



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة غرداية

Université de Ghardaïa

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم الآلية والكهروميكانيك

Département d'automatique et électromécanique

Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme

N°

d'enregistrement

...../...../.....

Master

Domaine: Sciences et Technologies

Filière: électrotechnique

Spécialité: énergie renouvelable en électrotechnique

Thème

**MODELISATION ET COMMANDE D'UN
FILTRE ACTIF PARALLELE**

Présenté par:

CHEHMA Sayeh Bilel

SIRADJ Idris

Soutenu devant le jury composé de:

ABDELKRIM THAMEUR	Directeur de recherche	URAER Ghardaïa	Président
MOUSSA OUSSAMA	MCB	Univ. Ghardaïa	Examineur
KHATTARA ABDELWAHAB	MCA	Univ. Ghardaïa	Examineur
BOURAGHDA SKANDER	MCB	Univ. Ghardaïa	Encadreur

Année universitaire 2022/2023

I. DEDICACE

Nous dédions ce mémoire

À nos chers parents

À nos frères et sœurs

À nos belles familles

II. REMERCIEMENTS

Notre profonde gratitude va au Dieu Tout-Puissant pour nous avoir aidés à accomplir cette tâche.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements et ma gratitude à mon encadrant, M. BOURAGHDA SKANDER, dont le soutien indéfectible a été essentiel pour assurer la réussite de cette mémoire. De plus, je tiens à exprimer mes sincères remerciements aux membres du jury pour leur disponibilité à évaluer ce travail.

Ma famille, y compris mon père, ma mère et mes frères et sœurs, mérite tous mes remerciements pour le soutien et les encouragements constants qu'ils m'ont apportés tout au long de mes études.

J'exprime ma sincère gratitude à mes amis qui ont été mes compagnons constants, partageant mes joies et mes peines, apportant du réconfort dans les moments difficiles et créant ensemble des moments de loisirs mémorables.

III. RESUME

Le principal problème abordé dans cette mémoire concerne la dégradation des systèmes électriques, qui peut être attribuée à l'augmentation des charges non linéaires. Pour pallier ce problème, nous proposons l'utilisation d'un filtre actif parallèle sous la forme d'un onduleur à deux niveaux. Ce filtre introduira des courants harmoniques au point de connexion en utilisant la méthode de puissance instantanée. Trois stratégies de contrôle distinctes seront examinées : l'hystérésis, la modulation de largeur d'impulsion (MLI) et l'hystérésis floue. Grâce à des simulations réalisées à l'aide de Simulink de Matlab, les résultats indiquent une diminution notable de la distorsion harmonique totale (THD).

MOTS CLES

Qualité de l'énergie, harmoniques, onduleur deux niveaux, filtre actif parallèle, charge non linéaire, Commande à hystérésis, Commande à MLI, hystérésis à bande floue

ملخص

المشكلة الرئيسية التي تم تناولها في هذه الأطروحة تتعلق بتدهور الأنظمة الكهربائية ، والتي يمكن أن تؤدي إلى زيادة الأحمال غير الخطية. للتغلب على هذه المشكلة ، نقتراح استخدام مرشح نشط متوازي في شكل عاكس من مستويين. سيقدم هذا المرشح تيارات توافقية عند نقطة الاتصال باستخدام طريقة القدرة اللحظية. سيتم فحص ثلاث استراتيجيات تحكم متميزة: التخلفية ، تعديل عرض النبضة (MLI) والتباطؤ الضبابي. من خلال عمليات المحاكاة التي أجريت باستخدام Matlab's Simulink ، تشير النتائج إلى انخفاض ملحوظ في التشويه التوافقي الكلي (THD).

الكلمات المفتاحية

جودة الطاقة ، التوافقيات ، العاكس ثنائي المستوى ، الفلتر النشط المتوازي ، الحمل غير الخطي ، التحكم في التباطؤ ، التحكم في عرض النبضة

SUMMARY

The main problem addressed in this thesis concerns the degradation of electrical systems, which can be attributed to the increase in nonlinear loads. To overcome this problem, we propose the use of a parallel active filter in the form of a two-level inverter. This filter will introduce harmonic currents at the connection point using the instantaneous power method. Three distinct control strategies will be examined: hysteresis, pulse width modulation (PWM) and fuzzy hysteresis. Through simulations performed using MATLAB's Simulink, the results indicate a noticeable decrease in total harmonic distortion (THD).

KEY WORDS

Power quality, harmonics, two-level inverter, parallel active filter, non-linear load, hysteresis control, PWM control, fuzzy bung hysteresis

IV. LISTE DES FIGURES

Fig. I. 1. Exemple d'un courant contenant des harmoniques et décomposition en rangs harmoniques de rang 1 (fondamental), 3, 5, 7 et 9.....	4
Fig. I. 2. Représentation graphique des inters et infra harmoniques	5
Fig. I. 3. Structure d'une charge linéaire résistive triphasé	6
Fig. I. 4. Formes d'ondes de la tension et courant absorbé par une charge résistive	7
Fig. I. 5. Pont redresseur à diode débite sur une charge inductive.....	7
Fig. I. 6. Forme d'onde du courant de réseau par l'effet de la charge polluante.....	7
Fig. II. 1. Schéma de liaison à la terre	15
Fig. II. 2. Exemple de schéma des transformateurs déphaseurs raccordés au réseau pour éliminer les 5ème et 7ème harmoniques.	16
Fig. II. 3. (a) Structure du redresseur 12 impulsions, (b) Forme d'onde du courant de réseau ...	17
Fig. II. 4. (a) Structure du redresseur 24 impulsions, (b) Forme d'onde du courant de réseau. .	18
Fig. II. 5. Structure d'un redresseur MLI	18
Fig. II. 6. (a) Filtre passif série, (b) Filtre passif parallèle.....	20
Fig. II. 7. (a) Courbe de résonance, (b) Filtre résonant parallèle	21
Fig. II. 8. (a) Filtre amorti parallèle, (b) Courbe de résonance	22
Fig. II. 9. Types de filtre amorti	22
Fig. II. 10. Schéma monophasé d'un réseau avec deux filtres résonants et un filtre amorti	23
Fig. II. 11. Représentation du réseau côté ca.....	24
Fig. II. 12. Principe de fonctionnement du filtre actif parallèle	26
Fig. II. 13. Filtre actif parallèle.....	27
Fig. II. 14. Filtre actif série.....	28
Fig. II. 15. Conditionneur universel de la qualité d'onde.....	28
Fig. II. 16. Filtre hybride parallèle	29
Fig. II. 17. Filtre hybride série.....	30
Fig. II. 18. Association filtre actif parallèle et filtre passif résonant	31
Fig. III. 1. Schéma de génération des courants harmoniques de référence selon la théorie f	38
Fig. III. 2. Algorithme d'identification basé sur la détection du courant de charge.....	40
Fig. III. 3. Algorithme d'identification des courants de référence à base du filtre Notch.....	41

Fig. III. 4. Algorithme d'identification des courants harmoniques de référence à base du référentiel synchrone (Park)	43
Fig. IV. 1. Structure du filtre actif parallèle.	45
Fig. IV. 2. Structure des unités de puissance et de commande du FAP	47
Fig. IV. 3. Structure de l'onduleur de tension à deux niveaux	48
Fig. IV. 4. Principe de la commande des courants par hystérésis.	49
Fig. IV. 5. Principe de commande des courants par MLI.....	50
Fig. IV. 6. Schéma général d'un système flou	51
Fig. IV. 7. Défuzzification par centre de gravité.	53
Fig. IV. 8. les fonction d'appartenance des variable.	54
Fig. IV. 9. Principe de la Commande hystérésis à bande floue.	54
Fig. V. 1. Schéma globale du système étudié.....	56
Fig. V. 2. Le système de puissance utilisé.....	57
Fig. V. 3. Courant de source I_s (A).....	57
Fig. V. 4. analyse spectrale du courant de la source avant filtrage (THD = 28.38 %)	57
Fig. V. 5. Courant de charge I_L (A)	58
Fig. V. 6. Courant injecté par le filtre I_f (A)	58
Fig. V. 7. Courant de source I_s (A)	58
Fig. V. 8. analyse spectrale du courant de la source après filtrage (THD = 3.45 %)	59
Fig. V. 9. Courant de source I_s (A)	59
Fig. V. 10. analyse spectrale du courant de la source après filtrage (THD = 4.01 %)	59
Fig. V. 11. Courant de source I_s (A)	60
Fig. V. 12. Courant de charge I_L (A)	60
Fig. V. 13. Courant injecté par le filtre I_f (A)	60
Fig. V. 14. analyse spectrale du courant de la source après filtrage (THD = 2.27 %)	60

V. LISTE DES TABLEAUX

Tab. II. 1. Comparaison entre le filtre hybride parallèle et le filtre hybride série.	31
Tab. II. 2. Comparaison entre le filtre actif et le filtre passif.	32
Tab. II. 3. Comparaison entre le filtre actif, le filtre passif et filtre hybride.	32
Table. IV. 1. Puissance du filtre actif en fonction des objectifs de compensation	47
Table. IV. 2. Règles de la commande floue.	54
Tab. V. 1. Paramètres de simulation	57

VI. LISTE DES MATIERES

I. DEDICACE	2
II. REMERCIEMENTS	3
III. RESUME	4
IV. LISTE DES FIGURES	6
V. LISTE DES TABLEAUX	8
VI. LISTE DES MATIERES	9
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I	3
ETAT DE L'ART SUR LES PERTURBATIONS HARMONIQUES DANS LES SYSTEMES ELECTRIQUE	3
I.1 Introduction	3
I.2 Les Perturbations harmoniques	3
I.2.1. Inter-harmoniques.....	5
I.2.2. Infra-harmoniques.....	5
I.3. Classification des harmoniques	5
I.3.1. Harmoniques du système direct.....	5
I.3.2. Harmoniques du système inverse	6
I.3.3. Harmoniques du système homopolaire.....	6
I.4. Charges électriques raccordés au réseau électrique	6
I.4.1. Charge électrique linéaire	6
.....	7
I.4.2. Charges non linéaires.....	7
I.5. Origine des harmoniques	8
I.6. Effets des perturbations harmoniques	8
I.6.1. Effets instantanés.....	8
I.6.2. Effets à long terme.....	9

I.7. Caractérisation des perturbations harmoniques induite par des charges non linéaires	10
.....	
I.7.1. Valeurs efficaces de la tension et du courant.....	10
I.7.2. Puissance instantanée et puissance moyenne en régime déformé	10
I.7.3. Puissances apparente, active, réactive et de distorsion	10
I.7.4. Facteur de puissance Fp	11
I.7.5. Distorsion harmonique individuelle THDi	12
I.7.6. Taux de distorsion harmonique THD	12
CHAPITRE II.....	14
STRATEGIES DE PREVENTION DES PERTURBATIONS HARMONIQUES.....	14
II.1 Introduction	14
II.2 Surdimensionnement du neutre	14
II.3 Transformateur spéciaux.....	15
II.3.1 Transformateur de type K.....	15
II.3.2 Transformateur de mise à la terre	15
II.3.3 Transformateur déphaseurs	16
II.4. Filtrages harmoniques	17
II.4.1. Filtrage interne des harmoniques	17
II.4.1.1 Utilisation d'un redresseur 12 ou 24 impulsions	17
II.4.1.2. Utilisation du redresseur MLI.....	18
II.4.2. Filtrage externe.....	19
II.4.2.1 Filtrage passif.....	19
a) Principe de fonctionnement	19
b) Classification des filtres passifs.....	19
c) Filtre passif parallèle.....	20
d) Types de filtre passif parallèles	20
i. Filtre passif résonant	20
ii. Filtre passif amorti.....	21

e)	Coût du filtre passif	23
f)	Effet de l'impédance réseau sur le filtre passif	24
II.4.2.2.	Filtrage actif.....	25
a)	Principe du filtrage actif	26
b)	Classification des filtres actifs	26
i.	Filtre actif parallèle (FAP).....	26
ii.	Filtre actif série (FAS).....	27
iii.	Conditionneur universel de la qualité d'onde.....	28
c)	Effet de l'impédance du réseau sur le filtre actif.....	29
II.4.2.3.	Filtre hybride.....	29
a)	Association filtre actif parallèle avec des filtres passifs parallèles	29
b)	Association filtre actif série avec des filtres passifs parallèles	30
c)	Association série d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif.....	31
II.4.2.4.	Comparaison générale entre le filtre passif, filtre actif.....	31
II.4.2.5.	Comparaison entre le filtre passif, filtre actif et filter hybride	32
II.5	Conclusion	32
CHAPITRE III	34
STRATEGIES D'EXTRACTION GLOBALE DES COURANTS HARMONIQUES DE	REFERENCES.....	34
III.1.	Introduction.....	34
III.2.	Techniques d'identification des harmoniques de références	34
III.2.1.	Domaine fréquentiel.....	34
III.2.1.1	Méthodes de Fast Fourier Transform (FFT).....	35
III.2.1.2	Technique de la multiplication sinusoïdale	35
III.2.2.	Domaine temporel.....	35
III.2.2.1	Méthode de la puissance instantanée ($p-q$).....	35
III.2.2.2.	Technique d'identification basée sur la détection du courant de charge (DCC).....	39

a)	Détermination de la valeur $I_s - max$	39
b)	Principe de la méthode.....	39
III.2.2.3.	Algorithme d'identification basé sur le filtre Notch.....	40
III.2.2.4.	Méthode de référentiel synchrone Park ($d-q$).....	41
CHAPITRE IV		44
DIMENSIONNEMENT, FONCTIONNEMENT ET COMMANDE DU FILTRE ACTIF PARALLELE (FAP)		44
IV.1. Introduction		44
IV.2. Objectif du filtrage actif parallèle		44
IV.3. Dimensionnement de la puissance nominale du FAP triphasé		45
IV.4. Structure de puissance et commande du FAP		47
IV.4.1. Partie puissance du filtre actif parallèle		47
IV.4.1.1. Onduleur triphasé de tension.....		48
IV.4.1.2. Condensateur du stockage d'énergie.....		48
IV.4.1.3. Inductance de couplage au réseau		49
IV.4.2. Partie contrôle du filtre actif parallèle		49
IV.4.2.1. Commande à hystérésis.....		49
IV.4.2.2. Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI).....		50
IV.4.2.3. Commande par logique floue		50
a.	Interface de fuzzification	51
b.	Base de règles	51
c.	Mécanisme d'inférence floue	51
d.	Interface de Défuzzification	52
i.	Méthode du maximum	52
ii.	Méthode de la moyenne des maxima.....	52
iii.	Méthode du centre de gravité	52
IV.4.2.4.	Commande par hystérésis à bande floue.....	53
IV.4.2.5.	Principe de la commande hystérésis à bande floue.....	54

IV.5. Conclusion	55
CHAPITRE V	56
RESULTANTS DE SIMULATION	56
V.1. Introduction	56
V.2. Description global de la simulation	56
V.3. Résultats de simulation de l'ensemble réseau - charge avant le filtrage	56
V.4. Application du Filtre actif parallèle	58
V.5. Résultats de simulation de l'ensemble réseau - charge après le filtrage	58
V.5.1. Commande par hystérésis ($\Delta h = 0.1$)	58
V.5.2. Commande par MLI.....	59
V.5.3. La commande hystérésis à bande floue.....	60
V.6. Interprétation	61
V.7. Conclusion	62
CONCLUSION GENERALE	63
BIBLIOGRAPHIES	65
ANNEXE	71

INTRODUCTION GENERALE

Aujourd'hui, la situation au niveau des réseaux d'énergie électrique est devenue très préoccupante, la qualité du courant dans les installations électriques se dégrade incontestablement. La source de cette dégradation peut être attribuée à l'augmentation des charges de courant non sinusoïdales, communément appelées « charges non linéaires ». Ces charges sont utilisées dans les secteurs commercial, industriel et résidentiel pour faciliter la conversion, la modification et la régulation de l'énergie électrique.

Ces charges non linéaires continuent à produire des harmoniques qui circulent dans les réseaux électriques, ce qui peut perturber le fonctionnement régulier voire conduire à la destruction de certains équipements électriques. Ces conséquences négatives peuvent se produire tout de suite ou après un certain temps.

Des multiples systèmes de filtrage ont été créés et utilisés pour réduire ou éliminer ces perturbations et améliorer la qualité de l'énergie électrique, y compris des filtres passifs, qui permettent l'élimination des harmoniques de courant et la compensation de la puissance réactive. Cependant, les systèmes de filtrage traditionnels présentent certains inconvénients, comme le fait qu'ils sont fixés sur des fréquences fixes au départ, l'apparition de phénomènes de résonance, etc.

Des systèmes de filtrage modernes, également appelés Active Power Filters, ont été développés ces dernières années par des chercheurs travaillant dans le domaine du filtrage de puissance pour pallier ces inconvénients. Parmi ces systèmes se trouve le filtre actif parallèle, qui doit être connecté en parallèle avec la source et tient compte des harmoniques de courant et de la puissance réactive. Les tensions harmoniques et plusieurs autres perturbations liées à la tension peuvent être compensées par le filtre actif série, qui doit être relié en série avec la source de tension. L'UPQC (Conditionneur universel de la qualité d'onde) est la seule méthode qui peut être utilisée pour compenser toutes les perturbations de courant et de tension.

La problématique de recherche à traiter dans cette mémoire consiste donc en :

L'étude de l'ensemble de ces systèmes de filtrage actifs (FAP)

Développement de modèles de simulation numérique reflétant le fonctionnement de ce système de filtrage (FAP) en utilisant le Logiciel MATLAB-Simulink. Dans ce cadre, que ce travail a été tracé et réalisé. Il est présenté en 5 chapitres :

Le 1^{er} chapitre sera présenté comme un état de l'art sur les perturbations harmoniques dans les systèmes électriques. On définit et classait principalement les perturbations

harmoniques et leurs origines. Ainsi que la nature des charges connectées aux réseaux et leur caractérisations et effets de ces derniers.

Le deuxième chapitre, montre les stratégies de prévention des perturbations harmoniques en l'utilisation des appareils propres, des dispositifs de filtrage et des filtres hybrides.

Dans le troisième chapitre, on présente les stratégies d'extraction globale des courants harmoniques avec les différentes techniques d'identifications (La méthode d'identification des courants perturbés (méthode de puissance imaginaire instantanées $p-q$) et leurs Algorithmes.

Dans le quatrième chapitre, nous présentons les objectives du filtrage actif parallèle (FAP) et le dimensionnement de la puissance nominale du FAP triphasé. Pour compenser les harmoniques de courant dans un réseau électrique tri-filaire, nous aborderons la composante contrôle-commande du système FAP, qui consiste à réguler le courant de sortie du compensateur actif par différentes méthodes telles que : le contrôle de courant par hystérésis, le contrôle MLI et contrôle de l'hystérésis de la bonde floue.

Dans le cinquième chapitre, en utilisant le logiciel de simulation MATLAB et nous permettent d'analyser les performances et la faisabilité du système de compensation des harmoniques. Finalement, on présente une conclusion générale sur l'essentiel de notre travail et de son intérêt à l'issue de la période de la réalisation.

CHAPITRE I

ETAT DE L'ART SUR LES PERTURBATIONS HARMONIQUES DANS LES SYSTEMES ELECTRIQUE

I.1 Introduction

L'adoption généralisée d'appareils industriels et domestiques basés sur l'électronique de puissance a entraîné une augmentation des perturbations du réseau électrique. L'utilisation de ces convertisseurs statiques offre des fonctions supplémentaires, une flexibilité et un rendement élevé, tout en bénéficiant également d'une réduction des coûts en raison de leur utilisation généralisée. Cependant, l'inconvénient de ces appareils est leur comportement non linéaire vis-à-vis du réseau électrique. Ils absorbent les courants qui ont des formes d'onde déformées, qui traversent ensuite les impédances du réseau, entraînant des tensions et des déséquilibres non sinusoïdaux qui se superposent à la tension fondamentale au point de connexion, ce qui la rend non sinusoïdale. De plus, ces appareils peuvent également consommer de la puissance réactive. [1] [2].

Ces perturbations, aussi appelée pollution harmonique, n'est pas récente ; néanmoins, du fait du grand nombre de charges non linéaires connectées au réseau électrique, il fait actuellement l'objet de divers groupes de recherche travaillant à l'amélioration de la nature de l'énergie électrique. Ces charges non linéaires déforment la tension et, par conséquent, le courant, ce qui peut entraîner l'arrêt du fonctionnement des appareils connectés au réseau. Par conséquent, la suppression de ces harmoniques est intéressante [3] [4] [5].

Nous étudierons dans ce chapitre la définition des perturbations harmoniques ainsi que leurs classifications. Nous détaillerons ensuite les origines, les effets des perturbations harmoniques et leurs caractérisations induites par des charges non-linéaires.

I.2 Les Perturbations harmoniques

La question de la pollution harmonique est apparue depuis longtemps, et elle n'affecte pas seulement l'installation d'où elle provient mais aussi les consommateurs environnants. Une perturbation harmonique est une distorsion de la forme d'onde d'un signal sinusoïdal pur. Les réseaux électriques sont principalement impactés par les distorsions de forme d'onde dues à la présence de charges non linéaires, car le courant qu'ils consomment s'écarte souvent d'une forme

sinusoïdale pure. Cela signifie que la distorsion de tension est inévitable une fois que la distorsion de courant se produit.

Sinusoïdes générées avec des multiples entiers de la fréquence fondamentale créent un signal harmonique.

Le signal harmonique peut être décomposé en une collection de signaux sinusoïdaux, dont chacun a deux composantes : un signal sinusoïdal avec la fréquence fondamentale (qui est la fondamentale), et des signaux sinusoïdaux avec des multiples entiers de la fondamentale.

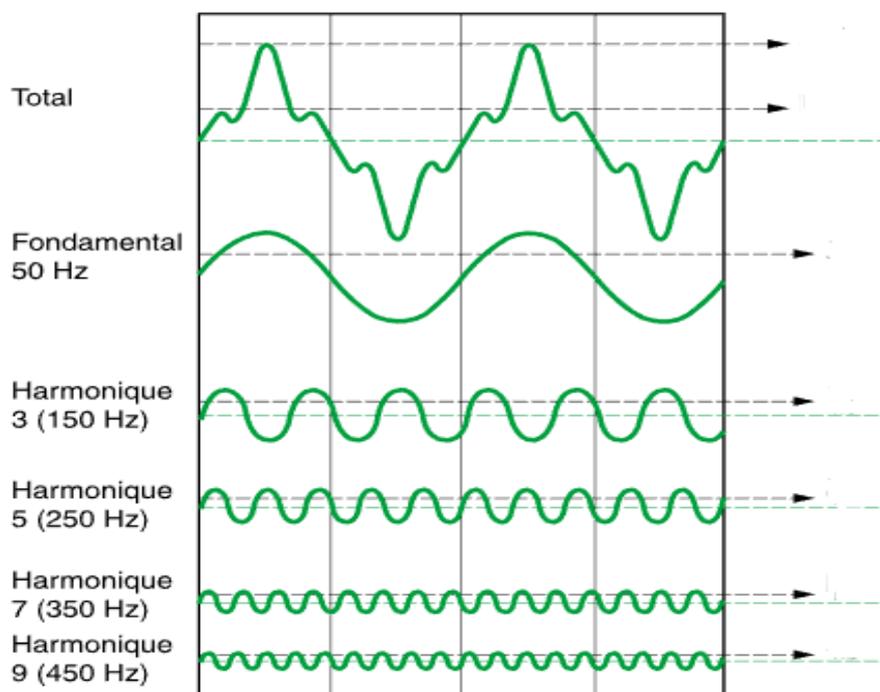


Fig. I. 1. Exemple d'un courant contenant des harmoniques et décomposition en rangs harmoniques de rang 1 (fondamental), 3, 5, 7 et 9

Si un récepteur d'énergie consomme des courants déséquilibrés ou non sinusoïdaux, ou de la puissance réactive, le réseau électrique l'identifie comme une charge perturbatrice. Lorsque l'impédance du réseau est importante, les deux premiers types d'anomalies peuvent déformer ou bouleverser ses tensions. D'autre part, le troisième type peut réduire la capacité de transmission des lignes électriques, des générateurs et des transformateurs [6].

La figure I.1 montre que la combinaison de divers ordres harmoniques produit un signal déformé, y compris les ordres 1, 3, 5, 7 et 9.

Si certains récepteurs subissent des fluctuations d'absorption de puissance, il convient de noter l'existence de composantes harmoniques supplémentaires. Ceux-ci incluent les inter-harmoniques et les infra-harmoniques, qui sont définis comme suit :

I.2.1. Inter-harmoniques

Ce sont des multiples non entiers de la fréquence fondamentale et ils se manifestent par des composantes sinusoïdales d'amplitudes variables.

I.2.2. Infra-harmoniques

Les composants auxquels il est fait référence sont de nature sinusoïdale et ont des fréquences inférieures aux fréquences fondamentales de (10Hz) et (20Hz).

La Figure I.2 décrit la répartition des harmoniques, des inter-harmoniques et des infra-harmoniques. Ces harmoniques résultent des fluctuations de la consommation électrique de certains récepteurs [7] [8]. Ces changements sont souvent causés par des machines comme les fours à arc, les cyclo-convertisseurs et les variateurs de vitesse.

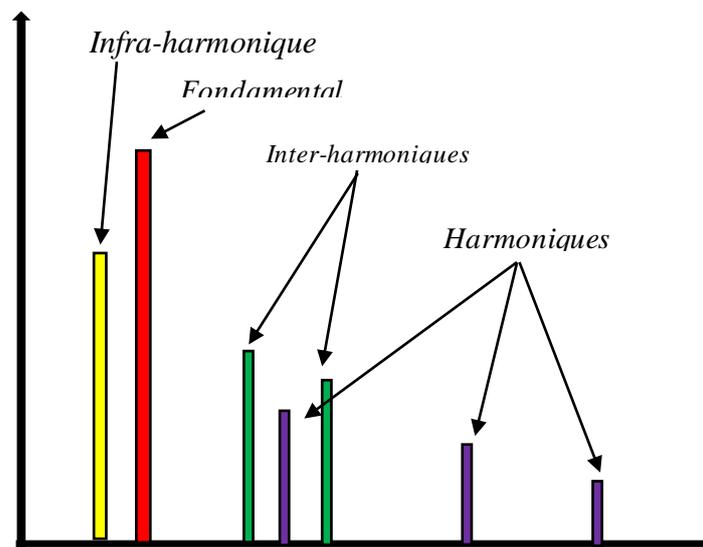


Fig. I. 2. Représentation graphique des inters et infra harmoniques

I.3. Classification des harmoniques

Les harmoniques sont classées en fonction de leur nomenclature, de leur fréquence et de leurs schémas de propagation. Le système triphasé équilibré non sinusoïdal, quant à lui, est composé de trois systèmes triphasés équilibrés sinusoïdaux. Celles-ci sont directes, inverses et homopolaires, selon [9].

I.3.1. Harmoniques du système direct

Le système primaire comporte le fondamental (50 Hz) et les harmoniques d'ordre impair égal à $3k+1$ tels que 7, 13, 19, etc. Ces harmoniques de séquence positive se déplacent dans la même direction que le fondamental. Cependant, ils sont généralement considérés comme

indésirables, responsables de la surchauffe des conducteurs, des lignes électriques et des transformateurs en raison de l'ajout de formes d'onde.

I.3.2. Harmoniques du système inverse

Les harmoniques d'ordre impair, tels que 5, 11, 17 et 23 ... etc. (exprimés en $3k-1$) génèrent un système inverse. Ils se déplacent dans le sens opposé à la rotation du fondamental, provoquant une diminution de la tension et de l'amplitude du courant. En raison de leur circulation entre les phases, les moteurs électriques rencontrent des problèmes supplémentaires.

I.3.3. Harmoniques du système homopolaire

Dans le système existe un ensemble distinct d'harmoniques connu sous le nom de "Triplens" (multiples de trois) avec des ordres impairs égale à $3k$ tels que (3, 9, 15, 21, etc.). Ces harmoniques possèdent une séquence de rotation nulle, d'où leur nom, et ne sont donc pas déplacées. Au contraire, ils circulent entre la terre et la phase et ne s'annulent pas. Au lieu de cela, ils s'additionnent arithmétiquement dans le fil neutre commun, qui est affecté par les courants des trois phases.

I.4. Charges électriques raccordés au réseau électrique

I.4.1. Charge électrique linéaire

Lorsqu'une source de tension sinusoïdale alimente une charge et qu'elle tire un courant sinusoïdal correspondant, la charge est considérée comme linéaire. Les charges linéaires comprennent les résistances, les inductances et d'autres composants. La Figure I.3 décrit ce type de comportement électrique.

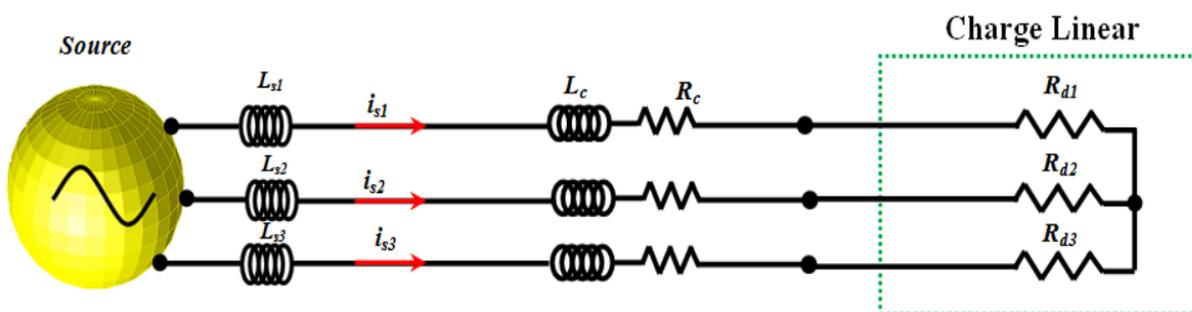


Fig. I. 3. Structure d'une charge linéaire résistive triphasé

La Figure I.4 illustre les formes d'onde de la tension source et du courant consommé par une charge linéaire, en particulier la résistance.

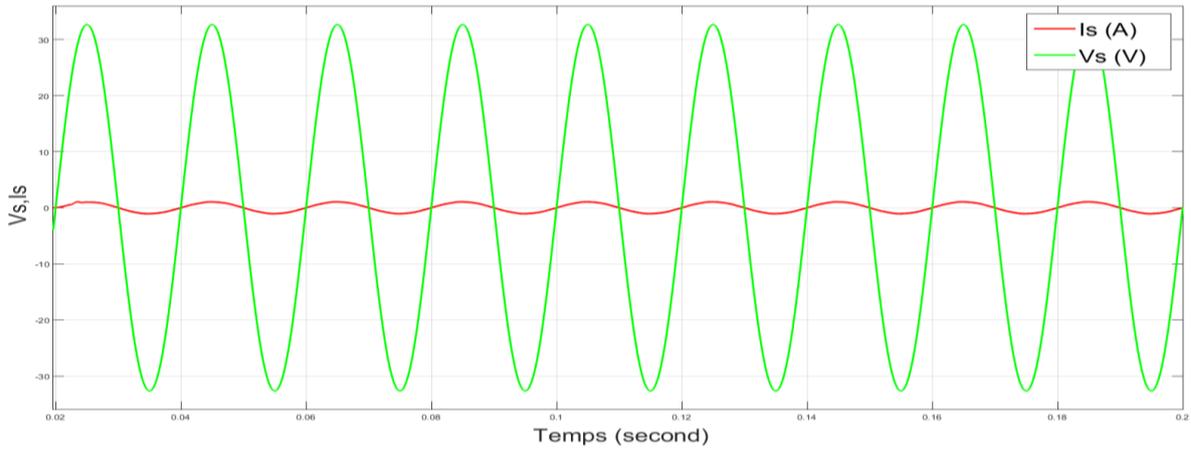


Fig. I. 4. Formes d'ondes de la tension et courant absorbé par une charge résistive

I.4.2. Charges non linéaires

Une charge est qualifiée de non linéaire si la tension qui lui est fournie ne correspond pas au courant qu'elle absorbe [10]. Les convertisseurs statiques tels que les gradateurs et les redresseurs, ainsi que les lampes et les circuits magnétiques saturés, font tous partie de ce groupe. Pour illustrer, la Figure.I.5 montre un pont de diodes triphasé installé sur une charge inductive, qui est alimenté par un réseau triphasé équilibré et représente une charge non linéaire.

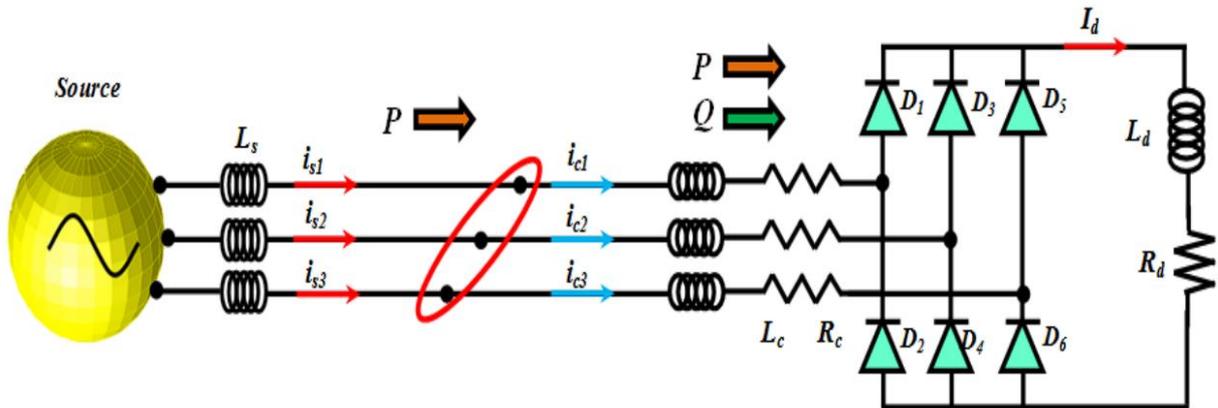


Fig. I. 5. Pont redresseur à diode débite sur une charge inductive

Le courant émanant de de la charge polluante, qui présente une forme carrée et est abondant en harmoniques ordonnés ($6k \pm 1$), a été illustré sur la Figure.I.6.

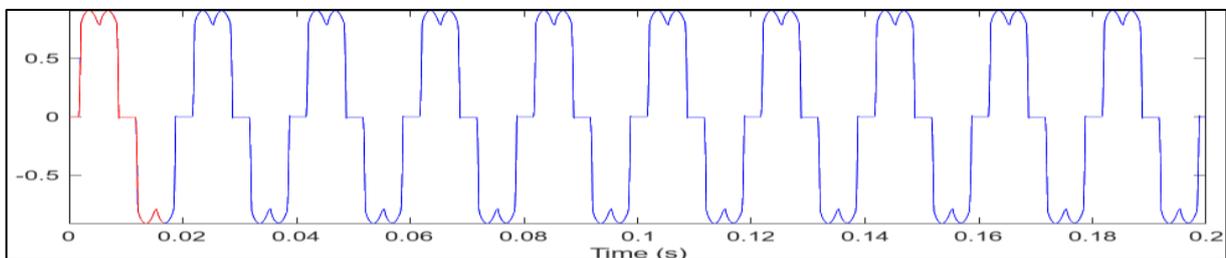


Fig. I. 6. Forme d'onde du courant de réseau par l'effet de la charge polluante

I.5. Origine des harmoniques

La généralisation des équipements électriques équipés de convertisseurs statiques a entraîné une augmentation notable de la pollution harmonique au sein des réseaux électriques.

Les équipements qui émettent des courants harmoniques avec des fréquences qui sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale ou, parfois, à des fréquences arbitraires, sont classés comme charges non linéaires. Lorsque ces courants harmoniques traversent les impédances du réseau électrique, ils peuvent générer des tensions harmoniques aux points de raccordement qui, à leur tour, peuvent polluer les consommateurs alimentés par le même réseau électrique [9] [8]. Des exemples de tels équipements comprennent :

- Les convertisseurs de puissance (alternatif/continu –continu/alternatif).
- Les démarreurs électroniques des moteurs.
- Les variateurs électroniques de vitesse.
- Les ordinateurs et autres dispositifs électroniques.
- Les éclairages électroniques.
- Les fours à arc électrique
- Les transformateurs
- Les convertisseurs d'énergie éolienne et photovoltaïque

I.6. Effets des perturbations harmoniques

L'impact des harmoniques sur les équipements et installations électriques est multiple. La déformation de la forme d'onde peut entraîner des dysfonctionnements et les surtensions de valeur de crête peuvent provoquer des claquages diélectriques. L'échauffement et les pertes de courant et de tension supplémentaires sont également induits par les valeurs efficaces. De plus, l'étalement spectral peut provoquer des vibrations et une fatigue mécanique. Ces effets ont un impact économique important, notamment des surcoûts, une inefficacité énergétique, un surdimensionnement, une perte de productivité et des déclenchements intempestifs. En conséquence, les entreprises sont moins compétitives en raison des coûts des matériaux, des pertes d'énergie et de la baisse de productivité. Les perturbations causées par les harmoniques peuvent être classées en deux types : instantanées et de longue durée. [9] [10].

I.6.1. Effets instantanés

Les impacts immédiats des harmoniques peuvent être décrits comme suit :

- Des problèmes avec les dispositifs de contrôle ou de régulation, tels que la détection de passage à zéro, peuvent entraîner des dysfonctionnements.

- Précision réduite des instruments de mesure.
- La cause sous-jacente des vibrations dans les moteurs électriques alternatifs est les couples mécaniques pulsés causés par les champs tournants harmoniques.
- Les transformateurs ou les inducteurs peuvent produire des bruits acoustiques et des vibrations résultant de forces électrodynamiques qui correspondent aux courants harmoniques.
- Un courant faible peut créer du bruit dans les liaisons par couplage électromagnétique dans divers systèmes tels que le contrôle-commande, les télécommunications, la téléphonie et les réseaux locaux.
- Perturbation des systèmes de télécommande utilisés par les distributeurs d'énergie.
- Les circuits de protection peuvent se déclencher de manière inattendue et prématurée.
- L'éclairage et les appareils électroniques affichent souvent des effets de scintillement.

I.6.2. Effets à long terme

Le résumé des impacts durables des harmoniques est le suivant :

- Le vieillissement précoce des moteurs électriques alternatifs est causé par des pertes excessives de cuivre et de fer. Cela est principalement dû à la différence de vitesse significative entre le rotor et les champs tournants induisant des harmoniques.
- La surchauffe des câbles et des équipements peut entraîner des pertes de joules supplémentaires, entraînant un déclassement et un surdimensionnement des équipements.
- Surchauffe sans aucune charge ou polarisation spécifique.
- Un échauffement supplémentaire des condensateurs par conduction et hystérésis dans le matériau diélectrique pourrait entraîner une panne potentielle.
- L'effet de peau dans le cuivre, l'hystérésis et les courants de Foucault dans le circuit magnétique entraînent des pertes supplémentaires dans les transformateurs et les inductances.
- L'usure des machines causée par le couple et les vibrations.

I.7. Caractérisation des perturbations harmoniques induite par des charges non linéaires

Le régime déformé a un certain nombre de grandeurs de définition, y compris le taux de distorsion harmonique total (THD), le facteur de distorsion (F_{dis}) et le facteur de crête (F_c). En examinant ce régime, nous nous concentrerons sur le cas où la source de tension est sinusoïdale et le courant de la charge comprend une composante harmonique [9]. Les expressions des tensions et courants instantanés sont donnés comme suit :

$$v(t) = \sum_{h=1}^{\infty} v_h(t) = \sqrt{2}V_{h.eff} \sin(h\omega t + \theta_h) \quad (I.1)$$

$$i(t) = \sum_{h=1}^{\infty} i_h(t) = \sqrt{2}I_{h.eff} \sin(h\omega t + \phi_h) \quad (I.2)$$

Où : $V_{h.eff}$: Valeur efficace de la tension harmonique de rang h

$I_{h.eff}$: Valeur efficace du courant harmonique de rang h

I.7.1. Valeurs efficaces de la tension et du courant

La définition de la valeur efficace pour un signal récurrent tel que la tension ou le courant est la suivante :

$$V_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_{h.eff}^2} \quad (I.3)$$

$$I_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_{h.eff}^2} \quad (I.4)$$

I.7.2. Puissance instantanée et puissance moyenne en régime déformé

$$p(t) = 3 \cdot v(t) \times i(t) \quad (I.5)$$

$$p = \int_0^T v(t) \times i(t) dt \quad (I.6)$$

$$P = 3 \cdot \sum_{h=1}^{\infty} V_{h.eff} \cdot I_{h.eff} \cos(\theta_h - \phi_h) = 3 \cdot \sum_{h=1}^{\infty} p_h \quad (I.7)$$

I.7.3. Puissances apparente, active, réactive et de distorsion

Lorsqu'il s'agit de conditions déformées, il devient nécessaire de modifier la définition de la puissance apparente afin de prendre en compte le courant harmonique [11] [12].

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (I.8)$$

Où S : Puissance apparente.

P : Puissance active.

Q : Puissance réactive.

D : Puissance déformante

$$P = 3.V_{eff}I_{eff} \cos(\phi_1) \quad (I.9)$$

$$Q = 3.V_{eff}I_{eff} \sin(\phi_1) \quad (I.10)$$

$$S = 3.V_{eff}I_{eff} \quad (I.11)$$

$$D = 3.V_{eff} \sqrt{I_{2,eff}^2 + I_{3,eff}^2 + \dots + I_{h,eff}^2} \quad (I.12)$$

Le rapport le plus récent indique que la puissance déformante provient exclusivement des harmoniques produites par la charge non linéaire.

I.7.4. Facteur de puissance F_p

Peu importe si le régime est sinusoïdal ou déformé, le facteur de puissance reste le même, c'est le rapport de la puissance active à la puissance apparente. Néanmoins, le facteur de puissance est influencé par la présence de puissance de distorsion. En évaluant la consommation électrique, le facteur de puissance permet de déterminer sa qualité [13] :

$$F_p = \frac{P}{S} = \cos \phi_1 \quad (I.13)$$

$$F_p = \frac{P}{S} = \frac{V_{eff} \times I_{1,eff} \times \cos \phi_1}{V_{eff} \times I_{eff}} = \frac{I_{1,eff}}{I_{eff}} \cos \phi_1 = F_{dis} \times F_{dép} \quad (I.14)$$

$$F_p = F_{dis} \times F_{dép} \quad (I.15)$$

Où :

F_p : Facteur de puissance.

F_{dis} : Facteur de distorsion.

$F_{dép}$: Facteur de déplacement.

Lorsqu'il s'agit d'un régime déformé, le facteur de puissance est déterminé en multipliant le facteur de déplacement et le facteur de distorsion. Il est important de noter que ces définitions s'appliquent à la fois à un régime monophasé et à un régime triphasé équilibré.

I.7.5. Distorsion harmonique individuelle THD_i

La proportion de la valeur réelle d'une harmonique d'ordre h à la valeur fondamentale est connue sous le nom de rapport.

$$THD_i = \frac{I_{h.eff}}{I_{1.eff}} \quad (I.16)$$

I.7.6. Taux de distorsion harmonique THD

La mesure dans laquelle une forme d'onde de courant ou de tension s'écarte d'une forme d'onde sinusoïdale peut être mesurée à l'aide du taux de distorsion harmonique. Ce taux est obtenu en comparant la valeur effective des harmoniques à celle de la forme d'onde fondamentale [9]. Le taux de distorsion harmonique total, qui reflète l'impact des harmoniques sur une onde de courant déformée, peut être défini comme suit :

$$THD_v(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h=\infty} (V_h)^2}}{V_1} \quad (I.16)$$

$$THD_i(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h=\infty} (I_h)^2}}{I_1} \quad (I.17)$$

Le taux de pourcentage THD_v est utilisé pour décrire la distorsion de l'onde de tension comme suit :

- Lorsque la valeur THD_v est inférieure à 5 %, elle est considérée comme normale et il n'y a pas lieu de s'inquiéter d'éventuels dysfonctionnements.
- Lorsque la tension de distorsion harmonique totale THD_v varie de 5 % à 8 %, cela indique une quantité importante de pollution harmonique. Cela pourrait entraîner des dysfonctionnements potentiels.
- Si la valeur THD_v dépasse 8%, cela indique un niveau de pollution harmonique alarmant pouvant entraîner des dysfonctionnements. Par conséquent, une analyse complète et l'application de mesures correctives appropriées sont impératives.

$THD_i(\%)$ signifie le taux de distorsion de l'onde de courant, ce qui peut aider à identifier la source d'interférence. En mesurant le THD en courant aux points d'arrivée et de départ des différents circuits, la perturbation peut être tracée. La valeur THD_i , ainsi que d'autres phénomènes observés, peuvent aider à définir les problèmes présents dans une installation :

- Une valeur THD_i inférieure à 10 % se situe dans la plage normale et n'indique aucun dysfonctionnement potentiel.
- Si la valeur THD_i est comprise entre 10% et 50%, cela indique un niveau considérable de pollution harmonique. Cela pose un risque de surchauffe de l'équipement, nécessitant l'utilisation de câbles et de sources plus gros pour l'éviter.
- Si la valeur THD_i dépasse 50%, cela indique la présence d'une pollution harmonique importante et un risque plus élevé de dysfonctionnements. Pour prévenir de telles défaillances, il faut procéder à une analyse détaillée et installer des dispositifs d'atténuation appropriés.

CHAPITRE II

STRATEGIES DE PREVENTION DES PERTURBATIONS HARMONIQUES

II.1 Introduction

Compte tenu de la gravité des défis posés par les perturbations harmoniques, il est impératif de mener des recherches approfondies qui se concentrent sur la formulation de méthodologies visant à atténuer ces perturbations.

Ainsi, de nombreuses résolutions potentielles ont été avancées, certaines options étant actuellement en expérimentation afin d'atteindre une résolution idéale. Le facteur clé dans le choix d'une solution réside dans la recherche d'un terrain d'entente qui équilibre efficacement efficacité et compromis. Afin d'honorer les obligations financières, il est impératif de rétablir la disposition sinusoïdale des courants et des tensions. L'accent est principalement mis sur les considérations de coût et sur l'évitement de toute complication supplémentaire au sein des systèmes.

Dans ce chapitre particulier, nous nous concentrons sur le détail des différentes solutions proposées visant à réduire les différentes solutions existant pour traiter les harmoniques sur les réseaux de distribution. Certains de ces remèdes comprennent :

L'utilisation de composants trop volumineux dans le système, associée à l'intégration de transformateurs, sont des facteurs clés à prendre en compte. Il existe deux types de "spéciaux" qui sont employés dans le processus, à savoir le "filtrage interne" et le "filtrage externe", ce dernier étant la technique la plus répandue. Ces pratiques font partie intégrante du cadre de l'industrie manufacturière.

II.2 Surdimensionnement du neutre

Les éléments de regroupement nuls dans le non biaisé sont nuls dans un système équilibré. Pour les systèmes avec une charge non linéaire, ce n'est pas exact [14]. Le conducteur neutre fait face à un risque important des courants homopolaires combinés trouvés dans les harmoniques de multiples de trois. Cette situation dangereuse survient en raison de la forte intensité des courants résultants et peut entraîner de graves dommages au câble neutre.

Pour éviter que le conducteur neutre ne subisse une usure intempestive, il peut être intéressant d'augmenter sa taille. Cette approche consiste à doubler voire tripler les conducteurs neutres. [14]

II.3 Transformateur spéciaux

II.3.1 Transformateur de type K

Les transformateurs conçus pour supporter des courants déformés sont vulnérables à des pertes accrues. La défaillance du transformateur est un résultat probable si les conditions de fonctionnement s'écartent de la norme. Les organismes de normalisation ont reconnu ce problème et ils ont récemment introduit un nouveau facteur K qui mesure l'impact d'une charge sur le transformateur. [15] Ce facteur K se définit comme suit :

$$K = \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2 n^2 \quad (II.1)$$

Où n : Rang de l'harmonique.

I_n : Rapport entre le courant efficace à la fréquence et le courant efficace total.

Un facteur K d'un est désigné pour une charge linéaire, tandis qu'une charge non linéaire peut dépasser un facteur K de 20 [14]. De plus, lors de l'alimentation d'une charge linéaire, les transformateurs sont calibrés avec un facteur K de un. Cependant, les facteurs K sont déterminés en testant des transformateurs spécialement conçus pour alimenter des charges non linéaires.

Le facteur K du transformateur doit dépasser celui de la charge pour que l'application fonctionne efficacement.

II.3.2 Transformateur de mise à la terre

Une stratégie efficace pour empêcher les courants harmoniques de traverser le conducteur neutre consiste à introduire un transformateur de mise à la terre. Ce transformateur établit un neutre artificiel et permet un chemin à faible impédance pour les courants harmoniques, qui sont détournés vers son propre neutre [15]. Cela garantit que seul le neutre du transformateur doit supporter de tels courants. Se reporter à la Figure II.1 pour le schéma fonctionnel.

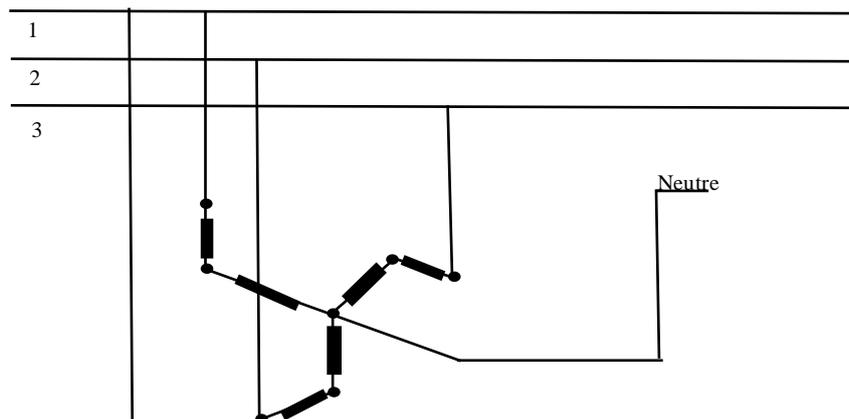


Fig. II. 1. Schéma de liaison à la terre

II.3.3 Transformateur déphaseurs

Afin de réduire les courants harmoniques, les transformateurs déphaseurs offrent une solution alternative comme illustré sur la Figure II.2 [15]. L'application d'un transformateur delta-delta en conjonction avec un transformateur étoile-triangle pour alimenter deux charges non linéaires de mesure égale permet l'élimination des courants de 5ème et 7ème harmonique généralement produits par ces charges. Cette élimination peut être attribuée au déphasage de 30° entre les raccordements des deux transformateurs, entraînant une élimination complète au point de raccordement commun. Cependant, dans le cas de charges non identiques, des traces de courants harmoniques peuvent persister sur le réseau. D'autres harmoniques d'ordre supérieur peuvent également être éliminées avec différentes configurations de transformateurs déphaseurs [15].

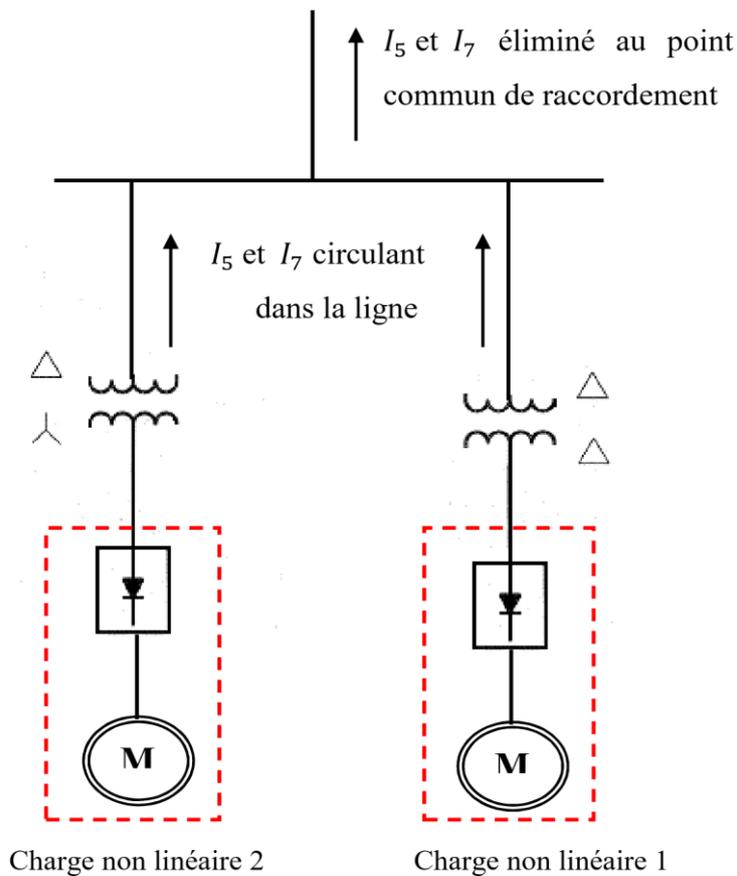


Fig. II. 2.Exemple de schéma des transformateurs déphaseurs raccordés au réseau pour éliminer les 5ème et 7ème harmoniques.

II.4. Filtrages harmoniques

Lorsqu'il s'agit d'éliminer les harmoniques, les transformateurs déphaseurs et les transformateurs neutres ne sont pas toujours la meilleure option, d'autant plus qu'ils ne fonctionnent que pour des charges équilibrées. Au lieu de cela, le filtrage s'avère être l'approche la plus couramment utilisée et la plus efficace. Il existe deux types de filtrage : le filtrage interne et le filtrage externe. [16]

II.4.1. Filtrage interne des harmoniques

Pour modifier la structure de la charge polluante, on peut envisager de renforcer l'alimentation électrique. Ceci peut être réalisé soit en utilisant un redresseur à 12 impulsions, soit en mettant en œuvre un convertisseur contrôlé (redresseur MLI) [16].

II.4.1.1 Utilisation d'un redresseur 12 ou 24 impulsions

Pour créer un redresseur à 12 impulsions qui alimente un bus CC partagé, deux redresseurs à 6 impulsions sont reliés en parallèle. Cette configuration nécessite soit un transformateur à trois enroulements, soit deux transformateurs à deux enroulements, leurs secondaires étant déphasés de 30° . Cette configuration offre plusieurs avantages. Pour résoudre ce problème, des harmoniques spécifiques sont supprimées par opposition de phase côté réseau. En principe, l'harmonique de rang 11 est l'harmonique de fréquence la plus basse notée du côté primaire du transformateur. Cependant, cette solution n'est pas sans inconvénient, car elle nécessite des transformateurs spécialement conçus, ce qui peut augmenter considérablement les coûts par rapport à un redresseur à 6 impulsions [17]. Faisant référence à la Figure II.3, elle illustre le principe fondamental du redresseur à 12 impulsions.

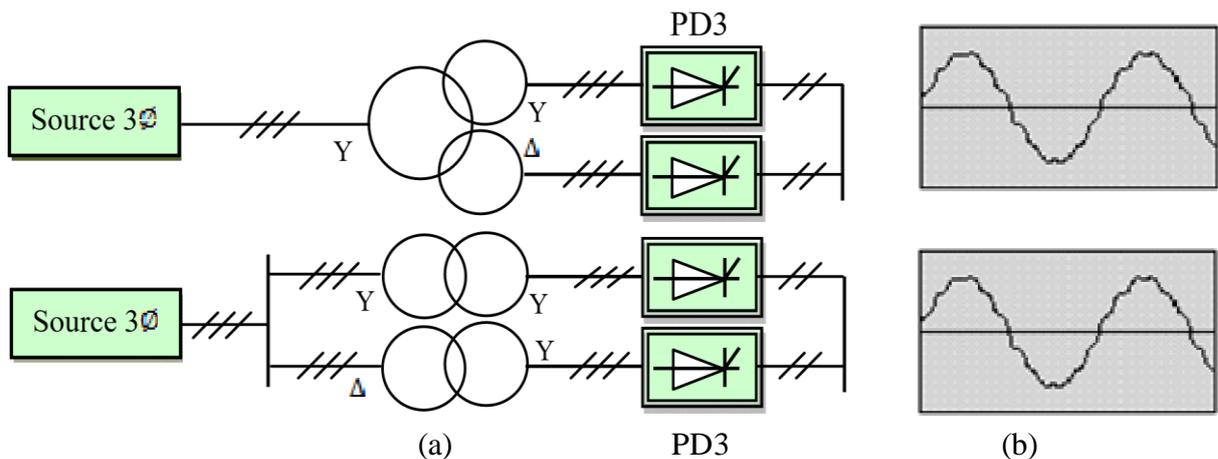


Fig. II. 3.(a) Structure du redresseur 12 impulsions, (b) Forme d'onde du courant de réseau

La Fig. II.4 illustre le concept de fonctionnement du redresseur à 24 impulsions. Une paire de redresseurs à douze impulsions, couplés à des transformateurs à trois enroulements, chacun avec des enroulements primaires décalés de 30 degrés, facilitent son fonctionnement. La technique offre une réduction exceptionnelle des harmoniques à basse fréquence, mais elle a un prix considérable. Notamment, pour une grande configuration multi-disques ou mono-disque haute puissance, un système à 24 impulsions est une option rentable qui minimise les distorsions harmoniques. [17]

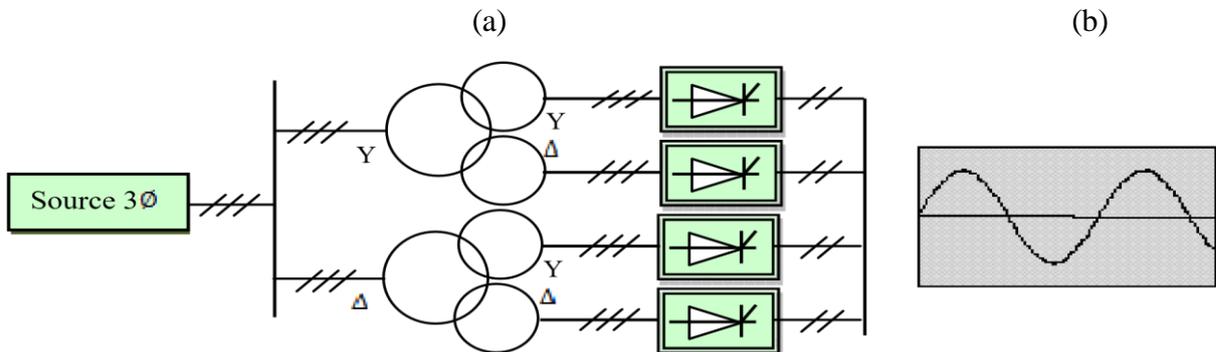


Fig. II. 4.(a) Structure du redresseur 24 impulsions, (b) Forme d'onde du courant de réseau.

II.4.1.2. Utilisation du redresseur MLI

Pour modifier la structure interne du redresseur, une technique est employée où les thyristors sont remplacés par des interrupteurs entièrement contrôlables qui s'ouvrent et se ferment. Pour les moyennes et basses puissances, des transistors MOSFET sont utilisés, tandis que les fortes puissances sont gérées avec des transistors IGBT ou des thyristors GTO accompagnés de diodes en antiparallèle. Le redresseur est commandé par la technique de modulation de largeur d'impulsion en utilisant un échantillonnage naturel (intersection triangulaire-sinusoïdale) ou une méthodologie calculée. La Fig. II.5 montre la structure d'un redresseur MLI.

Suivant le principe qui permet à l'onduleur de fournir une tension sinusoïdale, le redresseur

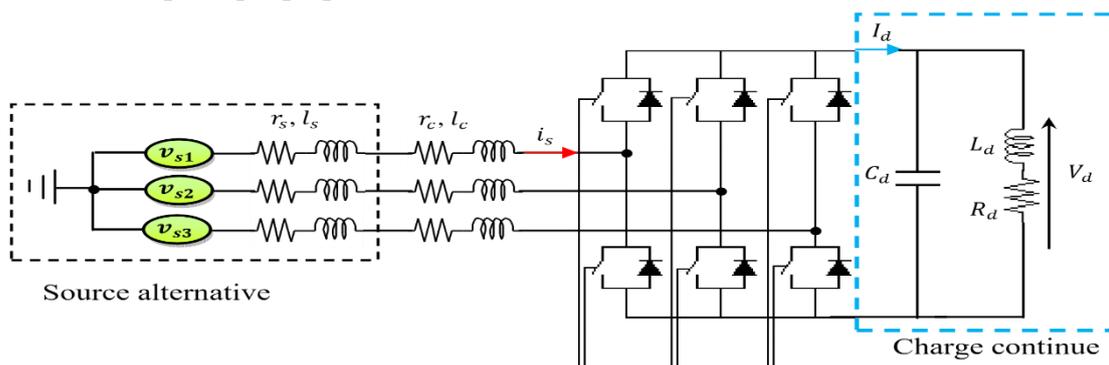


Fig. II. 5. Structure d'un redresseur MLI

peut accepter un courant sinusoïdal de la source [18]. Les redresseurs MLI ont une importance

particulière et sont particulièrement appréciés dans le secteur industriel en raison de la multitude d'avantages qu'ils offrent [19] :

- Un courant d'entrée presque sinusoïdal avec un facteur de puissance de l'unité.
- Flux de puissance capable de se déplacer dans les deux sens.
- Tension sous control direct.
- Puissance réactive gérable.
- La tension continue est contrôlée en boucle fermée, ce qui entraîne une insensibilité aux fluctuations de la tension d'alimentation.

Cependant, sa mise en œuvre dans l'industrie est limitée par les deux facteurs suivants :

- Le potentiel de sa conception est limité par les qualités actuelles des interrupteurs à commutation forcée.
- Lorsqu'il est juxtaposé au redresseur à thyristor, il devient évident que cette solution est considérablement plus complexe et coûteuse.

II.4.2. Filtrage externe

Le filtrage est considéré comme la méthode la plus couramment utilisée et la plus percutante. Le filtrage passif, le filtrage actif et le filtrage hybride sont les trois techniques de filtrage les plus répandues. [17]

II.4.2.1 Filtrage passif

a) Principe de fonctionnement

L'idée derrière le filtrage passif est de modifier l'impédance du réseau dans une zone spécifique. Cela modifie le cours du courant harmonique et élimine les tensions harmoniques résultantes, comme indiqué dans [20]. Les filtres sont constitués de composants capacitifs et inductifs stratégiquement placés pour obtenir une résonance en série à une fréquence particulière.

Pour fabriquer un filtre de cette nature, une compréhension approfondie des caractéristiques du réseau et des réactions aux harmoniques est essentielle [20]. Ce prérequis peut être satisfait grâce à l'utilisation de logiciels de simulation. Les variétés de filtres passifs sont ensuite sélectionnées en fonction du niveau de réduction des harmoniques recherché. [21]

b) Classification des filtres passifs

Les filtres passifs peuvent être classés en fonction de leur position dans le réseau, de la méthode de connexion, du niveau d'amortissement et de la fréquence de résonance [20] [21].

Deux types de filtres passifs peuvent être utilisés : des filtres passifs parallèles ou des filtres passifs en série. Selon l'option choisie, les harmoniques peuvent être (a) physiquement bloqués via une haute impédance série placée entre le convertisseur et le réseau, (b) déviés via une faible impédance parallèle ou (c) une combinaison des deux.

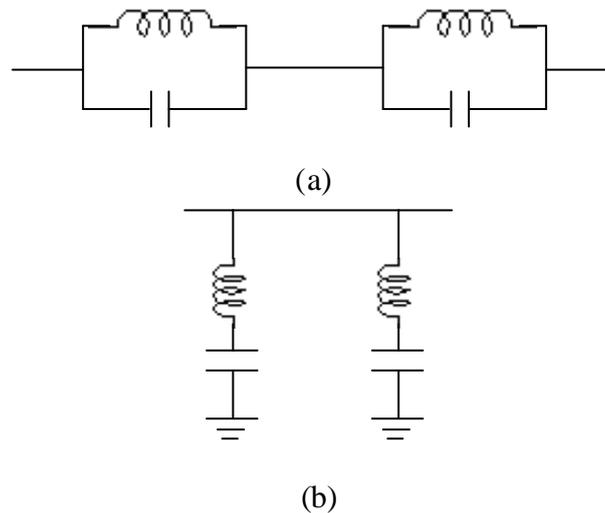


Fig. II. 6.(a) Filtre passif série, (b) Filtre passif parallèle

c) Filtre passif parallèle

Utilisé exclusivement du côté AC, le filtre passif parallèle sert deux objectifs principaux [22] :

- Ce système électrique transporte uniquement le courant harmonique et est également mis à la terre.
- Il détient un avantage distinct à sa fréquence primaire en fournissant une puissance réactive.

Pour obtenir une efficacité comparable à celle d'un filtre passif en série, l'option de filtre passif parallèle est proposée à un coût bien inférieur. Alors que le premier est idéal pour les charges qui produisent des tensions harmoniques, le second est principalement utilisé pour les charges qui génèrent des courants harmoniques, selon [22].

d) Types de filtre passif parallèles

i. Filtre passif résonant

La figure II.7 affiche un filtre résonant passif qui présente une impédance extrêmement faible à un ordre de courant harmonique prédéterminé. L'efficacité de l'élimination de l'harmonique correspondante dépend du facteur de qualité (Q) et de son réglage précis.

Cela indique que ce type de filtre bénéficie d'un quotient de qualité élevé. Pour filtrer chaque ordre harmonique, trois branches shunt (une pour chaque phase) doivent être prises en

compte. Le filtre résonnant est chargé de fournir une partie de la puissance réactive au convertisseur au moyen de ses condensateurs.

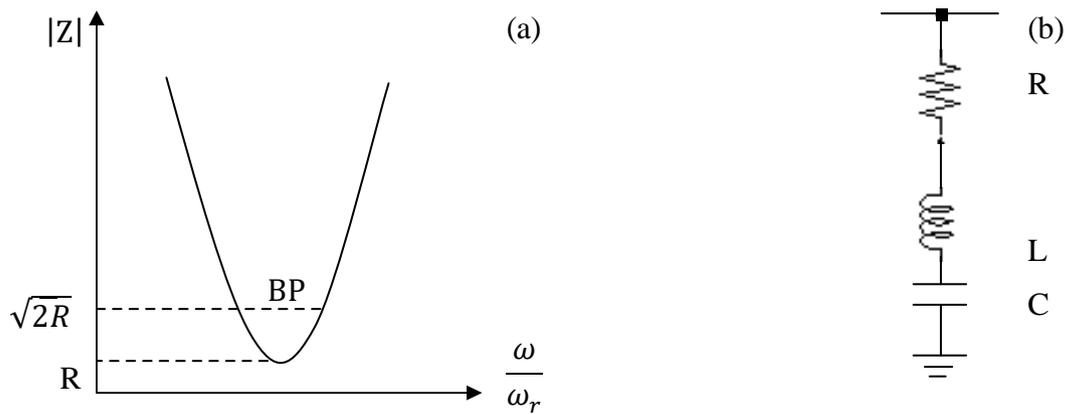


Fig. II. 7.(a) Courbe de résonance, (b) Filtre résonant parallèle

Les filtres passifs de ce type présentent un inconvénient : les éléments L et C sont sujets à une usure et une qualité variable, conduisant à un effet de désaccord global [15] [22]. Pour contrer le désaccord, des filtres résonnants spécifiques doivent être installés pour chacun des trois phases pour éliminer un ordre harmonique particulier.

L'introduction de ce type de filtre comporte le potentiel de résonances parallèles qui s'alignent sur l'impédance du réseau. Si deux filtres résonnants sont présents sur un réseau et réglés sur la même fréquence, le risque de résonance augmente. Ainsi, avant d'installer un tel filtre, une connaissance approfondie du comportement du réseau sous influence harmonique devient cruciale [23].

ii. Filtre passif amorti

Le filtre passif amorti montré dans la Fig. II.8

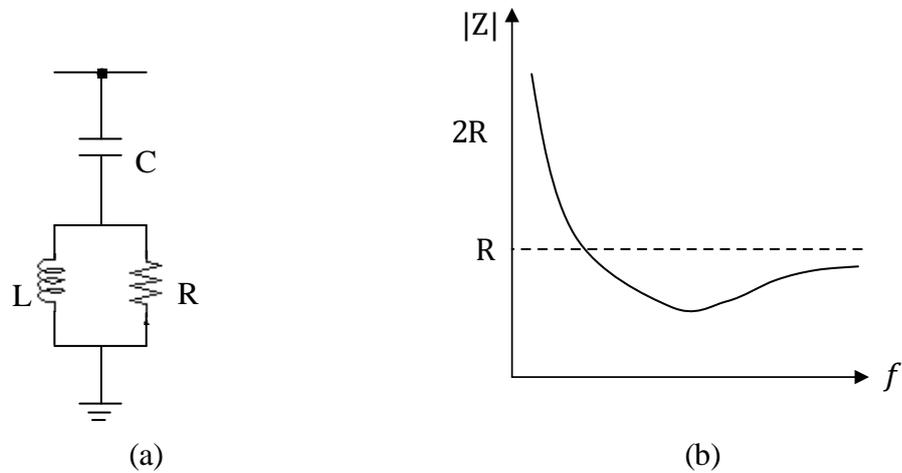


Fig. II. 8.a) Filtre amorti parallèle, (b) Courbe de résonance

La Fig. II.9 distingue trois classifications de filtres amortis. Il s'agit des filtres amortis du premier ordre (a), des filtres amortis du deuxième ordre (b) et des filtres du troisième ordre (c).

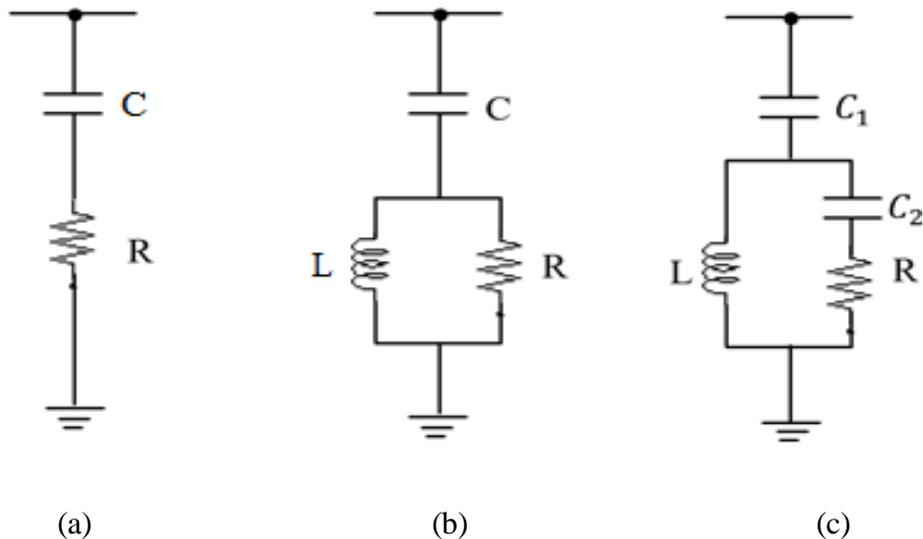


Fig. II. 9.Types de filtre amorti

L'utilisation de filtres amortis présente de nombreux avantages :

1. Leurs performances présentent une sensibilité minimale aux fluctuations de température, aux écarts de fréquence et aux tolérances des composants. [15]
2. Leur valeur d'impédance est constamment faible, même sur une vaste gamme de fréquences harmoniques.
3. Lorsque plusieurs filtres résonnants sont utilisés, cela peut conduire à des résonances parallèles entre eux et l'admittance du réseau. Pour éviter ce problème, il est recommandé d'utiliser un ou plusieurs filtres amortis.

Certains des principaux inconvénients associés à l'utilisation d'un filtre amorti comprennent :

1. Afin d'atteindre des performances de type filtre résonant, il est conseillé de concevoir le filtre amorti pour avoir un rapport de puissance apparente (S) élevé. Néanmoins, il est important de noter que des performances adéquates peuvent souvent être obtenues en s'assurant que la limite de compensation du facteur de puissance est respectée.
2. Les pertes de résistance ont tendance à être considérablement élevées.

Alors que le filtre de premier ordre est rarement utilisé car il nécessite une capacité importante et subit une perte de puissance excessive à la fréquence fondamentale, le filtre de second ordre offre de meilleures performances de filtrage malgré des pertes plus importantes à cette fréquence que son homologue de troisième ordre. Le filtre du troisième ordre est généralement construit avec un faible facteur Q compris entre (0,7 et 1,4) et bénéficie d'une réduction significative des pertes à la fréquence fondamentale en raison de la capacité qui améliore l'impédance C_2 . De plus, le condensateur C_2 est nettement plus petit que C_1 .

En pratique, il est courant de mettre en œuvre :

1. Les filtres qui sont réglés sur les premiers rangs harmoniques (en particulier les rangs 5 et 7) sont conçus pour être résonnants car c'est là qu'il y a une forte injection de courant.
2. Pour réduire l'impédance harmonique sur les fréquences supérieures au 11e ordre, un filtre qui réduit l'amortissement est utilisé. [22].

Un exemple de liaison de l'assemblage à un réseau monophasé est illustré à la Fig. II.10.

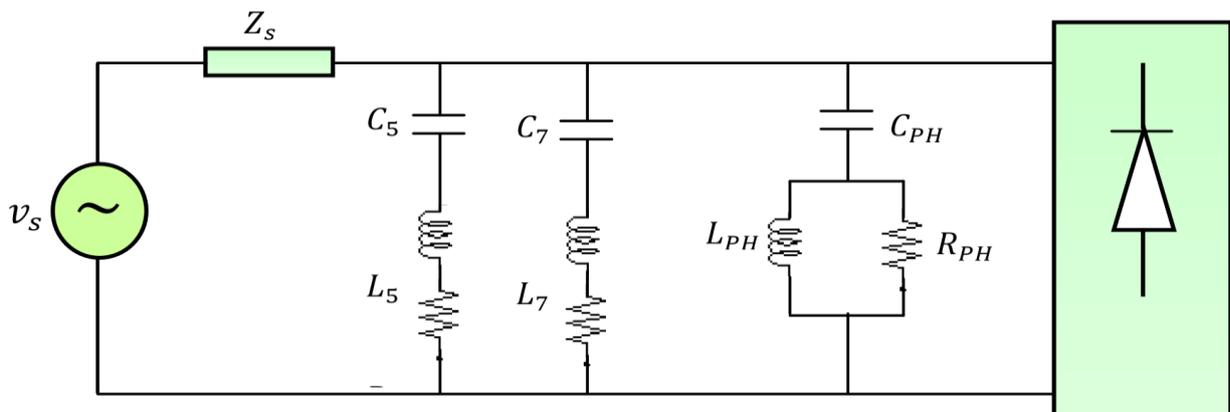


Fig. II. 10. Schéma monophasé d'un réseau avec deux filtres résonants et un filtre amorti

e) Coût du filtre passif

En règle générale, le coût d'un filtre AC ne représente qu'une fraction du coût total de l'équipement, soit environ 5 à 15 %. [15]

Un composant essentiel de la station de conversion (AC/DC) est le filtre qui doit générer de la puissance réactive et filtrer les harmoniques. Malheureusement, la division de ces fonctions manque de base logique. L'objectif principal est donc de créer un filtre qui soit rentable, tout en filtrant efficacement et en générant une partie de la puissance réactive. Notamment, la capacité constitue environ 60 % du coût total du filtre [15]. Avec ces informations à l'esprit, une conception de filtre bien planifiée devient d'autant plus cruciale.

f) Effet de l'impédance réseau sur le filtre passif

La représentation schématique du réseau (Fig. II.11) présente le convertisseur comme une source de courant harmonique I_{hs} supposée familière.

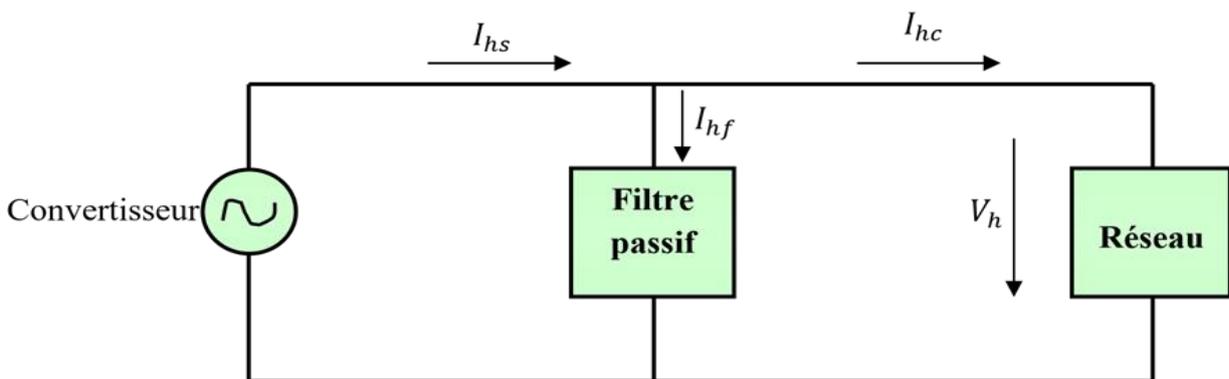


Fig. II. 11.Représentation du réseau côté ca

Pour connaître le courant produit par le convertisseur, on peut soit prélever des échantillons, soit simuler numériquement. La tension harmonique présente aux bornes du filtre et du réseau dépend de leur impédance spécifique. Du fait que l'impédance du réseau, lorsqu'il est soumis à des polluants harmoniques, est variable dans le temps et par nature imprécise, il est essentiel d'examiner quelques scénarios extrêmes afin d'établir son importance lors de la conception du filtre :

1. Dans le cas où l'impédance du réseau est inexistante, l'ordre de l'harmonique devient sans conséquence. Autrement dit, si $V_h = 0$ et $I_{hc} = I_{hs}$ un filtre shunt n'aura aucun impact. Il en résulte que toutes les harmoniques générées par le convertisseur sont libérées dans le réseau. Cependant, ce scénario est quelque peu irréaliste car l'impédance du réseau est généralement $Z_{hc} = 0$. Dans de tels cas, l'application d'un filtre série fournirait une solution viable.
2. En supposant une impédance de réseau infinie de $Z_{hs} = \infty$, tous les courants harmoniques produits traverseront le filtre shunt, indiquant $I_{hc} = 0$, $I_{hf} = I_{hs}$ et $V_h = Z_{hf}I_{hs}$. Bien que le filtre soit considéré comme idéal dans ce scénario, il est très peu pratique.

3. Si le réseau et le filtre devenaient parallèlement résonnants dans un scénario pessimiste, une impédance énorme s'ensuivrait, provoquant ainsi des valeurs extrêmement élevées d'harmoniques V_h , I_{hc} et I_{hf} .

La conception et la taille d'un filtre passif sont fortement influencées par l'impédance du réseau, ce qui rend crucial une compréhension approfondie de ses composants. Cette connaissance est essentielle pour créer un filtre efficace qui ne résonnera pas accidentellement avec l'impédance du réseau, comme indiqué dans la référence [21].

II.4.2.2. Filtrage actif

Les études théoriques sur l'utilisation des filtres actifs de puissance pour compenser les harmoniques dans les réseaux électriques industriels remontent à la proposition du principe de compensation par H. Sasaki et T. Machida en 1971 [23]. Cependant, à cette époque, la mise en œuvre pratique du filtrage actif était entravée par une technologie semi-conductrice sous-développée, limitant ainsi les progrès au stade du laboratoire.

La technologie des semi-conducteurs de puissance a subi une transformation majeure quelques années plus tard, entraînant un regain d'intérêt pour le filtrage actif pour la recherche sur la compensation des harmoniques. Des études théoriques sur les Pulse Multilevel Inverters (MLI) ont ouvert la voie à leur mise en œuvre pratique. Au début des années 1990, le filtrage actif était à nouveau à l'honneur en raison de ses capacités supérieures de réduction des harmoniques par rapport aux filtres passifs LC conventionnels [24]. Essentiellement, un filtre actif de puissance fonctionne comme un convertisseur DC-AC, avec pour objectif principal de reproduire les composantes harmoniques en opposition de phase, afin de les éliminer [24] [25]. En façonnant activement le courant de source, le shunt de filtre actif injecte un courant de compensation, l'amenant en ligne avec la forme sinusoïdale souhaitée. [24] [26]

Les filtres actifs ont fait des progrès technologiques remarquables ces dernières années, affichant un niveau de maturité sans précédent. Ils possèdent la capacité de compenser la puissance réactive, le courant neutre et les harmoniques, tout en bénéficiant d'une gamme de configurations, de stratégies de contrôle et de semi-conducteurs de puissance qui ont évolué au cours des 25 dernières années. Bien qu'à l'origine limités à la compensation d'harmoniques, les filtres actifs se sont diversifiés pour inclure la régulation de tension, la suppression du scintillement et l'amélioration de l'équilibre de phase (3Ø) dans les réseaux de distribution triphasés, entre autres domaines [25] [26] [27].

a) Principe du filtrage actif

Les convertisseurs de puissance statiques appelés onduleurs sont les éléments constitutifs des filtres actifs utilisés pour fournir du courant ou de la tension sur la base d'une alimentation en courant continu ou en tension. La loi de commande des interrupteurs détermine les niveaux d'harmoniques de la sortie [27] [28]. Les filtres actifs sont conçus pour contrecarrer les sources de tension ou de courant harmoniques déphasées par rapport aux sources de courant du réseau. Ils restituent des courants de source quasi-sinusoïdaux. Selon le type de compensation recherché (tension ou courant), le filtre actif peut être placé en série ou en parallèle avec le réseau. La configuration de filtre actif parallèle est illustrée à la Fig. II.12, où i_s représente le courant source et i_h le courant harmonique.

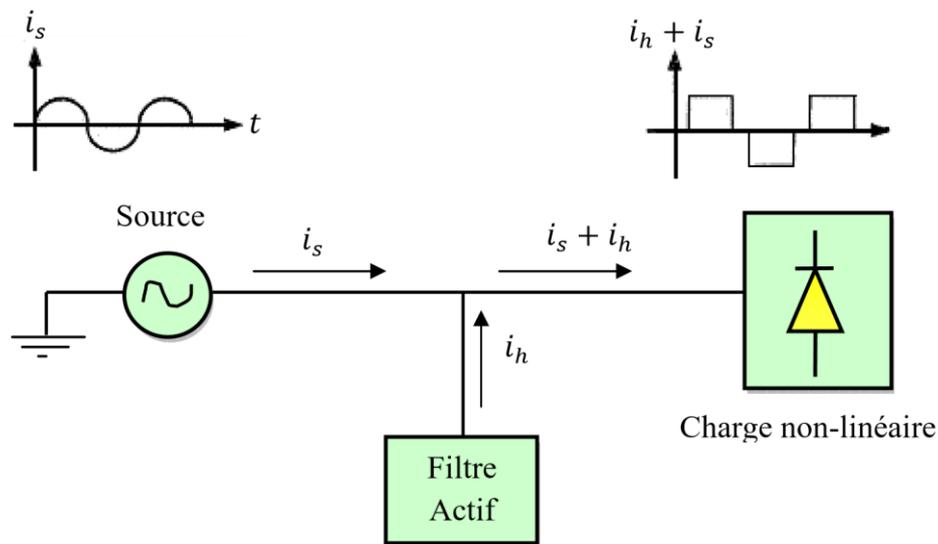


Fig. II. 12.Principe de fonctionnement du filtre actif parallèle

b) Classification des filtres actifs

Les filtres actifs peuvent être classés en fonction du type de convertisseur, de la topologie ou du nombre de phases. Par souci de simplicité, nous nous intéresserons uniquement à leurs topologies. Celles-ci peuvent être généralement classées en séries, parallèles ou mixtes, comme indiqué dans la référence [25].

i. Filtre actif parallèle (FAP)

Principalement conçu pour éliminer les courants harmoniques produits par certaines charges, le filtre actif parallèle (FAP) peut également compenser la puissance réactive (comme un STATCOM) et atténuer les résonances causées par l'interaction entre la ligne et le filtre passif. Il équilibre également les courants asymétriques. Cependant, le FAP est plus cher que son homologue passif, avec des pertes élevées et une adéquation limitée aux charges de

puissance faible et moyenne. Il existe également un risque que des courants de compensation circulent dans d'autres filtres passifs du même réseau [15].

Pour introduire un courant harmonique d'amplitude identique et de phase opposée à la charge, le FAP, un onduleur à modulation de largeur d'impulsion (MLI) est situé parallèlement à celui-ci, comme illustré à la Fig. II.13. Le FAP sert de source modifiable de courant harmonique, comme reconnu dans les sources [25] [29] [30] [31].

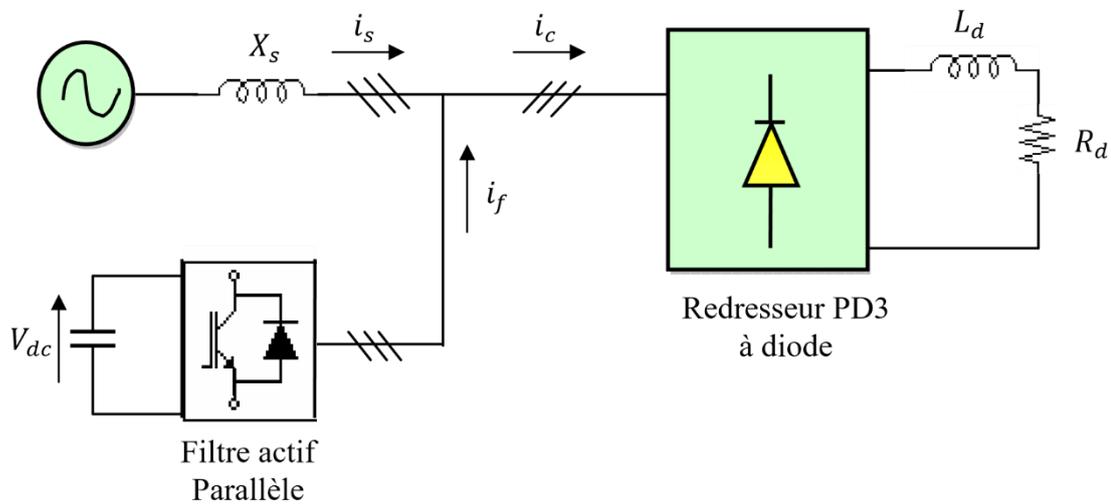


Fig. II. 13.Filtre actif parallèle

ii. Filtre actif série (FAS)

Un FAS, a la responsabilité de modifier l'impédance du réseau au niveau local. Sa fonctionnalité s'apparente à celle d'une source de tension harmonique. Essentiellement, il annule toute tension perturbatrice pouvant provenir de la source ou de la circulation de courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Cela permet à la tension du point de connexion de conserver une forme d'onde sinusoïdale [29].

Bien que le FAS ne parvienne pas à prendre en compte les harmoniques des courants consommés, l'impédance exceptionnelle du transformateur de couplage relève le défi. En présentant une impédance élevée aux courants harmoniques, le FAS bloque leur flux vers la source, les isolant efficacement. Ce mécanisme transforme le FAS en une source de tension contrôlable [25] [26].

La fonction principale du FAS est de filtrer toutes les charges de tension harmonique qui produisent des harmoniques indésirables [29], [30] et [31]. Selon la source [32], le principal inconvénient du FAS est son coût et sa sensibilité aux pertes élevées. De plus, la protection du filtre actif contre les surintensités pose un défi important et ne permet pas de gérer l'énergie réactive.

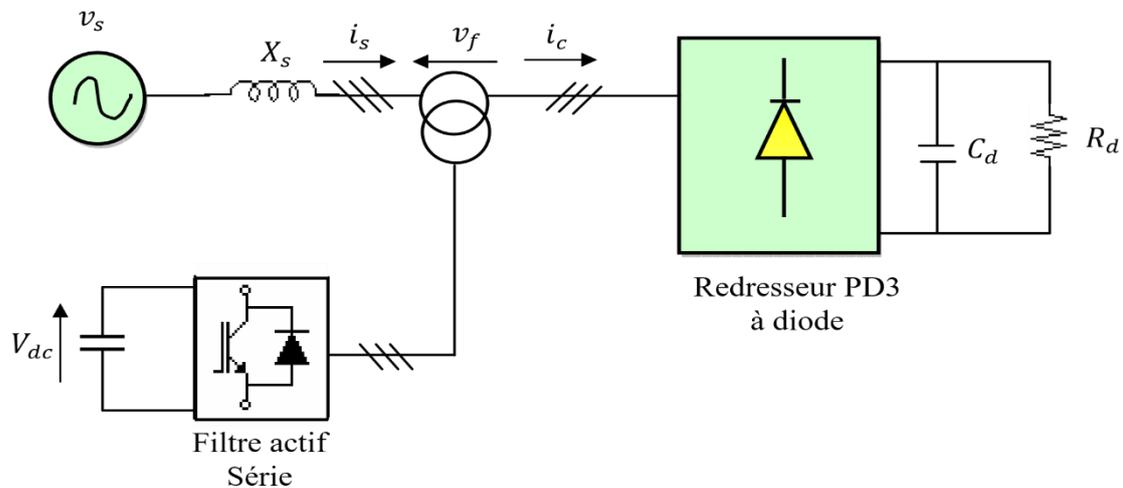


Fig. II. 14. Filtre actif série

iii. Conditionneur universel de la qualité d'onde

En combinant un filtre actif parallèle avec un filtre actif en série, un conditionneur universel de qualité de puissance (UPQC) est formé, connu sous le nom de "conditionneur de qualité de puissance unifié". Avec diverses fonctions disponibles, notamment la compensation de la puissance réactive, la compensation des harmoniques, la stabilisation de la tension et la régulation, cette structure peut améliorer la qualité de la tension. La figure représentée au II.15 illustre cette configuration.

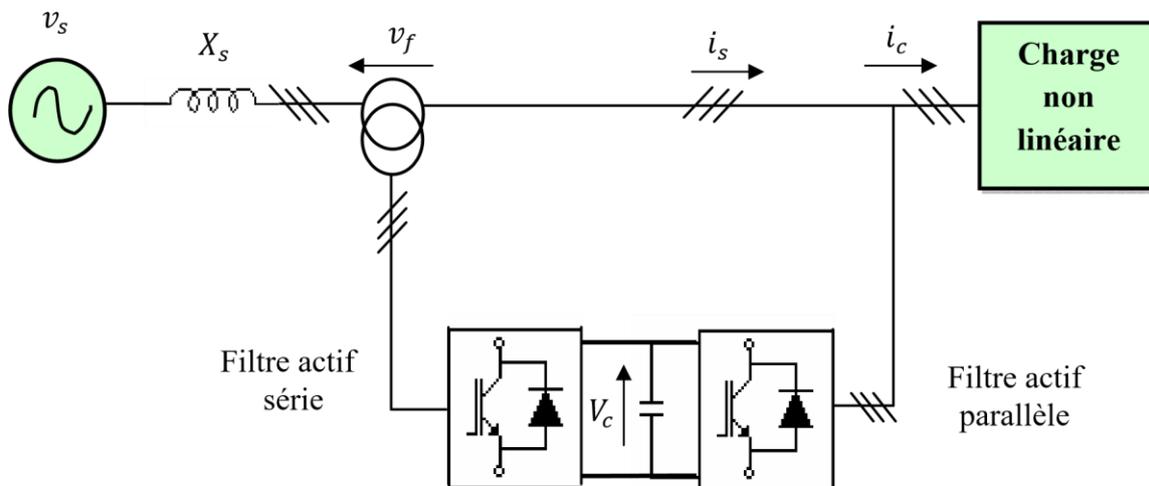


Fig. II. 15. Conditionneur universel de la qualité d'onde

Le FAS joue un rôle crucial dans le filtrage de toute source et interférence basée sur la charge, tout en rectifiant la tension déséquilibrée, assurant ainsi un fonctionnement optimal du système. Pour réguler la tension continue du condensateur situé entre deux filtres actifs, le FAP remplit un certain nombre de fonctions vitales telles que l'absorption des courants harmoniques,

la compensation de la puissance réactive et l'inversion des courants de séquence. Ceci est décrit dans les sources [25] et [33].

c) Effet de l'impédance du réseau sur le filtre actif

Par rapport aux filtres passifs, l'impact de l'impédance du réseau est minime sur les filtres actifs. De plus, il n'y a aucun risque de résonance entre l'impédance du réseau et un filtre actif, ce qui n'est pas une considération de conception importante. Cependant, l'efficacité de la compensation des harmoniques dans les filtres actifs est toujours influencée par l'impédance du réseau et les types de charge qui génèrent des harmoniques [22] [30].

II.4.2.3. Filtre hybride

Un filtre hybride comprend à la fois un filtre actif et un filtre passif qui fonctionnent ensemble. Alors que le filtre passif traite de la compensation des harmoniques, le filtre actif améliore les performances de filtrage en fonction des changements de charge et de réseau [15]. Les filtres hybrides peuvent être configurés de différentes manières, bien que seules quelques-unes de ces structures aient été mises en œuvre dans la pratique. Dans ce contexte, nous présenterons certaines des combinaisons de filtres hybrides les plus importantes.

a) Association filtre actif parallèle avec des filtres passifs parallèles

Cette topologie spécifique comprend à la fois un filtre actif et un filtre passif, tous deux connectés en parallèle avec la charge, comme illustré à la Figure II.16. Le filtre passif parallèle (FPP) est mieux adapté pour traiter les harmoniques d'ordre inférieur tels que les courants d'ordre 5^{ème} et 7^{ème}. D'autre part, le FAP est plus approprié pour traiter les harmoniques d'ordre supérieur. Par conséquent, il est crucial d'assurer un bon partage de la compensation entre les deux filtres lors de la phase de conception. De plus, le FAP peut être utilisé pour empêcher la résonance entre l'impédance de la source et le FPP, agissant comme une résistance variable pour atténuer toute harmonique offensante [29].

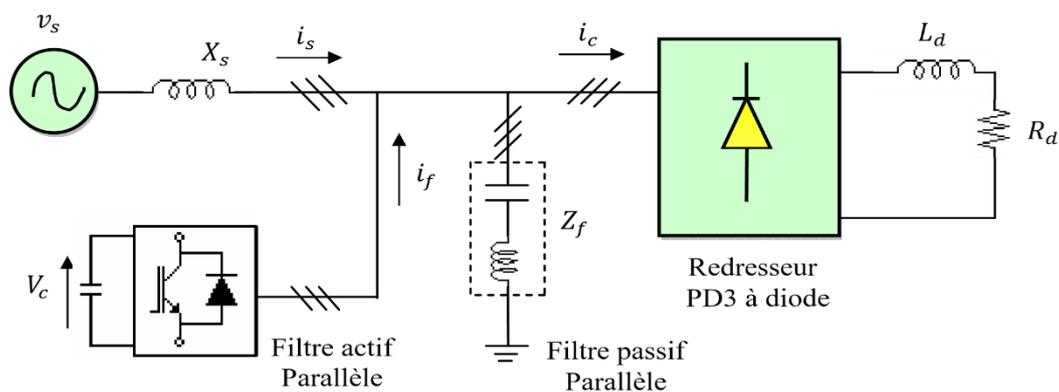


Fig. II. 16. Filtre hybride parallèle

b) Association filtre actif série avec des filtres passifs parallèles

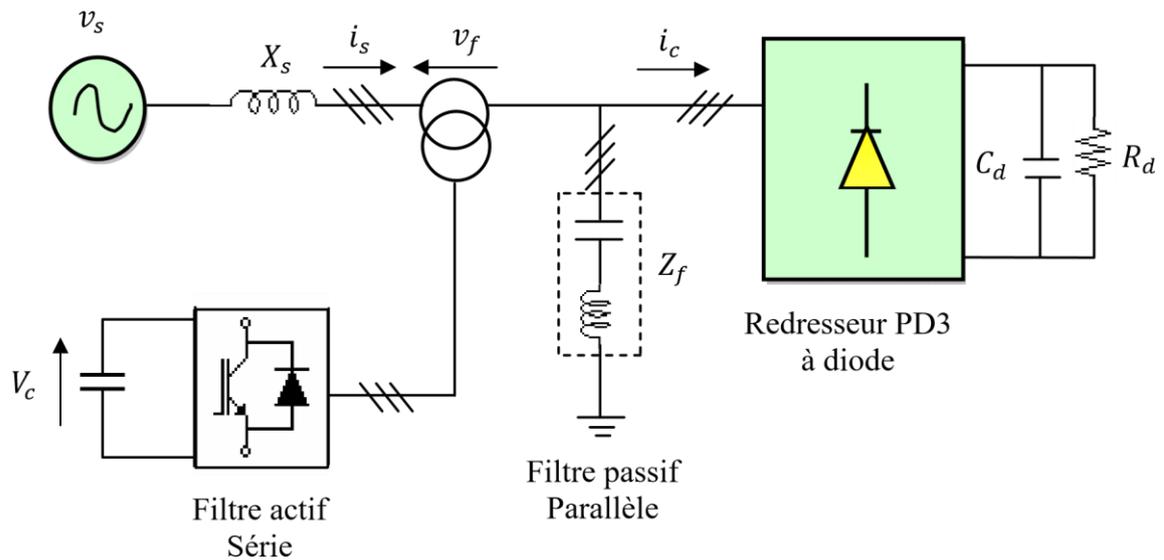


Fig. II. 17. Filtre hybride série

Comme l'illustre la Figure II.17, le filtre hybride série combine un FAS et un FPP. En déployant le FAS, les performances de compensation sont améliorées et les problèmes produits par le FPP, tels que la résonance et l'influence de l'impédance de la source, sont éliminés. Par conséquent, le filtre actif série agit comme une résistance pour remédier au flux de courants harmoniques et les canalise à travers le filtre passif [34]. Parallèlement, le FPP joue un rôle critique dans la divergence des courants harmoniques grâce à sa capacité à modifier localement l'impédance du réseau [28]. Une comparaison des deux systèmes hybrides peut être trouvée dans le tableau II.1 [32].

	Filtre passif parallèle-Filtre actif parallèle	Filtre passif parallèle-Filtre actif série
Configuration	Voire Figure II.16	Voire Figure II.17
Circuit de puissance du filtre actif	Onduleur de tension MLI avec une boucle de courant.	Onduleur de tension MLI sans boucle de courant.
Vocation du filtre actif	Compensation des harmoniques.	Isolation des harmoniques entre la source et la charge non-linéaire.
Avantages	Réduction dans la capacité du filtre actif parallèle.	Grande réduction dans la capacité du filtre actif série.

Inconvénients	<p>1. Les courants harmoniques peuvent circuler de la source vers le filtre actif.</p> <p>2. Les courants de compensation injectés par le filtre actif peuvent circuler dans les filtres passifs.</p>	Nécessité de protection et d'isolation du filtre actif série.
---------------	---	---

Tab. II. 1. Comparaison entre le filtre hybride parallèle et le filtre hybride série.

c) Association série d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif

Cet agencement comprend deux filtres, l'un actif et l'autre passif, qui sont reliés en série sans transformateur comme médiateur. L'installation est connectée en parallèle avec le réseau, comme illustré à la Fig. II.18. Ici, le filtre passif fonctionne comme une basse impédance à la fréquence d'accord et une haute impédance à la fréquence fondamentale. L'agencement présente un double avantage : le courant traversant le filtre actif est plus faible, d'où une réduction du dimensionnement en puissance. De plus, il protège le filtre actif des court-circuit potentiels dans la charge [34] [25].

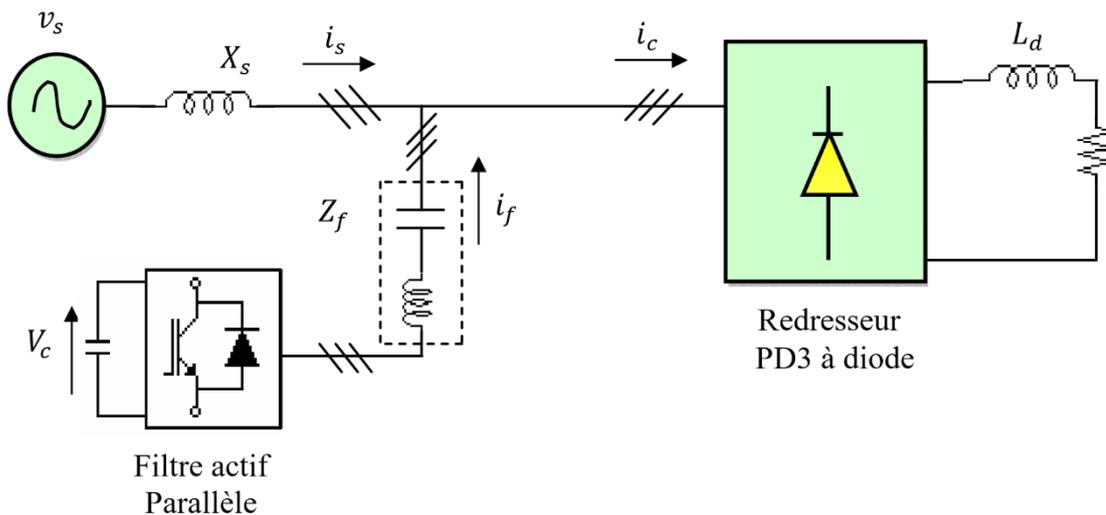


Fig. II. 18. Association filtre actif parallèle et filtre passif résonant

II.4.2.4. Comparaison générale entre le filtre passif, filtre actif

Les deux types de filtrage (passif et actif) sont comparés dans le Tab II.3 [15]

	Filtre passif	Filtre actif
Action sur les courants harmoniques	Nécessite un filtre pour chaque fréquence (encombrant)	Agit simultanément sur plusieurs fréquences
Influence d'une variation de fréquence	Efficacité réduit	Aucune conséquence

Influence de la variation de l'impédance	Risque de résonance	Aucune conséquence
Influence d'une augmentation de courant	Risque de surcharge et de détérioration	Aucun risque de surcharge, mais efficacité diminuée
Ajout de matériel (augmentation de charge)	Nécessite des modifications sur le filtre, dans certains cas	Aucun problème
Action sur les harmoniques suivant leur ordre	Très difficile	Possible, grâce au paramétrage
Encombrement	Important	Faible
Modification de la fréquence fondamentale	Modification impossible	Possible, grâce à la reconfiguration
Compensation dans les réseaux haute puissance	possible	Possible mais avec coût élevé
Compensation de puissance réactive	possible	Possible, mais à coût plus élevé que pour le filtre passif.

Tab. II. 2. Comparaison entre le filtre actif et le filtre passif.

II.4.2.5. Comparaison entre le filtre passif, filtre actif et filtre hybride

Les trois types de filtrage (passif, actif et hybride) sont corrélés dans la Tab II.3 [32].

	Filtres passifs	Filtres actifs	Filtres hybrides
Performance	Pauvre	Bonne	Bonne
Fiabilité	Pauvre	Pauvre	Moyenne
Pertes	Réduites	Elevées	Moyennes
Coût	Réduit	Elevé	Moyen

Tab. II. 3. Comparaison entre le filtre actif, le filtre passif et filtre hybride.

II.5 Conclusion

Cette chapitre détaille les mesures déployées pour lutter contre le problème de la pollution harmonique. La surcapacité des composants du réseau, les transformateurs de mise à la terre, les transformateurs déphaseurs, les redresseurs MLI et les redresseurs à 12 ou 24 impulsions font partie des techniques utilisées pour réduire l'énergie harmonique et réactive. De plus, des filtrages passif, actif et hybride sont également mis en œuvre pour atténuer ces problèmes.

Au cours des dernières décennies, les secteurs industriels ont été témoins de l'importance des méthodes de filtrage passif et actif. Bien que le filtrage passif ait ses propres avantages, le filtrage actif est apparu comme une solution supérieure pour à la fois atténuer les harmoniques et améliorer la qualité globale de l'alimentation dans les réseaux électriques. Cependant, il

convient de noter que chaque remède proposé a son propre ensemble d'avantages et d'inconvénients.

Afin de parvenir à une solution satisfaisante qui répond à toutes les exigences nécessaires, il est crucial de hiérarchiser et d'amplifier les efforts de recherche.

Dans les prochaines sections, nous explorerons trois techniques de filtrage harmonique : le filtre actif parallèle, le filtre actif parallèle par action sélective et le filtre hybride parallèle.

CHAPITRE III

STRATEGIES D'EXTRACTION GLOBALE DES COURANTS HARMONIQUES DE REFERENCES

III.1. Introduction

Pour effectuer une filtration active globale complète des harmoniques, les composantes harmoniques du courant de la charge incriminée doivent d'abord être extraites. Ces composants représentent les manifestations réelles des courants harmoniques qui existent dans le courant de la charge, et leur fonction est de réguler la puissance des filtres actifs (FAP). Cette réglementation définit l'efficacité et la fiabilité du filtre actif. Il existe plusieurs techniques pour générer le signal de référence de compensation, avec diverses stratégies préconisées dans la littérature depuis l'apparition des filtres actifs. Ces stratégies dépendent du domaine de calcul. [26]

Le choix de la stratégie appropriée pour identifier les courants harmoniques de référence est crucial pour que le filtre actif exécute ses tâches prévues et fonctionne efficacement dans des états stables et transitoires. [9] [15]

III.2. Techniques d'identification des harmoniques de références

Les interrupteurs à semi-conducteurs de l'onduleur s'appuient sur des signaux de référence pour l'ouverture et la fermeture. Ces signaux sont générés par des algorithmes de contrôle qui peuvent être classés en temps, en fréquence. Les méthodes d'identification des grandeurs harmoniques sont organisées en deux domaines selon leurs domaines de calcul :

- Domaine fréquentiel
- Domaine temporel

III.2.1. Domaine fréquentiel

Les techniques employées dans ce domaine reposent sur l'analyse de Fourier, qui est employée pour isoler les signaux de compensation des grandeurs déformées telles que les courants ou les tensions. Dans un premier temps, la transformée de Fourier est utilisée pour différencier les composantes harmoniques de compensation des signaux harmoniques polluants. Ensuite, les composantes harmoniques de compensation sont combinées pour former les points de consigne. [26]

Pour assurer une compensation adéquate, il est typiquement nécessaire de maintenir la fréquence de découpage des semi-conducteurs de filtrage actif au double des fréquences harmoniques.

L'utilisation de la transformée de Fourier, un système d'équations non linéaires, peut être un calcul ardu avec un retard conséquent dans le temps de réponse. Cette catégorie de techniques comprend :

III.2.1.1 Méthodes de Fast Fourier Transform (FFT)

En utilisant la méthode Fast Fourier Transform (FFT), la composante fondamentale d'un signal peut être supprimée, permettant la restauration de la composante harmonique. Ceci est réalisé en mettant en œuvre la technique FFT inverse pour récupérer le signal final dans le domaine temporel. [35]

La génération de coefficients de Fourier nécessite que le système prélève des échantillons de période complète, ce qui entraîne un retard de réponse. Par conséquent, cette technique est mal adaptée aux systèmes qui subissent des changements rapides dans le temps et n'est viable que pour ceux qui évoluent lentement. [35]

III.2.1.2 Technique de la multiplication sinusoïdale

Pour éliminer les harmoniques d'ordre élevé, une onde sinusoïdale de fréquence fondamentale est utilisée pour multiplier le signal. Le produit résultant subit une intégration avant de passer à travers un filtre passe-bas. Cette technique est efficace pour éliminer les harmoniques indésirables, mais le processus reste lent, prenant plus d'un cycle complet pour se terminer. [22]

III.2.2. Domaine temporel

La compensation des harmoniques de courant/tension et des fluctuations dans les bus CC à filtre actif implique des algorithmes de compensation dans le domaine temporel qui reposent sur la détermination instantanée des amplitudes de compensation, de la puissance réactive et des fluctuations du bus CC à filtre actif. L'objectif ultime est d'éliminer les courants harmoniques et de corriger les facteurs de puissance, ce qui peut être réalisé grâce à différentes approches telles que l'inclusion de composants réactifs. Plusieurs algorithmes, y compris la méthode de puissance instantanée [35], la méthode d'identification basée sur la détection du courant de charge, l'algorithme d'identification basé sur le filtre Notch, la méthode de référence synchrone "Park" et l'algorithme d'identification basé sur un filtre multi variable, entrent dans cette catégorie. Pour mieux comprendre et comparer ces méthodes, un exemple explicatif sera fourni.

III.2.2.1 Méthode de la puissance instantanée ($p-q$)

En présence des harmoniques, la puissance apparente est composée de trois parties : active (P), réactive (Q) et déformante (D) comme le montre la relation (III.1).

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (III.1)$$

En utilisant la transformation $(\alpha - \beta)$, il devient possible de calculer les puissances réelles et imaginaires. Les termes (V_α, V_β) et (i_α, i_β) font référence aux composantes perpendiculaires de la référence $(\alpha - \beta)$ affectées respectivement aux tensions de connexion du filtre actif parallèle (V_s) et aux courants consommés par les charges contaminées (i_{ch}) . En utilisant la transformation triphasée $(\alpha - \beta - 0)$, nous pouvons exprimer la relation tension-courant comme suit :

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & 1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & \sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{s1} \\ v_{s2} \\ v_{s3} \end{bmatrix} \quad (III.2)$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & 1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & \sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c1} \\ i_{c2} \\ i_{c3} \end{bmatrix} \quad (III.3)$$

L'expression de la puissance active instantanée notée $P(t)$ est donnée comme suit :

$$\begin{aligned} P(t) &= v_{s1} \cdot i_{c1} + v_{s2} \cdot i_{c2} + v_{s3} \cdot i_{c3} = p(t) + p_0(t) \\ P(t) &= v_\alpha \cdot i_\alpha + v_\beta \cdot i_\beta \\ p_0(t) &= v_0 \cdot i_0 \end{aligned} \quad (III.4)$$

Avec : $p_0(t)$ la puissance homopolaire instantanée

La transformation $(\alpha - \beta - 0)$ offre l'avantage d'isoler les séquences homopolaires de la structure de courant ou de tension triphasée. De même, la puissance imaginaire instantanée peut être exprimée de la manière suivante :

$$\begin{aligned} q(t) &= -\frac{1}{\sqrt{3}} [(v_{s1} - v_{s2}) \cdot i_{c3} + (v_{s2} - v_{s3}) \cdot i_{c1} + (v_{s3} - v_{s1}) \cdot i_{c2}] \\ &= v_\alpha \cdot i_\beta - v_\beta \cdot i_\alpha \end{aligned} \quad (III.5)$$

En utilisant les connexions trouvées dans (III.4) et (III.5), nous pouvons formuler la corrélation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & v_{s\beta} \\ -v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} \quad (III.6)$$

Typiquement, les puissances p et q possèdent chacune un segment continu et un segment alterné. Cela nous permet de formuler l'expression suivante :

$$\begin{cases} p = \bar{p} + \tilde{p} \\ q = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad (III.7)$$

Avec:

1. P représente la puissance en courant continu associée aux constituants primaires opérationnels du courant et de la tension.
2. Q symbolise un flux d'énergie ininterrompu qui correspond à la base réactive de la tension et du courant.
3. Le troisième point indique qu'il existe une corrélation entre les puissances alternatives de P et Q et les composantes perturbatrices combinées du courant et de la tension, comme détaillé dans la référence [8].

En inversant la relation (III.6), le calcul des courants perturbateurs est effectué et le courant de référence ($a-b$) peut être recalculé à l'aide de l'équation (III.8) :

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{s\alpha}^2 + v_{s\beta}^2} \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & -v_{s\beta} \\ v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (III.8)$$

A la réflexion des équations (III.7) et (III.8), il est possible de démêler le courant traversant la marque ($\alpha - \beta$) en un trio de composantes. Ceux-ci incluent à la fois les éléments actifs et réactifs à la fréquence fondamentale, ainsi que les harmoniques. Cette séparation se traduit par :

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & -v_{s\beta} \\ v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ 0 \end{bmatrix}}_{\text{Courant actif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & -v_{s\beta} \\ v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{q} \end{bmatrix}}_{\text{Courant réactif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & -v_{s\beta} \\ v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix}}_{\text{Courant harmonique}} \quad (III.9)$$

Avec : $\Delta = v_{s\alpha}^2 + v_{s\beta}^2$: supposé constant dans l'hypothèse d'une tension sinusoïdale équilibrée du réseau électrique.

L'expression indique clairement que la séparation des termes continus des puissances réelles et imaginaires instantanées dans le repère ($\alpha - \beta$) aboutit à l'identification des composantes courantes. En utilisant la transformation inverse ($\alpha - \beta$) fournie dans la relation (III.10), les courants de référence (i_{ch_ref}) les courants de perturbation triphasés qui représentent les courants identifiés peuvent être calculés :

$$\begin{bmatrix} i_{ch_ref1} \\ i_{ch_ref2} \\ i_{ch_ref3} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ch\alpha_ref} \\ i_{ch\beta_ref} \end{bmatrix} \quad (III.10)$$

La figure III.1 présente le schéma fonctionnel responsable de la création des courants de référence. Le schéma fait intervenir FPB, un filtre passe-bas du second ordre, dont l'équation (III.11) désigne sa fonction de transfert.

$$F(s) = \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\xi_0\omega_0s + \omega_0^2} \quad (III.11)$$

Avec :

$$\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f_0$$

f_0 : Est la fréquence de coupure de filtre,

ξ_0 : Amortissement

s : L'opérateur de la place

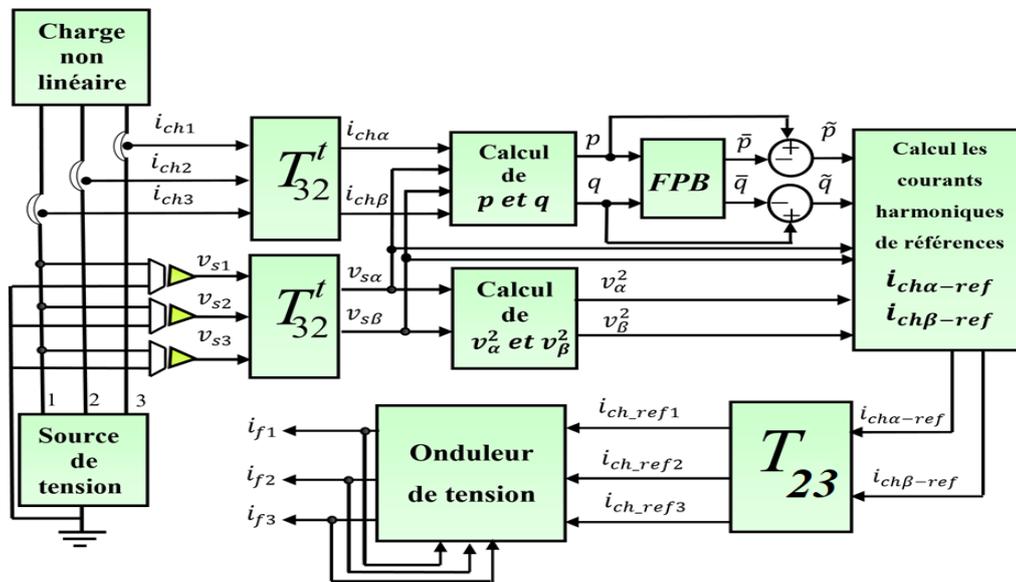


Fig. III. 1. Schéma de génération des courants harmoniques de référence selon la théorie f

Voici les principales caractéristiques de cette approche :

1. La notion de systèmes triphasés est une théorie inhérente.
2. La beauté de cette application réside dans sa polyvalence elle peut être utilisée dans n'importe quel système triphasé, qu'il soit caractérisé par un équilibre ou un déséquilibre, qu'il comprenne ou non des harmoniques.
3. Le système s'appuie sur des données en temps réel, ce qui lui permet de réagir rapidement à tout changement et d'assurer d'excellents temps de réponse dynamiques.
4. La quantité d'harmoniques qui sont compensées dépend de la bande passante semi-conductrice de l'onduleur à filtre actif [15].
5. La méthode de calcul simple utilise uniquement des expressions algébriques et est facilement exécutée avec un processeur standard.

III.2.2.2. Technique d'identification basée sur la détection du courant de charge (DCC)

Comme indiqué dans la référence [27], le principe fondamental de cette technique est :

1. Identification des courants harmoniques de la charge ($i_{ch1}, i_{ch2}, i_{ch3}$).
2. Détermination du niveau actuel de courant (I_{s-max}).
3. En introduisant une onde sinusoïdale en synchronisation avec la tension secteur, le courant de référence du filtre actif parallèle peut être dérivé. Cela se fait en alignant l'image du courant secteur avec la tension et en séparant cette dernière du courant de charge.

a) Détermination de la valeur I_{s-max}

La méthodologie de transformation ($\alpha - \beta$) peut être utilisée pour calculer l'amplitude de la composante fondamentale de tout courant de charge donné.

b) Principe de la méthode

Pour déterminer les deux composantes (i_α) et (i_β), nous transformons ($\alpha - \beta$) les courants de charge du système triphasé. Une fois cette transformation terminée, chaque composant est passé à travers un filtre passe-bas pour extraire ses composants fondamentaux. Le processus est décrit en détail dans la Figure III.2.

La détermination de la valeur maximale du courant de la source de référence nécessite de trouver la racine carrée de valeurs spécifiques. Une fois cette valeur établie, la multiplier par le sinus sinusoïdal de phase appropriée ($\omega t + \emptyset$) donne la référence de courant de source (i_s). L'extraction de ce courant du courant de charge nous fournit alors le courant de référence pour le filtre actif.

Pour isoler les courants sous-jacents (i_α) et (i_β), chacun doit traverser un filtre passe-bas du quatrième ordre avec une fréquence de coupure de ($f_c = 50Hz$). La fonction de transfert identique des deux filtres assure la cohérence de leur sortie :

$$F(s) = \frac{k}{(1+\tau s)^4} \quad (III.12)$$

Avec : $k = 4.9$, et $\frac{1}{\tau} = 2\pi \cdot f_c$

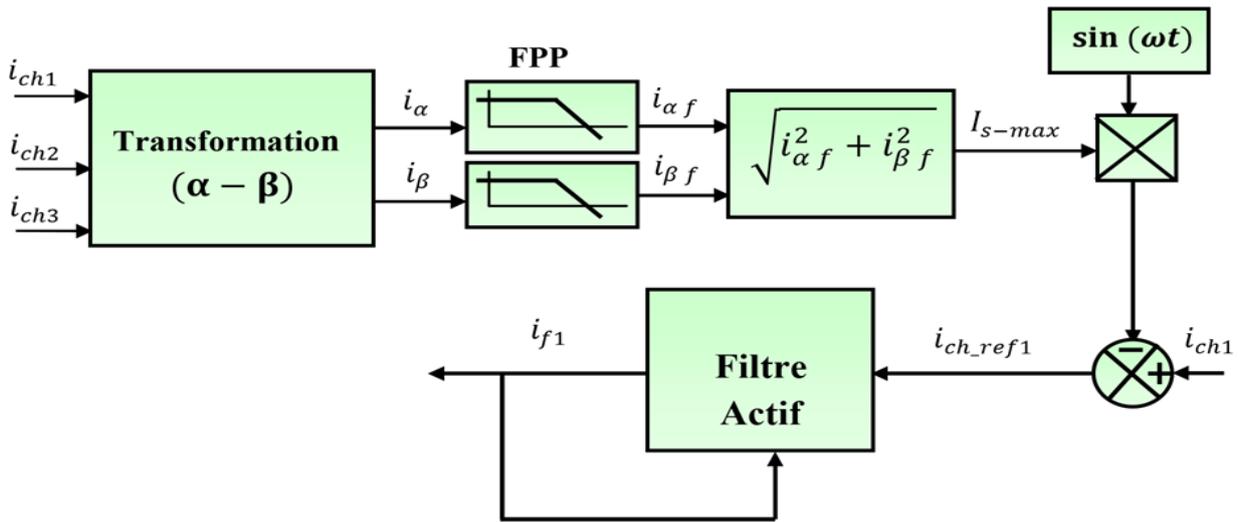


Fig. III. 2. Algorithme d'identification basé sur la détection du courant de charge

III.2.2.3. Algorithme d'identification basé sur le filtre Notch

CA Quinn et N. Mohan ont proposé l'algorithme le plus simple pour calculer les courants de référence en 1992. Le diagramme de la Fig. III.11 illustre son principe fondamental. [36]

Le processus d'identification consiste à faire passer le courant de charge à travers un filtre spécialisé appelé "Notch" ou "Notch filter" [33]. Ce filtre filtre efficacement la composante fondamentale, laissant passer les composantes harmoniques. Par conséquent, la fréquence de coupure de ce filtre est uniforme sur tous les composants.

Les propriétés isolantes d'un filtre coupe-bande basique à bande passante de 40Hz sont impressionnantes. Les signaux de commande pour les semi-conducteurs de l'onduleur sont produits à l'aide du courant de référence. Cela facilite la fonction de transfert. La méthode de mise en œuvre du filtre Notch est décrite comme suit :

$$F(s) = \frac{s^2 + \omega_0^2}{s^2 + \omega_0^2 + s \frac{\omega_0}{Q}} \quad (III.13)$$

Cette méthode possède les quelques caractéristiques suivantes :

1. La polyvalence de cette application permet son déploiement sur une large gamme de systèmes. Il peut être utilisé sans difficulté dans des systèmes monophasés, biphasés ou triphasés, équilibrés ou déséquilibrés.
2. Réagit bien pendant les périodes de transition.
3. Une approche simple de l'informatique.

4. La distinction entre composantes fondamentales et harmoniques est moins évidente.

Cette aide visuelle illustre le concept fondamental derrière la création de références harmoniques grâce à la mise en œuvre du filtre Notch.

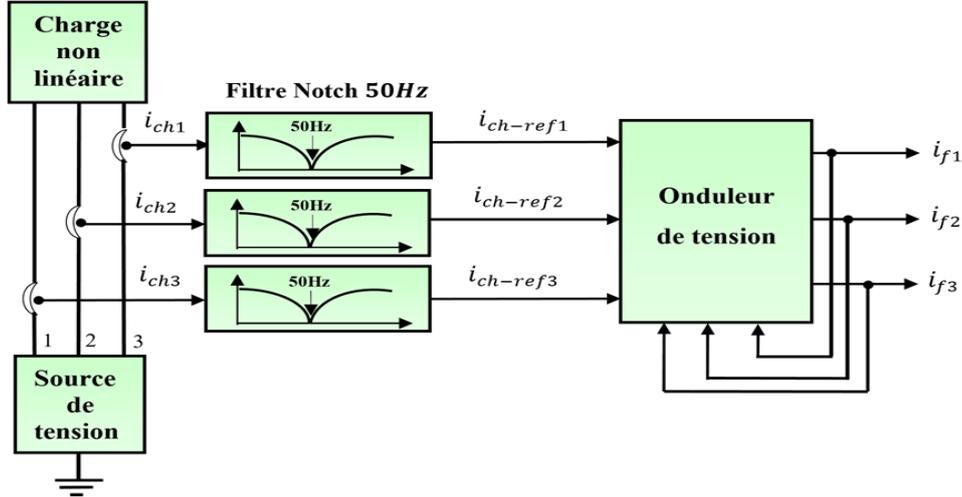


Fig. III. 3. Algorithme d'identification des courants de référence à base du filtre Notch

III.2.2.4. Méthode de référentiel synchrone Park ($d-q$)

Au cœur de cette technique se trouve la conversion d'un système de courant ou de tension triphasé en un système biphasé, à travers une référence orthogonale ($d - q$) qui tourne à une fréquence spécifique (ω) [37]. Pour un filtrage efficace avec compensation d'énergie réactive, la fréquence du réseau biphasé doit être identique à celle du réseau triphasé. Il en résulte deux composantes de courant, d et q , comprenant une composante constante et une composante variable (alternative). Alors que la composante alternative représente l'amplitude du courant pollué, la composante constante reflète l'amplitude évolutive de la pulsation.

Indéniablement, cet élément particulier sert de pierre angulaire au courant actuel. L'aspect fluctuant, quant à lui, incarne les harmoniques. En transformant les courants de charge par la méthode de Park, on obtient :

$$\begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_{ch1} \\ i_{ch2} \\ i_{ch3} \end{pmatrix} \quad (III.14)$$

Comme nous venons de citer :

$$\begin{cases} i_d = \bar{i}_d + \tilde{i}_d \\ i_q = \bar{i}_q + \tilde{i}_q \end{cases} \quad (III.15)$$

Où

\bar{i}_d : Amplitude du courant fondamental actif.

\tilde{i}_d : Courant harmonique sur l'axe d .

\bar{i}_q : Amplitude du courant fondamental réactif.

\tilde{i}_q : Courant harmonique sur l'axe q .

Des filtres passe-haut et passe-bas du premier ou du second ordre sont utilisés pour séparer les parties constantes du courant mesuré. Les courants harmoniques de référence sont issus de la transformée de Park inverse de ces filtres.

$$\begin{pmatrix} i_{ch.ref1} \\ i_{ch.ref2} \\ i_{ch.ref3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{i}_d \\ \tilde{i}_q \end{pmatrix} \quad (III.16)$$

La Figure III.12 [38] illustre un schéma fonctionnel d'un générateur de courant de référence qui utilise l'algorithme de trame de référence synchrone. Pour passer du plan $(\alpha - \beta)$ au plan $(d - q)$, la matrice de transition est fournie ci-dessous :

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) \\ \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (III.17)$$

Comme l'indique la relation III.17, pour se synchroniser avec les tensions simples du réseau, le plan $(\alpha - \beta)$ doit subir une transformation dans le référentiel $(d - q)$ des signaux, mettant en oeuvre une fonction sinus et cosinus. Ce processus est crucial et nécessite une boucle à verrouillage de phase, également appelée PLL (Phase Locked Loop) dans le terme anglo-saxon, pour chaque phase. [38]

Cet algorithme possède les quelques caractéristiques suivantes :

1. L'application de cette technique est intrinsèque aux systèmes triphasés.
2. Son application est possible pour les systèmes triphasés à la fois équilibrés et déséquilibrés, y compris ceux avec des composants neutres.
3. Une approche simple à calculer.
4. Les composantes fondamentales et harmoniques sont nettement découplées.

5. Le système fonctionne sur des données en temps réel ou instantanées.

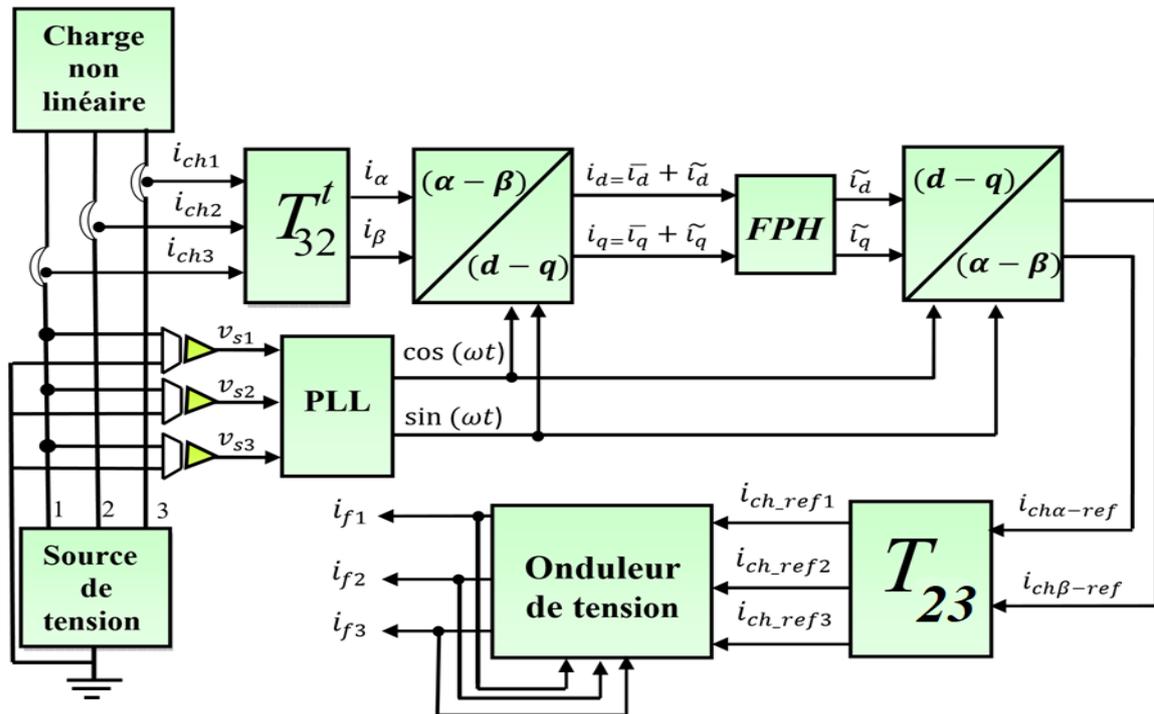


Fig. III. 4. Algorithme d'identification des courants harmoniques de référence à base du référentiel synchrone (Park)

CHAPITRE IV

DIMENSIONNEMENT, FONCTIONNEMENT ET COMMANDE DU FILTRE ACTIF PARALLELE (FAP)

IV.1. Introduction

Dans le cadre de la politique de dépollution harmonieuse, des solutions modernes telles que le filtrage actif parallèle des harmoniques sont mises en œuvre pour améliorer la qualité de l'énergie électrique. Cette approche réduit efficacement le taux de distorsion harmonique, compense l'énergie réactive et améliore finalement le facteur de puissance de l'installation [39]. Le principe fondamental du filtrage actif parallèle est de générer et d'introduire des courants harmoniques en opposition de phase avec les harmoniques non linéaires générés par la charge, restaurant ainsi la forme d'onde sinusoïdale du courant du réseau. Typiquement, cette technique utilise un onduleur de tension, et la sortie de l'onduleur est manipulée via une commande appropriée pour injecter la forme d'onde du signal de courant harmonique dans le point de connexion commun.

Ce chapitre va présenter la structure, les exigences de puissance et la sélection des paramètres du filtre de couplage et de la tension du bus continue. La méthode de puissance instantanée modifiée ($p-q$) a été utilisée pour déterminer les courants harmoniques de référence dans diverses conditions de tension du réseau, tandis que la commande d'hystérésis, modulation de largeur d'impulsion et logique flou ont été utilisées pour générer des signaux de commande de l'onduleur. Aussi les résultats de simulation en utilisant le Logiciel (MATLAB/Simulink).

IV.2. Objectif du filtrage actif parallèle

Dans un réseau électrique, un filtre actif parallèle sert à contrer les effets négatifs des courants harmoniques et de la puissance réactive produits par des charges non linéaires. Pour atteindre cet objectif, le filtre injecte dans le réseau des courants harmoniques et extrait les composantes harmoniques des courants de charge non linéaires et les utilise comme courants de référence. Ces courants de référence sont ensuite utilisés pour réguler le FAP. La boucle de régulation de la tension du bus continu du réservoir capacitif compense les pertes dans les

composants actifs du filtre. La structure générale d'un FAP triphasé est illustrée à la Figure IV.1.

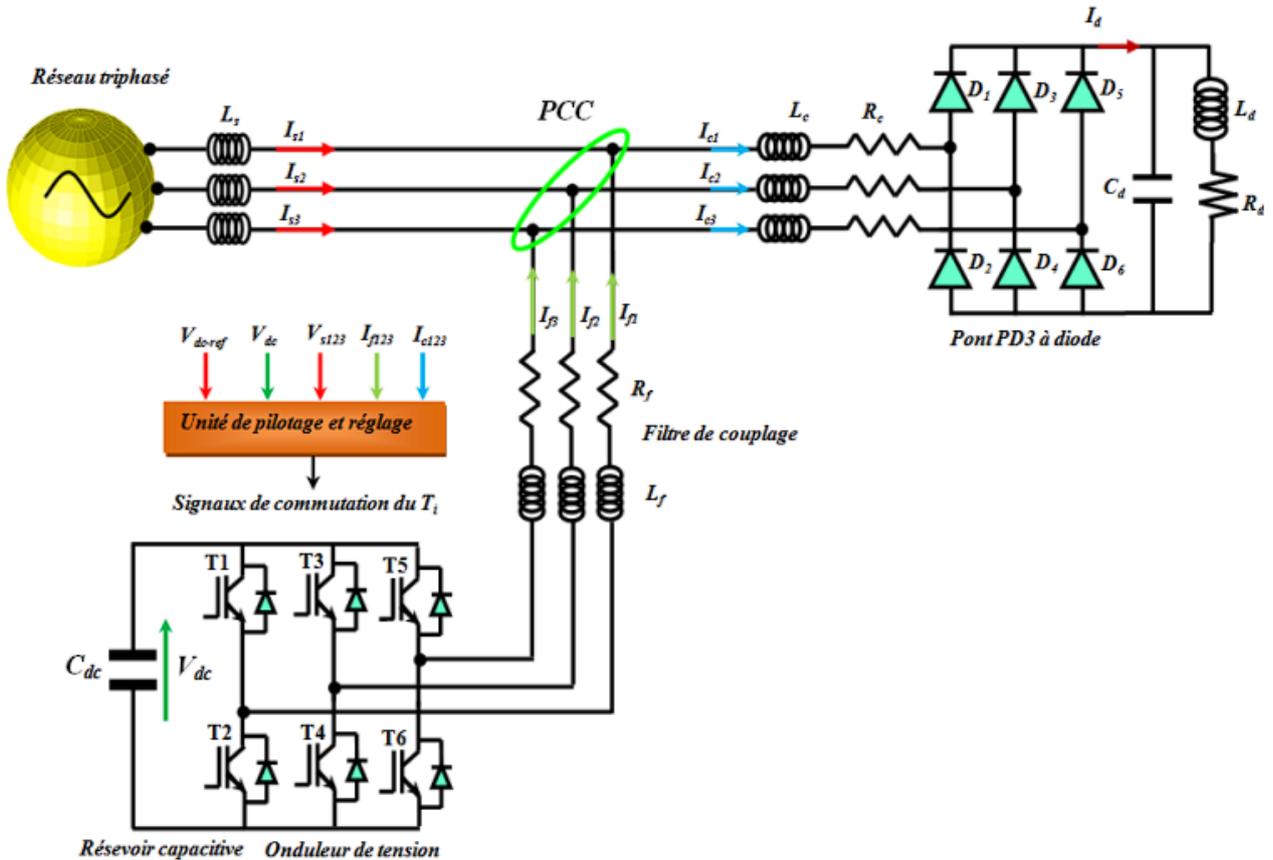


Fig. IV. 1. Structure du filtre actif parallèle.

IV.3. Dimensionnement de la puissance nominale du FAP triphasé

En comprenant la puissance apparente utilisée par la charge non linéaire, nous pouvons calculer la puissance apparente du filtre actif. Cela nous permet de dimensionner le filtre en supposant que toutes les harmoniques générées sont soit filtrées, soit compensées. De plus, nous envisagerons un filtrage actif spécifique des courants harmoniques. La relation (IV.1) définit la valeur efficace du courant de charge $i_c(t)$:

$$I_c = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_{ch}^2} \quad (IV.1)$$

La valeur I_{fh} des courants de compensation d'harmoniques produits par le filtre actif peut être déterminée par déduction :

$$I_{fh} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_{ch}^2} = \sqrt{I_c^2 - I_{c1}^2} \quad (IV.2)$$

En supposant des phases m sinusoïdales et équilibrées, la consommation de puissance apparente nominale du redresseur peut être exprimée comme suit :

$$S_{ch} = \sqrt{P_{ch}^2 + Q_{ch}^2 + D_{ch}^2} = m \cdot V_s \cdot I_c \quad (IV.3)$$

Avec : $P_{ch} = m \cdot V_s \cdot I_1 \cdot \cos(\phi_1)$ est la puissance active absorbée par le redresseur

$Q_{ch} = m \cdot V_s \cdot I_1 \cdot \sin(\phi_1)$ Est la puissance réactive absorbée par le redresseur

$D_{ch} = m \cdot V_s \cdot \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_{ch}^2}$ Est la puissance déformante absorbée par le redresseur

En supposant que le filtre compense la totalité des harmoniques, sa puissance nominale sera :

$$S_{filtre} = D_{ch} \quad (IV.4)$$

En analysant les relations (IV.2), (IV.3) et (IV.4), il est possible de déduire la proportion de puissance apparente attribuable au filtre par rapport à celle produite par la charge polluante :

$$\frac{S_{filtre}}{S_{ch}} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_{ch}^2}}{I_c} \quad (IV.5)$$

Négliger le phénomène d'empiètement peut avoir un impact sur la valeur efficace à la fois du courant de charge I_c et I_{fh} [9] :

$$I_c = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d \text{ et } I_{fh} = I_d \cdot \sqrt{\frac{2}{3} - \frac{6}{\pi^2}} = 0.24 \cdot I_d \quad (IV.6)$$

Le rapport des courants et donc des puissances devient :

$$\frac{S_{filtre}}{S_{ch}} (\%) = 29\% \quad (IV.7)$$

Pour contrecarrer toutes les harmoniques de courant prélevées par un pont redresseur, un filtre actif d'une puissance égale à près d'un tiers de la puissance nominale de la charge est nécessaire. Les rapports de puissance entre la charge et le filtre actif lors de la compensation globale ou sélective sont présentés dans le Tableau IV.1 [9].

	$\frac{S_{\text{filtre}}}{S_{\text{ch}}} (\%)$	$\frac{Sh_{\text{filtre}}}{Sh_{\text{ch}}} (\%)$
Filtrage globale des harmoniques	29	100
Filtrage d'harmonique d'ordre 5 th	19	66
Filtrage d'harmonique d'ordre 7 th	14	48
Filtrage des harmoniques d'ordres 5 th et 7 th	23	81

Table. IV. 1. Puissance du filtre actif en fonction des objectifs de compensation

IV.4. Structure de puissance et commande du FAP

La structure de filtre actif parallèle comprend deux composants principaux, comme illustré à la Figure III.2. La section de puissance se compose d'un onduleur de tension, d'un élément de stockage d'énergie capacitif et d'un filtre de couplage ponctuel passif avec une connexion partagée.

Pendant ce temps, la section de commande comprend l'unité d'ajustement de bus CC, l'unité de génération de courant harmonique de référence et l'unité de génération de signal de commutation à semi-conducteur d'inverseur de tension.

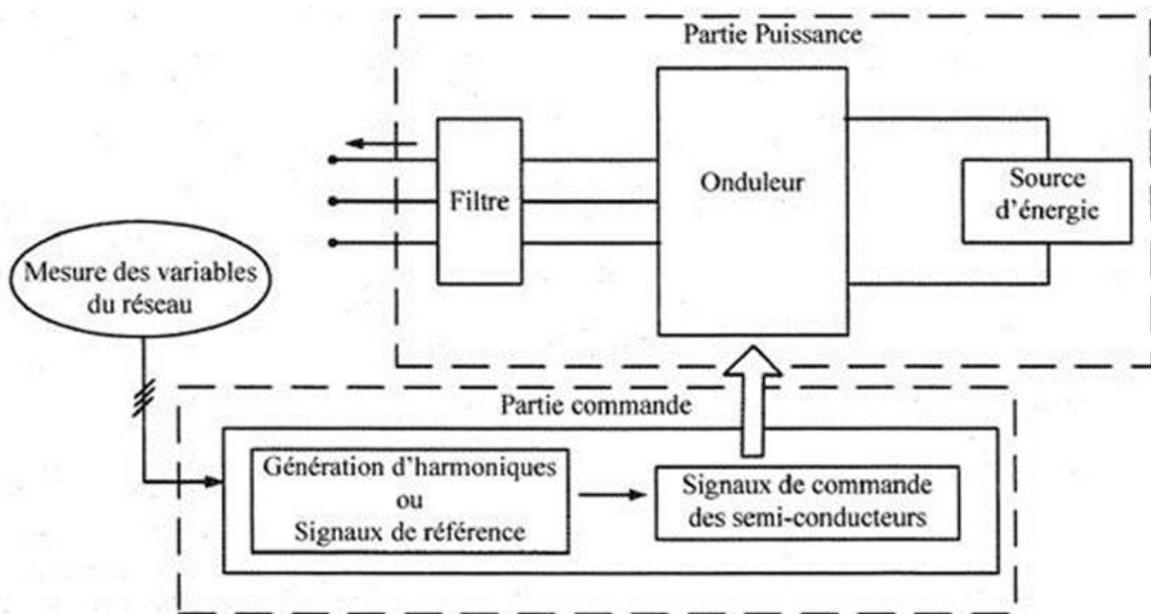


Fig. IV. 2. Structure des unités de puissance et de commande du FAP

IV.4.1. Partie puissance du filtre actif parallèle

Dans cette section, nous nous concentrons sur l'analyse des trois composants qui composent le filtre actif parallèle : l'onduleur de tension, le condensateur de stockage d'énergie

et l'inductance de couplage réseau. De plus, nous déterminerons la tension optimale du bus de condensateur, un aspect crucial qui sera établi dans cette section, selon les sources [15] et [9].

IV.4.1.1. Onduleur triphasé de tension

Pour éliminer les harmoniques du signal extrait de la charge (courant ou tension), une option populaire consiste à utiliser un onduleur de tension contrôlé par le courant. Notre recherche utilise un onduleur de source de tension à deux niveaux, illustré à la Fig. IV.3, car il possède un seul élément de stockage d'énergie (condensateur) et le moins de commutateurs

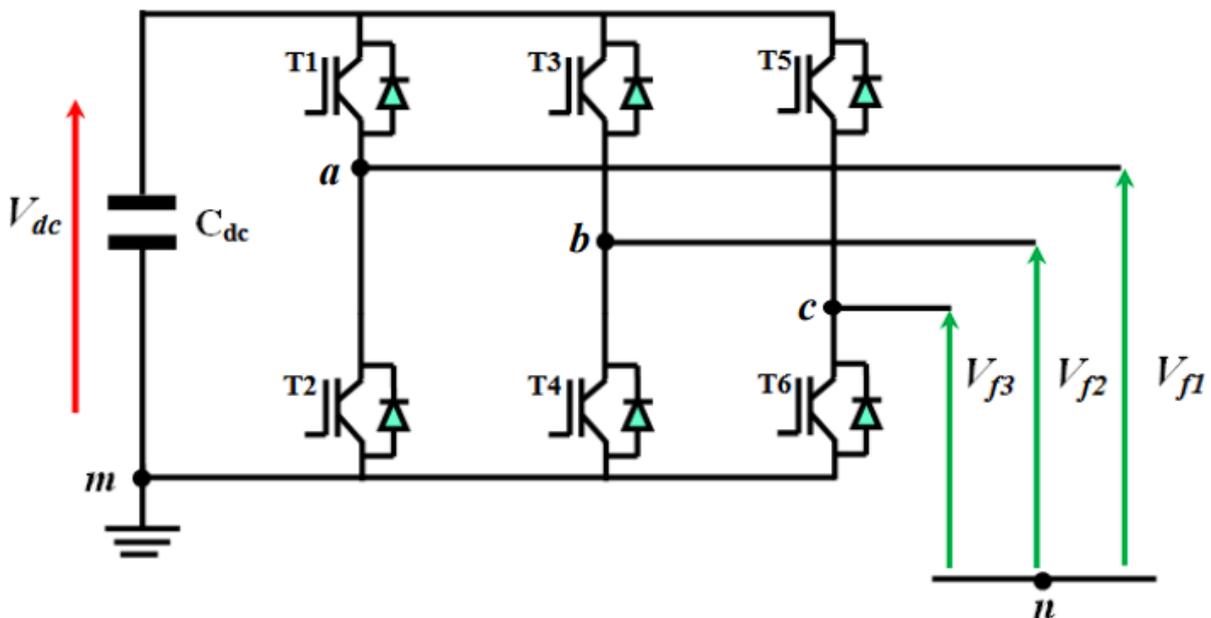


Fig. IV. 3. Structure de l'onduleur de tension à deux niveaux

IV.4.1.2. Condensateur du stockage d'énergie

Dans un système de filtre actif, un réservoir capacitif représenté par le condensateur C_{dc} agit comme une source de tension continue V_{dc} . La dynamique du système et la qualité de la compensation dépendent largement du choix des paramètres de stockage (V_{dc} et C_{dc}) [9]. Un V_{dc} élevé améliore la dynamique du filtre actif, tandis que le choix de C_{dc} détermine les ondulations de la tension continue V_{dc} qui peuvent impacter la qualité de compensation du filtre actif parallèle. Par conséquent, il est crucial de sélectionner des valeurs appropriées pour V_{dc} et C_{dc} afin d'optimiser les performances du filtre actif.

Typiquement, la tension du condensateur du bus continu (V_{dc}) correspond à l'énergie immédiate stockée dans le filtre actif parallèle. Ainsi, le niveau V_{dc} est intentionnellement fixé au-dessus de la tension de crête du réseau pour s'adapter aux fluctuations de la demande de

charge. Il existe plusieurs méthodes pour calculer le V_{dc} idéal, comme indiqué dans des sources telles que [40] et [8] :

$$V_{dc} = \frac{2\sqrt{2}}{m\sqrt{3}} \cdot V_s \quad (IV.8)$$

Avec : m est le coefficient de réglage, qui est considéré égale à 1.

IV.4.1.3. Inductance de couplage au réseau

Pour contrôler la tension et réduire les harmoniques de fréquence d'entraînement de l'onduleur, le filtre actif est couplé en mode parallèle en tant que source de tension contrôlée en courant. Ceci est réalisé grâce à l'utilisation d'une inductance L_f qui agit comme une source de courant, le délivrant au point de connexion commun.

IV.4.2. Partie contrôle du filtre actif parallèle

Il existe deux techniques pour contrôler le courant de sortie du filtre actif pour rester au niveau de référence calculé au chapitre précédent.

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

Le but premier du contrôle, qu'il soit par modulation de largeur d'impulsion ou par hystérésis, est de créer des ordres d'ouverture et de fermeture d'interrupteurs pour s'assurer que le courant du filtre actif reste le plus proche possible de la référence [41].

IV.4.2.1. Commande à hystérésis

Le contrôle conventionnel basé sur l'hystérésis est fréquemment utilisé dans diverses applications en raison de sa nature conviviale et de sa force de fonctionnement. Cette approche garantit un contrôle efficace du courant sans nécessiter une compréhension complète du modèle ou des paramètres du système contrôlé.

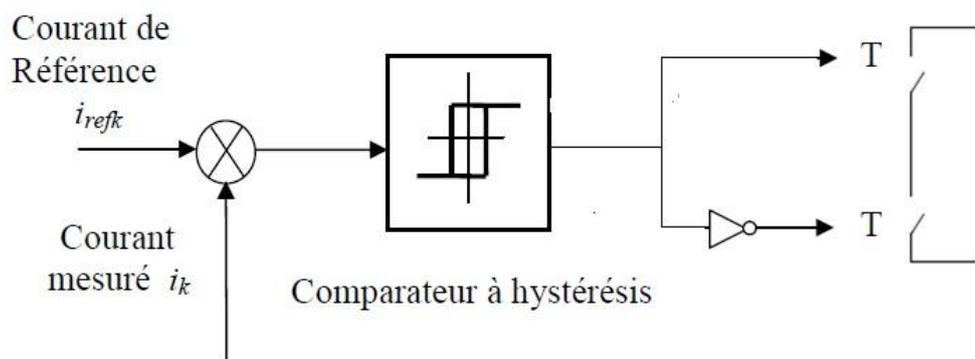


Fig. IV. 4.Principe de la commande des courants par hystérésis.

Le principe de la figure (IV.4) implique deux étapes principales. Initialement, un signal d'erreur est établi comme la différence entre le courant de référence, i_{ref} , et le courant produit par l'onduleur, i_k . Ensuite, les commandes de commande des interrupteurs sont déterminées en comparant cette erreur à un gabarit appelé bande d'hystérésis. Cependant, cette méthode de contrôle présente une limitation importante ; il est incapable de réguler la fréquence de découpage des semi-conducteurs, ce qui conduit à la génération d'un nombre considérable d'harmoniques dans les courants produits.

IV.4.2.2. Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)

Pour résoudre les problèmes susmentionnés, un type secondaire de groupe de commande d'onduleur sera introduit :

La technique de contrôle de la modulation de largeur d'impulsion (MLI) est une solution au défi de la gestion de la fréquence de commutation. Ceci est réalisé en fonctionnant à une fréquence fixe qui peut être simplement filtrée en aval de l'onduleur.

Sans aucun doute, le MLI intersectif, également appelé MLI à échantillonnage naturel, est le type de modulation de largeur d'impulsion le plus simple et le plus connu. Cette méthode de contrôle utilise initialement un régulateur qui détermine la tension de référence de l'onduleur (modulateur) en analysant l'écart entre la mesure du courant et sa référence. La tension de référence est ensuite comparée à un signal triangulaire qui établit la fréquence de commutation, qui est fixée à une fréquence élevée. La sortie du comparateur fournit la directive de commande aux commutateurs. Le schéma de principe est illustré à la figure (IV.5) [41]. Il est essentiel de noter que le signal triangulaire détermine la fréquence de commutation dans ce type de MLI.

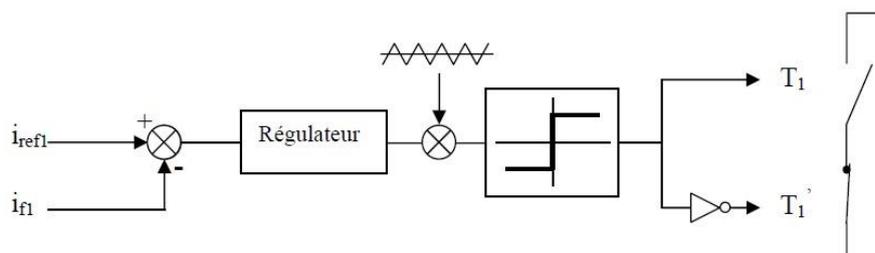


Fig. IV. 5.Principe de commande des courants par MLI.

IV.4.2.3. Commande par logique floue

En 1965, Zadeh a introduit le concept de Logique Floue, qui aide à gérer les informations imprécises et à formaliser leur représentation et leur traitement. L'objectif principal de l'utilisation d'un régulateur flou est d'améliorer les résultats par rapport aux régulateurs

traditionnels et d'améliorer la réponse du système. Ce type de processus implique une coopération humaine, et la stratégie de commande par logique floue est illustrée à la Figure IV.6.

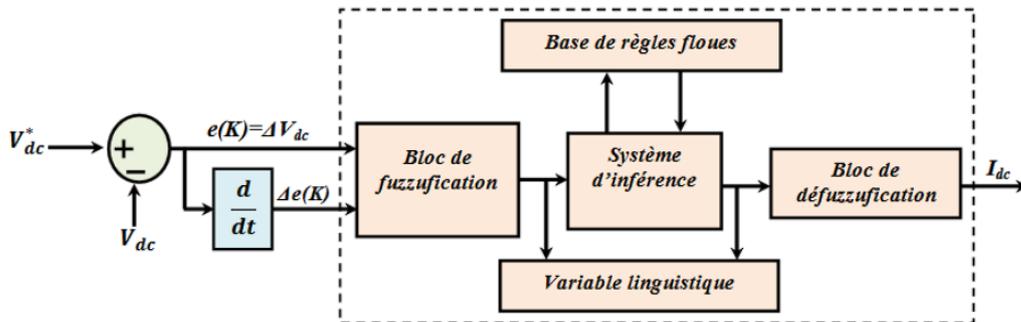


Fig. IV. 6. Schéma général d'un système floue

a. Interface de fuzzification

Le processus de fuzzification consiste à projeter des variables physiques réelles sur des ensembles flous qui représentent des valeurs linguistiques attribuées à ces variables. Le bloc responsable de la fuzzification entreprend les tâches suivantes [42] :

- La détermination des valeurs qui appartiennent aux fonctions d'appartenance est établie en définissant les plages sur la base des valeurs des variables d'entrée.
- Pour permettre le calcul, les données d'entrée doivent subir un processus de fuzzification qui les transforme en valeurs linguistiques pertinentes. Ces valeurs sont ensuite utilisées comme étiquettes pour les ensembles flous. Typiquement, cette opération a lieu dans un domaine normalisé, généralement l'intervalle de $[-1,1]$, pour assurer la facilité de calcul.

b. Base de règles

La liaison des variables floues d'entrée et de sortie est rendue possible par un ensemble de règles qui sont généralement structurées comme des instructions « if-then » ou « si-alors ». Ces règles peuvent être exprimées soit numériquement par des experts, soit par des termes et des variables linguistiques à travers des fonctions d'appartenance [43], et elles sont cruciales pour gouverner la relation entre les entrées et les sorties.

c. Mécanisme d'inférence floue

Pour faire simple, le principe de l'opération consiste à créer un lien entre les grandeurs d'entrée du contrôleur, qui s'expriment par des termes linguistiques, et la variable de sortie, qui est également sous une forme linguistique. Ceci est accompli en possédant une compréhension

experte du processus à réguler, ainsi qu'une compréhension complète du système à gérer. Les trois méthodes d'inférence les plus utilisées sont :

- Max-Produit.
- Somme-produit.
- Max-Min (Implication de Mamdani).

d. Interface de Défuzzification

Comme indiqué précédemment, le résultat des méthodes d'inférence est généralement une fonction d'appartenance. Inversement, la sortie produite par un contrôleur est généralement une valeur continue qui se situe dans un intervalle. La défuzzification est le processus qui permet d'établir une corrélation entre le résultat d'inférence et la quantité continue fournie en sortie [44].

De nombreuses techniques de défuzzification ont été créées et mises en œuvre. Parmi celles-ci, les méthodes les plus fréquemment utilisées sont :

i. Méthode du maximum

La sortie d'une commande est directement proportionnelle à la fonction d'appartenance maximale qu'elle possède, comme l'indique son nom.

L'approche consistant à utiliser la méthode du maximum est simple et efficace, mais elle présente certaines ambiguïtés et interruptions dans sa sortie. Parfois, deux valeurs maximales peuvent être détectées, provoquant une confusion.

ii. Méthode de la moyenne des maxima

La valeur de sortie est déterminée en calculant la moyenne de toutes les valeurs pour lesquelles la fonction d'appartenance, qui est dérivée de l'inférence, est à son maximum.

iii. Méthode du centre de gravité

La méthode de défuzzification la plus couramment utilisée est connue sous le nom de méthode du centre de gravité. Cette méthode fonctionne sur le principe du repérage de l'abscisse du centre de gravité, notée x^* , qui se situe sur la fonction d'appartenance issue de l'inférence de $\mu C(z)$. La sortie du régulateur est équivalente à cette abscisse, comme indiqué dans [1].

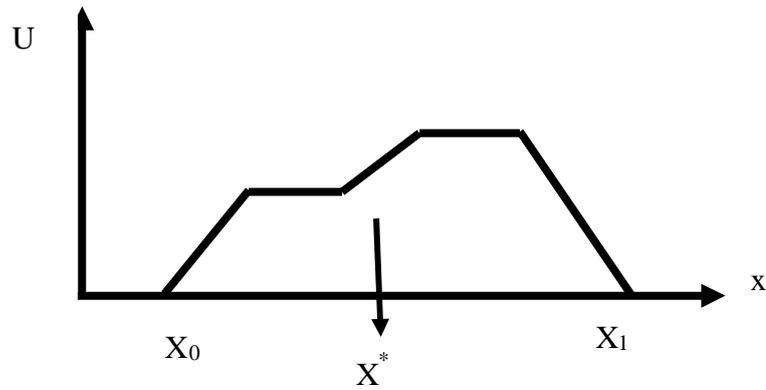
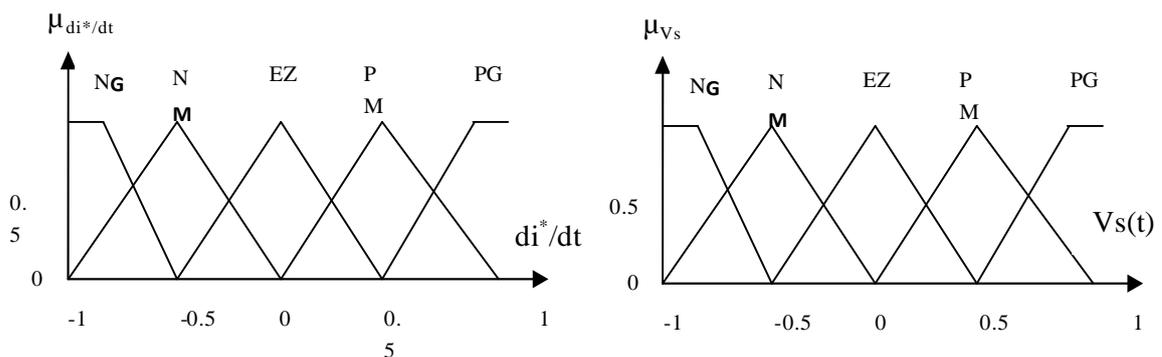


Fig. IV. 7. Défuzzification par centre de gravité.

IV.4.2.4. Commande par hystérésis à bande floue

La technique de modulation consiste à diminuer les écarts entre le courant généré par le filtre actif et les courants de référence tout en maintenant une fréquence constante. En implémentant les variables d'équation à l'aide de la logique floue, les performances du filtre actif peuvent être améliorées. Cette étude utilise la dérivée du courant de filtre injecté $\frac{di_c^*}{dt}$ et la tension de réseau $V_s(t)$ comme variables d'entrée, tandis que la bande d'hystérésis sert de variable de sortie. A noter que les fonctions d'appartenance de la variable de sortie correspondent aux sous-ensembles flous TPP : Très Petit Positif, PP : Petit Positif, PM : Moyen Positif, PG : Grand positif, TPG : Très Grand positif. Chaque variable d'entrée est transformée en une grandeur linguistique avec cinq sous-ensembles flous : PG : Grand Positif, PM : Positif Moyen, EZ : Environ Zéro, NM : Négatif Moyen, NG : Négatif Grand, comme le montre la figure (IV.8). Les règles de commande sont résumées dans la matrice d'inférence en tableau IV.1 [45]

Le principe de la commande hystérésis à bande floue est expliqué dans la figure (IV.8) :



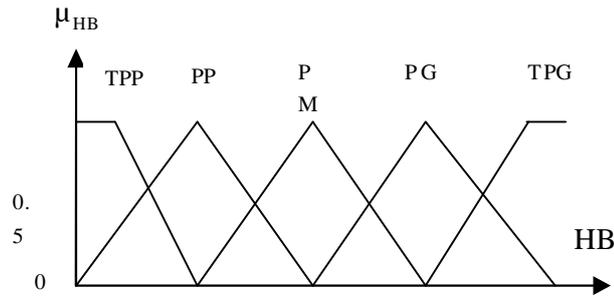


Fig. IV. 8. les fonction d'appartenance des variable.

$\frac{di^*}{dt}$ / $V_s(t)$	NG	NM	EZ	PM	PG
NG	PP	PP	PM	PP	PP
NM	PP	PM	PG	PM	PP
EZ	TPP	PM	TPG	PM	TPP
PM	PP	PM	PG	PM	PP
PG	PP	PP	PM	PP	PP

Table. IV. 2. Règles de la commande floue.

IV.4.2.5. Principe de la commande hystérésis à bande floue

Le principe de la commande hystérésis à bande floue est expliqué dans la figure (IV.9).

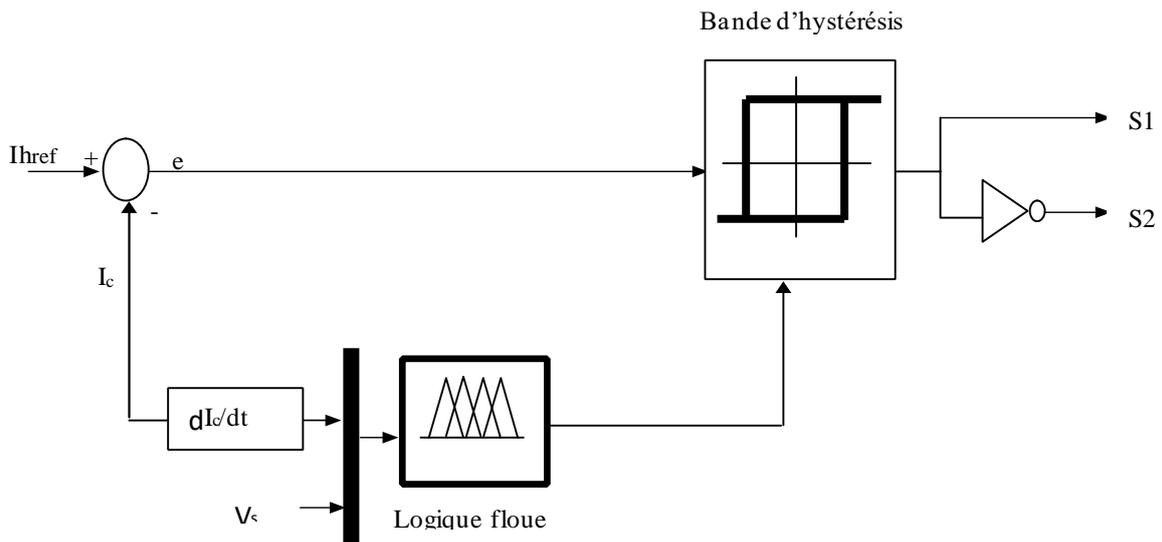


Fig. IV. 9. Principe de la Commande hystérésis à bande floue.

IV.5. Conclusion

L'objectif de ce chapitre a été de fournir un aperçu complet de la structure FAP triphasée, qui permet l'atténuation des harmoniques de courant dans un réseau électrique triphasé à trois fils. Notre discussion s'est centrée sur deux aspects principaux : les objectifs de filtrage actif parallèle et la puissance nominale optimale du FAP. Nous avons également approfondi le domaine des techniques de contrôle des onduleurs triphasés, en mettant particulièrement l'accent sur l'élucidation de diverses stratégies de contrôle des onduleurs.

CHAPITRE V

RESULTANTS DE SIMULATION

V.1. Introduction

Afin de valider l'étude théorique et évaluer les performances de notre système, ce chapitre est entièrement consacré à la simulation numérique du fonctionnement du filtre actif parallèle à l'aide du logiciel Matlab/Simulink.

Ainsi on a examiné l'effet de la charge polluante sur la forme de courant de source ainsi l'analyse spectrale des harmoniques. Par la suite, les trois stratégies des commandes (Hystérésis, MLI et Logique floue), appliquées dans ce travail pour le FAP, sont développées et analysées.

V.2. Description globale de la simulation

Le système à l'étude est décrit dans la Figure V.1, qui montre ses composants généraux. L'ensemble comprend un réseau triphasé, une charge en pont de Graëtz non linéaire qui comprend six diodes qui génèrent des pollutions harmoniques et un filtre actif parallèle.

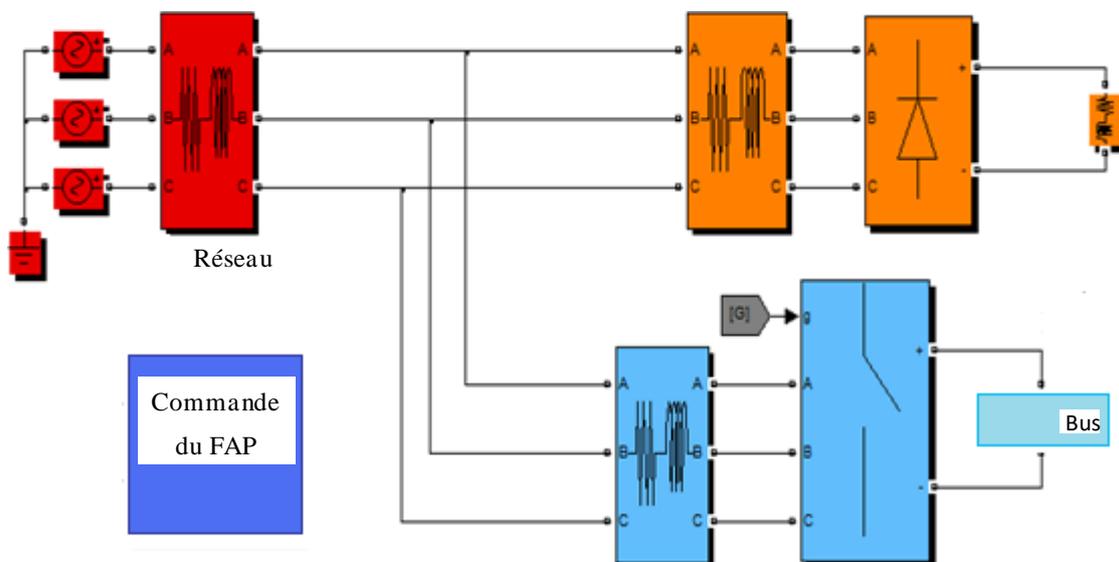


Fig. V. 1. Schéma globale du système étudié

V.3. Résultats de simulation de l'ensemble réseau - charge avant le filtrage

Dans un premier temps, notre approche a consisté à créer un modèle du réseau électrique triphasé à trois fils, suivi de sa simulation avec une charge non linéaire. Le filtre actif n'était pas intégré à ce modèle à ce stade.

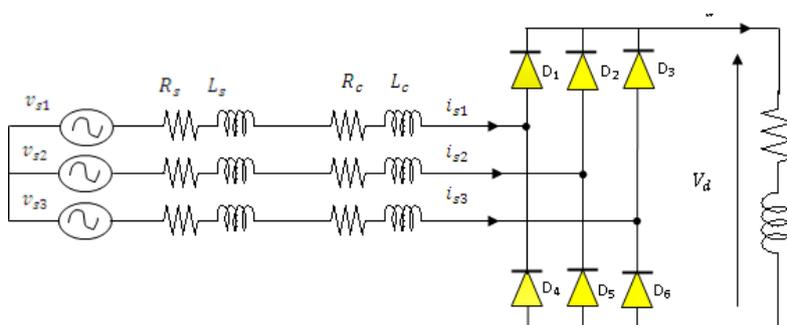


Fig. V. 2. Le système de puissance utilisé

Dans le tableau V.1, vous pouvez trouver une compilation complète des différents paramètres associés au réseau, au filtre actif parallèle et la charge non-linéaire utilisé dans la simulation.

Paramètre		Valeur numérique
Réseau électrique	E_s	50 v
	Fréquence f	50 Hz
	Résistance R_s	0.9 Ω
	Inductance L_s	16.58 mH
Charge perturbatrice	Résistance R_c	2.5 Ω
	Inductance L_c	0.5 h
Filtre actif parallèle	Résistance R_f	0.1 m Ω
	Inductance L_f	$L_f = 0.3$ mH
	Tension V_{dc}	130v

Tab. V. 1. Paramètres de simulation

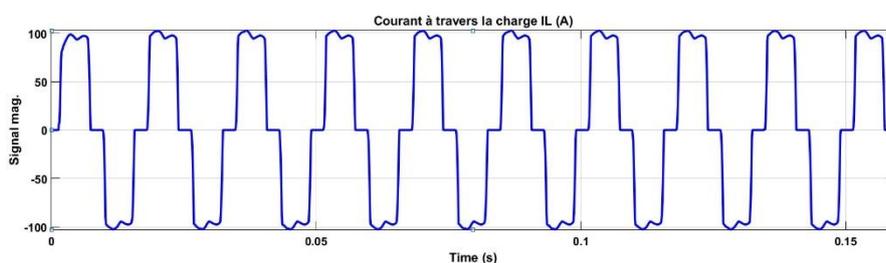
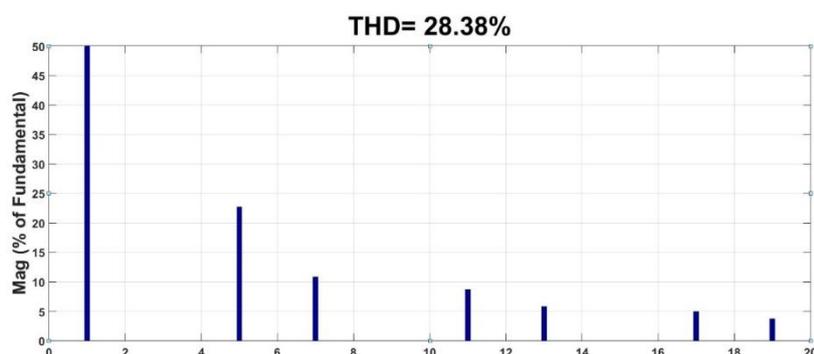

 Fig. V. 3. Courant de source I_s (A)


Fig. V. 4. analyse spectrale du courant de la source avant filtrage (THD = 28.38 %)

L'impact des harmoniques sur le courant de la source ressort de la figure V.3. La charge non linéaire introduit des harmoniques qui provoquent des distorsions dans le courant source. Au milieu de la demi-période, la distorsion du courant source est symétrique. Cette symétrie se traduit par l'absence d'harmoniques multiples de 2 et 3 dans son spectre. Au lieu de cela, seuls ceux d'ordre $(6h \pm 1)$ sont détectables. Le spectre du courant, qui affiche les 20 harmoniques les plus cruciales, corrobore cette affirmation, avec un THD de 28,38 %.

V.4. Application du Filtre actif parallèle

Les résultats de la simulation d'un système qui a été pollué par toute sa charge sont une indication claire des impacts négatifs de cette charge non linéaire sur la source d'alimentation. Par conséquent, il est essentiel de connecter un filtre actif en parallèle avec la charge non linéaire. Ce filtre doit être capable d'injecter un courant au point de connexion commun destiné aux utilisateurs du réseau.

V.5. Résultats de simulation de l'ensemble réseau - charge après le filtrage

V.5.1. Commande par hystérésis ($\Delta h = 0.1$)

Au début, le système fonctionne sans aucune filtration, ce qui donne des courants de source identiques aux courants de charge non linéaires. La charge est caractérisée par un spectre qui ne comprend que des harmoniques d'ordre impair qui ne sont pas des multiples de trois et un THD de 28,03 %, comme le montre la Figure V.4.

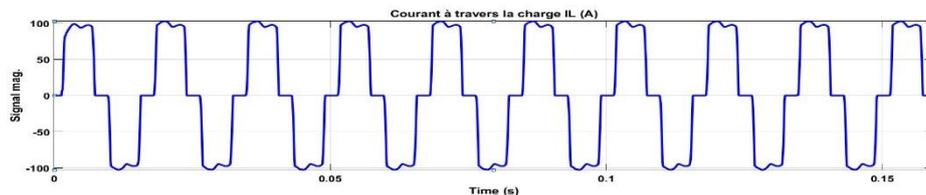


Fig. V. 5. Courant de charge I_L (A)

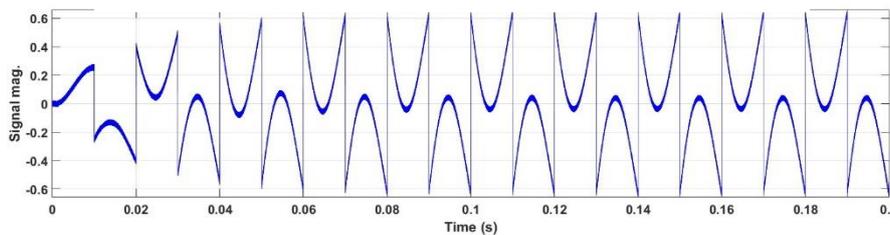


Fig. V. 6. Courant injecté par le filtre I_f (A)

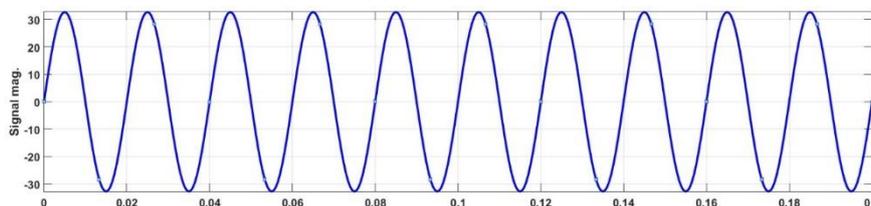


Fig. V. 7. Courant de source I_s (A)

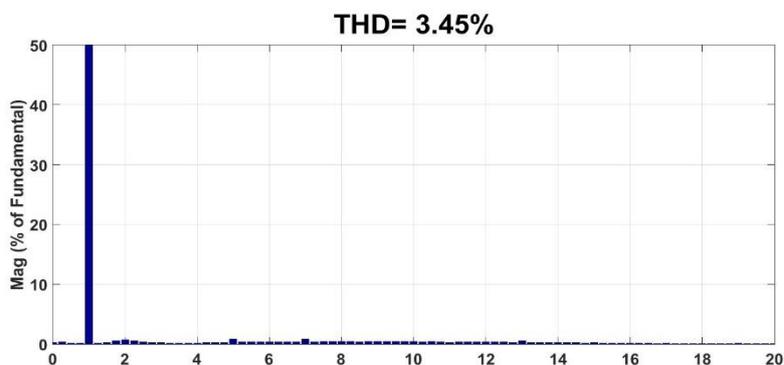


Fig. V. 8. analyse spectrale du courant de la source après filtrage (THD = 3.45 %)

V.5.2. Commande par MLI

L'utilisation de la commande MLI pour générer des signaux de commande FAP limite les résultats de la simulation à une représentation en régime permanent. En effet, dans notre observation, le comportement du FAP reste cohérent en termes de réponses transitoires, quelles que soient les techniques de modulation employées dans cette étude, qu'il s'agisse d'hystérésis ou de MLI.

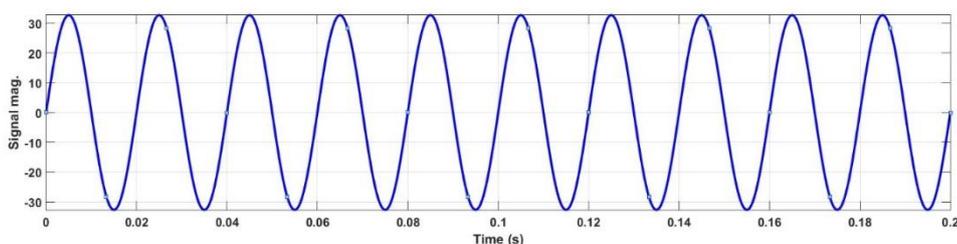


Fig. V. 9. Courant de source I_s (A)

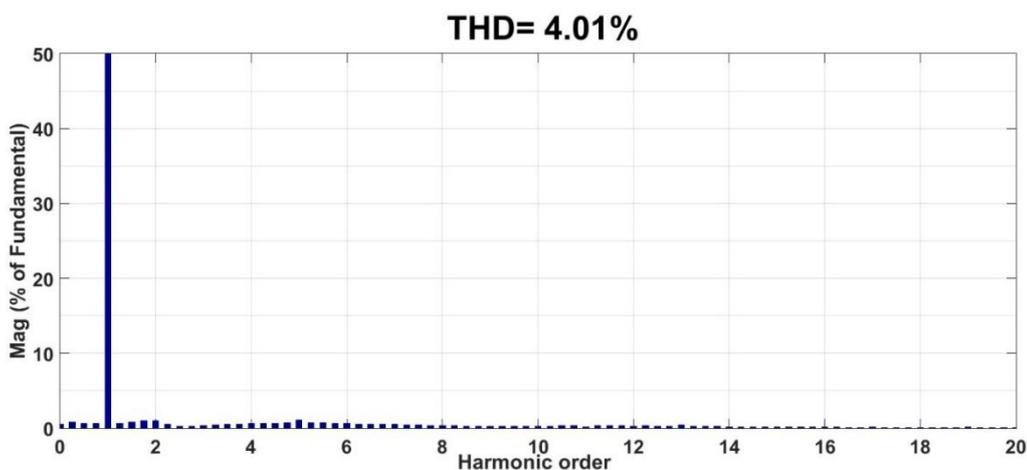


Fig. V. 10. analyse spectrale du courant de la source après filtrage (THD = 4.01 %)

Le résultat de cette observation révèle que le courant de la source acquiert une forme d'onde quasi sinusoïdale en raison de l'implication du FAP. Cependant, la distorsion harmonique totale (THD), estimée à 4,01 %, est relativement élevée par rapport au THD obtenu grâce au contrôle de l'hystérésis.

Il est important de garder à l'esprit que l'objectif principal du contrôle MLI est d'améliorer l'inconvénient majeur du contrôle de l'hystérésis en définissant la fréquence de commutation des semi-conducteurs.

V.5.3. La commande hystérésis à bande floue

Une application du filtrage actif, spécifiquement en relation avec des techniques intelligentes comme la logique floue, sera présentée ici pour donner un aperçu de l'intérêt croissant dans ce domaine.

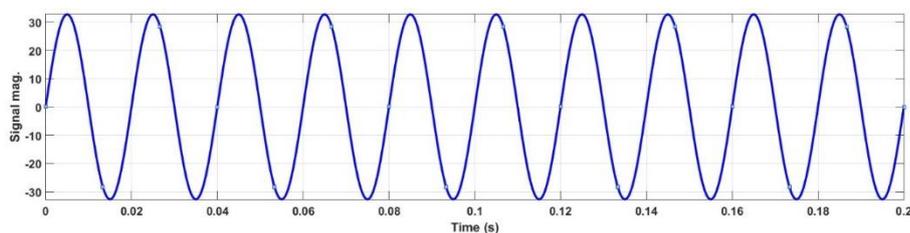


Fig. V. 11. Courant de source I_s (A)

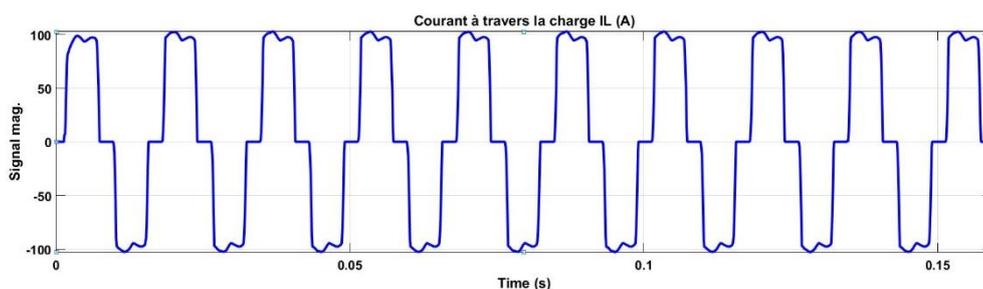


Fig. V. 12. Courant de charge I_L (A)

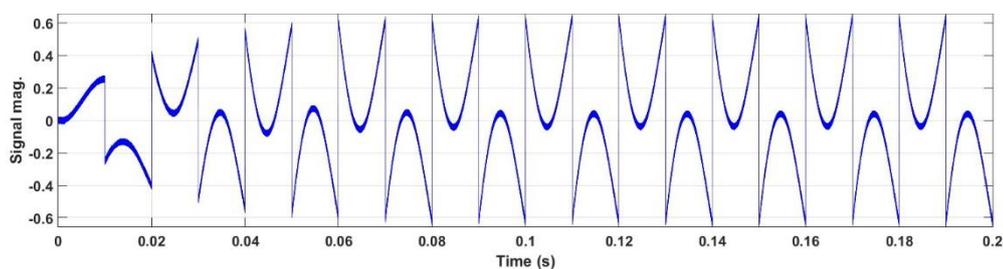


Fig. V. 13. Courant injecté par le filtre I_f (A)

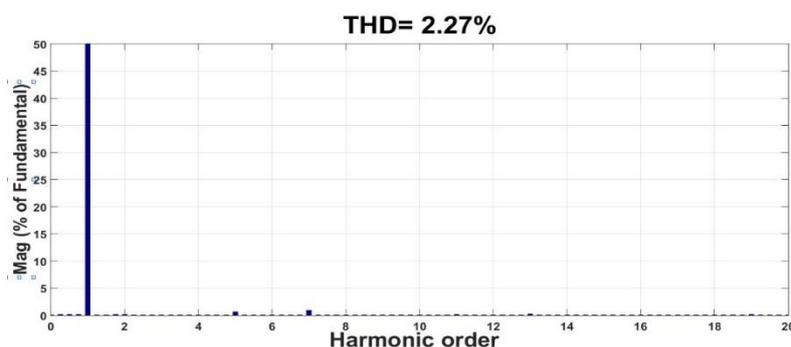


Fig. V. 14. analyse spectrale du courant de la source après filtrage (THD = 2.27 %)

L'intégration de la logique floue dans le filtrage actif implique le remplacement des correcteurs classiques (comme le régulateur PI du bus continue) par un correcteur flou. Cette substitution vise à fournir un contrôle flexible et à améliorer la dynamique du système.

Après avoir suivi le processus décrit à la figure IV.9 et programmé les sept règles floues citées au chapitre IV, le correcteur de flou est implémenté. Cette technique a donné des résultats positifs par rapport à la méthode de correction traditionnelle (classique), comme le montrent les figures V.8 et V.10. Dans la Figure V.14, le courant de source éliminé par le filtre actif flou est représenté. Ce courant se caractérise par une forme avec un $THDi$ sensiblement réduit de 2.27%

V.6. Interprétation

Les figures V (3, 4) illustre l'analyse temporelle de courant du réseau avant le filtrage (I_s) dans le cas de la compensation des courants harmoniques et sa analyse spectrale.

Les figures V (5, 6, 7) illustre l'analyse temporelle de courant de la charge (I_L), le courant injecté par le filtre (I_f) et le courant du réseau après le filtrage (I_s) par la commande Hystérésis dans le cas de la compensation des courants harmoniques.

Les figures V (9, 10) illustre l'analyse temporelle de courant du courant du réseau après le filtrage (I_s) par la commande MLI dans le cas de la compensation des courants harmoniques et sa analyse spectrale.

Les figures V (4, 8, 11) présente l'analyse spectrale du courant de source avant et après filtrage pour la compensation des courants harmoniques :

- Le THD du courant de source est de 28.38 % avant filtrage (Fig.V.4) et celle du réseau après compensation est de 3.45 % pour la command Hystérésis (Fig.V.8) et de 4.01% pour la command MLI (Fig.V.11) ce qui confirme la bonne qualité de filtrage remarquée dans les analyses temporelles.

Les figures V (11, 12, 13) illustre l'analyse temporelle de courant de source (I_s), le courant de la charge (I_L) et le courant injecté par le filtre (I_f) par la commande à Logique floue dans le cas de la compensation des courants harmoniques

Ce résultat à la fois important et intéressant est illustré par la valeur du THD qui est évalué à 4 % environ pour une commande classique, atteint les 2.27 % pour une commande à logique floue (Fig.V.14)

D'après les chiffres présentés dans les figures (V.8, V.11 et V.14), il est clair que :

- Une approche contemporaine pour éliminer les harmoniques de courant consiste à utiliser un filtre actif parallèle.
- On a observé que le déphasage avait une valeur nulle.

- Le contrôle de l'hystérésis de la bande floue a donné des résultats satisfaisants, légèrement supérieurs à ceux obtenus avec la technique MLI et l'hystérésis fixe.

V.7. Conclusion

Après une étude approfondie des topologies distinctes, des algorithmes de détection des grandeurs harmoniques de référence et des stratégies de contrôle et de régulation des filtres actifs parallèles (FAP) au chapitre III et IV, cette section se penche sur leurs applications pratiques et leurs simulations à l'aide de Matlab-Simulink. Les étapes suivantes décrivent le processus de simulation :

- Dans la première étape, nous afficherons la forme du courant dans son état non filtré à partir de la source, ainsi que son spectre harmonique qui transporte des données sur le $THDi$ (qui est calculé à 28,38%).
- Dans la deuxième étape, nous nous concentrons sur la simulation de la configuration parallèle qui utilise la régulation PI du bus continue. Nous présenterons ensuite les résultats obtenus à partir des différents circuits de contrôle, à savoir l'hystérésis de $THDi = 3.45\%$ et le MLI de $THDi = 4.01\%$.
- La troisième étape consiste à appliquer le même processus qu'à l'étape 2, mais cette fois pour le contrôle flou mis en œuvre sur le FAP ; le courant de source éliminé par le filtre actif flou est quasi sinusoïdale. Ce courant se caractérise par une forme avec un $THDi$ sensiblement réduit de 2.27%
- Après avoir interprété les résultats, l'étape suivante consiste à les synthétiser pour arriver à une conclusion. C'est l'étape 4 du processus.

CONCLUSION GENERALE

Les travaux présentés dans ce mémoire avaient pour but d'atteindre une meilleure compréhension de la perturbation harmonique et améliorer la qualité du courant source. La pollution harmonique est l'un des principaux obstacles qui impactent négativement la qualité de l'énergie électrique dans les réseaux de distribution. C'est une question complexe à prévoir et à réguler, en particulier en ce qui concerne le flux de courants harmoniques entre les charges et les lignes.

Pour atténuer l'impact néfaste des harmoniques, des techniques traditionnelles et des méthodes contemporaines telles que le filtrage actif peut être utilisées, cette dernière éliminant entièrement ces effets.

Notre travail s'articule autour de cinq chapitres dont le premier a été consacré à la présentation des différents types de perturbations qui peuvent polluer le réseau électrique et à la définition des harmoniques et ses origines et ses effets. Ainsi, les charges électriques raccordés au réseau électrique et la caractérisation des perturbations harmoniques induite par des charges non linéaires.

Dans le deuxième chapitre, nous nous sommes focalisés sur les stratégies de prévention des perturbations harmoniques. Ces stratégies sont divisées en deux : l'utilisation des appareils propres comme les transformateurs spéciaux où l'utilisation des dispositifs de filtrage interne et externe tel que : Filtre passif ; Filtre actif ; Filtre hybride.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude des stratégies d'extraction globale des courants harmoniques de références dans les deux domaines : domaine fréquentiels et domaine temporel, avec l'identification de méthode de la puissance instantanée ($p-q$) avec laquelle nous avons travaillé. Ainsi que l'algorithme d'identification basé sur le filtre Notch et la méthode de référentiel synchrone Park($d-q$).

Sur le quatrième chapitre, nous avons travaillé sur dimensionnement, fonctionnement et commande du filtre actif parallèle (FAP). On a montré l'objectif du filtrage actif parallèle et sa structure générale. La structure susmentionnée peut être séparée en deux composants distincts. Premièrement, il y a l'aspect puissance, qui comprend l'onduleur de tension à deux niveaux, la source de tension continue et le filtre de sortie, mieux connu sous le nom de filtre RL. Deuxièmement, il y a l'aspect contrôle, qui consiste à identifier le courant harmonique par la méthode de puissance instantanée et à réguler le courant qui est introduit dans le réseau.

Nos efforts ont abouti à trois stratégies de contrôle distinctes : contrôle d'hystérésis, contrôle MLI et contrôle d'hystérésis à bande floue, chacune visant à produire un courant de réseau avec un minimum d'harmoniques.

Finalement, dans le dernier chapitre on voit que l'utilisation de régulateurs flous fondés sur la logique floue a contribué à faciliter la recherche car ils sont plus résistants aux changements de paramètres. Le régulateur à logique floue améliore les résultats du régulateur proportionnel classique, abaissant le THD de 4 % à 2,27 % côté réseau. De plus, cette approche du contrôle ne nécessite pas de modèle mathématique. La technique d'intelligence artificielle connue sous le nom de logique floue n'exige pas d'informations précises sur le modèle ; au lieu de cela, cela dépend de l'expertise humaine.

Les résultats de la simulation sont finalement satisfaisants. Ceci peut être attribué à l'adaptabilité du filtrage actif parallèle, qui s'ajuste aux fluctuations de la charge. Cette adaptation se traduit par un réseau plus stable qui bénéficie d'un facteur de puissance unitaire.

Pour améliorer l'efficacité du système de contrôle basé sur la logique floue pour les filtres actifs parallèles, nous suggérons les perspectives suivantes :

La mise en œuvre effective de ce travail.

D'autres structures d'onduleur peuvent être utilisées comme les onduleurs deux niveaux afin d'améliorer les performances du filtre actif parallèle.

BIBLIOGRAPHIES

- [1] A. M. A. Edin, Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques, France: Thèse de doctorat en génie électrique Université Louis Pasteur ULP, 2002.
- [2] M. Fatiha, Commande robuste des conditionneurs actifs de puissance, France: Thèse de Doctorat en génie électrique, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, 2007.
- [3] A. L. d. H. Bermeo, Commande avancées des systèmes dédiés à l'amélioration de la qualité de l'énergie : de la basse tension à la moyenne tension, France: Thèse de doctorat en génie électrique, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2006.
- [4] O. A. Djaffar, Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : Application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension, France: Thèse de Doctorat en génie électrique, Université de Haute-Alsace, 2005.
- [5] Etxeberria-Otadui, Sur les Systèmes de l'Electronique de Puissance dédiés à la Distribution Electrique – Application à la Qualité de l'Energie, France: hèse de Doctorat de l'Institut Nationale Polytechnique de Grenoble, 2003.
- [6] I. S. 519-1992, IEEE recommended practices and requirements for harmonics Control in electrical power systems, New York - IEEE, United States: IEEE Industry Applications Society/Power Engineering Society, 1993.
- [7] J. L. J. S. C. Collombet, "Perturbation harmoniques dans les réseaux pollues et leur traitement," in *Schneider Electric*, Cahier Technique No. 152, 1999, p. Septembre.
- [8] A. CHAOUI, "FILTRAGE ACTIF TRIPHASE POUR CHARGES NON LINEAIRES," Thèse Doct. Université de Sétif et Université de Poitiers, France, 2010.
- [9] N. Bruyant, Etude et commande généralisées de filtres actifs parallèles, compensation global ou sélective des harmoniques, régime équilibré ou déséquilibré, France: Thèse de doctorat de l'université de Nantes, 1999.

- [10] J.S. Subjak Jr. and J.S. Mcquilkin, "Harmonic-causes, effects, measurements, Analysis: An update," *IEEE*, vol. vol 26, pp. pp.1034-1042, Nov. /Dec. 1990.
- [11] C. 61000-2-2, "Compatibilité électromagnétique (CEM)," – Partie 2: Environnement – Section 2: "Niveaux de compatibilité pour les perturbations conduites basse fréquence et la transmission de signaux sur les réseaux publics d'alimentation à basse tension, 1990.
- [12] P. Ferracci, "Cahier technique n°199 la qualité de l'énergie électrique, Revue Schneider Electric, 2011.
- [13] "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems," in *IEEE Std. 519-1992*, April, 1993, pp. pp.1-112.
- [14] S. S. W.M. Grady, « Understanding Power System Harmonics », *IEEE Power Engineering Review*, November 2001.
- [15] B. S., « Etude et mise au point d'un filtre actif d'harmoniques en vue d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique », Québec A Chicoutimi Canada: Mémoire Présente Comme Exigence Partielle De La Maîtrise En Ingénierie Université, 2006.
- [16] H. Djeghloud, « Réduction des harmoniques utilisant un filtre actif parallèle trois niveaux commandés en MLI », Constantine: Mémoire de magister, 2003.
- [17] ". D. S. D. R. D. Harmoniques", "Article tiré du site Internet:," [Online]. Available: www.jautomatise.com.
- [18] P. Nonnon, « Contribution à l'étude d'un Redresseur MLI à perturbations minimales du réseau », Thèse de Docteur Ingénieur de l'INPL de Nancy, 1991.
- [19] L. B., «Commande Directe de Puissance Basée sur le Flux Virtuel d'un Convertisseur AC/DC Triphasé sans Capteur de Tension », Thèse de magister EMP, 2007.
- [20] P. M. T. Deflandre, « Les harmoniques sur les réseaux électriques », France: Direction des Etude et Recherche en France -Edition EYROLLES, 1998.
- [21] N. W. J. Arrillaga, "POWER SYSTEM HARMONICS", Christchurch, New Zealand: University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, John Wiley & Sons,, 2003.

- [22] G. S. a. G. F. F.Z. Peng, "« A series LC filter for harmonic compensation of ac drives »,," *Power Electronics Specialists Conference, PESC 99.30th annual IEEE*, vol. Vol. 1, pp. pp. 213-218, 1999.
- [23] H. Sasaki and T. Machida, " « A New Method to Eliminate AC Harmonic Currents by Magnetic Compensation Consideration on Basic Design »,," *IEEE Trans. PAS*, vol. vol.90, pp. pp. 2009, no. 5, 1971.
- [24] Y. T. a. A. N. H. Akagi, "« Analysis and design of an active power filter using quad-series voltage source PWM converters »,," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. Vol. 26, no. No. 1, January/February 1990.
- [25] K. A.-H. a. A. C. B. Singh, "A Review of Active Filters for Power Quality Improvement," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. Vol. 46, pp. pp. 960-971, October 1999.
- [26] S. X. D. Chen, "« Review of the control strategies applied to active power filters," *IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies*, pp. pp. 666-670, April 2004.
- [27] H. Akagi, "New Trends in active Filters for Power Conditioning," *IEEE Trans. Ind. Appl*, vol. vol. 32, pp. pp. 1312-1322, Nov/Déc 1996.
- [28] G. S. e. R. B. F. Labrique, "Les Convertisseurs de l'Électronique de puissance," *Paris : Technique et Documentation-Lavoisier*, 1995.
- [29] D. A. F.Z. Peng, "Harmonic sources and filtering approaches-series/parallel active/passive, and their combined power filters," *Conference Record of the thirty-Fourth IAS IEEE Annual Meeting*, vol. Vol. 1, pp. pp. 448-455, 1999.
- [30] F.Z. Peng, "Application issues of active power filter," *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. vol. 4, pp. pp. 21-30, Sept.-Oct. 1998.
- [31] S. Mouttou, "Nouvelles approches de commande d'un filtre actif parallèle à source de courant," Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Trois-Rivières, Octobre 2002.
- [32] H. Djeghloud, "Le filtrage actif de puissance," Thèse de Doctorat de l'Université de Constantine département d'électrotechnique, Constantine, 2007.
- [33] H. F. a. H. Akagi, "The Unified Power Quality Conditioner: The Integration of Series and Shunt Active Filter," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. Vol. 13, no. No. 2, March 1998..

- [34] M. Abdusalam, "Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales," Thèse de Doctorat de l'Université de Henri Poincaré, Nancy-I, France, 2008.
- [35] L. Czarnecki, "On some misinterpretations of the instantaneous reactive power p-q theory," *IEEE Trans. on power electronics*, vol. vol. 19, no. n° 3, pp. pp: 828-836, 2004.
- [36] N. M. H. M. C. A. Quinn, "A four wire, current controlled converter provides harmonic neutralization in three-phase, four-wire systems," in *Proc. IEEE APEC'93*, pp. pp. 841-846, 1994.
- [37] Q. N. M. H. M. A. Conor, "A Four-Wire, Current-Controlled Converter Provides Harmonic Neutralization in Three Phase, Four-Wire Systems," *APEC'93*, pp. pp. 841-846, 1993.
- [38] D. D. S. Bhattacharya, "Synchronous frame based controller implementation for a hybrid series active filter system," in *Conf. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting*, pp. pp. 2531–2540,, 1995.
- [39] H. Akagi, "Modern active filters and traditional passive filters," *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, vol. Vol. 54, no. No. 3, pp. pp. 255-269, 2006.
- [40] S. G. Bhim Singh, A Zigzag Connected Auto-Transformer Based 24-Pulse AC-DC Converter, IEEE Transactions 2008.
- [41] M. T. Sid-Ahmed, "«Etude d'un système de compensation d'harmonique en utilisant un générateur photovoltaïque "GPV",» mémoire de Magister, Université M'Hamed Bougara de Boumerdes, 2008.
- [42] T. Belkacem, "Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable," mémoire de magister, université Batna, 2010.
- [43] M. Youcef, "Commande floue adaptative de la machine asynchrone," thèse de Doctorat, université d'Oran, 2012.
- [44] H. Chaouki, "Amélioration de la compensation active du courant harmonique par la commande MLI vectorielle," Thèse de master. Université de M'sila, M'sila, 2011/2012.

- [45] M. Tidjani, "Stratégies de Commande d'un Filtre Actif Parallèle à Quatre Fils," Thèse de magistère. CENTRE UNIVERSITAIRE D'EL-OUED, EL-OUED, 2012.
- [46] P. D. Z. G. J. L. Moràn, "Three-phase solid state voltage compensator system," vol. vol. 15, no. no. 1, pp. PP. 27-35, 1990.
- [47] H. Akagi, "Trends in active power line conditioners," *IEEE Trans. Power Electron*, vol. vol. 9, no. No. 3, p. pp. 263–268, May 1994.
- [48] H. Akagi, "Rec. European Conference on Power Electronics and Applications," in *The State-of-the-Art of Active Filters for Power Conditioning*, Dresden, September 2005, pp. pp. 1-15.
- [49] S. Hong-Scok, "Control scheme for PWM converter and phase angle estimation algorithm under voltage unbalanced and/or sag condition," Ph.D. in Electronic and Electrical Engineering Postech University, South KOREA., 2001.
- [50] A. S. N. a. S. S. L. Benchaitaa, "Comparative study of two structures of shunt active filter suppressing particular harmonics," *THE EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL APPLIED PHYSICS EDP Sciences GREEN-UHP*, France, 1998.
- [51] M. D. EPANYA, "Application du filtrage actif pour une mise en œuvre de méthode de production et de contrôle d'harmonique dans un réseau de distribution électrique," .Thèse Doct. Université de Québec, Canada, 2010.
- [52] S. S. e. A. S. N. L. Benchaita, "A comparison of voltage source and current source shunt active filter by simulation and experimentation," *IEEE trans. Power Systems*, vol. Vol. 14, pp. pp. 642-647,, Mai 1999.
- [53] M. S. a. H. T. Mikko Routimo, "Comparison of Voltage-Source and Current-Source Shunt Active Power Filters," *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, vol. VOL. 22, no. NO. 2, MARCH 2007.
- [54] M. F. R. a. C. Grantham, "A CURRENT SOURCE ACTIVE POWER FILTER WITH MINIMIZING NUMBER OF CURRENT SENSORS," *7th European Conference on Applied Superconductivity Journal of Physics: Conference Series 43 (2006) 913–916 University of New South Wales Australia*.
- [55] A. L. D. H. BERMEO, "Commandes avancées des systèmes dédiées à l'amélioration de la qualité de l'énergie : De la basse tension à la montée en tension.," Thèse Doct Université de Grenoble, 2006.

- [56] M. M. ABDUSALAM, "Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales," Thèse Doct. Université Henri Poincaré,, France, 2008.
- [57] L. Moussaoui, "Etude de la Commande de l'Ensemble Machine Asynchrone-Onduleur à Source de Courant," Thèse Doct. Université de Batna, Algérie, 2007.
- [58] L. M. a. A. Moussi, "Performances Assessment of Field Oriented Control and Torque Ripple Reduction for CSI-Fed Induction Motor with PWM Strategy's. 3ème Conf," Bordj El Bahri, Algérie, 15/16 Fev 2004, p. Abstract p. 12.
- [59] S. R.-. K. A.-H.-. F. Fnaiech, "A New Control Technique Based on the Instantaneous Active Current Applied to Shunt Hybrid Power Filters," IEEE, 2003.

ANNEXE

Paramètres de la source :

La tension simple : $V=50$ V et la fréquence : $f=50$ Hz

Paramètres du filtre actif :

$$R_f = 0.1 \text{ m}\Omega$$

$$L_f = 0.3 \text{ mH}$$

Paramètres de la charge :

$$R_c = 25 \text{ }\Omega$$

$$L_c = 0.5 \text{ H.}$$

Paramètres de l'onduleur :

$$V_{dc} = 130 \text{ V.}$$

$$C = 4.7\text{e-}3 \text{ F}$$

Paramètres du régulateur PI :

$$I = 17$$

$$P = 25$$