

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université de Djilali Bounaama-Khemis Miliana



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de la Technologie

Mémoire du Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention de diplôme

Master

En

« Génie électrique »

Option :

« Électrotechnique »

Titre :

**Commande d'un filtre actif shunt trois niveaux
par logique floue**

Réalisé par :
TETBIRTAissa
BOUGHARAAbdelkhalek

Encadré par :
Mr. YOUSFI Abdelkader

Année Universitaire 2014/2015

ملخص

في هذا العمل عالجتا التوفيقات المتولدة عن جسر يقوم ثلاثي التور بواسطة مرشح فعال علي التوازي. الصورية الرقمية بواسطة البرنامج KNILUMIS BALTAM للعناصر (شبكة -مرشح فعال -حمولة) من اجل استعمال تقنية التحكم منطقية فلو و تشكيل عرض النبضة. طريقة الاستطاعات اللحضية نستعمل من اجل حساب تيار التوفيقات, التحليل الطيفي قبل و بعد الترشيح يمكننا من مقارنة النتائج ويثبت فعالية المرشح الفعال حيث معامل تشوه تيار الحمولة قبل الترشيح اكبر بكثير منه بعد الترشيح. النتائج المتحصل عليها من خلال برنامج المحاكات يمكننا من معرفة مدى فعالية استعمال منطقية فلو على استعمال المعدل النسبي التكاملية.

ABSTRACT

In this work an active power filter is used to eliminate harmonics generated by a nonlinear load. A simulation by MATLAB SIMILINK of power supply, active power filter and a nonlinear load using fuzzy logic controller and PWM.

The instantaneous power method is applied to calculate and identify harmonic current. Spectral analyses before and after filtering harmonic is carried out in order to compare the results and determine that harmonic distortion is higher than after using shunt active filter.

The obtained results show by the program of simulation show a good filtering by using fuzzy logic controller then PI.

RESUME

Dans ce travail, on a traité l'élimination par un filtre actif parallèle des harmoniques générées par un pont redresseur triphasé non commandé.

Une simulation par MATLAB SIMULINK de l'ensemble réseau, filtre actif, et charge, avec la commande logique floue et le MLI

La méthode des puissances instantanées est utilisée pour calculer et identifier le courant harmonique. Une analyse spectrale avant et après filtrage est obtenue pour comparer les résultats et déterminer l'efficacité du filtre actif.

Les résultats obtenus par le programme de simulation nous montre le bon filtrage en utilisant le contrôleur floue.

Dédicace

*Louange à dieu le puissant, prière et salut le
prophète Mohamed que le salut sur lui.*

*Je remercie dieu et grâce à lui que je vous arrivée à
ce niveau.*

Je dédie ce modeste travail à :

Mon père et ma mère qui m'encouragent beaucoup.

Mes frères.

Tous les membres de ma grande famille.

A Tous mes amis.

*Toute personne ayant participé de loin ou de près
pour la réalisation de ce travail.*

Remerciements

Toute notre gratitude, grâce et remerciement vont à dieu le tout puissant qui nous a donné la force, la patience, le courage et la volonté pour élaborer ce travail.

C'est avec une profonde reconnaissance et considération particulière que nous remercions notre promoteur

Mr yousfi abdelkader pour la sollicitude avec laquelle il a suivi et guidé ce travail.

Nous remercions les membres de jury qui nous font l'honneur de présider et d'examiner ce modeste travail.

Nos sincères remerciements à tous les enseignants du Université de Khemis Miliana pour leurs soutiens et leurs aides.

Toute notre gratitude va à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation.

Liste des figures

Figure I.1 : Courant d'une alimentation à découpage d'un écran de micro-ordinateur	9
Figure I.2 : Diagramme de Fresnel de la puissance déformante	13
Figure I.3 : La propagation des harmoniques sur les réseaux	14
Figure I.4 : Filtres résonants agissant sur plusieurs rangs harmoniques	17
Figure I.5 : Filtres résonants agissant sur plusieurs rangs harmoniques	18
Figure I.6 : Structure du filtre amorti	18
Figure I.7 : Représente l'évolution de leur impédance en fonction de la fréquence	18
Figure I.8 : Filtre actif parallèle	20
Figure I.9 : Filtre actif série	20
Figure I.12 : Combinaison parallèle-série des filtres actifs	21
Figure I.13 : Filtre actif série et filtre passif parallèle	21
Figure I.14 : Filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle	22
Figure II.1 : Structure de l'onduleur triphasé à trois niveaux à structure NPC	25
Figure II.2 : Structure d'un bras d'onduleur triphasé à trois niveaux	25
Figure II.3 : Interrupteur bidirectionnel équivalent de la paire diode-transistor	26
Figure II.4 : Les différentes configurations possibles pour un bras d'onduleur à trois niveaux	27
Figure II.5 : Bloc Simulink d'onduleur trois niveaux commande MLI	33
Figure II.6 : la stratégie MLI à une porteuse signal triangulaire	33
Figure II.7 : La tension V_a sortie de l'onduleur à trois niveaux et son spectre harmonique pour $m=30$ et $r=0.8$	33
Figure II.8 : La tension V_a sortie de l'onduleur à trois niveaux et son spectre harmonique pour $m=12$ et avec coefficient de $r=0.8$	34
Figure II.9 : La tension V_a sortie de l'onduleur à trois niveaux et son spectre harmonique pour $m=8$ et avec coefficient de $r=0.8$	34
Figure II.10 : Signal de la stratégie MLI a deux porteuses décalées à $(T_p/2)$	36
Figure II.11 : La tension V_a sortie de l'onduleur à trois niveaux et son spectre harmonique pour $m=30$ et $r=0.8$	36
Figure II.12 : La tension V_a sortie de l'onduleur à trois niveaux et son spectre harmonique pour $m=12$ et $r=0.8$	36
Figure II.13 : La tension V_a sortie de l'onduleur à trois niveaux et son spectre harmonique pour $m=8$ et $r=0.8$	37
Figure III.1 : Principe du filtre actif parallèle	43
Figure III.2 : les Courant de source, charge et filtre	43
Figure III.3 : structure générale d'un filtre actif parallèle	44

Figure III. 4 : schéma du circuit de puissance d'un filtre actif parallèle à structure tension	45
Figure III. 5 : Schéma représentant le principe de séparation des puissances	48
Figure III.7 : Structure d'un filtre actif shunt basé sur la méthode des puissances instantanées	50
Figure III. 8 : Schéma de la régulation des courants du filtre actif parallèle	51
Figure III. 9 : Boucle de régulation de la tension continue	53
Figure III. 10 : Diagramme synoptique du contrôleur logique floue	54
Figure III. 11 : la fonction d'adhésion de l'entrée et sortie	55
Figure III. 12 : Fonction d'adhésion des variables d'entrées (e,de) et de sortie (cde)	55
Figure III. 13 : bloc Simulink de contrôleur logique floue	56
Figure III.14 : Schéma synoptique d'un réseau triphasé	56
Figure III.16 : Schéma d'un redresseur triphasé à thyristors	57
Figure III.17 : V_{ch} ou U_{ch} la tension redressée	58
Figure III.18 : I_{ch} le courant de charge	58
Figure III.19 : V_{ch} la tension redressée	58
Figure III.20 : I_{ch} du courant de charge	58
Figure IV.1 : source de tension triphasé V_a, V_b, V_c	59
Figure IV.2 : courant de charge $I_{ch}(t)$	59
Figure IV.3 : Spectre du courant de charge $I_{ch}(t)$	59
Figure. IV.4 : courant de charge $I_{ch}(t)$	60
Figure. IV.5 : spectre du courant de charge $I_{ch}(t)$	60
Figure. IV.6 : le courant de charge $I_{ch}(t)$	60
Figure. IV.7 : spectre du courant de charge $I_{ch}(t)$	61
Figure IV.8 : Courant de réseau après filtrage	61
Figure IV.9 : Spectre du courant du réseau $I_{res}(t)$	62
Figure IV.10 : Tension et courant de réseau après filtrage $V_{res}(v), I_{res}(A)$	62
Figure IV.11 : Courant du filtre $I_f(A)$ et sa référence $I_{href}(A)$	62
Figure IV.12 : Tension et courant de réseau et courant de filtre et de charge après le filtrage	63
Figure IV.13 : Courant de réseau après filtrage	63
Figure IV.14 : Spectre du courant du réseau $I_{res}(t)$	63
Figure IV.15: Tension et courant de réseau après filtrage $V_{res}(v), I_{res}(A)$	64
Figure IV.16 : Courant du filtre $I_f(A)$ et sa référence $I_{href}(A)$	64
Figure IV.17 : Tension et courant de réseau et courant de filtre et de charge après le filtrage	64
Figure IV.18 : Courant de réseau après filtrage	65
Figure IV.19 : Spectre du courant du réseau $I_{res}(t)$	65

Figure IV.20: Tension et courant de réseau après filtrage V_{res} (v), I_{res} (A)	65
Figure IV.21 : Courant du filtre $I_f(A)$ et sa référence $I_{href}(A)$	66
Figure IV.22 : Tension et courant de réseau et courant de filtre et de charge	66
Figure IV.23 : Courant de réseau après filtrage	67
Figure IV.24 : Spectre du courant du réseau I_{res} (t)	67
Figure IV.25: Tension et courant de réseau après filtrage V_{res} (v), I_{res} (A)	68
Figure IV.26 : Courant du filtre $I_f(A)$ et sa référence $I_{href}(A)$	68
Figure IV.27 : Tension et courant de réseau et courant de filtre et de charge	68
Figure IV.28 : Courant de réseau après filtrage	69
Figure IV.29 : Spectre du courant du réseau I_{res} (t)	69
Figure IV.30 : Courant du filtre $I_f(A)$ et sa référence $I_{href}(A)$	69
Figure IV.31 : Tension et courant de réseau après filtrage V_{res} (v), I_{res} (A)	70
Figure IV.32 : Tension et courant de réseau et courant de filtre et de charge après le filtrage	70
Figure IV.33 : Courant de réseau après filtrage	70
Figure IV.34 : Spectre du courant du réseau I_{res} (t)	71
Figure IV.35 : Tension et courant de réseau après filtrage V_{res} (v), I_{res} (A)	71
Figure IV.36 : Courant du filtre $I_f(A)$ et sa référence $I_{href}(A)$	71
Figure IV.37 : Tension et courant de réseau et courant de filtre et de charge	72

Liste des tableaux

Tableau I.1 : principales charges polluante.....	5
Tableau I.2 : Limitation des courants harmoniques édictée par EDF.....	16
Tableau (II. 1) : Grandeurs électriques correspondantes pour chacune des configurations d'un bras k	26
Tableau (III. 1) : Table des règles d'inférence.....	59

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I Problématique des harmoniques, état de l'art	
I.1 Introduction	3
I.2 Définition de la pollution harmonique	4
I.3 Caractéristiques des perturbations électriques	5
I.3.1 Qualité de l'énergie électrique	5
I.3.1.1 Qualité de la tension	5
I.3.2 Caractéristique de l'onde de tension et du courant	6
I.3.2.1 valeurs efficaces	6
I.3.2.2 La puissance apparent	7
I.3.2.3 Les puissances actives, réactives et déformantes	7
I.3.2.4 Le facteur de puissance	8
I.4 Origine des harmoniques	9
I.5 Conséquence de la pollution harmonique	10
I.6 La propagation des harmoniques sur les réseaux	14
I.7 Norme et réglementation	14
I.7.1 Le taux de distorsion harmonique THD	15
I.8 Stratégie de limitation des harmoniques	16
I.8.1 Stratégie classique.....	16
I.8.1.1 Filtrage passif	16
I.8.1.2 Filtre résonant	17
I.8.1.3 Filtre amorti	18
I.8.2 Filtre actif.....	19
I.8.2.1 Le filtre actif parallèle (F.A.P)	20
I.8.2.2 Le filtre actif série (FAS)	20
I.8.3 La Combinaison Parallèle-Série Actifs (UPQC)	21
I.9 Conclusion	23
Chapitre II Modélisation et stratégies de commande de l'onduleur à trois niveaux de type NPC	
II.1 Introduction	24
II.2 Modélisation d'un onduleur trois niveaux à structure NPC	24

II.2.1	Structure de l'onduleur trois niveaux à structure NPC	24
II.2.2	Modélisation du fonctionnement d'un bras d'onduleur NPC à trois niveaux	25
II.2.3	Les différentes configurations d'un bras d'onduleur à trois niveaux	26
II.2.4	Hypothèse	28
II.2.5	Commande complémentaire pour l'onduleur à trois niveaux	28
II.2.5.1	Fonction de connexion	28
II.2.5.2	Modélisation aux valeurs instantanées	28
II.2.5.3	Modèle de connaissance	29
II.3	Les différentes stratégies de commande de l'onduleur à trois niveaux	31
II.3.1	Commande par MLI	31
II.3.2	Commande à modulation de largeurs d'impulsions à une porteuses	31
II.3.3	Résultat de simulation	33
II.3.4	Commande à modulation de largeurs d'impulsions à deux porteuses	35
II.3.5	résultats de simulation	37
II.4	Conclusion	38
Chapitre III Principe de Filtre actif parallèle et identification du courant d'harmonique		
III.1	Introduction	39
III.2	Principe de filtre actif parallèle	39
III.3	Structure générale du filtre actif parallèle	41
III.3.1	Topologie générale	41
III.3.2	La partie puissance du filtre actif parallèle	42
II.3.2.1	L'onduleur de tension	42
II.3.2.2	Filtre de sortie	43
II.3.2.3	Système de stockage d'énergie	43
III.4	identification des courants harmonique	44
III.4.1	Méthode des puissances instantanées	44
III.4.2	Algorithme d'identification	47
III.5	La Régulation du filtre actif parallèle	47
III.5.1	La Régulation du courant de filtre actif parallèle	47

III.5.2 Régulation de la tension continue	49
III.6 Méthode de régulation par PI	50
III.7 Méthode de régulation par logique Floue	50
III.8 Modélisation de l'association réseau- Filtre actif- Charge polluante	53
III.8.1 Modélisation du réseau	53
III.9 Conclusion	56
Chapitre IV Application de l'onduleur à trois niveaux NPC pour la compensation des courants d'harmonique	
IV.1 Introduction.....	57
IV.2 Programme de Simulation	58
IV.3 Paramètres de simulation	58
IV.4 Caractéristique de courant de source avant le filtrage	59
IV.5 Résultats de simulation de filtre actif parallèle contrôlé par Régulateur PI	61
IV.5.1 Interprétations des résultats	66
IV.6 Résultats de simulation de filtre actif parallèle contrôlé par logique floue	67
IV.6.1 Interprétations des résultats	72
IV.7 Comparaison de THD des méthodes de commande	73
IV.8 Conclusion	73
CONCLUSION GENERALE	74
REFERANCE	75

Introduction générale

L'utilisation des convertisseurs statiques a connu un grand progrès dans les systèmes de conversion d'énergie électrique.

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

Pour faire face à ce problème, la solution classique qui est connue depuis bien longtemps consiste en l'utilisation des filtres passifs. Cette solution est la plus répandue et pratiquement la plus simple et la moins chère mais elle présente deux inconvénients majeurs. Le premier est lié au phénomène de résonance avec le réseau qui est à l'origine de l'amplification de tout harmonique à fréquence voisine de celle du réseau. Le deuxième inconvénient est la dépendance des performances du filtre passif aux caractéristiques du réseau sur lequel il est connecté.

Cependant, les progrès remarquables réalisés au cours des dernières années, dans le domaine des semi-conducteurs de puissance entièrement commandables, les thyristors et les transistors particulier, a permis de concevoir des processus et des dispositifs d'élimination des harmoniques auto-adaptables appelés compensateurs actifs d'harmoniques, ou encore filtre actif dont l'objectif est l'élimination des problèmes intrinsèques des filtres passifs.

L'objectif de ce travail étant le filtrage actif des harmoniques des réseaux électriques.

Comme les principales sources de l'existence des perturbations sont les charges non linéaires dont les plus utilisables sont les convertisseurs statiques raccordés aux réseaux qui les perturbent en injectant des courants harmoniques, les filtres actifs parallèle permettant de contrôler les courants semblent être plus adaptés à la compensation, ce qui a été choisi pour notre étude

Le travail présenté dans ce mémoire concerne particulièrement l'étude par simulation d'un filtre actif parallèle à structure tension destiné à compenser les courants harmoniques générés par une charge non-linéaire.

La conception et la mise en marche du filtre actif dépendent de quatre facteurs :

- Le circuit de puissance du filtre actif.
- La loi de commande ou la méthode de modulation employée (MLI, logique de floue, etc....)
- La méthode utilisée pour le calcul des courants harmoniques.
- Schéma de régulation pour que le filtre actif s'adapte aux variations de la charge.

Cette thèse comporte quatre chapitres, dans le premier chapitre nous analyserons la problématique des harmoniques, leurs origines, leurs conséquences et les différentes stratégies de limitation de ces harmoniques, dans le deuxième chapitre on présente la modélisation et la commande de l'onduleur trois niveaux structure NPC, pour le troisième chapitre nous avons étudié le filtre actif parallèle avec la partie puissance et la partie commande de ce filtre ainsi que leur raccordement avec le réseau et la méthode d'identification des harmoniques, au dernier chapitre il est consacré à l'application du filtre actif parallèle commandé par logique floue et PI avec l'utilisation de l'onduleur trois niveaux NPC.

CHAPITRE I

Problématique des harmoniques, Etat de l'art

Introduction

La tension fournie par les exploitants de réseaux électriques à leurs clients doit être sinusoïdale triphasée et équilibrée. Toutefois, à cause de multiples perturbations d'origines diverses (imperfections des générateurs et des lignes, perturbations atmosphériques lors du transport, défaillantes charges ...), la tension dont dispose un client à son point de raccordement est plus ou moins dégradée. Parmi les défauts les plus courants on dénombre :

Les déséquilibres, Les coupures ou micro-coupures, Les flickers, Les chutes de tension, Les pollutions harmoniques.

La qualité de l'énergie fournie dépend directement de la qualité de la tension au point de livraison. Cette tension subit généralement beaucoup de perturbations généralement classées selon deux origines distinctes :

- les perturbations de tension causées par le passage, dans les réseaux électriques, des courants perturbateurs comme les courants harmoniques...
- les perturbations de tension causées par des tensions perturbatrices comme les tensions harmoniques.

La pollution harmonique se caractérise par une distorsion plus ou moins importante de l'onde de tension distribuée. Ce chapitre se consacre exclusivement au problème harmonique. Après avoir étudié le phénomène de pollution harmonique et présenté ses principales causes et effets sur les réseaux et matériels connectés, les divers solutions envisageables ou existantes pour limiter cette pollution sont exposées et principalement le filtrage.

I.2. Définition de la pollution harmonique :

C'est l'altération de la forme d'onde sinusoïdale du courant et/ou de la tension engendrée par certaines charges électriques dites charges non- linéaires présentées dans le tableau (I.1), [1]

Ce genre de signal, à supposer que la périodicité du signal ne soit pas atteinte, peut être décomposée en une somme de sinusoïde de fréquence (n.f) tel que $n \in \mathbb{N}$ et (f) la fréquence du signal.

Pour $n = 1$ La sinusoïde est dite fondamentale

Pour $n > 1$ Les sinusoïdes sont dites harmoniques d'ordre supérieur.

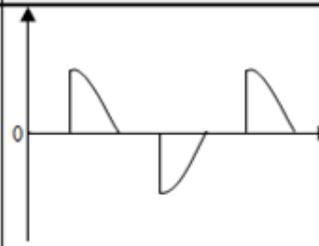
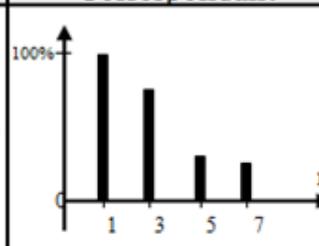
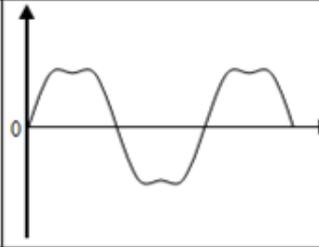
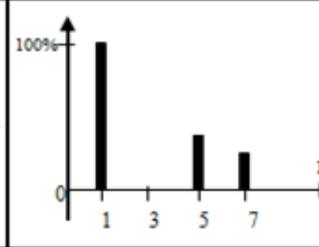
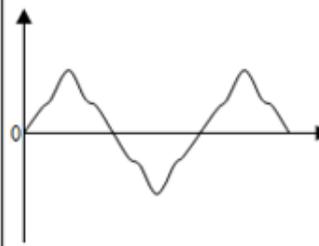
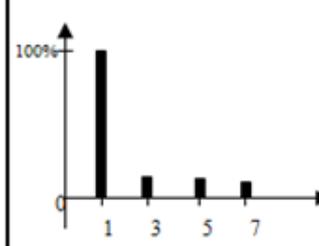
Type de charge	Appareils concernés	Courant absorbé	Spectre harmonique Correspondant
- Gradateurs Monophasé (Commande par angle de phase).	- Régulation de puissance de fours à résistances, - Modulation de Puissance des lampes halogènes.		
- Redresseur triphasé à thyristors.	- Variateur de vitesse des moteurs à courant continu et des moteurs synchrones.		
- Moteur asynchrone.	- Machines-outils, - Appareils électroménagers, - Ascenseurs.		

Tableau I.1 : principales charges polluantes

Le signal peut éventuellement contenir une composante continue qui présente la valeur moyenne du signal. Cette décomposition est connue sous le nom de la décomposition en série de Fourier.

Dans le cas où la tension et le courant seraient non-sinusoidaux, ils peuvent être mis sous la forme donnée respectivement par (I.1) et (I.2) :

$$V(t) = \sum_{n=1}^{\infty} V_n \sqrt{2} \sin(n \cdot \omega \cdot t - \alpha_n) + V_0 \quad (I.1)$$

$$i(t) = \sum_{m=1}^{\infty} I_m \sqrt{2} \sin(m \cdot \omega \cdot t - \beta_m) + I_0 \quad (I.2)$$

I.3 Caractéristiques des perturbations électriques

I.3.1 Qualité de l'énergie électrique

La qualité de l'énergie électrique est considérée comme une combinaison de la qualité de la tension et de la qualité du courant. Nous allons donc définir ces deux notions dans la suite de ce paragraphe.

I.3.1.1 Qualité de la tension [2]

Dans la pratique, l'énergie électrique distribuée se présente sous la forme d'un ensemble de tensions constituant un système alternatif triphasé, Les paramètres caractéristiques d'un tel système sont les suivants :

- la fréquence,
- l'amplitude des trois tensions,
- la forme d'onde qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde,
- la symétrie du système triphasé, caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et de leur déphasage relatif.

➤ Amplitude

L'amplitude de la tension est un facteur crucial pour la qualité de l'électricité. Elle constitue en général le premier engagement contractuel du distributeur d'énergie. Habituellement, l'amplitude de la tension doit être maintenue dans un intervalle de $\pm 10\%$ autour de la valeur nominale.

Dans le cas idéal, les trois tensions ont la même amplitude, qui est une constante. Cependant, plusieurs phénomènes perturbateurs peuvent affecter l'amplitude des tensions. En fonction de la variation de l'amplitude on distingue deux grandes familles de perturbations :

- Les creux de tension, coupures et surtensions. Ces perturbations se caractérisent par des variations importantes de l'amplitude. Elles ont pour principale origine des courts-circuits, et peuvent avoir des conséquences importantes pour les équipements électriques.
- Les variations de tension. Ces perturbations se caractérisent par des variations de l'amplitude de la tension inférieure à 10% de sa valeur nominale. Elles sont généralement dues à des charges fluctuantes ou des modifications de la configuration du réseau.

➤ Fréquence

Dans le cas idéal, les trois tensions sont alternatives et sinusoïdales d'une fréquence constante de 50 ou 60 Hz selon le pays. Des variations de fréquence peuvent être provoquées par des pertes importantes de production, de l'îlotage d'un groupe sur ses auxiliaires ou son passage en réseau séparé, ou d'un défaut dont la chute de tension résultante entraîne une réduction de la charge. Cependant, ces variations sont en général très faibles (moins de 1%) et ne nuisent pas au bon fonctionnement des équipements électriques ou électroniques. Pour les pays européens dont les réseaux sont interconnectés, la norme (EN 50160) précise que la fréquence fondamentale mesurée sur 10s doit se trouver dans l'intervalle $50\text{HZ} \pm 1\%$ pendant 99,5% de l'année, et $- 6\% \div 4\%$ durant 100% du temps. Il faut également remarquer que les variations de fréquence peuvent être bien plus importantes pour les réseaux autonomes.

➤ **Forme d'onde**

La forme d'onde des trois tensions formant un système triphasé doit être la plus proche possible d'une sinusoïde. En cas de perturbations au niveau de la forme d'onde, la tension n'est plus sinusoïdale et peut en général être considérée comme une onde fondamentale à 50Hz associée à des ondes de fréquences supérieures ou inférieures à 50 Hz appelées également harmoniques. Les tensions peuvent également contenir des signaux permanents mais non-périodiques, alors dénommés bruits.

➤ **Symétrie**

La symétrie d'un système triphasé se caractérise par l'égalité des modules des trois tensions et celle de leurs déphasages relatifs. La dissymétrie de tels systèmes est communément appelé déséquilibre.

I.3.1.2 Qualité du courant

La qualité du courant est relative à une dérive des courants de leur forme idéale, et se caractérise de la même manière que pour les tensions par quatre paramètres : amplitude, fréquence, forme d'onde et symétrie. Dans le cas idéal, les trois courants sont d'amplitude et de fréquence constante, déphasés de $2\pi/3$ radians entre eux, et de forme purement sinusoïdale.

Le terme « qualité du courant » est rarement utilisé, car la qualité du courant est étroitement liée à la qualité de la tension et la nature des charges. Pour cette raison, « la qualité de l'énergie électrique » est souvent réduite à « la qualité de la tension ». C'est l'hypothèse que nous ferons dans la suite de ce document, où le terme de « qualité de l'énergie » s'applique uniquement à celle de la tension.

I.3.2 Caractéristiques de l'onde de tension et de courant

I.3.2.1 Valeurs efficaces

Les valeurs efficaces de la tension et du courant sont données respectivement par les équations (I.3) et (I.4) [3].

$$V = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2} \quad (\text{I.3})$$

$$I = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} \quad (\text{I.4})$$

I.3.2.2 La puissance apparente

La puissance apparente est la puissance disponible, son expression est donnée par l'équation (I.5)

$$S=VI=\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2} \cdot \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad (\text{I.5})$$

I.3.2.3 Les puissances actives, réactives et déformantes

- 1) La puissance active est la puissance qui se transforme en travail, elle est mesurée en Watt, son expression est donnée par l'équation (I.6)

$$P = \frac{1}{T} \int_T V(t) \cdot I(t) dt = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos \varphi_h \quad (\text{I.6})$$

$$\varphi_h = \alpha_h - \beta_h \quad (\text{I.7})$$

α_h : Phase initiale de la tension harmonique d'ordre h

β_h : Phase initiale du courant harmonique d'ordre h,

φ_h : Déphase de la tension harmonique d'ordre h sur le courant harmonique d'ordre h.

- 2) La puissance réactive est une puissance qui est absorbée au réseau et qui ne se transforme pas en travail. Elle est mesurée en VAR et son expression est donnée par (I.8)

$$Q = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \sin \varphi_h \quad (\text{I.8})$$

- 3) La puissance déformante est donnée par (I.9) :

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2} \cdot \sqrt{\sum_{\substack{h=1 \\ h \neq n}}^{\infty} I_h^2} \quad (\text{I.9})$$

Cette puissance est véhiculée par les tensions et les courants harmoniques de rang différents, elle est dite puissance déformante et notée D.

I.3.2.4 Le Facteur de puissance

Le facteur de puissance est donné par :

$$F = \frac{P}{S} = (\sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos \varphi_h) / (\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2} \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}) \quad (\text{I.10})$$

Quelques effets des harmoniques dans le cas où la tension est sinusoïdale :

Valeur efficace de la tension et du courant :

$$V(t) = V_1 \sqrt{2} \sin(\omega t - \alpha) \quad (\text{I.11})$$

$$i(t) = \sum_{h=1}^{\infty} I_h \sqrt{2} \sin(h\omega t - \beta) \quad (\text{I.12})$$

Avec : $\varphi_1 = \alpha_1 - \beta_1$ (I.13)

La Puissance active et réactive :

$$P_1 = V_1 I_1 \cos \varphi_1 \quad (\text{I.14})$$

$$Q_1 = V_1 I_1 \sin \varphi_1 \quad (\text{I.15})$$

Facteur de puissance :

$$F = \frac{P}{S} = V_1 I_1 \cos \varphi_1 \frac{V_1 I_1 \cos \varphi_1}{V_1 \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}} = \cos \varphi_1 \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{D^2}{P^2 + Q^2}}} \quad (\text{I.16})$$

De l'équation (I.12), nous pouvons conclure que les courants harmoniques accroissent la valeur efficace, donc il aura une augmentation des pertes par effets Joules. Les composantes harmoniques véhiculent une puissance harmonique dite déformante, parce qu'elle est créée par les harmoniques et que ces derniers déforment l'onde sinusoïdale, cette puissance est de nature réactive car les composantes harmoniques ne contribuent pas à la production de la puissance active.

De (I.16), nous pouvons aisément voir que F est inférieur à 1, les harmoniques réduisent le facteur de puissance donc réduisent la puissance disponible.

I.4 Origines des harmoniques

Depuis plusieurs années, les convertisseurs statiques (redresseurs, gradateurs...) prolifèrent tant dans les équipements industriels que domestiques. Par exemple, ces dispositifs sont fréquemment employés dans la régulation de vitesse de moteurs à courant continu et alternatif, ainsi que dans les alimentations des ordinateurs (figure I.1).

Ils sont également utilisés dans les variateurs de lumière, les régulations de systèmes de chauffage électrique et les variateurs de vitesse des moteurs universels ... [4], [5].

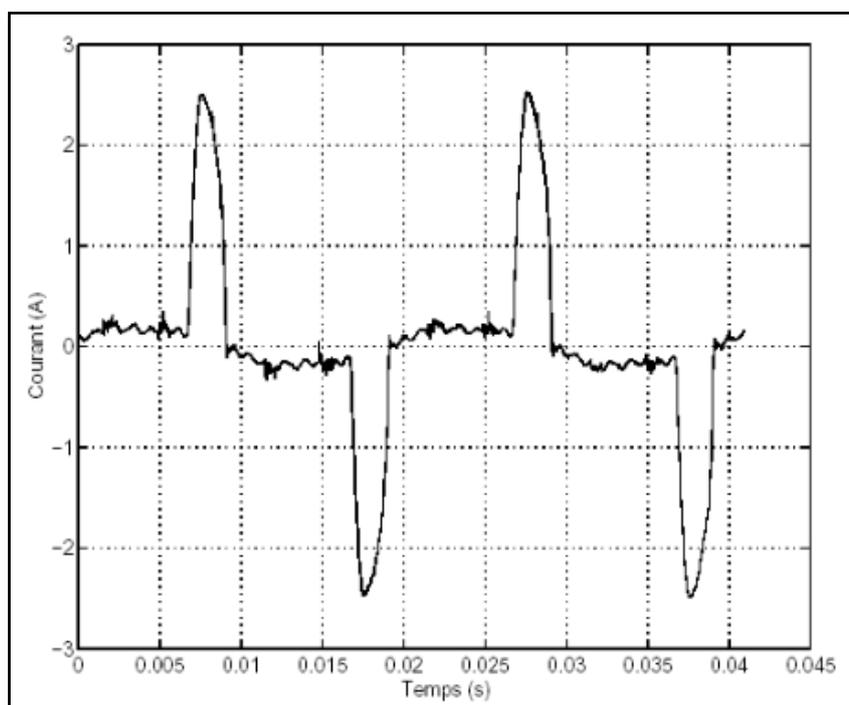


Figure I.1 : Courant d'une alimentation à découpage d'un écran de micro-ordinateur

L'utilisation de ces convertisseurs statiques dans les installations de conversion d'énergie électrique a considérablement contribué à améliorer les performances et l'efficacité de ces systèmes. En revanche, ils ont participé à détériorer la "qualité" du courant et de la tension des réseaux de distribution. En effet, ces systèmes consomment des courants non-sinusoïdaux, même s'ils sont alimentés par une tension sinusoïdale, ils sont considérés comme des charges non-linéaires émettant des courants harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale, ou parfois à des fréquences quelconques, ils se comportent comme des générateurs de courants harmoniques. Par l'intermédiaire de l'impédance de court-circuit du réseau, les courants harmoniques déforment la tension de celui-ci.

Les déformations du courant et de la tension peuvent perturber le fonctionnement normal d'autres équipements électriques. C'est pourquoi, les distributeurs d'énergie ayant la contrainte de fournir une tension sinusoïdale, prennent en charge l'atténuation des perturbations harmoniques au moyen d'installations de forte puissance. Les nouvelles réglementations internationales imposent aux consommateurs des limites aux harmoniques, engendrées par leurs systèmes, tant en courant qu'en tension.

I.5 Conséquences de la pollution harmonique

De nombreux effets des harmoniques sur les installations et les équipements électriques peuvent être cités. Les effets les plus importants sont l'échauffement et l'interférence avec les réseaux.

- **L'échauffement :**

Les pertes totales par effet Joule sont la somme de celles du fondamental et des harmoniques :

$$P_{\text{pertes}} = \sum_{h=1}^{\infty} I_h^2 R \quad (\text{I.17})$$

Avec I_h le courant harmonique de rang h qui représente le fondamental pour $h=1$, et R la résistance traversée par le courant I_h . Les harmoniques augmentent aussi les pertes fer (pertes par courants de Foucault). Ils prennent de l'importance dans les matériels utilisant les circuits magnétiques (moteurs, transformateurs...). Ce sont des effets à termes qui se traduisent par une fatigue...

- **Le vieillissement des isolants :**

Souvent dû à une contrainte en tension consécutive à la présence des harmoniques, et donc à une augmentation locale du courant de fuite, ou encore à l'échauffement exagéré dans les conducteurs. Le plus spectaculaire de ce type d'effet est la destruction d'équipement (condensateur, disjoncteur...).

- **L'interférence dans les systèmes de télécommunication [6]:**

L'importance de ces interférences est fonction de l'amplitude et de la fréquence des courants électriques ainsi que de l'importance du couplage électromagnétique entre les réseaux. Dans le cas de résonance, une partie des réseaux de télécommunication peut être rendue inutilisable.

- **Dysfonctionnement de certains équipements électriques :**

En présence des harmoniques, la tension ou/et le courant peut changer plusieurs fois de signe dans une demi-période, par conséquent, l'équipement sensibles au passage par zéro de ces grandeurs électriques sont perturbés.

Différentes grandeurs sont définies pour chiffrer ces perturbations. Parmi celles-ci les plus utilisées sont :

Le taux harmonique de rang h :

$$\text{THD} = \frac{f_h}{f_1} \quad (\text{I.18})$$

Où f_h représente la composante harmonique de rang h et f_1 représente la composante fondamentale

Le taux global de distorsion harmonique : On caractérise la pollution d'un réseau de manière globale par le taux de distorsion harmonique en tension ou en courant :

$$\text{THD}(\%) = 100 \sqrt{\sum_2^{\infty} \frac{f_h^2}{f_1^2}} \quad (\text{I.19})$$

En général, les harmoniques pris en compte dans un réseau électrique sont inférieurs à 2500 Hz (rang 50), ce qui correspond au domaine des perturbations basses fréquences au sens de la normalisation. Les harmoniques de fréquence plus élevées sont fortement atténuées par l'effet de peau et par la présence des inductances de lignes. De plus, les appareils générant des harmoniques ont, en grande majorité un spectre d'émission inférieur à 2500 Hz, c'est la raison pour laquelle le domaine d'étude des harmoniques s'étend généralement de 100 à 2500 Hz c'est-à-dire des rangs 2 à 50 [01].

- **Le facteur de puissance :**

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. Une faible valeur du facteur de puissance se traduit par une mauvaise utilisation de ces équipements, Dans le cas où il y a des harmoniques, une puissance supplémentaire appelée la puissance déformante (D).

Les puissances dans le cas périodique non sinusoïdal :

La puissance active dans le cas périodique non-sinusoïdal est définie par :

$$P = \sum_n P_n = \sum_n U_n I_n \cos \Phi_n \quad (\text{I.20})$$

Où :

U_n et I_n sont les valeurs RMS (Real Mean Square) de la tension et du courant harmonique d'ordre n, et Φ_n est le déphasage entre eux. La puissance réactive est définie par :

$$Q = \sum_n Q_n = \sum_n U_n I_n \sin \Phi_n \quad (\text{I.21})$$

Cependant, ces définitions ne sont pas conformes à l'équation de triangle des puissances :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (\text{I.22})$$

La puissance apparente est définie par :

$$S^2 = U^2 I^2 = \sum_n U_n^2 \sum_n I_n^2 \quad (I.23)$$

Alors :

$$S^2 = \sum_2 U_n^2 \sum_2 I_n^2 \geq (\sum U_n I_n \cos \Phi_n)^2 + (\sum U_n I_n \sin \Phi_n)^2 \quad (I.24)$$

Donc une quantité nommée la puissance déformante est donné par l'équation suivante :

$$D^2 = S^2 - P^2 - Q^2 \quad (I.25)$$

On peut donc écrire la puissance apparente de la manière suivante :

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (I.26)$$

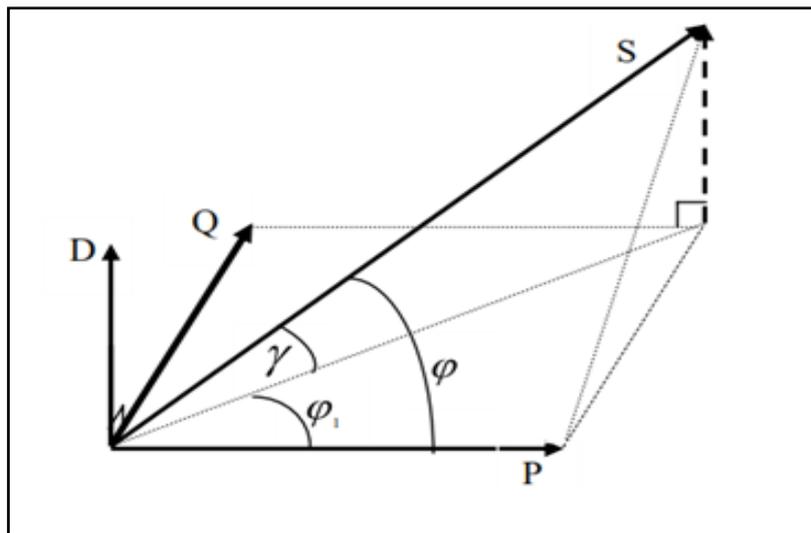


Figure I.2 : Diagramme de Fresnel de la puissance déformante.

La puissance déformante se compose principalement des produits croisés de la tension et du courant harmonique de différents ordres et sera réduite à zéro si les harmoniques sont réduits à zéro, c.-à-d. aux conditions sinusoïdales.

$$D = \sqrt{\sum_{\substack{i=2 \\ j=2 \\ i \neq j}}^{\infty} U_i^2 I_j^2} \quad (I.27)$$

Si uniquement le courant est non-sinusoïdal alors :

$$D = U_1 \sqrt{\sum_1^{\infty} I_h^2} \quad (I.28)$$

L'inconvénient majeur de cette définition est que'il n'est pas sûr que le facteur de puissance sera égal à l'unité si la puissance réactive (par cette définition) est réduite à zéro et que

la puissance réactive peut être totalement compensée en insérant des composants inductifs ou capacitifs.

Le facteur de puissance (F.P.) devient :

$$\text{F.P.} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} = \cos \Phi \sin \gamma \quad (\text{I.29})$$

Voit bien que les harmoniques affectent aussi le facteur de puissance.

I.6 La propagation des harmoniques sur les réseaux

Soit un transformateur HTB/HTA alimentant deux départs moyenne tension. L'un de ces départs comporte une source harmonique. Le réseau de distribution est composé par des lignes et des transformateurs. Comme l'impédance des charge est nettement grande que celle des lignes, une part importante du courant harmonique tend à circuler en direction des postes sources (les courants harmoniques remontent à la source car ils suivent le parcours le moins impédant). Aussi, le problème de propagation des harmoniques de courant se ramène à l'étude d'un simple diviseur de tension étant donné que le jeu de barre HTA vu de départ propre apparaît comme une source de tension.

La propagation des harmoniques sur le réseau est schématisée dans la figure :

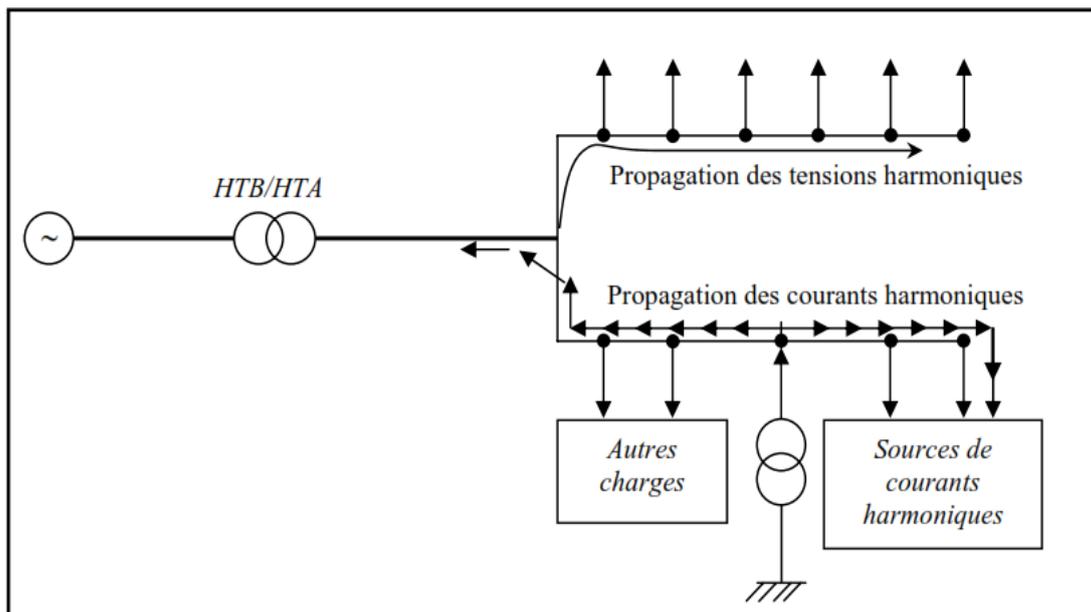


Figure I.3 : La propagation des harmoniques sur les réseaux.

I.7 Norme et réglementation :

Dans le but :

- D'épargner à l'utilisateur de l'énergie électrique, les désagréments engendrés par la

présence des harmoniques.

- D'assurer la longévité et la sécurité des différents équipements constituant le réseau et ceux qui sont branchés à ce dernier.

Des normes fixant un seuil d'injection harmonique maximale à ne pas dépasser, ces normes ont été élaborées par différents organismes, ils peuvent être soit nationaux, notamment UTE-CEF (Union Technique de l'Electricité- Comité Electrotechnique Français), régionaux, notamment le CENELEC (Comité de normalisation Electrotechnique) en Europe ou internationaux, notamment CEI (Comité Electrotechnique International). Il arrive que des entreprises édictent leurs propres règles, notamment EDF en France. Les règles de limitation des courants harmoniques recommandées aux clients par EDF sont données dans le tableau ci-dessous [8]

<i>Rangs impairs</i>	$I_h/I_1(\%)$	<i>Rangs pairs</i>	$I_h/I_1(\%)$
3	4	2	2
5 et 7	5	4	1
9	2	>4	0,5
11 et 13	3		
>13	2		

Tableau I.2 : Limitation des courants harmoniques édictée par EDF

Les limitations en tension harmonique que les clients d'EDF doivent respecter sont :

- Pour un harmonique pair : $\frac{V_h}{V_1} \leq 0.6\%$
- Pour un harmonique impair : $\frac{V_h}{V_1} \leq 1\%$
- Pour le taux de distorsion global de tension : $THD \leq 1.6\%$

Il est d'usage de dire que, dans les installations industrielles, les tensions harmoniques dont le THD est inférieur à 5% ne produisent pas d'effet notable. Entre 5% et 7% on commence à observer des effets, et pour plus de 10% les effets sont quasi certains. Concernant la puissance réactive, il est autorisé aux clients à en consommer, sans être facturés, jusqu'à 40% de la puissance active absorbée. Cela se traduit, pour des charges linéaires, par un facteur de puissance ($\cos \varphi \geq 0.928$).

I.7.1 Taux de distorsion harmonique THD (%)

Le taux individuel d'harmonique est défini comme le rapport (en %) de l'amplitude de l'harmonique au rang h ramenée à celle du fondamental :

$$T_{aux(h)} = 100 \frac{y_{h,trms}}{y_{1,trms}} (\%) \quad (I.30)$$

La notion la plus couramment usitée est le taux global de distorsion harmonique THD (Total Harmonic Distorsion) pour caractériser le taux de déformation d'une onde électrique. C'est le rapport entre la valeur efficace des harmoniques à celle du fondamental seul (norme IEC 61000-2-2) :

$$\text{THD} = 100 \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} y_{h, \text{trms}}^2}}{y_{1, \text{trms}}} (\%) \quad (\text{I.31})$$

Il est possible, de façon moins usuelle, de définir le rapport entre la valeur efficace des Harmoniques à celle de la grandeur déformée :

$$\text{THD} = 100 \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} y_{h, \text{trms}}^2}}{\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} y_{h, \text{trms}}^2}} (\%) \quad (\text{I.32})$$

I.8 stratégies de limitation des harmoniques

I.8.1. Stratégies classiques

- **Augmentation de la puissance de court-circuit :**

L'impédance de court-circuit en un point du réseau est inversement proportionnelle et d'autant plus réduite si la puissance de court-circuit est grande.

- **Pont dodécaphasé :**

Le redresseur triphasé en pont ne laisse que les harmoniques $12K \pm 1$ au primaire du transformateur. Nous obtiendrons le même résultat en utilisant deux transformateurs ayant respectivement pour montage triangle-étoile et étoile-étoile. Cependant, cette solution augmente l'impédance de la ligne et par voie de conséquence la distorsion harmonique de tension. En plus, le nombre des semi-conducteurs utilisés et le transformateur à deux enroulements au secondaire rendent cette solution onéreuse.[9]

- **L'utilisation de convertisseurs :**

L'utilisation de convertisseurs peu polluants qui ont pour effet de diminuer la distorsion harmonique (redresseur MLI), et en jouant aussi sur les stratégies de commande des onduleurs [10]

I.8.1.1 Filtrage passif

Le filtrage passif se fait par la mise en parallèle avec l'impédance du réseau d'un circuit de très faible impédance devant l'impédance du réseau à la fréquence de l'harmonique que l'on veut éliminer, le courant choisit le chemin le moins résistant et de ce fait l'harmonique pour lequel le filtre a été dimensionné, sera dévié à travers ce dernier. Le

facteur de qualité, le rapport de la résistance ou de la capacitance résonante par rapport à la résistance du filtre, que détermine la précision de l'accord doit être assez élevé, supérieur à 50, toutefois la bande passante étant inversement proportionnel au facteur de qualité, de forte valeur de ce dernier peut être gênante dans le cas d'un filtre même légèrement désaccordé.

On distinguera deux types de filtres assurant la limitation des harmoniques :

- Le filtre résonant (ou filtre de type shunt) ;
- Le filtre amorti.

I.8.1.2 Filtre résonant :

Le filtre résonant (ou filtre shunt) est composé d'une inductance L en série avec un condensateur C.

Les valeurs d'inductance L et de capacité C sont calculées à la fréquence de résonance correspondant à la fréquence de l'harmonique à éliminer.

Lorsque l'on souhaite réaliser le filtrage d'un signal déformé entaché par plusieurs courants harmoniques, il est nécessaire de prévoir un ensemble de filtres où chacun d'entre eux agit sur le rang harmonique à éliminer (Figure I.5)

Un filtre shunt efficace doit posséder un grand facteur de qualité Q. Celui-ci s'exprime par la Relation suivante : $Q = \frac{Z}{r}$, avec $r \ll x$ soit : $Q = \frac{x}{r}$ puisque $Z = \sqrt{r^2 + x^2}$.

L'ordre de grandeur de ce facteur est de 75

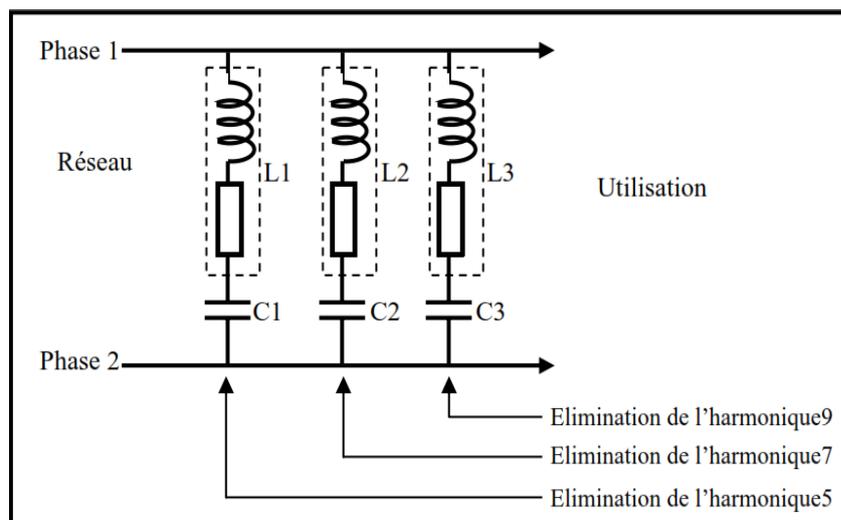


Figure I.5 : Filtres résonants agissant sur plusieurs rangs harmoniques.

I.8.1.3 Filtre amorti

Le filtre amorti est constitué d'une structure identique au filtre résonant, avec en supplément, une résistance R branchée en parallèle sur l'inductance (Figure I.6).

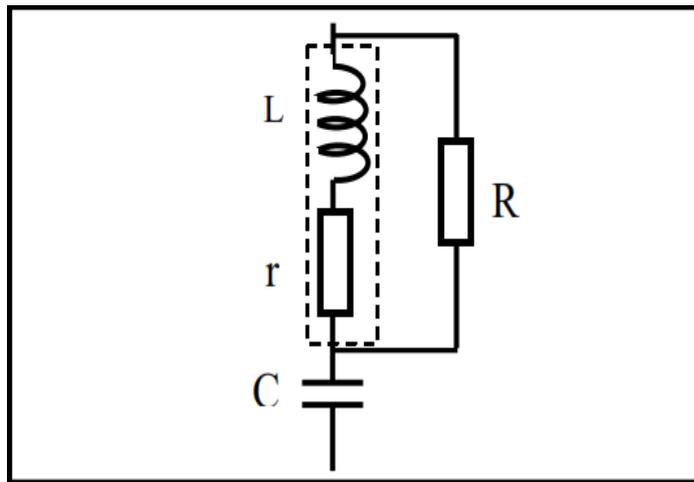


Figure I.6 : Structure du filtre amorti.

Il est moins sélectif, atténuant les harmoniques supérieurs ou voisins de son rang d'accord. [11]

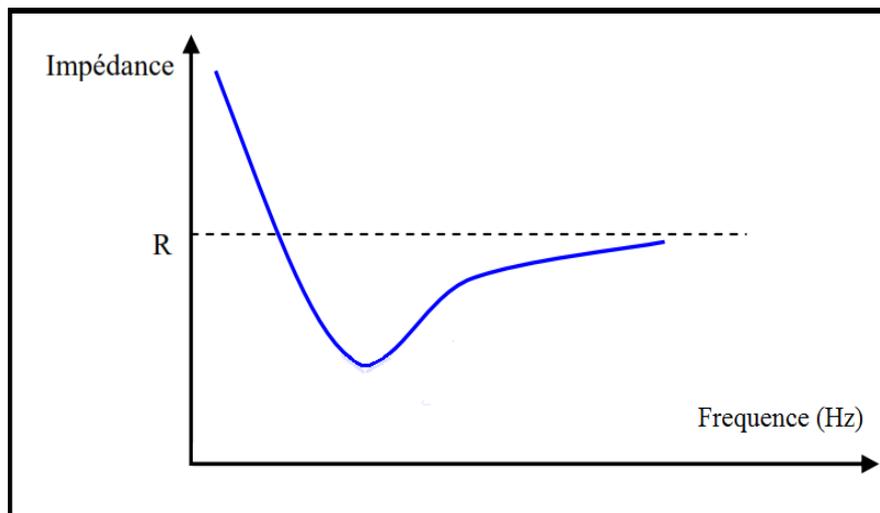


Figure (I.7) : représente l'évolution de leur impédance en fonction de la fréquence

Ce filtre assure l'atténuation des harmoniques dans une plus large bande de fréquence que le filtre résonant mais sans éliminer concrètement ces perturbations. Il ne réalise donc pas la suppression de ces harmoniques, mais contribue à améliorer sensiblement le taux de distorsion harmonique global d'une installation polluée.

Pour des installations utilisant le filtrage harmonique, on peut concevoir de mettre en œuvre un filtre résonant pour les rangs 5 et 7, associé à un filtre amorti accordé pour h égale à 13.

Ces dispositifs sont utilisés pour empêcher les courants harmoniques de se propager dans les réseaux électriques. Ils peuvent aussi être utilisés pour compenser la puissance réactive. Malgré leur large utilisation dans l'industrie, ces dispositifs peuvent présenter beaucoup d'inconvénients [12] :

- Manque de souplesse à s'adapter aux variations du réseau et de la charge,
- Problème de résonances avec l'impédance du réseau,
- Leur efficacité dépend de l'impédance du réseau, mal connue et susceptible de Varier.
- Leur incapacité de couvrir une large bande de fréquence, d'où l'utilisation de plusieurs filtres de rang d'accord différents.

Ces inconvénients et l'apparition de nouveaux composants semi-conducteurs, comme les thyristors GTO et les transistors IGBT, ont permis d'envisager de nouvelles solutions aux perturbations du réseaux électrique.

I.8.2 Filtrage Actif

Le filtrage actif constitue aujourd'hui une solution plus sophistiquée que le filtrage passif, bénéficiant des technologies les plus performantes et constamment améliorée par les constructeurs.

Le principe de fonctionnement du filtre actif réside dans le fait que celui-ci produit des courants qui s'opposent aux courants harmoniques créés par les charges non linéaires, tendant ainsi à rétablir un courant appelé du réseau quasi sinusoïdal.

Ces filtres actifs sont encore appelés compensateurs actifs. Ils sont utilisés en parallèle ou en série d'une installation nécessitant un traitement harmonique.[13]

Dans ce qui suit, nous donnons les structures les plus utilisés dans la littérature, à savoir les filtres parallèle série, combiné parallèle-série et les structures hybrides actifs - passifs.

I.8.2.1 Le filtre actif parallèle (F.A.P)

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau, comme le montre la Figure I.8, est le plus souvent commandé comme un générateur de courant [13]. Il injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci. Le courant côté réseau est alors sinusoïdal. Ainsi l'objectif du filtre actif parallèle (F.A.P) consiste à empêcher les courants perturbateurs (harmoniques, réactifs et déséquilibrés), produits par des charges polluantes, de circuler à travers l'impédance du réseau, située en amont du point de connexion du filtre actif.

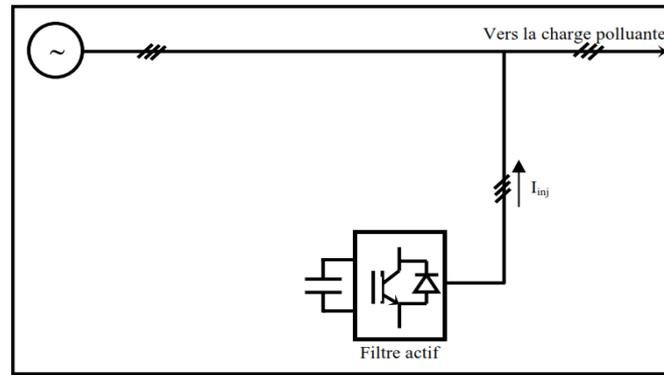


Figure I.8 : Filtre actif parallèle

I.8.2.2 Le filtre actif série (FAS)

Le filtre actif série se comporte dans ce cas, comme le montre la Figure (I.9), comme une source de tension qui s'oppose aux tensions perturbatrices (creux, déséquilibre, harmonique) venant de la source et également à celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau [58]. Ainsi la tension aux bornes de la charge à protéger est purement sinusoïdale.

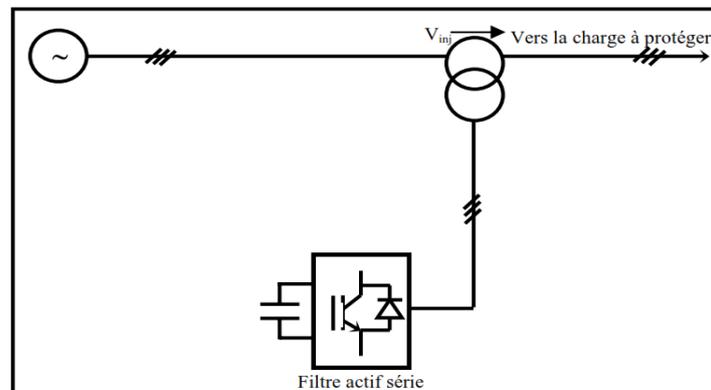


Figure I.9 : Filtre actif série

I.8.3 La Combinaison Parallèle-Série Actifs (UPQC)

La figure 1.12 schématise la configuration de la combinaison parallèle-série actifs qui s'appelle aussi (Unified Power Quality Conditionner UPQC), elle résulte de l'association des deux filtres actifs de puissance parallèle et série. Cette structure bénéficie des avantages de deux types de filtres actifs série et parallèle et elle permet d'assurer simultanément un courant sinusoïdal et une tension du réseau électrique également sinusoïdale [13].

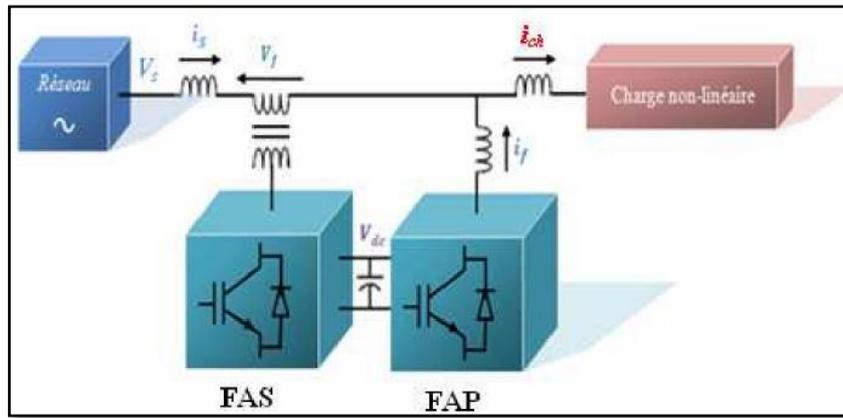


Figure I.12. Combinaison parallèle-série des filtres actifs

- **Combinaison du filtre actif série et du filtre passif parallèle :**

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 Fig. I.13.

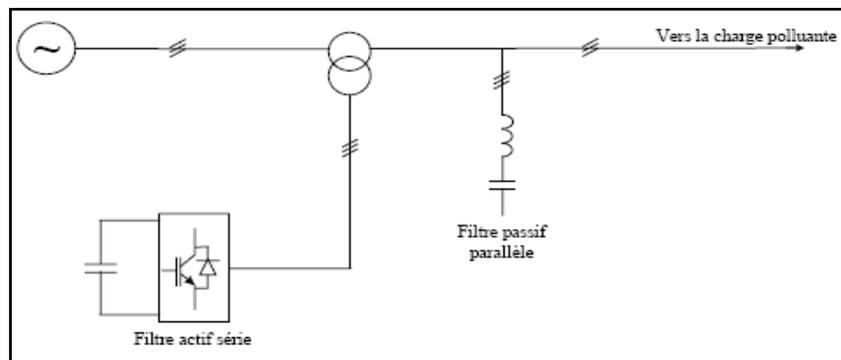


Fig. I.13 : Filtre actif série et filtre passif parallèle

- **Combinaison du filtre actif parallèle et du filtre passif parallèle :**

Le principe de fonctionnement de cette configuration, présentée en Fig. I.14, est la même que la précédente avec l'avantage de réduire encore le dimensionnement du filtre actif série car le courant qui le traverse est plus faible. De plus, le filtre actif série est à l'abri d'un éventuel court-circuit de la charge.

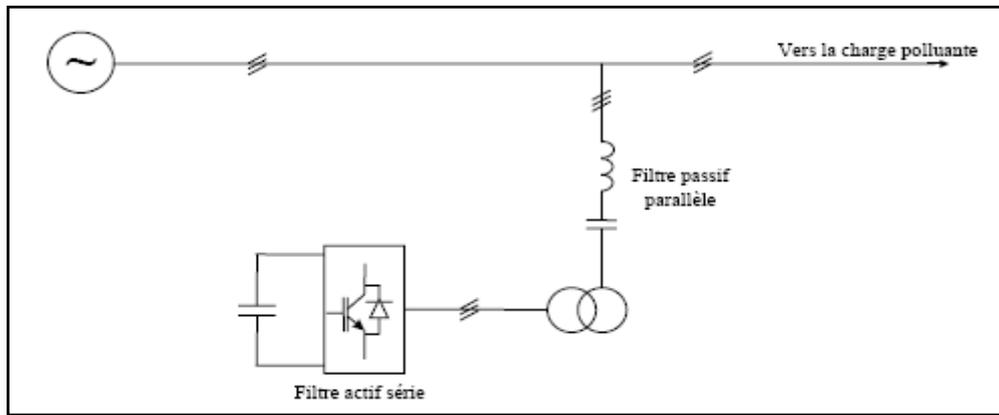


Fig. I.14 : Filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté différents types de perturbations affectant l'onde de tension du réseau électrique. Comme nous avons pu le constater, les harmoniques et les déséquilibres de courant et de tension, et les conséquences de la pollution harmonique sur l'installation électrique, l'origine de la perturbation de signal dans les réseaux.

Plusieurs solutions traditionnelles et modernes de dépollution ont été présentées brièvement dans cette partie telle que Filtrage Actif : Le filtre actif série (FAS) Le filtre actif parallèle (F.A.P), il existe des autres méthodes pour la compensation des pollution harmonique , dans notre étude nous intéresser au filtre actif parallèle pour la compensation des harmonique du courant dans le réseau

CHAPITRE II

Modélisation et stratégies de commande de l'onduleur à trois niveaux de type NPC

II.1 Introduction :

Les onduleurs de tension constituent une fonction incontournable de l'électronique de puissance. Ils sont présents dans des domaines d'application les plus variés, dont la compensation des courant harmonique dans les réseaux et celui de la variation de vitesse des machines à courant alternatif et d'autre utilisations.

La forte évolution de cette fonction s'est appuyée, d'une part, sur le développement des composants à semi-conducteurs entièrement commandables ,puissants, robustes et rapides, et d'autre part, sur l'utilisation quasi-généralisée des techniques dites de modulation de largeurs d'impulsions .Dans les applications de fortes puissances, la structure des onduleurs à trois niveaux est plus adaptée, par rapport à la structure classique, du fait que les tensions et courants de sortie présentent un taux d'harmoniques nettement inférieur. La tension aux bornes de chaque interrupteur est divisée par deux et la fréquence de hachage est plus basse.

II.2 Modélisation d'un onduleur à trois niveaux à structure NPC

II.2.1 Structure de l'onduleur à trois niveaux à structure NPC

La structure choisie est celle de l'onduleur de tension triphasé à trois niveaux à structure NPC.

Plusieurs études sont faites sur les onduleurs à deux niveaux, aussi bien du point de vue modélisation que stratégie de commande. On va essayer surtout d'approfondir les parties concernant les onduleurs multi-niveaux. Et plusieurs structures sont possibles pour l'onduleur à trois niveaux. Nous avons dans ce cas la structure NPC (Neutral Point Clamping), cet onduleur est dit à trois niveaux parce qu'il délivre trois niveaux de tension ($+U_c$, 0 , $-U_c$). Cette structure est présentée à la figure (II.1) [14].

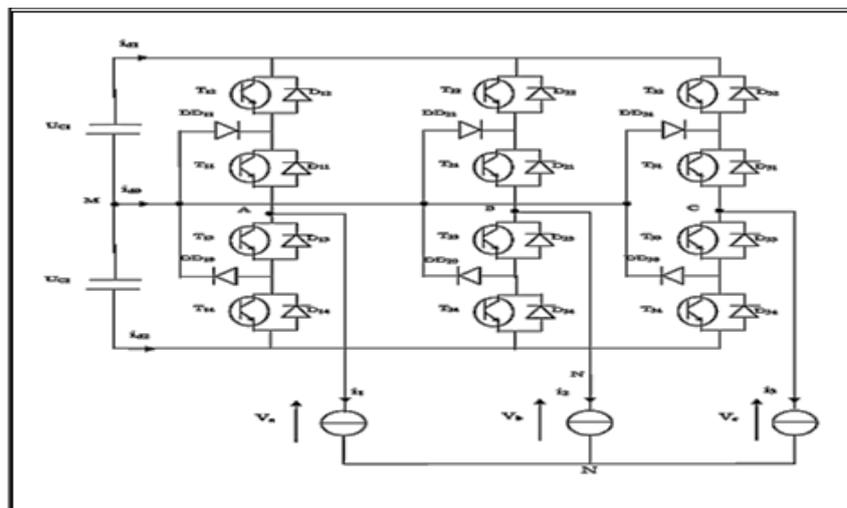


Figure (II.1) : Structure de l'onduleur triphasé à trois niveaux à structure NPC

II. 2. 2 Modélisation du fonctionnement d'un bras d'onduleur NPC à trois niveaux

L'onduleur à trois niveaux a une structure symétrique. Donc on procède par bras Figure (II.2), ainsi, on définit en premier lieu un modèle global d'un bras sans a priori sur la commande.

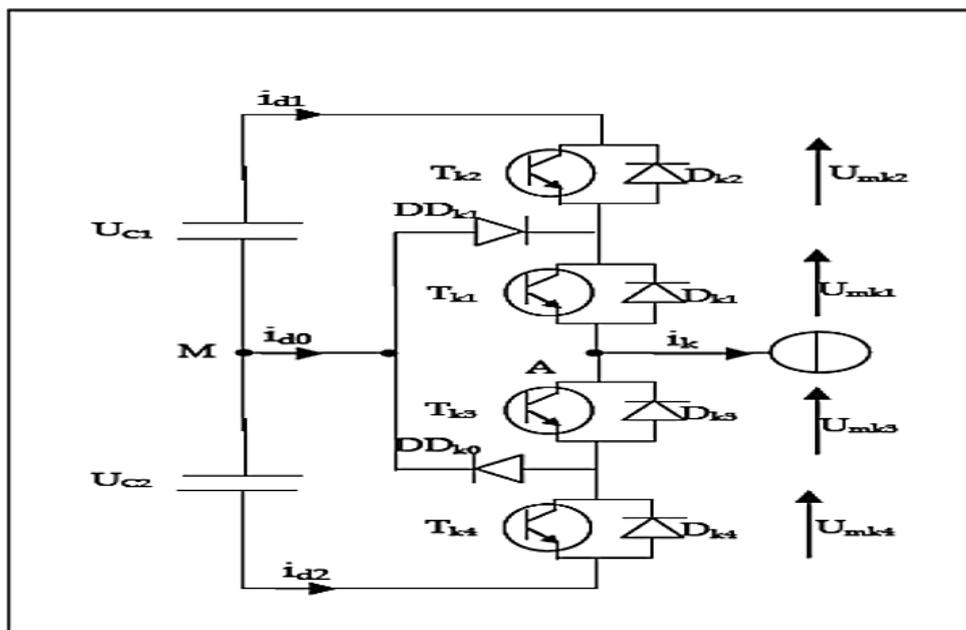


Figure (II.2) : Structure d'un bras d'onduleur triphasé à trois niveaux

II.2.3 Les différentes configurations d'un bras d'onduleur à trois niveaux [15]

Afin d'élaborer un modèle du fonctionnement de ces onduleurs à trois niveaux sans a priori sur la commande ; on représente chaque paire transistor diode par un seul interrupteur bidirectionnel figure (II. 3) et on procède par bras (grâce à la symétrie de l'onduleur triphasé).

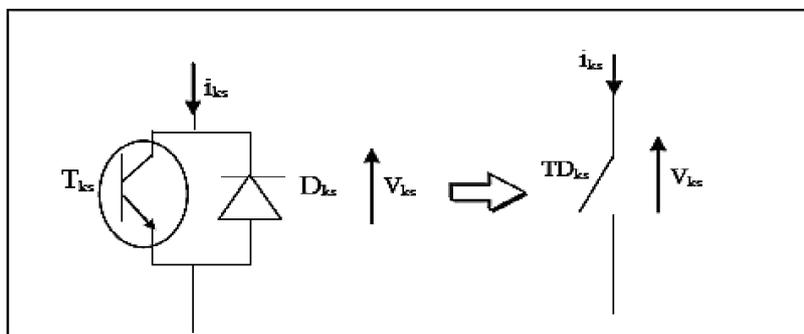


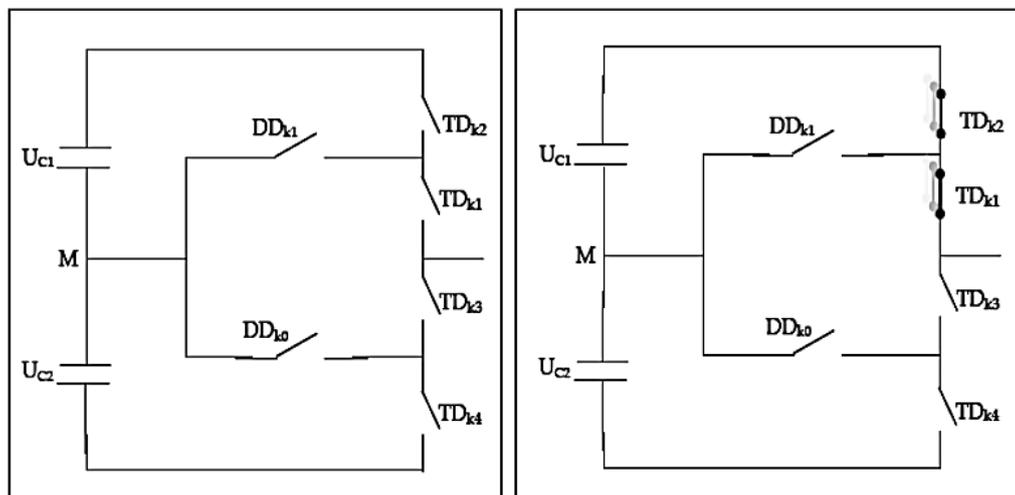
Figure (II. 3) : Interrupteur bidirectionnel équivalent de la paire diode-transistor

Une analyse topologique d'un bras montre cinq configurations possibles pour ce dernier. Ces différentes configurations sont présentées à la figure (II.4). Les grandeurs électriques caractérisant chacune de ces configurations sont données

dans le tableau (II. 1) (avec M origine des potentiels et V_K le potentiel du nœud k du bras k).
 Pour les configurations E_0 le potentiel V_K dépend de la source d'énergie alternative.

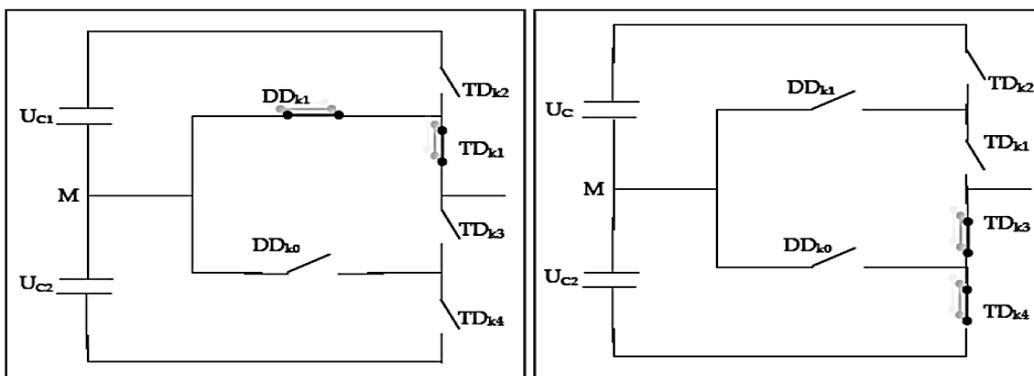
La configuration	La grandeur électrique
E0	$i_k = 0$
E1	$v_k = UC1 = UC$
E2	$v_k = 0$
E3	$v_k = -UC2 = -UC$
E4	$v_k = 0$

Tableau (II. 1) : Grandeurs électriques correspondantes pour chacune des configurations d'un bras k .



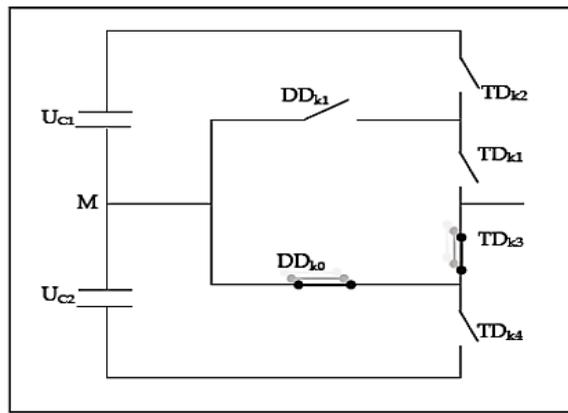
La configuration E0

la configuration E1



La configuration E2

la configuration E3



La configuration E4

Figure (II. 4) : Les différentes configurations possibles pour un bras d'onduleur à trois niveaux

II. 2. 4 Hypothèse

Les tensions d'entrée de l'onduleur sont supposées parfaites.

En pratique, cela se traduit par le fait que, quel que soit le courant i_k , délivré par cette alimentation, la tension à ses bornes reste constante $U_{c1}=U_{c2}$. La chute de tension aux bornes des semi-conducteurs est négligeable devant la tension d'alimentation qui est de l'ordre de quelques centaines de volts. [15].

II. 2. 5 Commande complémentaire pour l'onduleur à trois niveaux

Pour un onduleur triphasé à trois niveaux en mode commandable, et pour éviter le court-circuit des sources de tension par conduction de plusieurs interrupteurs, on définit la commande complémentaire suivante :

$$\begin{cases} B_{k1} = \overline{B_{k4}} \\ B_{k2} = \overline{B_{k3}} \end{cases} \quad (\text{II. 1})$$

B_{ks} commande de base du transistor T_{ks} d'un bras k.

Remarque :

un convertisseur statique est dit en mode commandable si les transitions entre les différentes configurations dépendent uniquement de la commande externe.

II. 2. 5. 1 Fonction de connexion

On définit les fonctions de connexion de demi bras F_{k1}^b, F_{k0}^b comme suit :

$$\begin{cases} F_{k1}^b = F_{k1} \cdot F_{k2} \\ F_{k0}^b = F_{k3} \cdot F_{k4} \end{cases} \quad (\text{II. 2})$$

Avec k est le numéro du bras k=1, 2,3 ; et On désigne par :

$$\begin{cases} 1: \text{le demi-bras de haut} \\ 0: \text{le demi-bras de bas} \end{cases}$$

II. 2. 5. 2 Modélisation aux valeurs instantanées

Les potentiels des nœuds A, B, C de l'onduleur triphasé à trois niveaux, par rapport au point M de la source de tension d'entrée, sont donnés par le système (II.3)

$$\begin{cases} V_{am} = F_{11}F_{12}F_{C1} - F_{13}F_{14}U_{c2} = (F_{11}F_{12} - F_{13}F_{14})U_c \\ V_{bm} = F_{21}F_{22}F_{C1} - F_{23}F_{24}U_{c2} = (F_{21}F_{22} - F_{23}F_{24})U_c \\ V_{cm} = F_{31}F_{32}F_{C1} - F_{33}F_{34}U_{c2} = (F_{31}F_{32} - F_{33}F_{34})U_c \end{cases} \quad (\text{II. 3})$$

avec : $U_{c1}=U_{c2}=U_c$

On constate d'après le système (II. 3), que l'onduleur de tension à trois niveaux est équivalent à deux onduleurs à deux niveaux en série.

$$\begin{cases} F_{11}^b = F_{11}F_{12} \\ F_{10}^b = F_{13}F_{14} \end{cases} \begin{cases} F_{21}^b = F_{21}F_{22} \\ F_{20}^b = F_{23}F_{24} \end{cases} \begin{cases} F_{31}^b = F_{31}F_{32} \\ F_{30}^b = F_{33}F_{34} \end{cases} \quad (\text{II. 4})$$

En introduisant l'expression de ces dernières dans les tensions d'entrée on aboutit à :

$$\begin{cases} V_{am} = F_{11}^b U_{c1} - F_{10}^b U_{c2} = (F_{11}^b - F_{10}^b)U_c \\ V_{bm} = F_{21}^b U_{c1} - F_{20}^b U_{c2} = (F_{21}^b - F_{20}^b)U_c \\ V_{cm} = F_{31}^b U_{c1} - F_{30}^b U_{c2} = (F_{31}^b - F_{30}^b)U_c \end{cases} \quad (\text{II. 5})$$

Les tensions composées sont données par :

$$\begin{cases} U_{AB} = V_{am} - V_{bm} = (F_{11}F_{12} - F_{21}F_{22})U_{c1} = (F_{13}F_{14} - F_{23}F_{24})U_{c2} \\ U_{BC} = V_{bm} - V_{cm} = (F_{21}F_{22} - F_{31}F_{32})U_{c1} = (F_{23}F_{24} - F_{33}F_{34})U_{c2} \\ U_{CA} = V_{cm} - V_{am} = (F_{31}F_{32} - F_{11}F_{12})U_{c1} = (F_{33}F_{34} - F_{13}F_{14})U_{c2} \end{cases} \quad (\text{II. 6})$$

II. 2. 5. 3 Modèle de connaissance

En utilisant la fonction de connexion des demi-bras Fks, on obtient:

$$\begin{bmatrix} U_{AB} \\ U_{BC} \\ U_{CA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_{11}^b \\ F_{21}^b \\ F_{31}^b \end{bmatrix} U_{c1} - \begin{bmatrix} F_{10}^b \\ F_{20}^b \\ F_{30}^b \end{bmatrix} U_{c2} \quad (\text{II. 7})$$

Les tensions simples sont données comme suite

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_{11}^b \\ F_{21}^b \\ F_{31}^b \end{bmatrix} \quad (\text{II. 8})$$

$$U_{c1} = \begin{bmatrix} F_{10}^b \\ F_{20}^b \\ F_{30}^b \end{bmatrix} U_{c2} \quad (\text{II. 9})$$

Dans le cas où $U_{c1}=U_{c2}=U_{c3}$, la relation (II. 9) s'écrirait comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_{11}^b - F_{10}^b \\ F_{21}^b - F_{20}^b \\ F_{31}^b - F_{30}^b \end{bmatrix} U_c \quad (\text{II. 10})$$

Les courants d'entrée i_{d1} et i_{d2} en fonction des courants de charge i_1, i_2, i_3 sont donnés par le système (II. 11) ci-dessous :

$$\begin{cases} i_{d1} = F_{11}^b i_1 + F_{11}^b i_2 + F_{11}^b i_3 \\ i_{d2} = F_{10}^b i_1 + F_{20}^b i_2 + F_{30}^b i_3 \end{cases} \quad (\text{II. 11})$$

Cette relation montre une analogie du point de vue des courants d'entrée des onduleurs à trois niveaux ainsi pour l'onduleur deux niveaux, tout se passe, comme si le courant i_{d1} était le courant d'entrée de l'onduleur à deux niveaux du haut, et i_{d2} celui de l'onduleur à deux niveaux du bas.

L'équation au nœud, permet d'écrire:

$$i_{d0} = i_1 + i_2 + i_3 - i_{d1} - i_{d2} \quad (\text{II. 12})$$

En introduisant la relation (dans l'équation (II. 12) on obtient (II. 13)

$$i_{d0} = (-1-F_{11}^b-F_{10}^b) \cdot i_1 + (-1-F_{21}^b-F_{20}^b) \cdot i_2 + (-1-F_{31}^b-F_{30}^b) \cdot i_3 \quad (\text{II. 13})$$

D'où on aura les relations de conversion suivantes :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ i_{d1} \\ i_{d2} \\ i_{d3} \end{bmatrix} = (N(t)) \cdot \begin{bmatrix} U_{c1} \\ U_{c2} \\ i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 14})$$

$[N(t)] =$

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{3}(2F_{11}^b - F_{21}^b - F_{31}^b) & -\frac{1}{3}(2F_{10}^b - F_{20}^b - F_{30}^b) & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{3}(-F_{11}^b + 2F_{21}^b - F_{31}^b) & -\frac{1}{3}(-F_{10}^b + 2F_{20}^b - F_{30}^b) & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{3}(-F_{11}^b - F_{21}^b + 2F_{31}^b) & -\frac{1}{3}(-F_{10}^b - F_{20}^b + 2F_{30}^b) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & F_{11}^b & F_{21}^b & F_{31}^b \\ 0 & 0 & F_{10}^b & F_{20}^b & F_{30}^b \\ 0 & 0 & (-1-F_{11}^b-F_{10}^b) & (-1-F_{21}^b-F_{20}^b) & (-1-F_{31}^b-F_{30}^b) \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

Remarque : un convertisseur statique est dit en mode commandable si les transitions entre les différentes configurations dépendent uniquement de la commande externe.

II. 3 Les différentes stratégies de commande de l'onduleur à trois niveaux

II. 3.1 Commande par MLI [16]

Les onduleurs peuvent être améliorés à l'aide d'un filtrage ou par utilisation des systèmes en PWM (Pulse Width Modulation) qui permettent grâce à la modulation de la longueur des impulsions d'obtenir une onde de sortie sinusoïdale. Les signaux de commande des interrupteurs sont déterminés par l'intersection d'une référence sinusoïdale appelée "modulatrice" de fréquence f avec une triangulaire de haute fréquence f_p appelée "porteuse".

Le module PWM, servant à générer un signal modulé en largeur d'impulsion (PWM), dont le rapport cyclique (α) est modifiable par le programme du PIC ou par une commande analogique.

- Modulation sinusoïdale classique :

les signaux de commande des interrupteurs sont obtenus à partir des intersections des trois signaux de référence sinusoïdaux déphasés entre eux de 120° , de fréquence $f_{\text{réf}}$ et d'amplitude $V_{\text{réf}}$, avec un signal triangulaire d'amplitude V_p et de fréquence f_p , très supérieure à $f_{\text{réf}}$.

- Modulation sinusoïdal triangles multiples :

Cette technique est basée, dans son principe, sur la modulation sinusoïdale classique. Pour un onduleur à trois niveaux, elle recommande l'utilisation des signaux triangulaires (porteuse) de même fréquence f_p et de même amplitude V_p . Ces signaux triangulaires sont comparés, pour chaque phase, avec un signal de référence d'amplitude $V_{\text{réf}}$ et de fréquence $f_{\text{réf}}$.

- Modulation sinusoïdale modifiée :

la technique de MLI sinusoïdale peut être modifiée en appliquant l'onde sinusoïdale durant le début et la fin d'un intervalle de 60° par demi-cycle; c'est à dire 0 à 60° et de 120° à 180° .

Ce type de modulation est connu sous le nom de MLI sinusoïdale modifiée. La composante fondamentale est ainsi augmentée et les caractéristiques des harmoniques sont améliorées.

II. 3.2 Commande à modulation de largeurs d'impulsions à une porteuses

Le principe de cette stratégie de commande, est de comparer le signal de référence ou modulante $V_{\text{réf}}$ de forme sinusoïdal avec le signal de n porteuses V_p de forme triangulaire, cette comparaison compte sur les intersections.

Toutes les stratégies de commande triangulo-sinusoidal sont caractérisées par deux paramètres essentiels :

- l'indice de modulation de fréquence "m_f" qui est défini comme étant le rapport de la fréquence de la porteuse (f_p) à la fréquence de la tension de référence f :

$$M_f = \frac{f_p}{f} \quad (\text{II. 18})$$

- taux de modulation "m_a" qui est le rapport de l'amplitude maximale de la tension de référence (V_m) et celle de la porteuse (U_p):

$$m_a = \frac{V_m}{V_p} \quad (\text{II. 19})$$

Dans le cas de la commande a deux porteuse on utilise deux porteuses identiques, décalées l'une par rapport à l'autre d'un niveau de tension U_p, afin de réduire le taux d'harmoniques des tensions de sorties.

Les équations de ces porteuses sont représentées par le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} V_{ref1} = V_{max} \sin(\omega t - \phi) \\ V_{ref2} = V_{max} \sin\left(\omega t - \phi - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_{ref3} = V_{max} \sin\left(\omega t - \phi - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{II. 20})$$

$$U_{p1}(t) = \begin{cases} 2U_{pm} \frac{t}{T_p}; & 0 \leq t \leq \frac{T_p}{2} \\ 2U_{pm} \left(1 - \frac{t}{T_p}\right); & \frac{T_p}{2} \leq t \leq T_p \end{cases} \quad (\text{II. 21})$$

On a l'algorithme de commande de la stratégie triangulo-sinusoidal pour le bras K d'onduleur trois niveaux a une porteuse est comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{si } (0 \leq |V_{ref}| \leq U_{pm}) \quad \text{et } (|V_{ref}| \leq U_p) \Rightarrow V_{k0} = 0 \\ \text{si } (0 \leq |V_{ref}| \leq U_{pm}) \quad \text{et } (|V_{ref}| > U_p) \quad \text{et } (V_{ref} > 0) \Rightarrow V_{k0} = U_{pm} \\ \text{si } (0 \leq |V_{ref}| \leq U_{pm}) \quad \text{et } (|V_{ref}| > U_p) \quad \text{et } (V_{ref} < 0) \Rightarrow V_{k0} = -U_{pm} \\ \text{si } (U_{pm} \leq |V_{ref}| \leq 2U_{pm}) \quad \text{et } (|V_{refk}| \leq U_p) \quad \text{et } (V_{ref} > 0) \Rightarrow V_{k0} = U_{pm} \\ \text{si } (U_{pm} \leq |V_{ref}| \leq 2U_{pm}) \quad \text{et } (|V_{refk}| \leq U_p) \quad \text{et } (V_{ref} < 0) \Rightarrow V_{k0} = -U_{pm} \\ \text{si } (U_{pm} \leq |V_{ref}| \leq 2U_{pm}) \quad \text{et } (|V_{refk}| > U_p) \quad \text{et } (V_{ref} > 0) \Rightarrow V_{k0} = 2U_{pm} \\ \text{si } (U_{pm} \leq |V_{ref}| \leq 2U_{pm}) \quad \text{et } (|V_{refk}| > U_p) \quad \text{et } (V_{ref} < 0) \Rightarrow V_{k0} = -2U_{pm} \end{array} \right. \quad (\text{II. 22})$$

II. 3.3 Résultat de simulation

Le schéma bloc Simulink de l'onduleur trois niveaux avec la commande MLI:

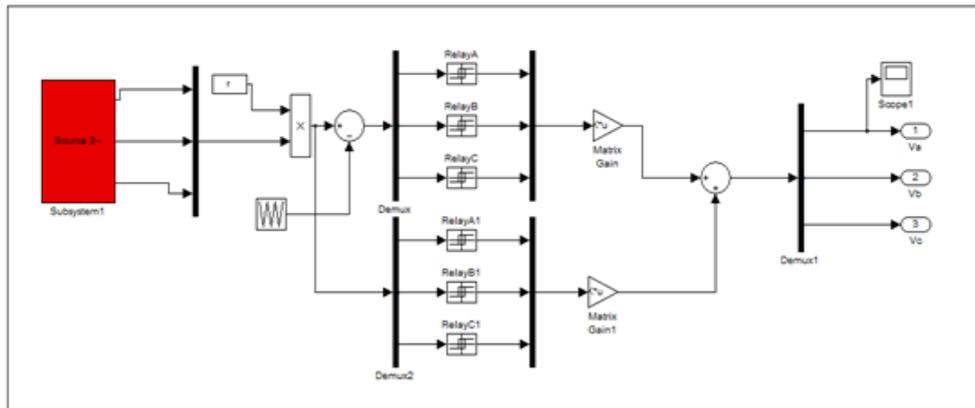


Figure (II. 5) : bloc Simulink d'onduleur trois niveaux commande MLI.

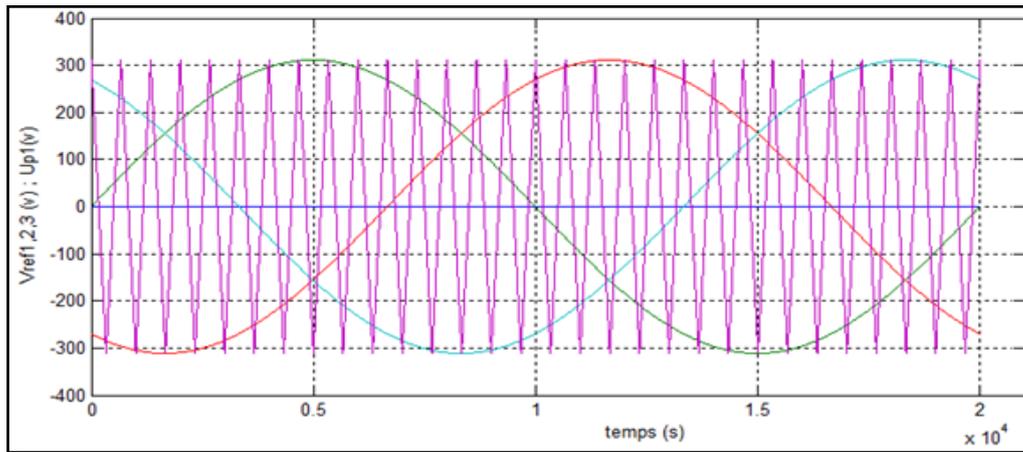


Figure (II.6) : la stratégie MLI à une porteuse signal triangulaire

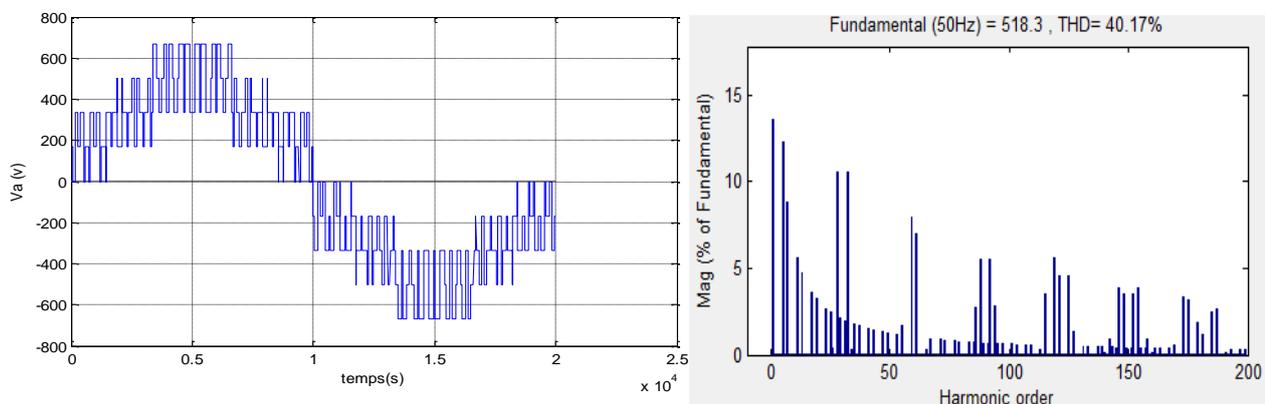


Figure (II. 7) : La tension V_a sortie de l'onduleur à trois niveaux et son spectre harmonique pour $m=30$ et $r=0.8$

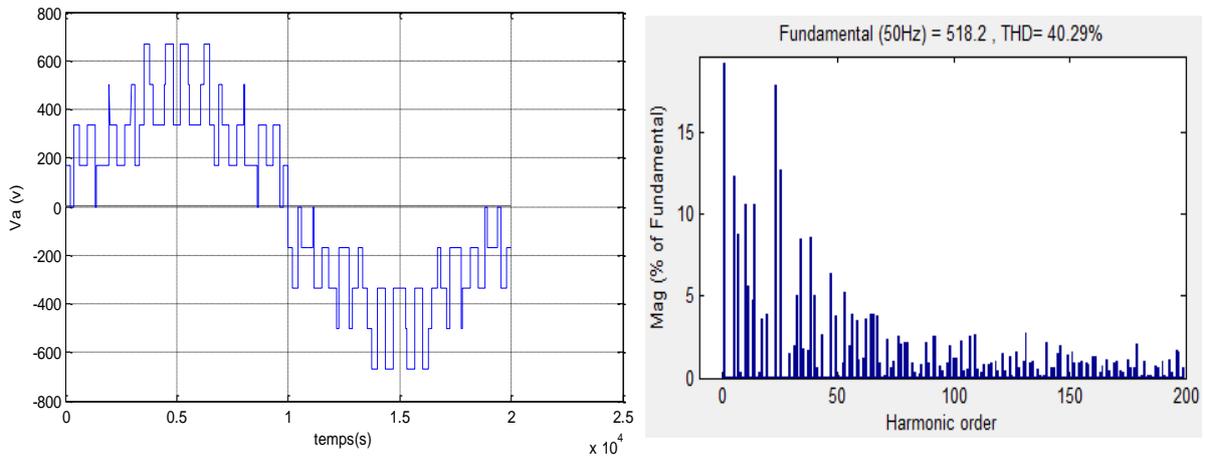


Figure (II. 8) : La tension V_a sortie de l'onduleur à trois niveaux et son spectre harmonique pour $m=12$ et avec coefficient de $r=0.8$

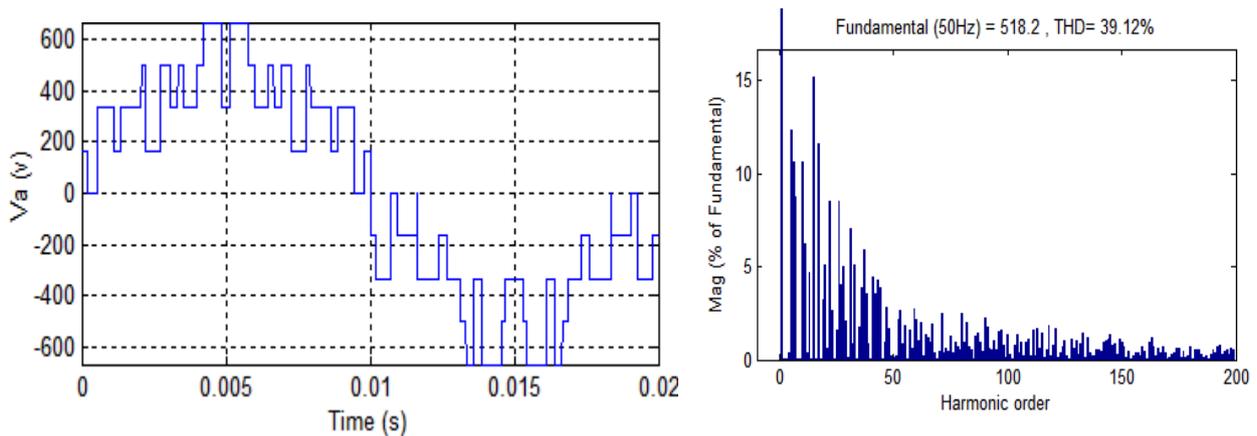


Figure (II. 9) : La tension V_a sortie de l'onduleur à trois niveaux et son spectre harmonique pour $m=8$ et avec coefficient de $r=0.8$

- **Interprétation des résultats :**

D'après les figure (II.7),figure (II.8) et figure (II.9) on remarque que le taux d'harmonique change avec la variation de l'indice de modulation 'm' , dans la figure (II.7) $m=30$, $r=0.8$; le taux d'harmonique est 40.17 % et pour $m=12$, $r=0.8$; dans la figure (II.8) le taux d'harmonique 40.29 % , pour $m=8$ $r=0.8$ le taux d'harmonique se diminue THD=39.12% donc le THD est se varie en fonction de la valeur mais d'une façon aléatoire en fonction de 'm', le taux d'harmonique THD=39.12 est le plus basse pour $m=8$.

Les valeur de l'indice de modulation 'm'et du rapport de l'amplitude 'r' influence sur la qualité de signal de la tension a la sortie de l'onduleur

triphase sinusoïdal :

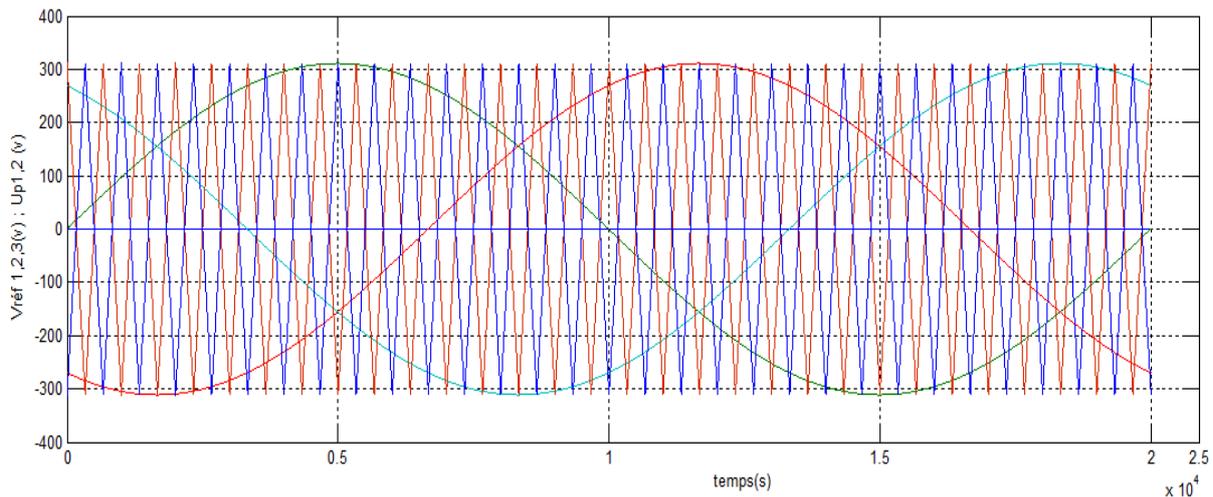


Figure (II.10) : Signal de la stratégie MLI a deux porteuses décalées à $(T_p/2)$

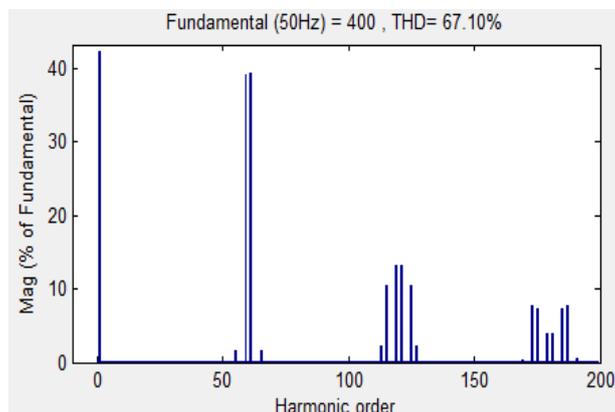
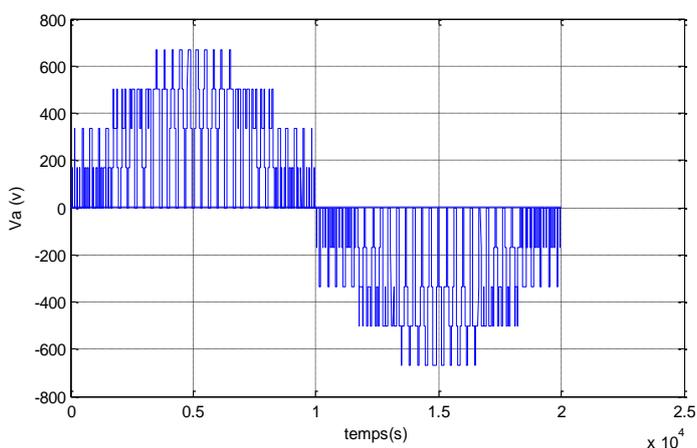
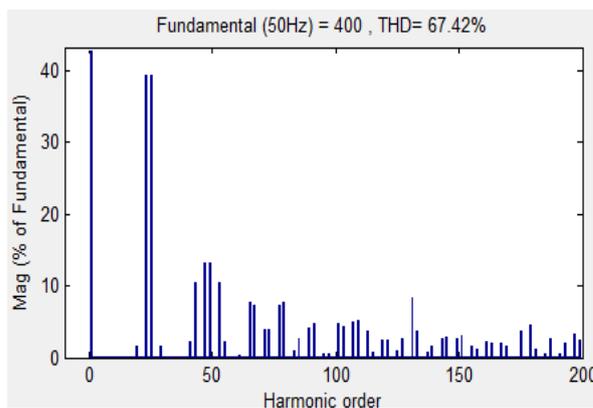
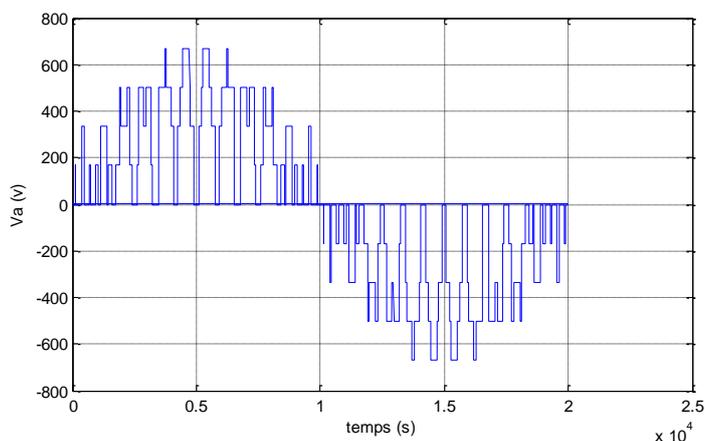
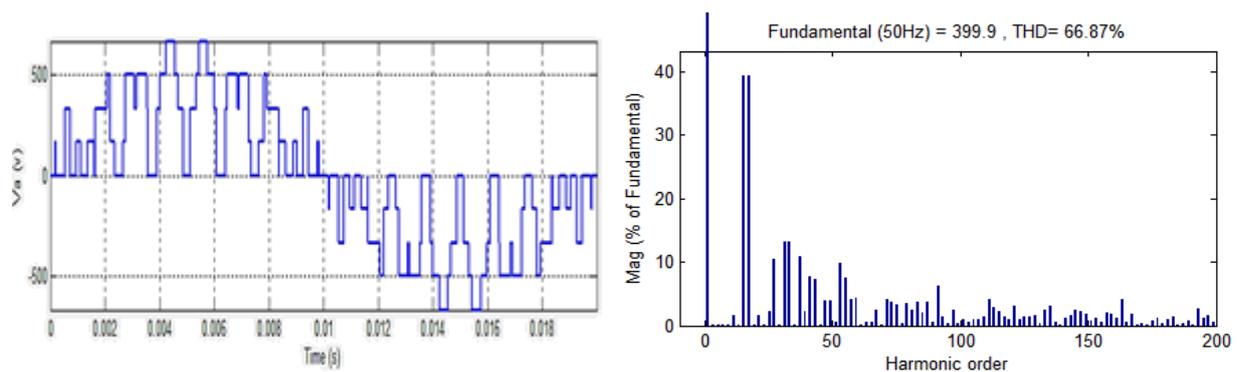


Figure (II.11): La tension V_a sortie de l'onduleur à trois niveaux et son spectre harmonique pour $m=30$ et $r=0.8$



Figure(II.12) : La tension V_a sortie de l'onduleur à trois niveaux et son spectre harmonique pour $m=12$ et $r=0.8$



Figure(II.13) : La tension V_a sortie de l'onduleur à trois niveaux et son spectre harmonique pour $m=8$ et $r=0.8$

- **Interprétation des résultats :**

A partir de la figure (II. 11), figure (II. 12), figure (II.13) , la valeur $THD=67.10$ pour $m=30,r=0.8$; $THD=67.42$ pour $m=12$ et $r=0.8$; $THD=66.87$ pour $m=8$ et $r=0.8$ donc la valeur THD se varie en fonction de l'indice de modulation 'm' , on remarque que pour la commande MLI a deux porteuse le taux d'harmonique est très grand par rapport a la commande MLI a une porteuse , pour la tension V_a présenter une symétrie par rapport à $T/4$ quel que soit la valeur donner de ' m ' et ' r '

Conclusion

L'onduleur joue un rôle très important dans la compensation des courant harmonique et l'énergie réactif par l'utilisation du filtre actif parallèle, en a vue dans ce chapitre la modélisation de l'onduleur trois niveau structure NPC et le principe de fonctionnement en a vue aussi la technique de commande avec une évaluation par simulation numérique des performances de ce type d'onduleur. En a présenter les différentes configurations des bras d'onduleur trois niveaux structure NPC et puits leur modélisation, en représenter en dernier les types de commande MLI a deux porteuse et commande a une porteuse avec une comparaison entre ces deux stratégies de commande.

CHAPITRE III

Principe de Filtre actif parallèle et identification du courant d'harmonique

III.1 Introduction

Le filtrage actif parallèle de puissance (FAP) est une solution moderne et adéquate permettant de remédier aux perturbations en courant. Ce compensateur peut être utilisé pour compenser les courants harmoniques, les courants déséquilibrés et le fondamental réactif. Il s'insère entre le réseau et la charge non linéaire. Les performances d'un filtre actif parallèle dépendent en grande partie du type de modulation mis en œuvre pour la commande des interrupteurs, du dimensionnement des éléments de couplage au réseau et du système de stockage (généralement capacitif), de la dynamique des algorithmes d'extraction et de contrôle des courants.

Les objectifs de ce chapitre est de comprendre le fonctionnement du filtre actif parallèle et le rôle des multiples composant qui construit le filtre. Ainsi nous examinerons de la méthode d'identification des courants harmoniques et puis nous avant présenter les principaux types de commande du filtre actif parallèle.

III. 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 pratique, on ne peut pas obtenir un courant de ligne purement sinusoïdal comme dans le cas idéal mais le but est d'avoir un courant qui sera le plus proche possible de la sinusoïde, la simulation par Matlab permet de nous approcher de la réalité de la compensation.

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. [18]

La structure générale du FAP est la suivante :

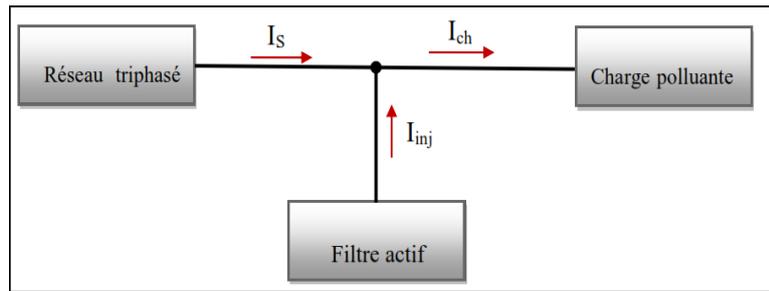


Figure (III. 1) : Principe du filtre actif parallèle

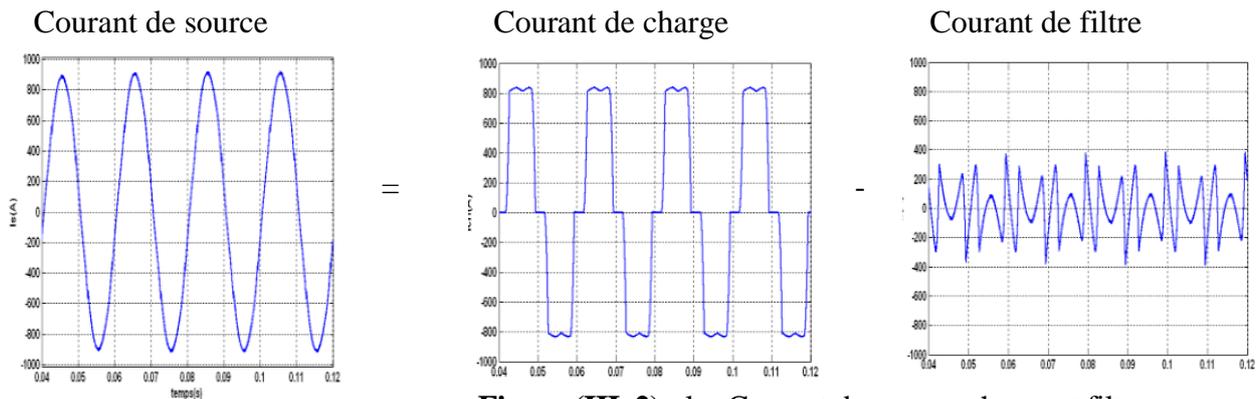


Figure (III. 2) : les Courant de source, charge et filtre.

Donc le filtre actif parallèle doit fournir la puissance déformante et où la puissance réactive. Ainsi, le réseau fournit uniquement la puissance fondamentale active et où réactive. Pour cela le circuit de contrôle en agissant sur les signaux de gâchette des semi-conducteurs (transistors, GTO, IGBT,..) doit imposer la valeur instantanée du courant débité par l'onduleur ($I_{inj1}, I_{inj2}, I_{inj3}$) de telle sorte que le courant fourni par le réseau (I_{s1}, I_{s2}, I_{s3}) soit sinusoïdale et en phase avec la tension du réseau.

Dans le cas général, le courant absorbé par la charge comporte une composante active (I_{ca}), une composante réactive (I_{cr}) et une composante harmonique ($\sum I_{chn}$).

Avec

$$I_c = I_{ca} + I_{cr} + \sum I_{chn} \quad (III.1)$$

($I_{cr} + \sum I_{chn}$), le courant réactive et déformant sera compensé par le filtre actif. Donc on obtient :

$$I_{ca} = I_s ; I_{inj} = I_{cr} + \sum I_{chn} \quad (III.2)$$

Le filtre actif se compose de deux parties distinctes de la partie puissance et la partie commande. La partie puissance est constituée d'un élément de stockage d'énergie, d'un pont onduleur triphasé et d'un filtre de sortie généralement du premier ordre. Pour

la partie commande, on a le bloc d'identification des courants de références, le contrôle du courant réseau ainsi que la commande.

III.3 Structure générale du filtre actif parallèle

III.3.1 Topologie générale

Le filtrage actif parallèle représenté par ce schéma global :

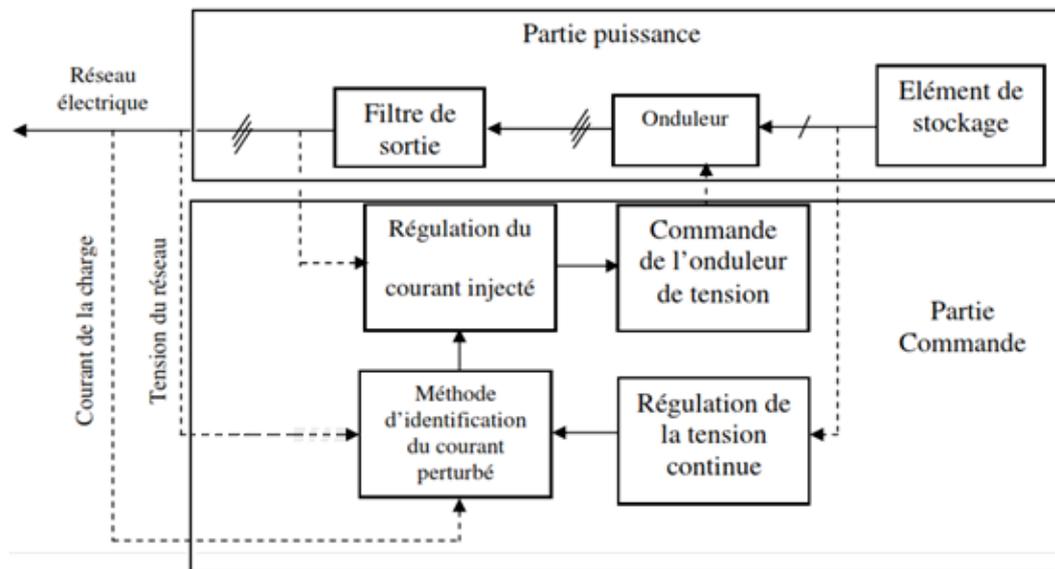


Figure (III. 3) : structure générale d'un filtre actif parallèle.

La partie puissance qui est constituée :

- D'un onduleur de tension
- D'un circuit de stockage d'énergie, souvent capacitif.
- D'un filtre de sortie.

La partie commande qui est constituée :

- D'un circuit d'identification des courants perturbés.
- de la commande de l'onduleur de tension.
- 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

III.3.2 La partie puissance du filtre actif parallèle

Le schéma du circuit de puissance d'un filtre actif parallèle est donné sur la figure (III. 4)

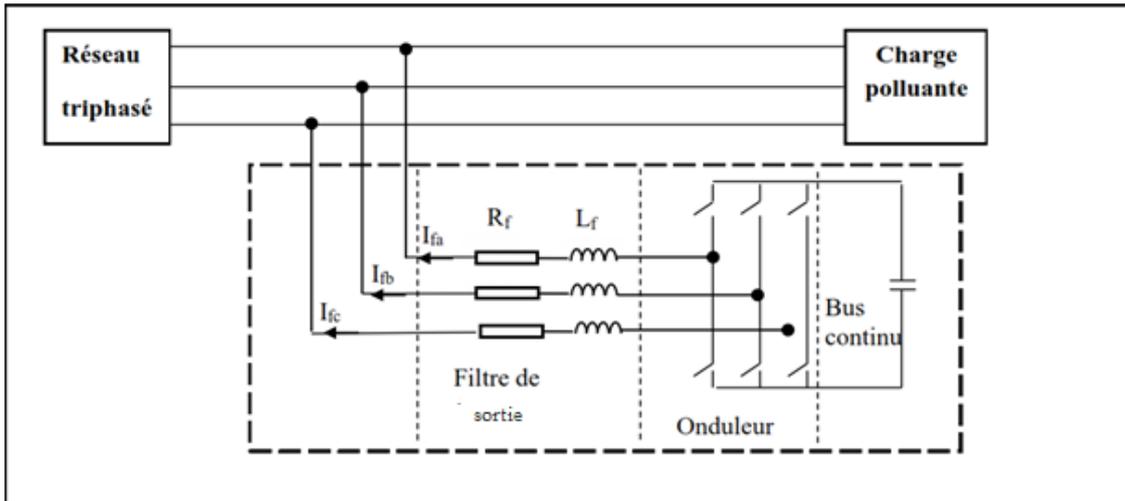


Figure (III. 4) : schéma du circuit de puissance d'un filtre actif parallèle à structure tension.

La figure (III. 4) présente le filtre actif à structure tension où l'onduleur de tension est connecté en parallèle sur le réseau via un filtre de sortie (L_f , R_f). La capacité C se comporte comme une source de tension continue (élément de stockage). La tension V_{dc} aux bornes du condensateur doit être positive et maintenue constante par la commande. Ses fluctuations doivent être faibles d'une part pour ne pas dépasser la limite en tension des semi-conducteurs constituant les interrupteurs et d'autre part pour ne pas dégrader les performances du filtre actif.

III.3.2.1 L'onduleur de tension

L'onduleur triphasé est constitué d'interrupteurs bidirectionnels en courant. Comme on verra dans le chapitre précédent Ils sont réalisés par des semi-conducteurs commandables à l'ouverture et à la fermeture (de type IGBT dans la majorité des cas) montés en antiparallèle avec une diode.

Comme on a vu dans le chapitre II, nous commandons les deux semi-conducteurs d'un même bras de façon complémentaire : la conduction de l'un entraîne le blocage de l'autre. Avec cette hypothèse, l'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur dépendent de l'état de trois signaux de la commande de ce dernier.

III.3.2.2 Filtre de sortie

Ce filtre ne permet pas de satisfaire simultanément les deux critères de dimensionnement du filtre de sortie :

- assurer la dynamique du courant.

$$\frac{d}{dt} \vec{I}_h = \frac{d}{dt} \vec{I}_{inj} \quad (\text{III.3})$$

Avec I_h le courant harmonique de la charge et I_{inj} le courant du filtre actif,

- empêcher les composantes dues aux commutations de se propager sur le réseau électrique.

Le type du filtre de sortie peut être employé : un filtre de sortie du premier ordre, Ce type de filtre est le plus utilisé dans la littérature. Il est composé d'une inductance L_f de résistance interne R_f . Un filtre de ce type ne permet pas de satisfaire simultanément les deux critères de dimensionnement du filtre de sortie. En effet, seule une valeur relativement faible de L_f peut réaliser une bonne dynamique du filtre actif en satisfaisant l'égalité formule (III.1).

Malheureusement, une valeur faible de L_f permet à la majorité des composantes dues aux commutations de se retrouver côté réseau et par conséquent d'affecter les installations et les équipements électriques. Inversement, une valeur relativement élevée de L_f va empêcher ces composantes de se propager sur le réseau électrique mais affectera la dynamique du filtre actif et dégradera alors la qualité de compensation.

III.3.2.3 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 coté 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 de la coté continue peut être maintenue à une valeur de référence désirée.

Néanmoins, quand les conditions de charge changent, la puissance transitant entre la source et la charge est perturbée et la différence d'énergie est compensée par le condensateur du coté continue 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 réglée 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.

III.4 identification des courants harmonique

III.4.1 Méthode des puissances instantanées

Afin de compenser les courants harmoniques, générés par la charge non linéaire, par un filtre actif parallèle, la technique la plus utilisée c'est l'identification à partir de la détection du courant de la charge polluante et cela par la méthode de la puissance instantanée.

La méthode des puissances instantanées n'est applicable que si la tension du réseau est parfaitement sinusoïdale et équilibrée.

La première étape consiste à ramener la tension V_s ou V_r de la source et les courants i_c de la charge dans le repère de Concordia en utilisant la transformation de Concordia.

Cette transformation permet de passer d'un système triphasé à un système biphasé, ce qui simplifie les expressions mathématiques et réduit le coût d'implantation La transformation se fait à partir de la relation suivant :

$$\begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (\text{III. 4})$$

Si on applique cette relation sur les courantes lignes (I_{Ia}, I_{Ib}, I_{Ic}) et de la tension simple du système triphasé (V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}) on trouve :

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{III.5})$$

$$\begin{bmatrix} I_{\alpha} \\ I_{\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{1a} \\ I_{1b} \\ I_{1c} \end{bmatrix} \quad (\text{III.6})$$

À partir des équations (III. 3) et (III. 4), on calcule les puissances instantanées, active p et réactive q , elles sont données par la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & V_{s\beta} \\ -V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{s\alpha} \\ I_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{III.7})$$

On peut décomposer les puissances instantanées p et q en deux composantes, les composantes continues liées au fondamental (\bar{p} , \bar{q}) composantes alternatives liées aux harmoniques (\tilde{p} , \tilde{q}) comme suit :

$$\begin{cases} p = \bar{p} + \tilde{p} \\ q = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

Un filtre de puissance est utilisé afin de séparer la composante de la puissance liée aux harmoniques de la composante de la puissance liée au fondamental. Le schéma représentant le principe de séparation des puissances est donné par la figure (III.5).

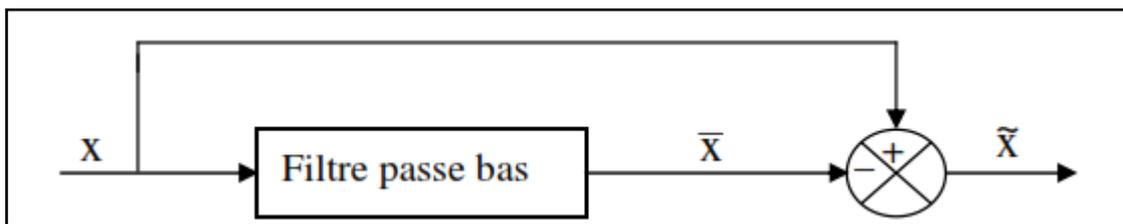


Figure (III. 5) : Schéma représentant le principe de séparation des puissances.

La fréquence de coupure du filtre est choisie, selon que la charge soit équilibrée ou déséquilibrée, de manière à ce qu'il puisse bloquer le passage des composantes harmoniques des puissances instantanées, et de permettre uniquement le passage des composantes continues représentant les puissances active et réactive à la fréquence fondamentale. Après avoir séparé les puissances, on calcule les courants perturbateurs dans le repère $\alpha\beta$ en se servant de l'expression (III. 8) comme suit :

On pose :

$$\Delta = V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2 \quad (\text{III.9})$$

Et à partir de l'expression (III.7) on a :

$$\begin{bmatrix} I_{ref\alpha} \\ I_{ref\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_0 - \tilde{p} \\ -\tilde{q} \end{bmatrix} \quad (\text{III.10})$$

P_0 Est la puissance active fournie par la boucle de tension nécessaire à la régulation de la tension continue.

La relation (III. 10) est utilisée afin de compenser l'ensemble des harmoniques. Cette technique permet aussi d'effectuer de la compensation de l'énergie réactive puisque l'absorption de l'énergie réactive se traduit par une composante continue selon l'axe q (\bar{q}) non nulle [18] le courant du filtre permettant cette compensation est donc :

$$\begin{bmatrix} I_{ref\alpha} \\ I_{ref\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -\bar{q} \end{bmatrix} \quad (\text{III.11})$$

Et si l'objectif est de compenser la puissance réactive et l'ensemble des harmoniques simultanément, on utilise la relation (III. 12).

$$\begin{bmatrix} I_{ref\alpha} \\ I_{ref\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_0 - \tilde{p} \\ -\bar{q} - \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (\text{III. 12})$$

Il est possible de séparer le courant dans le repère (α, β) en trois termes, actif, réactif à la fréquence fondamentale et la somme des harmoniques, tel que :

$$\begin{bmatrix} i_{ref\alpha} \\ i_{ref\beta} \end{bmatrix} = \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ 0 \end{bmatrix}}_{\text{Courant Actif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{q} \end{bmatrix}}_{\text{Courant Réactif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix}}_{\text{Courant Harmonique}} \quad (\text{III. 11})$$

Les courants perturbateurs triphasés qui représentent les courants identifiés, dits courants de référence $i_{réf}$, sont calculés à partir de la transformée inverse de Concordia. Ces courants sont donnés par la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} I_{ref1} \\ I_{ref2} \\ I_{ref3} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ref\alpha} \\ i_{ref\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{III. 12})$$

La méthode des puissances instantanées est illustrée par la figure (III. 6) :

III.4. 2 Algorithme d'identification

La Figure (III. 8) présente l'algorithme général du filtrage harmonique en utilisant la transformation $\alpha - \beta$. Le courant de source de référence déterminé par cette méthode est soustrait du courant de charge pour déterminer le courant filtre de référence. Ce dernier est comparé au courant réel généré par le filtre pour déterminer la commande des interrupteurs du filtre actif.

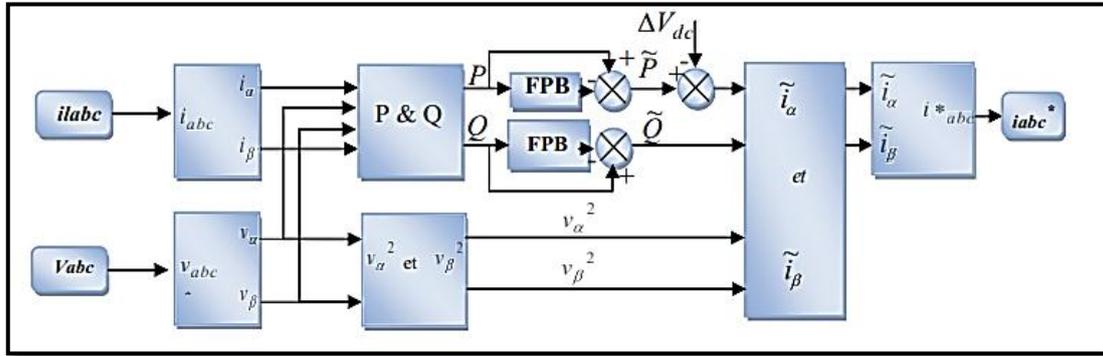


Figure (III.6) : Structure d'un filtre actif shunt basé sur la méthode des puissances instantanées

III.5 La Régulation du filtre actif parallèle

III.5.1 La Régulation du courant de filtre actif parallèle

En négligeant les effets de la capacité C_{dc} et des résistances du filtre de sortie sur le courant de référence I_{inj} (pour les harmoniques basses fréquences qui sont loin de la fréquence de commutation), nous pouvons écrire la relation suivante caractérisant le courant du filtre actif I_{inj} .

$$L_f \frac{d}{dt} I_{inj} = V_f - V_s \quad (III. 13)$$

Notons par ΔI_f la différence entre le courant de référence et le courant mesuré à partir de la relation suivante :

$$\Delta I_f = I_{ref} - I_{inj} \quad (III.14)$$

A partir des équations (III. 26) et (III. 27), nous obtenons l'expression ci-dessous : de référence (V_{fref}), ce qui nous donne l'expression suivante :

$$V_{fref} = V_s + L_f \frac{d}{dt} I_{ref} \quad (III.15)$$

L'écart entre V_{fref} et V_f produit alors une erreur sur le courant. Selon la relation (III. 28), la tension de référence est composée de deux termes à fréquences différentes. Le premier représente la tension du réseau V_s directement mesurable. Le second est égal à la chute de tension aux bornes de l'inductance L_f , lorsque celle-ci est traversée par un courant égal à

celui de la référence. Ce terme doit être élaboré par un régulateur de courant, comme le montre la figure (III. 11).

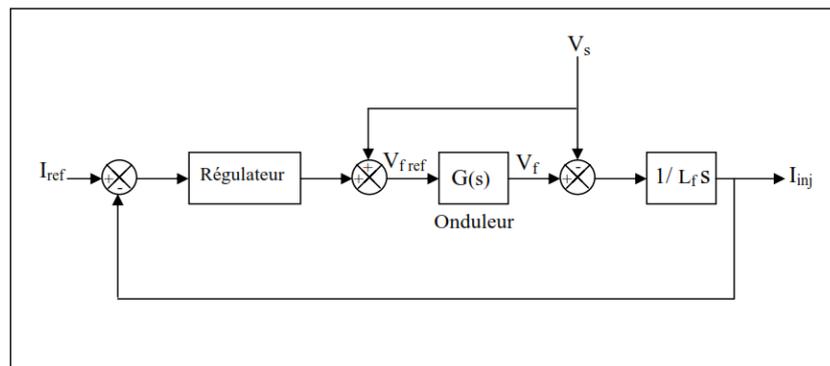


Figure (III. 7) : Schéma de la régulation des courants du filtre actif parallèle.

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

$$G(s) = K \frac{1}{1+\tau.s} \quad (\text{III.16})$$

$$K = \frac{V_{dc}}{2 V_p} \quad (\text{III.17})$$

Avec V_{dc} la tension cotée continue de l'onduleur, V_p l'amplitude de la porteuse triangulaire et (τ) représentant le retard causé par le calcul des courants perturbateurs. Le régulateur doit satisfaire les objectifs généraux de la régulation ainsi que les contraintes liées au rejet des perturbations

III. 5.2 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 \tilde{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.

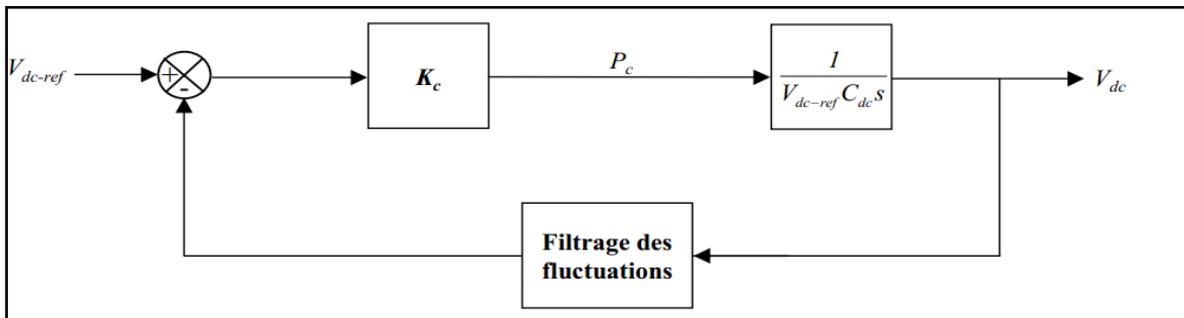
En négligeant les pertes de commutations dans l'onduleur ainsi que l'énergie stockée dans l'inductance du filtre de sortie, la relation entre la puissance absorbée par le filtre actif et la tension aux bornes du condensateur peut s'écrire sous la forme suivante :

$$P_c = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} C_{dc} \cdot V_{dc}^2 \right) \quad (\text{III.18})$$

Notons que la relation (III. 24) est non linéaire. Pour des faibles variations de la tension V_{dc} autour de sa référence V_{dc-ref} , elle peut être linéaire à travers les relations suivantes :

$$\begin{cases} P_c = C_{dc} \cdot V_{dc-ref} \frac{d}{dt} (V_{dc}) \\ \Rightarrow V_{dc}(s) = \frac{P_c(s)}{V_{dc-ref} \cdot C_{dc} s} \end{cases} \quad (\text{III.19})$$

En prenant en compte le régulateur proportionnel (K_c), la boucle de régulation de la tension continue peut être représenté par le schéma de la figure (III. 10). 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 (III.8) : Boucle de régulation de la tension continue.

III.6 Méthode de régulation par PI

Le contrôleur proportionnelle Intégral dit PI est un régulateur du courant dans notre cas, ce type de régulation est très utiliser dans le filtre actif parallèle grâce à leur efficacité et simplicité. Mais l'utilisation de ce dernier exige de trouver dans le cas d'une structure de filtre actif parallèle un filtre de sortie du premier ordre (choix de l'inductance). En effet, un régulateur PI ne peut pas assurer, avec les seuls paramètres de correction KP et KI , les objectifs de régulation en boucle fermée pour un système d'origine d'ordre supérieur à un.

Les paramètres de correction K_p : gain proportionnelle et K_i : gain intégrale.

La figure (III.14) représente la méthode de régulation par (PI).

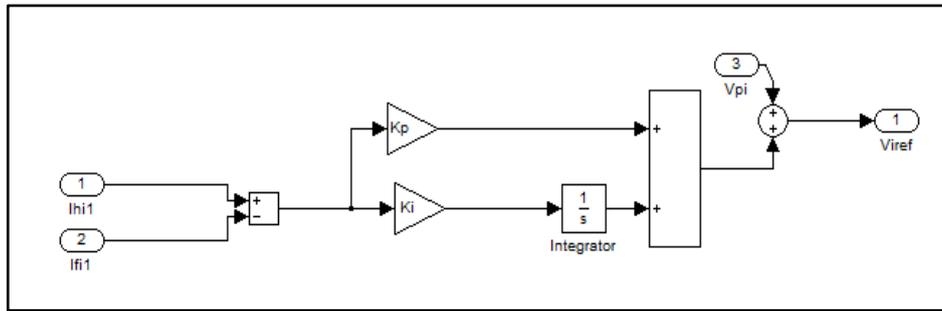


Figure (III.9) : régulation du courant par PI.

III.7 Méthode de régulation par logique Floue

La logique floue sert à représenter incertain et la connaissance imprécise du système, tandis que contrôleur logique floue Laisse prendre une décision même si nous ne pouvons pas estimer des entrées et les sorties seulement des attributs incertains [10] - [11] - [12]. Figure suivante montre le diagramme de bloc du contrôle proposé plan du filtre active parallèle Controller par la logique floue, qui possède deux entrées :

L'erreur (e), ($e = i_{réf} - i_f$) et son dérivé (de/dt), et un produit : la commande (cde).

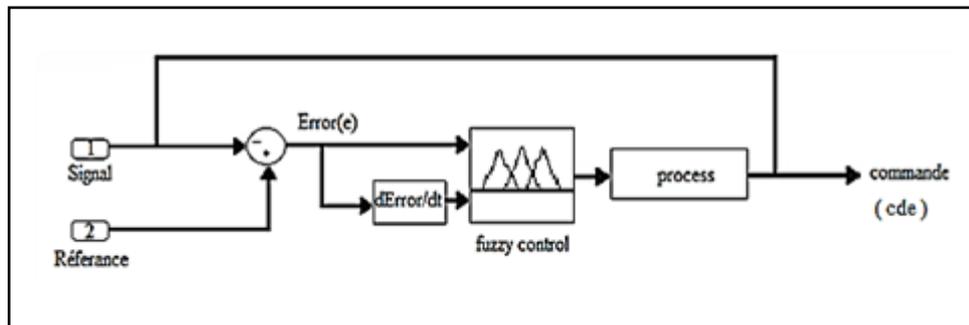


Figure (III. 10) : Diagramme synoptique du contrôleur logique floue.

Les règles linguistiques pour le contrôleur logique floue et la variation des entrées (e) et (de) qui fait la décision en sortie du contrôleur suivent les règles données dans le tableau (III.1).

e / de/dt	NB	NS	Z	PS	PB
NB	NB	NB	NS	NS	Z
NS	NB	NS	NS	Z	PS
Z	NS	NS	Z	PS	PS
PS	NM	Z	PS	PS	PB
PB	Z	PS	PS	PB	PB

Tableau (III. 1) : Table des règles d'inférence.

1. si l'erreur est négatif grand (NB) et taux d'erreurs est négatif grand (NB) alors la production est grand négatif,
2. si est l'erreur négatif grand (NB) et le taux d'erreurs est négatif petit (NS) alors la production est négatif grand (NB),

Comme dans ces deux cas le tableau (III.1) représente les 25 cas de la sortie.

La figure (III.11) et la figure (III.12) représente les fonctions d'adhésion des variables d'entrées (input1, input2) et de la sortie (output1).

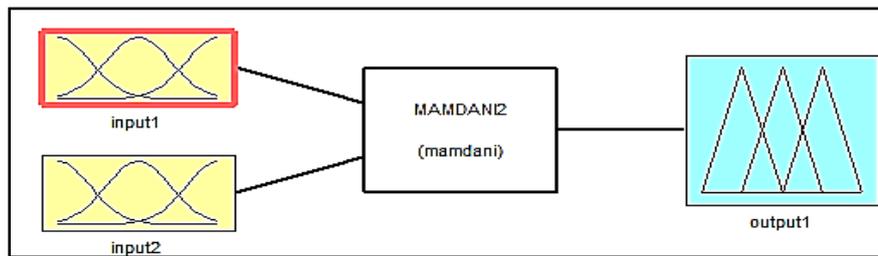


Figure (III. 11) : la fonction d'adhésion de l'entrée et sortie.

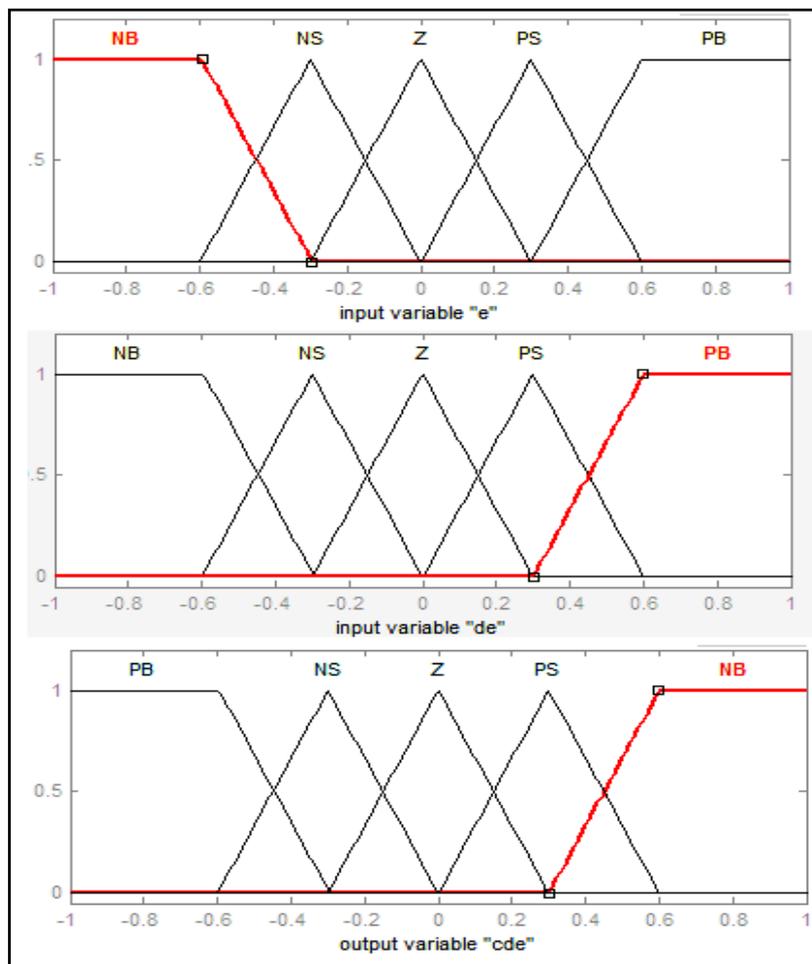


Figure (III. 12) : Fonction d'adhésion des variables d'entrées (e,de) et de sortie (cde).

Le bloc Simulink correspondant au régulateur logique floue pour contrôler l'entrée V_{iref} de l'onduleur est donné par la figure (III.13).

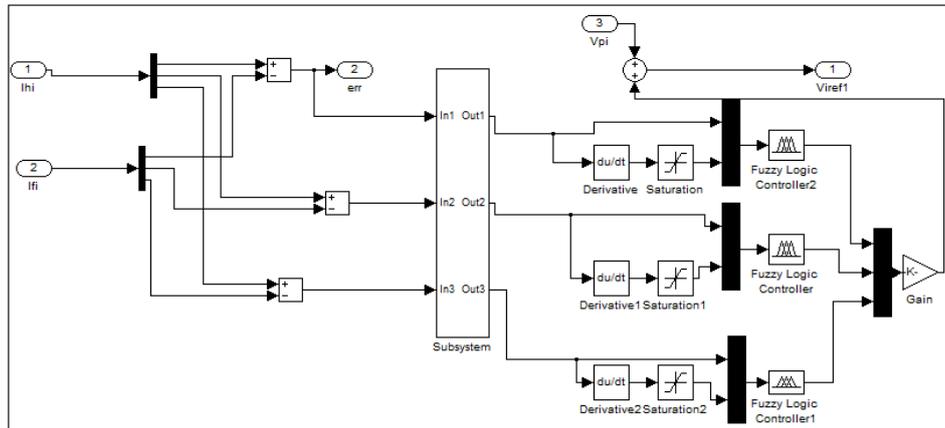


Figure (III. 13) : bloc Simulink de contrôleur logique floue.

III.8 Modélisation de l'association réseau- Filtre actif- Charge polluante

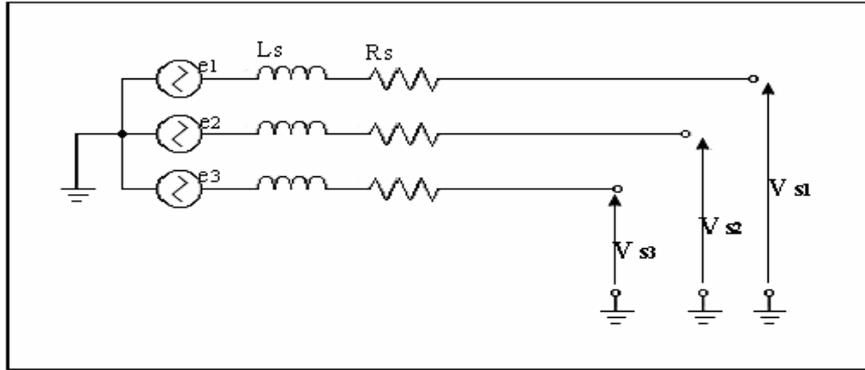
La modélisation d'un système c'est de trouver les équations mathématiques qui décrivent leur fonctionnement

III.8.1 Modélisation du réseau

Le réseau est assimilable à une source de tension sinusoïdale en série avec une impédance, dite de court-circuit, d'où la représentation du réseau par un système de F.E.M triphasées équilibrées en série avec une impédance (figure.14)

$$\begin{bmatrix} e1 \\ e2 \\ e3 \end{bmatrix} = \sqrt{2} \cdot E \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t - 2 \cdot \frac{\pi}{3}) \\ \sin(\omega t + 2 \cdot \frac{\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (III.20)$$

$$Z_c = R_s + jL_s\omega \quad (III.21)$$



Figure(III.14): Schéma synoptique d'un réseau triphasé

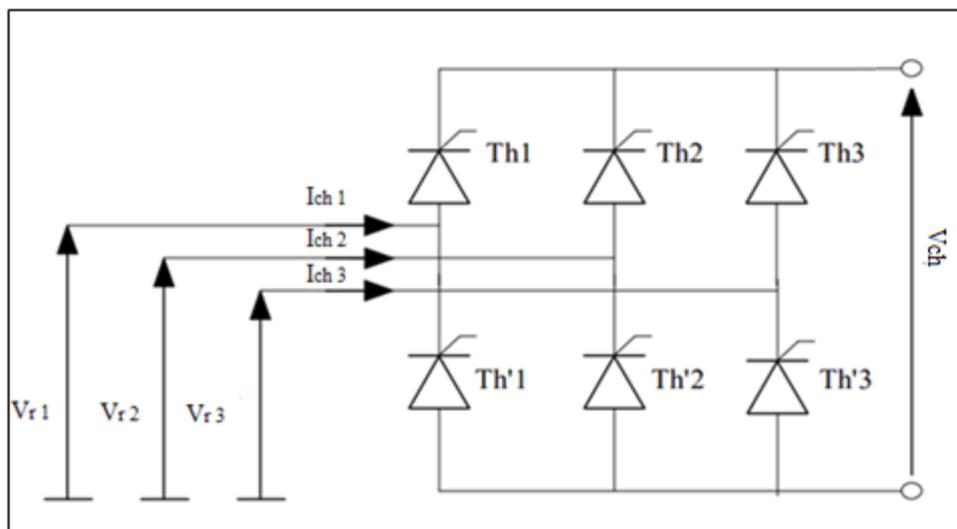
III.8.2 Modélisation de la charge polluante

Dans notre système de filtrage on utilise comme une charge polluante un pont redresseur alimenté par un réseau triphasé ce redresseur produit des harmoniques de courants de l'ordre $6k \pm 1$. Cette charge est modélisée comme étant des sources de courants parfaites (les semi-conducteurs sont considérés parfaits) [20;21].

La figure (III.16) représente le schéma d'un pont redresseur dont l'alimentation est triphasée.

Le thyristor Th1 est débloqué avec un angle de retard α , donc pour $\omega \cdot t = \alpha + \frac{\pi}{6}$

Les autres thyristors sont débloqués de sixième de période en sixième de période dans l'ordre suivant : Th'3, Th2, Th'1, Th3, Th'2



(Fig. III.15) : Schéma d'un redresseur triphasé à thyristors

En fonctionnement idéal des semi-conducteurs on résume les états de conduction de la tension redressée U_{ch} et des courants I_{chi} , $i=1, 2, 3$.

$$I_{chi} = x_i \cdot I_T \quad (III.24)$$

$$V_{ch} = \sum X_i \cdot V_{ri} \quad (III.25)$$

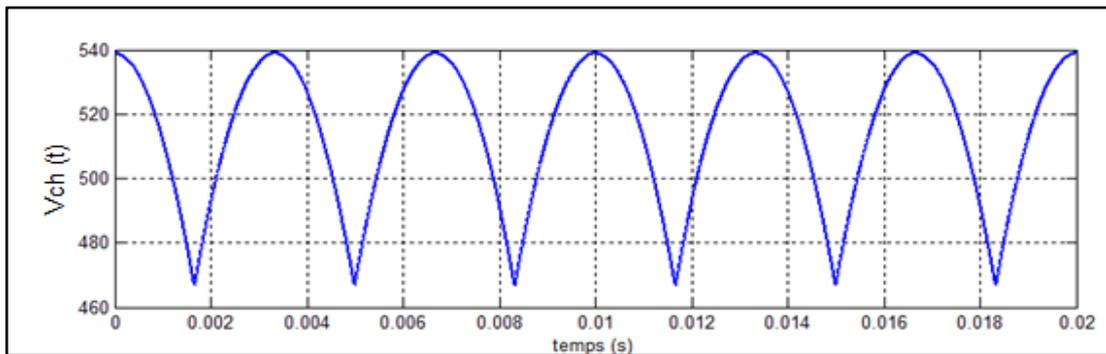
x_i : les fonctions de conversion des semi-conducteurs.

$$x_1 = \begin{cases} 1 & \alpha + \frac{\pi}{6} < wt < \alpha + 5 \cdot \frac{\pi}{6} \\ -1 & \alpha + \frac{\pi}{6} < wt < \alpha + 5 \cdot \frac{\pi}{6} \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (III.26)$$

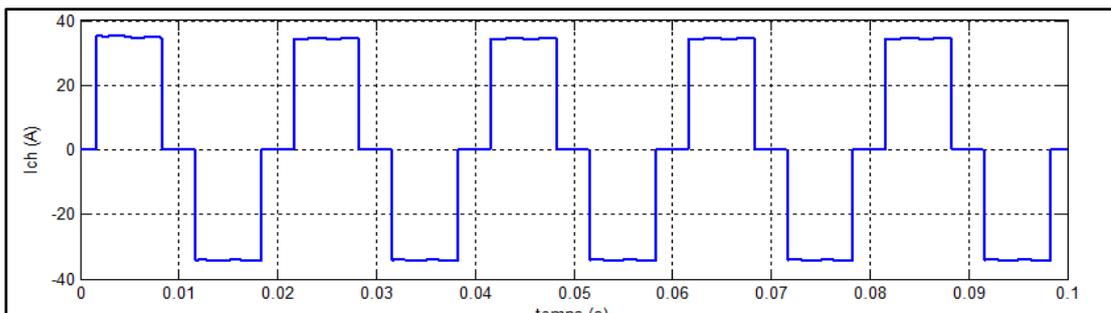
Les autres fonctions sont décalées de 120° et de 240° .

Les figure suivantes représentent les tensions et les courants de la charge.

Pour $\alpha = 0$

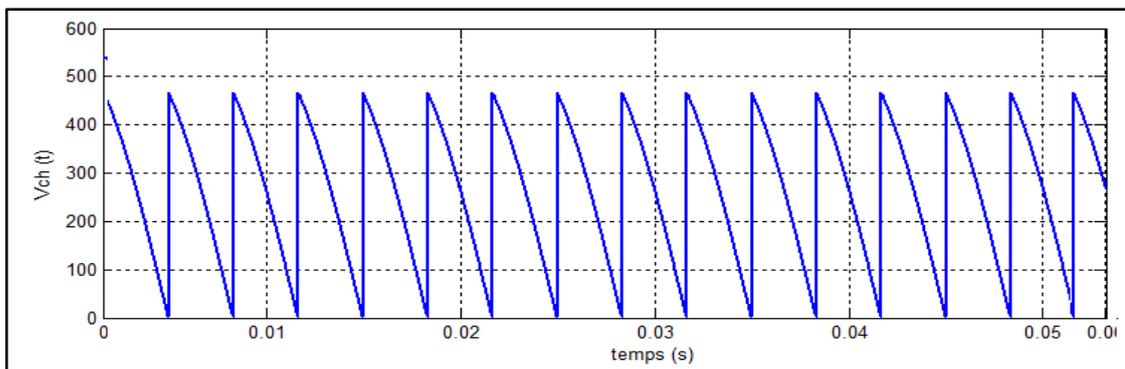


(Figure III.16) : V_{ch} ou U_{ch} la tension redressée

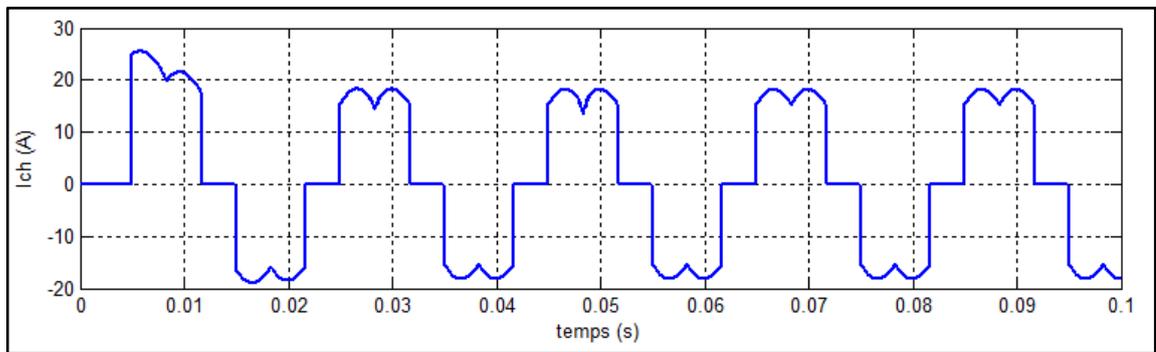


(Fig. III.17) : I_{ch} le courant de charge.

Pour $\alpha = 60$



(Fig. III.18) : V_{ch} la tension redressée



(Fig. III.19) : I_{ch} du courant de charge

Conclusion :

Le filtre actif parallèle est utilisé pour le but d'éliminer les perturbations des courants produit par la charge non linéaire.

En premier on a présenter et définir, le principe de filtre actif parallèle et le fonctionnement général , ensuite en a pu détailler la structure du FAP regrouper en partie puissance qui est constituée d'un onduleur ,d'un circuit de stockage d'énergie et d'un filtre de sortie et de la partie commande constituée d'un circuit d'identification des courant perturbés d'une commande pour l'onduleur et de la partie régulation appliqué au élément de stockage d'énergie .Ainsi, nous avons présenté la méthode pour déterminer les courant d'harmonique pour le contrôle ou commande dans notre système, on a vue aussi la commande de l'onduleur alimenter de source continue de régulation de la tension continue, comme l'onduleur, l'élément de stockage et le filtre de sortie.

CHAPITRE IV

Application de l'onduleur à trois niveaux NPC pour la compensation des courants harmoniques

Introduction :

Les programmes de simulation développés ont été effectués en utilisant le logiciel Matlab-

Simulink qui permet de visualiser sur un intervalle de temps donné l'évolution des courants et de la tension dans les différentes parties du système. La modélisation globale de l'ensemble réseau, charge non linéaire et filtre actif parallèle a permis d'étudier la validité fonctionnelle a travers plusieurs simulation de notre filtre actif parallèle qui est basé sur l'utilisation de l'onduleur trois niveaux NPC commande par MLI, le contrôleur de courant par logique floue (FLC) et du régulateur proportionnelle intégral PI pour la comparaison entre les deux stratégies de régulation

Après avoir étudié les différentes topologies, les méthodes de l'identification des harmoniques, les stratégies de commande et de régulation des filtres actifs dans les chapitres précédents, nous allons présenter l'application par simulation pour visualiser le comportement de notre compensation.

En premier on expose le résultat de notre système de filtrage pour des différent états et paramètres de filtrage pour le régulateur Floue (FLC) avec la vérification l'efficacité de ce régulateur, ensuite pour le régulateur proportionnelle intégrale et mettre une comparaison avec le FLC, la commande de l'onduleur utiliser et MLI a une porteuse et pour la charge en utilise trois différent angle (α).

Les paramètres du filtre actif parallèle et le contrôleur et la commande de l'onduleur influencer directement sur le filtrage du courant, donc la simulation aide nous à faire une optimisation de la qualité de filtrage pour la réalisation réelle.

IV.1 programme de Simulation

Pour réaliser ce programme on utilise le Matlab-Simulink, Le filtre actif parallèle pour la compensation des courant harmonique est réaliser en Simulink, ce dernier est constitué du filtre de sortie ou de couplage, la méthode des puissances instantané pour l'identification des courant harmonique de l'onduleur trois niveaux NPC avec la commande MLI une porteuse, la régulation et contrôle du courant , la charge non linéaire et la source de tension réseaux triphasé.

Les diffèrent résultat de simulation obtenir pour des différents angles α de la charge et des deux type de commande de l'onduleur et par les deux type de régulation.

IV.2 paramètres de simulation :

Les donné de simulation utilisé sont :

Le temps de simulation $T_s = 0.1$ s

- **Source :**

Tension efficace $V_{r-eff} = 220$ v

La fréquence $f = 50$ Hz

- **Filtre de sortie :**

$L_f = 6$ mH

$R_f = 10$ m Ω

- **Onduleur :**

$r = 0.8$

$M_f = 30 / 12$

$E = 800$ v

$f = 50$ Hz

- **Charge polluant :**

$R_{ch} = 10$ Ω

$L_{ch} = 5$ mH

Pour la simulation du modèle on va représenter les résultats du courant et de la tension seulement dans la phase (a), sachant que ceux les deux autres phases sont retardés par rapport à la phase (a) de 120° et 240° respectivement.

Pour la source de tension est triphasé avec le déphasage est $\varphi = \frac{2\pi}{3}$

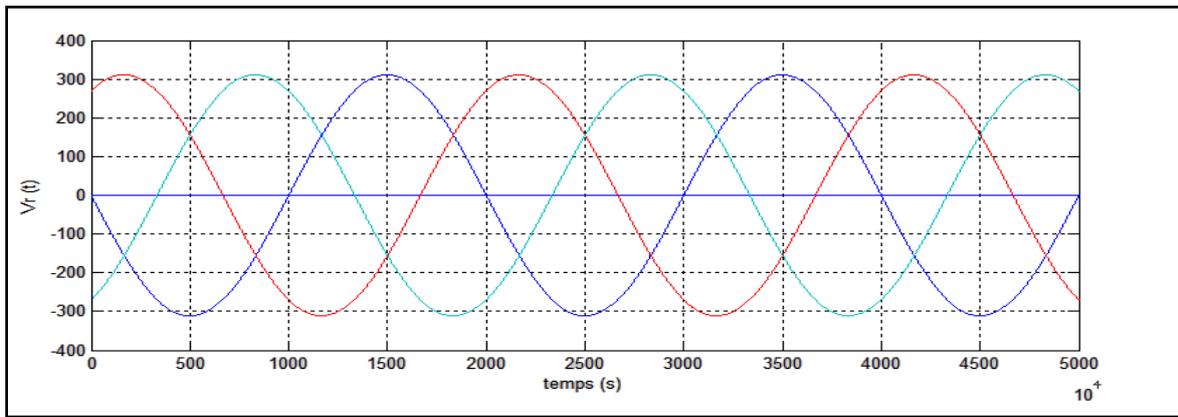


Figure IV.1 : source de tension triphasé V_a, V_b, V_c .

IV.3 Caractéristique de courant de source avant le filtrage :

Le courant de charge pour $\alpha = 0$:

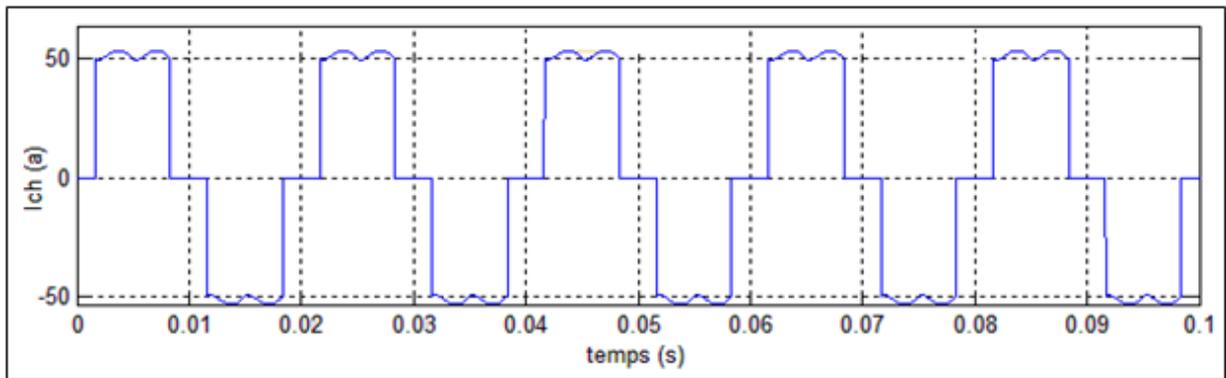


Figure IV.2 : courant de charge $I_{ch}(t)$.

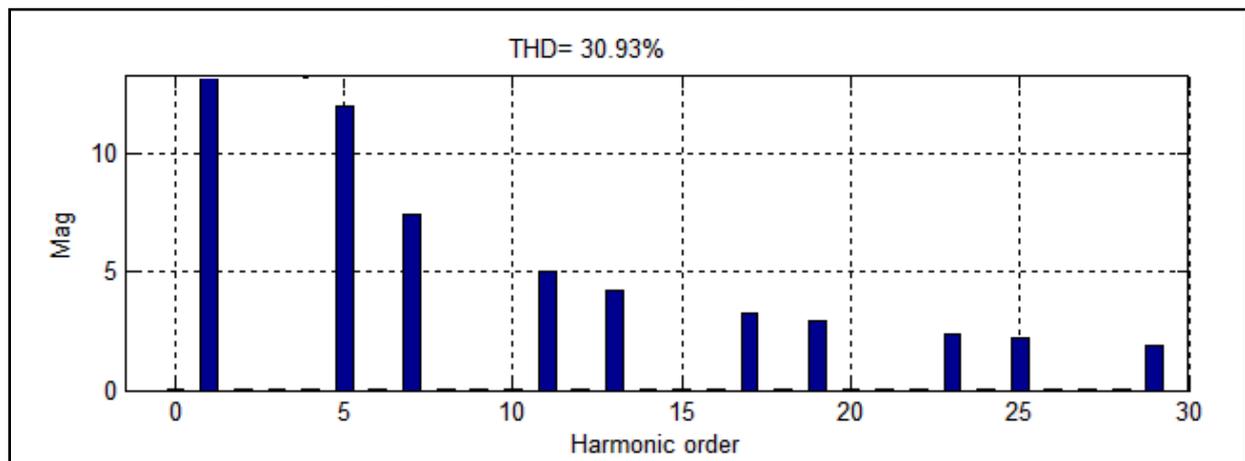


Figure IV.3 : Spectre du courant de charge $I_{ch}(t)$

Le courant de charge pour $\alpha = 30$:

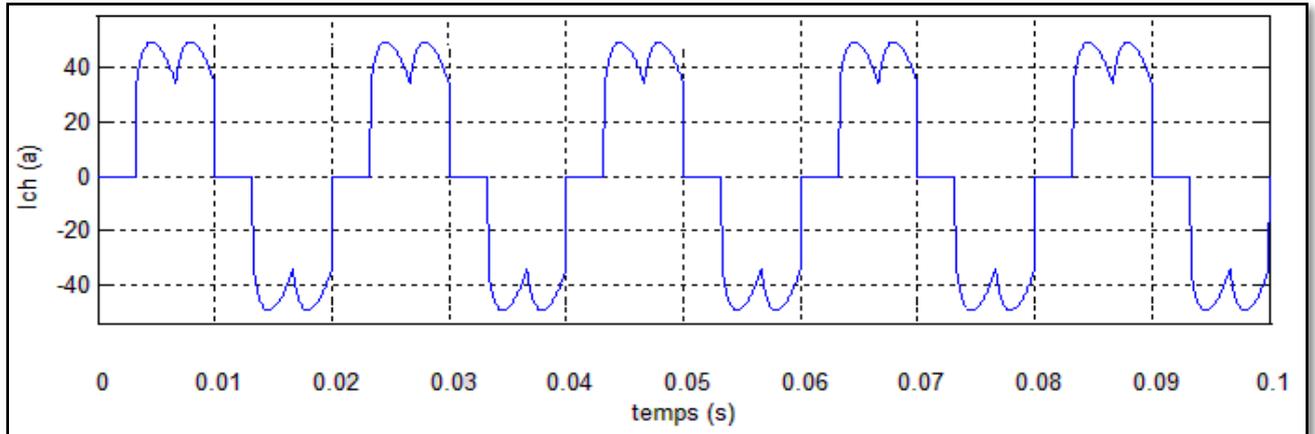


Figure. IV.4: courant de charge $I_{ch}(t)$

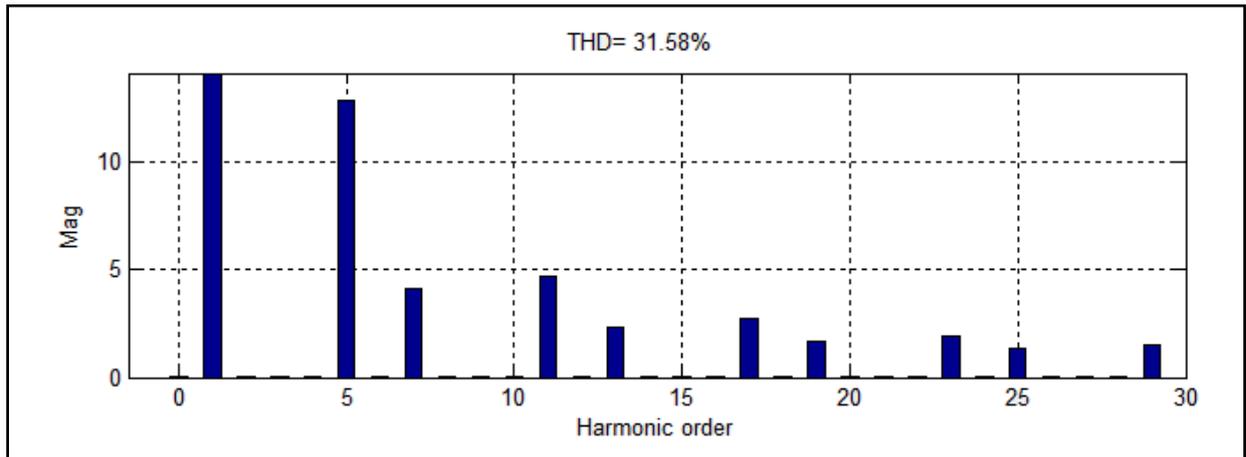


Figure. IV.5 : spectre du courant de charge $I_{ch}(t)$

Le courant de charge pour $\alpha = 60$:

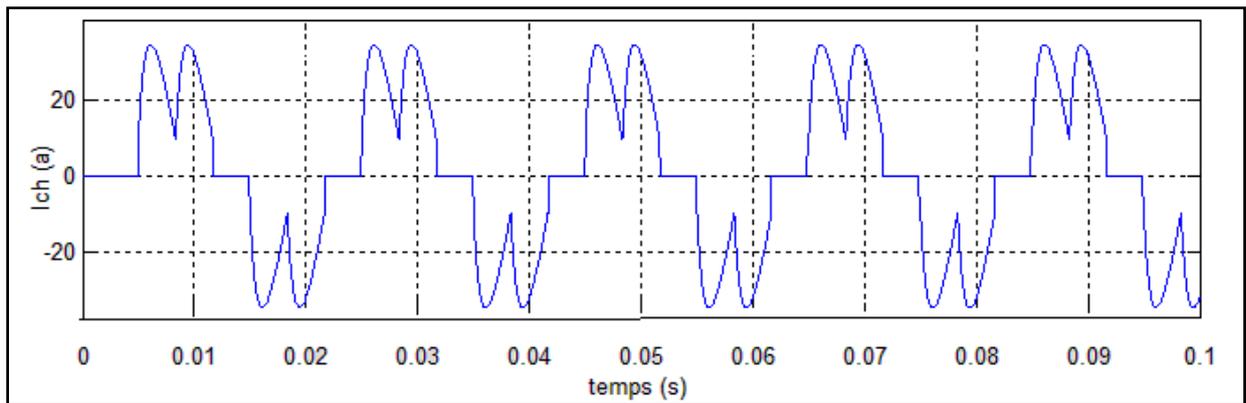


Figure. IV.6 : le courant de charge $I_{ch}(t)$

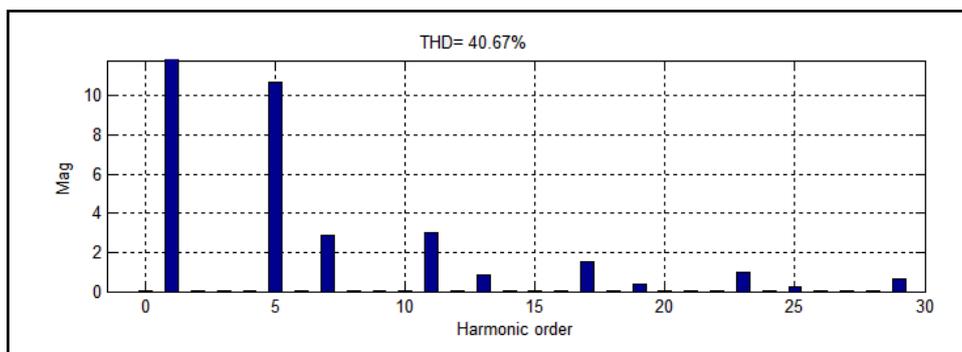


Figure. IV.7 : spectre du courant de charge $I_{ch}(t)$

VI.3.1 Interprétations des résultats

Les figures précédentes montrent les formes des courants simulés de la charge non linéaire avant le filtrage, on applique pour la charge non linéaire (RL) constitué d'un redresseur triphasé a thyristors une angle d'amorçage $\alpha = 0$ (les thyristors fonctionne comme des diode) puis une angle $\alpha = 30$ et $\alpha = 60$, on remarque d'après les figure (IV.2), (IV.4) et (IV.6) que le courant de charge I_{ch} avant le filtrage est non sinusoïdale et perturbé avec une différence d'amplitude, les courant I_{ch} est caractériser par un taux de perturbation très élevé ($\alpha = 0 \rightarrow \text{THD} = 31.85\%$; $\alpha = 30 \rightarrow \text{THD} = 30.93\%$; $\alpha = 60 \rightarrow 40.67\%$),le taux THD est le plus élevé pour ($\alpha = 60$) puisque la de déformation du courant I_{ch} dans ce cas est grand par rapport a un signal de referance sinusoïdale de frequence $f_r = 50\text{Hz}$.

Le courant de charge I_{ch} est similaire avec le même angle pour l'utilisation du filtre actif parallèle contrôleur par PI ou par FLC.

IV.4 Résultats de simulation de filtre actif parallèle contrôlé par Régulateur PI

- Pour $\alpha = 0$

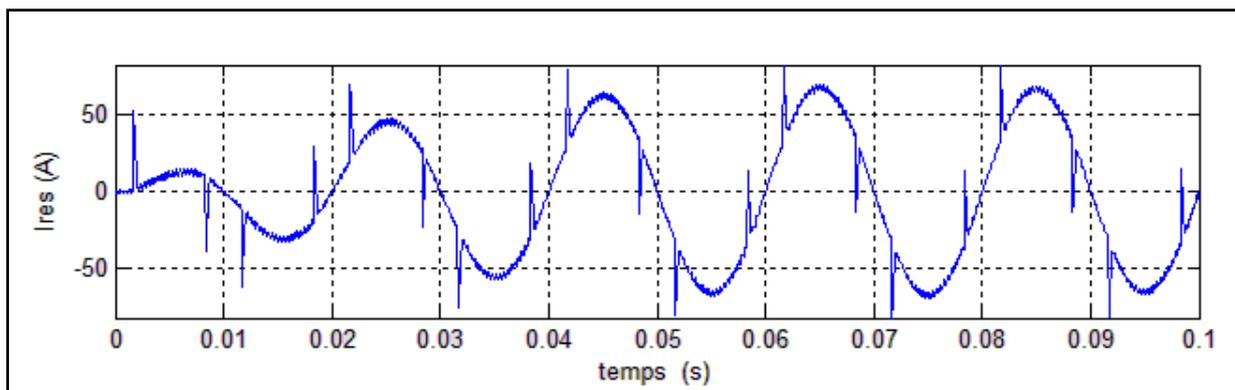


Figure IV.8 : Courant de réseau après filtrage.

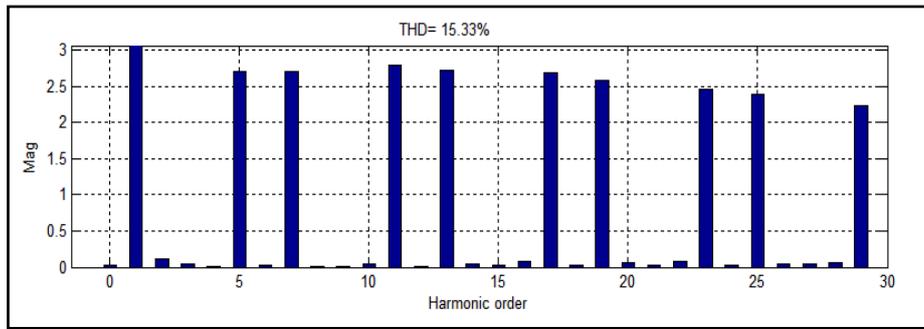


Figure IV.9 : Spectre du courant du réseau Ires (t)

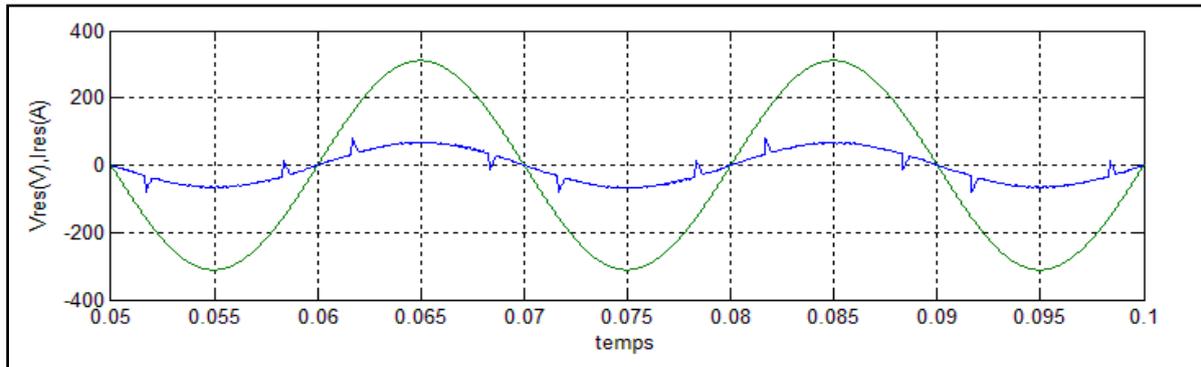


Figure IV.10: Tension et courant de réseau après filtrage V_{res} (v), I_{res} (A).

V_{res} (v) : en couleur vert, I_{res} (A) : en couleur bleu.

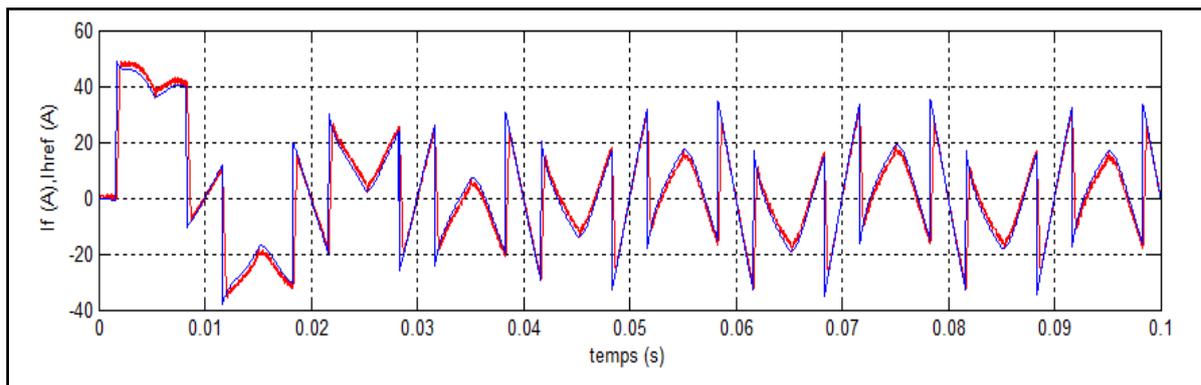


Figure IV.11 : Courant du filtre I_f (A) et sa référence I_{href} (A).

I_f (A) : en couleur rouge, I_{href} : en couleur bleu.

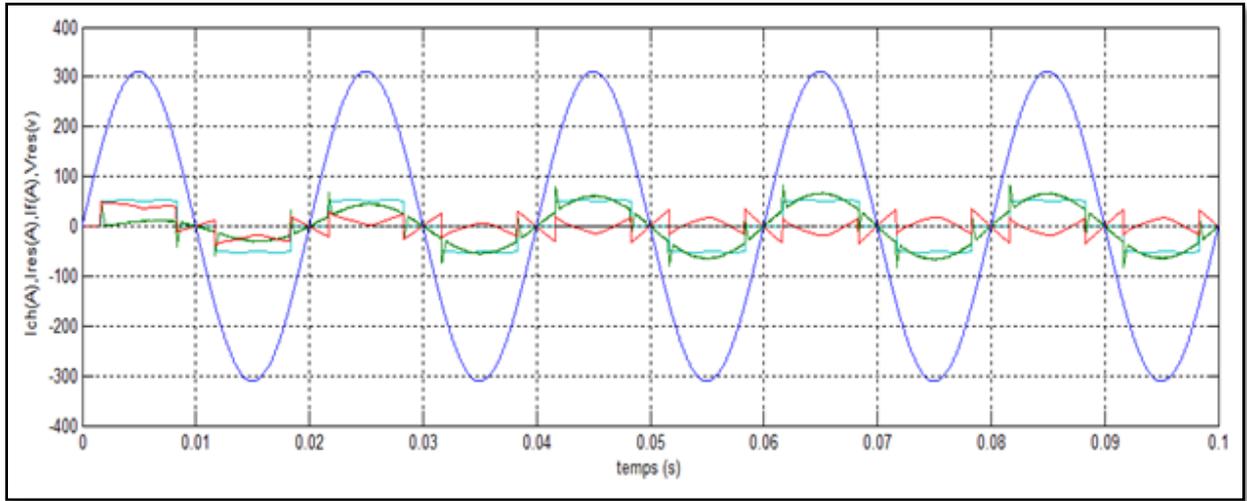


Figure IV.12 : Tension et courant de réseau et courant de filtre et de charge après le filtrage.

V_{res} (v) : en couleur bleu, I_{ch} (A) : en couleur bleu clair, I_f (A) : en rouge, I_{res} : en vert.

- Pour $\alpha=30$

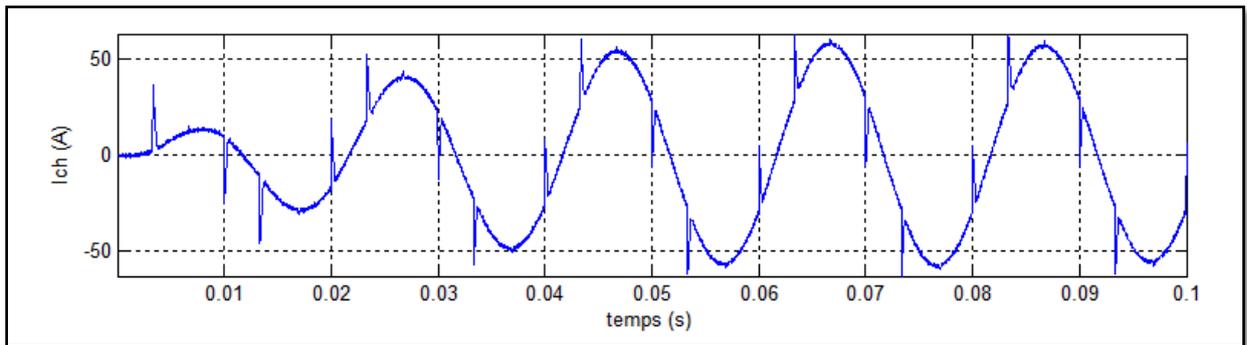


Figure IV.13 : Courant de réseau après filtrage.

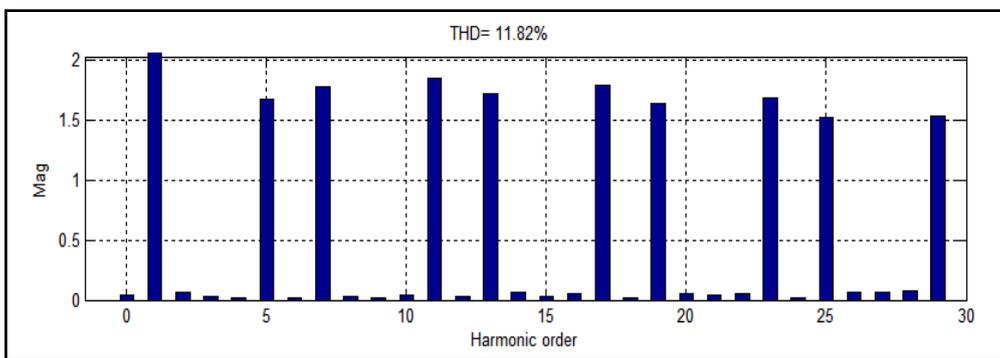


Figure IV.14 : Spectre du courant du réseau $I_{res}(t)$

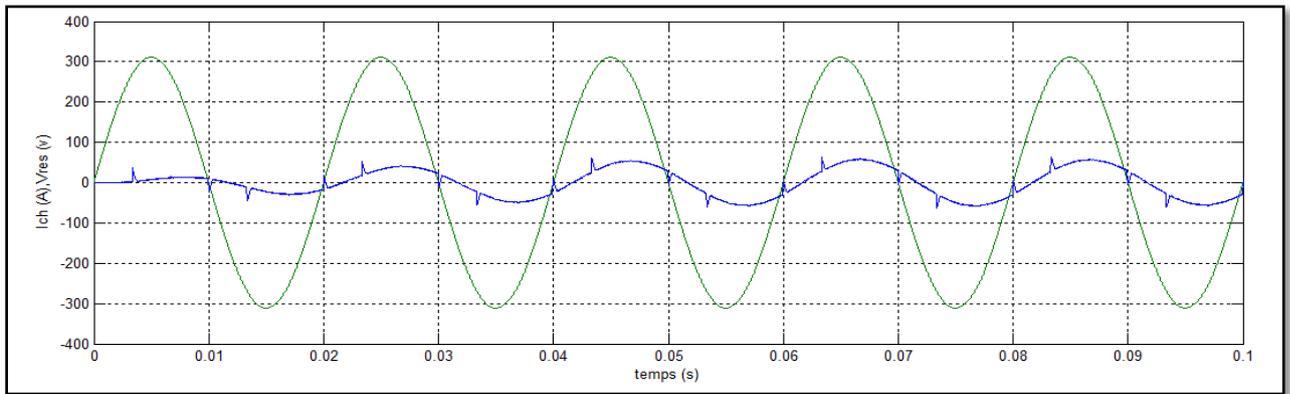


Figure IV.15: Tension et courant de réseau après filtrage V_{res} (v), I_{res} (A).

V_{res} (v) : en couleur vert, I_{res} (A) : en couleur bleu.

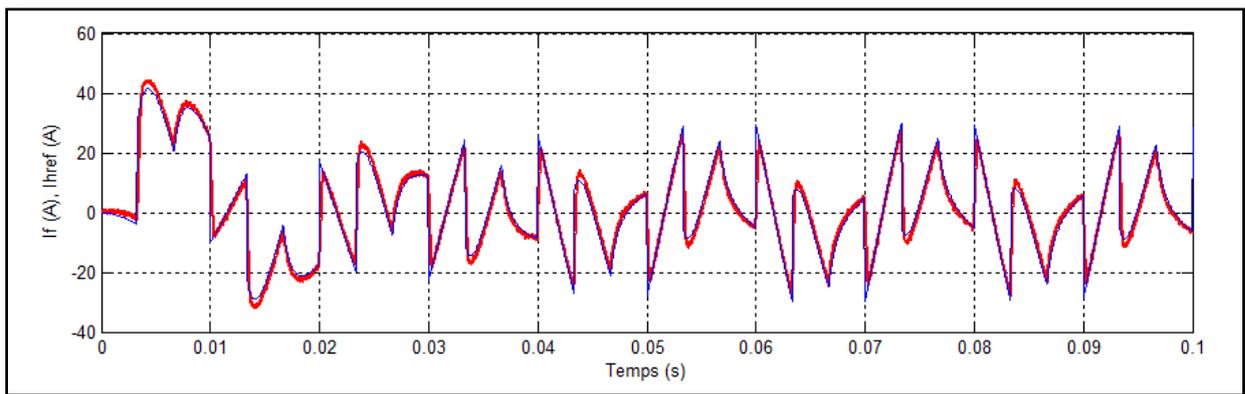


Figure IV.16 : Courant du filtre I_f (A) et sa référence I_{href} (A).

I_f (A) : en couleur rouge, I_{href} : en couleur bleu.

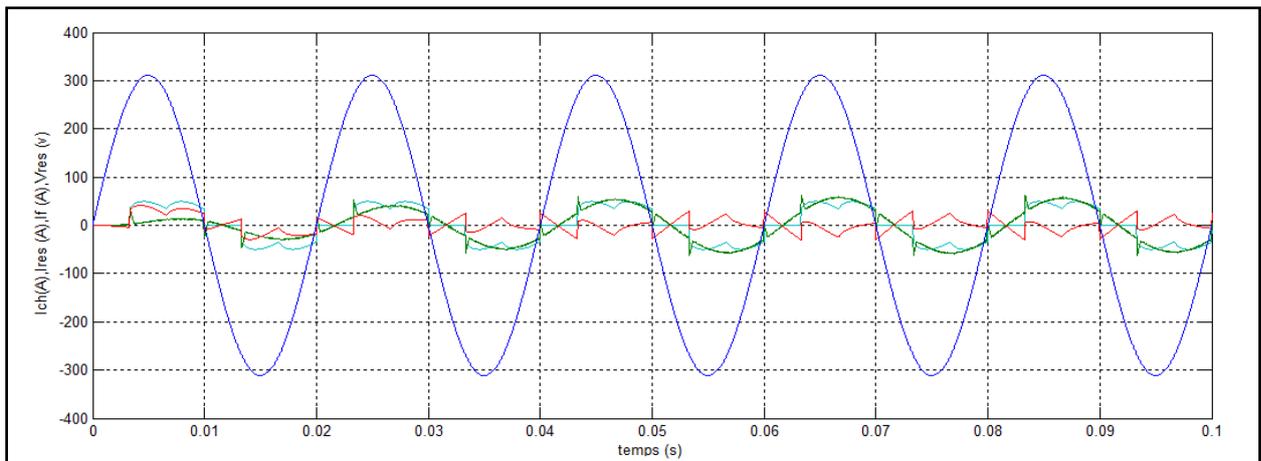


Figure IV.17 : Tension et courant de réseau et courant de filtre et de charge après le filtrage.

V_{res} (v) : en couleur bleu, I_{ch} (A) : en couleur bleu clair, I_f (A) : en rouge, I_{res} : en vert.

- Pour $\alpha = 60$

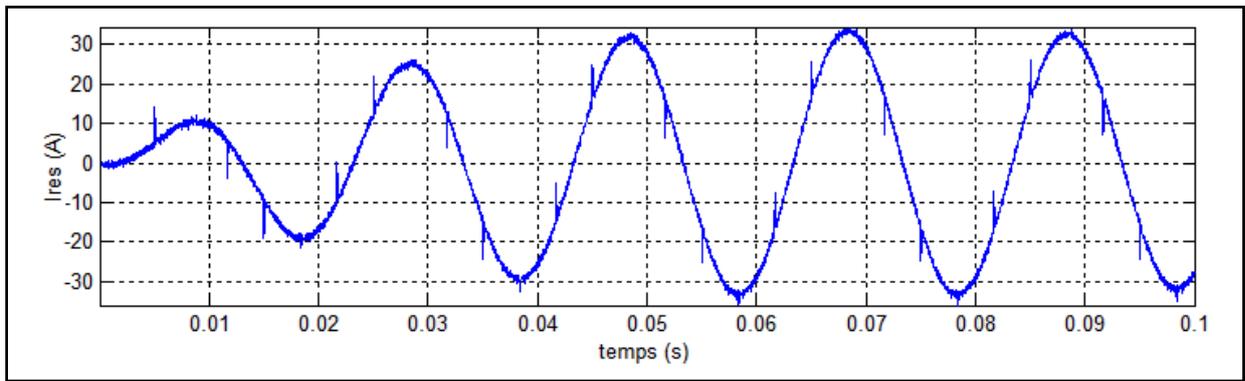


Figure IV.18 : Courant de réseau après filtrage.

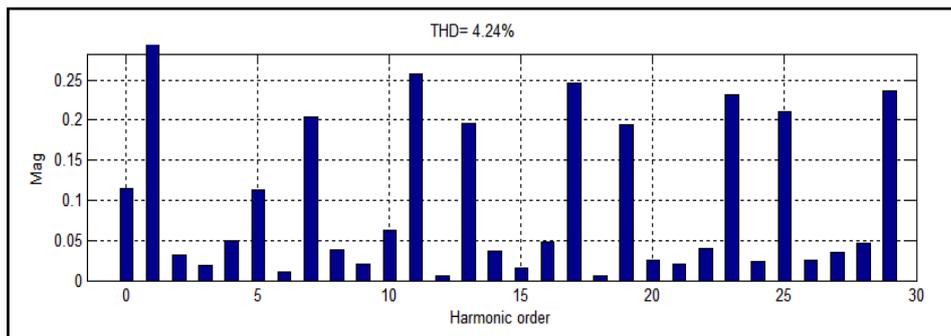


Figure IV.19 : Spectre du courant du réseau $I_{res}(t)$

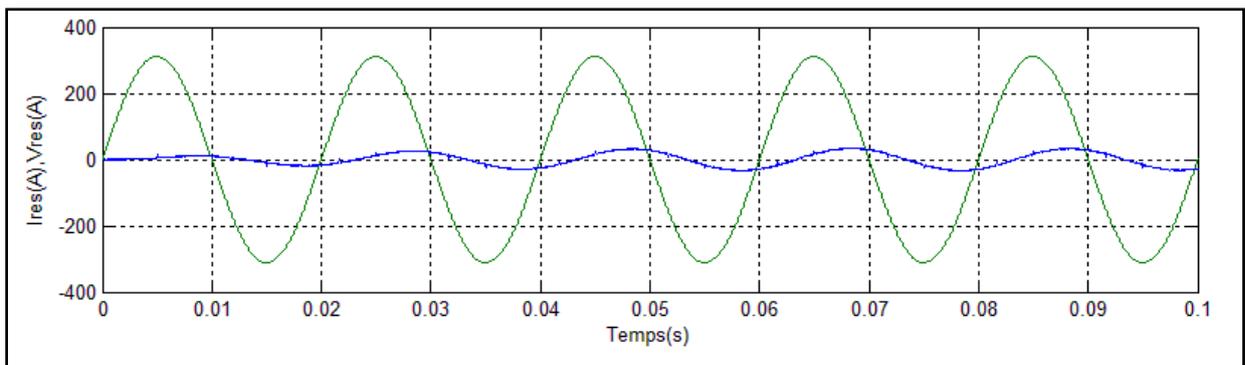


Figure IV.20: Tension et courant de réseau après filtrage $V_{res}(v)$, $I_{res}(A)$.

$V_{res}(v)$: en couleur vert, $I_{res}(A)$: en couleur bleu.

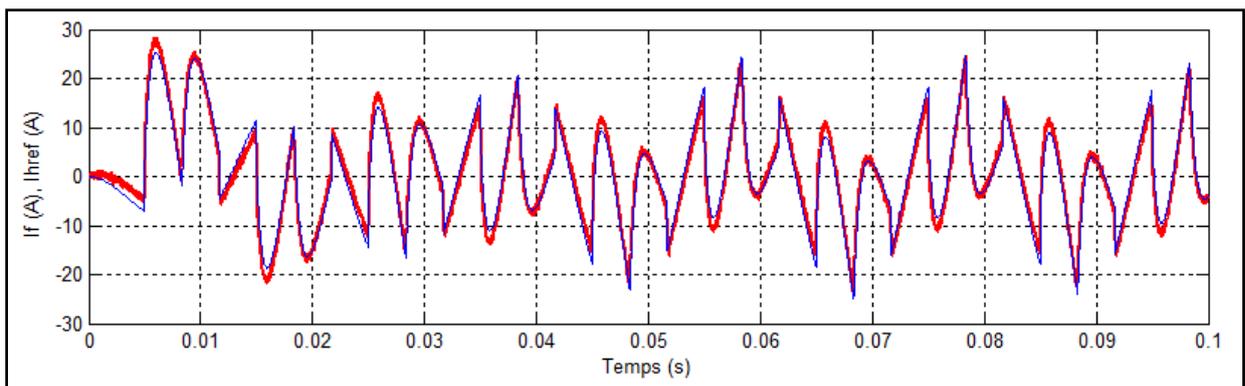


Figure IV.21 : Courant du filtre $I_f(A)$ et sa référence $I_{href}(A)$.

$I_f(A)$: en couleur rouge, I_{href} : en couleur bleu.

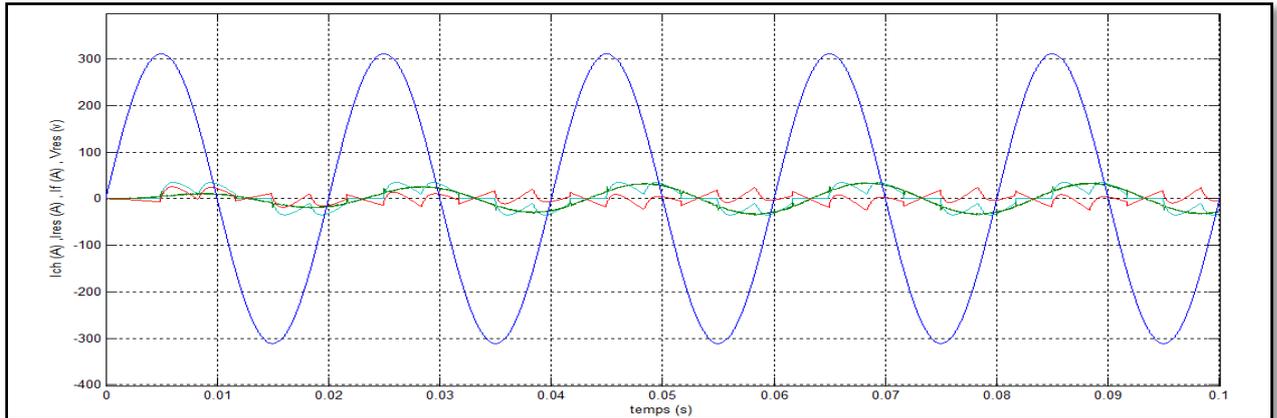


Figure IV.22 : Tension et courant de réseau et courant de filtre et de charge.

V_{res} (v) : en couleur bleu, I_{ch} (A) : en couleur bleu clair, I_f (A) : en rouge, I_{res} : en vert.

IV.4.1 Interprétations des résultats

On applique le filtre actif parallèle avec le régulateur PI, la commande de l'onduleur est MLI avec une porteuse ($m=30$; $r=0.85$).

On constate d'après les courbes de simulation (figure 8) et (figure 13) et (figure 18) que le courant dans le réseau devient presque sinusoïdal dès l'intégration du filtre actif parallèle. Cela est vérifié pour les deux commandes (à régulateur PI et à base de logique floue). Le courants de référence I_{href} sont bien identifiés par la méthode des puissances instantanées ce qui assure une

Excellente simulation les figure (IV.11), (IV.16), (IV.21), On remarque que les courants générés par le filtre suivent bien leurs références I_f , Ceci permet également d'injecter des courants harmoniques I_f au réseau Égax à ceux générés par la charge et de phases opposées. Le courant coté source devient alors sinusoïdal.

Après le filtrage le courant dans le réseau I_{res} caractérise par un taux de THD moins que celui du courant avant le filtrage, le taux de perturbation est variable en fonction de α comme montre les figures (IV.9), (IV.14), (IV.19). ($\alpha = 0^\circ \rightarrow THD = 15.33\%$, $\alpha = 30^\circ \rightarrow THD = 11.82\%$, $\alpha = 60^\circ \rightarrow THD = 4.24\%$). Le taux de perturbation du courant de charge change en fonctionne du taux d'harmonique du courant avant le filtrage.

IV.5 Résultats de simulation de filtre actif parallèle contrôlé par Régulateur logique floue

- Pour $\alpha = 0$

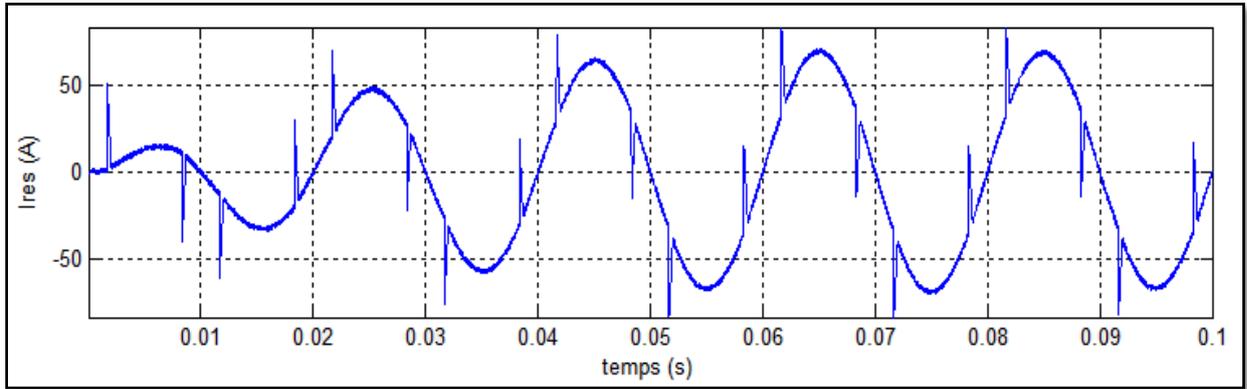


Figure IV.23 : Courant de réseau après filtrage.

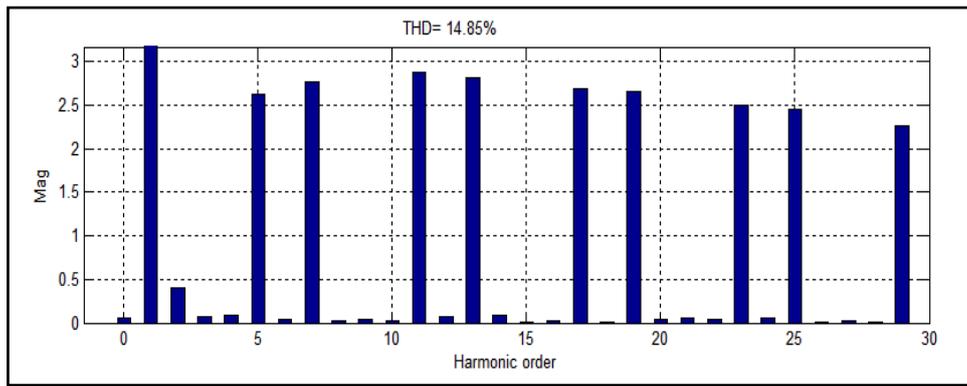


Figure IV.24 : Spectre du courant du réseau $I_{res}(t)$.

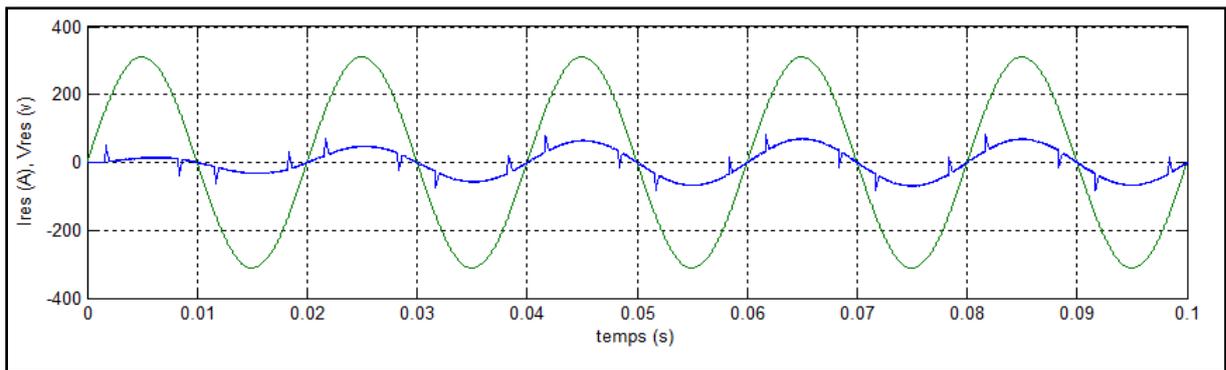


Figure IV.25: Tension et courant de réseau après filtrage $V_{res}(v)$, $I_{res}(A)$.

$V_{res}(v)$: en couleur vert, $I_{res}(A)$: en couleur bleu.

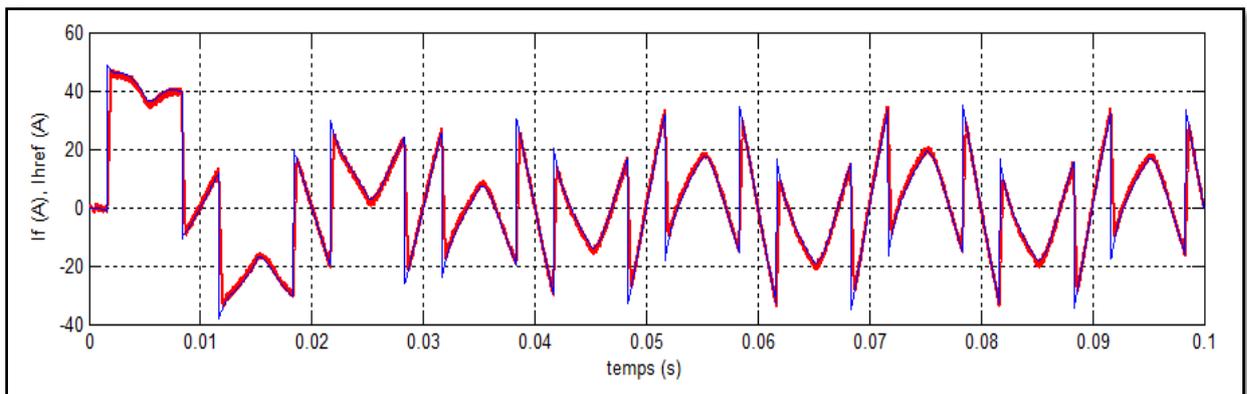


Figure IV.26 : Courant du filtre $I_f(A)$ et sa référence $I_{href}(A)$.

$I_f(A)$: en couleur rouge, I_{href} : en couleur bleu.

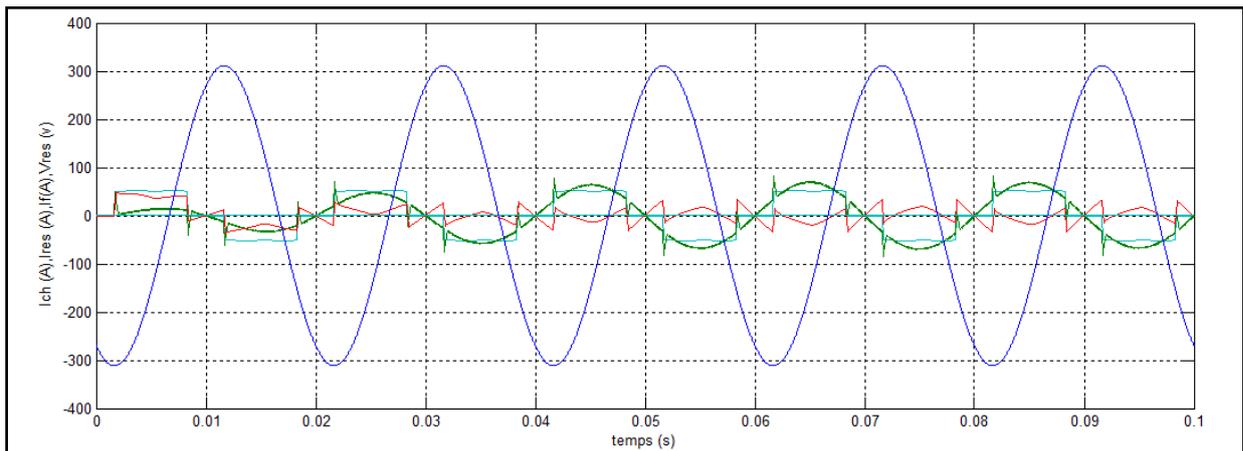


Figure IV.27: Tension et courant de réseau et courant de filtre et de charge.

V_{res} (v) : en couleur bleu, I_{ch} (A) : en couleur bleu clair, I_f (A) : en rouge, I_{res} : en vert.

- Pour $\alpha=30$

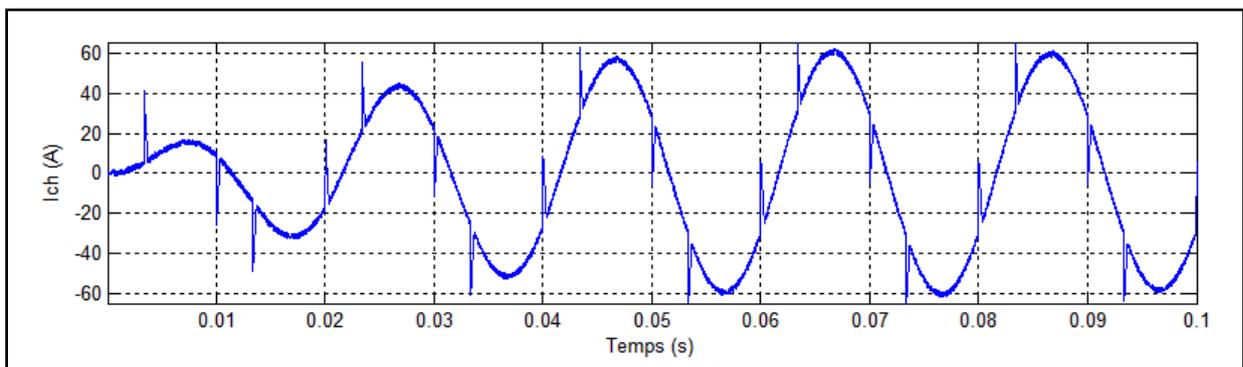


Figure IV.28 : Courant de réseau après filtrage.

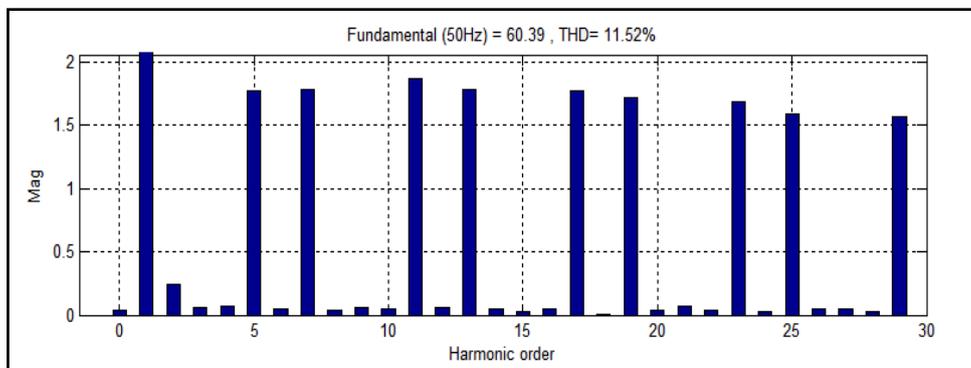


Figure IV.29 : Spectre du courant du réseau I_{res} (t)

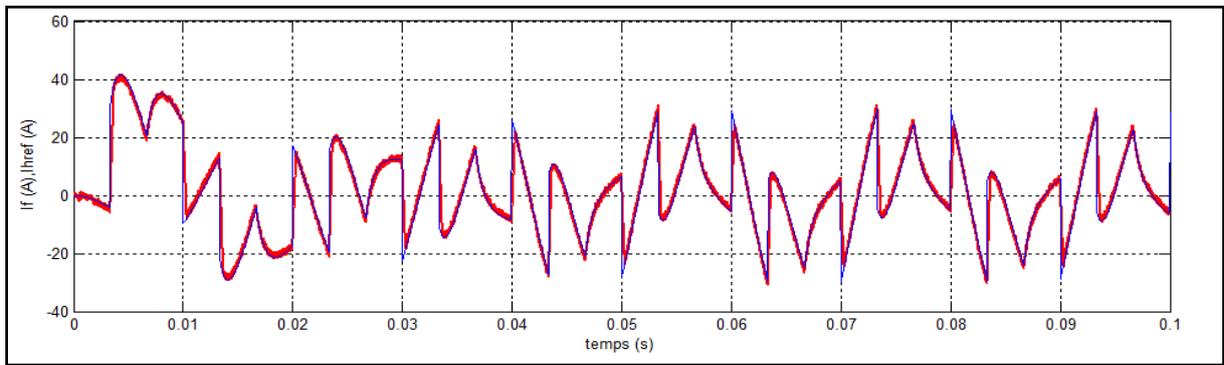


Figure IV.30 : Courant du filtre $I_f(A)$ et sa référence $I_{href}(A)$.

$I_f(A)$: en couleur rouge, I_{href} : en couleur bleu.

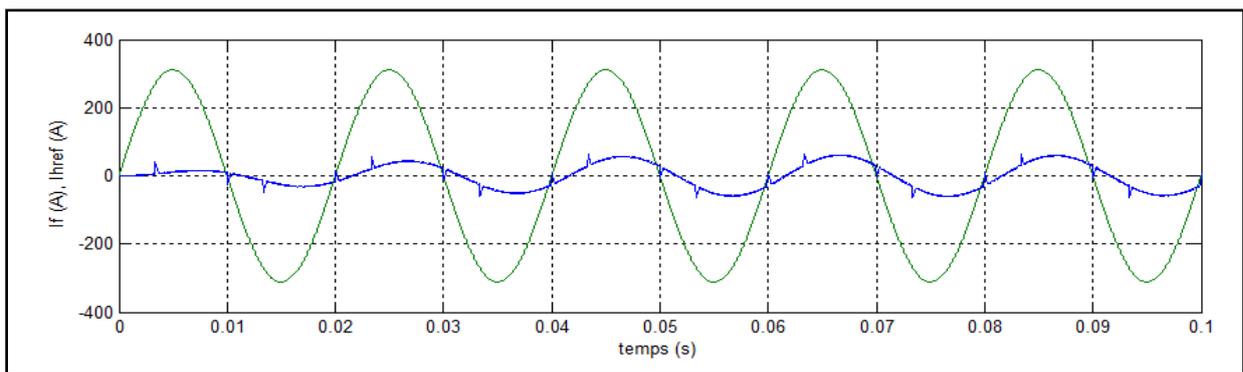


Figure IV.31 : Tension et courant de réseau après filtrage $V_{res}(v)$, $I_{res}(A)$.

$V_{res}(v)$: en couleur vert, $I_{res}(A)$: en couleur bleu.

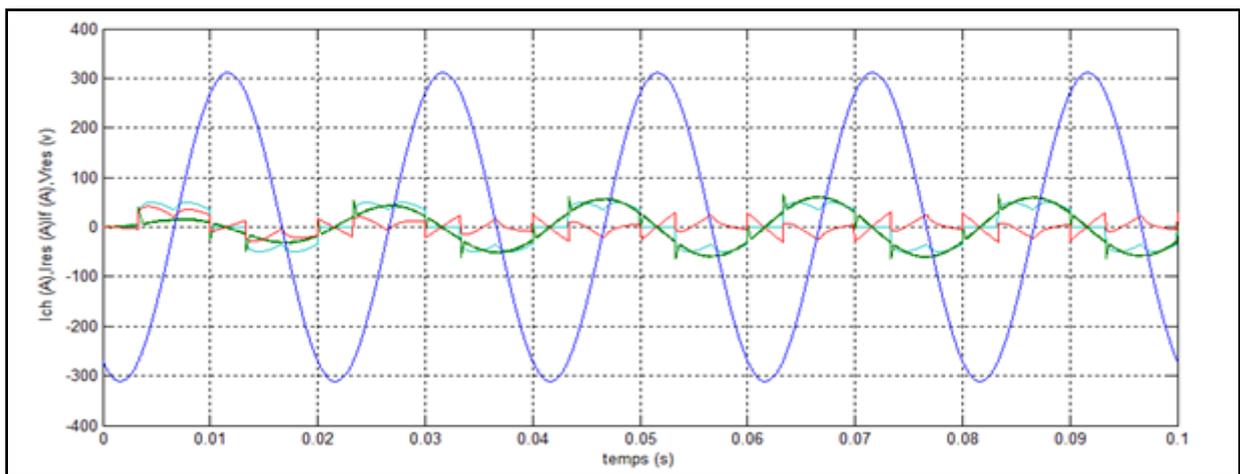


Figure IV.32 : Tension et courant de réseau et courant de filtre et de charge après le filtrage.

$V_{res}(v)$: en couleur bleu, $I_{ch}(A)$: en couleur bleu clair, $I_f(A)$: en rouge, I_{res} : en vert.

- Pour $\alpha = 60$

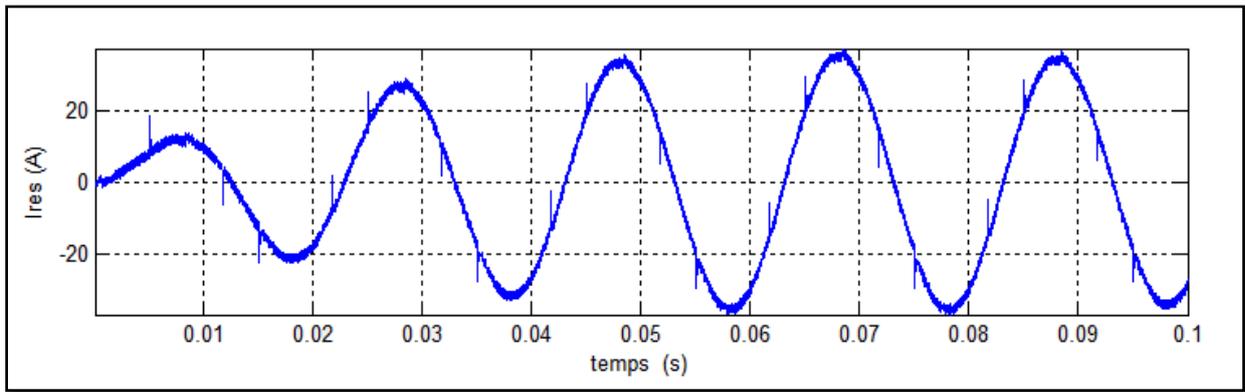


Figure IV.33 : Courant de réseau après filtrage.

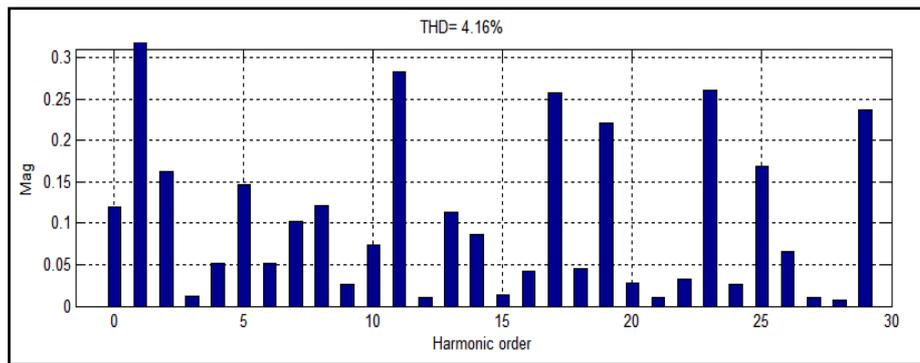


Figure IV.34 : Spectre du courant du réseau $I_{res}(t)$

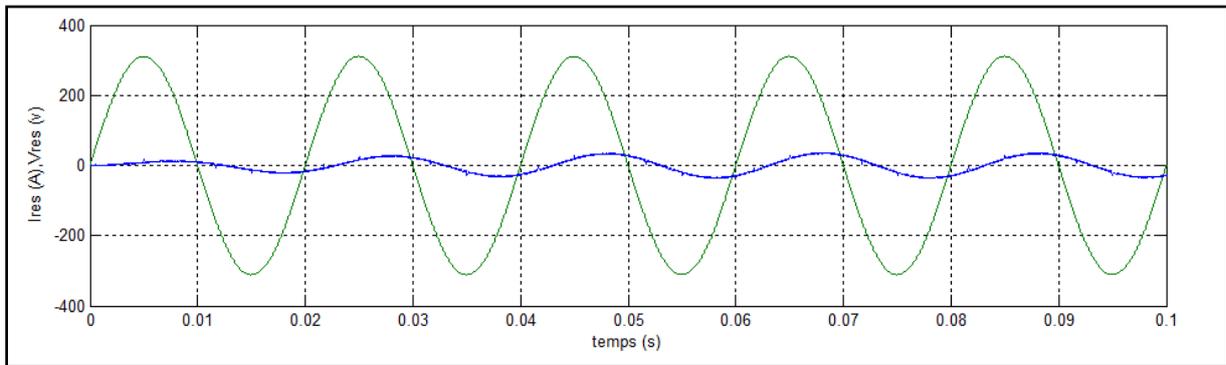


Figure IV.35 : Tension et courant de réseau après filtrage $V_{res}(v)$, $I_{res}(A)$.

$V_{res}(v)$: en couleur vert, $I_{res}(A)$: en couleur bleu.

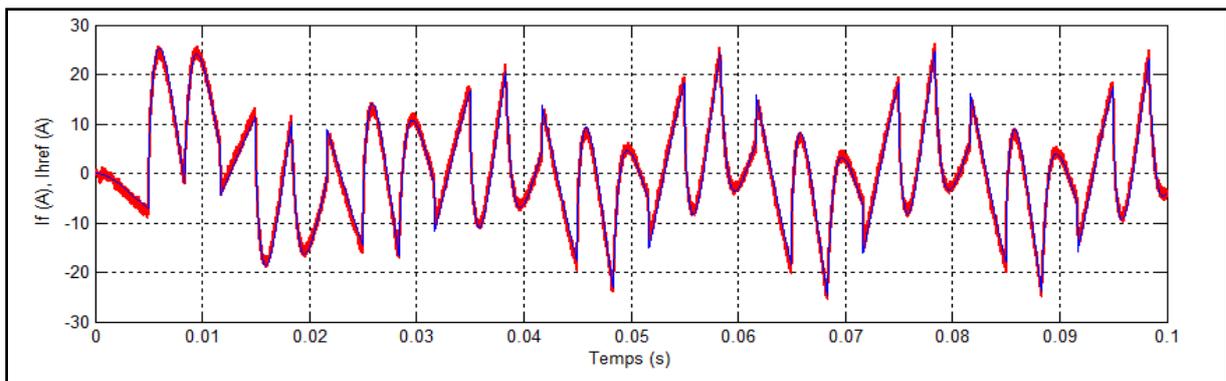


Figure IV.36 : Courant du filtre $I_f(A)$ et sa référence $I_{href}(A)$.

$I_f(A)$: en couleur rouge, I_{href} : en couleur bleu.

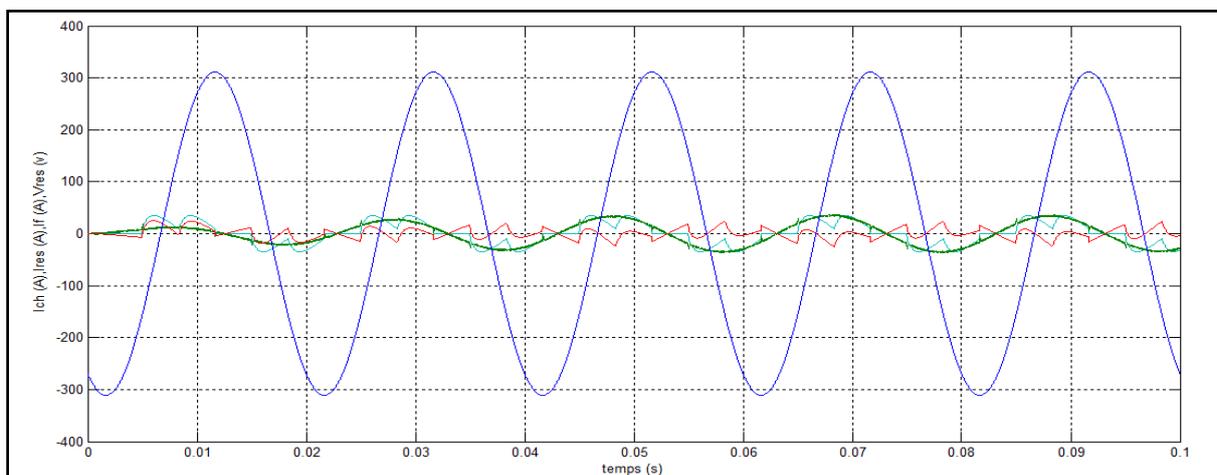


Figure IV.37 : Tension et courant de réseau et courant de filtre et de charge.

V_{res} (v) : en couleur bleu, I_{ch} (A) : en couleur bleu clair, I_f (A) : en rouge, I_{res} : en vert.

IV.5.1 Interprétations des résultats

Les figures précédentes montrent respectivement les formes des courants simulés pour le filtre actif parallèle à base du régulateur logique flou, les figures (IV.23), (IV.28), (IV.33) montrent que le courant dans le réseau devient presque sinusoïdal. On remarque d'après les courbes de courant I_{res} que la forme de signal est caractérisée par un taux de distorsion harmonique proportionnelle à l'angle (α) par contre les paramètres et le type de la commande de l'onduleur n'influencent pas sur ce dernier.

On remarque que le taux de perturbation change est proportionnelle avec la valeur de (α)

D'après les figures (IV.24), (IV.29), (IV.34) pour ($\alpha = 0^\circ \rightarrow \text{THD} = 14.85\%$; $\alpha = 30^\circ \rightarrow \text{THD} = 11.52\%$; $\alpha = 60^\circ \rightarrow \text{THD} = 4.82\%$) le taux de THD pour le courant de réseau diminue par rapport à la charge I_{ch} .

On remarque que les courants générés par le filtre I_f suivent bien leurs références I_{href} .

On constate que le courant est en phase avec la tension du réseau dans le cas du redresseur à ($\alpha = 0^\circ$) ainsi que les courants I_f , I_{href} et le courant dans le réseau avant le filtrage I_{ch} . Par contre, pour le redresseur à thyristors (α différent de zéro), le courant est déphasé par rapport à la tension du réseau, et ce déphasage augmente en fonction de l'angle d'amorçage, les figures (IV.37)(IV.32)(IV.27)

VI.6 comparaison de THD des méthodes de commande

La comparaison entre les deux stratégies de commande se fait en tenant compte que les paramètres du filtre actif parallèle sont identiques le changement se fait seulement par remplacer le régulateur PI par le FLC.

Le tableau (IV.1) représente valeur THD de courant dans le réseau en fonction de l'angle α de la charge non linéaire.

L'angle (α)	avant le filtrage THD (%)	après le filtrage THD (%)	
		PI	FLC
$\alpha = 0^\circ$	30.93	15.33	14.85
$\alpha = 30^\circ$	31.58	11.82	11.52
$\alpha = 60^\circ$	40.67	4.24	4.16

On remarque que le taux d'harmonique du courant du réseau avant le filtrage est très élevés par rapport au courant après le filtrage et cela pour les trois différents angles d'amorçage du pont redresseur α (0° , 30° , 60°) le THD (30.93%, 31.58%, 40.67%) successive.

On constate que la compensation des courants harmoniques en commande logique à base de logique floue est légèrement meilleure que celle de la commande à par régulateur PI dans le point de vue spectral d'après le tableau (IV.1), la régulation par logique floue caractérise par un traitement strict des signaux dans un intervalle court.

Conclusion

Dans ce chapitre, on a étudié les performances des algorithmes de commande du filtre actif parallèle appliqué sur la charge non linéaire. La méthode d'identification des harmoniques est très importante pour la qualité de filtrage du courant, Les résultats de simulation montrent l'efficacité de la 'méthode des puissances instantanées' à identifier les courants harmoniques, afin qu'ils soient filtrés. La commande par logique floue est meilleure pour la qualité de filtrage par rapport au régulateur PI, la commande de l'onduleur à deux porteuses n'influence pas beaucoup sur le courant après le filtrage.

Finalement, notre étude sur la compensation des courants harmoniques, nous a montré l'efficacité des onduleurs à trois niveaux utilisés dans les filtres actifs.

Conclusion générale

Dans ce mémoire on s'est intéressé à l'étude du filtrage actif parallèle a onduleur trois

niveaux commandé par logique floue.

En premier, après l'analyse des perturbations harmoniques, leur origine et leurs effets sur le réseau électrique, on a présenté les solutions traditionnelles pour les réduire, notamment le filtrage passif. Le filtrage actif est une nouvelle solution pour la dépollution harmonique.

On a ensuite étudié le contrôle de ce filtre actif. Pour identifier les courants harmoniques, on a choisi la méthode des puissances instantanées qui donne des très bons résultats. Le filtre actif parallèle est basé sur l'onduleur trois niveau dans notre travail l'onduleur est commandé par MLI a une et deux porteuse, notre système est commandé par le contrôleur logique floue (FLC).

On a réalisé le programme simulation avec deux méthodes de commande par logique floue et aussi par PI pour connaitre le mieux et le plus fiable pour la compensation des perturbations harmoniques.

En dernier en exploitant ce programme, on a optimisé les paramètres d'un filtre actif associé. Avec ce filtre, le THD des courants dans la source réduit pour le FLC et meilleur en vue du spectre du courant filtré.

REFEARANCE

[1] M.A.E. Allali,

« Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électrique basse tension »,

Thèse de Doctorat, ULP Strasbourg I. 12 sept 2002.

[2] VANYA IGNATOVA ,

« Méthodes d'analyses de la qualité de l'énergie électrique, application au creux de tension et à la pollution harmonique », Thèse de docteur de l'UDF. Université JOSEPH FOURIER
Octobre 2006.

[3] G.Segier

« Perturbations harmoniques : Effets, origine, mesures, diagnostic, remède », Dunod, Paris
2000.

[4] Segulier (G.),

« La conversion alternatif-continu », Tec & doc Lavoisier, 1984, Les convertisseurs de
l'électronique de puissance, volume 1.

[5] Rombaut (C.), Segulier (G.) et Bausiere (R.).

« La conversion alternatif alternatif », Tec & doc Lavoisier, 1986, Les convertisseurs de
l'électronique de puissance, volume 2.

[6] subjak (j.) et Mcquilkin(j.),

« harmonics-causes, effects, measurement and analysis », IEEE Trans. On Ind. Appl.,
vol.26,n6, ,app . 1034-1042 November/december 1990

[07] R. Atseneau,

« Pratical Definitions for Powers in System with Nonsinusoidal Waveforms and Unbalanced
Loads » : Discussion , IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 11, No. 1, app. 79-101, Jan
1996.

[8] T.Deflandre, P.Mauras,

« Les harmoniques sur les réseaux électriques ».

[9] I. Etxeberria-Otadui,

« Les Systèmes de l'Electronique de Puissance dédiés à la Distribution Electrique Application
à la Qualité de l'Energie », Thèse de l'Institut Nationale Polytechnique de Grenoble (France),
Septembre 2003.

[10] Jean Noël Fiorina,

« Harmoniques en amont des redresseurs des ASI », Cahier Technique Merlin Gerin, Mars
1993

[11] J.Bonal, G.Segulier,

« Entraînement électrique à vitesse variables », Technique et documentation, 2000.

[12] T. Benslimane,

« Commande numérique d'un filtre actif parallèle autonome », Mémoire de Magister, Ecole Militaire Polytechnique, 08 Février 2004.

[13] MEKARNIA OMAR –BOUFASSA RABAH,

« Modélisation et commande d'un UPFC utilise en filtrage des courants harmoniques d'un réseau électrique », PFE d'ingénieur d'état en électrotechnique, école nationale polytechnique

[14] DIAFF YOUSOUF-BENANTER DJAMAL,

« Modélisation et commande d'un onduleur triphasé pilote par MLI a structure multi niveaux »,Mémoire de master Université KASDI MERBAH OUARGLA 2012.

[15] B. Samir,

« Filtrage actif parallèle des réseaux électrique Avec compensation de l'énergie réactive », D'ingénieur d'état en génie électrotechnique, M'SILA 2006-2007.

[16] M Raouf ,

« Étude et simulation d'un moteur asynchrone alimenté par un onduleur de tension multi-niveaux » , Ingénieur d'état en génie électrotechnique M'SILA 2004-2005.

[17] B. KHALIFA,

« Réalisation d'un banc d'essai pour la Commande et l'observation des Convertisseur Multicellulaires Série : Approche Hybride » , Grade de docteur Université de CERGY-PONTOISE 2009.

[18] B.SAMIR,

« Filtrage actif parallèle des réseaux électriques avec compensation de l'énergie réactive » , Thèse ingénieur d'état en génie électrique Université Msila 2007.

[19] Melle HIND DJEGHLOUD,

« Filtrage actif de puissance »,Thèse doctorat en génie électrique .Université MENTOURI Constantine 2007.

[20] Boutraa Leila,

« Filtrage actif des harmoniques des réseau électriques », Thèse de Magister de l'Université de BATNA, 2005.

[21] Ould-Ouali Samy Hassani,

« Etude et réalisation d'un filtre actif parallèle commandé par Logique Floue » , Thèse de Magister de l'Ecole Militaire Polytechnique, 9 Janvier 2002.