

*République Algérienne Démocratique et Populaire*  
*Ministère de l'Enseignement Supérieur*  
*Et de la Recherche Scientifique*  
*Université Abderrahmane MIRA- Bejaia*  
*Faculté des sciences et sciences de l'ingénieur*  
*Département de électrotechnique*



جامعة بجاية  
Tasdawit n Bgayet  
Université de Béjaïa

# Mémoire de Fin d'étude

*En vue d'obtention d'un diplôme Master en Electrotechnique*

**Thème :**

**Etude d'un filtre actif parallèle**

**Présenté par :**

**M<sup>er</sup> KENOUCHE Arezki**  
**M<sup>er</sup> KORICHI Ilyas**

**Promoteur :**

**M<sup>er</sup> HAMOUDI.F**

**Jury:**

**M<sup>er</sup> HAMASS**

**M<sup>er</sup> ATROUNE**

**Promotion 2019-2020**

# Remerciements

*Nous remercions DIEU, le tout-puissant de nous avoir donné la foi qui nous a guidée jusqu'à la réalisation et l'aboutissement de ce travail.*

*Nous tenons à remercier notre encadreur Mr hamoudi farid pour son orientation.*

*Nos remerciements les plus sincères vont à tous les professeurs du département d'Electrotechnique de l'université de Béjaia qui n'ont pas hésité un instant pour nous orienter, et d'être à notre disposition à tout moment pour la réussite et la réalisation de notre travail.*

*Nos chers parents, pour leurs patiences et leurs sacrifices*

*Pour voir ce jour. Ils ont tout donné pour notre réussite.*

*Nos fidèles amis(es), tous nos remerciements pour vous, pour avoir participé soit de près soit de loin à la réalisation de ce travail.*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce travail :*

*A ma très chère parents, quoi que je fasse ou quoi je dise, je ne saurai vous remercier comme il se doit, votre affection me couve, votre bienveillance me guide et votre amour m'encourage a toujours donner le meilleur de moi-même, tout ce qui est de bien en moi vient de vous.*

*A mon frère Nabil et ma sœur Sabrina*

*A mes très chers amis : Juba, Mourad, Syphax, Bilal, Sofiane.*

*A mon binôme Ilyas et à toute sa famille.*

*Arezki.*

# *Dédicaces*

*A la femme la plus courageuse, sensible, généreuse, à celle qui a su me donner amour et joie de vivre à celle qui a toujours montrée affection et compréhension à ma mère que j'aime*

*A l'homme de courage et de force à celui qui a toujours été présent, qui m'a appris les vraies valeurs de la vie à celui qui m'a soutenu en toutes circonstances, mon père que j'aime.*

*A ceux qui sont la source de mon inspiration et de mon courage, à qui je dois de la reconnaissance, mon frère Adel, mes sœurs Samira et Karima, Nabila, Samia, Latifa, ainsi que tous les membres de ma famille.*

*A tous mes amis en particulier Abdelmomen , Abdehafit Hamid.Zahir.Massi.Salim.*

*A mon binôme Arezki et à toute sa famille.*

*Ilyas*

## *Symboles*

---

### Symboles

$V_m$  : L'amplitude de la tension simple

$\omega$  : Pulsation du réseau

$i_{dc}$  : Courant délivré par la capacité

$V_{ref}$  : Tension de référence

$I_{ref}$  : Courant de référence

$V_{dc}$  : Tension du bus continu.

$C_{dc}$  : Condensateur de stockage

$V_s$  : La valeur efficace de la tension simple du réseau.

$\alpha$  : L'angle d'allumage des thyristors du pont de Graetz.

$C$  : Capacité

$\omega_h$  : Pulsation de l'harmonique du rang h.0

$I_h$  : Courant harmonique du rang h.

$\vec{I}_{h-ch}$  : Courant harmonique de la charge.

$\vec{I}_f$  : Courant du filtre actif.

$V_p$  : L'amplitude de la porteuse triangulaire

$\tau$  : Retard causé par le calcul des courants perturbateurs.

$K_i$  : Coefficient d'action intégral.

$K_p$  : Coefficient d'action proportionnel.

$\bar{P}$  : Puissance continue liée à la composante fondamentale active du courant et de la tension.

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

$\tilde{P}$  et  $\tilde{q}$  : Puissance alternative liée à la somme de composante perturbatrice.

$V_1$  : Tension en harmonique ordre 1.

$I_1$  : Courant en harmonique ordre 1.

$V_n$  : Tension fondamentale.

$I_n$  : Courant fondamental.

$S$  : Puissance apparente.

$P$  : Puissance actif.

## *Symboles*

---

$P_j$  : Pertes électrique.

$R$  : Résistance de conducteur.

$\cos(\varphi)$  : Déphasage.

$L_f$  : Inductance de filtre de sortie.

$R_f$  : Résistance du filtre de sortie.

$C_f$  : Capacité du filtre de sortie.

$R_S$  : Résistance de ligne.

$L_S$  : Inductance du linge.

## Abréviation

---

### Abréviation

- THD : Taux de distorsion harmonique total.
- IHD : Taux distorsion harmonique individuel.
- PF : Facteur de puissance.
- FAP : Filtre actif parallèle.
- FAS : Filtre actif série.
- IGBT : Transistor bipolaire à grille isolée.
- FPB : Filtre passe bas.
- PI : Correcteur proportionnel intégral.
- PCC : Point de connexion commun.
- MLI : Modulation de la largeur d'impulsion.

## Liste des figures

---

### Liste des figures

Figure I.1 : Schéma d'une onde déformée .....	1
Figure I.2 : Filtre résonnant.....	5
Figure I.3 : Filtre passif amorti .....	6
Figure I.4 : Filtre actif série.....	6
Figure I.5 : Filtre actif parallèle.....	7
Figure I.6 : Filtre série-parallèle.....	7
Figure I.7 : Filtre actif hybride.....	7
Figure II.1 : Structure générale du filtre actif parallèle.....	9
Figure II.2 : Filtre actif à structure tension.....	10
Figure II.3 : Interrupteurs de puissance.....	10
Figure II.4 : Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur.....	13
Figure II.5 : Schéma équivalent par phase du filtre de sortie du troisième ordre en T.....	15
Figure II.6 : Schéma représentant le principe de séparation des puissances.....	18
Figure II.7 : Algorithme d'identification par la méthode des puissances instantanée.....	18
Figure II.8 : Boucle de régulation de la tension continue.....	19
Figure II.9 : Schéma de la régulation des courants du F.A.P.....	20
Figure II.10 : Commande par hystérésis.....	21
Figure III.1 : Schéma de simulation d'une charge non linéaire connecter au réseau .....	22
Figure III.2 : Courant de la charge triphasé avant filtrage.....	23
Figure III.3 : Courant de source triphasé avant filtrage.....	23
Figure III.4 : Courant de source pour la phase a.....	24
Figure III.5 : Spectre d'harmonique du courant de source avant le filtrage.....	24
Figure III.6 : Schéma de simulation d'un filtre actif parallèle de puissance.....	25
Figure III.7 : Courant de source triphasé après le filtrage à $t= 0.05s$ .....	25
Figure III.8 : Courant de source phase a (à $t=0.05$ après filtrage).....	26
Figure III.9 : Spectre harmonique du courant de source après le filtrage.....	26
Figure III.10 : Courant de référence triphasé .....	27
Figure III.11 : Courant injectés par le filtre triphasé .....	27
Figure III.12 : Puissance actif.....	28
Figure III.13 : Puissance réactive.....	28



## Liste des tableaux

---

### Liste des tableaux

Tableau I.1 :Niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles sur les réseaux publique basse tension (norme CEI 61000-2-2).....	4
Tableau I.2 :Limite des composantes harmoniques en courant (norme CEI 61000-3-.....	5
Tableau II.1 : Tensions délivrées par l'onduleur.....	12
Tableau III.1 : Paramètres de simulation.....	22

# Table des matières

---

Remerciement

Dédicace

Symboles

Abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Table des matières

Introduction générale

## Chapitre I : pollution harmonique et solution

I.1 Introduction .....	1
I.2 Définition d'harmonique .....	1
I.3 Sources des harmoniques .....	1
I.4 Caractérisation des perturbations harmoniques .....	2
I.5 Puissance électrique en présence d'harmoniques .....	2
I.6 Effets des harmoniques.....	3
I.7 Normes .....	4
I.8 Solutions de dépollution harmonique .....	5
I.8.1 Filtrage passif.....	5
I.8.2 Filtrage actif .....	6
I.8.3 Filtre actif hybride .....	7
I.9 Conclusion.....	8

## Chapitre II : Modélisation d'un filtre actif

II.1 Introduction.....	9
II.2 Structure générale d'un filtre actif parallèle .....	9
II.2.1 Topologie générale .....	9
II.3 Etude de la partie puissance .....	10
II.3.1 Onduleur de tension .....	10

## Table des matières

---

II.3.1.1 Modélisation de l'onduleur de tension .....	11
II.3.1.2 Représentation vectorielle des tensions générées .....	12
II.3.2 Circuit de stockage de l'énergie .....	13
II.3.3 Filtre de connexion au réseau .....	14
II.3.3.1 Filtre de connexion de type L .....	14
II.3.3.2 Filtre de connexion de type LCL .....	14
II.4 Etude de la partie contrôle-commande .....	16
II.4.1 Identification des courants harmoniques .....	16
II.4.1.1 Méthode d'identification par les puissances instantanées .....	16
II.4.2 Séparation des puissances non désirables .....	17
II.4.3 Calcul des courants harmoniques de référence .....	18
II.4.4 Régulation de la tension continue .....	19
II.4.5 Régulation de courant du filtre actif .....	19
II.5 Commande de l'onduleur .....	20
II.5.1 Commande par hystérésis .....	21
III.6 Conclusion .....	21

### Chapitre III : Simulation et interprétation des résultats

III .1 Introduction .....	22
III.2 Simulation sous Matlab Simulink .....	22
III.3 Paramètres de simulation .....	22
III.4 Résultats de simulation .....	23
III.4.1 Modèle d'un réseau électrique -charge non linéaire avant le filtrage .....	23
III.4.2 Modèle d'un filtre actif réseau-charge non linéaire avec le filtrage .....	25
III.5 Conclusion .....	29

Conclusion générale

BIBLIOGRAPHIE

# INTRODUCTION GENERALE

## **Introduction générale**

Ces dernières années, l'utilisation croissante des dispositifs d'électronique de puissance dans les systèmes électriques a entraîné d'énormes problèmes liés aux perturbations ou distorsions harmoniques des réseaux électriques. Ce phénomène touche l'ensemble des secteurs industriels (utilisation de redresseurs, de gradateurs,...), tertiaire (informatique ou éclairage des bureaux, commerce,...) et domestique (téléviseurs, appareils électroménagers grand public,...) [1].

La problématique des harmoniques dans le réseau électrique, également appelée pollution harmonique, n'est pas un phénomène nouveau. La distorsion harmonique est générée par les charges non linéaires connectées au réseau et qui absorbent des courants non sinusoïdaux. Ces harmoniques de courant vont à leur tour générer des tensions harmoniques aux différents points de connexion au réseau [2].

Plusieurs solutions de dépollution ont été présentées. La solution à base de filtres passifs est souvent pénalisée 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. Le filtre actif parallèle peut être installé pour compenser toutes les perturbations de courant comme les harmoniques et la puissance réactive. D'autres solutions de dépollution consistent à associer des filtres hybrides pour trouver un compromis entre l'efficacité de compensation et le coût. Ces solutions peuvent être des solutions futures très prometteuses.

Le travail présenté dans ce mémoire consiste en l'étude d'un filtre actif parallèle pour la compensation des harmoniques de courant générés par une charge polluante connectée au réseau électrique.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté les perturbations harmoniques, leurs origines, leurs effets sur le réseau d'alimentation et les normes inhérentes à ces perturbations. Nous avons également présenté les solutions de dépollution.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude du filtre actif parallèle à base de l'onduleur de tension. Nous avons présenté les méthodes d'identification des courants harmoniques, la régulation de la tension continue et la commande de l'onduleur.

Au dernier chapitre, nous présenterons la simulation de l'ensemble réseau d'alimentation, filtre actif parallèle et la charge polluante sous Matlab/Simulink/SimPowerSystemes. Les résultats obtenus seront présentés.

Enfin nous terminons ce travail par une conclusion générale.

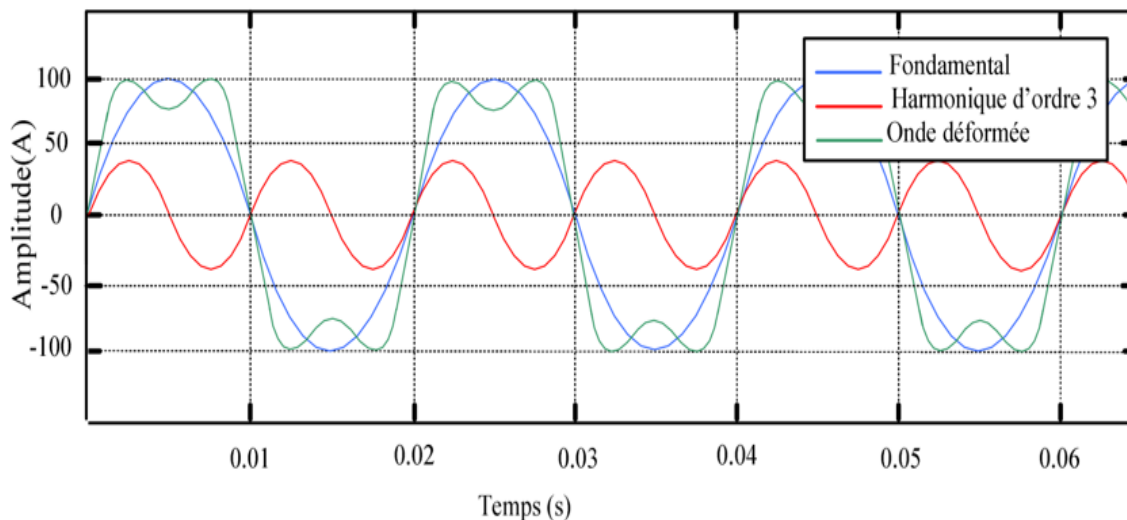
# CHAPITRE I

## I.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons la problématique de la pollution harmonique. Nous commencerons par la définition et la caractérisation d'harmoniques, avant de donner les différentes sources d'harmoniques et leurs effets sur l'ensemble des équipements électriques. A la fin du chapitre nous abordons les différentes stratégies de dépollution de ces harmoniques.

## I.2 Définition d'harmonique

On parle d'harmonique lorsqu'un signal électrique périodique (tension ou courant) peut être décomposé en plusieurs signaux sinusoïdaux dont les fréquences sont multiples entières de celle du signal globale. Le premier terme de cette décomposition représente le rang fondamental de fréquence 50 Hz. Les autres rangs ont des fréquences  $n$  fois 50 Hz et des amplitudes souvent inversement proportionnelles à leurs rangs. Ainsi, en général les harmoniques proches du fondamental (3, 5, 7, ...) sont les plus gênants et par conséquent, il faut les éliminer. Sur la figure ...une onde de courant composée du rang fondamental et de l'harmonique 3 est représentée.



**Figure I.1** : Schéma d'une onde déformée

En plus des harmoniques définies ci-dessus, parfois, dans des cas particuliers, il y a apparition des inter-harmoniques ayant des fréquences non multiple-entière du fondamentale. Ces inter-harmoniques sont en majorité causés par des convertisseurs statiques de fréquence, tels les variateurs de vitesse pour moteurs asynchrones.

## I.3 Sources des harmoniques

Les charges non linéaires, particulièrement celle utilisant les convertisseurs d'électronique de puissance sont la cause principale de la pollution harmonique. On peut citer notamment les onduleurs, les redresseurs, les fours à arc et à induction, les variateurs de vitesse des machines électriques, les appareils domestiques tels que les téléviseurs et les lampes

fluorescentes, et les alimentations à découpage représentent la majorité des sources d'émission des harmoniques [3].

#### I.4 Caractérisation des perturbations harmoniques

Une tension ou un courant électrique lorsqu'il est composé de plusieurs harmoniques est écrit comme suit :

$$i = \sum_{n=1} i_n , \quad v = \sum_{n=1} v_n \quad (I.1)$$

La pollution harmonique est caractérisée principalement par le taux de distorsion harmonique total, et parfois individuel définis comme suit :

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2} I_n^2}}{I_1} , \quad THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=2} V_n^2}}{V_1} \quad (I.2)$$

$$IHD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2} I_n^2}}{I_1} , \quad IHD_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=2} V_n^2}}{V_1} \quad (I.3)$$

En plus des taux de distorsions, les harmoniques sont aussi caractérisés par leurs séquences. Ainsi, dans un système triphasé, les harmoniques de rang  $6n+1$  (1, 7, 13...) forment des sous-systèmes harmoniques de séquence directe (positive) puisqu'ils tournent dans le même sens que le fondamental, alors que les harmoniques de rang  $6n-1$  (5, 11, 17, ...) forment des sous-systèmes harmoniques de séquence inverse (négative) puisqu'ils tournent dans le sens inverse. Finalement, les harmoniques multiples impaires de 3 forment des sous-systèmes de séquence homopolaire. Ceci apparaissent lorsque dans les systèmes triphasé à neutre distribué et ont comme conséquence l'augmentation du courant dans le neutre.

#### I.5 Puissance électrique en présence d'harmoniques

Outre les taux de distorsion, les harmoniques ont un effet direct sur les valeurs efficaces des courants et tension, les puissances ainsi que le facteur de puissance. Ainsi, en cas de présence d'harmonique, les valeurs efficaces d'un courant et d'une tension sont données par

$$I = \sqrt{\sum_{n=1} I_n^2} = I_1 \sqrt{1 + \left(\frac{THD_I}{100}\right)^2} \quad (I.4)$$

$$V = \sqrt{\sum_{n=1} V_n^2} = V_1 \sqrt{1 + \left(\frac{THD_V}{100}\right)^2} \quad (I.5)$$

Par conséquent, la puissance apparente devient

$$S = V_1 I_1 \sqrt{\left[1 + \left(\frac{THD_V}{100}\right)^2\right] \times \left[1 + \left(\frac{THD_I}{100}\right)^2\right]} \quad (I.6)$$



Les harmoniques de tension et de courant de même séquence et de même fréquence participent au transfert de puissance, comme le montre l'équation suivante :

$$P = \frac{1}{T} \int v i \, dt = V_n I_n \cos(\varphi_{Vn} - \varphi_{In}) \quad (\text{I.7})$$

Le facteur de puissance qui est donné comme le rapport entre la puissance moyenne et la puissance apparente.

$$PF = \frac{P}{V_1 I_1} \times \frac{1}{\sqrt{\left[1 + \left(\frac{THDV}{100}\right)^2\right] \times \left[1 + \left(\frac{THDI}{100}\right)^2\right]}} \quad (\text{I.8})$$

Cette équation montre clairement que le facteur de puissance est détérioré en présence d'harmoniques. On peut le vérifier clairement lorsque les tensions sont sinusoïdales, en effet, dans ce cas, la puissance moyenne P devient simplement

$$P = P_1 = V_1 I_1 \cos(\phi_1), \quad \phi_1 = \varphi_{V1} - \varphi_{I1} \quad (\text{I.9})$$

Ainsi ;

$$PF = \cos(\phi_1) \times \frac{1}{\sqrt{\left[1 + \left(\frac{THDI}{100}\right)^2\right]}} \quad (\text{I.10})$$

Ce qui montre que le facteur de puissance au fondamentaux est multiplié par un coefficient inférieur à 1. Par ailleurs, on ne peut pas facilement montrer que les pertes cuivre dans les conducteurs augmentent également en présence d'harmonique. En effet, si on néglige l'effet de la fréquence sur la résistance du conducteur, ces pertes vont s'écrire

$$P_J = RI^2 = RI_1^2 \sqrt{1 + \left(\frac{THDI}{100}\right)^2} \quad (\text{I.11})$$

## I.6 Effets des harmoniques

Ci-dessus, on a montré que la présence d'harmonique dans un système électrique, modifie considérablement, les valeurs efficaces, les puissances et le facteur de puissance. Ceci provoque des effets qui peuvent être immédiats (instantanés) ou à terme. Parmi les effets instantanés on peut noter :

- Les déclenchements intempestifs des protections à cause de l'augmentation des valeurs efficaces des courants et tensions en présence d'harmoniques ;
- Perturbations induites des systèmes à courants faibles (télécommande, téléviseur, écran d'ordinateur,...) ;
- Vibrations et bruits acoustiques anormaux (tableaux BT, moteurs, transformateurs), à cause des couples parasites dus aux harmoniques de courants ;
- Destruction par surcharge thermique de condensateurs ;
- Perte de précision des appareils de mesure.

Par ailleurs, à long terme les harmoniques peuvent provoquer notamment un vieillissement prématuré des équipements et des isolations électriques, à cause des échauffements. On peut citer notamment le vieillissement des condensateurs, les isolations dans les machines électriques.

### I.7 Normes

L'objectif des normes et des réglementations est de limiter les dysfonctionnements occasionnés par les harmoniques. Les deux principaux organismes de normalisation internationaux dans le domaine sont la CEI (Commission Electrotechnique Internationale), et IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). La CEI définit le niveau des courants et des tensions harmoniques à ne pas dépasser par une série de normes de compatibilité électromagnétique (CEI 61000).

Nous pouvons citer à titre d'exemple [4] :

**La norme CEI 61000-2-2** : elle définit les niveaux de compatibilité de tensions harmoniques sur les réseaux publics basse tension. Elle est représentée sur le tableau (I.1). Cette norme vise à protéger les équipements raccordés sur un réseau basse tension déformé. [2]

**La norme CEI 61000-3-2** : cette norme fixe la limitation des courants injectés dans le réseau public pour des équipements dont le courant par phase est inférieur à 16A. [2] .elle est représentée sur le tableau (I.2).

**Tableau I.1** Niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles sur les réseaux publique basse tension (norme CEI 61000-2-2).

Harmoniques impaires				Harmoniques paires	
Non multiples de 3		Multiple de 3		Rangs	Taux (%)
Rangs	Taux (%)	Rangs	Taux (%)		
5	6				
7	5			2	2
11	3.5	3	5	4	1
13	3	9	1.5	6	0.5
17	2	15	0.3	8	0.5
19	1.5	21	0.2	10	0.5
23	1.5	>21	0.2	12	0.2
25	1.5			>12	0.2
>25	0.2+1.3*25/h				

**Tableau I.2** Limite des composantes harmoniques en courant (norme CEI 61000-3-2).

Harmoniques impaires		Harmoniques paires	
Rangs	Taux (%)	Rangs	Taux (%)
3			
5	2.3		
7	1.14 0.77	2	1.08 0.43
9	0.40	4	
11	0.33 0.21	6	0.3
13	0.15*15/h	8≤h≤40	0.23*8/h
15≤h≤39			

## I.8 Solutions de dépollution harmonique

### I.8.1 Filtrage passif

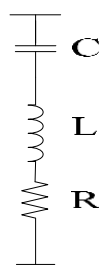
Un filtre passif est constitué d'éléments passifs tels que les inductances, les condensateurs et les résistances. Il consiste à placer en parallèle sur le réseau d'alimentation une impédance de valeur très faible autour de la fréquence à filtrer et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau. On connecte alors le filtre passif en parallèle avec le réseau de manière à absorber un harmonique de courant donné.

Il existe différents types de filtres passifs destinés à éliminer les courants harmoniques. On distingue le filtre passif résonnant et le filtre passif amorti [5] :

#### Filtre passif résonnant

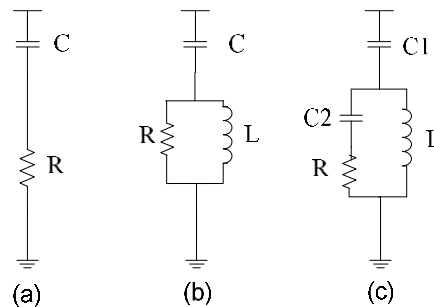
Le filtre résonnant est constitué d'un ensemble RLC en série accordés sur la fréquence de l'harmonique que l'on veut éliminer comme montré par la figure II.2.

Ce filtre possède une impédance faible pour l'harmonique concerné et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau. Par conséquent il faut autant de circuits résonnants que d'harmoniques à supprimer [6].

**Figure I.2** Filtre résonnant.

### Filtre passif amorti

Le filtre passif amorti compense les harmoniques supérieurs ou égaux à sa fréquence propre, il peut se connecter en parallèle avec d'autres résonants. On distingue trois types de filtres amortis : filtre amorti de 1<sup>er</sup> ordre, 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> ordre [7].



**Figure I.3** Filtre passif amorti : (a) filtre amorti de 1<sup>er</sup> ordre, (b) filtre amorti de 2<sup>ème</sup> ordre, (c) filtre amorti de 3<sup>ème</sup> ordre.

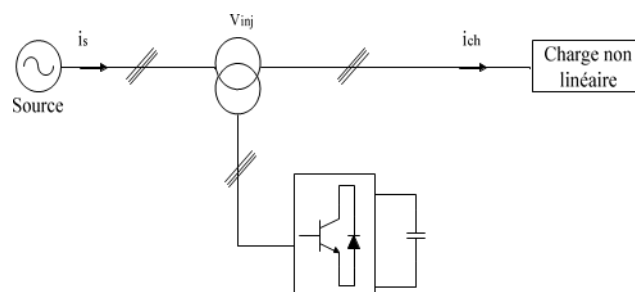
### I.8.2 Filtrage actif

Les inconvénients des solutions classiques comme les filtrages passifs ont conduit à la conception de nouvelles structures pour l'élimination des harmoniques appelées filtres actifs.

Le principe de ce filtre est l'injection de courants harmoniques de même amplitude et en opposition de phase avec les harmoniques que l'on désire compenser [6].

#### Filtre actif série

Le FAS est connecté en série sur le réseau, il se comporte comme une source de tension qui génère des tensions harmoniques. Il est destiné à protéger les installations sensibles aux tensions perturbatrices (harmoniques, creux, déséquilibre). Cette topologie ne permet pas de compenser les courants harmoniques consommés par la charge [8].



**Figure I.4** Filtre actif série

#### Filtre actif parallèle

Le FAP est connecté en parallèle au réseau, il est souvent commandé comme un générateur de courant. Il injecte des courants harmoniques dans le réseau égaux à ceux absorbés par la charge non linéaire, mais en opposition de phase avec ceux ceci. L'objectif du FAP est d'empêcher les courants perturbateurs produits par les charges non linéaires de circuler à travers l'impédance du réseau, située en amont du point de connexion du filtre actif [9].

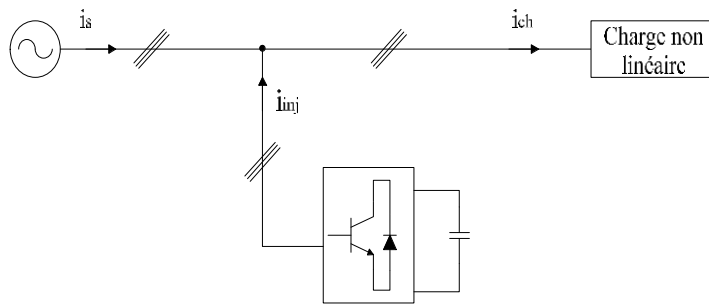


Figure I.5 Filtre actif parallèle.

**La combinaison Parallèle- série actifs**

La combinaison du filtres actifs parallèle- série permet de réaliser simultanément un courant sinusoïdal et une tension du réseau également sinusoïdale [10].

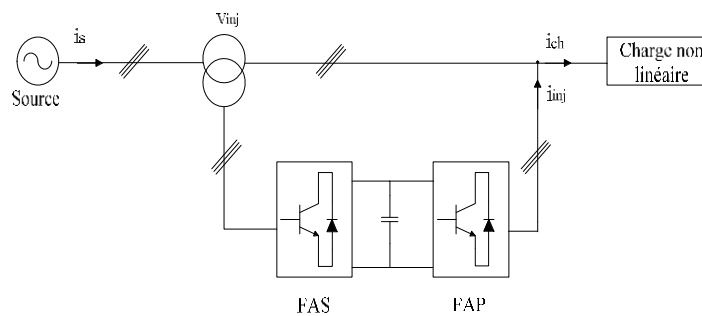


Figure I.6 Filtre série-parallèle.

**I.8.3 Filtre actif hybride**

Le filtre actif hybride combine les avantages des filtres passifs et des filtres actifs. Pour cela, il est considéré comme l'une des meilleures solutions pour filtrer les harmoniques de courants. On distingue trois configurations du filtre actif hybride [9] :

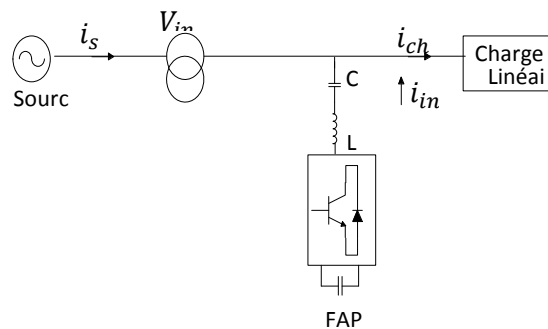


Figure I.7 Filtre actif hybride.

**I.9 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté la pollution harmonique dans le réseau électrique, nous avons donné la définition les harmoniques et leurs origines ainsi que leurs effets instantané et à terme sur les équipements électriques.

Ces effets peuvent aller des échauffements et de la dégradation du fonctionnement jusqu'à la destruction totale de ces équipements. Alors que pour éliminer ces effets, plusieurs solutions de dépollution ont été présentées. La solution à base de filtres passifs est souvent pénalisée en termes d'encombrement et de résonance, de plus elles ne peuvent pas s'adapter à l'évolution du réseau et aux charges polluantes. Contrairement, les filtres actifs ont un objet de s'adapter et dépolluer le réseau de tous types de perturbations .le chapitre suivant sera consacré au Modélisation de filtre actif parallèle

# CHAPITRE II

## II.1 Introduction

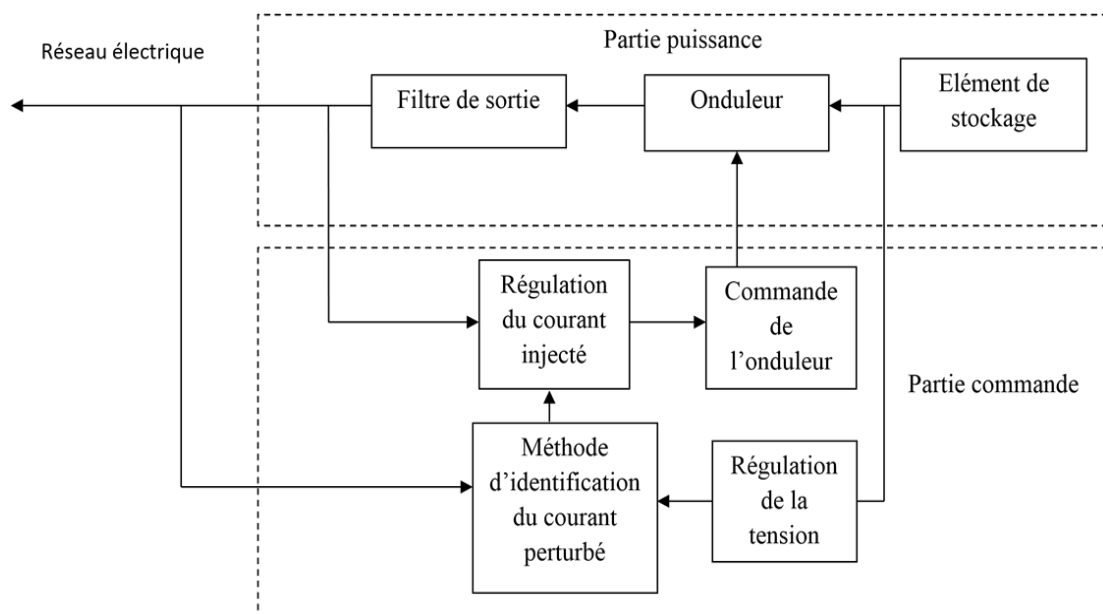
Dans ce chapitre nous allons étudier une des solutions de dépollution étudiés dans le chapitre précédent qui est le filtre actif parallèle basé sur un onduleur de tension triphasé.

Cette étude contient deux parties, la partie puissance et la partie contrôle-commande. Dans la partie puissance, on a retrouvé les trois blocs de cette structure : L'onduleur de tension qui est un élément fondamental de ce filtre, l'élément de stockage d'énergie et le filtre de sortie. La partie contrôle-commande, comporte des blocs pour identifier des courants perturbateurs et la régulation de la tension du bus continu et la régulation du courant harmonique injecté par l'onduleur de tension.

## II.2 Structure générale d'un filtre actif parallèle

### II.2.1 Topologie générale

On peut diviser un filtre actif parallèle en deux grandes parties comme le montre la figure (II.1) :



**Figure II.1 :** Structure générale du filtre actif parallèle

- La partie puissance qui est constituée
  - d'un onduleur de tension
  - d'un circuit de stockage d'énergie, souvent capacitif.
  - d'un filtre de sortie.
- la partie contrôle-commande qui est constituée :
  - Identification des courants harmoniques : ceci généralement à partir des courants absorbés par la charge non linéaire ;
  - Régulation de la tension du bus continu ;
  - Régulation des courants harmoniques injectés par l'onduleur de tension.



II.3 Etude de la partie puissance

II.3.1 Onduleur de tension

L'onduleur de tension, de par sa capacité à réaliser un grand nombre de fonctionnalités, a été naturellement mis à contribution pour réaliser des objectifs de compensation.

L'onduleur de tension est composé de trois bras chacun à deux interrupteurs bidirectionnels en courant commandés à l'amorçage et au blocage, ils sont réalisés avec un transistor (MOSFET, IGBT, GTO) associé à une diode en antiparallèle pour obtenir la réversibilité en courant.

Le stockage de l'énergie se fait dans un condensateur  $C_{dc}$  qui joue le rôle d'une source de tension continue  $V_{dc}$ . L'onduleur de tension est connecté au réseau électrique via un filtre passif appelé aussi filtre de sortie.

L'onduleur de tension triphasé et les interrupteurs de puissance sont présentés par les schémas des figures (II.2) et (II.3) respectivement.

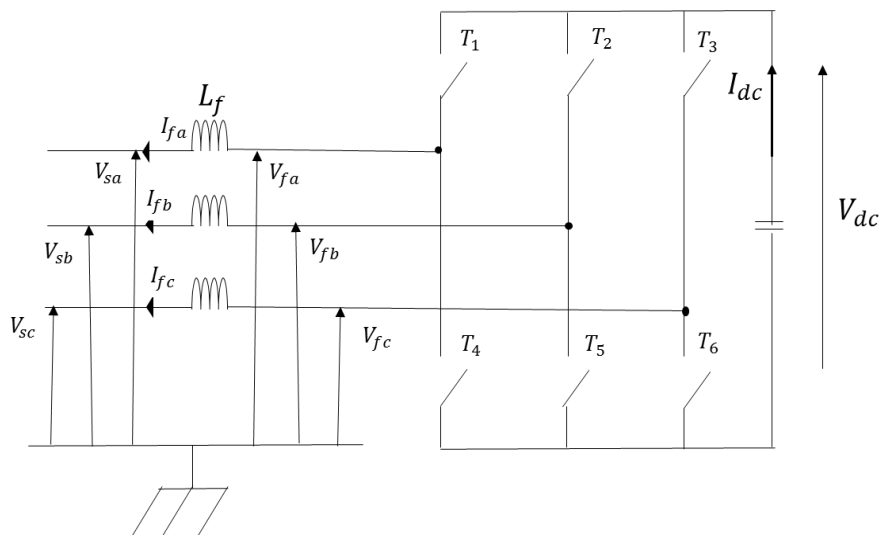


Figure II.2 : Filtre actif à structure tension

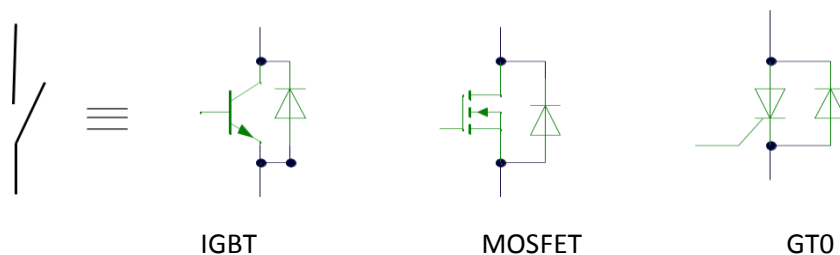


Figure II.3 : Interrupteurs de puissance

Au cours de son fonctionnement, le convertisseur statique relie par l'intermédiaire de ses interrupteurs une source de tension alternative avec une source de tension continue entre lesquelles il assure le contrôle et l'échange d'énergie. Pour que cette liaison puisse se faire, il faut respecter deux règles essentielles [1] :

- Deux interrupteurs d'un même bras ne peuvent être fermés simultanément sous peine de court-circuiter le condensateur de stockage, mais ils peuvent être tous les deux ouverts pendant un temps d'attente appelé temps mort inséré entre la commande de blocage d'un interrupteur et la commande d'amorçage de l'autre. Toutefois, avec l'hypothèse des commutations instantanées, ce mode de fonctionnement ne sera pas pris en compte.
- Une source de courant ne doit jamais être ouverte ce qui impose la présence de la diode antiparallèle.

### II.3.1.1 Modélisation de l'onduleur de tension

L'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur de la Figure (II.3) sont désignées par les fonctions de commutation ( $u_1, u_2, u_3$ ) définis ci-dessous :

$$\begin{aligned} u_1 &= \begin{cases} 1 & \text{T1 fermé et T4 ouvert} \\ 0 & \text{T1 ouvert et T4 fermé} \end{cases} \\ u_2 &= \begin{cases} 1 & \text{T2 fermé et T5 ouvert} \\ 0 & \text{T2 ouvert et T5 fermé} \end{cases} \\ u_3 &= \begin{cases} 1 & \text{T3 fermé et T6 ouvert} \\ 0 & \text{T3 ouvert et T6 fermé} \end{cases} \end{aligned} \quad (\text{II.1})$$

Dans l'hypothèse d'un système équilibré, les tensions du réseau sont supposées triphasées équilibrées et sinusoïdales de fréquence (50Hz), elles sont définies par :

$$V_{si} = V_m \sin\left(\omega t - (i-1)\frac{2\pi}{3}\right) \quad (i = a, b, c) \quad (\text{II.2})$$

$$\text{Avec :} \quad V_{sa} + V_{sb} + V_{sc} = 0 \quad (\text{II.3})$$

$V_m$  Et  $\omega$  sont, respectivement, l'amplitude de la tension simple et la pulsation du réseau.

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

$$\begin{bmatrix} V_{fa} - V_{fb} \\ V_{fb} - V_{fc} \\ V_{fc} - V_{fa} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 - u_2 \\ u_2 - u_3 \\ u_3 - u_1 \end{bmatrix} V_{dc} \quad (\text{II.4})$$

Le courant délivré par la capacité est :

$$i_{dc} = C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = \sum_{i=0}^3 (u_i i_{fi}) - V_{dc} \quad (\text{II.5})$$

$V_{fa}, V_{fb}$  et  $V_{fc}$  Sont les tensions par rapport au point neutre, elles vérifient l'équation :

$$\begin{bmatrix} V_{fa} \\ V_{fb} \\ V_{fc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} + L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{fa} \\ i_{fb} \\ i_{fc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

Sachant que la somme des courants du filtre actif est nulle :

$$i_{fa} + i_{fb} + i_{fc} = 0 \quad (\text{II.7})$$

On déduit des équations (II.3), (II.6), (II.7)

$$V_{fa} + V_{fb} + V_{fc} = 0 \quad (\text{II.8})$$

Les équations (II.4) et (II.8) donnent :

$$\begin{bmatrix} V_{fa} \\ V_{fb} \\ V_{fc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \frac{V_{dc}}{3} \quad (\text{II.9})$$

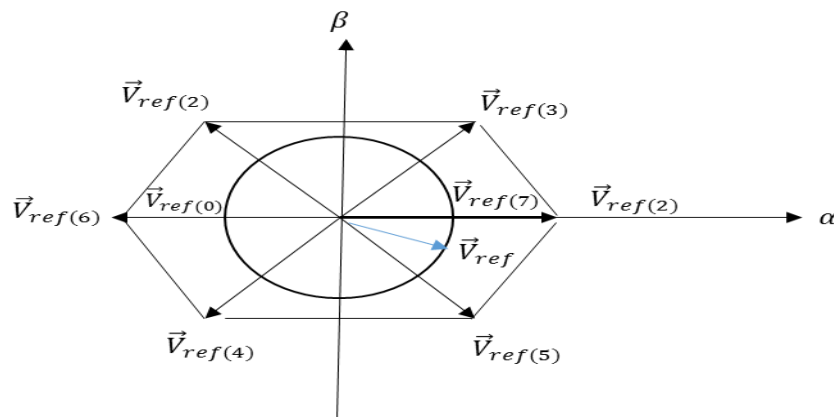
Les variables  $u_1$ ,  $u_2$ , et  $u_3$  prennent chacune deux valeurs possibles, il en résulte huit états possibles pour les tensions  $V_{fa}$ ,  $V_{fb}$ ,  $V_{fc}$  résumés dans le tableau (II.1).

T	$u_1$	$u_2$	$u_3$	$V_{fa}$	$V_{fb}$	$V_{fc}$
0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	$\frac{2V_{dc}}{3}$	$\frac{-V_{dc}}{3}$	$\frac{-V_{dc}}{3}$
2	0	1	0	$\frac{-V_{dc}}{3}$	$\frac{2V_{dc}}{3}$	$\frac{-V_{dc}}{3}$
3	1	1	0	$\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{-2V_{dc}}{3}$
4	0	0	1	$\frac{-V_{dc}}{3}$	$\frac{-V_{dc}}{3}$	$\frac{2V_{dc}}{3}$
5	1	0	1	$\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{-2V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{3}$
6	0	1	1	$\frac{-2V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{3}$
7	1	1	1	0	0	0

Tableau II.1 Tensions délivrées par l'onduleur.

### II.3.1.2 Représentation vectorielle des tensions générées

Dans le plan de Concordia  $\alpha\beta$ , et en considérant  $\vec{V}_{ref}$  le vecteur correspondant aux tensions de l'onduleur, les huit cas possibles du vecteur  $\vec{V}_{ref}$  sont donnés par la Figure (II.4).



**Figure II.4 :** Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur

Où  $\vec{V}_{ref}$  représente la tension de référence que doit produire l'onduleur pour pouvoir créer les courants perturbateurs identifiés. Ceci signifie que l'onduleur n'est capable de fournir des tensions égales aux tensions de référence que si le vecteur formé par ces derniers reste à l'intérieur de l'hexagone montré dans la Figure (II.4) [11].

### II.3.2 Circuit de stockage de l'énergie

Le stockage de l'énergie et la fourniture d'une tension continue  $V_{dc}$  sont les rôles du condensateur  $C_{dc}$ . Le choix des paramètres du système de stockage n'est pas arbitraire car ils ont une influence sur la dynamique et la qualité de compensation du filtre actif parallèle.

En effet, le choix de la tension  $V_{dc}$  se répercute en grande partie sur le choix des interrupteurs (voir tableau (II.1)), et l'augmentation de  $V_{dc}$  améliore la dynamique du filtre actif, donc elle doit être choisie comme la plus grande tension tout en respectant les contraintes des interrupteurs. Le choix de  $C$  se fait de manière à ce que les ondulations de la tension  $V_{dc}$  causées par les courants engendrés par le filtre actif soient limitées, car plus ces ondulations sont importantes plus l'amplitude du courant du filtre est grande, sa fréquence est faible et sa qualité de compensation est dégradée.

Ainsi on peut estimer que seuls les premiers harmoniques sont pris en compte dans le choix des paramètres de stockage. Pour démontrer ceci deux méthodes peuvent être utilisées [7] :

- La première méthode est basée sur le calcul de l'énergie fournie par le filtre actif pendant une demi période de la pulsation de puissance liée aux deux premiers harmoniques (5 et 7) pour un pont redresseur de Graetz. En choisissant un taux d'ondulation acceptable ( $\epsilon$ ), généralement de l'ordre de 5% de  $V_{dc}$ , la capacité  $C$  est calculée à partir de la relation suivante :

$$C_{dc} = \frac{V_s \cdot \sqrt{I_5^2 + I_7^2 - 2I_5 I_7 \cos(5\alpha - 7\beta)}}{2\omega \cdot \epsilon \cdot V_{dc}^2} \quad (\text{II.10})$$

Avec :

$V_s$  : La valeur efficace de la tension simple du réseau.

$\alpha$  : l'angle d'allumage des thyristors du pont de Graetz.

• La deuxième méthode, plus simple, se base sur la mesure du courant harmonique  $I_h$  du rang le plus faible. La capacité  $C_{dc}$  se calcule de la façon suivante :

$$C_{dc} = \frac{I_h}{\varepsilon V_{dc} \omega_h} \quad (\text{II.11})$$

Avec :

$\omega_h$  : Est la plus faible pulsation des harmoniques à compenser.

$I_h$  : Le courant harmonique du rang h.

### II.3.3 Filtre de connexion au réseau

Dans son rôle de filtre actif, l'onduleur de tension est connecté au point de couplage via un filtre passif d'inductif. Il y a alors deux solutions ; soit un filtre de premier ordre, dit de type L ou un filtre de troisième ordre dit de type LCL.

#### II.3.3.1 Filtre de connexion de type L

Pour le cas du filtre L, celui-ci est caractérisé par son inductance L et une faible résistance parfois négligeable. Le calcul de ce filtre dépend généralement de deux critères :

Assurer la dynamique du courant :

$$\frac{d}{dt} \vec{I}_{h-ch} = \frac{d}{dt} \vec{I}_f \quad (\text{II.12})$$

$\vec{I}_{h-ch}$  : Le courant harmonique de la charge.

$\vec{I}_f$  : Le courant du filtre actif.

Empêcher les composantes harmoniques haute fréquences, dues aux commutations de se propager sur le réseau électrique.

Le dimensionnement de ce filtre est relativement facile, néanmoins il est difficile d'assurer une bonne dynamique de courant tout en rejetons les harmoniques de commutation. En effet, une bonne dynamique nécessite une valeur d'inductance faible alors que pour repousser les harmoniques de commutation il faut en choisir une inductance élevée.

#### II.3.3.2 Filtre de connexion de type LCL

Nous proposons ici d'étudier le cas d'un filtre de sortie du troisième ordre afin d'échapper aux problèmes évoqués dans le cas du filtre de sortie du premier ordre [12]. Ce filtre de sortie, souvent appelé filtre en T, se compose de deux inductances ( $L_f$ ,  $L_{f2}$ ) de résistances internes respectives ( $R_{f1}$ ,  $R_{f2}$ ) et d'une capacité  $C_f$ . Dans ce travail, une petite résistance

d'amortissement  $R_f$  a été ajoutée en série avec la capacité  $C_f$  comme le montre la Figure (II.5) [13].

Ce type de filtre et grâce au degré de liberté supplémentaire, fourni par la capacité  $C_f$ , peut assurer les deux critères de dimensionnement du filtre de sortie que nous avons évoqués précédemment

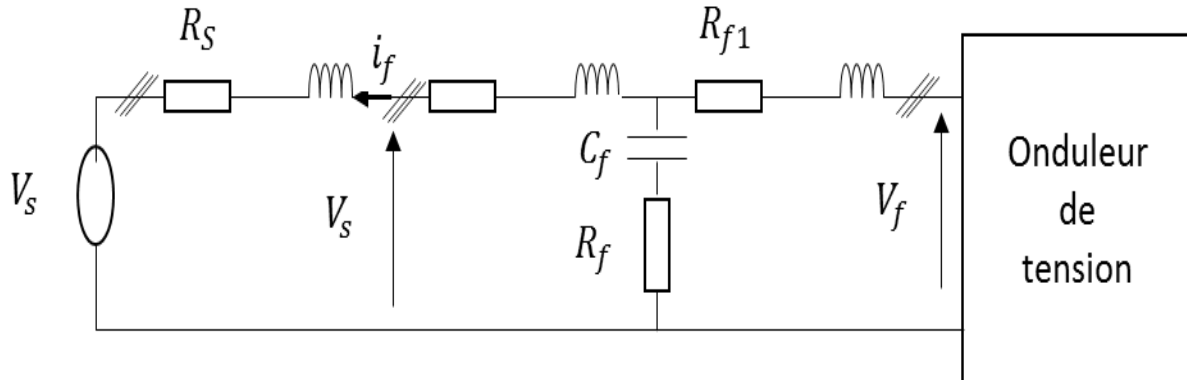


Figure II.5 : Schéma équivalent par phase du filtre de sortie du troisième ordre en T

Les équations qui modélisent le filtre de sortie sont :

$$I_f(s) = \frac{B_1(s)}{A(s)} V_f(s) + \frac{B_2(s)}{A(s)} e_s(s) \quad (II.13)$$

Avec  $V_f$  la tension de sortie de l'onduleur,  $B_1(s)/A(s)$  la fonction de transfert du filtre de sortie correspondant au système d'origine et  $B_2(s)/A(s)$  la fonction de transfert correspondant au modèle de perturbation. Ces perturbations sont causées par la tension du réseau électrique  $e(s)$  que l'on considère désormais égale à la tension de raccordement  $V_s$  pour les réseaux électriques de forte puissance de court-circuit.

$$\begin{cases} A(s) = a_1 s^3 + a_2 s^2 + a_3 s + a_4 \\ B_1(s) = b_{11} s + b_{12} \\ B_2(s) = -(b_{21} s^2 + b_{22} s + b_{23}) \end{cases} \quad (II.14)$$

Avec :

$$\begin{aligned} a_1 &= (L_s + L_{f2}) L_{f1} C_f \\ a_2 &= ((L_s + L_{f2}) R_{f1} C_f + (R_s + R_{f2}) L_{f1} C_f + (L_{f1} + L_s + L_{f2}) R_f C_f) \\ a_3 &= ((L_s + L_{f2}) + L_{f1} + (R_s + R_{f2}) R_{f1} C_f + (R_{f1} + R_s + R_{f2}) R_f C_f) \\ a_4 &= (R_{f1} + R_s + R_{f2}) \\ b_{11} &= R_f C_f \\ b_{12} &= 1 \end{aligned} \quad (II.15)$$

$$b_{21} = L_{f1}C_f$$

$$b_{22} = (R_f + R_{f1})C_f$$

$$b_{23} = 1$$

Des relations (II.13), (II.14) et (II.15), si nous négligeons toutes les résistances, nous pouvons établir la relation suivante, valable aux fréquences supérieures à 50 Hz :

$$\frac{B_1}{A}(s) = \frac{1}{(L_{f1}L_{f2}C_f)s^3 + (L_{f1} + L_{f2})s} \quad (\text{II.16})$$

La fréquence de résonance  $f_{CP}$  du système d'origine est donnée par la relation (II.17) :

$$f_{CP} = \frac{1}{2\pi \sqrt{\frac{(L_{f1}L_{f2})C_f}{L_{f1} + L_{f2}}}} \quad (\text{II.17})$$

## II.4 Etude de la partie contrôle-commande

La partie control-commande d'un filtre actif comprend trois étages essentiels

- 1- Identification des courants harmoniques : ceci généralement à partir des courants absorbés par la charge non linéaire ;
- 2- Réglage de la tension du bus continu ;
- 3- Régulation des courants harmoniques injectés par l'onduleur de tension.

### II.4.1 Identification des courants harmoniques

Elle consiste à générer les courants de référence que l'onduleur doit injecter pour contrer les harmoniques de la charge non linéaire. Cette identification peut être réalisée dans le domaine temporel ou fréquentiel. Dans le domaine temporel, deux méthodes sont très souvent utilisées : la méthode des courants instantanés dans le référentiel synchrone dq, ou la méthode des puissances instantanées pq dans le référentiel  $\alpha\beta$ .

#### II.4.1.1 Méthode d'identification par les puissances instantanées

Dans cette méthode le calcul des puissances instantanées dans le référentiel  $\alpha\beta$  sont réalisés à partir des courants absorbés par la charge non linéaire et des tensions au PCC, exprimés également dans le référentiel  $\alpha\beta$  comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_{ch\ \alpha} \\ I_{ch\ \beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ch\ a} \\ I_{ch\ b} \\ I_{ch\ c} \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

A noter que dans le cas d'un système trois fils (sans la distribution du neutre), les composantes homopolaires indiquées par l'indice (0) n'existent pas.

Le calcul des puissances réelle et imaginaire instantanées donne alors :

$$\begin{aligned} P_{ch} &= V_{\alpha} I_{ch\ \alpha} + V_{\beta} I_{ch\ \beta} \\ q_{ch} &= V_{\alpha} I_{ch\ \beta} - V_{\beta} I_{ch\ \alpha} \end{aligned} \quad (\text{II.20})$$

Qu'on peut mettre sous forme matricielle comme suit :

$$\begin{bmatrix} P_{ch} \\ q_{ch} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & V_{s\beta} \\ -V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ch\ \alpha} \\ I_{ch\ \beta} \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

En présence d'harmoniques dans les courants et/ou les tensions, ces puissances contiendront des parties continues (valeurs moyennes) qui sont le résultat des composantes fondamentales de courant et de tension, et des parties oscillatoires résultant des autres composantes harmoniques. Ainsi ;

$$\begin{cases} P_{ch} = \bar{P} + \tilde{P} \\ q_{ch} = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

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 perturbatrices du courant et de la tension.

#### II.4.2 Séparation des puissances non désirables

Cette séparation consiste à choisir les puissances à supprimer du côté réseau. De manière générale, les parties oscillatoires doivent être supprimées, néanmoins pour un facteur de puissance unitaire, la partie continue de la puissance imaginaire est également supprimée, car celle-ci correspond à la puissance réactive. On peut, soit séparer la partie continue ou oscillatoire, néanmoins, il est recommandé de séparer la partie continue, car celle-ci nécessite un filtre passe-bas plus performant d'un filtre passe-haut.



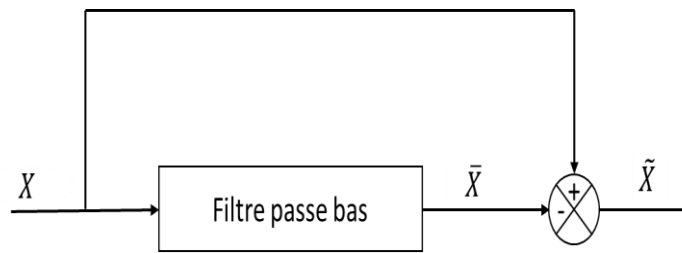


Fig.II.6 : Schéma représentant le principe de séparation des puissances

II.4.3 Calcul des courants harmoniques de référence

Ou cas ou toute la puissance imaginaire q doit être supprimée, les courants de référence dans le référentiel  $\alpha\beta$  sont calculés comme suit :

$$\begin{bmatrix} I_{\alpha ref} \\ I_{\beta ref} \end{bmatrix} = \frac{1}{V_{s\alpha}^2 + V_{s\beta}^2} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\tilde{p} \\ -q \end{bmatrix} \tag{II.23}$$

Les courants de référence sont alors déduit en utilisant la transformée Concordia inverse :

$$\begin{bmatrix} I_{a ref} \\ I_{b ref} \\ I_{c ref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\alpha ref} \\ I_{\beta ref} \end{bmatrix} \tag{II.24}$$

Finalement, l'algorithme de cette identification est représenté sur la figure (II.7) A noter qu'en cas de tensions non sinusoïdales ou déséquilibrées, cette méthode nécessite une identification de la séquence directe fondamentale des tensions en utilisant une boucle à verrouillage de phase (PLL).

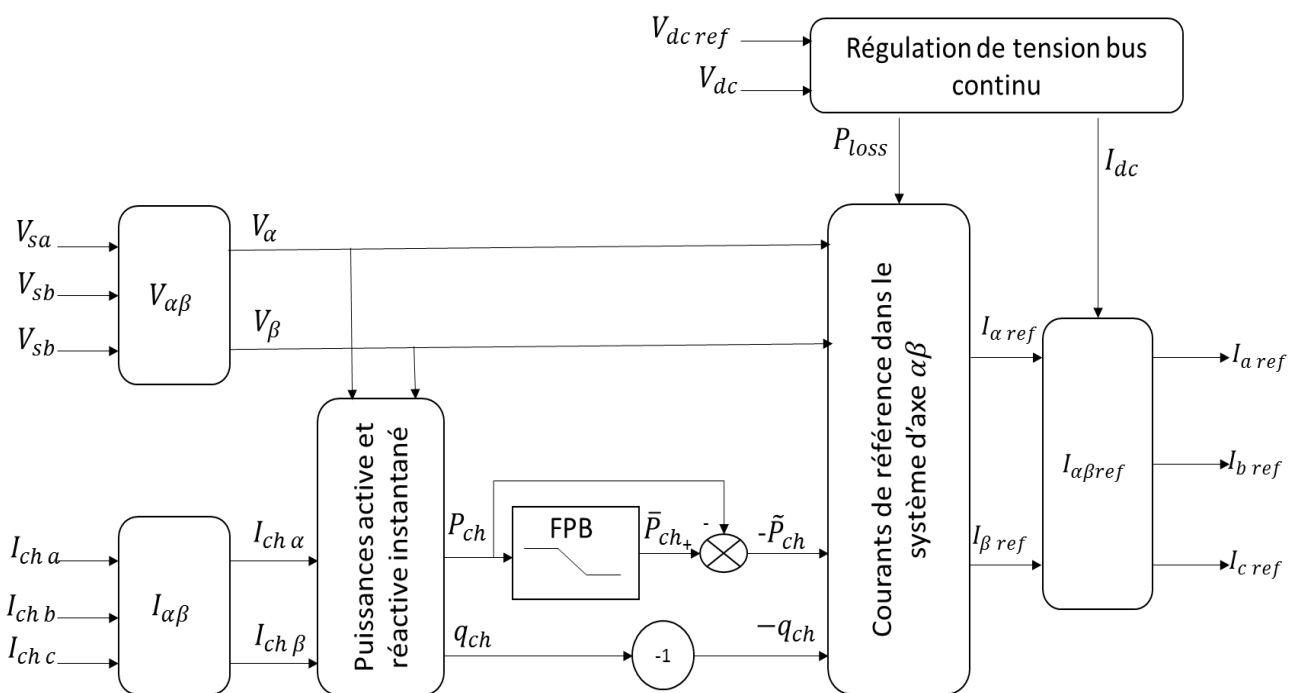


Figure II.7 : Algorithme d'identification par la méthode des puissances instantanée.

### II.4.4 Régulation de la tension continue

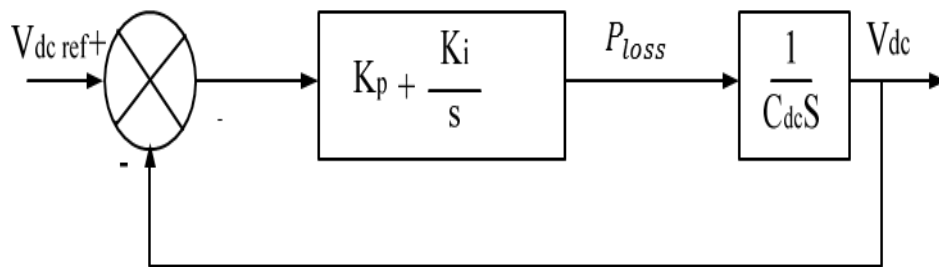
La tension aux bornes du bus continu doit être maintenue à une valeur supérieure de la tension maximale au PCC. L'onduleur de tension maintient cette tension en absorbant une puissance active du réseau afin de compenser ses propres pertes. Ainsi, le réglage de la tension continue est réalisé par un régulateur souvent de type PI qui génère une référence de puissance  $P_{loss}$  que l'onduleur doit absorber du réseau, en plus des courants harmoniques de référence.

Ce courant supplémentaire est calculer par

$$I_{loss} = K_p(V_{dc\ ref} - V_{dc}) + K_i \int (V_{dc\ ref} - V_{dc}) dt \quad (II.25)$$

Où  $K_p$  et  $K_i$  représentent les gains proportionnel et intégral du régulateur PI.

La boucle de régulation de la tension continue est donnée sur la Figure(II.8) (à insérer)



**Figure II.8 :** Boucle de régulation de la tension continue

Ainsi le calcul des paramètres  $K_p$  et  $K_i$  est réalisé à partir de la fonction de transfert en boucle fermée en fixant une fréquence de coupure (environ 20 Hz) et un amortissement optimale (0.7).

### II.4.5 Régulation de courant du filtre actif

En négligeant les résistances du filtre de sortie sur le courant de référence  $I_f$  (pour les harmoniques basses fréquences qui sont loin de la fréquence de commutation) [7], relation suivante caractérisant le courant du filtre actif  $I_f$ :

$$L_f \frac{d}{dt} I_f = V_f - V_S \quad (II.26)$$

avec  $L_f = L_{f1} + L_{f2}$

Notons par  $\Delta I_f$  la différence entre le courant de référence et le courant mesuré à partir de la relation suivante :

$$\Delta I_f = I_{ref} - I_f \quad (II.27)$$

Des équations (II.26) et (II.27), nous obtenons l'expression ci-dessous :

$$L_f \frac{d}{dt} \Delta I_f = \left( V_S + L_f \frac{d}{dt} I_{ref} \right) - V_f \quad (II.28)$$

Le premier terme de la partie droite de la relation (II.28) peut être défini comme tension de référence ( $V_{f-ref}$ ), ce qui nous donne l'expression suivante :

$$V_{f-ref} = V_S + L_f \frac{d}{dt} I_{ref} \quad (II.29)$$

L'écart entre  $V_{f-ref}$  et  $V_f$  produit alors une erreur sur le courant. Selon la relation (II.29), la tension de référence est composée de deux termes à fréquences différentes. Le premier représente la tension du réseau  $V_S$  directement mesurable. Le second est égal à la chute de tension aux bornes de l'inductance  $L_f$ ,

Lorsque celle-ci est traversée par un courant égal à celui de la référence. Ce terme doit être élaboré par un régulateur de courant, comme le montre la Fig. (II.9).

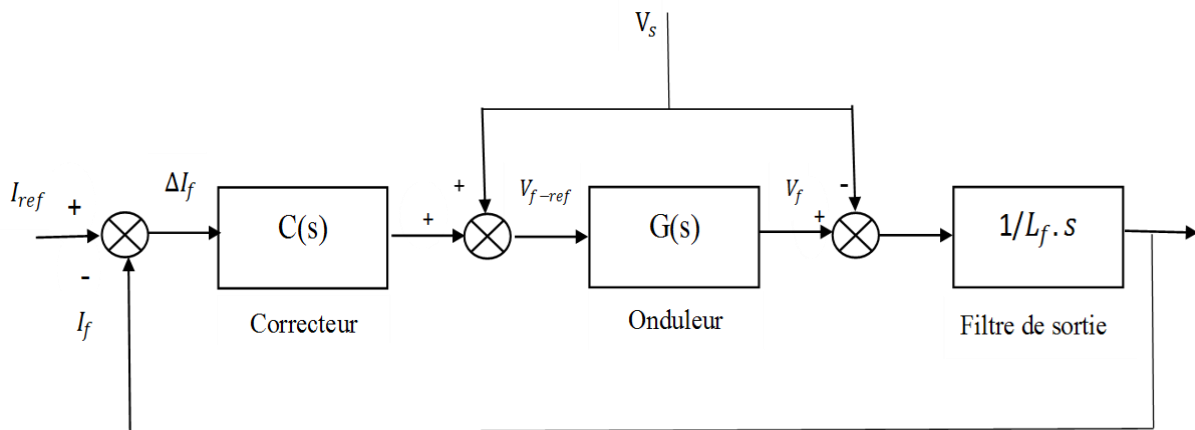


Figure II.9 : Schéma de la régulation des courants du F.A.P

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

$$\begin{cases} G(s) = K \frac{1}{1+\tau s} \\ K = \frac{V_{dc}}{2V_p} \end{cases} \quad (II.30)$$

Avec  $V_{dc}$  la tension côté continu de l'onduleur,  $V_p$  l'amplitude de la porteuse triangulaire et ( $\tau$ ) représentant le retard causé par le calcul des courants perturbateurs.

### II.5 La commande de l'onduleur

Les deux principales familles de commande des convertisseurs statiques sont :

- La commande par hystérésis,
- La commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI).

### II.5.1 Commande par hystérésis

La commande par hystérésis est une commande non linéaire qui utilise l'erreur existant entre le courant de référence et le courant injecté par l'onduleur, cette erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis. Dès que l'erreur atteint la bande inférieure ou supérieure, un ordre de commande est envoyé de manière à rester à l'intérieur de la bande. Cette technique de commande est utilisée pour sa simplicité de mise en œuvre et sa robustesse, mais elle présente cependant un inconvénient majeur : elle ne permet pas de contrôler la fréquence de commutation des semi-conducteurs, d'où la présence d'un nombre important d'harmoniques dans les courants générés [14].

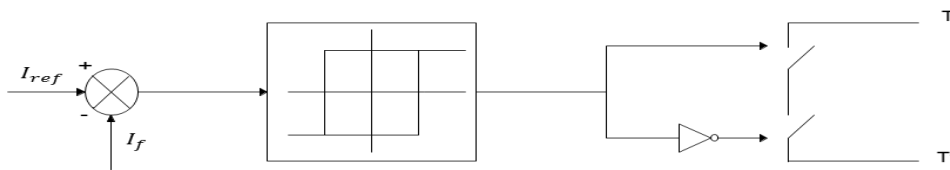


Figure II.10. Commande par hystérésis.

### II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la partie puissance du FAP dans laquelle plusieurs éléments sont présentés tels que : l'onduleur de tension, le circuit de stockage de l'énergie et le filtre de sortie. Nous avons également présenté dans la commande l'identification des courants harmoniques, la régulation de la tension continue et celle du courant du FAP. Nous avons enfin donné un bref aperçu sur les stratégies de commandes de l'onduleur : hystérésis. Dans le prochain chapitre résultats et simulation de filtre actif sur le réseau électrique

# CHAPITRE III

### III .1. Introduction

Après avoir étudié dans le chapitre précédent l'algorithme des courants harmoniques de références et les stratégies de commande du filtre actif, nous allons présenter dans ce chapitre, la simulation sous Matlab/Simulink/SimPowerSystemes, le schéma global de notre étude basée sur la méthode des puissances instantanées et commande par hystérésis, dans le but d'assurer la compensation des courants harmoniques.

### III.2. Simulation sous Matlab Simulink

Dans cette partie, nous présenterons les résultats de simulation obtenus par la méthode d'identification des courants de référence précédemment étudiées, à partir de la théorie p.q.

Le système simulé comporte un réseau électrique triphasé à trois fils, une charge non Linéaire triphasé (Pont redresseur triphasé PD3 alimentant une charge RL) et un filtre actif parallèle triphasé à structure tension.

### III.3 Paramètres de simulation

L'ensemble des paramètres de simulation sont rassemblés dans le tableau suivant :

<b>Réseau électrique</b>
$V_s = 380 \text{ V}$ , $f = 50 \text{ Hz}$ , $L_s = 0.5 \text{ mH}$
<b>Charge polluante</b>
$R_{ch} = 10 \Omega$ , $L_{ch} = 1 \text{ mH}$
<b>Filtre actif parallèle</b>
$V_{dc} = 600 \text{ V}$ , $C = 1500 \mu\text{F}$ , $L_f = 2 \text{ mH}$
<b>Commande hystérésis</b>
$\Delta I = \pm 1 \text{ mA}$

**Tableau III.1** Paramètres de simulation.

III.4 Résultats de simulation

III.4.1 Modèle d'un réseau électrique -charge non linéaire avant le filtrage

Dans une première partie, nous avons modélisé puis simulé le réseau électrique triphasé à trois fils, et sa charge non linéaire, sans connecter le filtre actif présenté par la figure III.1

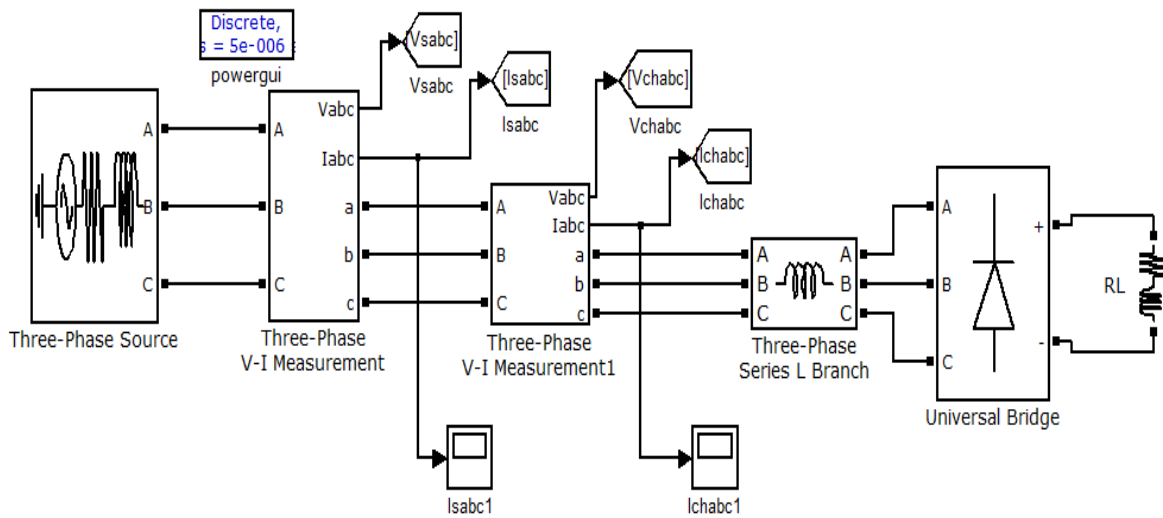


Figure III.1 : Schéma de simulation d'une charge non linéaire connecter au réseau.

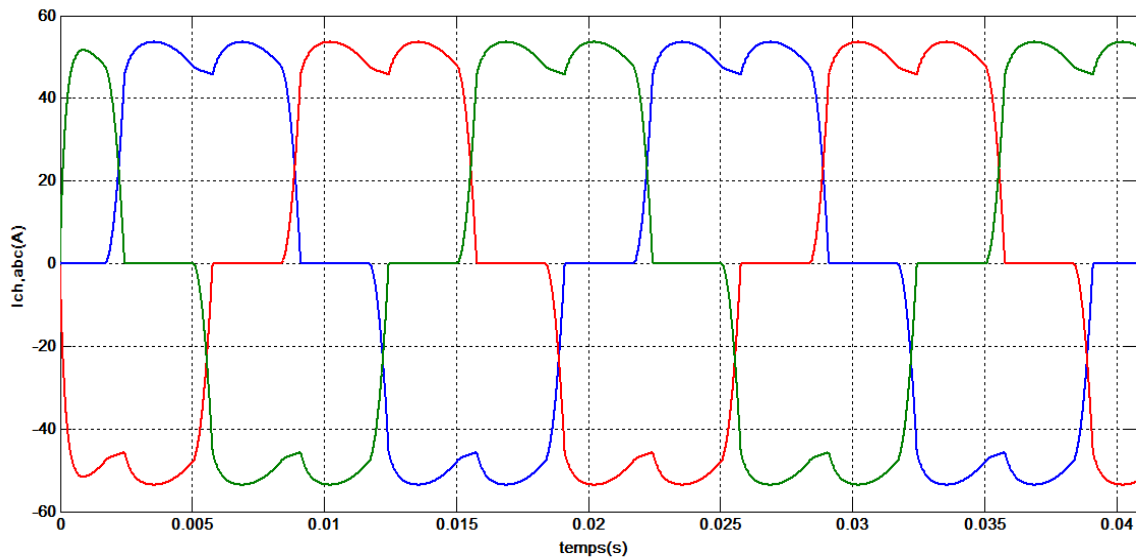
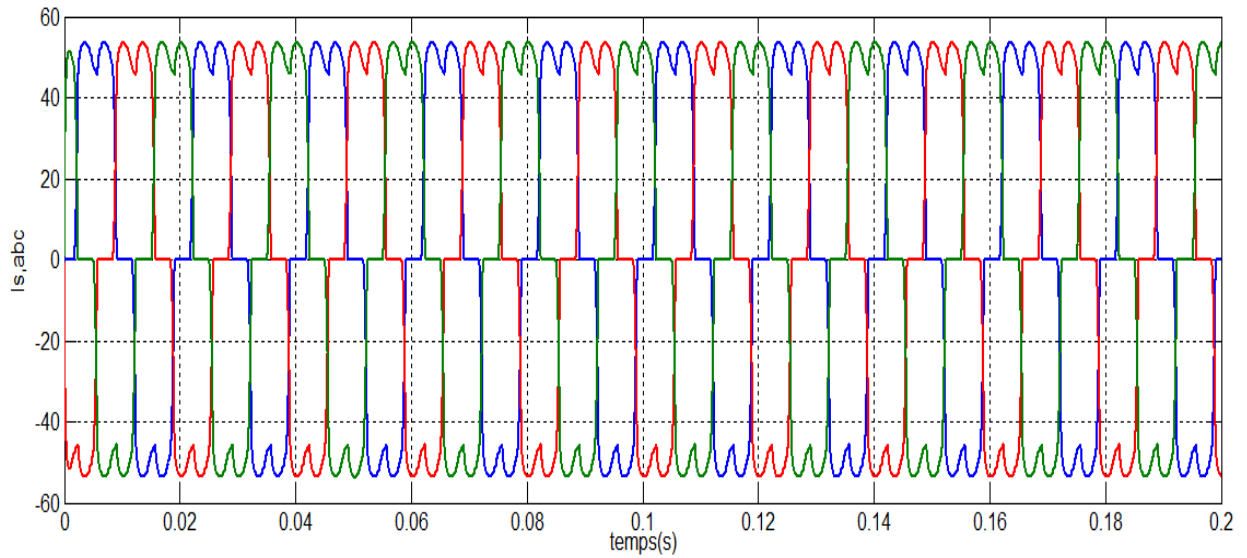
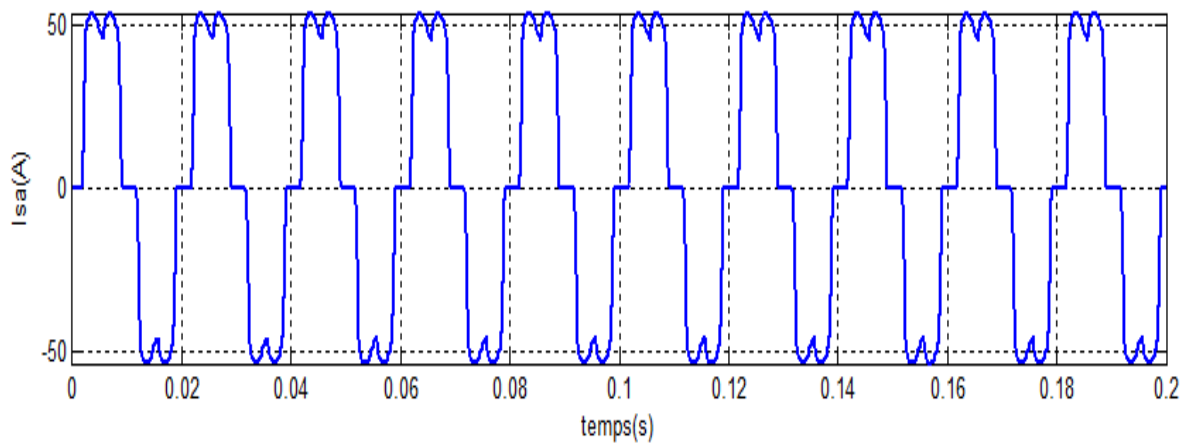


Figure III.2 : Courant de la charge triphasé avant filtrage.

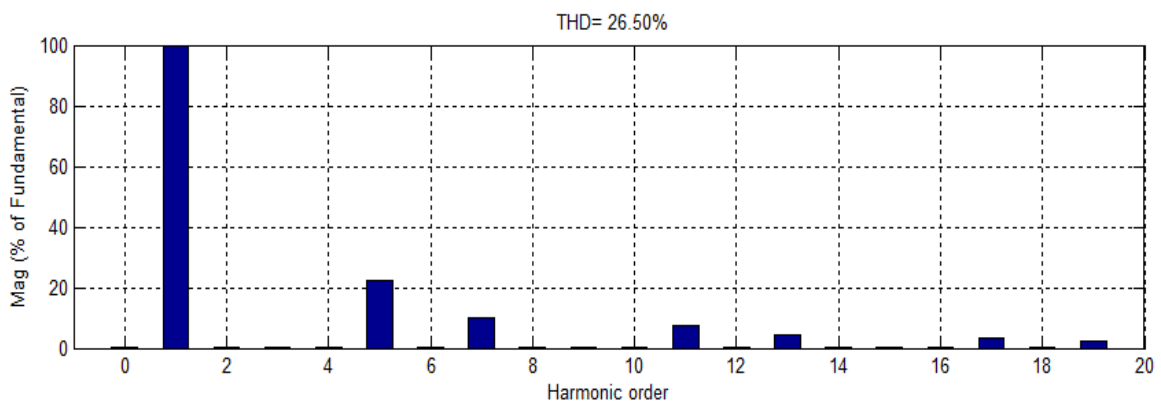


**Figure III.3 :** Courant de source triphasé avant filtrage.

La figure III.3 montre les courants de source avant le filtrage, ces courants sont déformés à cause des courants harmoniques générés par le redresseur.



**Figure III.4 :** Courant de source pour la phase a.



**Figure III.5 :** Spectre d'harmonique du courant de source avant le filtrage.



La figure III.5 représente le taux de distorsion du courant de source avant le filtrage, ce taux a été mesuré sur une période. On remarque que le courant de la source est très riche en harmoniques du rang impaires d'ordre 5, 7, 11, 13..., avec un THD égale à 26.50%. Si nous comparons ce THD avec celui imposé par la norme (CEI 621000-3-2), nous remarquons qu'il est très supérieur. Il est donc nécessaire d'insérer un filtre actif pour améliorer la qualité des courants.

### III.4.2 Modèle d'un filtre actif réseau-charge non linéaire avec le filtrage

Dans la deuxième partie, nous avons modélisé puis simulé le réseau électrique triphasé à trois fils, et sa charge non linéaire, avec la connexion du filtre actif parallèle au réseau présenté par la figure III.6.

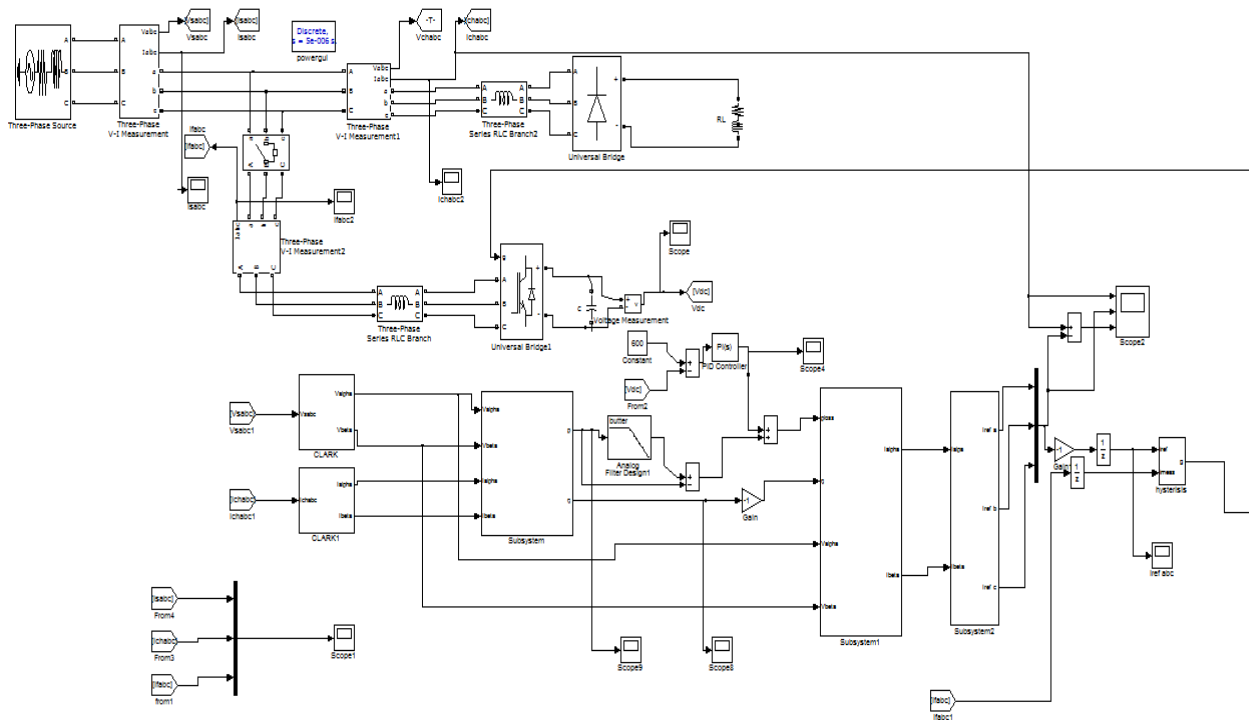


Figure III.6 : Schéma de simulation d'un filtre actif parallèle de puissance.

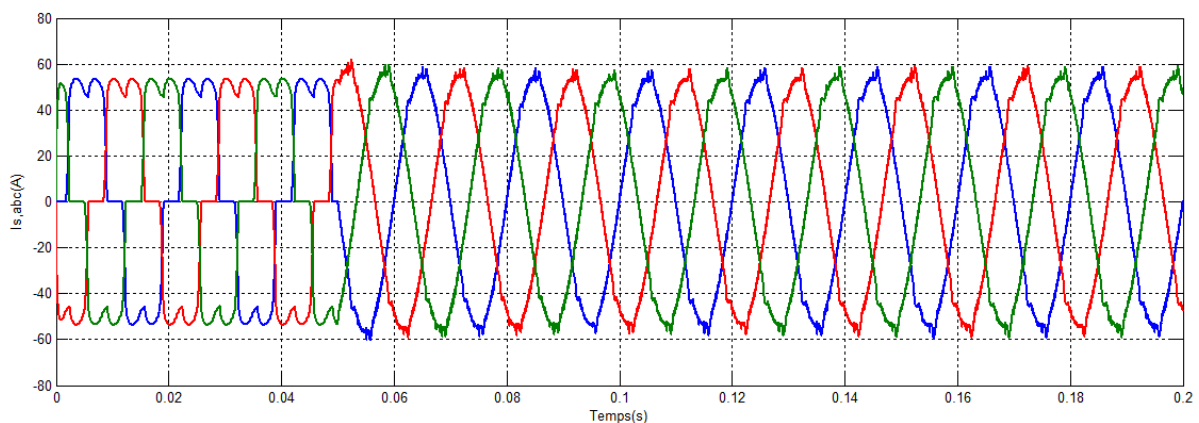
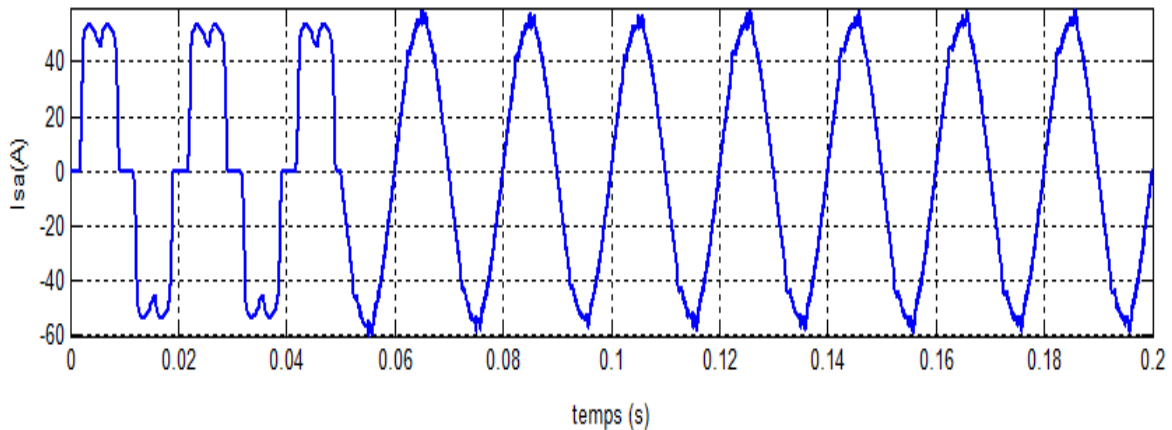
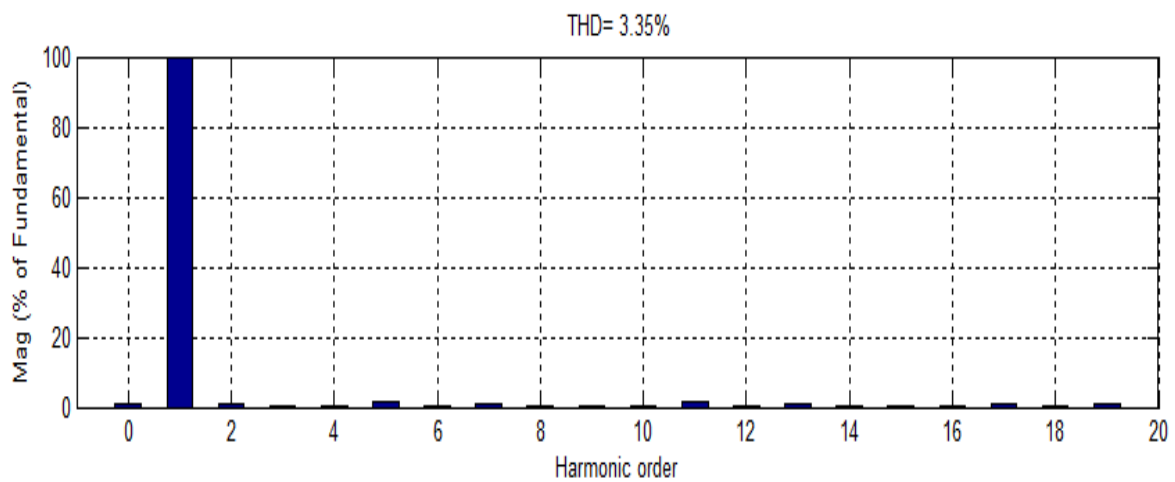


Figure III.7 : Courant de source triphasé après le filtrage à  $t = 0.05s$ .

La figure III.7 à  $t=0.05s$  on remarque que les harmoniques du courant sont éliminées et la forme d'onde du courant de source est proche de la sinusoïde.

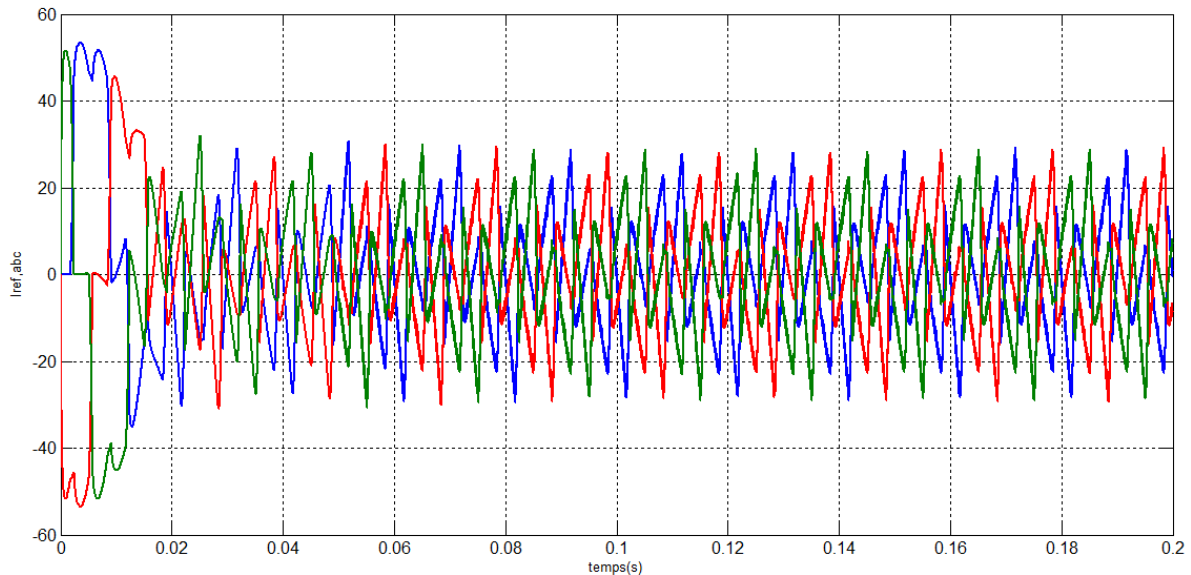


**Figure III.8 :** Courant de source phase a (à  $t=0.05$  après filtrage).

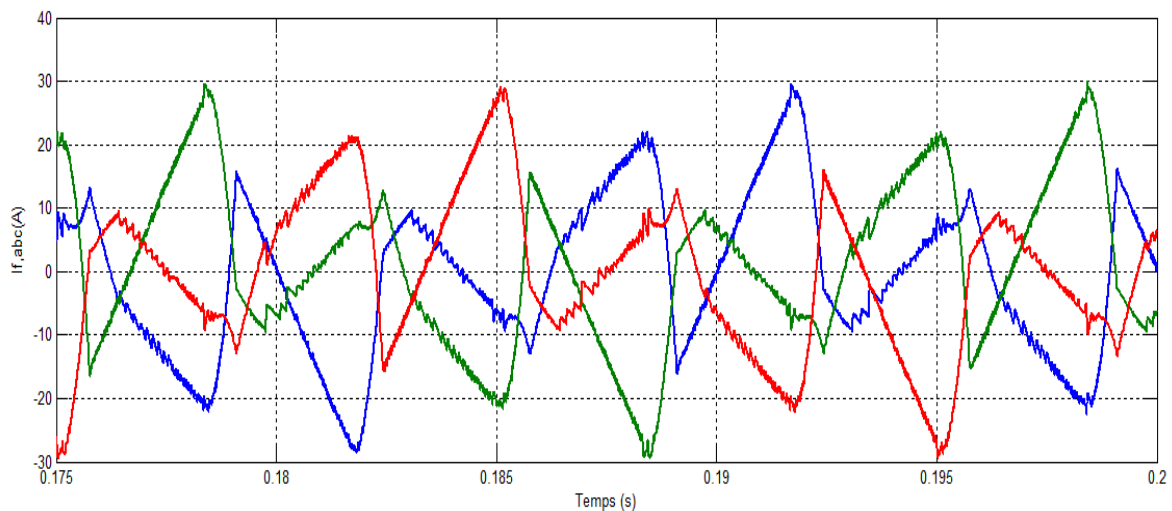


**Figure III.9 :** Spectre harmonique du courant de source après le filtrage.

La figure III.9 représente le spectre harmonique du courant de source après le filtrage, on remarque que le THD est amélioré de 26.50% à 3.35%. Cela montre l'efficacité du FAP.



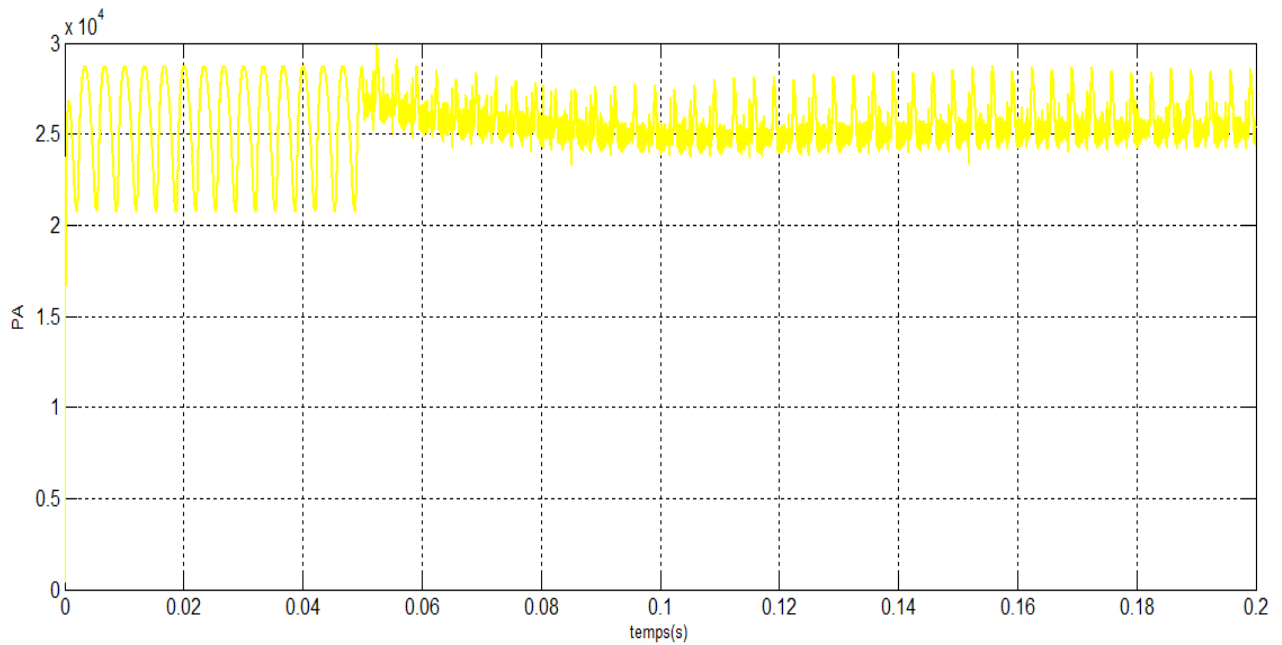
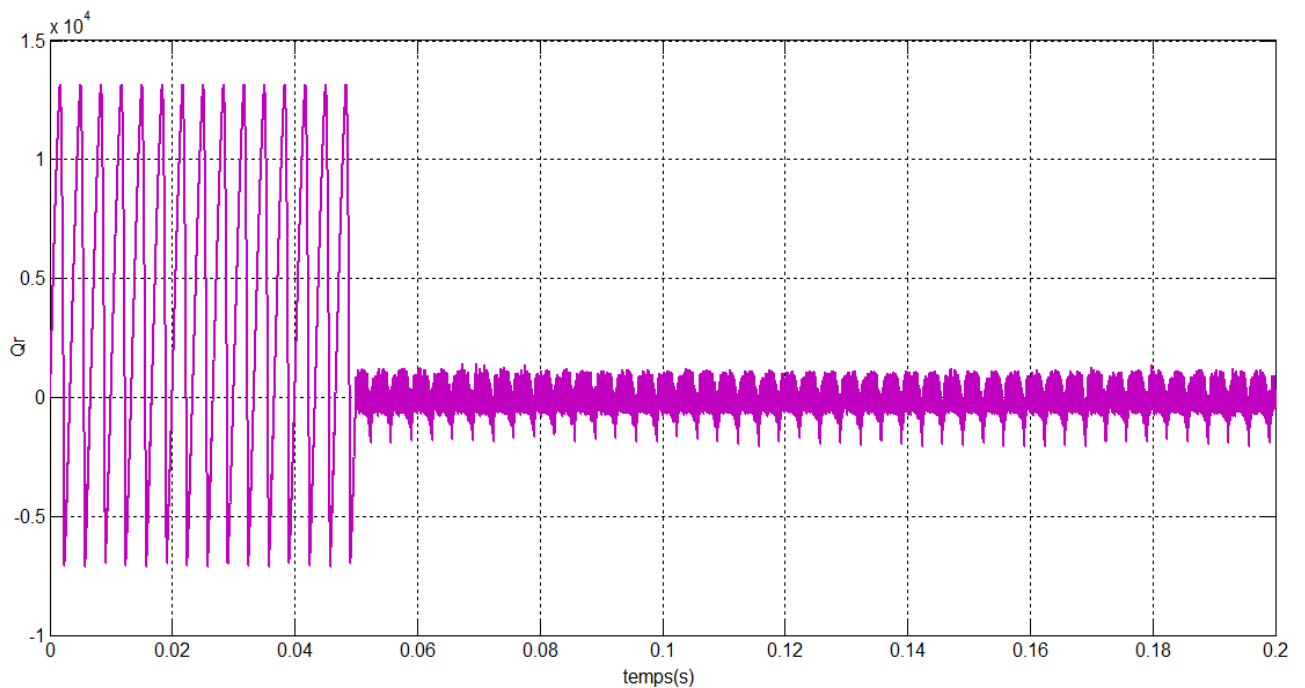
**Figure III.10 :** Courant de référence triphasé.



**Figure III.11 :** Courant injectés par le filtre triphasé.

On remarque que les courants injectés par le filtre figure(III.11) suivent parfaitement les courants de référence figure(III.10).

Une fois le filtre actif mis en service, il commence à injecter les courants  $I_f, abc$  dans le réseau figure(III.11), ce qui permet au courant de source devient pratiquement sinusoidale figure (III.7) à  $t=0.05s$ , et permet de réduit considérablement le contenu harmonique de courant source.

**Figure III.12 : Puissance actif.****Figure III.13 : Puissance réactive.**

Les figures (III.12) et (III.13) illustrent les résultats de simulation concernant les puissances instantanées active  $P(w)$  et réactive  $Q(var)$ , nous pouvons constater que dès que le FAP est mis en service, il compense l'énergie réactive qui a été consommée par la charge non linéaire, ce qui n'est pas le cas avant la connexion du filtre actif en parallèle avec le système.

**III.5 Conclusion**

Dans ce travail, le filtre actif à base d'un onduleur de tension, est étudié avec différentes stratégies de détection des harmoniques basées respectivement sur la méthode des puissances instantanées ( $pq$ ), la théorie proposée. Cette dernière donne directement la forme d'onde harmonique à compenser et ont une réponse adéquate pour le traçage des harmoniques variant dans le temps. Les résultats de simulations obtenus sur l'interface Simulink du logiciel Matlab, confirment l'efficacité de la méthode proposée. En outre, la stratégie de contrôle proposée est très simple et robuste.

# CONCLUSION GENERALE

### **Conclusion général :**

Le travail présenté dans ce mémoire à pour objectif d'étudier la solution de dépollution harmonique sur le réseau électrique qui est le filtre actif parallèle à base d'un onduleur de tension, cette pollution causée par la charge non linéaire.

Dans le premier chapitre, nous vous présenté la pollution harmonique dans le réseau électriques, nous avons donné la définition harmonique et leurs origines et leur effets instantanée et à terme, ainsi que les différentes méthodes de dépollution proposées (filtre passif et filtre actif).

Nous avons consacré le deuxième chapitre à l'étude du filtre actif parallèle, pour se faire nous avons considéré en deux parties : la partie puissance dans laquelle nous avons présenté les déferent organes qui constituent le filtre actif parallèle (onduleur de tension ,circuit de stockage d'énergie, les filtres de sortie), et la partie commande qui consiste d'abord en l'identification des courants harmoniques et le réglage de la tension de bus continu et la régulation de courant harmonique injecté par l'onduleur de tension , et la stratégie de commande de l'onduleur par hystérésis.

Dans le troisième chapitre nous avons simulée de l'ensemble réseau, filtre actif et charge non linéaire sous l'environnement Mtlab/Simulink/SimPowerSystems a été effectué. Les résultats obtenus montre que les courants injectés par le FAP suivent parfaitement les courants de références et le taux de distorsion harmonique pour le courant de source est réduit de 26.50% à 3.35%, cela montre l'efficacité du FAP dans la compensation des courants harmoniques.

En perspective, il serait intéressant de reprendre le travail en vue de son amélioration par l'emploi d'autres techniques avancées d'identification des courants harmoniques et de la commande du filtre.

# BIBLIOGRAPHIE



## BIBLIOGRAPHIE

---

### BIBLIOGRAPHIE

- [1] N. BRYANT, Etude et commande généralisées de filtres actifs parallèles : Compensation globale ou sélective des harmoniques : Régime équilibré ou déséquilibré. Thèse de Doctorat, Université de Nantes, 1999.
- [2] MOHAMED MUFTAH ABDUSALAM, Structure et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validation expérimental , thèse de doctorant , université Henri Poincar, Nancy-I, soutenance le29/05/2008.
- [3] Steeve Beaulieu, "Etude et mise au point d'un filtre actif d'harmonique en vue d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique," Mémoire de Fin d'Etudes, Université Québec à Chicoutimi, Mai 2007.
- [4] MERABTI IBRAHIM, Modélisation et simulation des filtres actifs séries, mémoire de fin d'étude présente en vue de l'obtention du diplôme de master en génie électrique, université l'arbi ben M'Hidi OUM el bouaghi Algérie' 'juin 2015.
- [5] CHAOUI Abdelmadjid « Filtrage actif triphasé pour charges non linéaires », thèse de doctorat, université de Sétif, 2010.
- [6] M.MAGRAOUI ,« Validation de techniques de commande d'un filtre actif parallèle », mémoire comme exigence partielle à l'obtention de la maîtrise en génie électrique, université du Québec, 17/09/2007.
- [7] M.A.ALALI, « Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension », thèse de doctorat en Automatisation des systèmes de puissance électriques, université de Louis Pasteur – Strasbourg I, 12 Septembre 2002.
- [8] D.OULD ABDESLAM,« Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension », thèse de doctorat en Electronique, Electrotechnique et Automatique, université de Haute-Alsace, 08 décembre 2005.
- [9] N.BELHAOUCHET « Fonctionnement à fréquence de commutation constante des convertisseurs de puissance en utilisant des techniques de commande avancées, Application : Amélioration de la qualité de l'énergie », thèse de doctorat en science, option : machines électrique et leurs commandes, université Ferhat Abbas-Sétif, 06/07/2011.
- [10] S.CHENNAI, « Etude, modélisation et commande des filtres actifs : apport des techniques de l'intelligence artificielle », thèse de doctorat en électrotechnique, université Mohamed Khider—Biskra, 19/09/2013.
- [11] J. Xu, Filtrage actif parallèle des harmoniques des réseaux de distribution d'électricité. Thèse de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy 20 Janvier 1994.

## BIBLIOGRAPHIE

---

[12] C. Lott, Filtrage actif parallèle des harmoniques de courant sur des réseaux industriels : étude théorique et réalisation d'une maquette à GTO. Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy 17 Octobre 1995.

[13] Mohamad .A.E. Alali, Optimisation des performances de filtres actifs parallèles-séries à partir des correcteurs avancés. JCGE'01, Belfort/Nancy, pp. 215-222, 2001.IEEE Trans. On power delivery, vol. 12, No. 1, pp. 354-363, 1997.

[14] N.BELHAOUCHET,« Fonctionnement à fréquence de commutation constante des convertisseurs de puissance en utilisant des techniques de commande avancées, Application : Amélioration de la qualité de l'énergie », thèse de doctorat en science, option : machines électrique et leurs commandes, université Ferhat Abbas-Sétif, 06/07/2011.