

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L' ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE UNIVERSITÉ DE MOHAMED BOUDIAF- M'SILA

FACULTÉ DE: TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT : GÉNIE ÉLECTRIQUE
N°=.....



DOMAIN :SCIENCES ET TECHNOLOGIE
FILIERE : ELECTROTCHNIQUE
OPTION : Réseau Électrique

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME MASTER EN GÉNIE ÉLECTRIQUE

THEME

Stratégies de compensation active sélectives et globale des courants harmoniques à base d'un filtre multi-variable

Proposé par :

Dr. HAMOUDA NOUREDDINE

Dr. ZORIG ASSAM

Présenté par :

BOUCHELALLEG MERIEM

MERBATET SAIF EDDINE

Soutenu le Juin/2023. Devant le jury composé de :

Mr. Messalti Sabir

Maitre de conférences

Président

Mr. Bedboudi Mohamed

Maitre de conférences

Rapporteur

Mr. Zorig Assam

Maitre de conférences

Examineur

اللَّهُمَّ صَلِّ وَسَلِّمْ وَبَارِكْ عَلَى سَيِّدِنَا مُحَمَّدٍ



Remerciements

Nous rendons nos profondes gratitudee à Dieu le tout puissant qui nous a aidés à réaliser ce travail.

Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à mon encadreur Dr : ZORIG ASSAM pour avoir d'abord

Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à mon encadreur Dr : HAMOUDA NOUREDDINE pour avoir d'abord

proposé ce thème, pour leur suivi continuel tout au long de la réalisation de ce mémoire et qui n'ont pas cessé de nous donner leurs conseils.

Nous remercions tous les membres du jury qui acceptent de juger notre travail et pour l'intérêt qu'ils l'ont porté.

Un grand merci à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation sans exception.





Dédicaces

Tous les mots ne peuvent pas exprimer la gratitude, l'amour, le respect, la reconnaissance à :

Je dédie ce travail :

Mes chers parents qui m'ont aidé à atteindre le niveau d'études actuel.

A mes sœurs et frères.

A toute ma famille.

A tous mes amis.

A mon encadreur qui m'a beaucoup aidé.



Résumé

Ce projet de master s'inscrit dans le cadre de dépollution harmonique des réseaux électriques basse tension à l'aide de compensateurs actifs de puissance, cette pollution harmonique est causée par l'utilisation illimitée des charges électrique non linéaire. Les causes, les effets de ces perturbations harmoniques et les normes internationales imposées présentés. Ainsi, les différentes solutions traditionnelles et modernes qui face ce problème sont présentés. On passe à présenter les méthodes d'identifications des courants harmoniques de référence à base d'un filtre multi-variable (FMV), ces courant harmoniques de références sont exploités pour contrôler le filtre actif parallèle (FAP), ensuite, on va implémenter la méthode des puissance active et réactive instantanée ($p-q$) modifiée sur un FAP afin de réaliser un filtrage actif globale des courants harmoniques sous différent régimes des tensions de réseau électrique, d'autre part, on va aborder deux techniques d'identifications sélective des courants harmonique à base d'un FMV, afin de réaliser une compensation active par action sélective des courants harmoniques spécifiques. Ce travail sera clôturé par une conclusion.

Mots clés : pollution harmonique, FAP, FMV, filtrage actif globale, filtrage actif sélectif.

Abstract

This master's project is part of the harmonic depollution of low voltage electrical networks using active power compensators, this harmonic pollution is caused by the unlimited use of non-linear electrical loads. The causes, effects of these harmonic disturbances and the imposed international standards presented. Thus, the various traditional and modern solutions to this problem are presented. We go on to present the methods of identification of harmonic currents of reference based on a multivariable filter (FMV), these harmonic currents of references are used to control the parallel active filter (FAP), then, we will implement the method of active and reactive instantaneous power ($p-q$) modified on a FAP in order to carry out a global active filtering of harmonic currents under different regimes of electric network voltages, on the other hand, two techniques of selective identification of harmonic currents based on an FMV, in order to achieve active compensation by selective action of specific harmonic currents. This Works Will close with a conclusion.

Key words : harmonic pollution, APF, MVF, global active filter, selective active filter.

ملخص

مشروع الماستر هذا هو جزء من التخلص التوافقي من الشبكات الكهربائية منخفضة الجهد باستخدام تعويضات الطاقة النشطة، وهذا التلوث التوافقي ناتج عن الاستخدام غير المحدود للأحمال الكهربائية غير الخطية. أسباب وأثار هذه الاضطرابات التوافقية والمعايير الدولية المفروضة المعروفة. وبالتالي، يتم تقديم الحلول التقليدية والحديثة المختلفة لهذه المشكلة. نواصل تقديم طرق تحديد التيارات المرجعية التوافقية بناءً على مرشح متعدد المتغيرات (FMV)، يتم استخدام هذه التيارات التوافقية من المراجع للتحكم في المرشح النشط الموازي (FAP)، إذن، سننفذ طريقة القوة الفورية النشطة والتفاعلية (p-q) تم تعديله على FAP من أجل إجراء ترشيح نشط عالمي للتيارات التوافقية في ظل أنظمة مختلفة من جهد الشبكة الكهربائية، من ناحية أخرى، تقنين لتحديد انتقائي للتيارات التوافقية على أساس FMV، من أجل تحقيق تعويض نشط عن طريق عمل انتقائي لتيارات توافقية محددة. سينتهي هذا العمل بنتيجة.

الكلمات الرئيسية: التلوث التوافقي، المرشح الفعال، مرشح متعدد التغيرات، تصفية انتقائية نشيطة، تصفية نشيطة كلية

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Perturbations Harmoniques dans les Systèmes Électriques et Moyens de Mitigation.....	5
I.1.Introduction.....	6
I.2. Définition des perturbations harmoniques	6
I.3. Classification des harmoniques	7
I.3.1. Les harmoniques dans un système triphasé.....	6
I.3.1.1. Harmoniques du système direct.....	8
I.3.1.2. Harmoniques du système inverse.....	8
I.3.1.3 Harmoniques du système homopolaire.....	8
I.3.2. Les harmoniques dans un system monophasé.....	8
I.3.2.1. Harmoniques du système direct.....	8
I.3.2. Les harmoniques dans un system monophasé	7
I.4. Charges électriques raccordés au réseau électrique.....	7
I.4.1. Charge électrique linéaire.....	7
I.4.2. Charge électrique non linéaire.....	8
I.5. Origine des harmoniques.....	8
I.6. Effets des perturbations harmoniques	9
I.6.1. Effets instantanés	9
I.6.2. Effets à long terme	9
I.7. Caractérisation des perturbations harmoniques	10
I.7.1. Valeurs efficaces de la tension et du courant	10
I.7.2. Puissances apparente, active, réactive et de distorsion.....	10
I.7.3. Facteur de puissance FP	11

I.7.4. Taux de distorsion harmonique THD	12
I.7.5. Normes imposées sur le taux de distorsion harmonique THD	13
I.8. Stratégies de préventions des perturbations harmoniques	16
I.8.1 Transformateurs de mise à la terre	15
I.8.2 Transformateurs déphaseurs.....	15
I.8.3. Utilisation des Filtre	16
I.8.3.1. Utilisation des Filtre passifs.....	18
I.8.3.2. Utilisation de Filtre actif parallèle.....	19
I.8.3.3. Utilisation de filtre actif série (FAS).....	19
I.8.3.4. Utilisation de conditionneur universel de la qualité d'onde.....	20
I.8.3.5. Utilisation de Filtres hybrides.....	21
I.9. Conclusion	19
Chapitre II : Filtrage actif parallèle monophasé par action globale à base d'un filtre multi-variable.....	22
II.1.Introduction.....	22
II.2. Principe du filtrage actif parallèle	22
II.3. Le système de puissance	23
II.4. Structure générale d'un FAP monophasé.....	25
II.4.1. Onduleur de tension monophasé.....	25
II.4.2. Commande par hystérésis	26
II.4.3. Elément passif de couplage au réseau.....	27
II.4.3. Régulateur proportionnel	28
II.4.4. Génération de courants harmonique de référence	29

II.4.4.1. Méthode de la puissance instantanée $p-q$ en monophasé.....	32
II.4.4.2. Filtre passe bande multi-variable (FMV).....	35
II.4.4.3. Modèle mathématique du FMV.....	35
II.5. Résultats de simulation	36
II.5.1. Performance du FMV avec tension de réseau distordue	40
II.5.2. Comportement du FAP monophasé en régime permanent.....	38
II.5.3. Fonctionnement du FAP monophasé avec tension de réseau distordue	40
II.5.4. Fonctionnement du FAP monophasé avec tension de réseau.....	42
II.5.4. Fonctionnement du FAP monophasé avec variation de la charge.....	43
II.5.5. Évaluation globale d'écoulement de puissance avec effet du FAP.....	44
II.6. Conclusion	50
Chapitre III.....	52
Chapitre III :Étude et analyse du fonctionnement d'un Filtre actif monophasé par action à base d'un FMV	48
III.1. Introduction	48
III.2. FAP sélectif monophasé à base de la technique des puissances $p-q$	48
III.3. FAP sélectif monophasé par la méthode $p-q$ classique.....	49
III.3.1. Identification d'un harmonique d'ordre inverse.....	49
III.3.2. Identification d'un harmonique direct.....	52
III.4. FAP sélectif monophasé par la méthode $p-q$ modifiée.....	54
III.4.1. Identification sélective des harmoniques direct et inverse par $p-q$ modifiée.....	63
III.5. Comparaison entre la méthode monophasé ($p-q$) classique et modifiée	59
III.6. Résultats de simulation.....	60
III.6.1. Filtrage actif sélectif du courant harmonique d'ordre 3 th	60

III.6.2.FAP sélectif du 3 th sous tension de distordue avec la méthode <i>p q</i> classique	70
III.6.3.FAP sélectif du 3 th sous tension de distordue avec la méthode <i>pq</i> modifie.....	72
III.6.4.FAP sélectif du 3 th avec charge capacitive.....	75
III.6.5.FAP sélectif du courant harmonique 5 th avec charge inductive	67
III.6.6.Filtrage actif sélectif simultanée des harmoniques d'ordre 3 th , 5 th et 7 th	69
III.7.Conclusion.....	84
Conclusion générale.....	86

Liste des Figure :

Chapitre I : Perturbations Harmoniques dans les Systèmes Électriques et Moyens de Mitigation.

Figure (I-1) : Décomposition d'un signal périodique.....	6
Figure (I-2) : Formes d'ondes de la tension et courant absorbé par une charge résistive.....	7
Figure (I-3) : Pont redresseur à diode débite sur une charge inductive-capacitive.....	8
Figure (I-4) : Forme d'onde du courant de réseau par l'effet de la charge polluante.....	8
Figure (I-5): Représentation vectorielle de la puissance apparente.....	11
Figure (I-6) : Transformateur de mise à la terre.....	15
Figure (I-7) : Utilisation des transformateurs déphaseurs pour supprimer l'harmonique 5 et 7.....	16
Figure (I-8) : Structure du filtre passif parallèle résonant.....	17
Figure(I-9) : Structure du filtre actif parallèle monophasé.....	18
Figure (I-10) : Structure du filtre actif série.....	18
Figure(I-11): Structure du conditionneur universel de la qualité d'onde 'UPQC'	19
Figure (I-12) : Association du filtre actif parallèle avec filtre passif.....	19

Chapitre II : Filtrage actif parallèle monophasé par action globale à base d'un filtre multi-variable

Figure (II-1): Structure et principe du FAP monophasé.....	23
Figure(II-2): Système de puissance utilisé.....	24
Figure (II-3) : Formes d'ondes du délivré par la charge non linéaire monophasé courant.....	24
Figure (II-4) :Structures et montage d'un l'onduleur monophasé.....	26
Figure (II-5) : Structures de commutations de l'onduleur monophasé de source tension.....	26
Figure (II-6) : Principe de commande des courants par hystérésis.....	27
Figure (II-7) : Schéma illustratif du filtre passif de couplage.....	27
Figure (II-8) : Schéma fonctionnel de la régulation de V dc avec le régulateur proportionnel.....	28
Figure (II-9) : Les formes d'ondes de la tension et du courant.....	31
Figure (II-10) : Diagramme d'identification par la méthode p q classique en monophasé.....	32
Figure (II-11) : (a, b) Diagramme de Bode du FMV.....	34
Figure(II-12) : Structure du FMV.....	35
Figure (II-13) : Diagramme d'identification globale en monophasé des harmoniques de référence par la méthode p q modifiée.....	36
Figure (II-14): Block de simulation du FAP monophasé.....	37
Figure (II-15) : (a, b). Tension de source sur l'axe (α - β) en présence et absence du FMV.....	38
Figure(II-16) : Effet du filtrage actif en régime permanent.....	39
Figure (II-17) : (a ,b ,c) Spectres harmonique du courts ich, is et if.....	40
Figure(II-18):impact de la tension du réseaux FAP monophasé.....	40
Figure (II-19) : (a,b). Spectres harmonique de vs et is.....	41
Figure (II-20) : Impact de méthode p q modifié sur qualité de filtrage du FAP.....	42
Figure (II-21) : Spectres harmonique du is avec vs distordue : (a) avec p q (b) avec p q modifié.....	42
Figure(II-22) : Impact de la charge capacitive sur la dynamique du FAP monophasé.....	42
Figure (II-23) : (a ,b). Spectres harmonique du courant de source is avant et après le filtrage.....	43
Figure (II-24) : Dynamique du FAP avec variation brusque de la charge.....	44
Figure (II-25) :Évaluation total de l'écoulement de puissance active et réactive en présence du FAP..	45

Chapitre III : Étude et analyse du fonctionnement d'un Filtre actif monophasé par action à base d'un FMV

Figure (III- 1) : Transformation du spectre du courant de la charge vers le system de puissance.....	51
Figure(III-1) : Spectre du courant de charge et des puissances instantanées p_3 q_3	51
Figure (III-1) : Transformation du spectre du courant de la charge vers le system de puissance.....	53
Figure(III-1) : Spectre du courant de charge et des puissances instantanées p_5 q_5	53
Figure (III-1) : Identification simultanée des courant harmonique 3th et 5th par p q classique.....	54
Figure (III-1) : (a, b) Diagramme de Bode pour les harmoniques d'ordre 3th, 4th et 5th.....	56
Figure (III-1) : Transformation du spectre du courant de la charge vers le system de puissance.....	57
Figure(III-1) : Système de puissance utilisé.....	57
Figure(III-1) : Extraction de 3th harmoniques dans l'espace p q par FMV.....	58
Figure (III-1) : Extraction de 5th harmoniques dans l'espace p q par FMV.....	58
Figure (III-1) : Structure et principe du FAP monophasé.....	59
Figure (III-1): Filtrage sélectif du courant harmonique d'ordre 3th.....	61
Figure(III-1) : (a, b, c). Spectres harmonique du courant i_{ch} , i_s et i_f	62
Figure (III-1) : FP et THD du courant de source après le filtrage d'harmonique d'ordre 3th.....	62
Figure (III-1) : Puissance active et réactive relative à l'harmonique d'ordre 3th.....	63
Figure (III-1) : Effet du v_s distordue sur la qualité du filtrage avec pq classique.....	64
Figure (III-1) : (a, b, c). Spectres harmonique du v_s , i_{ch} , i_s et i_f	64
Figure (III-1) : (a, b). Impact du p q modifie sur la qualité du filtrage avec v_s distordue.....	65
Figure(III-1) : (a, b). Spectres harmonique du i_{ch} et i_s	66
Figure(III-1) : (a,b). Spectres harmonique du courant de source avant et après le filtrage.....	66
Figure(III-1) : FAP sélectif avec charge frottement capacitive.....	67
Figure (III-1) : (a,b,c). Spectres harmonique du courant de source avant et après le FA du 5th.....	68
Figure (III-1) : FAP sélectif du courant harmonique d'ordre 5th.....	68
Figure(III-1) : FAP sélectif simultanée des harmoniques 3th et 5th avec charge inductive.....	70

Figure (III-1) : FAP sélectif simultanée des harmoniques 3th et 5th avec charge capacitive.....	70
Figure (III-1) : Puissance active et réactive relative à l'harmonique d'ordre 3th et 5th.....	71
Figure (III-1) : FAP sélectif simultanée des harmoniques 3th, 5th et 7th avec charge inductive.....	71
Figure (III-1) :FP,THD et $\cos \varphi$ après filtrage simultanée des courants harmonique 3th, 5th et 7th...	72
Figure (III-1) : Spectres harmonique de i_{ch} , i_s , et i_f après le filtrage simultané des courants 3th, 5th et 7th.....	72

Liste des Tableaux :

TABLEAU (I-1) : LIMITES DES TENSIONS ET COURANT HARMONIQUES SELON IEEE-519	13
TABLEAU (I-2) : LIMITES D'ÉMISSION DE COURANTS HARMONIQUES DES APPAREILS BASSE TENSION	14
TABLEAU (I-3) : LIMITATION DES ÉMISSIONS DE COURANTS HARMONIQUES (CEI 61000-3-4)	14
TABLEAU (II-1): PARAMÈTRES DU SYSTÈME DE FILTRAGE ACTIF PARALLÈLE À SIMULÉ.....	37
TABLEAU (III-1): COMPARAISON ENTRE LA MÉTHODE (P-Q) CLASSIQUE ET MODIFIÉ	59
TABLEAU (III-2) : TAUX D'ATTÉNUATIONS APRÈS LE FILTRAGE DU COURANT L'HARMONIQUE 3TH	60
TABLEAU(III- 3) : TAUX D'ATTÉNUATIONS APRÈS LE FILTRAGE DE 3TH AVEC VS DISTORDUE	63
TABLEAU (III-4) : TAUX D'ATTÉNUATIONS APRÈS LE FILTRAGE DE 3TH AVEC VS DISTORDUE.....	66
TABLEAU (III-5): TAUX D'ATTÉNUATIONS APRÈS LE FILTRAGE DE 3TH AVEC CHARGE CAPACITIVE	67
TABLEAU (III-6) : TAUX D'ATTÉNUATIONS APRÈS LE FILTRAGE DE 5TH.....	69

Liste des symboles et abréviations

P	Puissance active
Q	Puissance réactive
S	Puissance apparente
D	Puissance déformante
\bar{p}	Puissance active continue
\bar{q}	Puissance réactive continue
\tilde{p}	Puissance active alternative
\tilde{q}	Puissance réactive alternative
F	Facteur de puissance
I_{ch}	Courant de la charge

I_s Courant de la source

V_s Tension de la source

I_f Courant du Filtre

V_f Tension du filtre

V_s Tension efficace Courant efficace

ξ Coefficient d'amortissement

τ Constante de temps

Ω Pulsation du réseau

ω_c Pulsation de coupure

f_c Fréquence de coupure

V_{ac} Tension continue du bus continu

C_{ac} Capacité de stockage

QVAR La puissance réactive de compensation

Notations

CEI : Commission Électrotechnique International

CEM . compatibilité électromagnétique

FMV :filtre multi-variable

MLI : modulation de largeur d'impulsion

P q : méthode de la puissance instantanée

F_p : facteur de puissance

FPH :Filtre passe haut

FPP : Filtre passe bas

THD_i : distorsion harmonique individuelle

THD_T : taux de distorsion harmonique

FAP : filtre actif parallèle

FAS : filtre actif série

PI : Régulateur proportionnel intégral

K_p: Gain proportionnel

K_I: Gain intégral

IEEE : Institute of Electrical and Electronic Engineers

Introduction générale

Introduction générale

Durant les trois dernières décennies, on a constaté une croissante utilisation des dispositifs d'électronique de puissance, dans les systèmes électriques monophasés et triphasés, afin de satisfaire les besoins de plus en plus exigeantes des abonnés. Ceci a entraîné des problèmes liés aux perturbations ou distorsions harmoniques des réseaux électriques de plus en plus polluantes.

Ce phénomène touche l'ensemble des secteurs industriels (utilisation de gradateurs, de redresseurs, de variateurs de vitesse,...etc.), tertiaire (informatique ou éclairage des bureaux, commerce,...etc.) et domestique (téléviseurs, appareils électroménagers grand public,...etc.). La distorsion harmonique est générée par les charges non linéaires connectées au réseau monophasé qui absorbent un courant non sinusoïdal. Ces harmoniques de courant vont à leur tour générer des tensions harmoniques aux différents points de connexion au réseau. Pour les autres équipements électriques connectés en ces points, cette pollution harmonique a des nocifs effets.

Parmi ces derniers, on peut notamment citer la déformation de la tension du réseau au point de raccordement alors que le distributeur d'énergie est tenu de fournir une tension de qualité ou propre. Cette pollution peut également conduire à un échauffement supplémentaire des câbles et des équipements électriques ou bien encore à l'arrêt soudain de machines tournantes, voire la destruction totale de tous ces équipements. Pour diminuer ou supprimer ces perturbations et ainsi améliorer la qualité de l'énergie distribuée, plusieurs solutions existent [1-2] :

- ✓ Réduction de l'impédance de court-circuit.
- ✓ Modification du convertisseur statique polluant en termes de la topologie et/ou de la commande afin d'intervenir directement à la source des perturbations harmoniques.
- ✓ Dispositifs de filtrage.

L'utilisation des dispositifs de filtrage tels que les filtres passifs dits résonnants et/ou amortis peut ainsi empêcher les courants harmoniques de se propager dans les réseaux électriques. Ils peuvent également être utilisés pour compenser la puissance réactive. Cependant, le filtrage passif pose certains problèmes [1] :

1. Non adaptabilité lors de la variation de l'impédance du réseau.
2. Non adaptabilité de la variation de la charge.

3. Risque de résonance possible avec l'impédance du réseau.
4. Encombrement dans le réseau.

Ainsi, cette solution présente un inconvénient majeur qui peut être intolérable dans des particulières circonstances.

Afin d'éviter les inconvénients du filtrage passif, une autre solution est développée, dite filtrage actif. Cette dernière existe sous plusieurs versions (parallèle ou série). Une première solution consiste à connecter le filtre actif en parallèle avec le système polluant, aussi il injecte au réseau un courant de même amplitude que celle du courant harmonique à éliminer, mais en opposition de phase. Comme la plupart des travaux de recherche des chercheurs dans le domaine sont basé sur filtrage actif parallèle triphasé, notre travail est accentue sur le filtrage actif triphasé monophasé d'une part, et d'autre part, il est important de noter que les performances d'un filtre actif parallèle monophasé sont étroitement liées à l'algorithme utilisé pour déterminer les courants harmoniques de références, ainsi qu'à la méthode utilisée pour la poursuite de ces références pour réaliser la tâche de filtrage des courant harmonique que se soit par action global ou par action sélective.

Afin d'étudier le filtre actif monophasé filtres et le filtrage actifs, ce mémoire est structuré comme suit :

Un premier chapitre dédié aux définitions du concept 'harmoniques', à l'énumération des nombreux effets néfastes qu'ils engendrent et les normes imposées sur la *THD* des grandeurs électriques, ainsi les causes des harmoniques d'un part, et d'autre part à l'exposition des différentes solutions traditionnelles et modernes proposées pour réduire les conséquences nuisibles des harmoniques.

Le deuxième chapitre a été consacré au filtrage actif parallèle monophasé (pour filtrer les courants harmoniques de manière globale). Après une présentation du principe de fonctionnement, nous avons abordé, avec plus ou moins de détail, ses composants essentiels. Deux méthodes de générations des références harmoniques par la méthode des puissances instantanée seront présentés et discutés, techniques de commande de l'onduleur (la commande par hystérésis. Les résultats de simulation tenant compte des ont été présentés et interprétés.

Un Troisième chapitre traite le fonctionnement du filtre actif monophasé en vue d'une compensation sélective de certains rangs harmoniques spécifiques. Le principe d'identification sélective des courant harmoniques de références, à base de la méthode de puissance instantanée active et réactive pq sera présenté dans la version classique et dans la version modifiée (couplée avec un filtre multi variable hautement sélectif), seront présenter clairement. L'avantage de technique $p q$ modifiée est apparu en la compare avec sa version classique, elle sera valider par voie de simulation (avec tension de réseau sinusoïdale et distordue).

Enfin, on termine par des conclusions générales et perspectives .

Chapitre I

*Perturbations Harmoniques dans les Systèmes
Électriques et Moyens de Mitigation*

Chapitre I : Perturbations Harmoniques dans les Systèmes Électriques et Moyens de Mitigation.

I.1.Introduction

L'objectif d'un système électrique de puissance est de fournir une énergie propre pour un large nombre de consommateurs. Dans le cas idéal, cette électricité doit être fournie sous forme d'une parfaite tension sinusoïdale ayant une amplitude et une fréquence constantes. En pratique, l'opération de l'approvisionnement du système et l'usage de ce dernier par les consommateurs, induit plusieurs déviations vis-à-vis l'idéal. La plus influente déviation est la distorsion des formes d'ondes. Contenir celle-ci dans des proportions acceptables est devenue la principale préoccupation des ingénieurs électriciens. Mais ce problème a eu une nouvelle importance avec la disponibilité des équipements électroniques de puissance.

Dans ce chapitre, des notions élémentaires d'analyse harmonique, les origines et les conséquences de la pollution harmonique sont exposés. Ensuite, les normes et la réglementation en vigueur seront présentées aussi, les différents remèdes pour balayer les problèmes des harmoniques sont exposés à fin d'assurer une compensation totale ou sélective de cette pollution harmonique et de récupérer la forme d'onde sinusoïdale des courants/tensions du réseau.

I.2. Définition des perturbations harmoniques

Les harmoniques sont des tensions ou courants sinusoïdaux dont la fréquence est un multiple entier de la fréquence du réseau (fondamentale), La distorsion harmonique est une forme de pollution du réseau électrique, susceptible de poser des problèmes si la somme des courants harmoniques est supérieure à certaines valeurs limites [3-4]. En général, les harmoniques pris en compte dans un réseau électrique sont supérieurs à 100 HZ et inférieur à 2500 HZ, c'est-à-dire des rangs 2 à 50.

La décomposition en série de Fourier d'un signal périodique (non sinusoïdale) de fréquence $f=50\text{Hz}$, peut être représentée, selon la décomposition harmonique sous la forme d'une somme de fonction composée (Figure. I.1) :

- d'un terme sinusoïdal à la fréquence $f_1=50\text{Hz}$ de valeur efficace. Ce terme est appelé fondamental.

- des termes sinusoïdaux dont les fréquences sont égales à n fois la fréquence du fondamental ($f_h = n f_1$) et de valeurs efficaces. Ces fréquences multiples du fondamental sont appelées harmoniques.
- d'une éventuelle composante continue d'amplitude.

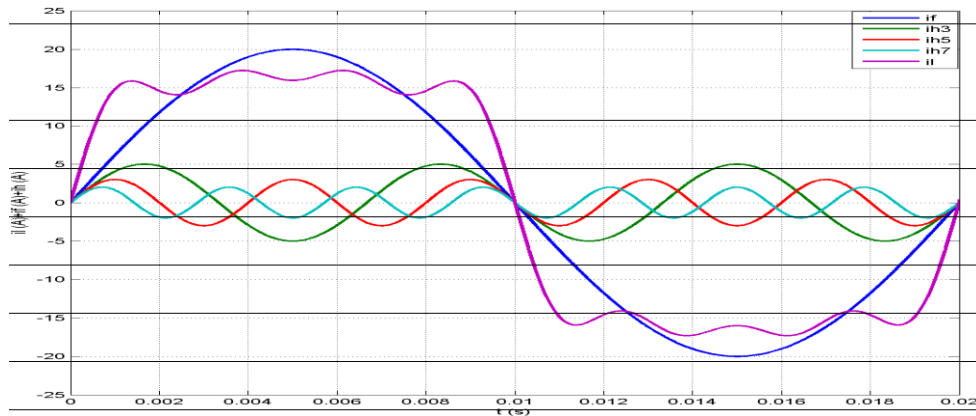


Figure (I-1) : Décomposition d'un signal périodique

I.3. Classification des harmoniques

Les harmoniques sont généralement classées par leurs noms, leurs fréquences et leurs séquences de propagations, de plus, la classification des harmoniques selon le type de réseau électrique soit monophasée et soit triphasé.

I.3.1. Les harmoniques dans un système triphasé

Système triphasé équilibré non sinusoïdal est la superposition de trois systèmes triphasés équilibrés sinusoïdaux, direct, inverse et homopolaire [1]-[5] :

I.3.1.1. Harmoniques du système direct

Le système directe comporte le fondamentale (50Hz) et les harmoniques de rang impair égal à $6k+1$, soit 7, 13, 19, 25,...etc. Ces harmoniques se propagent dans la même direction du fondamentale, Généralement, ces harmoniques de séquence positive ne sont pas souhaitables, car elles sont responsables de la surchauffe des conducteurs, des lignes de puissance et des transformateurs en raison de l'addition des formes d'onde.

I.3.1.2. Harmoniques du système inverse

Le système inverse dus aux harmoniques de rang impair égal à $6k-1$, soit 5, 11, 17, 23,..., ces harmoniques se propagent dans le sens opposé de la direction de rotation du fondamentale, tendent à diminuer l'amplitude de la tension et du courant. Ils circulent entre

les phases, créant des problèmes supplémentaires avec les moteurs électriques.

I.3.1.3 Harmoniques du système homopolaire

Ce système contient autre ensemble d'harmoniques spéciales appelées "Triplens" (multiple de trois) d'ordre impair égal à $3k$ (3, 9, 15, 21,...etc.). Ils ont des séquences de rotation nulle. D'où leur nom, et sont donc déplacés de zéro degré. Ces harmoniques circulent entre la phase et le neutre ou la masse et ne s'annulent pas. Au lieu de cela s'ajoutent arithmétiquement dans le fil neutre commun qui est soumis aux courants des trois phases.

I.3.2. Les harmoniques dans un system monophasé

Un système monophasé distordu est la superposition de deux systèmes monophasés sinusoïdaux directe et inverse

I.3.2.1. Harmoniques du système direct

Le système direct en monophasé comporte le fondamental les harmoniques de rang impair égal à $4k+1$, soit 5, 9, 13, 17,21. Avec $k=1.....n$

I.3.2.1. Harmoniques du système inverse

Le système harmonique inverse comporte les harmoniques de rang impair égal à $4k-1$, soit 3, 7, 11,15.19. 25, avec $k=2.....n$

I.4. Charges électriques raccordés au réseau électrique

I.4.1. Charge électrique linéaire

Une charge est dite linéaire, lorsqu'elle alimenté par une source de tension sinusoïdale, elle absorbe un courant sinusoïdale, à titre d'exemple des charge non linéaire les résistances, inductance...etc. Les formes d'ondes de la tension de source et du courant absorbé par une charge linéaire (résistance) sont représentées sur la Figure. I.2.

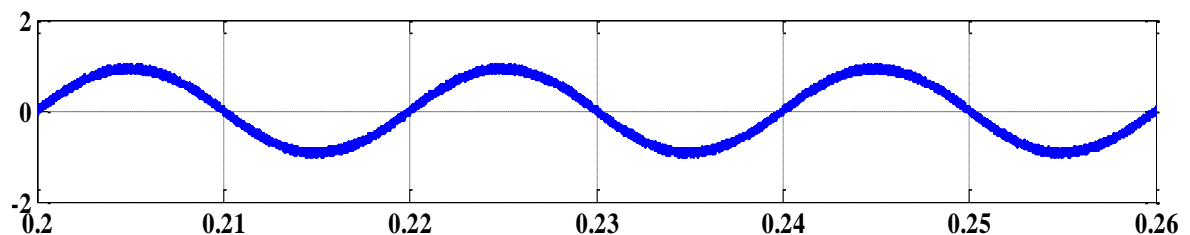


Figure (I-2) : Formes d'ondes de la tension et courant absorbé par une charge résistive

I.4.2. Charge électrique non linéaire

Une charge est dite non linéaire lorsque le courant qu'elle absorbe n'a pas la même forme que la tension qui l'alimente [6]-[7]. Cette classe de charges englobe les convertisseurs statiques (gradateurs, redresseurs...etc.), les circuits magnétiques saturés, les lampes, ...etc. La Figure. I.3 présente la structure d'une charge non linéaire représentée par un pont à diode débité sur une charge mixte (inductive, résistive et capacitive), et alimenté par un réseau monophasé.

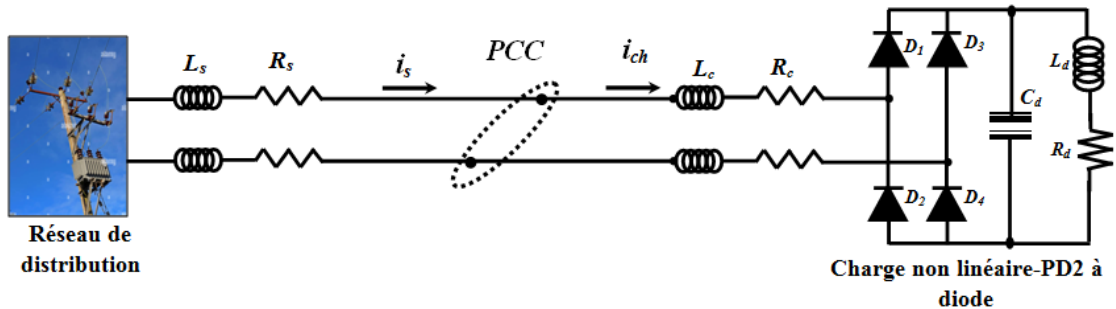


Figure (I-3) : Pont redresseur à diode débite sur une charge inductive-capacitive

Le courant délivré par la source aura, dans ce montage, une forme carrée qui est riche par des harmoniques d'ordre $(4k \pm 1)$ [7], est montré dans la Figure. I.4.

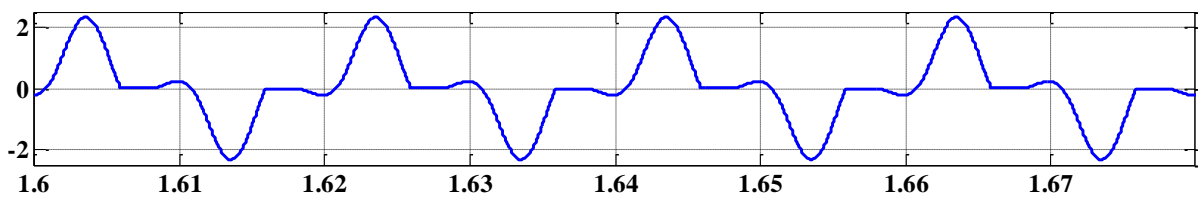


Figure (I-4) : Forme d'onde du courant de réseau par l'effet de la charge polluante

I.5. Origine des harmoniques

La prolifération des équipements électriques utilisant des convertisseurs statiques a entraîné une augmentation sensible du niveau de pollution harmonique des réseaux électriques. Ces équipements sont considérés comme des charges non linéaires émettant des courants harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale. Le passage de ces courants harmoniques dans les impédances du réseau électrique peut entraîner des tensions harmoniques aux points de raccordement et alors polluer les consommateurs alimentés par le même réseau électrique. [8]. Parmi ces équipements on peut citer :

- ✓ Convertisseurs de puissance (alternatif/continu –continu/alternatif).

- ✓ Variateurs électroniques de vitesse.
- ✓ Ordinateurs et autres dispositifs électroniques.
- ✓ Fours à arc électrique
- ✓ Transformateurs
- ✓ Convertisseurs d'énergie éolienne et photovoltaïque

I.6. Effets des perturbations harmoniques

De nombreux effets des harmoniques sur les installations et les équipements électriques peuvent être cités tels que les déformations des formes d'ondes entraînant des dysfonctionnements, l'augmentation des valeurs crêtes créant des claquages de diélectriques ou des valeurs efficaces induisant des échauffements et donc des pertes supplémentaires aussi bien en courant qu'en tension, ainsi qu'un étalement spectral provoquant des vibrations et des fatigues mécaniques. Les effets de ces perturbations peuvent se classer en deux types instantanés et à long terme [7-8].

I.6.1. Effets instantanés

Parmi les effets instantanés des harmoniques, on peut citer les points suivants :

- ✓ Dysfonctionnements des dispositifs de commande ou de régulation
- ✓ Vibrations dans les moteurs électriques alternatifs à cause des couples mécaniques pulsatoires dus aux champs tournants harmoniques.
- ✓ Interférences avec les systèmes de télécommande à distance utilisés par les distributeurs d'énergie.
- ✓ Déclenchement intempestif des circuits de protection.

I.6.2. Effets à long terme

Les effets à long terme des harmoniques sont récapitulés comme suite :

- ✓ Vieillesse prématurée des moteurs électriques alternatifs du fait des pertes cuivre et fer supplémentaires.
- ✓ Echauffements et pertes joules supplémentaires des câbles et des équipements
- ✓ Surchauffe du neutre. En effet dans un système triphasé équilibré.

- ✓ Pertes supplémentaires dans les transformateurs ou les inductances dues à l'effet de Peau dans le cuivre, à l'hystérésis et aux courants de Foucault dans le circuit magnétique.
- ✓ Fatigue mécanique des équipements à cause des vibrations et des couples pulsatoires,
- ✓ vieillissement des isolants. Il peut être dû soit à une contrainte en tension consécutive à la présence de tensions harmoniques, et donc à une augmentation locale des courants de fuite, soit à l'échauffement exagéré provoqué par l'échauffement des conducteurs.

I.7. Caractérisation des perturbations harmoniques

Parmi les grandeurs utilisées pour quantifier la distorsion harmonique dans le réseau de distribution, on peut citer le taux global de distorsion harmonique (THD), le facteur de distorsion (F_{dis}) et le facteur de crête F_c . Nous limiterons l'analyse du régime déformé au cas où la source de tension est sinusoïdale et où le courant absorbé par la charge est pourvu de composante harmonique [7-8]. Les expressions des tensions et de courants instantanés sont données par :

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

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

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

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

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

I.7.2. Puissances apparente, active, réactive et de distorsion

En régime déformé, on doit modifier la définition de la puissance apparente pour qu'elle tienne compte du courant harmonique [7], [9] :

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

Où S est la puissance apparente, P est la puissance active et Q est la puissance réactive.

Ce qui est le cas pour un réseau fort. Nous avons alors :

$$P = V_{eff} I_{1,eff} \cos(\phi_1) \quad (\text{I.6})$$

$$Q = V_{eff} I_{1,eff} \sin(\phi_1) \quad (\text{I.7})$$

$$S = V_{eff} I_{eff} \quad (\text{I.8})$$

$$I_{eff} = \sqrt{I_{1,eff}^2 + I_{2,eff}^2 + I_{3,eff}^2 + \dots + I_{n,eff}^2} \quad (\text{I.9})$$

$$D = V_{eff} \sqrt{I_{2,eff}^2 + I_{3,eff}^2 + \dots + I_{n,eff}^2} \quad (\text{I.10})$$

Nous voyons dans cette expression, un nouveau terme qui apparait, il s'agit de la puissance de distorsion D . La Figure. I.5 illustre vectoriellement ces puissances.

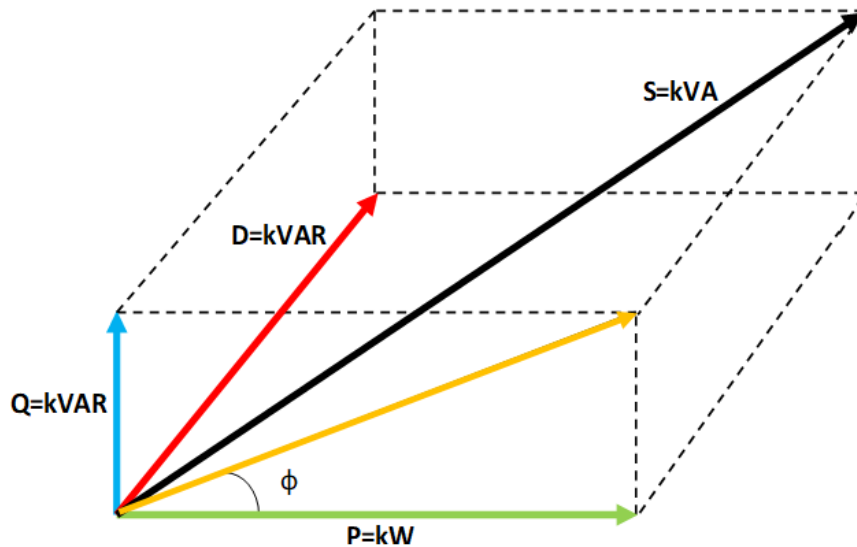


Figure (I-5): Représentation vectorielle de la puissance apparente

1.7.3. Facteur de puissance F_p

Indépendamment du régime sinusoïdal ou déformé, le facteur de puissance est le rapport entre la puissance active et la puissance apparente. Cependant, le facteur de puissance s'en trouve modifié par la présence de la puissance de distorsion, le facteur de puissance permet de qualifier la consommation de la puissance réactive [1], [7-10] :

$$F_p = \frac{P}{S} \neq \cos \phi_1 \quad (\text{I.11})$$

$$F_p = \frac{P}{S} = \frac{V_{eff} \times I_{1eff} \times \cos \phi_1}{V_{eff} \times I_{eff}} = \frac{I_{1eff}}{I_{eff}} \cos \phi = F_{dis} \times F_{dép} \quad (\text{I.12})$$

$$F_p = F_{dis} \times F_{dép} \quad (\text{I.13})$$

Où

F_p : Facteur de puissance.

F_{dis} : Facteur de distorsion.

$F_{dép}$: Facteur de déplacement.

1.7.4. Taux de distorsion harmonique THD

Le taux de distorsion harmonique permet d'évaluer l'écart entre la forme d'onde réelle et la forme d'onde sinusoïdale pour un courant ou une tension. Il représente le rapport de la valeur efficace des harmoniques à celle du fondamental [4-11]. Le taux global de distorsion harmonique caractérisant l'influence des harmoniques sur l'onde de courant déformée est défini de la façon suivante :

$$THD_I (\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h=\infty} (I_h)^2}}{I_1} \quad (\text{I.14})$$

$$THD_V (\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h=\infty} (V_h)^2}}{V_1} \quad (\text{I.15})$$

Le taux de distorsion harmonique de tension $THD_V(\%)$ caractérise la déformation de l'onde de tension comme suite :

- Une valeur de THD_V inférieure à 5 % est considérée comme normale. Aucun dysfonctionnement n'est à craindre.
- Une valeur de THD_V comprise entre 5 et 8 % révèle une pollution harmonique significative. Quelques dysfonctionnements sont possibles.
- Une valeur de THD_V supérieure à 8 % révèle une pollution harmonique importante. Des dysfonctionnements sont probables. Une analyse approfondie et la mise en place de dispositifs d'atténuation sont nécessaires.
- Une valeur de THD_I inférieure à 10 % est considérée comme normale. Aucun dysfonctionnement n'est à craindre.

- Une valeur de THD_I comprise entre 10 et 50 % révèle une pollution harmonique significative. Il y a risque d'échauffements, ce qui implique le surdimensionnement des câbles et des sources.

I.7.5. Normes imposées sur le taux de distorsion harmonique THD

Les consommateurs ainsi que les distributeurs de l'énergie électrique sont conscients de l'importance d'une réglementation standard unique pour les problèmes de la pollution harmonique. Une telle réglementation universelle n'existe pas encore, cependant des organismes comme IEC (Commission Électrotechnique Internationale) en Europe et IEEE en Amérique [11-15], élaborent des normes efficaces qui peuvent être regroupées en trois catégories :

1. Niveaux de **compatibilité harmonique** en amont du point commun de raccordement :

- ✓ IEEE 519-1992.
- ✓ IEC 61000-2-2.
- ✓ IEC 61000-3-6.

2. Limites sur l'**émission harmonique** des équipements:

- ✓ IEC 61000-3-2 (appareils de moins de 16 A par phase)
- ✓ IEC 61000-3-4 (appareils de plus de 16 A par phase)

La norme **IEEE-519** [11], par exemple, définit des limites pour les tensions et courants harmoniques au point commun de raccordement (PCC) pour assurer le bon fonctionnement des récepteurs dans d'autres sites. À titre d'exemple, les taux individuels maximaux des tensions harmoniques ainsi que le THD à ne pas dépasser sont donnés dans le Tableau.I.1.

Tableau (I-1) : Limites des tensions et courant harmoniques selon IEEE-519

	Composante harmonique individuelle maximale	THD maximal (%)
$V_S \leq 69 \text{ kV}$	3%	5%
$115 \text{ kV} \leq V_S \leq 161 \text{ kV}$	1.5%	2.5%
$\geq 161 \text{ kV}$	1.0%	1.5%

La norme **CEI 61000-3-2** spécifie les limites pour les émissions de courant harmonique des matériels individuels raccordés aux réseaux publics pour les appareils consommant moins de 16 A par phase [7]. Le Tableau.I.2 indique les limites d'émission pour ces appareils faisant partie de la classe A, c'est-à-dire autres que les outils portatifs, appareils d'éclairage et

appareils ayant un courant d'entrée à forme d'onde spéciale dont la puissance active est inférieure à 600W.

Tableau (I-1) : Limites d'émission de courants harmoniques des appareils basse tension

Rang harmonique	Courant harmonique maximal autorisé (A)
2	1,08
3	2,30
4	0,43
5	1,14
6	0,30
$8 \leq h \leq 40$	0,77
9	$0,23 \cdot 8/h$
11	0,40
13	0,33
$15 \leq h \leq 39$	$0,15 \cdot 15/h$

La norme *CEI 61000-3-4* spécifie les limites pour les émissions de courant harmonique des équipements individuels d'intensité assignée supérieure à 16A et jusqu'à 75A. Ces limites s'appliquent aux réseaux publics de tensions nominales entre 230V (monophasée) et 600V (triphasé). Le Tableau.I.3 résume la limitation des émissions de courants harmoniques (CEI 61000-3-4) [1],[7].

Tableau (I-2) : Limitation des émissions de courants harmoniques (CEI 61000-3-4)

Rang harmonique	Pourcentage du courant harmonique (I_h/I_1)%
3	21,6
5	10,7
7	7,2
9	3,8
11	3,1
13	2
15	0,7
17	1,2
19	1,1
21	$\leq 0,6$
23	0,9
25	0,8
27	$\leq 0,6$
29	0,7
31	0,7
≥ 33	$\leq 0,6$
Pair	$\leq 0,6$ ou $\leq 8/h$

I.8. Stratégies de préventions des perturbations harmoniques

Parmi les remèdes proposés pour balayer les harmoniques de façon globale et sélective, nous avons présenté les solutions suivantes:

1. Surdimensionnement des éléments composant le réseau [14].
2. Utilisation de transformateurs spéciaux [7].
3. Utilisation des appareils propres (redresseur MLI...etc.) [15]
4. Utilisation des dispositifs de filtrage (filtrage passif, filtrage actif et filtrage hybride)[7],[16].

I.8.1 Transformateurs de mise à la terre

Afin d'éviter le passage des courants harmoniques par le conducteur de neutre, l'ajout d'un transformateur de mise à la terre créant un neutre artificiel est une solution efficace. Ce type de transformateur fournit un chemin de faible impédance pour les courants harmoniques qui sont déviés dans son propre neutre [14]. C'est à dire, que seul neutre du transformateur doit être en mesure de supporter ces courants. Le schéma de principe est montré sur la Figure. I.6.

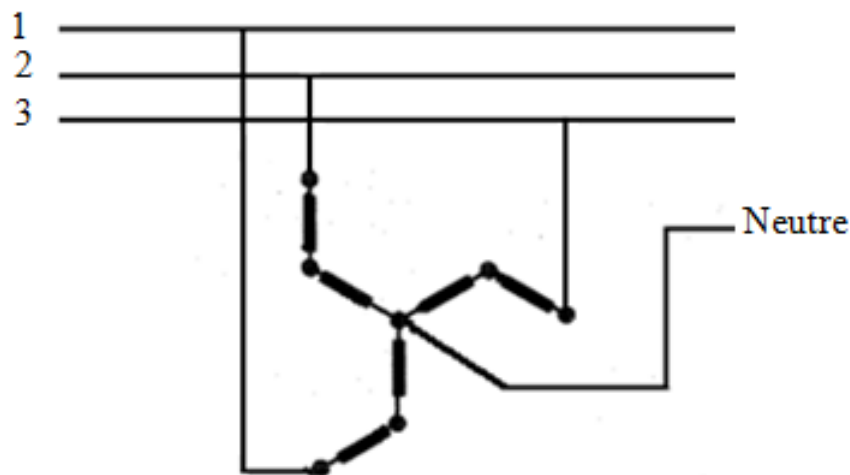


Figure (I-6) : Transformateur de mise à la terre

I.8.2 Transformateurs déphaseurs

Une autre solution pour la réduction des courants harmoniques est l'utilisation de transformateurs déphaseurs qui sont présentés dans la Figure.I.7 [15].

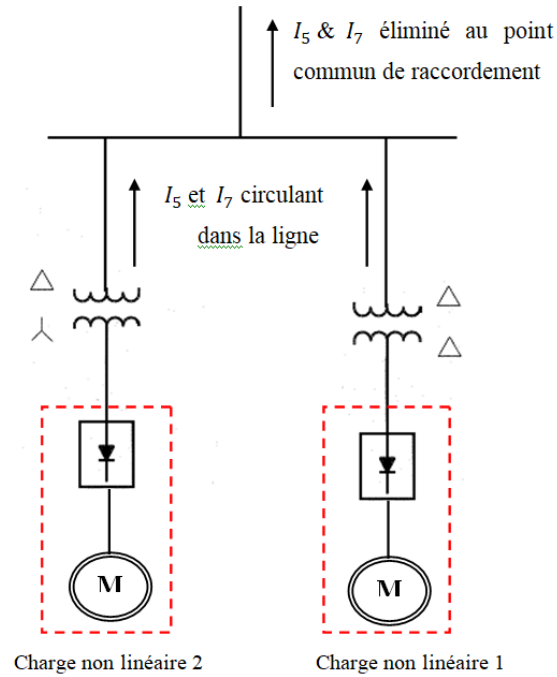


Figure (I-7) : Utilisation des transformateurs déphaseurs pour supprimer l'harmonique 5 et 7

L'utilisation du transformateur triangle-triangle et du transformateur triangle-étoile pour alimenter les deux charges non linéaires identiques a pour effet d'éliminer les courants du 5^{ème} et 7^{ème} harmoniques produits par ces charges. L'élimination de ces courants harmoniques est due au 30° de déphasage entre les connexions des deux transformateurs. Si les charges non linéaires sont identiques, les courants de 5^{ème} et 7^{ème} harmoniques sont éliminés au point commun de raccordement. Dans le cas contraire, un résidu de ces courants harmoniques sera toujours présent sur le réseau. D'autres connexions de transformateurs déphaseurs peuvent être employées pour éliminer des harmoniques de rangs plus élevés [7],[15].

I.8.3. Utilisation des Filtré

Cette solution consiste à installer un filtre entre la charge non linéaire et le réseau électrique afin de filtrer les harmoniques générés par la charge non linéaire de façon globale et sélective, on va présenter trois types de filtres, le filtrage passif, filtrage actif et le filtrage hybride qui combine le filtre actif avec le filtre passif [1][7],[18-20].

I.8.3.1. Utilisation des Filtré passifs

Le principe de ce filtrage passif est de modifier localement l'impédance du réseau afin de faire dévier les courants harmoniques et, du même coup, éliminer les tensions harmoniques résultantes [18-20]. Ces filtres sont composés d'éléments capacitifs et inductifs qui sont

disposés de manière à obtenir une résonance série accordée sur les rangs harmoniques désiré à éliminé. Afin de concevoir ce type de filtre,

La Figure. I.8 montre la structure d'un filtre passif parallèle résonant qui est destiné pour filtrer les deux premiers harmoniques 3^{th} et 5^{th} .

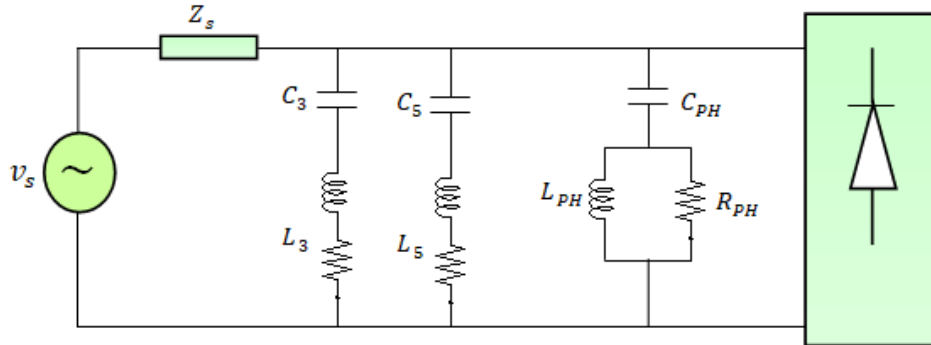


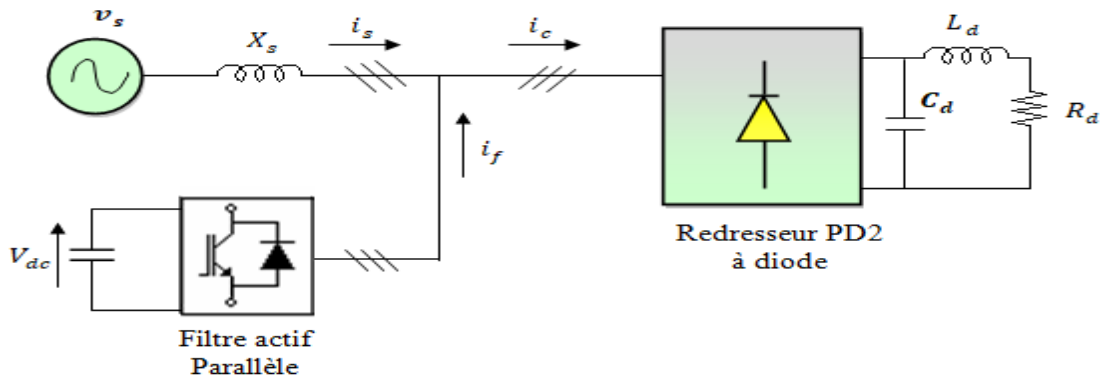
Figure (I-8) : Structure du filtre passif parallèle résonant

Une connaissance précise des caractéristiques et du comportement du réseau sous l'effet des harmoniques est nécessaire [20]. Une telle exigence de conception est généralement satisfaite à l'aide d'un logiciel de simulation. Les types de filtre passif utilisés sont choisis en fonction de l'atténuation harmonique recherchée [19].

L'inconvénient de ce type de filtre passif est la variation des éléments L_h et C_h due à leur vieillissement et à leur qualité [20]. Ces facteurs ont pour effet de créer un désaccord de l'ensemble. Afin d'éliminer un rang harmonique particulier, un filtre résonant ajusté pour cette fréquence doit être installé sur chacune des trois phases.

I.8.3.2. Utilisation de Filtre actif parallèle

Le Filtre actif parallèle est un onduleur modulé en largeur d'impulsion (MLI) qui est placé en parallèle avec la charge dans le but d'injecter un courant harmonique de même amplitude et de phase opposée que celui de la charge, Le FAP agit comme une source de courant harmonique réglable [21],[7]. La Figure. I.9 illustre la structure générale d'un FAP triphasé.



Figure(I-9) : Structure du filtre actif parallèle triphasé

I.8.3.3. Utilisation de filtre actif série (FAS)

Le rôle du filtre actif série est de modifier localement l'impédance du réseau [22-23], et sa structure est montrée sur la Figure. I.10. Le FAS se comporte comme une source de tension harmonique qui annule les tensions perturbatrices (creux, déséquilibre, harmonique) venant de la source et celles générées par la circulation de courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Ainsi, la tension au point de raccordement peut être rendue sinusoïdale.

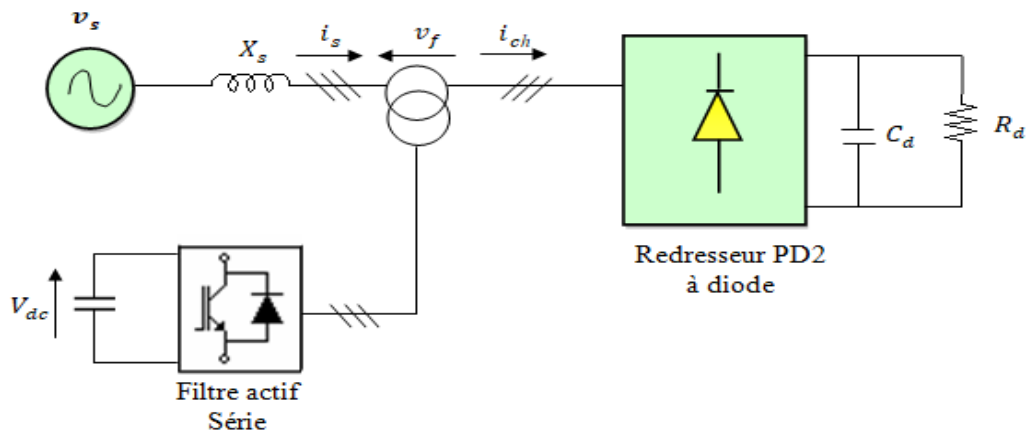
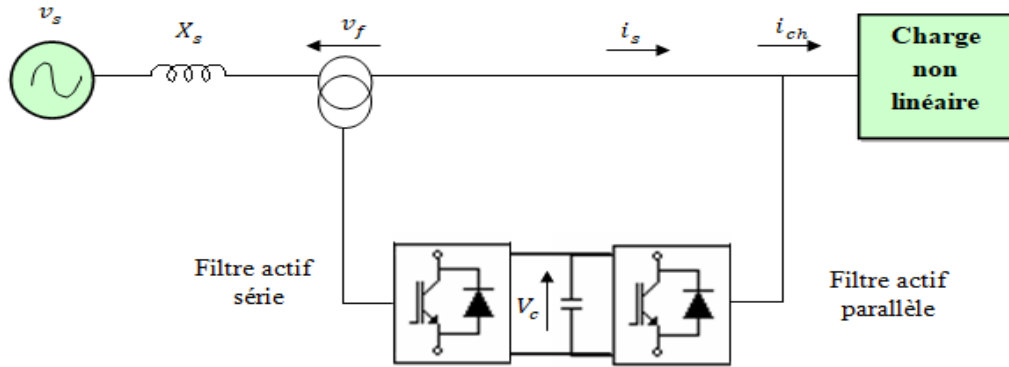


Figure (I-10) : Structure du filtre actif série

I.8.3.4. Utilisation de conditionneur universel de la qualité d'onde

Cette topologie de filtrage mixte, permet d'aller chercher plusieurs fonctions simultanément servant à améliorer la qualité de la tension (compensation des harmoniques, de puissance réactive, régulation et stabilisation de tension,... etc.) [24]. Le FAS a pour principales fonctions d'isoler les harmoniques entre la source et la charge polluante, de compenser les tensions déséquilibrées. La combinaison d'un filtre actif série et d'un filtre actif parallèle comme le montre la Figure. I.11 se nomme conditionneur universel de la qualité d'onde (UPQC).



Figure(I-11): Structure du conditionneur universel de la qualité d'onde 'UPQC'

I.8.3.5. Utilisation de Filtres hybrides

Dans cette topologie, le filtre actif est connecté en parallèle avec le filtre passif. Les deux sont également en parallèle avec la charge comme le montre la Figure. I.12. La partie du filtre passif parallèle (*FPP*) est occupé pour la compensation des harmoniques de faible rang (les courants de 5^{ème} et 7^{ème} rangs par exemple). Pour ce qui est du FAP, il est d'avantage approprié pour la compensation des harmoniques de rang élevé [1],[7], [20-24].

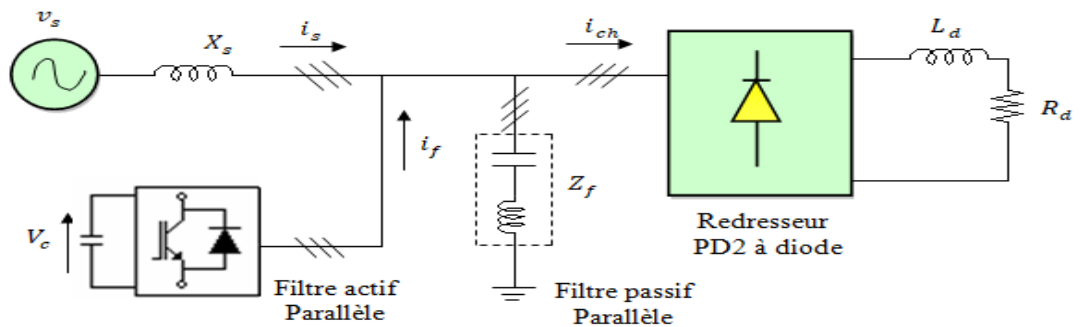


Figure (I-12) : Association du filtre actif parallèle avec filtre passif.

I.9. Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons donné une idée générale sur la notion d'harmoniques, et principalement sur les effets nuisibles qu'ils engendrent dans les systèmes électriques de puissance. L'utilisation des charges responsables de la propagation de la pollution harmonique dans l'ensemble des systèmes électriques est irremplaçable.

Donc, il est impératif d'aller chercher les solutions au problème d'harmoniques ailleurs sans avoir à éliminer ces charges. Cependant, il est inconcevable que ces solutions puissent occasionner des problèmes supplémentaires sur le réseau. La maîtrise des harmoniques est d'une importance capitale afin de permettre à l'utilisateur de :

- Retrouver un réseau électrique "propre", par la réduction du THD_i en minimisant ou éliminant les harmoniques.
- Retrouver un taux de distorsion en tension THD_v , compatible avec tous les récepteurs présents, en respectant le seuil de 5 %.
- Retrouver de "bons" facteurs de puissance et de déphasage
- Rendre une installation conforme aux normes actuelles et à venir en matière de pollution harmonique.

La solution à base du filtre actif constitue la voie par excellence pour, non seulement compenser les harmoniques, mais pour améliorer la qualité de l'énergie du réseau électrique et comme facteur clé d'un filtre actif des harmoniques, se jugé par la bonne méthode d'identification des courants harmoniques de références, Le processus de compensation globale et sélective par un filtre actif monophasé par des techniques d'identification harmonique à base d'un filtre multi variable fait l'objet de prochains chapitres.

Chapitre II

*Filtrage actif parallèle monophasé par action
globale à base d'un filtre multi-variable*

Chapitre II : Filtrage actif parallèle monophasé par action globale à base d'un filtre multi-variable

II.1. Introduction

Le filtre actif est un dispositif à base d'électronique de puissance exploitant au moins un convertisseur statique pour satisfaire la fonction de dépollution harmonique [1]. L'utilisation du filtre actif contribue plus efficacement à la minimisation des harmoniques survenant dans le réseau de distribution de l'énergie électrique causées surtout par le couplage au réseau de charges non linéaires. Avec un filtre actif on peut compenser, en temps réel, totalement ou partiellement toute perturbation pouvant survenir sur le réseau électrique [7]. Le mode de couplage au réseau dénomme le filtre actif utilisé : Filtre actif parallèle ou Filtre actif série. Indépendamment du filtre en question, la tâche commune est de générer des harmoniques en opposition de phase et en amplitude égale à celles contenues dans la charge, de manière à compenser ces derniers et par conséquent les empêcher de se propager dans la source. Selon le comportement harmonique de la charge, en courant ou en tension on choisit le filtre actif qui convient mieux.

Notre Travail a été consacré à une étude très modeste sur le filtrage actif parallèle monophasé par action globale, avec accentuation sur la méthode d'identification des courant harmonique de référence à base de la puissance instantanée modifiée par un filtre passe bande hautement sélective (FMV), tout en visant surtout sa présentation sous une forme très compréhensive en déduisant entre autres les limites d'application de chacun des deux types.

II.2. Principe du filtrage actif parallèle

Le filtrage actif est une méthode moderne utilisée pour l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique, réduction du taux d'harmonique ainsi que l'augmentation du facteur de puissance. Son principe de base est d'injecter de l'énergie réactive harmonique, et y compris parfois la fondamentale lorsqu'il s'agit de viser un facteur de puissance unitaire, moyennant un montage convertisseur onduleur. D'ici vient la nomination active du filtrage. A partir d'une source de tension ou de courant et avec une commande appropriée on reçoit à la sortie de l'onduleur la forme du signal à injecter dans le réseau. L'efficacité du filtre est jugée par la forme de ce signal qui doit être l'image inversée des harmoniques à compenser, contenues dans la charge. La détection de ces harmoniques, joue un rôle déterminant dans le filtrage actif. Car le signal détecté présente une grandeur de référence pour la commande de

l'onduleur. Pour ce fait existe déjà dans la littérature différentes méthodes, [11], [6-7]. Ces méthodes sont classées généralement en fonction de deux critères principaux, à savoir le degré de complexité lors de la réalisation pratique et le temps de calcul qu'exigent. Ce dernier influe beaucoup sur la dynamique de la méthode, travaillant en temps réel. Dans notre travail, nous avons choisi comme moyen de détection la méthode des puissances instantanées p q , basée sur un filtre multi-variable FMV.

L'utilisation du Filtrage actif seul est moins attractive dans la pratique à cause de son coût encore élevé, surtout dans le cas des systèmes puissants à filtrer. Pour cela on s'intéresse beaucoup plus au filtrage hybride, réunissant les avantages des deux types de filtrage : passif et actif. Si l'objectif du filtrage est de rendre le courant de la source purement sinusoïdal et en phase avec la tension de la source, chose pas toujours facile et aussi souvent non souhaitable dans la pratique, la référence de la commande doit contenir le courant ou la tension de charge dépourvu de la composante fondamentale active. Ainsi la source délivrera uniquement de la puissance active à la charge comme le montre la Figure.II.1.

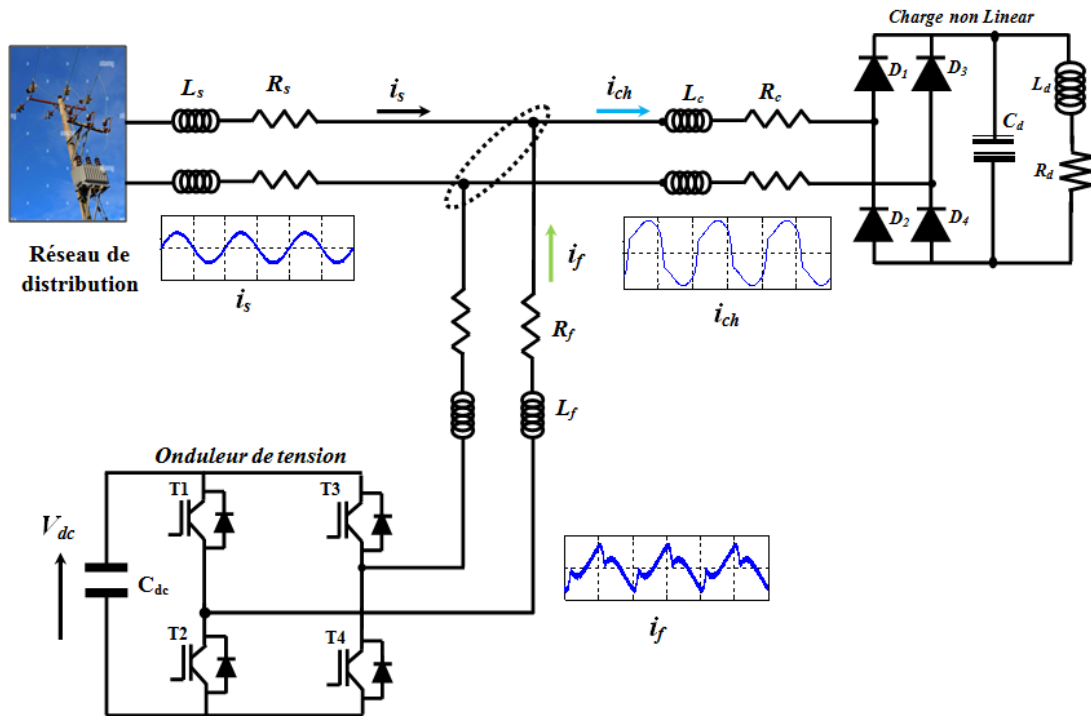
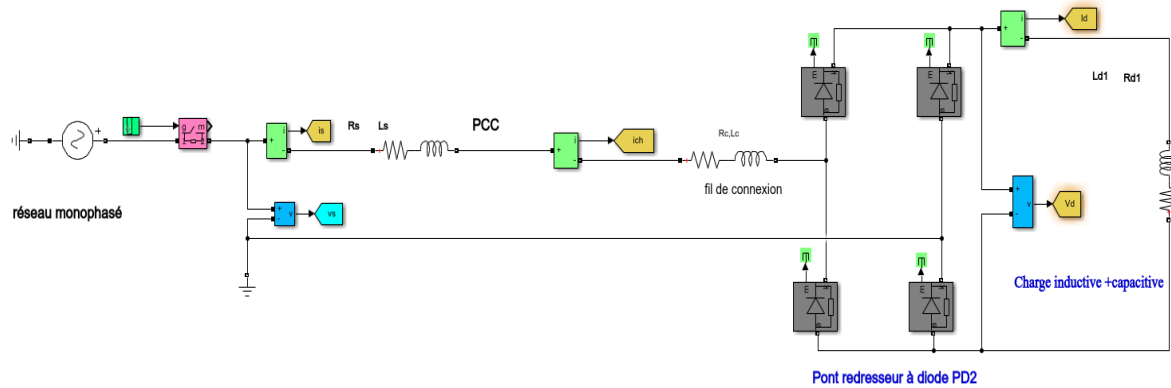


Figure (II-1): Structure et principe du FAP monophasé

II.3. Le système de puissance

Le système de puissance que nous avons pris dans notre travail, sur lequel l'analyse du filtrage actif monophasé a été faite, comprend une source de tension sinusoïdale monophasé possédant une impédance interne inductive (R_s, L_s). Comme charge non linéaire nous avons choisi le pont redresseur monophasé non commandé de type PD2 à diode. La charge

proprement dit est de nature inductive (R_d, L_d). Durant la simulation, faite à base du logiciel Matlab/Simulink, le model pris pour la charge est celui disponible dans la bibliothèque du logiciel sous formes de blocks (voir la Figure.II.2).



Figure(II-2): Système de puissance utilisé

Avec une charge fortement inductive le courant absorbé par la charge devient presque constant [12]. Sa valeur moyenne est donnée par la relation :

$$I_d = \frac{V_d}{R_d} \quad ; \text{ Avec } V_d = \frac{3}{\pi} \sqrt{2} \cdot V \quad (\text{II.1})$$

Le courant délivré par la source aura, dans ce montage, une forme pseudo carrée comme le montre dans la Figure.II.3

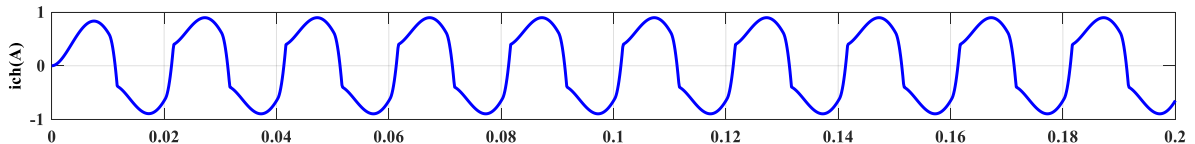


Figure (II-3) : Formes d'ondes du délivré par la charge non linéaire monophasé courant

Dans le cas du montage redresseur, Le courant de la source contient des harmoniques d'ordre impaire donné par la relation $h = 4k \pm 1$, ou k est un entier. Sa décomposition en série de Fourier peut être exprimée par la formule de Möltgen [1].

$$i_s(\omega t) = \sum_{h=1}^{h=4k \pm 1} \sqrt{2} \cdot I_{sh} \cdot \sin(h \cdot \omega t - h \varphi) \quad (\text{II.2})$$

Ou I_{sh} est valeur efficace de l'harmonique h , en remplaçant I_{sh} par son expression :

$I_{sh} = \frac{\sqrt{2} I_c}{h \cdot \pi}$, le courant $i_s(t)$ sera exprimé par :

$$i_s(t) = \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot I_d}{\pi} \left[\sin[(\omega t - \varphi)] + \frac{1}{3} \cdot \sin[3 \cdot (-\omega t - \varphi)] + \frac{1}{5} \cdot \sin[5 \cdot (\omega t - \varphi)] + \frac{1}{7} \cdot \sin[7 \cdot (-\omega t - \varphi)] + \dots \right] \quad (\text{II.3})$$

II.4. Structure générale d'un FAP monophasé

Le FAP monophasé, que ce soit de type série ou parallèle, est composé de deux parties principales : la partie puissance et la partie commande. La partie puissance est constituée de trois éléments :

- Une source d'énergie prise souvent de type tension, en utilisant un condensateur
- Un convertisseur statique (onduleur de tension monophasé)
- Élément de couplage au réseau, qui joue aussi le rôle d'un filtre de sortie réduisant les harmoniques dues à la fréquence de commande de l'onduleur. Dans le cas du filtre actif série cet élément comprend en plus un transformateur.

La partie commande enveloppe deux unités essentielles :

- Unité de commande et de réglage
- Unité génératrice des grandeurs de références (notre principale tâche dans ce travail)

Par la suite on va présenter, d'une manière plus ou moins détaillée suivant l'importance exigée, chacun de ces composants.

II.4.1. Onduleur de tension monophasé

L'onduleur est un convertisseur statique permettant de fabriquer un échange d'énergie entre une source de tension continue fournie par une batterie ou un redresseur, et une source de tension alternative pour alimenter des charges en courant alternatif. Cette fonction est schématisée sur la Figure II.4 [7]. Les différentes structures de l'onduleur monophasé sont illustrées dans la Figure.II.5

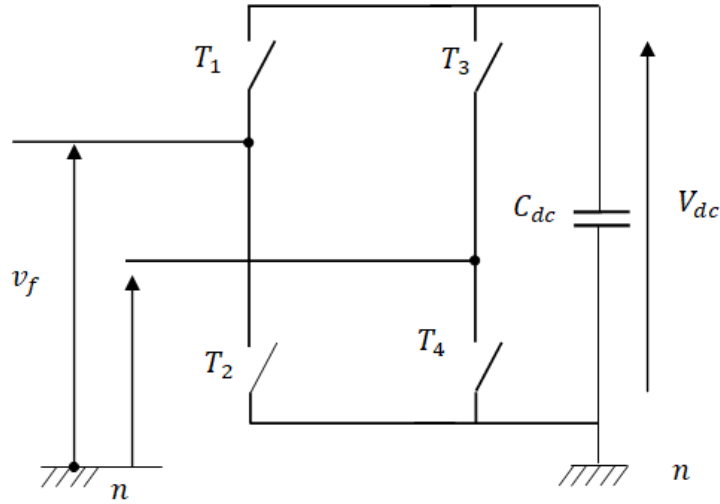


Figure (II-4) : Structures et montage d'un l'onduleur monophasé

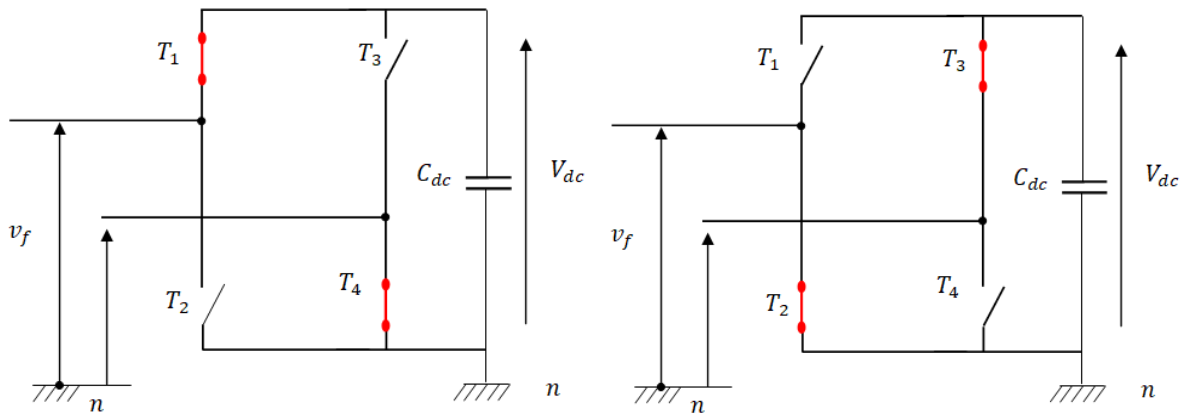


Figure (II-5) : Structures de commutations de l'onduleur monophasé de source tension

II.4.2. Commande par hystérésis

La commande par hystérésis, appelée aussi commande en tout ou rien, est une commande non linéaire qui utilise l'erreur existant entre le courant de référence i_f^* et le courant produit par l'onduleur i_f [6-7]. L'erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis. Dès que l'erreur atteint la bande inférieure ou supérieure, un ordre de commande est envoyé de manière à rester à l'intérieur de la bande. La simplicité de la mise en œuvre, le schéma du principe est donné par la Figure. II.6. En revanche, les commutations évoluant librement à l'intérieur de bande d'hystérésis, on ne peut maîtriser correctement le spectre haut fréquence dû aux fréquences de commutations.

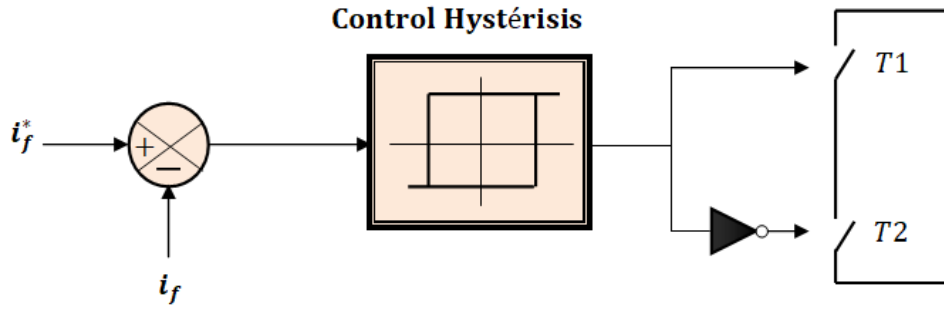


Figure (II-6) : Principe de commande des courants par hystérésis

II.4.3. Élément passif de couplage au réseau

Le couplage du filtre actif, considéré en mode parallèle comme source de tension commandé en courant, se fait à l'aide d'une inductance L_f . Cette dernière, elle joue le rôle d'une source de courant, à injecter dans le point de connexion commun, ainsi, elle permet de réduire l'amplitude des harmoniques dues à la fréquence de commande de l'onduleur. En prenant un schéma équivalent unifilaire dans la Figure.II.7.

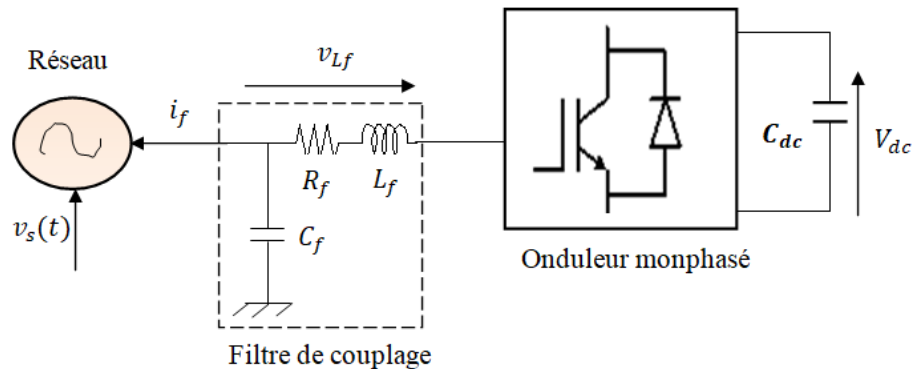


Figure (II-7) : Schéma illustratif du filtre passif de couplage

La variation du courant à la sortie de l'onduleur sera exprimée par:

$$\frac{di_f}{dt} = \frac{V_{dc} - v_s}{L_f} \quad (\text{II.4})$$

Cette expression montre qu'une faible valeur de L_f mène à une variation rapide du courant i_f . Si cette variation arrange bien la dynamique de la commande et induit une faible chute de tension, elle amplifie les amplitudes des harmoniques à des fréquences multiples de celle de la commande. Des valeurs élevées pour L_f résulte le contraire.

Donc en pratique lors du dimensionnement de L_f , on doit tenir compte de ces deux contraintes. Une diminution substantielle des harmoniques d'ordre élevés se fait simplement en ajoutant un condensateur C_f formant avec L_f un filtre passe-bas de second ordre. Le choix

de C_f se fait, après le choix de L_f , en choisissant une pulsation de coupure $f_c = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_f \cdot C_f}}$ suffisamment inférieure à la fréquence de commande de l'onduleur f_m , ($f_c \leq 10 \cdot f_{cm}$) [6-7].

Pour éviter la résonance éventuelle du filtre passe-bas, on ajoute une petite résistance R_f , s'il est nécessaire, en série avec L_f . La valeur de R_f se calcule en imposant une valeur choisie du facteur d'amortissement ξ :

$$R_f = 2 \cdot \xi \sqrt{Z_0}, \text{ avec } Z_0 = \frac{L_f}{C_f} : \text{impédance caractéristique du filtre [1].}$$

II.4.3. Régulateur proportionnel

En régime permanent, les courants de référence ne contiennent pas de composante fondamentale, et la puissance nécessaire pour compenser les pertes est faible. Dans ce cas, un simple gain est suffisant, et pour filtrer les fluctuations à 300Hz, nous proposons d'ajouter un filtre passe-bas du premier ordre en sortie du régulateur. Dans notre travail, nous avons choisi un régulateur proportionnel intégral PI pour réguler la tension du condensateur V_{dc} à sa valeur de consigne V_{dc}^* comme illustre dans Figure.II.8

$$K(s) = K_r \cdot \frac{1}{1 + \tau_c s} \quad (\text{II.5})$$

Avec :

K_r : Gain du régulateur

τ_c : Constante de temps

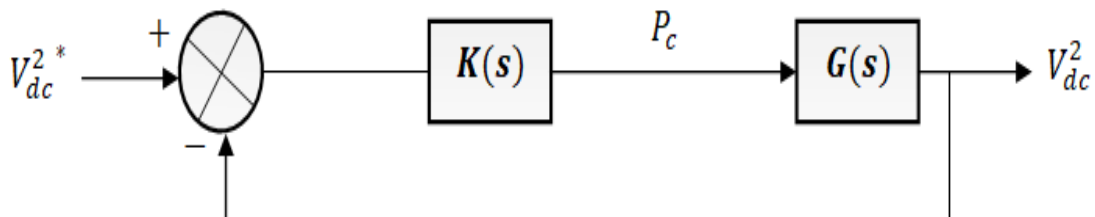


Figure (II-8) : Schéma fonctionnel de la régulation de V dc avec le régulateur proportionnel

La relation entre la puissance active absorbée par le condensateur et la tension aux bornes de celui-ci s'écrit :

$$P_c = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} C_{dc} \cdot V_{dc}^2 \right) \quad (\text{II.6})$$

Après la transformation de Laplace de (III.6), on obtient (III.7) :

$$P_c(s) = \frac{1}{2} C_{dc} \cdot s \cdot V_{dc}^2(s) \quad (\text{III.7})$$

Après le calcul, la fonction de transfert en boucle fermée est de la forme :

$$F(s) = \frac{\omega^2}{s^2 + 2\xi_c \omega s + \omega^2} \quad (\text{II.8})$$

$$F(s)_{BF} = \frac{\left(\frac{2K_r}{\tau_c}\right)}{s^2 + \frac{1}{\tau_c} s + \left(\frac{2K_r}{\tau_c}\right)} \quad (\text{II.9})$$

Par identification de la (III.16) avec (III.15), on aura :

$$\omega = \sqrt{\frac{2K_r}{C_{dc}\tau_c}} \quad \text{et} \quad \xi_c = \frac{1}{2\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\frac{C_{dc}}{K_r \cdot \tau_c}} \quad (\text{II.10})$$

Pour réaliser un bon compromis entre les performances dynamique et statique nous choisirons une valeur de ξ_c comprise entre 0.4 et 0.8, soit 0.7 et $2\pi \cdot 36 \left(\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right)$ [7].

II.4.4. Génération de courants harmonique de référence

L'efficacité du filtrage actif parallèle revient en grande partie à la méthode utilisée pour la génération des courants ou des tensions harmoniques de référence. Cette fonction, étroitement liée au mécanisme de détection (extraction) du signal à filtrer, constitue le noyau principal du filtrage actif parallèle monophasé [7]. Vu leurs simplicités relatives deux méthodes s'imposaient ces derniers temps.

L'une est basée sur le calcul de puissance instantanée, en se servant des courants et des tensions et l'autre basée uniquement sur la mesure des courants ou des tensions. La première utilise comme repère de calcul le repère fixe ($\alpha - \beta$). Comme dans notre travail la génération des références harmoniques a été faite moyennant de la méthode de puissance instantanée pq, cette dernière est beaucoup plus appliquée en triphasé, mais cette fois on va la généraliser dans un système monophasé.

II.4.4.1. Méthode de la puissance instantanée p q en monophasé

Le courant de charge et la tension du réseau peut directement convertir en axe $(\alpha-\beta)$ sans aucune matrice de transformation. Le courant et la tension imaginaires sont obtenus en décalant le signal d'origine (tension/courant) de 90 degrés et donc le signal original et le signal imaginaire représente le courant de charge dans les coordonnées $(\alpha-\beta)$ [7],[25-26].

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{h=1}^{h=4k\pm 1} \sqrt{2} \cdot I_{ch} \cdot \sin(h\omega t - h\theta) \\ \sum_{h=1}^{h=4k\pm 1} \sqrt{2} \cdot I_{ch} \cdot \sin(h\omega t - h\theta - \frac{\pi}{2}) \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

$$\begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_s \sin(\omega t - \varphi) \\ V_s \sin(\omega t - \varphi - \frac{\pi}{2}) \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

La puissance active et réactive instantanée, notée $p(t)$ et $q(t)$ sont définis par la relation suivante :

$$\begin{aligned} p(t) &= v_{s\alpha} \cdot i_{c\alpha} + v_{s\beta} \cdot i_{c\beta} \\ q(t) &= v_{s\alpha} \cdot i_{c\beta} - v_{s\beta} \cdot i_{c\alpha} \end{aligned} \quad (\text{II.13})$$

A partir des équations (II.13), on peut calculer la puissance active et réactive comme le montre l'équation (II.14).

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & v_{s\beta} \\ -v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

$$\begin{cases} p = \bar{p} + \tilde{p} \\ q = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

\bar{p} : Puissance active fondamentale

\bar{q} : Puissance réactive fondamentale

\tilde{p} et \tilde{q} : Puissances active et réactive harmoniques

D'après la Figure. II.9, on remarque que les courants diphasés de la charge dans l'axe $(\alpha-\beta)$ sont transformés dans l'espace des puissances instantanées active et réactive en composante constante qui représente la composante fondamentale, et en composantes alternative avec une pulsation de $(\pm 4\omega h)$. qui représente l'ensemble des harmoniques, dont h est l'ordre d'harmonique.

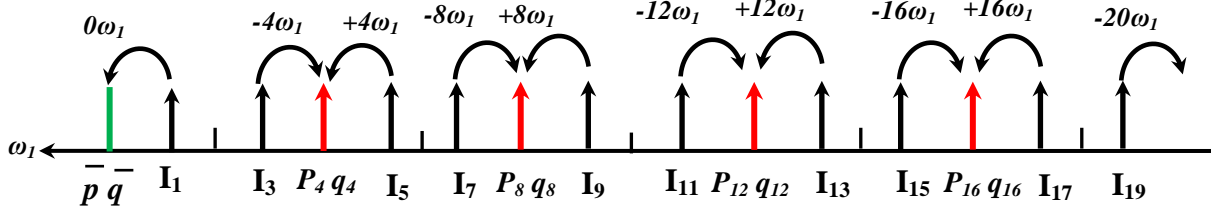


Figure (II-9) : Les formes d'ondes de la tension et du courant

Par similitude avec la méthode d'identification monophasée (p q), on trouve le courant harmonique de référence (le courant sur l'axe β n'est pas considéré).

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha h} \\ i_{c\beta h} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{s\alpha}^2 + v_{s\beta}^2} \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & v_{s\beta} \\ -v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} + \bar{q} \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

La composante du courant sur l'axe β est pas considéré dans le calcul final. Les courants harmoniques de références sont calculés par l'expression suivante :

$$i_{c\alpha h}^* = \frac{1}{v_{s\alpha}^2 + v_{s\beta}^2} (v_{s\alpha} \cdot \tilde{p} + v_{s\beta} \cdot (\tilde{q} + \bar{q})) \quad (\text{II.17})$$

$$i_h^* = i_{c\alpha} - i_c \quad (\text{II.18})$$

Ou i_c est la composante du courant responsable au réglage du bus continu (délivré par le régulateur du condensateur C_{dc} , le diagramme d'identification globale monophasé est illustré par la Figure. II.10.

II.4.4.3. Modèle mathématique du FMV

Le modèle mathématique est développé dans la première fois par Song Hong-Scok, la relation entre les grandeurs d'entrée et de sortie est [27] :

$$\hat{x}_{\alpha\beta}(t) = e^{j\omega_c t} \int e^{j\omega_c t} x_{\alpha\beta}(t) dt \quad (\text{II.19})$$

Après transformation de Laplace de l'équation (II.19), on a trouvé l'équation (II.20) (la démonstration est effectuée à l'annexe de la thèse de Song Hong-Scok Ph.D 2001) [29-31].

$$H(s) = \frac{\hat{x}_{\alpha\beta}(s)}{x_{\alpha\beta}(s)} = \frac{s + j\omega_c}{s^2 + \omega_c^2} \quad (\text{II.20})$$

Avec cette fonction de transfert, il prouve que le signal de sortie $\hat{x}_{\alpha\beta}(s)$ est en phase avec le signal d'entrée $x_{\alpha\beta}(s)$. D'ailleurs, si nous traçons le diagramme de Bode de cette fonction de transfert nous trouverons des similitudes avec un filtre passe bande. Supposant maintenant que nous ajoutons deux nouvelles constantes K_1 et K_2 dans la fonction de transfert (II.21), nous aurons l'expression suivante :

$$H(s) = \frac{\hat{x}_{\alpha\beta}(s)}{x_{\alpha\beta}(s)} = K_2 \frac{(s + K_1) + j\omega_c}{(s + K_1)^2 + \omega_c^2} \quad (\text{II.21})$$

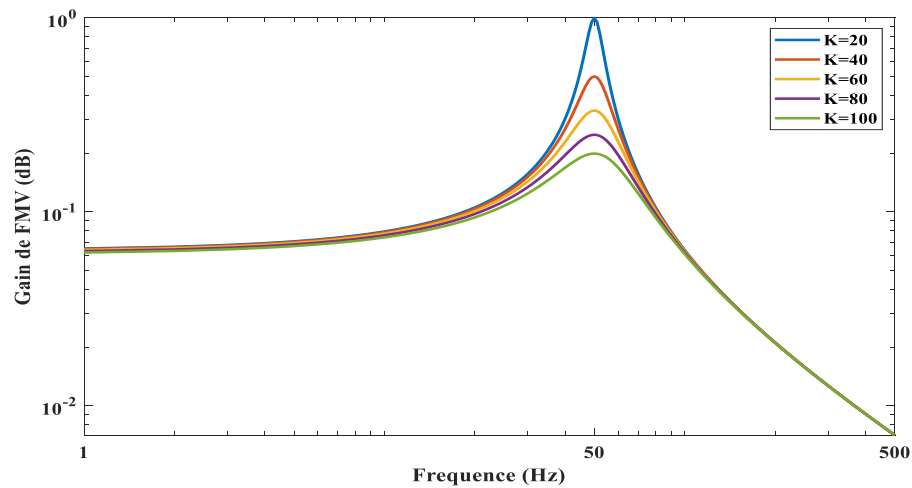
Où: $\omega_c = 2\pi f \cdot h$: pulsation de coupure, avec h est l'ordre de la composante à filtrer.

$x_{\alpha\beta}$: les composantes électrique d'entrés du FMV sur l'axe $(\alpha-\beta)$.

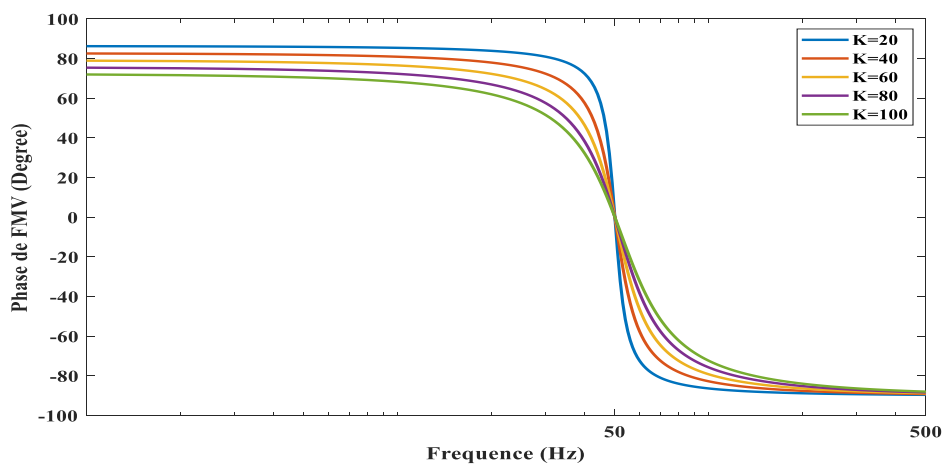
$\hat{x}_{\alpha\beta}$: les composantes de sortie du FMV sur l'axe $(\alpha-\beta)$.

K_1, K_2 : constantes à fixer.

Si on pose K_2 égale à 20 et on fait varier K_1 , nous traçons le diagramme de Bode en (2D) de cette fonction de transfert pour la phase et le gain pour différents fréquence de coupures et paramètres K_1 de la fonction de transfert comme le montre dans la Figure.II.11



(a) Gain du FMV pour le fondamental



(b) Phase du FMV pour le courant fondamental

Figure (II-11) : (a, b) Diagramme de Bode du FMV

D'après les Figure. II.11, on constate que:

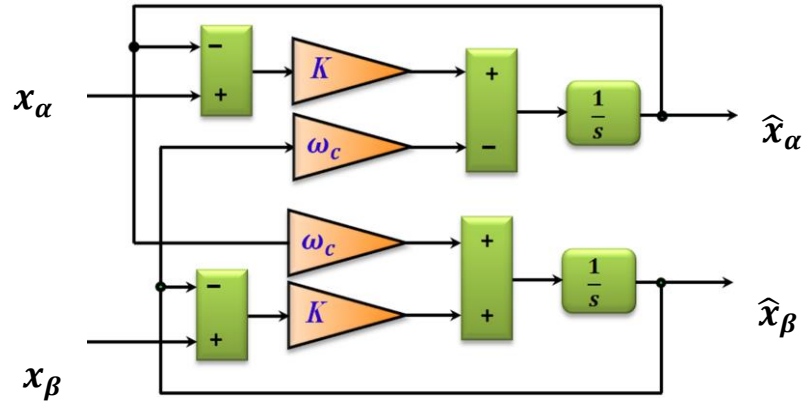
- ✓ Pour des fréquences de coupure 50Hz, l'angle de phase du diagramme de Bode est nul. Ce qui signifie que les signaux d'entrées et de sorties de la composante fondamentale sont en phases, c.à.d. le déphasage introduit par le FMV est égal à zéro.
- ✓ Pour $K = 20$, le gain de la fonction est unitaire ou nul ($|H(s)| = 0 \text{ dB}$), pour chaque fréquence de coupure 50Hz.

Selon les axes $(\alpha-\beta)$, les expressions liant les composantes $\hat{x}_{\alpha\beta}$ en sortie du FMV avec les composantes d'entrées $x_{\alpha\beta}$ sont les suivantes :

$$\hat{x}_\alpha = K \cdot \frac{(s+K)}{(s+K)^2 + \omega_c^2} x_\alpha(s) - \frac{K\omega_c}{(s+K)^2 + \omega_c^2} x_\beta(s) \quad (\text{II.22})$$

$$\hat{x}_\beta = \frac{K\omega_c}{(s+K)^2 + \omega_c^2} x_\alpha(s) + K \frac{(s+K)}{(s+K)^2 + \omega_c^2} x_\beta(s) \quad (\text{II.23})$$

À partir de ces équations, nous développons le circuit du filtre multi variable. Cette dernière est illustrée par la Figure. II.12.



Figure(II-12) : Structure du FMV

Après avoir la structure du FMV, c'est facile d'extraire la composante fondamentale de la tension du réseau, dans le cas où la tension contient certains harmoniques de faible ordre. Il suffit de passer les deux composantes (α - β) sur l'axe sur un FMV ajusté sur la fréquence de coupure fondamentale ($K=20$, $\omega_c=2*\pi*50$). Les composantes fondamentales de la tension de réseau sur l'axe de Concordia (α - β) sont utilisées pour extraire la composante harmonique fondamentale du courant de charge comme suite

$$v_{s\alpha 1} = 20 \cdot \frac{(s+20)}{(s+20)^2 + \omega_c^2} v_{s\alpha}(s) - \frac{K\omega_c}{(s+20)^2 + \omega_c^2} v_{s\beta}(s) \quad (\text{II.24})$$

$$v_{s\beta 1} = \frac{20\omega_c}{(s+20)^2 + \omega_c^2} v_{s\alpha}(s) + 20 \frac{(s+20)}{(s+20)^2 + \omega_c^2} v_{s\beta}(s) \quad (\text{II.25})$$

Le diagramme d'identification à base de la méthode p q modifiée par le FMV est illustré dans la Figure.II.13, le courant de référence est exprimé par les équations (II.26-27)

Tableau 0.1: Paramètres du système de filtrage actif parallèle à simulé

Etage du système simulé	Désignation	Valeurs
Réseau électrique monophasé	-Valeur efficace de la tension -Fréquence -Impédance interne du réseau	$-V_s=50*\sqrt{2}V$ $-f_s=50Hz$ $-L_s=0.015mH, R_s=1m\Omega$
Charge non linéaire monophasé	-Pont redresseur triphasé (PD2) débitant sur une charge RLC -Impédance de filtrage à	$-R_d=30\Omega, L_d=50mH$ $-R_c=0.03\Omega, L_c=30mH$
Filtre actif parallèle	-Filtre de couplage - Condensateur de stockage -Tension de référence	$-L_f=40mH, R_d=10\Omega$ $-C_{dc}=1100\mu F$ $-V_{dc}^*=350V$
Paramètres de simulation	- Temps d'échantillonnage - Bande d'hystérésis -Contrôleur PI	$-T_s=5 \mu s$ $-\Delta h=0.001A$ $-K_p=0.93, K_I=19.14$

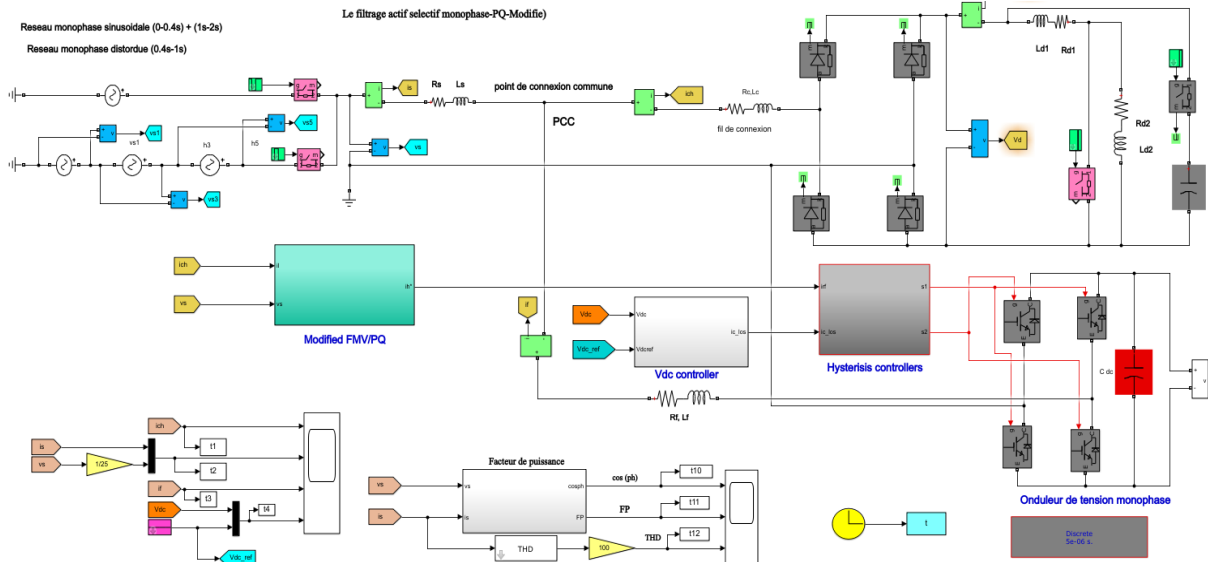


Figure (II-14): Block de simulation du FAP monophasé

II.5.1. Performance du FMV avec tension de réseau distordue

Considérons maintenant une source de tension monophasé distordue, dont la THD est de $THDv_s\% = 40.36\%$. Avec la présence des harmoniques de basses fréquences d'ordre 3^{th} et 5^{th} , les amplitudes des harmoniques sont données par le système d'équation suivant :

$$v_s(t) = 50.\sqrt{2}.\sin(\omega t) + 20.\sin(-3\omega t) + 10\sin(5\omega t) \tag{II.28}$$

La Figure. II.15.(a) montre que la tension de source sur l'axe $(\alpha-\beta)$ sans filtre FMV est distordue à l'instant $0.4s$, donc cela justifie que la performance de la méthode classique $p q$ est dégradé. Après l'insertion du FMV à l'instant $0.6s$, les composantes de tension de source selon l'axe la tension sur l'axe $(\alpha-\beta)$ devient sinusoidale comme le montre dans la

Figure.II.15. (b), cela jugé l'impact majeur du FMV pour améliorer la robustesse de la technique d'identification $p q$.

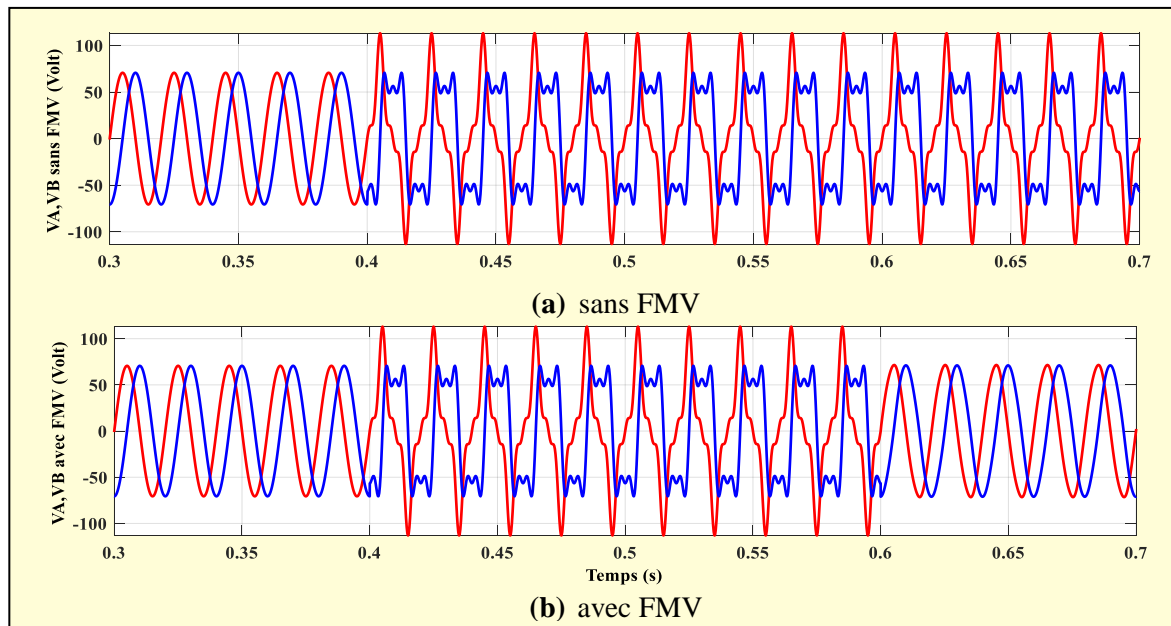
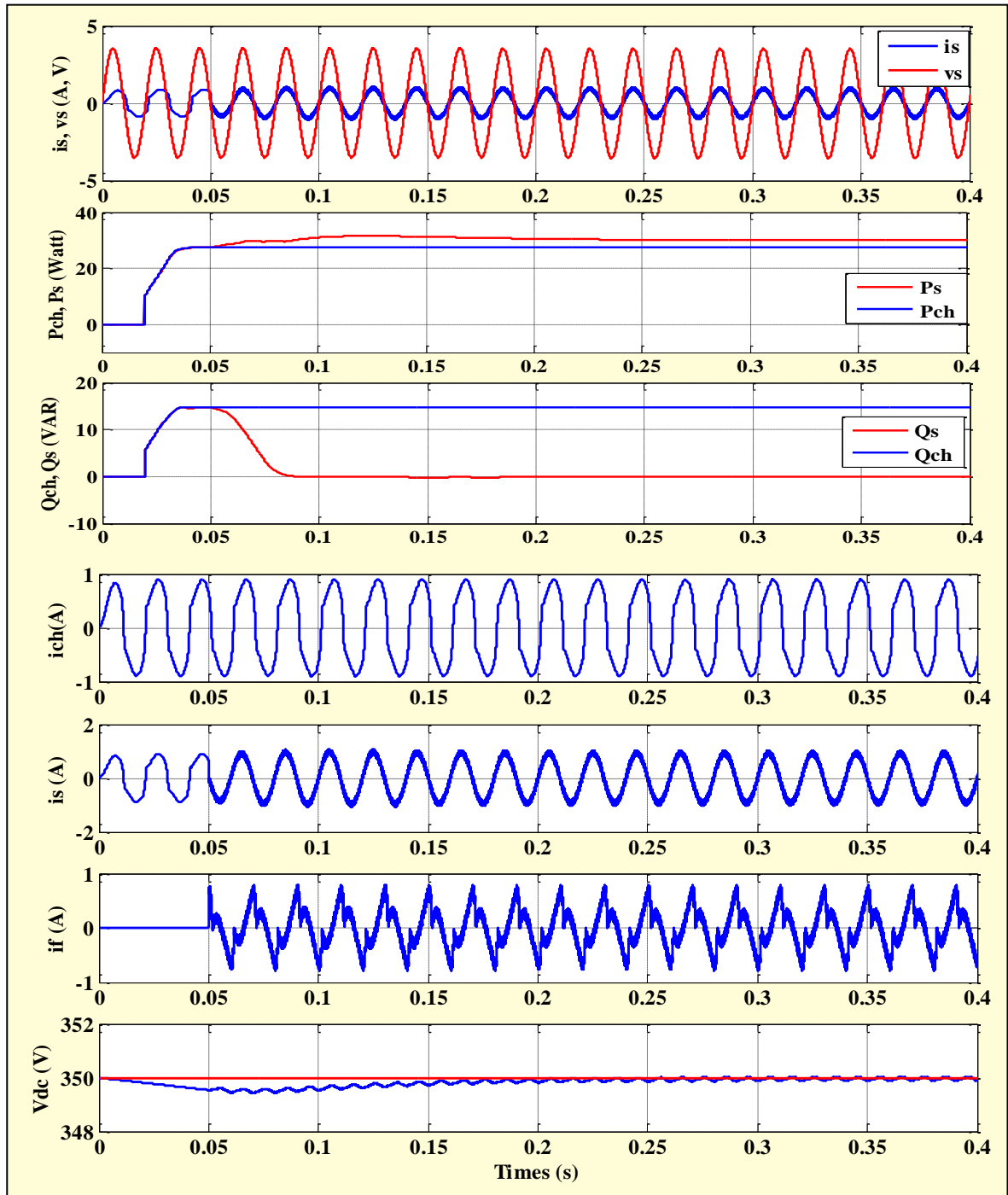


Figure (II-15) : (a, b). Tension de source sur l'axe $(\alpha-\beta)$ en présence et absence du FMV

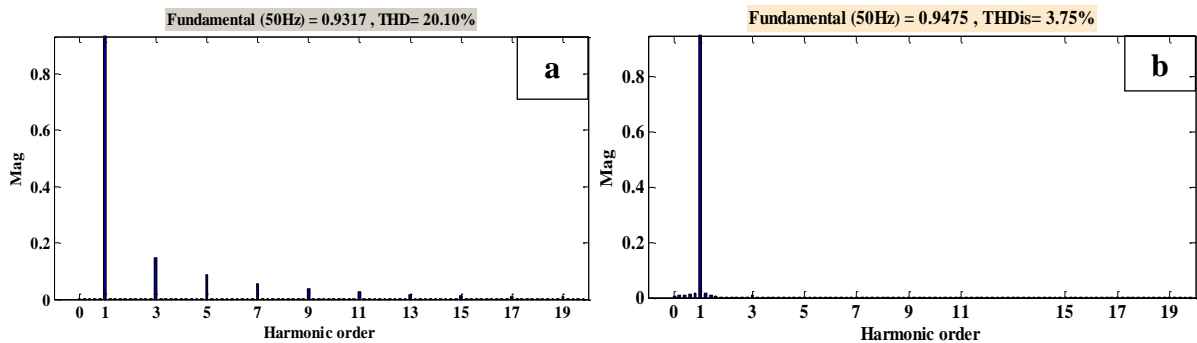
II.5.2. Comportement du FAP monophasé en régime permanent

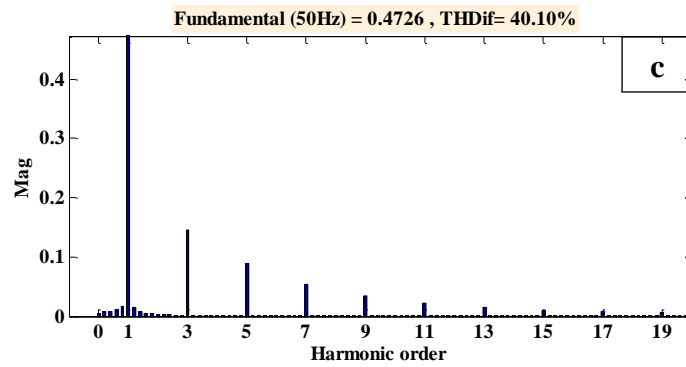
Dans ce cas, on serve la méthode $p q$ dans la commande du FAP, Les Figures (II.16), où sont portées les formes des courants et de tension, montrent clairement l'effet de compensation effectuée par le FAP sur le courant de la source. Le spectre harmonique du courant de la source avant et après le filtrage (Figure.II.17) justifie de plus cet effet.

La compensation de la totalité d'harmonique et compris le fondamental réactive, selon notre choix lors de la génération de références harmonique, est vérifié à travers le déphasage nul entre la tension de la source v_s et le courant i_s (cela juge la compensation de l'énergie réactive). On observe aussi que le courant harmonique i_f , contenant toutes les harmoniques du courant de la charge, délivré l'onduleur du FAP, et cela a été illustré à travers le spectre harmonique du courant (Figure.II.17). Le THD du courant de source est passe de 26,38% avant le filtrage vers 1,27% après le filtrage. Donc la norme IEEE-519 a été respectée. La tension V_{dc} voit sa valeur diminuée après l'application des courants de charge, cette chute de tension sera récupérée après deux périodes par le contrôleur PI. Ce dernier est capable de garder constante la tension V_{dc} autour de sa valeur de référence avec une faible fluctuation.



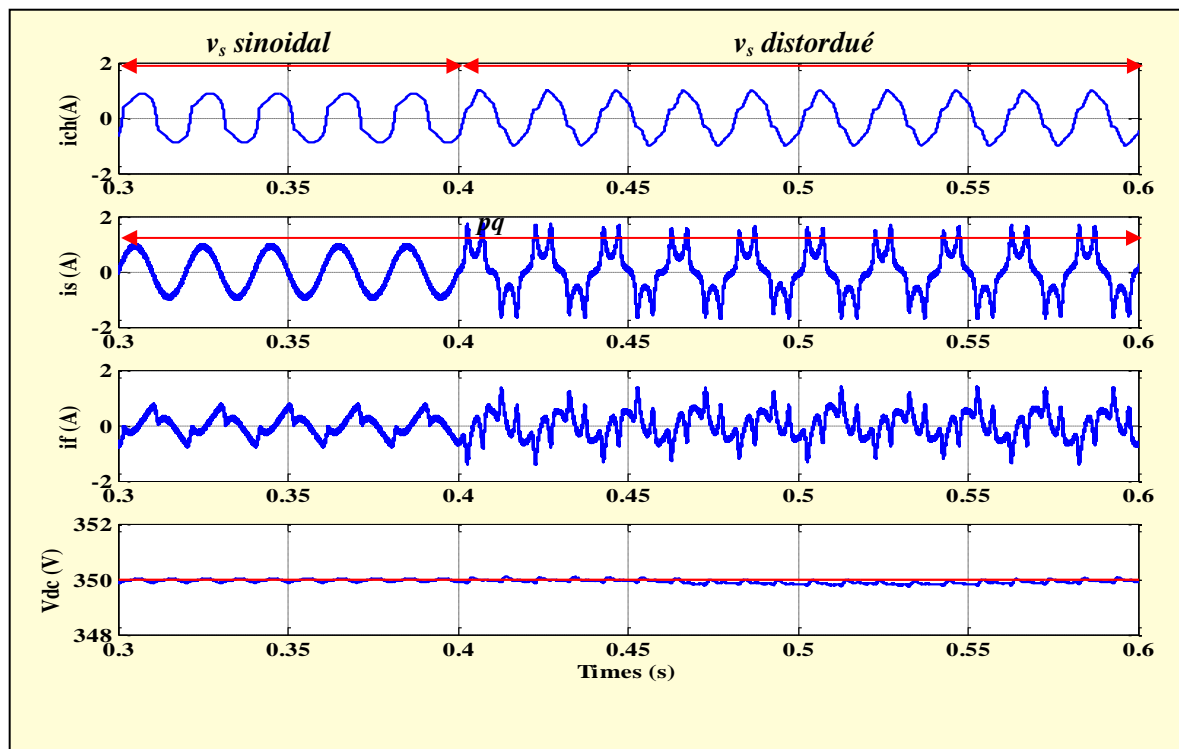
Figure(II-16) : Effet du filtrage actif en régime permanent



Figure (II-17) : (a ,b ,c) Spectres harmonique du courants i_{ch} , i_s et i_f

II.5.3. Fonctionnement du FAP monophasé avec tension de réseau distordue

La Figure.II.18 montre que, si on alimente la charge non linéaire par une tension distordue, la qualité de filtrage est dégradé, le THD du courant de source après le filtrage est noté 10.67% (Figure.II.19). On peut constater que la méthode $p q$ ne convient pas pour contrôler le FAP avec ce régime de fonctionnement.



Figure(II-18):impact de la tension du réseaux FAP monophasé

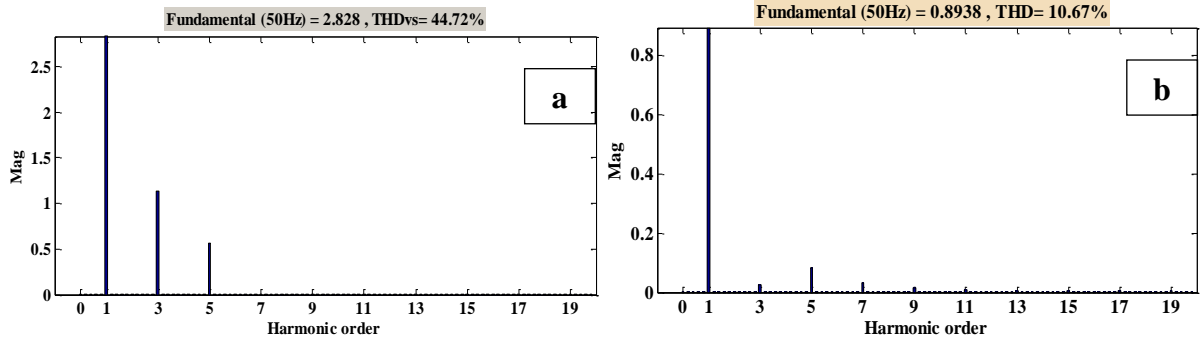


Figure (II-19) : (a,b). Spectres harmonique de v_s et i_s

Après l'application de la méthode $p q$ modifié à l'instant $0.6s$, on remarque que le courant de réseau récupère sa forme d'onde sinusoïdale comme le montre dans la Figure.II.20, cela juge la robustesse de cette méthode d'identification. Le THD du courant de source passe de 25% à 2.93% après le filtrage, et la puissance réactive est notée compensé.

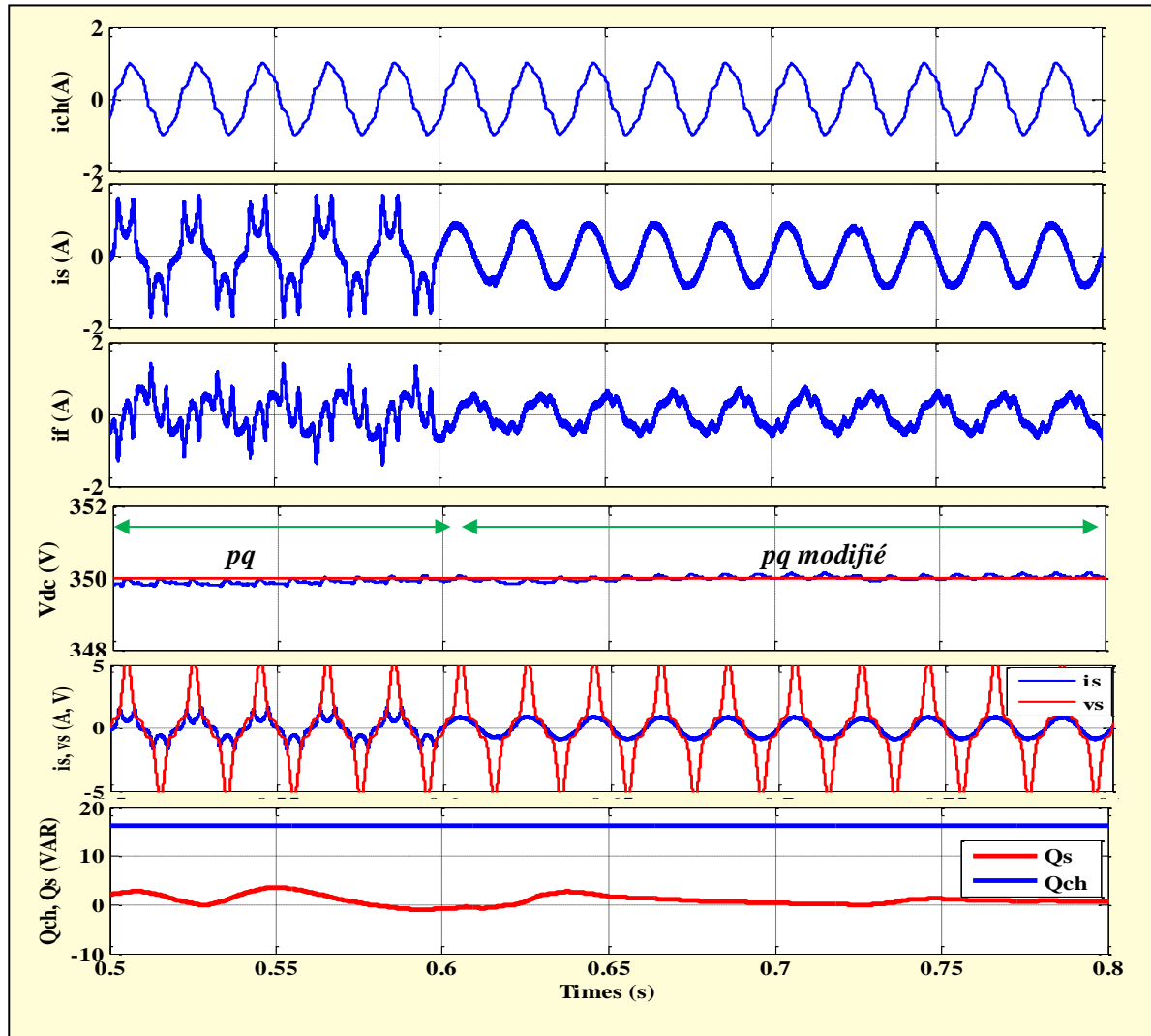


Figure (II-20) : Impact de méthode $p q$ modifié sur qualité de filtrage du FAP

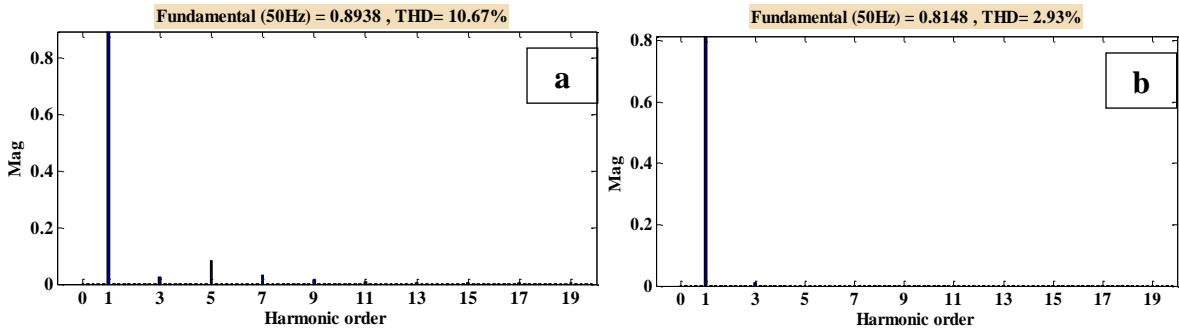
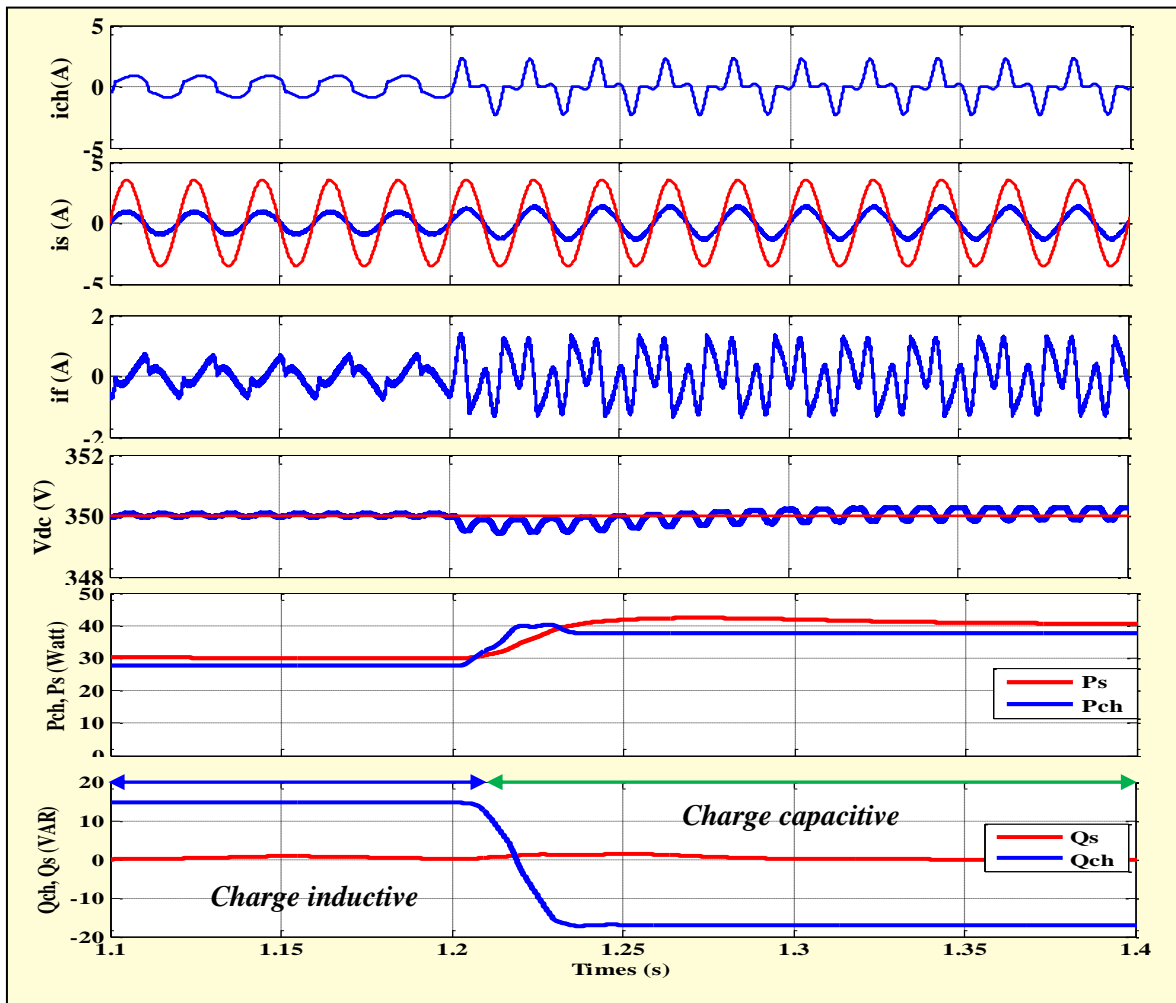


Figure (II-21) : Spectres harmonique du i_s avec vs distordue : (a) avec p q (b) avec p q modifié

II.5.4. Fonctionnement du FAP monophasé avec tension de réseau

La présence d'un condensateur de valeur $C_d=40\mu F$ aux bornes de la charge, prise avant inductive, rendre le courant de charge fortement distordue, mais l'effet positive compensateur du FAP est remarquable (Figure.II.22) Cela à cause de la méthode de commande et la robustesse du régulateur PI. La THD du courant est passe de 68.27% avant le filtrage à 4.17% après le filtrage comme le montre la Figure.II.23. On constate que le filtrage du courant harmonique se fait en temps réel avec le changement de caractère de charge.



Figure(II-22) : Impact de la charge capacitive sur la dynamique du FAP monophasé

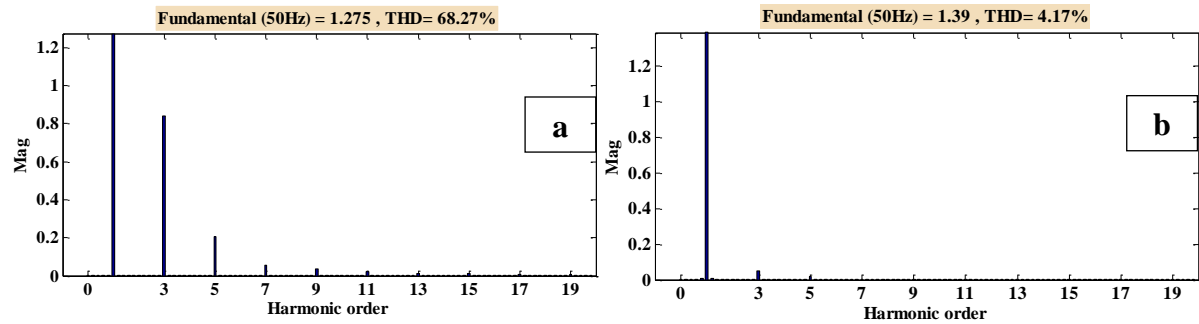


Figure (II-23) : (a ,b). Spectres harmonique du courant de source is avant et après le filtrage

II.5.4. Fonctionnement du FAP monophasé avec variation de la charge

Dans la Figure.II.24., si on fait un changement de charge dans les instants $1.4s$ et $1.5s$, on remarque que le FAP gère en temps réel cette fluctuation de la charge non linéaire (R_d de 60Ω à 30Ω et L_d de 200 mH à 100mH), L'allure du courant de la source démontre bien le suivi correct du filtre actif d'une variation brusque de la charge.

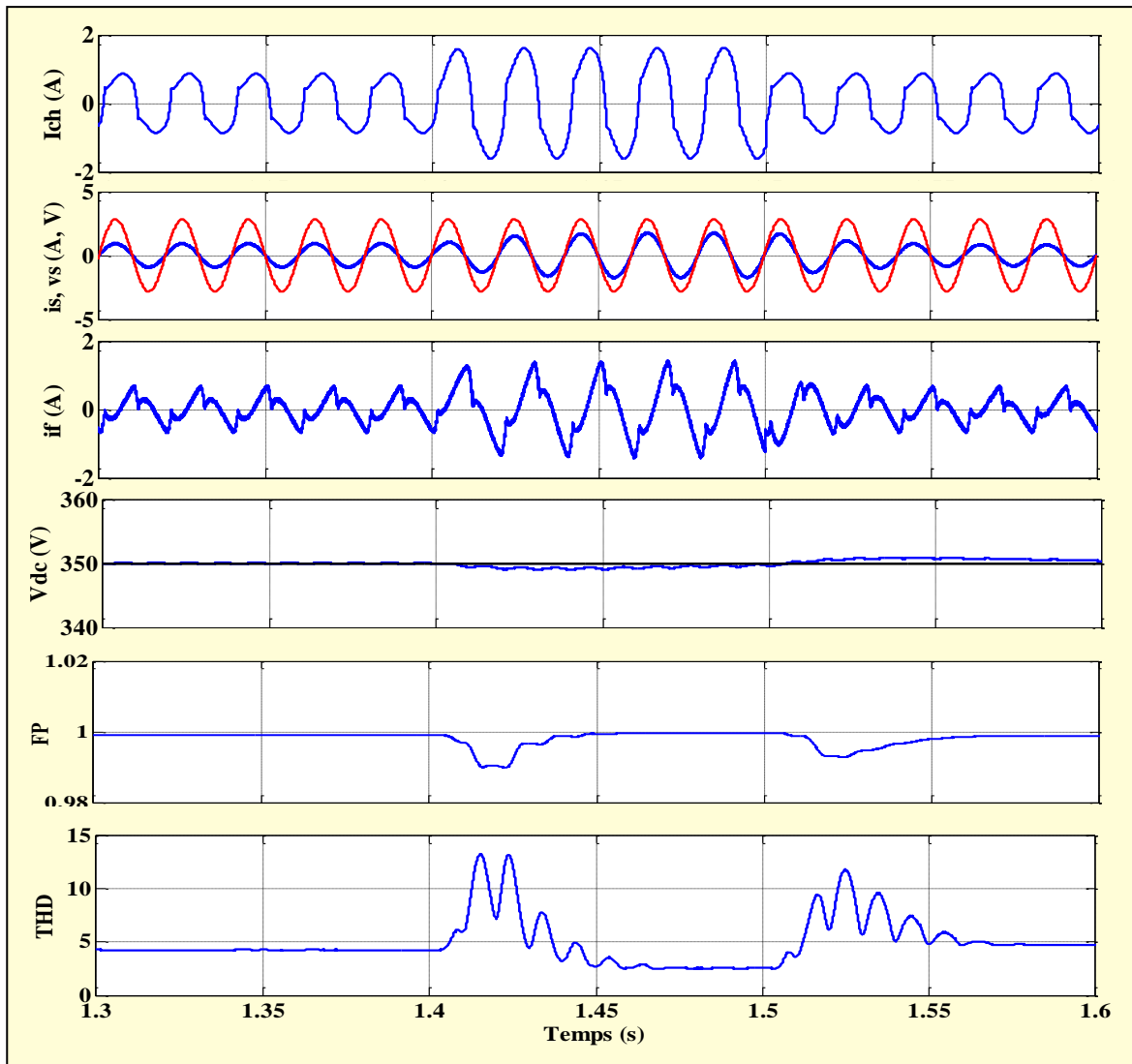


Figure (II-24) : Dynamique du FAP avec variation brusque de la charge

II.5.5. Évaluation globale d'écoulement de puissance avec effet du FAP

Les Figures II.25 montre clairement qu'avant le couplage du FAP, la puissance réactive est marqué une valeur de 15VAR, et la puissance active est de valeur de 25Watt, le facteur de déphasage est $\cos \varphi = 0.9$, facteur de puissance est 0.86, la THD du courant de source est de 20%, et après maitre en marche le FAP, la puissance réactive du réseau devient nulle, le THD du courant de source est inférieur à 5% (sauf dans le cas où la tension du réseau est distordue avec la méthode $p q$ classique), le facteur de puissance est diminué sous ce régime de fonctionnement.

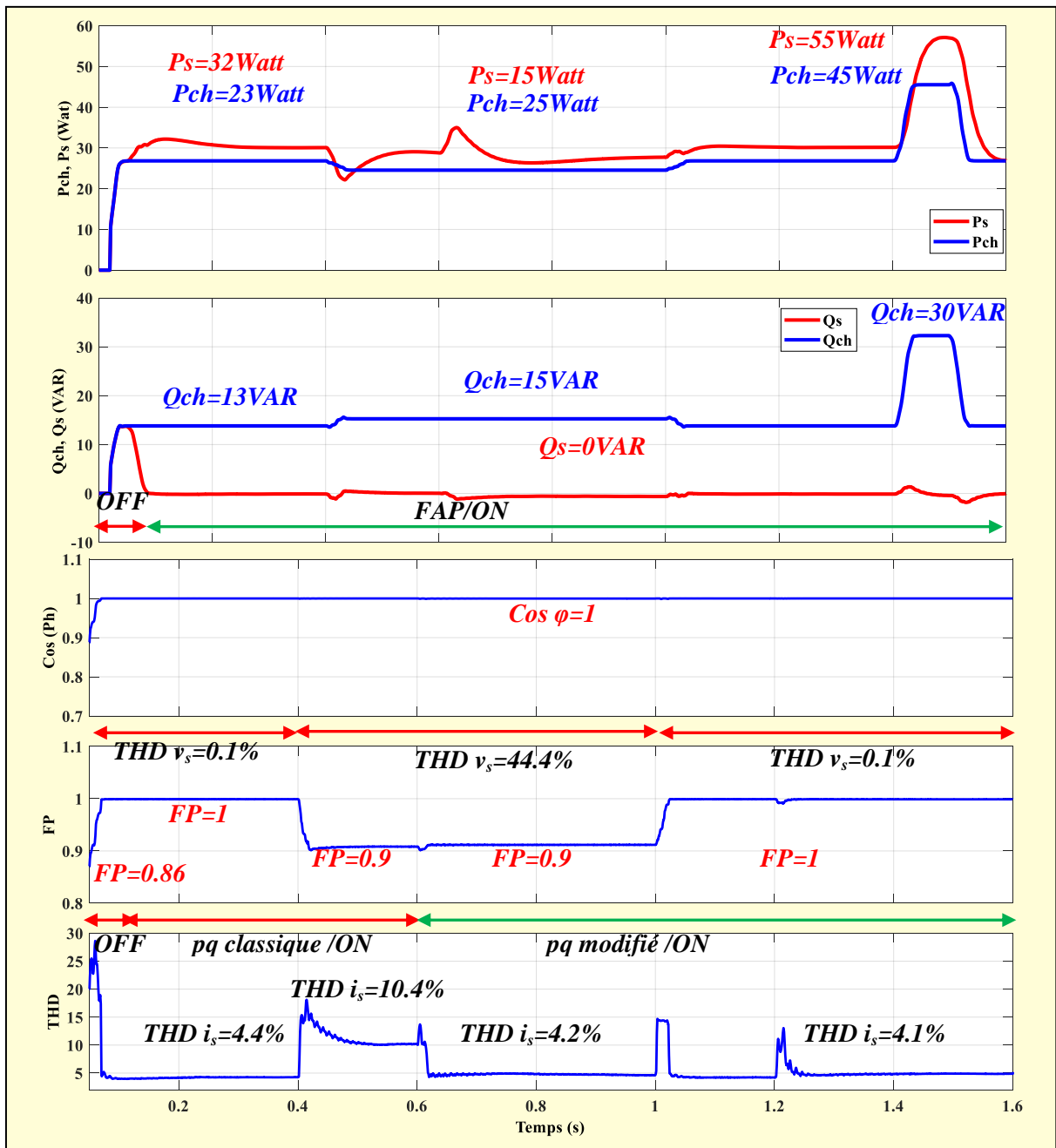


Figure (II-25) : Évaluation total de l'écoulement de puissance active et réactive en présence du FAP

II.6.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la structure générale d'un filtre actif parallèle monophasé, Dans le but de rendre ce type de filtrage plus compréhensif, surtout aux étudiants, nous avons décrit chacun des éléments contributeurs au fonctionnement du filtre actif monophasé. Comme le mécanisme de génération des références harmoniques présente la clé pour un filtrage actif, nous l'avons attribué relativement un peu plus d'intérêt, en exposant

deux méthodes, la première est la méthode de puissance instantanée $p-q$ classique en monophasé et la deuxième méthode est la méthode de puissance instantanée évoluée qui est comprise à sa constitution un FMV hautement sélective (pour le cas d'un filtrage global des harmoniques).

A travers la simulation du système, en prenant comme charge non linéaire un montage redresseurs de type PD2 à diode débité sur une charge RLC, nous avons essayé de montrer tout d'abord l'effet compensateur de tel type de filtrage. Ensuite nous avons montré par des résultats de simulation l'impact de deux techniques d'identification et le genre de charges sur la qualité de filtrage du FAP monophasé. Aussi le régime dynamique du FAP a été examiné. Ce dernier point faisait l'objectif principal de notre travail.

1. Dans le cas où la tension de réseau est distordue, la méthode $(p-q)$ présente un effet compensateur meilleur avec un faible THD du courant de source, meilleur facteur de puissance même dans les conditions dynamiques. Contrairement la méthode $p-q$ classique ne convient uniquement pour le cas d'un réseau électrique sain (tension sinusoïdale)
2. La qualité de filtrage actif est dégradée lorsque la tension du bus continue est diminuée, parce que la puissance de filtre actif est insuffisante pour compenser la totalité des harmoniques. Cet effet est augmenté dans un réseau électrique moyenne tension.
3. La qualité de filtrage reste meilleure après l'insertion d'un condensateur de filtrage fortement capacitif à la sortie du PD2. Ce qui signifie que le FAP est plus adapté pour des charges inductives et capacitives.
4. Le bus continu du FAP est bien régulé grâce à l'utilisation du régulateur PI.
5. La qualité de filtrage pour chaque test est jugée par la lecture du taux de distorsion harmonique du courant de réseau avant et après le filtrage.

Nous avons mentionné que l'application du filtre multi-variable pour contrôler le FAP monophasé n'est pas limitée pour le filtrage global, mais il est possible d'appliquer ce filtre pour réaliser une compensation sélective de certaines harmoniques de courant, en faisant modifier la technique d'identification des harmoniques. Aussi, parfois dans la pratique une compensation totale des harmoniques n'est pas nécessaire. Dans ce cas on fait recours au filtrage sélectif. Ceci est faisable aussi avec un filtre actif parallèle monophasé, qui sera l'objet de prochain chapitre.

Chapitre III

*Étude et analyse du fonctionnement d'un Filtre
actif monophasé par action sélective à base
d'un FMV*

Chapitre III : Étude et analyse du fonctionnement d'un Filtre actif monophasé par action à base d'un FMV

III.1.Introduction

La contrainte principale d'une filtre actif globale des harmonique est la puissance que doit délivrer le filtre au réseau, celle-ci est proportionnelle à celle de la charge. Plus la charge est importante, plus le filtre actif est puissant [1], [4]. Une solution apparue dans la littérature est l'utilisation du contrôle harmonique sélectif, ce type de filtrage dans l'industrie a été réalisé par les filtres passif, actuellement le filtrage sélectif est réalisé aussi moyennant de filtre actif, où la bande passante du filtre actif est réglée de telle sorte que les courants harmoniques sont contrôlés individuellement ou simultanément. Cela permet au filtre actif d'atténuer les courants harmoniques dominants. Généralement les harmoniques en questions sont des basses fréquences. Ce type de filtrage permet de réduire sensiblement la puissance du filtre actif [32], et de contrôler et supprimer les harmoniques gênants [33-36], et comme la clé du filtrage actif par action sélective est reposé sur la technique d'identification des courants harmoniques de références, en profitant l'option de la haute sélectivité du FMV pour réaliser un filtrage actif monophasé des harmoniques géants (ou dominants), l' utilisation du FMV, va permettre de modifier les techniques d'identifications des harmoniques tels que la technique des puissances instantanée (pq) pour avoir une version robuste de adaptable avec les perturbation de la tension de réseau.

La plupart des travaux réalisés dans la littérature de filtrage actif sélectif sont appliques sur un système triphasé équilibré, dans notre modeste travail, nous avons appliqués la technique de filtrage actif sélectif sur un system monophasé distordue moyennant d'un filtre multivariable.

III.2. FAP sélectif monophasé à base de la technique des puissances $p q$

Dans le réseau électrique monophasé, le principe de la méthode des puissances instantanées actives réactives ($p q$) pour le cas d'un filtrage sélectif est consiste à extraire la composante de la puissance instantanée active et réactive relative à l'harmonique désiré à filtrer [1]. Nous avons présenté deux méthodes d'extraction des composantes de puissances, et

à partir de ces composantes on trouve les courants harmoniques de références sélectionnées à filtré. La première méthode est la méthode $p q$ classique et la deuxième c'est la méthode $p q$ modifiée.

III.3. FAP sélectif monophasé par la méthode $p q$ classique

Le principe de filtrage actif sélectif par la technique d'identification classique $p q$ est consisté à rendre constante la composante de puissance instantanée active et réactive relative à l'harmonique désiré à filtrer. Cette composante constante de puissance peut être séparé de la composante alternative moyennant un filtre passe bas de premier ordre, et après avoir les composante constante de puissance active et réactive, on peut facilement trouver le courant harmonique désiré à identifier [1].

III.3.1. Identification d'un harmonique d'ordre inverse

Un courant généré par une charge non linéaire monophasée comporte deux composantes inverses et directes. Un system directe dit $[i_{ch}]_-$ est constitué des harmoniques 3,7, 11, 15,...etc, pour identifier un harmonique inverse de rang $(h=4k-1)$ il suffit de générer un système de tension inverse $[v_h]_-$ de même ordre [1]. Ce système de tension inverse générée directement à partir du système à PLL monophasé [36-37]. La sortie de la PLL délivre l'angle de phase $\hat{\theta}_s = \hat{\omega}_s \cdot t$ référencé par rapport au fondamental de la première phase v_s . A partir de cet angle, on construit deux signaux sinusoïdaux d'amplitude unitaire en quadrature, $v_{h\alpha}$ et $v_{h\beta}$, d'ordre $(h=4k-1)$ oscillant à la pulsation $(-h \cdot \omega)$. Les deux systèmes sont exprimés par les deux équations suivantes :

$$[v_h]_- = V_h \sqrt{2} \cdot \sin(-h\omega t + \varphi_h) \quad (\text{III.1})$$

$$[i_{ch}]_- = \sum_{\substack{h=4k-1 \\ k \in \mathbb{N}^*}}^n I_{ch} \sqrt{2} \cdot \sin(-h\omega t + \theta_h) \quad (\text{III.2})$$

Où V_h et φ_h représentent respectivement la valeur efficace et la phase du système de tensions monophasé de rang h . Les puissances instantanées ont pour expression :

$$\begin{cases} p_h = [v_h]_- \cdot [i_{ch}]_- = v_{h\alpha} \cdot i_{c\alpha} + v_{h\beta} \cdot i_{c\beta} \\ q_h = [v_h]_- \wedge [i_{ch}]_- = v_{h\alpha} \cdot i_{c\beta} - v_{h\beta} \cdot i_{c\alpha} \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

$$\text{Avec :} \quad \left\{ \begin{array}{l} [v_{h\alpha\beta}] = \begin{bmatrix} v_{h\alpha} \\ v_{h\beta} \end{bmatrix} \\ [i_{c\alpha\beta}] = \begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (\text{III.4})$$

Les puissances réelles et imaginaires peuvent être séparées en leurs composantes continues (\bar{p}_h, \bar{q}_h), et en leurs composantes alternatives (\tilde{p}_h, \tilde{q}_h) de la façon suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} P_h = \bar{P}_h + \tilde{P}_h \\ Q_h = \bar{Q}_h + \tilde{Q}_h \end{array} \right. \quad (\text{III.5})$$

Les informations sur la valeur efficace et la phase de l'harmonique de rang h à extraire sont contenues dans les grandeurs continues de \bar{p}_h et \bar{q}_h . Ces dernières ont pour expression :

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{p}_h = V_h \cdot I_c \cdot \cos(\varphi_h - \theta_h) \\ \bar{q}_h = V_h \cdot I_c \cdot \sin(\varphi_h - \theta_h) \end{array} \right. \quad \text{Avec } h = 4k - 1 \quad (\text{III.6})$$

Les courants diphasés après le filtrage sont donnés par :

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha h}^* \\ i_{c\beta h}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{h\alpha}^2 + v_{h\beta}^2} \cdot \begin{bmatrix} v_{h\alpha} & -v_{h\beta} \\ v_{h\beta} & v_{h\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{P}_h \\ \bar{Q}_h \end{bmatrix} \quad (\text{III.7})$$

$$\text{Soit :} \quad \begin{bmatrix} i_{c\alpha h}^* \\ i_{c\beta h}^* \end{bmatrix} = \sqrt{2} \cdot I_{ch} \cdot \begin{bmatrix} \sin(h\omega t - \theta_h) \\ \cos(h\omega t - \theta_h) \end{bmatrix} \quad (\text{III.8})$$

$$i_{c\alpha h}^* = \sqrt{2} \cdot I_{ch} \cdot \sin(h\omega t - \theta_h) \quad (\text{III.9})$$

On remarque que l'amplitude et la phase de la tension V_h et φ_h n'intervient pas dans le résultat final.

On prend comme exemple explicatif des harmoniques inverse, le courant harmonique de rang 3th. Il suffit d'utiliser le système inverse des tensions pour faire la transformation du courant de charge dans l'espace pq , ce système de tension inverse d'ordre 3th correspondant défini comme suit :

$$v_{3\alpha} = V_3 \cdot \sin(-3\omega t + \varphi_3). \quad (\text{III.10})$$

$$v_{3\beta} = V_3 \cdot \sin(-3\omega t + \varphi_3 - 3 \cdot \frac{\pi}{2}). \tag{III.11}$$

Si on calcule les puissances p_3 et q_3 à l'aide de ces tensions, le spectre du courant subit les transformations représentées sur la Figure. III.1.

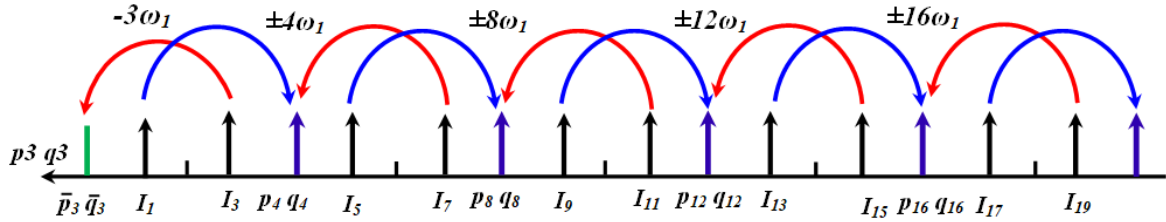
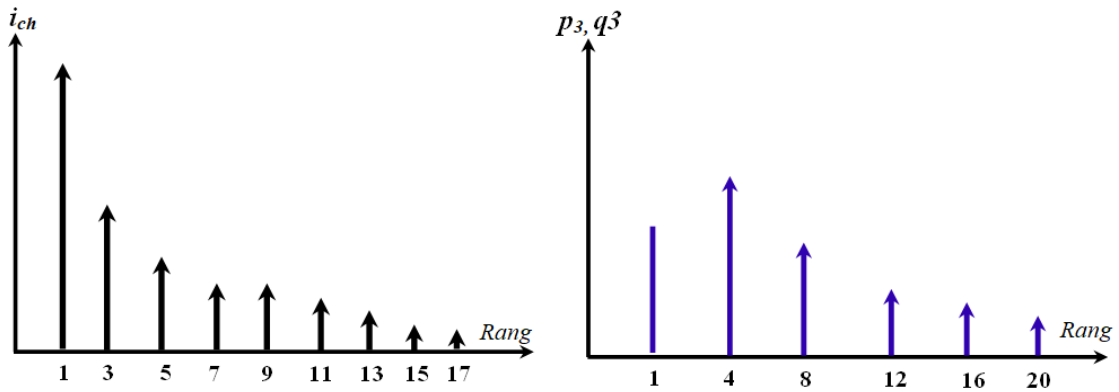


Figure (III- 1) : Transformation du spectre du courant de la charge vers le system de puissance



Figure(III-2) : Spectre du courant de charge et des puissances instantanées p3 q3

L'harmonique 3^{th} du courant de la charge va donc se transformer en composante continue dans l'espace des puissances instantanées comme le montre la Figure. III.2. Cette composante continue nous permet, après un filtrage passe bas, d'identifier la composante harmonique de rang 3^{th} parmi toutes les autres. Cette composante deviendra la référence de courant pour le filtre actif $i_{c\alpha 3}^*$.

La référence finale du courant harmonique d'ordre 3^{th} est calculée après prendre en considération la compensation du courant du bus continu comme suite :

$$i_f^* = \sqrt{2} \cdot I_{ch} \cdot \sin(3 \cdot \omega t - \theta_3) - i_c \tag{III.12}$$

III.3.2. Identification d'un harmonique direct

L'identification d'un harmonique directe du courant de la charge d'ordre ($h=4k+1$) se fait directement en générant un système de tension inverse, ce dernier sera généré par un circuit PLL monophasé, les deux systèmes sont exprimés comme suite :

$$[v_h]_+ = V_h \sqrt{2} \cdot \sin(+h\omega t + \varphi_h) \quad (\text{III.13})$$

$$[i_{ch}]_+ = \sum_{\substack{h=4k+1 \\ k \in \mathbb{N}^*}}^n I_{ch} \sqrt{2} \cdot \sin(+h\omega t + \theta_h) \quad (\text{III.14})$$

Où V_h et φ_h représentent respectivement la valeur efficace et la phase du système monophasé de tension de rang h . Les puissances instantanées ont pour expression :

$$\begin{cases} p_h = [v_h]_+ \cdot [i_{ch}] = v_{h\alpha} \cdot i_{c\alpha} + v_{h\beta} \cdot i_{c\beta} \\ q_h = [v_h]_+ \wedge [i_{ch}] = v_{h\alpha} \cdot i_{c\beta} - v_{h\beta} \cdot i_{c\alpha} \end{cases} \quad (\text{III.15})$$

Avec :

$$\begin{cases} [v_{h\alpha\beta}] = \begin{bmatrix} v_{h\alpha} \\ v_{h\beta} \end{bmatrix}_+ \\ [i_{c\alpha\beta}] = \begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (\text{III.16})$$

Les puissances réelles et imaginaires peuvent être séparées en leurs composantes continues (\bar{p}_h, \bar{q}_h), et en leurs composantes alternatives (\tilde{p}_h, \tilde{q}_h) de la façon suivante :

$$\begin{cases} p_h = \bar{p}_h + \tilde{p}_h \\ q_h = \bar{q}_h + \tilde{q}_h \end{cases} \quad (\text{III.17})$$

$$\begin{cases} \bar{p}_h = V_h \cdot I_{ch} \cdot \cos(\varphi_h - \theta_h) \\ \bar{q}_h = V_h \cdot I_{ch} \cdot \sin(\varphi_h - \theta_h) \end{cases} \quad (\text{III.18})$$

Les courants diphasés après le filtrage sont donnés par :

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha h}^* \\ i_{c\beta h}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{h\alpha}^2 + v_{h\beta}^2} \begin{bmatrix} v_{h\alpha} & -v_{h\beta} \\ v_{h\beta} & v_{h\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p}_h \\ \bar{q}_h \end{bmatrix} \quad (\text{III.19})$$

$$\text{Soit :} \quad \begin{bmatrix} i_{c\alpha h}^* \\ i_{c\beta h}^* \end{bmatrix} = \sqrt{2} \cdot I_{ch} \cdot \begin{bmatrix} \sin(h\omega t - \theta_h) \\ \cos(h\omega t - \theta_h) \end{bmatrix} \quad (\text{III.20})$$

Dans le système monophasé, on prend uniquement la composante de référence sur l'axe α

$$i_{cch}^* = \sqrt{2} \cdot I_{ch} \cdot \sin(h \cdot \omega t - \theta_h) \tag{III.21}$$

L'exemple significatif des harmoniques directes, on prend le courant harmonique d'ordre 5^{th} , donc ce courant se transformera en composante continue de l'espace des puissances instantanées active et réactive, et les autres courants vont changer leurs fréquences dans cet espace des puissances instantanées ($\pm h4\omega_1$), comme la montre la Figure. III. 3.

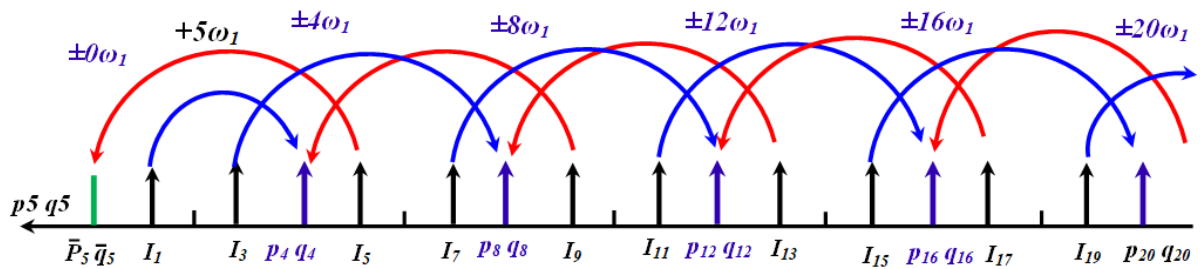
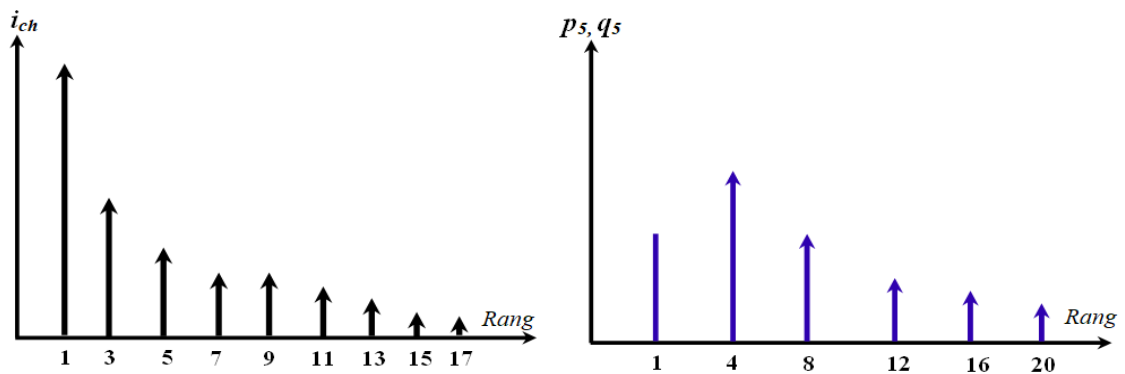


Figure (III-3) : Transformation du spectre du courant de la charge vers le system de puissance



Figure(III-4) : Spectre du courant de charge et des puissances instantanées p5 q5

La Figure.III.4 montre le spectre harmonique du courant de la charge et le spectre harmonique des puissances active et réactive engendré, on aura une composante active et réactive constante, et des composantes actives et réactive alternative. Le diagramme d'identification sélective simultanée des deux premier harmoniques 3^{th} , 5^{th} , est illustré dans la Figure. III.5.

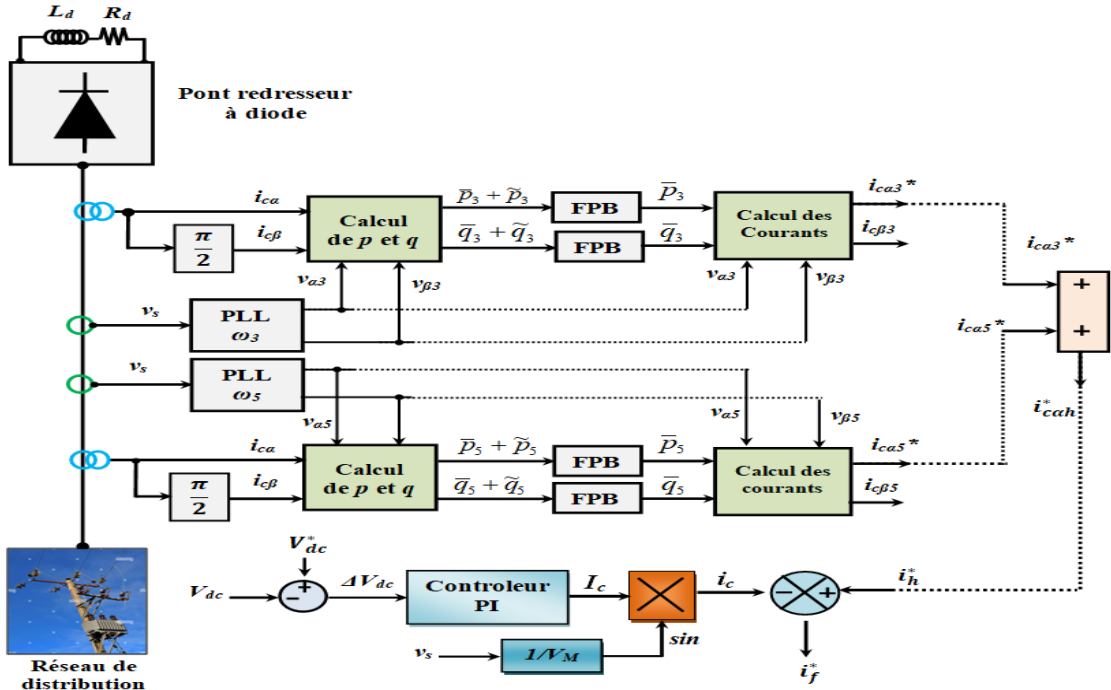


Figure (III-5) : Identification simultanée des courant harmonique 3th et 5th par p q classique

III.4. FAP sélectif monophasé par la méthode p q modifie

Le principe de la méthode de puissance instantanée ($p-q$) modifiée dans un système de filtrage actif parallèle monophasé, est consisté à extraire les composantes de la puissance active et réactive relative au courant harmonique désiré à extraire [7][31].

Dans un système monophasé, les harmoniques du courant de la charge peuvent être représentés par la formule suivante ($4K \pm 1$), dont $K = 0 \dots n$, donc la série des harmoniques de courant dans un système monophasé est incluse l'harmonique d'ordre 3^{th} et le multiple de 3^{th}

$$i_{ch} = i_{c1} + i_{c3} + i_{c5} + i_{c7} + \dots + i_{cn} \quad (III.22)$$

Donc la pulsation de propagation des harmoniques de courant du système direct et inverse sont donné par l'équation suivante :

$$\begin{cases} [i_{ch}]_+ = i_{c1} + i_{c5} + i_{c9} + \dots + i_h (h = 4k + 1) \\ [i_{ch}]_- = i_{c3} + i_{c7} + i_{c11} + \dots + i_h (h = 4k - 1) \end{cases} \quad (III.23)$$

La puissance active et réactive est calculée après la création des composantes imaginaire de la tension du réseau $v_{s\beta}$ et courant de charge $i_{c\beta}$ sur l'axe ($\alpha-\beta$), par un déphasage de 90 degré par rapport le signale originale (tension et courant) comme le montre les équations (III.24-25)

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{\substack{h=4k+1 \\ k \in N^*}}^n I_{ch} \sqrt{2} \cdot \sin(h\omega t + \theta_h) \\ \sum_{\substack{h=4k+1 \\ k \in N^*}}^n I_{ch} \sqrt{2} \cdot \sin(h\omega t + \theta_h - h\frac{\pi}{2}) \end{bmatrix} \quad (\text{III.24})$$

$$\begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_M \cdot \sin(\omega t + \varphi_h) \\ V_M \sin(\omega t + \varphi - \frac{\pi}{2}) \end{bmatrix} \quad (\text{III.25})$$

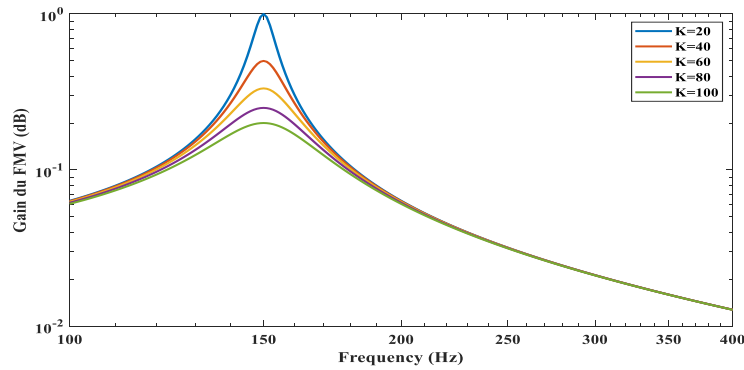
La puissance active et réactive peuvent être décrit par l'expression suivante :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & v_{s\beta} \\ -v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{III.26})$$

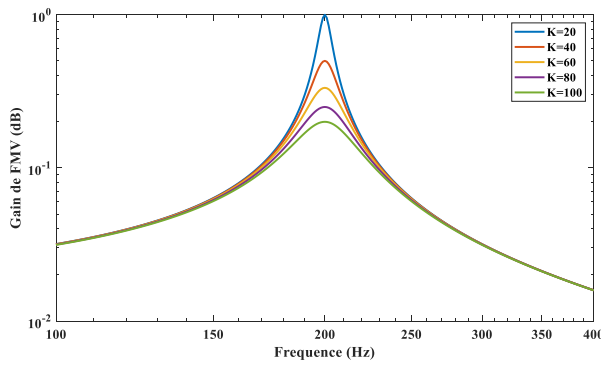
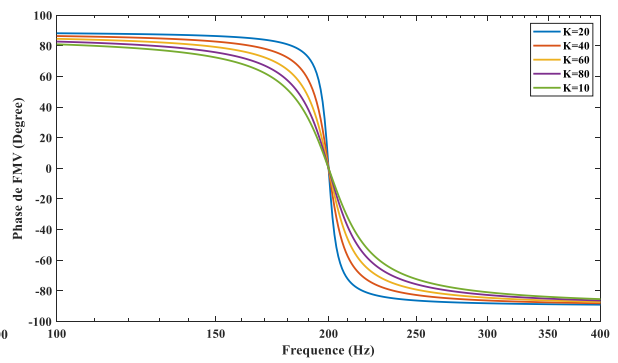
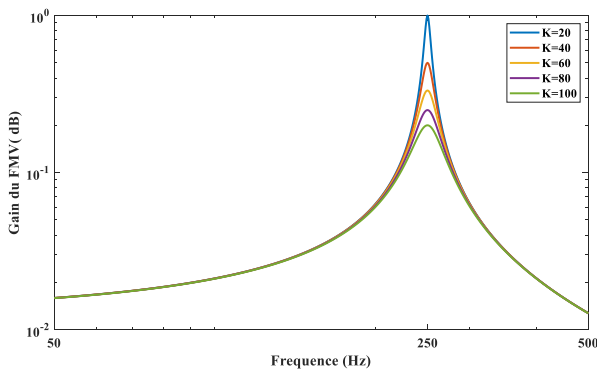
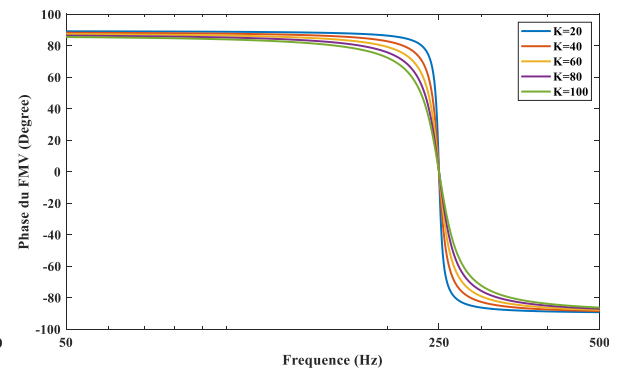
$$\begin{cases} p = \bar{p}_1 + p_3 + p_5 + p_7 + \dots p_n \\ q = \bar{q}_1 + q_3 + q_5 + q_7 + \dots q_n \end{cases} \quad (\text{III.27})$$

Pour extraire la composante de puissance active et réactive relative à aux courant harmonique désiré à extraire, il suffit d'utiliser un filtre multi variable ajusté sur pulsation de coupure dans le plan de puissance p q . Donc pour réaliser un filtrage actif sélectif par un filtre multi variable, il suffit de tracer le diagramme de Bode pour chaque harmonique concerné

D'ailleurs, si nous traçons le diagramme de *Bode* de cette fonction de transfert nous trouverons des similitudes avec un filtre passe bande. Supposant maintenant que nous ajoutons deux nouvelles constantes K_1 et K_2 dans la fonction de transfert (II.14), Si on pose K_2 égale à 20 et on fait varier K_1 , la Figure.III.6 montre le tracé du diagramme de *Bode* en de la gain et de la phase de cette fonction de transfert pour la phase et le gain pour différents fréquence de coupures et paramètres K_1 de la fonction de transfert.



(a) gain du FMV pour 3th

(c) gain du FMV pour 4th(d) phase du FMV pour 4th(a) gain du FMV pour 5th(b) phase du FMV pour 5th**.Figure (III-6) : (a, b) Diagramme de Bode pour les harmoniques d'ordre 3th, 4th et 5th**

D'après les Figure. III.6, on constate que:

- ✓ Pour des fréquences de coupure de 150Hz, 200Hz et 250Hz relative aux harmoniques d'ordre 3th, 4th et 5th l'angle de phase du diagramme de Bode est nul. Ce qui signifie que les signaux d'entrées et de sorties de la composante fondamentale sont en phases, c.à.d. le déphasage introduit par le FMV est égal à zéro et ça convient pour la valeur de $K=20$.
- ✓ Pour $K = 20$, le gain de la fonction est unitaire ou nul ($|H(s)| = 0 \text{ dB}$), pour chaque fréquence de coupure 150Hz, 200Hz et 250Hz respectivement.

Selon les axes $(\alpha-\beta)$, les expressions liant les composantes de puissance en sortie $p_h q_h$ du FMV avec les composantes d'entrées de puissance $p q$ sont montré par les équations (III.28) et (III.29)

$$p_h = K \cdot \frac{(s + K)}{(s + K)^2 + \omega_c^2} p(s) - \frac{K\omega_c}{(s + K)^2 + \omega_c^2} q(s) \tag{III.28}$$

$$q_h = \frac{K\omega_c}{(s + K)^2 + \omega_c^2} p(s) + K \frac{(s + K)}{(s + K)^2 + \omega_c^2} q(s) \tag{III.29}$$

III.4.1. Identification sélective des harmoniques direct et inverse par p q modifie

La puissance active et réactive est décomposée en deux parties, partie constante et partie alternative, la partie constante est correspondre au fondamentale du courant et la partie alternative correspondre aux harmoniques du système directe et inverse comme le montre la Figure.III.7.

Pour les harmonique inverse, La transformation du courant de la charge non linéaire dans l'espace de puissance instantanée active et réactive, dont leur pulsations de propagations est représenté par $(-4\omega h)$.

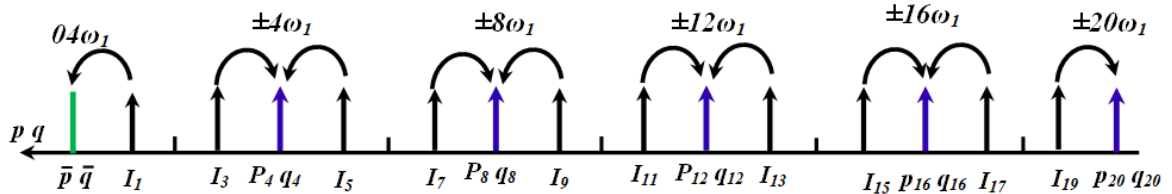
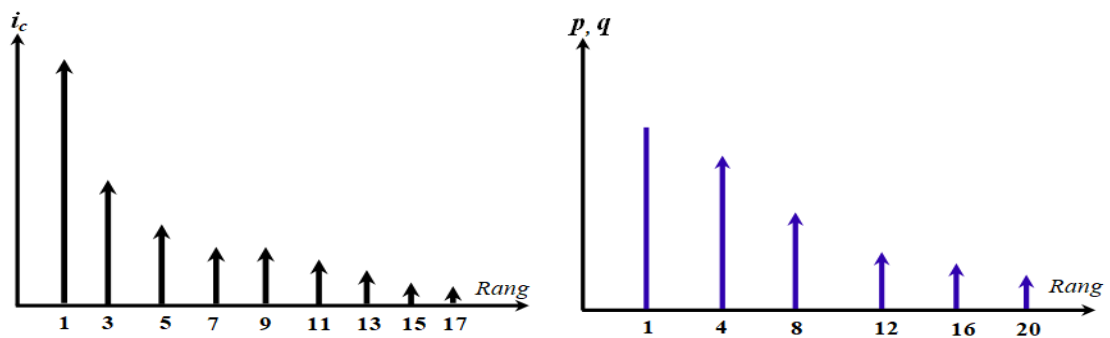


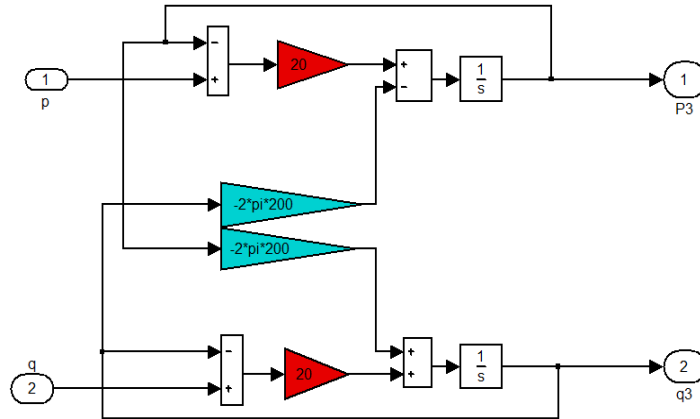
Figure (III-7) : Transformation du spectre du courant de la charge vers le system de puissance

La représentation spectrale du courant de charge et la puissance active et réactive de la charge est montrée dans la Figure. III.8.



Figure(III-8) : Système de puissance utilisé.

Donc la pulsation le courant harmonique d'ordre 3th dans l'espace de courant ($-3\omega_l$) se transfert dans l'espace de puissance active et réactive pq ($-4\omega_l$), il suffit d'utiliser un FMV avec pulsation de coupure ($-4\omega_l$) comme illustre dans la Figure. III.9.



Figure(III-9): Extraction de 3th harmoniques dans l'espace p q par FMV

Pour les harmonique direct, La transformation du courant de la charge non linéaire dans l'espace de puissance instantanée active et réactive, dont leur pulsations de propagations est représenté par ($+4\omega_h$).

La pulsation le courant harmonique d'ordre 5th dans l'espace de courant ($5\omega_l$) se transfert dans l'espace de puissance active et réactive $p q$ ($+4\omega_l$), il suffit d'utiliser un FMV avec pulsation de coupure ($+4\omega_l$) comme illustre dans la Figure. III.10.

Le diagramme globale d'identification sélective simultanée des harmoniques d'ordre 3th et 5th est illustré dans la Figure. III.11.

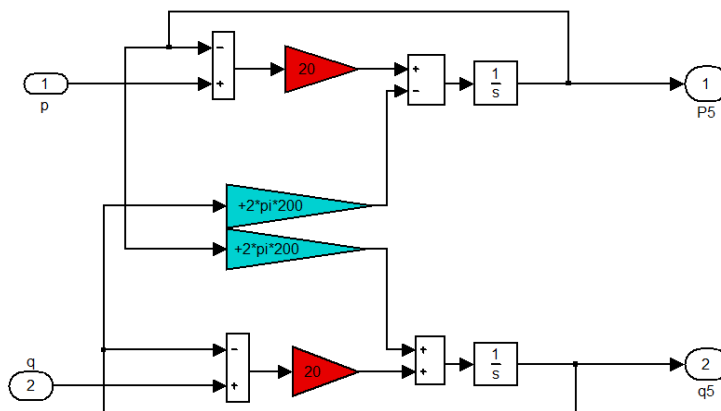


Figure (III-10) : Extraction de 5th harmoniques dans l'espace pq par FMV

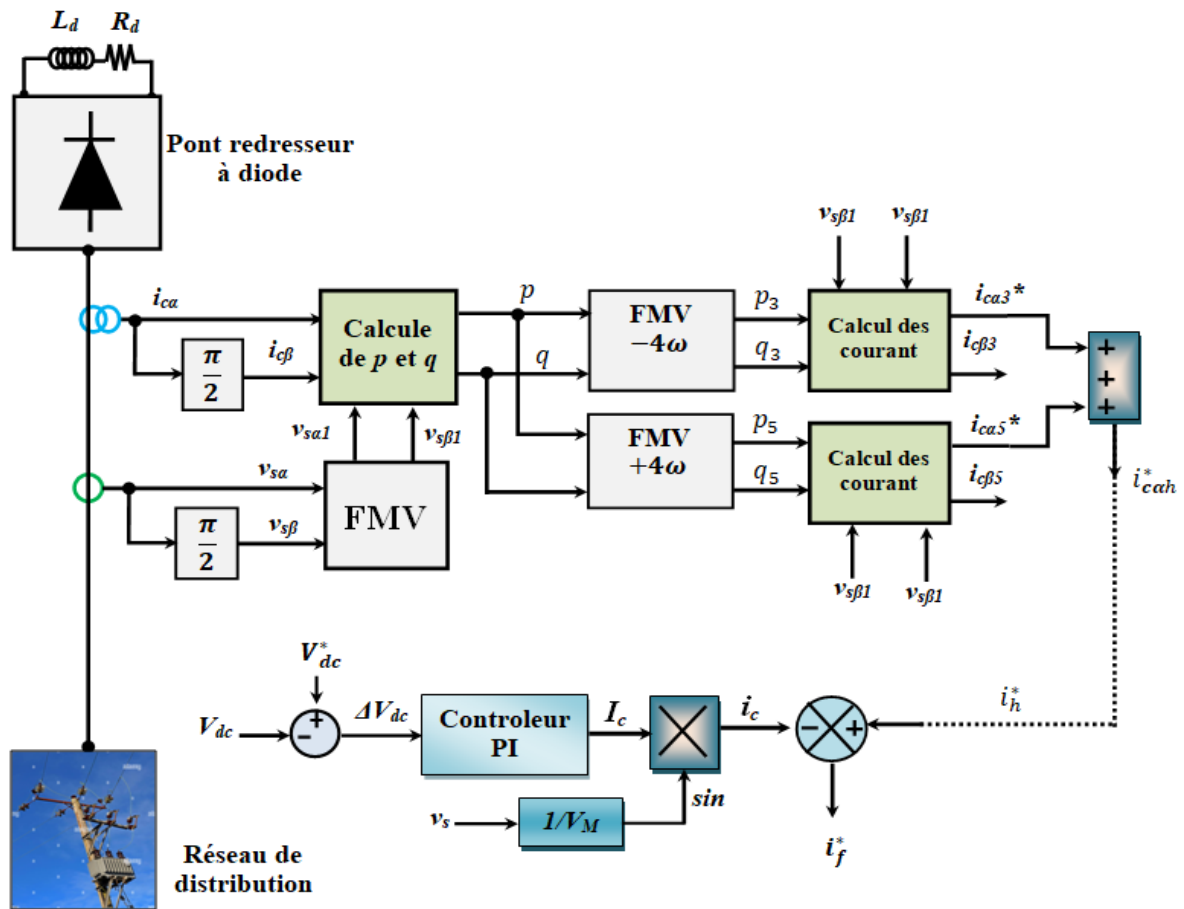


Figure (III-11) : Structure et principe du FAP monophasé

III.5. Comparaison entre la méthode monophasé (p q) classique et modifie

D'après le diagramme d'identification sélectif simultané triphasé des harmoniques 3^{th} et 5^{th} , pour les deux algorithmes de puissance instantanée active et réactive classique et modifiée, on peut constater que la méthode (p q) modifiée est mieux que la méthode (p-q) classique, parce que la méthode (p q) modifiée utilise un seul FMV pour un seul harmonique isolé (avantage économique), un seul block de calcul des puissances active et réactive pour tous les harmoniques sélectionnés, aussi un seul block de calcul du courant (taux de calcul réduit). Les résultats de comparaison sont montrés dans le Tableau III.1.

Tableau III-1: Comparaison entre la méthode (p-q) classique et modifiée

3^{th} & 5^{th}	N°-B-Filtre	N° -B- Puissance	N°-B-Current	N° PLL
(pq)	4 FPB	2	2	2
(pq-FMV)	3 FMV	1	1	0

III.6. Résultats de simulation

La simulation d'un filtre actif monophasé par action sélective est réalisée sous environnement Matlab/Simulink. La Tension de réseau sinusoïdal ($v_s/25$), la méthode $p q$ modifié est utilisée, pour la commande de l'onduleur monophasé de tension on utilise la commande hystérésis. Les mêmes paramètres du système simulé pour le cas du filtrage actif global des harmoniques.

III.6.1. Filtrage actif sélectif du courant harmonique d'ordre 3th

La Figure. III. 12 montre les formes d'ondes de la tension de source ($v_s/25$), le courant de la charge i_{ch} (qui le courant de source avant le filtrage), le courant de source i_s , le courant de filtre i_f (injecté par le filtre actif monophasé) et la tension du bus continu V_{dc} du condensateur de stockage du FAP C_{dc} , la pulsation de coupure du FMV pour le filtrage de l'harmonique du courant d'ordre 3th est ajusté à $\omega_3 = -2 * \pi * 200 \text{Hz}$.

On remarque que la forme d'onde du courant de source après le filtrage du courant de l'harmonique 3th est rapprochée à la forme d'onde sinusoïde, et la lecture de son taux de distorsion harmonique et son spectre harmonique avant et après le filtrage montre que l'harmonique d'ordre 3th a été filtré comme illustre la Figure. III.13 (a-c) illustre bien que le courant harmonique 3th est compensé. La THD du courant de source passe de 20.10% vers 12.00%, le taux d'atténuation de cet harmonique est passe de 15.95% vers 0.57% comme illustre dans le Tableau.III.2 (la norme IEEE-519 a été respectée). Aussi le bus continu V_{dc} est constante, cela jugé le meilleur rôle du régulateur PI à garder cette tension constante avec bon temps de réponse.

Tableau III-2 : Taux d'atténuations après le filtrage du courant l'harmonique 3th

I_h	I_3	I_5	I_7	I_9	THD%
I_s avant FA	15.94%	9.13%	5.89%	3.96%	20.10%
I_s après FA-3 th	0.57%	8.74%	5.72%	3.79%	12.00%

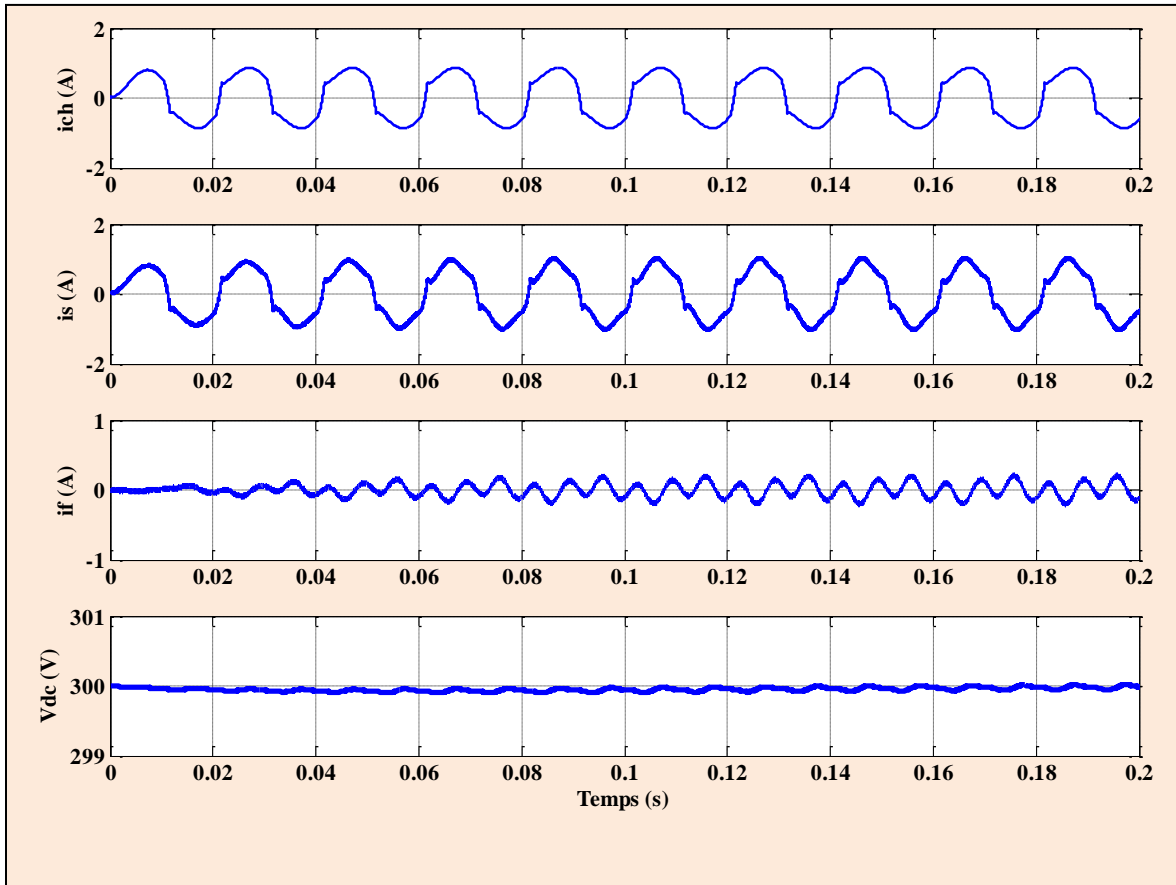
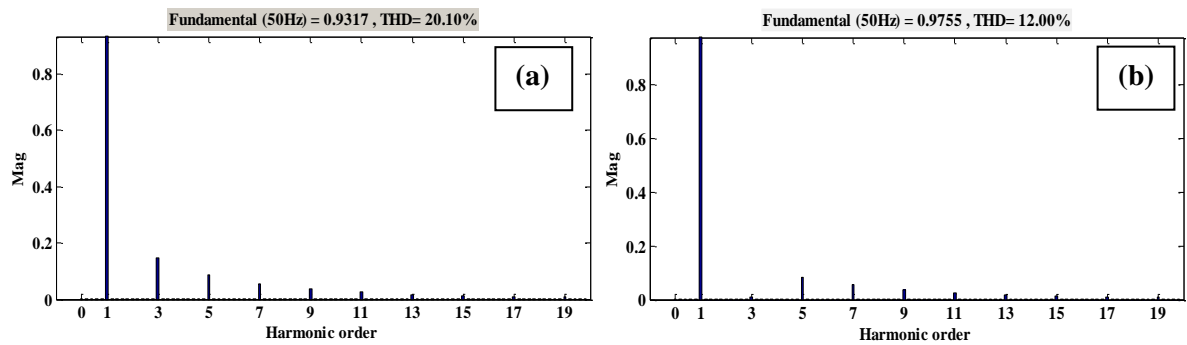
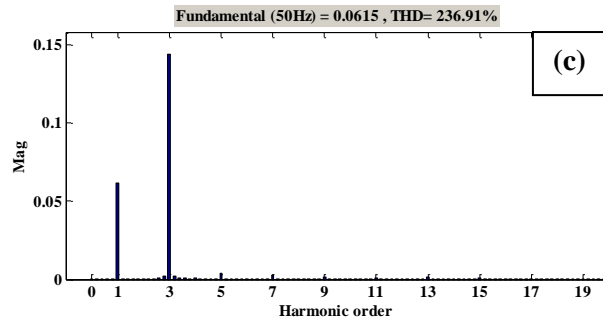


Figure (III-12): Filtrage sélectif du courant harmonique d'ordre 3th





Figure(III-13) : (a, b, c). Spectres harmonique du courant i_{ch} , i_s et i_f

D'après la Figure. III. 14, on constate après le FAP du courant harmonique d'ordre 3th, le facteur de puissance FP passe de 0.863 à 0.9, le THD passe de 20% à 12%, aussi le $\cos\phi=0.9$. On remarque que le FMV est capable d'extraire la composante de puissance active et réactive relative au courant harmonique 3th comme illustre dans la Figure.III.15. C'est l'avantage majeur de la méthode pq modifiée par rapport la méthode pq classique.

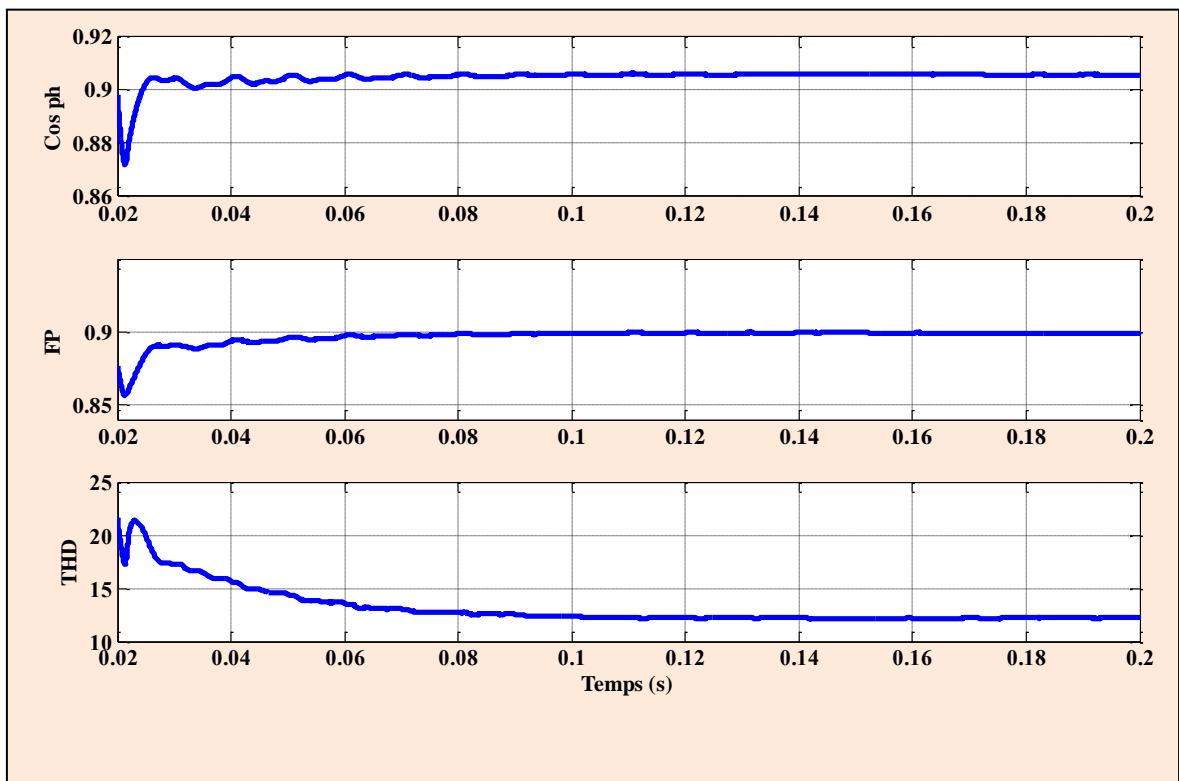


Figure (III-14) : FP et THD du courant de source après le filtrage d'harmonique d'ordre 3th

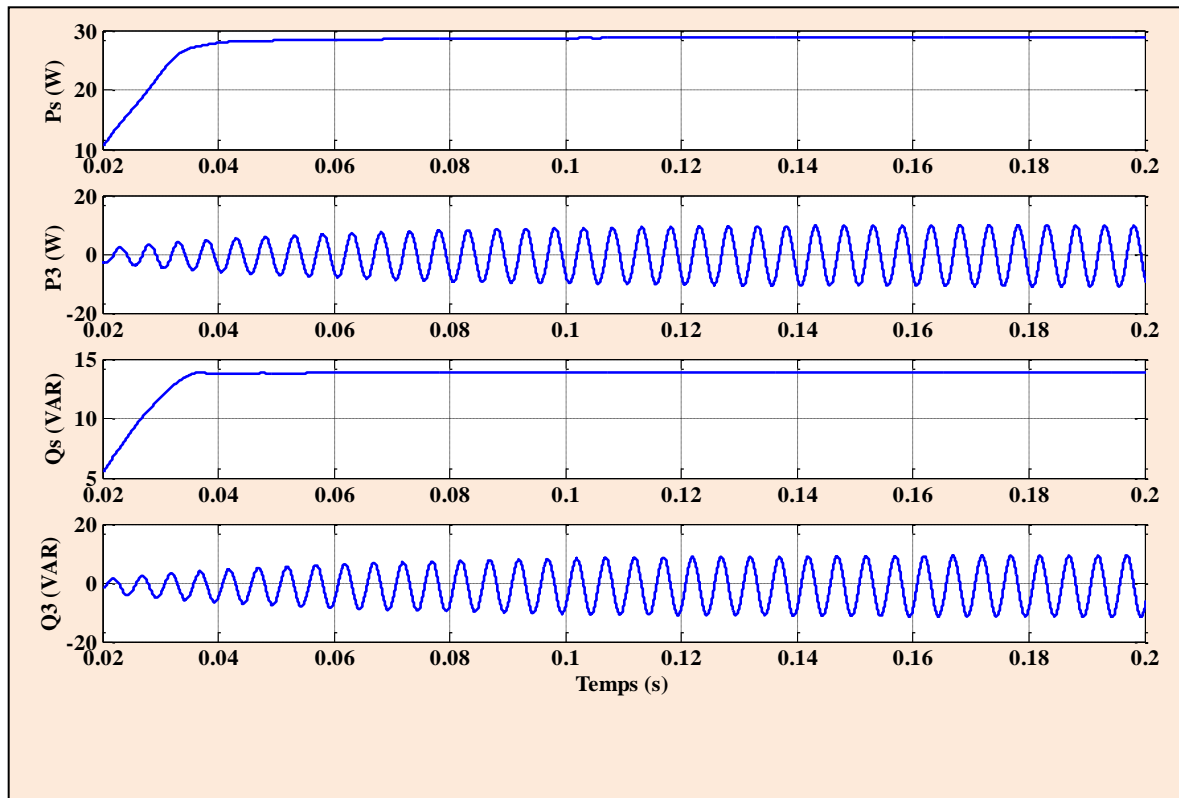


Figure (III-15) : Puissance active et réactive relative à l'harmonique d'ordre 3th

III.6.2.FAP sélectif du 3th sous tension de distordue avec la méthode $p q$ classique

Dans ce teste, à l'instant $0.4s$ on peut alimenter la charge non linéaire avec une tension distordue $THD v_s=44,72\%$ (riche en 3th et 5th) avec $p q$ classique. On remarque que le courant de source après le filtrage est reste distordue comme le montre la Figure.III.16, dont son THD est augmenté passe de 10.57% à 19.14%. Cela confirmé que la méthode $p q$ classique est perde ses performances dans cette condition de fonctionnement.

Tableau III-3 : Taux d'atténuations après le filtrage de 3th avec vs distordue

I_h	I_3	I_5	I_7	I_9	THD%
I_s avant FA	2.94%	9.29%	5.58%	1.89%	10.67%
$I_s\%$ après FA-3 th	17.35%	6.35%	3.81%	2.40%	19.14%

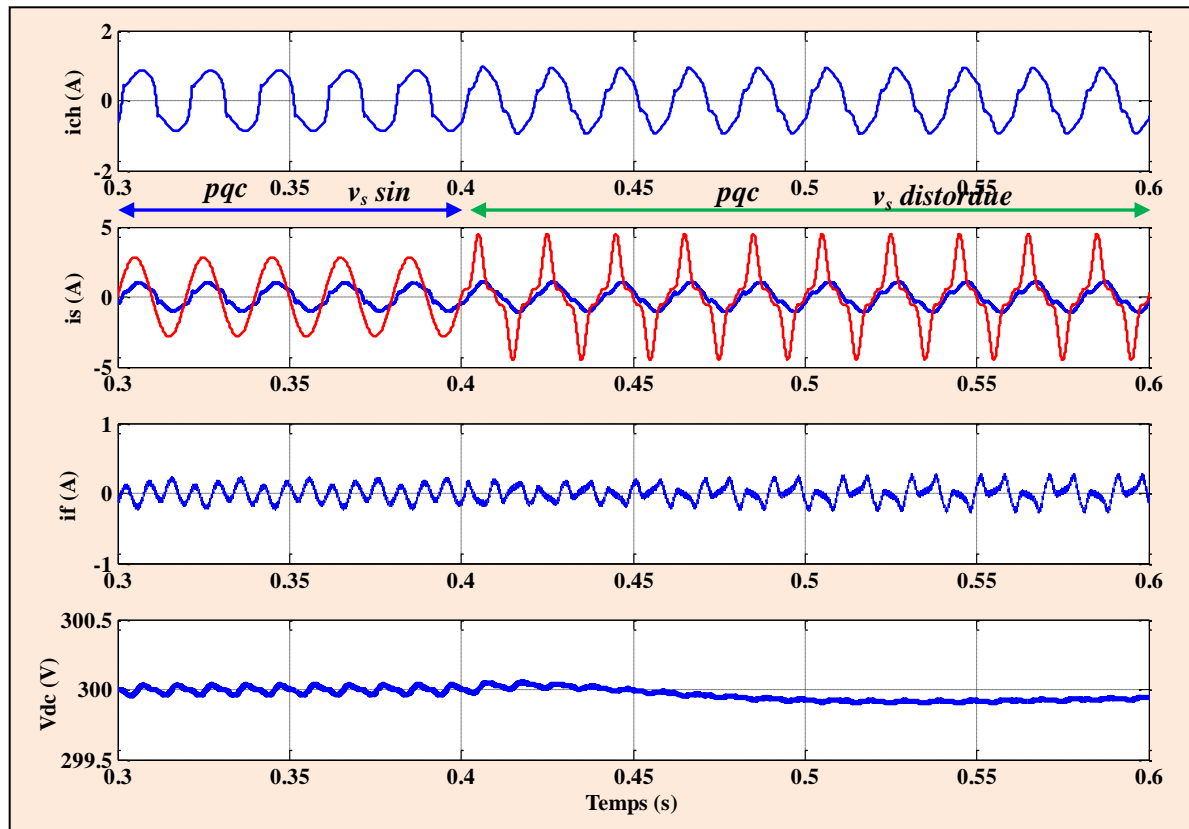


Figure (III-16) : Effet du v_s distordue sur la qualité du filtrage avec pq classique

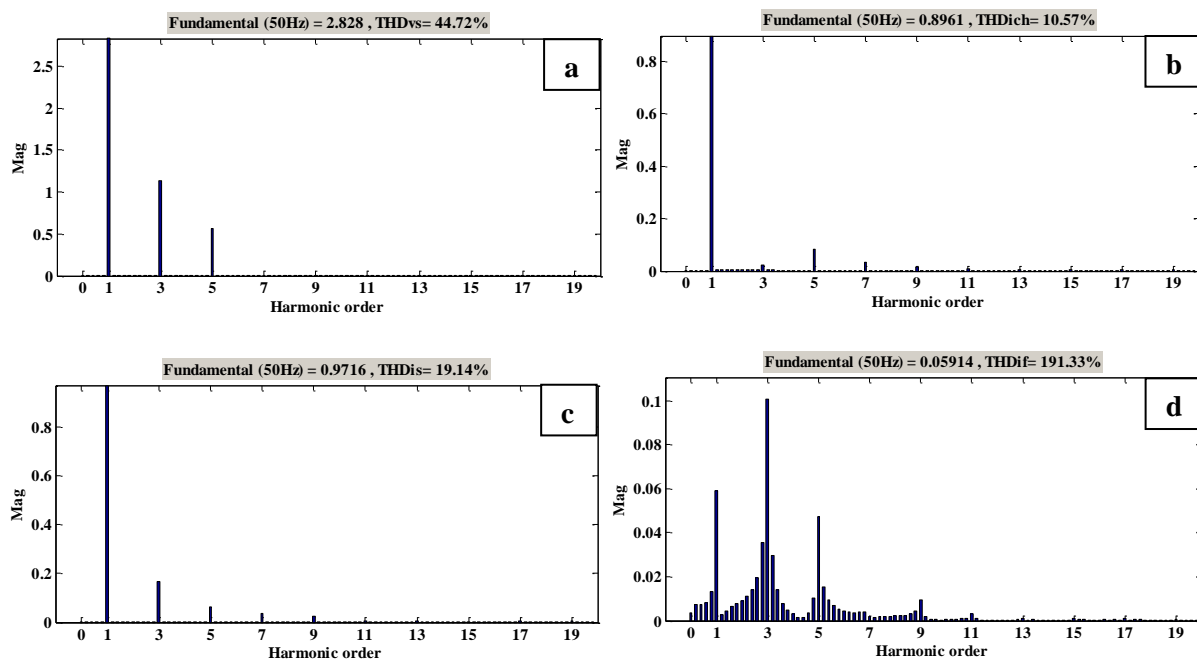


Figure (III-17) : (a, b, c). Spectres harmonique du v_s , i_{ch} , i_s et i_f

III.6.3.FAP sélectif du 3th sous tension de distordue avec la méthode p q modifie

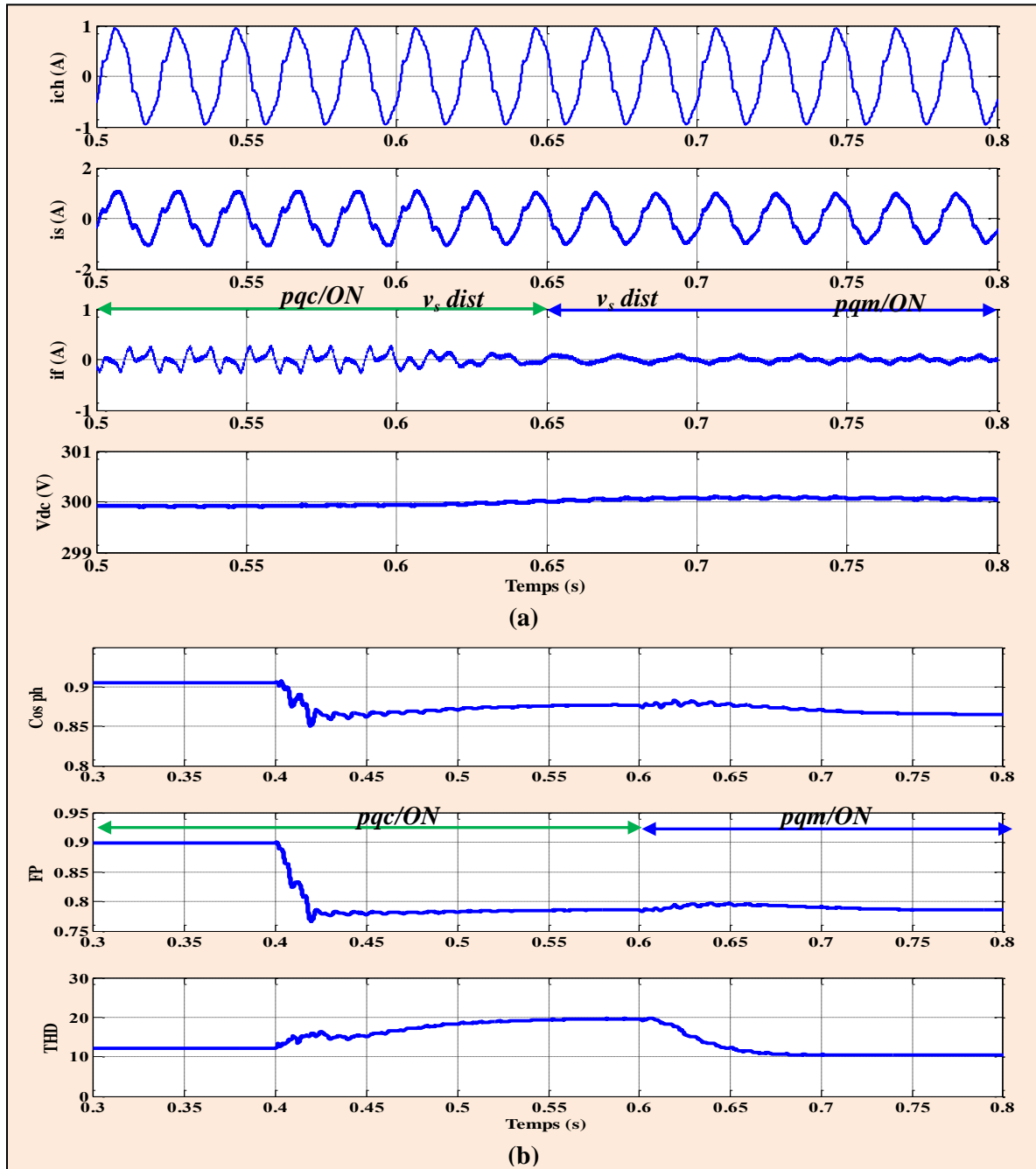
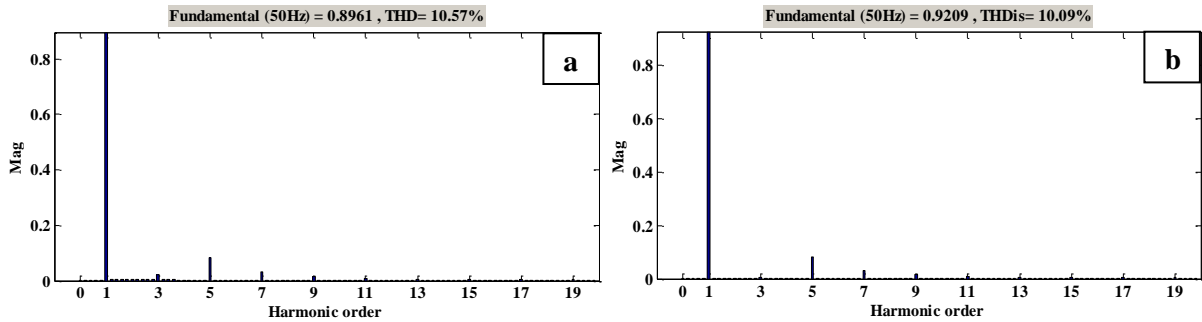


Figure (III-18) : (a ,b). Impact du p q modifie sur la qualité du filtrage avec v_s distordue

Dans ce cas, et après l'activation la méthode p q modifie à l'instant $0.6s$, on remarque que la forme d'onde du courant de source après le filtrage de l'harmonique 3 est devenu proche de

sinusoïdal (voir la Figure.III.18), le spectre harmonique du courant de source montre que le courant harmonique est entièrement filtré, donc le taux d'atténuation passe de 2.94% à 0.64%, (voir le Tableau.III.4) et le THD du courant de source est passe de 10,57% à 10.09% (voir la Figure.III.19) . Cela justifié la robustesse de cette méthode. Aussi le facteur de puissance est légèrement amélioré.



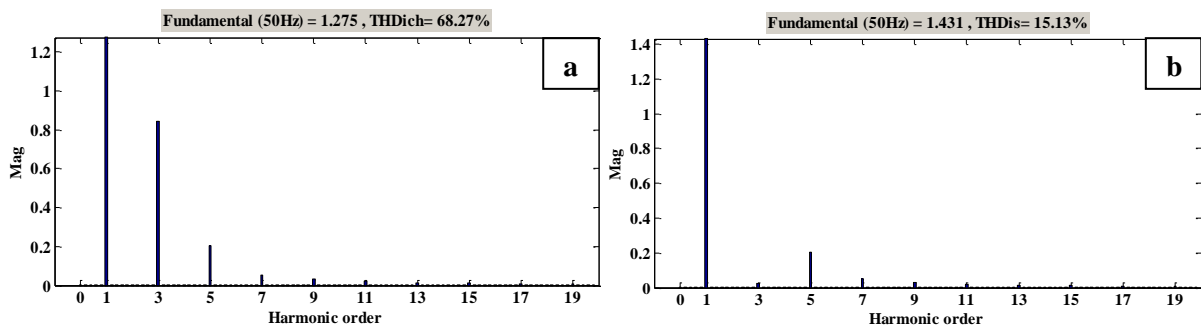
Figure(III-19) : (a, b). Spectres harmonique du ich et is

Tableau III-4 : Taux d'atténuations après le filtrage de 3th avec vs distordue

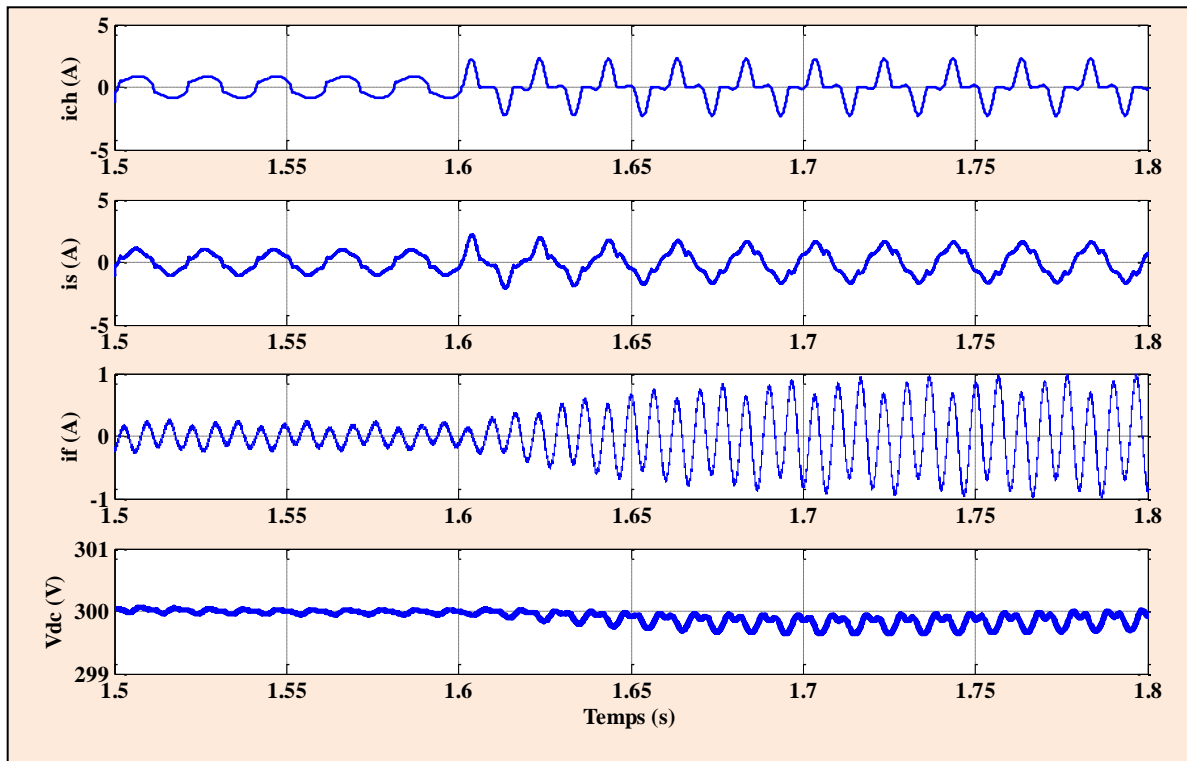
I_h	I_3	I_5	I_7	I_9	THD%
I_s avant FA	2.94%	9.29%	5.58%	1.89%	10.57%
I_s après FA-3 th	0.64%	8.91%	3.38%	1.91%	10.09%

III.6.4.FAP sélectif du 3th avec charge capacitive

Dans le cas où la tension de réseau sinusoïdal, et après l'insertion d'un condensateur de filtrage $C_d=40\mu F$ après le pont PD2 à diode à l'instant $1.6s$. Avec la méthode pq modifiée, on observe que le courant de charge est fortement distordu et le mécanisme filtre actif a pu filtrer le courant harmonique d'ordre 3th comme illustre la Figure.III.21, la THD du courant de source passe de 68.27% avant le filtrage à 15.13% après le filtrage de l'harmonique 3th (voir la Figure.III.20). le taux d'atténuation de l'harmonique concerné est passe de 66.08% avant le filtrage à 1.61% après le filtrage, donc la norme IEEE-519 est respecté (Tableau.III.5)



Figure(III-20) : (a,b). Spectres harmonique du courant de source avant et après le filtrage

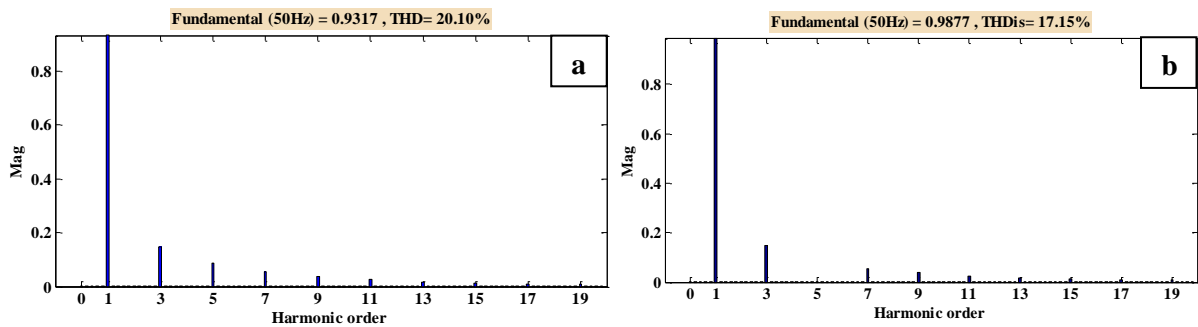


Figure(III-21) : FAP sélectif avec charge frottement capacitive

Tableau III-5: Taux d'atténuations après le filtrage de 3th avec charge capacitive

I_h	I_3	I_5	I_7	I_9	THD%
I_s avant FA	66.08%	16.19%	4.32%	2.67%	68.27%
I_s % après FA-3 th	1.61%	14.10%	3.79%	2.27%	15.13%

III.6.5.FAP sélectif du courant harmonique 5th avec charge inductive



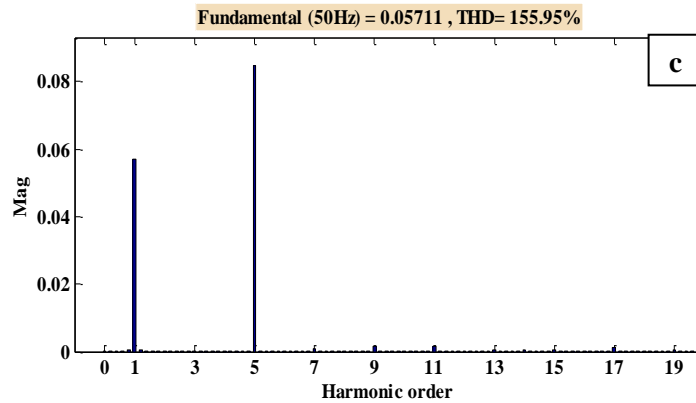


Figure (III-22) : (a,b,c). Spectres harmonique du courant de source avant et après le FA du 5th

La Figure.III.23 montre le filtrage actif parallèle monophasé de l'harmonique du courant d'ordre 5th, la forme d'onde du courant de source après le filtrage est légèrement amélioré, mais après lecture du son spectre démontré sur la Figure.III.22, que le courant d'ordre 5th est filtré et le courant injecté par le filtre contient uniquement l'harmonique 5th.

Le taux d'atténuation des courants harmoniques du courant de source est récapitulé dans le tableau.III.6, il passe de 9.123% à 0.13%. (IEEE-519 respectée)

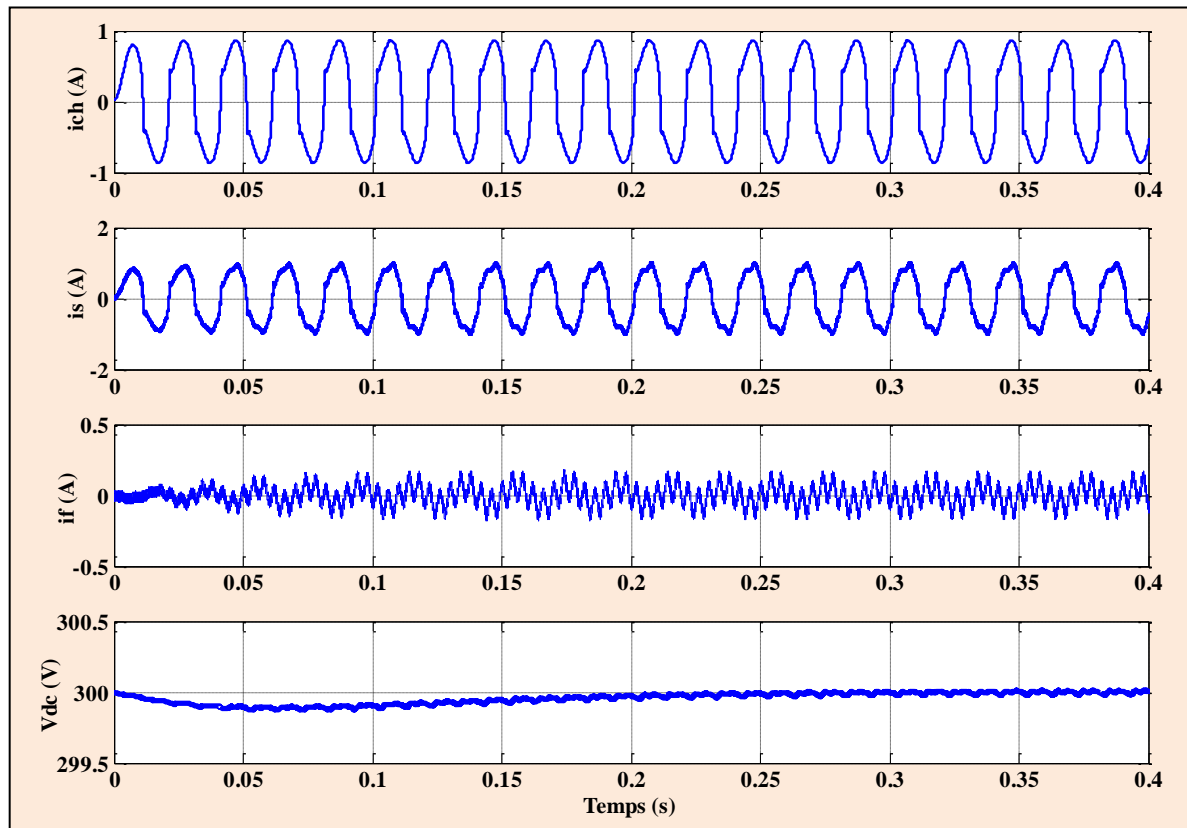


Figure (III-23) : FAP sélectif du courant harmonique d'ordre 5th

Tableau III-6 : Taux d'atténuations après le filtrage de 5th

I_h	I_3	I_5	I_7	I_9	THD%
I_s avant FA	15.94%	9.13%	5.89%	3.96%	20.10%
I_s % après FA-5 th	15.07%	0.13%	5.51%	3.88%	17.15%

III.6.6. Filtrage actif sélectif simultanée des harmoniques d'ordre 3th, 5th et 7th

Dans ce cas, nous avons utilisé trois FMV, dont leurs pulsation sont les a pulsation de coupure des FMV utilisés sont $\omega_{c3}=-4\omega_1$, $\omega_{c5}=+4\omega_1$ et $\omega_{c7}=-8\omega_1$ respectivement pour l'extraction de la composante de puissance active et réactive relative aux courant harmoniques d'ordre 3th, 5th et 7th. Donc nous avons illustré plusieurs résultats comme suite :

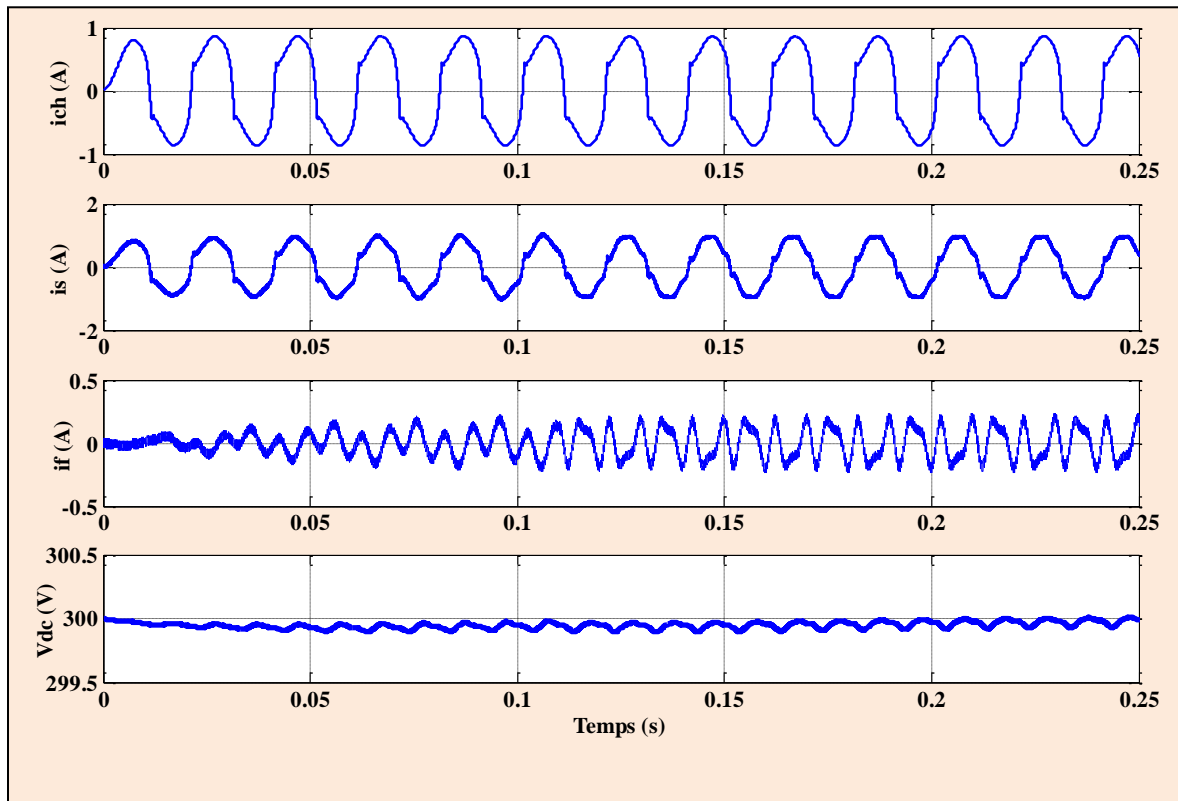
D'après la Figure.II.24, on constate que le courant de source est récupère sa forme d'onde sinusoïdale après le filtrage successive de l'harmonique 3th puis l'harmonique 5th à l'instant 0.1s. la THD du courant de source es passe de 20.% à 8% .

Pour le cas d'une charge capacitive, le FAP garde ses performance sélectives assure un courant de réseau sinusoïdal à l'aide de la robustesse de la commande adopté et le meilleur comportement de la technique $p q$ modifie comme illustré dans la figure.III.25.

La dynamique du filtre multi variable pour extraire les composantes de puissance active et réactive aux harmoniques des courants désirés sur le plan de puissance $p q$ est montrée sur la Figure.III.26 (la pulsation de coupure pour chaque rang harmonique 3th et 5th respectivement sont $\omega_{c3}=4\omega$).

Le cas du filtrage active sélective simultanée des trois premier harmoniques sont montrés sur la Figure.III.27, elle démontre que la le courant de source est purement sinusoïdale après le filtrage, et après la lecture du spectre harmonique du courant de source, courant charge et le courant filtre, il apparue que la THD est passe de 20.01% à 5.95%, donc la norme IEE-519 fortement accepté (voir Figure.III.29).

Le facteur de puissance après le filtrage simultanée des trois premier harmonique est amélioré, il prend la valeur de FP=0.91 (voir Figure.III.28), cela justifié le bon mécanisme de filtrage et control en temps réal des harmonique gênant.



Figure(III-24) : FAP sélectif simultanée des harmoniques 3th et 5th avec charge inductive

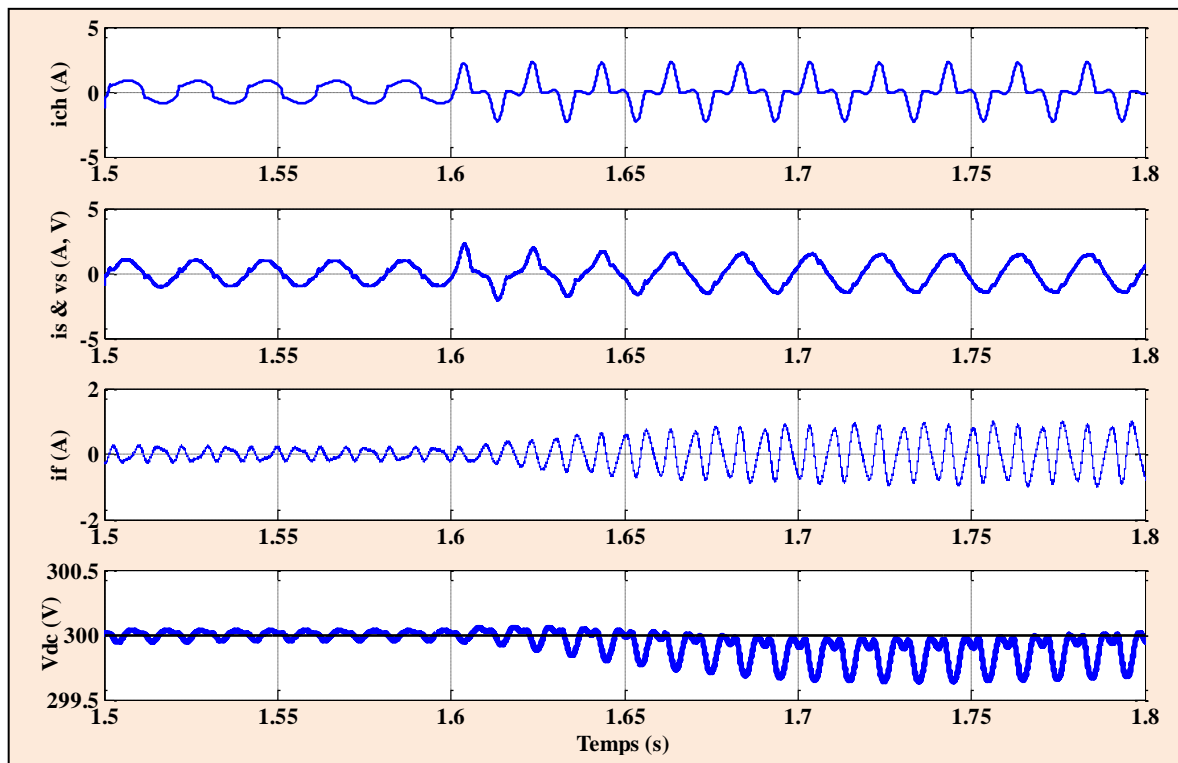


Figure (III-25) : FAP sélectif simultanée des harmoniques 3th et 5th avec charge capacitive

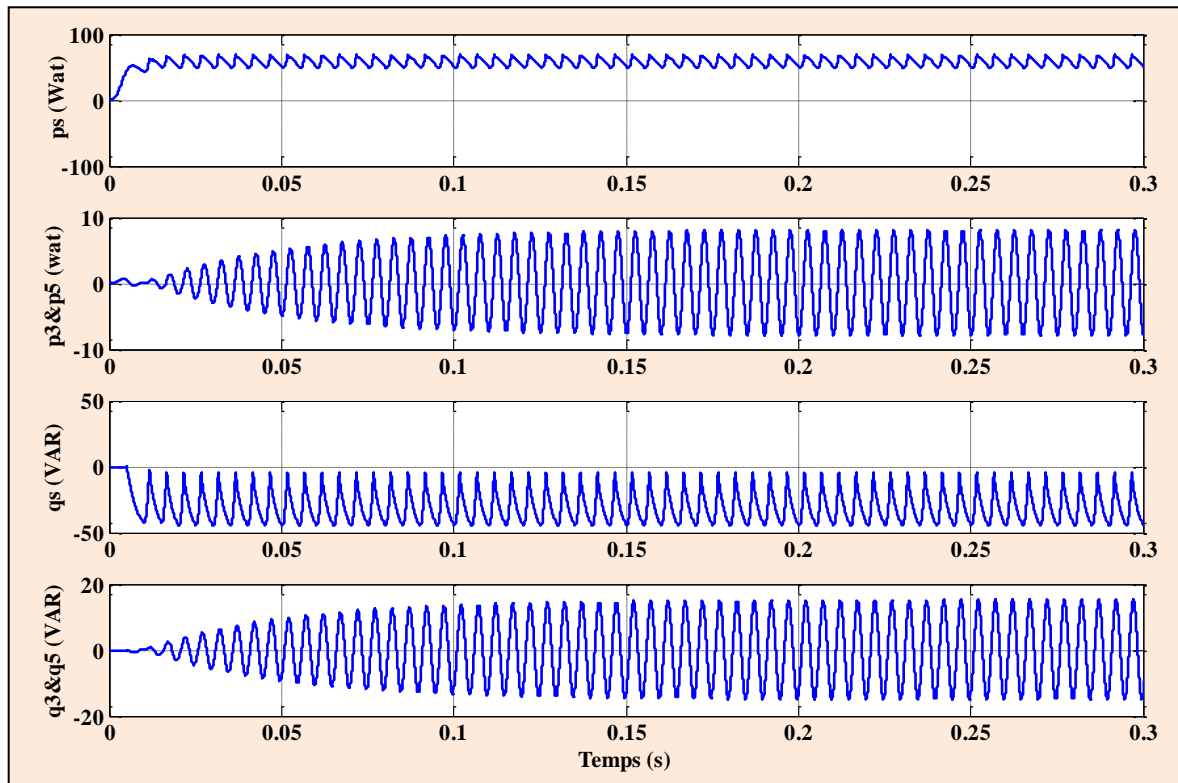


Figure (III-26) : Puissance active et réactive relative à l'harmonique d'ordre 3th et 5th

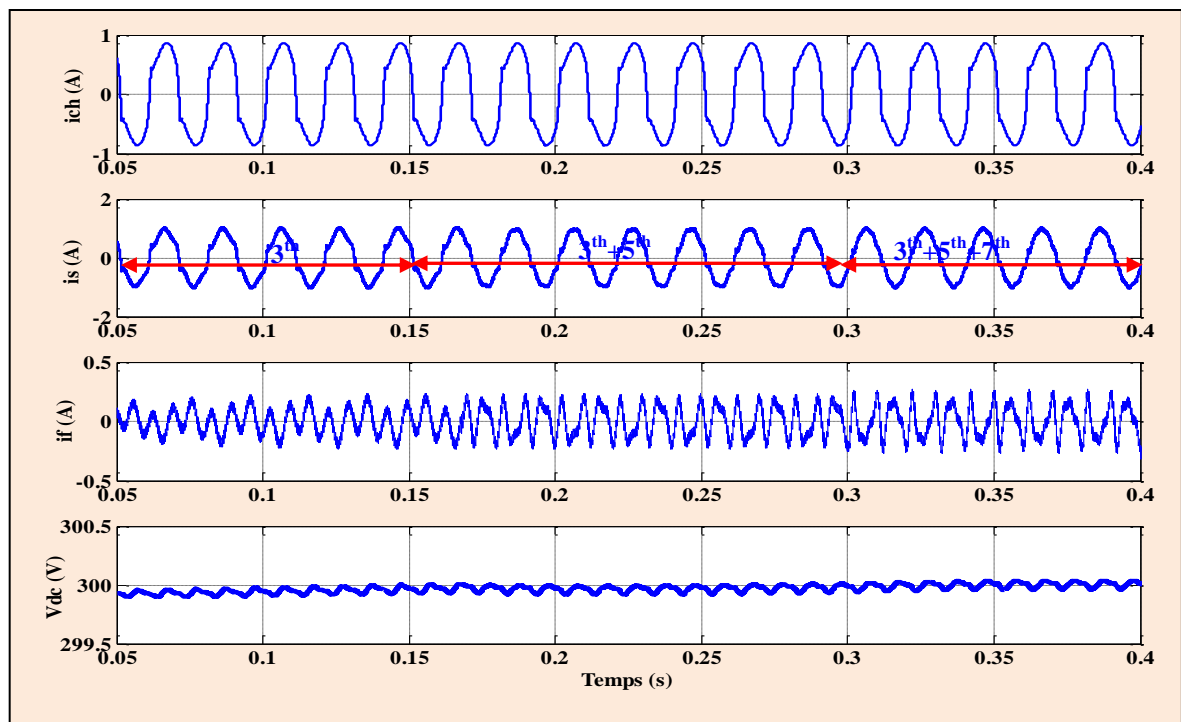


Figure (III-27) : FAP sélectif simultanée des harmoniques 3th, 5th et 7th avec charge inductive

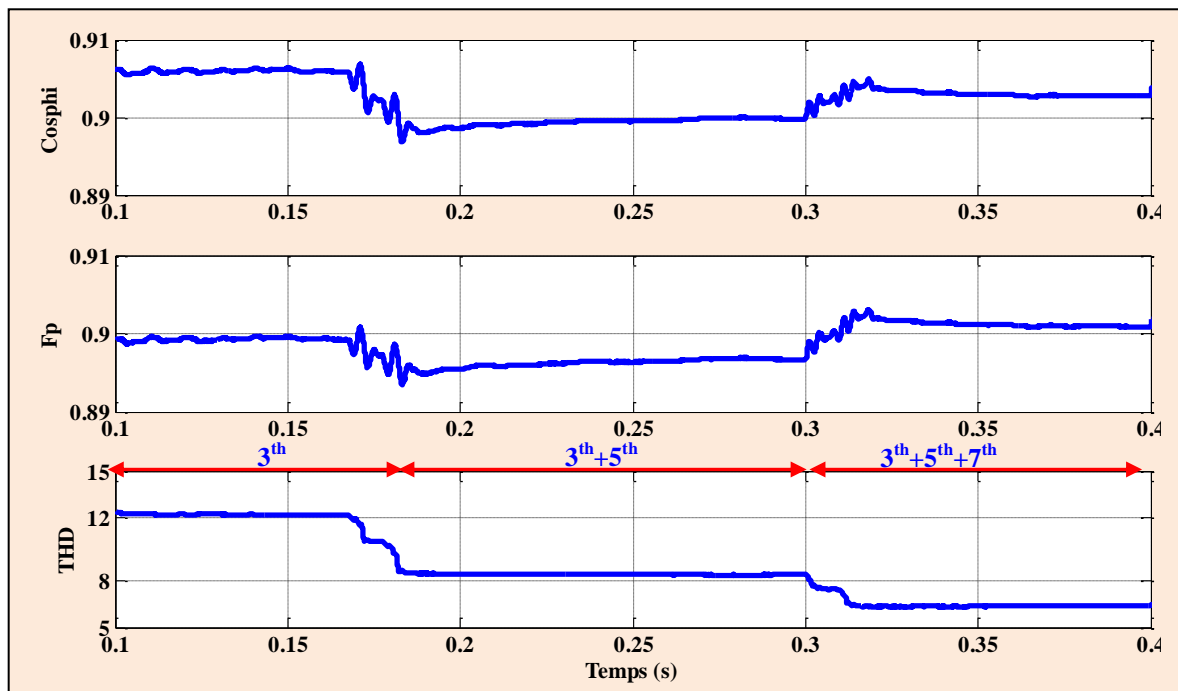


Figure (III-28) : FP, THD et $\cos\phi$ après filtrage simultanée des courants harmonique 3th, 5th et 7th

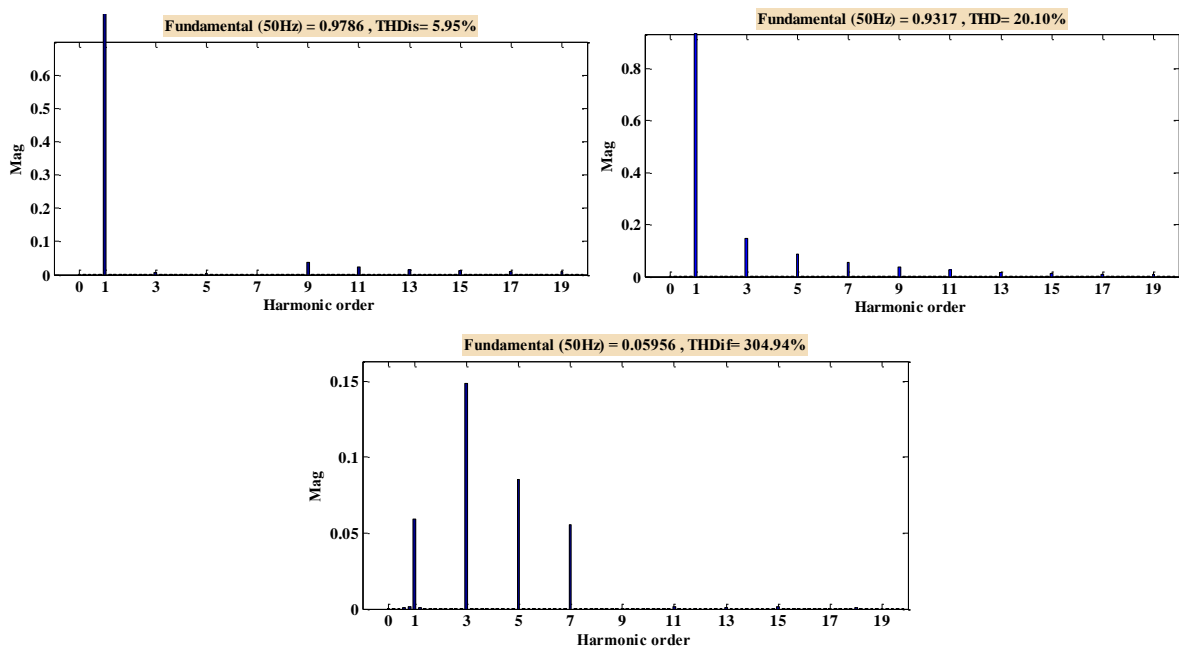


Figure (III-29) : Spectres harmonique de i_{ch} , i_s , et i_f après le filtrage simultanée des courants 3th, 5th et 7th

III.7.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons utilisé le filtre actif parallèle monophasé à fin de réaliser un filtrage sélectif des harmonique gênants, ce type de filtrage permet d'atténuer et contrôler les harmoniques gênants. Cette solution est convient mieux dans l'industrie. Nous avons

montré en premier lieu, le principe du filtrage actif sélectif monophasé à base de la méthode de puissance instantanée $p-q$, pour cela nous avons présenté deux méthodes de puissance instantanée l'un dit $p-q$ classique et l'autre dite $p-q$ modifiée. La modification d'extraction sélective se fait par un FMV. Le principe d'extraction sélective des courants harmoniques de référence des harmoniques désirés à filtrer ont été discutés pour un système monophasé et l'évaluation de deux méthodes nous a permis de majorer la technique modifiée par rapport à la technique classique (la faisabilité d'utiliser un FMV dans l'espace quadratique de puissance $p-q$ a été confirmée). Les résultats de simulation du FAP sélectif monophasé nous ont permis de constater que :

- ✓ Les courants harmoniques sont filtrés individuellement et simultanément
- ✓ La norme internationale IEEE-519 a été respectée, parce que les taux d'atténuation des harmoniques filtrés sont inférieurs à 1.5%.
- ✓ La THD du courant de source est diminuée de manière considérable pour dans le cas d'un filtrage actif sélectif simultané des harmoniques dominants.
- ✓ La méthode de puissance $p-q$ modifiée est robuste dans le cas où la tension de réseau est riche en harmoniques.

Conclusion générale

Dans notre travail ayant trait aux moyens utilisés pour la réduction d'harmoniques dans le réseau électriques, générées par des charges non linéaires, nous avons consacré le premier chapitre à la problématique des perturbations harmoniques générées par les charges non linéaires connectées aux réseaux électriques, les origines et les effets néfastes de ces perturbations ont été abordés et les normes en vigueur ont été présentées. Ces normes, notamment imposées aux distributeurs d'énergie, autorisent cependant la génération d'harmoniques dans certaines limites. En outre, le respect de ces normes motive l'étude et le développement de méthodes efficaces pour dépolluer les réseaux électriques.

Nous avons essayé de présenter de manière compréhensive le fonctionnement du filtrage actif parallèle monophasé d'une manière plus simple. Nous avons présenté en premier lieu la structure du filtre actif monophasé parallèle (puissance et en commande), nous avons aussi accentué sur travail deux techniques d'identification globale des courants harmonique, afin de réaliser un filtrage global des harmonique et de compenser aussi la puissance réactive.

La méthode de puissance instantanées ($p-q$) en monophasé et sa version modifiée par le filtre multivariable, Nous avons constaté que la méthode $p-q$ modifiée est convient mieux pour contrôler le FAP monophasé dans le cas où la tension de réseau est distordue. A travers les résultats de simulation obtenus dans ce chapitre. Les résultats obtenus dans le troisième chapitre on a vérifié que le filtre actif parallèle monophasé est capable de compenser les harmonique et la puissance réactive, et l'amélioration de ses performances est dépende de l'unité de contrôle et réglage désigné. Et malgré ces qualités attractives du filtrage actif, son application pratique est encore réticente à cause de son coût de réalisation surtout pour les systèmes puissants. C'est pourquoi on s'intéresse beaucoup plus actuellement au filtrage actif parallèle sélectif.

Dans le dernier chapitre, qui porte notre contribution scientifique, nous avons présenté et analysé, par voie de simulation deux méthodes de compensation active sélective des harmoniques spécifiques dans un système monophasé, ($p-q$), nous avons présenté deux techniques d'identification sélectif en monophasé à base de la méthode de puissance $p-q$ et $p-q$ modifiée. Nous avons constaté d'après les résultats de simulation que la méthode de $p-q$ modifiée est convient mieux le faire un filtrage sélectif monophasé

Nous sommes conscients qu'un travail simulait ne peut être qualifié de complet, quels que soient les résultats auxquels il a abouti, que s'il pourrait être mis à l'évidence pratique. On aurait pu essayer de faire une vérification pratique de nos résultats.

Pour conclure nous proposons comme suite de notre travail, toujours en gardant la simplicité, de l'élargir au filtrage hybride. Un développement, à base de ces travaux, d'une plateforme servant comme support de simulation pour les étudiants master serait très souhaitable.

Bibliographie

- [1] **N. Bruyant**, "Etude et commande généralisées de filtres actifs parallèles, compensation global ou sélective des harmoniques, régime équilibré ou déséquilibré ". Thèse de doctorat de l'université de Nantes, France, (1999).
- [2] **T. Delflandre, P. Mauras**, "les harmoniques sur les réseaux électriques", Collection de la direction des études et recherches d'électricité de France, EYROLLES, ISSN 0399-4198,1998.
- [3] **J. Arrillaga, D. A. Bradley, and P. S. Bodger**. "Power System Harmonies". Wiley, New York, 1983.
- [4] **C. Collombet, J.M. Lupin et J. Schonek**, "Perturbation harmoniques dans les réseaux pollues et leur traitement ", Schneider Electric, cahier technique No. 152, Septembre **1999**.
- [5] **W.M. Grady, S. Santoso**, « Understanding Power System Harmonies », IEEE Power Engineering Rewiew, November 2001.
- [6] **A. Chaoui**, “ Filtrage actif triphasé pour charges non linéaires“, Thèse de doctorat, université Ferhat Abbas – Sétif, Décembre 2010.
- [7] **Hamouda, Noureddine**, « Amélioration de la qualité du réseau électrique à l'aide de compensateurs actifs », 2018, Thèse de doctorat, Université Frères Mentouri-Constantine 1.
- [8] **P. Ferracci** « Cahier technique n°199 la qualité de l'énergie électrique », Revue Schneider Electric 2011.
- [9] **A. Gaillard**, “Système éolien basé sur une MADA : contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service”, Thèse de doctorat, l'Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2010.
- [10] **H. Akagi**, “Modern active filters and traditional passive filters,” Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences, 2006, vol. 54(3), pp. 255-269.
- [11] **IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems**, in IEEE Std. 519-1992, pp.1-112, April 9 1993.
- [12] **EN61000-3-2**, Compatibilité électromagnétique (CEM), partie 3 : émission, section 2 : "limites pour l'émissions de courant (courant appelé par les appareils $\leq 16A$ par phase).
- [13] **CEI 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**.

- [14] **CEI 61000-3-4**, Compatibilité électromagnétique (CEM). Partie 3-4 : Limitation des émissions de courants harmoniques dans les réseaux basse tension pour les matériels ayant un courant assigné supérieur à 16 A. Octobre 1998.
- [15] “Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-2: Limits for harmonic current emissions (equipment input <16 A per phase),” International Electrotechnical Commission (IEC), standard, Geneva, 2005.
- [14] **Bhim Singh, Sanjay Gairola**, “A Zigzag Connected Auto-Transformer Based 24-Pulse AC-DC Converter”, IEEE Transactions 2008
- [15] **N. Bernard, B. Multon, H. Ben Ahmed**. “Le redresseur MLI en absorption sinusoïdale de courant ». revue 3EI, pp.56-65. 2003.
- [18] **Chang, G.W., et al.** “Passive Harmonic Filter Planning in a Power System With Considering Probabilistic Constraints,” IEEE Transactions on Power Delivery, , vol. 24(1), pp. 208-218, 2009.
- [19] **S. Hansen, P. Nielsen, P. Thogersen, F. Blaabjerg** “Line side harmonic reduction techniques of PWM adjustable speed drives-A cost-benefit analysis,” Proc. of NORPIE Conf., , pp. 271-277. 2000
- [20] **J.C. Das**, “Passive filters – potentialities and limitations,” IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 40. No.1 Jan./Feb 2004, pp.232-241.
- [21] **H. Sasaki, T. Machida**, “A New Method to Eliminate AC Harmonics Currents by Magnetic Compensation ”, IEEE Trans. on Power Application System, vol. 90, no. 5, pp. 2009-2019, Sept./Oct. 1971.
- [22] **H. Akagi**, “Active harmonic filters “, IEEE Trans. of Power Electronics, vol. 93, no. 12, pp. 2128-2141, Dec. 2005.
- [23] **B. Singh, K. Al-Haddad and A.C. Chandra**, « A Review of Active Filters for Power Quality Improvement », IEEE Trans. Industrial Electronics. Vol. 46, pp. 960-971, October 1999.
- [24] **H. Akagi, H. Fujita**, “New Power Line Conditioner for Harmonic Compensation in Power Systems ”, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 10, no. 3, pp. 1570-1575, Jul.1995.
- [25] **M. T. Haque**, “Single-Phase PQ Theory”, IEEE 33rd Annual Power Electronics Specialists Conference PESC’02, pp. 1815-1820. Cairns, Australia, 2002.
- [26] **M. T. Haque**, “Single-Phase PQ Theory for Active Filters”, TENCON’02, Beijing, pp. 1941-1944, China, 2002.
- [27] **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.

- [28] **Ben Habib. M, C. Jacquot, E and Saadate. S**, “An advanced control approach for a shunt active power filter”, International conference on renewable energies and power quality (Icrepq’03), Vigo. 2003.
- [29] **S. Biricik, S. Redif , S. K. Khademand, M. Basu** , “Improved harmonic suppression efficiency of single-phase APFs in distorted distribution systems”, International Journal of Electronics, Vol. 103, No. 2, pp.232–246, 2016.
- [30] **Abdusalam M, Poure P, Saadate. S**, “Study and experimental validation of harmonic isolation based on high selectivity filter for three-phase active filter”, In Proceeding of IEEE International Symposium Ind Electron. ISIE 2008, pp 166-171, 2008.
- [31] **Biricik. S, Ozerdem. O. C, Redif. S and Kmail. M. O. I**, “Performance improvement of active power filters based on p-q and d-q control methods under non-ideal supply voltage conditions”, 7th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO 2011), Bursa. 2011.
- [32] **L. Asiminoaei, S. Hansen, C. Lascu**, “Selective harmonic current mitigation with shunt active power filter”, IEEE Power Electronics and Applications, 2007 European Conference on, Aalborg, Denmark. 2007.
- [33] **R.I. Bojoi, G. Griva, V. Bostan, M. Guerriero, F. Farina, and F. Profumo**, “Current control strategy for power conditioners using sinusoidal signal integrators in synchronous reference frame”, IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 20, No. 6, pp. 1402-1412, 2005.
- [34] **P. Mattavelli**, “Closed-loop selective harmonic compensation for active filters”, IEEE Trans. on Ind. App., Vol. 37, No. 1, pp. 81-89, 2001.
- [35] **C. Lascu, L. Asiminoaei, F. Blaabjerg, I. Boldea**, “High performance current controller for selective harmonic compensation in active power filters”, Proc. of OPTIM’06, Vol. 1, pp. 205-212, 2006.
- [36] **L. Qian, D. Cartes, Q. Zhang**, “Three-Phase Harmonic Selective Active Filter Using Multiple Adaptive Feed Forward Cancellation Method”, Power Electronics and Motion Control Conference, 2006.
- [37] **J. Miret, M. Castilla, J. Matas, J. M. Guerrero, and J. C. Vasquez**, “Selective harmonic-compensation control for single-phase active power filter with high harmonic rejection”, IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 56, No. 8, pp. 3117-3127, Aug. 2009