

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERSCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE SCIENCES ET TECHNOLOGIES
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE
N° : ER-05



DOMAINE :SCIENCES ET TECHNOLOGIE
FILIERE : ENERGIE RENOUEVELABLE
OPTION : ENERGIE RENOUEVELABLE EN
ELECTROTECHNIQUE

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par:

Manel TERK

Imane SAADAALLAH

Intitulé

**Compensation des harmoniques dans un réseau électrique
public basse tension sous l'environnement Matlab /Simulink**

Soutenu devant le jury composé de:

Mr. El Hadi BELHITECHE	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Président
Dr. Hani BENGUESMIA	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Rapporteur
Mr. Fayssal OUAGUENI	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Co-Rapporteur
Dr. Riyadh ROUABHI	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Examineur

Année universitaire : 2019/ 2020

Dédicace

Je dédie ce travail aux êtres les plus chers à mon cœur,

Ma mère

Mon père

Pour tous les sacrifices et leur Soutien moral

Et matériel dont ils ont fait

Preuve pour que je réussisse.

Je le dédie également à :

Ma grand-mère

Tous Mes Frères

Ma famille qui n'a cessé de me soutenir pendant tout mon parcours.

*Pour finir j'adresse mes remerciements à mes très chers amis qui
sont devenus des frères et sœurs pour moi manal, Salssabil,*

Zouzou, Houđa, Zina, Assia, Youssra, Meryam

Et Tous Mes Amis promotion 2020

REMERCIEMENTS

En préambule à ce mémoire nous remerciant ALLAH qui nous aide et nous donne la patience et le courage durant ces longues années d'étude.

Nos remerciements les plus vifs et chaleureux, Dr. H. Benguesmia, Enseignant à l'université de M'sila, pour son aide, son orientation et sa disponibilité, aussi pour la confiance, la patience et la compréhension qu'il nous a toujours manifesté.

J'adresse ma reconnaissance, ma gratitude à M^{lle} H. Salem pour l'orientation et pour leurs conseils, leur aide, leur qualité humaine.

Nos sincères et chaleureux remerciements à Mr.I.Chouidira pour son aide, son appuis moral, et ses qualités humaines.

Je voudrais remercier les membres des jurys pour l'effort qu'ils feront dans le but d'examiner ce modeste travail.

Sans oublier tous les professeurs qui nous ont enseigné et qui par leurs compétences nous ont soutenu dans la poursuite de nos études.

Je remercie enfin tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué à la réussite de ce travail et qui n'ont pas pu être cités ici.

MERCI

ملخص:

يهدف هذا العمل الى دراسة إزالة التلوث من الشبكة الكهربائية عن طريق تعويض اضطراب التيار التوافقي وتحسين جودة التيار بناءً على مصفى الفعال ذو الأربعة أذرع. تُظهر نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها في باستعمال برنامج MATLAB/Simulink أهمية هذا العمل في الترشيح التوافقي وتعويض الاستطاعة الرجعية وإظهار أنه يعتبر حلاً حديثاً لازالة التلوثات التوافقية في الشبكة الكهربائية الناتجة عن الأحمال غير الخطية وتقديم نتائج جد جيدة لـ THD لتيار المنبع.

الكلمات المفتاحية: مصفى الفعال ذو الأربعة أذرع، تعويض، THD ، الأحمال غير الخطية.

Résumé

Le travail présenté dans ce mémoire, consiste à l'étude des perturbations harmoniques et la dépollution du réseau électrique et l'amélioration de la qualité du courant à base de filtre actif parallèle à quatre bras pour la compensation des perturbations en courants harmoniques.

Les résultats de simulation effectuées sous l'environnement Matlab/Simulink témoignent de l'importance de ce travail au filtrage des harmoniques et à la compensation de l'énergie réactive et montrée qu'il est considéré comme une solution moderne pour compenser les perturbations dans le réseau électrique causées par des charges non linéaires et offrant des bons résultats du THD du courant coté source.

Mots clés : Filtre actif parallèle a quatre bras, compensation, THD, charge non-linéaire.

Abstract

The present work consists of the study of the depollution of the electrical network by the compensation of harmonic current perturbation and improvement of current quality based on four-arm parallel active filter.

The simulations results obtained in Matlab/simulation environment demonstrate the importance of this work is harmonic filtering and reactive power compensation and show that is considered as a modern solution to compensate perturbation in the grid utility caused by nonlinear loads and offering good results for the THD of the current on the source side.

Key words: Four-arm parallel active filter, compensation, nonlinear loads.

"Sommaire"

Sommaire

Sommaire	i
Liste des figures & tableaux	iii
Introduction Générale	1

Chapitre I : Etat de L'art "Dépollution Dans les Réseaux Électriques et Leurs Remèdes"

I.1. Introduction	3
I.2 Qualité d'énergie électrique	3
I.3 Origine des harmoniques	3
I.4 Caractérisation des perturbations harmoniques	4
I.5 Normes imposées sur le THD	5
I.5.1 THD en courant ou en tension	5
I.5.2 Relation entre facteur de puissance (FP) et THD	6
I.5.3 Intérêt du THD	6
I.6 Solution de dépollution du courant dans les réseaux électrique	7
I.6.1 Solution traditionnelle	7
I.6.1.1 Compensation de l'énergie réactive	7
I.6.1.2 Principe de la compensation	8
a. Compensation shunt	8
b. Compensation série	9
c. Comparaison entre la compensation série et la compensation shunt	10
d. Compensation par déphasage	11
e. Avantages dus a l'amélioration du facteur de puissance	12
I.6.2 Solution moderne	12
I.6.2.1 Filtre actif	13
a. Filtre actif parallèle (FAP)	13
b. Filtre série (FAS)	15
I.6.2.2 Filtre hybride	16
I.7 Applications des filtres actifs parallèles	16
I.8 conclusion	17

Chapitre II : "Commande D'un Filtre Actif Parallèle à Quatre Bras"

II.1 Introduction	18
II.2 Constituants d'un filtre actif parallèle à quatre bras	18
II.3 Étude de la partie de la puissance	19
II.3.1 Description d'un onduleur triphasé à quatre bras	20
II.3.2 Filtre de couplage (Filtre de sortie)	21
II.3.3 Système de stockage d'énergie	21
II.4 Présentation du système	23

II.4.1 Type de la source d'alimentation	23
II.4.2 Type de la charge	25
II.5 Étude de la partie commande	27
II.5.1 Identification des courants polluant	27
I.5.2 Identification par la méthode des puissances instantanées classique avec un Filtre Passe Bas (FPB)	28
II.5.3 Régulation de la tension du bus continue	33
II.5.4 Contrôle de l'onduleur par hystérésis	34
II.6 Conclusion	35

Chapitre III : "Résultats de Simulations"

III.1 Introduction	36
III.2 Simulation de l'ensemble de réseau (filtre actif parallèle et la charge non linéaire)	36
III.3 Résultats des simulations (Simulation de l'ensemble source-charges non linéaires)	37
III.3.1 Cas de charges identiques	37
III.3.2 Cas de charges non-identiques	42
III.3.3 Etude de courant de neutre	44
III.3.4 Etude comparative (charge identique et non-identique)	46
III.4 Conclusion	46
Conclusion Generale	48
Références bibliographiques	50

"Liste des Figures & Tableaux"

Liste des Figures & Tableaux

N°	Figures	Page
<u>Chapitre I</u>: Etat de L'art "Dépollution Dans les Réseaux Électriques et Leurs Remèdes"		
Figure I.1	Fondamentale et harmoniques dans un signal distordu	1
Figure I.2	Déférentes solutions utilisées dans le filtrage du courant	2
Figure I.3	Principe de compensation	5
Figure I.3	Schéma de compensation shunt	5
Figure I.4	Courbe de puissance avec et sans compensation shunt	6
Figure I.5	Schéma de Compensation série	7
Figure I.6	Courbe de puissance avec et sans compensation série	7
Figure I.7	Schéma de compensation par déphasage	8
Figure I.8	Courbe de puissance avec compensation par déphasage. $\alpha=30^\circ$	8
Figure I.9	Déférentes solutions moderne dans le filtrage du courant	10
Figure I.10	Principe de compensation harmonique par un filtre actif parallèle	10
Figure I.11	Configuration du filtre actif parallèle (FAP) à trois bras	11
Figure I.12	Déférentes topologies utilisées dans un FAP d'un réseau triphasé à quatre fils	12
Figure I.13	Principe de filtre actif série (FAS)	13
Figure I.14	Structure du filtre actif hybride (série, parallèle)	13
<u>Chapitre II</u>: "Commande D'un Filtre Actif Parallèle à Quatre Bras"		
Figure II.1	Principe du FAP à quatre bras connecté au réseau	19
Figure II.2	Filtre actif parallèle à quatre bras pour un réseau triphasé à quatre Fils	20
Figure II.3	Type de la source d'alimentation	23
Figure II.4	Source de tension $V_{s_{1,2,3}}(t)$.	23
Figure II.5	Tension d'alimentation $V_{s_1}(t)$ et courant de source $I_{s_1}(t)$.	24
Figure II.6	Courant de source de la phase 1. $I_{s_1}(t)$ et FFT du courant de source de la première phase.(Avant filtrage)	24
Figure II.7	Courants de source de la phase 2 et 3. $I_{s_2}(t)$ et $I_{s_3}(t)$ (Avant filtrage)	24
Figure II.8	Courant de neutre $I_n(t)$, (Avant filtrage)	25
Figure II.9	Type de la charge	26

Figure II.10	Tension de source $V_{s1}(t)$, et la tension redressé $V_{ch}(t)$ de la première phase 1 (Avant filtrage)	26
Figure II.11	Tension de source $V_{s1,2,3}(t)$, et la tension redressé $V_{ch}(t)$ de la première phase . (Avant filtrage)	26
Figure II.12	Courant de charge $I_{ch}(t)$ et tension redressé $V_{ch}(t)$ de la première phase 1. (Avant filtrage)	27
Figure II.13	Tension au borne de la diode $V_{d1}(t)$ de la première phase 1. (Avant filtrage)	27
Figure II.14	Filtres d'extraction.	31
Figure II.15	Schéma de principe de la méthode des puissances instantanées avec FPB	31
Figure II.16	Courant harmonique $I_{h1}(t)$ et son spectre de la première phase 1	32
Figure II.17	Courant harmonique de trois phase $I_{h1,2,3}(t)$	32
Figure II.18	Spectre des courants de source $I_{s1}(t)$ et d'harmonique identifié $I_{h1}(t)$. (Avant le filtrage)	32
Figure II.19	Boucle de régulation de la tension continue	33
Figure II.20	Principe de la commande par hystérésis d'un onduleur à quatre bras.	34

Chapitre III: "Résultats de Simulations"

Figure III.1	Schéma synoptique de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle triphasé et charge polluante	36
Figure III.2	Tension de la source V_{s1} et FFT du tension de source de la première phase 1.(Avant filtrage)	37
Figure III.3	Courants de la source $I_{s1,2,3}$ et FFT du courant de source de la première phase 1.(Avant filtrage)	38
Figure III.4	Courant du neutre I_n .(Avant filtrage)	38
Figure III.5	Courants de la charge $I_{c1,2,3}$ (Après filtrage)	39
Figure III.6	Courant de la source I_{s1} et son spectre. (Après filtrage)	39
Figure III.7	Courants de la source $I_{s1,2,3}$ et son spectres d'harmoniques des courants de source des trois phase 1,2,3. (Après filtrage)	39
Figure III.8	Courants de la source I_s avant et après le filtrage et ses spectres d'harmoniques des courants de source de la première phase 1.	40
Figure III.9	Courants du neutre I_n avant et après le filtrage	40
Figure III.10	Courants du filtre I_{f1} de la première phase et les courants de filtre des	41

	trois phases $I_{f1,2,3}$ injectées dans le réseaux	
Figure III.11	Tension aux bornes du condensateur	41
Figure III.12	Courants de la charge $I_{c1,2,3}$ (Après filtrage)	42
Figure III.13	Courants de la charge $I_{s1,2,3}$ (Après filtrage)	42
Figure III.14	Courants $I_{f1,2,3}$ injectés dans le réseau.	43
Figure III.15	Courants du neutre avant et après le filtrage	43
Figure III.16	Spectres d'harmonique après et avant le filtrage (3 phases respectivement $I_{s1,2,3}$)	43
Figure III.17	Tension aux bornes du condensateur	44
Figure III.18	Courant dans le neutre I_n et son spectre d'harmonique (avant filtrage)	45
Figure III.19	Courant du neutre I_n après le filtrage	45
Figure III.20	Courant du neutre I_{fn} injecté par le filtre et son spectre d'harmonique	45

N°	Tableaux	Page
----	-----------------	-------------

Chapitre I : Etat de L'art "Dépollution Dans les Réseaux Électriques et Leurs Remèdes"

Tableau I.1	Limites des courants harmoniques pour les luminaires d'après la norme NF EN61000-3-2	6
--------------------	--	----------

Chapitre II : "Commande D'un Filtre Actif Parallèle à Quatre Bras"

Tableau II.1	Tensions générées par l'onduleur de tension à quatre bras	21
---------------------	---	-----------

Chapitre III : "Résultats de Simulations"

Tableau III.1	Valeurs des éléments caractérisant la structure étudiée	37
Tableau III.2	THD de la technique appliquée au système identique et non-identique	46

"Introduction Générale"

Introduction Générale

Dans nos jours, l'amélioration de la qualité de l'énergie est devenue un sujet de recherche majeur dans le système de distribution électrique moderne.[1]

La pollution harmonique est l'une des préoccupations principales des spécialistes dans le domaine du génie électrique depuis 1970.

Ces dernières années, l'utilisation des convertisseurs statiques dans les installations de conversion d'énergie électrique a considérablement contribué aux progrès réalisés aux niveaux des performances et de l'efficacité de ces systèmes.[2]

Due à un nombre croissant de charges non linéaires présentes dans les lignes électriques (tels que les convertisseurs, les ordinateurs personnels, les appareils à tubes fluorescents, etc...). La problématique relevée de la pollution harmonique dans les réseaux électriques de distribution devient de plus en plus préoccupante avec l'accroissement de l'usage des charges non-linéaires. Tous ces appareils possèdent la particularité d'absorber des courants non sinusoïdaux et donc d'introduire dans les lignes électriques des pollutions harmoniques en courant.[3]

Plusieurs solutions ont été proposées pour résoudre le problème de la pollution harmonique dans les réseaux électriques de distribution.

Ces dernières peuvent être classées en deux différentes approches: des solutions ont traditionnelles et modernes de dépollution été traitées.

Donc nous allons essayer de répondre à ces deux questions suivant :

- ✚ Quel est l'intérêt d'un bon facteur de puissance ?
- ✚ Quel est l'intérêt d'un bon facteur THD ?

Afin d'y remédier aux inconvénients des méthodes traditionnelles, une autre solution consiste à mettre en œuvre un système de filtres actifs de puissance. Les filtres actifs (les filtres actifs parallèles (FAP), séries(FAS), et hybrides) sont un moyen efficace pour la compensation des harmoniques de courants ou de tensions générés par des charges non linéaires. Ils compensent, en temps réel, les perturbations dues à une charge non linéaire en injectant sur le réseau les harmoniques et le réactif du courant consommé par la charge afin que le réseau n'est plus qu'à fournir un courant sinusoïdal et en phase avec la tension.

Leur objectif principal est consiste à compenser les harmoniques (diminution du taux de distorsion totale du courant de source THD) produits dans le réseau public et parfois consommée par les charges non-linéaires et l'amélioration du facteur de puissance.

Parmi les solutions qui garantir une meilleure qualité de l'énergie, le filtrage actif de puissance a été choisi comme solution de dépollution harmonique, et en particulier le filtrage actif de puissance parallèle (FAP).

Dans ce contexte, l'objectif de notre travail sera compensation des harmoniques dans un réseau électrique public basse tension par un FAP à quatre bras connecté à un réseau électrique à quatre fils à structure tension destiné à compenser les courants harmoniques générés par un redresseur à diode sous l'environnement Matlab / Simulink.

Pour ce faire, on a réparti le manuscrit en trois chapitres:

Le premier chapitre contiendra un état de l'art et une révision de la littérature de la dépollution dans les réseaux électriques et leurs remèdes. Par ailleurs, les solutions traditionnelles (compensation) et modernes (filtrage actif) qui sont utilisées pour pallier aux problèmes liés aux perturbations harmoniques sont étudiés. Les résultats de programmation obtenus à l'aide Matlab sont présentés.

Au second chapitre, sera étudiée la topologie de FAP a quatre bras à structure tension et sa stratégie de commande et contrôle générale, par laquelle a été divisé en deux parties qui sont partie de puissance et la partie de commande-contrôle, la partie de puissance est représenter par l'onduleur de tension, système stockage l'énergie et filtre de sortie, et la deuxième partie qui est commande –contrôle représenté par la commande d'onduleur et l'identification des courants perturbés. Quelques résultats de simulation à l'aide Matlab/Simulink sont présentés.

Enfin, au dernier chapitre, on proposera la simulation de l'ensemble réseau, charge non linéaire, filtre actif parallèle (FAP) à quatre fils obtenus pour la commande par hystérésis que ce soit en mode charge identique et non-identique sous l'environnement Matlab/Simulink. Les résultats obtenus sont présentés et commentés.

Ce mémoire sera clôturé par une conclusion générale et les perspectives envisagées pour un futur travail.

Chapitre I
Etat de L'art
"Dépollution Dans les Réseaux Électriques et Leurs
Remèdes"

I.1 Introduction

Aujourd'hui, La qualité d'énergie est devenue la question la plus importante dans le secteur de l'électricité. Le courant électrique dans les installations commerciales et électriques se dégrade incontestablement. Cependant ces perturbations sont généralement causées par la connexion au réseau de charges non linaires qui provoquent une distorsion des courants et de la tension.

Dans ce chapitre nous présentons dans une partie introductive sur la qualité d'énergie ainsi les origines des harmoniques. Ensuite, nous présentons les solutions classiques et modernes pour dépolluer les réseaux électriques. Au milieu de chapitre a consacré à la programmation et discussion des résultats obtenus par la méthode classique.

I.2 Qualité d'énergie électrique

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

- ✚ La nécessité économique d'accroître la compétitivité pour les entreprises, (La réduction des coûts liés à la perte de continuité de service et à la non-qualité),
- ✚ La généralisation d'équipements sensibles aux perturbations de la tension et/ou eux-mêmes générateurs de perturbations,(du fait de leurs multiples avantages (souplesse de fonctionnement, excellent rendement, performances élevées...)
- ✚ L'ouverture du marché de l'électricité, (les règles du jeu du secteur électrique ont ou vont évoluer en profondeur : ouverture à la concurrence de la production d'électricité).[4]

I.3 Origine des harmoniques

Les courants harmoniques sont les composantes sinusoïdales d'un courant électrique périodique décomposé en série de fourrier.

Les harmoniques ont une fréquence multiple de la fréquence fondamentale, généralement de 50 ou 60 Hertz, dans les réseaux électriques.[5]

Les courants harmoniques sont l'un des facteurs qui ont le plus d'influence sur la qualité du réseau des installations, plus particulièrement en référence à la forme d'onde.

Ces courants provoquent des distorsions qui éloignent le profil de l'onde de la référence sinusoïdale idéale.[6]

Les courants harmoniques sont dus à la présence de charges électriques non linéaires dans un réseau électrique.[5]

Les dispositifs générateurs d'harmoniques sont présents dans tous les secteurs industriels, tertiaires et domestiques.

Les harmoniques sont le fait d'une charge non-linéaire (le courant qu'elle absorbe n'a pas la même forme que la tension qui l'alimente).

Exemples de charges non-linéaires :

- ✚ Les équipements industriels (machines à souder, fours à arc, fours à induction, redresseurs),
- ✚ Les variateurs de vitesse pour moteurs asynchrones ou moteurs à courant continu,
- ✚ Les onduleurs,
- ✚ Les appareils de bureautique (ordinateurs, photocopieurs, fax, etc.),
- ✚ Les appareils domestiques (TV, fours micro-ondes, éclairage néon, etc.),
- ✚ Certains équipements avec saturation magnétique (transformateurs). [7]

Donc, les courants harmoniques ont divers effets néfastes : augmentation des pertes, augmentation du bruit, interférences et couple vibratoire. Pour la bonne qualité de l'électricité, il est donc important de limiter leur présence. [5]

I.4 Caractérisation des perturbations harmoniques

Les harmoniques sont des signaux de fréquence multiple de la fréquence industrielle. Ils sont générés par des charges dites non-linéaires qui absorbent des courants non sinusoïdaux ou et déséquilibrés ou consomment de l'énergie réactive.

Par exemple, la figure I.1 illustre la forme d'onde déformée résultante de l'addition du terme fondamentale de fréquence 50 Hz avec les harmoniques d'ordre impair de degré 3, 5, et 7.

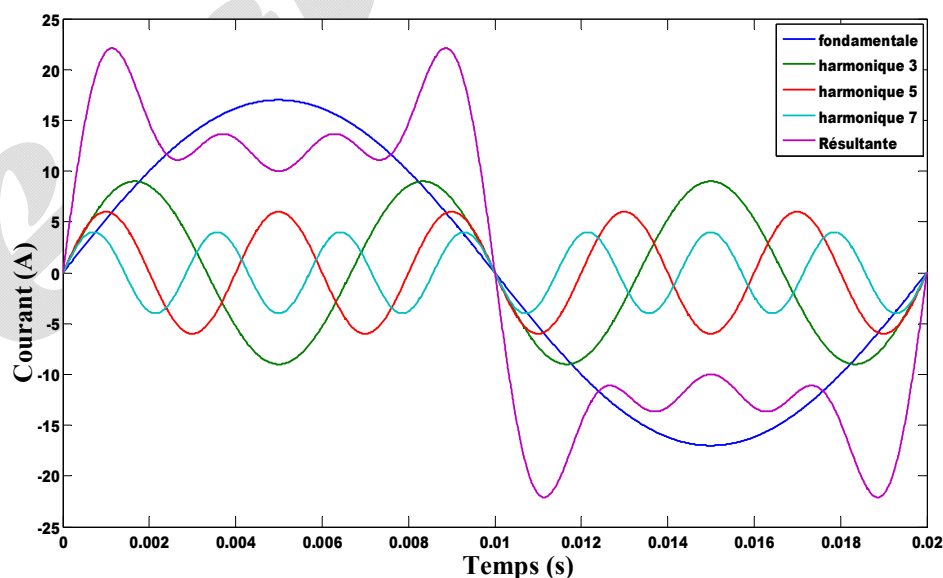


Figure I.1. Fondamentale et harmoniques dans un signal distordu.

✚ Chaque composante est caractérisée par son rang (par exemple rang 5 pour une composante à la fréquence de 250 Hz, soit 5x50 Hz) et par son amplitude exprimée en pourcentage par rapport à celle du fondamental.

✚ Ils sont caractérisés par le taux de distorsion harmonique (THD) de la tension ou du courant, par rapport à leurs ondes fondamentales respectives. Et la consommation de l'énergie réactive est évaluée par le facteur de puissance $\cos \varphi$.

✚ C'est le rapport, exprimé en pourcent, entre la valeur efficace des composantes harmoniques et l'amplitude du fondamental. [8]

I.5 Normes imposées sur le THD

Pour un signal y , le taux de distorsion harmonique (THD) est défini par la formule : (Cette notion suit la définition de la norme IEC 61000-2-2)

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} y_h^2}}{y_1} \quad (I.1)$$

Tels que :

y_h : la composante harmonique de rang h

y_1 : la composante fondamentale,

Le THD est une notion très utilisée pour définir l'importance du contenu harmonique d'un signal alternatif, il est habituellement exprimé en pourcentage. [9]

I.5.1 THD en courant ou en tension

L'une des solutions destinées à déceler la présence d'harmoniques est le calcul du THD, taux de distorsion harmonique. Il existe deux sortes de taux de distorsion harmonique THD :

✚ En tension (apparaît à la source), ou,

✚ En courant (dû aux charges non linéaires)

Lorsqu'il s'agit d'harmoniques de courant, l'expression devient :

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

Cette formule est équivalente à la formule suivante, plus directe et plus facile à utiliser lorsque l'on connaît la valeur efficace totale :

$$THD = \sqrt{\left(\frac{I_{eff}}{I_1}\right)^2 - 1} \quad (I.3)$$

Tels que :

I_h : Valeur efficace du courant harmonique du rang h,

I_1 : la valeur efficace du courant fondamental.

Lorsqu'il s'agit d'harmoniques de courant, l'expression devient : [9]

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \quad (I.4)$$

V_h : Valeur efficace de la tension harmonique du rang h,

V_1 : la valeur efficace du fondamental de la tension.

I.5.2 Relation entre facteur de puissance (FP) et THD

En présence des harmoniques, l'expression de facteur de puissance (PF) devient : [10]

$$FP = \frac{\cos \varphi}{\sqrt{1 + THD^2}} \quad (I.5)$$

I.5.3 Intérêt du THD

La norme CEI 61000-3-2 traite la limitation des courants harmoniques injectés dans le réseau public d'alimentation.

Elle définit les limites des harmoniques du courant d'entrée qui peuvent être produits par les matériels soumis à l'essai dans des conditions spécifiées.

Cette partie de la CEI 61000 est applicable aux appareils électriques et électroniques ayant un courant d'entrée dont la valeur est inférieure ou égal à 16 A par phase et qui sont destinés à être raccordés à des réseaux publics de distribution à basse tension.

Tableau I.1. Limites des courants harmoniques pour les luminaires d'après la norme NF EN61000-3-2

Harmonique des rangs mesurés		
Harmonique impairs seulement	2	0%
	3	49.5%(117.9 mA)
	5	34.2%(81.4mA)
	7	28.4%(67.6mA)
	9	25.1%(59.8mA)
	11<n<39	h11 17.5%(41.7mA)
		h13 10.6% (25.2mA) h15 8.9%(21.2mA) h17 6.6%(15.7mA)

Les niveaux de THD sont souvent exprimés en pourcentage du niveau *fondamental*. Dans le cadre de la fourniture d'électricité :

- ✚ Les taux de tension harmonique THD-V < 5%,
- ✚ Les taux de courants harmoniques THD-I < 10%

Dans certains cas, le fournisseur d'énergie électrique peut imposer des niveaux maximaux de courants harmoniques générés par ses clients.[11]

I.6 Solution de dépollution du courant dans les réseaux électrique

On peut regrouper les solutions visant à réduire les perturbations harmoniques en deux groupes : les solutions traditionnelles et les solutions modernes.(figure I.2)

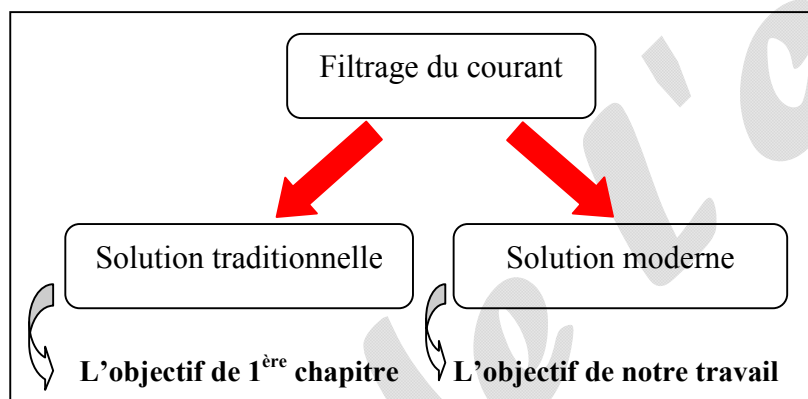


Figure I.2. Différentes solutions utilisées dans le filtrage du courant.

I.6.1 Solution traditionnelle

Des solutions existent pour éviter la propagation des harmoniques dans les réseaux électriques et être connues par tous les électriciens.

Elles apportent une solution facile et rapide pour certains cas de perturbations bien localisées et utilisent des composants passifs. (Inductances, **condensateurs**, transformateurs)(" Compensation de l'énergie réactive").

I.6.1.1 Compensation de l'énergie réactive

La compensation est une technique de la gestion d'énergie réactive afin d'améliorer la qualité énergétique dans les réseaux électriques à courant alternatif. [11]

Quel est l'intérêt de bon facteur de puissance $\cos \varphi$?

Figure I.3, montré bien la puissance transité dans un linge électrique avant et après la compensation.

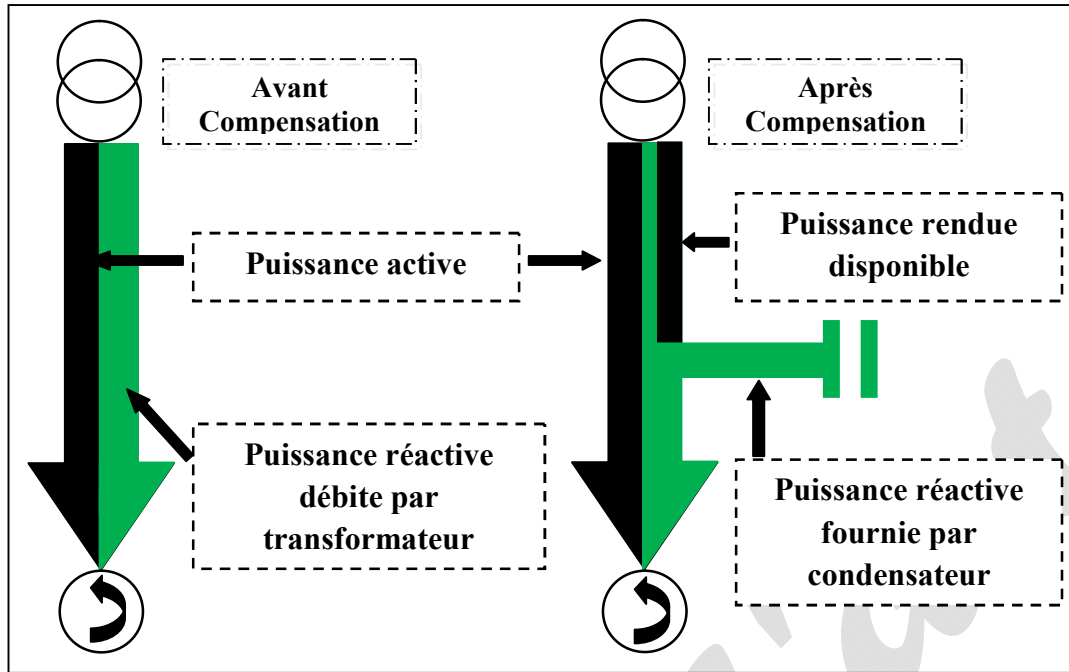


Figure I.3. Principe de compensation.

I.6.1.2 Principe de la compensation

Pour limiter les courants en ligne et donc l'énergie réactive absorbée par l'installation, on doit donc installer des sources d'énergie réactive en parallèle sur notre installation. On appelle cette technique « *Compensation de l'énergie réactive* ». Cette compensation permet d'améliorer le facteur de puissance ($\cos \varphi$). Soit un appareil ou groupe d'appareils appelant une puissance active $P(W)$ et une puissance réactive (VAR). On souhaite réduire la $\tan(\varphi)$ à une valeur plus faible $\tan(\varphi)$. Il existe trois types de compensation : [12]

a. Compensation shunt

La compensation parallèle (shunt) présentée dans la figure I.3.

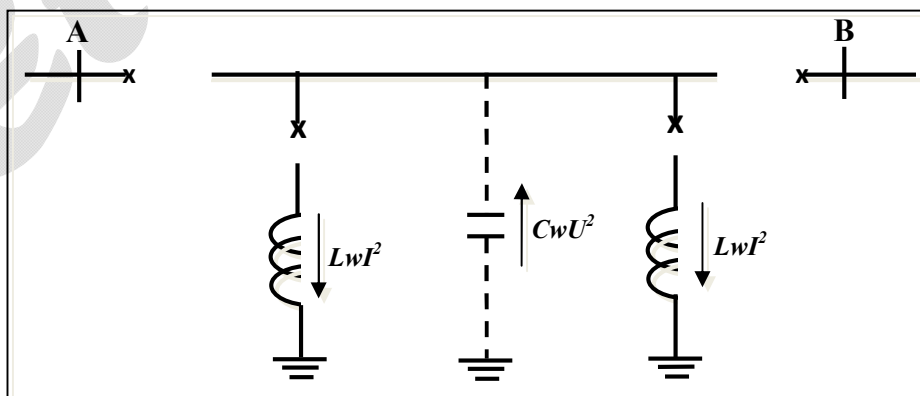


Figure I.3. Schéma de compensation shunt.

Il est consiste à enclencher des condensateurs shunte/ou des inductances shunt connectés entre les phases du réseau et la terre en général par le biais de disjoncteurs à différents endroits sur le réseau pour modifier l'impédance des lignes, dans le but de maintenir des niveaux de tension acceptables suivant l'état de charge du réseau .en effet , la chute de tension à travers une ligne est donné par la relation en négligeant le terme résistif de la ligne.

L'équation (I.6) donne l'expression de la puissance transmise par la ligne avant compensation, et l'équation (I.7) donne l'expression de la puissance transmise par la ligne compensée.

$$P = \frac{V^2}{X_L} \sin(\delta) \quad (I.6)$$

On remarque que la puissance maximal transite et doublée et obtenue par le déphasage $\delta = 180^\circ$. (figure I.4).

$$P = \frac{2V^2}{X_L} \sin(\delta/2) \quad (I.7)$$

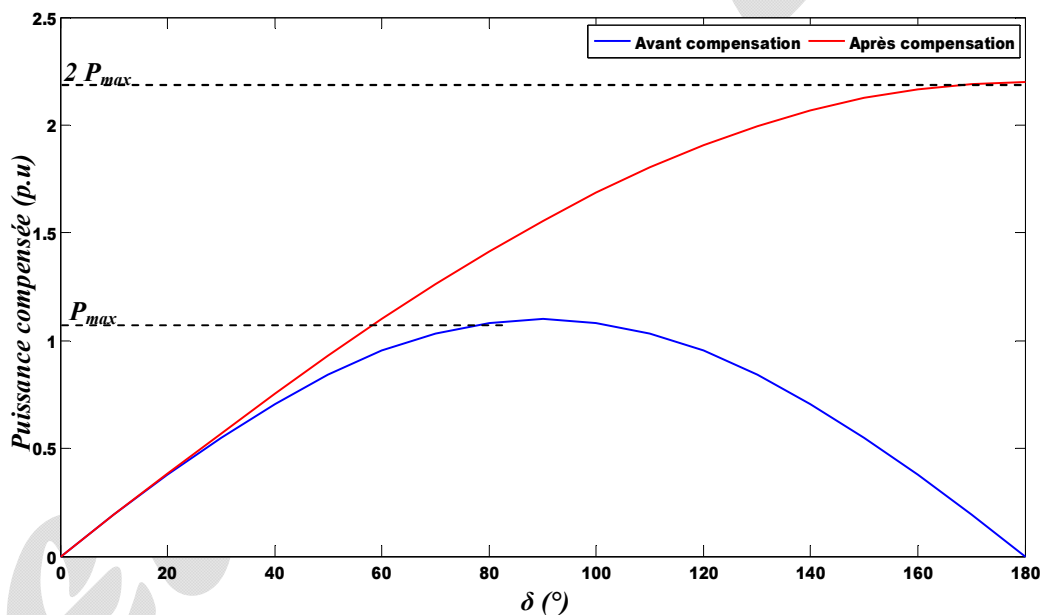


Figure I.4. Courbe de puissance avec et sans compensation shunt.

b. Compensation série

Cette compensation pour insères les réactances sur une ligne, Il modéliser par une réactance de type inductif, quand comprend que l'on démunie cette réactance on ajoutant une réactance de type capacitive toujours dans le but augmenter la puissance transmissible.

La compensation série est utilisée sur certaines lignes à haute tension à la fois très chargées et très longues. Figure I.5. [13]

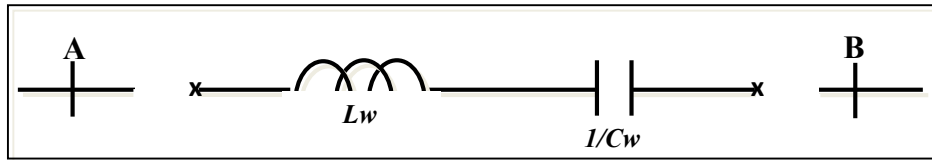


Figure I.5. Schéma de Compensation série.

La réactance introduite aura la valeur X_C , donné par l'équation (I.8)

$$X_c = S * X \quad (I.8)$$

S : est degré se compensation $0 \leq S \leq 1$

L'impédance totale entre le récepteur et la source est maintenant donnés par l'équation (I.9). La puissance transmise, exprimée par l'équation (I.10), et alors fonction du degré de compensation S . (figure I.6).

$$X_{TOTAL} = X_L - X_C = (1 - S) * X_L \quad (I.9)$$

$$P = \frac{2V^2}{X_L(1-S)} \sin(\delta) \quad (I.10)$$

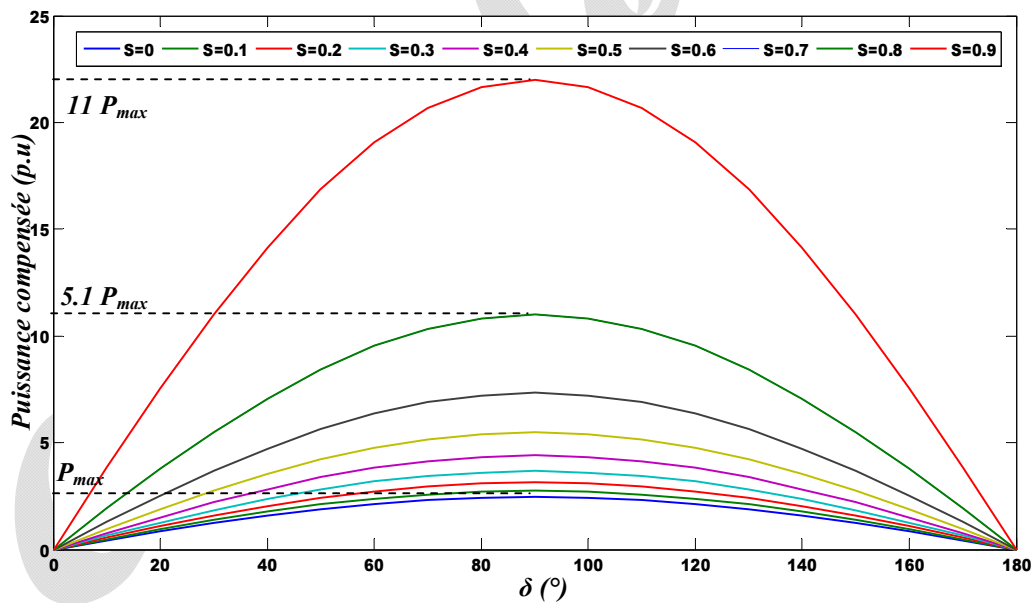


Figure I.6. Courbe de puissance avec et sans compensation série.

c. Comparaison entre la compensation série et la compensation shunt

L'effet d'ajouter un condensateur en parallèle avec la ligne à pour conséquence de diminuer la chute de tension dans la ligne. Aussi pour une valeur de capacitance élevée, il est possible que la chute de tension soit neutralisée. [14]

Donc le rôle principal de la compensation parallèle est d'améliorer la chute de tension causée par la charge dans la ligne. La compensation série peut être installée en n'importe quel point sur la ligne contrairement à la compensation shunt qui doit être positionnée en milieu de la ligne.

Les compensateurs série ont été utilisés avec succès pendant des nombreuses années, pour améliorer la stabilité et les aptitudes de charge des réseaux de transport haute tension .

La compensation série est aussi utilisée pour régulariser la tension au long de la ligne lorsque la charge subit à des variations brusque [13,15]. Par contre leur utilisation dans les lignes longue est très fréquente. L'impédance de la ligne réduite, augmente la stabilité du réseau électrique, qui nous permet de transité des grandes puissance.

d. Compensation par déphasage

Le principe de cette compensation est basé sur l'insertion d'un déphaseur sur la ligne.

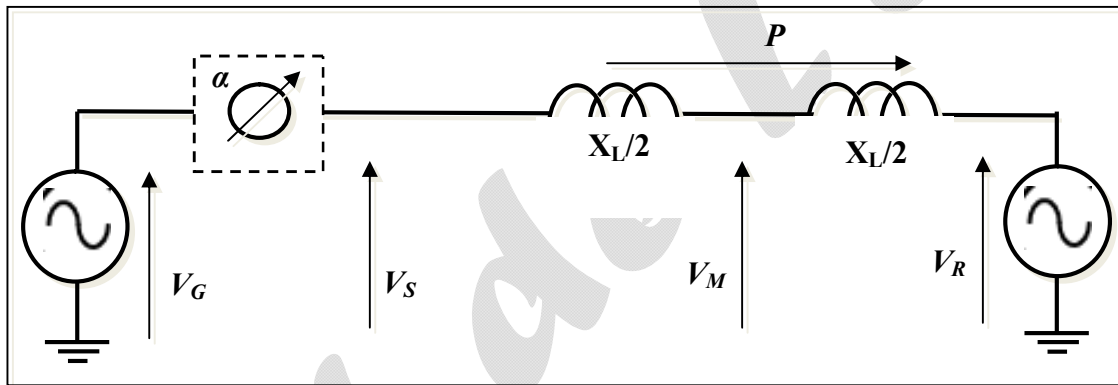


Figure I.7. Schéma de compensation par déphasage.

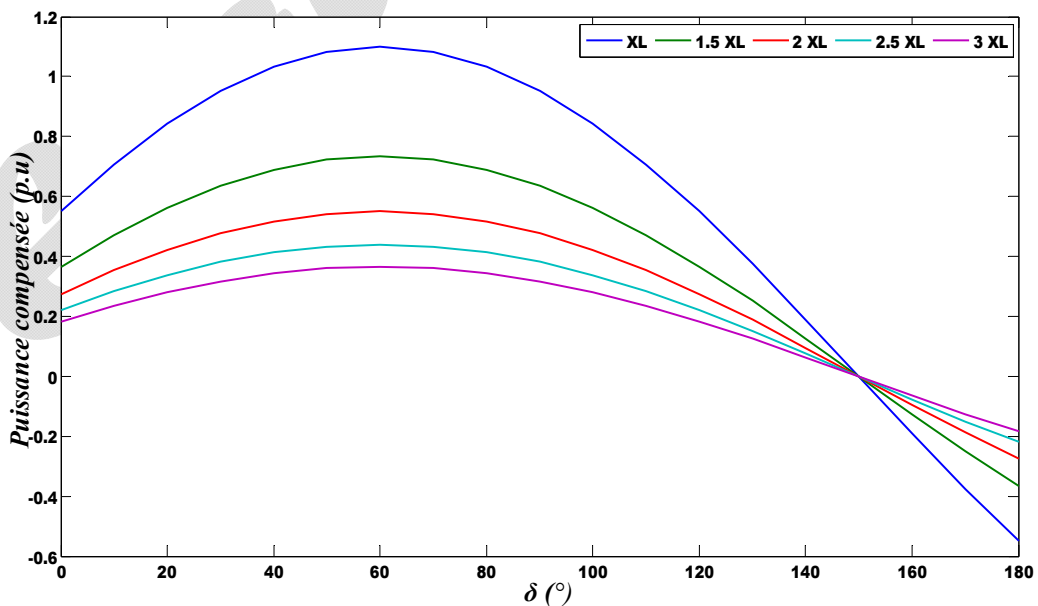


Figure I.8. Courbe de puissance avec compensation par déphasage. $\alpha=30^\circ$.

Ce dispositif est modélisé par une source de tension, d'amplitude et phase variables. On peut alors avoir en sortie du déphaseur une tension V_s de même amplitude qu'à l'entrée V_G mais déphasée de l'angle α . (figure I.7)

La puissance transmissible sur la ligne est alors fonction de l'angle déphasage α équation (I.11)

$$P = \frac{V^2}{X_L} \sin(\delta + \alpha) \quad (\text{I.11})$$

Pour ce type de compensation, la puissance maximale n'est pas augmentée, mais le réglage de α permet le réglage transit de puissance. (Figure I.8).

e. Avantages dus à l'amélioration du facteur de puissance

- ✚ Diminution de la section des câbles,
- ✚ Diminution des pertes en ligne,
- ✚ Réduction de la chute de tension,
- ✚ Augmentation de la puissance disponible.

I.6.2 Solution moderne

Les solutions de dépollution traditionnelles ne répondent pas au changement des réseaux électriques et des charges à protéger, [16] donc des solutions modernes sont proposées, (figure I.9). Donc pour fournir aux consommateurs une bonne qualité de l'énergie électrique, même dans les conditions de fonctionnement les plus perturbées :

- ✚ La première solution de dépollution consiste à fabriquer la charge la moins polluante possible, comme le pont redresseur dodécaphasé, de manière à réduire le taux d'émission d'harmoniques.
- ✚ La deuxième solution consiste à utiliser les filtres actifs sont proposés comme des solutions avancées de dépollution des réseaux électriques. En effet, ces solutions peuvent s'adapter aux évolutions de la charge et du réseau électrique et ceci sans toucher aux installations du fournisseur d'énergie et du consommateur.
- ✚ La troisième solution utilise les filtres hybrides (association de deux filtres actifs parallèle et série). Cette structure bénéficie des avantages des deux types de filtres actifs série et parallèle. Ainsi, elle permet d'assurer simultanément un courant sinusoïdal et une tension du réseau électrique également sinusoïdale.

L'avantage rencontré lors de l'utilisation de cette méthode de combinaison du Filtre actif série et parallèle d'après mes recherches bibliographiques, si l'amélioration du facteur de puissance ainsi le non utilisation d'un filtre actif de puissance parallèle.

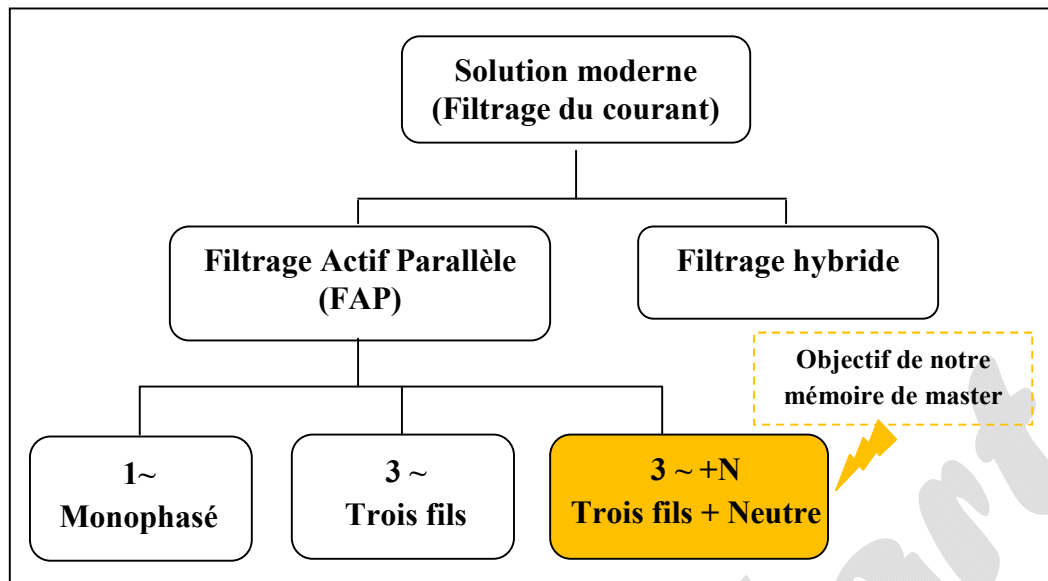


Figure I.9. Différentes solutions modernes dans le filtrage du courant.

I.6.2.1 Filtre actif

Le but des filtres actifs est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à ce que le courant ou la tension redevienne sinusoïdal.

On trouve deux types de structures de filtre actif :

a. Filtre actif parallèle (FAP)

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau, comme le montre figure I.10, dans l'objectif de empêcher les courants perturbateurs (harmoniques, réactifs et déséquilibrés), produits par des charges polluantes, de circuler à travers l'impédance du réseau, située en amont du point de connexion du filtre actif.

Il injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci. Le courant côté réseau est alors sinusoïdal.[17]

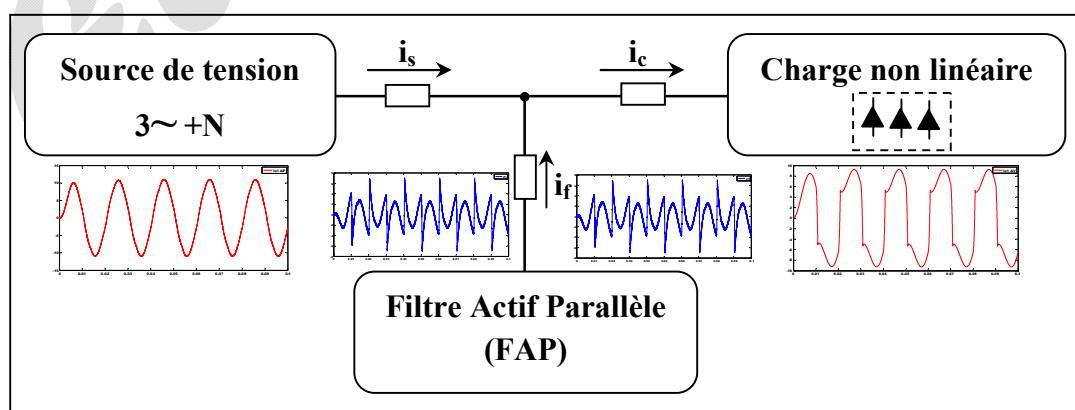


Figure I.10. Principe de compensation harmonique par un filtre actif parallèle.

Pour un système triphasé, on peut distinguer deux configurations du filtre actif parallèle à structure tension :

➤ **Filtre actif parallèle à trois fils**

Le filtre actif parallèle est utilisé pour la dépollution des réseaux BT et HTA [18]. Ce type de configuration est indiqué par la figure I.11. Il injecte en temps réel les composantes harmoniques des courants absorbés par les charges non linéaires connectées au réseau. Ainsi, le courant fourni par la source d'énergie devient sinusoïdal.

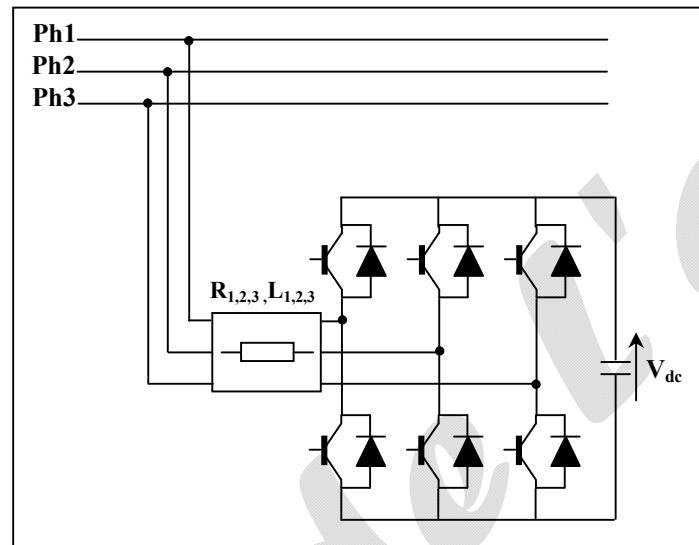


Figure I.11. Configuration du filtre actif parallèle (FAP) à trois bras.

➤ **Filtre actif parallèle à quatre fils**

Un grand nombre de charges monophasées peuvent être alimentées à partir d'un système triphasé avec le neutre. Elles peuvent causer un courant harmonique excessif dans le neutre, une surcharge due à la consommation de puissance réactive et un déséquilibre.

Pour ces problèmes, des compensateurs à quatre fils ont été l'objectif de notre mémoire de master.

Les topologies de ce type de filtre à quatre fils peuvent être citées :

- ✚ Figure I.12(a) Onduleur à trois bras avec condensateurs à point milieu,
- ✚ Figure I.12 (b) Onduleur à trois bras avec connexion asymétrique du neutre,
- ✚ **Figure I.12 (c) Onduleur à quatre bras, (utilisé dans la partie de simulation),** montre une configuration du filtre actif parallèle de type source de tension à quatre fils (FAP à quatre bras), ou le quatrième bras est utilisé pour stabiliser et contrôler le courant du neutre du filtre actif .
- ✚ Figure I.12 (d) Onduleur à quatre bras amélioré.

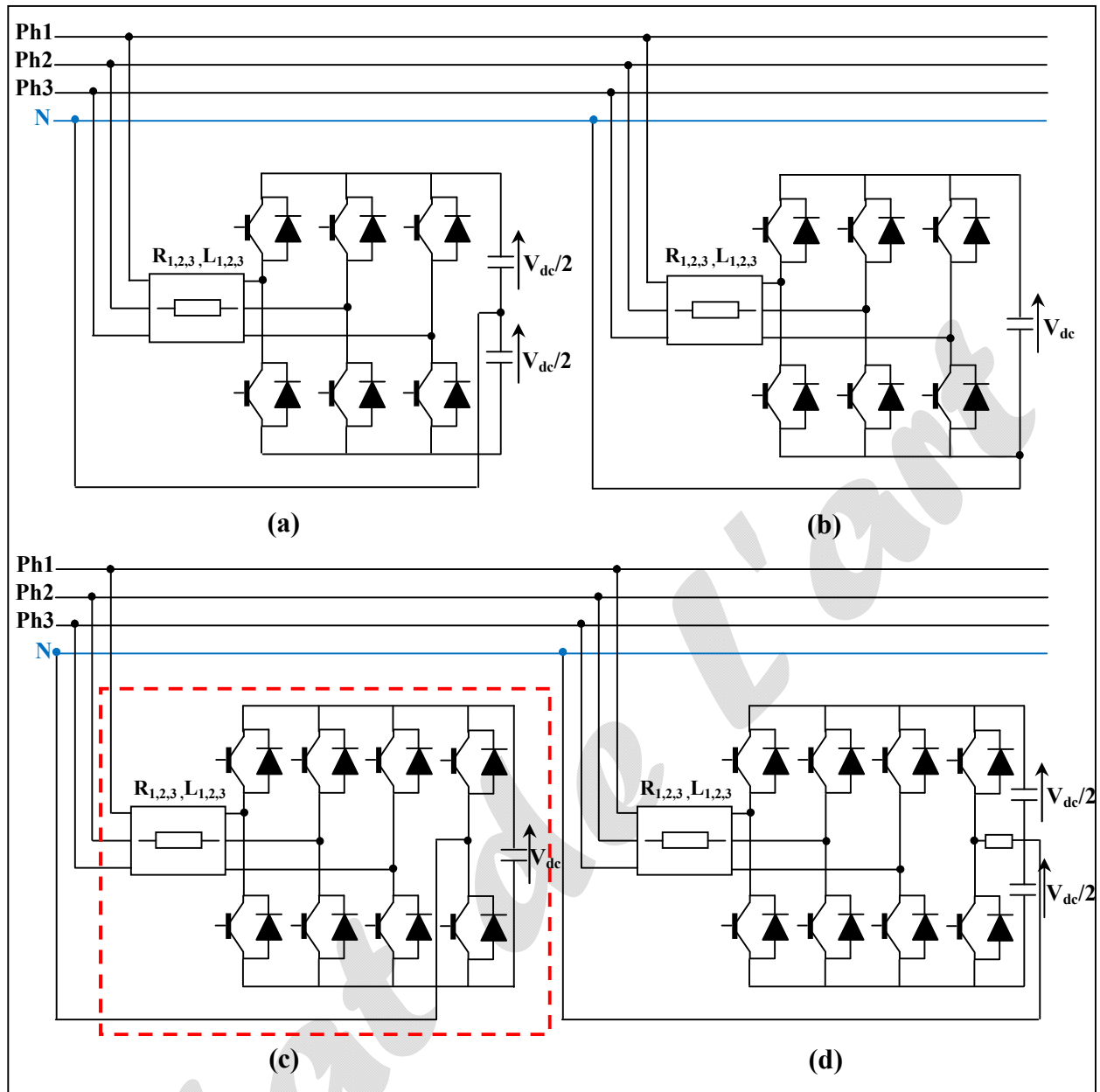


Figure I.12. Différentes topologies utilisées dans un FAP d'un réseau triphasé à quatre fils.

b. Filtre série (FAS)

Il est destiné à protéger les charges sensibles aux perturbations provenant du réseau telles que les harmoniques en tension, les surtensions, déséquilibres et creux de tension. Ce type de configuration est montrée par la figure I.13.[19]

Remarque

Le filtrage série ne permet pas de compenser les courants harmoniques consommés par la charge non linéaire

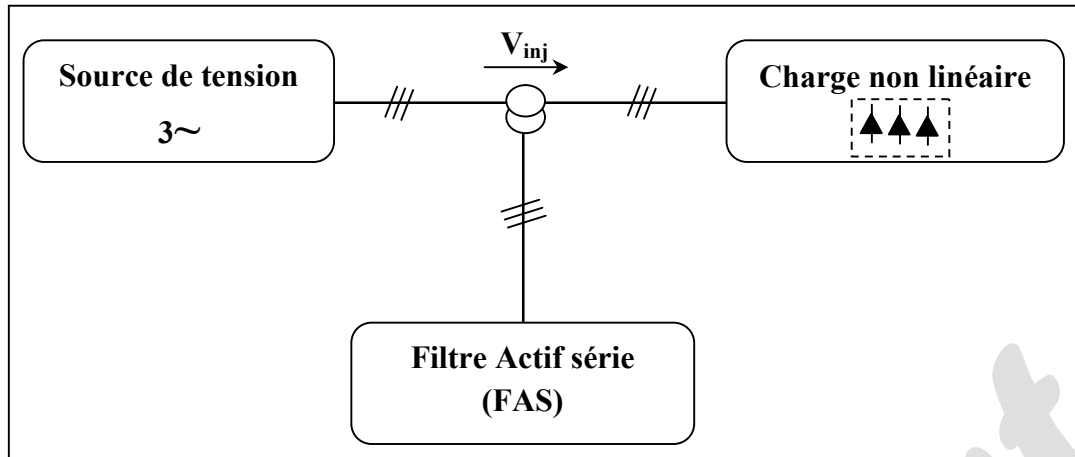


Figure I.13. Principe de filtre actif série (FAS).

I.6.2.2 Filtre hybride

La combinaison parallèle-série actifs, aussi appelée (Unified Power Quality Conditioner (UPQC)). Profitant des avantages des deux filtres actifs, dans l'objectif d'assurer un courant et une tension sinusoïdaux du réseau électrique à partir d'un courant et d'une tension perturbés de celui-ci. (de compenser les harmoniques de courant et de tension). Il est résulte de l'association des deux filtres actifs parallèle et série, comme le montre la figure I.14. [19]

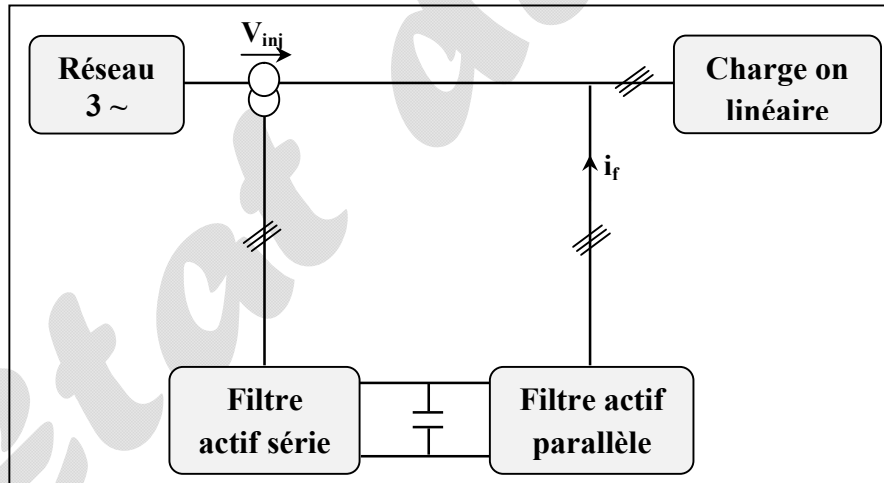


Figure I.14. Structure du filtre actif hybride (série, parallèle)

I.7 Applications des filtres actifs parallèles

Les filtres actifs sont également utilisés dans des applications industrielles, afin de dépolluer une zone avec plusieurs charges non linéaires (redresseurs, certains éclairages, etc.). En fin, le filtrage actif est également employé dans les applications tertiaires car les filtres actifs peuvent être intéressants dans les bâtiments commerciaux, hôpitaux, etc.

Ces filtres actifs compensent les courants harmoniques, les courants réactifs et les déséquilibres des charges.

Les filtres permettent une compensation globale des harmoniques, souvent jusqu'à l'harmonique 50. Ces filtres actifs, en plus de réduire les courants harmoniques, améliorent le facteur de puissance et équilibrent les charges triphasées.

L'utilisation de ces filtres produit une réduction des coûts d'exploitation et une prolongation de la durée de vie de l'installation.[19-20]

I.8 conclusion

Après l'étude accomplie dans ce chapitre concernant la qualité d'énergie, caractérisation des perturbations harmoniques, origine des harmoniques, ainsi les différentes méthodes de compensation de l'énergie réactive dans les réseaux électriques, on peut conclure que l'élimination des harmoniques dans la structure des réseaux électriques, permet le réglage des tensions, le contrôle du transit de la puissance active et réactive, ce qui permet une meilleure gestion de l'énergie et une amélioration des indices de qualité de l'énergie électrique.

Les résultats obtenus par notre programme dans ce chapitre sous l'environnement (MATLAB), montre clairement l'avantage d'intégrer des dispositifs de compensation.

Enfin, les résultats de programmations par la solution traditionnelle nous a permis d'aboutir à une constatation que l'installation d'un compensateur avec un emplacement efficace permet d'accroître la capacité de transit et de réduire les pertes.

Dans le chapitre suivant, on présentera la modélisation -contrôle-commande du filtre actif parallèle à quatre bras. Nous avons aussi s'intéressé dans la suite aux solutions modernes tel que le filtre actif parallèle à quatre fil qui sera l'objet de ce mémoire.

Chapitre II

"Commande D'un Filtre Actif Parallèle à Quatre Bras"

II.1. Introduction

L'objectif principal de notre travail est d'améliorer le niveau harmonique par une méthode moderne qui a été présentée dans le chapitre précédent.

Le filtrage actif parallèle de puissance (FAP) est une solution moderne et adéquate permettant de remédier aux perturbations en courant [10].

Les filtres actifs sont composés de deux parties distinctes la partie puissance et la partie contrôle-commande.

Dans la partie puissance, nous introduirons les trois principaux blocks de cette structure, à savoir l'onduleur de tension à quatre bras, le circuit de stockage d'énergie et le filtre de découplage.

Dans la partie contrôle-commande, nous aborderons l'identification des courants perturbés, la régulation de la tension continue et du courant du FAP.

Dans ce chapitre, nous donnerons une explication détaillée du filtre actif parallèle à quatre bras, (les deux parties qui sont cités précédemment).

II.2 Constituants d'un filtre actif parallèle à quatre bras

Le filtre actif parallèle FAP peut être installé pour compenser toutes les courants harmoniques basses fréquences émis par la charge polluante, les déséquilibres et la puissance réactive.

Il est composé de deux fonctions principales; une fonction d'identification de courants harmoniques et une fonction de commande d'onduleur pour injecter les courants de compensation [21].

Un filtre actif parallèle à quatre bras est essentiellement constitué de deux parties (Voir la figure (II.1)):

- ✚ Partie puissance,
- ✚ Partie commande.

Ces deux parties vont être détaillées dans les deux sections qui suivent.

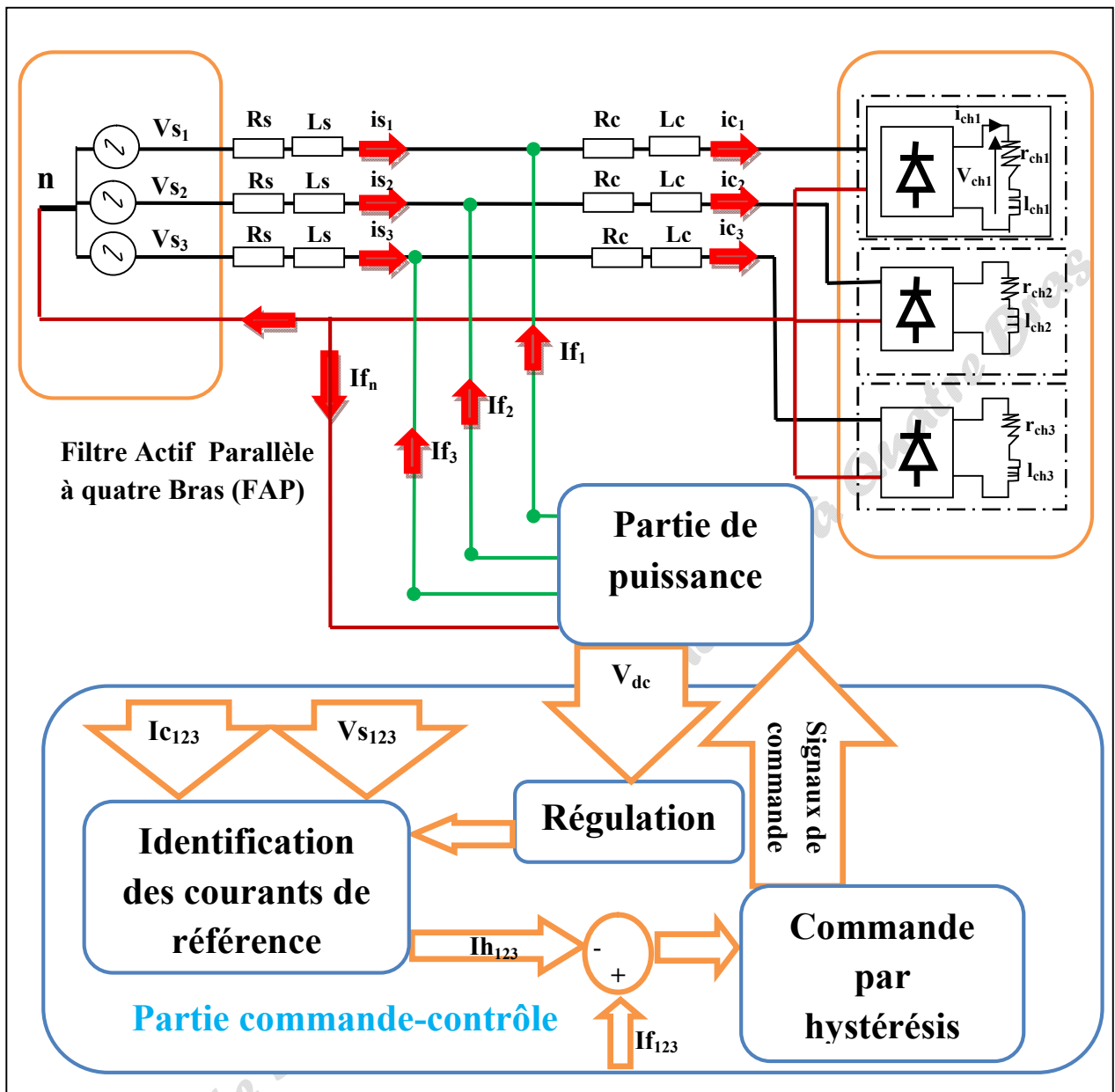


Figure II.1. Principe du FAP à quatre bras connecté au réseau.

II.3 Étude de la partie de la puissance

Dans cette section nous nous sommes intéressés à la partie puissance du FAP dont les composants sont les suivants :

- ✚ L'onduleur à quatre bras,
- ✚ Le filtre de couplage,(filtre de sortie),
- ✚ Le système de stockage de l'énergie.

II.3.1 Description d'un onduleur triphasé à quatre bras

Dans cette topologie, nous utilisons un onduleur comprenant quatre bras constitués de huit interrupteurs réversibles en courant (IGBT, GTO) en antiparallèle avec une diode [10-22]. Comme l'illustre la figure II.2.

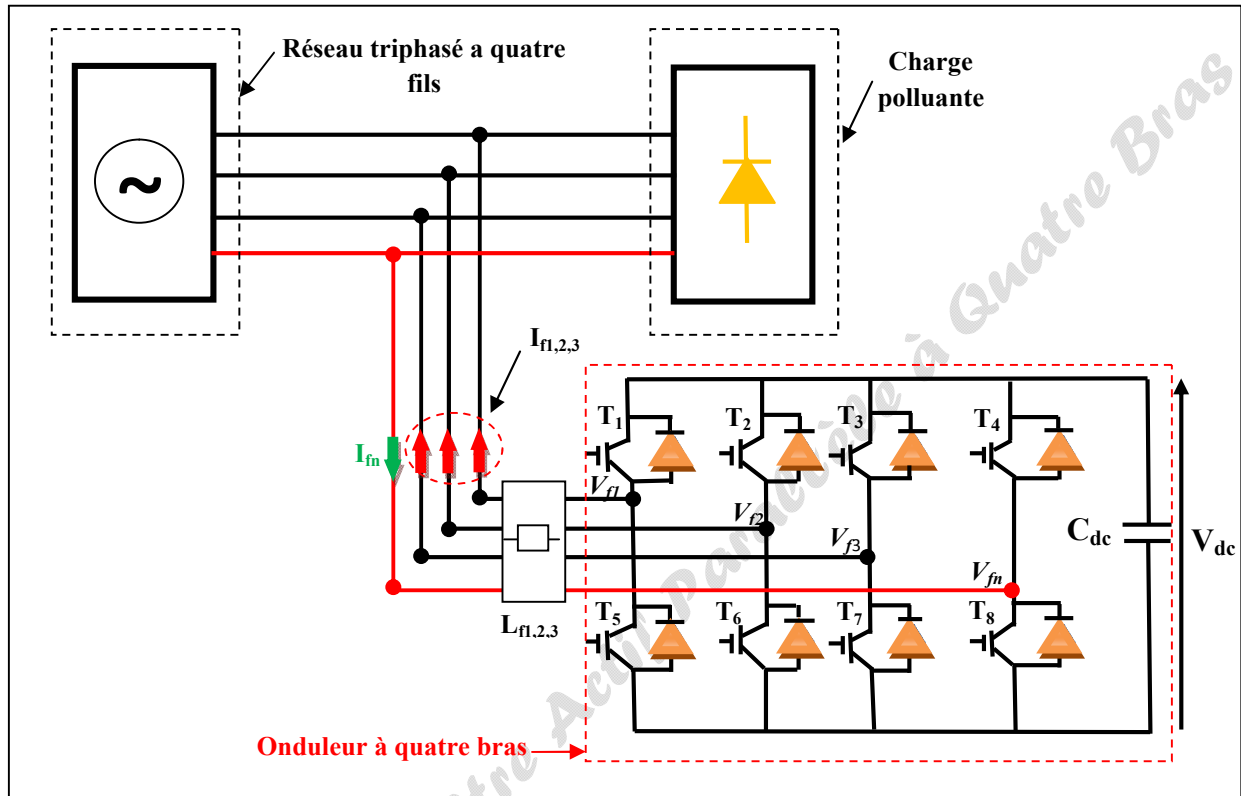


Figure II.2. Filtre actif parallèle à quatre bras pour un réseau triphasé à quatre Fils.

Les états de commutation pour ce type d'onduleur sont présentés dans le tableau II.1. Ils sont obtenus grâce aux expressions suivantes :

$$V_{f1} = (T_1 - T_4)V_{dc} \tag{II.1}$$

$$V_{f2} = (T_2 - T_4)V_{dc} \tag{II.2}$$

$$V_{f3} = (T_3 - T_4)V_{dc} \tag{II.3}$$

$$i_{dc} = T_1i_1 + T_2i_2 + T_3i_3 - T_4i_4 \tag{II.4}$$

Avec :

$T_i = 1$ si T_{i+4} est fermé,

et $T_i = 0$ si T_{i+4} est ouvert,

et $i = 1$ à 4

Tableau II.1. Tensions générées par l'onduleur de tension à quatre bras.

K	T ₄	T ₃	T ₂	T ₁	V _{f3}	V _{f2}	V _{f1}
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	0	0	V _{dc}
2	0	0	1	0	0	V _{dc}	0
3	0	0	1	1	0	V _{dc}	V _{dc}
4	0	1	0	0	V _{dc}	0	0
5	0	1	0	1	V _{dc}	0	V _{dc}
6	0	1	1	0	V _{dc}	V _{dc}	0
7	0	1	1	1	V _{dc}	V _{dc}	V _{dc}
8	1	0	0	0	-V _{dc}	-V _{dc}	-V _{dc}
9	1	0	0	1	-V _{dc}	-V _{dc}	0
10	1	0	1	0	-V _{dc}	0	-V _{dc}
11	1	0	1	1	-V _{dc}	0	0
12	1	1	0	0	0	-V _{dc}	-vdc
13	1	1	0	1	0	-V _{dc}	0
14	1	1	1	0	0	0	-V _{dc}
15	1	1	1	1	0	0	0

II.3.2. Filtre de couplage (Filtre de sortie)

Le but du filtre de couplage est de permettre la connexion de l'onduleur de tension au réseau électrique qui est très souvent considéré comme une source de courant qui génère des courants harmoniques à partir de la différence des tensions entre la sortie du pont onduleur et le réseau .

Le filtre de sortie est un filtre passif utilisé pour connecter l'onduleur de tension au réseau. Il est dimensionné pour satisfaire les deux critères suivants :

✚ assurer la dynamique du courant du filtre défini par :

$$\frac{di_f}{dt} = \frac{di_h}{dt}$$

(II.5)

Où :

i_f : Courant du filtre,

i_h : Courant harmonique de la charge.

✚ Empêcher les composantes dues aux commutations de se propager sur le réseau électrique.

Ce filtre réduit la propagation sur le réseau électrique des composantes harmoniques dues aux commutations.

le filtre composé d'une inductance L_f avec une résistance interne R_f . En négligeant la résistance de ce filtre de couplage on obtient [10-23]:

$$\left(\frac{di_f}{dt}\right)_{\max} = \frac{V_{f\max} - V_{s\max}}{L_f} \quad (\text{II.6})$$

Avec

$V_{f\max}$: La valeur maximale de la tension à l'entrée de l'onduleur,

$V_{s\max}$: La valeur maximale de la tension simple au point de raccordement du filtre.

pour des petites variations du courant du filtre, on obtient:

$$\left(\frac{\Delta i_f}{\Delta T}\right)_{\max} = \frac{V_{dc} - V_{s\max}}{L_f} \quad (\text{II.7})$$

Avec : $\Delta T = 1/f_{ond}$: la période de variation du courant du filtre,

En supposant la variation maximale du courant du filtre égale à 25% de la valeur maximale du courant du réseau, la valeur de l'inductance de couplage est donnée par : [10]

$$L_f = \frac{V_{dc} - V_{s\max}}{0.25 i_{s\max} f_{ond}} \quad (\text{II.8})$$

II.3.3 Système de stockage d'énergie

L'utilisation des batteries de condensateurs est effective dans les petites et moyennes puissances. Dans le cas des grandes puissances on utilise des bobines supraconductrices. Le stockage de l'énergie du côté continu se fait souvent par un système de stockage capacitif représenté par le condensateur qui joue le rôle d'une source de tension continue [24].

Dans les applications de compensation d'harmoniques, une tension V_{dc} élevée améliore la dynamique du filtre actif, par ailleurs, le critère commun pour le choix de la capacité C_{dc} est en générale la limitation des ondulations de la tension continue. Ces ondulations sont d'autant plus élevées que les harmoniques à compenser sont de basses fréquences et d'amplitudes importante.

Un dimensionnement adéquat de la capacité peut-être établi à partir d'un courant type que doit générer le filtre actif, ceci n'est pas toujours facile à réaliser car on ne connaît pas souvent tous les harmoniques qu'on doit compenser, ainsi une méthode de dimensionnement consiste à calculer la capacité à partir du courant harmonique du rang le plus faible I_h [25].

$$C_{dc} = \frac{I_h}{\tau V_{dc} \omega_h} \tag{II.9}$$

Avec :

τ : Taux d'ondulation admissible généralement de l'ordre de 5% de V_{dc} ,

ω_h : la pulsation la plus faible des harmoniques à compenser, (pulsation du rang h).

II.4 Présentation du système

Le système qu'on désire utiliser est :

- ✚ Une source de tension triphasée à quatre fils,
- ✚ Trois charges non linéaires monophasées,
- ✚ Un filtre actif parallèle (FAP) à quatre bras avec sa commande.

II.4.1 Type de la source d'alimentation

La figure suivante montre présente la source de tension que nous allons utiliser est un système triphasée à quatre fils (trois phases + neutre) ayant une inductance L_s et une résistance R_s .

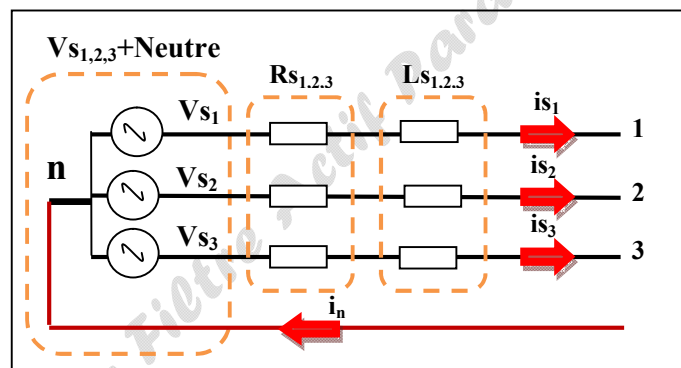


Figure II.3. Type de la source d'alimentation.

✚ Résultats de simulation et interprétation

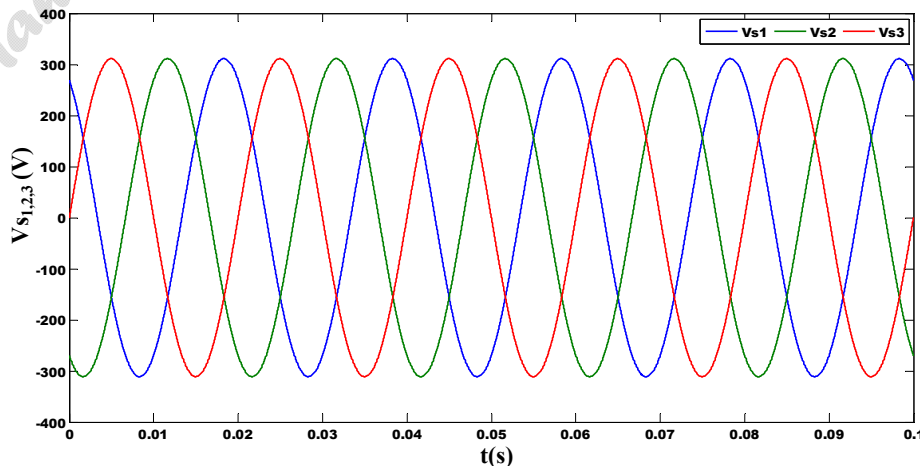


Figure II.4. Source de tension $V_{s1,2,3}(t)$.

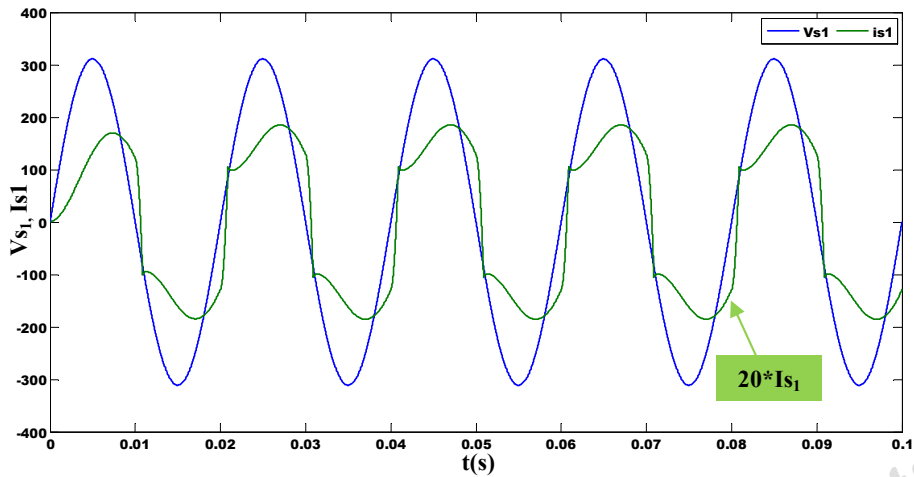


Figure II.5. Tension d'alimentation $V_{s1}(t)$ et courant de source $I_{s1}(t)$.

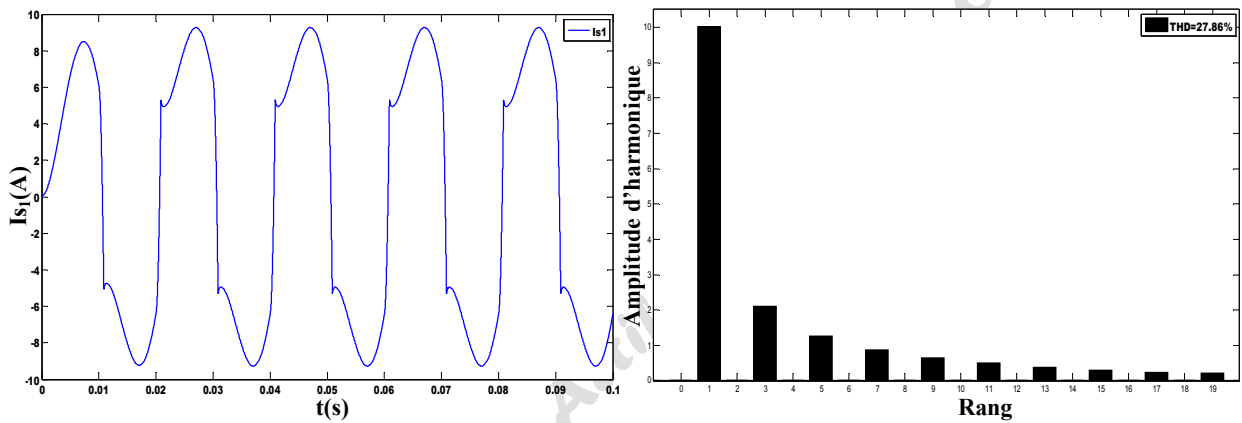


Figure II.6. Courant de source de la phase 1. $I_{s1}(t)$ et FFT du courant de source de la première phase.(Avant filtrage).

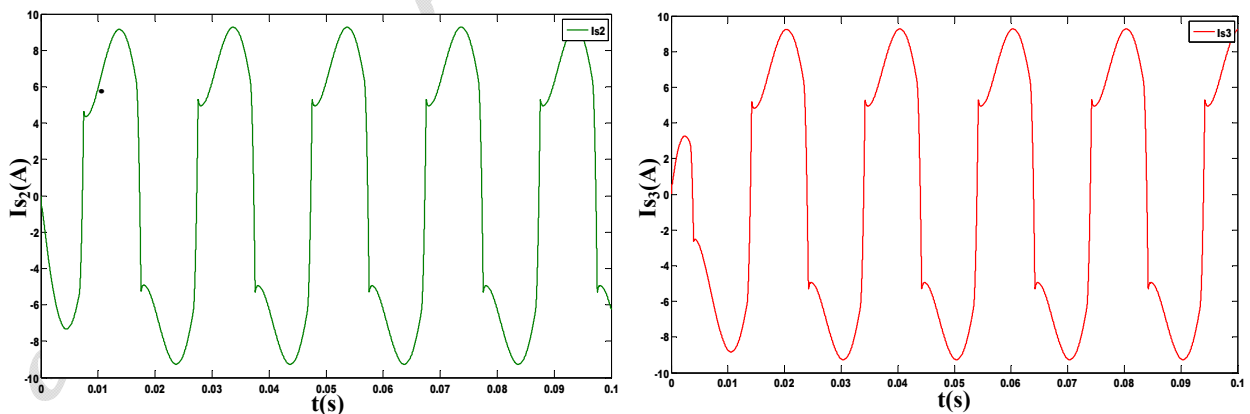


Figure II.7. Courants de source de la phase 2 et 3. $I_{s2}(t)$ et $I_{s3}(t)$. (Avant filtrage).

- ✚ Les courants $I_{s1,2,3}$ sont déphasé par 120° ,
- ✚ Les courants de source $I_{s1,2,3}$ avec les courants de ligne $I_{c1,2,3}$ sont égaux dans le cas avant filtrage.

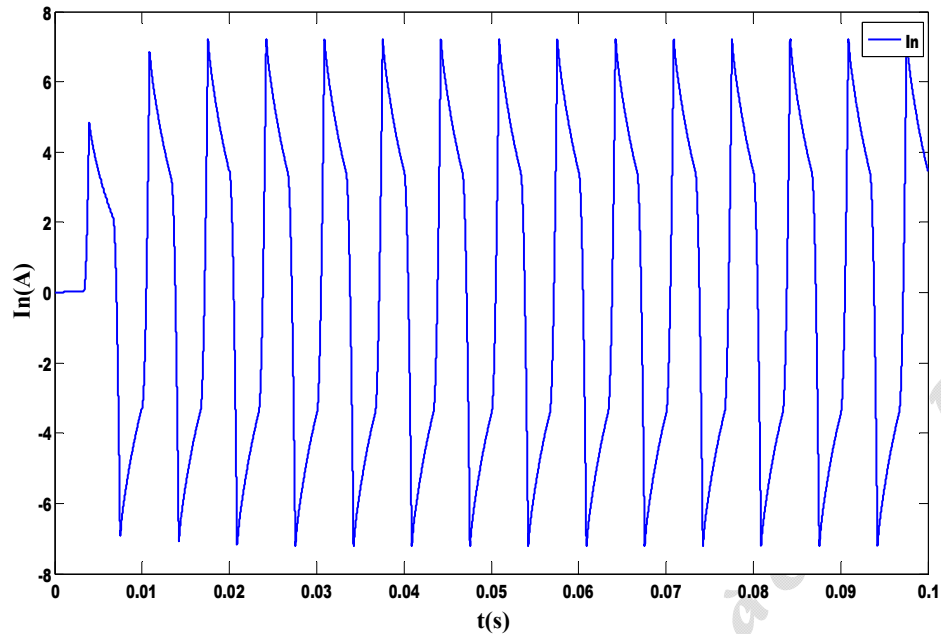


Figure II.8. Courant de neutre $I_n(t)$, (Avant filtrage).

- ✚ La Figure II.4, présente la tension de source V_s est sinusoïdale,
- ✚ Figure II.5, montre la tension d'alimentation V_{s1} et le courant de source I_{s1} .
- ✚ Figures (II.6-7), montrent les courants de source $I_{s1,2,3}$ et FFT du courant de source de la première phase où le taux de distorsion harmonique est de 27.86%. (Avant filtrage).
- ✚ Le courant de source I_s est non sinusoïdal, car il est riche en harmoniques, générés par la charge non linéaire (pont à diode) qui alimente une charge de type RL.
- ✚ Dans le cas avant filtrage le courant de source égal le courant de ligne (charge) ($I_{s1,2,3} = I_{c1,2,3}$).
- ✚ Nous remarquons dans la figure II.8 avant filtrage que le courant du neutre est plein de courant d'harmonique excessif.

Pour résoudre ces problèmes, on a utilisé un Filtre Actif Parallèle (FAP) commandé par hystérésis pour la méthode d'identification de la puissance instantanée avec Filtre Passe Bas (FPB).

II.4.2 Type de la charge

La figure II.9 présente la charge polluante utilisée, dans notre système est une charge non linéaire constituée de trois charges monophasée de type pont redresseur monophasée à diode débitant chacune d'elles sur une charge I_{ch} et r_{ch} .

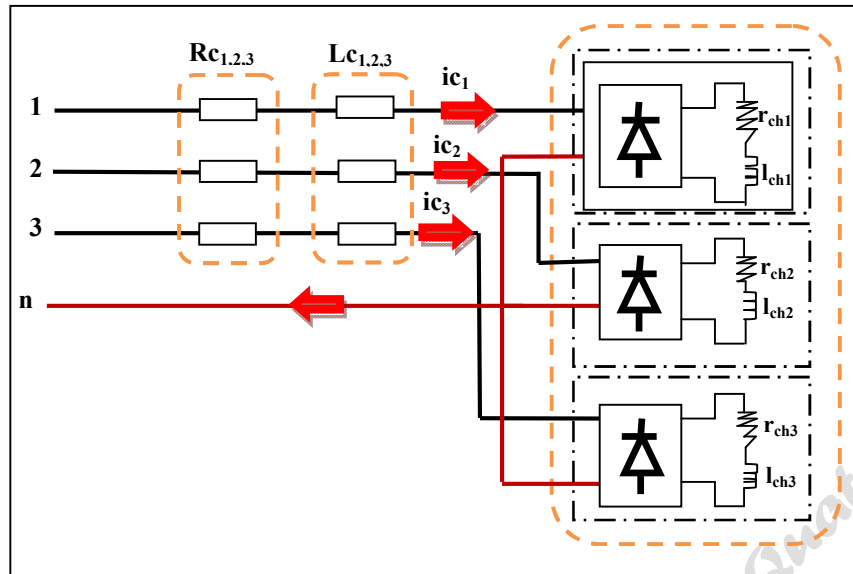


Figure II.9. Type de la charge.

➤ Résultats de simulation

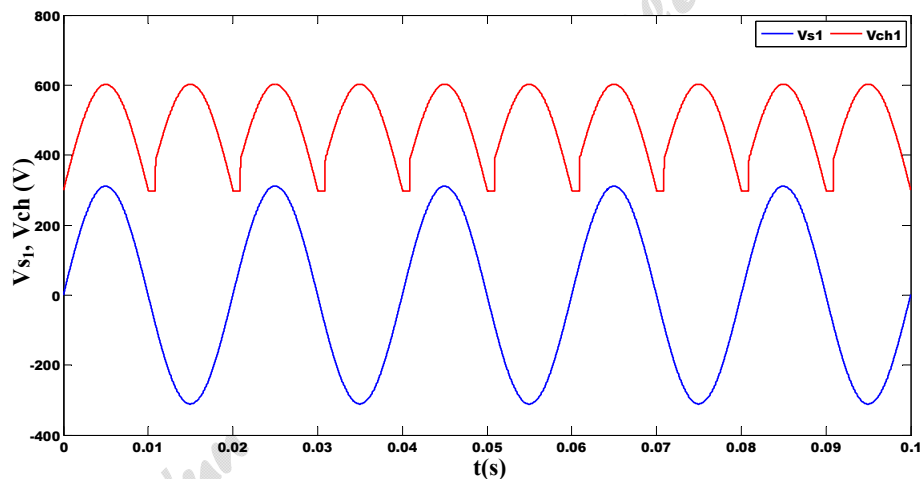


Figure II.10. Tension de source $V_{s1}(t)$, et la tension redressé $V_{ch}(t)$ de la première phase 1 (Avant filtrage).

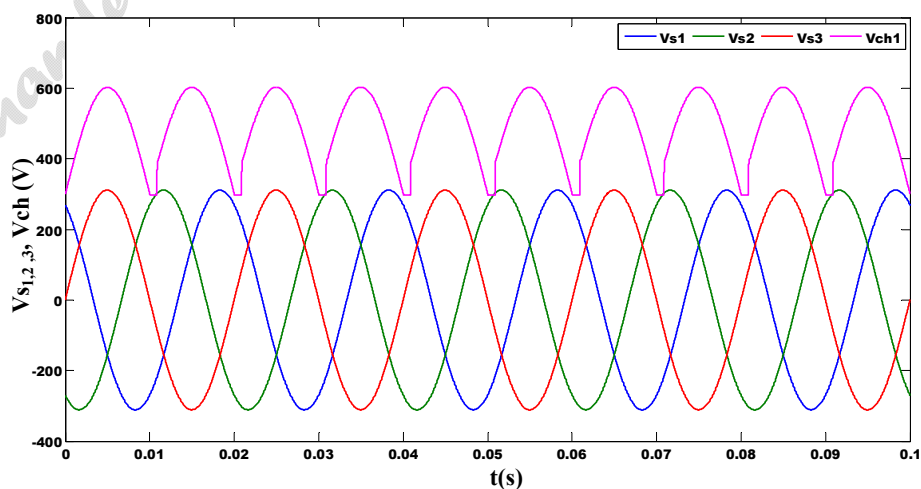


Figure II.11. Tension de source $V_{s1,2,3}(t)$, et la tension redressé $V_{ch}(t)$ de la première phase . (Avant filtrage).

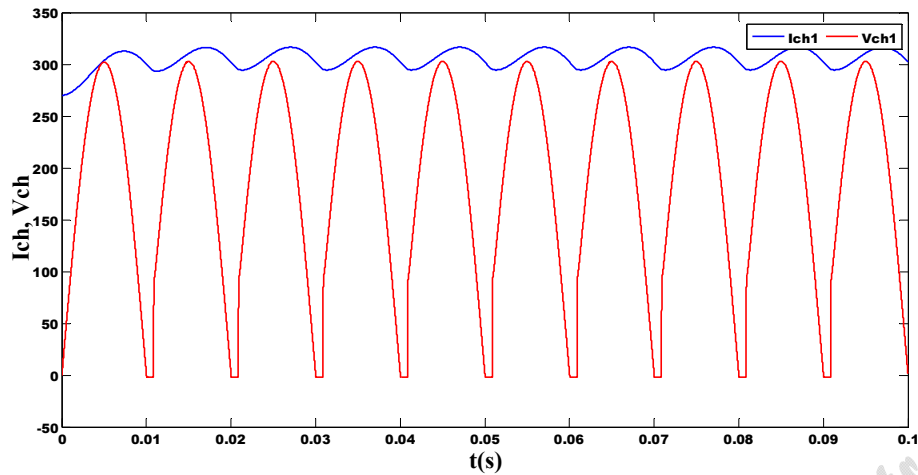


Figure II.12. Courant de charge $I_{ch}(t)$ et la tension redressé $V_{ch}(t)$ de la première phase 1. (Avant filtrage).

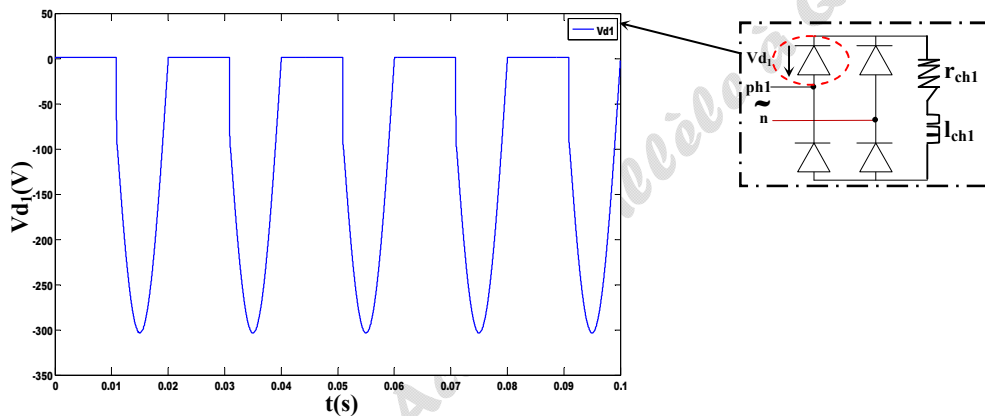


Figure II.13. Tension au borne de la diode $V_{d1}(t)$ de la première phase 1. (Avant filtrage).

- ✚ Les figures (II-10-11-12-13), montrent les résultats obtenus avec le pont à diode qui alimente une charge de type RL.
- ✚ D'après la figure II.12, illustre bien que pas de problème de discontinuité dans le cas des charges inductive (le courant est toujours continu).
- ✚ La figure II.13, montre la tension au borne de la diode V_{d1} de la première phase 1. (Avant filtrage).

II.5 Étude de la partie commande

II.5.1 Identification des courants polluant

L'identification du courant polluant est une étape essentielle dans le processus de commande des filtres actifs. A l'heure actuelle, les chercheurs continuent toujours à améliorer ces méthodes à fin d'obtenir des meilleurs résultats.

Le but du filtrage actif est la génération de courants harmoniques de même amplitude mais en opposition de phase avec ceux absorbés par la charge. Ainsi, le courant absorbé au réseau sera sinusoïdal. Il est donc nécessaire d'identifier avec précision les courants harmoniques de la charge polluante.[10]

Parmi toutes les méthodes présentées dans la littérature, dans ce chapitre la méthode d'identification des puissances instantanées avec un filtre d'extraction (Filtre Passe Bas (FPB)) habituellement utilisé sera développée pour être appliqué au filtre actif parallèle à quatre fils.

II.5.2 Identification par la méthode des puissances instantanées classique avec un Filtre Passe Bas (FPB)

La charge non linéaire absorbe un courant constitué d'une composante fondamentale et de composantes harmoniques. Le but du filtrage actif est la génération de courants harmoniques de même amplitude mais en opposition de phase avec ceux absorbés par la charge. Ainsi, le courant absorbé au réseau sera sinusoïdal. Il est ce nécessaire d'identifier avec précision les courants harmoniques de la charge polluante.

Akagi et al.[26] introduite la méthode de la puissance instantanée qui exploite la transformation de Concordia des tensions simples et des courants de ligne, afin de calculer les puissances réelle, imaginaire et homopolaire instantanées.

Elle permet de transformer la composante fondamentale en une composante continue et les composantes harmoniques en composantes alternatives. Cette transformation est nécessaire si on veut éliminer facilement la composante continue.

Le principe de la méthode de puissances réelle, imaginaire et homopolaire instantanées est énoncé ci-dessous.

Soient respectivement les tensions simples et les courants de ligne d'un système triphasé avec homopolaire, $V_{s1}(t)$, $V_{s2}(t)$, $V_{s3}(t)$ et $i_{s1}(t)$, $i_{s2}(t)$, $i_{s3}(t)$.

La transformation de Concordia permet de ramener ce système triphasé des axes **1-2-3** aux axes **α - β - o** , comme le montre les deux relations suivantes :

Pour la tension :

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

Pour le courant :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c1} \\ i_{c2} \\ i_{c3} \end{bmatrix}$$

(II.11)

La composante homopolaire de la tension source équilibrée, nous pouvons écrire alors :

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ V_{s3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

Remarque :

Il est à noter que le courant du neutre i_n et le courant homopolaire i_0 sont liés par la relation ci-dessous [10]:

$$i_n = i_{c1} + i_{c2} + i_{c3} \quad (\text{II.13})$$

$$i_0 = \frac{1}{\sqrt{3}} (i_{c1} + i_{c2} + i_{c3}) = \frac{1}{\sqrt{3}} i_n \quad (\text{II.14})$$

Dans le repaire de Concordia, la puissance réelle et la puissance imaginaire sont données par la matrice suivante :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

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

$$\begin{cases} p = \bar{p} + \tilde{p} \\ q = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad (\text{II.16})$$

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.

Notre objectif est de compenser les harmoniques de courant. Après isolation des composantes fondamentales en tension notées $\bar{V}_{\alpha,\beta}$, et des courants harmoniques $\tilde{i}_{\alpha,\beta}$.

Nous pouvons alors calculer les composantes alternatives des puissances réelle de (p) et imaginaire de (q) instantanées par: (l'équation II.19 devient) :

$$\begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{V}_{\alpha} & \bar{V}_{\beta} \\ -\bar{V}_{\beta} & \bar{V}_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_{\alpha} \\ \tilde{i}_{\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{II.17})$$

Les composantes harmoniques du courant $\tilde{i}_{\alpha,\beta}$ sont alors définies par : (inversion de l'équation II.17) :

$$\begin{bmatrix} \tilde{i}_{\alpha} \\ \tilde{i}_{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{V}_{\alpha} & \bar{V}_{\beta} \\ -\bar{V}_{\beta} & \bar{V}_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

Donc :

$$\begin{bmatrix} \tilde{i}_{\alpha} \\ \tilde{i}_{\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{(\bar{V}_{\alpha}^2 + \bar{V}_{\beta}^2)} \begin{bmatrix} \bar{V}_{\alpha} & -\bar{V}_{\beta} \\ \bar{V}_{\beta} & \bar{V}_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

Soit :

$$\tilde{i}_{\alpha} = \frac{\bar{V}_{\alpha}}{(\bar{V}_{\alpha}^2 + \bar{V}_{\beta}^2)} \tilde{p} - \frac{\bar{V}_{\beta}}{(\bar{V}_{\alpha}^2 + \bar{V}_{\beta}^2)} \tilde{q} \quad (\text{II.20})$$

$$\tilde{i}_{\beta} = \frac{\bar{V}_{\beta}}{(\bar{V}_{\alpha}^2 + \bar{V}_{\beta}^2)} \tilde{p} + \frac{\bar{V}_{\alpha}}{(\bar{V}_{\alpha}^2 + \bar{V}_{\beta}^2)} \tilde{q} \quad (\text{II.21})$$

Nous remarquons de ces équations que dans les expressions de i_{α} et de i_{β} la puissance homopolaire est absente.

Nous prenons :

$$i_{f\alpha}^{ref} = \tilde{i}_{\alpha}, i_{f\beta}^{ref} = \tilde{i}_{\beta}, \text{ et pour l'homopolaire : } i_{f0}^{ref} = i_0$$

Maintenant, il est aisé de remonter aux courants de référence par la transformation inverse de Concordia:

$$\begin{bmatrix} i_{f1}^{ref} \\ i_{f2}^{ref} \\ i_{f3}^{ref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{f\alpha}^{ref} \\ i_{f\beta}^{ref} \\ i_{f0}^{ref} \end{bmatrix} \quad (\text{II.22})$$

Avec :

$$i_0 = \frac{1}{\sqrt{3}} i_n = \frac{1}{\sqrt{3}} (i_{c1} + i_{c2} + i_{c3}) \quad (II.23)$$

Dans notre étude, nous avons choisi un filtre passe-bas du premier ordre dont le principe de fonctionnement est illustré dans la Figure II.14. Les deux types de filtre d'extraction sont présentés à la figure suivante [27] :

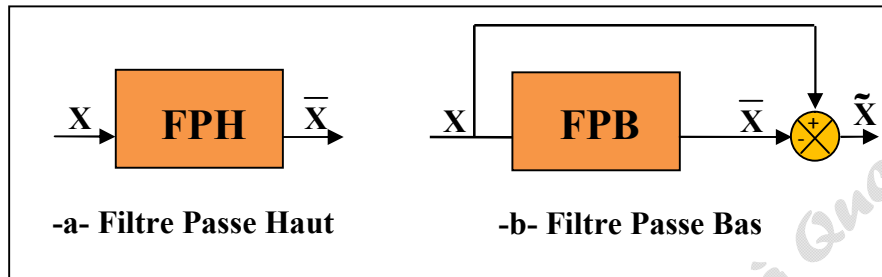


Figure II.14. Filtrés d'extraction.

Ces filtres d'extraction permettent d'obtenir une élimination plus ou moins satisfaisante de la composante continue, car leurs caractéristiques concernant le résidu harmonique sont différentes.

Le diagramme de blocs permettant de générer les courants de référence de l'équation (II.22) est représenté figure II.15.

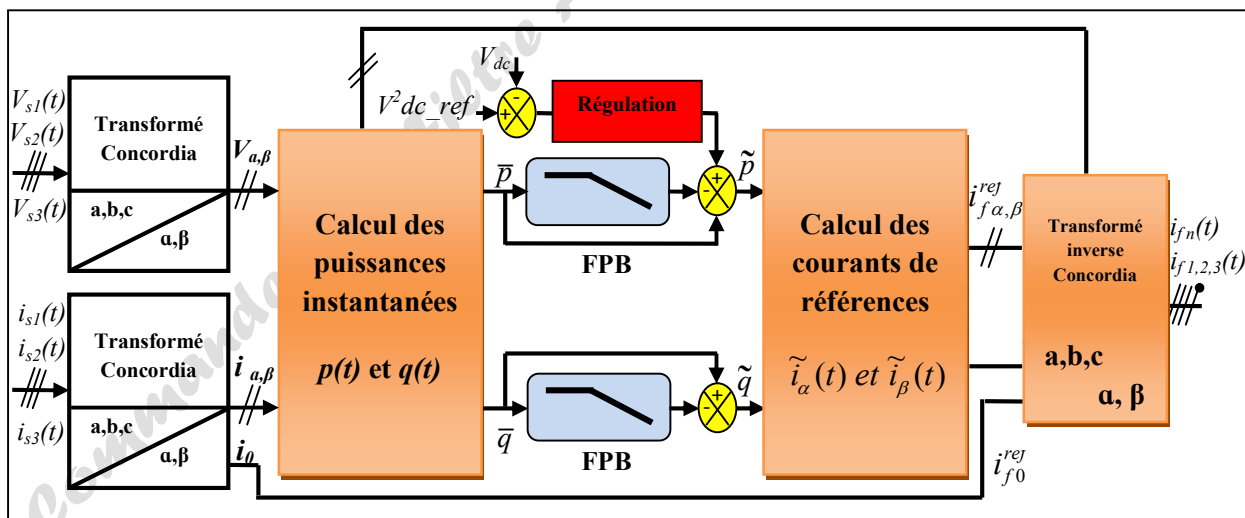


Figure II.15. Schéma de principe de la méthode des puissances instantanées avec FPB.

➤ Résultats de simulation

Les résultats présentés dans cette partie en ce qui concerne la section de la courant par la méthode d'identification filtre actif, ainsi le courant de références générée qui a été présentée dans la figure II.15.

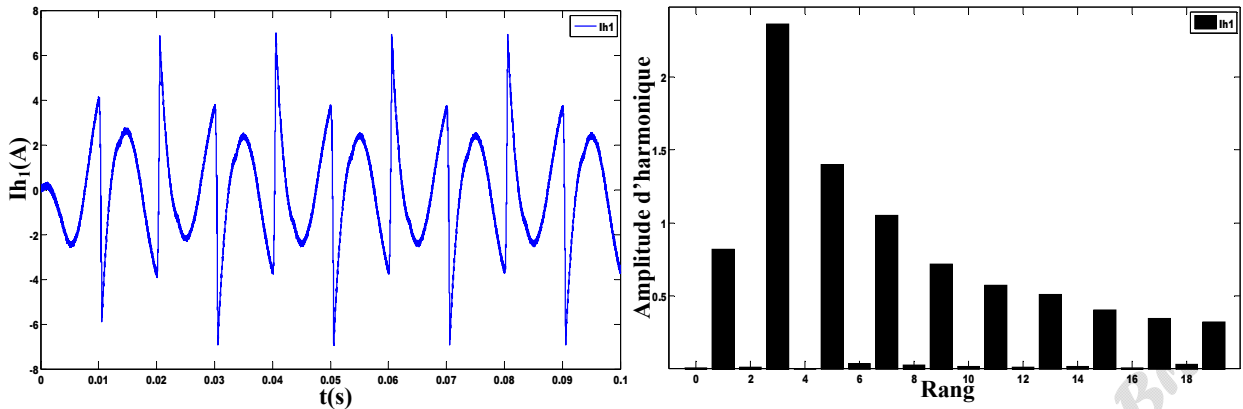


Figure II.16. Courant harmonique $I_{h1}(t)$ et son spectre de la première phase 1.

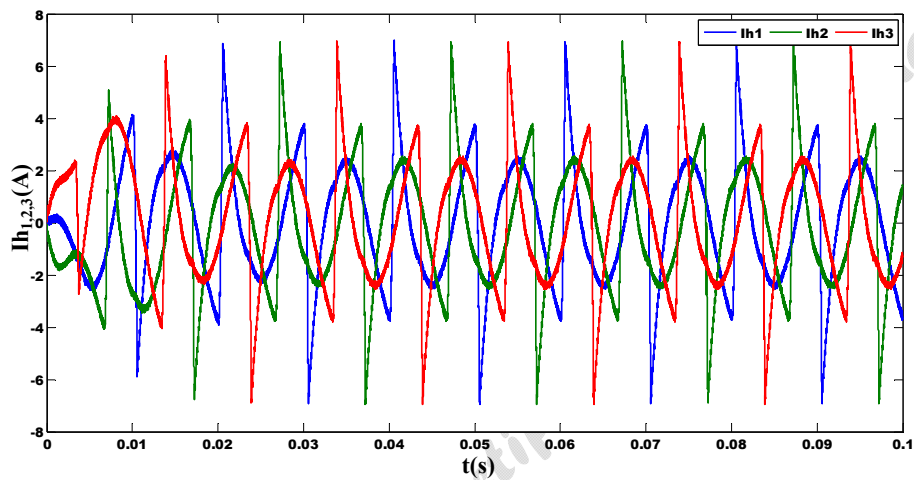


Figure II.17. Courant harmonique de trois phase $I_{h1,2,3}(t)$.

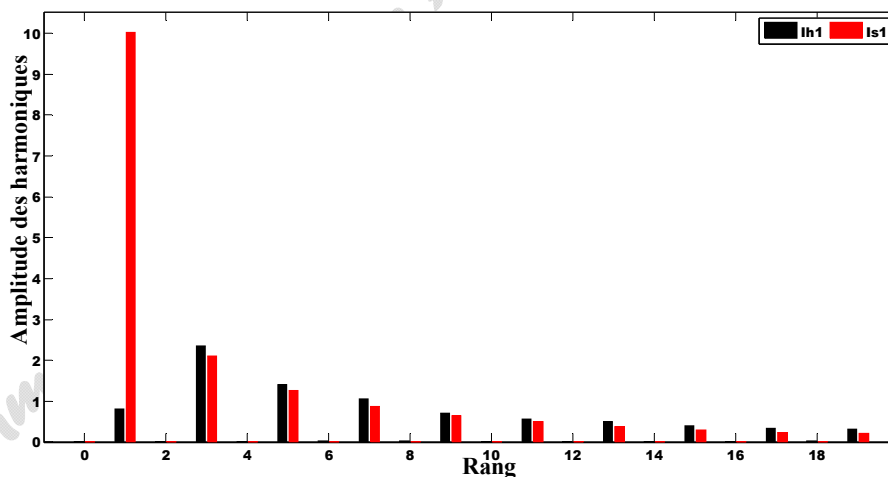


Figure II.18. Spectre des courants de source $I_{s1}(t)$ et d'harmonique identifié $I_{h1}(t)$. (Avant le filtrage).

La méthode d'identification des courants harmoniques se compose de différents blocs de calculs présentés dans la figure II.15.

Les figures II(16-17), présentent les courants harmoniques identifiés des trois phases générées par la méthode d'identification des courants harmoniques, ainsi le spectre de la première phase.

La figure II.18 ci-dessus montre la coïncidence entre le spectre de courant de source et le spectre du courant d'harmonique identifié, on remarque presque l'absence de la composante fondamentale du courant harmonique identifié par rapport à celle du courant de source.

D'après les figures (II.17-18), les courants de références sont bien identifiés par la méthode des puissances instantanées ce qui assure une bonne simulation. Ceci permet également d'injecter des courants harmoniques des onduleurs qui suivent les courants identifiés.

II.5.3 Régulation de la tension du bus continue

La régulation de la tension du bus continu du filtre actif peut être améliorée en ajustant le petit taux de puissance active s'écoulant dans le (les) condensateur(s), compensant ainsi les pertes par conduction et par commutation [28].

Afin d'assurer le rôle de source de tension continue, une régulation de cette tension est nécessaire. Pour cela, nous pouvons utiliser un régulateur PI. Si nous négligeons les pertes au niveau de l'onduleur et dans le filtre de sortie, la relation entre la puissance absorbée par le condensateur et la tension à ses bornes peut s'écrire sous la forme suivante [10,22,24].

La tension au borne de la capacité du bus continu est :

$$V_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} \int i_{dc} dt \quad (\text{II.24})$$

La puissance de la capacité est :

$$P_{dc} = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} C_{dc} V_{dc}^2 \right) \quad (\text{II.25})$$

En appliquant la transformation de la Laplace sur la relation (II.25), nous obtenient :

$$P_{dc}(s) = \frac{1}{2} s C_{dc} V_{dc}^2(s) \quad (\text{II.26})$$

D'après l'équation précédente, la tension aux bornes du condensateur est donnée par :

$$V_{dc}^2(s) = \frac{2P_{dc}(s)}{C_{dc}s} \quad (\text{II.27})$$

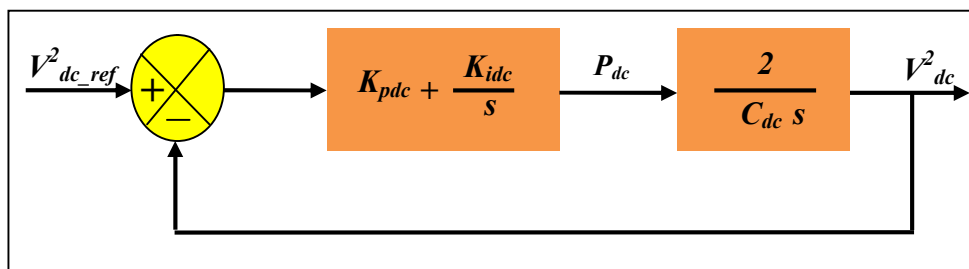


Figure II.19. Boucle de régulation de la tension continue.

D’après la figure II.19, la fonction de transfert représentant la régulation en boucle fermée de la tension continue est donnée par :

$$G_{BF} = \frac{(1 + \frac{K_{Pdc}}{K_{idc}} s)}{s^2 + 2 \frac{K_{Pdc}}{C_{dc}} + 2 \frac{K_{idc}}{C_{dc}}} \tag{II.28}$$

Comparant cette équation avec la forme générale d’une fonction de transfert de deuxième ordre,

on trouve : $K_{idc} = \frac{1}{2} C_{dc} \omega_c^2$ tel que : $\omega_c = 2\pi f_c$ et $K_{Pdc} = \zeta \sqrt{2 C_{dc} K_{idc}}$

En général, la régulation est stable, et ζ compris entre 0.4 et 0.8. ($f_c=50\text{Hz}$, $\zeta=0,707$).

II.5.4 Contrôle de l’onduleur par hystérésis

La commande conventionnelle par hystérésis est une commande non linéaire très couramment utilisée de par sa simplicité d’utilisation et sa robustesse. En fait, cette stratégie assure un contrôle satisfaisant du courant sans exiger une connaissance poussée du modèle du système à contrôler ou de ses paramètres. Il utilise l’erreur existant entre le courant de référence et le courant produit par l’onduleur, cette erreur est comparée à un gabarit appelé bande d’hystérésis, comme le montre la figure II.20.

Son principe qui consiste à établir dans un premier temps le signal d’erreur, différence entre le courant de référence i_h^{ref} et le courant produit par l’onduleur i_f . Cette erreur est ensuite comparée à un gabarit appelé bande d’hystérésis afin de fixer les ordres de commande des interrupteurs [21].

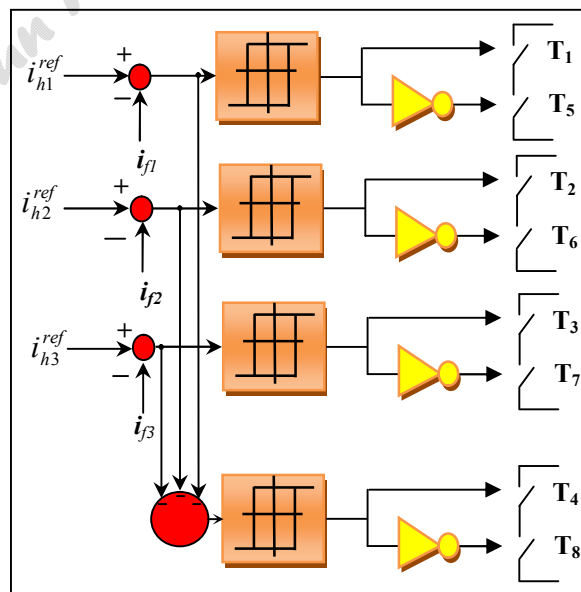


Figure II.20. Principe de la commande par hystérésis d’un onduleur à quatre bras.

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le principe de fonctionnement du filtre actif parallèle (FAP) de puissance où la structure générale du FAP qui constituées par l'identification des courants perturbés par la méthode de la puissance instantanée, la stratégie de commande de l'onduleur de tension, régulation de la tension continue et le dimensionnement de l'ensemble réseau, charge polluante et filtre actif parallèle dans la première partie du chapitre. Dans le prochain chapitre on présentera les résultats de simulation par Matlab/Simulink.

Commande D'un Filtre Actif Parallèle à Quatre Bras

Chapitre III
"Résultats de Simulations"

III.1 Introduction

Dans ce dernier chapitre, on présentera de simulation de l'ensemble réseau-FAP-charge non linéaire. L'objectif de FAP a quatre bras est compenser les courants harmoniques, ces améliorations peuvent être plus importantes par l'insertion d'une stratégie de commande. Cette stratégie est éliminer certaine rangs d'harmonique, ainsi que la réduction des perturbations conduites par les convertisseurs statique. Pour cela, on étudiera la stratégie de commande par hystérésis à bande fixe.

Dans les paragraphes suivants on propose d'étudier la simulation de l'ensemble réseau, charges polluantes, trois redresseurs monophasés, filtre actif parallèle à quatre fils sous l'environnement Matlab/Simulink. On donne ensuite les résultats de simulation obtenus, qui sont classés comme une solution de ce problème.

III.2 Simulation de l'ensemble de réseau (filtre actif parallèle et la charge non linéaire)

Pour évaluer cette travail, les programmes de simulation du système global (réseau électrique, FAP charge non linéaire) est effectuée sous l'environnement Matlab/Simulink qui permet de visualiser sur un intervalle de temps donné l'évolution des courants et de la tension.

La figure III.1 présente les différentes branches du circuit (l'ensemble réseau, filtre actif parallèle et charge polluante). La validité fonctionnelle du FAP à travers plusieurs simulations. Les valeurs des éléments caractérisant cette structure ont été regroupées dans le tableau III.1.

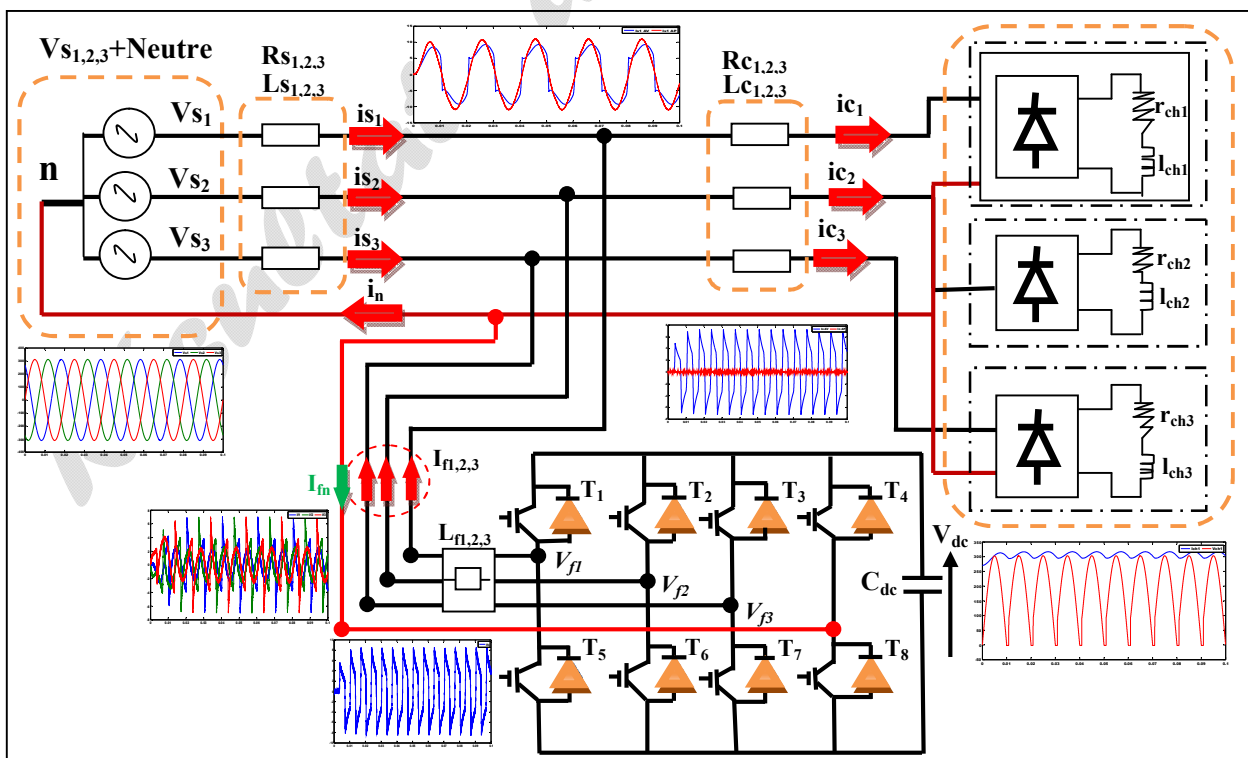


Figure III.1. Schéma synoptique de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle triphasé et charge polluante.

Tableau III.1. Valeurs des éléments caractérisant la structure étudiée

Réseau électrique	
$V_{\text{seff}}=220\text{V}$, 50Hz , $R_s=0.42\Omega$, $L_s=2.3*10^{-3}\text{H}$	
Charge non-linéaire	
$R_c=0.001\ \Omega$, $L_c=0.001\ \text{H}$	
Pont de graets alimentant une charge RL	
Charge identiques	Charge non-identiques
$r_{ch_{1,2,3}}=26\Omega$, $l_{ch_{1,2,3}}=0.09\text{H}$	$r_{ch_1}=26\Omega$, $l_{ch_1}=0.09\text{H}$ $r_{ch_2}=23\Omega$, $l_{ch_2}=0.1\text{H}$ $r_{ch_3}=30\Omega$, $l_{ch_3}=0.085\text{H}$
Filtre Actif parallèle (FAP)	
$L_f=0.003\ \text{H}$, $C_{dc}=1000*10^{-5}\ \text{F}$ et $V_{dc}=700\ \text{V}$. Bande d'hystérésis $\Delta H=0.02$	

Finalement, ces simulations nous permettront d'évaluer la performance et la rapidité de la méthode des puissances réelles et imaginaires instantanées avec la commande d'hystérésis pour deux types de charges identiques et non identiques.

III.3 Résultats des simulations (Simulation de l'ensemble source-charges non linéaires)

III.3.1 Cas de charges identiques

Dans ce premier cas nous avons pris un système de charges identique (équilibré), c'est la raison pour laquelle nous ne tracerons que la courbe du courant de source de la phase 1, ainsi que le spectre d'harmonique de cette phase, les deux autres phases ont la même courbe de courant et le même spectre d'harmonique que ceux de la première phase. Les résultats des simulations du système étudié sont présentés sur les figures suivantes :

 Avant

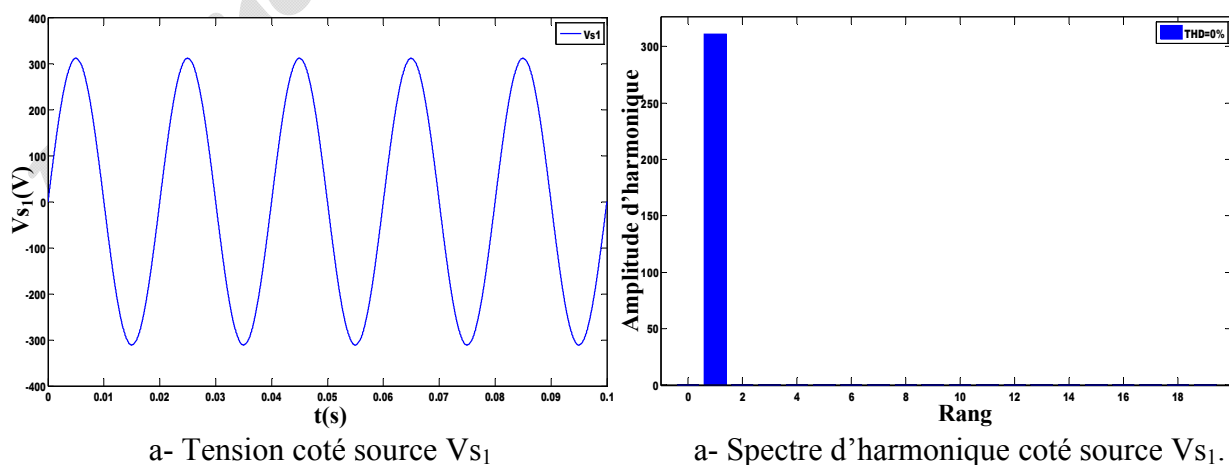


Figure III.2. Tension de la source V_{S1} et FFT du tension de source de la première phase 1.(Avant filtrage).

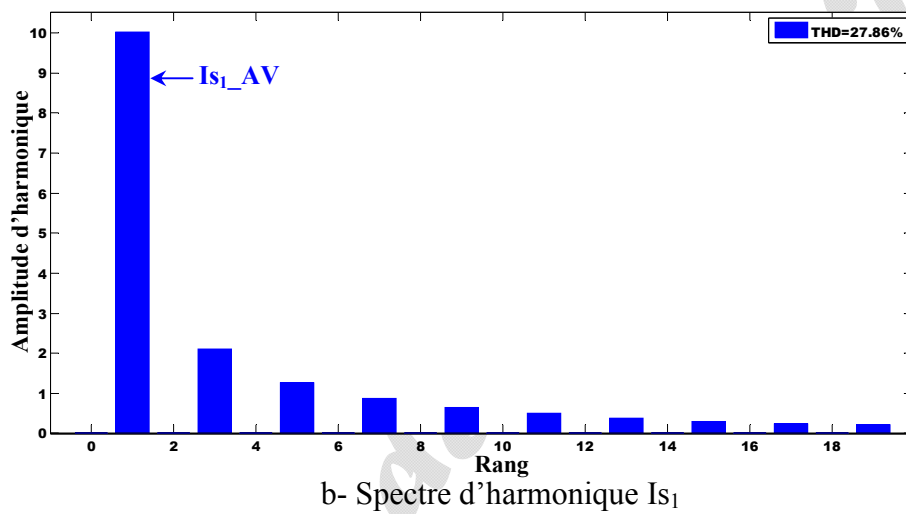
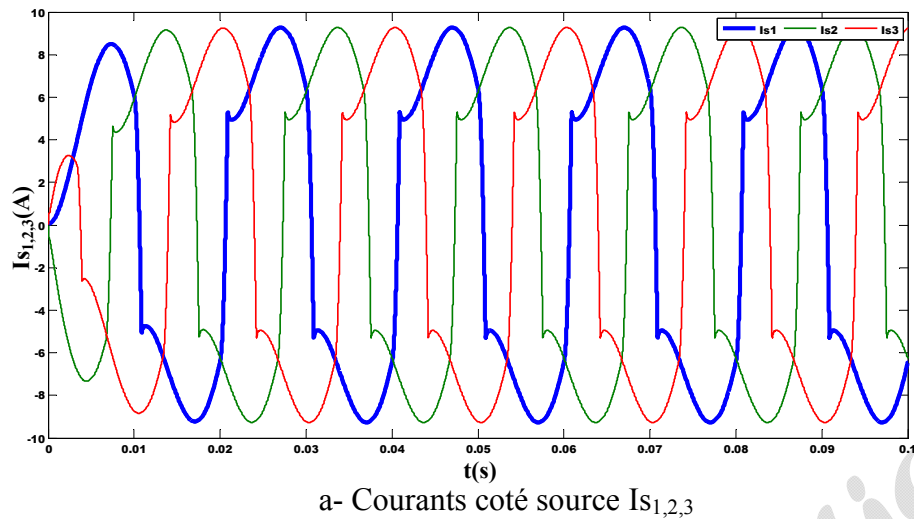
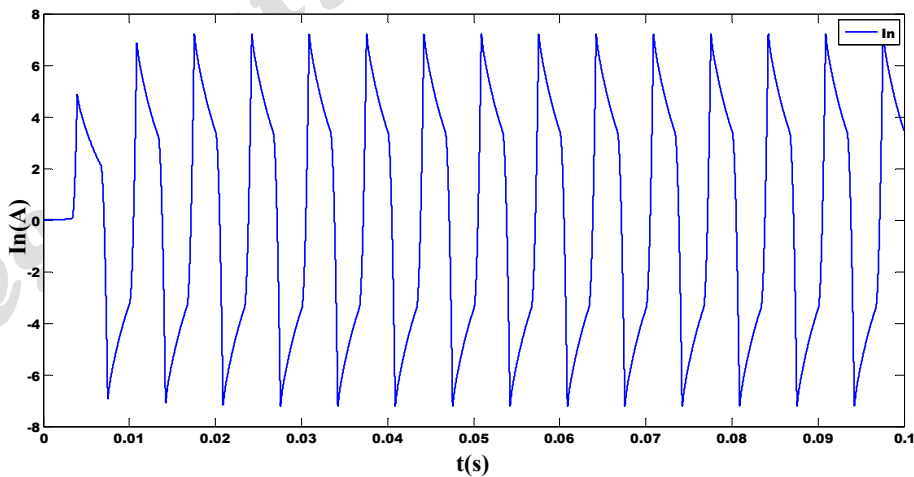


Figure III.3. Courants de la source $I_{s1,2,3}$ et FFT du courant de source de la première phase 1.(Avant filtrage).



Les figures ci-dessus montrent :

Le taux de distorsion d'harmonique a été mesurée sur cinq périodes entre l'instant 0 et 0.1 s, nous remarquons que pour la tension de source V_{s1} THD = 0% et pour le courant de source I_{s1} THD = 27.86%. Donc notre objectif est d'éliminer les harmoniques des courants.

- Un courant excessif dans le neutre à cause de surcharge importantes par la présence des courants d'harmonique.
- D'après le chapitre II on observe le courant du côté charge et du côté source sont confondus et déformés avec un THD = 27.86%. ($I_{s_{1,2,3}} = I_{c_{1,2,3}}$).

➦ Après, Maintenant, nous allons insérer le FAP.

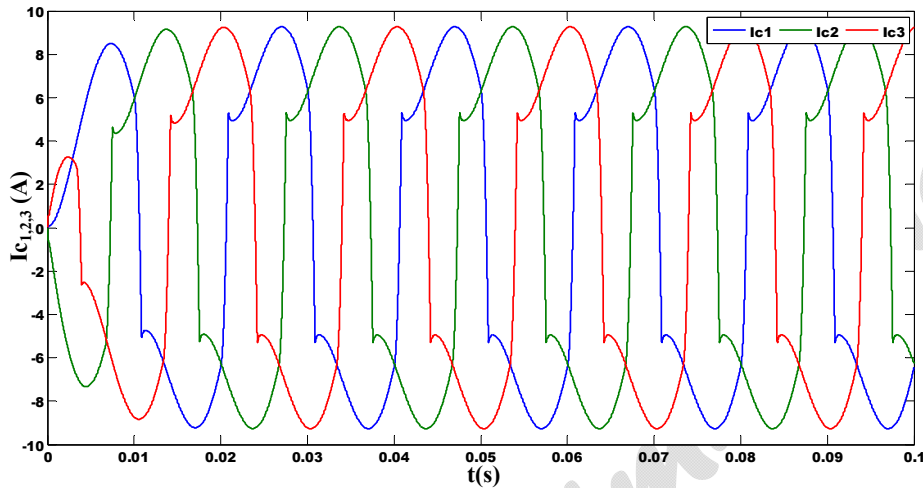
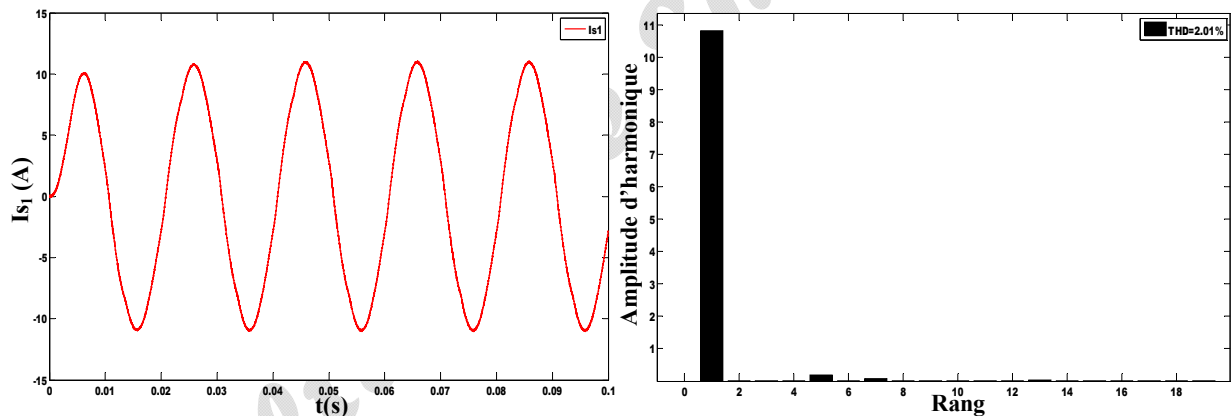


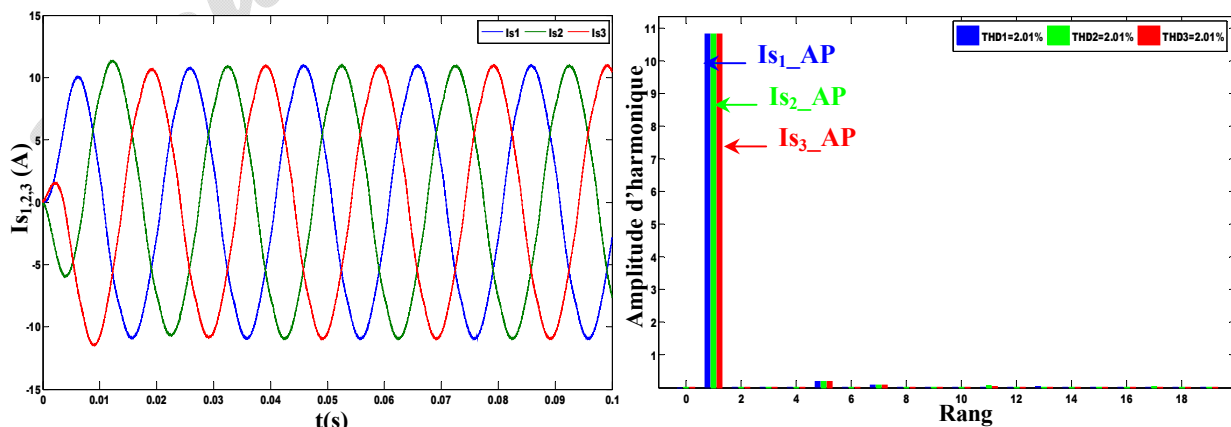
Figure III.5. Courants de la charge $I_{c_{1,2,3}}$ (Après filtrage).



a- Courant coté source I_{s_1}

b- Spectre d'harmonique I_{s_1}

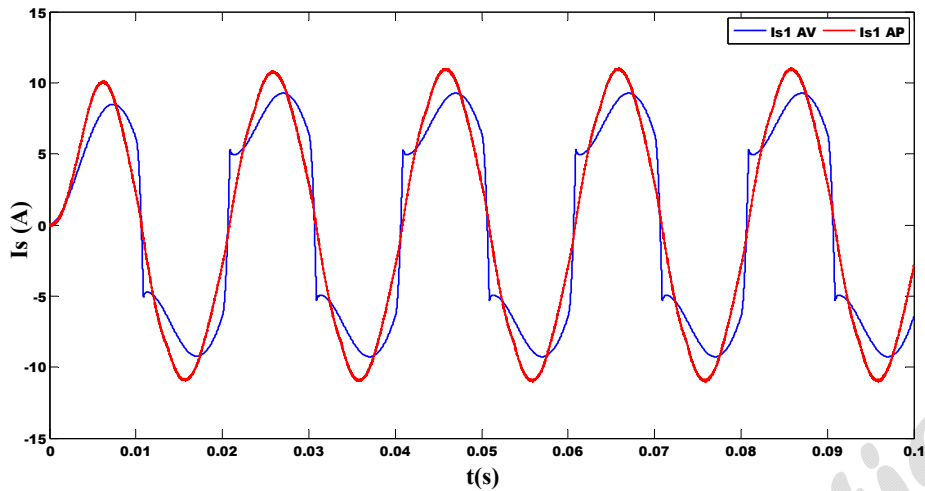
Figure III.6. Courant de la source I_{s_1} et son spectre. (Après filtrage).



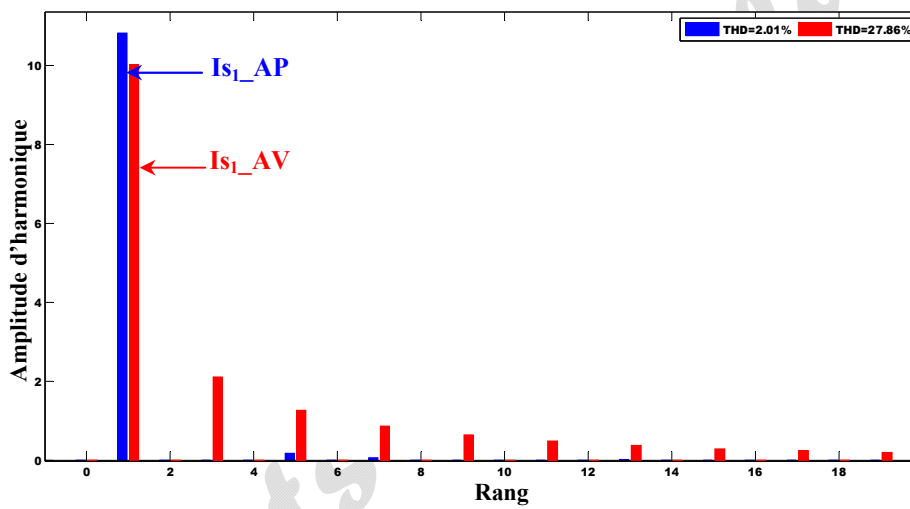
a- Courant coté source $I_{s_{1,2,3}}$

b- Spectre d'harmonique $I_{s_{1,2,3}}$

Figure III.7. Courants de la source $I_{s_{1,2,3}}$ et son spectres d'harmoniques des courants de source des trois phase 1,2,3. (Après filtrage).



a- Courant coté source I_{s1} avant et après filtrage.



b- Spectre d'harmonique coté source I_{s1} avant et après filtrage.

Figure III.8. Courants de la source I_s avant et après le filtrage et ses spectres d'harmoniques des courants de source de la première phase 1.

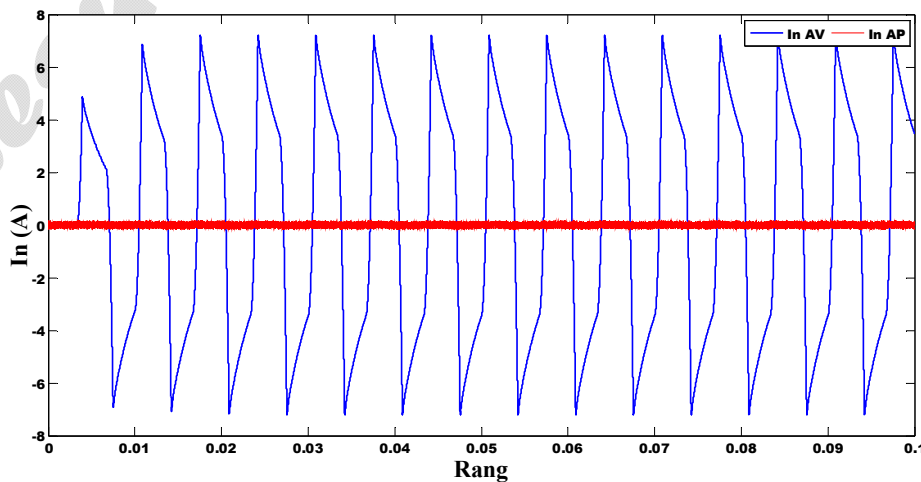


Figure III.9. Courants du neutre I_n avant et après le filtrage.

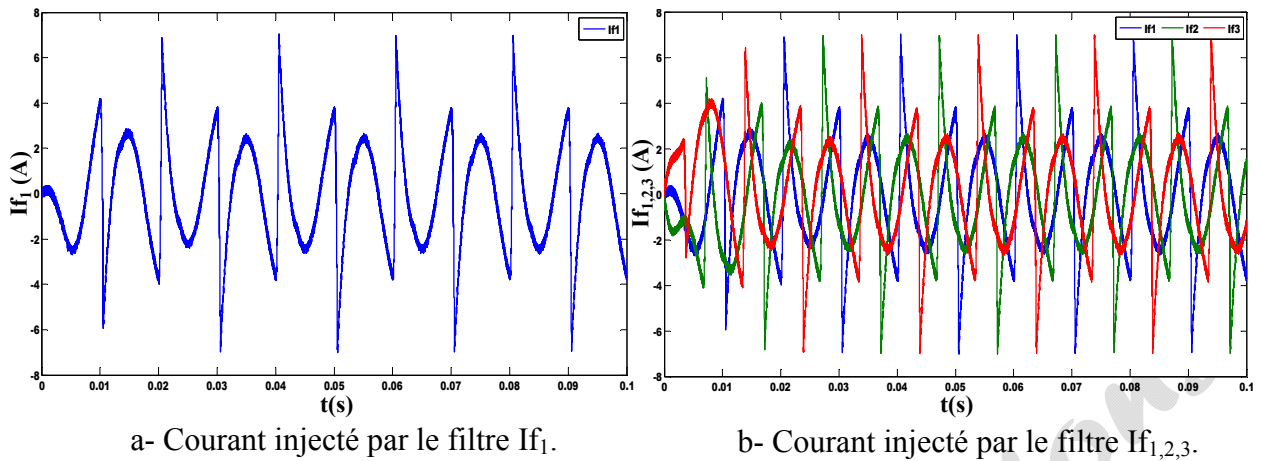


Figure III.10. Courants du filtre I_{f1} de la première phase et les courants de filtre des trois phases $I_{f1,2,3}$ injectées dans le réseau.

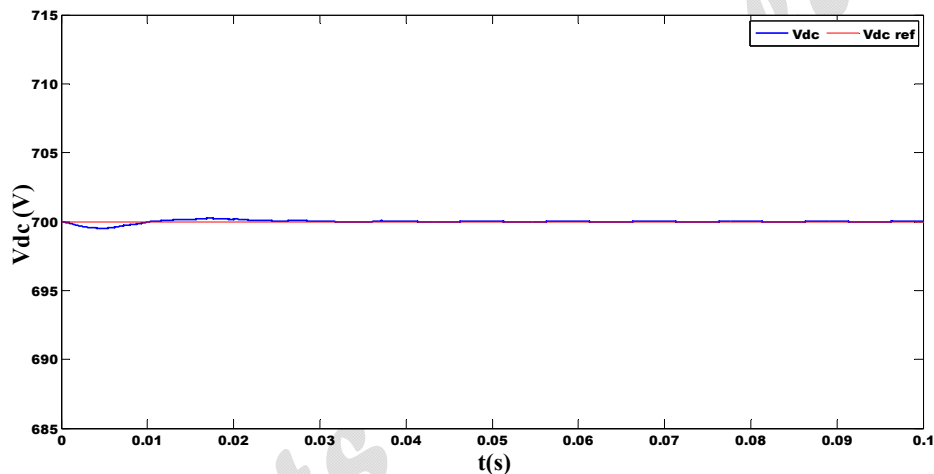


Figure III.11. Tension aux bornes du condensateur.

D'après les figures précédentes :

- Amélioration de la forme des courants de source I_{S1} après filtrage. (Sinusoïdal),
- Le taux de distorsion d'harmonique a été mesurée sur cinq périodes entre l'instant 0 et 0.1 s, nous remarquons que pour le courant de source I_{S1} THD = 2.01 %.
- Les forme des courants du côté charge $I_{c1,2,3}$ sont déformé par rapports la tension de source.(Après filtrage),
- Le courant du neutre côté source est aussi filtré, il est devenu pratiquement nul,
- La tension aux bornes du condensateur suite parfaitement sa référence de 700 V avec une léger chute de tension au début,
- Nous remarquons que le filtre actif de puissance a éliminer les perturbations de courant et a compenser l'énergie réactive de sorte que le courant a retrouver la forme sinusoïdale.

III.3.2 Cas de charges non-identiques

Dans ce deuxième cas nous avons pris un système de charges non-identiques par le FAP avec un onduleur à quatre bras.

On ne considère que les trois charges différentes alimentées par trois ponts redresseurs non commandées. On prend les valeurs selon le tableau III.1.

Les résultats de simulation du système étudié sont présentés sur les figures suivantes :

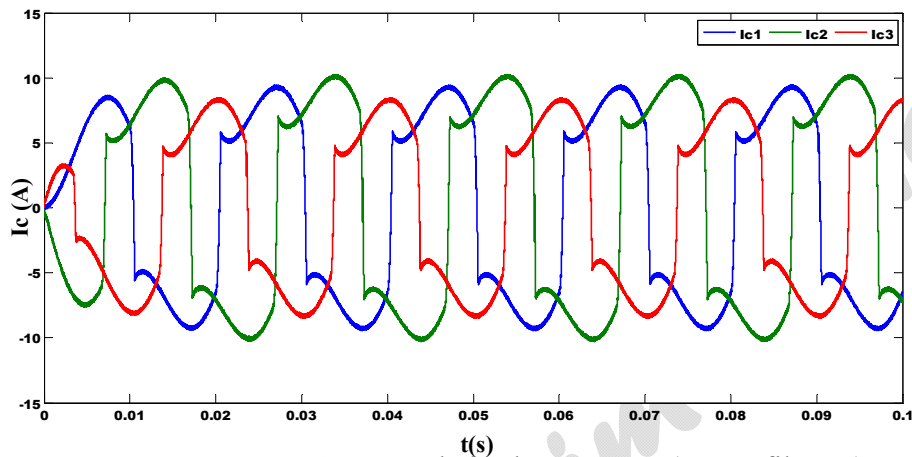


Figure III.12. Courants de la charge $I_{c1,2,3}$ (Après filtrage).

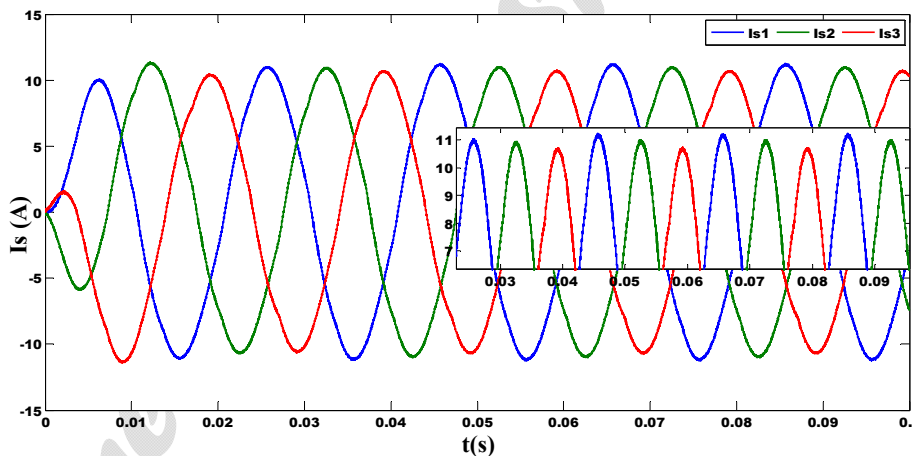
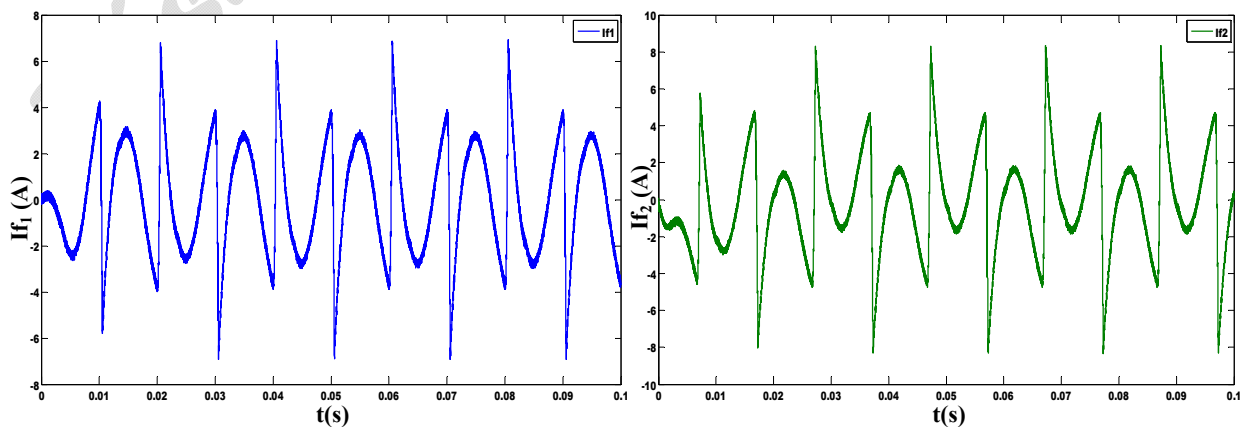
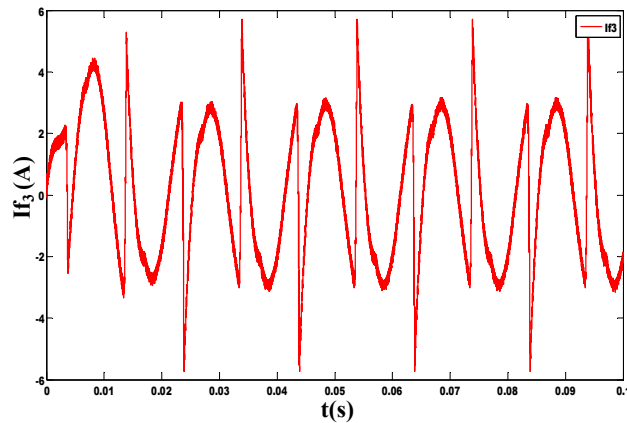


Figure III.13. Courants de la charge $I_{s1,2,3}$ (Après filtrage).



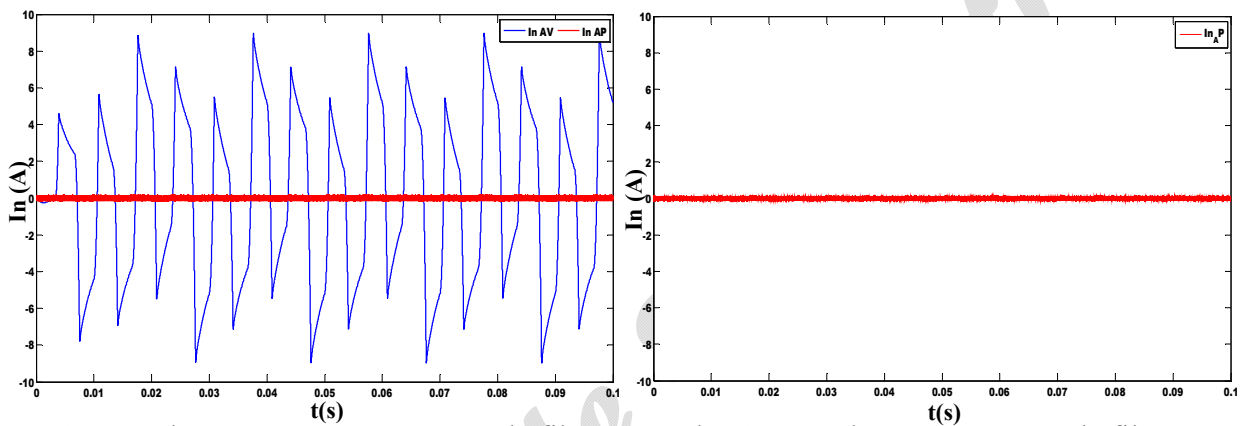
a- Courant injecté par le filtre I_{f1} .

b- Courant injecté par le filtre I_{f2} .



c- Courant injecté par le filtre I_{f3} .

Figure III.14. Courants $I_{f1,2,3}$ injectés dans le réseau.



a- Courant du neutre I_n avant et après le filtrage

b- Courant du neutre I_n après le filtrage.

Figure III.15. Courants du neutre avant et après le filtrage.

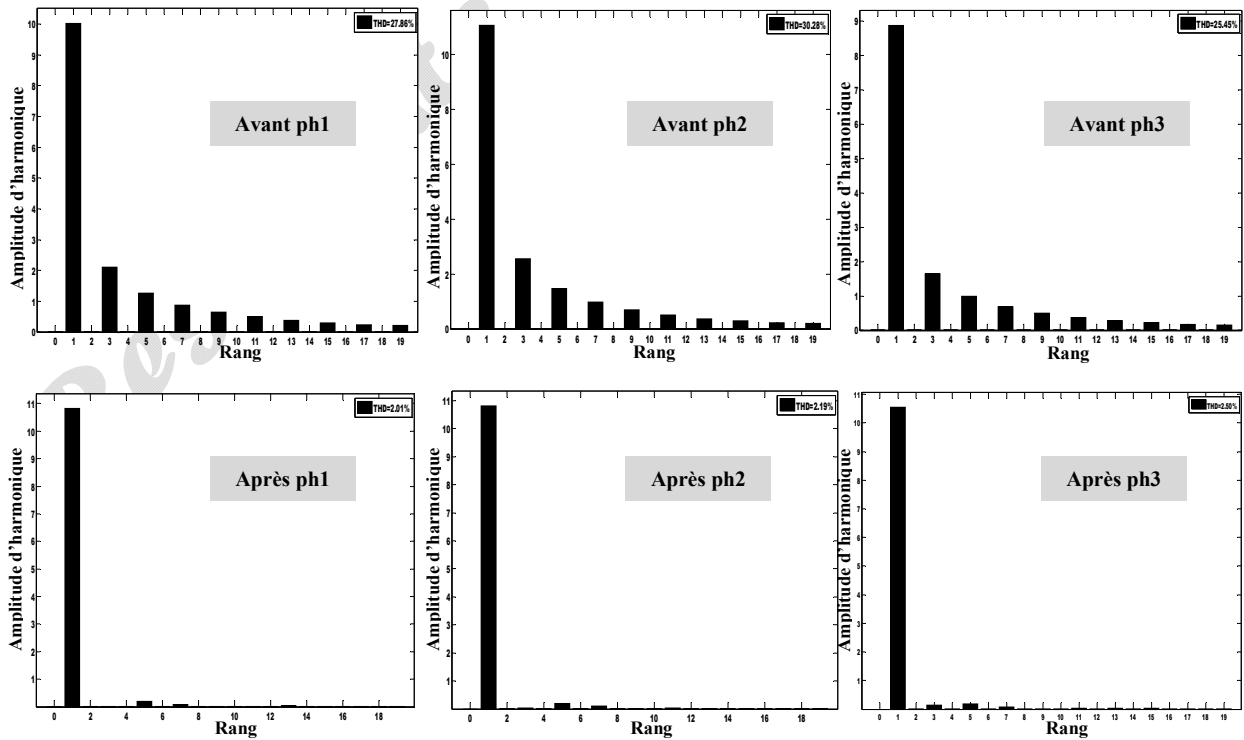


Figure III.16. Spectres d'harmonique après et avant le filtrage (3 phases respectivement $I_{s1,2,3}$)

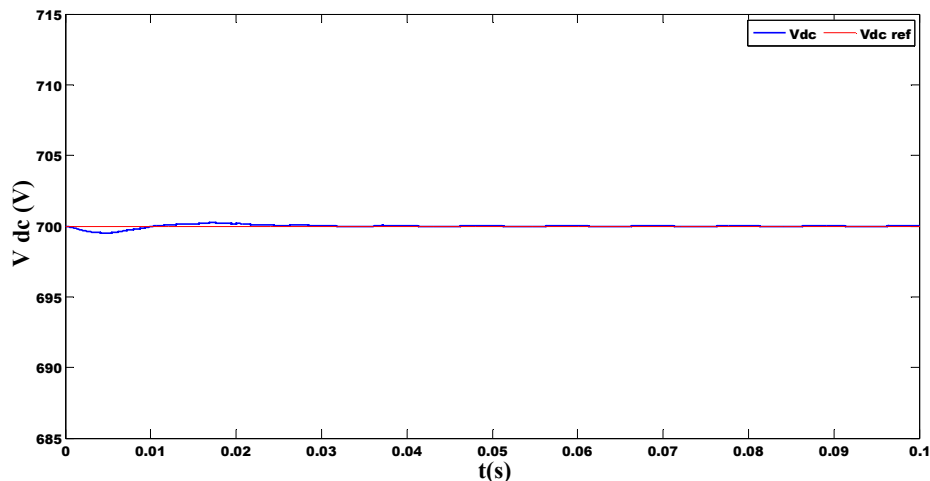


Figure III.17. Tension aux bornes du condensateur

D'après les résultats obtenus dans le cas d'une charge non-identiques :

- Nous remarquons que les harmoniques de courant ont été compensés pour chacune des phases, même la troisième phase, également le déséquilibre de courant a été nettement atténué.
- Nous observons que les perturbations de courant de source ont été éliminées, ainsi on constate clairement la compensation de l'énergie réactive, (car on observe le courant retrouver sa forme sinusoïdale) après l'injection du courant de filtre illustré par les courbes de la figure III.14.
- Montre que les forme générale des courants de la source après le filtrage est sinusoïdales, le taux de distorsion d'harmonique a été mesurée sur cinq périodes, avant filtrage :

- $\text{THD}(I_{s1})=27.86\%$,
- $\text{THD}(I_{s2})=30.28\%$,
- $\text{THD}(I_{s3})=25.45\%$,

et après filtrage :

- $\text{THD}(I_{s1})=2.01\%$,
- $\text{THD}(I_{s2})=2.19\%$,
- $\text{THD}(I_{s1})=2.50\%$.

Donc le THD est bien inférieur à 5 % (la limite maximale admissible par la norme IEEE qui est 5 %).

- Le courant du neutre nul après le filtrage pour assurer la protection du conducteur du neutre,
- La tension aux bornes du condensateur est toujours suite parfaitement sa référence de 700 V.

III.3.3 Etude de courant de neutre

Les figures ci-dessous présentent le courant du neutre et son spectre d'harmoniques avant et après filtrage, ainsi le courant injecté dans le neutre I_{f_n} et son spectre d'harmonique, on prend un système de charges identiques pour $R_{d1,2,3}=26 \Omega$, $L_{d1,2,3}=90 \text{ mH}$.

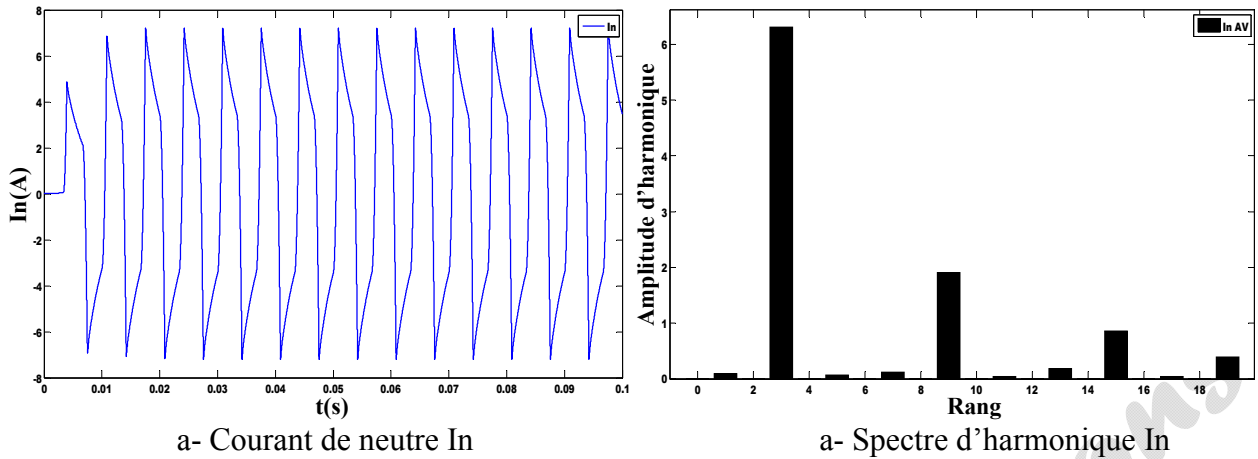


Figure III.18. Courant dans le neutre I_n et son spectre d'harmonique (avant filtrage).

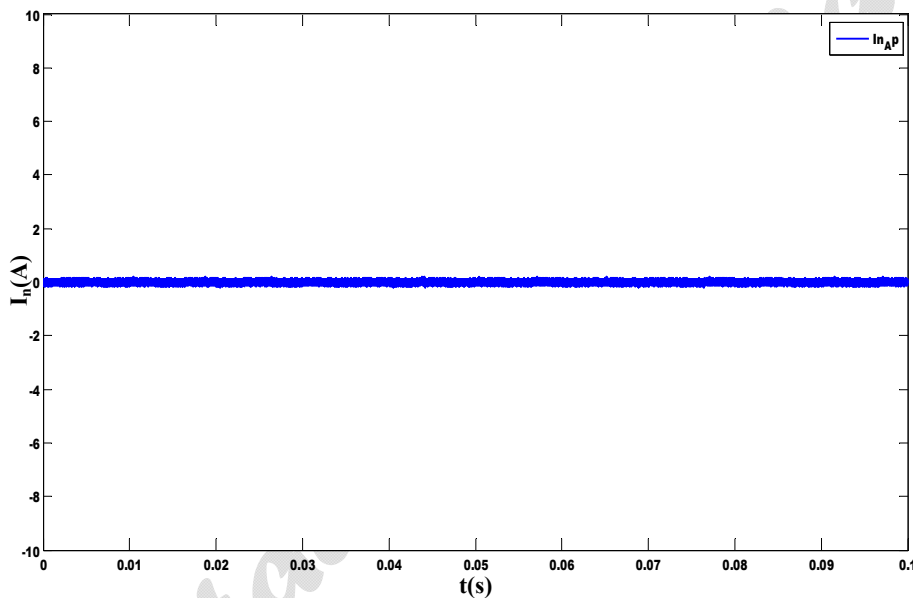


Figure III.19. Courant du neutre I_n après le filtrage.

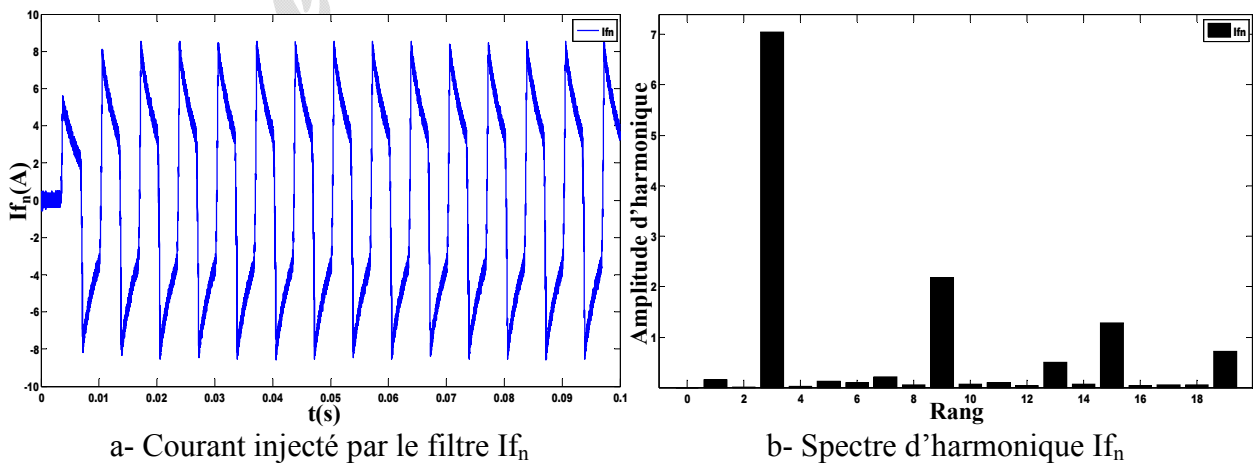


Figure III.20. Courant du neutre I_{f_n} injecté par le filtre et son spectre d'harmonique.

D'après les résultats nous observons :

- D'après les commentaires précédents, le courant de neutre est plein de courant d'harmonique excessif, (avant filtrage),
- Le spectre d'harmoniques du neutre contient les harmoniques 3, 9, 15 et 19. Le courant harmonique d'ordre 3 est dominant, il est de 63 % du fondamental de la source, le courant harmonique d'ordre 9 est moins dominant, il est de 19 % du fondamental de la source, le courant harmonique d'ordre 15 est faible, il présente 8.6 % du courant fondamental de la source, et le courant harmonique d'ordre 19 est le plus faible, il présente 3.9 % du courant fondamental de la source.
- Après l'injection du courant de filtre illustré par la courbe de la figure III.20, le courant total du neutre est pratiquement nul.

III.3.4 Etude comparative (charge identique et non-identique)

D'après les résultats des différentes série de simulations pour la technique de commande utilisé, il est rationnel de faire un récapitulatif des résultats obtenus pour nous permettre d'effectuer une étude comparative entre le cas charge identique et non-identique utilisées par rapport aux THD des courants de source.

Tableau III.2. THD de la technique appliquée au système identique et non-identique.

	Charge identique		Charge non-identique	
	Méthode de la puissance instantanée avec FPB		Méthode de la puissance instantanée avec FPB	
	THD (%) avant filtrage	THD (%) après filtrage	THD (%) avant filtrage	THD (%) après filtrage
Phase 1	27.86	2.01	27.86	2.01
Phase 2			30.28	2.19
Phase 3			25.45	2.50

Lorsque notre système est identique ou non-identique en charge, nous remarquons que la méthode des puissances instantanée avec un FPB avec une charge équilibré (identique) donne le meilleur résultat vu que son THD est le plus faible.

III.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la simulation de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle et charge polluante, nous avons présenté et commentée les résultats de simulation du FAP à quatre fils, ainsi le filtrage était très bon dans les différents cas examinés. La méthode des puissances réelles et imaginaires instantanées a été utilisée pour générer les courants de

références. La méthode d'identification utilisée s'adapte bien aux variations de la charge non linéaire.

D'après les résultats de simulation nous remarquons que :

- Les courants du côté source sont sinusoïdaux presque dépourvus d'harmonique, et leurs THD sont présentés dans le tableau III.2,
- Le courant du neutre côté source est aussi filtré, il est devenu pratiquement nul.
- La méthode d'identification utilisée s'adapte bien aux variations de la charge (identiques et non-identiques).

Résultats de Simulations

" Conclusion Générale "

Conclusion Générale

Le travail de recherche exposé dans cette mémoire a fait l'objectif d'une compensation des harmoniques dans un réseau électrique public basse tension sous l'environnement Matlab /Simulink.

Notre travail s'articule autour de trois chapitres dont le premier chapitre, nous avons présenté deux solutions (solutions traditionnelles et modernes utilisées pour dépolluer les réseaux électriques) pour le problème de la circulation des forts courants réactifs dans les réseaux de distribution. On peut conclure d'après la solution traditionnelle que l'intégration des batteries de condensateur dans la structure des réseaux électriques, permet le contrôle du transit de la puissance active et réactive, ce qui permet une meilleure gestion de l'énergie et une amélioration des indices de qualité de l'énergie électrique. Les résultats obtenus par notre programme sous l'environnement (MATLAB), montre clairement l'avantage d'intégrer des dispositifs de compensation de l'énergie réactive et les courants harmoniques.

Dans le deuxième chapitre, nous nous sommes focalisés sur le fonctionnement et la structure du FAP à quatre bras comme une solution moderne de dépollution des réseaux électriques à quatre fils. Cette structure est divisée en deux parties : la partie puissance constituée de l'onduleur de tension à quatre bras, la source d'alimentation et le type de la charge utilisée dans notre étude. La deuxième partie est la partie commande incluant l'identification par la méthode des puissances instantanées classique avec un Filtre Passe Bas (FPB) et la régulation du courant injecté sur le réseau. Ainsi, nous avons présenté la modélisation et la simulation de la source d'alimentation, la charge polluante, ainsi la méthode d'identification des harmoniques.

Dans le troisième chapitre, on a étudié la simulation de l'ensemble réseau, charge non linéaire et le filtre actif parallèle à quatre fils sous l'environnement Matlab/Simulink.

D'après les résultats de simulation nous remarquons que :

- ✚ Les résultats obtenus avec la topologie à quatre bras lorsqu'elle est utilisée dans un FAP donnent toujours de meilleurs résultats car l'onduleur à quatre bras pilote les trois courants de phase et celui du neutre,
- ✚ Les courants du côté source sont sinusoïdaux presque dépourvus d'harmonique et le courant dans le fil neutre côté source est devenu nul,
- ✚ On note que la commande hystérésis à bande fixe nous a permis d'obtenir des meilleurs résultats, et cela est montré à travers un très faible THD obtenu,

✚ Nous remarquons une réduction remarquable du contenu harmonique du courant de source, ce qui se traduit par la diminution du THD après le filtrage bien en dessous de 5%, dans les deux cas étudiés (charge identiques et non-identiques) et permet de rendre le courant du neutre qui est la somme des courants des trois phases nul, et la source se comporte alors comme un système équilibré,

✚ Le courant total du neutre est pratiquement nul.

Comme perspectives visées à ce modeste travail un ensemble de points peuvent être traités :

✚ Nous espérons dans le futur faire des essais pratiques sur ce type de filtre, dans notre laboratoire LGE de M'sila, qui va permettre de valider les résultats obtenus par simulations.

✚ L'utilisation d'autres techniques de commande de dans la commande du filtre actif parallèle.

Conclusion Générale

"Références Bibliographique"

Références Bibliographique

Références Bibliographique

- [1] **S. Ouchen**, "Contribution à la Commande Directe de Puissance Dédiée au Filtrage Actif, Associé à une Source Photovoltaïque", Thèse de doctorat LMD, département génie électrique, Université de Biskra, 2017.
- [2] **Jianhong XU**, "filtrage actif parallèle des harmoniques des réseaux de distribution d'électricité", These de doctorat, Génie électrique, l' Institut National Polytechnique de Lorraine, France, Janvier 1994.
- [3] **I. choudira, A. Telli**, " Commande par logique floue d'un filtre actif parallèle avec correction du facteur de puissance ", Mémoire de master, département de génie électrique, Université de M'sila, juin 2017.
- [4] **Ph. Ferracci**, Cahier technique n° 199, La qualité de l'énergie électrique, <http://www.surprises.ch/HT/annexes/CT-199.pdf>
- [5] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Harmonique_\(%C3%A9lectricit%C3%A9\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Harmonique_(%C3%A9lectricit%C3%A9))
- [6] <http://circuitor.com/fr/produits/articles-en-vedette/4628-harmoniques-origine-effets-et-solutions>
- [7] https://fr.electrical-installation.org/frwiki/Origine_des_harmonique
- [8] <http://www.electromagazine.ch/fr/perturbations-harmoniques/>
- [9] https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=Technical+leaflet&p_File_Name=DBTP152GUI_FR+%28web%29.pdf&p_Doc_Ref=DBTP152GUI_FR
- [10] **H. Salem**, "Commande d'un Filtre actif parallèle à quatre bras par des techniques avancées", Mémoire de magister, Département de génie électrique, Université de Biskra, 2015.
- [11] **S. Hammou**, "Compensation de l'énergie réactive d'une installation industrielle MT/BT (HTA/BTB)", Mémoire de Master, département de génie électrique, Université de M'sila, juin 2016.
- [12] **B. Laiadi, M.S. Krekir**, "Compensation dynamique de l'énergie réactive dans les réseaux électrique", Mémoire d'Ingénieur d'Etat, département d'Electrotechnique, Université de Biskra, Juin 2005.
- [13] **Théodor Wildi**, "Électrotechnique 4^{ème} édition", Chapitre 46, Transport de l'énergie électrique, 1999.
- [14] S. Hadjeri, "ETL 438 Analyse des réseaux de transport et de distribution", Cours de 4^{ème} années électrotechnique option : réseaux électrique, université de sidi bel abbés.
- [15] **C. Hantouche**, "Condensateur de puissance", Technique d'ingénieur D 4710, juin 1996.
- [16] **O. Moussa**, "Etude des harmoniques et techniques de commandes du filtre actif", mémoire de magister, département d'Electrotechnique, Université de Batna2, juin 2016.
- [17] https://pmb.univ-saida.dz/butecopac/doc_num.php?explnum_id=272
- [18] **A. Telli, I. Choudira**, "Commande par logique floue d'un filtre actif parallèle avec correction du facteur de puissance", Mémoire de Master, département de génie électrique, Université de M'sila, juin 2017.
- [19] **N. Reguig, B. Herizi**, " Commande et diagnostic d'un filtre actif parallèle ", Mémoire de master, département de génie électrique, Université de M'sila, juin 2018.
- [20] **M. Amroune**, "Etude et Simulation d'un Filtre Actif de Puissance", Mémoire de master, département de génie électrique, Université de M'sila, juin 2016.
- [21] **A. Omeiri**, "Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant", thèse de doctorat d'état, département d'électrotechnique, Université de Annaba, 2007.
- [22] **M Tidjani**, "Stratégies de Commande d'un Filtre Actif Parallèle à Quatre Fils", Thèse de Magistère, département d'électrotechnique, centre universitaire d'el-oued, 2012.

- [23] **F Hamoudi**, "Contribution aux stratégies de commande avancées d'un filtre actif shunt à quatre fils", Thèse de doctorat de l'université de Batna, 2012.
- [24] **S. Ben Ali, S. Bouhanak**, "Etude et simulation d'un filtre actif parallèle a quatre fils", Mémoire de master, Département de génie électrique, Université d'el-oued, 2015.
- [25] **K.Khelifi, M. Tienti**, " Etude comparative de techniques d'extraction de courants de référence pour un filtre actif parallèle à quatre bras", Département d'électrotechnique, Université de Tlemcen, 2017.
- [26] **H. Akagi, S. Ogasawara and H. Kim**. "The Theory of Instantaneous Power in Three-Phase Four-Wire Systems and its Applications", Electrical engineering in Japan, V.135, p. 74-86, 2001.
- [27] **M. M. Abdusalam**, "Structures et Stratégies de Commande des Filtres Actifs Parallèle et Hybride avec Validations Expérimentales", Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré-Nancy-I-France, 2008.
- [28] **H. Djeghloud**, "Filtrage actif de puissance", Thèse de doctorat, Département d'électrotechnique, Université mentouri constantine, 2007.

Références Bibliographique