

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



Mémoire de Fin d'Études

Présenté à

l'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued

Faculté de la Technologie

Département de Génie Electrique en Vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

en Commande Electrique

Présenté par

SOUALMI Djihane - DEBILOU Mohammed said

Thème

Commande par Logique Floue d'un Filtre Actif Parallèle

Soutenu le 08/06/2023. Devant le jury composé de :

Dr. GIA Talal

Maitre de conférences

Président

Dr. MAHNI Tidjani

Maitre de conférences

Rapporteur

Dr. ZALOUMA Laide

Professeur

Examineur

Année Universitaire 2022/2023

Dédicaces

*C'est difficile pour moi d'exprimer tout ce que je
dois à ma famille. Me*

*Je pense surtout à ma mère et Frères
Pour le soutien moral et logistique inestimable et les
nombreux*

*Les encouragements que j'ai toujours reçus d'eux.
En conclusion, je dédie chaleureusement à ma mère
mon précieux*

Merci beaucoup à ma mère.

✍ Djihane

Dédicace

Tout d'abord, nous remercions Dieu

d'avoir terminé le travail

À ma mère et à mon père

À mes frères

*À mes proches amis abd el kayoum mehdi houssein
nassim*

À mes collègues

À toute ma chère famille et mes amis

Je dédie cet humble travail

✍ Mohammed said

Remerciements

*A l'occasion de la présentation de cette thèse,
je*

*remercie tout le monde Ceux qui m'ont aidé,
de*

près ou de loin, font le travail

Merci beaucoup, Professeur MAHNI Tidjani

*Merci beaucoup Professeur Hicham
SERHOUD*

Pour tout ce qu'il nous apporte

*Je remercie également tous les membres de ma
famille, en particulier ma mère et mon père.*

Résumé

L'énergie électrique, principalement produite et distribuée sous forme de tensions triphasées sinusoïdales, permet de fournir la puissance électrique nécessaire aux différentes charges sur le réseau électrique. Ce dernier, enregistre un accroissement des perturbations à cause de l'augmentation des charges non linéaires en nombre et genre. Les solutions classiques sont avérées insuffisantes. En promouvant certains des nouveaux composants rapides de l'électronique énergétique, des solutions modernes et efficaces ont émergé. Le travail présenté dans ce mémoire aborde une solution moderne de contrôle de la pollution harmonique qui est le filtre parallèle actif. Dans ce mémoire, nous présentons l'étude et la simulation du compensateur actif parallèle à deux niveaux. Les deux paramètres qui nécessitent un réglage précis pour une meilleure compensation sont la tension d'alimentation de l'onduleur (filtre actif) et le courant ou la tension harmonique.

Après un rappel des origines et des effets de la pollution harmonique sur les réseaux électriques, les différentes solutions de dépollution du réseau électrique nous étudions la structure du filtre actif parallèle, la commande du filtre actif à base de l'onduleur a été ensuite étudiée, à savoir les méthodes d'identification des courants harmoniques de référence: dans ce cas on utilise la méthode des puissances instantanées $p-q$, la commande hystérésis pour l'onduleur et un régulateur par logique floue pour régulation du bus continue. Puis, nous allons valider le filtre par des simulations sous l'environnement Simulink/Matlab. Les résultats obtenus par simulation montrent l'efficacité et les bonnes performances du filtre actif parallèle.

Mots clés: Courants harmoniques, Taux de distorsion d'harmonique, FAP, Onduleur, Méthode $p-q$.

Abstract

Electrical energy, mainly produced and distributed in the form of three-phase sinusoidal voltages, provides the electrical power necessary for the various loads on the electrical network. The latter records an increase in disturbances due to the increase in non-linear loads in number and type. Conventional solutions have been shown to be insufficient. By promoting some of the new fast components of energy electronics, modern and efficient solutions have emerged, and the work presented in this thesis addresses a solution modern for controlling harmonic pollution which is the filter parallel active.

In this thesis, we present the study and simulation of the two-level parallel active compensator. The two parameters that require fine tuning for better compensation are the inverter supply voltage (active filter) and the harmonic current or voltage.

After a reminder of the origins, and the effects of harmonic pollution on networks electrical, the various solutions for cleaning up the electrical network we study the structure of the parallel active power filter, the control of the active filter based on the inverter was then studied, namely the methods of identification of the reference harmonic currents: in this case we used the instantaneous power method pq, the hysteresis control for the inverter and a proportional regulator or fuzzy logic regulator for continuous bus regulation. Then, we will validate by simulations under the Simulink / Matlab environment. The results obtained by simulation show the efficiency and good performance of the parallel active filter.

Key words: Harmonic current, total harmonic distortion, shunt active power filter, inverter, method (p-q).

الملخص

توفر الطاقة الكهربائية، التي يتم إنتاجها وتوزيعها بشكل أساسي على شكل جهد جيبي ثلاثي الطور، الطاقة الكهربائية اللازمة للأحمال المختلفة على الشبكة الكهربائية هذا الأخير يسجل زيادة في الاضطرابات بسبب الزيادة في الأحمال غير الخطية في العدد والنوع. لقد ثبت أن الحلول التقليدية غير كافية من خلال الترويج لبعض المكونات الجديدة السريعة للإلكترونيات الطاقة، ظهرت حلول حديثة وفعالة، ويتناول العمل المقدم في هذه الأطروحة حلا للتحكم في التلوث التوافقي وهو المرشح الموازي النشط في هذه الرسالة، نقدم دراسة ومحاكاة المعوض النشط المتوازي ذي المستويين المعلمتان اللتان تتطلبان ضبطا دقيقا لتعويض أفضل هما جهد مصدر تغذية العاكس مرشح نشط) والتيار أو الجهد التوافقي.

بعد التذكير بالأصول وتأثيرات التلوث التوافقي على الشبكات الكهربائية، الحلول المختلفة لتنظيف الشبكة الكهربائية؛ قمنا بدراسة بنية مرشح القدرة النشط المتوازي، ثم تمت دراسة التحكم في المرشح النشط القائم على العاكس، والطرق المستعملة لتحديد التيارات التوافقية المرجعية في هذه الدراسة استخدمنا طريقة الاستطاعة اللحظية pq التحكم في التخلفية للعاكس والمنظم النسبي أو المنظم المنطق الضبابي لتنظيم الجهد المستمر بعد ذلك، سوف نتحقق من الصحة عن طريق عمليات المحاكاة في بيئة Simulink / Matlab تظهر النتائج التي تم الحصول عليها عن طريق المحاكاة كفاءة وأداء المرشح النشط المتوازي.

الكلمات المفتاحية : التيارات التوافقية ، معامل تشويه التيار ، المرشح الفعال المتوازن ،
المرشح ، طريقة pq

LISTES DES SYMBOLES

THD: Taux de distorsion Harmonique

ω : Pulsation fondamentale du réseau.

FP : Facteur de puissance

S : La puissance apparente

D : Puissance déformante liée aux harmoniques

ϕ_1 : Le déphasage entre la puissance active et la puissance apparente.

γ : Le déphasage entre la puissance apparente dans le cas d'un système équilibré

I_s : courant de la source.

L : Inductance.

C : Capacité.

R : Résistance.

FAP : filtre actif parallèle

GTO : Le thyristor à extinction par la gâchette, en anglais Gate Turn-Off Thyristor.

IGBT : Le transistor bipolaire à grille isolée, en anglais Insulated Gate Bipolar Transistor.

FAS : le filtre actif série

UPQC : Combinaison parallèle série actif

V_{an} , V_{bn} et V_{cn} : Les tensions simples

V_{ab} , V_{bc} et V_{ca} : Tension composée

L_f : Inductance de filtre passif

V_{dc} : tension aux bornes du condensateur de l'onduleur (bus continue).

C_{dc} : le Condensateur du bus continue.

V_α : Tension instantanée suivant l'axe α

V_β : Tension instantanée suivant l'axe β

P_c : Puissance active absorbée par le condensateur et la tension

OU/ NON/ ET : L'opérateur en logique floue

LISTE DE FIGURES

CHAPITRE I

Figure I.1: Les perturbations électriques	9
Figure I.2 : image d'une onde déformée.....	10
Figure I.4: Filtre passif amorti	17
Figure I.5 : Subdivision des FA selon la configuration et les connexions	18
Figure I.6 : Filtre Actif Paralle.....	19
Figure I.7: Filtre Actif Serie	20
Figure I.8: Filtre actif mixte série-parallèle (UPQC)	20
Figure.(I.9): Filtre actif hybride.....	22
Figure I.10: Filtre actif série et filtre passif parallèle	23
Figure I.12: Filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle	24

CHAPITRE II

Figure (II.1) : Principe de filtre actif parallèle	27
Figure (II.2) : Courant de source, charge et filtre.....	28
Figure (II.3): Structure générale du filtre actif parallèle	28
Figure II.4 : Modèle équivalent de l'onduleur à deux niveaux.....	29
Figure II.5 : schéma du circuit de puissance d'un filtre actif parallèle à structure tension.	31
Figure II.6 : Onduleur monophasé de tension.	31
Figure II.7 : Onduleur monophasé de courant.	32
Figure II . 4: Synoptique de la P.L.L classique.	38
Figure II . 5: Synoptique détaille de la P.L.L classique	38
Figure (II.9) : Principe de commande du courant par MLI	40

CHAPITRE III

Figure III. 1 : logique Booléenne	46
Figure III.2 : logique flou	46
Figure (III.3) : Différentes formes des fonctions d'appartenance [30]	47
Figure III.4 : L'opérateur ET, OU, NON [29]	48
Figure (III .5): Schéma de principe d'un régulateur à logique floue [27]	49
Figure III.6: Schéma de principe d'un régulateur flou.....	50

Figure III.7: illustrative de deux entrées et d'un régulateur floue.	50
Figure III.8: Partition floue de e.....	51

CHAPITRE IV

Figure IV-1 : Schéma de principe de filtrage actif parallèle.....	56
Figure IV-2 : Schéma de cmmand par hysteresis	56
Figure IV-3 : Schéma de puissances instatanees	57
Figure IV-4 : Résultats de simulation de courants $I_{ch}(a)$	57
Figure IV-4 : Résultats de simulation de courants $I_s(a)$	58
Figure IV-5: Résultats de simulation de courant de filtre ifa avec onduleu	58
Figure IV-6: Résultats de simulation avant filtrage actif parallèle (a) du THD _{ich} du courant de charge $i_{ch}(a)$	59
Figure IV-7: Résultats de simulation avant filtrage actif parallèle (a) du THD _{isa} du courant de source $I_s(a)$	60

LISTE DE TABLEAU

Tableau I.1 : Les Principales Perturbations dans les Réseaux Electriques	5
Tab I.2:Caracteristiques de quelques generateurs d’harmoniques.....	11
Tab I.4: Niveaux de compatibilite pour les tensions harmoniques individuelles sur les reseaux publics basse tension (norme CEI 61000-2-2).....	14
Tab. I.5. L imites des composantes harmoniques en courant (norme IEC 61000-3-2).	15
Tableau I.6 :Comparaison entre filtrage actif et filtrage passif	21
TableauIV.1: parmaêtre du fap trois fils	55

SOMMAIRE

Dédicaces	I
Résumé.....	IV
LISTES DES SYMBOLES	VII
LISTE DE FIGURES.....	VIII
LISTE DE TABLEAU.....	X
SOMMAIRE	XI
INTRODUCTION GENERALE	1

Chapiter I

Généralités sur les perturbations des réseaux électriques

I.1.INTRODUCTION	4
I .2. Qualité de l'énergie électrique (QEE):.....	4
I.3. Classification et types des perturbations électrique :	5
I.3.1. Perturbations et leurs classifications :	5
I.3.1.1.Les perturbations électriques transitoires :	6
I.3.1.2.Les perturbations de courte durée sont les creux de tension,	6
I.3.2 Types de perturbations :	7
I.3.2.1.Les Courants parasites :	7
I.3.2.2.Les perturbations de tension :	7
I.4. Les perturbations électriques et leurs origines :	7
I.4.1. Creux et coupures de tension.....	7
I.4.2. Fluctuations de tension :	8
I.4.3. Déséquilibre du systµeme triphasé de tension :	8
I.4.4. Variation de fréquence :	8
I.5. Les harmoniques :	10
I.5.1 Définition :	10
I.5.2.Origines des harmoniques :	10
I.5.4.Caractérisation des harmoniques :	12
B-Facteur de puissance :	12
I.5.5.Normes :	14

I.6.Solutions de dépollution du réseau électrique :	15
I.6.1.Solutions traditionnelles:	15
I.6.1.1.Filtre <i>passifs</i> résonant :	16
I.6.2.Solution modern:	17
I.6.2.1.a.Les Filtres actifs parallèle-FAP :	18
I.6.2.1.b.le filtre actif série(FAS) :	19
I.6.2.3.Filtrage hybride :	22
I.7.Conclusion:	25

CHAPITRE II

Structure et principe de fonctionnement du filtre actif parallèle

II.1.Introduction:	27
II.2.Principe de filtre actif parallèle :	27
II.3.Structure générale du filtre actif parallèle :	28
II.3.1. La partie puissance est constituée:	28
II.3.2.La partie commande est constituée:	28
II.3.3.Modélisation de l'onduleur triphasé à deux niveaux :	29
II.3.4.Etude de la partie puissance :	30
II.3.4.1 Onduleur d'un filtre actif parallèle	31
II.3.4.2. Structures de l'onduleur	31
II.3.4.3.Comparaison des deux structures	32
II.3.4.4.Système de stockage d'énergie :	33
II.3.5.Etude de la partie commande:	34
II.3.5.1 Les méthodes d'identification des courant perturbés	34
II.3.5.2.La méthode de puissances instantanées :	35
II.3.5.3.Calcul des courants perturbateurs :	36
II.3.5.4 Système a PLL:	37
II.3.5.5. Commande de l'onduleur :	39
II.3.5.5.1 Commande par hystérésis :	39
II.3.5.5.2 Commande par MLI sinusoïdale :	40
II.3.5.5.3 Commande par MLI vectorielle :	40
II.3.5.6 Régulation de la tension continue :	41

II.4.Conclusion :	42
-------------------	----

Chapitre III

La commande par logique floue.

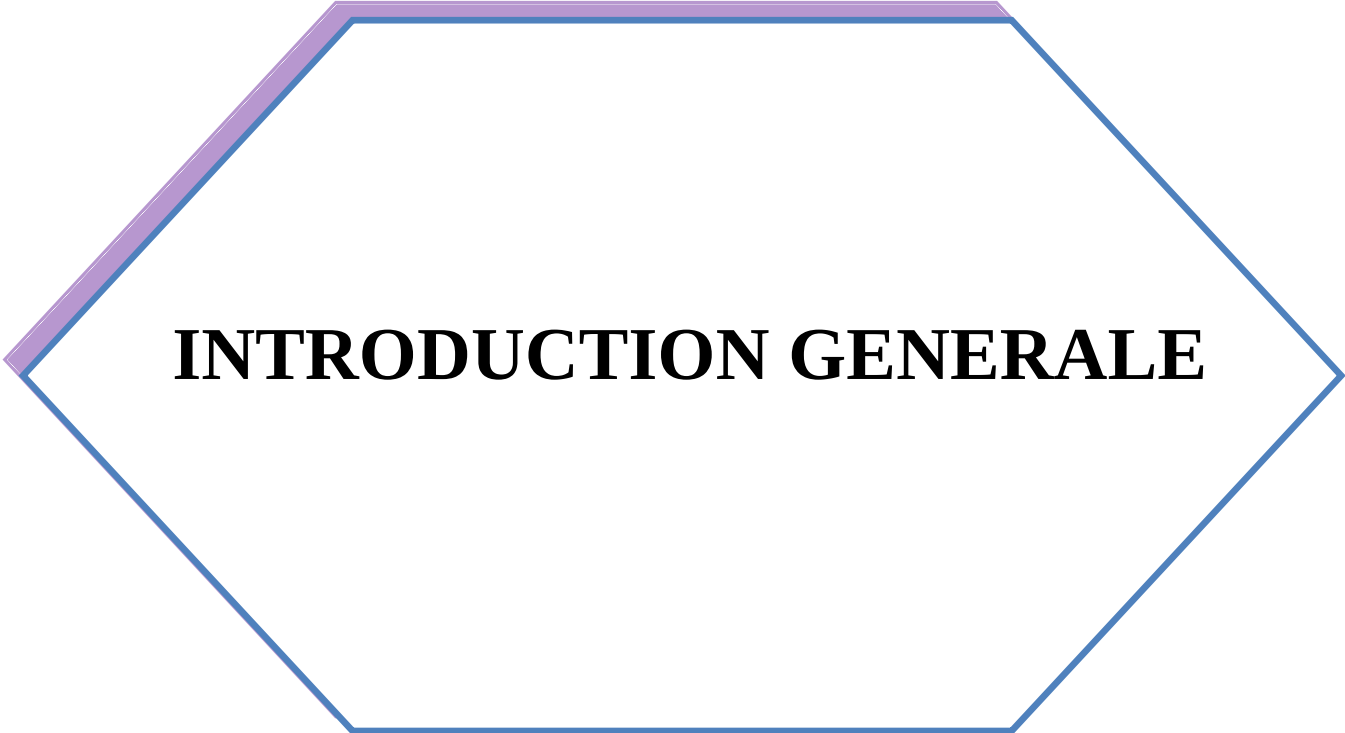
III.1.Introduction.....	44
III.4.Principe de la logique floue :	45
III.4.2.Limite de la logique booléenne :	45
III.4.3.Les concepts principaux de la logique floue :	46
III.4.3.1.Les Fonctions D'appartenance :	47
III.4.3.2.Opérateurs de la logique floue :	47
III.4.3.2.1.L'opérateur ET :	48
III.4.3.2.2.L'opérateur OU :	48
III.4.3.2.3.L'opérateur NON :	48
III.4.4.Structure d'un régulateur flou :	48
III.4.4.1.Fuzzification :	49
III.4.4.2.Defuzzification:	49
III.5.Application à la commande d'un filtre actif :	50
III.5.1.Partitions floues :	50
III.5.2.Base des règles:	52
III.6.Conclusion	53

Chapitre IV

Simulations sous Matlab-Simulink

IV-2 Les paramètres du régulateur :	55
IV-3. principe de filtrage actif parallèle.....	56
IV-4. Résultats de simulation :	57
IV. 4.1 Les courants $I_{ch}(a)$:	57
IV. 4.2 Les courants $I_s(a)$:	58
IV-5 Compensation des courants harmoniques :	59
IV-5.1.La THD _{ich} du courant de charge $i_{ch}(a)$:	59
IV-5.2 : La THD _{isa} du La courant $I_s(a)$	60
IV-6 Conclusion :	60

Conclusion générale.....	61
Reférence bibliographie	63



INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Ces dernières années, l'utilisation croissante de l'électronique de puissance dans les systèmes électriques a entraîné de plus en plus de problèmes liés aux perturbations harmoniques et aux distorsions du réseau. Ce phénomène touche tous les secteurs industriels utilisant des charges non linéaires (grâce à des gradateurs, redresseurs, variateurs de vitesse...), tertiaires (informatique ou éclairage bureautique, commerce...) et domestiques (TV, électroménager) [1]. Ces perturbations sont la principale raison du faible facteur de puissance et de la génération de courants alternatifs non sinusoïdaux riches en harmoniques. Ces harmoniques de courant génèrent des tensions harmoniques aux différents points de connexion du réseau. Cette pollution harmonique peut nuire aux autres équipements électriques connectés à ces points. Parmi ces effets, on peut citer notamment la déformation de la tension du réseau aux points de connexion lorsque le distributeur d'énergie doit fournir sa propre tension. Cette contamination peut entraîner une surchauffe des câbles et des équipements électriques, voire l'arrêt brutal des machines tournantes, voire la destruction complète de tous ces équipements [2].

Les limites proposées ont été établies par les normes de la commission internationale d'électrotechnique IEC61000, et par les recommandations IEEE Std. 519-1992. Pour faire face au phénomène des perturbations harmoniques, plusieurs solutions ont été proposées. Les efforts de la recherche contemporaine dans ce secteur ont largement contribué dans le développement des solutions et topologies sont basées sur des redresseurs à diodes monophasés et triphasés à structures spéciales, des redresseurs à MLI, des filtres passifs et des filtres actifs [3].

Parmi les résultats adoptés, l'efficacité des filtres passifs se limite à la connaissance préalable de la charge polluante imposant la distorsion du courant.

Mais aujourd'hui, les récents progrès en matière de technologie de l'électronique de puissance apportent une capacité sans précédent de compensation et de correction de la distorsion harmonique générée par les charges non linéaires en utilisant un compensateur actif parallèle, permettant de dépolluer les réseaux électriques.

Le principe de compensation actif est basé sur l'injection en permanence, au point de connexion (filtre actif parallèle-réseau), des courants qui s'opposent à tout moment aux

composantes harmoniques des courants absorbés par la charge, de cette manière, le courant fourni par la source d'énergie reste sinusoïdal.

Ce dispositif facile à mettre en corpus, et peut être installé en n'importe quel point d'un réseau notamment de basse pression, pour compenser la puissance absorbée par une ou plusieurs charges non linéaires, évitant ainsi la rotation des courants harmoniques dans tout le réseau [4].

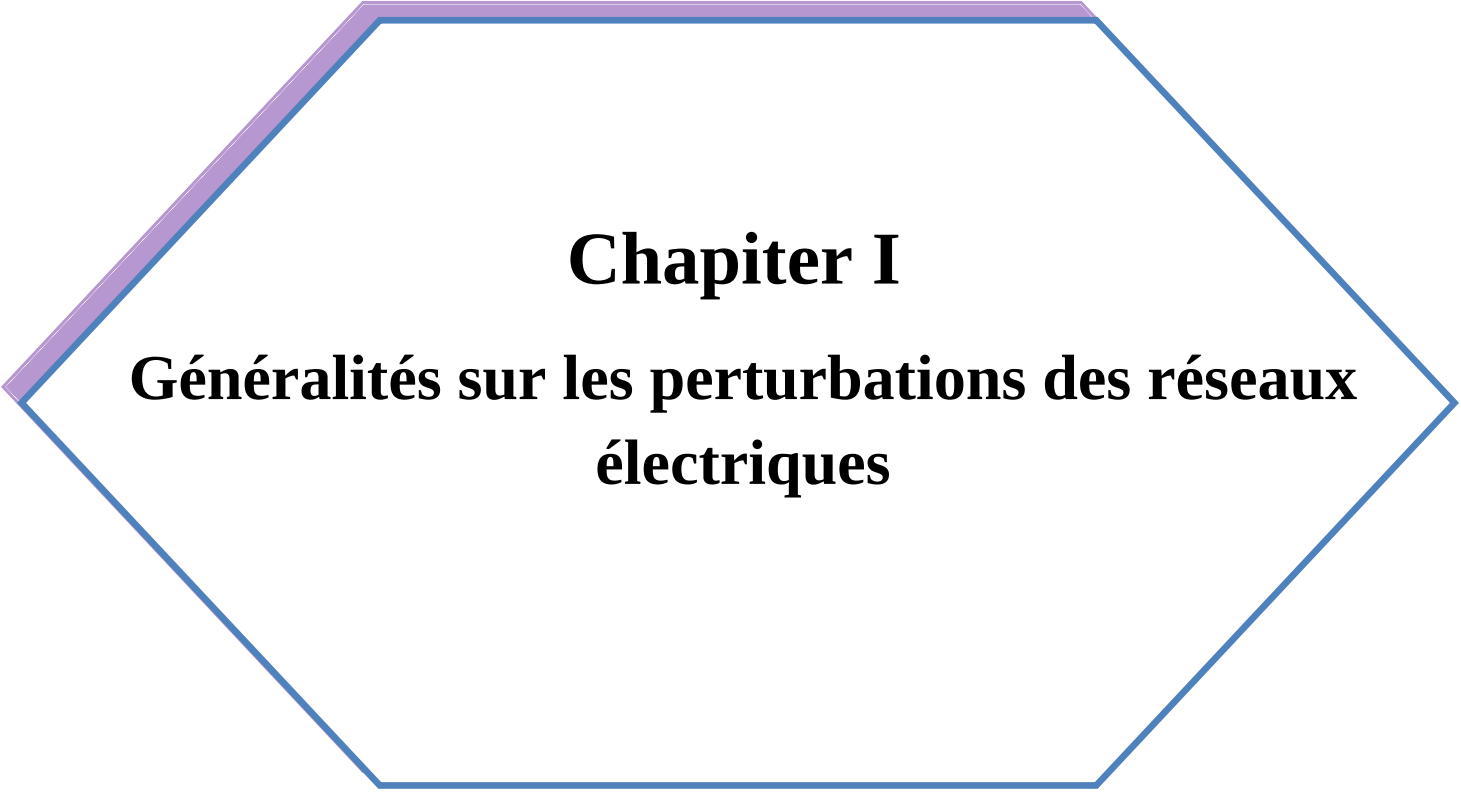
Dans le premier chapitre nous allons présenter d'une manière générale les perturbations électriques et leur influence sur le réseau. Nous focalisons sur les perturbations harmoniques, leurs causes, leurs conséquences et les normes imposées.

Pour faire face aux perturbations harmoniques générées par les charges non-linéaires, la solution classique qui est connue depuis bien longtemps consiste en l'utilisation de filtre passif. Ce type de solution va être abordé à la deuxième partie de ce chapitre. Le principe de fonctionnement ainsi que les avantages, les inconvénients et les solutions de filtre passifs seront présentés [5].

Le deuxième chapitre, sera consacré à la structure du filtre actif parallèle de puissance ainsi que son principe de fonctionnement. Nous avons présenté les différentes méthodes d'identifications des courants harmoniques des références, les principaux types de commande d'onduleur, et la régulation de bus continue.

Le troisième chapitre est consacré aux généralités de la logique floue, c'est-à-dire en l'introduisant en mentionnant ses caractéristiques et les règles mathématiques présentes en elle, en plus d'expliquer son mécanisme de travail qui nous permet de l'utiliser en régulateur pour commande le filtre actif parallèle afin d'atteindre une haute efficacité de cette filtre.

Dans le quatrième chapitre nous présentons la modélisation de l'ensemble, réseau-charge polluante-filtre actif, ensuite les résultats de simulation obtenus à partir l'environnement Matlab/Simulink [2].



Chapiter I

Généralités sur les perturbations des réseaux électriques

I.1.INTRODUCTION

L'énergie électrique, principalement produite et distribuée sous forme de tensions triphasées sinusoïdales, permet de fournir la puissance électrique nécessaire aux différents consommateurs d'énergie électrique. Dans le cas idéal, cette énergie doit être fournie sous la forme d'un ensemble de tensions constituant un système alternatif triphasé équilibré, qui possède quatre caractéristiques principales : amplitude, fréquence, forme d'onde et symétrie.

Cependant cet objectif semble idéal et n'est jamais facile à assurer, car le réseau électrique aujourd'hui est appelé à fonctionner sous un environnement de plus en plus perturbateur [4].

De ce fait, ce chapitre traite dans la première partie les problèmes de la qualité d'énergie et les caractéristiques générales des perturbations électriques et particulièrement les perturbations harmoniques en courants. Ainsi, nous détaillerons les origines, les conséquences matérielles et les limites tolérées et imposées par les normes internationales de ces perturbations [1].

Dans une deuxième partie, nous étudierons les caractéristiques générales des perturbations électriques. Ainsi, nous détaillerons les origines, les conséquences matérielles de ces perturbations et nous présenterons des solutions de compensation de ces perturbations généralement [2].

I .2. Qualité de l'énergie électrique (QEE):

L'énergie électrique est délivrée sous la forme d'un système de tension sinusoïdale triphasée.

Les paramètres caractéristiques de ce système sont les suivants :

- Fréquence.
- Amplitude.
- La forme d'onde doit être une onde sinusoïdale.
- La symétrie du système triphasé se manifeste en fait dans l'égalité de module des trois tensions et leurs déphasages relatifs [1].

Durée	Type de perturbations	Amplitude	Origine	Conséquences
<10ms	Transitoires (impulsions et oscillations)	–	Déclenchement des appareils, enclenchement des condensateurs, commutations	Dysfonctionnements gênants
10ms-1min	Creux de tension	0.1-0.9 pu	Courts- circuits, démarrage de gros moteurs, saturation Des transformateurs	Arrêts d'équipements Pertes de production
	Coupures brèves	<0.1pu	Courts- circuits	Arrêts d'équipements Pertes de production
	Surintensités	1.1-1.8 pu	Courts- circuits, Débranchement des charges Importantes	Déclenchements, dangers pour les et pour les matériels
Régime établi	Déséquilibre	-	Charges asymétriques ou monophasées	Echauffements des machines tournantes, vibrations
	Variations rapides de tension (Flicker)	0.1-7%	Charges fluctuantes (fours à arc moteur à démarrage fréquent. soudeuses. éoliennes)	Papillotements de l'éclairage
	Harmoniques	0-20%	Charges non linéaires (structures d'électronique de puissance, arcs électriques)	Echauffements, vieillissements, pertes supplémentaires, troubles fonctionnels
	Interharmoniques	0-1%	Fours à arc, charges non linéaires	Echauffements, pertes, vieillissements
	Variations de fréquence	-	Déséquilibre entre la production et la consommation	Dysfonctionnements des équipements électriques

Tableau I.1 : Les Principales Perturbations dans les Réseaux Electriques

I.3. Classification et types des perturbations électrique :

I.3.1. Perturbations et leurs classifications :

Les perturbations sont tous les phénomènes, internes ou externes à un réseau, ayant la capacité de modifier l'amplitude et/ou la forme de grandeurs électriques (courant, tension, fréquence) du réseau de manière transitoire ou permanente. Ces perturbations peuvent être classées selon deux critères ; selon la durée de persistance, ou selon le mode de distribution, c'est-à-dire leur impact sur la charge. Ainsi, selon la première classification, il existe deux catégories de base.

Perturbations périodiques (durée), telles que la distorsion Harmoniques, chutes de tension et déséquilibres dus au flux de puissance réactive dans le réseau.

Les perturbations apériodiques, principalement tous les phénomènes transitoires, sont souvent difficiles à prévoir, comme les creux de tension transitoires ou les surtensions.

A partir des paramètres listés au paragraphe précédent caractérisant la tension,

Les perturbations électriques sont divisées en quatre catégories :

- Changements d'amplitude (creux de tension, coupures brèves et surtensions, papillotement),
- fluctuations de fréquence autour de la fréquence fondamentale,
- Modification de la forme d'onde (harmoniques, interharmoniques, bruit),
- Asymétrie dans les systèmes triphasés : déséquilibré.

Il existe une autre classification des perturbations électriques basée sur la durée :

- Perturbations transitoires,
- perturbations de courte durée,
- Interférence permanente.

I.3.1.1.Les perturbations électriques transitoires :

Durent moins de la moitié de la période fondamentale. Leurs principales sources sont les opérations de commutation des réseaux de transport et de distribution, mais aussi des phénomènes naturels comme la foudre.

I.3.1.2.Les perturbations de courte durée sont les creux de tension,

Les coupures brèves et les surtensions, qui sont généralement causées par des courts-circuits. Ils se caractérisent par des variations importantes de l'amplitude de la tension et peuvent avoir des conséquences néfastes et coûteuses pour les équipements électriques. Les perturbations permanentes : Dans cette catégorie on retrouve les harmoniques, le bruit, le déséquilibre et les variations de tension et de fréquence. Elles sont généralement provoquées par la présence de charges non linéaires et fluctuantes au sein du réseau électrique. Elles se caractérisent par de faibles variations de l'amplitude, et sont à l'origine d'échauffement, de pertes supplémentaires, de vieillissement prématuré des équipements électriques et de dysfonctionnements sur certains appareillages de contrôle-commande [7].

I.3.2 Types de perturbations :

Afin d'analyser correctement la pollution du réseau basse tension, et donc, Afin de trouver la meilleure méthode de décontamination, nous distinguerons deux types d'interférences, C'est-à-dire une perturbation de courant et une perturbation de tension.

I.3.2.1.Les Courants parasites :

Tels que courants harmoniques et courants déséquilibrés La puissance réactive est principalement générée par des charges non linéaires, basées sur électronique de puissance, et/ou asymétrique. La puissance réactive peut également Dissipation par des charges inductives linéaires, telles que des moteurs asynchrones Largement présents dans les sites industriels.

I.3.2.2.Les perturbations de tension :

Telles que les creux, les déséquilibres et les harmoniques La tension provient généralement du réseau lui-même, mais Et parfois responsable. Ces types d'interférences peuvent avoir un effet très nocif sur les équipements électriques. Ces Les effets vont de la surchauffe ou de l'arrêt des machines tournantes à Détruisez complètement l'appareil [7].

I.4. Les perturbations électriques et leurs origines :

Les perturbations électriques affectant l'un des quatre paramètres cités précédemment peuvent se manifester par : un creux ou une coupure de tension, une fluctuation de tension, un déséquilibre du système triphasé de tension, une variation de la fréquence, la présence d'harmoniques et/ou d'interharmoniques.

I.4.1. Creux et coupures de tension

Le creux de tension est une diminution brutale de la tension μ a une valeur située entre 10% et 90% de la tension nominale pendant une durée allant de 10 ms jusqu' μ a quelques secondes.

Les creux de tension sont dus μ a des phénomènes naturels comme la foudre, ou μ a des défauts sur l'installation ou dans les réseaux tant publics que ceux des utilisateurs. Ils apparaissent également lors de manoeuvres d'enclenchement mettant en jeu des courants de fortes intensités (moteurs, transformateurs, etc.).

Une coupure de tension quand μ a elle est une diminution brutale de la tension μ a une valeur supérieure μ a 90% de la tension nominale ou disparition totale pendant une durée généralement comprise entre 10 ms et une minute pour les coupures brèves et supérieure μ a une minute pour les coupures longues. La plupart des appareils électriques admettent une coupure

totale d'alimentation d'une durée inférieure à 10 ms. La figure I. 1(a) montre un exemple de creux et de coupure de tension.

I.4.2. Fluctuations de tension :

Les fuctuations de tension sont des variations périodiques ou erratiques de l'en- veloppe de la tension. Ce sont des variations brutales de l'amplitude de la tension situées dans une bande de $\pm 10\%$ et se produisent sur un intervalle de temps de quelques centièmes de secondes.

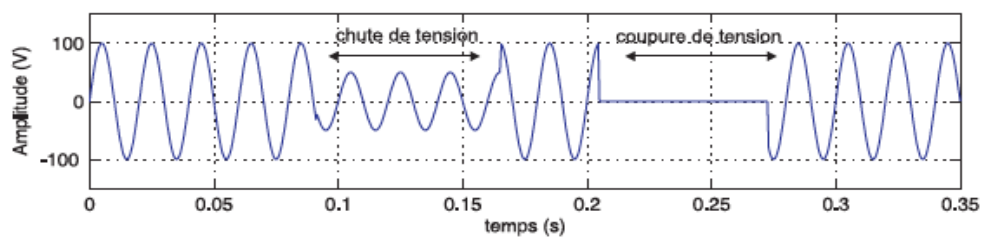
Elles sont en particulier dues μ a la propagation sur les lignes du réseau de cou- rants d'appel importants. L'origine principale de ces courants est le fonctionnement d'appareil dont la puissance absorbée varie de manière rapide, comme les fours μ a arc et des machines à souder. Ces fluctuations se traduisent par des variations d'inten- sité, visible au niveau de l'éclairage causant une gêne visuelle 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.1(b).

I.4.3. Déséquilibre du systpeme triphasé de tension :

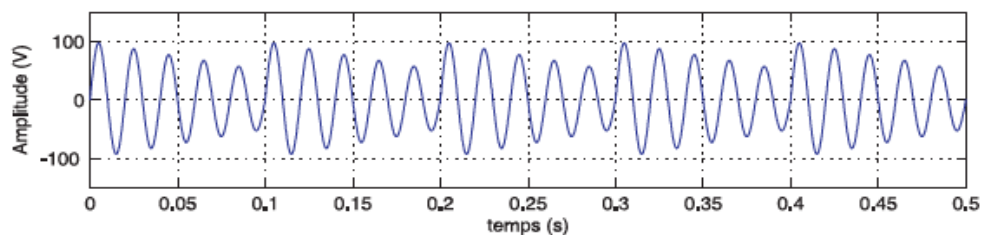
Lorsque les trois tensions ne sont pas identiques en amplitude et/ou ne sont pas décalées d'un angle de 120° les unes par rapport aux autres, on parlera de déséquilibre du système triphasé (voir la figure I.1(c)). Un réseau électrique triphasé équilibré alimentant un récepteur électrique tri-phasé non équilibré conduit μ a des déséquilibres de tension dus μ a la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau.

I.4.4. Variation de fréquence :

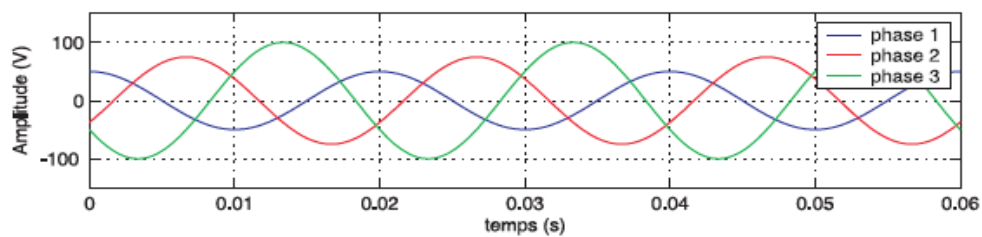
Une variation sensible de la fréquence du réseau peut appara³tre sur les réseaux des utilisateurs non interconnectés ou alimentés par une source thermique autonome (voir la figure I.1(d)). Au niveau des réseaux de distribution ou de transport, cette variation de la fréquence est très rare et n'est présente que lors de circonstances exceptionnelles, comme dans le cas de certains défauts graves sur le réseau. Dans conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamental doit être comprise dans l'intervalle $50 \text{ Hz} \pm 1\%$ [6].



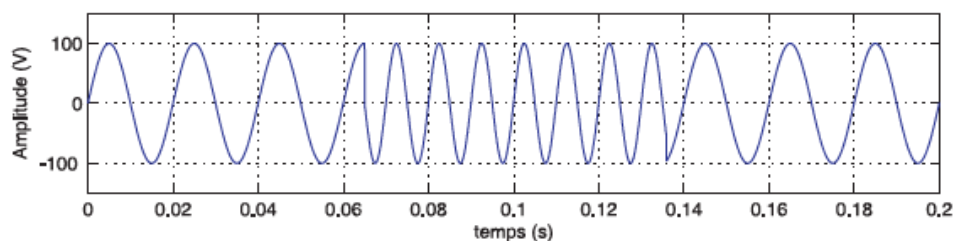
(a) Creux et coupures de tension.



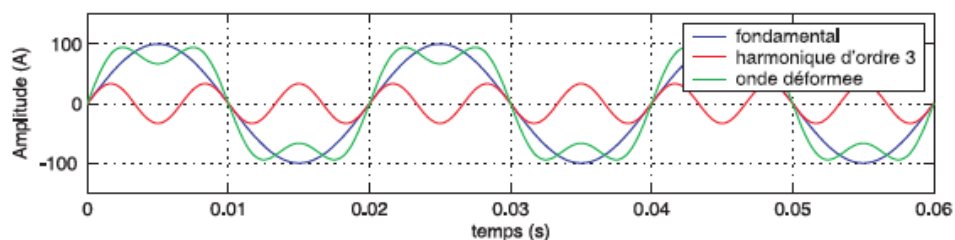
(b) Fluctuations de tension.



(c) Cas particulier de déséquilibre du système triphasé de tension.



(d) Variation de fréquence.



(e) Harmoniques.

Figure I.1: Les perturbations électriques

I.5. Les harmoniques :

I.5.1 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 $h=40$) [4].

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.

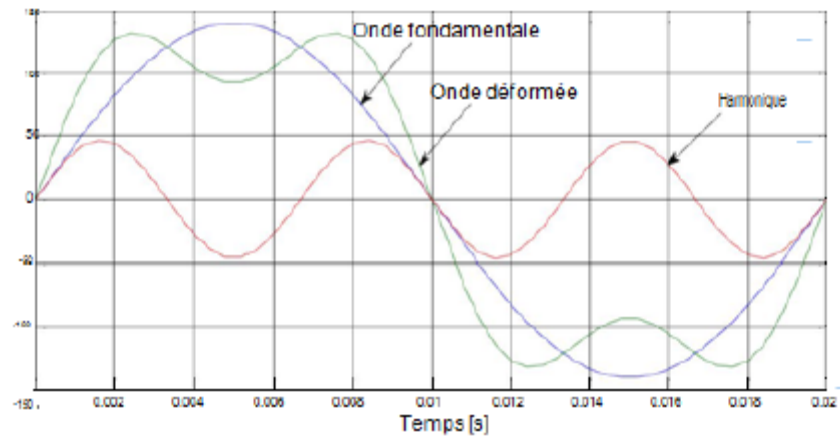
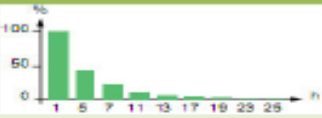
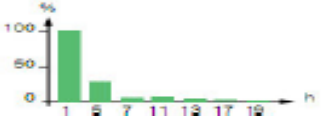
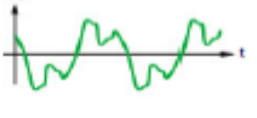
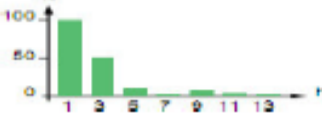


Figure I.2 : Image d'une onde déformée

I.5.2.Origines des harmoniques :

Les harmoniques proviennent des caractéristiques non linéaires des dispositifs et des charges connectées sur le système d'alimentation. 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 (Tab.1.2) [7].

Charge non linéaires	Forme d'onde	Spectre	THD
Variateur de vitesse			44%
Redresseur/ chargeur			28%
Charge informatique			115%
Eclairage fluorescent			53%

Tab I.2: Caracteristiques de quelques generateurs d'harmoniques.

I.5.3. Conséquence néfastes des harmoniques:

Les courants et les tensions harmoniques ont des effets néfastes sur le fonctionnement, la rentabilité et la durée de vie des équipements électriques. Bien que les susceptibilités des différents équipements et appareils électriques, raccordés à un réseau pollué, soient très diversifiés [2].

- **Lignes** : pertes ohmiques supplémentaires.
- **Transformateurs** : pertes supplémentaires dans les enroulements par effet joule et dans lenoyau par courant de Foucault.
- **Moteur à courant alternatif** : pertes supplémentaires dans le fer et 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 électromagnétiqueentre les lignes de puissance et les circuits de communication [2].

I.5.4.Caractérisation des harmoniques :

A- La perturbation harmonique :

Est généralement caractérisée par le taux de distorsion harmonique (*THD*) défini pour la tension ou le courant. Ce critère est le plus souvent employé pour quantifier le contenu harmonique d'un signal distordu. Il mesure également le degré de déformation du signal apporté par les harmoniques par rapport à une onde sinusoïdale [1].

Le courant absorbé par une charge non linéaire (convertisseur statique) n'est pas sinusoïdal, mais sa valeur moyenne sur chaque phase est souvent nulle. Dans ce cas, la décomposition en série de Fourier du courant donne :

$$i(t) = \sqrt{2}I_1 * \sin(\omega t + \alpha_1) + \sum_{h=1}^{\infty} (\sqrt{2}I_h * \sin(h\omega t + \alpha_h)) \quad (I-1)$$

Avec :

I_1, I_h : Valeur efficace du courant fondamental et du courant harmonique de rang h ,

α_1 et α_h : Déphasage du courant fondamental et du courant harmonique de rang h ,

ω : Pulsation fondamentale du réseau.

Le taux de distorsion harmonique de ce courant s'exprime sous la forme suivante :

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

B-Facteur de puissance :

Le facteur de puissance FP permet d'évaluer le surdimensionnement à appliquer à l'alimentation d'une installation. Pour un signal sinusoïdal le facteur de puissance est donné par le rapport entre la puissance active P et la puissance apparente S. Les générateurs, les transformateurs, les lignes de transport et les appareils de contrôle et de mesure sont dimensionnés pour la tension et le courant nominaux. Le facteur de puissance est égal au rapport entre la puissance active P et la puissance apparente S [9].

$$PF = P/S \quad (I-3)$$

La puissance apparente est donnée par

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

En présence d'harmoniques, le facteur de puissance est dégradé [1, 2, 10], une puissance supplémentaire appelée la puissance déformante (D) apparait. La puissance apparente est séparée en 3 composantes orthogonales comme le montre le diagramme de Fresnel de la figure II.2. Son expression est donnée par l'équation suivante :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (I-5)$$

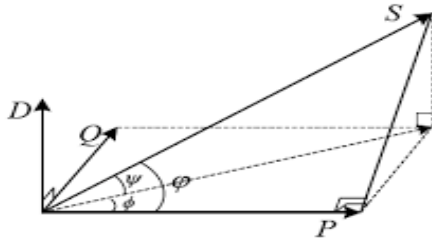
Où ; D la puissance déformante liée aux harmoniques.

$$D = 3.V. \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2} \quad (I-6)$$

Le facteur de puissance est donné par ;

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} = \cos\varphi. \cos\gamma \quad (I-7)$$

γ Le déphasage entre la puissance active dans le cas d'un système équilibré linéaire S et la puissance apparente S dans le cas charge non linéaire. [9]



φ_1 : Le déphasage entre la puissance active et la puissance apparente.

γ : Le déphasage entre la puissance active dans le cas d'un système équilibré linéaire S1 et la puissance apparente dans le cas déséquilibré non linéaire S.

φ : Le déphasage entre la puissance active et la puissance apparente S

I.5.5.Normes :

L'objectif des normes et des réglementations est de limiter les dysfonctionnements occasionnés par les harmoniques. La Commission électrotechnique Internationale (CEI) définit le niveau des courants et des tensions harmoniques qui ne pas dépasser par une série de normes de compatibilité électromagnétique (CEI 61000).

Nous pouvons citer par titre d'exemple [6] :

IEC 61000-2-2 : elle établit les niveaux de compatibilité de tensions harmoniques sur les réseaux publics basse tension. Elle est représentée sur le tableau. **I.4** Cette norme vise à protéger les équipements raccordés sur un réseau basse tension déformé.

IEC 61000-3-2 : cette norme représentée sur le tableau **I.5** fixe la limitation des courants injectés dans le réseau public pour des équipements dont le courant par phase est inférieur à 16A. Il s'agit de la des appareils du domaine domestique.

La norme principale, IEEE 519: 1992, Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Power Systems, détermine la procédure pour contrôler les harmoniques présents sur le réseau électrique. Elle impose également les limites recommandées de la pollution harmonique générée par les clients et de distorsion harmonique totale sur le réseau. Cette norme limite la distorsion harmonique (THD) du courant des réseaux < 69kV à 5% [7].

Tab I.4: Niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles sur les réseaux publics basse tension (norme 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				

Tab. I.5. L imites des composantes harmoniques en courant (norme IEC 61000-3-2).

Rang d'harmoniques impairs	Courant harmonique maximal autorisé (A)
3	2,3
5	1,14
7	0,77
9	0,40
11	0,33
13	0,21
$15 \leq h \leq 39$	$0,15 * 15 / h$
Rang d'harmoniques pairs	Courant harmonique maximal autorisé (A)
2	1,08
4	0,43
6	0,3
$8 \leq h \leq 40$	$0,23 * 8 / h$

I.6.Solutions de dépollution du réseau électrique :

Afin de compenser toutes les perturbations, deux méthodes de solution de dépollution, traditionnelle et moderne sont présentées. Le filtrage est une méthode de réduction des missions harmoniques au sein d'un site industriel, où la distorsion harmonique a graduellement augmenté ou comme solution globale pour un nouveau site, donc le filtre est un absorbeur de courants harmoniques [4].

On distingue les techniques suivantes:

- a) les filtres passifs.
- b) les filtres actifs.
- c) les filtres hybrides.

I.6.1.Solutions traditionnelles:

Ce sont des techniques (solutions) qui apportent une solution facile et rapide et qui utilisent des composants passifs (inductances, condensateurs, transformateurs) et/ou des branchements qui modifient le schema de l'installation. Plusieurs solutions sont proposees pour limiter la propagation et l'effet des harmoniques dans les reseaux electriques, parmi lesquelles, le transformateur etoile/triangle place en amont de la charge (la charge est connectee en etoile) afin de supprimer l'harmonique d'ordre 3, de ce fait ces harmoniques circulent dans les enroulements

(connectés en triangle) du transformateur sans se propager vers la source. Dans le cas où nous avons des charges non-linéaires qui produisent non seulement les courants harmoniques de rang 3, le transformateur isole ne permet pas d'empêcher ces courants de se propager dans le réseau électrique. Pour cette raison, afin de réduire les effets des perturbations harmoniques, des filtres sont proposés [10].

I.6.1.1. Filtre *passifs* résonant :

C'est un filtre très sélectif constitué d'un ensemble RLC en série voir la figure (I.3) et il est accordé sur une fréquence déterminée. Sa performance est caractérisée par la réduction de la tension harmonique entre ses bornes. Cette solution consiste aussi à offrir au courant harmonique que l'on désire éliminer, un chemin moins résistant que la ligne.

Elle exploite la résonance série des circuits formés par l'association d'éléments inductifs et capacitifs, ces circuits, pour chaque paire (L, C) une fréquence dite de résonance où l'impédance de circuit est très basse [11].

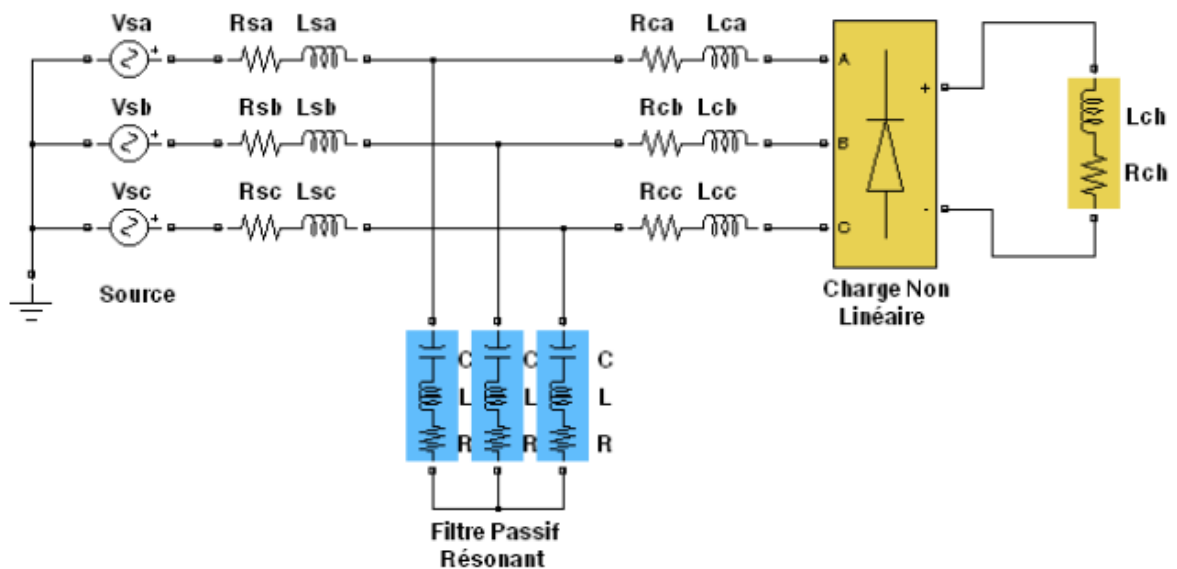


Figure I.3. Filtre passif résonant

I.6.1.2. Filtres *passifs* amorti :

Ces filtres présentent une faible impédance sur une large bande de fréquence. Ils sont beaucoup moins sélectifs et réduisent les harmoniques supérieures au voisinage de leurs rangs d'accord. Le Figure (I .4) présente respectivement, le schéma de branchement d'un filtre amorti et l'évolution de son impédance en fonction du rang harmonique. Ces filtres présentent des

performances moins bonnes que celles des filtres résonnants. En revanche, les conséquences d'une variation de la capacité ou de la fréquence sont très limitées [11].

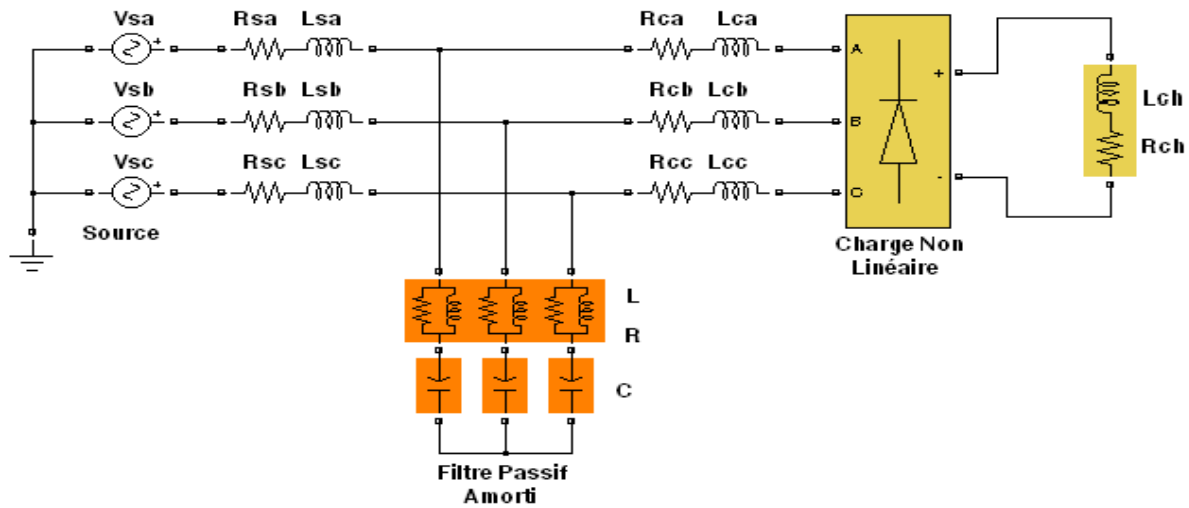


Figure I.4: Filtre passif amorti

I.6.2.Solution modern:

I.6.2.1.Les Filtrés actifs :

Un filtre actif de puissance se compose d'un composants semi-conducteurs, comme les thyristors GTO et les Transistors IGBT, ont conduit à concevoir une nouvelle structure de filtres appelée filtres actifs parallèle (FAP). Le but de ces filtres est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à ce que le courant et la tension du réseau soient rendus sinusoïdaux Le filtre actif est connecté en série, en parallèle, en combinant ces deux dernières structures ensembles ou associé avec des filtres passifs qui illustre par la figure [12].

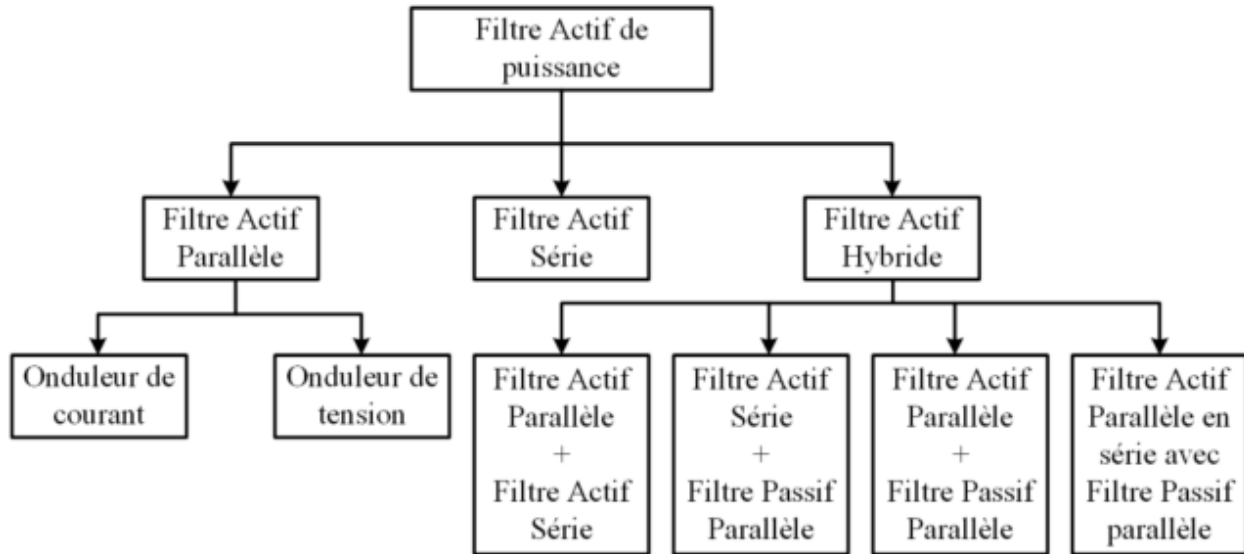


Figure I.5 : Subdivision des FA selon la configuration et les connexions

I.6.2.1.a. Les Filtrés actifs parallèle-FAP :

Le filtre actif parallèle, appelé aussi compensateur shunt, présenté sur la figure **I.6**. Il se compose d'un onduleur de tension et d'un filtre inductif en sortie et d'un condensateur du bus continu, les commutateurs d'électroniques de puissance et une inductance d'interface. Le FAP parallèle agit comme une source de courant, La fonctionnalité du FAP consiste à injecter un courant de compensation qui est équivalent en amplitude au courant déformé mais en opposition de phase, ce qui élimine ainsi le courant déformé original [12].

Le but du FAP est l'obtention d'un courant de source sinusoïdal.

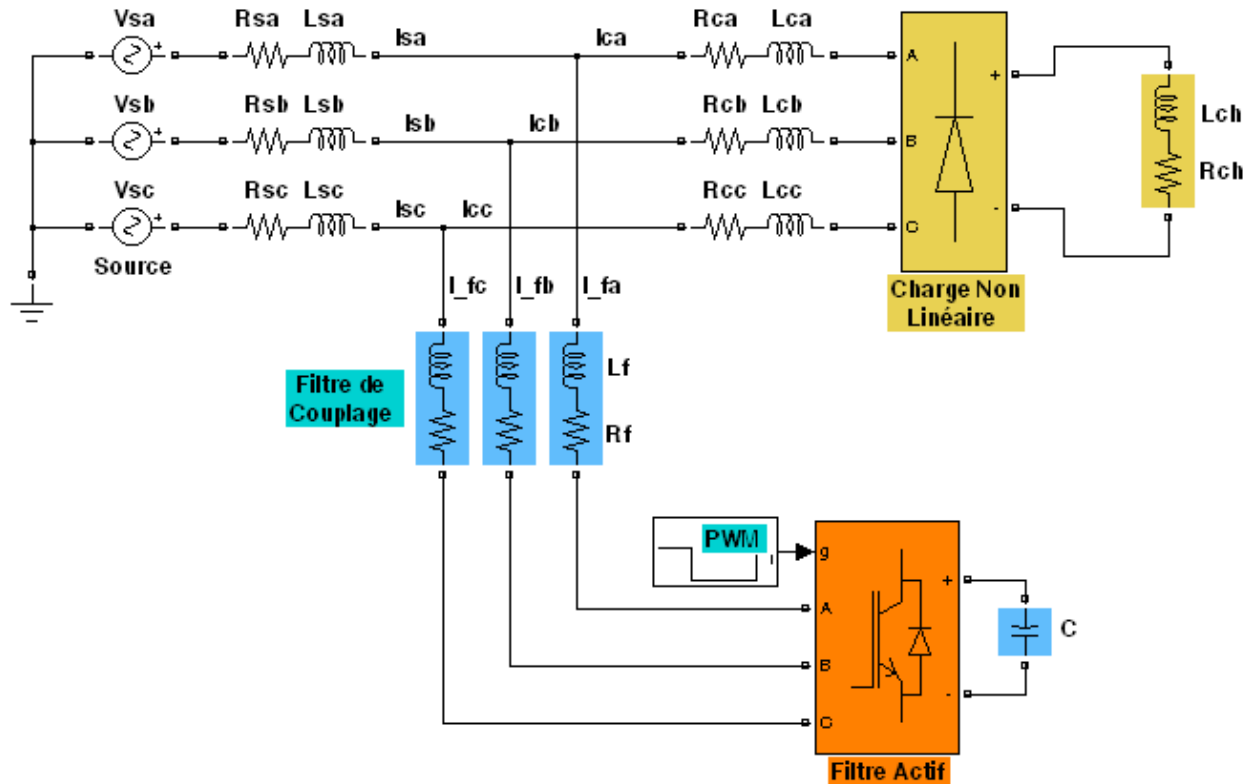


Figure I.6 : Filtre Actif Parallele

I.6.2.1.b. Le filtre actif série(FAS) :

Le filtre actif série est connecté en série sur le réseau (figure I.7). 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 oeuvre : elle ne permet pas, par exemple, de compenser les courants harmoniques consommés par la charge [6].

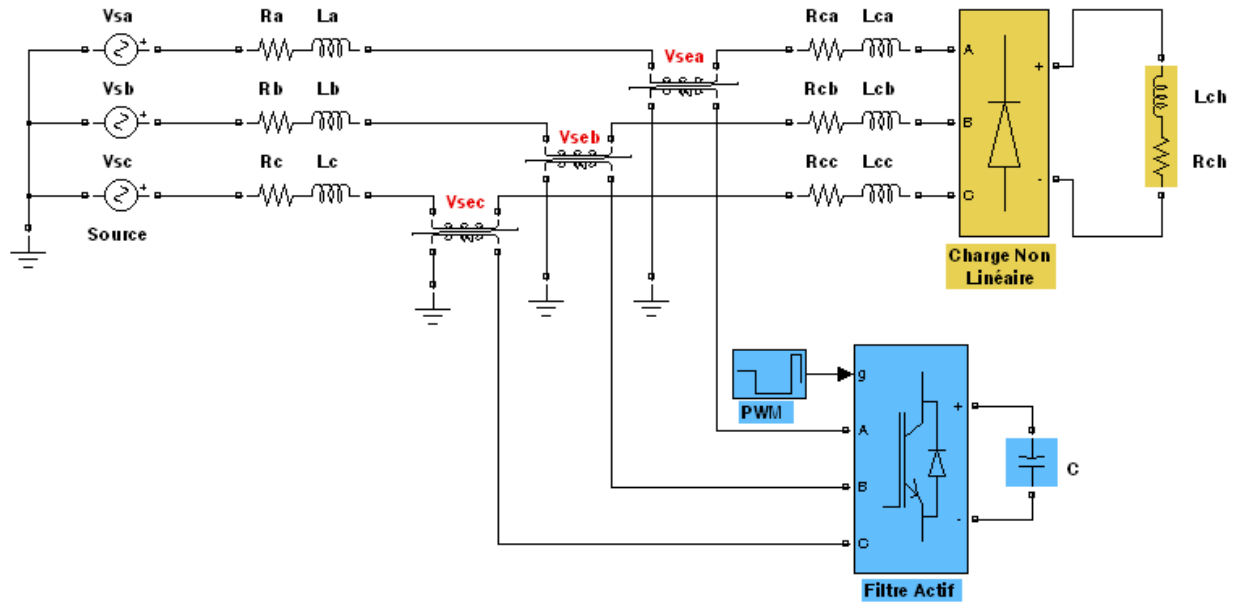


Figure I.7: Filtre Actif Serie

I.6.2.2. La Combinaison parallèle série actif (UPQC):

La figure (I.8) illustre l'association de deux filtres actifs parallèle et série, Cette structure bénéficie des avantages des deux types de filtres actifs série et parallèle. Ainsi, elle permet d'assurer simultanément un courant sinusoïdal et une tension du réseau électrique également sinusoïdale [2].

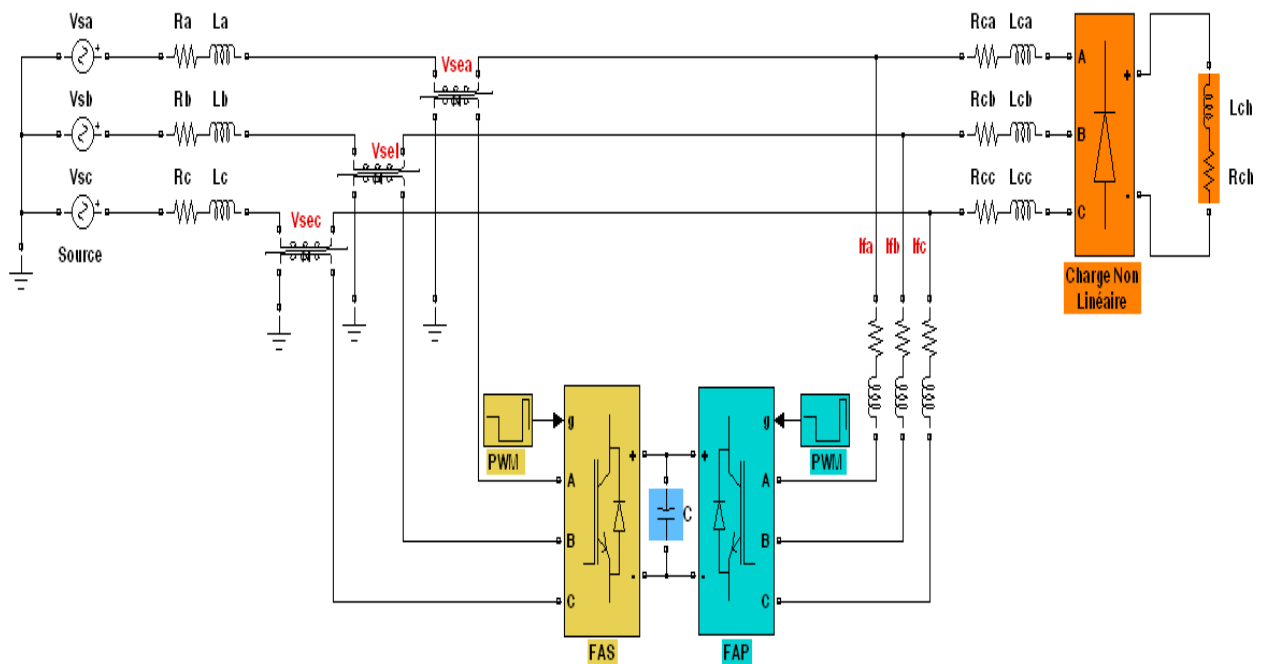


Figure I.8: Filtre actif mixte série-parallèle (UPQC)

Tableau I.6 : Comparaison entre filtrage actif et filtrage passif

Critère de comparaison	Filtre actif	Filtre passif
Action sur les courants Harmoniques	Agit simultanément sur Plusieurs fréquences selon sa Bande passante	Nécessite un pour chaque Harmonique (encombrant)
Interaction entre filtres Voisins	Pas de risque	Risque de destruction de filtres Accordés à des fréquences Voisines (résonance)
Influence d'une variation de fréquence	Aucune conséquence	Efficacité réduite (le filtre est Calculé pour une fréquence Exacte)
Surcharge	Pas de risque	Risque de détérioration lorsque le courant harmonique à compenser dépasse ses capacités
Variation de l'impédance du réseau	Aucune conséquence	Risque d'amplification des harmoniques (déplacement de la fréquence d'antirésonance vers une fréquence harmonique)
Vieillessement	Pas d'influence sur les Performances	Risque de dégradation des Performances (dérive de la fréquence d'accord)
Raccordement	Pas d'étude préalable	Etude au cas par cas
Surveillance de fonctionnement	Réalisée par le système de contrôle commande	Pas de surveillance
Influence d'une augmentation de courant	Aucun risque de surcharge, mais efficacité diminuée	Risque de surcharge et de Détérioration
Rajout d'équipement en aval	Pas de problème (dans la limite de la puissance du filtre)	Nécessite des modifications sur le filtre, dans certains cas
Encombrement	Faible	Important
Poids	Faible	Elevé
Cout	Cout composant plus élevé pas de cout d'étude de dimensionnement	Cout composant plus faible Etude de dimensionnement Obligatoire

I.6.2.3. Filtrage hybride :

Connecté avec ou sans transformateurs au réseau, le filtre actif hybride (Figure. I.9) est constitué d'un filtre passif connecté directement en série avec le filtre actif, ce qui entraîne une diminution de la tension du bus continu comparativement à celle d'un filtre actif pur et une réduction du dimensionnement du filtre hybride. En plus, le filtre passif évite les oscillations dues à la commutation (HF) car il présente une haute impédance à cette fréquence. Cependant, la mise en place d'une inductance à l'entrée de la charge non linéaire est indispensable pour le bon fonctionnement du filtre hybride [11].

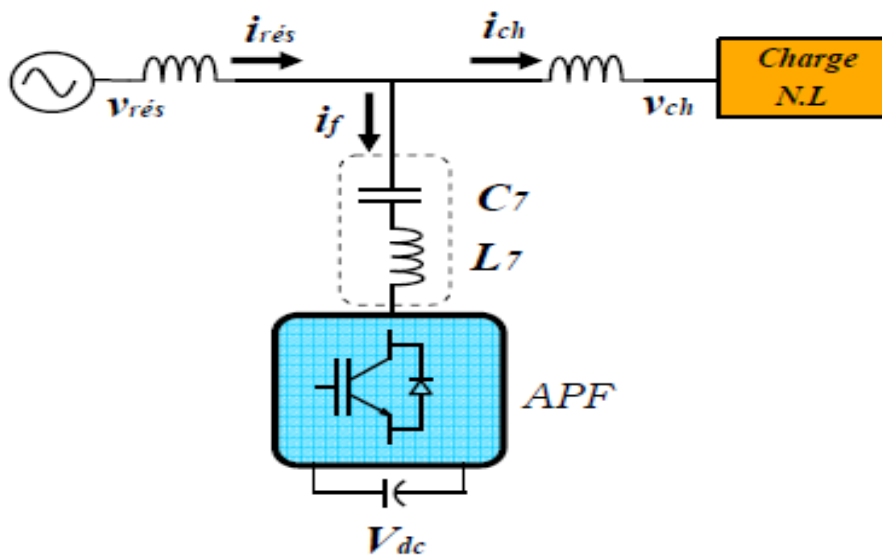


Figure. (I.9): Filtre actif hybride

a) 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 (I-10) .[13]

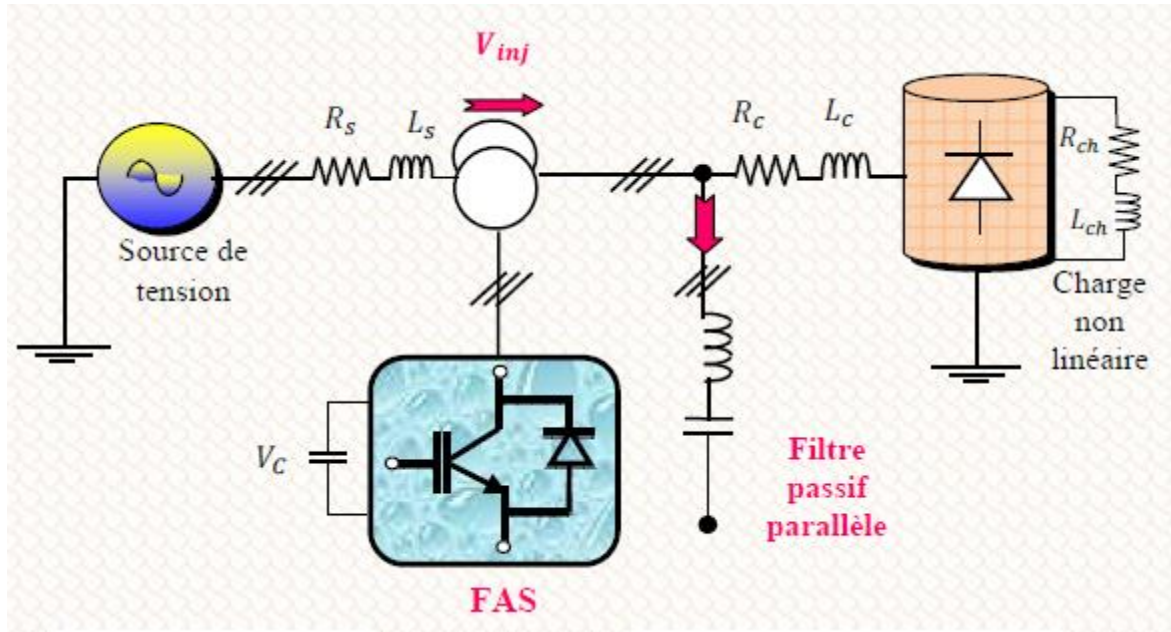


Figure I.10: Filtre actif série et filtre passif parallèle

b. Filtre hybride parallèle :

La figure (I.11) présente la configuration du filtre hybride parallèle contenant deux filtres parallèles actif et passif. Dans cette structure, le filtre passif est accordé aux fréquences des harmoniques fortement présentes sur le réseau. TI absorbe une grande partie des courants harmoniques créés par la charge non linéaire. Le filtre actif injecte le courant de compensation i_c dans la source pour éliminer les harmoniques existant dans le courant i_L . Le filtre actif agit comme une source de courant contrôlée en tension.

Une autre propriété importante de cette configuration est la possibilité de fonctionner en amortissement actif des résonances. Ainsi le filtre parallèle apparaît comme une résistance R_a qui amortit les harmoniques et n'influe pas la composante fondamentale [14].

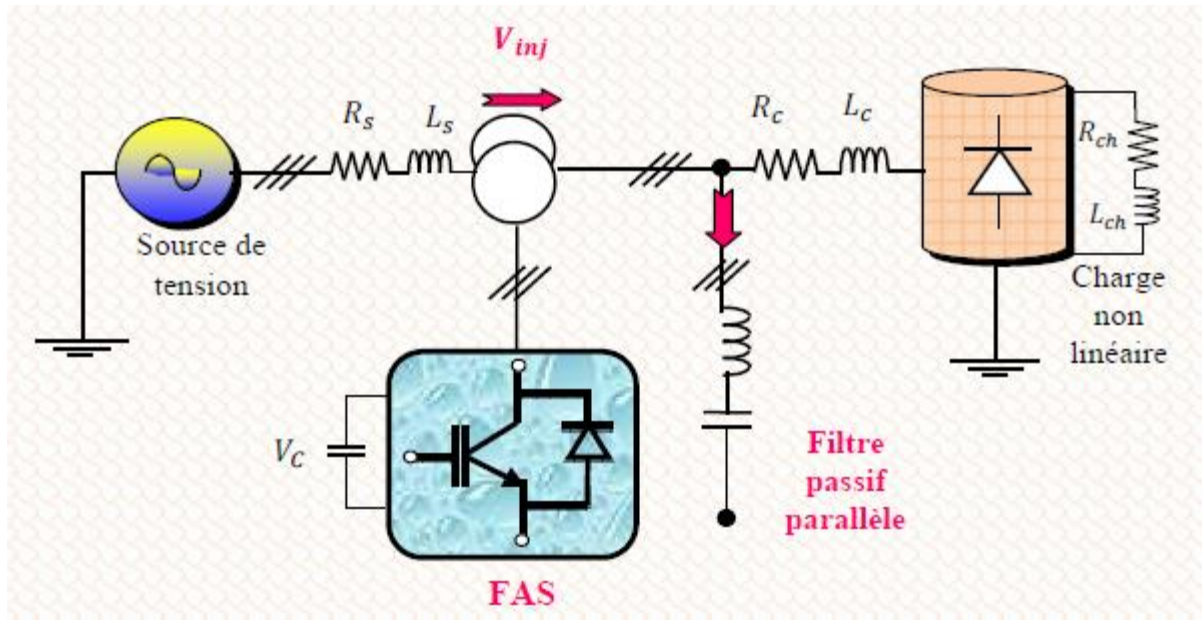


Figure I.11: Schéma de principe d'un filtre hybride parallèle

c.Filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles :

Le principe de fonctionnement de cette configuration, présentée en figure (I.12) est la même que celui-ci de la figure (I.11) 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].

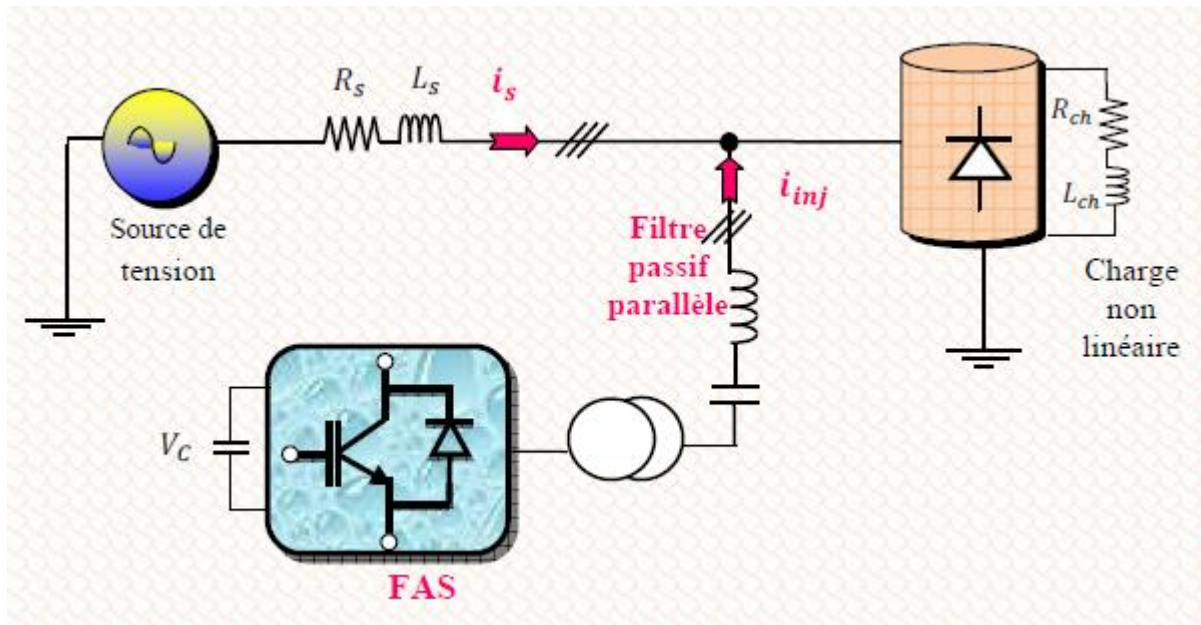


Figure I.12: Filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle

I.7.Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons présenté différents types de perturbations pouvant affecter la tension du réseau électrique, ces perturbations sont les harmoniques, les déséquilibres de courant et de tension, les creux de tension et les surtensions. Ces perturbations ont des effets néfastes sur les équipements électriques pouvant aller des échauffements et de la dégradation du fonctionnement jusqu'à la destruction totale de ces équipements [9].

Pour pallier a ces phenomenes, nous avons presente egalement les solutions traditionnelles et modernes de depollution .La solution traditionnelle a base de filtres passifs est souvent penalisante en termes d'encombrement et de resonance. De plus, les filtres passifs ne peuvent pas s'adapter à l'evolution du reseau et aux charges polluantes. Afin de contourner les problemes que posent les filtres passifs nous avons presentes les nouvelles techniques de filtrage actif introduites depuis plusieurs annees à savoir : les filtres actifs paralleles, series et leur combinaison et le filtre actif modulaire. [10]

La solution classique à base de filtres passifs est souvent pénalisée en termes d'encombrement et de résonance, de plus elles ne peuvent pas s'adapter à l'évolution du réseau et aux charges polluantes. Contrairement, les filtres actifs ont un objet de s'adapter et dépolluer le réseau de tous types de perturbations [8].



CHAPITRE II

Structure et principe de fonctionnement du filtre actif parallèle

II.1.Introduction:

La prolifération de perturbations électriques est due à un nombre croissant de charges non linéaires présentes dans les lignes électriques. Tous ces appareils possèdent la particularité d'absorber des courants non sinusoïdaux et donc d'introduire dans les lignes électriques des pollutions harmoniques en courant.

Les filtres actifs parallèles se sont révélés être des techniques efficaces pour la compensation des composantes harmoniques. Dans ce chapitre nous allons étudier le filtre actif parallèle. Sa structure a été divisée en deux parties, la partie puissance et la partie commande.

La partie puissance, à savoir l'onduleur triphasé à structure tension, l'élément de stockage d'énergie et le filtre de sortie. Dans la partie commande, on a l'identification des courants perturbateurs, la régulation du courant injecté par l'onduleur et la régulation de la tension continue [2].

II.2.Principe de 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 alternatifs au niveau du réseau. Il permet donc de supprimer au point de raccordement tous les harmoniques de courants de charge non linéaire. En générale, 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 les performances appréciables. Sa structure est la suivante [16] :

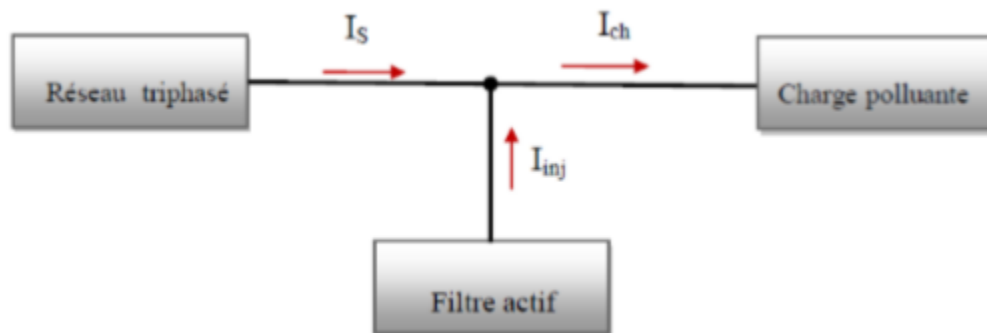


Figure (II.1) : Principe de filtre actif parallèle

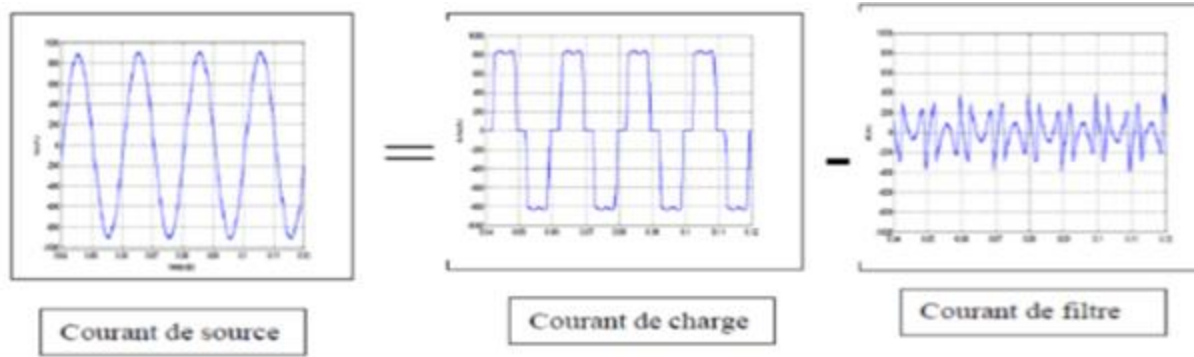


Figure (II.2) : Courant de source, charge et filtre

II.3. Structure générale du filtre actif parallèle :

Les filtres actifs sont constitués de deux parties distinctes: une partie puissance, une partie commande (figure II.3). La première se compose d'un onduleur, d'un filtre de couplage au réseau et d'une source d'énergie. Ces deux derniers déterminent la nature du filtre actif. Il peut être à structure tension ou courant suivant qu'il est réalisé à l'aide d'un onduleur de tension ou de courant.

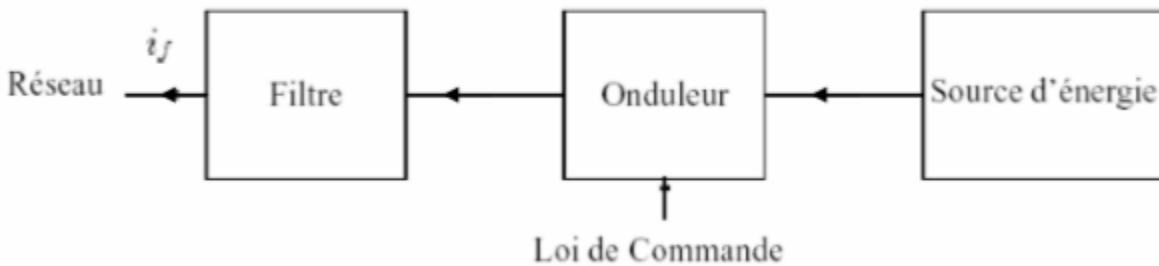


Figure (II.3): Structure générale du filtre actif parallèle

II.3.1. La partie puissance est constituée:

- d'un onduleur à base d'interrupteurs de puissance, commandables à l'ouverture et à la fermeture (GTO, IGBT, MOSFET, etc....) avec des diodes en antiparallèle.
- d'un circuit de stockage d'énergie.
- d'un filtre de sortie.

II.3.2. La partie commande est constituée:

- de la méthode d'identification des courants perturbés.
- de la régulation de la tension continue appliquée aux éléments de stockage d'énergie.
- de la régulation du courant injecté sur le réseau à partir de l'onduleur de tension.
- de la commande de l'onduleur de tension. [19]

II.3.3. Modélisation de l'onduleur triphasé à deux niveaux :

L'onduleur triphasé à deux niveaux, se compose de trois bras et une source de tension continue. Chaque bras est formé de deux interrupteurs en série. Chaque interrupteur comporte un transistor et une diode. (La figure II.4) donne une représentation schématique de cet onduleur.

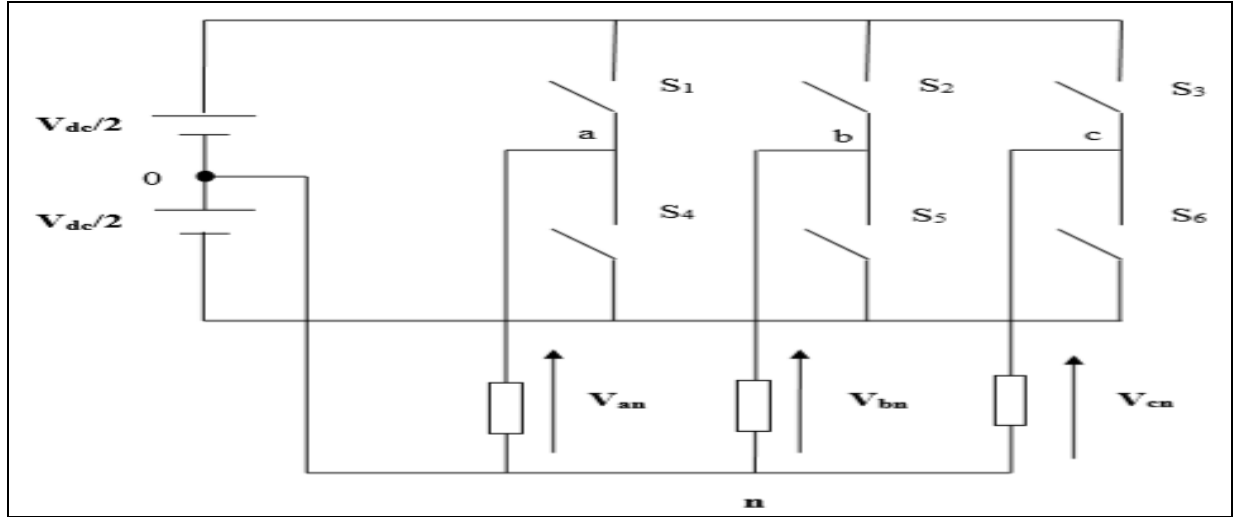


Figure II.4 : Modèle équivalent de l'onduleur à deux niveaux.

Pour exprimer les tensions de sortie de l'onduleur en fonction de la tension dans l'étage continu et de l'état des commutateurs, ces états doivent d'être définis pour les trois bras :

*Tension entre a, b, c et 0 (neutre) :

➤ Bras 1 :

$$V_{a0} = V_a - V_0 \begin{cases} +\frac{v_{dc}}{2} & \text{si } S_1 \text{ est fermé} \\ -\frac{v_{dc}}{2} & \text{si } S_4 \text{ est fermé} \end{cases} \quad (\text{II-1})$$

➤ Bras 2:

$$V_{b0} = V_b - V_0 \begin{cases} +\frac{v_{dc}}{2} & \text{si } S_2 \text{ est fermé} \\ -\frac{v_{dc}}{2} & \text{si } S_5 \text{ est fermé} \end{cases} \quad (\text{II-2})$$

➤ Bras 3:

$$V_{c0} = V_c - V_0 \begin{cases} +\frac{v_{dc}}{2} & \text{si } S_3 \text{ est fermé} \\ -\frac{v_{dc}}{2} & \text{si } S_6 \text{ est fermé} \end{cases} \quad (\text{II-3})$$

- Les tensions simples V_{an} , V_{bn} et V_{cn} : Si la charge est équilibrée et couplée en étoile : la somme des courants de ligne est nulle, ce qui implique que la somme des tensions simples est égale à zéro, donc: $V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0$. A partir des relations précédentes, on tire :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3}[2(v_a - v_0) - (v_b - v_0) - (v_c - v_0)] \\ V_{bn} = \frac{1}{3}[2(v_b - v_0) - (v_a - v_0) - (v_c - v_0)] \\ V_{cn} = \frac{1}{3}[2(v_c - v_0) - (v_a - v_0) - (v_b - v_0)] \end{cases} \quad (II-4)$$

- Tension composée V_{ab} , V_{bc} et V_{ca} : De ces tensions simples, on déduit les tensions composées entre les bornes de sortie de l'onduleur, tel que [17]:

$$\begin{cases} V_{ab} = (v_{an} - v_{bn}) \\ V_{bc} = (v_{bn} - v_{cn}) \\ V_{ca} = (v_{cn} - v_{an}) \end{cases} \quad (II-5)$$

De ces équations on tire :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3}(v_{ab} - v_{ca}) = \frac{1}{3}[2v_{ao} - v_{bo} - v_{co}] \\ V_{bn} = \frac{1}{3}(v_{bc} - v_{ab}) = \frac{1}{3}[2v_{bo} - v_{ao} - v_{co}] \\ V_{cn} = \frac{1}{3}(v_{ca} - v_{bc}) = \frac{1}{3}[2v_{co} - v_{ao} - v_{bo}] \end{cases} \quad (II-6)$$

On définit les fonctions logiques de connexion par S_{ij} tel que :

$$V_{ij} = (1 - S_{ij}) \cdot V_{dc}$$

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{dc}(S1 - S2) \\ V_{bc} = V_{dc}(S2 - S3) \\ V_{ca} = V_{dc}(S3 - S1) \end{cases} \quad (II-7)$$

Ainsi l'onduleur a comme modèle mathématique l'équation suivante :

$$\begin{cases} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{cases} = \frac{v_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S1 \\ S2 \\ S3 \end{bmatrix} \quad (II-8)$$

II.3.4. Etude de la partie puissance :

Le schéma du circuit de puissance d'un filtre actif parallèle à structure tension est donné sur la figure. On y distingue trois éléments :

- un onduleur de tension.
- un filtre de découplage.
- un élément de stockage capacitif. [4]

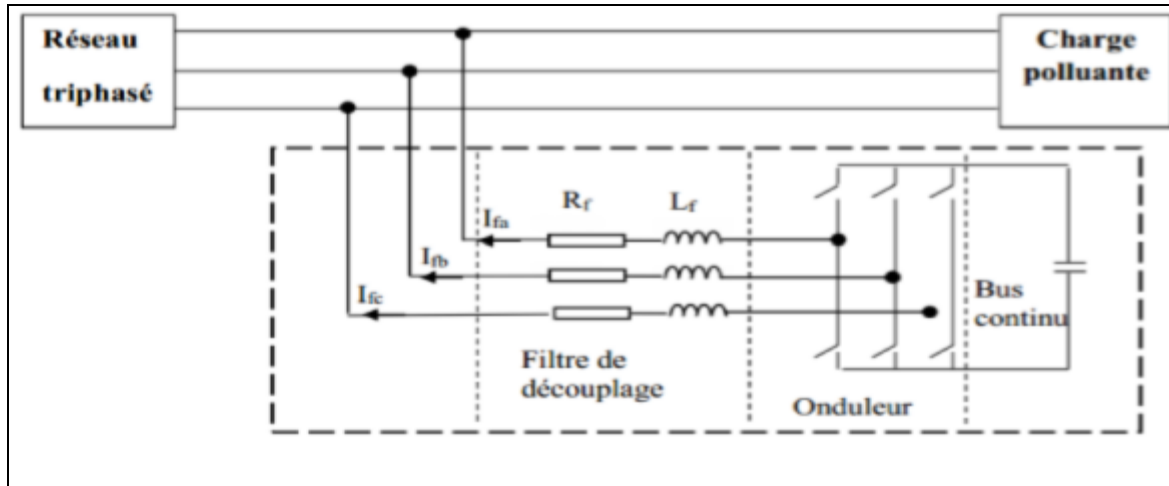


Figure II.5 : schéma du circuit de puissance d'un filtre actif parallèle à structure tension.

II.3.4.1 Onduleur d'un filtre actif parallèle

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continue - alternative. Deux structures de l'onduleur sont envisagées.

II.3.4.2. Structures de l'onduleur

Il existe la structure tension et la structure courant. Dans la structure tension l'onduleur connecte en parallèle au réseau est illustre (Cas monophasé) par (la figure II.6). La capacité C_{dc} joue le rôle d'une source de tension continue.

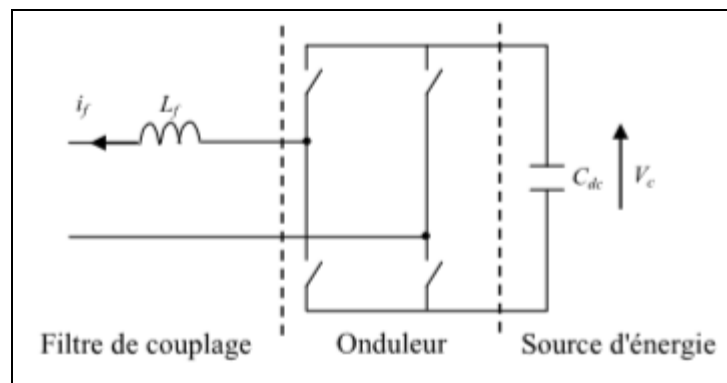


Figure II.6 : Onduleur monophasé de tension.

L'onduleur de tension est relié au réseau par l'intermédiaire d'un filtre du premier ordre constitué d'une inductance L_f .

Dans la structure courant l'inductance joue le rôle d'une source de courant continu. Le courant i_f 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 . Ainsi le courant i_f du filtre actif est égal au courant délivré par l'onduleur filtre par le filtre LC dont la fréquence propre $1/2\pi\sqrt{L_f C_f}$. La bande passante du filtre actif est donc essentiellement imposée par le choix de L_f et de C_f . Ceux-ci peuvent être dimensionnés de manière à atténuer la fréquence de commutation des interrupteurs de l'onduleur.

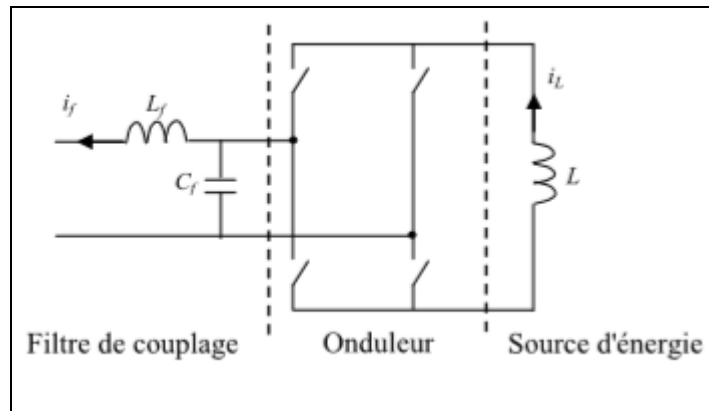


Figure II.7 : Onduleur monophasé de courant.

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.

II.3.4.3. Comparaison des deux structures

- Dimensionnement des circuits de stockage : Pour les faibles puissances, le stockage de l'énergie dans un condensateur (structure tension) est plus efficace et moins coûteux. En revanche, pour les fortes puissances une inductance (structure courant) est plus adaptée.
- Protection contre les surtensions et surintensités : Les interrupteurs constituant un onduleur de tension doivent être protégés contre les surintensités tandis qu'un onduleur de courant nécessite une protection contre les surtensions. Cette dernière est plus complexe à réaliser technologiquement.

Ainsi, pour des installations de faible ou de moyenne puissance, la structure tension semble mieux adaptée et plus simple à réaliser. Par conséquent, cette structure sera retenue par la suite.

Dans le cas du filtrage actif, l'onduleur de tension est raccorde entre deux types de sources : source de courant coté alternatif et source de tension coté continu. La présence de ces deux types de sources impose les conditions suivantes :

- seul interrupteur d'un bras doit conduire pour éviter des courts-circuits de la source de tension.
- le courant de ligne doit toujours trouver un chemin libre d'où la mise en antiparallèle des diodes avec les interrupteurs pour éviter l'ouverture du circuit de la source de courant.

Dans ce qui suit on présente quatre topologies de l'onduleur qui peuvent être utilisées dans d'un filtre à quatre fils. [23]

II.3.4.4. Système de stockage d'énergie :

Le stockage de l'énergie du côté continu se fait souvent par un système de stockage capacitif représenté par un condensateur C_{dc} qui joue le rôle d'une source de tension continue V_{dc} . Le choix des paramètres du système de stockage (V_{dc} et C_{dc}) se répercute sur la dynamique et sur 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.

Le condensateur du côté continu a deux fonctionnalités principales :

- maintenir la tension avec un faible taux d'ondulation en régime permanent,
- être un réservoir qui sert à fournir la différence d'énergie de la charge et la source durant le régime transitoire.

En régime permanent, la puissance active fournie par la source doit être égale à la puissance active absorbée par la charge plus une faible puissance active qui sert à compenser les pertes dans le filtre. La tension du côté continu peut être maintenue à une valeur de référence désirée.

Néanmoins, quand les conditions de charge changent, la puissance transite entre la source et la charge est perturbée et la différence d'énergie est compensée par le condensateur du côté continu ce qui éloigne cette tension de sa référence. Pour satisfaire les fonctionnalités du filtre actif, la valeur maximale du courant de référence doit être ajustée proportionnellement à l'énergie fournie par la source. Si la tension aux bornes du condensateur a été régulée et a atteint sa

tension de référence, l'énergie fournie par la source est supposée être égale à l'énergie consommée par la charge.

La valeur maximale du courant de référence est obtenue par régulation de la tension cotée continue. [24]

II.3.5. Etude de la partie commande:

II.3.5.1 Les méthodes d'identification des courants perturbés

La charge polluante absorbe un courant constitué d'une composante fondamentale et de composantes harmoniques. Le but du filtrage actif est la génération de courants harmoniques de même amplitude mais en opposition de phase avec ceux absorbés par la charge. Ainsi, le courant absorbé au réseau sera sinusoïdal. Il est donc nécessaire d'identifier avec précision les courants harmoniques de la charge polluante. L'identification sert à générer des références nécessaires à la compensation. Le choix de la méthode utilisée pour isoler la composante harmonique du courant de charge est un facteur déterminant quant aux performances obtenues par le filtre actif (précision, dynamique, . . .). Dans la littérature, on trouve plusieurs méthodes qui décrivent différents algorithmes d'identification possibles.

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. 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.

On distingue des méthodes d'extraction globale (tous les harmoniques à compenser sont présents dans la référence) et sélective (les harmoniques à compenser sont choisis et limités). Le choix de la méthode dépendra des objectifs fixés : compensation de tous les courants harmoniques, compensation sélective de certaines harmoniques, compensation des harmoniques dans des cas de configurations défavorables susceptibles de survenir dans les réseaux triphasés

industriels, car la tension du réseau est souvent perturbée ou déformée. Pour générer les courants de référence servant à la commande du filtre actif. [2]

II.3.5.2. La méthode de puissances instantanées :

Cette méthode exploite la transformation des paramètres du système dans le repère triphasé abc en biphasé dans le repère stationnaire, 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_s) et aux courants absorbés par les charges polluantes (I_s). La transformation α - β -0 triphasée permet d'écrire la relation des tensions suivante.

$$\begin{bmatrix} v_o \\ v_a \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II-9})$$

Et la relation des courants ci-dessous:

$$\begin{bmatrix} I_o \\ I_a \\ I_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a1} \\ I_{b2} \\ I_{c3} \end{bmatrix} \quad (\text{II-10})$$

Les composantes avec l'indice (0) représentent les séquences homopolaires du système triphasé du courant et de tension.

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

$$\begin{cases} P(t) = v_{a1}I_{a1} + v_{a2}I_{a2} + v_{c3}I_{c3} = P(t) + P_0(t) \\ P(t) = v_a I_a + v_\beta I_\beta \\ P_0(t) = v_0 I_0 \end{cases} \quad (\text{II-11})$$

$P(t)$: la puissance réelle instantanée.

$P_0(t)$: la puissance homopolaire instantanée

L'avantage de la transformation α - β -0 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 suivant :

$$q(t) = \frac{1}{\sqrt{3}} [(v_{a1} - v_{b2})I_c + (v_{b2} - v_{c3})I_a + (v_{c3} - v_{a1})I_b] = v_a I_\beta - v_\beta I_a \quad (\text{II-12})$$

La puissance q a une signification plus large- que la puissance réactive habituelle. En effet, contrairement à la puissance réactive, qui ne considère que la fréquence fondamentale, la puissance imaginaire prend en compte toutes les composantes harmoniques de courant et de tension. C'est pourquoi on lui donne une autre dénomination (puissance imaginaire) avec comme unité le volt-ampère imaginaire (VAI).

A partir des relations, nous pouvons établir la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{II-13})$$

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

$$\begin{cases} p = \bar{p} + \tilde{p} \\ q = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad (\text{II-14})$$

- $\bar{P}$ Une puissance continue liée à la composante fondamentale active du courant et de la tension.
- $\bar{q}$ Une puissance continue liée à la composante fondamentale réactive du courant et de la tension.
- $\tilde{p}$ et $\tilde{q}$ des puissances alternatives liées à la somme des composantes perturbatrices du courant et de tension. [4]

II.3.5.3. Calcul des courants perturbateurs :

En inversant la relation (II.12), nous pouvons recalculer les courants dans le repère comme le montre l'équation (II-15) :

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{V_{s\beta} + V_{s\alpha}} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (\text{II-15})$$

En considérant les équations (II. 14) et (II.15), nous pouvons séparer le courant dans le repère

(α, β) en trois composantes, active et réactive à la fréquence fondamentale et les harmoniques.

Ceci conduit à:

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{p} \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{q} \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (\text{II-16})$$

Avec:

$$\Delta = V_{s\alpha}^2 + V_{s\beta}^2 \quad (\text{II.17})$$

Supposé constant dans l'hypothèse d'une tension sinusoïdale équilibrée du réseau électrique. Cette expression montre donc que l'identification des différentes composantes du courant dans le repère (α, β) revient à séparer des termes continus des puissances réelle et imaginaire instantanées. Les courants perturbateurs triphasés qui représentent les courants identifiés, dits courants de référence (I_{href}), qui sont à injecter en opposition de phase sur le réseau électrique pour éliminer les harmoniques, sont calculés à partir de la transformation (α, β) inverse donnée par la relation (II-18) :

$$\begin{bmatrix} I_{href1} \\ I_{href2} \\ I_{href3} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{h\alpha} \\ I_{h\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{II}_18)$$

Avec : courants perturbateurs calculés dans le repère (α, β) à partir des courants réactifs et harmoniques de la relation (II-16).

II.3.5.4 Système a PLL:

La technique PLL est la plus utilisée pour l'extraction de la composante directe de la tension du réseau. C'est un système asservi comprenant un régulateur (PID, RST, RSTamélioré, ...) pour la détection de la pulsation directe de la tension et utilisant une transformation pour passer dans le repère de Park, La forme de base de la PLL est présentée sur la figure II.4, contenant un détecteur de phase (PD), un filtre de la boucle (LF) et un oscillateur de tension contrôlée (VCO).

Plusieurs techniques de PLL ont été développées, la figure II.5 représente le synoptique détaillé de la PLL classique utilisée. Cette méthode détecte les paramètres de la composante fondamentale (θ, V_m) des tensions de sources données par l'équation (II.9) où ω est la pulsation du terme fondamental de la tension V_m et sa valeur efficace.

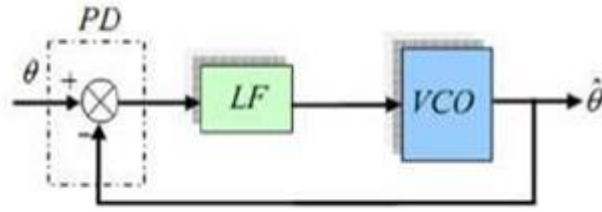


Figure II . 4: Synoptique de la P.L.L classique.

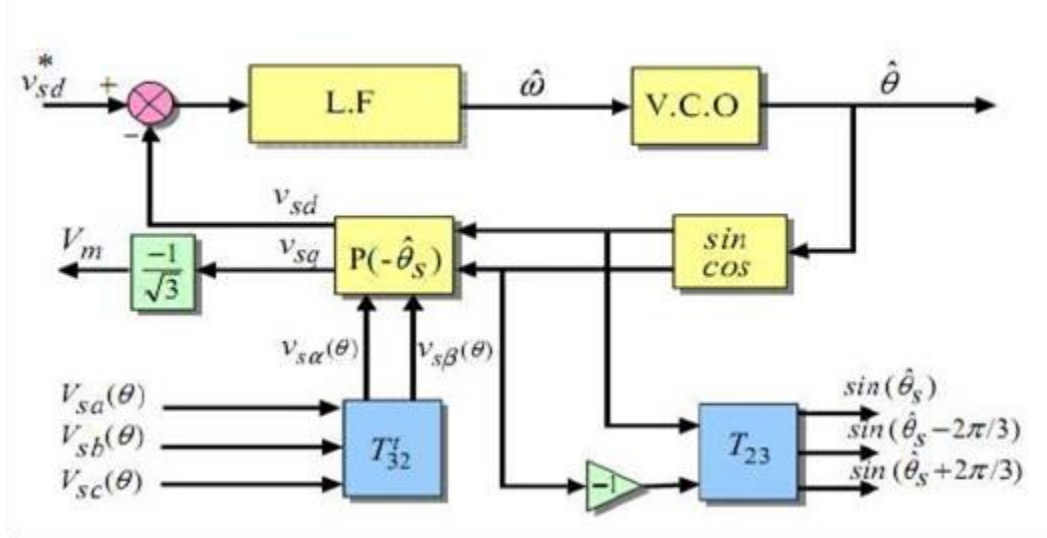


Figure II . 5: Synoptique détaillée de la P.L.L classique

$$\begin{bmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \sqrt{2} V_m \begin{bmatrix} \sin \theta \\ \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}, \text{ avec } \theta = \omega t \quad (\text{II-19})$$

$$\begin{bmatrix} V_{\alpha}(\theta) \\ V_{\beta}(\theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{3} \\ -\sqrt{3} \end{bmatrix} V_m \cdot \begin{bmatrix} \sin(\theta) \\ \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II-20})$$

Ces grandeurs peuvent être obtenues dans le référentiel tournant synchrone en appliquant la transformation de Park suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta^{\wedge}) & \sin(\theta^{\wedge}) \\ -\sin(\theta^{\wedge}) & \cos(\theta^{\wedge}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{\alpha} \\ V_{\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

D'où on obtient :

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} = \sqrt{3}V_m \begin{bmatrix} \sin(\theta - \theta^{\wedge}) \\ \cos(\theta - \theta^{\wedge}) \end{bmatrix} \quad (\text{II.22})$$

La PLL Sera verrouillée lorsque l'angle estime $\theta^{\wedge}$ sera égal a θ .Dans ce cas : $V_{sd} = 0$, et la fonction de transfert trouvée peut s'identifier avec le système général du deuxième ordre donné

Par :

$$F(S) = \frac{2.\varepsilon.w_n s + w_n^2}{s^2 + 2.\varepsilon.w_n s + w_n^2} \quad (\text{II-23})$$

Les paramètres du LF s'expriment comme suit :

$$K_p = \frac{2.\varepsilon.w_n}{\sqrt{3}V_m} \quad \text{et} \quad \tau_i = \frac{2.\tau}{w_n} \quad (\text{II-24})$$

II.3.5.5. Commande de l'onduleur :

Les performances du filtre actif et notamment la diminution du THD du courant de source sont certes liées aux performances de la génération des références de courants harmoniques, mais dépendent également de la stratégie de commande de l'onduleur de tension (poursuite des références de courant). Pour maintenir le courant à la sortie du filtre actif autour de sa référence, deux techniques de commande peuvent être utilisées :

- La commande par hystérésis.
- La commande par Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI). [2]

II.3.5.5.1 Commande par hystérésis :

La commande conventionnelle par hystérésis est très couramment utilisée de par sa simplicité d'utilisation et sa robustesse. En fait, cette stratégie assure un contrôle satisfaisant du courant sans exiger une connaissance poussée du modèle du système à contrôler ou de ses paramètres. La figure expose son principe qui consiste à établir dans un premier temps le signal d'erreur, différence entre le courant de référence i_{ref} et le courant produit par l'onduleur i_f . Cette erreur est ensuite comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis afin de fixer les ordres de commande des interrupteurs. Cette commande présente cependant un inconvénient majeur : elle ne permet pas de contrôler la fréquence de commutation des semi-conducteurs, d'où la présence d'un nombre important d'harmoniques dans les courants générés.

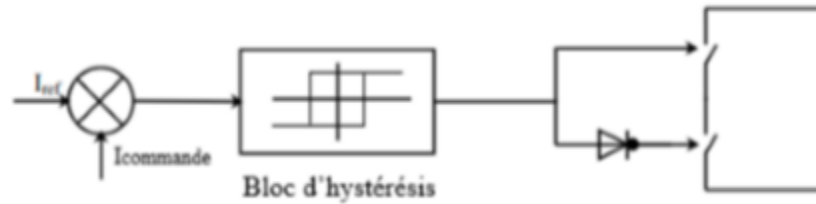


Figure (II.8) : Commande des interrupteurs par hystérésis.

II.3.5.5.2 Commande par MLI sinusoïdale :

La technique de commande par Modulation de Largeur d'impulsion (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. 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 tension est ensuite comparée avec un signal en dent de scie (porteuse à fréquence élevée fixant la fréquence de commutation). La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs.

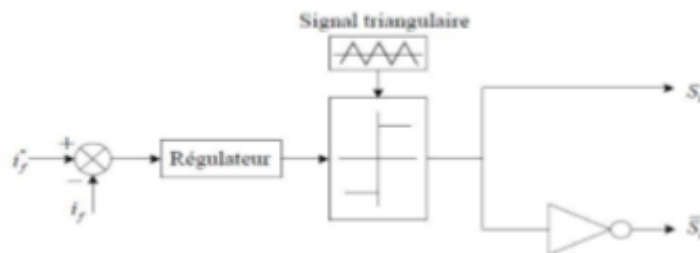


Figure (II.9) : Principe de commande du courant par MLI

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

II.3.5.5.3 Commande par MLI vectorielle :

La méthode MLI vectorielle est largement utilisée dans la commande des onduleurs, elle peut augmenter la valeur maximale de la tension de sortie de l'onduleur avec un taux de distorsion harmonique réduit par rapport à ceux obtenus par la méthode MLI sinusoïdale. Il y a plusieurs algorithmes utilisant la MLI vectorielle pour commander l'onduleur ou le redresseur.

Le but de toutes les stratégies de modulation est de réduire les pertes de commutation et les harmoniques, et d'assurer une commande précise [3].

II.3.5.6 Régulation de la tension continue :

La tension moyenne V_{dc} aux bornes du condensateur doit être maintenue à une valeur fixe. La principale cause susceptible de la modifier sont les pertes dans le filtre actif (interrupteurs et filtre de sortie). La régulation de la tension moyenne aux bornes du condensateur de stockage d'énergie doit se faire par l'adjonction des courants fondamentaux actifs dans les courants de référence. La sortie du régulateur P_c s'ajoute, à un signe près, à la puissance active perturbatrice P et donne lieu à un courant fondamental actif corrigeant ainsi V_{dc} . La puissance P_c représente la puissance active nécessaire pour maintenir la tension V_{dc} égale à la valeur de la tension de référence souhaitée (V_{dc-ref}) .

Le régulateur employé ici est un régulateur proportionnel simple (K_c) avec une action de filtrage au préalable sur la tension mesurée V_{dc} , réalisée par un filtre passe-bas du deuxième ordre de manière à atténuer les fluctuations à 300 Hz.

En négligeant les pertes de commutations dans l'onduleur ainsi que l'énergie stockée dans l'inductance du filtre de sortie, la relation entre la puissance absorbée par le filtre actif et la tension aux bornes du condensateur peut s'écrire sous la forme suivante :

$$p_c = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} C_{dc} \cdot V_{dc}^2 \right) \quad (II-25)$$

Notons que la relation est non linéaire. Pour des faibles valeurs de la tension V_{dc} autour de la référence V_{dc-ref} , elle peut être linéarisée à travers les relations suivantes :

$$\begin{cases} P_c = C_{dc} \cdot V_{dc-ref} \cdot \frac{d}{dt} (V_{dc}) \\ \Rightarrow V_{dc}(S) = \frac{P_c(s)}{V_{dc-ref} \cdot C_{dc} s} \end{cases} \quad (II-26)$$

A partir de la relation et en prenant en compte le régulateur proportionnel (K_c). Le choix du paramètre K_c aura pour objectif d'obtenir un temps de réponse minimal afin de ne pas nuire à la dynamique du filtre actif

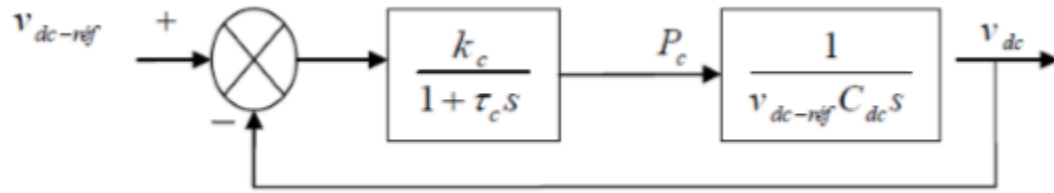
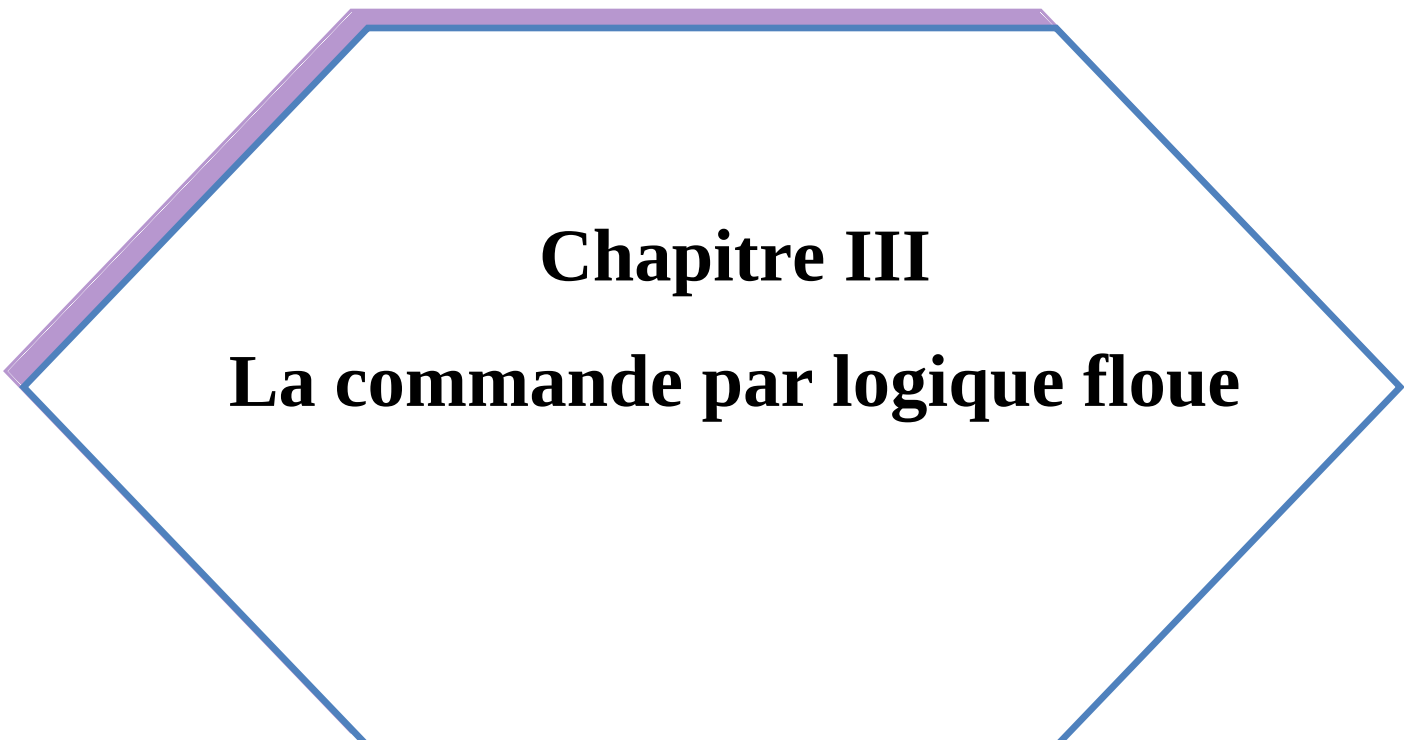


Figure II .10: boucle de régulation de tension continue [2].

II.4.Conclusion :

Nous avons dans ce chapitre commence par faire une présentation du filtre actif de puissance parallèle base sur un onduleur de tension. Nous avons ensuite présente les différentes stratégies de commande pour l'identification des courants de référence. Nous avons présente en détail les éléments constituant les commandes de filtre actif de puissance [2].



Chapitre III

La commande par logique floue

III.1.Introduction

L'incertitude, l'imprécision, sont inhérents à certains types d'informations traitées ou échangées par l'homme avec son environnement. Comme le précisait Zadeh, le raisonnement humain utilise couramment des étiquettes floues, "la température est élevée", " le ciel est gris ",... Ce trait de caractéristique différencie l'intelligence humaine de l'intelligence artificielle. La logique floue sert à représenter des connaissances incertaines et imprécises. La commande floue, quant à elle, sert à prendre une décision même si on ne peut estimer les entrées/sorties qu'à partir de prédicats vagues ou lorsque ces entrées/sorties sont entachées d'erreurs que l'on ne peut évaluer que grossièrement. Les avantages de la commande floue que nous pouvons résumer ainsi :

- Facilité d'implémentation,
- Solution de problèmes multi variables complexes,
- Robustesse vis-à-vis des incertitudes.

III.2. La logique floue :

Est une extension de la logique booléenne créée par Lotfi Zadeh en 1965 en se basant sur sa théorie mathématique des ensembles flous, qui est une généralisation de la théorie des ensembles classiques. En introduisant la notion de degré dans la vérification d'une condition, permettant ainsi à une condition d'être dans un autre état que vrai ou faux, la logique floue confère une flexibilité très appréciable aux raisonnements qui l'utilisent, ce qui rend possible la prise en compte des imprécisions et des incertitudes.

III.3.Historique:

Dans les années trente, exactement en 1937, la logique floue présentée par le philosophe Max Black, mais le concept fut réellement introduit en 1965 par Lotfi Zadeh, un professeur d'électronique à l'université de Berkeley (Californie-USA), jette véritablement les bases théoriques de la logique floue dans son livre " fuzzy set theory". En 1973, le professeur Lotfi Zadeh propose d'appliquer la logique floue aux problèmes de réglage. En 1975, le professeur Mandani réalise le premier contrôleur flou expérimental dont, quatre ans plus tard, on trouve la première application dans un four, puis dans une turbine à vapeur et en 1983 sur un épurateur.

En 1985, premiers produits industriels (Japon) utilisant le principe de la logique floue appliqué à des problèmes de réglage et de commande. Depuis, la grande majorité des travaux sur la logique floue a été menée au Japon où cette théorie est très prisée. Là-bas, il existe de

nombreux ustensiles et appareils électroménagers utilisant cette méthode et même le fameux métro de Sendai en est dépendant. On peut expliquer ce revirement des recherches en Orient par le fait que la pensée occidentale est trop marquée par le cartésianisme qui rend aberrante « la violation du principe du tiers exclus » alors que cette idée est volontiers admise au Japon. En clair, la logique floue n'est surtout pas une logique imprécise mais bien une logique qui s'adapte à l'être humain en laissant une place entre la certitude du vrai et la certitude du faux [32].

III.4.Principe de la logique floue :

III.4.1.Application de la logique floue :

La théorie des sous-ensembles flous a de nombreuses applications en industrie ou autres, là où les outils mathématiques stricts ne subviennent pas aux besoins de robustesse et de prise de décision, elles sont scindées en trois catégories.

- Le raisonnement incertain : utilisé dans la configuration des systèmes qui doit s'adapter à la demande des clients, ou dans des systèmes de diagnostic médical ... etc.
- La robotique : utilisée pour aider à la prise de décision et l'interaction dans un environnement insuffisamment déterminé et interprétation des instructions linguistiques données par un utilisateur
- La commande floue : dans cette application les progrès sont les plus spectaculaires en industrie (lave-linge, caméscope, chauffage ...etc.). On vise l'atteinte des meilleures performances de robustesse en introduisant les bases de connaissances d'un expert à travers des variables linguistiques soumises à certaines règles, une approche souvent appelée commande intelligente qui s'adapte mieux avec le système à réguler ou à contrôler

III.4.2.Limite de la logique booléenne :

Pour illustrer très concrètement le principe fondamental de la logique floue, nous Allons prendre l'exemple de la température de l'air ambiant. Nous souhaitons évaluer la Température extérieure. Fait-il chaud ou froid ? Dans le cadre de la logique booléenne, il Est nécessaire d'introduire un seuil correspondant à la valeur limite de la température Extérieure qui va déterminer s'il fait chaud ou froid (figure III.1)

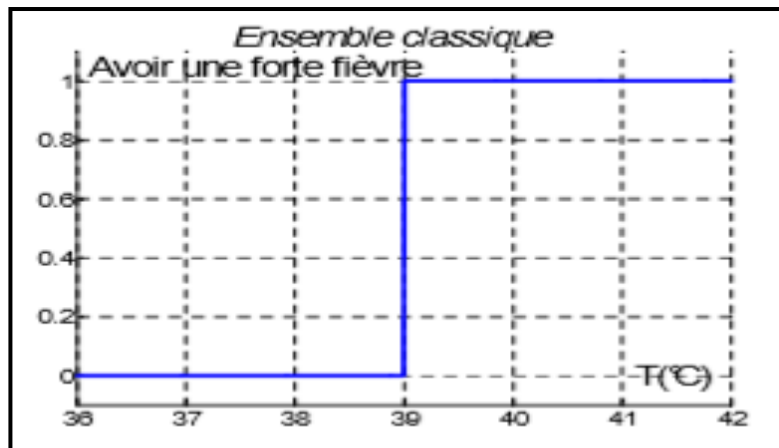


Figure III. 1 : logique Booléenne

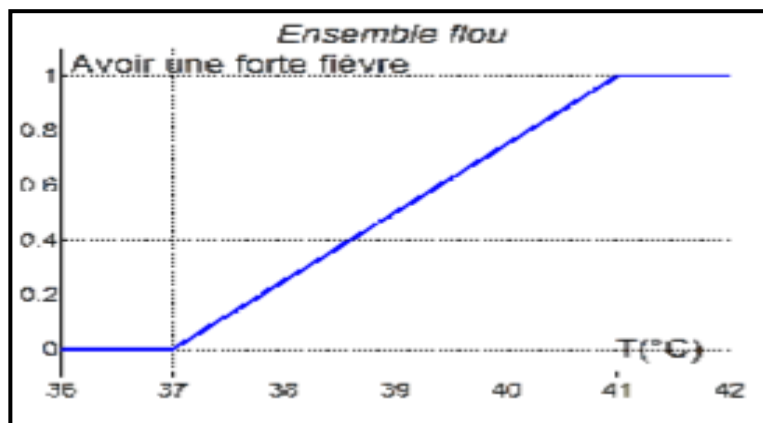


Figure III.2 : logique floue

La logique floue, qui introduit une infinité de valeurs entre vrai et faux, permet de Déterminer un degré d'appartenance à l'un ou l'autre état (figure III.2). La logique floue Comble donc les lacunes de la logique booléenne en introduisant la notion de continuité Entre les états. Par exemple, si nous constatons que la température extérieure est de 22°C , nous pouvons dire qu'il fait plus chaud que froid sans pour autant affirmer qu'il Fait vraiment chaud. [25]

III.4.3. Les concepts principaux de la logique floue :

Le concept de la théorie des sous-ensembles flous, s'appuie sur la notion de degré D'appartenance d'un élément à un sous-ensemble flou. Tandis que les ensembles traditionnels sont caractérisés par une fonction d'appartenance notée (également Appelée fonction caractéristique) définie sur $\{0,1\}$, les sous-ensembles flous sont, eux, Caractérisés par une fonction d'appartenance notée μ définie sur $[0,1]$.

En d'autres termes, dans le langage ensembliste classique, un élément appartient ou n'appartient pas à un ensemble tandis qu'un élément appartient à un sous-ensemble flou avec un certain degré (éventuellement nul). En résumé, pour un sous-ensemble A défini sur un univers de discours U on peut écrire : A Sous-ensemble classique : fonction caractéristique $A : U \rightarrow \{0,1\}$

A Sous-ensemble flou : fonction d'appartenance $\mu_A : U \rightarrow [0,1]$ [A1]

III.4.3.1 Les Fonctions D'appartenance :

Les formes les plus couramment utilisées pour les fonctions d'appartenance sont les formes triangulaires, trapézoïdales ou Gaussiennes

III.4.3.1.1. Fonction d'appartenance trapézoïdale : $\mu(x) = (0, (\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c}))$ (III-1)

Où a, b, c et d sont les coordonnées des apex du trapèze

III.4.3.1.2. Fonction d'appartenance triangulaire : $\mu(x) = (0, (\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{c-x}{c-b}))$ (III-2)

(3.3) Où a, b, c sont les coordonnées des apex du triangle.

III.4.3.1.3. Fonction d'appartenance gaussienne: $\mu(x) = \exp(-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2})$ (III-3)

Où c est le centre de la gaussienne et σ sa largeur (variance).

Les fonctions d'appartenance doivent se chevaucher. Ceci nous permet d'avoir le fait que « un verre peut être partiellement plein et partiellement vide à la fois »

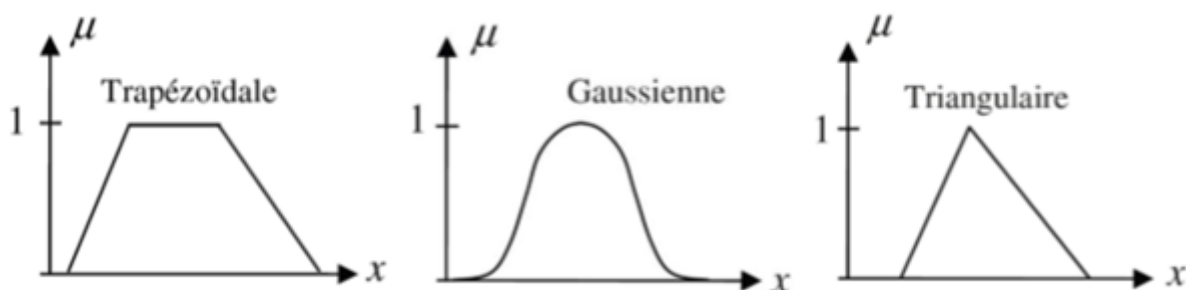


Figure (III.3) : Différentes formes des fonctions d'appartenance [30]

III.4.3.2. Opérateurs de la logique floue :

Supposant deux fonctions d'appartenance $\mu_A(x)$ et $\mu_B(x)$ de deux variables floues x et y caractérisant la température de l'air et la force du vent, l'exemple "l'air est froid et le vent est fort" ou encore "si l'air est froid ou le vent n'est pas faible" il faut fermer la porte. Les compositions ET et OU en plus de la négation apparaissent et doivent être définies. Pour pouvoir décider de fermer la porte ou non il faut que deux conditions soient vérifiées en même temps. Alors, il est important de pouvoir composer entre les divers prédicats et leurs fonctions d'appartenance

III.4.3.2.1.L'opérateur ET :

L'opérateur ET est réalisé dans la plupart des cas par la formation du minimum (intersection) des deux fonctions d'appartenance :

$$\mu_C(z) = \mu_A \text{ et } B(z) = \min (\mu_A(x), \mu_B(y)) \quad (\text{III-4})$$

Cet opérateur est commutatif, associatif, admet 0 comme élément absorbant et 1 comme élément neutre.

III.4.3.2.2.L'opérateur OU

En général, l'opérateur OU est réalisé par la formation du maximum des deux fonctions d'appartenance :

$$\mu_C(z) = \mu_A \text{ ou } B(z) = \max (\mu_A(x), \mu_B(y)) \quad (\text{III-5})$$

Cet opérateur est commutatif, associatif, admet 1 comme élément absorbant et 0 comme élément neutre.

III.4.3.2.3.L'opérateur NON :

Il est caractérisé en logique floue par la fonction :

$$\mu_C(z) = \mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (\text{III-6})$$

Dans certaines circonstances, il est judicieux de choisir d'autres opérateurs en plus de OU, ET et NON.

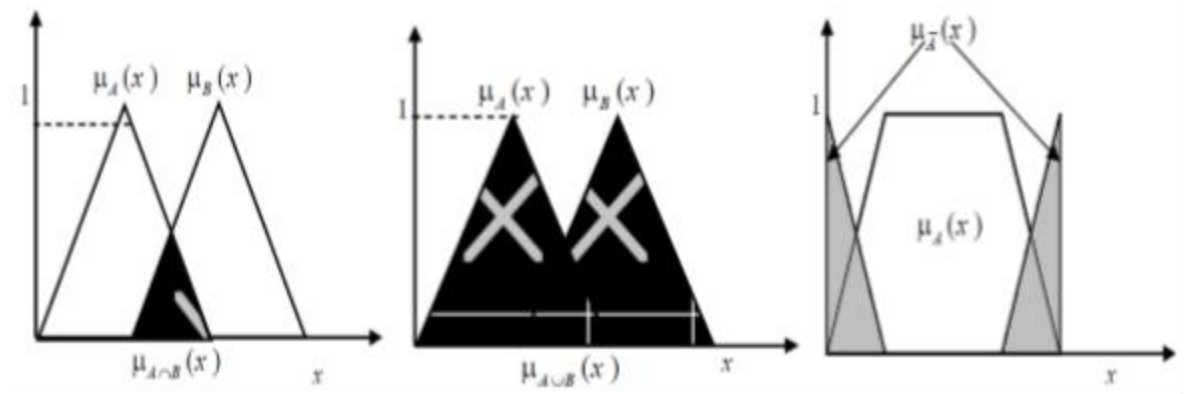


Figure III.4 : L'opérateur ET, OU, NON

[29]

III.4.4.Structure d'un régulateur flou :

Après avoir présenté les concepts de la base les plus utilisés en logique floue, nous examinons la structure d'un régulateur flou. La structure conventionnelle d'une commande floue est présente sur la figure (III.5) Elle est composée de quatre blocs distincts dont les définitions sont données ci dessous.

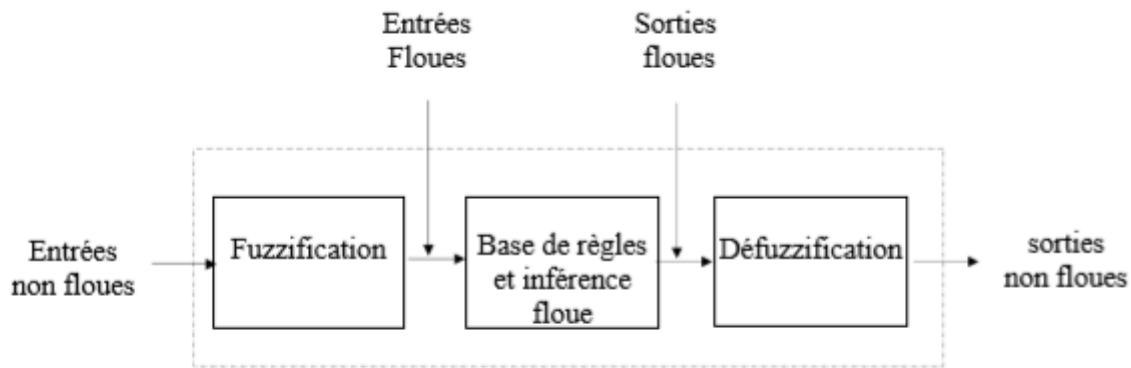


Figure (III .5): Schéma de principe d'un régulateur à logique floue [27]

III.4.4.1.Fuzzification :

A. Opérateur de fuzzification

Cette étape s'occupe de la transformation des valeurs numériques aux entrées en valeurs flc en utilisant les bases de données. Comme le traitement de données dans un RFL est basé sur 1; théorie des ensembles flous, la fuzzification doit être faite a priori. Pour la fuzzification proprement dite, il faut choisir la stratégie de fuzzification et effectuer l'opération de fuzzification qui a pour forme symbolique : $x = \text{fuzzification}(x)$ où x_0 est la valeur numérique de l'entrée et x est un ensemble flou. Cet opérateur calcule le degré d'appartenance à un ensemble flou pour une entrée déterministe (crisp) donnée

B. Définition de fonctions d'appartenance :

La stratégie de fuzzification comprend le choix des fonctions d'appartenance. Suivant les Plages de valeurs, il existe 2 méthodes de définition : numérique pour les valeurs discrètes et Fonctionnelle pour les valeurs continues. Dans notre application avec des systèmes électrotechniques, les fonctions d'appartenance sous forme fonctionnelle sont avantageusement employés. Comme les données sont perturbées par les bruits blancs, les fonctions de singleton ne sont pas habituellement choisies. Pour que les fonctions d'appartenance soient moins sensibles au bruit, elles doivent être suffisamment larges. Tel que mentionné dans le paragraphe les fonctions d'appartenance des formes trapézoïdale, triangulaire et de cloche sont les plus souvent employés. Nous pouvons choisir la forme triangulaire en raison de sa simplicité. L'opérateur de fuzzification, devient donc une indexation linéaire [26].

III.4.4.2.Defuzzification:

Nous utilisons pour la defuzzification la méthode des hauteurs pondérées, cette méthode n'est rien d'autre qu'un cas particulier de la méthode du centre de gravité. Dans ce cas, nous choisissons des fonctions d'appartenance pour la variable de sortie des barres, et nous

aboutissons à une simplification de la détermination de l'abscisse du centre de gravité. On utilise cette méthode pour les deux régulateurs du flux et du couple [28].

III.5.Application à la commande d'un filtre actif :

Souvent, le régulateur flou possède deux entrées (l'erreur et sa dérivée) et une sortie représentant la commande floue elle-même. La régulation floue consiste à transformer le régulateur classique en un régulateur classique-flou avec un processus. La figure (III.6) montre le schéma de principe d'un régulateur flou.

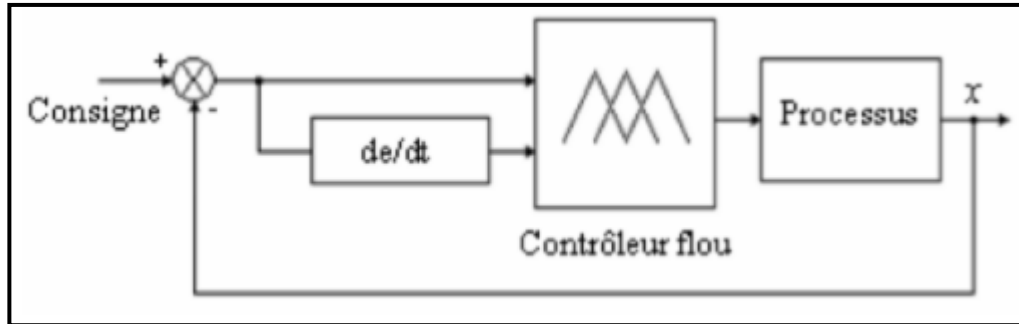


Figure III.6: Schéma de principe d'un régulateur flou.

III.5.1.Partitions floues :

Les deux entrées (e et Δe) sont définies chacune par trois sous-ensembles: Négative 'N', Nulle 'ZE', Positive 'P', les fonctions d'appartenance sont du type Gaussien. La sortie (cde) est définie par cinq sous-ensembles: Grande Négative 'GN', Négative 'N', Nulle 'ZE', Positive 'P', Grande Positive 'GP', les fonctions d'appartenance sont du type triangulaire. Les partitions floues de cette commande sont représentées dans la figure (III.7)

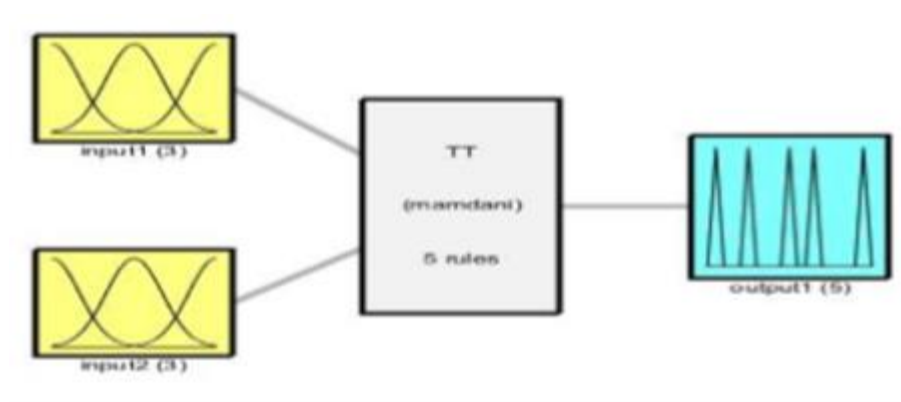


Figure III.7: illustrative de deux entrées et d'un régulateur flou.

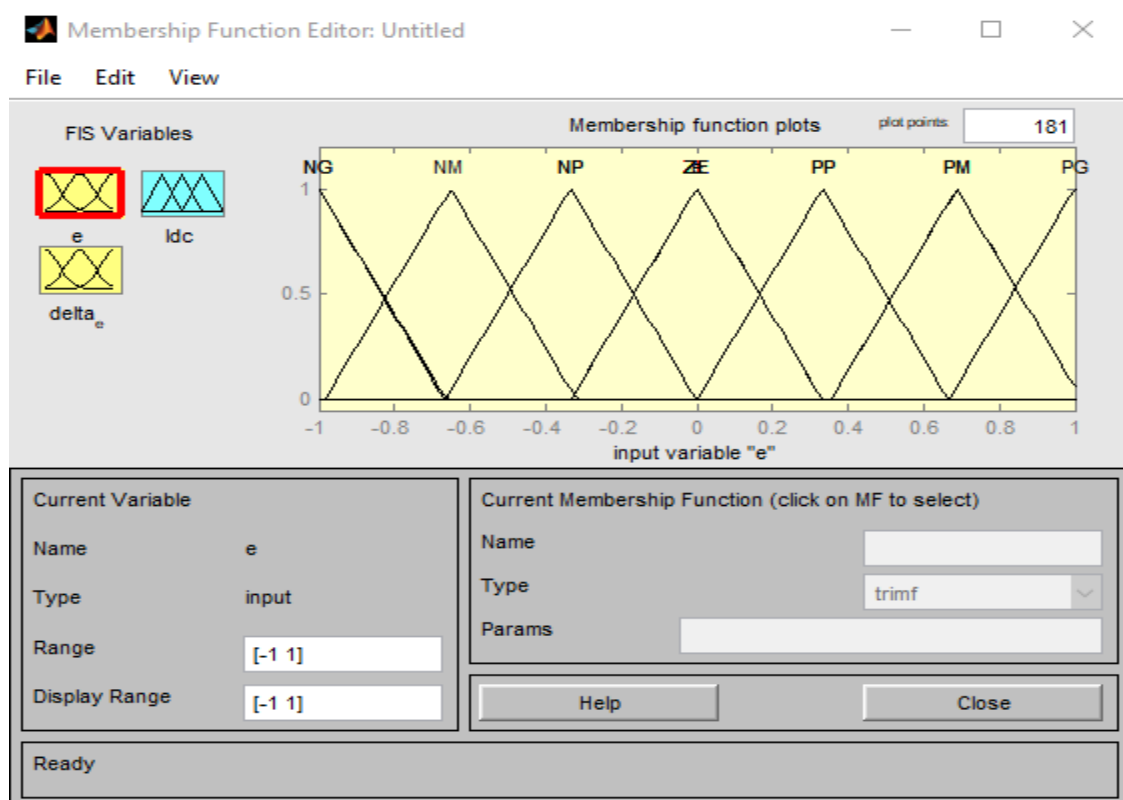


Figure III.8: Partition floue de e.

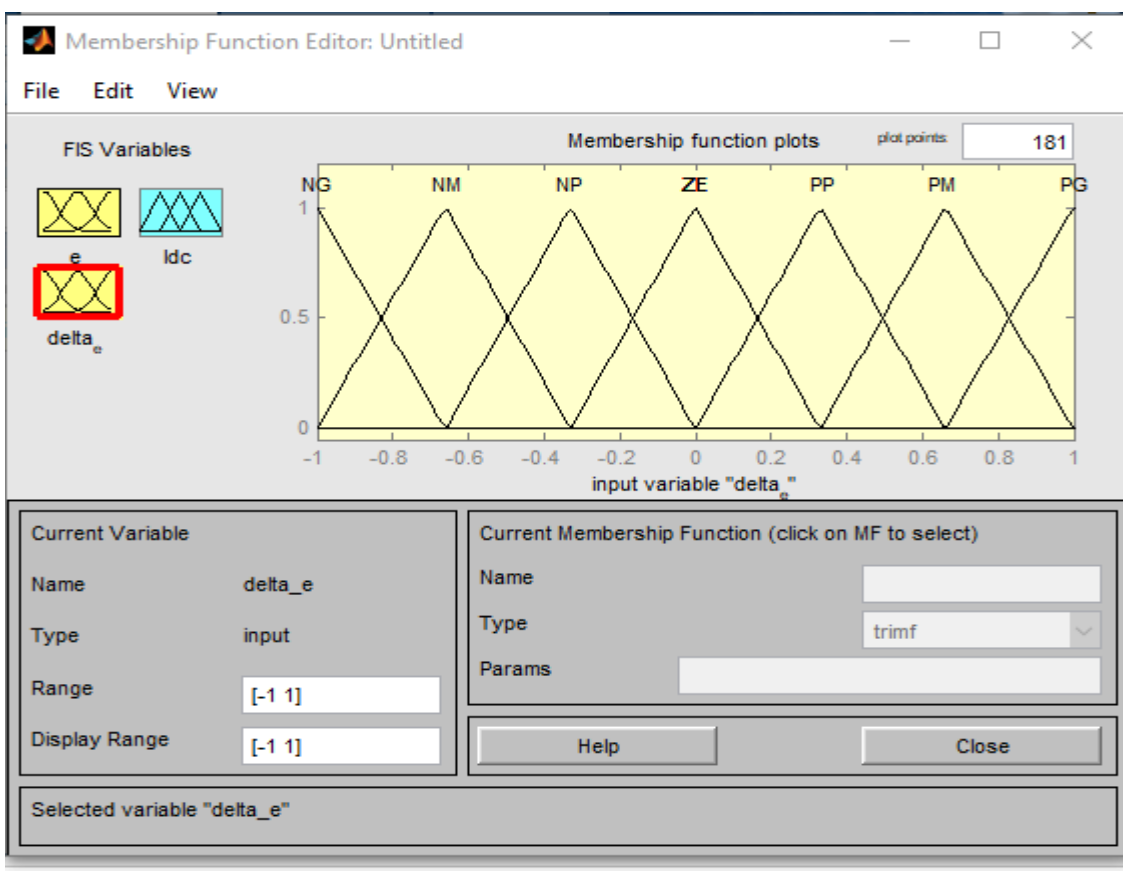
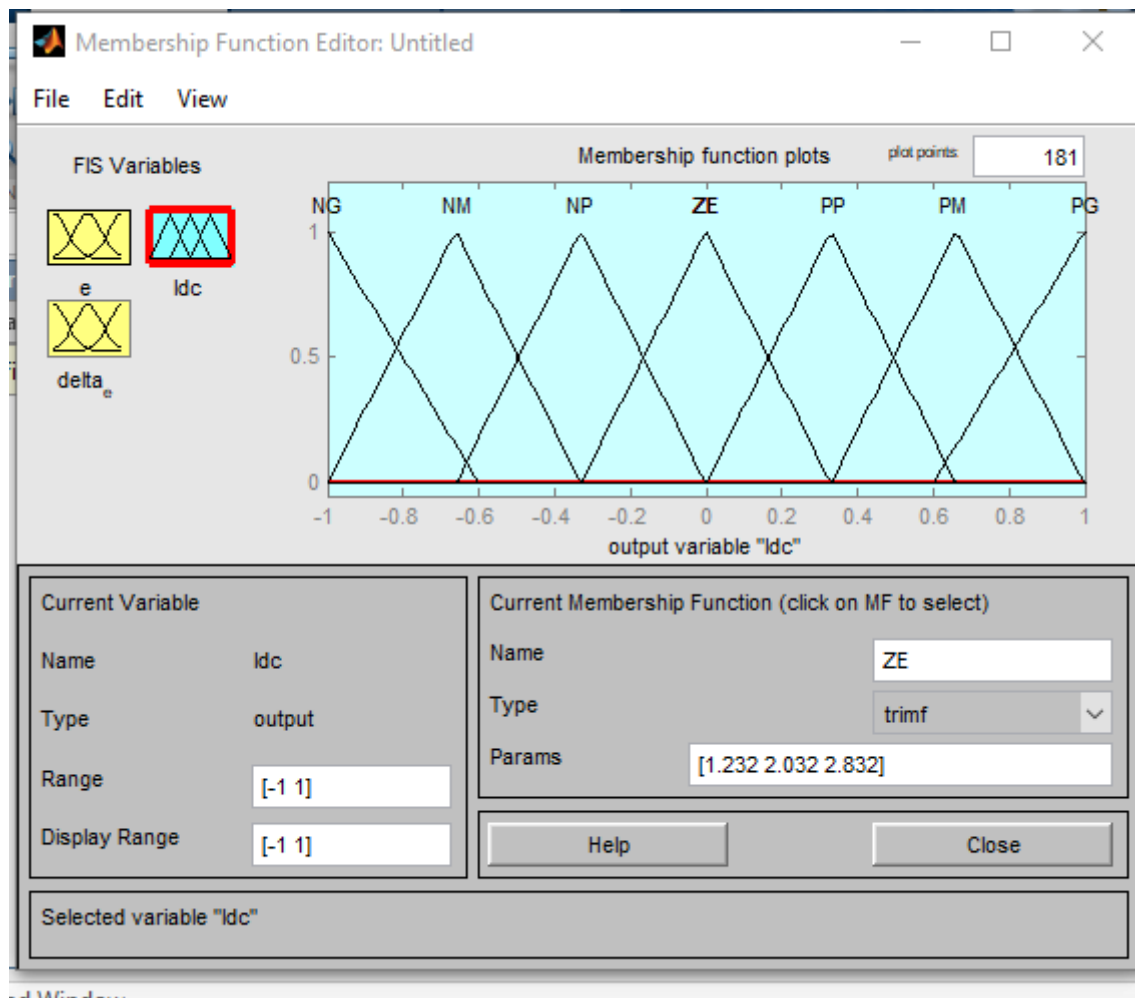


Figure III.9: Partition floue de Δe .Figure III.10: Partition floue de cde .

III.5.2.Base des règles:

L'établissement des règles floues se base sur le sens de variation de l'erreur e , de son signe algébrique et de celui de sa dérivée Δe . Comme illustrée, et sachant que :

- e est croissante si sa dérivée Δe est positive,
- e est constante si sa dérivée Δe est nulle,
- e est décroissante si sa dérivée Δe est négative,
- e est positive si la consigne est supérieure à la sortie x (consigne $> x$),
- e est nulle si la consigne est égale à la sortie x (consigne $= x$),
- e est positive si la consigne est inférieure à la sortie x (consigne $< x$),

Alors la commande cde sera:

- Nulle (ZE) si e est nulle (ZE).

- Grande positive (GP) si e est positive dans les deux situations de croissance et décroissance.
- Grande négative (GN) si e est négative dans les deux situations de croissance et décroissance.
- Négative (N) si e est croissante vers zéro.
- Positive (P) si e est décroissante vers zéro.
- SI e est ZE, ALORS cde est ZE.

SI e est P, ALORS cde est GP.

Ainsi, les règles floues seront définies comme suit:

- SI e est N, ALORS cde est GN.
- SI e est ZE ET Δe est P, ALORS cde est N.
- SI e est ZE ET Δe est N, ALORS cde est P. [2]

III.6.Conclusion

Ce chapitre s'est concentré sur les principes et les méthodes d'application de la logique floue et son importance dans la résolution de divers problèmes de commande.

Dans le chapitre suivant, nous appliquerons la modélisation et les simulations numériques à la commande par logique floue adaptative d'un filtre actif parallèle.



Chapitre IV

Simulation sous Matlab-Simulink

IV-1 Introduction:

Dans le chapitre précédent on a étudié les trois méthodes de contrôle classique et moderne de filtre actif parallèle. Le but de ce chapitre est voir les résultats de simulation des différentes méthodes de contrôle comme suit : Dans la première partie de ce chapitre on donne les tableaux des paramètres de simulation du filtre actif parallèle. La seconde partie présente les résultats de simulation du filtre actif parallèle commandé par un contrôleur moderne, c'est le régulateur à base de la logique floue. ces résultats seront interprétés.

IV-2 Les paramètres du régulateur :

<i>Réseau d'alimentation</i>					
<i>Paramètres</i>	<i>Vs[v]</i>	<i>F[Hz]</i>	<i>Rs[Ω]</i>	<i>Ls[mH]</i>	<i>Lc[mH]</i>
<i>Valeurs</i>	<i>40.8</i>	<i>50</i>	<i>0.42</i>	<i>2.3</i>	<i>1</i>

<i>Charge non-linéaire</i>		
<i>Paramètres</i>	<i>Rs/Ω/</i>	<i>Ld[μF]</i>
<i>Valeurs</i>	<i>11</i>	<i>3</i>

<i>Filtre actif parallèle</i>			
<i>Paramètres</i>	<i>L_f[mH]</i>	<i>V_{dc}[V]</i>	<i>C_{dc}[μF]</i>
<i>Valeurs</i>	<i>3mH</i>	<i>120</i>	<i>1100</i>

TableauIV.1: parmaêtre du fap trois fils

Avec une largeur de la bande d'hysrtérésis $\Delta_i = 0.01$

IV-3. Principe de filtrage actif parallèle

A-

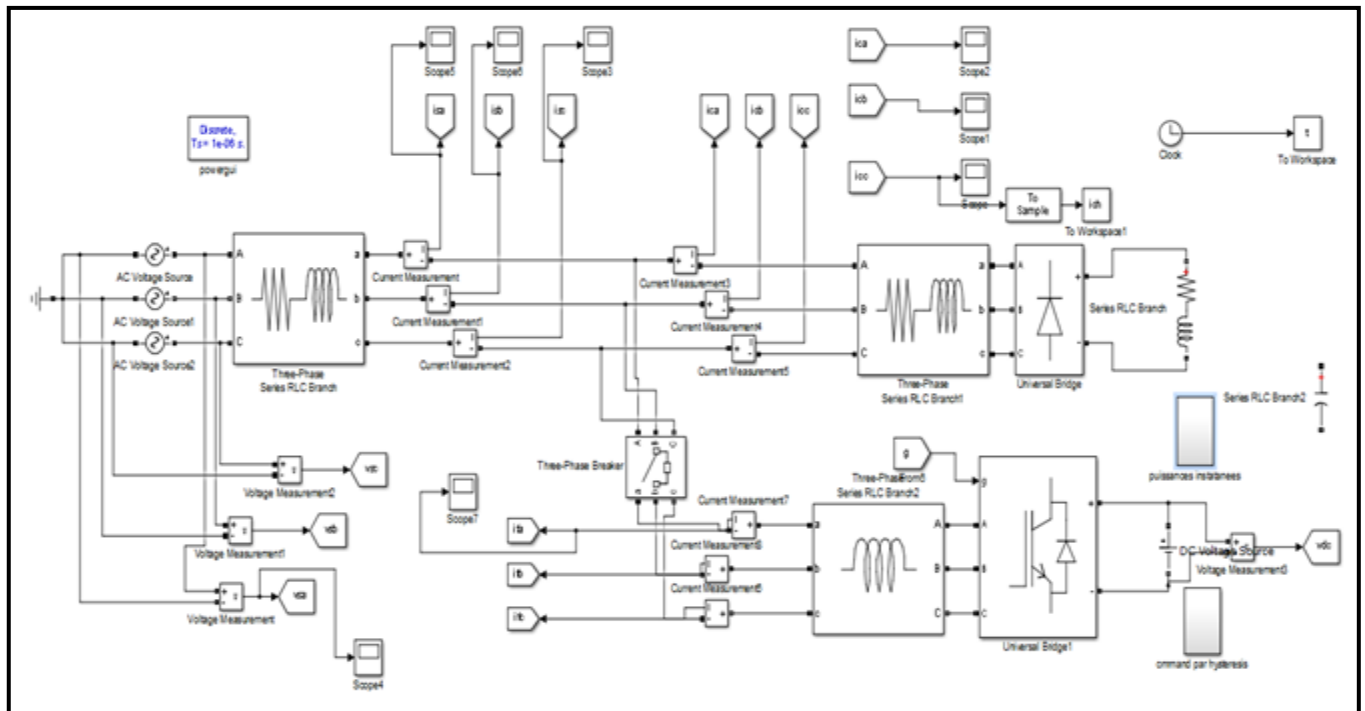


Figure IV-1 : Schéma de principe de filtrage actif parallèle

B-

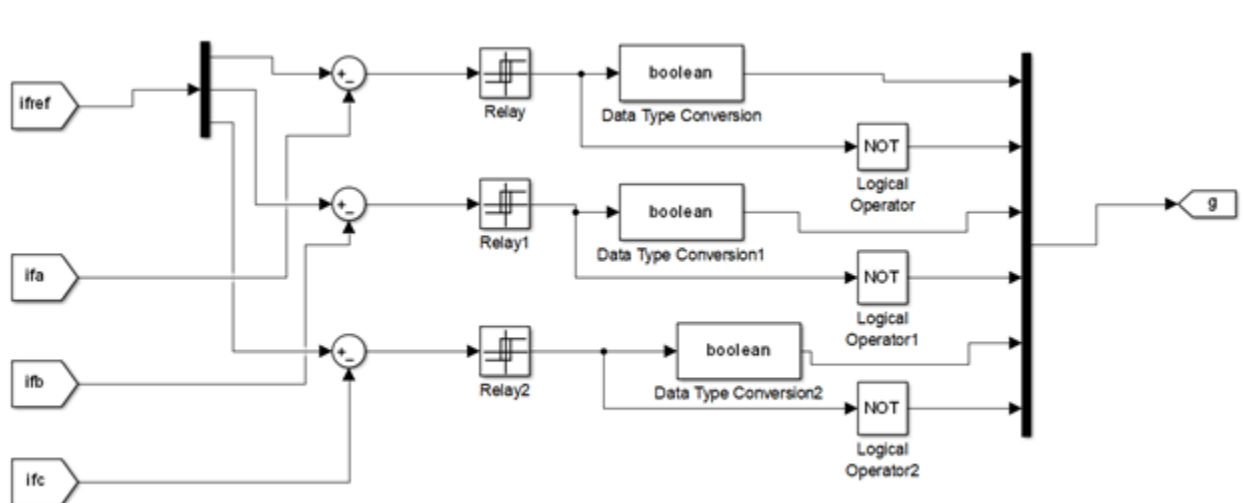


Figure IV-2 : Schéma de commande par hysteresis

C-

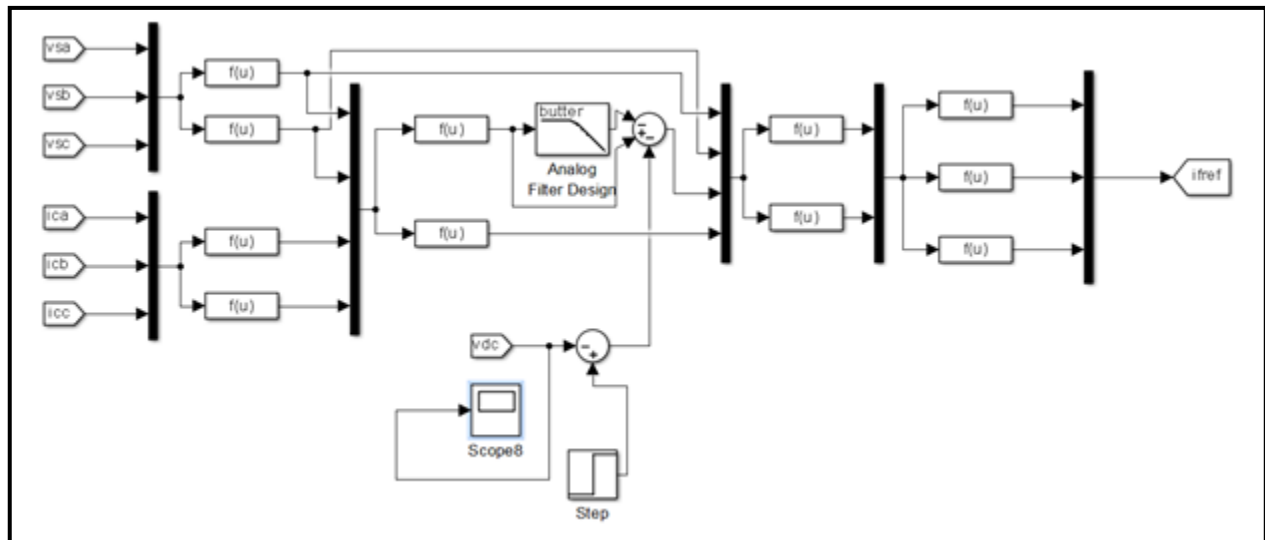


Figure IV-3 : Schéma de puissances instantanées

IV-4. Résultats de simulation :

IV. 4.1 Les courants Ich(a) :

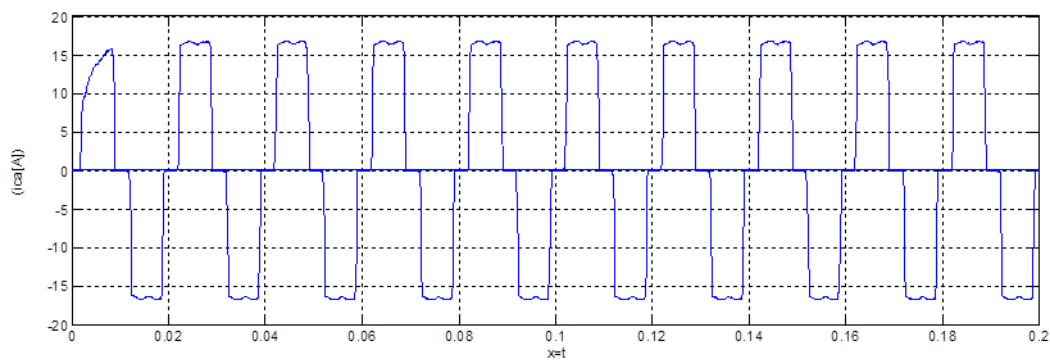


Figure IV-4 : Résultats de simulation de courants Ich(a)

La figure (IV-4) représente le courant de charge ich(a) avant l'application du filtre actif parallèle. Nous observons que les résultats obtenus par simulation, la nature du courant est déformée. C'est-à-dire une mauvaise qualité d'énergie [33].

IV. 4.2 Les courants $I_s(a)$:

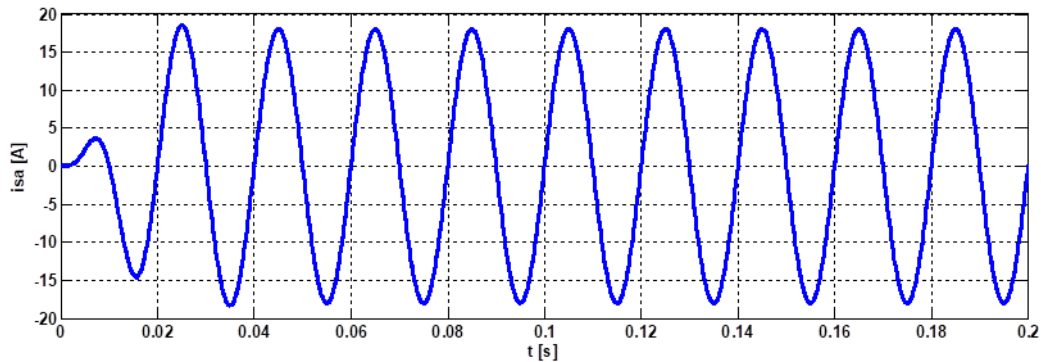


Figure IV-4 : Résultats de simulation de courants $I_s(a)$

La figure (IV-5) représente le courant de source i_s après l'application du filtre actif parallèle. Nous observons que les résultats obtenus, la nature du courant i_s est devenu sinusoïdale. C'est-à-dire, une amélioration de la qualité d'énergie. [33]

IV. 4.3 La courant de filtre i_{fa} :

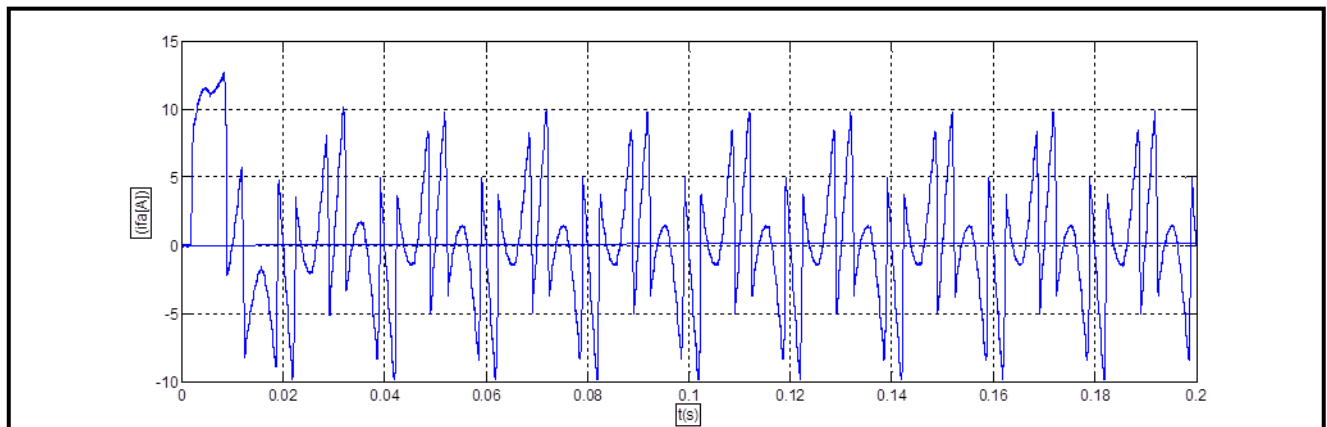


Figure IV-5: Résultats de simulation de courant de filtre i_{fa} avec onduleur.

La figure (IV-6) représente le courant de filtre i_{fa} et sa référence i_{fa}^* , après l'application du filtre actif parallèle. Cela nous semble claire que le courant du filtre suit parfaitement sa référence dans toute la durée de simulation, nous observons donc que le courant i_{fa} est bien injecté par l'onduleur ce qui minimise le maximum des harmoniques imposés par la charge non linéaire. C'est-à-dire, une amélioration de la qualité d'énergie [33].

IV-5 Compensation des courants harmoniques :

IV-5.1.La THDich du courant de charge ich(a) :

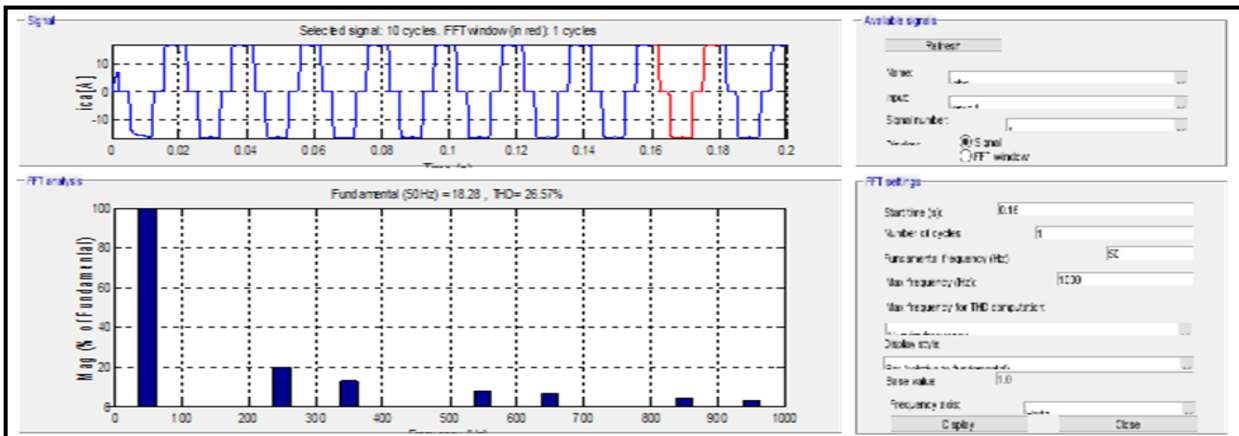


Figure IV-6: Résultats de simulation avant filtrage actif parallèle (a) du THDich du courant de charge $i_{ch(a)}$

La figure (IV-6) représente le taux d'harmoniques de distorsion du courant de charge $i_{ch(a)}$ (THD $i_{ch(a)}$) avant le filtre actif parallèle, il est de 26.58%, cette valeur est très élevée due à la perturbation créée par la charge non linéaire [33].

IV-5.2 : La THDisa du La courant Is (a)

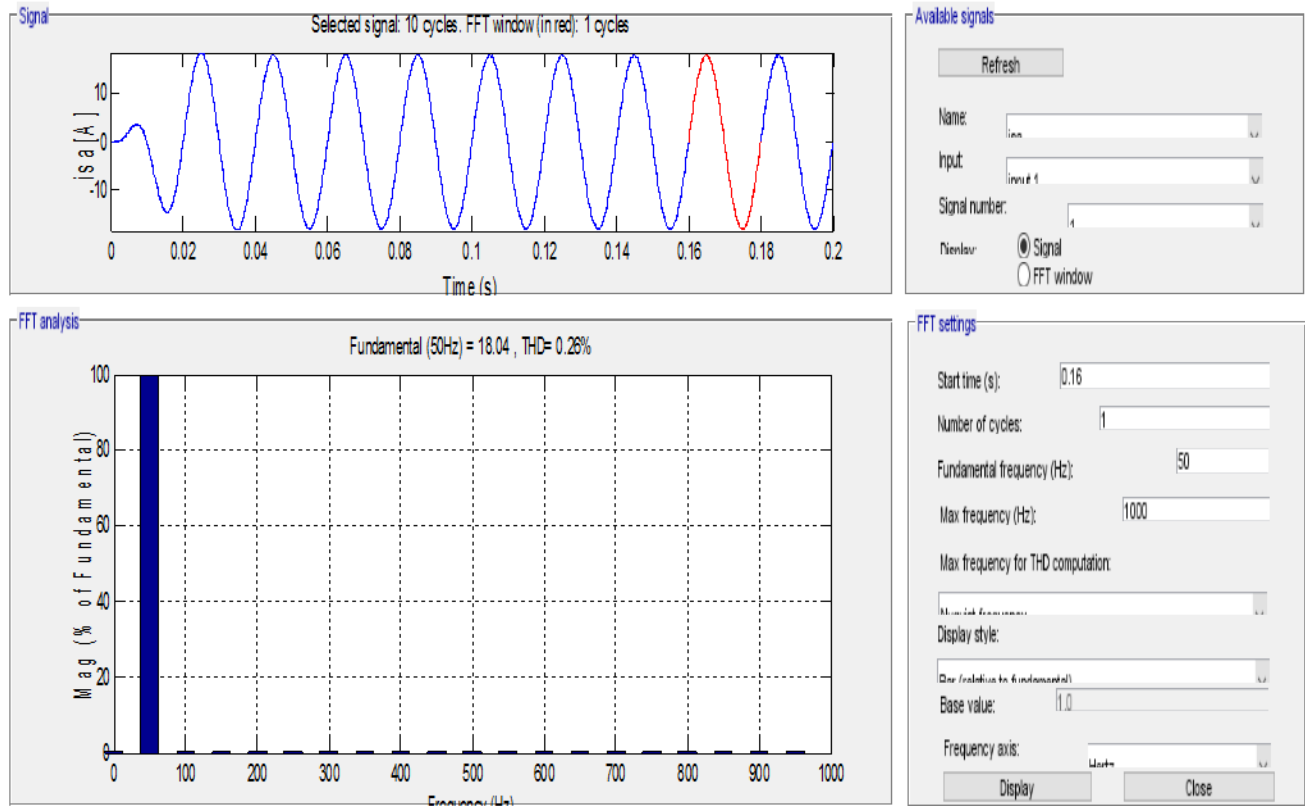


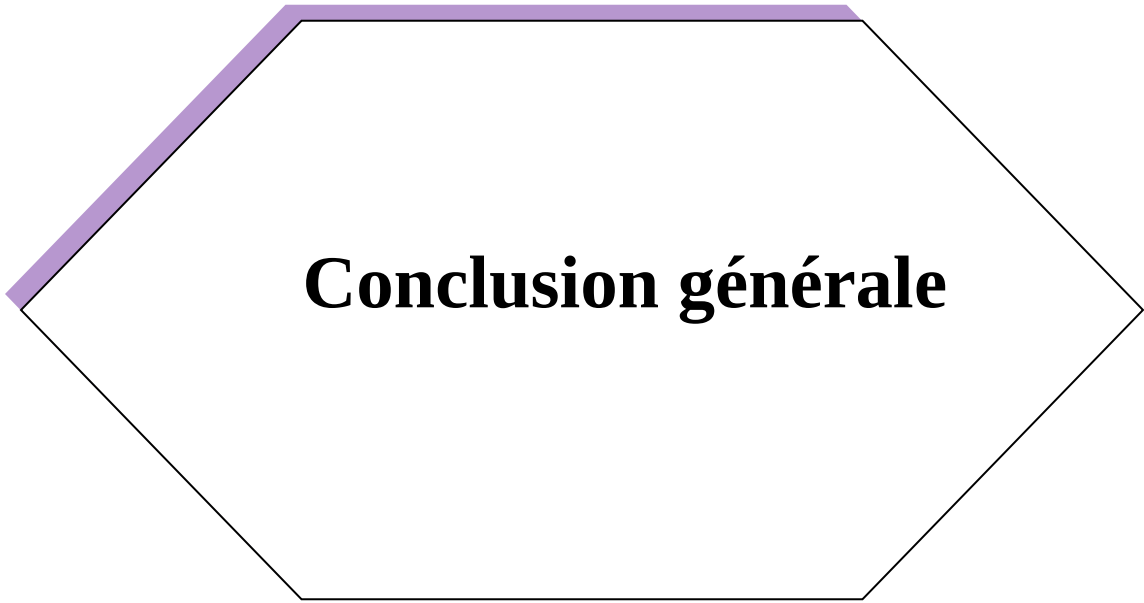
Figure IV-7: Résultats de simulation avant filtrage actif parallèle (a) du THDisa du courant de source i_{sa}

La figure (IV-8) représente le taux d'harmoniques de distorsion du courant de source i_{sa} (a) (THDisa) avant le filtre actif parallèle, il est de 0.26%, cette valeur est très élevée due à la perturbation créée par la charge non linéaire.

IV-6 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats de simulation d'un système de filtrage actif parallèle alimenté par un générateur sous l'environnement MATLAB/Simulink [33].

Nous avons fourni le schéma général du système de filtrage (source –filter-charge) avant et après compensation, ainsi que les résultats de simulation et les interprétations obtenus en utilisant la stratégie de contrôle par hystérésis de l'onduleur avec un régulateur flou [2].



Conclusion générale

Conclusion générale

Dans le présent travail, nous avons étudié le rôle du filtre actif parallèle commandé par la logique floue pour la dépollution des réseaux électriques. La pollution en harmonique est l'un des problèmes majeurs qui dégrade la qualité d'énergie électrique dans les réseaux de distribution. La circulation des courants harmoniques dans les lignes et entre les charges est difficile à prédire et à contrôler.

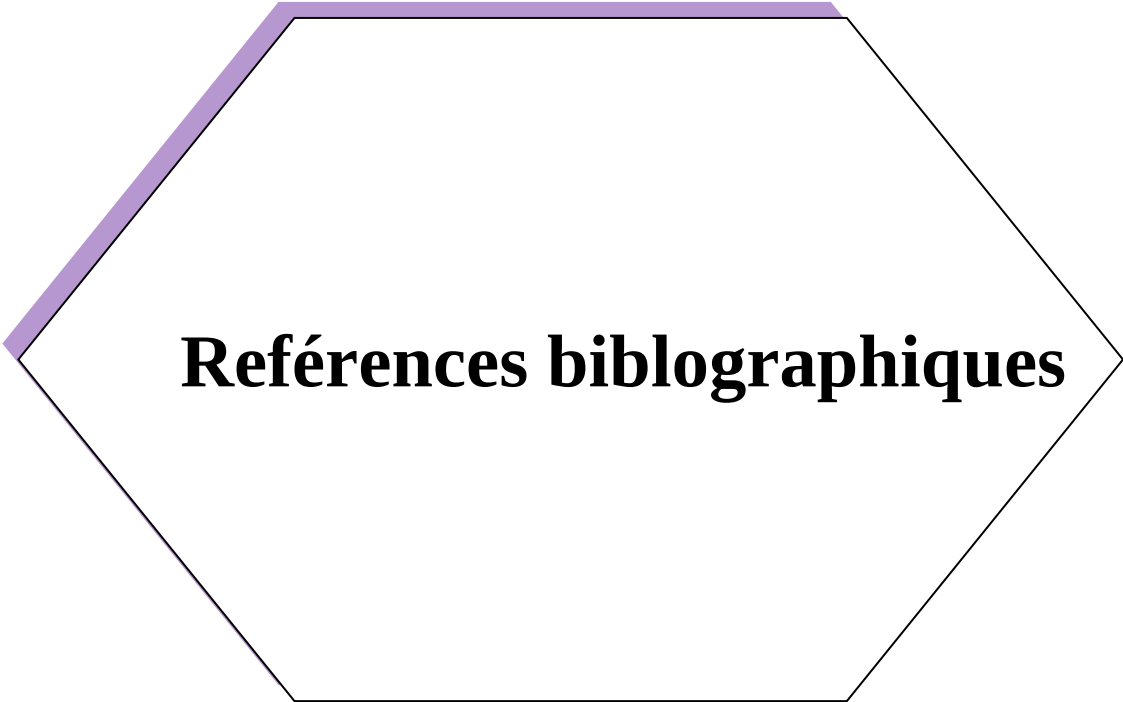
Dans cette situation, il existe des méthodes classiques qui peuvent diminuer les effets néfastes des harmoniques et des méthodes modernes qui les éliminent complètement tel que le filtrage actif.

Notre travail s'articule autour de quatre chapitres dont le premier a été consacré à la présentation des différents types de perturbations qui peuvent polluer le réseau électrique et à la définition des harmoniques et des équilibres de courants et de tensions.

Dans le deuxième chapitre, nous nous sommes focalisés sur la structure générale des filtres actifs parallèles. Cette structure est divisée en deux parties : la partie puissance constituée de l'onduleur de tension à deux niveaux, la source de tension continue et le filtre de sortie (filtre R L). La deuxième partie est la partie commande incluant l'identification du courant harmonique par la méthode de puissances instantanées et la régulation du courant injecté sur le réseau.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté la commande par logique floue. La logique floue est une technique de l'intelligence artificielle qui ne nécessite pas la connaissance exacte du modèle mais elle se repose sur l'expertise humaine [4].

Dans le quatrième chapitre Les résultats obtenus uniquement par simulation (dans l'environnement Simulink / Matlab) démontrent que le filtre actif choisi peut réduire les harmoniques de courant à des valeurs inférieures à 5% conformes aux normes internationales, ce filtre s'adapte aux variations de charge.



Références bibliographiques

Référence bibliographie

- [1] ANOUAR NASRI. "LA COMMANDE PREDICTIVE D'UN FILTRE ACTIF PARALLELE ", Thèse de Mémoire de Master, "Université Larbi Ben M'hidi" . Oum-El-Bouaghi 2019.
- [2] HADDIG Salah. "Commande d'un filtre actif parallèle par logique floue ", Thèse de Mémoire de Master, "Université Echahid Hamma Lakhdar" . El-Oued 2020.
- [3] GHADBANE Ismail. "Etude Et Réalisation D'un Filtre Actif Parallèle En Utilisant Différentes Stratégies De Contrôle", Thèse de Mémoire de Doctorat, "Université Mohamed Khider". Biskra 2016.
- [4] ZOUAK Abd essamed. "Commande par logique floue d'un filtre actif parallele", Thèse de Mémoire de Master, "Université Mohamed Boudiaf". M'SILA 2019.
- [5] DOUKARI Zakaria. "Commande d'un Filtre Actif Parallèle triphasé ", Thèse de Mémoire Master, "Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi ". Bordj Bou Arreridj 2021.
- [6] DJAffar OULD ABDESLAM ."Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif Parallèle dans les réseaux électriques basse tension " ,Thèse de Mémoire de Doctorat , "Université de Haute". Alsace 2005.
- [7] LAHMADI OUARDA. "Contribution à l'identification et la commande d'un filtre Actif parallèle par des Techniques Neuromimétiques ", Thèse de Mémoire de Doctorat , "Université de Batna" -2- 2017.
- [8] AMROUNE Mourad. "Commande et diagnostic d'un filtre actif parallèle", Thèse de de Mémoire Master, "Université Mohamed Boudiaf" .M'SILA 2016.
- [9] KACEM Seddik . " Commande Inélégant D'un Onduleur Deux-Niveaux Avec Filtre Active " , Thèse de Mémoire de master , , "Université Mohamed Boudiaf" .M'SILA 2020.
- [10] LAIB HICHEM. "Contribution par une Nouvelle Approche Modulaire au Filtrage Actif des Harmoniques dans les Réseaux Electriques de Distribution", Thèse de Mémoire de Doctorat, "Université de Batna ,"2017.
- [11] MESSALLEM Soufiane . "Validation de technique de commande d'un filtre actif parallèle", Thèse de Mémoire de Master, "Université Echahid Hamma Lakhdar". El-Oued 2021.
- [12] Mohammed CHERMAT. "Contribution a La Commande de F iltrage Actif Parallèle ", Thèse de Mémoire de Master," Université de Mohamed El-Bachir El -Ibrahimi-.Bordj Bou Arreridj ",2021.

- [13] OMEIRI AMAR. "Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant ", Thèse de Mémoire de Doctorat," Université Badji Mokhtar ". ANNABA 2007.
- [14] SALIM MOUTTOU. "Nouvelles Approches de Commande d'un Filtre Actif Parallèle à Source de Courant ",Thèse de Mémoire de A MAÎTRISE, "Université de Québec.TROIS-RIVIÈRES ",2002.
- [15] GAOUAR Fateh. "Commande d'un Filtre Actif Serie " ,Thèse de Mémoire de Fin D'études en vue de L'obtention du Diplôme D'ingénieur D'état Electrotechnique ," Université de M'SILA ",2010.
- [16] Barkat Fathi " Contribution à l'étude de la Commande de Filtre Actif parallèle par régulateur PI et logique floue ",thèse de mémoire de master," UNIVERSITE AHMED DRAIA ADRAR", 2017.
- [17] TELLI Abdelwahab " COMMANDE PAR LOGIQUE FLOUE D'UN FILTRE ACTIF PARALLELE AVEC CORRECTION DU FACTEUR DE PUISSANCE ". Thèse de mémoire de master," UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA", 2016/2017.
- [18] LABBI Imad "FILTRAGE ACTIF PARALLÈLE DES RESEAUX ELECTRIQUES ".thèse de mémoire master, "UNIVERSITE DE M'SILA", 2011/2012.
- [19] OMEIRI AMAR " Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant".thèse de mémoire de doctorat , "UNIVERSITE BADJI MOKHTARANNABA,"2007.
- [20] Tameur Abdelkrim " Commande Non Linéaire par Mode de Glissement d'un Filtre Actif Paaralléle à Spt Niveaux". thèse de mémoire de magazine Unité de recherche appliquée en energies Renouvelables B.P.88.Zone Industrielle , Ghardaia , Algérie.
- [21] DjaffarOuldAbdeslam",Stratégieneuromimétique d'identification etdecommanded'unfiltreactifparallèle^ thèse de mémoire de master, "Université de Haute Alsace 4 rue des Frères Lumière",2006.
- [22] Mohamed Muftah Abdusalam, "Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales ", thèse de mémoire de master, "Université Henri Poincaré - Nancy 1, "2008.

- [23] Tidjani MAHNI" 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 mémoire de doctorat, " Université Mohamed Khider – Biskra" 2017.
- [24] MOHAMED MAGRAOUI" VALIDATION DE TECHNIQUES DE COMMANDE D'UN , FILTRE ACTIF PARALLÈLE ".thèse de mémoire TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE, ECOLE DE TECHNOLOGIE SUPERIEURE ."UNIVERSITÉ DU QUÉBEC".2007
- [25] BOURAIYOU Ahmed ."DIAGNOSTIC DE DEFAUTS PAR LOGIQUE FLOUE".thèse de mémoire de master, "UNIVERSITE BADJI MOKHTAR". ANNABA 2010
- [26] Doctor (Ph.D.)"COMMANDE NUMÉRIQUE DE MACHINES ASYNCHRONES PAR LOGIQUE FLOUE ".thèse de mémoire doctor, "l'Université Laval" .QUÉBEC 1997
- [27] M. Laamayad Tahar." Commande Optimale d'une Machine Asynchrone Apport de La Logique Floue". thèse de mémoire de master, "Université de .Batna "2008.
- [28] NABTI KHALIL." Contribution à la commande de la machine asynchrone par DTC et logique floue ",thèse de mémoire de master, "université de mantouri".constantine 2006
- [29] Fodil Malika ." Commande par logique floue type -2-appliquée à la machine asynchrone ".thèse de mémoire de master, "UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF" ,M'SILA 2016
- [30] HAMZA Oussama ." Commande par logique floue d'une machine synchrone à aimant permanent". thèse de mémoire de master , "UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF" ,M'SILA 2018.
- [31] Tahar Laamayad."Contribution à la Commande d'une Machine Asynchrone Double Etoile par Mode Glissant. Apport de la Logique floue ".thèse de mémoire de master, "Université de .Batna"2008.
- [32] GUERFI YUCEF."Régulation des onduleurs multi niveaux par un régulateur à logique floue ".thèse de mémoire de master, "UNIVERSITE DE BADJI MOKHTARE" ANNABA 2009
- [33] Anfel SKENDER ." Etude et Réalisation du Système de Filtrage Actif Parallèle de Puissance Commandé par Logique Floue Type 2 Alimenté par une Source Photovoltaïque". thèse de mémoire de master, "Université Yahia Fares ", Médéa 2021

Référence bibliographie

- [34] Mr. MORSLI Abdelkader " Commande D'un filter actif parallèle de puissance par controleur de logique floue type-2". thèse de mémoire de master, "UNIVERSITE DR . YAHIA FARES", MEDEA,2015.