



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Electrotechnique
Réseau électrique

Réf. :

Présenté et soutenu par :
KIAS Samiha

Le : samedi 6 juillet 2019

Etude et simulation de filtre actif parallèle de puissance

Jury :

Dr	CHANOUFI Halim	MAA	Université de Biskra	Président
Mme	ABDEDDAIM Sabrina	MCA	Université de Biskra	Encadreur
Dr	CHARROUF Omar	MCB	Université de Biskra	Examinateur

Année universitaire : 2018 - 2019

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière: Electrotechnique
Option: Réseaux électrique

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:

MASTER

Thème

Etude et simulation de filtre actif parallèle de puissance

Présenté par :

KIAS Samiha

Avis favorable de l'encadreur :

Mme ABDEDDAIM Sabrina

Avis favorable du Président du Jury

Dr . CHANOUI Halim

Cachet et signature

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Electrique

Filière: Electrotechnique

Option: Réseaux électrique

Thème :

Etude et simulation de filtre actif parallèle de puissance

Proposé et Dirigé par : Mme. ABDEDDAIM Sabrina

RESUMES (Français et Arabe)

Résumé: Les charges non linéaires absorbent des courants non sinusoïdaux, consomment de la puissance réactive et génèrent des perturbations qui perturbent et dégradent les équipements liés au réseau. Dans ce travail, nous avons utilisé le filtre actif parallèle comme solution pour éliminer les perturbations et les harmoniques de la charge non linéaire par les simulations MATLAB/SIMULINK. Une commande en courant permet de monter de bonnes performances pour le filtre actif parallèle par rapport aux solutions traditionnelles tel que les filtres passifs.

Mot clés: Les charges non linéaires -la puissance reactive- des perturbations - le filtre actif parallèle - les harmoniques -les filtres passives, THD: Taux de distorsion harmonique

ملخص: تمتص الأحمال غير الخطية التيارات غير الجيبية، وتستهلك الطاقة التفاعلية وتوليد اضطرابات لتعطيل وتحطيم المعدات المرتبطة بالشبكة. في هذا العمل استخدمنا المرشح النشط الموازي كحل للتخلص من الاضطرابات والتوافقيات الخاصة بالحمل غير الخطي بواسطة محاكاة MATLAB/SIMULINK، يوفر التحكم في التيار أداءً جيدًا للمرشح النشط الموازي مقارنةً بالحلول التقليدية مثل المرشحات السلبية.

كلمات مفتاحية: الأحمال غير الخطية- الطاقة التفاعلية- اضطرابات- للمرشح النشط الموازي-التوافقيات- المرشحات السلبية- معدل تشويه التوافقي.



Dédicace

Je dédie cet humble travail à ceux qui ont donné naissance à ma mère et à mon père .

Qui ont vu plus de moi tout au long de ma vie

Je veux aussi dédier ce travail

Pour mes sœurs

Pour mon frère

Mon mari, ma fille et mon fils (Ali et Sondos)

Et à chaque famille Kias ET famille Meziani.

A tous mes amis .

Et quiconque m'a aimé et m'a encouragé et tous ceux qui m'ont aidé

Proche ou lointain et tous ceux qui les ont oubliés involontairement.

Remerciement

J'exprime ma profonde gratitude et ma reconnaissance, et surtout à Dieu qui m'a donné

Force, désir et patience J'ai passé des années à étudier, en particulier pendant ce travail modeste.

Je voudrais également remercier Mme Abdedaim Sabrina

Après avoir accepté de me prendre pour cadre, me guidant dans l'abnégation et m'attribuant une part de

Son temps précieux, son expérience et son soutien tout au long de mon travail.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements aux membres du jury et à tous

Les enseignants du département de génie électrique pour leur soutien.

Enfin, je remercie chaleureusement toute ma famille, mon mari et mes amis.

Soutiens-moi toujours et encourage-moi.

Table des matières

Titre	Page
Dédicaces	
Remerciements	
Listes des figures	
Liste des tableaux	
Symbole	
INTRODUCTION GENERALE	(1)
Chapitre I Qualité d'énergie électrique	
I-1 Introduction	(3)
I-2 Définition de Qualité de l'énergie électrique	(3)
I-3 Les perturbations électriques	(3)
I.3.1 Harmoniques	(4)
1) Définition	(4)
2) Déformation du signal périodique	(4)
3) Origines des harmoniques	(5)
4) Type des harmoniques	(5)
5) Les différents types des charges	(6)
1) Charge non linéaires	(6)
2) Charge linéaires	(6)
6) Caractéristiques des harmoniques	(6)
a) Taux de Distorsion Harmonique	(6)
b) Facteur de Puissance	(7)
c) Série de Fourier	(8)
7) Les effets de la pollution harmonique	(8)
a) Les effets instantanés	(8)
b) Les effets différés	(9)
7-1) Phénomènes de résonance	(9)
a) Résonance parallèle	(9)
b) Résonance série	(10)
7-2) Échauffement dans les conducteurs et les équipements électriques	(10)
7-3) Vibrations mécaniques	(10)

7-4 Effets sur le conducteur neutre	(10)
7-5 Dysfonctionnement d'appareils utilisant la tension comme référence	(11)
I-3-2 Creux et coupure de tension	(11)
I-3-3 Variation des fréquences	(12)
I-3-4 Fluctuation de tension	(13)
I-3-5 Déséquilibres de système triphasé de tension	(13)
I-4 Conclusion	(14)
Chapitre II les solution de diminution des harmoniques	
II-1 Introduction	(15)
II-2 Solutions de dépollution des réseaux électriques	(15)
II-2-1 Les solutions traditionnelles	(15)
II-2-1-1 Transformateur à couplage passif	(15)
II-2-1-2 Inductances (selfs) série	(16)
II-2-1-3 Augmentation de l'indice de pulsation du convertisseur	(16)
II-2-1-4 Filtrage passif	(17)
A- Filtre résonant	(17)
B- Filtre amorti	(18)
II-2-1-5 Agir sur la structure de l'installation	(18)
II-2-2 Stratégies modernes	(18)
II-2-2-1 Le Filtre actif parallèle (FAP)	(19)
• Structure tension	(19)
• Structure courant	(20)
II-2-2-2 Le Filtre actif série (FAS)	(21)
II-2-2.3 La combinaison parallèle-série actifs	(22)
II-2-2-4 Filtre hybride	(24)
1 -Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles	(24)
2 -Le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles	(25)
3 -Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle	(25)
II-2-2-5 Redresseurs à MLI	(26)
II-3 Conclusion	(27)
Chapitre III Modélisation et résultats de simulation	
III-1 Introduction	(28)

III-2 Principe du filtre actif parallèle	(28)
III-3 Structure d'un filtre actif parallèle	(29)
-La partie puissance est constituée	(29)
- La partie contrôle-commande est constituée	(29)
-Etude de l'onduleur de tension	(30)
III-4 Stratégie de commande	(31)
a)Commande par hystérésis	(31)
b)Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)	(32)
1-Principe de MLI sinus-triangle	(33)
2-Caractéristiques	(34)
III-5 Méthodes d'identification des courants harmoniques	(34)
1- Généralités sur les méthodes d'identification	(34)
III-6)Résultats de simulation et interprétations	(40)
1-La charge non linaire est un redresseur triphasé non commandé alimentant une charge R-L	(41)
2- test du filtre pour changement de la charge	(45)
III-7 Conclusion	(45)
CONCLUSION GENERALE	(46)
Bibliographie	
Annexes	

Liste des figures

Chapitre I	
Figure (I-1):Onde déformé et sa décomposition.	(5)
Figure (I-2) : Représentation spectrale d'un signal périodique .	(6)
Figure (I-3):Spectre de fréquences d'un courant non sinusoïdal .	(7)
Figure (I-4) :Résonance parallèle et résonance série .	(9)
Figure (I-5) :Creux et coupure de tension .	(12)
Figure(I-6) :Variation de fréquence.	(12)
Figure (I-7): La fluctuation de la tension.	(13)
Figure (I-8):Déséquilibres du système triphasé de tension.	(14)
Chapitre II	
Figure(II-1): Forme des courants absorbés.	(16)
Figure(II-2): Montage en série (a) ou en parallèle (b) des deux redresseurs.	(17)
Figure(II-3): Branchement d'un filtre résonant.	(18)
Figure(II-4): Branchement d'un filtre amorti.	(18)
Figure (II-5) : Filtrage actif parallèle .	(19)
Figure (II-5-1) : Structure tension de Filtrage actif parallèle.	(20)
Figure(III-5-2): Structure courant de Filtrage actif parallèle.	(21)
Figure (II-6) : Filtrage actif série.	(21)
Figure (II-7) : Combinaison des filtres actifs série et parallèle.	(22)
Figure(II-8): Filtre actif série et filtre passif parallèle.	(25)
Figure(II-9): Filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle.	(25)
Figure(II-10): Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.	(26)
Figure(II-11) Schéma de principe d'un redresseur à MLI triphasé .	(26)
Chapitre III	
Figure (III-1): Schéma de principe des signaux générés par le filtre actif parallèle .	(29)
Figure(III-2): Structure générale d'un filtre actif parallèle.	(30)
Figure (III-3): Principe de la commande des courants par hystérésis.	(31)
Figure (III-4): Commande par hystérésis .	(32)
Figure(III-5): Principe de commande par MLI.	(33)
Figure(III-6) : Commande MLI sinus-triangle : Schéma de principe.	(34)

Figure(III-7) :schéma bloc du transformation des systèmes triphasé en biphasé.	(36)
Figure(III-8) :schéma bloc de calcul des puissances active et réactive .	(37)
Figure (III-8-a): Schéma représentant le principe de séparation des puissances.	(38)
Figure (III-9): Algorithme d'identification des courants harmoniques basé sur le calcul des puissances réelles et imaginaires instantanées.	(39)
Figure(III-10) :Schéma global d'un filtre actif parallèle .	(40)
Figure (III-11) : Les allures des courants :a) courant coté réseau de la phase (a) après le filtrage (Isa après) ,b)courant d'entrée de la charge N L ,c)courant à la sortie du filtre .	(41)
Figure (III-12) :L'allure du courant de la phase (a) en sortie du filtre avec sa référence .	(42)
Figure (III-13) :L'allure de courant de la phase (a) du réseau avant filtrage .	(42)
Figure(III-14) :Spectre du courant du réseau avant filtrage .	(42)
Figure(III-15) :L'allure du courant de la phase(a) du réseau après filtrage .	(43)
Figure(III-16) : Spectre du courant de réseau après filtrage .	(43)
Figure(III-17) : Le courant et la tension de la phase (a) du réseau après filtrage .	(44)
Figure(III-18) :L'allure de courant de 3 phase (a,b,c) du réseau après filtrage	(44)
Figure(III-19) : L'allure de courant de 3 phase (a,b,c) du filtrage	(44)
Figure (III-20) : Les allures des courants :a) courant coté réseau de la phase (a) après le filtrage (Isa après) ,b)courant d'entrée de la charge N L ,c)courant à la sortie du filtre.	(45)

Liste des Tableaux

Chapitre II	
Tableau(II-1): Comparaison entre le filtre actif et le filtre passif.	(23)
Tableau(II-2): comparaison entre le filtre actif parallèle et le filtre actif série.	(24)

Symbole

Symbole	Désignation
THD	Taux de distorsion harmonique
P	Puissance active
S	Puissance apparente
Q	Puissance réactive
D	Puissance déformante
Fp	Facteur de puissance
f	Fréquence (Hz)
fp	Fréquence de la porteuse (Hz)
fr	Fréquence de la référence (Hz)
f ₀	Fréquence fondamentale (Hz)
m	Indice de modulation
r	Coefficient de réglage
T	Période (s)
t	Temps (s) (ms)
h	Harmoniques
I _h	Courant harmonique
I ₁	Courant fondamental
V ₁	Tension fondamental
Z _n	Impédance
f _r	Fréquence de résonance
C	Capacité
L	Inductance
R	Résistance
I _{eff}	Courant efficace
I _s	Courant de la source
I _f	Courant de filtre
I _{ch}	Courant de la charge
I _{inj}	Courant injecte de filtre
V _p	Tension de porteuse
V _r	Tension de référence
AC	Alternatif
DC	Continu
V _{dc}	Tension continu
FAP	Filtre actif parallèle
FAS	Filtre actif série
H5 , H7	Harmonique rang 5 ,7
I _{a,b,c}	Courant de la source phase a,b,c
e1, 2, 3	Le système de f.e.m.s triphasé du réseau
I _{ref}	Le courant de référence a la sortie de bloc d'identification
L1 , 2, 3	Les Ligne 1, 2, 3
UPQC	Unified Power Quality Conditionner
BT	Basse tension
MT	Moyenne tension
MLI	Modulation de largeur d'impulsions
I _{mes}	Courant mesurer
P(t)	La puissance active instantanée

$p(t)$	La puissance réelle instantanée
$p_0(t)$	La puissance homopolaire instantanée
$q(t)$	La puissance imaginaire instantanée
pf	La puissance fondamentale active
qf	La puissance fondamentale réactive
ph	La puissance harmonique active
qh	La puissance harmonique réactive
FPB	Filtre passe bas
GT O	Le thyristor à extinction par la gâchette , en anglais <i>Gâte Turne-Off Thyristor</i> .
IGBT	Le transistor bipolaire à grille isolée ,en anglais <i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i> .

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

L'électronique de puissance de notre époque se situe dans un domaine nouveau et en expansion, qui renverse le passé.

Les appareils électroniques modernes ont été utilisés dans de nombreuses applications, telles que la commande de moteur électrique, le chauffage électrique, la compensation harmonique, etc.

L'utilisation des convertisseurs statiques dans les systèmes de conversion d'énergie électrique a considérablement contribué aux progrès réalisés aux niveaux des performances et de l'efficacité de ces systèmes.

Les convertisseurs statiques absorbent des courants non sinusoïdaux même s'ils sont alimentés par des tensions sinusoïdales. Ils se comportent alors comme des générateurs de courants harmoniques et consomment généralement de l'énergie réactive. Le réseau quant à lui est parfaitement adapté à des courants sinusoïdaux. Ces deux phénomènes nouveaux sur le réseau ont engendré un certain nombre de perturbations allant du dysfonctionnement d'un équipement jusqu'à la destruction d'une partie des équipements connectés.

Nous avons besoin d'une qualité d'alimentation élevée en termes de continuité de l'alimentation et de qualité de la tension, mais la qualité a été affectée par les perturbations électriques, notamment les harmoniques.

Dans notre travail, nous avons discuté de trois chapitres :

Le premier chapitre : Dans ce chapitre nous présentons des notions sur la qualité de l'énergie et des généralités sur les perturbations qui les affectaient , et nous avons également abordé les effets de la pollution harmonique.

Le deuxième Chapitre : Nous présentons des solutions des problèmes au manque d'harmoniques, y compris les solutions traditionnelles, à savoir:

Inductance série ,augmentation de l'indice de pulsation du convertisseur ,filtre passif.

Parmi les solutions modernes:

Le filtre actif parallèle ,le filtre actif série et filtra hybride .

Troisième chapitre : Nous présentons la méthode d'identification des courant de référence et modélisation et simulation de l'ensemble réseau d'alimentation , filtre actif parallèle et la charge polluante .

***CHAPITRE I : QUALITE
D'ENERGIE ELECTRIQUE***

I-1 Introduction

Le distributeur d'alimentation fournit à tous ses clients et à ses utilisateurs une énergie de qualité et distincte, généralement sous la forme de trois tensions un réseau triphasé équilibré. La qualité de l'énergie dépend de la qualité de la tension.

Mais l'effort sur le réseau est affecté par des perturbations et des changements au cours du transfert et de la distribution jusqu'à atteindre les clients, en plus de la nature physique des dispositifs d'exploitation du réseau.

Problématiques

Quel est le concept de qualité énergétique?

Quelles perturbations électriques affectent la qualité de l'énergie?

Quels sont les effets de la pollution harmonique?

I-2 Définition de Qualité de l'énergie électrique

La qualité de l'énergie est une notion assez large qui recouvre à la fois la qualité de la fourniture électrique, la qualité de l'onde de tension et la qualité des courants. Lorsque la tension est présente, les principaux phénomènes pouvant l'affecter sont d'une part les variations lentes : creux de tension, surtensions, coupures, déséquilibres et d'autre part des variations rapides : surtensions transitoires. La qualité des courants reflète par contre la possibilité des charges à fonctionner sans perturber ni réduire l'efficacité du système de puissance. C'est pourquoi certains considèrent que la qualité de l'électricité se réduit à la qualité de la tension .[2]

La qualité de l'alimentation électrique ou qualité de l'onde fait référence à la mesure du degré de conformité d'une source d'alimentation électrique par rapport à un certain nombre de critères ou de normes à caractère quantitatif et absolu. L'énergie électrique est délivrée sous forme d'un système triphasé de tensions sinusoïdales .[1]

I-3 Les perturbations électriques

Sauf exception, les tensions d'un réseau électrique constituent un système alternatif triphasé, dont la fréquence de base est de 50 Hz. les paramètres caractéristiques d'un tel système sont les suivants :

-La fréquence .

- L'amplitude des trois tensions .

- La forme d'onde, qui doit être la plus sinusoïdale possible .
- La symétrie du système triphasé, caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et leur déphasage relatif.

La qualité de la tension peut être aussi affectée, soit du fait de certains incidents inhérents à la nature physique et aux obstacles liés à l'exploitation du réseau, soit de certains récepteurs non linéaires. Ces défauts se manifestent sous forme de différentes perturbations affectant un ou plusieurs des quatre paramètres précédemment définis. On a donc quatre possibilités distinctes de perturbation.[3]

I.3.1 Harmoniques

Les principales sources d'harmoniques sont les dispositifs contenant des éléments qui commutent (les convertisseurs statiques), et les dispositifs à caractéristique tension- courant non linéaire (fours à arc, inductances saturées, transformateurs, machines tournantes, etc.). Ces équipements électriques sont considérés comme des charges non linéaires émettant des courants harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale, ou parfois à des fréquences quelconques. Le passage de ces courants harmoniques dans les impédances du réseau électrique peut entraîner des tensions harmoniques aux points de raccordement et alors polluer les consommateurs alimentés par le même réseau .[3-4]

1) Définition

Un harmonique est défini comme étant une composante sinusoïdale d'un signal périodique, ayant une fréquence multiple de l'onde fondamentale. Le domaine des fréquences qui correspond à l'étude des harmoniques est généralement compris entre 100 Hz et 2000 Hz (entre les harmoniques de rangs $h=2$ et $h=40$) .

L'amplitude de rang 1 est appelée la composante fondamentale du signal électrique périodique; dans notre cas c'est la (50 HZ). L'amplitude de chaque harmonique est inversement proportionnelle à son ordre. Les premiers rangs harmoniques tel que (3, 5, 7,9) ont des amplitudes élevées, d'où l'importance des courants injectés, raison pour laquelle il faut limiter ces harmoniques dans les normes .[12-5]

2) Déformation du signal périodique

Un signal déformé est due principalement à la superposition des harmoniques sur la composante fondamentale. Comme dans la figure (I-1).

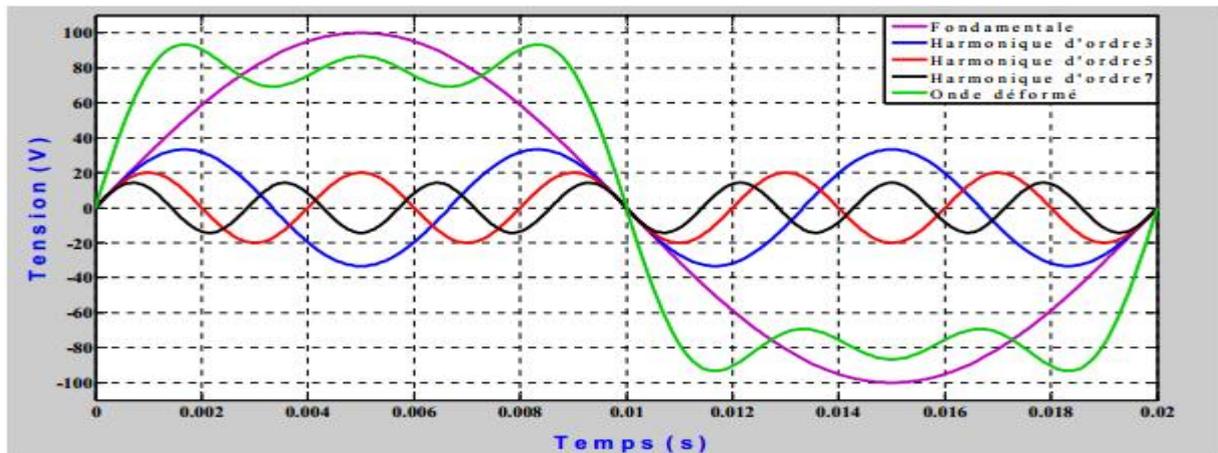


Figure (I-1) : Onde déformée et sa décomposition. [20]

3) Origines des harmoniques

L'augmentation sensible du niveau de la pollution harmonique du réseau électrique est une conséquence de la prolifération des convertisseurs statiques. En effet, ces convertisseurs sont considérés comme des charges non linéaires émettant des courants harmoniques. Ces courants harmoniques dans les impédances du réseau électrique peuvent entraîner des tensions harmoniques aux points de raccordement et alors polluer les consommateurs alimentés par le même réseau électrique.[3]

4) Type des harmoniques

En règle générale on distingue les harmoniques de rang pair (2, 4, 6, 8 ...etc.) et les harmoniques de rangs impairs (3, 5, 7 ...etc.) plus influentes, dans les réseaux industriels. Il existe aussi d'autres types d'harmoniques tel que :

- **Inter harmoniques** : ce sont des composantes sinusoïdales d'une grandeur qui n'est pas une fréquence multiple entière de celle du fondamental .
- **Infra harmoniques** : ce sont des composantes des fréquences inférieures à celle du fondamental . Illustré à la Figure (I-2).[6]

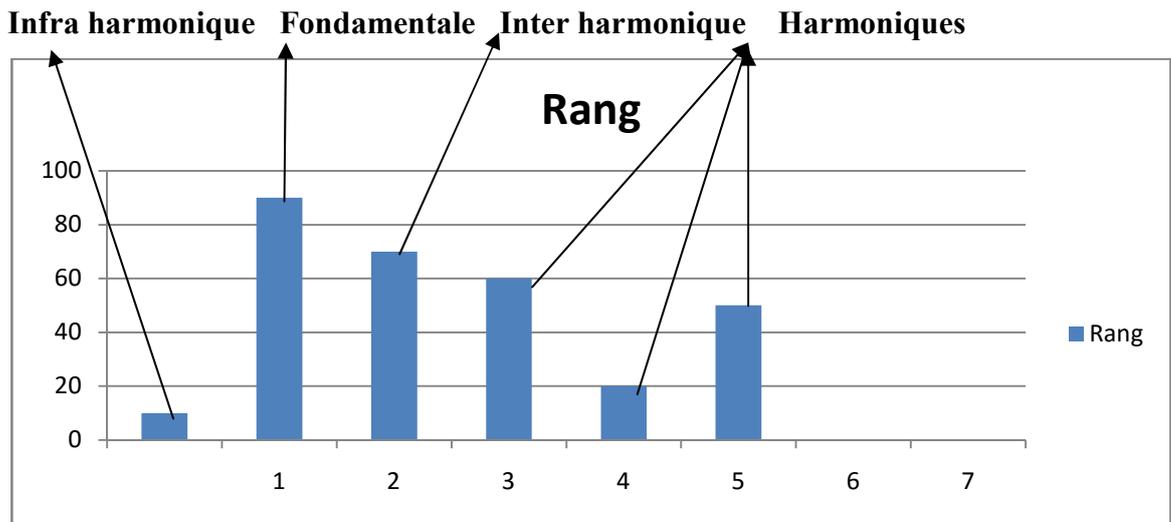


Figure (I-2) représentation spectrale d'un signal périodique

5) Les différents types des charges

1) Charge non linéaires

les charges non linéaires consomment un courant qui n'est pas sinusoïdal lorsque la tension est sinusoïdale . Elles représentent les principales sources d'émission en courants harmoniques sur les réseaux .

2) Charge linéaires

Une charge est dite linéaire , si alimentée par une tension sinusoïdale , elle consomme un courant sinusoïdal . Cependant , le courant et la tension peuvent être déphasés . les charges linéaires couramment utilisées sont constituées de résistances , de capacités et d'inductances .[12]

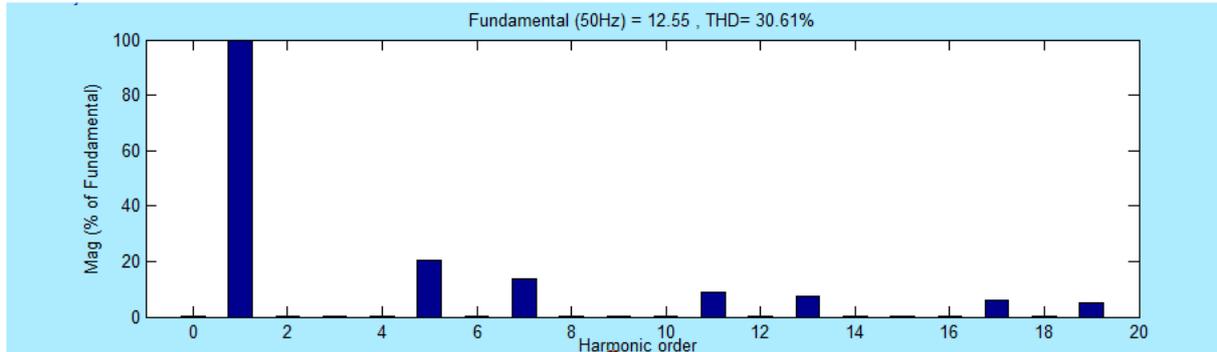
6) Caractéristiques des harmoniques

a) Taux de Distorsion Harmonique

Il est possible de caractériser les perturbations harmoniques au moyen de deux paramètres, le taux de distorsion harmonique (THD) et le facteur de puissance. Le **THD** permet de quantifier les perturbations harmoniques, et le facteur de puissance permet de qualifier la consommation de la puissance réactive .[7]

Le taux de distorsion harmonique peut être calculé pour le courant par :

$$\text{THD}\% = 100 \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2} \quad (\text{I-1})$$



Figure(I-3): Spectre de fréquences d'un courant non sinusoïdal et THD de courant

b) Facteur de Puissance

Pour ce qui est du facteur de puissance, il est défini par le rapport entre la puissance active P et la puissance apparente S , rapport qui tient compte des harmoniques:

$$F_p = \frac{P}{S} \quad (\text{I-2})$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (\text{I-3})$$

$$D = 3V_1 \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2} \quad (\text{I-4})$$

$$F_p = \frac{P}{S} = \frac{3V_1 \cos \varphi_1}{3VI} \quad (\text{I-5})$$

où V_1 et I_1 : tension et courant instantanés, sous fréquence fondamentale.

Il est important de ne pas confondre le facteur de puissance avec le cosinus ($\cos \varphi$) qui est le facteur de déplacement de la puissance; ce facteur $\cos \varphi$, est bon à tenir proche de la valeur 1 (angle φ petit) pour ne pas avoir à fournir une intensité forte due au fait que la puissance apparente devra aussi être forte. La seule possibilité très rare de voir le $\cos \varphi$ et le facteur de puissance en égalité est lorsque la tension et le courant tirés du réseau sont tous deux purement sinusoïdaux. Puisque le $\cos \varphi$ se rapporte uniquement à la fréquence fondamentale, dès lors que les harmoniques sont pris en compte, il est différent du facteur de puissance.[7]

c) Série de Fourier

Ceci revient à dire que : tout signal , périodique de période $T=1/f$, peut se décomposer en une somme infinie de termes sinus et cosinus de fréquences multiples mathématiquement . cela s'écrit :

$$S(t)=a_0+\sum_{n=1}^{\infty}(a_n \cos n\omega t +b_n \sin n\omega t) \quad (I-6)$$

La valeur a_0 représente la valeur moyenne de $s(t)$.

On calcule les coefficients a_n et b_n avec les formules suivantes :

$$a_n=\frac{2}{T} \int_0^T S(t) \cos(n\omega t) dt \quad (I-7) \quad \text{et} \quad b_n=\frac{2}{T} \int_0^T S(t) \sin(n\omega t) dt \quad (I-8)$$

De plus, il existe quelques pré requis qui permettent de ne pas faire de calculs inutiles :

- si la fonction est symétrique par glissement, la valeur a_0 est nulle ;
- si la fonction est paire, les coefficients b_n sont nuls ;
- si la fonction est impaire, les coefficients a_n sont nuls ;
- si la fonction possède une symétrie sur ses deux demi-périodes, les termes d'indice pairs sont nuls.[8]

7) Les effets de la pollution harmonique

Les courants harmoniques associés aux différentes impédances du réseau vont donner naissance à des tensions harmoniques qui vont se superposer à la tension fondamentale du réseau . La tension qui en résulte n'est plus sinusoïdale . La pollution alors présente sur le réseau de distribution pourrait être préjudiciable au bon fonctionnement de tous les récepteurs (ou charge) raccordés sur ce même réseau . On distingue deux types d'effet des harmoniques sur les équipements électrique :[9]

a) Les effets instantanés

Ce sont les effets immédiats sur le bon fonctionnement d'un équipement .Par exemple , dans le cas des appareils électroniques , il peut s'agir d'une altération de l'image pour les écrans de télévision ou une altération du son s'il s'agit d'une chaîne HI-FI ou d'un téléphone .la précision des appareils de mesure est également affectée par la présence d'harmonique.[9]

b) Les effets différés

Ils se manifestent après une longue exposition au phénomène et se traduisent par une perte partielle des fonctionnalités ou une destruction complète de l'appareil . L'échauffement des câbles et des diverses enroulements d'une machine en est un exemple.[9]

7-1) Phénomènes de résonance

L'apparition de phénomènes de résonance est due à la présence sur les réseaux d'éléments capacitifs et inductifs .Le danger de ce phénomène est qu'il peut engendrer de grandes valeurs d'impédance Z_n de tension V_n et de courant harmonique I_h aux bornes des différents éléments composant le réseau . Lorsque ces valeurs de tension et de courant harmoniques sont trop élevées ,ils peuvent endommager et même détruire les équipements qui y sont soumis .On distingue deux types de résonance selon la configuration des éléments capacitifs et inductifs ,comme dans figure (I-4).[9]

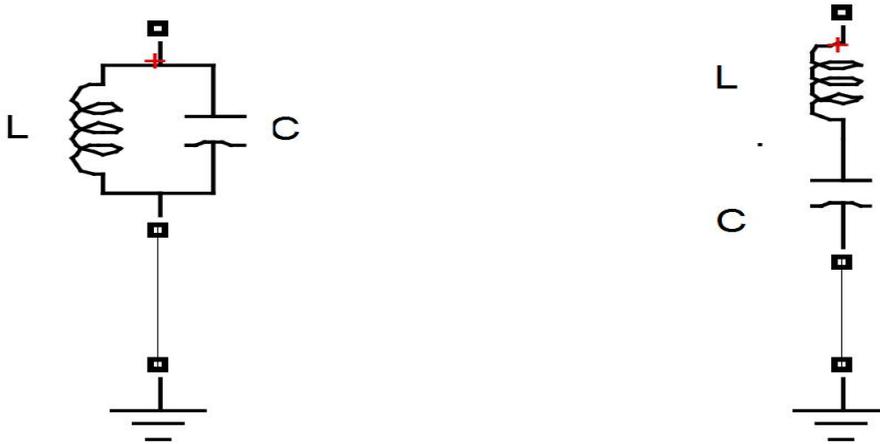


Figure (I-4) Résonance parallèle et résonance série

a) Résonance parallèle

L'inductance et la capacité en parallèle donnent l'impédance suivante :

$$Z_n = \frac{jL\omega}{1 - LC\omega^2} \quad (I-9)$$

Il y a résonance lorsque $X_L = X_C$, c'est-à-dire , lorsque le dénominateur $1 - LC\omega^2$ est nul .

Dans ce cas ,l'impédance est infinie .La fréquence de résonance est donnée par :[9]

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (I-10)$$

b) Résonance série

L'inductance en série avec une capacité donne l'impédance suivante :

$$Z_n = \frac{1 - LCn^2 \omega^2}{jCn\omega} \quad (I-11)$$

Il y a résonance lorsque $X_L = X_C$, c'est-à-dire, lorsque le numérateur $1 - LCn^2 \omega^2$ est égal à zéro. Dans ce cas, l'impédance est nulle. La fréquence de résonance est donnée par : [9]

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (I-12)$$

7-2 Échauffement dans les conducteurs et les équipements électriques

Les courants harmoniques circulant dans les conducteurs provoquent l'échauffement de ceux-ci par effet Joule (RI_{eff}^2). Cependant, les harmoniques ne contribuent pas au transfert de puissance active, ils créent uniquement des pertes électriques et participent à la dégradation du facteur de puissance. La circulation des courants harmoniques dans les transformateurs et dans les enroulements du moteur asynchrone crée également des échauffements supplémentaires. En plus des pertes Joule, le transformateur subit des échauffements supplémentaires en présence d'harmonique qui sont causés par les pertes fer dans le noyau magnétique. Ces dernières résultent des pertes par hystérésis et par courant de Foucault. De plus, les condensateurs sont très sensibles à la circulation de courant harmoniques de par leur impédance qui décroît en fonction de l'augmentation de la fréquence. Ces courants harmoniques circulent alors plus aisément dans le condensateur de faible impédance ce qui crée des échauffements qui risquent de le détruire. [9]

7-3 Vibrations mécaniques

La présence d'harmoniques peut engendrer des couples mécaniques pulsatoires à l'arbre des moteurs électriques. Ces couples, qui sont dus aux champs tournant harmoniques, engendrent des vibrations dans les moteurs électriques. Pour ce qui est des transformateurs, ils peuvent être susceptibles d'entrer en résonance mécanique aux fréquences harmoniques, ce qui peut entraîner une usure prématurée de cet équipement. [9]

7-4 Effets sur le conducteur neutre

Dans un système équilibré, les composantes homopolaires dans le neutre sont nulles. Ceci n'est pas le cas des systèmes comportant une charge non linéaire. En effet, les courants

homopolaires des harmoniques de rang multiple de 3 vont s'additionner dans le conducteur neutre . L'intensité de ces courants superposés peut endommager sérieusement le câble neutre .[9]

7-5 Dysfonctionnement d'appareils utilisant la tension comme référence

Une tension déformée peut altérer le bon fonctionnement de certains appareils électroniques qui utilisent les passages à zéro de la tension d'alimentation pour fonctionner adéquatement .En effet ,les tension harmoniques peuvent créés des faux passages de la tension à zéro , ce qui engendre un mauvais fonctionnement pour ces appareils . Divers équipements sont sensibles à cette problématique , citons : les convertisseurs de courant , les automates programmables et certains appareils électroniques domestiques .[9]

I-3-2 Creux et coupure de tension

Le creux de tension est une diminution brutale de la tension à une valeur situé entre 10% et 90% de la tension nominale pendant une durée allant de 10 ms jusqu'à quelques secondes. Les creux de tension sont dus à des phénomènes naturels comme la foudre, ou à des défauts sur l'installation des réseaux électriques. Ils apparaissent également lors de manœuvre d'enclenchement mettant en jeu des courants de fortes intensités (moteurs transformateurs,..etc.).[17]

Une coupure brève est une diminution de la tension pendant une courte durée qui n'excède par une minute. Ces coupures sont dues au fonctionnement du système de protection des réseaux aériens évitant ainsi des coupures longues. La figure (I-5) montre un exemple d'un creux de tension triphasé entre 0.15 à 0.35s. La figure (I-5) montre un exemple de creux et de coupure de tension.

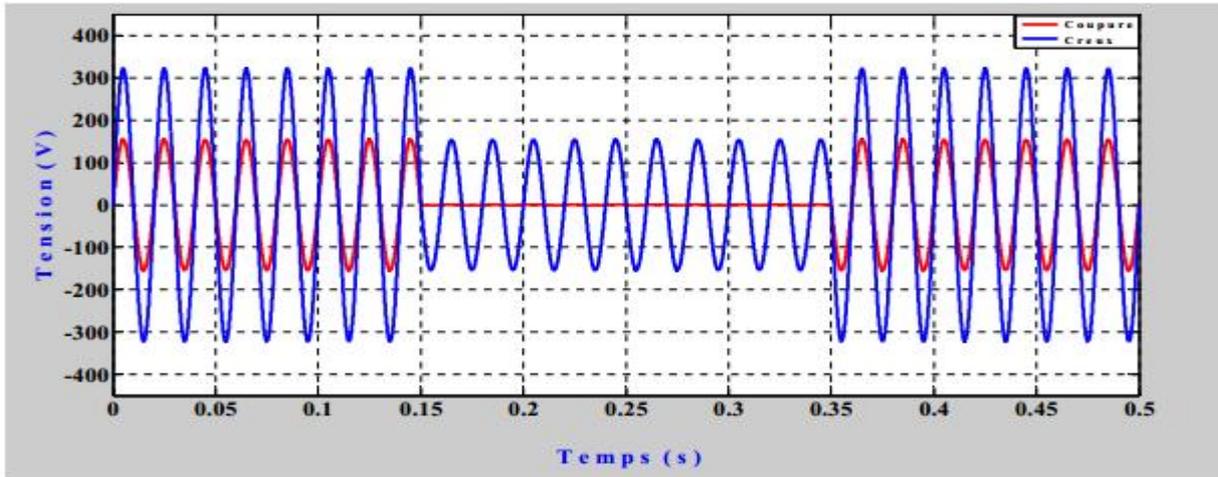


Figure (I.5) Creux et coupure de tension.[17]

Conséquences: Perturbation ou arrêt du procédé, pertes de données, données erronées, ouverture de contacteurs, verrouillage de variateurs de vitesse, ralentissement ou décrochage des moteurs et extinction de lampes à décharge.[21]

I-3-3 Variation des fréquences

Une variation sensible de la fréquence de réseau peut apparaître sur les réseaux des utilisateurs non interconnectés ou alimentés par une source thermique, comme le montre la figure (I-6). au niveau des réseaux de distribution ou de transport, cette variation de la fréquence est très rare et n'est présente que lors de circonstances exceptionnelles comme dans le cas de certains défauts graves sur les réseaux. Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle $50\text{Hz} \pm 1\%$. [17]

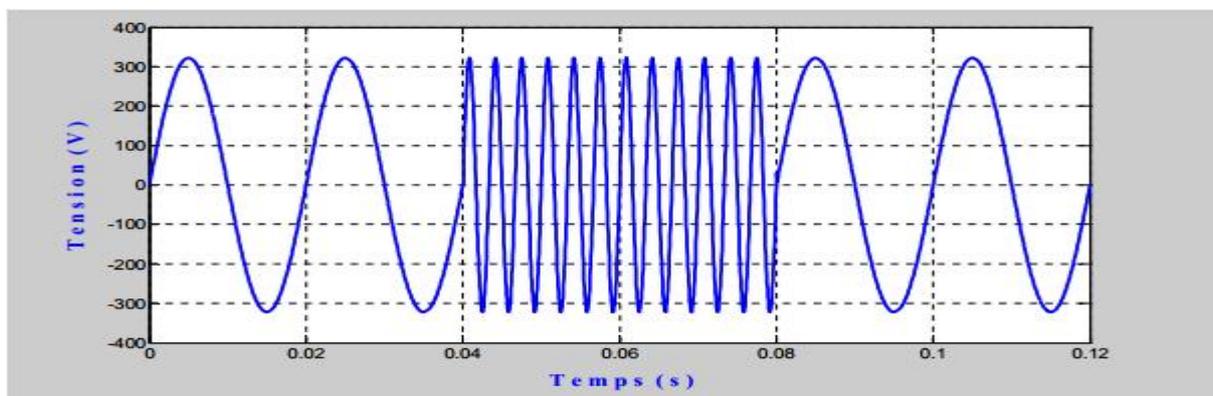


Figure (I-6) Variation de fréquence.

I-3-4 Fluctuation de tension

Les fluctuations de tension sont des variations périodiques ou de l'enveloppe de la tension. Ce sont des variations brutales de l'amplitude de la tension située dans une bande de 10% est se produisent sur un intervalle de temps de quelque centième de seconde. Elles sont en particulier dues à la propagation sur les lignes du réseau de courant d'appel important. L'origine principale de ce courant et le fonctionnement d'appareil dont la puissance absorbée varie de manière rapide, comme les fours à arc et des machines à souder. Ces fluctuations se traduisent par des variations d'intensité, visible au niveau de l'éclairage causant un gêne visuel perceptible pour une variation de 1% de la tension. Ce phénomène de papillotement est appelé flicker. Un exemple de fluctuation de tension est montré dans la figure (I-7). [3]

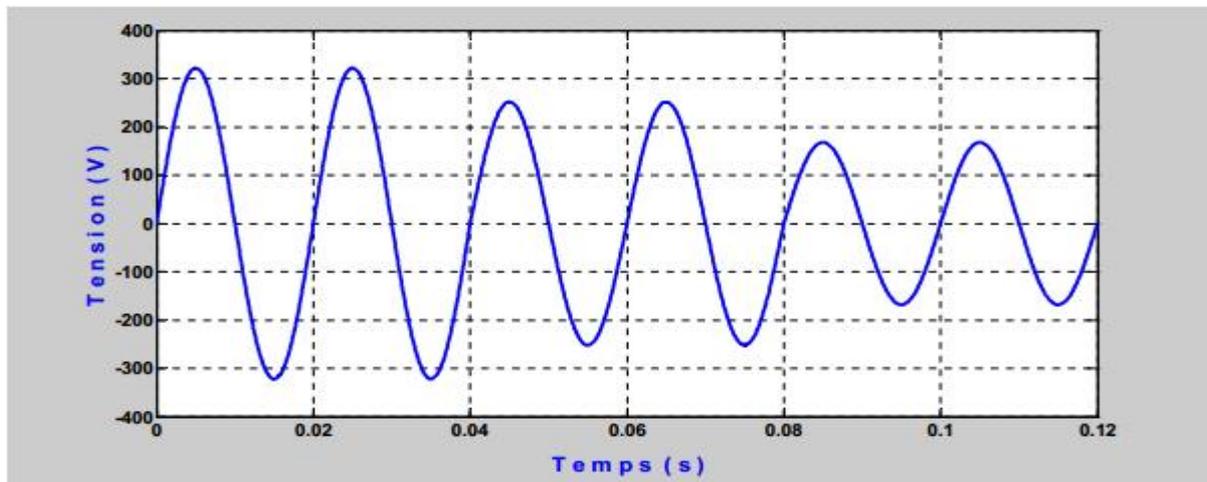


Figure (I-7) La fluctuation de la tension

Conséquences : Fluctuation de la luminosité des lampes (papillotement ou Flicker).[21]

I-3-5 Déséquilibres de système triphasé de tension

Lorsque les trois tensions ne sont pas identiques en amplitude et/ou ne sont pas décalés d'un angle 120° les unes par rapport aux autres, on parlera de déséquilibre du système triphasé comme le montre la figure (I-8). Un réseau électrique triphasé équilibré alimentant un récepteur électrique triphasé non équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau.[17]

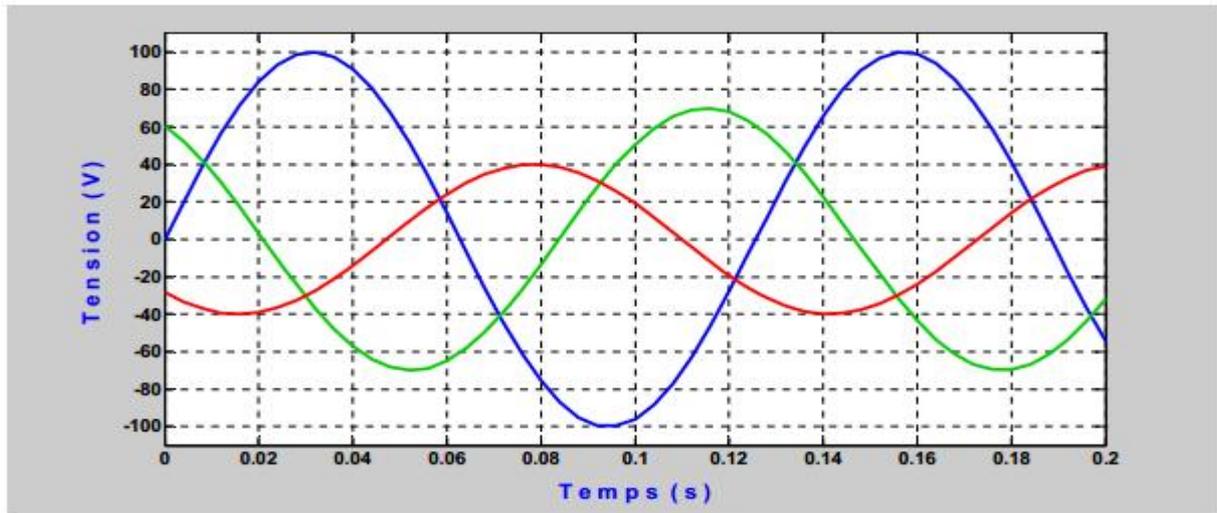


Figure (I-8) Déséquilibres du système triphasé de tension.

Conséquences:

Couples moteurs inverses (vibrations) et sur-échauffement des machines électriques.[3]

I-4 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de voir les perturbations électriques et les effets de la pollution harmonique sur la qualité de l'énergie et nous devons donc trouver des solutions pour l'améliorer la qualité de l'énergie, comme nous le verrons dans le deuxième chapitre.

***CHAPITRE II : LES
SOLUTION DE***

***DIMINUTION DES
HARMONIQUES***

II-1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons vu plusieurs perturbations affectant la qualité de l'énergie, le courant et la tension électrique, c'est pourquoi nous allons étudier la théorie de plusieurs solutions différentes pour améliorer la qualité de l'énergie et réduire les harmoniques.

Alors, selon la littérature, les solutions les plus répondus pour la dépollution des réseaux électriques peuvent être classées en deux groupes :

- Solutions traditionnelles .
- Solutions modernes.

II-2 Solutions de dépollution des réseaux électriques

Les perturbations engendrées par les charges non linéaires peuvent être atténuées soit :

- avec un système auxiliaire de filtrage pour les perturbations harmoniques .
- en limitant la consommation de puissance réactive .
- en modifiant la topologie du convertisseur pour limiter les propagations harmoniques
- en augmentant la puissance de court circuit du réseau par rapport à la puissance du générateur.....etc. [10]

II-2-1 Les solutions traditionnelles

Les solutions traditionnelles de dépollution sont essentiellement des solutions passives ou des modifications structurelles permettant de traiter directement les harmoniques.[11]

II-2-1-1 Transformateur à couplage passif

Certain couplage du type triangle-zigzag permettent de supprimer les harmoniques de rang 3 et de leurs multiples.[11]

Il s'agit d'une solution centralisée pour un ensemble de charges monophasées. Elle n'a cependant aucun effet sur les autres rangs d'harmoniques (H5, H7, etc...). Cette solution limite, au contraire, la puissance disponible de la source et augmente l'impédance de ligne. Il en résulte une augmentation de la distorsion en tension dû aux autres rang 3 harmoniques .[12]

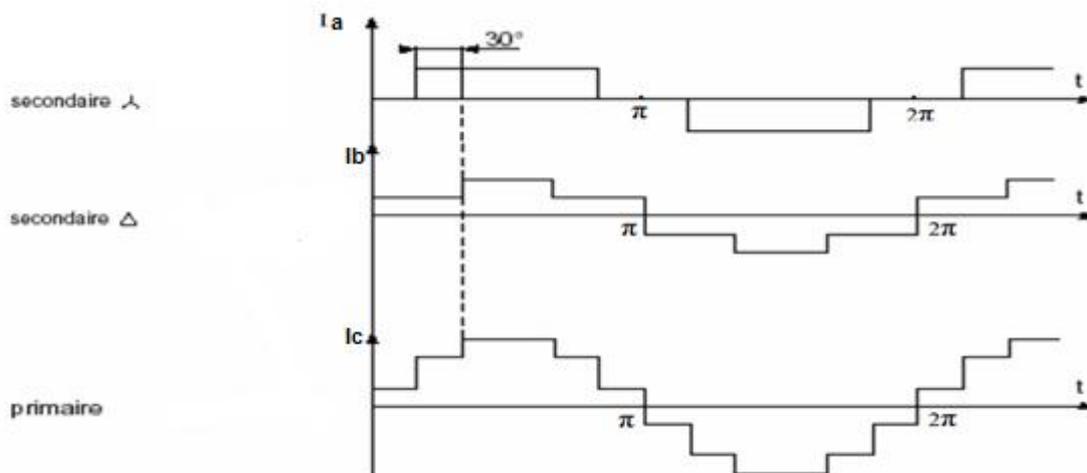
II-2-1-2 Inductances (selfs) série

Cette solution, utilisée pour les entraînements à vitesse réglable (variateurs de vitesse) et les redresseurs triphasés, consiste à introduire une inductance série en amont d'une charge non linéaire. La self mais a une efficacité limitée. Il doit être installé avant la grosse charge non linéaire. La distorsion actuelle est grossièrement divisée par deux. [12]

II-2-1-3 Augmentation de l'indice de pulsation du convertisseur

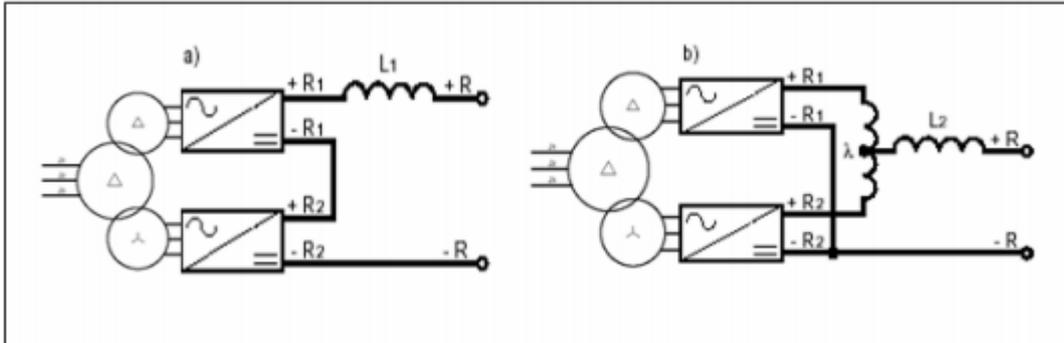
Le principe consiste à utiliser un transformateur à deux secondaires délivrant des tensions décalées de 30° entre elles, chacun de ces secondaires alimentant un redresseur en pont de Graëtz qui réalise un redressement hexaphasé.

Les redresseurs doivent fournir des courants continus identiques afin que les courants alternatifs qu'ils prélèvent sur les secondaires des transformateurs aient les mêmes valeurs. Dans ces conditions, il y a une recombinaison des courants harmoniques, générés par chacun des redresseurs au primaire du transformateur et le calcul montre que les harmoniques de rang $6h \pm 1$ avec k impair sont éliminés. C'est le cas en particulier pour les harmoniques 5 et 7 dont les amplitudes théoriques sont les plus importantes. Les harmoniques 11 et 13 sont conservés tandis que les harmoniques 17 et 19 sont éliminés. Les harmoniques restants sont donc de rang $12h \pm 1$ avec h entier naturel. La figure(II-1) donne le courant absorbé par le primaire du transformateur à partir des courants délivrés par les deux secondaires. [22-12]



Figure(II-1): Forme des courants absorbés.

Le courant de ligne a une forme beaucoup plus proche d'une sinusoïde que le courant obtenu avec un seul redresseur. Les deux redresseurs peuvent être connectés en série ou en parallèle.[22]



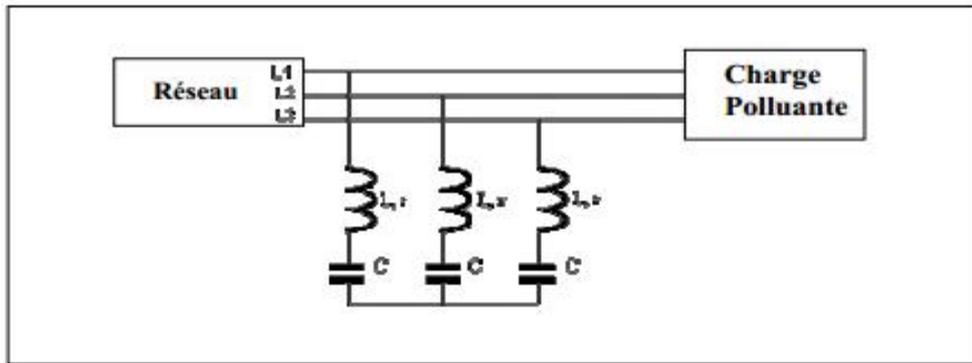
Figure(II-2): Montage en série (a) ou en parallèle (b) des deux redresseurs.

II-2-1-4 Filtrage passif

Le principe d'un filtre passif est de modifier localement l'impédance du réseau, de façon à dériver les courants harmoniques et à diminuer les tensions harmoniques là où c'est nécessaire. On associe des éléments capacitifs et inductifs de manière à obtenir une résonance série accordée à une fréquence choisie. Il existe deux classes de filtres passifs (résonant ,amorti) permettant de réduire les harmoniques .[12]

A- Filtre résonant

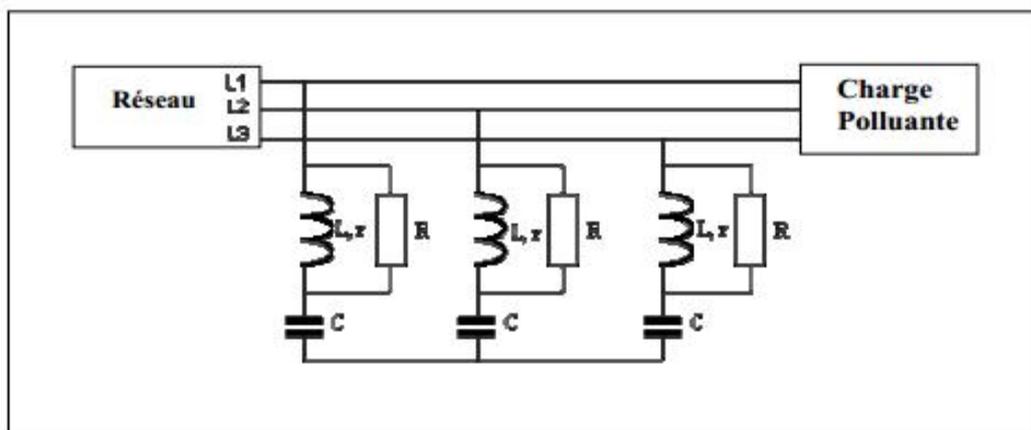
Le filtre résonant est constitué d'un condensateur monté en série avec une inductance. Ces éléments sont placés en dérivation sur l'installation et accordés sur un rang d'harmonique à éliminer, comme le montre figure (II-3). L'impédance de cet ensemble est très faible pour sa fréquence d'accord, et se comporte ainsi comme un court circuit pour l'harmonique considéré. [12]



Figure(II-3): Branchement d'un filtre résonant.

B- Filtre amorti

Un filtre amorti se compose d'une capacité en série avec un ensemble constitué de la mise en parallèle d'une inductance et d'une résistance appelée résistance d'amortissement. Il est utilisé lorsque les performances demandées ne sont pas trop élevées. On utilise souvent pour filtrer simultanément les plus hautes fréquence du spectre et non une fréquence particulière, c'est un filtre passe haut .[12]



Figure(II-4): Branchement d'un filtre amorti.

II-2-1-5 Agir sur la structure de l'installation

Eviter la connexion d'un récepteur sensible en parallèle avec un pollueur tel que les redresseurs, si le pollueur est de forte puissance, il est souhaitable de l'alimenter par un autre transformateur .[13]

II-2-2 Stratégies modernes

L'apparition de nouveaux composants semi-conducteurs tels que les IGBT, MOSFET,

commutant des puissances de plus en plus élevées à des fréquences plus importantes, a permis de trouver de nouvelles solutions aux problèmes de perturbations des réseaux. Les inconvénients des solutions classiques telle que le filtrage passif (antirésonance, surcharges et forte dépendance de l'environnement,...) ont conduit à la conception de nouvelles structures "auto-adaptatives" pour la suppression des harmoniques appelées filtres actifs.

Le principe du filtrage actif est d'injecter des courants (ou des tensions) harmoniques en opposition de phase avec les harmoniques que l'on désire compenser.

Nous citerons trois topologies possibles de filtres actifs .[13]

II-2-2-1 Le Filtre actif parallèle (FAP)

Il est aussi appelé compensateur shunt, connecté en parallèle sur le réseau de distribution (figure (II-5)). Il est souvent commandé comme un générateur de courant. Il restitue dans le réseau électrique les courants harmoniques égaux à ceux absorbés par la charge non linéaire mais en opposition de phase, de telle sorte que le courant fourni par le réseau soit sinusoïdal et en phase avec la tension simple correspondante. Son indépendance vis-à-vis de la source et de la charge lui assure l'auto- adaptabilité, la fiabilité et la bonne performance.[13]

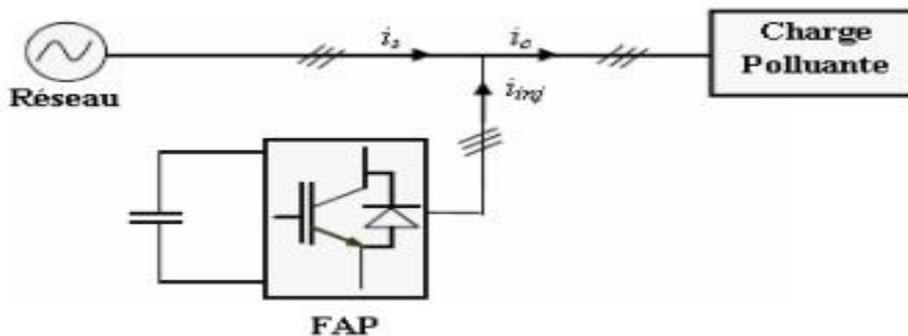


Figure (II-5) : Filtrage actif parallèle

- **Structure tension**

L'onduleur de tension connecté en parallèle au réseau est illustré par la figure(II-5-1) .Le condensateur C_{dc} joue le rôle d'une source de tension continue. La tension à ses bornes V_{dc} doit être positive et maintenue quasiment constante. Ses fluctuations doivent être faibles d'une part pour ne pas dépasser la limite en tension des semi-conducteurs constituant les interrupteurs, d'autre part pour ne pas dégrader les performances du filtre actif. L'onduleur de tension est relié au réseau par l'intermédiaire d'un filtre. Deux rôles sont dévolus à ce filtre: d'une part transformer les variations de tension V_f en variations de courant, d'autre part filtrer

les fréquences de commutation des bras d'onduleur. Les interrupteurs de l'onduleur sont réversibles en courant. Ils sont constitués de semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture en anti-parallèle avec une diode .[12]

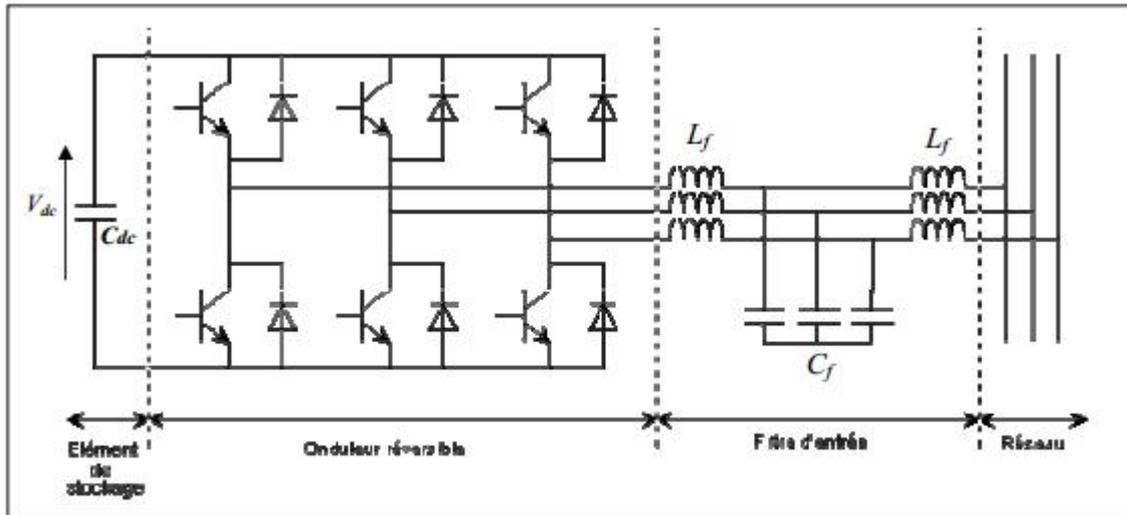
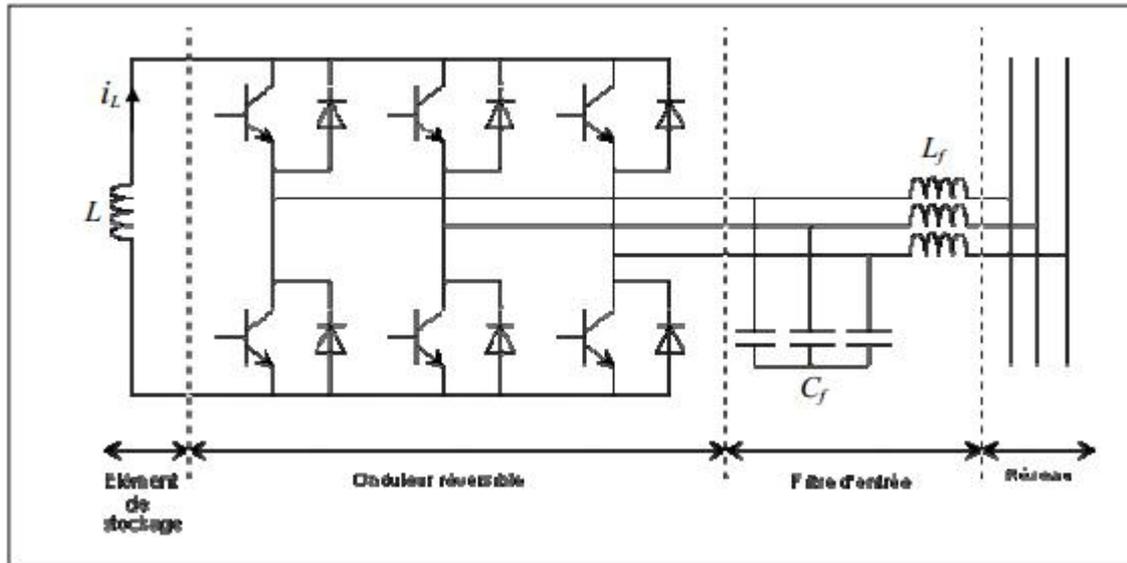


Figure (II-5-1) : Structure tension de Filtrage actif parallèle.

- **Structure courant**

La figure(III-5-2) représente le schéma de principe d'un onduleur de courant . L'inductance joue le rôle d'une source de courant continu. Le courant iL traversant cette inductance est maintenu quasiment constant pour ne pas dégrader les performances du filtre actif. L'onduleur de courant est relié au réseau par l'intermédiaire d'un filtre passe-bas du second ordre constitué d'une inductance L_f et d'une capacité C_f . Les interrupteurs sont unidirectionnels. Ils sont formés par des transistors commandés à l'ouverture et à la fermeture. Ceux-ci ne pouvant supporter de tension inverse, ils nécessitent une diode en série.[12]



Figure(III-5-2): Structure courant de Filtrage actif parallèle.

II-2-2-2 Le Filtre actif série (FAS)

Le filtre actif série est connecté en série sur le réseau (figure (II-6)). Il se comporte comme une source de tension qui engendre des tensions harmoniques dont la somme avec la tension réseau est une onde sinusoïdale. Il est destiné à protéger les installations sensibles aux tensions perturbatrices (harmoniques, creux, déséquilibres) provenant de la source et également celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Cette structure est proche, dans le principe, des conditionneurs de réseau. Toutefois, cette topologie présente quelques difficultés et inconvénients lors de sa mise en œuvre : elle ne permet pas, par exemple, de compenser les courants harmoniques consommés par la charge.[13]

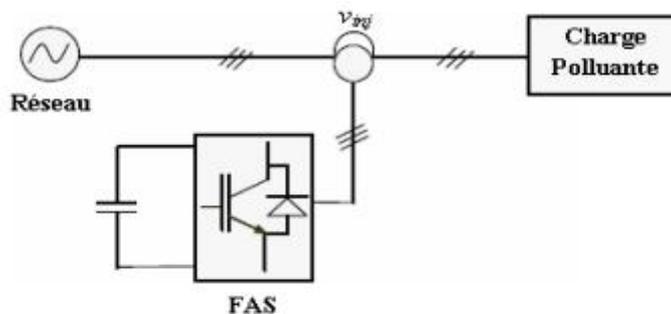


Figure (II-6) : Filtrage actif série

II-2-2.3 La combinaison parallèle-série actifs

C'est une solution de compensation universelle basée sur le fonctionnement simultané des filtres actifs parallèle et série. Cette nouvelle topologie est appelée combinaison parallèle-série actifs ou Unified Power Quality Conditionner (UPQC).

L'UPQC possède les avantages cumulés des filtres actifs parallèles et série. Le filtre actif série, lorsqu'il est placé en amont du filtre actif parallèle, permet de dépolluer la source des tensions perturbatrices. Lorsqu'il est placé en aval, il permet d'isoler la charge de la source perturbée.[13]

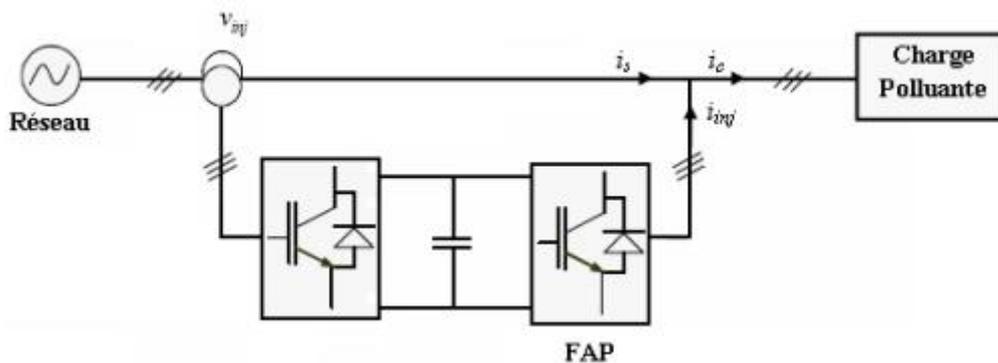


Figure (II-7) : Combinaison des filtres actifs série et parallèle

Avantages des filtres actifs

Le filtre actif offre de nombreux avantages .

- Il s'adapte automatiquement à l'évolution des charges et du réseau :
 - Il peut compenser plusieurs rangs harmoniques (dans la limite de sa bande passante).
 - Il ne passe pas en surcharge lorsque le courant harmonique à compenser dépasse le dimensionnement du filtre actif. Il limite son émission de compensation harmonique aux maximums de ses capacités, mais il n'y a aucun risque de destruction.
- Le risque de résonance entre filtre et impédance du réseau qui existe avec le filtre passif est supprimé.

Un compensateur actif peut protéger des condensateurs de compensation par élimination des courants harmoniques générés par une charge. De même, un compensateur actif de tension de type série peut protéger des condensateurs ou des filtres passif contre une distorsion de tension provenant du réseau amont.

La compensation de l'énergie réactive à 50HZ est possible mais elle est coûteuse par rapport à une solution passive . [19]

	Filtre passif	Filtre actif
Action sur les courants harmoniques	Nécessite un filtre pour chaque fréquence (encombrant)	Agit simultanément sur plusieurs fréquences
Influence d'une variation de fréquence	Efficacité réduit	Aucune conséquence
Influence d'une modification de l'impédance	Risque de résonance	Aucune conséquence
Influence d'une augmentation de courant	Risque de surcharge et de détérioration	Aucune risque de surcharge, mais efficacité diminuée
Ajout de matériel (augmentation de charge)	Nécessite des modification sur le filtre, dans certaines cas	Aucune problème
Action sur les harmoniques suivant leur ordre	Très difficile	Possible, grâce au paramétrage
Modification de la fréquence fondamentale	Modification impossible	Possible, grâce à la reconfiguration
Encombrement	Important	Faible
Poids	Important	Faible

Tableau(II-1): Comparaison entre le filtre actif et le filtre passif.

	Filtre actif parallèle	Filtre actif série
Circuit de puissance du filtre actif	Onduleur de tension à MLI avec boucle de courant	Onduleur de tension à MLI sans boucle de courant
Filtre actif fonctionnant comme	Source de courant I_{af}	Source de tension V_{af}
Type de charge non linéaire	Redresseurs à diodes ou à thyristors à charge inductive et cycloconvertisseurs	Redresseurs à diodes à charge capacitive au coté continu
Fonction additionnelle	Compensation de la puissance réactive	Régulation de la tension alternative

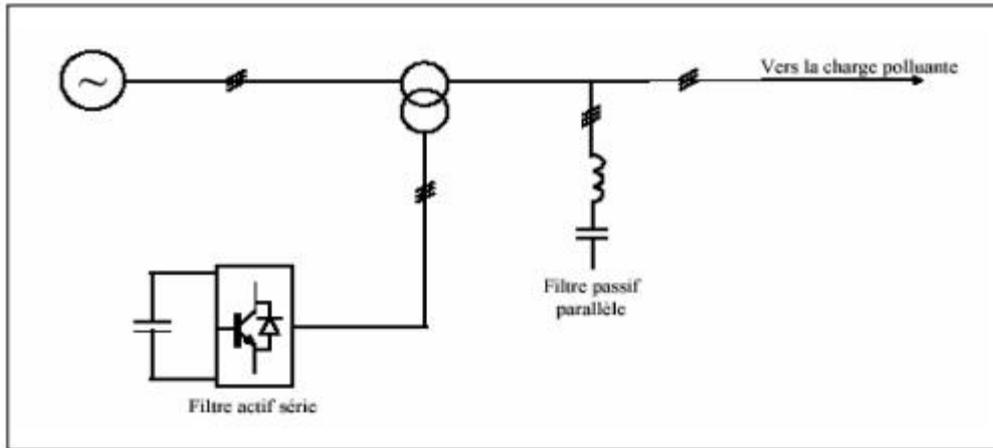
Tableau(II-2): comparaison entre le filtre actif parallèle et le filtre actif série.

II-2-2-4 Filtre hybride

Le filtrage mixte ou hybride résulte de l'association d'un filtre passif et d'un filtre actif. L'intérêt des filtres mixtes est que le filtre passif prend en charge la compensation d'une petite partie des harmoniques; le filtre actif maintient les performances de filtrage en fonction de l'évolution de la charge et du réseau. Ainsi la puissance de convertisseur qui constitue le filtre actif est fortement diminuée grâce aux éléments passifs. Ces structures permettent donc, d'optimiser le rapport performance/coût et d'avoir une meilleure tenue en tension. On a plusieurs structures de filtre mixte. [15]

1 -Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles :

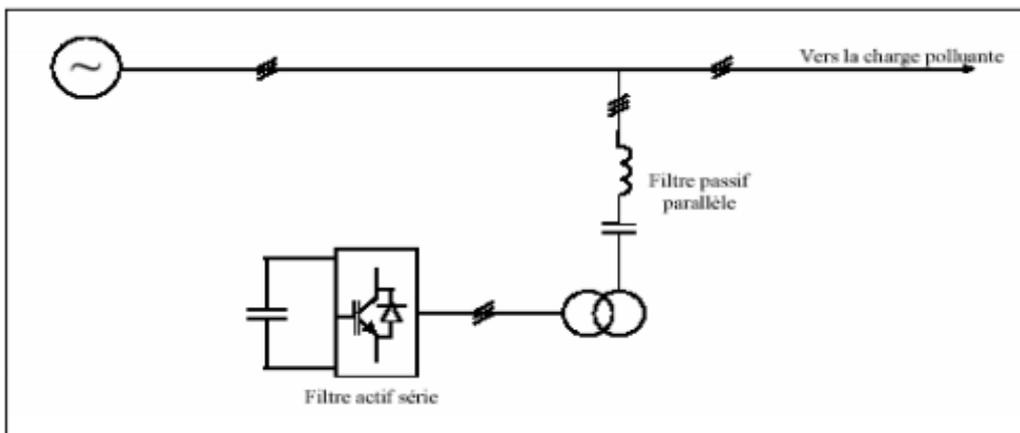
Le rôle du filtre actif série dans ce cas est d'empêcher les courants harmoniques de circuler vers le réseau et de les obliger à passer par les filtres passifs raccordés à leurs fréquences comme le montre la figure(II-8).[15]



Figure(II-8): Filtre actif série et filtre passif parallèle.

2 -Le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles

Le principe de fonctionnement de cette configuration, présentée en figure(II-9), est la même que la précédente avec l'avantage de réduire encore le dimensionnement du filtre actif série car le courant qui le traverse est plus faible. De plus, le filtre actif série est à l'abri d'un éventuel court-circuit de la charge . [15]

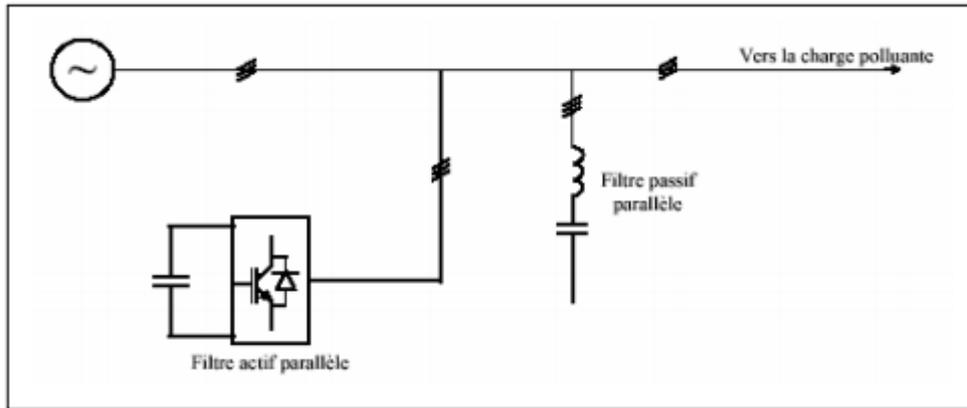


Figure(II-9): Filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle.

3 -Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle

Le rôle du filtre actif parallèle dans cette configuration, montrée en figure(II-10), est la compensation des courants harmoniques basses fréquences émis par la charge polluante. Le filtre passif accordé sur une fréquence élevée, élimine les harmoniques hautes fréquences.

Ce type de filtrage a déjà été appliqué à la compensation des courants harmoniques émis par un cycloconvertisseur de forte puissance .[15]

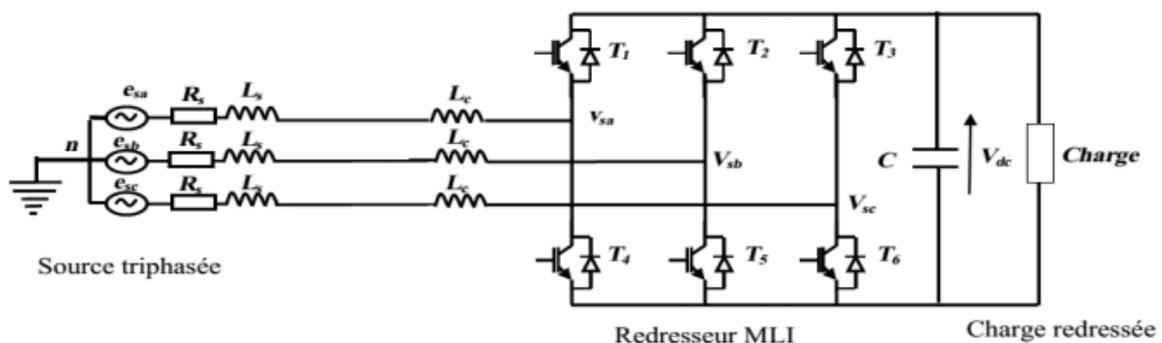


Figure(II-10): Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.

II-2-2-5 Redresseurs à MLI

Grâce à la stratégie de modulation de largeur d'impulsion, un convertisseur AC-DC à absorption sinusoïdale a été rendu possible. C'est une solution très efficace, donc elle doit être généralisée, ce qui n'est pas le cas malheureusement de nos jours. Dans le cas monophasé, la structure la plus répandue est une mise en parallèle d'un pont redresseur monophasé à diodes et d'un hacheur, tandis que dans le cas triphasé, c'est la structure en pont triphasé à base de GTO ou IGBT qui est la plus répandue.

Ce convertisseur permet de réduire les harmoniques produits par les convertisseurs AC-DC conventionnels, il absorbe des courants sinusoïdaux et il fonctionne avec un facteur de puissance proche de l'unité, il permet aussi de contrôler l'écoulement de puissance active et réactive dans les deux directions. [11]



Figure(II-11) Schéma de principe d'un redresseur à MLI triphasé.

II-3 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons discuté des solutions traditionnelles et modernes pour réduire les harmoniques .Nous avons constaté que les solutions traditionnelles ne sont pas assez efficaces, que ce soit des solutions modernes ou plus efficaces.

Nous avons également comparé le filtre actif et passif , et nous avons trouvé le passif plus dangereux, notamment en ce qui concerne l'effet de la fréquence et l'ajustement de la résistance à l'opposé de l'actif n'a pas de conséquences, nous avons donc choisi l'étude d'un Filtre actif parallèle dans le prochaine chapitre .

**CHAPITRE III :
MODELISATION ET
RESULTAT DE SIMULATION
DE FILTRE ACTIF
PARALLELE**

III-1 Introduction

Dans ce chapitre, nous étudierons une solution moderne de filtre active parallèle qui prend en compte les perturbations et compensations électriques que nous utilisons pour compenser les courants irréguliers et déséquilibrés.

La structure FAP est divisée en deux parties: la partie puissance et la partie contrôle de commande. Dans le volet Contrôle - Commande, nous identifierons les courants perturbateurs.

Il existe deux types de méthodes d'identification: la méthode utilise la transformée de Fourier et la méthode de la puissance instantanée. Dans ce chapitre, nous utiliserons la méthode de la puissance instantanée .

III-2 Principe du filtre actif parallèle

Ce filtre est le plus souvent commandé comme un générateur de courant, il génère des courants harmoniques, en opposition de phase avec le réseau, afin que la somme avec ceux-ci soit nulle. On obtient alors des courants sinusoïdaux au niveau du réseau. Il permet donc de supprimer au point de raccordement tous les harmoniques de courants de la charge non linéaire. En pratique, on ne peut pas obtenir un courant de ligne purement sinusoïdal comme dans le cas idéal mais le but est d'avoir un courant qui sera le plus proche possible de la sinusoïde.

En général, le filtre actif parallèle est utilisé pour la dépollution des réseaux BT et MT. Son impédance totale vis à vis de la source et de la charge lui confère une bonne auto-adaptabilité avec des performances appréciables, comme le montre la figure(III-1) le principe du FAP .[14]

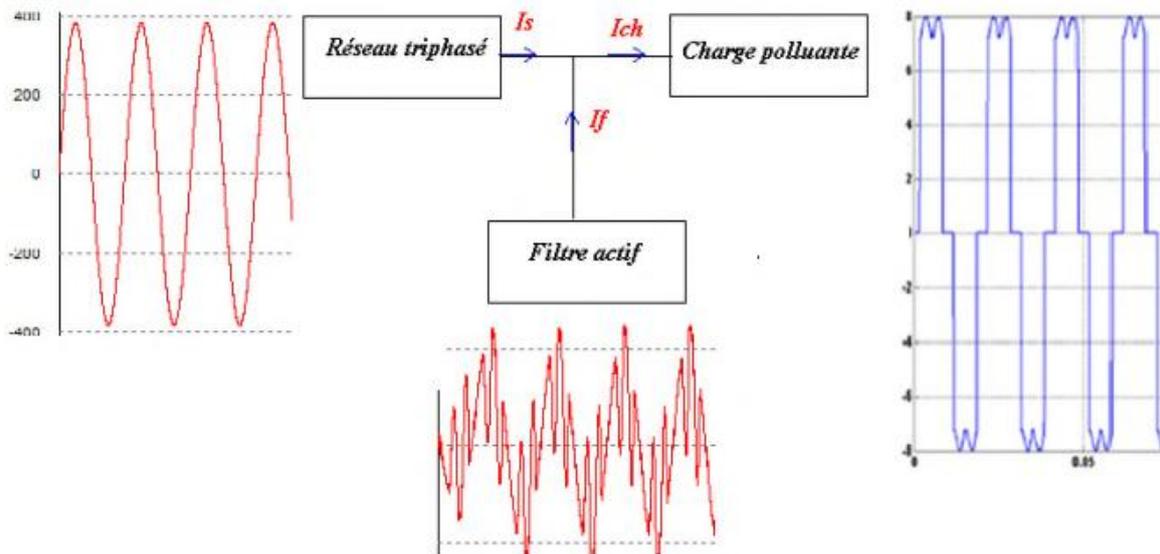


Figure (III-1): Schéma de principe des signaux générés par le filtre actif parallèle.[15]

III-3 Structure d'un filtre actif parallèle

La structure générale du filtre actif parallèle, est présentée dans la figure(III-2) sous la forme de deux blocs: la partie puissance et la partie contrôle-commande.

-La partie puissance est constituée :

-D'un onduleur à base d'interrupteurs de puissance, commandés à l'amorçage et au blocage (GTO, IGBT, etc....) avec des diodes en antiparallèle.

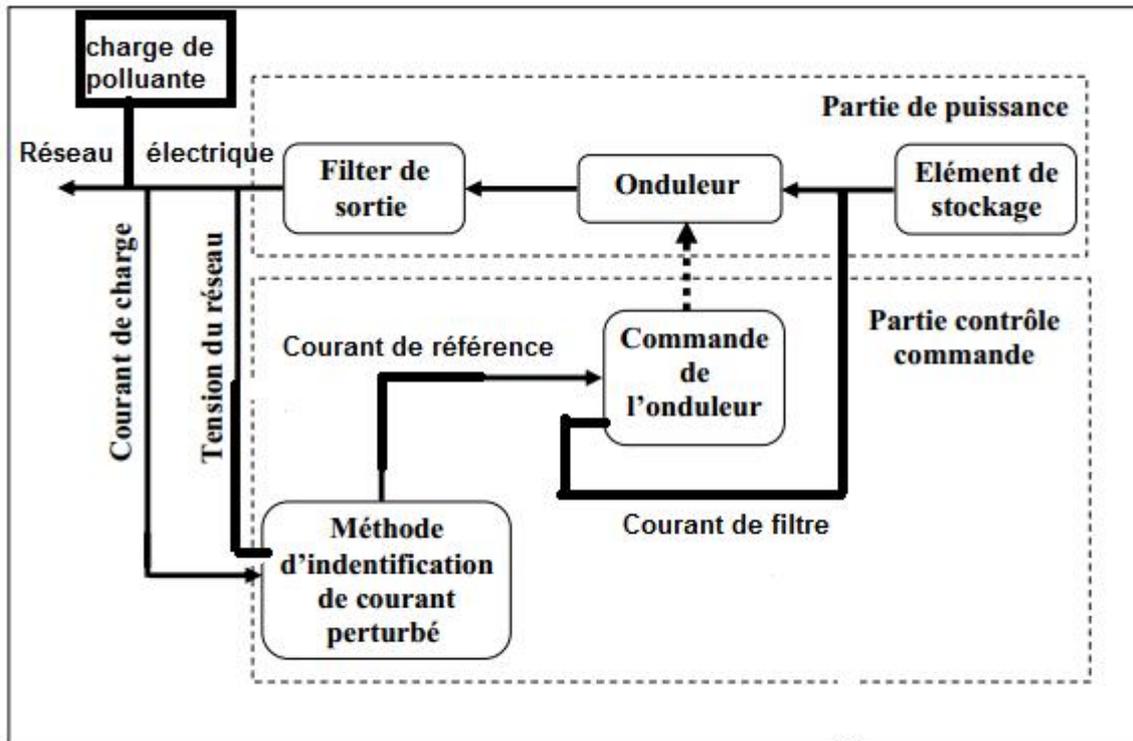
- D'un circuit de stockage d'énergie.

- D'un filtre de sortie.

- La partie contrôle-commande est constituée :

-La méthode d'identification des courants perturbés.

- La commande de l'onduleur de tension .[15]



Figure(III-2): Structure générale d'un filtre actif parallèle.

-Etude de l'onduleur de tension

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continue - alternative à partir d'une source de tension continue, on peut obtenir à la sortie une tension alternative. Donc, il est possible de produire à la sortie du convertisseur une tension alternative, par une séquence de commande adéquate des interrupteurs. Cette tension peut comporter un ou plusieurs créneaux par alternance suivant qu'il s'agit d'une commande à un créneau par alternance, ou d'une commande de modulation de largeur d'impulsions (MLI). [12]

Le but de la commande de l'onduleur est de permettre la meilleure reproduction des courants de référence, à travers les ordres de commande appliqués aux interrupteurs de puissance.

Les deux principales familles de commande des convertisseurs statiques sont :

- la commande par hystérésis
- la commande par modulation de largeur d'impulsions.[15]

III-4 Stratégie de commande

a) Commande par hystérésis

La commande par hystérésis, appelée aussi commande en tout ou rien, est une commande non linéaire qui utilise l'erreur existant entre le courant de référence et le courant produit par l'onduleur, cette erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis, comme le montre la figure (III-3).[15]

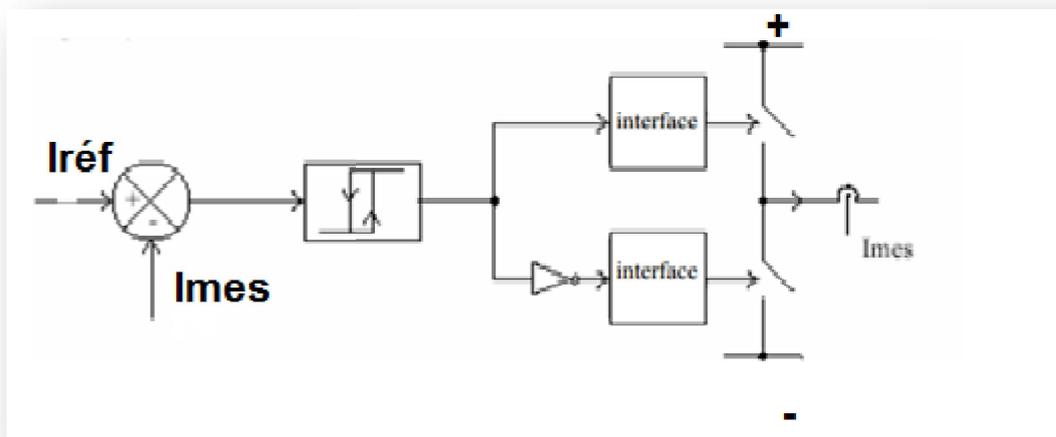
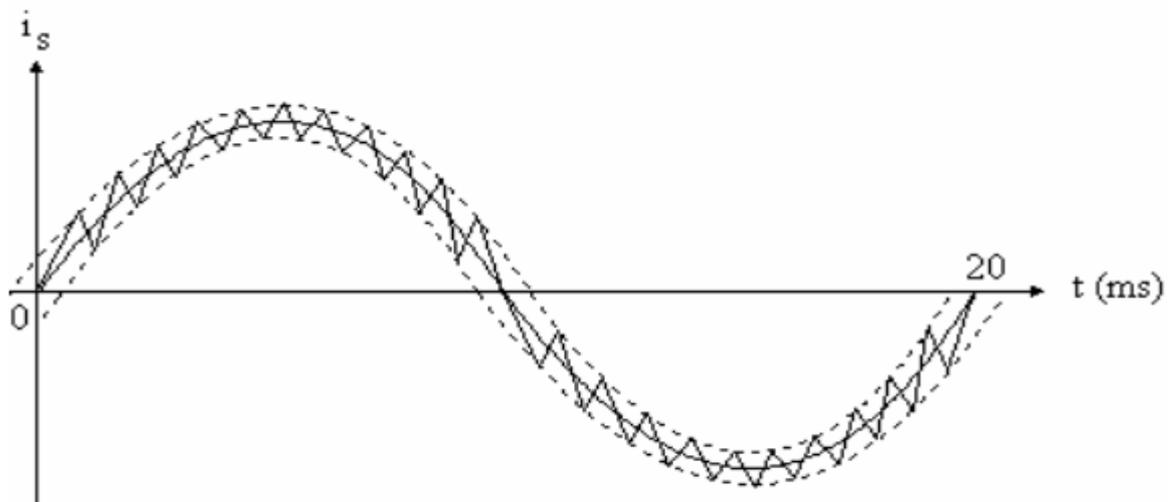


Figure (III-3): Principe de la commande des courants par hystérésis.

Dès que l'erreur atteint la bande inférieure ou supérieure (figure III-4), un ordre de commande est envoyé de manière à rester à l'intérieur de la bande. La simplicité est le principal avantage de cette technique. En revanche, les commutations évoluant librement à l'intérieur de la bande d'hystérésis, on ne peut pas maîtriser correctement le spectre haute fréquence dû aux fréquences de commutations.[16]



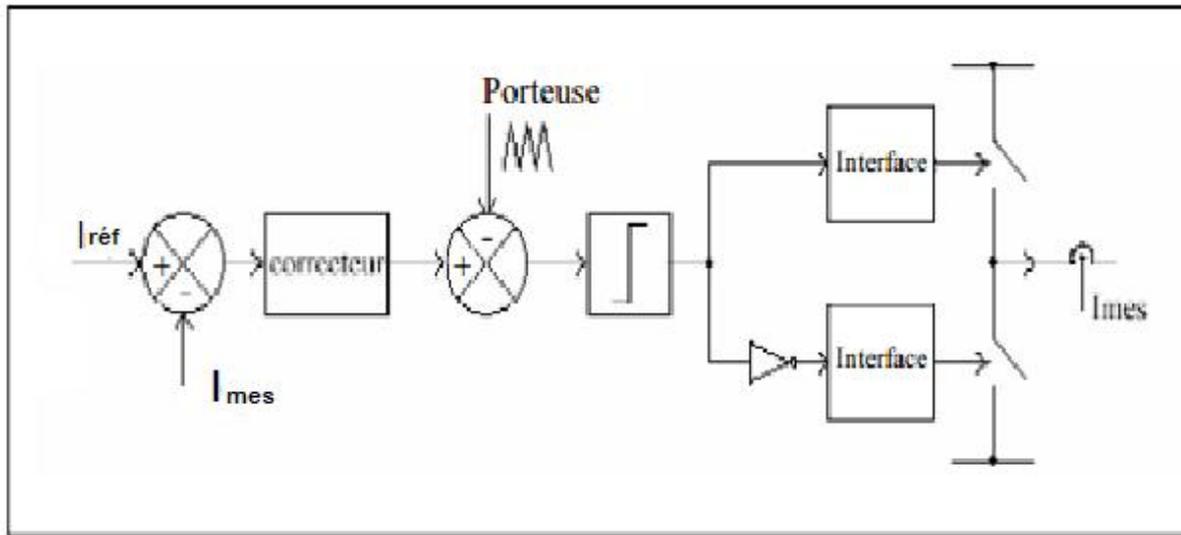
Figure(III-4): Commande par hystérésis

Ce problème peut être résolu par une autre stratégie de commande qui peut être proposé à savoir la commande par hystérésis modulée. [17]

b)Commande par modulation de largeur d’impulsion (MLI)

Pour résoudre les problèmes précédents, nous introduisons une deuxième famille de commande de l’onduleur, c’est la technique de commande par MLI, qui résous le problème de la maîtrise de la fréquence de commutation.

La plus simple et la plus connue des modulations de largeur d’impulsion est sans doute la MLI à échantillonnage naturel. Cette technique de commande met en œuvre d’abord un régulateur qui détermine la tension de référence de l’onduleur à partir de l’écart entre le courant mesuré et sa référence. Cette dernière est ensuite comparée avec un signal triangulaire (porteuse à fréquence élevée fixant la fréquence de commutation). La sortie du comparateur fournit l’ordre de commande des interrupteurs. Le schéma de principe est donné par la figure(III-5).[16]



Figure(III-5): Principe de commande par MLI.

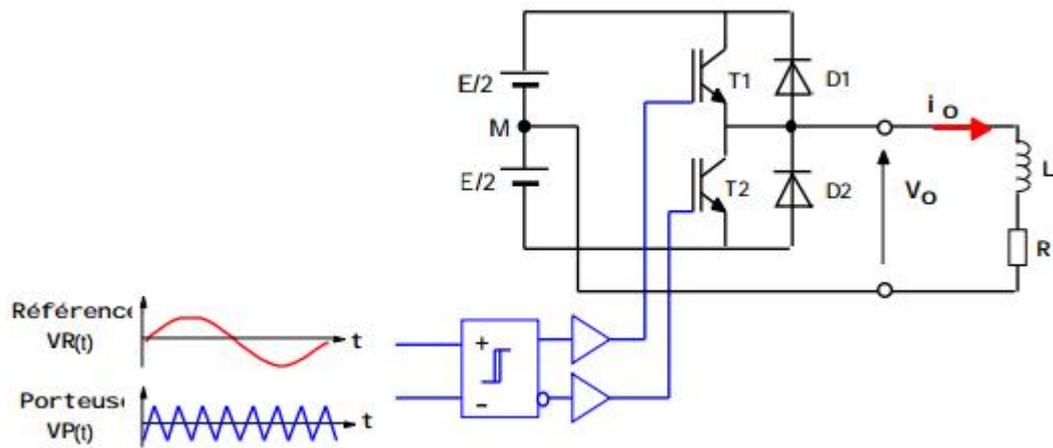
D'autres techniques de MLI existent également dans la littérature comme la MLI à échantillonnage régulier où on peut distinguer deux méthodes :

- La MLI à échantillonnage régulier symétrique où la référence est échantillonnée à chaque période de la porteuse.
- La MLI à échantillonnage régulier asymétrique où la référence est échantillonnée à la demi-période de la porteuse.

Plus récemment, nous avons vu apparaître une technique de commande, dite commande à modulation vectorielle. Cette dernière diffère des techniques présentées précédemment par le fait qu'elle ne s'appuie pas sur des modulations appliquées à chacun des interrupteurs.[16]

1-Principe de MLI sinus-triangle

Le signal de commande des interrupteurs est généré à partir de la comparaison du signal de référence sinusoïdal, (de fréquence $f_r = 1/T_o$) et du signal de modulation triangulaire ou porteuse (de fréquence $f_p = 1/T_d$), comme le montre figure(III-6) .[23]



Figure(III-6) : Commande MLI sinus-triangle : Schéma de principe[23]

2-Caractéristiques

- Deux paramètres caractérisent la commande :

- L'indice de modulation : $m = f_p/f_r$, avec $m \gg 1$ (III-1)

(exemple : $f_r = 50 \text{ Hz}$, $f_p = 5 \text{ kHz}$ $m = 100$) (III-2)

- Le coefficient de réglage : $r = V_r/\max / V_p/\max$ (III-3)

(rapport des amplitudes de la référence et de la porteuse). Généralement, r est compris entre 0 et 1 (l'amplitude de la référence reste inférieure à celle de la porteuse).[23]

III-5 Méthodes d'identification des courants harmoniques

Il existe plusieurs algorithmes pour identifier les courants signaux de référence tel que :

- 1) Puissances instantanées
- 2) Référentiel synchrone
- 3) Filtre Notch
- 4) Filtre de Kalman [9]

1- Généralités sur les méthodes d'identification

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

La première utilise la transformée de Fourier rapide dans le domaine fréquentiel, pour

extraire les harmoniques du courant. Cette méthode est bien adaptée aux charges où le contenu harmonique varie lentement. Elle donne aussi l'avantage de sélectionner les harmoniques individuellement et de ne choisir de compenser que les plus prépondérants. Il est à noter que cette méthode nécessite une grande puissance de calcul afin de réaliser, en temps réel, toutes les transformations nécessaires pour extraire les harmoniques.

La deuxième famille est basée sur le calcul des puissances instantanées dans le domaine temporel. Certaines de ces méthodes se basent sur le calcul des puissances harmoniques de la charge non linéaire. D'autres peuvent être utilisées pour compenser à la fois les courants harmoniques et la puissance réactive, en se basant sur la soustraction de la partie fondamentale active du courant total.[15]

Dans autre travail nous avons choisis la méthode des puissances instantané .

❖ Mise en œuvre de la méthode des puissances instantanées

En présence des harmoniques, la puissance apparente est composée de trois parties: active (P), réactive (Q) et déformante (D) comme le montre la relation (III-4).

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (\text{III-4})$$

Cette méthode exploite la transformation α - β pour obtenir les puissances réelles et imaginaires. Notons par (V_α, V_β) et (I_α, I_β) les composantes orthogonales du repère α - β associées respectivement aux tensions de raccordement du filtre actif parallèle (V_a, V_b, V_c) et aux courants absorbés par les charges polluantes (I_a, I_b, I_c) .

La transformation triphasée α - β permet d'exprimer les tensions par la relation suivante :[12]

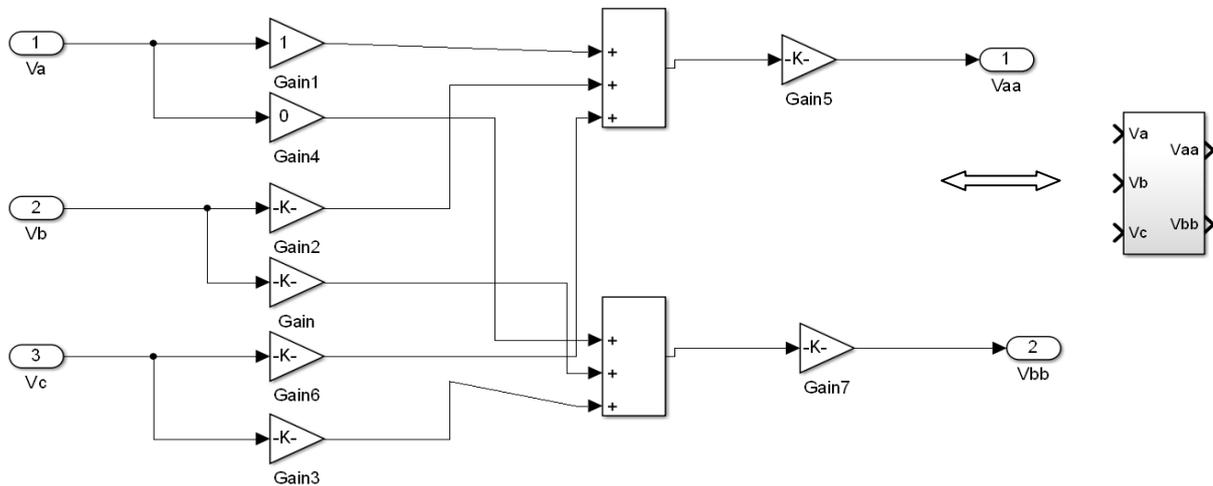
$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (\text{III-5})$$

Et la relation des courants ci-dessous :

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (\text{III-6})$$

Les composante ayant l'indice (0) représentant les composantes homopolaires du système triphasé de courant et de tension, on considère que le réseaux étudié est à neutre isolé et composé de trois fils ce qui empêche la circulation des composantes homopolaires.[24]

On montre dans la figure(III-7)



Figure(III-7) :schéma bloc du transformation des systèmes triphasé en biphasé .

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

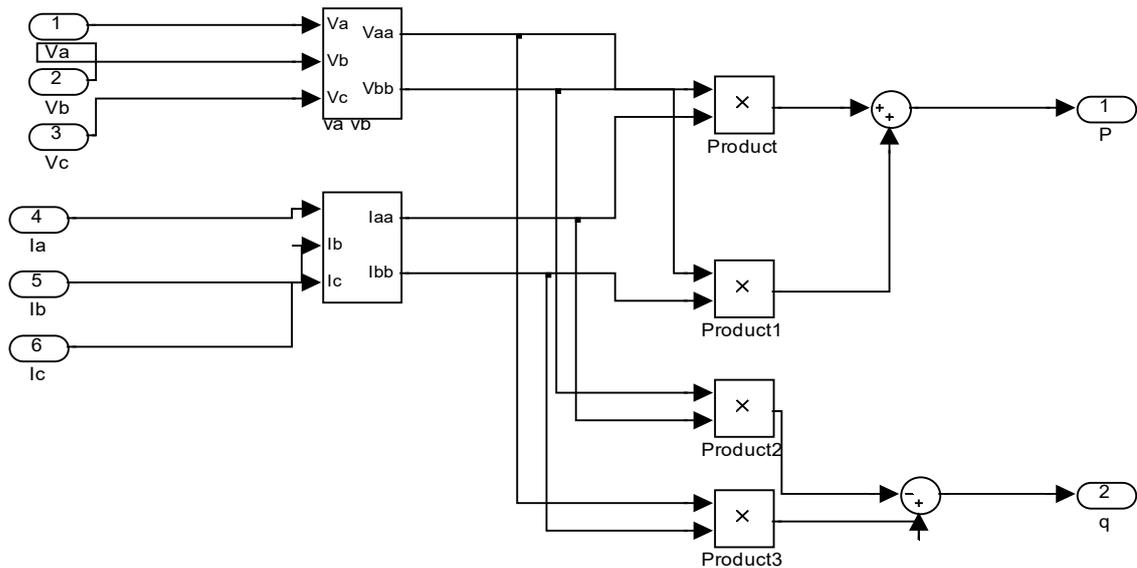
$$\begin{cases} P(t) = Va Ia + Vb Ib + Vc Ic = p(t) + p0(t) \\ p(t) = V\alpha I\alpha + V\beta I\beta \\ p0(t) = V_0 I_0 \end{cases} \quad (III-7)$$

Avec $p(t)$ la puissance réelle instantanée, $p0(t)$ la puissance homolaire instantanée. L'avantage de la transformation α - β est la séparation des séquences homopolaires du système triphasé de courant ou de tension. De la même manière, la puissance imaginaire instantanée peut s'écrire sous la forme suivante :

$$q(t) = -1/2 [(Va-Vb)Ic + (Vb-Vc)Ia + (Vc-Va)Ib] = V\alpha I\beta - V\beta I\alpha \quad (III-8)$$

A partir des relations (III-7) et (III-8) , nous pouvons établir la relation matricielle de l'équation (III-3) :[6]

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V\alpha & V\beta \\ -V\beta & V\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I\alpha \\ I\beta \end{bmatrix} \quad (III-9)$$



Figure(III-8) :schéma bloc de calcul des puissances active et réactive .

On peut décomposer les puissances instantanées p et q en deux composantes, les composantes continues liées au fondamental (p_f et q_f) et les composantes alternatives liées aux harmoniques (p_h et q_h). Cela peut s'écrire comme suit :

$$P = p_f + p_h \quad (III-10)$$

$$q = q_f + q_h \quad (III-11)$$

Un filtre de puissance est utilisé afin de séparer la composante de la puissance liée aux harmoniques de la puissance liée au fondamental .[24]

Avec :

- p_f une puissance continue liée à la composante fondamentale active du courant et de la tension.
- q_f une puissance continue liée à la composante fondamentale réactive du courant et de la tension.
- p_h et q_h des puissances alternatives liées à la somme des composantes perturbatrices du courant et de la tension .[12]

❖ Séparation des puissances perturbatrices

Les puissances définies précédemment contiennent un terme constant relatif au fondamentale ainsi qu'un terme alternatif correspondant aux harmoniques, afin de ne garder que la partie relative aux harmoniques, la composante continue de la puissance doit être filtré.

Cette séparation peut être réalisée en utilisant l'un des deux artifices de filtrage, un filtre passe-haut ou un filtre passe-bas.[6]

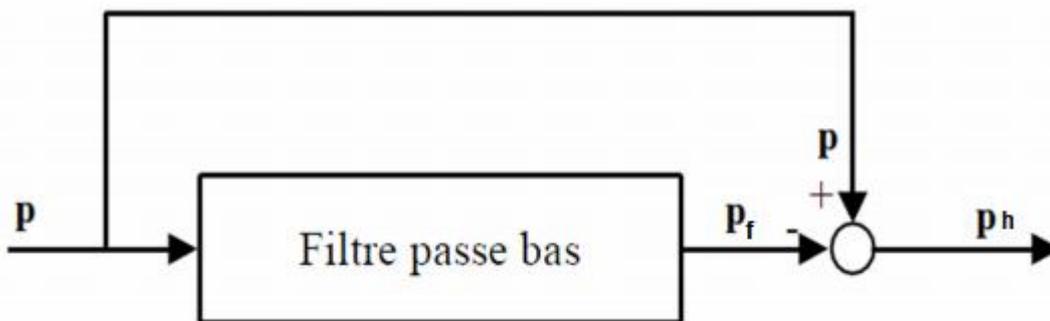


Figure (III-8-a): Schéma représentant le principe de séparation des puissances.

❖ Calcul des courants perturbateurs

En inversant la relation (III-9), nous pouvons déterminer les courants dans le repère $\alpha\text{-}\beta$ comme le montre l'équation :

$$\begin{bmatrix} I\alpha \\ I\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v\alpha^2 + v\beta^2} \begin{bmatrix} V\alpha & -V\beta \\ V\beta & V\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ q \end{bmatrix} \quad (\text{III-12})$$

En considérant les équations (III-12) et (III-11), nous pouvons décomposer le courant dans le repère $(\alpha\text{-}\beta)$ en trois composantes, active et réactive à la fréquence fondamentale et les harmoniques. Ceci conduit à:

$$\begin{bmatrix} I\alpha \\ I\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V\alpha & -V\beta \\ V\beta & V\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_f \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V\alpha & -V\beta \\ V\beta & V\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ q_f \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V\alpha & -V\beta \\ V\beta & V\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_h \\ q_h \end{bmatrix} \quad (\text{III-13})$$

Avec :

$\Delta = V\alpha^2 + V\beta^2$ supposé constant dans l'hypothèse d'une tension sinusoïdale équilibrée du réseau électrique.

Cette expression montre que l'identification des différentes composantes du courant dans le repère $(\alpha\text{-}\beta)$ revient à séparer les termes continus des puissances réelles et imaginaires

instantanées. Les courants perturbateurs triphasés qui représentent les courants identifiés, dits courants de référence (I_{ref}), sont calculés à partir de la transformation (α - β) inverse donnée par la relation (III-14) :

$$\begin{bmatrix} I_{ref1} \\ I_{ref2} \\ I_{ref3} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\alpha} \\ I_{\beta} \end{bmatrix} \quad (III-14)$$

Avec :

I_{α} , I_{β} courants perturbateurs calculés dans le repère α - β à partir des courants réactifs et harmoniques de la relation (III-13).[6-18]

❖ **Algorithme d'identification**

La figure III.9 illustre les différentes étapes de calcul permettant l'obtention des composantes harmoniques du courant d'une charge non- linéaire.

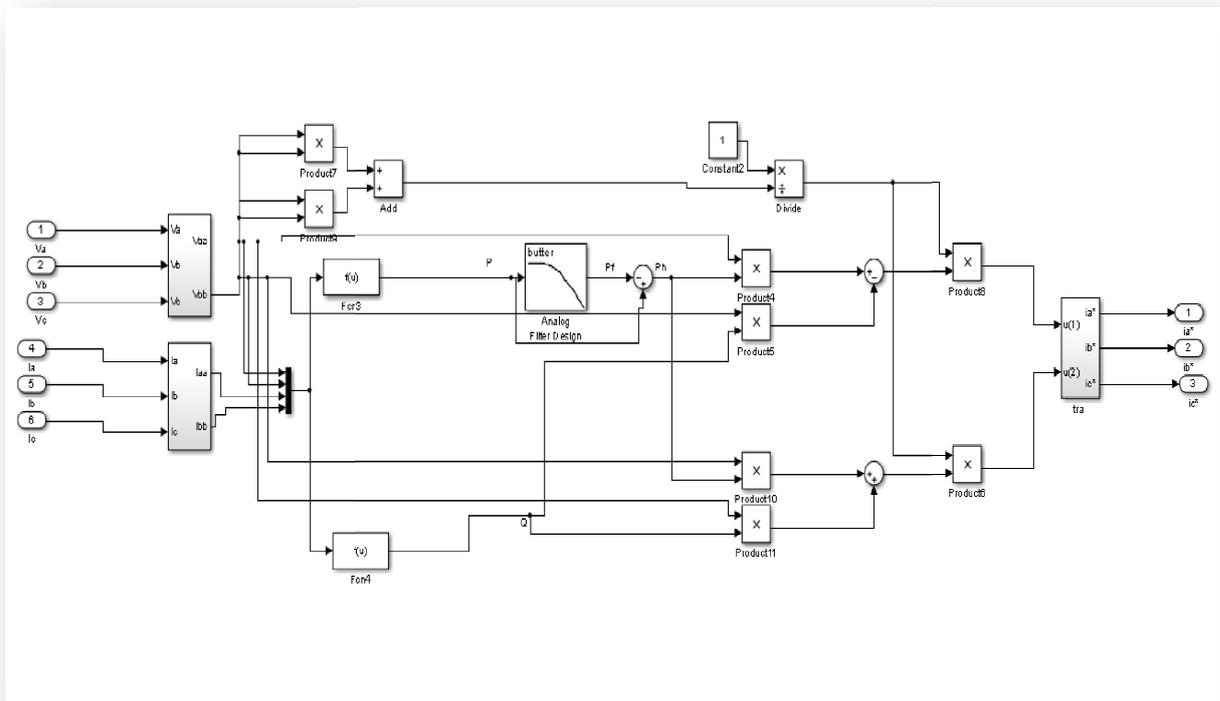
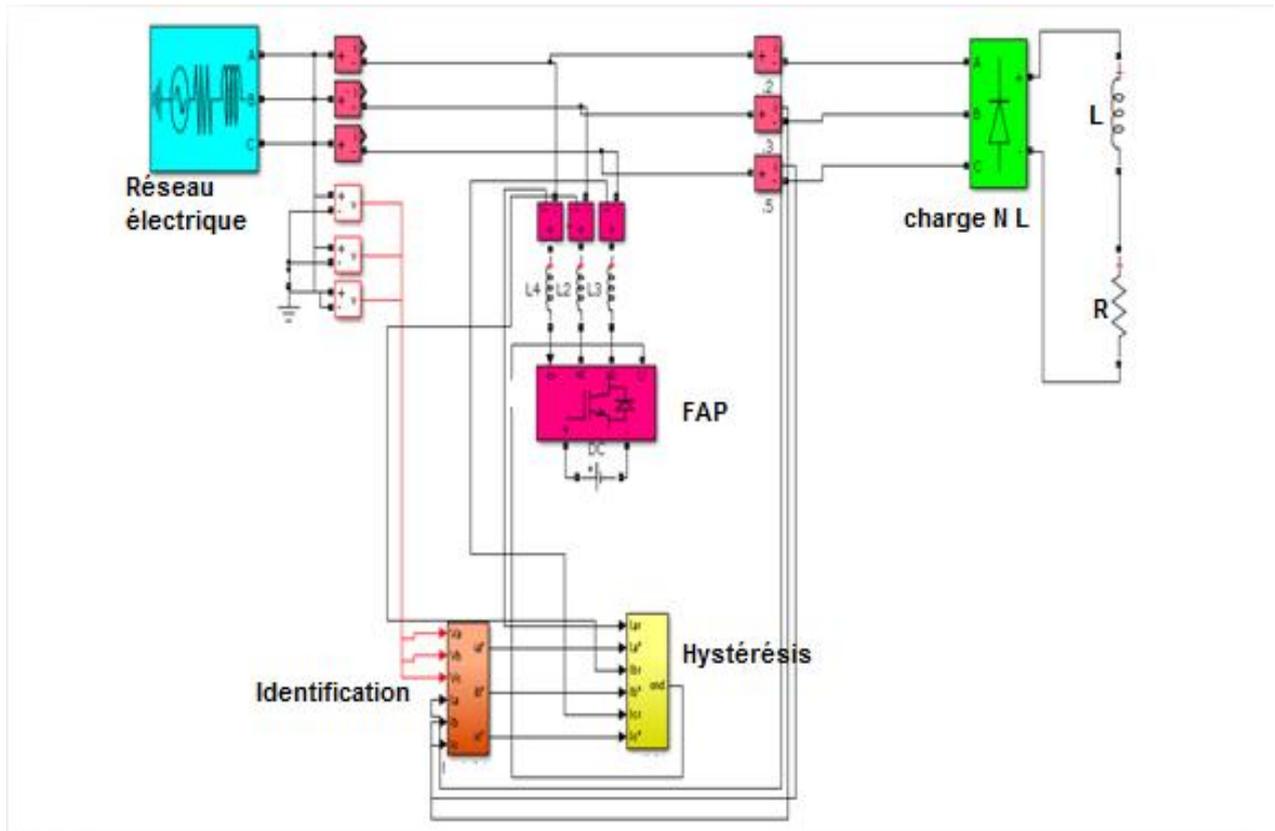


Figure (III-9): Algorithme d'identification des courants harmoniques basé sur le calcul des puissances réelles et imaginaires instantanées.

Cette figure représente le schéma de l'algorithme d'identification des courants harmoniques. Ce dernier est constitué essentiellement, par des blocs de la matrice de transformation ($\alpha\text{-}\beta$), des filtres passe bas, permettant d'extraire les composantes continues des puissances, et les différents blocs de calcul des courants harmoniques.[17]

III-6) Résultats de simulation et interprétations



Figure(III-10) :Schéma global d'un filtre actif parallèle

1-La charge non linéaire est un redresseur triphasé non commandé alimentant une charge R-L

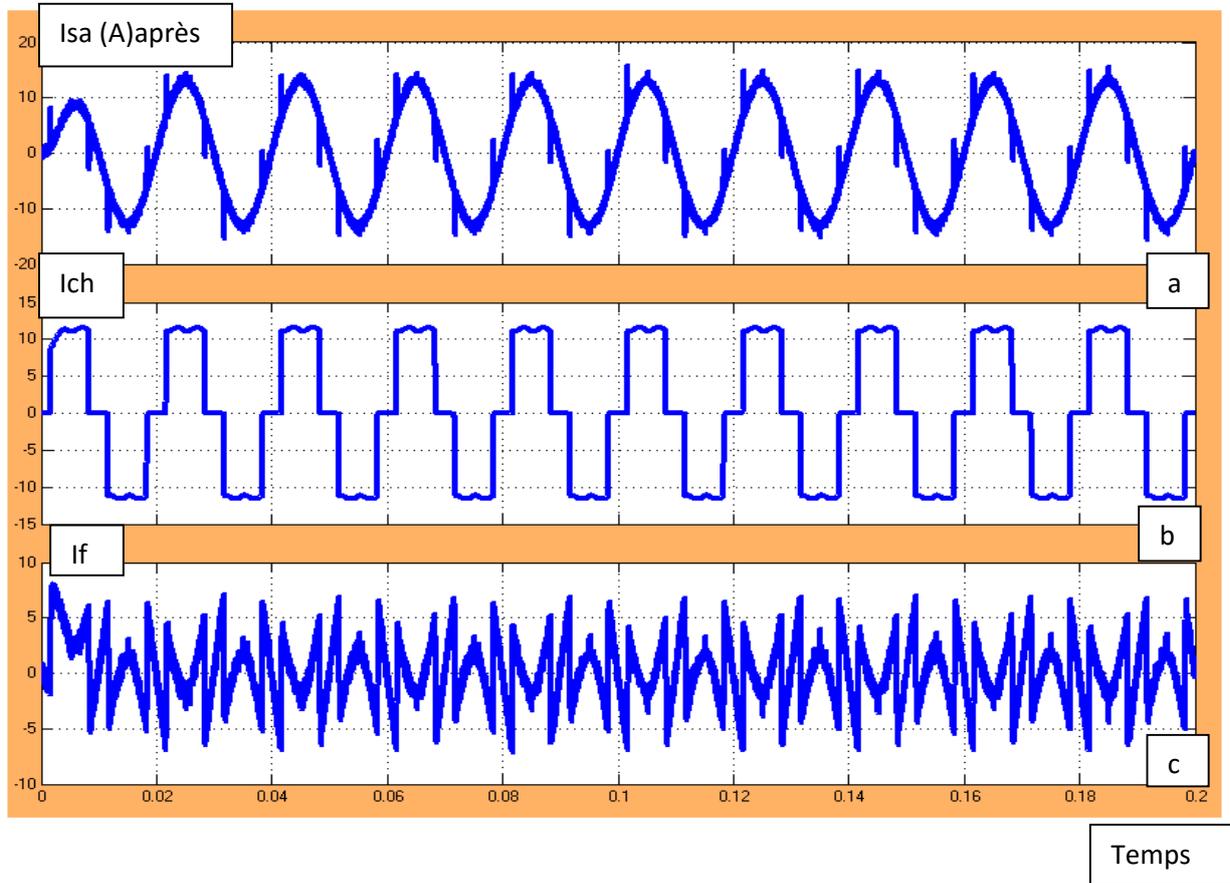


Figure (III-11) :Les allures des courants :a) courant coté réseau de la phase (a) après le filtrage (I_{sa} après) ,b)courant d'entrée de la charge N L ,c)courant à la sortie du filtre .

- ❖ La figure (III-11) montre l'allure des courants harmoniques à la sortie du filtre avec celles du courant de réseau et coté charge N L ,pour montrer l'efficacité de la commande hystérésis .

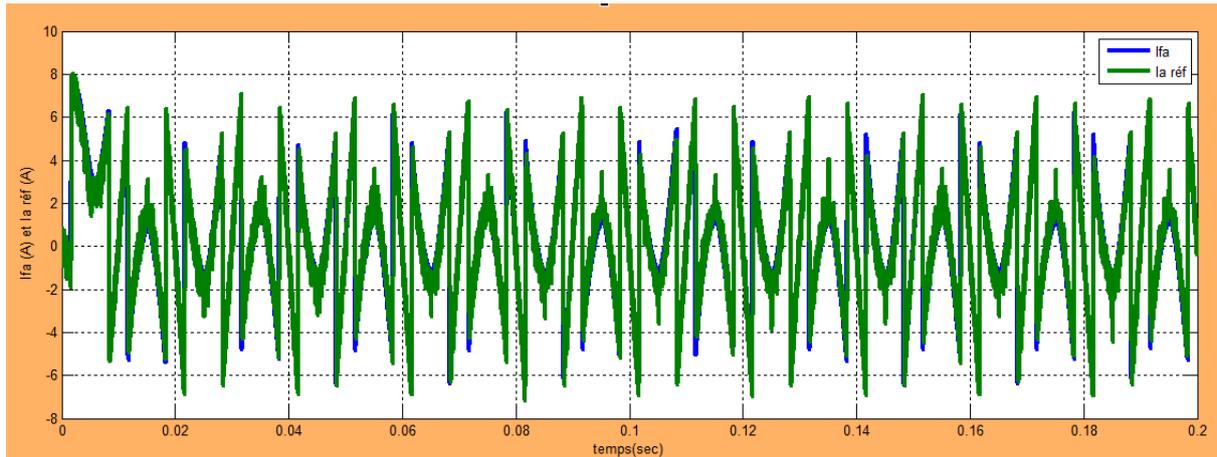


Figure (III-12) :L'allure du courant de la phase (a) en sortie du filtre avec sa référence .

- ❖ La figure (III-12) montre l'allure du courant de la phase (a) en sortie de l'onduleur (FAP) avec sa référence, une bonne superposition des courants sans dépassement est garantie .

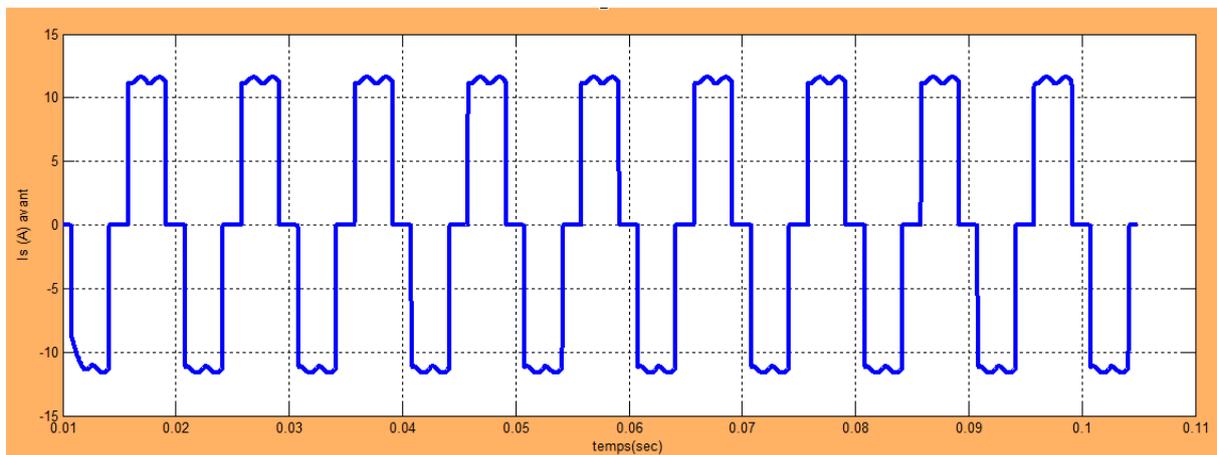
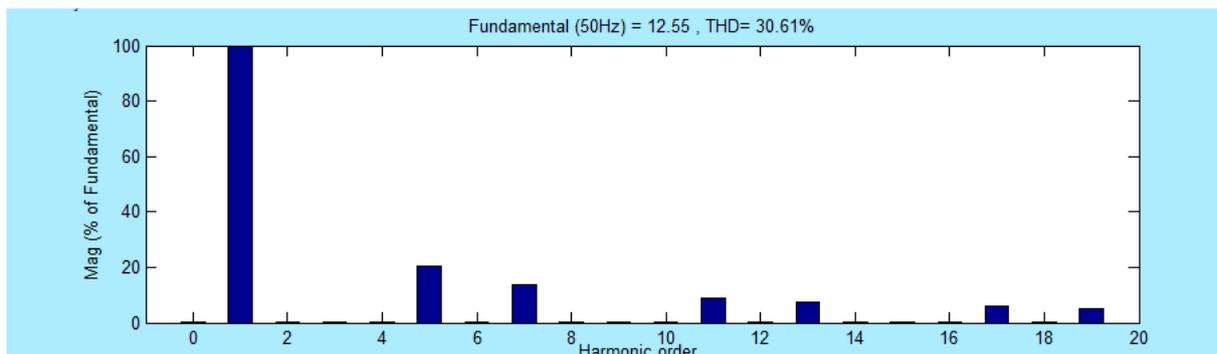
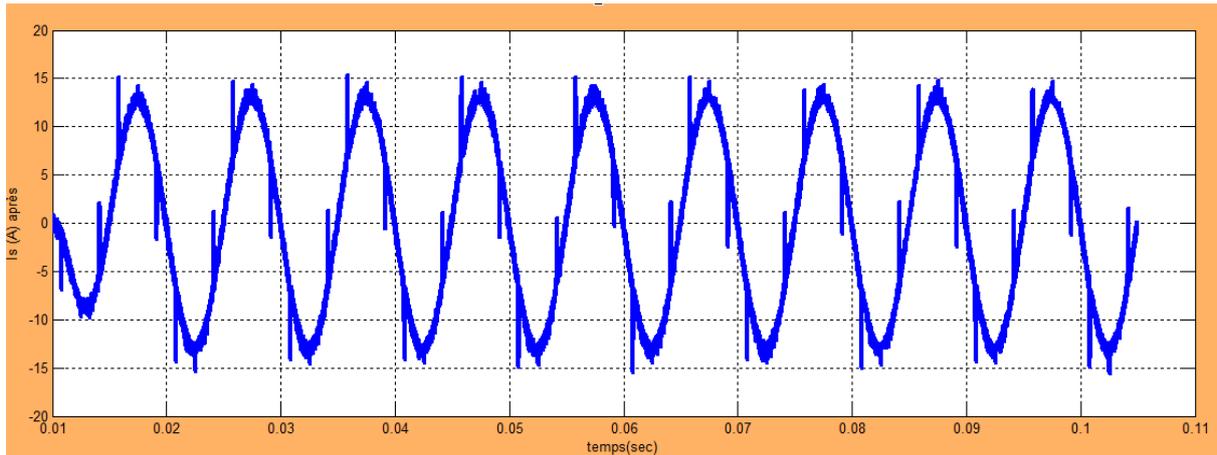


Figure (III-13) :L'allure de courant de la phase (a) du réseau avant filtrage

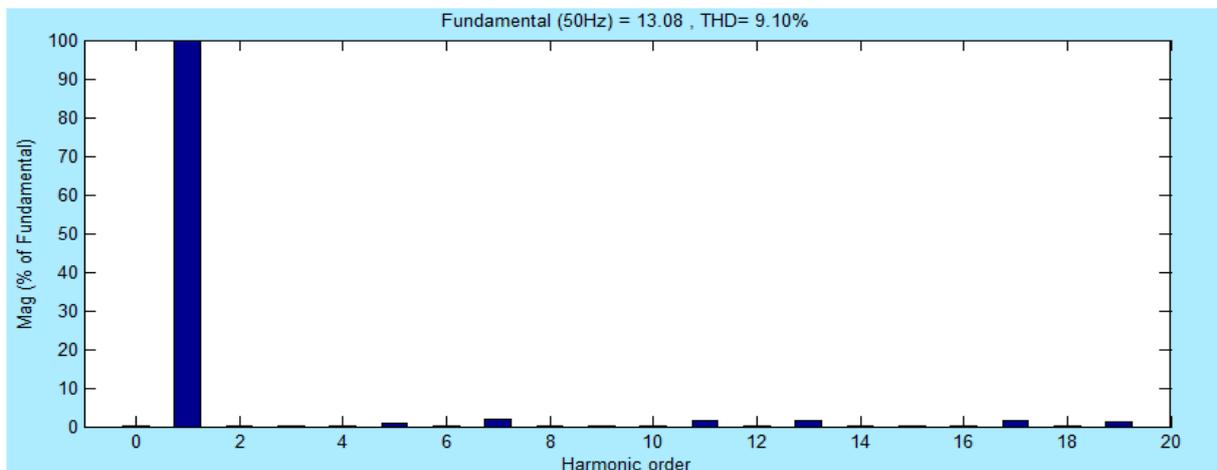


Figure(III-14) :Spectre du courant du réseau avant filtrage .

- ❖ Les figures (III-13) et (III-14) montrent le courant avant filtrage avec son spectre d'harmonique. Un THD de 30.61% montre un grand contenu d'harmonique .

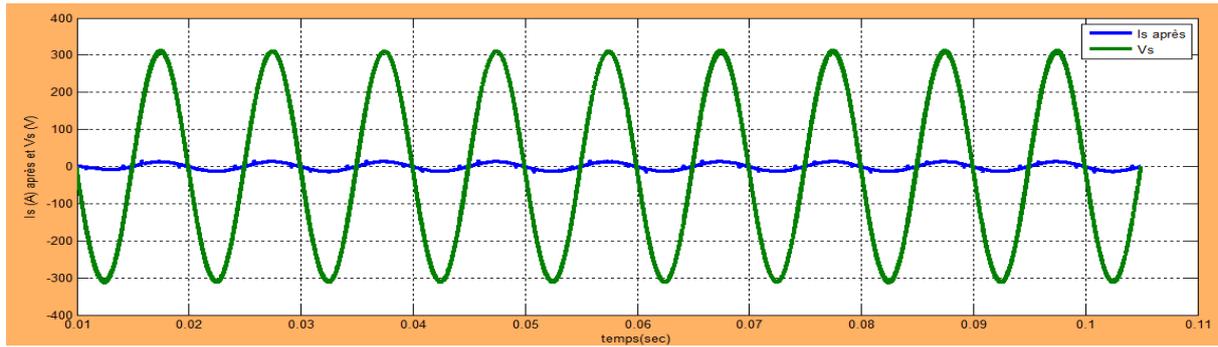


Figure(III-15) :L'allure du courant de la phase(a) du réseau après filtrage



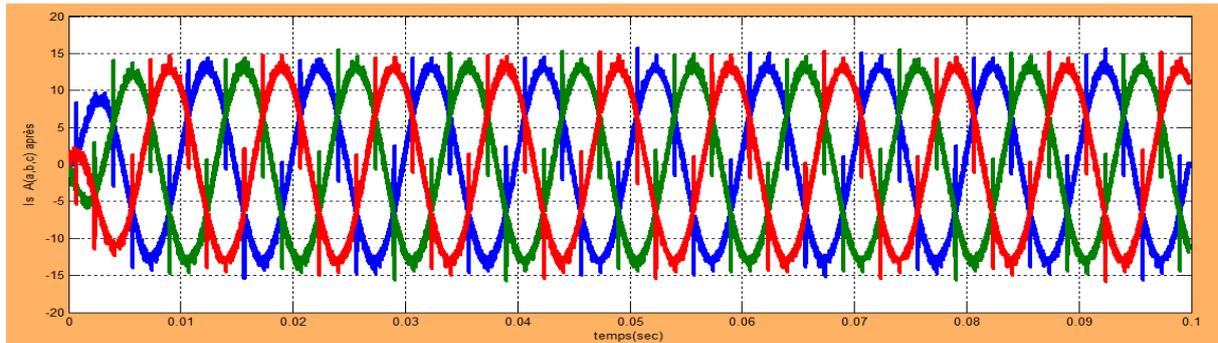
Figure(III-16) : Spectre du courant de réseau après filtrage .

- ❖ Pour montrer l'efficacité de l'introduction du filtre actif parallèle ,la figure (III-15) montre l'allure du courant de la phase (a) proche d'une forme sinusoïdale et la figure(III-16) montre un THD très inférieur à celui de la figure (III-14) ce qui montre l'efficacité du filtre actif parallèle à celui du filtre passif .

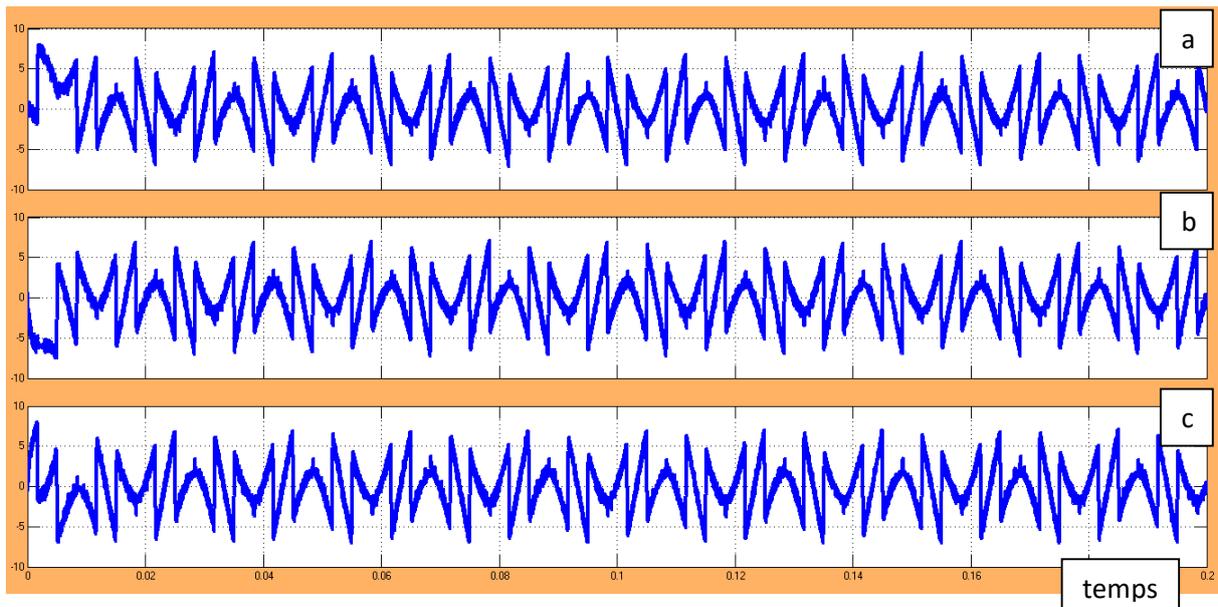


Figure(III-17) : Le courant et la tension de la phase (a) du réseau après filtrage

- ❖ La figure (III-17) montre les formes du courant et de la tension du réseau après filtrage ,la tension et le courant sont en phase ,ce qui assure un fonctionnement à facteur de puissance unitaire.



Figure(III-18) :L'allure de courant de 3 phase (a,b,c) du réseau après filtrage



Figure(III-19) : L'allure de courant de 3 phase (a,b,c) du filtrage

2- Test du filtre pour changement de la charge

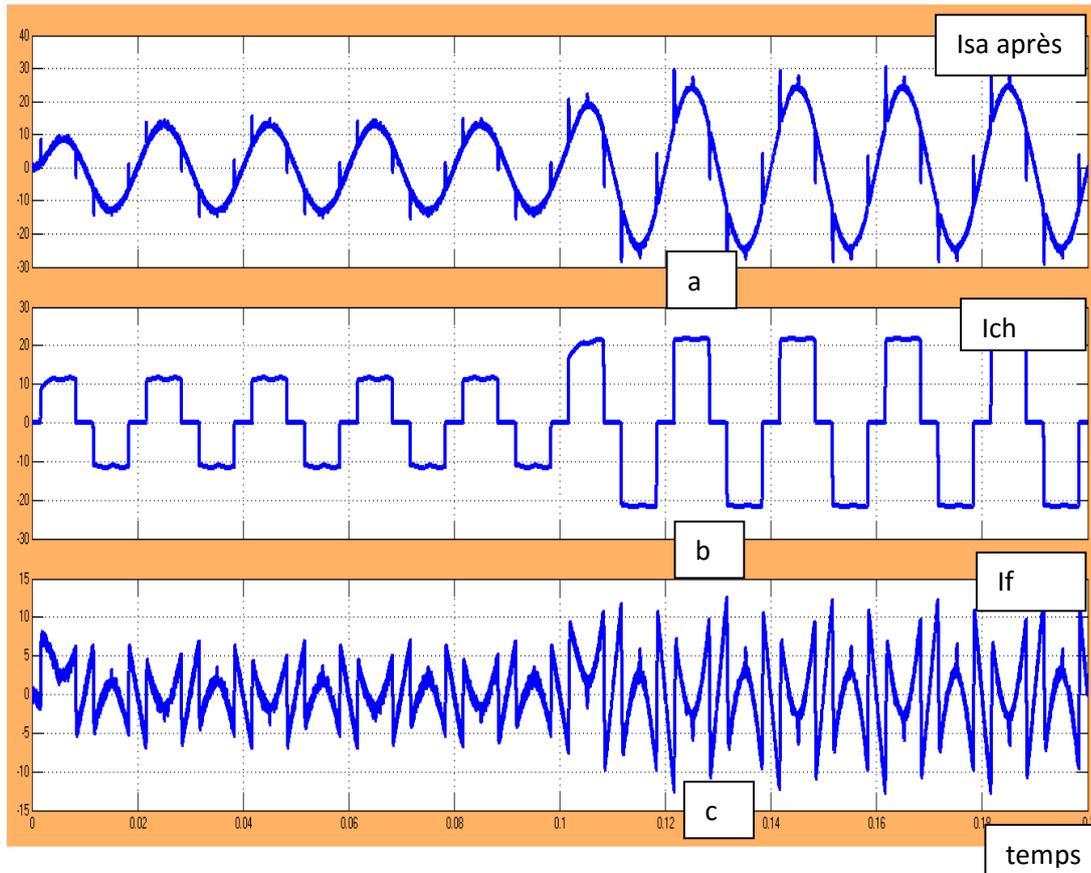


Figure (III-20) :Les allures des courants :a) courant coté réseau de la phase (a) après le filtrage (I_{sa} après) ,b)courant d'entrée de la charge N L ,c)courant à la sortie du filtre.

- ❖ La figure (III-20) montre l'allure des courants harmoniques à la sortie du filtre avec celles du courant de réseau et coté charge N L .

Pour montrer l'efficacité de la commande hystérésis , et la rapidité du filtre actif parallèle, en effet lors du changement brutale de la charge.

III-7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié le filtre actif parallèle comme une solution de dépollution pour minimiser les harmoniques dans le réseau causés par une charge non-linéaire .A cet effet, la méthode des courants a été utilisée pour identifier les courants harmoniques , et commandée le filtre actif parallèle par hystérésis .

Les résultats de simulation ont montré les performances assez acceptables de cette méthode.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Dans le cadre de procédures visant à traiter et à améliorer la qualité de l'énergie et à réduire la pollution harmonique et les perturbations affectant le réseau électrique. Nous avons choisi parmi les solutions modernes de filtrage, le filtre parallèle actif pour éliminer les courants harmoniques de charge non linéaire et pour optimiser les courants de source.

Au début, nous avons étudié dans le premier chapitre la qualité de l'énergie et les perturbations électriques qui affectaient le réseau électrique, tel que : les harmoniques surtensions, creux et coupure de tension ..etc.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté les solutions traditionnelles pour réduire les perturbations harmoniques, mais nous avons constaté que les solutions modernes sont les plus efficaces à notre époque avec l'évolution de l'électronique.

Notre choix est porte sur le filtre actif parallèle comme solution. Par application d'une commande hystérésis qui est simple et facile à implémenter, on a montre ses performances à travers des résultats de simulations. Il en résulte un fonctionnement à facteur de puissance unitaire et un THD faible.

Bibliographie

- [1] **M. SHAFIEE KHOOR** , « Amélioration de la qualité de l'énergie à l'aide de compensateurs actifs :série, parallèle ou conditionneurs unifiés de réseaux électriques », Thèse de doctorat de l'école Polytechnique de l'université de Nantes, Nantes, 2006.
- [2] **BOUAFIA ABDELOUAHAB** , « Techniques de commande prédictive et floue pour les systèmes d'électronique de puissance: application aux redresseurs a MLI », Thèse de doctorat de l'Université ferhat abbas – Setif ,2010 .
- [3] **HEBAIBIA SAMIRA-DAKHLI LOUBNA** , « Modélisation et simulation d'un filtre actif parallèle à sept niveaux à commande MLI » , Mémoire de master de l'universite larbi tebessi – tebessa ,2015 .
- [4] **M TIDJANI**, « Stratégies de Commande d'un Filtre Actif Parallèle à Quatre Fils », Thèse de magistère, Centre Universitaire d'el-oued, 2012.
- [5] **SALEM HAFSIA**, « Commande d'un Filtre actif parallèle à quatre bras par des techniques avancées », Mémoire de Magister de l'Université Mohamed Khider – Biskra,2015 .
- [6] **BAHRI M^{ED} MOULOUD-ZELLOUMA SAID**, « Contribution à l'étude du filtrage actif parallèle des harmoniques dans les réseaux électriques » ,Mémoire de Magister de l'Université Mohamed Khider – Biskra,2011.
- [7] **MARCEL DANIEL EPANYA**, « Application du filtrage actif pour une mise en œuvre de méthode de prédiction et de contrôle d'harmoniques dans un réseau de distribution électrique », Mémoire de l'Université du Québec à trois- rivières ,2010.
- [8] **S .BOUGUERRA et I.BOURENNANE**, « filtrage actifs parallèles des réseaux électriques avec compensation de l'énergie réactive ». Mémoire d'ingénieur d'état, Université de m'sila, 2007.
- [9] **STEEVE BEAULIEU**, « Etude et mise au point d'un filtre actif d'harmoniques en vue d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique »,Mémoire de l'ingénierie de l'Université du québec à chicoutimi ,2007.
- [10] **D. OULD ABDESLAM**, « Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basses tension», Thèse de doctorat, Université de Haute Alsace, 2005.
- [11] **BOUKADOUM AZIZ** , « Contribution à l'étude des stratégies d'identification harmoniques et de commande basées sur les techniques avancées pour les compensateurs actifs des réseaux électriques », Thèse de Doctorat, Université badji mokhtar annaba ,2015 .
- [12] **ZELLOUMA LAID** , « Filtrage actif parallèle des harmoniques du courant générés par un pont redresseur triphasé non commandé », Mémoire de magister , Université badji mokhtar annaba ,2006 .

- [13] **LEMALINI MOHAMED** , « Contrôle de puissance d'un redresseur MLI », Mémoire de master, Université Mohamed Khider – Biskra,2018.
- [14] **B.SAMIR**, « Filtrage actif parallèle des réseaux électriques avec compensation de l'énergie réactive », Thèse ingénieur d'état en génie électrique Université Msila 2007.
- [15] **ALALI MOHAMAD ALAA EDDIN** , « Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension »,THÈSE École Doctorale Sciences Pour l'Ingénieur ULP – ENSAIS – ENGEES – URS, 2002.
- [16] **ABDELAZIZ CHAGHI**, « Contribution au contrôle du courant sur un réseau de distribution électrique application d'un compensateur actif », Thèse de Doctorat de l'Université de Batna, 2004.
- [17] **OMEIRI AMAR** ,«Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant », Thèse de doctorat, Université badjimokhtar annaba, 2007.
- [18] **BOUTRAA LEILA**, « Filtrage actif des harmoniques des réseau électriques », Thèse de Magister de l'Université de Batna, 2005.
- [19] **CHOUAF FATHI**, « L'adaptation du filtre actif parallèle aux variations de la charge », Thèse de Magister de l'Université de Annba, 2004.
- [20] **C. FETHA**," Analyse et amélioration de l'indice de la non-symétrie de tension dans la qualité de l'énergie électrique", Thèse Doctorat. Université de Batna 2006.
- [21] **NEKKAR DJAMEL**. "Contribution à l'étude des stratégies de commande des filtres actifs triphasés " ,Mémoire de magister .Université de Souk-Ahras 2013_2014.
- [22] **J.-N. FIORINA**, « Harmoniques en amont des redresseurs des ASI », Cahier Technique n° 160.
- [23] **P. LADOUX, G. OLLE**, « Compensateur d'harmoniques et de puissance réactive », Publication RESELEC 2002.
- [24] **MR.GALOU ELHACENE -MELLE. HAMANI RACHIDA** , « Contribution à La Commande d'un filtre actif parallèle» , Mémoire de master ,2016 .

ANNEXE

Réseau électrique
$V_{s\ L-L} = 380\ V$, $f = 50\ Hz$, $R_s = 0.5\ m\Omega$, $L_s = 0.015\ mH$
Charge de polluante
$R_c = 45\ \Omega$, $L_c = 50\ mH$, $R_{1c} = 50\ \Omega$
Filtre actif parallèle
$V_{dc} = 740\ V$, $L_f = 5\ mH$,
Commande hystérésis
$\Delta I = 0.1\ A$