



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

Université Echahid Hamma Lakhdar - El Oued

Faculté de la Technologie

Département de Génie Electrique

MÉMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Spécialité : Commande électrique

Présenté par :

1. Salhi Dhiya Eddine
2. Belaid Haitham
3. Houba Mohammed Oussama

Intitulé :

Etude d'un Filtre Actif Parallèle à Quatre Fils

Soutenue le : 28/05 /2025

Devant le jury composé de :

Dr : TOUIL Slimane

Président

Dr : AZZA Abdelaziz

Examineur

Dr : Mahni Tidjani

Encadreur

Année académique : 2024/2025



REMERCIEMENTS

Louange A Dieu, qui nous a accordé la foi, le courage, la patience et la volonté pour accomplir ce modeste travail dans les meilleures conditions.

Nos premiers remerciements s'adressent à monsieur Mahni Tidjani, pour nous avoir encadrés tout au long de cette période de recherche, et pour ses précieux conseils.

Nous remercions également les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer notre travail.

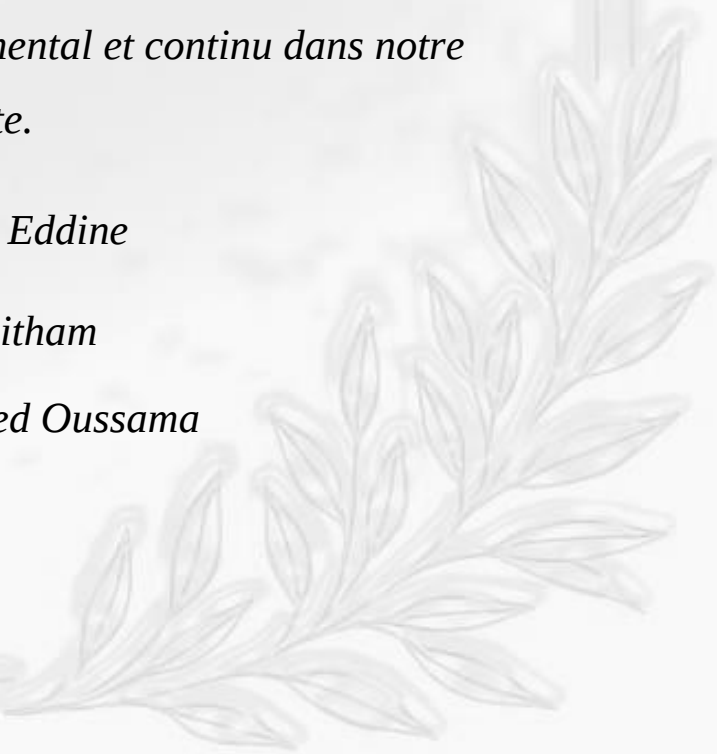
Nos sincères remerciements vont aussi à nos amis, pour leur soutien moral constant tout au long de la préparation de ce mémoire.

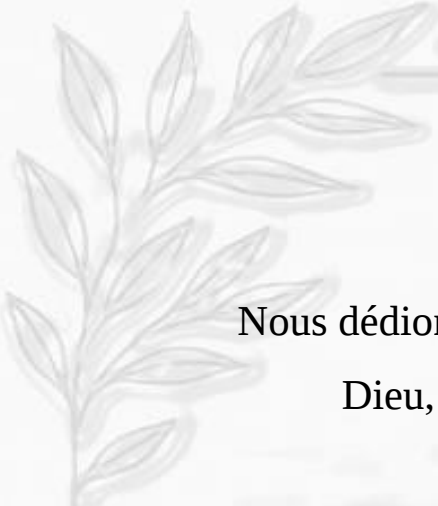
Enfin, nous ne saurions clore ces remerciements sans exprimer notre profonde gratitude à nos parents, qui ont toujours été à nos côtés et ont joué un rôle fondamental et continu dans notre réussite.

Salhi Dhiya Eddine

Belaid Haitham

Houba Mohmmmed Oussama





DEDICACE

Nous dédions le fruit de ce modeste travail à ceux qui, après Dieu, ont été la source de notre force et de notre persévérance.

À nos chers parents, symboles de sacrifice et de dévouement, pour leur soutien inconditionnel, leur amour infini et leur confiance constante, ils ont été la lumière qui a éclairé notre chemin.

À nos frères et sœurs, toujours présents à nos côtés, ainsi qu'à nos familles respectives qui ne nous ont jamais ménagé leurs encouragements et leurs prières.

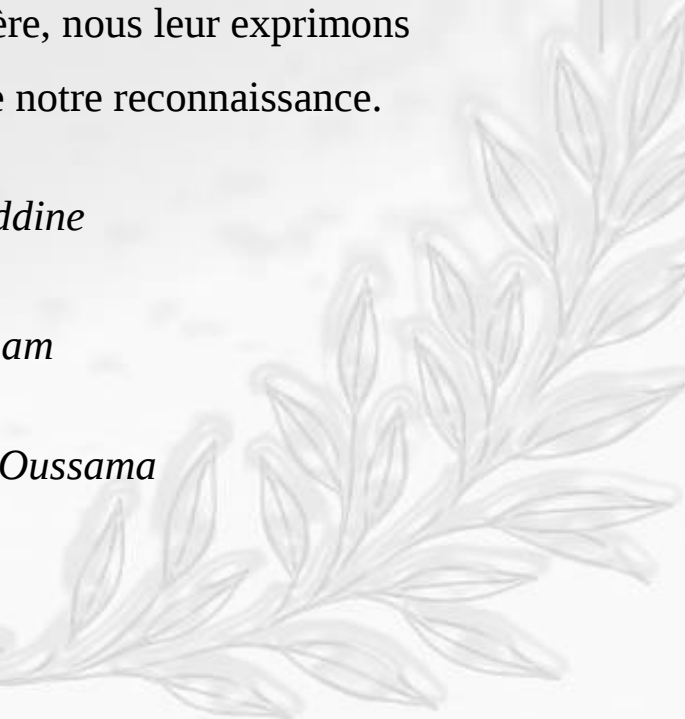
Nous le dédions également à nos fidèles amis et camarades de parcours, qui ont partagé avec nous les moments difficiles comme les plus joyeux, et qui ont toujours été un appui précieux.

Enfin, à tous ceux qui ont cru en nous, qui nous ont soutenus par un mot, un conseil ou une prière, nous leur exprimons notre profonde gratitude et toute notre reconnaissance.

Salhi Dhiya Eddine

Belaid Haitham

Houba Mohmmmed Oussama



ملخص

تُستخدم محولات الطاقة بشكل متزايد نظرًا للمزايا الكبيرة التي تقدمها. ومع ذلك، فإن هذه المحولات تلوث الشبكات الكهربائية عن طريق إدخال التيارات والجهود التوافقية، واستهلاك الطاقة التفاعلية في بعض الأحيان. تنتشر التوافقيات في الشبكات الكهربائية ويمكن أن تعرقل العمل الطبيعي لبعض المعدات الكهربائية أو حتى تتسبب في تلفها.

يهدف هذا العمل إلى دراسة مرشح نشط متوازٍ ذي بنية جهدية لتحسين جودة الطاقة في شبكات الجهد المنخفض.

في هذا البحث، سيتم دراسة قسم الطاقة وقسم التحكم في المرشح النشط. سيتم استخدام هذا المرشح النشط في الشبكة الكهربائية لإزالة التيارات التوافقية الناتجة عن ثلاثة مقومات أحادية الطور.

في مثل هذه الشبكة حيث يتم توزيع السلك المحايد، تظهر مكونات متجانسة (توافقيات من الرتبة الثالثة ومضاعفاتها) بسبب هذه الأحمال غير الخطية أحادية الطور. لهذا السبب، فإن المرشح المدروس في هذا العمل أكثر ملاءمة، نظرًا لوجود السلك الرابع الذي يسمح بتعويض تيار المحايد.

تمت محاكاة النظام المكون من الشبكة الكهربائية والأحمال غير الخطية والمرشح النشط باستخدام برنامج MATLAB/Simulink. سيتم اختبار عاكس بأربعة أذرع. وأخيرًا، سيتم عرض ومناقشة نتائج المحاكاة بعد الترشيح.

الكلمات المفتاحية:

مرشح نشط متوازٍ بأربعة أسلاك، معدل التشويه التوافقي (THD) ، تحديد التيارات التوافقية، مع عاكس بأربعة أذرع، تحكم بالتباين المغناطيسي (هيستريزيز)

Résumé

Les convertisseurs de puissance sont de plus en plus utilisés grâce aux avantages énormes qu'ils offrent. Cependant ces convertisseurs polluent les réseaux électriques en introduisant des courants et des tensions harmoniques et en consommant parfois l'énergie réactive. Les harmoniques circulent dans les réseaux électriques et peuvent perturber le fonctionnement normal de certains équipements électriques voir même engendrer leur destruction.

L'objectif de ce travail est l'étude d'un filtre actif parallèle à structure tension afin d'améliorer la qualité d'énergie dans les réseaux basse tension.

Dans ce travail la partie puissance et la partie commande du filtre actif vont être étudiées. Ce filtre actif va être utilisé dans un réseau électrique pour éliminer les courants harmoniques générés par trois ponts redresseurs monophasés.

Dans un tel réseau, le neutre est distribué ce qui fait apparaître des composantes homopolaires (harmoniques d'ordre 3 et ses multiples), à cause de ces charges non linéaires monophasées, à cette effet le filtre étudié dans ce travail est plus adéquat, du fait de la distribution du quatrième fil, qui permet de compenser le courant du neutre.

Le système composé du réseau électrique, des charges non linéaires et du filtre actif a été simulé à l'aide du logiciel MATLAB/Simulink. Un onduleur à quatre bras sera testé. Enfin, les résultats de la simulation après le filtrage seront présentés et discutés.

Mots clés : Filtre actif parallèle à quatre fils, Taux de distorsion harmonique(THD), Identification des courants harmoniques, Onduleur à quatre bras, commande par hystérésis

Sommaire

INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
----------------------------	---

CHAPITRE I

Perturbations et Dépollution dans les Réseaux Electriques

I.1 Introduction.....	4
I.2 Qualité de l'énergie.....	4
I.3 Origines des perturbations dans le réseau électrique.....	4
I.3.1 Influences sur l'amplitude.....	4
I.3.1.1 Creux de tension et coupures	4
I.3.1.2 Fluctuation de tension	5
I.3.1.3 Surtension	6
I.3.2 La Influence sur la fréquence	7
I.3.3 Influence sur l'équilibre du système triphasé	7
I. 3.4. Les harmoniques et inter-harmoniques.....	8
I.3.4.1. Notion de charge linéaire et charge non linéaire	8
I.4. Perturbation harmoniques	10
I.4.1 Définition	10
I.4.2 Sources des harmoniques.....	10
I.4.3 Effets des harmoniques	10
I.4.3.1. Effets instantanés	10
I.4.3.2. Effets à long terme	11
I.4.4.Conséquences dû à la présence de signaux harmoniques	11
I.4.5 Caractéristiques des harmoniques.....	11
I.4.5.1 Décomposition en série de Fourier	11
I.4.5.2 Taux de distorsion harmonique(THD).....	12
I.4.5.3 Le facteur de puissance (FP).....	12
I.5 Normes et réglementation.....	13
I.6 Solutions de dépollution du réseau électrique	16
I.6.1 Solutions traditionnelles de dépollution	16
1.6.2 Solutions modernes de dépollution	18
1.6.2.1 Filtre actif parallèle	18
1.6.2.2 Filtre actif série	19
1.6.2.3 Filtre combiné	19
1.6.2.4 Filtre actif hybride	20
I.7 Conclusion	20

CHAPITRE II

Commande du Filtre Actif Parallèle à Quatre Fils

II.1 Introduction	22
II.2. Structure d'un filtre actif parallèle.....	22
II.2.1 Etude de la partie puissance.....	23
II.2.1.1. Description de l'onduleur triphasé à quatre bras	23
II.2.1.2.Système de stockage d'énergie.....	24
II.2.1.3 Filtre de couplage	25
II.2.2 Etude de la partie commande.....	25
II.2.2.1 L'identification des courants de référence.....	25
II.2.2.2 Régulation de la tension du bus continue	26
II.2.2.3 Commande de l'onduleur	27
II.2.2.3.1 La Commande par hystérésis.....	27
II.2.2.3.2. Commande d'onduleur par MLI	28
II.3 Conclusion.....	29

CHAPITRE III

Simulation et Interprétations des Résultats

III.1 Introduction	29
III.2 Méthode des puissances instantanées réelle, imaginaire et homopolaire avec FBP	31
III.3Méthode des puissances instantanées réelle, imaginaire et homopolaire avec FMV	31
III.4Méthode de référentiel synchrone avec FPB.....	33
III.5Méthode de référentiel synchrone avec FMV	34
III.6 Conclusion.....	35

CHAPITRE IV

Simulation et Interprétations des Résultats

IV.1 Introduction.....	37
IV.2 Schémas de simulation	37
IV.2.1. Paramètres de la simulation	39
IV.2.2. Résultats des simulations sous Matlab-Simulink	40
IV.2.2.1. Cas de charge équilibrée	40
IV.2.2.1.1 Cas de charge équilibrée avec un onduleur triphasé à trois bras	40
IV.2.2.2 Cas de charges déséquilibrées	44
IV.3 Conclusion	47
CONCLUSION GÉNÉRALE	48
Bibliographies	

LISTE DES SYMBOLES

Symbole	Définition
f	Fréquence
fh	Fréquence de la composante harmonique de rang h
f_1	Fréquence de la composante fondamentale
THD	Taux de Distorsion Harmonique
D	Puissance Déformante
P	Puissance active
Q	Puissance reactive
S	Puissance apparente
FP	Facteur de puissance
I_f	Valeur efficace du courant injecté par le FAP
I_{1h}	Valeur efficace du Courant harmonique du rang h
V_1	Valeur efficace de la tension de l'harmonique de rang h
V_h	Valeur efficace de la tension du fondamental
p	Indice de pulsation
L	Inductance
C	Capacité
R	Résistance
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
MLI	Modulation de largeurs d'impulsions
FAP	Filtre actif parallèle
FAS	Filtre actif série
R_s	Résistance du réseau côté source (Ω)
L_s	Inductance côté source (H)
R_c	Résistance côté charge (Ω)
L_c	Inductance côté charge (H)
L_f	Inductance de filter
C_{dc}	Condensateur du bus continu
I_s	Courant de la source
I_f	Courant du filter
I_h	Courant harmonique de la charge
I_n	Courant du neuter
$i_\alpha^*, i_\beta^*, i_c^*$	Courants de référence identifiés
i_{ca}, i_{cb}, i_{cc}	Courants de ligne
$\tilde{p}, \tilde{q}$	Composantes alternatives de la puissance réelle et imaginaire
$\alpha\text{-}\beta$	Axes du repère de Concordia
ΔT	Période de variation du courant du filtre
W_h	Pulsation du rang h
T_i	État de l'interrupteur i (ouvert ou fermé)

LISTE DES FIGURES

Figure	Titre	Page
Fig (I.1)	Creux et coupure de tension.	5
Fig (I.2)	Fluctuations de tension.	5
Fig (I.3)	Surtension transitoire.	6
Fig (I.4)	Surtension permanente.	6
Fig (I.5)	Variation de la fréquence.	7
Fig (I.6)	Déséquilibre de réseau. .	8
Fig (I.7)	tension et courant d'une charge linéaire.	9
Fig (I.8)	tension et courant d'une charge non linéaire.	9
Fig (I.9)	représentation de deux signaux fondamental et d'ordre.	10
Fig (I.10)	le facteur de puissance.	12
Fig (I.11)	Filtre passif resonant.	17
Fig (I.12)	Filtre passif amorti.	18
Fig (I.13)	Filtre actif parallèle.	19
Fig (I.14)	Filtre actif série.	19
Fig (I.15)	Combinaison parallèle -série actif.	20
Fig (I.16)	filtre actif hybride.	20
Fig (II.1)	Structure générale de filtre actif parallèle	22
Fig (II.2)	Onduleur triphasé à quatre bras.	23
Fig (II.3)	Boucle de régulation de la tension continue	27
Fig (II.4)	Bande d'hystérésis et signal de commande d'un interrupteur.	28
Fig (II.5)	Commande par hystérésis d'un filtre actif parallèle.	28
Fig (II.6)	Principe de commande par MLI.	28
Fig (III.1)	Identification par la méthode des puissances instantanées avec FPB+FMV.	33
Fig (III.2)	Identification par la méthode des puissances instantanées avec 2 FMV.	34
Fig (III.3)	Identification par la méthode de référentiel synchrone avec FPB.	35
Fig (III.4)	Identification par la méthode de référentiel synchrone avec FMV.	35
Fig (IV.1)	Schéma de FAP à quatre fils avec un onduleur à quatre bras sous Matlab-Simulink.	37
Fig (IV.2)	charges triphasées non linéaire sous Matlab- Simulink.	38
Fig (IV.3)	Identification par la méthode des puissances instantanées sous Matlab- Simulink.	38
Fig (IV.4)	commande par hystérésis sous Matlab- Simulink.	39
Fig (IV.5)	Courant de charge après filtrage.	40
Fig (IV.6)	Courant de source après filtrage	40
Fig (IV.7)	Courant de filtre après filtrage	41

LISTE DES FIGURES

Fig (IV.8)	Courant de neutre côté charge après filtrage.	41
Fig (IV.9)	Courant de neutre côté source après filtrage.	41
Fig (IV.10)	Spectre d'harmonique du courant de source.	42
Fig (IV.11)	Courant de charge après l'augmentation de la charge.	42
Fig (IV.12)	Courant de source après l'augmentation de la charge.	42
Fig (IV.13)	Courant de filtre après l'augmentation de la charge.	43
Fig (IV.14)	Courant de neutre côté charge après l'augmentation de la charge	43
Fig (IV.15)	Courant de neutre côté source après l'augmentation de la charge	43
Fig (IV.16)	Courant de côté source	45
Fig (IV.17)	Courant de neutre.	45
Fig (IV.18)	Spectre d'harmonique du courant de la phase 1	45
Fig (IV.19)	Spectre d'harmonique du courant de la phase 2	46
Fig (IV.20)	Spectre d'harmonique du courant de la phase 3	46

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Titre	Page
Tab (I.1)	valeurs niveaux de compatibilité pour tensions harmoniques (CEI 61000-2-2).	13
Tab (I.2)	limites des émissions des courants harmoniques (CEI 61000-3-2)	14
Tab (I.3)	limites de perturbations définies par la norme EN 50160	14
Tab (I.4)	Limite IEEE pour la tension harmonique	15
Tab (I.5)	Limite IEEE des émissions de courants harmoniques	15
Tab (I.6)	Classification IEEE des perturbations électromagnétiques	16
Tab (II.1)	Les états de commutation de l'onduleur.	23
Tab (III.1)	Les modes de compensation de la commande des puissances instantanées.	32
Tab (IV.1)	Paramètres du système étudié.	39
Tab (IV.2)	Tableau (IV2) : comparaison THD dans les différents cas de simulation.	47

Introduction générale

Dans un système triphasé idéal, les tensions et les courants sont des ondes à fréquence et amplitude constantes. Par contre, les courants de phase générés par une charge non linéaire reliée à un système d'alimentation triphasé idéale par l'intermédiaire d'un réseau de transmission ne sont pas sinusoïdaux, mais se composent de la superposition de plusieurs harmoniques et inter-harmoniques. Par définition, l'harmonique est une composante sinusoïdale périodique et sa fréquence est un multiple entier de la fréquence fondamentale, tandis qu'inter-harmonique se réfère à n'importe quel élément de signal avec une fréquence qui n'est plus multiple de la fréquence fondamentale. Les courants déformés causent la déformation des tensions du système de distribution

Les éléments non-linéaires causant une déformation à l'alimentation électrique sont nombreux tels que les convertisseurs électriques, les consommateurs électroniques, fours électriques à arc et les lampes à décharges électriques.... Au-delà, les transformateurs et les moteurs peuvent également causer une déformation due à leurs caractéristiques non idéales. Bien que les charges non-linéaires existent pendant des décennies, non seulement les équipements industriels de haute puissance, mais également les appareils électriques de faible puissance. Bien qu'une application de faible puissance ne provoque pas une déformation notable en comparaison par exemple à un four électrique à arc, plusieurs dispositifs de basse puissance fonctionnant simultanément peuvent poser des problèmes assez sévères.

Les tensions et les courants distordus ont plusieurs effets nocifs, tels que, la génération des résonances entre les inductances et les capacités du réseau d'alimentation, les surintensités du courant et surtensions dans les moteurs et les générateurs. Dans les transformateurs, les courants déformés causent l'échauffement et les vibrations mécaniques, ce qui mène en plus aux effets thermiques et mécaniques qui dégradent l'isolant. La déformation réduit également, l'exactitude de divers instruments de mesure et dégrade les caractéristiques de fonctionnement de la protection du système d'alimentation. En plus, les systèmes de communication et les consommateurs électroniques peuvent être perturbés ou endommagés.

Les filtres passifs ont été traditionnellement utilisés pour atténuer la déformation due aux courants harmoniques dans les systèmes d'alimentation industriels, mais leurs performances dépendantes de l'impédance du système et du courant harmonique de la charge non-linéaire, les rendent inefficaces sous certaines conditions et laissent des possibilités aux propagations des harmoniques dans le système d'alimentation.

Pour remédier à ces inconvénients, les filtres actifs de puissance sont introduits. Ils injectent une tension ou un courant harmonique avec une amplitude et angle de phase appropriée dans le système et compensent les harmoniques des charges non linéaires.

De nombreuses configurations de filtres actifs ont été introduites dans la littérature. Celles qui répondent le mieux aux contraintes industrielles de nos jours sont les filtres actifs parallèles, les filtres séries ou même la combinaison série-parallèle. Dans le cas où les courants de la source sont non linéaires, le filtre actif parallèle est la meilleure solution pour la réduction des perturbations de faible et moyenne puissance. Le filtrage actif est plus avantageux lorsqu'une réponse rapide est nécessaire en présence d'une charge dynamique. D'autre part, il est important de noter que les performances des filtres actifs sont profondément liées à l'algorithme de détection des références harmoniques ainsi qu'à la méthode utilisée pour la poursuite de ces références. Le présent mémoire est organisé selon le plan suivant:

Le premier chapitre est consacré à la présentation des perturbations dans les réseaux électriques d'alimentation, en courant et en tension, ainsi que les origines de ces perturbations et leurs conséquences sur les installations électriques. Ensuite, quelques normes d'harmoniques sont présentées. Après, les techniques et les méthodes de dépollution des réseaux électriques sont exposées.

Le deuxième chapitre est dédié à l'étude du filtre actif parallèle triphasé, nous exposerons les différents éléments constitutifs du filtre.

Le troisième chapitre est consacrée à l'identification des courants de référence, où la méthodologie utilisée pour extraire ces courants à partir des courants de charge sera présentée.

Dans Le quatrième chapitre, les différentes simulations du FAP à quatre fils sont effectuées, les courbes sont présentées et interprétées.

CHAPITRE I

**Perturbations et Dépollution
dans les Réseaux Electriques**

I.1 Introduction

Ce chapitre introductif est de présenter une étude sur la pollution harmonique dans le réseau électrique et les différents moyens de dépollution. Nous exposons dans un premier temps les bases techniques et théoriques permettant d'effectuer une étude des harmoniques et des générateurs de grandeurs électriques harmoniques surtout celles produites par les redresseurs classiques à commutation naturelle. Pour cela, nous parlons de problématique des harmoniques, de leurs conséquences et des limites tolérées et imposées par les normes internationales des perturbations. Nous présentons ensuite les différentes solutions possibles face à la problématique des harmoniques dans les réseaux électriques et nous évoquons aussi l'utilité et le rôle primordial de l'électronique de puissance dans la constitution et la mise en œuvre des structures modernes de compensation

I.2 Qualité de l'énergie

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, flicker [1].

Ainsi que les harmoniques, 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].

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

1. La fréquence
2. L'amplitude des trois tensions
3. La forme d'onde
4. Le déséquilibre

I.3.Origines des perturbations dans le réseau électrique

Les perturbations affectent différentes caractéristiques de la tension du réseau électrique:

I.3.1 Influences sur l'amplitude

Il y a une plage de variation nominale de la tension du réseau fixée à +/- 10% de la tension nominale, conformément à la norme EN 50160 élaborée par le Cenelec (Comité européen de normalisation électrotechnique).

I.3.1.1. Creux de tension et coupures

On appelle creux de tension, toute chute brutale de l'amplitude de la tension au-delà du seuil inférieur de cette plage, c'est-à-dire entre 10% et 90% de la tension de référence. Le signal se rétablit après un laps de temps de 10ms à quelques secondes (Figure 1.1) [3].

Les court-circuit non-permanents sont la principale cause de creux de tension, ainsi que la mise en service d'un appareil appelant un fort courant de démarrage tel que les moteurs, ou la variation brusque de la charge, ou encore des phénomènes naturels aléatoires tel que la foudre, le contact avec la végétation ...etc.

On appelle coupure de tension, un creux d'une profondeur supérieure à 90% de la tension de référence. Elle est provoquée généralement par des manœuvres des automatismes liées aux réseaux de distributions (Figure I.1) [3].

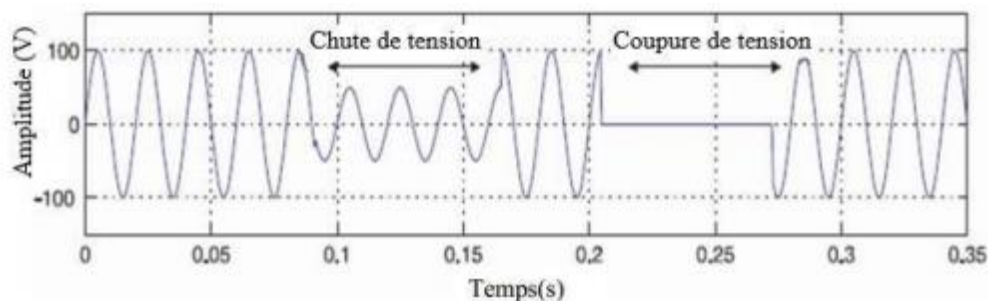


Figure I.1 : Creux et coupure de tension.

1.3.1.2. Fluctuation de tension

On appelle fluctuation de tension, toute diminution brusque de courtes durées (quelques millièmes de secondes) de la valeur efficace de la tension d'alimentation à des valeurs inférieure à 10% de la tension nominale (Figure I.2) [3].

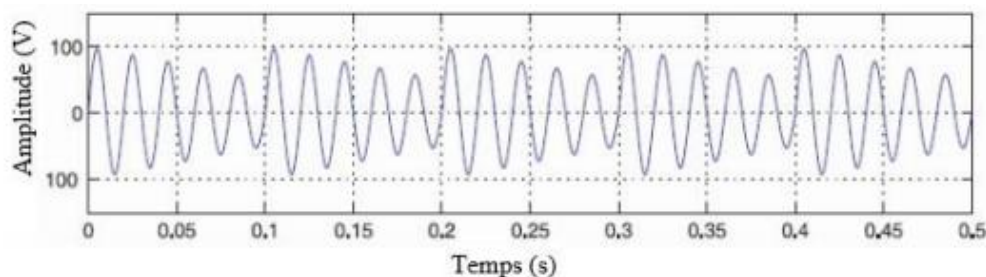


Figure I.2 : Fluctuation de tension.

Les variations lentes de tension sont causées par la variation lente des charges connectées au réseau. Ils ne présentent pratiquement pas d'inconvénients insupportables pour les appareils usuels tant qu'ils sont dans la plage de tolérance.

Les variations rapides de la tension (appelée flicker en anglais) sont causées soit par des perturbations électromagnétiques ou par des variations de puissance sur le réseau porteur de cette tension, comme par exemple la mise en service ou hors service des appareils dont la puissance absorbée varie de façon rapide.

L'effet flicker affecte évidemment certains appareils qui lui sont sensibles tel que le téléviseur, l'écran d'ordinateur, les tubes fluorescents ou toute source lumineuse présente sur le réseau sur lequel les sources du flicker sont connectés ou déconnectés.

1.3.1.3. Surtension

Selon la durée de leur cycle, on distingue deux types de surtension :

Transitoire:

On appelle surtension transitoire, tout dépassement brusque de l'amplitude de la tension fondamentale de fréquence de 50 Hz. C'est un phénomène bref (de durée de moins de 1s), d'une apparition aléatoire (Figure I.3) [3] [4].

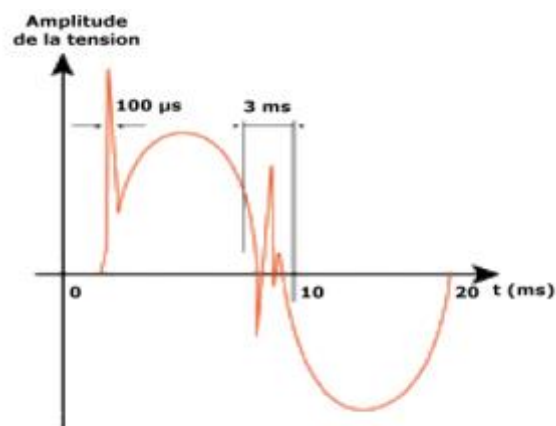


Figure I.3 : Surtension transitoire

Permanente:

On appelle surtension permanente, toute augmentation de la tension au-dessus de 10% de valeur nominale qui est maintenue pendant plusieurs cycles de façon permanente (Figure I.4) [5].

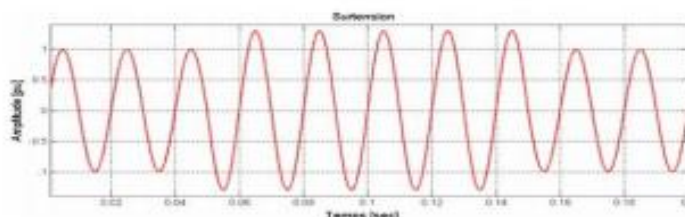


Figure. I.4 : Surtension permanente.

Les surtensions causent la défaillance des équipements électriques bien que ceux-ci soient bien protégés, la destruction de l'équipement est provoquée lorsque le pic de tension atteint une valeur supérieure à celle supportée par l'appareil.

Les surtensions sont de trois natures :

- Les surtensions temporaires
- Les surtensions de manœuvres
- Les surtensions atmosphériques

1.3.2. La Influence sur la fréquence :

Fréquence du réseau est directement liée à la vitesse de rotation des générateurs utilisés pour la production de l'énergie électrique. Or, le déséquilibre entre l'offre et la demande entraine des variations de cette vitesse, conduisant par conséquent à des variations de la fréquence : si la demande est supérieure à l'offre, la fréquence baisse, et vice versa (FigureI.5) [6].

La fréquence du système électrique est donc un bon indicateur de l'équilibre entre la production et la consommation, Le point d'équilibre est de 50 Hz ou 60 Hz.

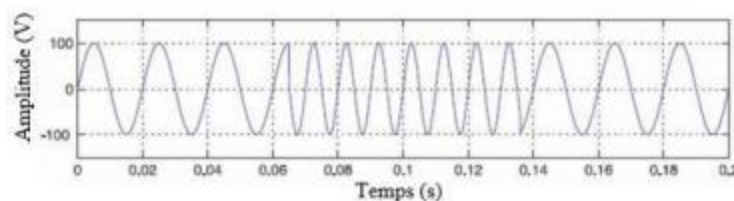


Figure. I.5 : Variation de la fréquence.

La fréquence est mesurée et contrôlée en temps réel avec précision afin de la maintenir dans une zone acceptable $\pm 0,5$ Hz autour de 50 Hz ou 60Hz [7].

La fréquence d'un réseau doit être constante pour plusieurs raisons :

- Pour un bon fonctionnement des transformateurs et les moteurs alternatifs (machines à laver, outils, etc.).
- Pour certains systèmes électroniques où la fréquence est utilisée pour l'horloge.

Les variations de fréquence peuvent être causées par des évolutions continues de la consommation, l'arrêt d'une centrale de production ou par des courts circuits.

1.3.3. Influence sur l'équilibre du système triphasé

Lorsque des charges monophasées du système triphasé ne sont pas réparties Uniformément sur le réseau, les courants absorbés sur les trois phases sont d'amplitude et/ou de phase différente. Par conséquent, les trois tensions du système triphasé n'auront pas la même valeur efficace, et on parle dans ce cas d'un déséquilibre d'amplitude. Où, le décalage entre les trois phases ne va pas être égal à 120° , on parle dans ce cas d'un

déséquilibre de phase. Si l'un de ces deux types de déséquilibres apparaît, le système triphasé n'est plus équilibré (Figure I.6) [4].

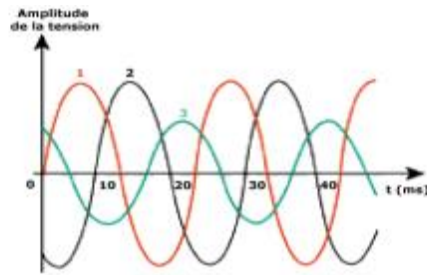


Figure I.6 : Déséquilibre de réseau.

Le déséquilibre de réseau peut entraîner un dysfonctionnement des appareils de basses Tensions connectés. En effet, si la tension est très faible les appareils ne fonctionnent pas correctement, et si elle est très élevée les appareils peuvent être détruit [8].

1.3.4. Les harmoniques et inter-harmoniques

La démystification de la déformation du signal électrique nécessite la mise en évidence d'un aspect mathématique de la distorsion appelé « harmoniques », qu'on obtient à partir de la décomposition en série de Fourier du signal électrique périodique. Ce sont donc des composants sinusoïdaux d'une fréquence multiple de la composante fondamentale du signal.

Dans le cas où la fréquence des harmoniques n'est pas multiple entier de la fréquence fondamentale, on parle d'inter-harmoniques (par exemples : 110Hz, 130Hz). Ces distorsions apparaissent comme des pertes électriques et des dysfonctionnements sur le réseau électrique. Elles sont provoquées par des variations aléatoires de la puissance absorbée [9].

1.3.4.1. Notion de charge linéaire et charge non linéaire

a) Charge linéaire

Avant l'apparition des technologies des semi-conducteurs, les charges utilisées étaient de type récepteur classique connu dans le domaine de distribution électrique, tel que les lampes à incandescences, les convecteurs électriques ou tout simplement des éléments purement résistifs qui, lorsqu'ils sont soumis à une tension d'alimentation sinusoïdale, absorbent un courant de même allure, il y a donc une proportionnalité entre courant et tension. On parle ainsi de charge linéaire, et la puissance absorbée est le simple produit de ces deux grandeurs.

Un élément capacitif ou inductif, est aussi considéré comme charge linéaire, la différence réside dans l'existence d'un décalage dans le temps entre le courant et la tension qu'on appelle le déphasage φ (Figure I.7). En plus du produit du courant et

tension, la puissance absorbée par le récepteur en monophasé considère un nouveau terme appelé facteur de puissance dû à la différence de phase constatée

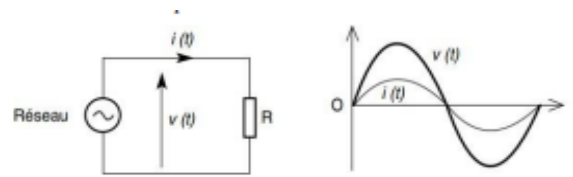


Figure I.7: tension et courant d'une charge linéaire

Le facteur de puissance : est le rapport entre la puissance active P et la puissance Apparente S . S'étant la somme trigonométrique de la puissance active P et réactive Q et s'écrit :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad \text{I.1}$$

Le facteur de puissance s'écrit donc :

$$FP = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad \text{I.2}$$

Pour un signal purement sinusoïdal (absence de distorsion), on peut utiliser le terme « $\cos \varphi$ » pour dire facteur de puissance.

Pour résumer, la notion de charge linéaire est valable pour :

- Un récepteur résistif, capacitif ou inductif.
- Un récepteur qui conserve la proportionnalité entre courant et tension.

b) Charge non linéaire

Avec l'apport de la technologie des semi-conducteurs à l'électronique, et le développement connu par les dispositifs de puissance, les charges alimentées par une tension sinusoïdale absorbent un courant qui est déformé, le courant et la tension ne sont donc plus proportionnels, on parle dans ce cas de charge non linéaire (Figure I.8).

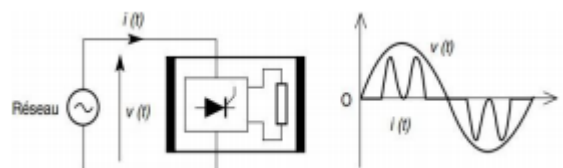


Figure I.8: tension et courant d'une charge non linéaire.

La notion « $\cos \varphi$ » n'est plus valide pour un signal distordu, cette distorsion est traduite par un nouveau terme D représentant la puissance déformante qui est introduite dans l'expression du facteur de puissance comme suit, causant sa dégradation :

$$FP = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad \text{I.3}$$

On cite comme exemples d'éléments déformateurs de signaux électriques et producteurs d'harmoniques : Les variateurs de vitesses, les redresseurs dans le domaine industriel, les onduleurs de tension et les alimentations à découpage dans les ordinateurs.

I.4 Perturbation harmoniques

I.4.1 Définition

Le signal harmonique est une superposition sur l'onde fondamentale à 50 Hz ainsi que d'ondes sinusoïdales mais de fréquences multiples entier de celle du fondamental. La (Figure I.9) montre la superposition de l'harmonique de rang 3 sur une fondamentale à fréquence 50 Hz.

La principale source de la présence de courants harmoniques dans les réseaux électriques est l'utilisation de plus en plus croissante d'équipements à base d'électronique de puissance [10].

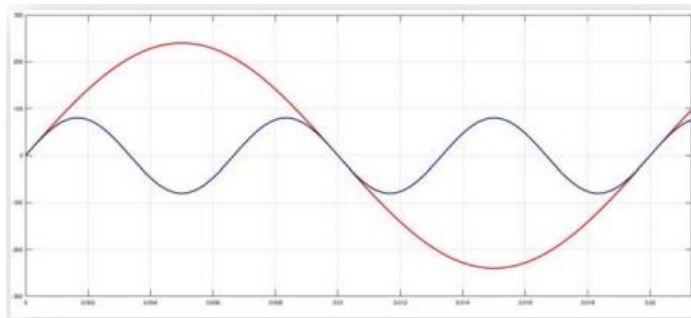


Figure I.9: représentation de deux signaux fondamental et d'ordre 3

I.4.2 Sources des harmoniques

La cause principale des courants harmoniques est l'injection des courants non-sinusoïdaux par des charges non-linéaires. Les onduleurs, les ponts redresseurs, les variateurs de vitesse des machines électriques, les appareils domestiques tel que les téléviseurs et les lampes fluorescentes, et les alimentations à découpage représentent la majorité des sources d'émission des harmoniques [11].

I.4.3 Effets des harmoniques

Les effets des harmoniques les plus connus sont la destruction des condensateurs ou des disjoncteurs sous l'effet des forts courants harmoniques. Un autre phénomène fréquent est l'échauffement des transformateurs et des conducteurs de neutre sous l'effet des courants harmoniques de rang 3.

I.4.3.1. Effets instantanés

- Déclenchements à un moment inapproprié des protections.
- Perturbations induites des systèmes à courants faibles (télécommande, téléviseur, écran d'ordinateur ...).
- Destruction par surcharge thermique de condensateurs.
- Perte de précision des appareils de mesure.

I.4.3.2. Effets à long terme

- Une surcharge en courant provoque des échauffements supplémentaires donc un vieillissement prématuré des équipements.
- Echauffement des transformateurs et des alternateurs (par augmentation des pertes Joule, des pertes fer...).
- Fatigue mécanique.
- Echauffement des récepteurs: des conducteurs de phases et du neutre par augmentation des pertes Joule et diélectriques.
- Destruction de matériels (condensateurs, disjoncteurs ...).

I.4.4 Conséquences dû à la présence de signaux harmoniques

Les courants et les tensions harmoniques ont des effets néfastes sur le fonctionnement normal, la rentabilité et la durée de vie de certains équipements électriques liés à la circulation des courants harmonique :

- Lignes: pertes ohmiques supplémentaires.
- Transformateurs: pertes supplémentaires dans les enroulements par effet joule et dans le noyau par courant de Foucault.
- Moteur à courant alternatif: pertes supplémentaires dans les enroulements principalement liées aux harmoniques de tension.
- Condensateur de puissance: pertes diélectrique supplémentaires conduisant aux vieillissements rapide du condensateur.
- Equipement de l'électronique de puissance: dysfonctionnement lié à la déformation de la tension.
- Ordinateurs: trouble fonctionnels liés à la distorsion de la tension
- Lignes téléphoniques: génération des bruits importants liés au couplage électromagnétique entre les lignes de puissance et les circuits de communication [12].

I.4.5 Caractéristiques des harmoniques

Les perturbations harmoniques sont généralement caractérisées par le taux de distorsion harmonique (THD) et le facteur de puissance (FP).

I.4.5.1 Décomposition en série de Fourier

Au début du 19^{ème} siècle, Joseph Fourier a montré qu'un signal périodique de fréquence f peut être décomposé avec des signaux sinusoïdaux de fréquence multiple entière de f .

Dans le cas d'un courant électrique de fréquence f :

$$i_c(t) = i_c + \sum_{n=1}^{\infty} i_{cn} \sqrt{2} \sin(2\pi n f t + \alpha_n). \quad \text{I.4}$$

i_c : Valeur de la composante continue.

f : Fréquence du signal sinusoïdal de fréquence fondamentale.

n : Rang de l'harmonique.

i_{cn} : Valeur efficace du courant harmonique de rang n .

α_n : Phase de l'harmonique de rang n .

Pour la tension électrique v de fréquence f :

$$v(t) = v + \sum_{n=1}^{\infty} v_n \sqrt{2} \sin(2\pi n f t + \varphi_n). \quad \text{I.5}$$

Avec:

v_n : Valeur efficace de l'harmonique de rang n (en volts).

$\theta + \varphi$: Phase à l'origine de l'harmonique de rang n (en radians).

φ : Déphasage entre les harmoniques de rang n de la tension et du courant.

I.4.5.2 Taux de distorsion harmonique (THD)

Le taux de distorsion harmonique « THD » permet de quantifier le contenu harmonique d'un signal périodique de tension ou de courant donné. Le THD se calcule comme suit :

$$THD_N = 100 \frac{I_n}{I_0} \quad \text{I.6}$$

THD_N: Le taux de distorsion harmonique individuel de rang n est le rapport de la valeur efficace I de l'amplitude de l'harmonique n à celle du fondamentale I_0 .

$$THD_f = 100 \frac{\sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_N^2}}{I_0} \quad \text{I.7}$$

THD_f: Le taux de distorsion harmonique total par rapport au fondamental.

$$THD_S = 100 \frac{\sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_N^2}}{\sqrt{I_0^2 + I_1^2 + \dots + I_N^2}} \quad \text{I.7}$$

THD_S: Le taux de distorsion harmonique relatif à la valeur efficace.

I.4.5.3 Le facteur de puissance (FP)

On définit par :

$$F_P = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad \text{I.8}$$

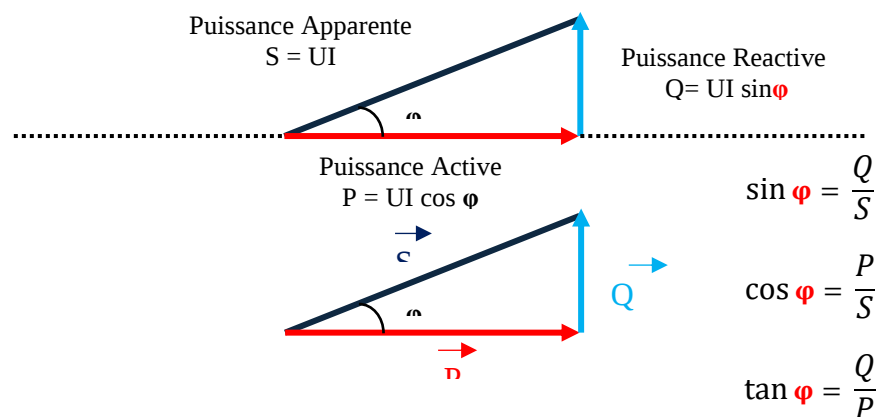


Figure I.10: le facteur de puissance.

I.5 Normes et réglementation

Pour assurer une qualité d'énergie satisfaisante en limitant les effets des perturbations harmoniques, les distributeurs énergétiques et les utilisateurs doivent être en conformité avec les normes. L'objectif des normes et des réglementations est de limiter les dysfonctionnements occasionnés par les harmoniques. Ces normes doivent être d'origines diverses, à titre d'exemple : Commission Electrotechnique Internationale (CEI) et Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) sont les deux principaux organismes de normalisation internationaux dans le domaine électrotechnique [13] [14].

•La norme internationale CEI 61000 :

Elle se rapporte à la compatibilité électromagnétique (CEM) dont certaines parties ont été rendues obligatoires dans l'union européenne et retranscrites dans les droits nationaux sous l'appellation NF EN 61000 [15].

•La norme internationale CEI 61000-2-2 :

Elle définit les niveaux de compatibilité de tensions harmoniques sur le réseau basse tension pour protéger les équipements raccordés sur ce réseau électrique comme le montre le tableau I.1 [13].

Tableau I.1:valeurs niveaux de compatibilité pour tensions harmoniques (CEI 61000-2-2).

Rangs impairs		Rangs impairs		Rangs pairs	
Rang	Taux(%)	Rang	Taux(%)	Rang	Taux(%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.3	6	0.5
13	3	21	0.2	8	0.5
17	2	>21	0.2	10	0.5
19	1.5			12	0.2
23	1.5			>12	0.2
25	1.5				
>25	0.2+1.3*25/h				

• **La norme internationale CEI 61000-3-2 :**

Elle détermine les niveaux de Compatibilité des courants injectés dans le réseau pour des équipements dont le Courant de phase est inférieur à 16A (Courant appelé par les appareils ≤ 16 A par phase), comme le montre le tableau.I.2.

Tableau I.2: limites des émissions des courants harmoniques (CEI61000-3-2) [13]

Range harmonique	Courant harmonique maximal autorise (A)
Harmoniques impaires	
2	1.08
3	2.30
4	0.43
5	1.14
6	0.30
7	0.77
$8 \leq h \leq 40$	$0.23 \cdot 8^{\frac{1}{h}}$
Harmoniques paires	
9	0.4
11	0.33
13	0.21
$15 \leq h \leq 39$	$0.15 \cdot 15^{\frac{1}{h}}$

L'objectif de la CEI est de promouvoir la coopération internationale sur toutes les questions relatives à la normalisation dans les domaines électriques et électroniques [16].

• **La norme EN 50160 :**

Définit les caractéristiques principales des tensions fournies par les réseaux de distribution basse ou moyenne tension qui précise les caractéristiques de la tension fournie par les réseaux publics basse tension, comme le montre le tableau (I.3) [17] [15].

Tableau I.3: limites de perturbations définies par la norme EN50160

Amplitude de la tension	• Pour chaque période d'une semaine 95% des valeurs efficaces moyennes sur 10 minutes doivent être dans la plage $V_n \pm 10\%$.
Variations rapides de la Tension	• De 5 à 10% de V_n (4 à 6% en moyenne tension).
Creux de tension	• Profondeur : entre 10% à 99% de V_n. • Durée : entre 10 ms et 1 minute. • Nombre : quelques dizaines à 1 millier par an.
Coupures brèves	• Durée: jusqu'à 3 minutes. • Nombre: quelques dizaines à plusieurs centaines par an.
Coupures longues	• Durée: supérieure à 3 minutes. • Nombre : entre 10 et 50 par an.
Frequences	• 50Hz $\pm 1\%$ pendant 95% d'une semaine. • 50Hz +4%, -6% pendant 100% d'une semaine.

IAS (Industrial Applications Society) et **PES** (Power Engineering Society) sont les deux entreprises de l'IEEE qui peuvent également œuvrer pour garantir une bonne qualité de l'énergie [18]:

Norme IEEE :

Elle définit les exigences et les recommandations pratiques relatives au contrôle harmonique des systèmes électriques d'énergie. Cette norme s'applique aussi bien aux fournisseurs qu'aux utilisateurs et couvre toutes les plages de puissance. Dans ce standard, les limites sont données par rapport au quotient des courants de court-circuit au point de raccordement du réseau et du courant de charge fondamental [19] [15].

La norme IEEE 519 recommande notamment une distorsion harmonique de la tension totale inférieure à 5 % pour les systèmes dont la tension est inférieure à 69 kV et la distorsion harmonique de la tension individuelle est inférieure à 3% comme représenté dans les tableaux (I.4 et I.5) [20].

Tableau I.4 : Limite IEEE pour la tension harmonique [13]

Tension au point de raccordement (Vn)	Distorsion Harmonique Individuelle (%)	THD Vn(%)
$V_n \leq 69\text{Kv}$	3.0	5.0
$69\text{kV} < V_n \leq 161\text{Kv}$	1.5	2.5
$V_n > 161\text{kV}$	1.0	1.5

Tableau I.5 : Limite IEEE des émissions de courants harmoniques [13]

Vn ≤ 69Kv						
Icc / Ich	h < 11	11 ≤ h < 17	17 ≤ h < 23	23 ≤ h < 35	35 ≤ h	TDD
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20-50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50-100	10.0	4.5	4	1.5	0.7	12.0
100-1000	12	5.0	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0
69kV < Vn ≤ 161Kv						
<20	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20-50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50-100	5.0	2.25	2.0	1.25	0.35	6.0
100-1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
>1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10
Vn > 161Kv						
<50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
≥50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0

Tableau I.6 : Classification IEEE des perturbations électromagnétiques [13]

		Durée	Magnitude de Tension
Variations de courte durée			
Instantané	Creux	0.5–30 cycles	0.1–0.9 p.u.
	Surtension	0.5–30 cycles	1.1–1.8 p.u.
Momentané	Coupure	0.5-30 cycles	<0.1 p.u.
	Creux	30 cycles–3s	0.1–0.9 p.u.
	Surtension	30 cycles–3s	1.1–1.8 p.u.
Temporaire	Coupure	3s–1 min	<0.1 p.u.
	Creux	3s–1 min	0.1–0.9 p.u.
	Surtension	3s–1 min	1.1–1.8 p.u.
Variations de longue durée			
	Coupure longue	> 1 min	0.0 p.u.
	Surtension	> 1 min	0.8–0.9 p.u.
	Sous-tension	> 1 min	1.1–1.2 p.u.

I.6 Solutions de dépollution du réseau électrique

Les solutions de réduction des perturbations harmoniques peuvent être regroupées en deux groupes : les solutions traditionnelles et les solutions modernes. La première consiste à utiliser des convertisseurs statiques moins ou peu polluants, tandis que la seconde consiste en la mise en œuvre d'un filtrage des composantes harmoniques et à compenser les courants ou les tensions harmoniques [18].

I.6.1 Solutions traditionnelles de dépollution

Ce sont des techniques qui doivent être connues de 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) et des branchements qui modifient le schéma de l'installation. Il existe plusieurs solutions pour limiter la propagation des signaux harmoniques dans les réseaux électriques [15] [21] :

➤ Agir sur la structure de l'installation :

Le grand pollueur est alimenté par un transformateur séparé afin de le séparer d'un récepteur sensible. Pour le pollueur moyen, il est préférable de l'alimenter par des câbles distincts au lieu d'une transmission parallèle.

➤ Rééquilibrage des courants du réseau électrique :

Puisque les courants déséquilibrés dans un réseau électrique basse tension résultent généralement des charges monophasées et biphasées mal réparties, la solution préconisée consiste en une répartition identique des charges sur les trois phases. Les charges

monophasées et triphasées mal distribuées entraînant un déséquilibre des courants dans un système électrique basse tension.

➤ Filtrage passif

Cette méthode est plus économique et la plus utilisée. L'utilisation de l'inductance et du condensateur est ajustée pour contrôler les harmoniques. Il existe pour ce type de filtrage passif deux types à savoir :

➤ Filtres passifs résonants :

Qui sont constitués d'un circuit LC série avec résistance Utilisée généralement pour éliminer les harmoniques de rang 5 et 7 [16].

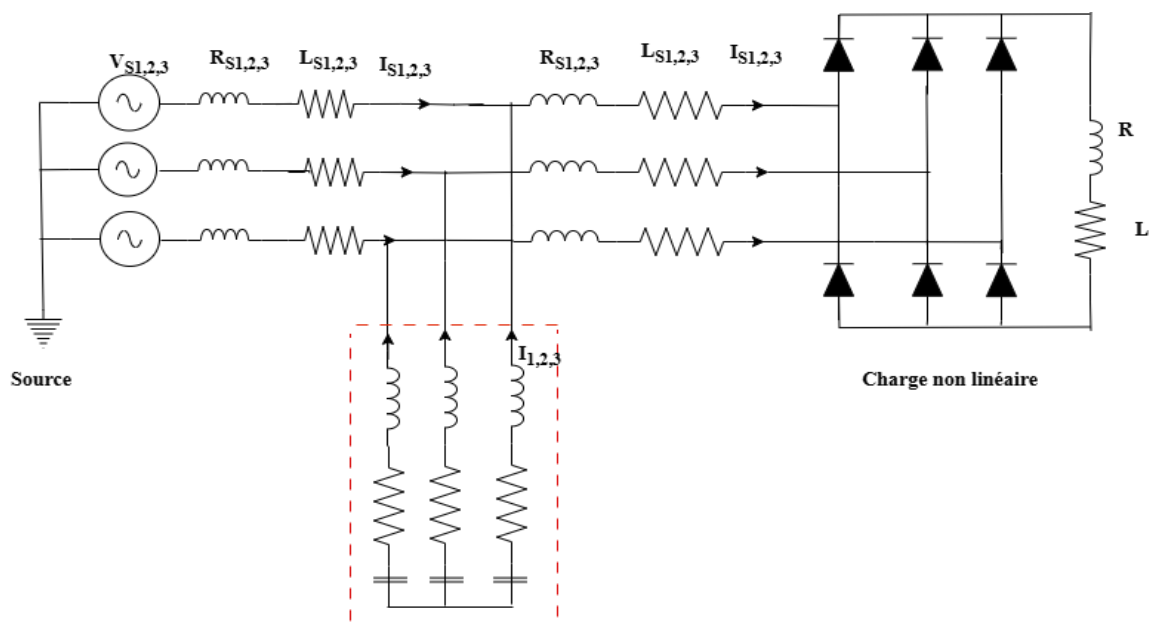


Figure I.11: Filtre passif résonant [16]

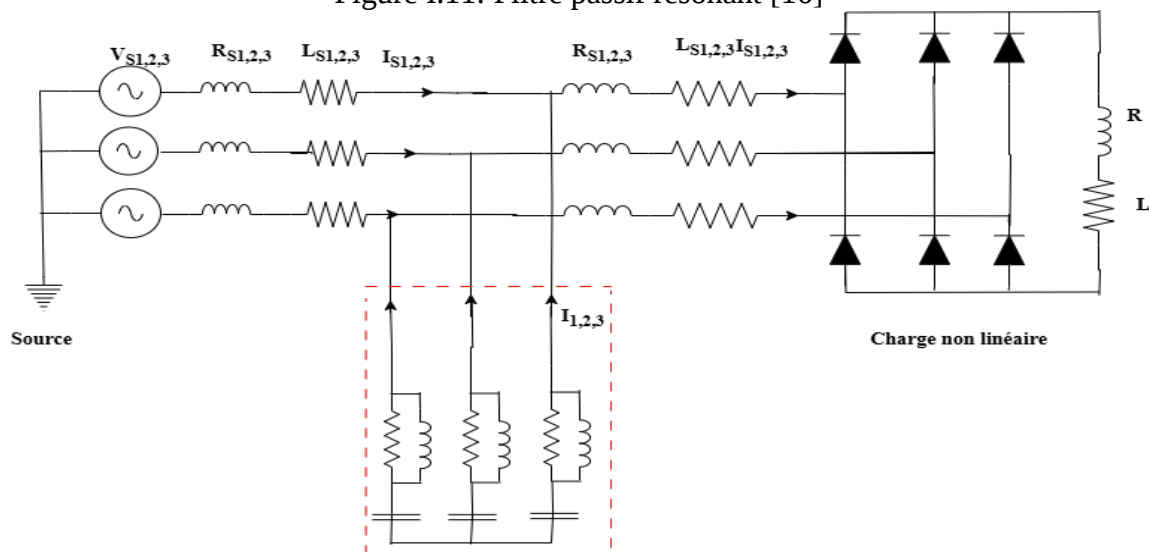


Figure I.12: Filtre passif amorti [16]

Malgré sa large utilisation dans l'industrie, ce dispositif a certains inconvénients :

- Problèmes de résonance avec l'impédance du réseau.
- Equipements volumineux.
- Manque de souplesse à s'adapter aux variations de la charge et du réseau.

1.6.2 Solutions modernes de dépollution

Les solutions de dépollution traditionnelle ne répondant plus à l'évolution des réseaux électriques et des charges à protéger pour fournir aux utilisateurs une bonne qualité de l'énergie électrique, même dans les conditions de fonctionnement les plus perturbées. Avec l'émergence de nouvelles technologies basées sur les semi-conducteurs telles que MOSFET et IGBT. Le but de ces filtres est de générer des Courants harmoniques ou des tensions afin de compenser les perturbations responsables de la dégradation du rendement des équipements et installations électriques. Les principaux types de filtrages actifs existants sont : les filtres Actifs parallèles, les filtres actifs série, les filtres combinés parallèle série et les filtres actifs hybrides actif-passif [22].

1.6.2.1 Filtre actif parallèle

Il est aussi appelé compensateur de dérivation, connecté en parallèle au réseau de Distribution. Il est habituellement contrôlé comme un générateur de courant. Son Principe est d'injecter dans le réseau électrique des courants harmoniques (i_f) égaux à ceux absorbés par la charge non linéaire mais en opposition de phase, de sorte que le courant fourni par le réseau (i_s) soit sinusoïdal. Ainsi, il empêche les courants harmoniques de ne pas passer par l'impédance du réseau. Par conséquent, il améliore le taux de distorsion harmonique du courant [23]

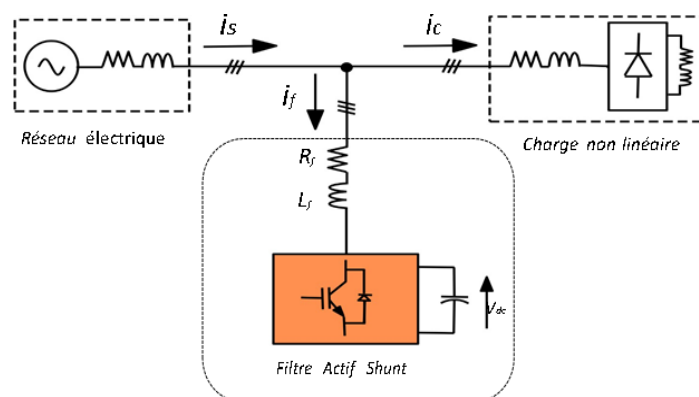


Figure I.13: Filtre actif parallèle [13]

1.6.2.2 Filtre actif série:

Il est considéré comme une source de tension reliée en série avec le réseau électrique. On propose généralement la résolution des harmoniques de tension. Le filtre actif de puissance génère des tensions harmoniques pour compenser les tensions harmoniques présentes au réseau électrique [16].

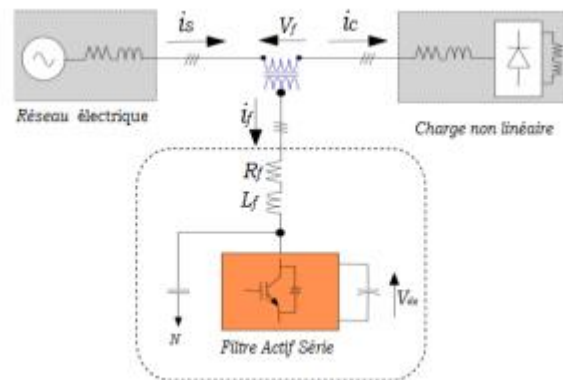


Figure I.14: Filtre actif série [13]

1.6.2.3 Filtre combiné :

Il s'agit d'une solution de compensation universelle basée sur le fonctionnement simultané de filtres actifs en parallèle et série. Donc, il présente les avantages cumulés de filtres actifs en parallèle et en série. Cette topologie est appelée en anglais Unified Power Quality Conditionner « UPQC » [13].

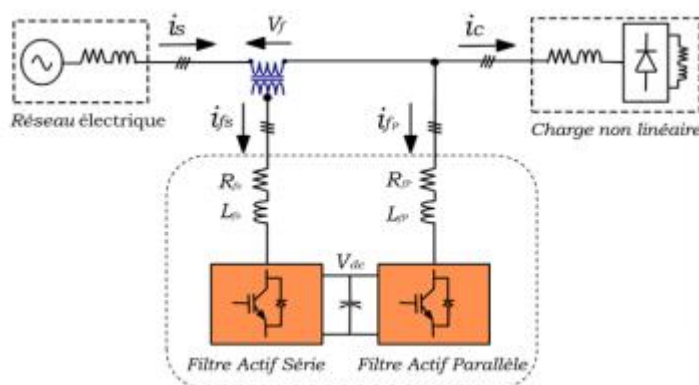


Figure I.15: Combinaison parallèle -série actif [13]

1.6.2.4 Filtre actif hybride :

Pour réduire le dimensionnement et en conséquence le prix des filtres actifs, la combinaison des filtres passifs et actifs représente une bonne solution (Figure I.16) [13]. Le rôle des filtres passifs réside dans l'élimination des harmoniques basse fréquence.

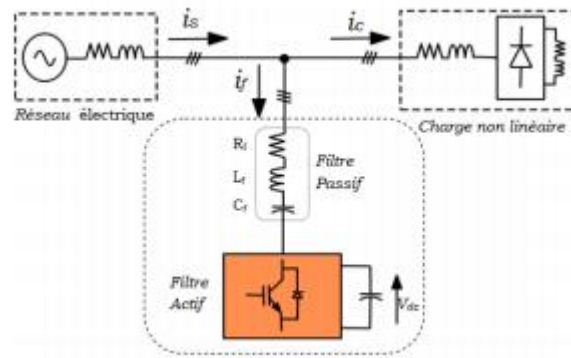


Figure I.16: filtre actif hybride [13]

I.7 Conclusion:

Nous avons présenté dans ce chapitre les divers problèmes de pollution du réseau électrique. De plus, on a présenté les normes fixées par les organismes internationaux. Ensuite, nous avons vu les solutions classiques et modernes appliquées pour la dépollution des réseaux électriques. Les solutions classiques telles que les filtres passifs qui présentent certaines limites et des solutions modernes à base de filtres actifs de puissance efficace pour la compensation des harmoniques.

CHAPITRE II

Structure et Commande du Filtre

Actif Parallèle a Quatre Fils

II.1 Introduction:

Le filtre actif parallèle est un dispositif électronique utilisé pour améliorer la qualité de l'énergie électrique dans les réseaux contenant des charges non linéaires. Il compense les courants harmoniques et réactifs en injectant un courant de forme opposée. Sa structure comprend une partie puissance (onduleur, stockage, filtre de sortie) et une partie commande (détection, régulation, contrôle). Grâce à des techniques comme la commande par hystérésis ou par MLI, il assure une réponse dynamique rapide. Ce type de filtre est essentiel dans les systèmes modernes pour garantir une alimentation stable et conforme.

II.2 Structure d'un filtre actif parallèle:

La structure générale du filtre actif parallèle, est présentée dans la (Figure II.1) sous la forme de deux blocs: la partie puissance et la partie contrôle-commande [24].

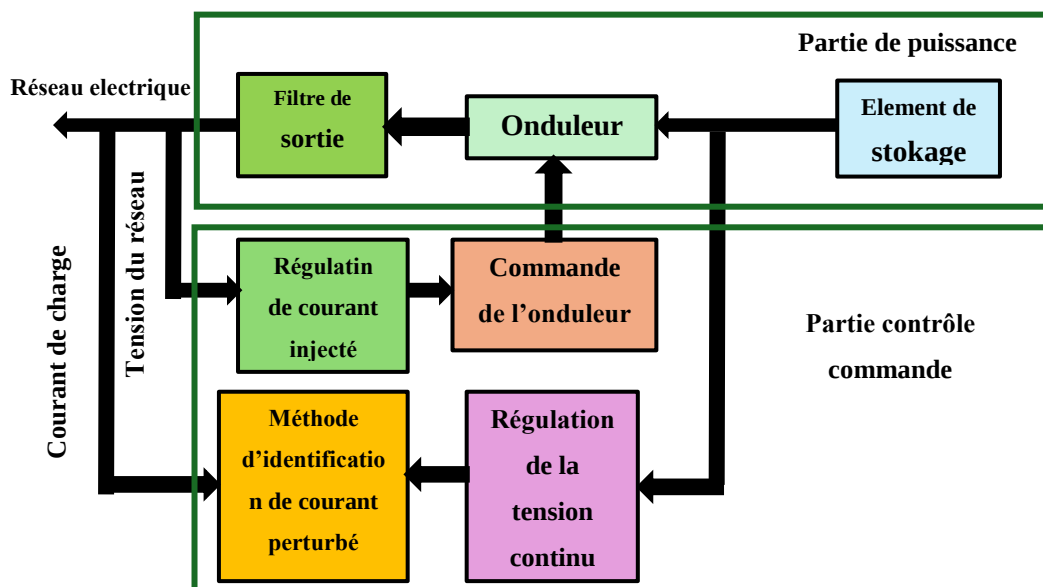


Figure II.1: Structure générale de filtre actif parallèle.

La partie puissance est constituée:

- D'un onduleur de tension à base d'interrupteurs de puissance, commandables 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 commande est constituée :

- la méthode d'identification des courants perturbés.
- la régulation de la tension continue appliquée aux éléments de stockage d'énergie.
- la régulation du courant injecté sur le réseau à partir de l'onduleur de tension.
- la commande de l'onduleur de tension [24].

II.2.1 Etude de la partie puissance:

II.2.1.1. Description de l'onduleur triphasé à quatre bras:

Dans notre étude, nous utilisons un onduleur de tension comprenant quatre bras constitués de huit interrupteurs réversibles en courant (IGBT) en antiparallèle avec une diode. Comme l'illustre la (Figure II.2) ci-après [25] :

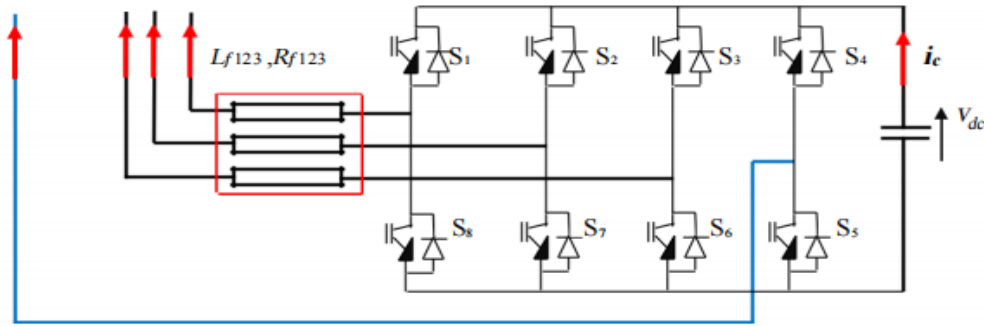


Figure II.2 : Onduleur triphasé à quatre bras.

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

$$vf1 = (S1 - S4) vdc \quad \text{II.1}$$

$$vf2 = (S2 - S4) vdc \quad \text{II.2}$$

$$f3 = (S3 - S4) vdc \quad \text{II.3}$$

$$idc = S1 \times i1 + S2 \times i2 + S3 \times i3 - S4 \times iN \quad \text{II.4}$$

Tableau. II.1 : Les états de commutation de l'onduleur.

k	S ₄	S ₃	S ₂	S ₁	V _{f3}	V _{f2}	V _{f1}
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	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}	-V _{dc}
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.2.1.2. 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 supraconductrice. Le choix de la tension V_{dc} et de la capacité de condensateur C_{dc} affecte la dynamique et la qualité de compensation du filtre actif parallèle. En effet, une tension V_{dc} élevée améliore la dynamique du filtre actif. De plus, les ondulations de la tension continue V_{dc} causées par les courants engendrés par le filtre actif et limitées par le choix de C_{dc} , peuvent dégrader la qualité de compensation du filtre actif parallèle. Ces fluctuations sont d'autant plus importantes que l'amplitude du courant du filtre est grande et que sa fréquence est faible. Pour cette raison, nous pouvons estimer que seuls les premiers harmoniques sont pris en compte dans le choix des paramètres du système de stockage. Pour démontrer ceci, deux méthodes peuvent être utilisées:

*La première méthode est basée sur le calcul de l'énergie fournie par le filtre actif et celle de la charge polluante comme suit [26] :

La valeur efficace du courant de la charge coté alternatif dans les trois phases est :

$$I_s = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I_d^2 d(wt)} = I_d \quad \text{II.5}$$

Où I_d représente le courant de charge coté continu.

Le fondamental du courant de la charge est donné par :

$$I_{s1} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_s = 0.9 I_d \quad \text{II.6}$$

Les courants harmoniques produits par la charge représentent la différence entre le fondamentale et la valeur efficace du courant coté alternatif de la charge. Ces courants sont donnés par :

$$\sum_{h=2}^{\infty} I_{sh} = \sqrt{I_s^2 - I_{s1}^2} = 0.43 I_s \quad \text{II.7}$$

Le filtre actif doit fournir la puissance correspondante aux harmoniques produite par la charge. En choisissant la période de l'ondulation de la tension aux bornes du condensateur six fois inférieure à celle de la tension du réseau électrique, on peut trouver :

$$C_{dc} \geq \frac{0.43 I_s}{6 f_s (V_{dc \max}^2 - V_{dc \min}^2)} \quad \text{II.8}$$

avec f_s : la fréquence fondamentale du réseau électrique.

On choisit un taux d'ondulation ΔV_{dc} acceptable, généralement de l'ordre de 2%.

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

$$C_{dc} = \frac{I_h}{V_{dc}\omega_h} \quad \text{II.9}$$

Avec ω_h : la pulsation la plus faible des harmoniques à compenser.

II.2.1.3 Filtre de couplage:

Le but du filtre de découplage 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. Ce filtre réduit la propagation sur le réseau électrique des composantes harmoniques dues aux commutations. Nous avons utilisé un filtre entre l'onduleur et le réseau électrique qui se compose d'une inductance L_c et de résistance interne R_c [25]

II.2.2 Etude de la partie commande:

II.2.2.1 L'identification des courants de référence:

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 [27]. Le reste des détails sera fourni dans le prochain chapitre.

II.2.2.2 Régulation de la tension du bus continue :

La source d'alimentation du filtre n'est pas une source de tension autonome mais une capacité qui se charge et se décharge. La tension aux bornes de cette dernière n'est pas constante, à cause de sa sensibilité aux échanges de puissance active entre la charge polluante et le réseau.

Les pertes dans les composantes de puissance font aussi varier la tension aux bornes de la capacité, d'où la nécessité de réguler cette tension de la maintenir à un niveau constant. Les principales causes susceptibles de modifier cette tension sont [28]:

- Les pertes dans le filtre actif.
- L'injection des courants fondamentaux pendant les régimes transitoires de la charge polluante.
- Les Pertes de commutation et par conduction des interrupteurs de puissance.

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 suivant [28]:

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

$$V_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} \int I_{dc} dt \quad \text{II.10}$$

en appliquant la transformé de Laplace on trouve :

$$V_{dc} = \frac{1}{sC_{dc}} I_{dc} \quad \text{II.11}$$

La fonction de transfert du système est $\frac{1}{sC_{dc}}$, et la boucle de régulation par PI est montrée à la (Figure II.3).

La fonction de transfert en boucle fermée s'écrit comme suit :

$$G_{BF} = \frac{\left(1 + \frac{K_P}{K_I} s\right) \frac{K_I}{C}}{s^2 + \frac{K_P}{C_{dc}} s + \frac{K_I}{C_{dc}}} \quad \text{II.12}$$

L'expression générale d'une fonction de transfert du second ordre est :

$$G_{BF} = \frac{\left(1 + \frac{K_P}{K_I} s\right) w_c^2}{s^2 + 2\xi w_c s + w_c^2} \quad \text{II.13}$$

En comparant cette équation avec la forme générale, on trouve :

$$K_i = w_c^2 C_{dc} \quad \text{et} \quad K_{pdc} = 2\xi \sqrt{C_{dc} K_i} \quad \text{tel que: } w_c = 2\pi f_c$$

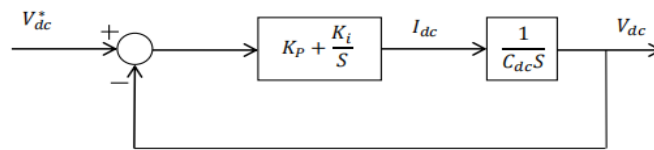


Fig. II.3: Boucle de régulation de la tension continue.

II.2.2.3 Commande de l'onduleur :

L'objectif de la commande est de générer les ordres d'ouverture et de fermeture des interrupteurs, de sorte que la tension créée par l'onduleur soit la plus proche de la tension de référence [29]. Les deux principales familles de commande des convertisseurs statiques sont :

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

II.2.2.3.1 La Commande par hystérésis :

La commande par hystérésis, appelée aussi commande en tout ou rien, est une commande non linéaire qui utilise l'erreur entre le courant de référence et le courant généré par l'onduleur. L'erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis. Dès que l'erreur atteint la limite inférieure ou supérieure, un ordre de commande est envoyé aux interrupteurs pour rendre l'erreur à l'intérieur de la bande. La simplicité de la mise en œuvre est le principal atout de cette technique. Cependant, la fréquence de commutation n'est pas maîtrisée (aléatoire); en conséquence, les commutations évoluent librement à l'intérieur de la bande d'hystérésis.

Cette commande est très adaptée pour les systèmes ayant une action à deux positions comme l'IGBT qui peut être ouvert ou fermé. En pratique la largeur de la bande d'hystérésis est fixée à 5% du courant nominal. Cependant elle ne garantit pas d'une manière systématique le respect de la fréquence maximale de commutation des semi-conducteurs. Le Schéma de principe est donné par la (Figure II.4) [30].

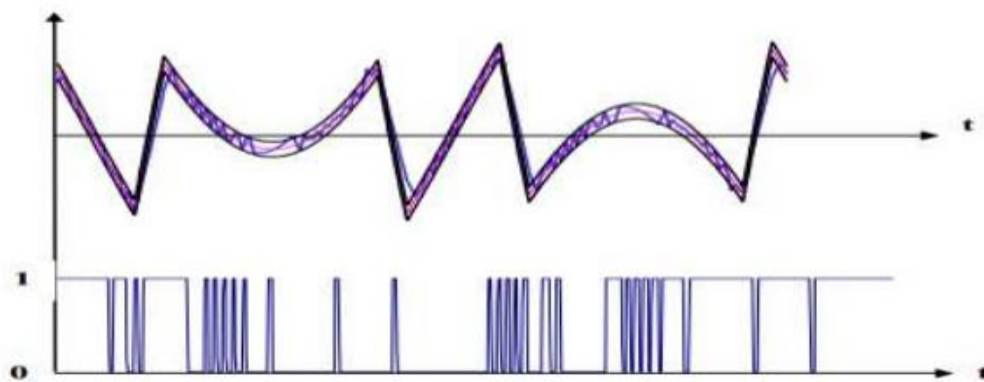


Figure II.4: Bande d'hystérésis et signal de commande d'un interrupteur.

Le schéma synoptique de la commande des courants du filtre actif par des régulateurs à hystérésis est donné par la (Figure II.5) :



Figure II 5 : Commande par hystérésis d'un filtre actif parallèle. [30]

II.2.2.3.2. Commande d'onduleur par MLI :

La technique de commande par MLI résout le problème de la maîtrise de la fréquence de commutation en fonctionnant avec une fréquence fixe facile à filtrer en aval de l'onduleur. Cette technique de commande met en œuvre d'abord un régulateur qui détermine la

tension de référence de l'onduleur (modulatrice) à partir de l'écart entre la tension 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 la commande est donnée par la (Figure II.6) [31].

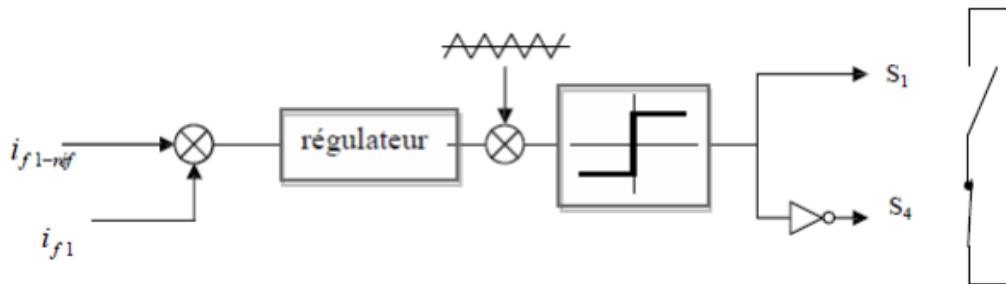


Figure. II.6: Principe de commande par MLI.

II.3.Conclusion:

En résumé, le filtre actif parallèle constitue une solution efficace pour compenser les perturbations harmoniques et améliorer la qualité de l'énergie électrique. Sa structure combine une partie puissance sophistiquée et une commande avancée. Le bon dimensionnement du système de stockage et la stratégie de commande choisie sont essentiels à ses performances. Ce dispositif joue un rôle clé dans les réseaux modernes en assurant une alimentation propre et stable.

CHAPITRE III

Identification des Courants de Référence

III.1 Introduction:

Ce chapitre présente plusieurs méthodes pour identifier les composantes indésirables du courant électrique dans les systèmes triphasés. Il s'appuie notamment sur la transformation de Concordia et l'usage de filtres passe-bas (FPB) ou filtres multi-variables (FMV). Les puissances instantanées réelles, imaginaires et homopolaires sont extraites pour améliorer la qualité de l'énergie. Les différentes variantes permettent une compensation efficace des harmoniques et de l'énergie réactive. L'objectif global est d'optimiser les performances des filtres actifs dans des réseaux.

III.2 Méthode des puissances instantanées réelle, imaginaire et homopolaire avec FBP :

Cette méthode introduite par, 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 cette méthode est énoncé ci-dessous. Soient respectivement les tensions simples et les courants de ligne d'un système triphasé avec neutre, $v_{sa}(t)$, $v_{sb}(t)$, $v_{sc}(t)$ et $i_{sa}(t)$, $i_{sb}(t)$, $i_{sc}(t)$. La transformation de Concordia permet de ramener ce système triphasé des axes abc aux axes $\alpha\beta 0$, comme le montre les deux relations suivantes [32] :

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} \quad (III.1)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad (III.2)$$

La transformation de Concordia est définie par :

$$C = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (III.3)$$

Après isolation des composantes fondamentales en tension notées $\bar{v}_{\alpha\beta 0}$, les puissances réelle, imaginaire et homopolaire instantanées sont données par la matrice suivante :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \\ p_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{v}_\alpha & \bar{v}_\beta & 0 \\ -\bar{v}_\alpha & \bar{v}_\beta & 0 \\ 0 & 0 & \bar{v}_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (III.4)$$

Les composantes $\bar{v}_{\alpha\beta}$ sont isolées par un filtre multi-variable (FMV) au lieu d'une PLL.

Les puissances instantanées peuvent s'écrire de la façon suivante :

$$p = \bar{p} + \tilde{p} \quad (\text{III.5})$$

$$q = \bar{q} + \tilde{q} \quad (\text{III.6})$$

$$p_0 = \bar{p}_0 + \tilde{p}_0 \quad (\text{III.7})$$

$\bar{p}$, $\bar{q}$ et $\bar{p}_0$: Composantes continues des puissances instantanées.

$\tilde{p}$, $\tilde{q}$ et $\tilde{p}_0$: Composantes alternatives des puissances instantanées.

A l'aide d'un filtre passe bas avec une boucle de retour ou d'un filtre passe haut, on peut éliminer de p et de q une (des) partie (s) selon les objectifs de la compensation montrés au tableau (III.1) ci-dessous.

Table III.1 : Les modes de compensation de la commande des puissances instantanées.

Paramètre à compenser	Paramètre de contrôle
Courant harmonique	$p = \bar{p}$ et $q = \tilde{q}$
Énergie réactive	$p = 0$ et $q = \bar{q}$
Courant harmonique + énergie réactive	$p = \tilde{p}$ et $q = \bar{q}$

Pour la compensation du courant dans le neutre, le courant homopolaire i_0 sera utilisé directement comme référence sans passer par le calcul de la puissance homopolaire et donc l'isolation de la composante fondamentale de la tension homopolaire pour le calcul de la puissance homopolaire n'est pas nécessaire dans cette variante de la méthode des PIRI.

L'objectif dans ce travail est de compenser les harmoniques de courant et l'énergie réactive. Les composantes du courant $i_{f\alpha\beta}^*$ sont alors définies par :

$$\begin{bmatrix} i_{f\alpha}^* \\ i_{f\beta}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{v}_\alpha & \bar{v}_\beta \\ -\bar{v}_\alpha & \bar{v}_\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ q \end{bmatrix} \quad (\text{III.8})$$

Donc:

$$\begin{bmatrix} i_{f\alpha}^* \\ i_{f\beta}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{\bar{v}_\alpha^2 + \bar{v}_\beta^2} \begin{bmatrix} \bar{v}_\alpha & -\bar{v}_\beta \\ \bar{v}_\beta & \bar{v}_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ q \end{bmatrix} \quad (\text{III.9})$$

Soit:

$$i_{f\alpha}^* = \frac{\bar{v}_\alpha}{(\bar{v}_\alpha^2 + \bar{v}_\beta^2)} \tilde{p} - \frac{\bar{v}_\beta}{(\bar{v}_\alpha^2 + \bar{v}_\beta^2)} q \quad (\text{III.10})$$

$$i_{f\alpha}^* = \frac{\bar{v}_\beta}{(\bar{v}_\alpha^2 + \bar{v}_\beta^2)} \tilde{p} - \frac{\bar{v}_\alpha}{(\bar{v}_\alpha^2 + \bar{v}_\beta^2)} q \quad (\text{III.11})$$

$i_{f\alpha}^*$ et $i_{f\beta}^*$ sont les courants de référence dans le repère de Concordia. On remarque dans les expressions de ces derniers l'absence du courant homopolaire. On prend pour l'homopolaire : $i_{f0}^* = i_0$

Maintenant, il est aisé de remonter aux courants de référence par la transformation inverse de Concordia .La (Figure III.1) illustre l'algorithme d'identification.

$$\begin{bmatrix} i_{fa}^* \\ i_{fb}^* \\ i_{fc}^* \end{bmatrix} = C^{-1} \begin{bmatrix} i_{f\alpha}^* \\ i_{f\beta}^* \\ i_{fo}^* \end{bmatrix} \quad (III.12)$$

$$C^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (III.13)$$

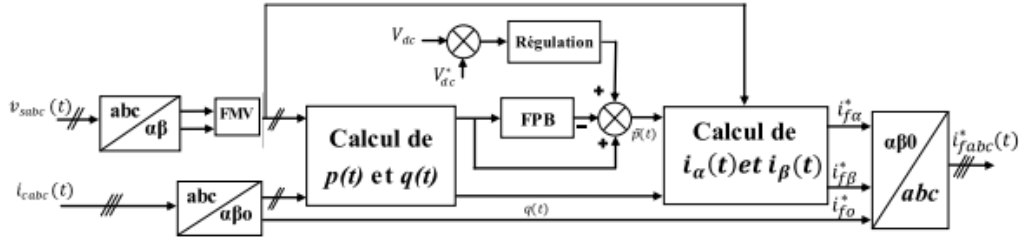


Figure III.1 : Identification par la méthode des puissances instantanées avec FPB+FMV.

III.3 Méthode des puissances instantanées réelle, imaginaire et homopolaire avec FMV :

La transformation de Concordia des tensions simple de la source et du courant de charge est appliqué comme dans le cas de l'identification précédent. Le FMV, utilisé au niveau des tensions diphasées, permet de filtrer efficacement les composantes harmoniques des tensions d'alimentation. Ainsi, sa mise en œuvre permet d'améliorer les performances du filtrage. Quant aux courants diphasés d'axes α et β , ils peuvent être définis comme la somme d'une composante fondamentale et d'une composante harmonique :

$$\begin{cases} i_{\alpha} = \tilde{i}_{\alpha} + \tilde{i}_{\alpha} \\ i_{\beta} = \tilde{i}_{\beta} + \tilde{i}_{\beta} \end{cases} \quad (III.14)$$

Le rôle d'un deuxième FMV est d'extraire les composantes fondamentales du courant de charge à la pulsation fondamentale ω_c , directement selon les axes $\alpha\beta$. Ensuite, les composantes harmoniques du courant selon les axes $\alpha\beta$, notées ici $\tilde{i}_{\alpha}$ et $\tilde{i}_{\beta}$, sont obtenues en soustrayant sur chaque axe, la sortie du FMV à son entrée [33]. Puis les puissances $\tilde{p}$ et $\tilde{q}$ sont calculées par l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{v}_\alpha & \bar{v}_\beta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\bar{v}_\beta & \bar{v}_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_\alpha \\ \tilde{i}_\beta \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{III.15})$$

Les étapes qui restent se font de la manière que dans le cas d'identification précédent. La (Figure III.2) illustre l'algorithme d'identification par la méthode des puissances instantanées avec 2 FMV [34].

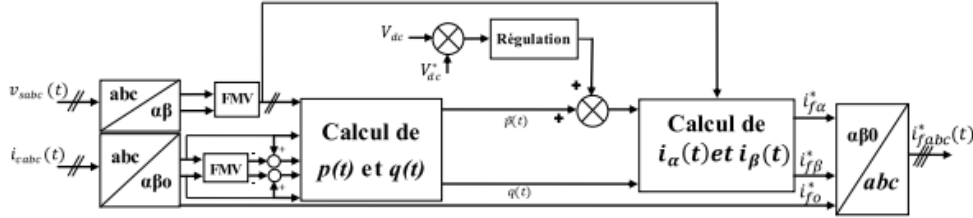


Figure III.2 : Identification par la méthode des puissances instantanées avec 2 FMV

III.4 Méthode de référentiel synchrone avec FPB :

La méthode de référentiel synchrone, est appelée aussi méthode des courants instantanés d et q. Elle permet d'obtenir des meilleures performances mêmes si la tension du réseau est perturbée ou déséquilibrée. La (Figure III.3) représente le schéma de principe de cette méthode.

Dans cette méthode les courants de la charge sont transformés dans le repère αβ0 de Concordia avec la transformation C de l'équation (III.3), puis dans le repère dq de Park P(θ) de l'équation (III.16) pour obtenir id(t) et iq(t).

$$P(\theta) = \begin{bmatrix} -\sin \theta & \cos \theta \\ \cos \theta & \sin \theta \end{bmatrix} \quad (\text{III.16})$$

$\theta = \omega t$ représente la position angulaire du repère tournant qui est une fonction linéaire de la pulsation angulaire.

Ce repère de référence tourne à une vitesse constante en synchronisme avec les tensions triphasées [35]. Le courant dans ce repère peut être exprimé de la façon suivante :

$$i_d(t) = i_{dh}(t) + i_{df}(t) \quad (\text{III.17})$$

$$i_q(t) = i_{qh}(t) + i_{qf}(t) \quad (\text{III.18})$$

id f(t) et iq f(t) représentent successivement le courant fondamental actif et le courant fondamental réactif dans le repère dq, idh(t) et iqh(t) représentent successivement les courants harmoniques sur l'axe d et l'axe q dans les mêmes repères. Le courant de référence idh(t) sera extrait dans ce repère à l'aide d'un FPB avec une boucle de retour.

Avec la transformation inverse de Park $P^{-1}(\omega t)$ appliquée sur idh et iq on obtient les courants $i_{f\alpha}^*$ et $i_{f\beta}^*$. Ensuite la transformation inverse de Concordia C^{-1} est appliquée

sur i_{fa}^* , $i_{f\beta}^*$ et $i_{fo}^* = i_0$ pour retrouver les courants de référence i_{fa}^* , i_{fb}^* et i_{fc}^* dans le repère triphasé.

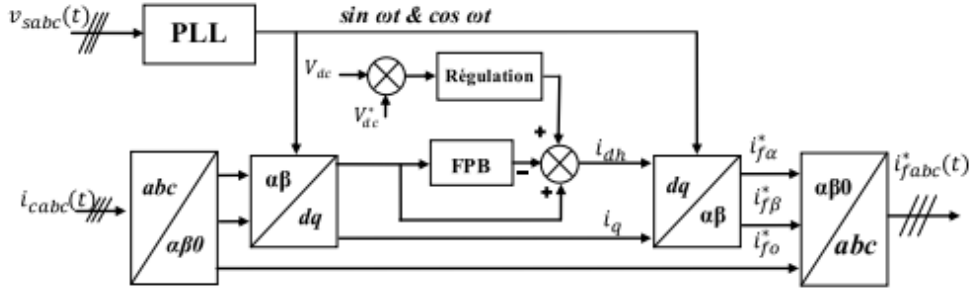


Figure III.3 : Identification par la méthode de référentiel synchrone avec FPB

III.5 Méthode de référentiel synchrone avec FMV :

Cette méthode suit les mêmes démarches que la méthode précédente, la seule différence est que le courant perturbateur s'identifie par un FMV dans le repère de $\alpha\beta$ après la transformation de Concordia du courant de la charge. Le schéma de cette méthode est montré par la (Figure III.4) ci-dessous. L'expression du courant après le passage par le FMV et la transformation d-q de R.H Park sera [32] :

$$\begin{bmatrix} i_{dh} \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \theta & \sin \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_\alpha \\ \tilde{i}_\beta \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{III.19})$$

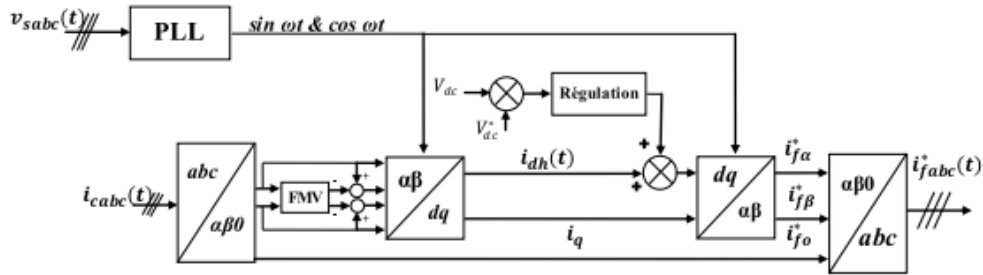


Figure III.4 : Identification par la méthode de référentiel synchrone avec FMV

III.6 Conclusion:

En résumé, les différentes méthodes d'identification basées sur les puissances instantanées permettent une compensation efficace des perturbations électriques dans les réseaux triphasés. L'utilisation de la transformation de Concordia combinée à des filtres adaptés (FPB ou FMV) améliore la précision de séparation des composantes fondamentales et harmoniques. Ces approches permettent de traiter les courants actifs, réactifs et homopolaires selon les besoins de compensation. Les versions synchrones assurent une robustesse même en cas de déséquilibre ou de perturbation de tension. L'ensemble de ces techniques contribue à améliorer la qualité de l'énergie électrique injectée dans le réseau.

CHAPITRE IV

Simulations et Interprétations des Résultats

IV.1. Introduction:

Un système d'électronique de puissance a pour objectif la conversion de l'énergie électrique. Il se compose de plusieurs éléments fondamentaux:

- ✓ Une source d'énergie électrique.
- ✓ Un convertisseur statique.
- ✓ Une charge électrique
- ✓ Un système de commande du convertisseur.

Étant donné la complexité de l'analyse théorique de ce type de système, notamment pour un point de fonctionnement précis, il est souvent nécessaire de recourir à des hypothèses simplificatrices. C'est pourquoi la simulation numérique s'impose comme un outil incontournable pour l'étude et l'évaluation de ces systèmes.

Dans ce chapitre, nous étudions la simulation d'un système comprenant un réseau électrique, des charges perturbatrices, des redresseurs triphasés, ainsi qu'un filtre actif parallèle à trois ou quatre bras, le tout modélisé dans l'environnement Matlab-Simulink.

Les résultats issus de cette simulation seront ensuite présentés et analysés afin d'en tirer les conclusions techniques

IV.2 Schémas de simulation :

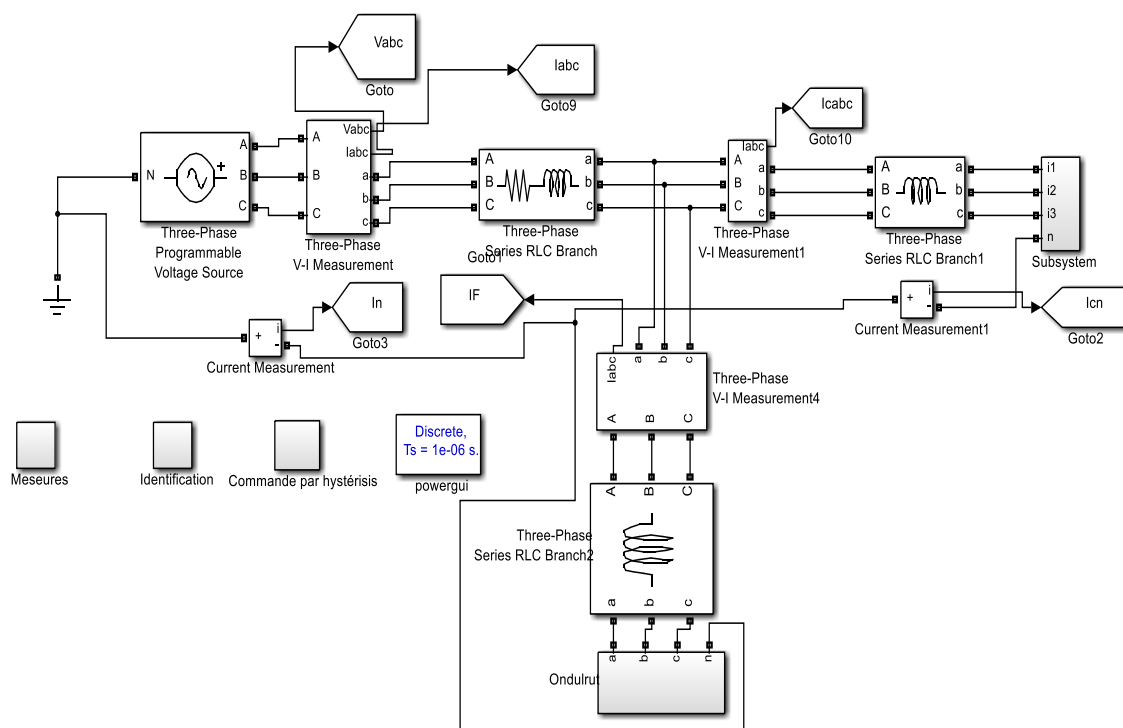


Figure IV.1 : Schéma de FAP à quatre fils avec un onduleur à quatre bras sous Matlab--Simulink.

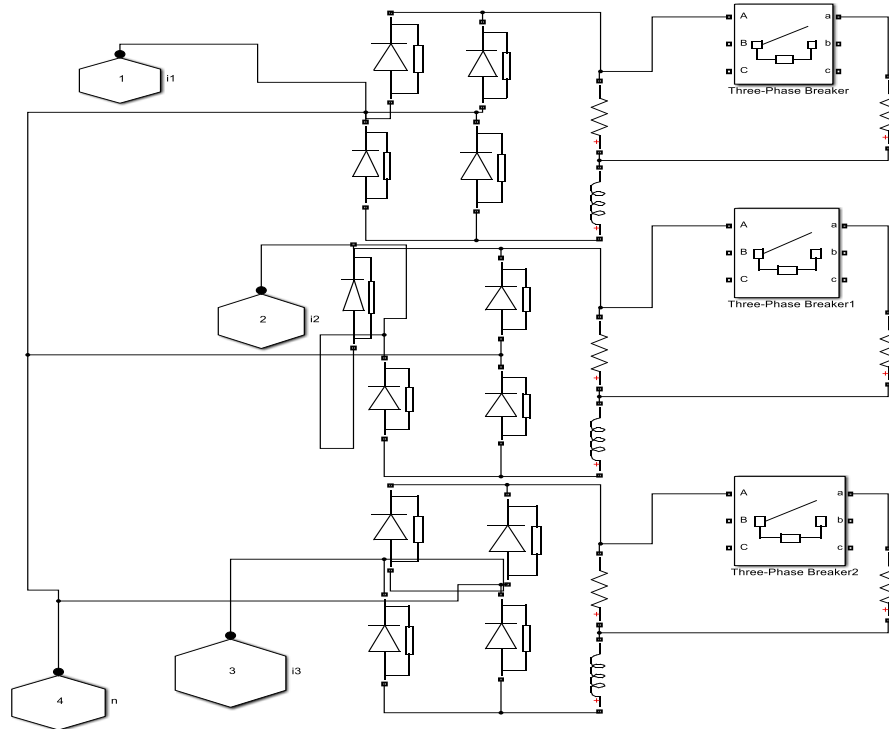


Figure IV.2: charges triphasées non linéaire sous Matlab- Simulink.

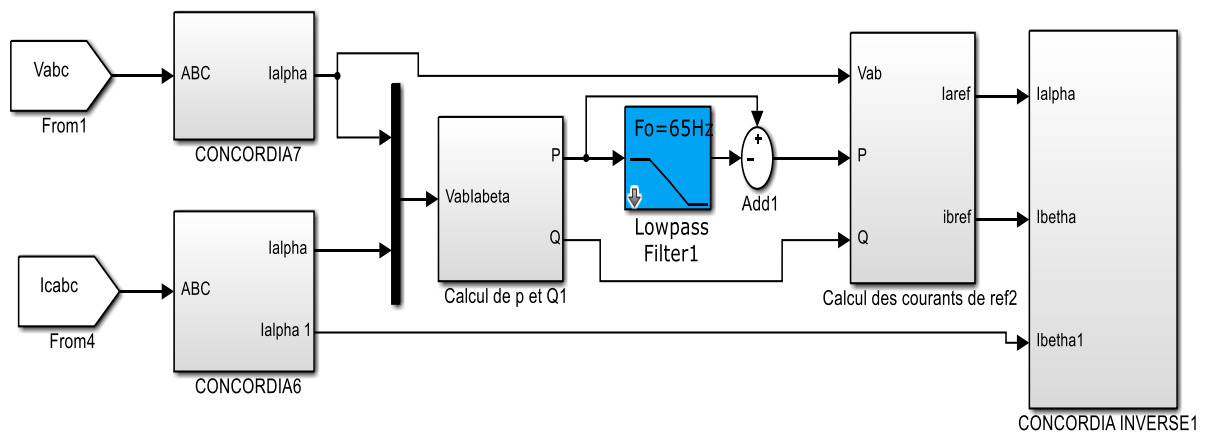


Figure IV.3 Identification par la méthode des puissances instantanées sous Matlab- Simulink.

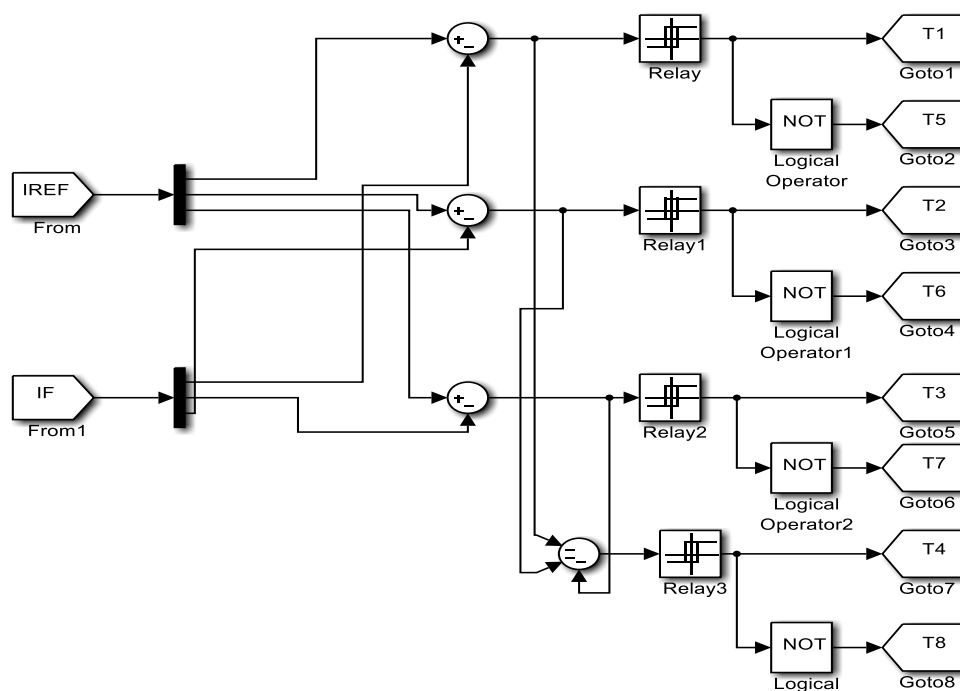


Figure IV.4: commande par hystérésis sous Matlab- Simulink.

IV.2.1. Paramètres de la simulation:

Pour simuler le modèle de l'association filtre actif-réseau-charge polluante du la (Figure IV.1) et (Figure IV.2) sous Matlab-Simulink, on a utilisé les paramètres suivant :

Tableau (IV.1) : Paramètres du système étudié.

E [V]	F [HZ]	L_s [mH]	R_s [Ω]	L_C [mH]	L_f [mH]	V_{dc} [V]
94	50	2.3	0.42	1	3	200

Pour les charges, nous étudions les deux cas suivants:

❖ Cas où les trois charges sont identiques:

$$R_{d1} = R_{d2} = R_{d3} = 12.5\Omega \quad \text{IV.1}$$

$$L_{d1} = L_{d2} = L_{d3} = 200\text{mH} \quad \text{IV.2}$$

❖ Cas où les trois charges sont différentes:

$$R_{d1} = 12.5\Omega, R_{d2} = 8\Omega, R_{d3} = 17\Omega. \quad \text{IV.3}$$

$$L_{d1} = 200\text{mH}, L_{d2} = 250\text{mH}, L_{d3} = 220\text{mH}. \quad \text{IV.4}$$

IV.2.2. Résultats des simulations sous Matlab-Simulink :

IV.2.2.1. Cas de charge équilibrée :

Dans ce premier cas nous avons pris un système de charge équilibré qui utilisé pour deux filtres actif à (trois ou quatre bras), 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 :

IV.2.2.1.1. Cas de charge équilibrée avec un onduleur triphasé à quatre bras:

a- Les courbes après filtrage :

A l'instant ($t=0.2$ s) on injecte le FAP.

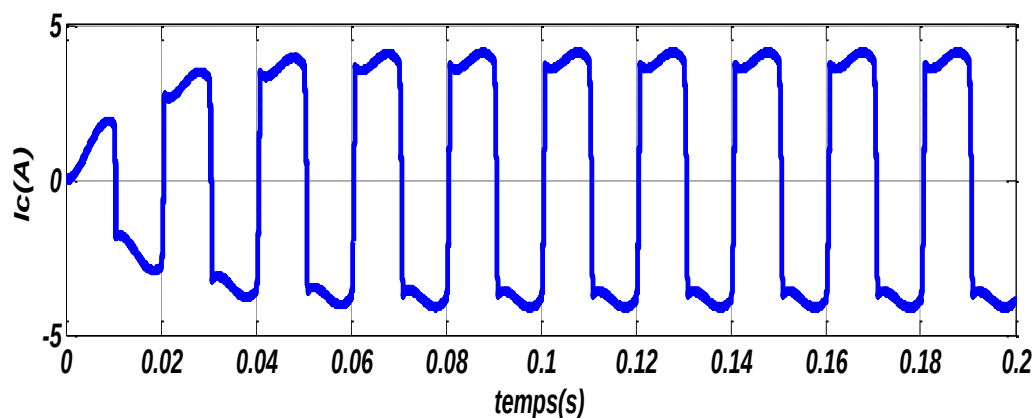


Figure IV.5: Courant de charge après filtrage.

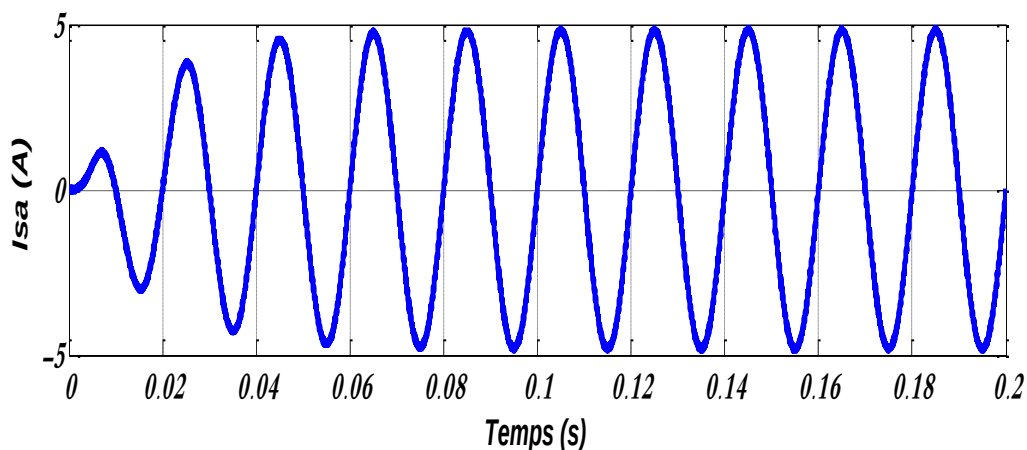


Figure IV.6 Courant de source après filtrage.

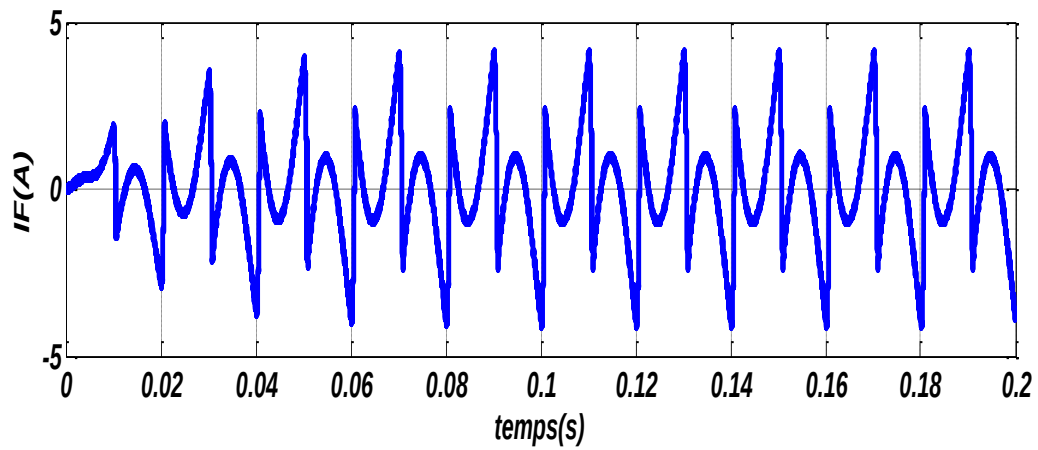


Figure IV.7: Courant de filtre après filtrage.

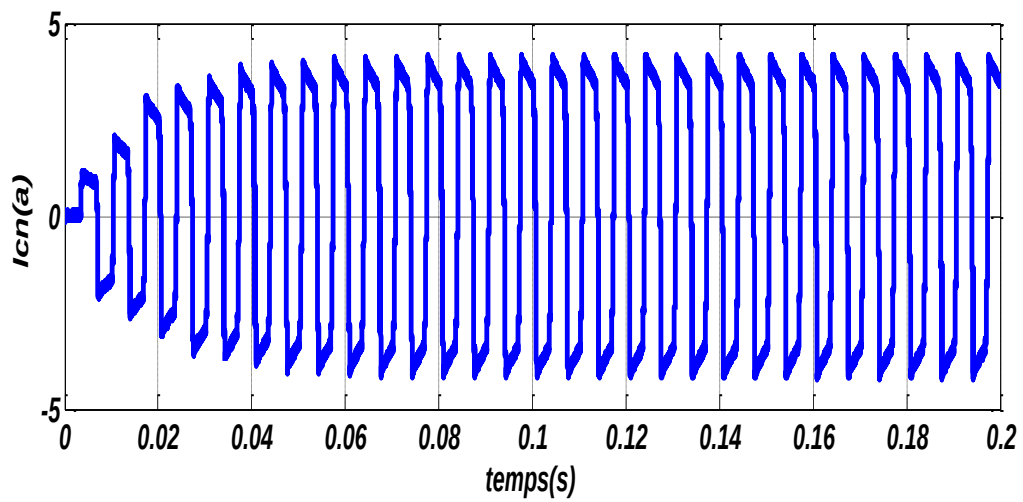


Figure IV.8: Courant de neutre côté charge après filtrage.

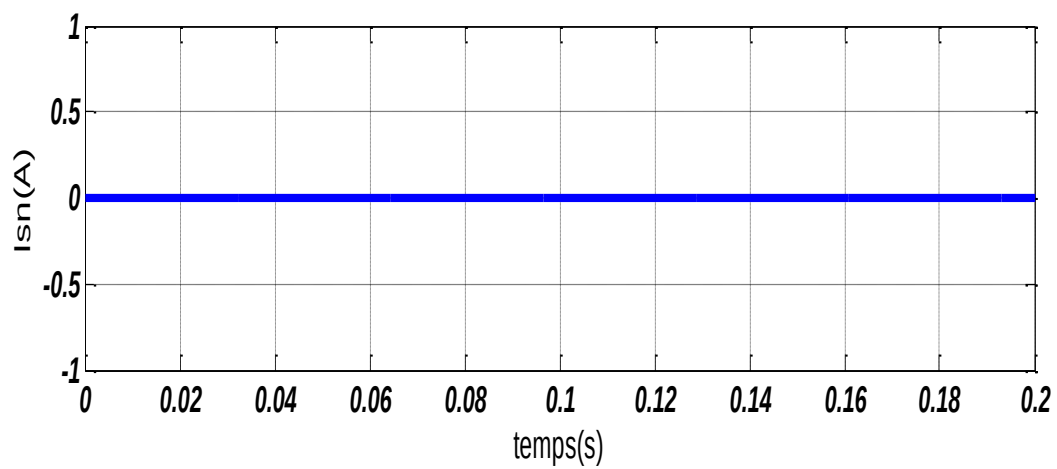


Figure IV.9: Courant de neutre côté source après filtrage.

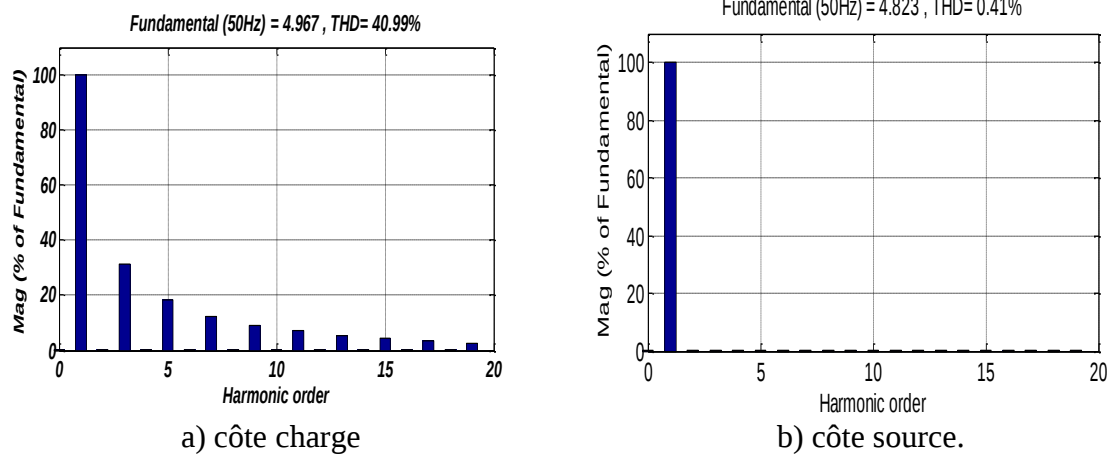


Figure IV.10: Spectre d'harmonique du courant de source.

b- Les courbes après l'augmentation de la charge :

A l'instant ($t=0.4$ s) on augmente la charge.

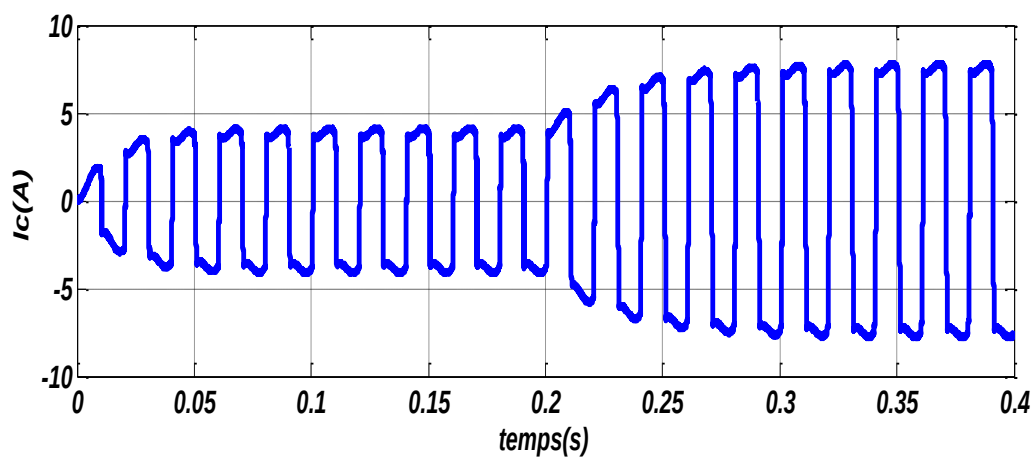


Figure IV.11: Courant de charge après l'augmentation de la charge.

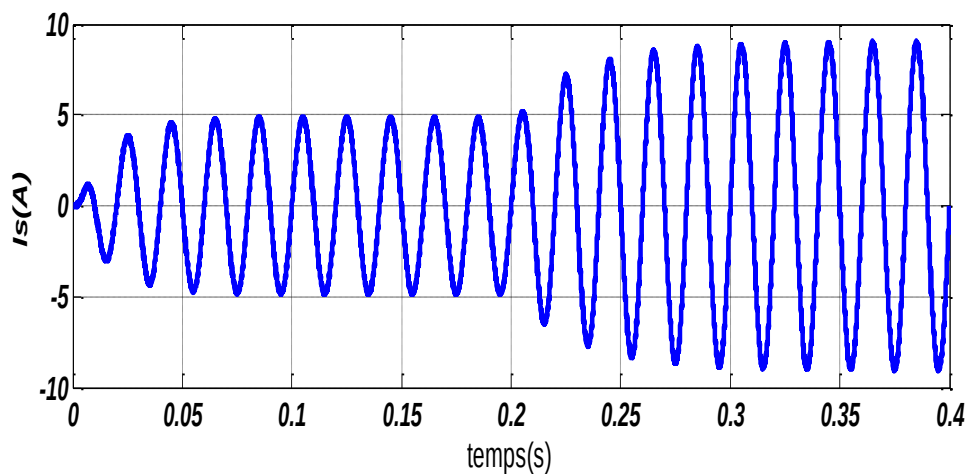


Figure IV.12: Courant de source après l'augmentation de la charge.

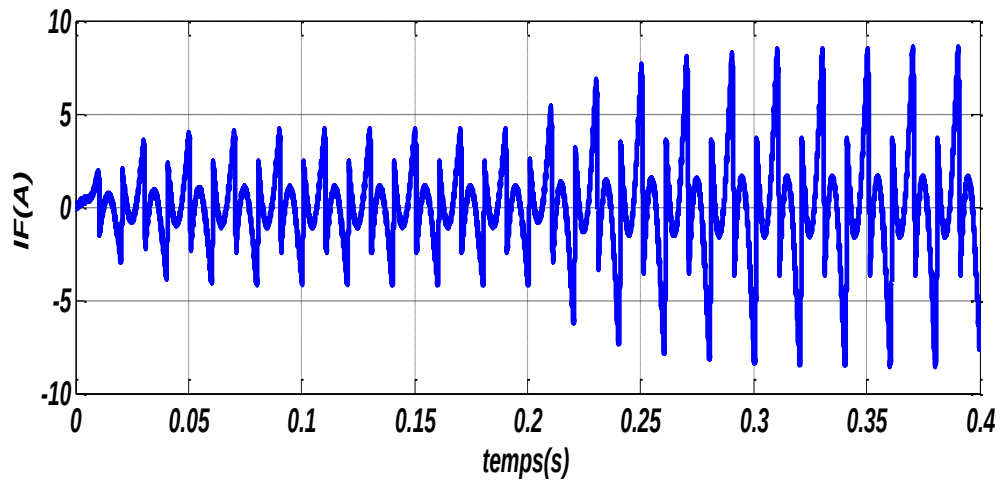


Figure IV.13: Courant de filtre après l'augmentation de la charge

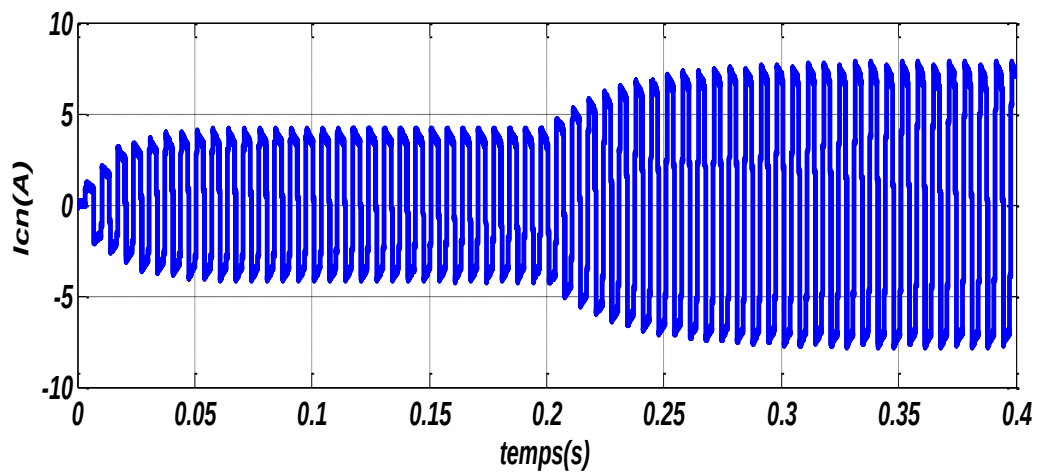


Figure IV.14 : Courant de neutre côté charge après l'augmentation de la charge

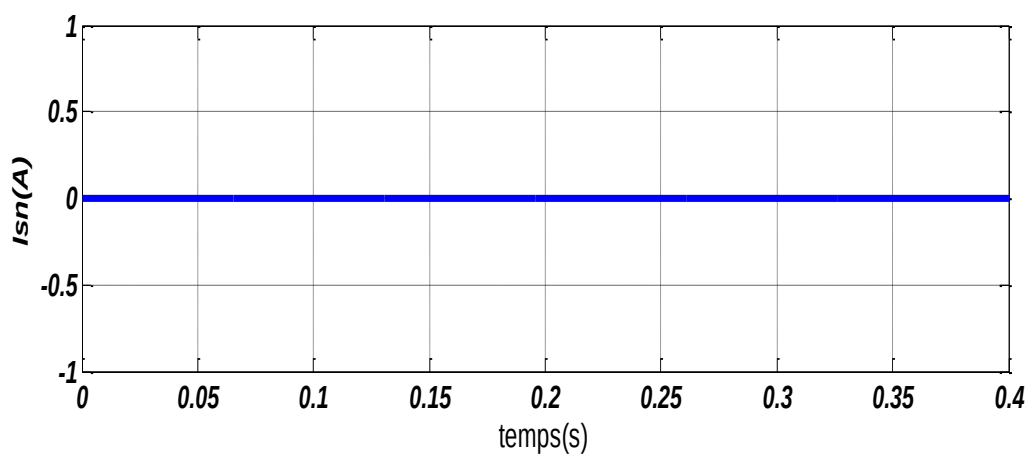


Figure IV.15 : Courant de neutre côté source après l'augmentation de la charge

❖ Commentaires:**Étude des courants et des harmoniques dans le cas d'une charge équilibrée avec un onduleur à quatre bras**

Dans le cas d'une charge équilibrée et de l'utilisation d'un onduleur triphasé à quatre bras, les formes des courants dans les trois phases ainsi que les spectres harmoniques sont identiques. Il suffit donc d'analyser le courant de la phase 1 uniquement.

Première période (de 0 à 0,2 seconde) – Filtre activé et charge constante

Comme illustré dans les figures (IV.6 et IV.7), on observe que le courant du côté source est sinusoïdal dès le début du fonctionnement, grâce à la présence du filtre. En revanche, le courant du côté charge reste déformé en raison de la nature non linéaire de la charge. Le taux de distorsion harmonique total (THD) du côté source est de **0,93 %**, bien inférieur à la limite maximale autorisée par la norme IEEE (5 %), comme le montre la figure (III.9.b)

Deuxième période (de 0,2 à 0,4 seconde) – Augmentation de la charge avec filtre toujours actif

À cette étape, comme le montrent la figure (IV.10) on constate une augmentation des courants du côté source et du côté charge. Le courant du côté source reste sinusoïdal grâce à l'efficacité du filtre, avec un THD de **0,91 %**. Du côté charge, le courant reste fortement déformé, avec un THD atteignant **39,70 %**.

Courants injectés par le filtre:

La figure (IV.7) montre les courants injectés par le filtre. Dès le démarrage (0s), le filtre commence à compenser les harmoniques. Lorsque la charge augmente (de 0,2 à 0,4 s), les courants injectés s'amplifient, ce qui reflète l'adaptation du filtre aux variations de charge.

Courants du conducteur neutre:

La figure (III.8) présente les courants dans le conducteur neutre du côté source et du côté charge. Bien que la charge soit équilibrée, le courant dans le neutre du côté charge n'est pas nul. Grâce à l'action du filtre, le courant du neutre côté source devient nul, tandis qu'il reste non nul côté charge, et augmente progressivement avec l'augmentation de la charge.

IV.2.2.2. Cas de charge déséquilibrée :

Dans ce deuxième cas nous avons pris un système de charges déséquilibré par le FAP avec un onduleur à quatre bras, c'est la raison pour laquelle nous tracerons les courbes du courant côté source et côté charge de chaque phase, ainsi que les spectres des harmoniques du chaque phases, Les résultats de simulation du système étudié sont présentés sur les figures suivants :
On injecte le FAP à $t=0s$

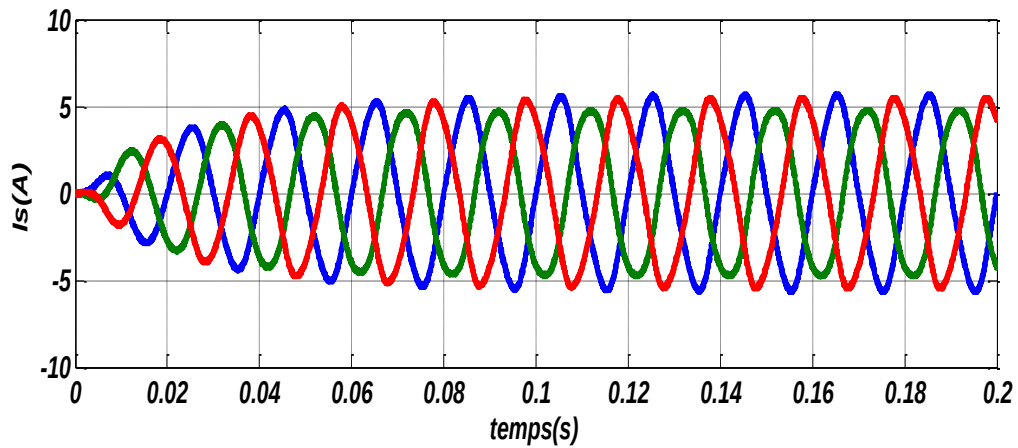


Figure IV.16: Courant de côte source.

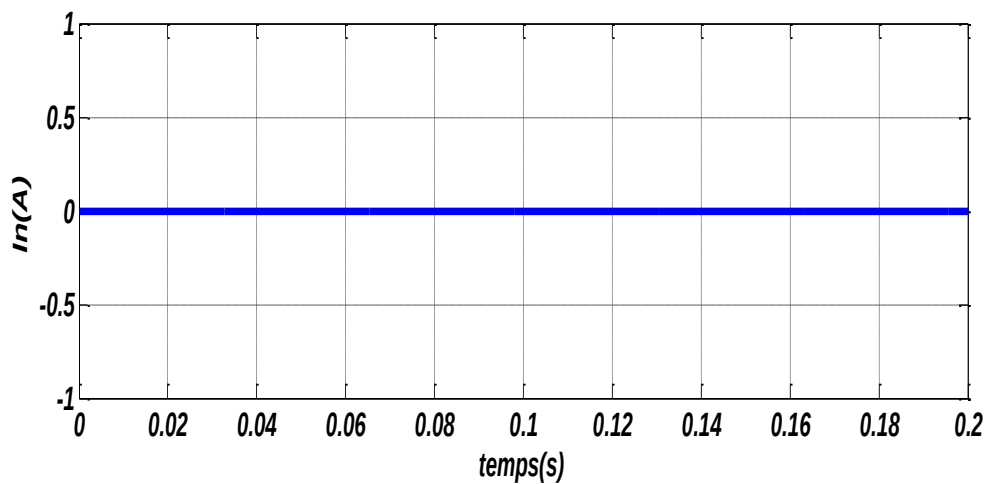


Figure IV.17: Courant de neutre.

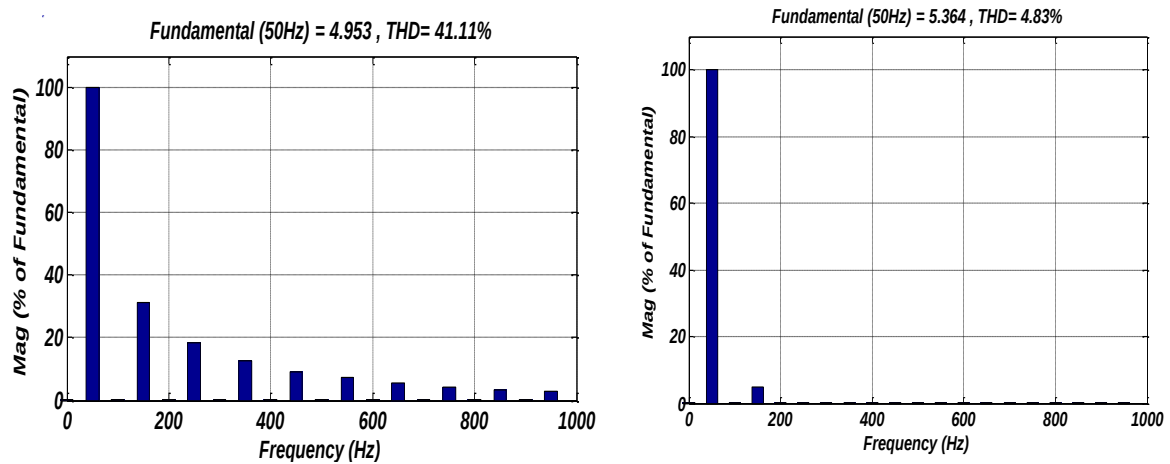


Figure IV.18: Spectre d'harmonique du courant de la phase 1

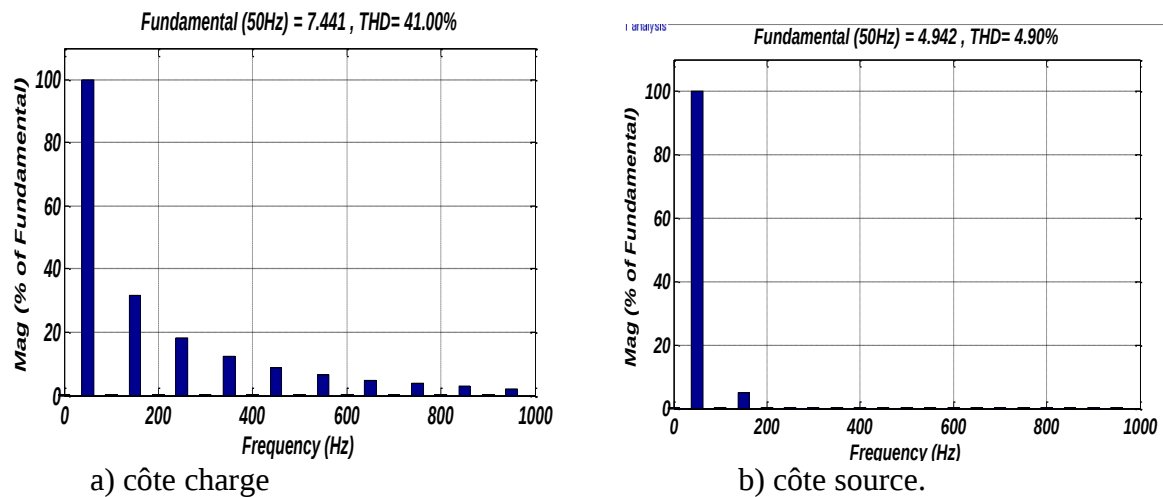


Figure IV.19: Spectre d'harmonique du courant de la phase 2

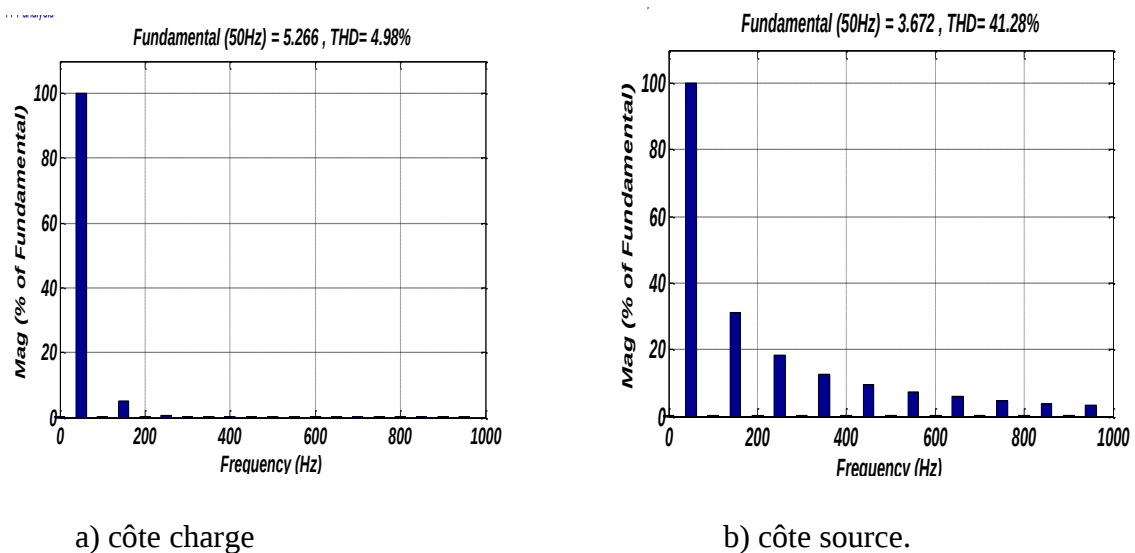


Figure IV.20: Spectre d'harmonique du courant de la phase 3

❖ Commentaires:

La figure (IV.17) représente les courants des trois phases du côté source. On observe qu'ils sont sinusoïdaux dès le début du fonctionnement (de 0 à 0,2 seconde), grâce à l'activation du filtre dès l'instant initial.

La figure (IV.18) montre que le courant du conducteur neutre du côté source est nul.

Les figures (IV.19, IV.20 et IV.21) illustrent les taux de distorsion harmonique (THD) des courants des trois phases du côté source. On remarque que ces taux sont très faibles et inférieurs à 5 %.

Le tableau (IV.2) présente un résumé des valeurs du taux de distorsion harmonique des courants obtenus.

Tableau (IV2) : comparaison THD dans les différentes cas de simulation.

Charge équilibrée			
THD[%]	Phase1	Phase2	Phase3
côte charge	40.99		
côte source	0.41		
Charge déséquilibrée			
THD[%]	Phase1	Phase2	Phase3
côte charge	41.11	41.11	41.28
côte source	4.83	4.90	4.98

IV.3 Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons présenté et commenté les résultats de simulation du filtre actif de puissance (FAP) à quatre fils, et le filtrage s'est révélé très efficace dans les différents cas étudiés.

La topologie à quatre bras donne toujours de meilleurs résultats lorsqu'elle est utilisée dans un FAP, car l'onduleur à quatre bras commande les trois courants de phase ainsi que celui du neutre, contrairement à l'onduleur à trois bras qui ne permet pas cette capacité.

Conclusion Générale

Ce travail a mis en évidence la problématique de la pollution harmonique dans les réseaux électriques, causée principalement par les charges non linéaires, en particulier les redresseurs classiques. Ce phénomène affecte négativement la qualité de l'énergie et engendre des perturbations dans le fonctionnement des équipements électriques. Une étude théorique a été menée pour comprendre cette problématique ainsi que les normes internationales qui en définissent les limites. Différentes solutions ont été explorées, en insistant sur le rôle essentiel de l'électronique de puissance dans le développement de systèmes de compensation performants.

Dans ce contexte, le filtre actif parallèle s'est imposé comme une solution moderne et efficace pour compenser les courants harmoniques et réactifs, en injectant des courants correcteurs dans le réseau. Sa structure, composée d'une partie puissance et d'une partie commande, ainsi que certaines techniques de commande dynamiques ont été présentées pour garantir une réponse rapide et fiable.

Le travail a également porté sur plusieurs méthodes permettant d'identifier les composantes indésirables du courant, afin d'optimiser les performances du système de filtrage.

Enfin, une modélisation complète dans l'environnement Matlab/Simulink a été réalisée, incluant un réseau électrique, des charges perturbatrices, des redresseurs triphasés et un filtre actif parallèle. Les résultats de simulation ont montré une amélioration significative de la qualité de l'énergie, avec une réduction notable du taux de distorsion harmonique totale, renforçant ainsi la fiabilité des réseaux électriques modernes.

BIBLIOGRAPHIES

- [1] **Bouhabila Mohammed Salah**, « Commande avancée d'un filtre actif parallèle », mémoire de Master, Université de Jijel, Année 2018.
- [2] **MA. Kouadria**, « Techniques de commande avancées d'un filtre actif parallèle pour améliorer la qualité d'énergie fournie au réseau autonome hybride », Thèse de Doctorat, Université Ibn KHALDOUN de Tiaret, Année 2017.
- [3] **Atef Ghouli , Ahmed Bachir Karmia**, « Etude de la Commande par logique floue d'un filtre actif parallèle à trois fils », mémoire de Master, Université Echahid Hamma Lakhdar d' Eloued, Année 2023
- [4] **BEN MEDDOUR Mostefa**, « Contribution à l'étude du filtrage actif parallèle des harmoniques dans les réseaux électriques », mémoire d'ingénieur, université Biskra, 2011.
- [5] **GHASSOULI Nabil et RAOUACHE Noui**, « application du filtrage actif parallèle sur une charge dynamique non linéaire », mémoire d'ingénieur, université de M'sila, 2007.
- [6] **BOUGUERRA Samir et BOURENNANE Ibrahim**, « Filtrage actif parallèle des réseaux électriques avec compensation de l'énergie réactive », mémoire d'ingénieur, université de M'sila, 2007.
- [7] **BOUCIF Abdelmalek**, « Filtrage actif d'un réseau électrique », mémoire de master, université de Biskra, 2014.
- [8] **Eric BETTEGA et Jean Noël FIORINA**, « Harmoniques, convertisseurs propres et compensateurs actifs », Cahier Technique Schneider Electric n° 183, 2000.
- [9] **M.A.E ALLALI**, « Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension », thèse de doctorat, ULP Strasbourg, 2002.
- [10] **Bachir Asma, Merabti Mohammed El amin**, « Étude et simulation d'un filtre actif parallèle Multi niveaux », mémoire de Master, Université Aboubakr Belkaïd, Tlemcen, le 30/ 09/2020.
- [11] **BEAULIEU.S**, « Etude et mise au point d'un filtre actif d'harmonique en vue d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique », mémoire de Fin d'Etudes, Université Québec à Chicoutimi, Mai 2007.
- [12] **Abdelhamid. H**, « Amélioration des performances du filtre actif : Application du régulateur proportionnel intégral et du régulateur floue », mémoire de Magister, Ecole de Technologie Supérieure, Université Québec, Novembre 2004
- [13] **Zemmit Khalil , Benlefki Lotfi**, « Étude et Simulation du Filtrage Actif Parallèle Basé sur la Méthode des Puissances p-q », mémoire de Master, Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj, Année 2022.
- [14] **A. Amara & A. Bengana**, « Étude et simulation d'un circuit de commande pour un filtre actif de puissance », Mémoire Fin d'Etudes de Master Académique, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, 25 juin 2015.

BIBLIOGRAPHIES

[15] **A. Chaoui**, «Filtrage actif triphasé pour charges non linéaires, Thèse de doctorat, Université de Ferhat Abbas de Sétif, 2010.

[16]**M. Tahri, Z. Djemaa, Thèse** «Étude et simulation d'une commande robuste pour filtre actif», Mémoire Fin d'Etudes de Master Académique, Université de Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, 2016/2017.

[17] **M. Sarra**, «Contribution à l'étude des filtres actifs hybrides», Thèse de doctorat, Université de Sétif, 2013.

[18] **A. bachir, M. Merabti**, «Étude et simulation d'un filtre actif parallèle», Mémoire Fin Etudes de Master Académique, Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen–, le 30/09/2020.

[19] **M.A.E. Alali**, «Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension», Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, ULP-Strasbourg 1, France, Septembre 2002.

[20] **M. Sarra**, «Contribution à l'étude des filtres actifs hybrides», Thèse de doctorat, Université de Sétif, 2013.

[21] **L. Benchaita**, «Étude, par simulation numérique et expérimentation, d'un filtre actif parallèle à structure courant avec une nouvelle méthode de contrôle commande», Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, 1998.

[22] **D. Ould Abdeslam**, «Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension», Thèse de doctorat, université de Haute- Alsace, 8décembre 2005.

[23] **K. Djazia**, «Étude des filtres actifs pour réseaux déséquilibrés et distordus», Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas, Sétif 1, 2015.

[24]**Kouka Ahlam, Djreaba Ouissal** «Commande direct puissance d'un filtre actif parallèle», mémoier de Master, Universite Echahid Hamma Lakhdar d' Eloued, juni2022.

[25] **Benzine Tarek ,Derouiche Ahmed , AmineZerrouki sadek**, «Commande par Hystérésis du Courant d'un Filtre Actif Parallèle à Quatre-Bras», mémoier de Master, Université kasdi merbah Ouargla, le / 10/2020

[26]**Dr. Benchouia Med Toufik**, «Commande d'un Filtre actif parallèle à quatre bras par des techniques avancées», Thèse de Magister, Université Mohamed Khider – Biskra, le 03/03/2015.

[27] **Mereddef Mohammed Amine, Hamaden Ayoub**, «Commande par Réseaux de Neurones Artificiels d'un Filtre Actif Parallèle», mémoier de Master, Universite Echahid Hamma Lakhdar d' Eloued, 2023.

[28] **Hadfi Hassene**, «Etude et Commande d'un Filtre Actif Parallèle à quatre bras», mémoier de Master, Université Mohamed Khider – Biskra, Le lundi 8 juillet 2019.

[29] **Adouka yacin, Djouadi ahmed Tedjani**, «Etude et simulation d'un filtre actif parallèle De puissance», mémoier de Master, Universite Echahid Hamma Lakhdar d' Eloued, le Juin 2022.

BIBLIOGRAPHIES

- [30] **D. Mohamed laminé, G. Elhabib, M. Y. Bachir**, « Commande direct de puissance d'un filtre actif parallèle », mémoire de Master, Université Echahid Hamma Lakhdar d' Eloued, Année 2020.
- [31] **Ihaddaden seif eddine, Bettache Amine**, « Étude et simulation d'un filtre actif parallèle alimenté par un système photovoltaïque », mémoire de Master, Université SAAD DAHLAB de BLIDA, Juillet 2019.
- [32] **Tidjani Mhani**, « Etude et Conception d'un Filtre Actif Parallèle Triphasé à Quatre Fils en vue de sa Commande par des Méthodes d'Intelligence Artificielle », Thèse de Doctorat, le 19/02/2017.
- [33] **M. M. ABDUSALAMM**, « Structures et Stratégies de Commande des Filtres Actifs Parallèle et Hybride avec Validations Expérimentales », Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré-Nancy-I-France, 2008.
- [34] **T. MAHNI, M. T. BENCHOUIA, A. GOLEA, K. SRAIRI et M. H. BENBOUZID**, « Three-Phase Four-Wire Shunt Active Filter with Unbalanced Loads », Elsevier, Energy procedia, V. 50, p. 528–535, Juillet 2014.
- [35] **J. BALCELLS, M. LAMICH et G. CAPELLA**, « LC Coupled Shunt Active Power Filter (APF): New Topology and Control Method », Electrical Power Quality and Utilisation, 2007.
- [36] **T. MAHNI**, « Amélioration de la qualité d'énergie électrique dans un réseau basse tension par un filtre actif parallèle », mémoire de Master, Université Echahid Hamma Lakhdar d' Eloued, 2018