frac{K}{s} (x_\beta(s) - \hat{x}_\beta(s)) - \frac{w_c}{s} \hat{x}_\alpha(s) \quad (\text{II.40})$$

La figure suivante illustre la représentation de ces deux expressions :

## CHAPITRE II : Filtre actif de puissance parallèle



**Figure II.8 : Principe du FMV**

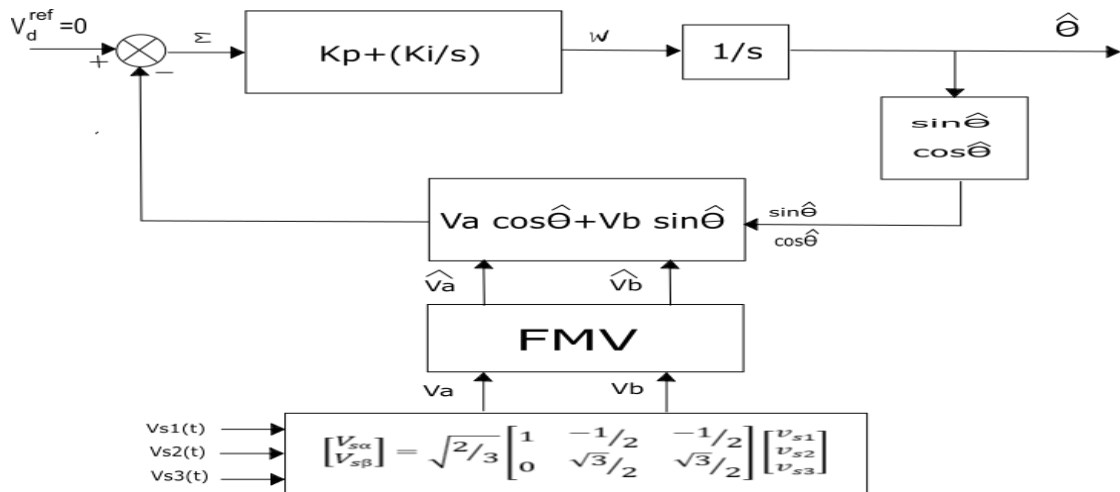
Avec :

$x_{\alpha\beta}$ : Le signal d'entrée est déterminé par l'axe  $\alpha$ - $\beta$  et est de nature tension ou courant.

$\hat{x}_{\alpha\beta}$ : Les composantes fondamentales, de  $x_{\alpha\beta}$

$K$  : constante à fixer ( $K=80$ ) ; et  $\omega_c = 2\pi f$  : Pulsation fondamentale du réseau ( $f=50\text{Hz}$ ).

Nous utiliserons également ce filtre multi-variable dans le PLL pour mieux le protéger des perturbations harmoniques causées par le réseau électrique. En conséquence, le schéma PLL devient comme suite.



**Figure II.9 : PLL avec un filtre multi-variable FMV**

Les figures suivantes montrent la commande complète directe et indirecte utilisant filtre multi-variable :

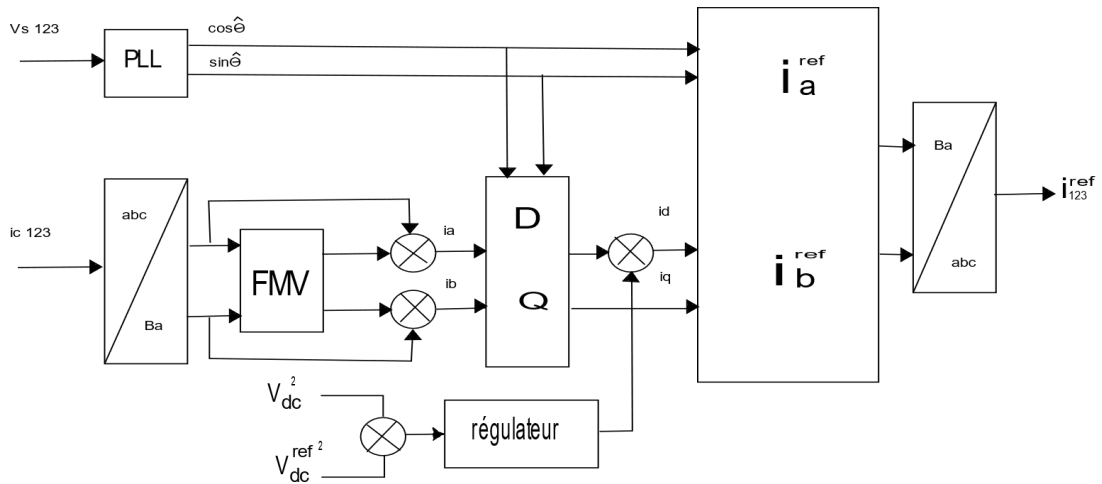


Figure II.10 : Commande d'un filtre actif de puissance par la méthode directe du référentiel lié au synchronisme (SRF) avec FMV

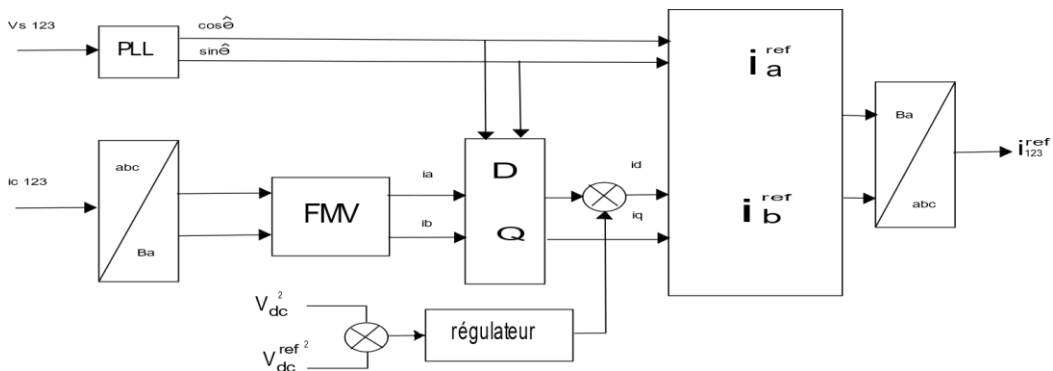


Figure II.11 : Commande d'un filtre actif de puissance par la méthode indirecte du référentiel lié au synchronisme (SRF) avec FMV

## II.4 Résultat de Simulation de l'ensemble charge non-linéaire - filtre actif de puissance à trois bras

Nous allons présenter quelques résultats de simulation obtenus lorsque nous utilisons un filtre actif de puissance pour les deux types de commandes proposées à savoir les commandes directes et les commandes indirectes.

La figure (II.18) représente un réseau triphasé à trois fils alimentant une charge non-linéaire de type RL uniquement.

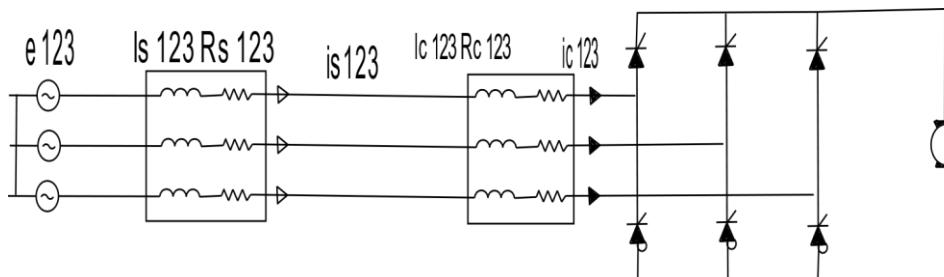


Figure II.12 Schéma de charge non-linéaire alimentant une charge RL connectée au réseau triphasé à trois fils

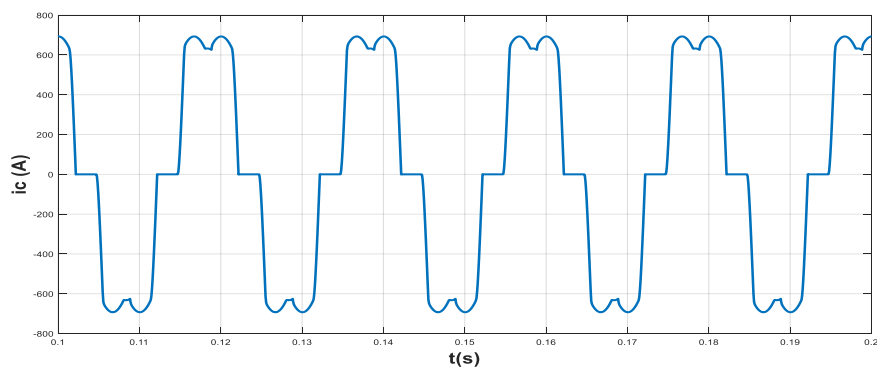
## CHAPITRE II : Filtre actif de puissance parallèle

Les paramètres du réseau électriques sont donnés dans le tableau suivant :

**Tableau II.3 tableaux des Paramètres**

Elément de l'installation	Valeur de paramètre	
Réseau	$f=50$ Hz $R_s=0.001$ ohm,	$V_s=230$ v $L_s=0,00033$ H
Redresseur	$R_c=0,00273$ ohm $R_L=0.79$ ohm	$L_c=0,02319$ H $L_L=0,0000026$ H

Après simulation, l'allure du courant de charge est obtenue comme suite :



**Figure II.13 Courant de charge avant filtrage**

Lorsque nous utilisons le filtre actif de puissance parallèle à commande directe p-q nous utilisons les paramètres suivant du système complet qui contient le réseau électrique alimentant une charge non linéaire et ayant un filtre actif de puissance connecté au réseau électrique.

**Tableau II.4 tableaux des paramètres**

Elément de l'installation	Valeur de paramètre	
Réseau	$f=50$ Hz $R_s=0.001$ ohm,	$V_s=230$ v $L_s=0,00033$ H
Redresseur	$R_c=0,00273$ ohm $R_L=0.79$ ohm	$L_c=0,02319$ H $L_L=0,0000026$ H
Filtre actif parallèle	$R_f=0,00001$ ohm	$L_f=0,0001$ H

La figure suivante montre le système complet avec sa commande directe utilisant la méthode p-q avec un contrôle par hystérésis

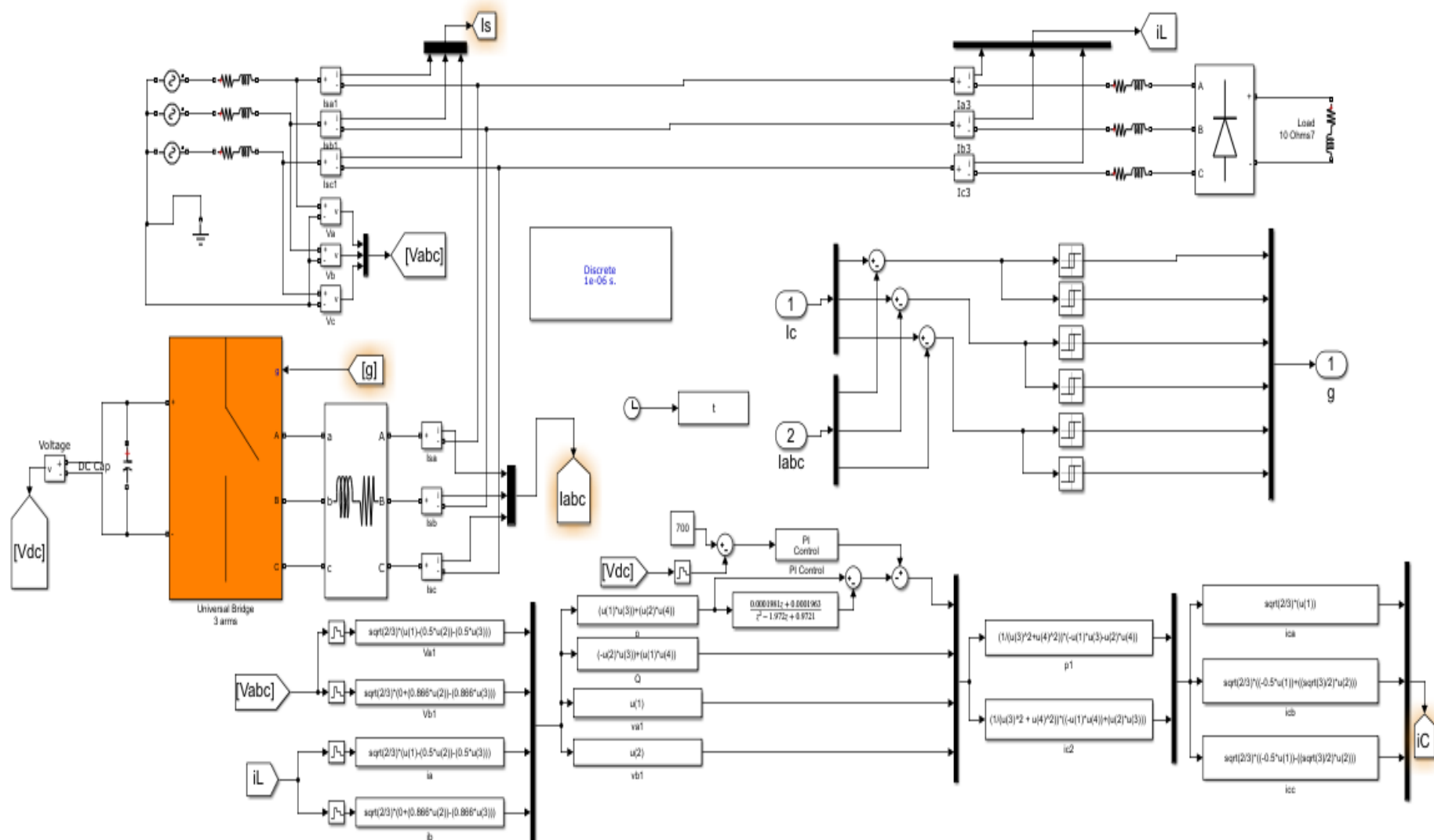
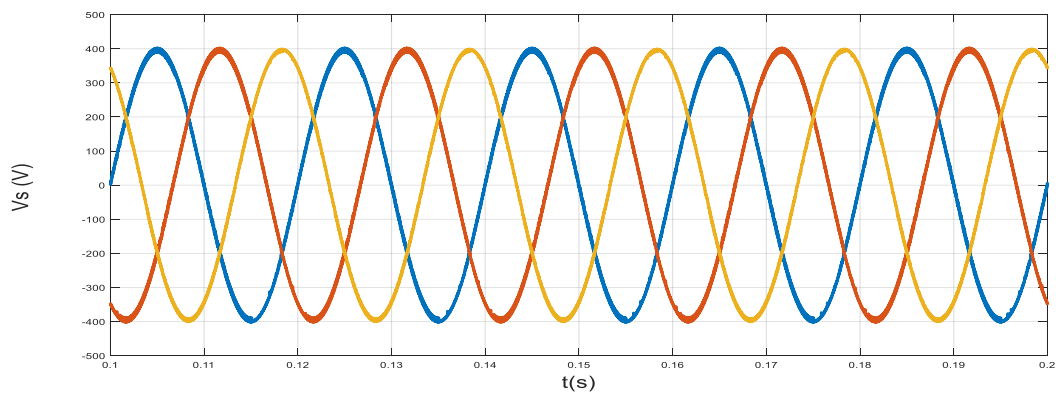


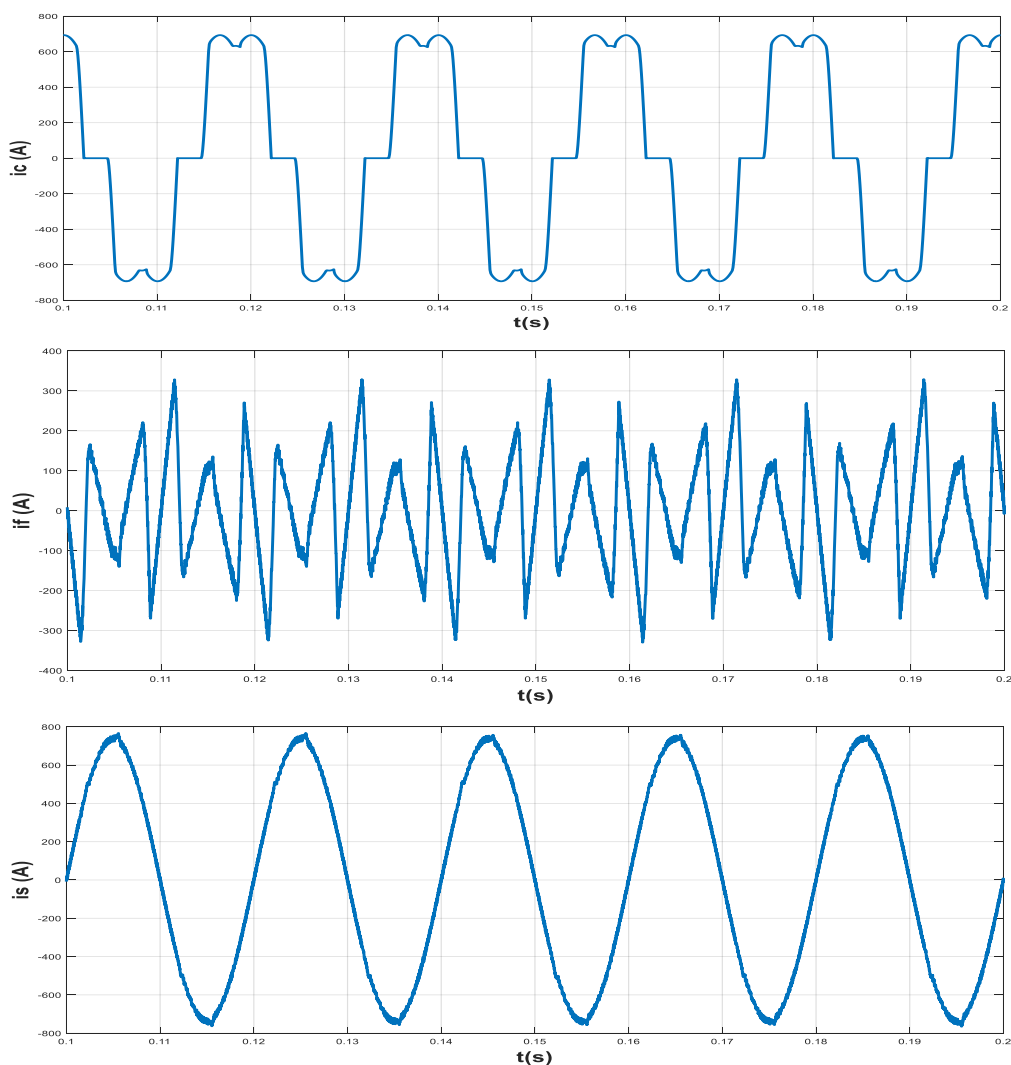
Figure II.14 FAP avec sa commande directe par hystérésis (p-q)

## CHAPITRE II : Filtre actif de puissance parallèle

Les résultats de simulation obtenu son comme suite :



**Figure II.15 Tension de sources (Vs)**



**Figure II.16 Compensation des courants harmoniques d'un pont redresseur alimentant une charge R-L en utilisant un filtre actif de puissance à trois bras et une commande directe p-q**

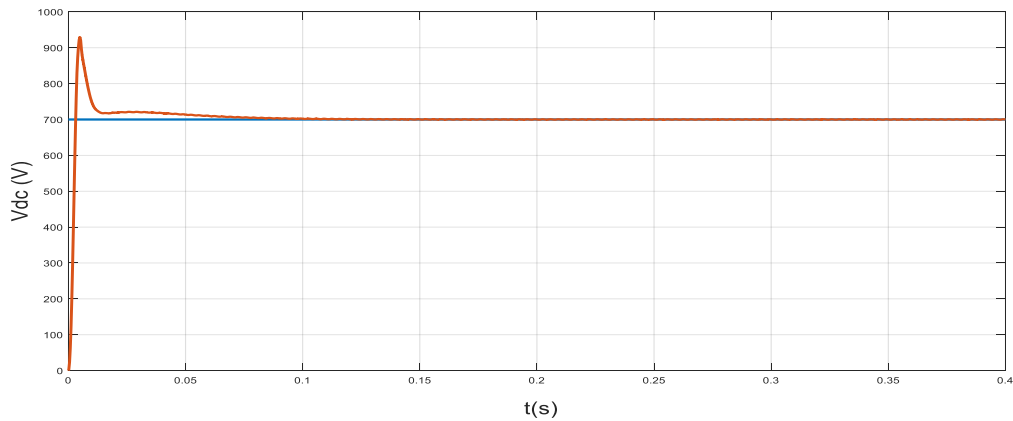
Avec :



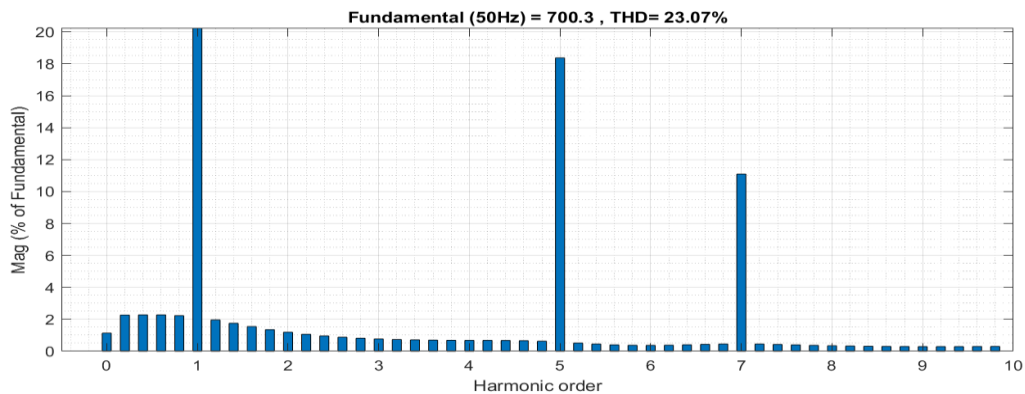
$i_s$ : Courant de source de la première phase après filtrage.

$i_c$ : Courant de charge de la première phase avant le filtrage.

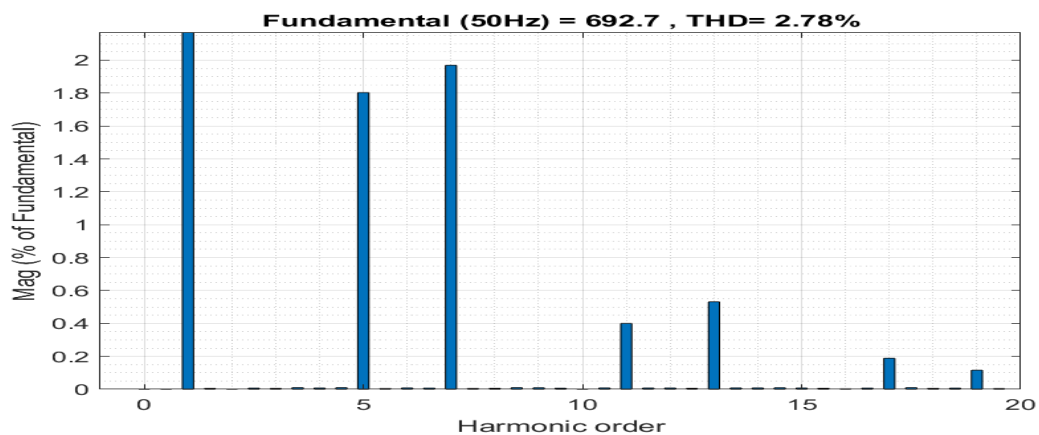
$i_f$ : Courant injecté par la première phase de filtre actif de puissance à deux bras.



**Figure II.17 Tension aux bornes du condensateur**



**Figure II.18 Spectre du courant du réseau avant filtrage (THD=23.07%)**



**Figure II.19 Spectre du courant du réseau après filtrage (THD=2.78%)**

Lorsque nous utilisons la commande directe d-q avec un contrôle par hystérésis, nous obtenons la figure complète de notre système :

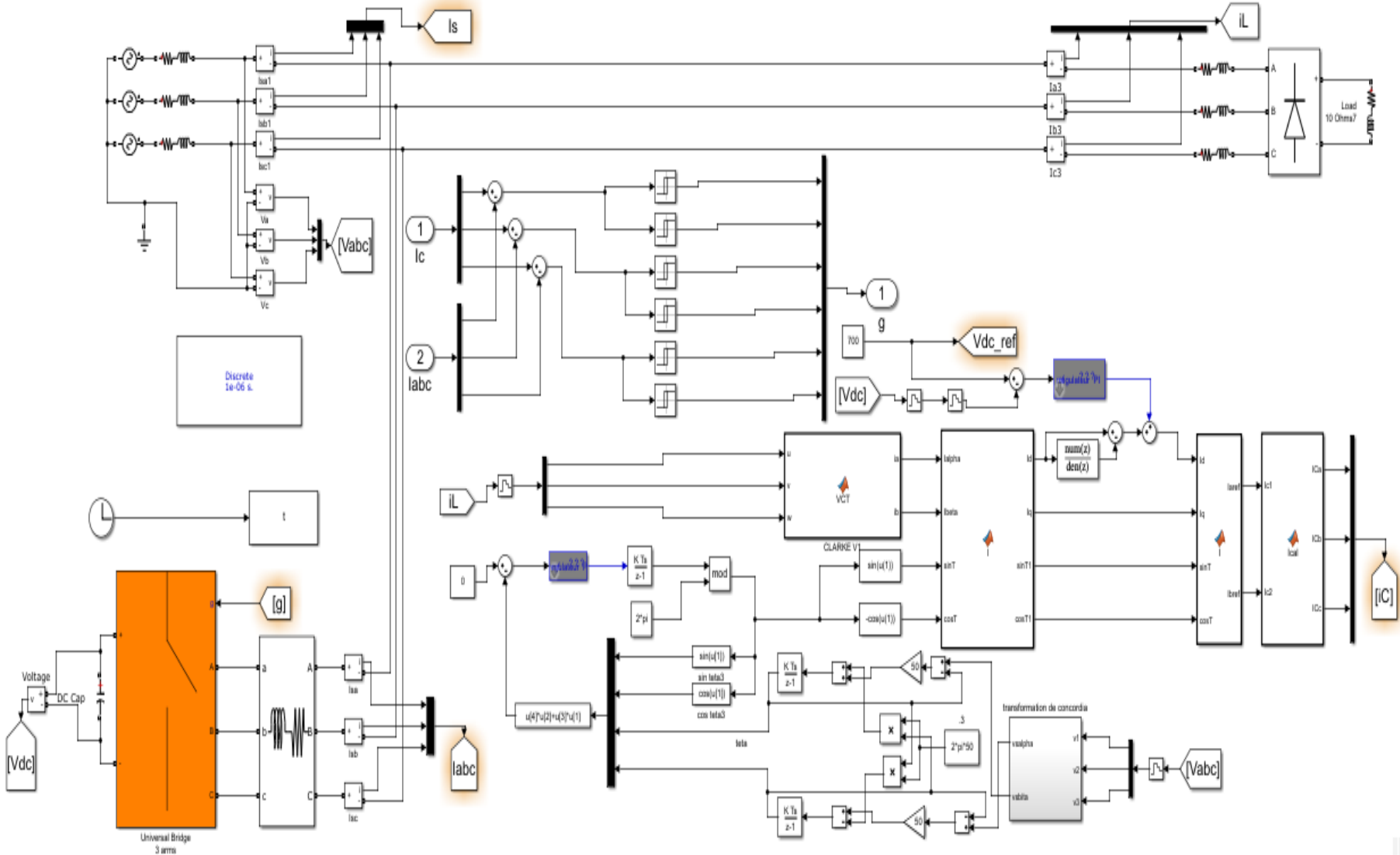
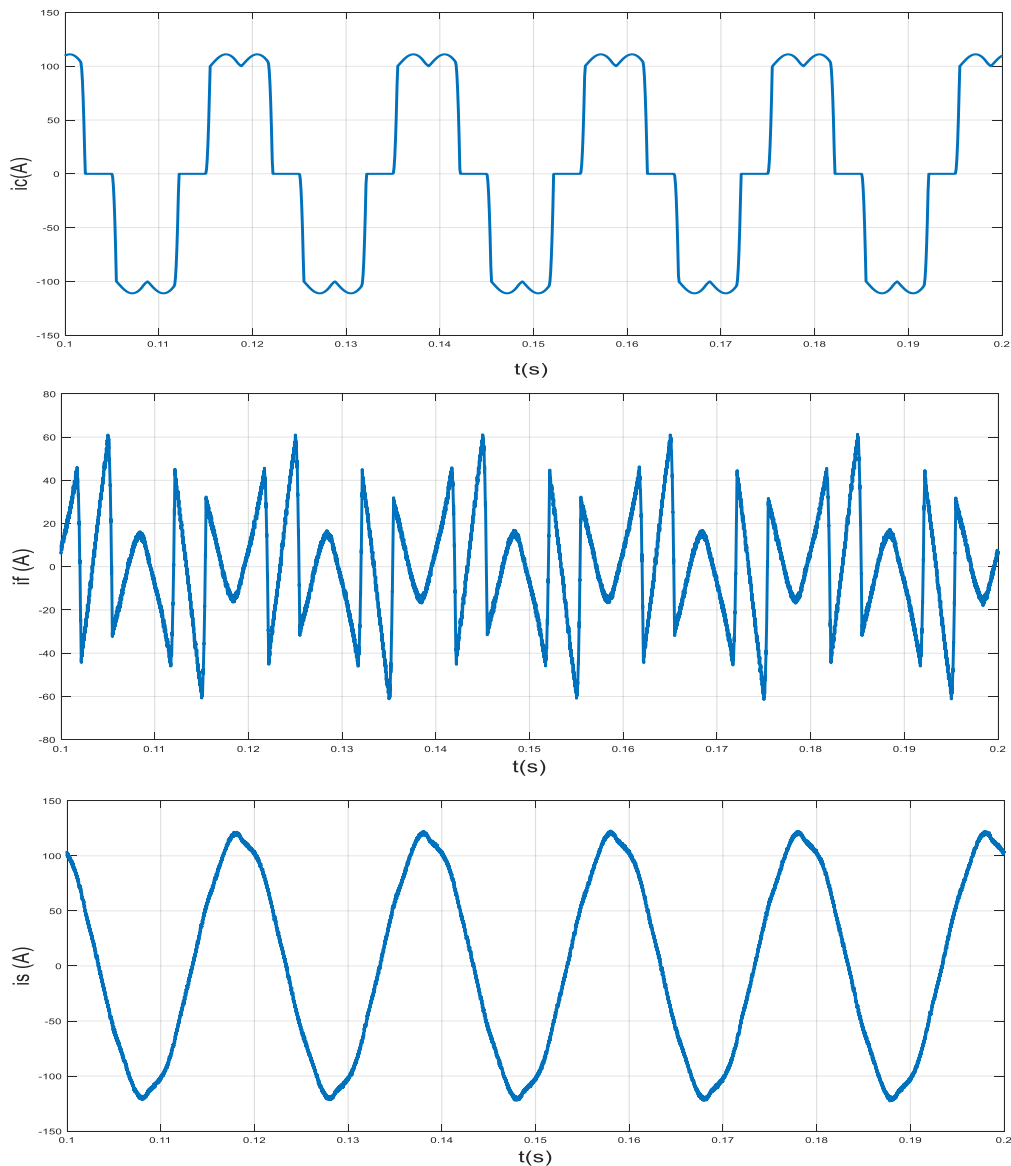


Figure II.20 FAP avec sa commande directe par hystérésis (d-q)

Les figures suivantes montrent les résultats de simulation obtenus lorsque nous utilisons la commande directe d-q.



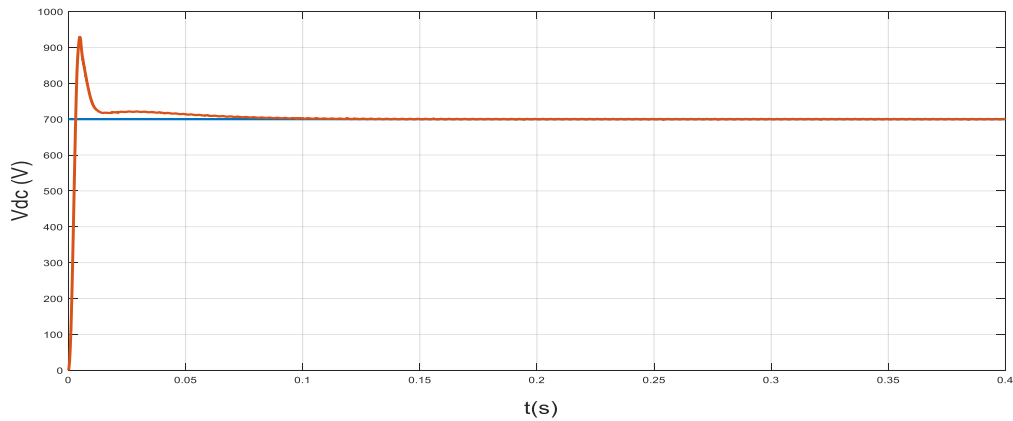
**Figure II.21 Compensation des courants harmoniques d'un pont redresseur alimentant une charge R-L en utilisant un filtre actif de puissance à trois bras et une commande directe d-q**

Avec :

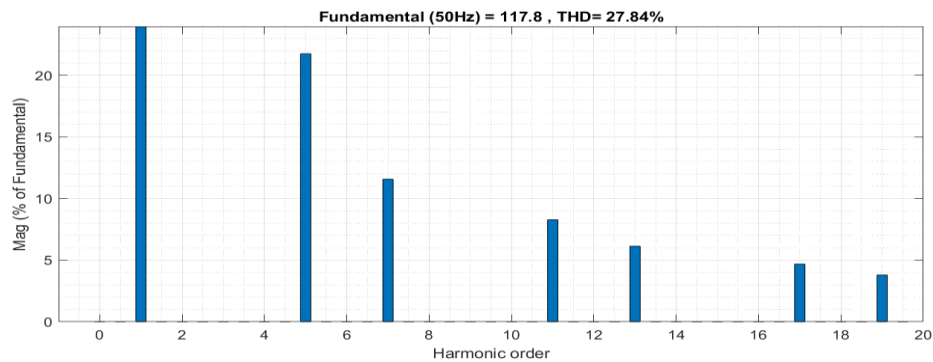
$i_s$ : Courant de source de la première phase après filtrage.

$i_c$ : Courant de charge de la première phase avant le filtrage.

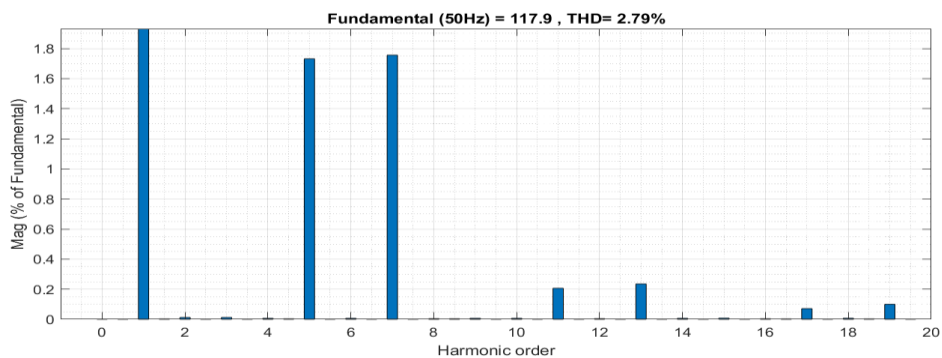
$i_f$ : Courant injecté par la première phase de filtre actif de puissance à deux bras.



**Figure II.22 Tension aux bornes du condensateur**



**Figure II.23 Spectre du courant du réseau avant filtrage (THD=27.84%)**



**Figure II.24 Spectre du courant du réseau après filtrage (THD=2.79%)**

Nous remarquons de ces deux simulations (utilisant la méthode p-q et la méthode d-q) que la tension aux bornes du condensateur est constante du fait que la régulation de ce dernier correctement réaliser. De plus nous remarquons que le THD après filtrage des deux commandes donne le même résultat, à savoir un THD inférieur à 5% ce qui respecte les normes IEC.

Nous allons maintenant présenter les résultats de simulation obtenus lorsque nous utilisons un filtre actif de puissance triphasé a deux bras avec condensateur a point milieu.

## CHAPITRE II : Filtre actif de puissance parallèle

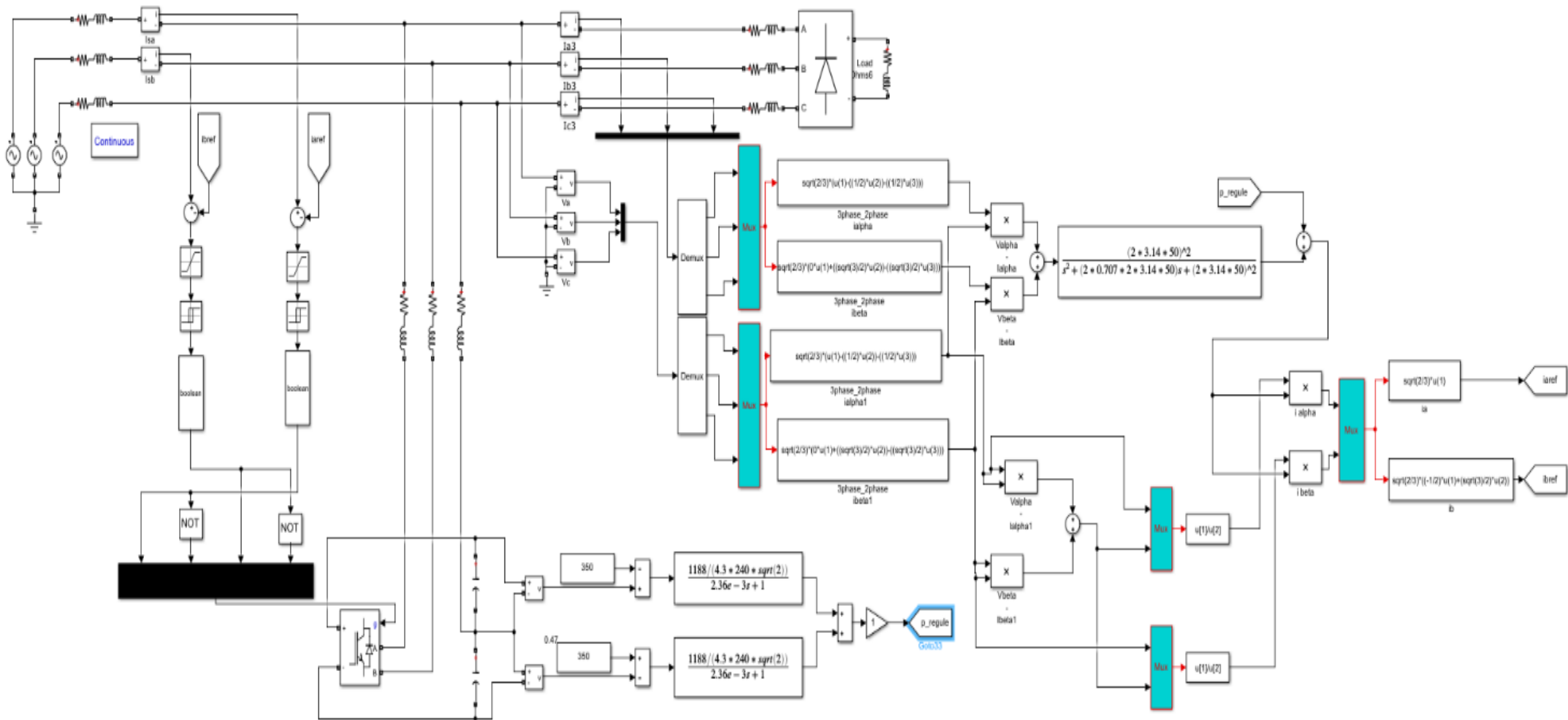


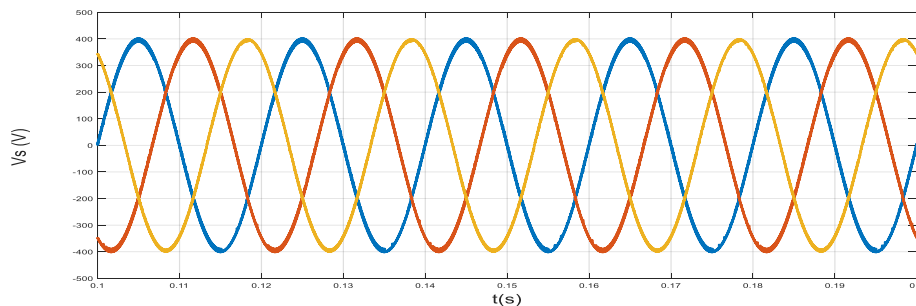
Figure II.25 FAP a deux bras avec condensateur a point milieu utilisant une commande indirecte.

Les paramètres de notre système est donnée dans le tableau suivant :

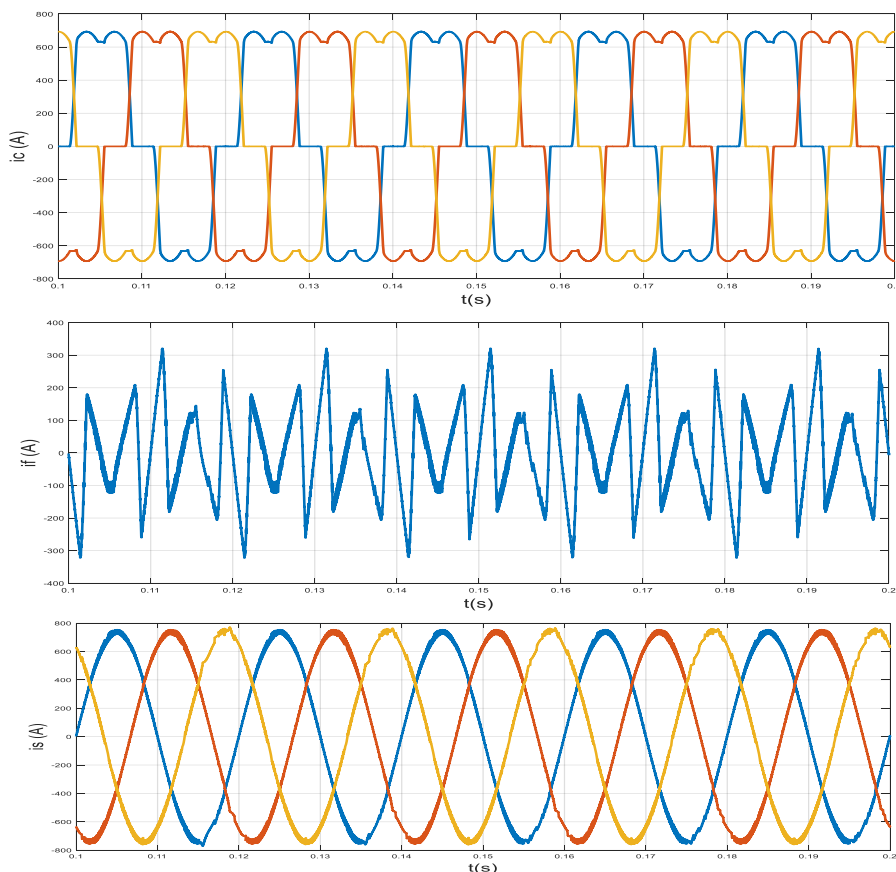
**Tableau II.5 Paramètres**

Elément de l'installation	Valeur de paramètre	
Réseau	$f=50$ Hz $R_s=0.001$ ohm,	$V_s=230$ v $L_s=0,00001$ H
Redresseur	$R_c=0,00273$ ohm $R_L=0.79$ ohm	$L_c=0,02319$ H $L_L=0,0000026$ H
Filtre actif parallèle	$R_f=0,005$ ohm	$L_f=0,0001$ H

Les figures suivantes montrent les résultats de simulation :



**Figure II.26 Figure Tension de sources ( $V_s$ )**



**Figure II.27 Figure Onduleur triphasé à deux bras avec condensateur à point milieu**

Avec  $i_s$ : courant de source,  $i_c$ : courant de charge et  $i_f$ : courant injecté.

## CHAPITRE II : Filtre actif de puissance parallèle

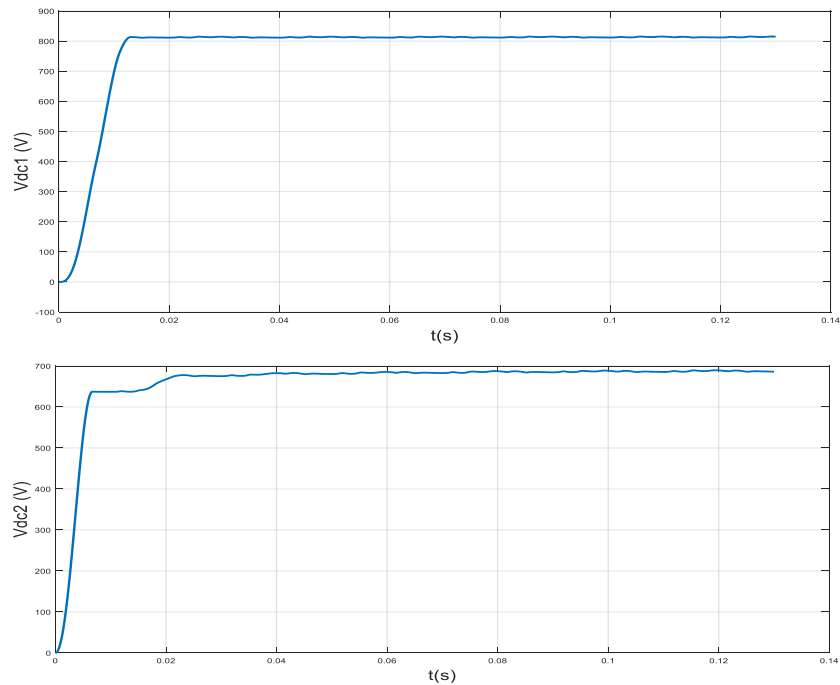


Figure II.28 Tensions aux bornes des condensateurs  $V_{dc1}$  et  $V_{dc2}$

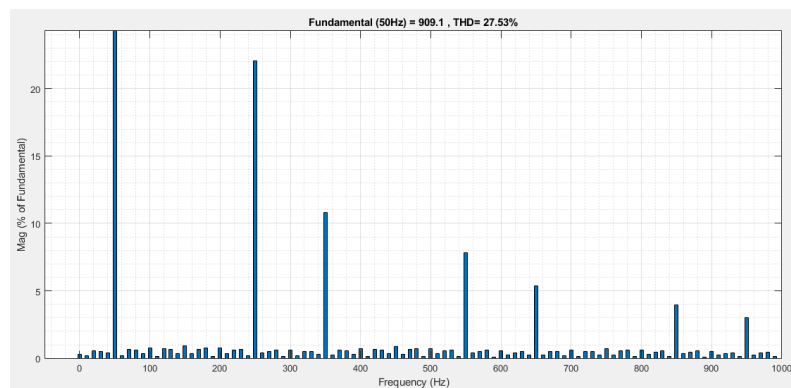


Figure II.29 FFT du courant de charge (THD=27.53%)

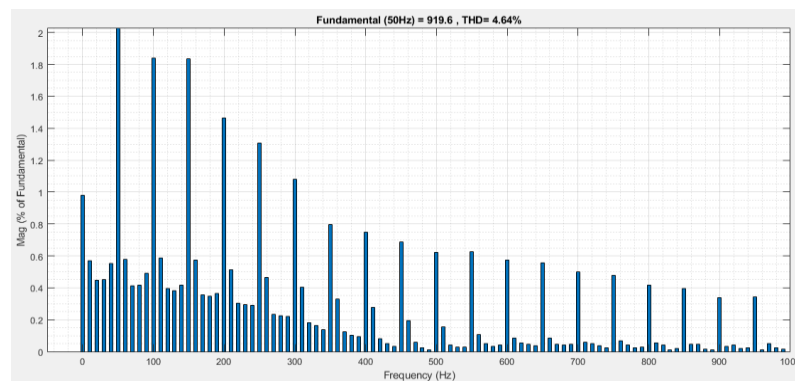


Figure II.30 FFT du courant de source (THD=4.64%)

Les chiffres montrent que ce type de topologies de filtre actif de puissance à point milieu donne également de bon résultat et qu'il élimine les harmoniques créées par la charge non linéaire.

## **Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les nombreux éléments qui composent la structure du filtre actif de puissance parallèle, qui est divisé en deux parties : la puissance et la commande. Nous avons ensuite écrit les techniques d'extraction de courant de référence.

Notre objectif est d'éliminer les harmoniques de courant et de compenser l'énergie réactive générée par les charges non linéaires. À cette fin, nous avons utilisé un filtre parallèle de puissance actif basé sur un onduleur de tension à trois bras avec l'identification de puissances instantanées (p-q) méthode pour compenser les courants harmoniques générés par la charge non linéaire. Nous avons simulé deux structures de filtre actif de puissance à savoir le filtre active de puissance parallèle et le filtre active de puissance parallèle à point milieu. Les deux structures avec leurs commandes on montrer une bonne compensation des courants harmoniques.



# Chapitre III

## Filtre hybride de puissance parallèle

### III Introduction

Le filtre hybride résulte de l'association d'un filtre actif de puissance et d'un filtre passif, La puissance du convertisseur du filtre actif de puissance est considérablement réduite grâce aux éléments passifs. En effet, les filtres passifs et actifs se partagent les tâches : le filtre passif s'occupe de la compensation d'une grande partie des harmoniques tandis que le filtre actif de puissance prend soin de maintenir la performance du filtrage en fonction de l'évolution de la charge et le réseau.

#### III.1 Filtre actif de puissance parallèle à commande indirecte

Après avoir étudié dans le chapitre précédent l'algorithme l'identification des courants harmoniques de références, ainsi que les stratégies de commande du filtre actif de puissance. Nous allons présenter dans ce chapitre, la simulation sous MATLAB de notre model d'étude, dans le but d'assurer la compensation les courants harmoniques.

Nous allons présenter maintenant les résultats de simulation obtenus lorsque nous utilisons un filtre actif de puissance à trois bras à commande indirecte utilisant un contrôleur hystérésis. La figure III.1 montre le schéma de simulation du système complet. Les paramètres de ce système sont donnés sur la tableau suivant :

**Tableau III.1 Table du Paramètres**

Elément de l'installation	Valeur de paramètre	
Réseau	$f=50$ Hz $V_s=230$ v $R_s=0,001$ ohm,	$L_s=0.00001$ mH
Redresseur	$R_c=0,00273$ ohm $R_L=2$ ohm	$L_c=0,1$ mH $L_L=2.6$ mH
Filtre actif parallèle	$R_f=0,00005$ ohm	$L_f=0,183$ mH

Nous allons maintenant présenter les résultats de simulation obtenus lorsque nous utilisons un FAP à commande indirecte.

### CHAPITRE III : Filtre hybride de puissance parallèle

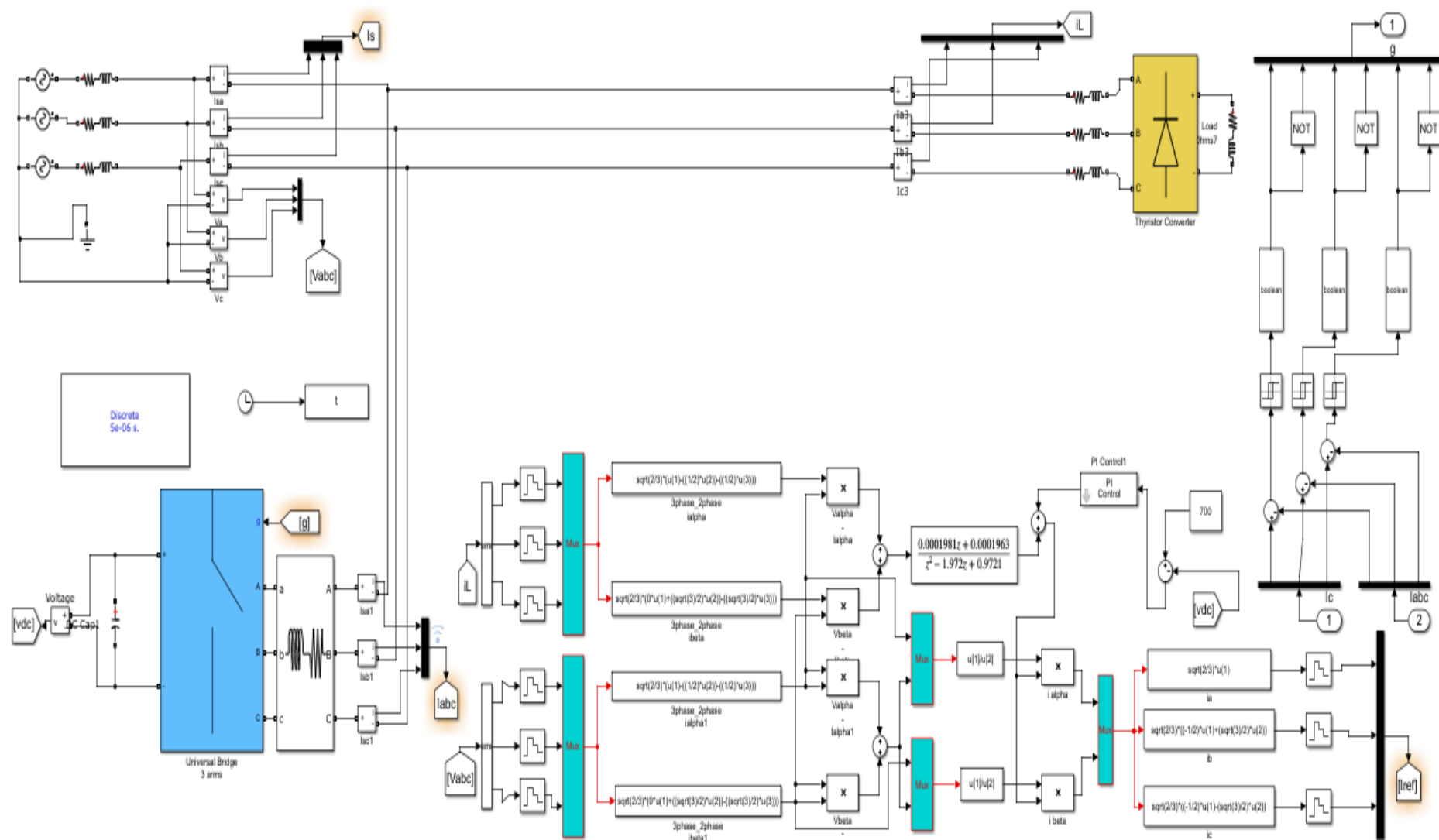
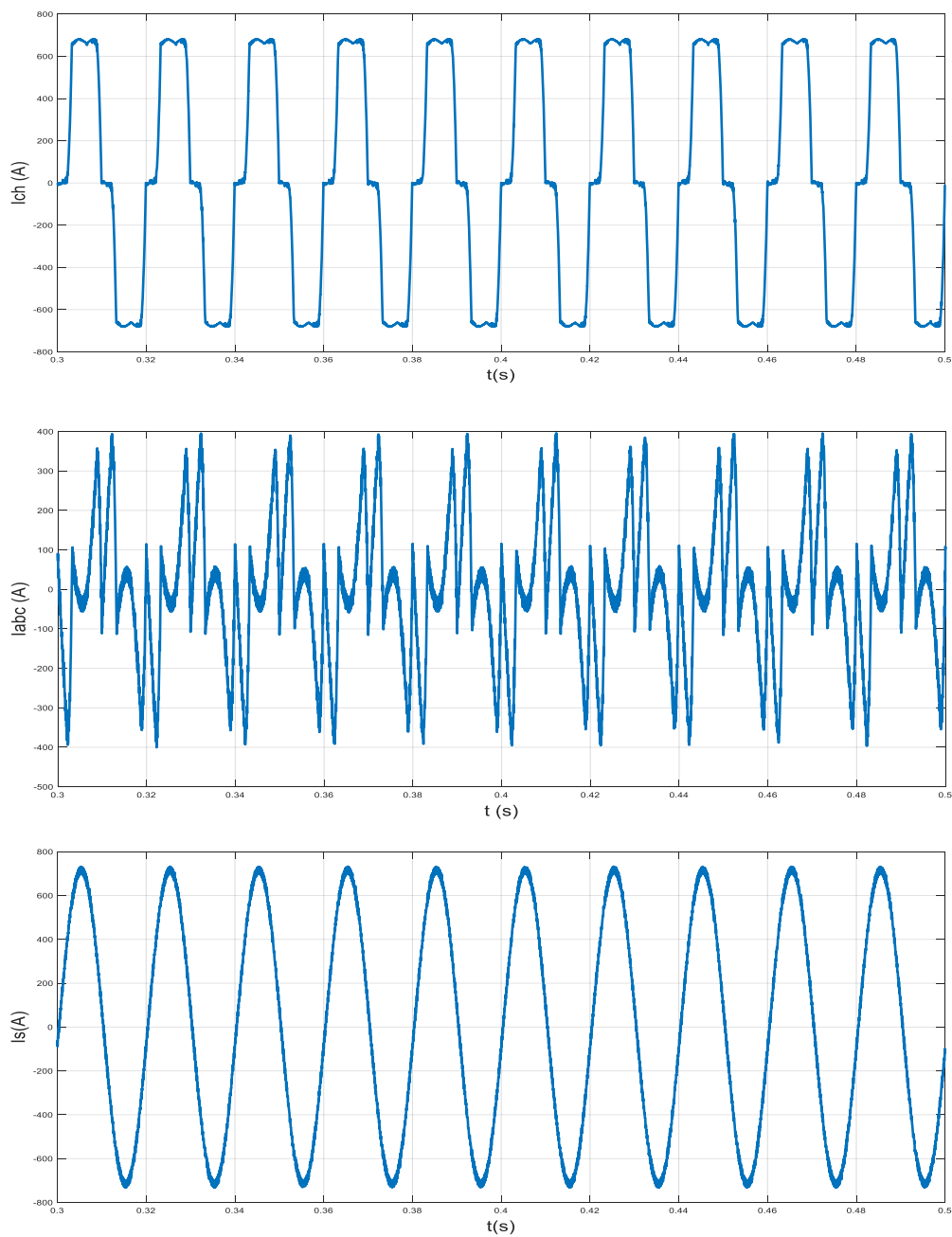


Figure III.1 Structure globale du filtre actif parallèle à commande indirecte.

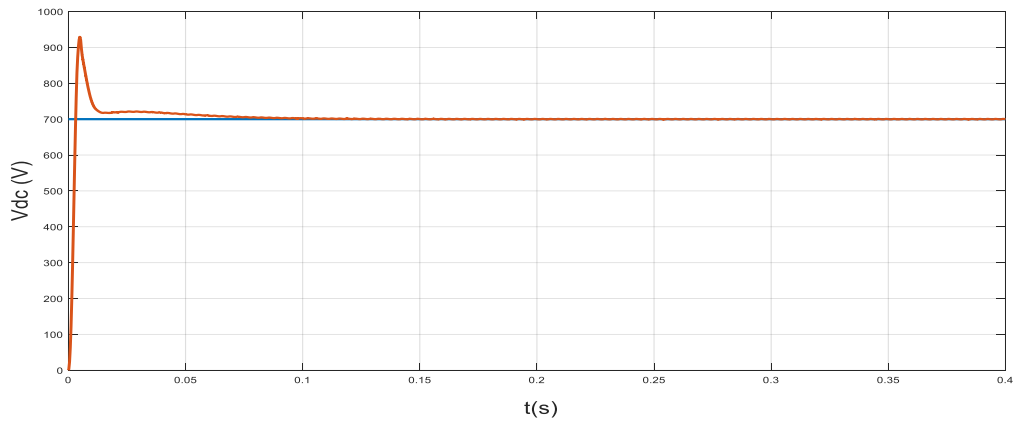
## CHAPITRE III : Filtre hybride de puissance parallèle

Les résultats de simulation obtenue pour ce système sont illustrés sur les figures suivantes :

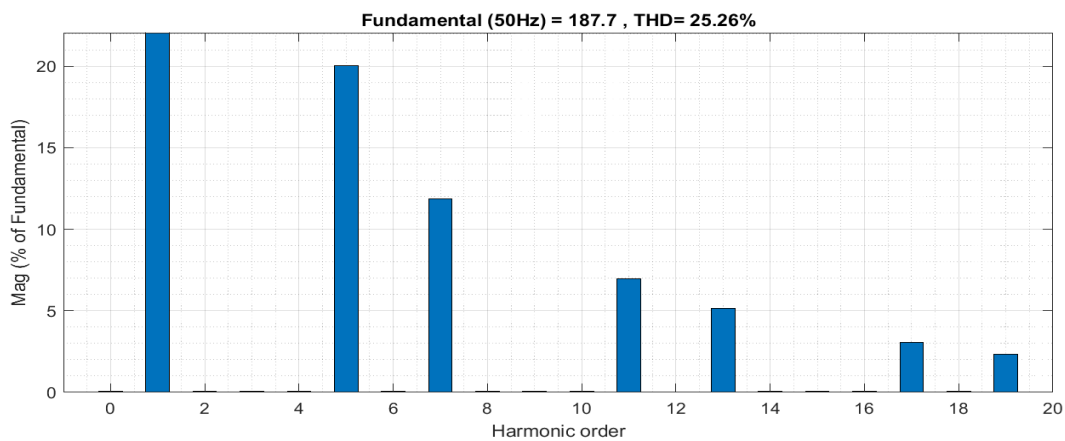


**Figure III.2 Compensation des courants harmoniques filtrages (filtre actif de puissance)**

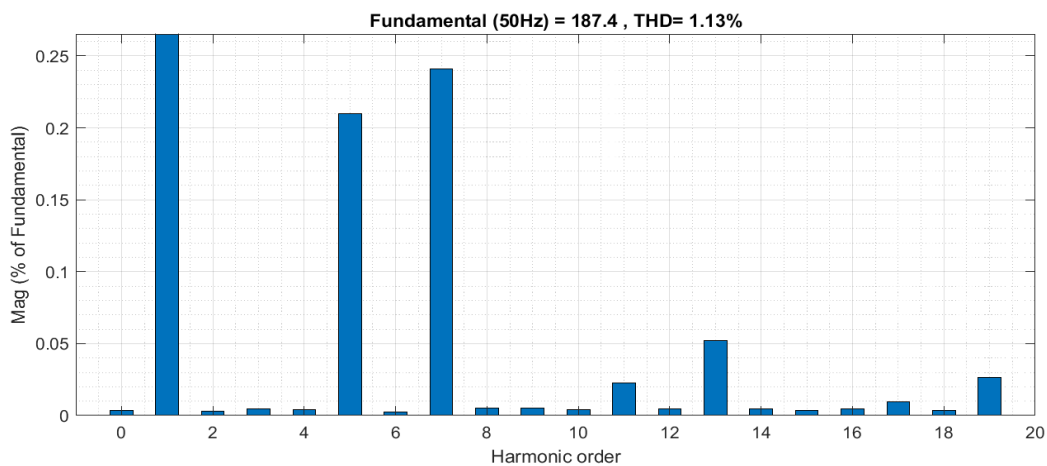
Avec  $i_s$ : courant de source,  $i_c$ : courant de charge et  $i_f$ : courant injecté.



**Figure III.3 Tension aux bornes du condensateur**



**Figure III.4 Spectre du courant du réseau avant filtrage (THD=25.26%)**



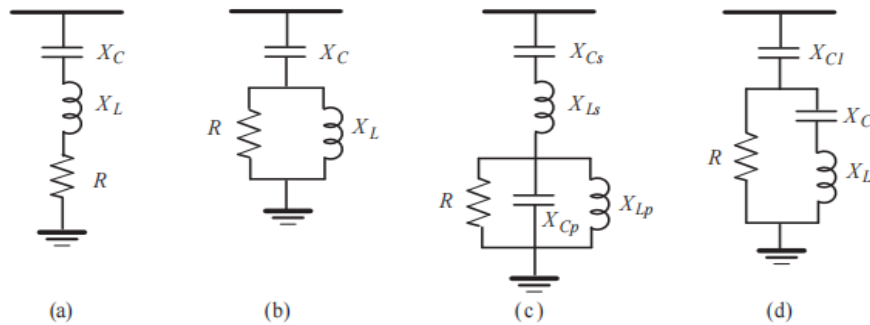
**Figure III.5 Spectre du courant du réseau après filtrage (THD=1.13%)**

La figure (III. 2) montre le courant de charge, le courant de source et le courant injecté par le filtre actif de puissance parallèle. Nous remarquons que le THD après filtrage du courant de source à une valeur inférieur a 5% et ainsi il devient un signal sinusoïdal.

Les figures (III.4 et III.5) représentent le spectre harmonique du courant avant et après filtrage. Nous remarquons que la valeur du spectre harmonique est réduite après le processus de filtrage de 25.26% à une valeur de 1.13 %. Ce qui respecte la norme CEI.

## III.2 Filtres passifs d'harmoniques

Le filtre passif est l'une des technologies les plus efficaces pour réduire ou empêcher la propagation d'harmonique dans les réseaux électriques. Ce type de filtre consiste à combiner les condensateurs et inductances pour éliminer les harmoniques. Il existe plusieurs types de filtres passifs, à savoir les filtres résonants de base, les filtres multi-résonants et les filtres résonants de deuxième degré. Bien que les configurations varient considérablement, la **figure III.6** illustre les configurations les plus courantes.



**Figure III.6 Filtres passifs d'harmoniques ; (a) Filtre résonant, (b) Filtre passe haut, (c) Filtre à double résonance, (d) Filtre type C.**

**Filtre résonant :** Ce filtre est accordé à une fréquence spécifique, et donc capable de piéger éliminer un seul harmonique

**Filtre passe haut :** Ce filtre est accordé à une fréquence à partir de laquelle il doit piéger tous les harmoniques supérieurs, donc capable d'éliminer plusieurs harmoniques

**Filtre à double résonance :** Ce filtre est accordé à deux fréquences distinctes pour pouvoir éliminer deux harmoniques

**Filtre type C :** C'est un filtre passe haut également mais avec des caractéristiques meilleurs (compensation de la puissance réactive, et moins de pertes). [29]

Le principe d'un filtrage passif d'harmonique (ou de filtrage d'harmonique en général) est illustré sur la figure 1.2 ; Il s'agit d'insertion en dérivation avec la charge polluante d'un filtre calculé de sorte à constituer un piège aux harmoniques générés par la charge non linéaire, pour que le courant côté source reste le plus proche possible de la forme sinusoïdale. En effet, pour une charge non linéaire qui absorbe un courant constitué du rang 1 plus les rangs 5, 7, si le filtre en question est calculé pour piéger l'harmonique 5, le courant côté source sera alors constitué des rangs 1 et 7. Si ce filtre est calculé pour piéger les rangs 5 et 7, alors le courant de source sera uniquement constitué du rang fondamental et par conséquent, sinusoïdale.

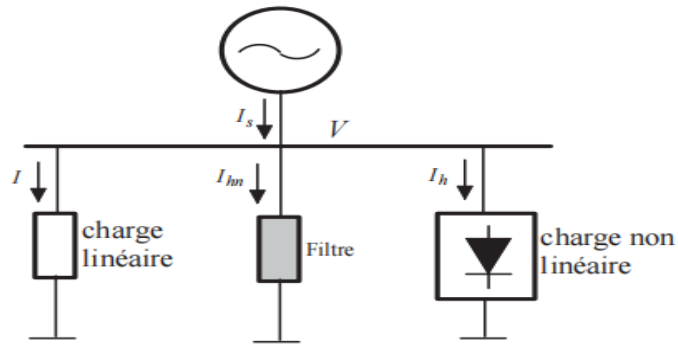


Figure III.7 Principe de filtrage passif d'harmoniques.

### III.3 Etude d'un filtre résonnant

Le filtre résonant a pour caractéristique une impédance très faible à un courant harmonique de rang déterminé. Le facteur de qualité (Q) détermine la précision du réglage de l'harmonique correspondant ainsi que son efficacité à l'éliminer. Ce qui implique un facteur de qualité élevé pour ce type de filtre. Pour chaque rang d'harmoniques à filtrer, nous devons compter trois branches shunt (un filtre shunt pour chaque phase). Le filtre résonant fournit une partie de la puissance réactive au convertisseur par ses capacités. L'inconvénient de ce type de filtre shunt est la variation des éléments L et C due à leur vieillissement et à leur qualité. Ces facteurs ont pour effet de créer un désaccord de l'ensemble. Afin d'éliminer un rang harmonique particulier, un filtre résonant ajusté pour cette fréquence doit être installé sur chacune des trois phases, nous allons vous montrer les étapes de calcul de ce filtre pour une fréquence donnée sont les suivantes :

Ces éléments RLC sont connectés en série, mais cela ne signifie pas qu'ils sont connectés en série au réseau ! En outre, il est fréquemment connecté en parallèle.

**Réaction capacitive :** La réaction capacitive du filtre est déterminée par la puissance réactive requise par la source harmonique.

$$X_C = V^2/Q_C \quad (III.1)$$

**Réaction inductive :** La réaction inductive du filtre doit être suffisamment élevée pour capter l'harmonique  $h_n$ .

$$X_L = X_C/h_n^2 \quad (III.2)$$

**Résistance :** La résistance du filtre est déterminée par son facteur de qualité Q.

$$R = X_n/Q \quad (III.3)$$

NB. Le facteur de qualité pour un tel filtre est entre 30 et 100.

La capacité du filtre (Var) peut alors être déterminée par :

$$Q_F = \frac{V^2}{X_C - X_L} \quad (III.4)$$

Puisque  $X_L = X_C/h_n^2$  alors

$$Q_F = \frac{h^2_n}{h^2_n - 1} Q_C \quad (\text{III.5})$$

L'impédance du filtre résonant est donnée à chaque fréquence par

$$Z_F(h) = R + j \left( hX_L - \frac{X_C}{h} \right) = R + j \frac{X_C}{h^2_n} \left( \frac{h^2 - h^2_n}{h^2} \right) \quad (\text{III.6})$$

La tension aux bornes du condensateur est donnée par

$$\frac{V_{C1}}{V_1} = \frac{-jX_C}{R + j(X_L - X_C)} \approx \frac{h^2_n}{h^2_n - 1} \quad (\text{III.7})$$

A la fréquence de résonance cette tension devient alors

$$\frac{V_{Cn}}{V_n} = \frac{-jX_{Cn}}{R + j(X_{Ln} - X_{Cn})} \approx \frac{-jX_n}{R} = -jQ \quad (\text{III.8})$$

### ***Application numérique***

Réactance capacitive

$$X_C = V^2 / Q_C$$

$$X_C = \frac{400^2}{20 \cdot 10^3} = 8 \Omega$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C}$$

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} \rightarrow C = 397,88 \cdot 10^{-6} \text{ F}$$

Réactance inductive

$$X_L = X_C / h^2_n$$

$$X_L = \frac{8}{5^2} = 0,32 \Omega$$

$$X_L = 2\pi f L$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = 1,0185 \cdot 10^{-3} \text{ H}$$

**Resistance**

$$X_n = \sqrt{X_C X_L}$$

$$X_n = \sqrt{8 \cdot 0,32} = 1,6 \Omega$$

$$R = \frac{X_n}{Q}$$

$$R = \frac{1,6}{50} = 0,032 \Omega$$



## CHAPITRE III : Filtre hybride de puissance parallèle

Nous avons eu beaucoup de difficulté et ça nous a pris beaucoup de temps pour trouver les bons résultats. Cependant, après avoir su comment les calculer, nous avons comparé nos résultats avec celui du site "calculator harmonique filter" [30], nous avons constaté que nous avons obtenus les mêmes résultats.

**Tableau III.2 Table des Paramètres du banc de filtres**

Données	Filtre 1 (5ème harmonique)	Filtre 2 (7ème harmonique)
$Q_c$ (kVar)	20	20
$h_n$	5	7
$Q$	50	50
$V$ (V)	400	400
Calculs	/	/
$C$ (F)	$397.88 \cdot 10^{-6}$	$397.88 \cdot 10^{-6}$
$L$ (H)	$1,0185 \cdot 10^{-3}$	$0,5196 \cdot 10^{-3}$
$R$ ( $\Omega$ )	0.032	0.0229

### III.4 Simulation

Nous allons pour cette simulation connectée à notre filtre actif de puissance parallèle à commande indirecte à un filtre passif de 5ème harmonique comme il est représenté sur la **Figure III.7**.

**Tableau III.3 Table des Paramètres**

Élément de l'installation	Valeur de paramètre	
Réseau	$f=50$ Hz $V_s=230$ v $R_s=0,003$ ohm,	$L_s=0,1$ mH
Redresseur	$R_c=0,00273$ ohm $R_L=0,788$ ohm	$L_c=0,10319$ mH $L_L=2,6$ mH
Filtre actif parallèle	$R_f=0,005$ ohm	$L_f=0,01$ mH

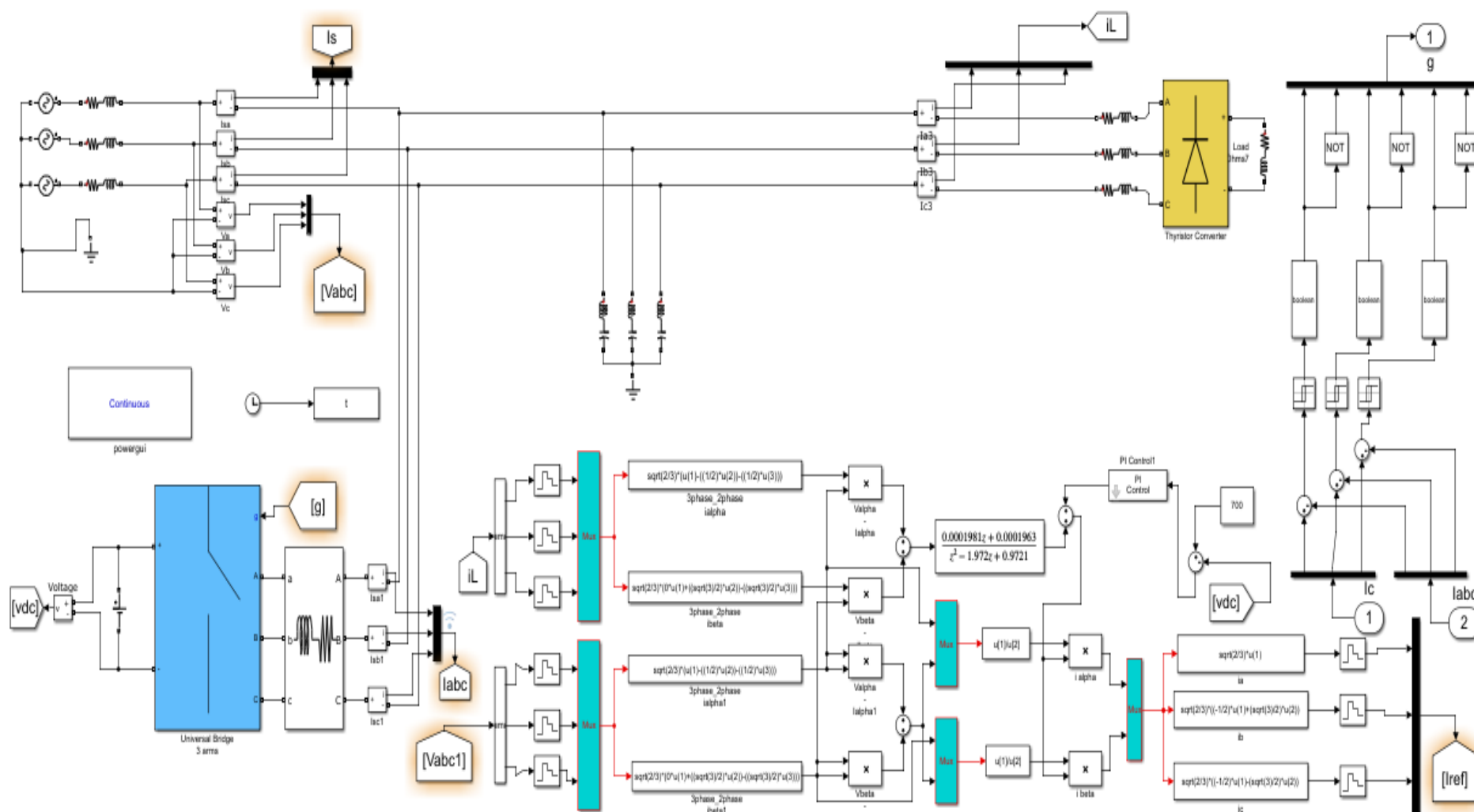
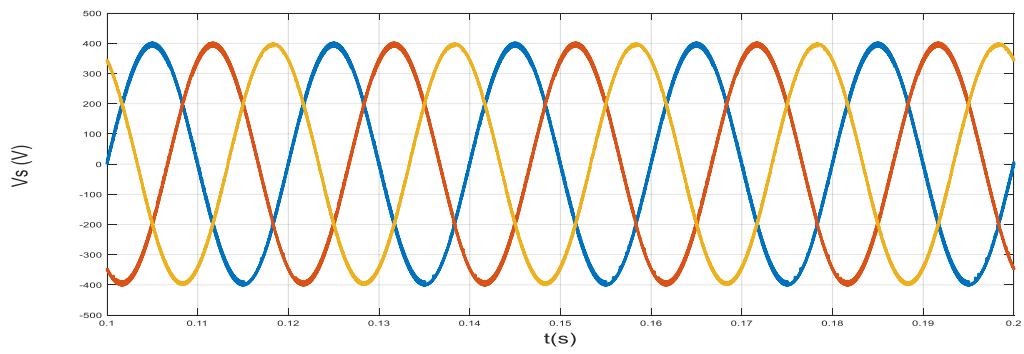
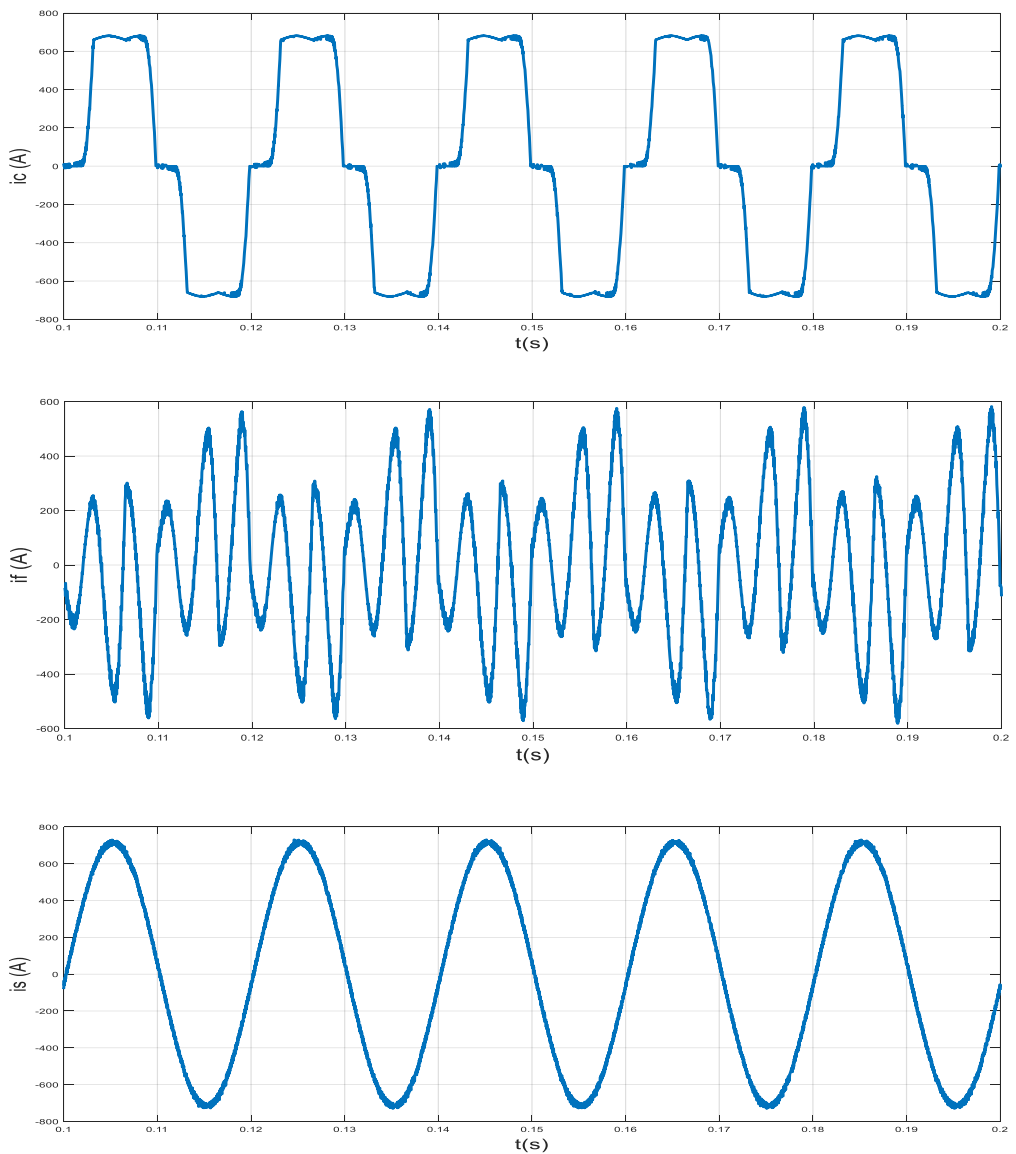


Figure III.7 FAP à commande indirecte et filtre passif accordés sur la fréquence 5ème de l'harmoniques.

Les figures suivantes montrent les résultats de simulation :



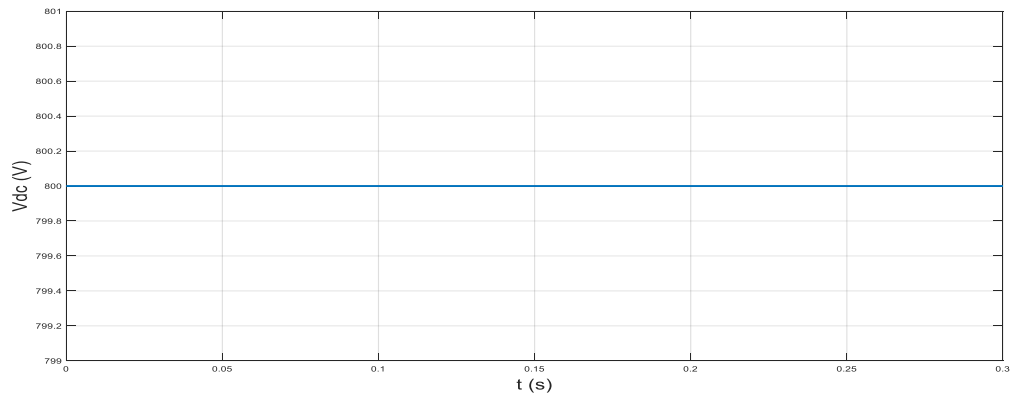
**Figure III.8 tensions de source  $V_s$  (V)**



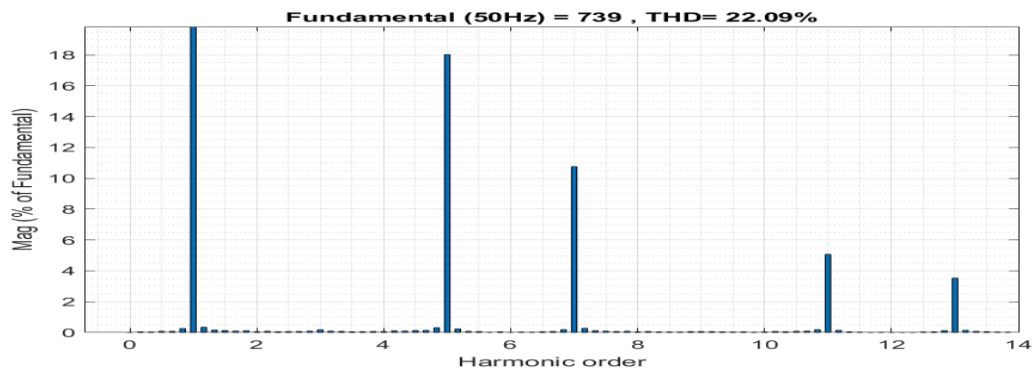
**Figure III.9 Compensation des courants harmoniques par le filtre actif de puissance et le filtre passif**

Avec  $i_s$ : courant de source,  $i_c$ : courant de charge et  $i_f$ : courant injecté.

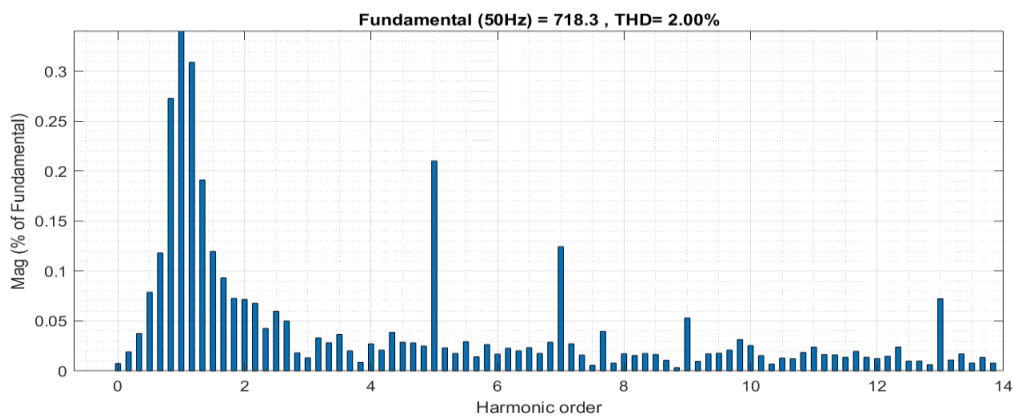
## CHAPITRE III : Filtre hybride de puissance parallèle



**Figure III.10 Tension de source continue**



**Figure III.11 Spectre du courant du réseau avant filtrage (THD=22.09%)**



**Figure III.12 Spectre du courant du réseau après filtrage (THD=2%)**

Les résultats des simulations montrent que le filtre actif de puissance parallèle avec le filtre passif, nous donne des bons résultats et nous obtenons ainsi un THD de 2%.

Maintenant nous allons vous présenter les résultats de simulation obtenus lorsque nous utilisons un FAP à commande indirecte et filtre passif accordée sur les fréquences 7èmes harmonique.

CHAPITRE III : Filtre hybride de puissance parallèle

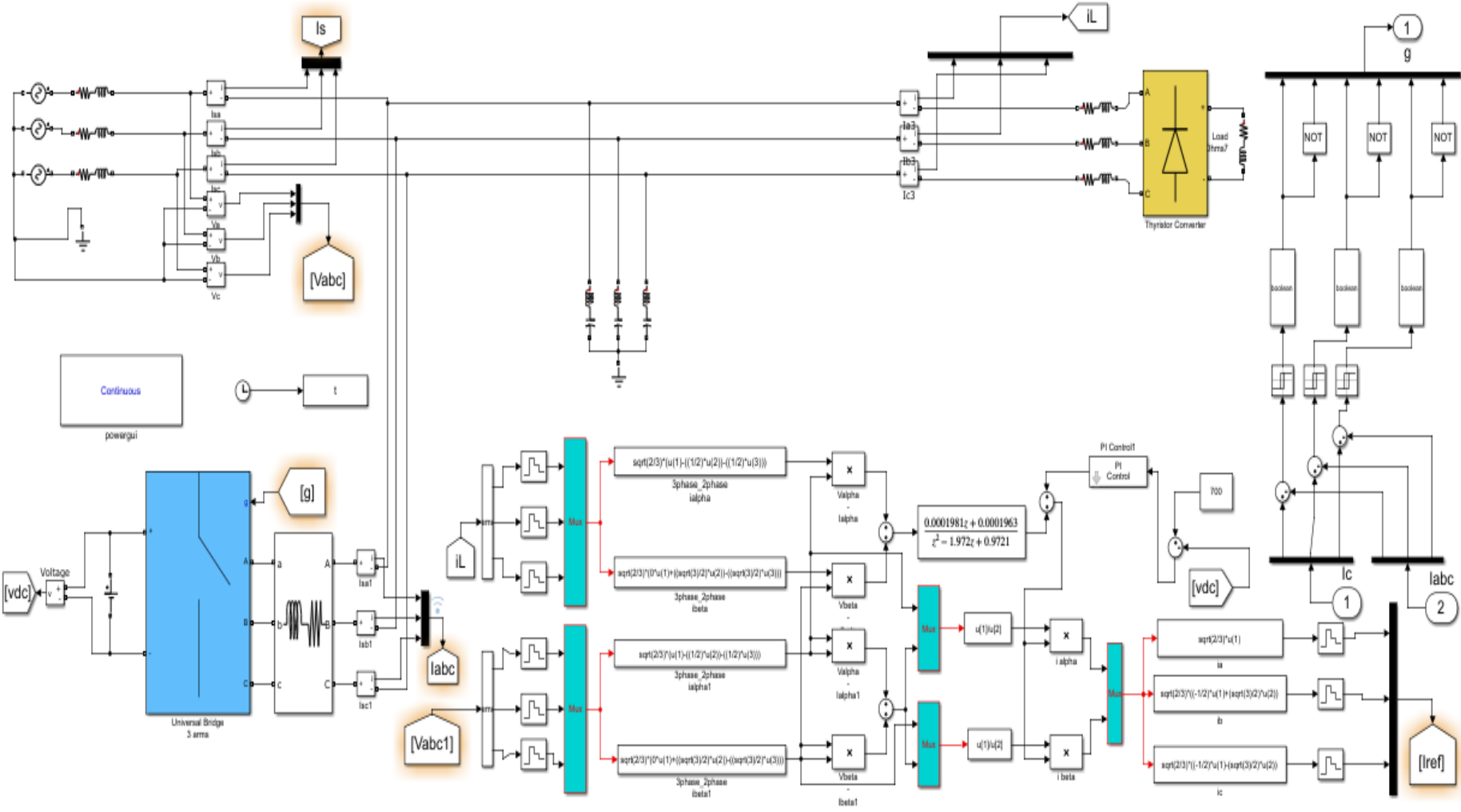
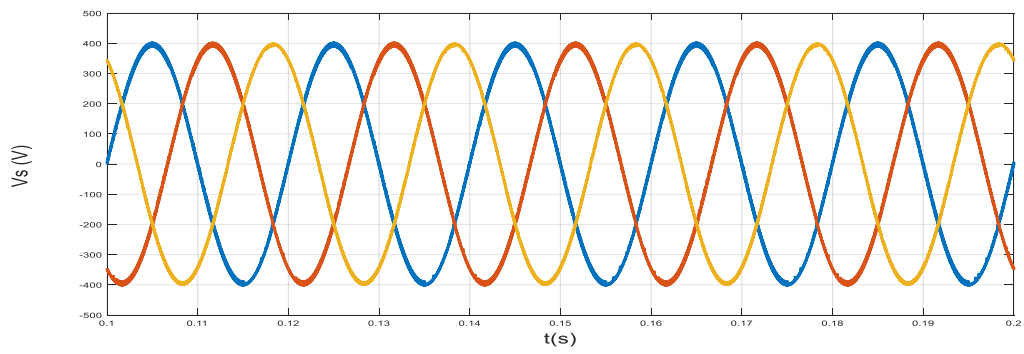


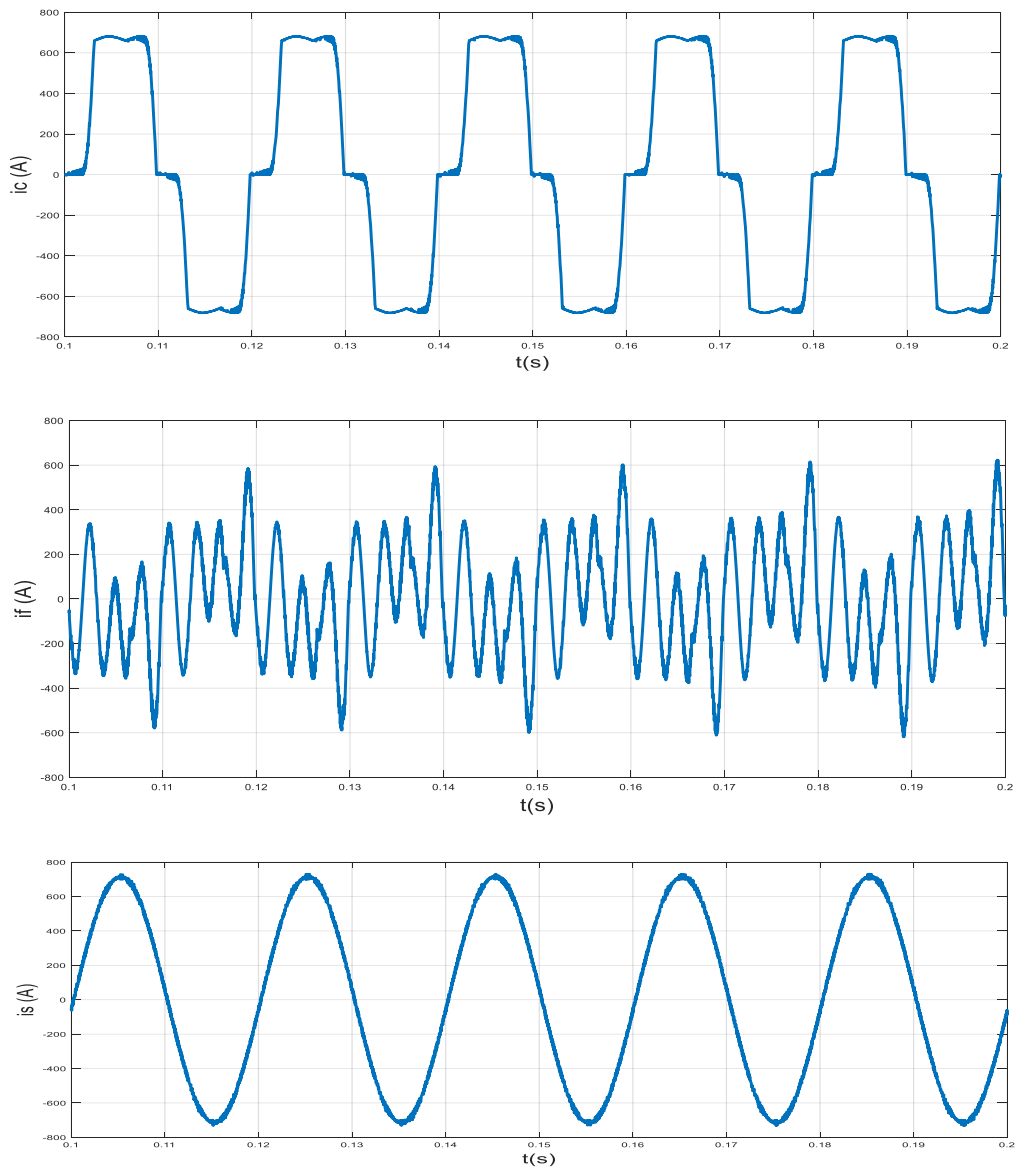
Figure III.13 FAP à commande indirecte et filtre passif accordés sur les fréquences 7<sup>ème</sup> de l'harmonique.

## CHAPITRE III : Filtre hybride de puissance parallèle

Les figures suivantes montrent les résultats de simulation :

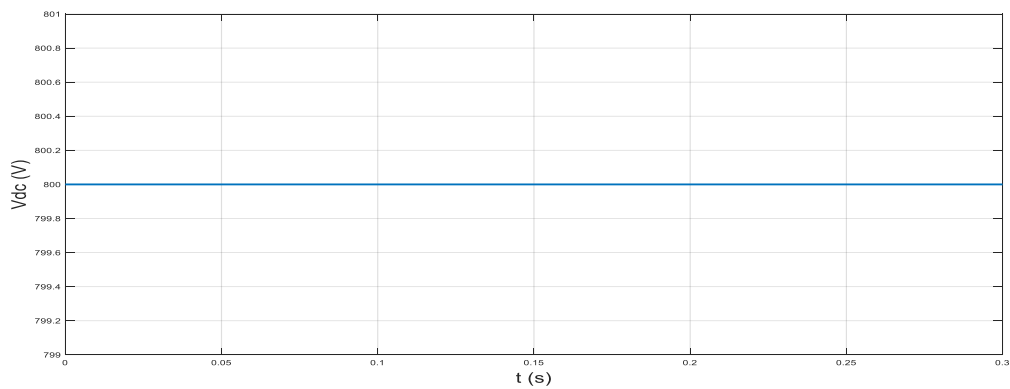


**Figure III.14 tensions de source  $V_s(V)$**

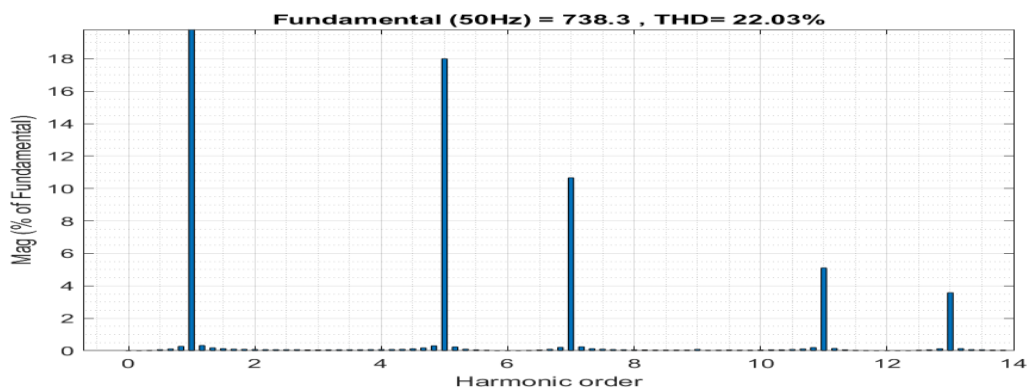


**Figure III.15 Compensation des courants harmoniques par le filtre actif de puissance et le filtre passif**

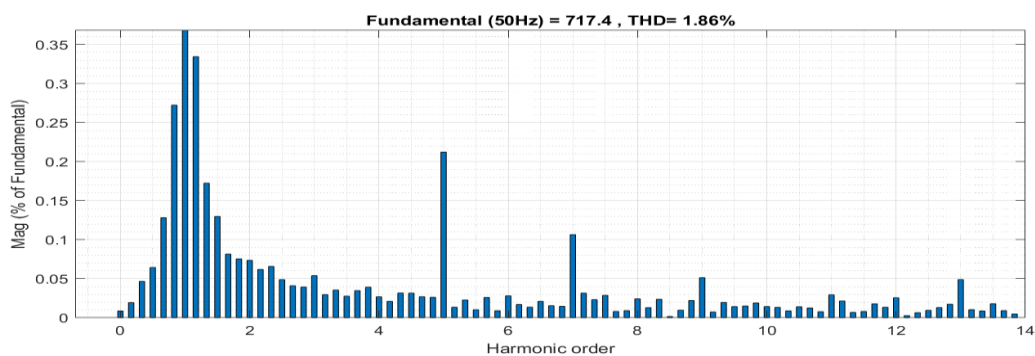
Avec  $i_s$ : courant de source,  $i_c$ : courant de charge et  $i_f$ : courant injecté.



**Figure III.16 Tension de source continue**



**Figure III.17 Spectre du courant du réseau avant filtrage (THD=22.03%)**



**Figure III.18 Spectre du courant du réseau après filtrage (THD=1.86%)**

Les résultats des simulations montrent que le filtre actif de puissance parallèle avec le filtre passif nous remarquons de cette simulation le THD donne un meilleur résultat qu'avant, car nous obtenons un THD inférieur de 2 % qui égale à 1.86%.

Maintenant nous allons brancher les deux filtres passifs (5+7ème harmonique) nous obtenons le schéma de simulation suivant.

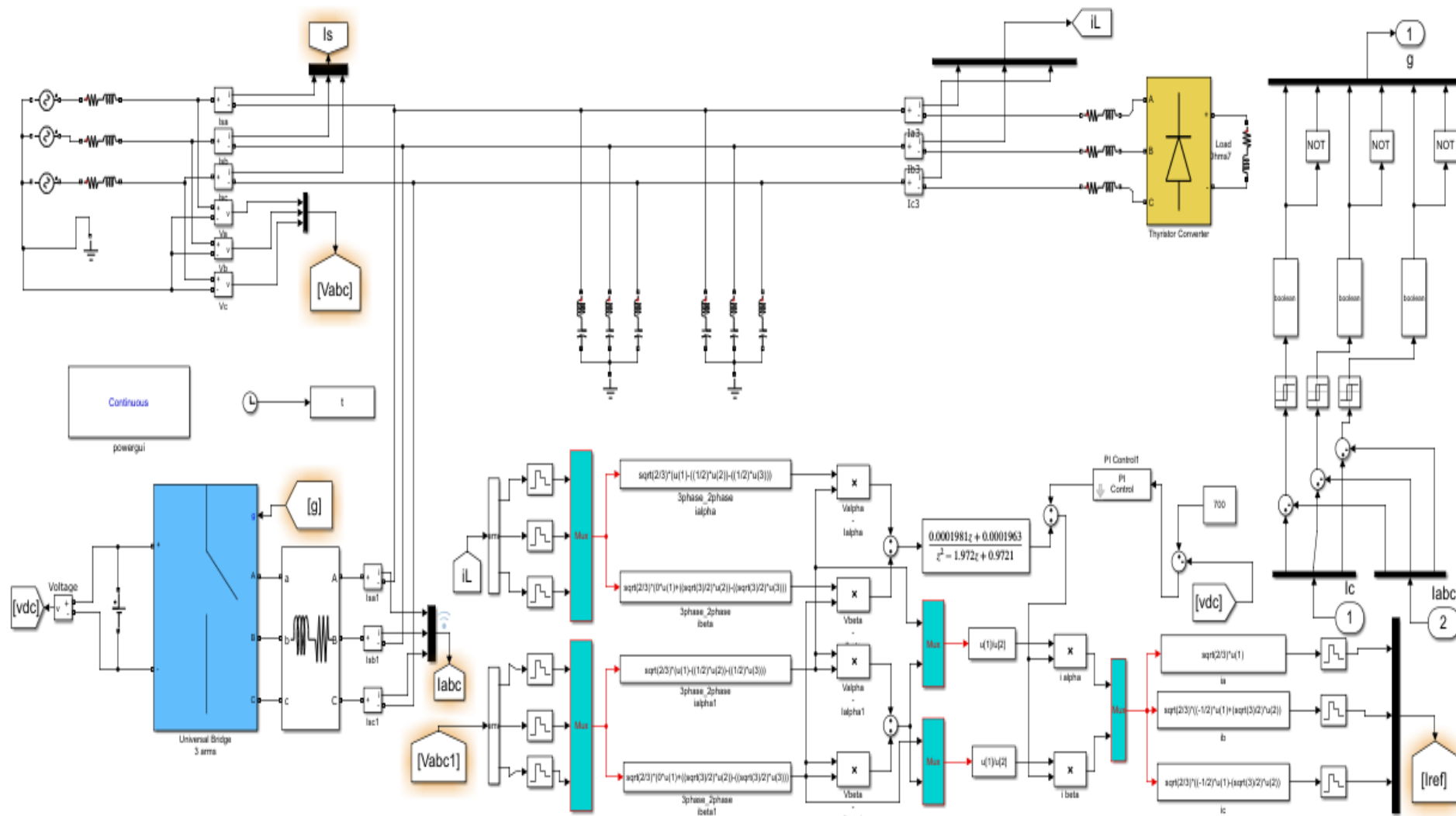


Figure III.19 FAP à commande indirecte et filtre passif accordés sur les fréquences 5ième et 7ième de l'harmoniques.



Les figures suivantes montrent les résultats de simulation :

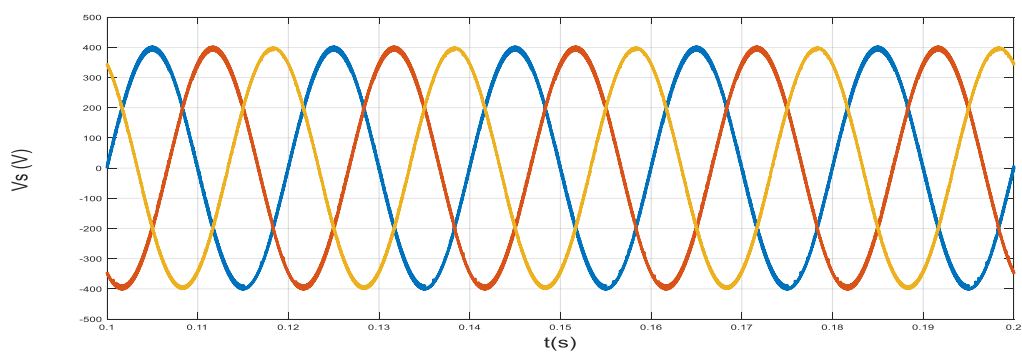


Figure III.20 tensions de source  $V_s(V)$

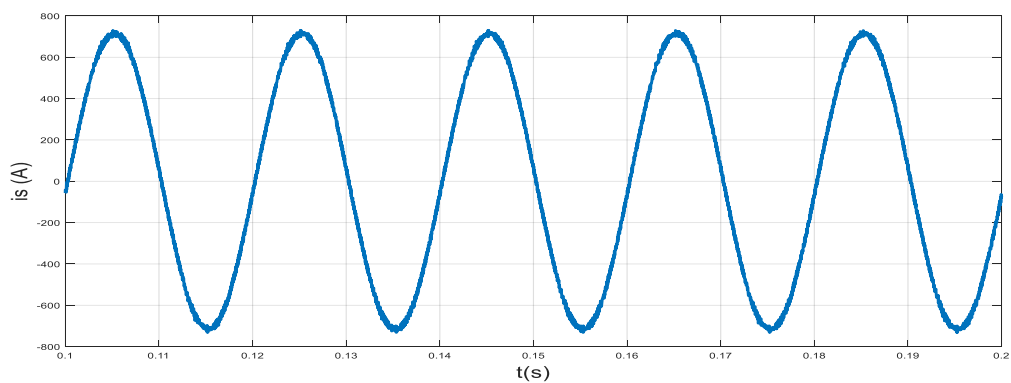
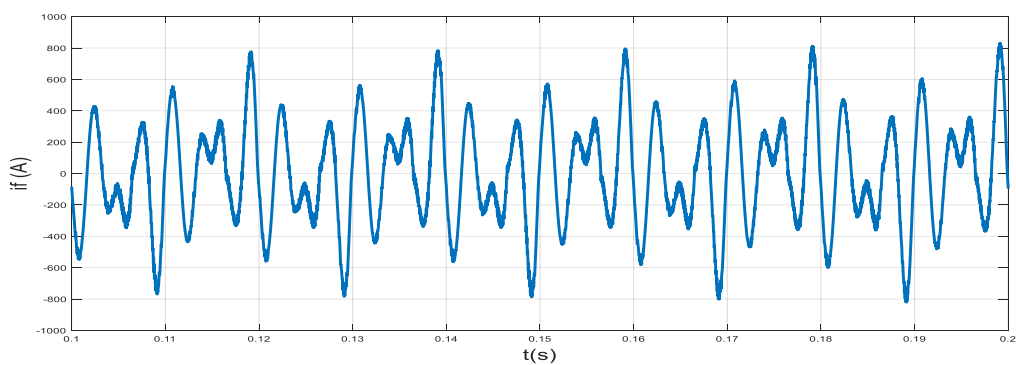
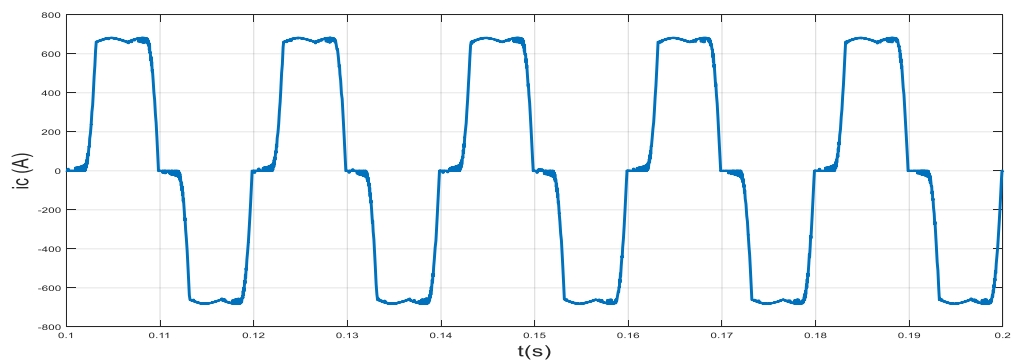
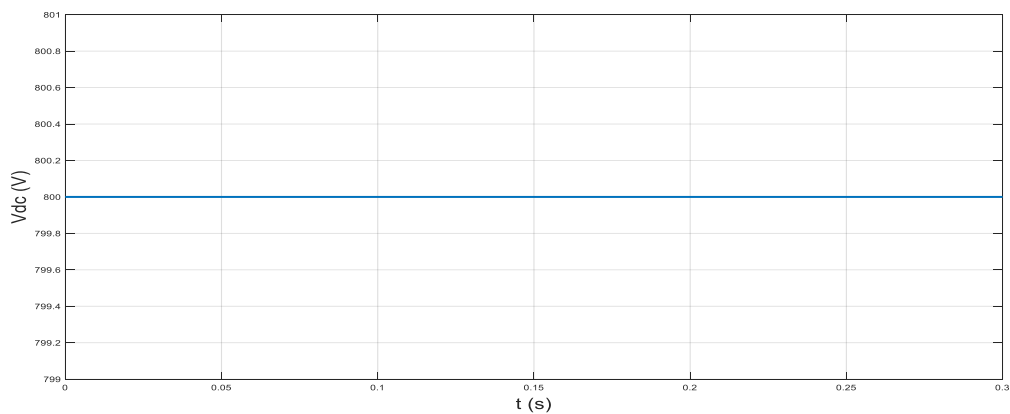
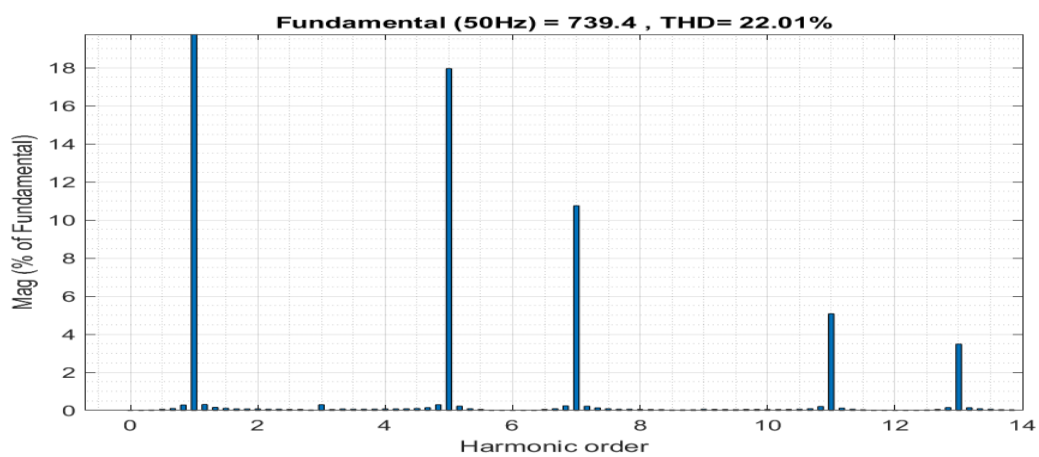


Figure III.21 Compensation des courants harmoniques par le filtre actif de puissance et le filtre passif

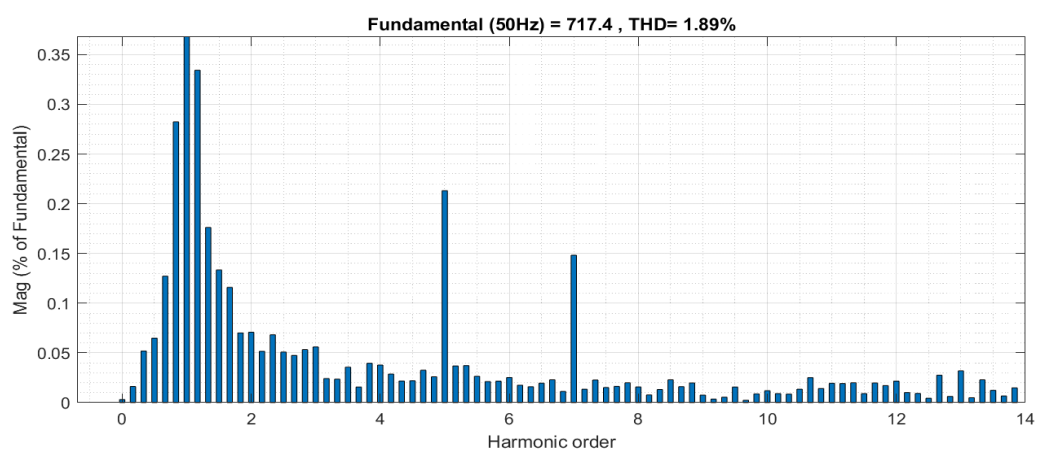
Avec  $i_s$ : courant de source,  $i_c$ : courant de charge et  $i_f$ : courant injecté.



**Figure III.22 Tension de source continue**



**Figure III.23 Spectre du courant du réseau avant filtrage (THD=22.01%)**



**Figure III.24 Spectre du courant du réseau après filtrage (THD=1.89%)**

Les résultats des simulations montrent que le filtre actif de puissance parallèle avec les filtres passifs nous donne des bons résultats et nous obtenons ainsi un THD de 1.89%.

Nous allons maintenant regrouper les résultats des trois simulations et montrer le THD de chacun d'eux.

**Tableau III.4 : table spectre du courant**

	<b>THD</b>	<b>THD</b>
	<b>Avant Filtrage</b>	<b>Après Filtrage</b>
<b>Filtre 5ème harmonique + FAP</b>	22.09	2
<b>Filtre 7ème harmonique +FAP</b>	22.03	1.86
<b>Filtre 5+7ème harmonique +FAP</b>	22.01	1.89

Nous avons constaté que les résultats du filtre hybride étaient bien, comme le montre le tableau ci-dessus.

### **III Conclusion**

Dans ce chapitre, le filtre hybride a été modélisé et simulé en utilisant un filtre passif et FAP pour les harmoniques. Passif accordé, qui est implémenté dans un filtre de puissance actif afin d'améliorer les performances

Nos résultats de simulation montrent que le filtre de puissance actif réduit THD du courant de source très bonne que filtre passif

Le filtre actif de puissance est une méthode nouvelle et efficace pour résoudre les problèmes de puissance harmonique

# Conclusion générale

Dans ce travail réalisé dans ce rapport, nous étudions La dépollution des réseaux alimentant n des convertisseurs statiques par l'association de filtres passifs et actifs.

L'application de la méthode de réduction d'harmoniques proposée est développée à travers une analyse complète des performances des filtres passifs de compensation de deux harmoniques sous forme de courants 5,7, puis on relie les filtres actifs selon L'évolution de la charge du réseau maintient le filtrage performances, de sorte que la puissance des convertisseurs constituant le filtre actif est fortement réduite du fait des composants passifs. Par conséquent, ces structures peuvent optimiser la performance des coûts.

Enfin l'utilisation intensive des convertisseurs statique ne cesse d'augmenter et la pollution harmonique sur le réseau électrique devient plus préoccupante donnée en année. Pour résoudre ce problème, la pollution harmonique doit être strictement limitée Utilisé pour encourager les utilisateurs et les consommateurs d'énergie à respecter normes imposées.

Le filtre de puissance actif est une méthode nouvelle et efficace pour résoudre les problèmes de puissance harmonique. D'après l'analyse précédente, on peut dire que la méthode proposée a très bonne prestation

# RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

[1] C. Collombet - J.M. Lupin - J. Schonek «Perturbations harmoniques dans les réseaux pollués et leur traitement» Référence : CT152 - 17/12/2008 – (Vue le 23-05-2022) .

[https://download.schneider-electric.com/files?p\\_enDocType=Cahier+Technique&p\\_File\\_Name=CT152.pdf&p\\_Doc\\_Ref=CT152&\\_ga=2.74826898.1240188983.1656450278-289548813.1653317389](https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=Cahier+Technique&p_File_Name=CT152.pdf&p_Doc_Ref=CT152&_ga=2.74826898.1240188983.1656450278-289548813.1653317389)

[2] A.OMEIRI, « Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant »

[3] L. Zellouma, « Filtrage actif parallèle des harmoniques du courant générés par un pont redresseur triphasé non commandé. » Mémoire de Magister, Université d'Annaba 2006

[4] C. DEWEZ, « Modélisation d'un filtre actif parallèle triphasé pour la dépollution harmonique et synthèse d'une commande basée sur le rejet de perturbations ». Thèse de doctorat de l'université de Poitiers, France, (2007).

[5] A.Bouafia, Techniques de commande prédictive et floue pour les systèmes d'électronique de puissance : application aux redresseurs a MLI, Thèse de doctorat de l'Université de Sétif, Algérie, (2010)

[6] CHEBABHI Rabie & BOUDRAF Mustapha. « Modélisation et commande des différentes topologies des filtres actifs parallèles » mémoire d'ingénieur d'état. Université de M'sila, 2011.

[7] BAKHI Hamza « Commande d'un filtre actif triphasé shunt par logique floue» mémoire de Master. Université de M'sila, 2015

[8] A.Karim «Analyse harmonique et évolution de l'impédance harmonique d'un réseau de distribution industriel équilibré », Mémoire présenté à l'U.M.M.TO en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en électrotechniques 2009/2010

[9] Q. Chen, Z. Chen and M. McCormick, « the application and optimization of C-type filter in a combined harmonic power filter ». 35th Annual IEEE, Power Electronics Specialists Conference, Aachen, Germany, (2004)

[10] B. Singh, V. Verma, A. Chandra and K. Al-Haddad, « Hybrid filters for power improvement ». IEE, Proc-Gener. Transm. Distrib, Vol. 152, no. 3, (2005).

[11] S. Srianthumrong and H. Akagi, « A Medium-voltage transformer less ac/dc power conversion system consisting of a diode rectifier and a shunt hybrid filter ». IEEE, Transactions on Industry Applications, Vol. 39, no. 3, pp. 874-882, (2003).

[12] J. C. Das, « Passive filters- Potentialities and limitations ». IEEE, Transactions on Industry Applications, Vol. 40, pp. 345-362, (2004).

[13] L. BENCHAITA, « Etude, par simulation numérique et expérimentation, d'un filtre actif parallèle à structure courant avec une nouvelle méthode de contrôle-commande ». Thèse de doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy-France, (1998).

- [14] N. BRUYANT, « Etude et commande généralisée de filtres actifs parallèles, compensation global ou sélective des harmoniques, régime équilibré ou déséquilibré ». Thèse de doctorat de l'université de Nantes, France, (1999).
- [15] M. A. E. Alali, « Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension ». Thèse de doctorat de l'université Louis Pasteur Strasbourg I, France, (2002).
- [16] OULD ABDESLAM Djaffar. «Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension». Thèse de Doctorat de l'université de Haute-Alsace, 2005.
- [17] BADACHE Zohir & SACI Abdeslam. « Etude par simulation d'un filtre actif parallèle », mémoire d'ingénieur, Université de Msila, 2006.
- [18] : KESSAL ABDELHALIM, Correction du Facteur de Puissance a L'entrée d'un Convertisseur AC/DC, Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbes Sétif, soutenance le 26/04/2012.
- [19] 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, Université Henri Poincaré, Nancy-France, (2004).
- [20] S. Rahmani and K. Al-Haddad, « A new indirect current control algorithm based on the instantaneous active current for reduced switch active filters ». EPE, ISBN 90-75815-07-7, pp 1-10, Toulous, (2003).
- [21] H. AKAGI, Y. KANAZAWA and A. NABAE « Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits ». Proceeding International Power Electronics Conference. Tokyo, Japan, pp. 1375-1386, (1983).
- [22] 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 de l'Université Henri Poincaré, Nancy-I, 17/12/ 2004.
- [23] T. BENMILOUD et A. OMARI « Régulation de la tension d'alimentation du filtre actif parallèle par PI adaptatif » Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, 03-04/11/2007.
- [24] S. BHATTACHARYA, D. M. DIVAN and B. BANERJEE " Synchronous frame harmonic isolator using active series filter " EPE'91, pp.3.030-3.35, 1991
- [25] M. C. BENHABIB and S. SAADATE «A New Robust Experimentally Validated Phase Locked Loop for Power Electronic Control» EPE journal, vol.15, N°3, 2005.
- [26] H. Salem, « Commande d'un Filtre actif parallèle à quatre bras par des techniques avancées. » Mémoire de magister, Université Mohamed Khider – Biskra, 2015.
- [27] M.A.E.ALALI « Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension », Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur-Strasbourg I, 2002

[28] S. HONG-SCOK « Control scheme for PWM converter and phase angle estimation algorithm under voltage unbalanced and/or sag condition ». Ph.D. in Electronic and Electrical Engineering, POSTECH university, South KOREA, (2001).

[29] Edward Wilson Kimbark « Direct current transmission», Volume 1, New York- Wiley Interscience Division, United States 1971

[30] Voltage disturbance / HARMONIC FILTER CALCULATOR / (Vue le 23-05-2022)

[https://voltage-disturbance.com/harmonic-filter-calculator/?fbclid=IwAR2x4vvn2eLLCYAFVbA4SguULIDAI9XuvKD2cxB7lya2\\_cuwPmipNgyELJs](https://voltage-disturbance.com/harmonic-filter-calculator/?fbclid=IwAR2x4vvn2eLLCYAFVbA4SguULIDAI9XuvKD2cxB7lya2_cuwPmipNgyELJs)

[31] Fujita.H et Akagi.H: "A Practical Approach to Harmonic Compensation in Power Systems - Series Connection of Passive and Active Filters", IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol.27, No.6, Nov./Dec. 1991, pp. 1020-1025

[32] Kawahira.H, Nakamura.T, Nakazawa.S et Nornura.M: "Active Power Filter", IPEC Tokyo, 1983, pp.981-992

# Résumé

Le travail de notre thèse de master s'est concentré sur l'étude d'un filtre hybride composé d'un filtre actif de puissance parallèle et d'un filtre passif, afin d'éliminer les harmoniques de courant, générées par les charges non linéaires qui sont connectées au réseau électrique. Les résultats de simulation donnent de bons résultats, que les filtres passifs soient utilisés ou non. Nous avons utilisé le contrôle p-q (directe et indirecte) et le contrôle d-q (directe). En outre, nous avons simulé l'ensemble du système en utilisant un FAP à trois bras et d'un filtre actif de puissance à deux bras à un point milieu. Les résultats de la simulation ont validé le bon fonctionnement du système hybride.

# Abstract

The work of our master's thesis focused on the study of a hybrid filter composed of an active parallel power filter and a passive filter, in order to eliminate the current harmonics, generated by the loads not lines that are connected to the electrical network. The simulation results give good results whether passive filters are used or not. We used the p-q control (direct and indirect) and the d-q control (direct). Furthermore, we simulated the whole system using a three-arm DPF and a two-arm active power filter at a midpoint. The results of the simulation validated the proper functioning of the hybrid system.

# ملخص

ركز عمل أطروحتنا الرئيسية على دراسة مرشح هجين يتكون من مرشح طاقة نشط مواز ومرشح سلبي، من أجل القضاء على التوافقيات الحالية التي تولدها المقاومة غير الخطية الموصولة بالشبكة الكهربائية. تعطي نتائج المحاكاة نتائج جيدة سواء تم استخدام المرشحات FAP السلبية أم لا. لقد استخدمنا التحكم p-q (المباشر وغير المباشر) والتحكم d-q (المباشر) بالإضافة إلى ذلك، قمنا بمحاكاة النظام بأكمله باستخدام ثلاثي الأذرع ومرشح طاقة نشط ثنائي الأذرع بالمنتصف نتائج المحاكاة المعطاة جيدة جداً.