الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DR.YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

**Département du Génie Électrique
et de l'Informatique**



Mémoire de Fin d'Études

**Présenté pour l'obtention du Diplôme
de Master en Génie Électrique**

Option: Commande et électronique industrielle

THEME

Modélisation et commande d'une unité de conditionnement qualité d'énergie électrique (U P Q C)

Proposé et dirigé par :

Dr. Abed alhafid MOUALDIA

Dr. Wahid BOUCHEHIDA

Préparé et présenté par :

Mr. Farouk BOURENNANE

Mr. Aissa BOUKHALFA

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

A ma source de bonheur et d'amour : mes chers parents;

A mes chers frère et sœur ;

A toutes la familles BOURANANE

A tout mes amies, avec qui j'ai partagé les meilleur moments et en particulier :

MRIZAK-AISSA-YAHIA-SIFOU-WALID-AFAF-IMANE

A toute la promotion - 2015 - Electrotechnique

Tous ceux qui m'ont aidé dans ma tache de réussir mes études avec succès

En fin je dédie a tout se qui aimer ***FAROUK***

Je dédie ce modeste travail à :

A ma source de bonheur et d'amour : mes chers parents;

A mes chers frère et sœur ;

A toutes la familles BOUKHALFA

A tout mes amies, avec qui j'ai partagé les meilleur moments et en particulier :

AISSA-MRIZAK-YAHIA-SOUHIL-HASSAN-HAMZA-KHAYAR-AFAF-

SARAAH-GRINE

A toute la promotion - 2015 - Electrotechnique

Tous ceux qui m'ont aidé dans ma tache de réussir mes études avec succès

En fin je dédie a tout se qui aimer AISSA

Remerciements

Je tiens profondément à remercier tout d'abord DIEU l'unique qui a permis à ce travail de voir la lumière.

Je tiens à remercier vivement mon promoteur Monsieur MOUALDIA, pour ses orientations éclairées, ses conseils constructifs, son esprit critique et son aide précieuse.

J'exprime mes vifs remerciements à Messieurs :

M.MORSLI-M.HANINI , qu'ils soient assurés de ma profonde reconnaissance.

Nous remercions très chaleureusement les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'être rapporteurs de notre mémoire.

Tous les enseignants qui ont contribué à notre formation pendant notre cycle de formation.

Que tous ce qui a contribué de prés ou de loin, dans ma formation ainsi qu'à la réalisation de ce travail reçoit ici le témoignage de ma grande sympathie.

ملخص

العمل المقدم هنا هو جزء من البحث عن حلول جديدة لتحسين جودة الطاقة الكهربائية في الشبكة الكهربائية
ويعرض هذا العمل تصميم و نمذجة ومراقبة مرشح النشط الذي يجمع بين المرشحين النشطين المتسلسل والمتوازي المتمثل في مرشح النشط موحدة مكيف نوعية الطاقة (UPQC) . وقد اقترح UPQC كحل عام للتعويض عن أي اضطرابات في الجهد والتيار الحالي كما أن نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها تشير إلى أن UPQC يسمح بتعويض اضطراب التيار والجهد في وقت واحد مع الأداء الجيد.

Résumé

Le travail présenté s'inscrit dans le cadre de la recherche des nouvelles solutions pour l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique dans le réseau électrique. Ce travail présente l'étude, la modélisation et la commande d'un filtre actif combiné série-parallèle (UPQC). L'UPQC a été proposé comme une solution générale de la compensation de toutes les perturbations en courant et en tension. Les résultats de simulations obtenus montrent que l'UPQC permet la compensation simultanée des perturbations en courant et en tension avec de bonnes performances.

Abstract

The work presented here is part of the search for new solutions to improve the quality of the electrical energy in the electrical network. This work presents the design, modeling and control of a series-parallel combined active filter (UPQC). the UPQC has been proposed as a general solution to compensate for any disturbances in current and voltage. The simulation results obtained show that the UPQC allows simultaneous disturbance compensation current and voltage with good performance.

Mots clés : Filtre Actif Parallèle, Filtre Actif Série, UPQC, Harmoniques, Taux de Distorsion, Puissance PQ .

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

ABRÉVIATIONS

INTRODUCTION GENERALE 01

Chapitre I: Perturbations des réseaux électrique et principe de compensation des harmoniques.

I.1 Introduction 03

I.2. Charges industrielles génératrices d'harmoniques 03

I.3. Les effets de la pollution harmonique 04

I.4 Caractéristique de la pollution harmonique 04

I.4.1 Le facteur de distorsion harmonique 04

I.4.2 Le facteur de distorsion harmonique 05

I .5 Normes et réglementations 05

I.6 Solutions de dépollution des réseaux électriques 07

1.6.1 Solutions de dépollution traditionnelles 07

I.6.2 .Solutions de dépollution modernes 08

I.7 Filtrage passif 08

I.7.1 Principe de fonctionnement 08

I.7.2 Classification des filtres passifs 08

I.7.2.1.Filtre passif parallèle 09

I.7.2.2.Types de filtres parallèles 09

a) Filtre résonant 09

b) Filtre amorti 10

I.7.2.3. Effet de l'impédance réseau sur le filtre passif 12

I.8. Filtres actifs 13

I.8.1 Le filtre actif parallèle (F.A.P) 13

I.8.2. Le filtre actif série (F .A.S) 14

I.8.3. Combinaison hybride active et passive 14

I.8.3.1 .Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles 15

I.8.3.2.Le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles 15

I.8.3.3 .Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle 16

I.8.4 .La combinaison parallèle-série actifs (UPQC) 17

I.9. Conclusion 18

Chapitre II: Filtre actif parallèle, stratégie de commande, régulation et dimensionnement
II.1.Introduction 19
II.2. Principe du filtrage actif parallèle 19
II.3. Modélisation de la tension du réseau 20
II.4. Modélisation de l'onduleur 21
II.4.1.Onduleur à deux niveaux 21
II.4.2. Onduleur à trois niveaux 24
II.4.2.1. Fonctionnement d'un bras d'onduleur à trois niveaux 25
II.4.2.2.Modèle de connaissance de l'onduleur à trois niveaux 26
II.4.2.3. Fonctions de connexion des interrupteurs 27
II.4.2.4.Fonctions de connexion des demi-bras 28
II.4.3.Onduleur multiniveaux d'ordre supérieur 28
II.5. partie contrôle commande 29
II.5.1.Méthodes d'identifications 29
II.5.1.1.La méthode d'identification des courants perturbés 29
II.5.1.2. Méthode des puissances instantanées active et réactive P, Q 30
II.5.2. MLI à échantillonnage périodique 34
II.5.3. MLI à Bande d'hystérésis 34
II.5.4. MLI à porteuse triangulaire 35
II.6. Partie de simulation 36
II.6.1. Identification des courants perturbes 37
II.6.2.Résultats de simulation 37
II.6.3. Interprétation des résultats 42
II.7. Conclusion 42

Chapitre III: Etude du filtre actif série
III. 1. Introduction 43
III. 2. Principe de la compensation actif série 43
III.3. Topologie générale d'un compensateur actif série 44
III.4. Structure générale du filtre actif série 45
III. 5. Etude de la partie puissance du filtre actif série 48
III. 5. 1.Onduleur de tension 48
III. 5. 2. Système de stockage d'énergie 48
III. 5. 3. Filtre passif de sortie 48
III.5.4 Transformateurs d'injection et protection du F.A.S 48

III. 6. Etude de la partie contrôle commande 49
III.6.1. Principe de la méthode P, Q 50
III. 6. 2. Séparation des puissances 52
III.6. 3. Identification des tensions de référencées 52
III.7. Etude de la boucle de régulation 53
III .8. L'onduleur de tension muni de son Filtre LC 53
III .9. Calcul des paramètres de régulateur PI 55
III.10.Stratégie de placement de pôles 55
III.11. Partie de simulation 58
III.12. Interprétation des résultats 62
III.13. Conclusion 62

Chapitre IV: Filtre actif combiné Parallèle-Série (UPQC)
IV.1.Introduction 63
IV.2.Dépollution universelle combinaison parallèle-série actifs (UPQC) 63
IV.3. Techniques de Régulation des FA 64
IV.3.1. Régulation du courant des FA 64
IV.3.2. Régulation de la tension des FA 65
VI.4.Résultat de simulation 67
VI.4.1.Résultat de simulation avant le filtrage 67
IV.4.2.Résultats de simulation de l'UPQC 69
IV.4.3 . Interprétation des résultats 76
IV .5. Conclusion 77

CONCLUSION GENERALE 78
ANNEXE
BIBLIOGRAPHIE

CHAPITRE I

Fig.I.1 - a) Filtre série et b) Filtre Parallèle..... 9
Fig. I.2 - Filtre résonant..... 9
Fig. I.3 - Filtre amorti..... 10
Fig. I.4 - Types de filtre amorti..... 10
Fig. I.5 - Schéma monophasé d'un réseau avec deux filtres résonants et un filtre amorti..... 12
Fig. I.6 - Représentation du réseau côté. 12
Fig. I.7 : Filtre actif parallèle..... 13
Fig. I.8. Filtre actif série..... 14
Fig. I.9. Filtre actif série et filtre passif parallèle..... 15
Fig. I.10. Filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle... 15
Fig. I.11.Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle..... 16
Fig. I.12. Combinaison parallèle-série actifs (UPQC)..... 17

CHAPITRE II

Fig.II.1 Principe du filtrage actif parallèle..... 20
Fig. II.2. Schéma synoptique d'un réseau..... 20
Fig. II.3. Onduleur de tension deux niveaux et les interrupteurs pouvant le constituer..... 21
Fig.II. 4. Onduleur triphasé à trois niveaux..... 24
Fig.II.5. Structures d'un bras de l'onduleur à trois niveaux 25
Fig.II.6: Interrupteur bidirectionnel équivalent du pair transistor–diode..... 25
Fig.II.7. Diagramme de transformation du référentiel a-b-c au référentiel α-β..... 30
Fig.II.8. Diagramme de blocs de génération des courants de référence selon la théorie p-q..... 33
Fig. II.9. Opération du filtre passe-bas utilisé pour l'extraction des signaux AC de p-q..... 33

Fig.II.10. Modulateur MLI à échantillonnage périodique..... 34

Fig. II.11. Modulateur MLI à bande d'hystérésis. (a). Schéma global. (b). Principe..... 34

Fig. II.12. Modulateur MLI à porteuse triangulaire..... 36

Fig.II.13.Schéma global sous Matlab-simulink du F.A.P..... 36

Fig.II.14.Méthode p q sous Matlab-simulink..... 37

Fig.II.15 Les tensions du réseau d'alimentation..... 37

Fig.II.16. Courant absorbé par la charge polluante (en triphasé)..... 38

Fig.II.17.Spectre harmonique de is..... 38

Fig.II.18. Les courants de référence triphasés..... 39

Fig.II.19. Le courant de filtre..... 39

Fig.II.20.Le spectre harmonique du courant de filtre..... 40

Fig.II.21 Le courant de charge..... 40

Fig.II.22. Le spectre harmonique du courant de charge..... 40

Fig.II.23 Le courant de source is..... 40

Fig.II.24 spectre harmonique de is..... 41

CHAPITRE III

Fig. III.1 . Principe du filtrage actif série..... 44

Fig.III.2 : filtre actif série..... 45

Fig.III.3. L'alimentation et stratégie de commande de l'onduleur pour asservi le filtre actif série..... 46

Fig. III.4.Les tensions de sortie constituent le filtre actif série..... 47

Fig.III.5. Filtres passe-haut de Butterworth..... 52

Fig. III. 6 .Méthode p-q d'extraction des tensions de référence..... 52

Fig. III.7. Emplacement du block de régulation..... 53

Fig. III.8 : Model simplifies d'un réseau perturbé associée d'un compensateur actif..... 53
Fig.III.9 Model simplifié d'un onduleur et filtre de sortie..... 54
Fig. III.10 : Modélisation du block de régulation..... 54
Fig. III.11: stratégie de placement de pôles de D(s)..... 57
Fig.III.12.Schéma global sous Matlab-simulink du F.A.S..... 58
Fig .III 13. Les tension du réseau d'alimentation (V)..... 59
Fig .III 14. Spectre harmonique de Vc..... 59
Fig .III 15. Les courants de source (A)..... 60
Fig .III 19. (a) Tesion harmonique (b) Tesion harmonique régulée (c) Tension harmonique de sortie de filtre (d) Tension de compensation injecté. 60
Fig .III 20. Courant de isa (A)..... 61
Fig .III 21. La tension de charge Vc (V)..... 61
Fig. III.22. Spectre harmonique de Vc..... 61

CHAPITRE IV

Fig.IV.1. Structure générale de l'UPQC..... 63
Fig.IV.2. Boucle de régulation du courant..... 64
Fig.IV.3. Boucle de régulation de la tension continue..... 66
Fig. IV .4 : Blocs diagramme sans filtrage..... 67
Fig. IV.5. Les tensions du réseau vs (V) 68
Fig. IV.6. Spectre harmonique de vs..... 68
Fig. IV.7. Allure de is (A) 69
Fig. IV.8. Spectre harmonique de is..... 69
Fig.IV.9.Schéma global sous Matlab-simulink (UPQC)..... 70
Fig .IV 11. Les tension du réseau d'alimentation (V)..... 70
Fig.IV.12.Les courants de source (A)..... 71
Fig .IV. 13. Les courants de charge icabc (A)..... 71
Fig.IV.14. Courant de source isa et courant de reference ira (A)..... 72

Fig.IV.15.Courant de source isa et courant de charges ica (A)..... 72

Fig.IV.16. Tesion harmonique Vh1 (V)..... 73

Fig .IV. 17.Tesion injectée Vc-inj1 (V)..... 73

Fig .IV .18.Courant harmonique ih1 (A)..... 74

Fig .IV. 19.Courant injecté ic-inj1 (A)..... 74

Fig .IV.20.1.Les courants de charge icabc (A)..... 75

Fig. IV.21. Spectre harmonique de isa (A)..... 75

Fig.IV.22. Les tensions Va (V)..... 76

Fig. IV.23. Spectre harmonique de vsaV) 76

CHAPITRE I

Tableau I.1 : Niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles sur les réseaux publics basse tension(norme CEI 61000-2-2) *05*
Tableau I.2:Limite des composantes harmoniques en courant (norme CEI 61000-3-2) 06
Tableau I.2:Limite des composantes harmoniques en tension (norme CEI 61000-3-2) 06

CHAPITRE II

Tableau II.1 Obtention des deux niveaux de tension en fonction des états des interrupteurs 22
Tableau II.2.Obtention des deux niveaux de tension pour toutes les combinaisons possibles 22
Tableau II.3.Coordonnées α–β des vecteurs de sortie de l'onduleur deux niveaux 23
Tableau II.4 : Grandeurs électriques caractérisant chacune des configurations 26
Tableau II. 5 :Table d'excitation associée à la commande complémentaire 27

CHAPITRE III

Tab.III.1:Valeurs de régulateur PI..... 57

NOMENCLATURE

I_h : Le courant harmonique de rang(A)

R : La résistance traversée par le courant (Ω)

THD : Taux de distorsion harmonique (%)

v_{ab}: Tension entre phase a et b(V)

v_{bc} : Tension entre phase b et c(V)

v_{ca} : Tension entre phase b et c(V)

v_{an}:Tension entre phase a et le neutre (V)

v_{bn}: Tension entre phase b et le neutre(V)

v_{cn}: Tension entre phase c et le neutre(V)

Kp : Coefficients du correcteur *PI*

K_i : Coefficients du correcteur *PI*

L : Inductance totale série vue par le filtre actif (H)

ω_c: Fréquence de la porteuse triangulaire (Hz)

Vdc: La valeur moyenne de la tension du bus continu du filtre actif (v)

Vs : Tension de source(V)

v_{sa} : Tension simple de phase a (V)

v_{sb} :Tension simple de phase b (V)

v_{sc} :Tension simple de phase c (V)

$v_{s\alpha}$: Tension dans le repère $\alpha - \beta$(V)

i_{sa} : Courant de phase(A)

i_{α} : Courant dans le repère $\alpha - \beta$(A)

P : Puissance active instantané (W)

q : Puissance réactive instantané(VAR)

$p_{s\alpha}$: Puissances instantanées selon les axes α

$p_{s\beta}$: Puissances instantanées selon les axes β

$\bar{p}$: Puissance continue liée à la composante fondamentale active du courant(W)

$\bar{q}$: Puissance continue liée à la composante fondamentale réactive du courant(VAR)

$\tilde{p}$ et $\tilde{q}$: Puissance alternatives liées à la somme des composantes harmoniques du courant

i_{ha} : Courant harmonique de phase a(A)

$i_{h\alpha}$:Courant harmonique dans repère α(A)

$i_{h\beta}$:Courant harmonique dans repère α (A)

S:Puissance apparente (VA)

P :Puissance active (W)

Q :Puissance réactive (VAR)

$v(t)$:La tension instantanée (V)

$i(t)$:le courant instantané (A)

F_p : Facteur de puissance

F_{dis} : Facteur de distorsion

$F_{dép}$: Facteur de déplacement

C_f: Capacité de filtre(F)

L_f : Inductance de filtre(H)

$\Delta\vec{I}_f$: La différence entre le courant de référence et le courant mesuré

$\vec{V}_{f-ref}$: Tension de référence

V_{dc}: Tension côté continu de l'onduleur (V)

V_p : L'amplitude de la porteuse triangulaire

τ :Le retard causé par le calcul des courants perturbateurs

a: La largeur du domaine

μ_{Ci} :Facteur d'appartenance liée à la condition *i*

c_i : Le centre de gravité

Cosφ : Facteur de puissance

ABREVIATIONS

THD **:** Total harmonica distorsion

H : Rang de l'harmonique

FA : filtre active

FAP : filtre active parallèle

FAS : filtre active série

UPQC : Unified Power Qualité conditioner

MLI **:M**odulation de Largeure d'Impulsion.

PI : Régulateur Proportionnel **I**ntégral.

PQ : Puissances active et réactive

Cf : Compos antes fondamentales

GTO **:** gate turn off

Introduction Générale

L'utilisation croissante dans l'industrie de systèmes commandés à base d'électronique de puissance entraîne de plus en plus de problèmes de perturbation au niveau des réseaux électriques.

Ainsi, on assiste à une augmentation régulière, de la part des utilisateurs, des taux d'harmonique et de déséquilibre des courants, ainsi qu'à une importante consommation de la puissance réactive.

La circulation de ces mêmes courants perturbés va également provoquer des harmoniques et des déséquilibres de tension, lesquels vont se superposer à la tension nominale du réseau électrique. De plus, des incidents du type coups de foudre ou un brusque démarrage d'une machine tournante à forte puissance peuvent causer une chute soudaine et importante de tension. On nommera ce type d'incident : creux de tension. Ces perturbations ont bien entendu des conséquences néfastes sur les équipements électriques, lesquelles peuvent aller d'un fort échauffement ou d'un arrêt soudain des machines tournantes jusqu'à la destruction totale de ces équipements [1],[2].

Plusieurs solutions de dépollution des réseaux électriques , celles qui répondent le mieux aux contraintes industrielles d'aujourd'hui sont les filtres actifs parallèle, série et combinaison parallèle-série actifs (UPQC).

Le filtre actif parallèle peut être utilisé pour compenser les courants harmoniques et déséquilibrés de même que la puissance réactive. Le filtre série peut compenser à la fois les tensions harmoniques et déséquilibrées, et les creux de tension. L'UPQC correspond à une solution universelle de compensation pour un, plusieurs ou tous les types de perturbation de courant et de tension que l'on observe sur le réseau [2],[3],[4].

Progressivement, et de manière à endiguer l'augmentation des problèmes de perturbation sur les réseaux électriques, des normes de qualité électrique de plus en plus contraignantes seront imposées aux fournisseurs et aux consommateurs industriels. Face à ces nouvelles réglementations mais aussi face à la demande de plus en plus spécifique des utilisateurs d'énergie électrique, les filtres actifs doivent s'adapter en rendant plus complexes leurs structures et leurs méthodes de régulation. D'autant plus que ces solutions doivent se soumettre aux limites physiques et technologiques inhérentes aux dispositifs de filtrage actif [1].

De manière à atteindre ces objectifs de travail , ce mémoire sera divisé en quatre chapitres:

Le premier chapitre sera consacré à la description des perturbations en courant et en tension pouvant intervenir dans un réseau électrique. Les origines, les conséquences et les normes inhérentes à ces perturbations seront analysées. Dans ce chapitre, nous présenterons également les solutions traditionnelles et modernes de dépollution.

Dans le second chapitre de ce mémoire, nous traiterons du problème des perturbations en courant et de leur compensation à partir d'une structure de filtre actif parallèle. La structure du compensateur sera rendue plus complexe par l'introduction d'un filtre du troisième ordre en sortie de l'onduleur.

Dans le troisième chapitre, nous traiterons à la fois du filtre actif série, appliqué ici pour réduire les perturbations en tension. Nous étudierons principalement les différentes méthodes d'identification et de régulation en vue d'optimiser les performances de compensation du filtre actif série. Ainsi, la méthode de régulation améliorée, basée sur les régulateur que nous aurons introduite dans le cas du filtre actif serie, sera reprise et appliquée pour réguler ici la tension.

Dans le quatrième et dernier chapitre , une solution combinée série-parallèle (UPQC), proposée pour compenser l'ensemble des perturbations du réseau électrique en courant et tension. Nous observerons de nouveau l'efficacité de cette méthode à travers les très bons résultats de compensation observés, cette fois-ci, dans le cas des perturbations en tension et en courant. La validation des méthodes proposées sera effectuée par simulation à partir du logiciel MATLAB-SIMULINK. Faisant suite à notre synthèse d'étude sur l'UPQC , nous présenterons, dans ce chapitre, la pertinence de notre approche dans la perspective de conception d'un compensateur universel (UPQC).

I.1 Introduction:

Le distributeur d'énergie doit fournir à l'ensemble de ses clients et utilisateurs une énergie de qualité sous la forme de trois tensions sinusoïdales constituant un réseau triphasé équilibre.

La qualité de cette énergie dépend de celle de la tension aux points de raccordement toutefois, cette tension subit généralement des altérations durant son transport jusqu'à son arrivée chez le client, industriel ou particulier. Les origines de ces altérations sont nombreuses, outre les incidents relatifs à la nature physique et matérielle des organes d'exploitation du réseau, il existe aussi des causes intrinsèques spécifiques au fonctionnement de certains récepteurs particuliers.

Afin d'éviter le dysfonctionnement, voire la destruction des composants du réseau électrique ou des récepteurs finaux, il est indispensable de comprendre l'origine des perturbations et de chercher et les solutions adéquates pour les supprimer.

Nous commencerons ce chapitre par un exposé des principaux défauts affectant la tension et le courant du réseau électrique. Nous parlerons également de leurs origines, des conséquences matérielles. Nous discuterons ensuite des solutions traditionnelles et modernes utilisés pour pallier aux problèmes liés aux perturbations harmoniques.

I.2. Charges industrielles génératrices d'harmoniques:

L'avènement de l'électronique de puissance a eu un impact majeur sur le monde industriel au cours des dernières décennies. Cet avènement s'est produit par l'arrivée sur le marché des composants d'électronique de puissance tels les thyristors, les triacs, les GTO, les IGBT ou les transistors de forte puissance. Ces composantes ont permis le développement de convertisseurs statiques de grande puissance qui permettent la conversion de la puissance électrique d'une forme quelconque à une autre forme. Ces convertisseurs apportent un progrès considérable au niveau des procédés industriels.

Comme mentionné précédemment, ces convertisseurs sont vus comme étant des charges non linéaires qui injectent des courants harmoniques sur le réseau électrique [1].

I.3. Les effets de la pollution harmonique:

Les courants harmoniques associés aux différentes impédances du réseau vont donner naissance à des tensions harmoniques qui vont se superposer à la tension fondamentale du réseau. La tension qui en résulte n'est plus sinusoïdale. La pollution alors présente sur le réseau de distribution pourrait être préjudiciable au bon fonctionnement de tous les récepteurs (ou charge) raccordés sur ce même réseau. On distingue deux types d'effet des harmoniques sur les équipements électriques :

- Les effets instantanés:

Ce sont les effets immédiats sur le bon fonctionnement d'un équipement. Par exemple, dans le cas des appareils électroniques. La précision des appareils de mesure est également affectée par la présence d'harmoniques.

- Les effets différés:

Ils se manifestent après une longue exposition au phénomène et se traduisent par une perte partielle des fonctionnalités ou une destruction complète de l'appareil.
L'échauffement des câbles et des diverses enroulements d'une machine en est un exemple.[52]

I.4 Caractéristique de la pollution harmonique :

Nous considérons le cas où la tension aux points de raccordement est sinusoïdale.

I.4.1 Le facteur de distorsion harmonique :

Le facteur de distorsion noté THD nous donne une idée sur l'ampleur de la pollution harmonique, il est défini par l'équation (I.1)

$$THD(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{50} I_n^2}}{I_1} \qquad (I.1)$$

Le THD vaut zéro pour une onde ayant une forme sinusoïdale, devient plus en plus grand que l'onde se déforme, c'est à dire que les harmoniques deviennent importants.

I.4.2 Le facteur de distorsion harmonique :

Le facteur de distorsion noté F_{dis} donné par l'équation (I.1) nous renseignent sur la puissance déformante engendrée par les harmoniques, voir l'équation (I.2).

$$F_{dis} = \frac{I_n}{I} \quad \text{(I.2)}$$

$$D = S.(1 - (F_{dis})^2) \quad \text{(I.3)}$$

Avec: D : Puissance apparente.

S : Puissance déformante.

I .5 Normes et réglementations :

Afin de limiter les perturbations et les disfonctionnements causés par la présence des harmoniques dans le réseau électrique, la Commission Electrotechnique Internationale (CEI), a défini les niveaux des tensions et des courants harmoniques a ne pas dépasser par une série de norme de compatibilité électromagnétique (CEI 61000).

On Cite par titre d'exemple les deux norme [3]:

La norme CEI 61000-2-2 :

Elle définit les niveaux de compatibilité de tensions harmoniques sur les Réseaux publics basse tension. Elle est représentée sur le tableau I.1. Cette norme vise a protéger les équipements raccordes sur un réseau basse tension déformé.

Rangs impairs		Rangs impairs multiple de 3		Rangs pairs	
Rang	Taux (%)	Rang	Taux (%)	Rang	Taux (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.3	6	0.5
13	3	21	0.2	8	0.5
17	2	>21	0.2	10	0.5
19	1.5			12	0.2
23	1.5			>12	0.2
25	0.2+1.3x25/h				
>25					

Tab. I.1 : Niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles sur les réseaux publics basse tension (norme CEI 61000-2-2) [3].

La norme CEI 61000-3-2 :

Cette norme représentée sur les deux tableaux I.2 et I.3 fixe la limitation des courants / tension injectes dans le réseau public pour des équipements dont le courant par phase est inferieur a 16 A. Il s'agit la des appareils du domaine domestique.

Harmoniques pairs		Rangs impairs	
Rang harmonique	Courant harmonique Maximal autorisé (A)	Rangs harmonique	Courant harmonique Maximal autorisé (A)
2	1.08	3	2.3
4	0.43	5	1.14
6	0.3	7	0.77
8≤H≤40	0.23x8/h	9	0.40
		11	0.33
		13	0.21
		15≤h≤39	0.15x15/h

Tab.I.2 : Limite des composantes harmoniques en courant (norme CEI 61000-3-2).

Harmoniques impairs				Harmoniques pairs	
Non multiple de 3		Multiple de 3			
Rang	V_h/V_1 (%)	Rang	V_h/V_1 (%)	Rang	V_h/V_1 (%)
5 et 6	2	3	2	2	1.5
11 et 13	1.5	9	1	4	1
17 et 19	1	15 et 21	0.5	6 à 24	0.5
23 et 25	0.7	Le TDH globale de tension ne dépassant pas 3 %.			

Tab.I.3 : Limite des composantes harmoniques en tension (norme CEI 61000-3-2).

Les normes citées sont obligatoires mais reste incomplètes et ne permettent pas de garantir totalement la compatibilité électromagnétique sur les réseaux publics.

C'est la raison pour laquelle EDF (en France) par exemple émet quelques recommandations concernant le raccordement des utilisateurs sur le réseau. Les limitations en tension harmonique que doivent respecter les clients d'EDF sont :

- pour chaque rang pair, la tension harmonique est limitée a 0,6%,
- pour chaque rang impair, la tension harmonique est limitée a 1%,
- limitation du THD a 1,6% [3].

I.6 Solutions de dépollution des réseaux électriques:

Afin de compenser toutes les perturbations, séparées en deux types : courant et tension, deux groupes de solution de dépollution, traditionnelle et moderne, vont être étudiées. L'approche de la dépollution la mieux adaptée à notre objectif.

1.6.1 Solutions de dépollution traditionnelles:

Ce sont des techniques qui doivent être connues par tous les électriciens. Elle apportent une solution facile et rapide pour certains cas de perturbations bien localisées et utilisent des composants passifs (inductances, condensateurs, transformateur) et/ou des branchements qui modifient le schéma de l'installation. Plusieurs solutions existent pour limiter la propagation et l'effet des harmoniques dans les réseaux électriques:

- l'augmentation de la puissance de court-circuit du réseau et l'utilisation de convertisseurs peu polluants qui ont pour effet de diminuer la distorsion harmonique.
- l'utilisation de dispositifs de filtrage pour réduire la propagation des harmoniques produits par des charges non linéaires.

Le filtrage consiste à placer en parallèle sur le réseau d'alimentation une impédance de valeur très faible autour de la fréquence à filtrer et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau. Parmi les dispositifs de filtrage les plus répandus, on distingue le filtre passif résonnant et le filtre passif amorti ou passe-haut.

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

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

I.6.2 .Solutions de dépollution modernes:

Les solutions de dépollution traditionnelle ne répondant plus à l'évolution des réseaux électriques et des charges à protéger, comme nous venons de le décrire précédemment, d'autres solutions modernes ont été proposées. La première solution de dépollution consiste à fabriquer la charge la moins polluante possible, comme le pont redresseur do déca phase, de manière à réduire le taux d'émission d'harmoniques.

Pour fournir aux consommateurs une bonne qualité de l'énergie électrique, même dans les conditions de fonctionnement les plus perturbées, les filtres actifs sont proposés comme des solutions avancées de dépollution des réseaux électriques. En effet, ces solutions peuvent s'adapter aux évolutions de la charge et du réseau électrique et ceci sans toucher aux installations du fournisseur d'énergie et du consommateur.

Cependant, ces solution entraînent un coût supplémentaire et demandent plus que le savoir-faire habituel pour les mettre en œuvre. De plus, ces solutions ne résolvent pas les problèmes causés par les charges polluantes qui existent sur le marché.

I.7 Filtrage passif:

I.7.1 Principe de fonctionnement:

Le principe du 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. Ces filtres sont composés d'éléments capacitifs et inductifs qui sont disposés de manière à obtenir une résonance série sur une fréquence déterminée.

Afin de concevoir ce type de filtre, une connaissance précise des caractéristiques et du comportement du réseau sous l'effet des harmoniques est nécessaire. 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 [4].

I.7.2 Classification des filtres passifs:

II est possible de classifier les filtres passifs selon leur emplacement sur le réseau, leur mode de connexion, leur degré d'amortissement de même que leur fréquence de résonance.

Les filtres passifs peuvent se diviser en deux familles, soit les filtres parallèles et les filtres séries. Selon le type choisi, les harmoniques peuvent être littéralement bloqués par une impédance série élevée entre le convertisseur et le réseau, déviés par une faible impédance en parallèle ou une combinaison des deux.

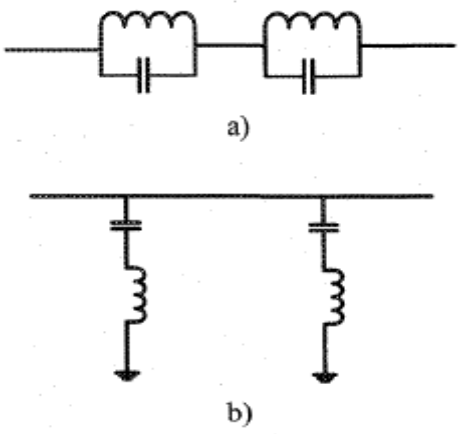


Fig.I.1 - a) Filtre série et b) Filtre parallèle

I.7.2.1.Filtre passif parallèle:

Le filtre parallèle est utilisé exclusivement du côté alternatif pour deux raisons :

- II porte uniquement le courant harmonique et est lié à la terre.
- À la fréquence fondamentale, il possède l'avantage de fournir de la puissance réactive.

Pour une efficacité équivalente au filtre série, le filtre parallèle est beaucoup moins cher. Le filtre parallèle est surtout utilisé dans le cas des charges génératrices de courants harmoniques alors que le filtre série l'est pour les charges génératrices de tensions harmoniques [4].

I.7.2.2.Types de filtres parallèles:

a) Filtre résonant

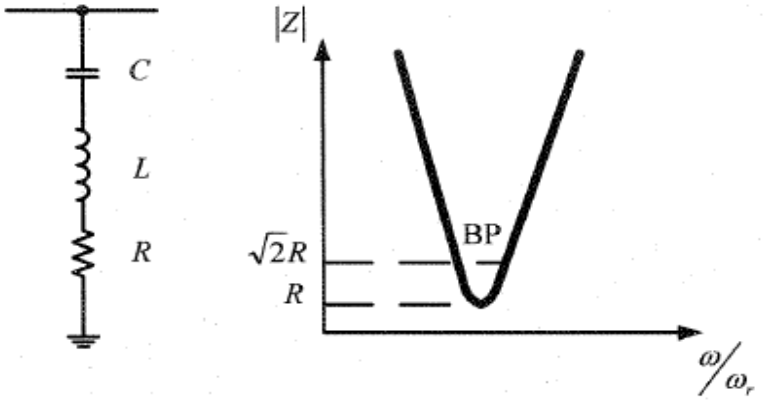


Fig. I.2 - Filtre résonant.

Le filtre résonant a pour caractéristique une impédance très faible à un courant harmonique de rang déterminé. Le facteur de qualité *(Q)* détermine la précision du réglage de l'harmonique correspondant ainsi que son efficacité à l'éliminer. Ce qui implique un facteur de qualité élevé pour ce type de filtre. Pour chaque rang d'harmoniques à filtrer, nous devons compter trois branches shunt (un filtre shunt pour chaque phase). Le filtre résonant fournit une partie de la puissance réactive au convertisseur par ses capacités.

L'inconvénient de ce type de filtre shunt est la variation des éléments *L* et C due à leur vieillissement et à leur qualité. 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. De plus, l'ajout de ce type de filtre peut causer des résonances parallèles avec l'impédance du réseau. Il y a également risque de résonance si deux filtres résonants ajustés à la même fréquence sont présents sur un même réseau. Il est donc particulièrement important d'avoir une bonne connaissance du comportement du réseau sous l'effet d'harmoniques avant l'installation de ce type de filtre.

b) Filtre amorti

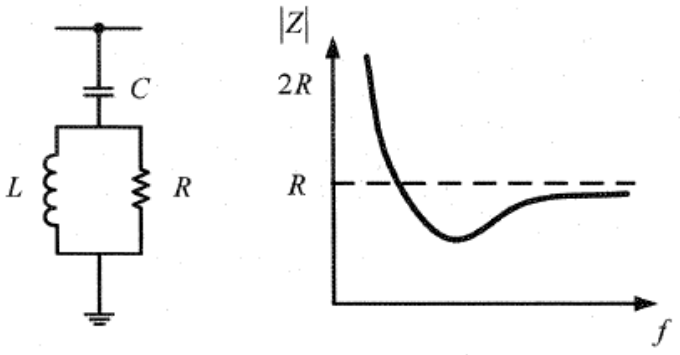


Fig. I.3 - Filtre amorti

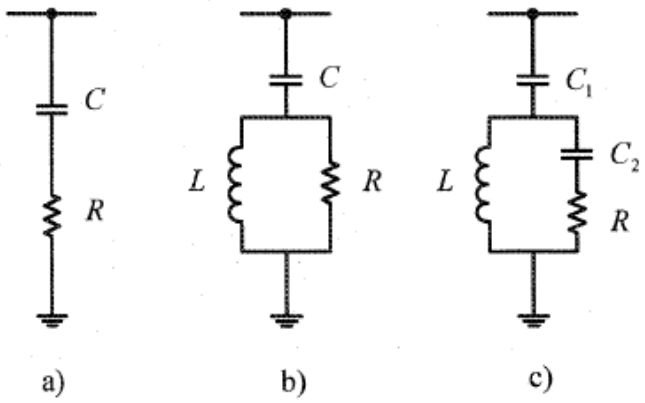


Fig. I.4 - Types de filtre amorti

On distingue trois types de filtre amorti, les filtres amortis de premier ordre, les filtres amortis de second ordre et les filtres de troisième ordre. Les filtres amortis offrent plusieurs avantages :

1) Leurs performances sont moins sensibles aux variations de température, aux déviations de fréquence, aux tolérances des composantes.

2) Ils présentent une faible valeur d'impédance pour une large gamme de fréquences harmoniques.

3) L'usage de multiples filtres résonants peut provoquer des résonances parallèles entre les filtres et l'admittance du réseau. Dans ce cas, l'usage d'un ou de plusieurs filtres amortis est préférable.

Les principaux désavantages du filtre amorti sont les suivant :

4) Pour atteindre des performances similaires au filtre résonant, le filtre amorti doit être conçu pour un taux de puissance apparente (S) élevé, bien que dans la plupart des cas de bonnes performances peuvent être obtenues avec la limite requise pour la compensation du facteur de puissance.

5) Les pertes dans la résistance sont généralement élevées.

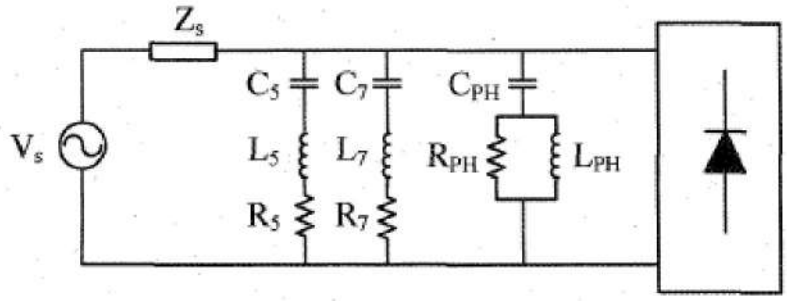
Le filtre de premier ordre n'est pas très utilisé, car il exige une grande capacité et présente une perte de puissance excessive à la fréquence fondamentale. Le filtre de second ordre fournit de meilleures performances de filtrage, mais avec des pertes plus élevées à la fréquence fondamentale que le filtre de troisième ordre. Ces deux derniers sont en général conçus avec un faible facteur de qualité Q compris entre 0,7 et 1,4. Le principal avantage du filtre amorti de troisième ordre sur le deuxième ordre est une réduction substantielle des pertes à la fréquence fondamentale en raison de l'impédance accrue à cette fréquence provoquée par la présence du condensateur Q. De plus, la taille de *C2* est petite comparativement à *C1* [4] , [5].

En pratique, il est courant de mettre en œuvre :

Des filtres résonants accordés sur les premiers rangs harmoniques (rangs 5 et 7) où les injections de courant sont importantes.

Un filtre amorti pour limiter l'impédance harmonique sur le reste du spectre (rangs>11).

La figure ci-dessous illustre un exemple de raccordement d'un tel montage sur un réseau monophasé.



e amorti

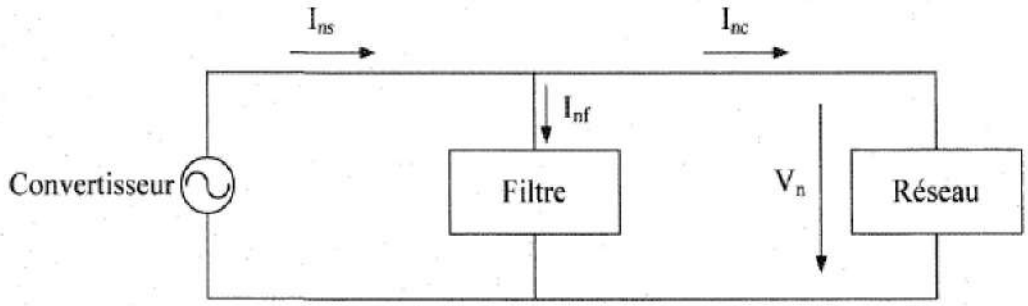


Fig. I.6 - Représentation du réseau côté.

Dans la représentation schématique du réseau, le convertisseur est vu comme une source de courant harmonique *(I_{ns})*. Le courant harmonique généré par le convertisseur est considéré comme étant connu. Afin de le déterminer, une prise d'échantillons peut être effectuée, ou encore, il peut être obtenu par simulation numérique. La tension harmonique aux bornes du filtre et du réseau dépend de leur impédance respective. Puisque l'impédance du réseau soumise aux polluants harmoniques varie dans le temps et est rarement connue précisément, quelques cas extrêmes doivent être étudiés afin d'avoir une meilleure idée de son importance lors de la conception du filtre :

- Si l'impédance du réseau est nulle, peu importe le rang de l'harmonique, c'est-à-dire que *Vn* = 0 et *Inc* = *Ins,* le filtre shunt n'a pas d'effet. Tous les harmoniques générés par le convertisseur vont dans le réseau. Cela signifie que l'impédance du réseau est *Znc* = 0, ce qui n'est pas très réaliste. Si ce cas se présente, la solution serait d'appliquer un filtre série.
- Dans le cas où l'impédance du réseau est infinie *Znc* = ∞, tous les courants harmoniques générés passent dans le filtre shunt. Ce qui signifie que *Inc* = 0, *Inf* = *Ins* et *Vn* = *Znf Ins.* Le filtre est considéré ici comme parfait. Ce cas est également très peu réaliste.

- Dans le cas très pessimiste où le réseau et le filtre sont en résonance parallèle. Il en résulterait une impédance très élevée, ce qui provoquerait des valeurs harmoniques de *Vn, Inc* et *Inf* très élevées.

Comme nous pouvons le constater, l'impédance du réseau a un impact majeur sur la conception et le dimensionnement du filtre passif. Il est important d'avoir une bonne connaissance des paramètres composant le réseau lors de cette étape afin d'obtenir un filtre efficace et qui ne risque pas d'entrer en résonance avec l'impédance du réseau [4].

I.8. Filtres actifs:

Les filtres actifs constituent une alternative intéressante aux solutions classiques. Flexibles car auto-adaptatifs, ils viennent s'ajouter à des structures déjà existantes de convertisseurs. Ils peuvent également être utilisés comme complément aux solutions traditionnelles de dépollution. Le rôle d'un filtre actif est de compenser en temps réel les perturbations, en tout ou en partie, présentes dans les réseaux électriques.

I.8.1 Le filtre actif parallèle (F.A.P):

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau, comme le montre la Fig. I.7, est le plus souvent commandé comme un générateur de courant. Il injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante , mais en opposition de phase avec ceux-ci.[2].

Le courant côté réseau est alors sinusoïdal. Ainsi l'objectif du filtre actif parallèle (F.A.P) consiste à empêcher les courants perturbateurs (harmoniques, réactifs et déséquilibrés), produits par des charges polluantes, de circuler à travers l'impédance du réseau, située en amont du point de connexion du filtre actif.

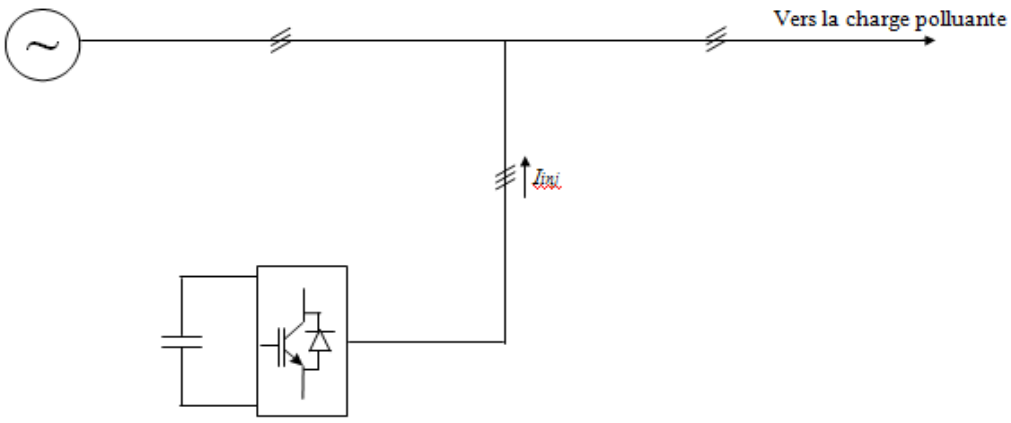


Fig. I.7 : Filtre actif parallèle

I.8.2. Le filtre actif série (F .A.S):

Le filtre actif série se comporte dans ce cas, comme le montre la Fig. I.8, comme une source de tension qui s'oppose aux tensions perturbatrices (creux, déséquilibre, harmonique) venant de la source et également à celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau [3]. Ainsi la tension aux bornes de la charge à protéger est purement sinusoïdale.

Ce filtre est une solution adaptée à la compensation des tensions perturbatrices, harmoniques, déséquilibrées et des creux de tension. Ces perturbations trouvent généralement leurs origines dans le réseau lui-même mais peuvent parfois être provoquées par les charges elles-mêmes.

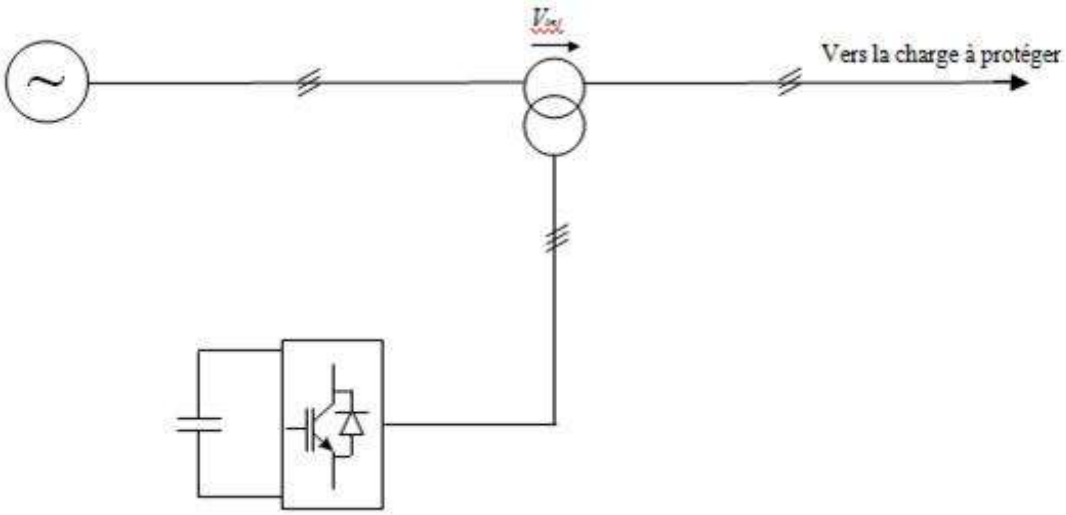


Fig. I.8. Filtre actif série

I.8.3. Combinaison hybride active et passive:

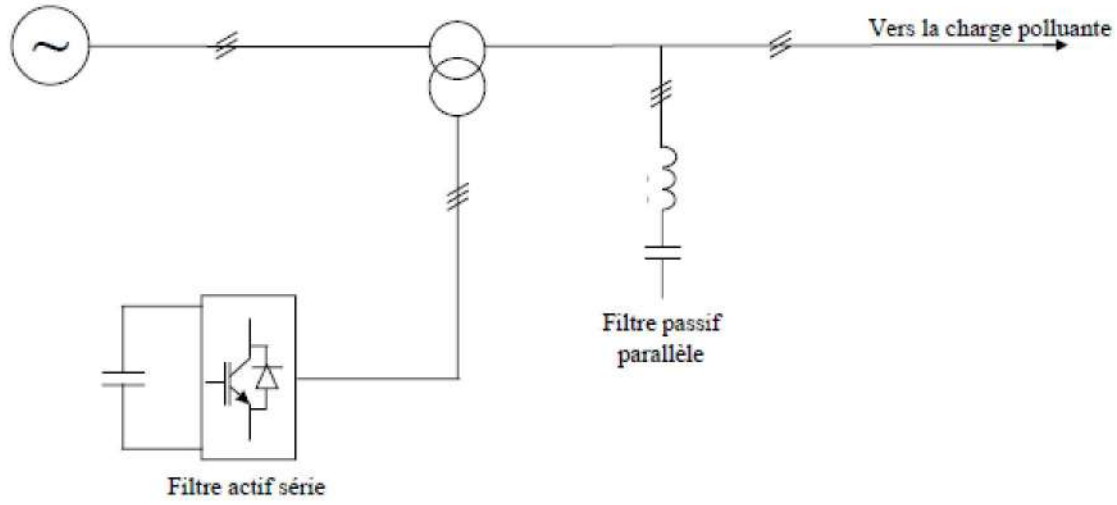
Il faut noter l'existence de plusieurs combinaison mixtes de filtres actifs avec les filtre passifs. Ces structure sont conçues dans le but d'optimiser le rapport performance/cout.

Plusieurs configurations ont été présentées dans la littérature [6], les plus étudiées étant :

- le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles.
- le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles
- le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle

I.8.3.1 .Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles:

Le rôle du filtre actif série dans ce cas est d'empêcher les courants harmoniques de circuler vers le réseau et de les obliger à passer par les filtres passifs raccordés à leurs fréquences comme le montre la Fig.I.9 [2].



I.8.3.

I me
que l car
le co 'un
évent

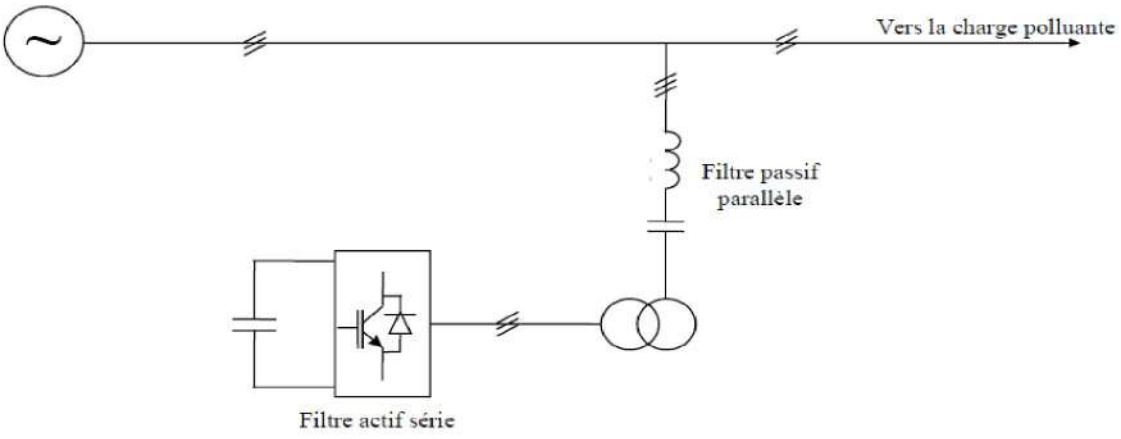


Fig. I.10. Filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle

I.8.3.3 .Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle:

Le rôle du filtre actif parallèle dans cette configuration, montrée en Fig. I.11, est la compensation des courants harmoniques basses fréquences émis par la charge polluante. Le filtre passif accordé sur une fréquence élevée, élimine les harmoniques hautes fréquences y compris ceux créés par le filtre actif parallèle. Ce type de filtrage a déjà été appliqué à la compensation des courants harmoniques émis par un cycloconvertisseur de forte puissance [2],[4].

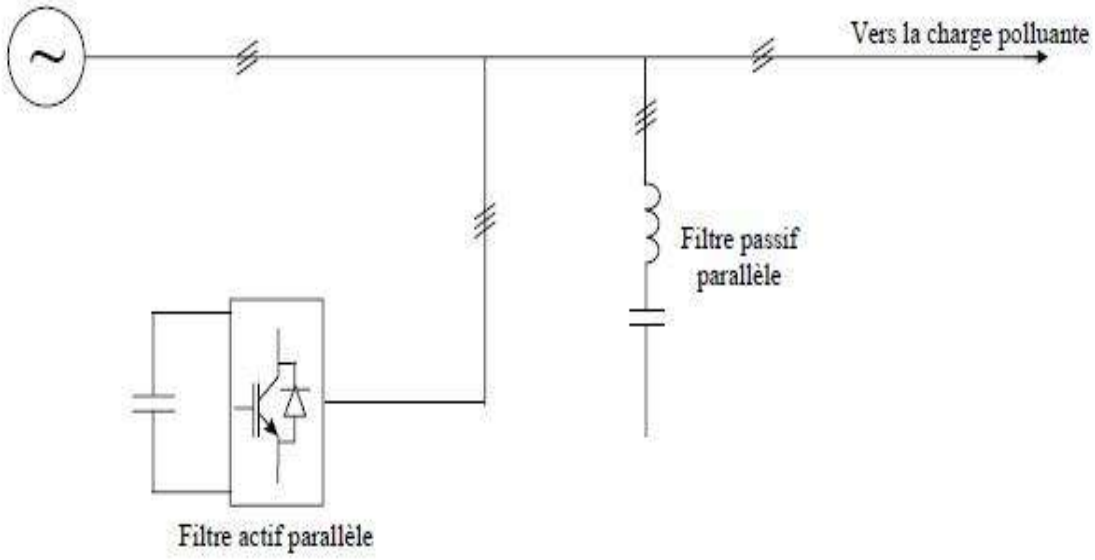


Fig. I.11. Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle

I.8.4 .La combinaison parallèle-série actifs (UPQC):

C'est une solution de compensation universelle basée sur le fonctionnement simultané des filtres actifs parallèle et série Fig.I.12.Cette nouvelle topologie est appelée Unified Power Quality Conditioner (UPQC), aussi appelée combinaison parallèle-série actifs, résulte de l'association des deux filtres actifs parallèle et série, comme le montre la Fig. I.12. Profitant des avantages des deux filtres actifs, l'UPQC assure un courant et une tension sinusoïdaux du réseau électrique à partir d'un courant et d'une tension perturbés de celui-ci [2].

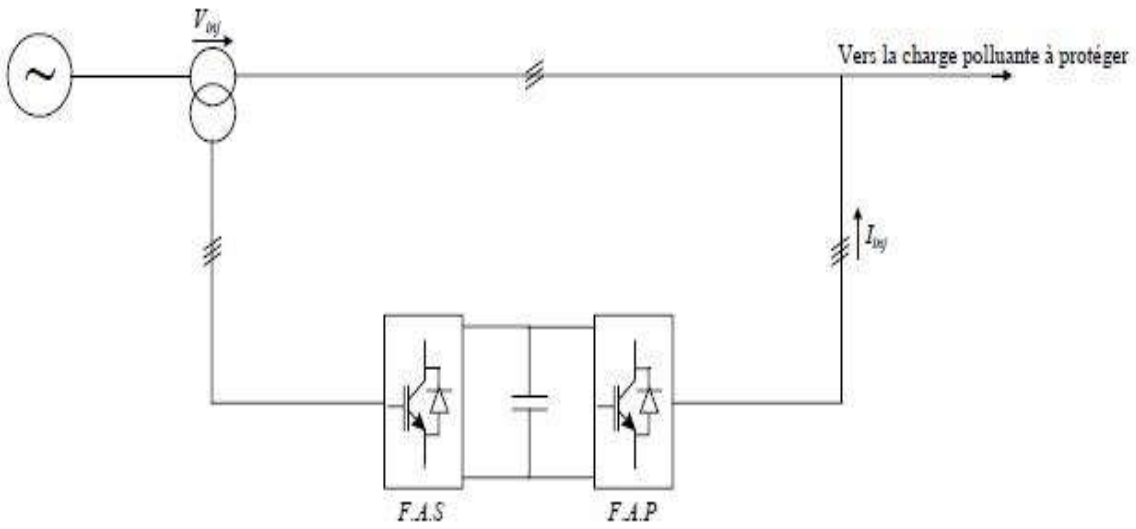


Fig. I.12. Combinaison parallèle-série actifs (UPQC)

I.9. Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes origines des perturbations affectant les réseaux électriques et les solutions de dépollution existantes. Ces effets peuvent aller des échauffements et de la dégradation du fonctionnement jusqu'à la destruction totale de ces équipements.

Plusieurs solutions traditionnelles et modernes de dépollution ont été présentées. La solution classique à base de filtres passifs est souvent pénalisée en termes d'encombrement et de résonance.

De plus, les filtres passifs ne peuvent pas s'adapter à l'évolution du réseau et aux charges polluantes.

Récemment, en plus du filtrage des harmoniques, les filtres actifs parallèles et séries, et leur combinaison, sont étudiés pour la compensation de tous les types de perturbation susceptible d'apparaître dans un réseau électrique basse tension. En effet, profitant des progrès réalisés dans le domaine de l'électronique de puissance, ces solutions peu encombrantes n'occasionnent aucune résonance avec les éléments passifs du réseau et font preuve d'une grande flexibilité face à l'évolution du réseau électrique et de la charge polluante.

Le filtre actif parallèle peut être installé pour compenser toutes les perturbations de courant comme les harmoniques, les déséquilibres et la puissance réactive.

Le filtre actif série peut être installé pour compenser toutes les perturbations de tension comme les harmoniques, les déséquilibres et les creux de tension.

La combinaison parallèle-série actifs est la solution universelle pour compenser toutes les perturbations en courant et en tension.

Ces nouvelles méthodes ont été mises au point qui sont plus souple et performante. c'est ainsi que dans l'objectif d'améliorer la qualité de l'énergie électrique qui doit être conforme aux nouvelles contraintes normatives, nous étudierons, dans les chapitres suivants, des méthodes de régulation avancées que nous appliquerons dans le cas des structures de filtres actifs parallèle, série et combiné (UPQC).

II.1.Introduction:

Les convertisseurs statiques introduisent des harmoniques et des perturbations dans les courants de ligne. Pour éviter la propagation de ces derniers, il convient de les capter le plus prés possible de leurs sources d'émission de façon à forcer le courant de ligne à suivre une référence du courant.

Plusieurs techniques existent à l'heure actuelle pour combattre les effets des harmoniques. La plus utilisée consiste à installer des filtres qui atténuent les courants harmoniques avant qu'ils ne se propagent dans le réseau. L'inconvénient principal de ces dispositifs et qu'ils ne s'adaptent pas à des variations des spectres harmoniques.

Les nouvelles structures de dépollution des réseaux sont apparues sous le nom du filtre actif.

L'objectif est alors d'adapter le filtre en temps réel par rapport à un environnement variable en un système unique.

Le filtrage actif est une méthode moderne du filtrage des réseaux, indépendante des caractéristiques de ceux-ci. Il permet la dépollution des réseaux électriques alimentant une charge non linéaire telle que les convertisseurs statiques, sans se soucier des fréquences polluantes contenues dans le courant de la charge [3].

II.2. Principe du filtrage actif parallèle :

Le filtrage actif parallèle des courants harmoniques consiste à ajouter en parallèle sur la charge principale une charge non linaire constituée par un pont d'onduleur qui injecte des courants harmoniques, de telle sorte que le courant de source (réseau) soit sinusoïdal.

Une mesure du courant de la charge non linéaire permet de connaître le courant harmonique à fournir. L'injection peut être réalisé par différents types de convertisseurs. Le courant harmonique que doit fournir le filtre est égal à la différence entre le courant d'entrée du convertisseur polluant et le courant sinusoïdal fourni par le réseau comme le montre la figure (II.1) [7],[8].

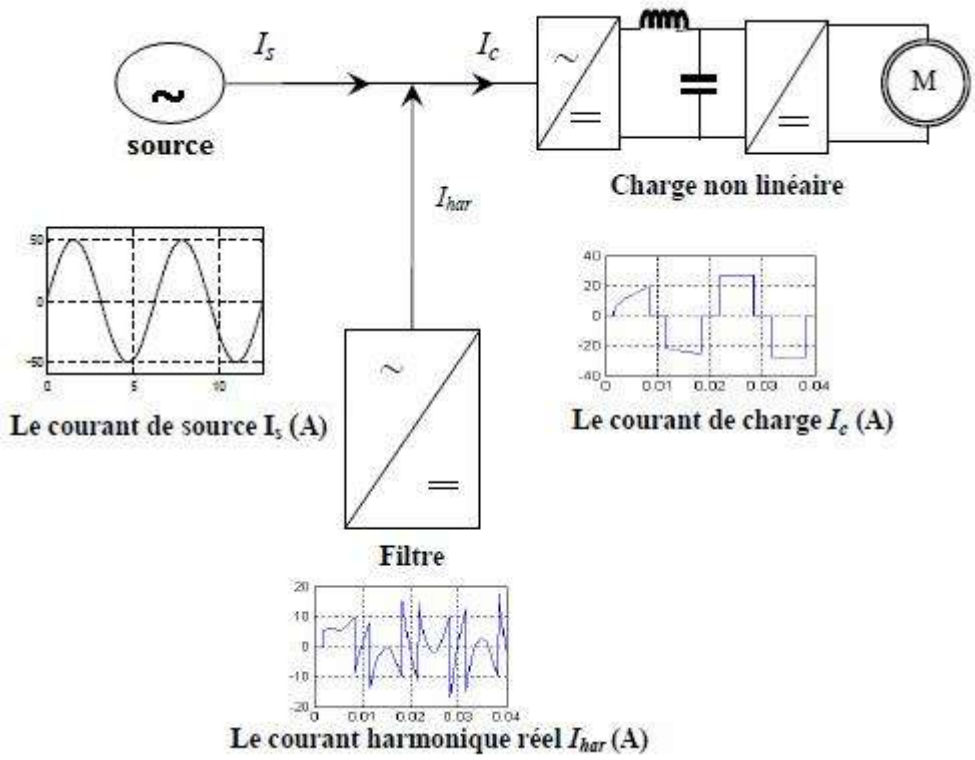


Fig.II.1 Principe du filtrage actif parallèle

II.3. Modélisation de la tension du réseau :

Le réseau est assimilable à une source de tension sinusoïdale en série avec une impédance, dite de court circuit, d'où la représentation du réseau par un système de f.e.m.s triphasées équilibrées en série avec une impédance [3], fig. (II.2).

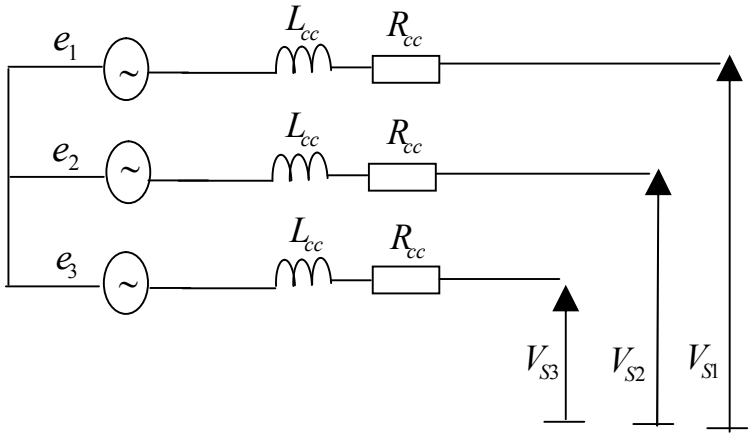


Fig. II.2. Schéma synoptique d'un réseau

$$v_a(t) = V_1 \cos(\omega t) \tag{II.1}$$

$$v_b(t) = V_1(1+m)\cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \tag{II.2}$$

$$v_c(t) = V_1(1-m)\cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \tag{II.3}$$

$$\begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} - I_{sm} \cdot \begin{bmatrix} \sin(\omega t + \emptyset_f^+) \\ \sin(\omega t + \emptyset_f^+ - 2\pi/3) \\ \sin(\omega t + \emptyset_f^+ + 2\pi/3) \end{bmatrix} \tag{II.4}$$

II.4. Modélisation de l'onduleur:

II.4.1.Onduleur à deux niveaux:

En cas de présence d'un point milieu [8], la structure générale d'un onduleur de tension deux niveaux est représentée Fig. II.3. L'onduleur triphasé de tension deux niveaux est constitué de deux interrupteurs par bras. Ces derniers ont la particularité d'être bidirectionnels et entièrement commandables à l'ouverture et à la fermeture. Ils peuvent être soit des MOSFET pour les faibles puissances et fréquences très élevées, des IGBT pour les grandes puissances et fréquences élevées, ou des GTO pour les très grandes puissances et fréquences faibles [8],[9] Pour assurer la circulation du courant dans les deux sens, l'interrupteur doit être placé en antiparallèle avec une diode.

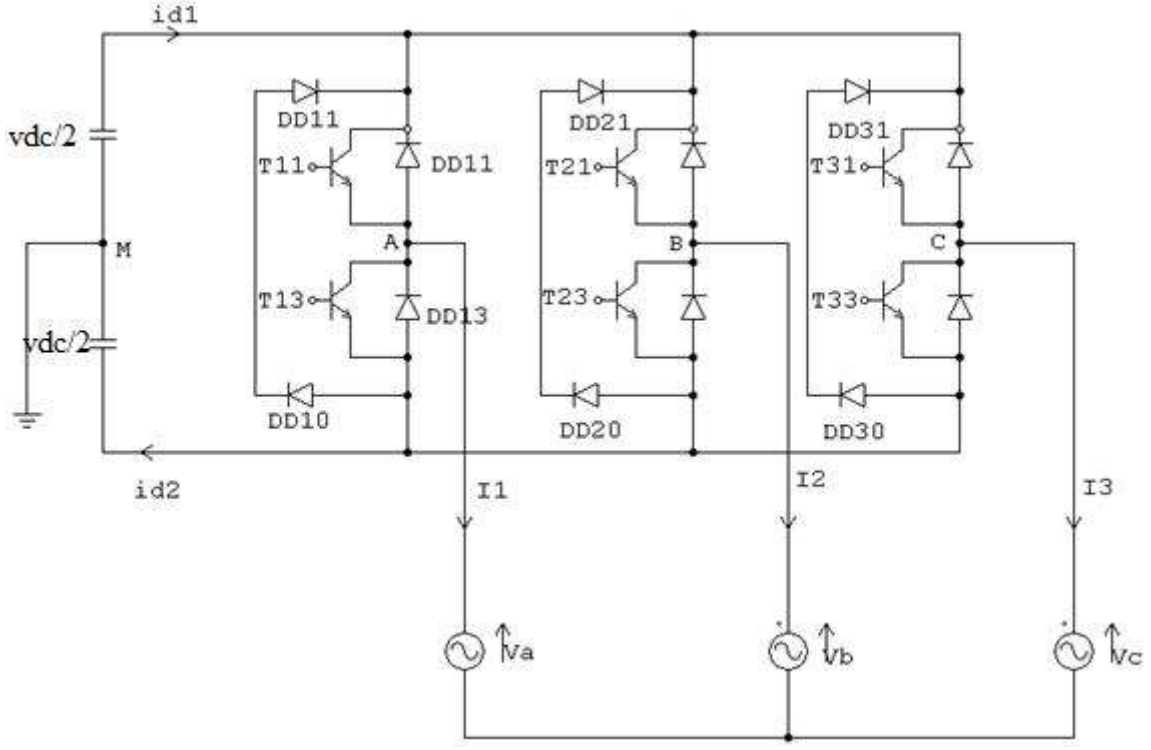


Fig. II.3. Onduleur de tension deux niveaux et les interrupteurs pouvant le constituer.

L'onduleur de tension deux niveaux délivre, en sortie, deux niveaux de tensions –*vdc*/2 et +*vdc*/2, en fonction des états des interrupteurs comme expliqué dans le Tableau II.1.

Ci	Si	Si'	*vio*
-1	0	1	-*vdc*/2
1	1	0	+*vdc*/2

Tab.II.1 Obtention des deux niveaux de tension en fonction des états des interrupteurs.

Avec: *i*, indicateur de phase tel que *i* = *a*, *b*, *c*, *Ci* est la variable d'état de l'interrupteur prenant comme valeurs -1 ou 1, *vio* est la tension prise entre phase et point milieu M. La tension *vio* est obtenue en appliquant la formule suivante:

$$v_{i0} = C_i.\frac{vdc}{2} \quad \text{(II.5)}$$

Maintenant, si on considère tous les interrupteurs, toutes les phases (3), et tous les états possibles (2), on obtient 2^3 combinaisons lesquelles sont présentées dans le Tableau II.2.

Les tensions entre phases sont données par:

$$\begin{cases} v_{ab} = v_{a0} - v_{b0} \\ v_{bc} = v_{b0} - v_{c0} \\ v_{ca} = v_{c0} - v_{a0} \end{cases} \quad \text{(II.6)}$$

N°	C_a	C_b	C_c	Sa	Sa'	Sb	Sb'	Sc	Sc'	v_{ao}	v_{bo}	V_{co}
1	-1	-1	-1	0	1	0	1	0	1	-vdc/2	-vdc/2	-vdc/2
2	-1	-1	1	0	1	0	1	1	0	-vdc/2	-vdc/2	vdc/2
3	-1	1	-1	0	1	1	0	0	1	-vdc/2	vdc/2	-vdc/2
4	-1	1	1	0	1	1	0	1	0	-vdc/2	vdc/2	vdc/2
5	1	-1	-1	1	0	0	1	0	1	vdc/2	-vdc/2	-vdc/2
6	1	-1	1	1	0	0	1	1	0	vdc/2	-vdc/2	vdc/2
7	1	1	-1	1	0	1	0	0	1	vdc/2	vdc/2	-vdc/2
8	1	1	1	1	0	1	0	1	0	vdc/2	vdc/2	vdc/2

Tab. II.2. Obtention des deux niveaux de tension pour toutes les combinaisons possibles

Si le système est équilibré, on a une somme nulle des tensions phase-neutre:

$$v_{an} + v_{bn} + v_{cn} = 0 \qquad \text{(II.7)}$$

Alors, les tensions phase-neutre seront données, en fonction des tensions entre phases, par:

$$\begin{cases} v_{an} = (\frac{1}{3}).(v_{ab} - v_{ca}) \\ v_{bn} = (\frac{1}{3}).(v_{bc} - v_{ab}) \\ v_{cn} = (\frac{1}{3}).(v_{ca} - v_{bc}) \end{cases} \qquad \text{(II.8)}$$

Et en fonction des tensions phase-point milieu, on a:

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2/3 & -1/3 & -1/3 \\ -1/3 & 2/3 & -1/3 \\ -1/3 & -1/3 & 2/3 \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} v_{a0} \\ v_{b0} \\ v_{c0} \end{bmatrix} \qquad \text{(II.9)}$$

En remplaçant les tensions *vio* par leurs valeurs définies dans l'équation (II.5), on aboutit à:

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2/3 & -1/3 & -1/3 \\ -1/3 & 2/3 & -1/3 \\ -1/3 & -1/3 & 2/3 \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} C_a \\ C_b \\ C_c \end{bmatrix} . \frac{vdc}{2} \qquad \text{(II.10)}$$

Et dans le plan *α–β*, on aura:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = C_{32} . \begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} \qquad \text{(II.11)}$$

Avec, *C*32 la matrice de Concordia définie par la formule (I.2). Les coordonnées *α–β* du vecteur *v* de la formule (II.11), considérant toutes les combinaisons possibles, sont inscrites dans le Tableau II.3.

v_{ao}	v_{bo}	v_{vo}	v_α/vdc	v_β/vdc	v_{an}	v_{bn}	v_{cn}	v_α/vdc	v_β/vdc	
-vdc/2	-vdc/2	-vdc/2	0	0	0	0	0	0	0	$\vec{v}_0$
-vdc/2	-vdc/2	vdc/2	-0.408	-0.707	- vdc/3	- vdc/3	2.vdc/3	-0.408	-0.707	$\vec{v}_5$
-vdc/2	vdc/2	-vdc/2	-0.408	0.707	- vdc/3	2.vdc/3	- vdc/3	-0.408	0.707	$\vec{v}_3$
-vdc/2	vdc/2	vdc/2	-0.816	0	-2.vdc/3	vdc/3	vdc/3	-0.816	0	$\vec{v}_4$
vdc/2	-vdc/2	-vdc/2	0.816	0	2.vdc/3	- vdc/3	- vdc/3	0.816	0	$\vec{v}_1$
vdc/2	-vdc/2	vdc/2	0.408	-0.707	vdc/3	-2.vdc/3	vdc/3	0.408	-0.707	$\vec{v}_6$
vdc/2	vdc/2	-vdc/2	0.408	0.707	vdc/3	vdc/3	- 2.vdc/3	0.408	0.707	$\vec{v}_2$
vdc/2	vdc/2	vdc/2	0	0	0	0	0	0	0	$\vec{v}_7$

Tab.II.3. Coordonnées *α–β* des vecteurs de sortie de l'onduleur deux niveaux

II.4.2. Onduleur à trois niveaux:

Plusieurs structures sont possibles pour réaliser un onduleur triphasé à trois niveaux, nous avons choisi d'étudier la structure à point milieu [8].

L'onduleur triphasé à trois niveaux à point milieu étudié se compose de trois bras symétriques, chaque bras est constitué de quatre paires (Diode -Transistor) représentant chacune une interrupteur bidirectionnel en courant et deux diodes médianes permettant d'avoir les niveaux zéro de la tension de sortie de l'onduleur V_{KM} notées DD_{K0} et DD_{K1}. Cette structure impose l'utilisation des interrupteurs commandables à l'amorçage et au blocage.

Le point milieu de chaque bras est relié à une alimentation continue de force électromotrice $(vd_{c1}+vd_{c2})$. Ces deux générateurs ainsi que les diodes DD_{K0} et DD_{K1} se trouvent connectés entre eux en un point fictif noté (M).

La représentation schématique de cet onduleur est donnée par la figure (II.4), où :

- Les tensions continues vd_{c1}, vd_{c2} sont les tensions d'entrée ;
- Les tensions alternatives V_A, V_B, V_C sont les tensions de sortie ;
- Les courants i_1, i_2, i_3 sont les courants de sortie.

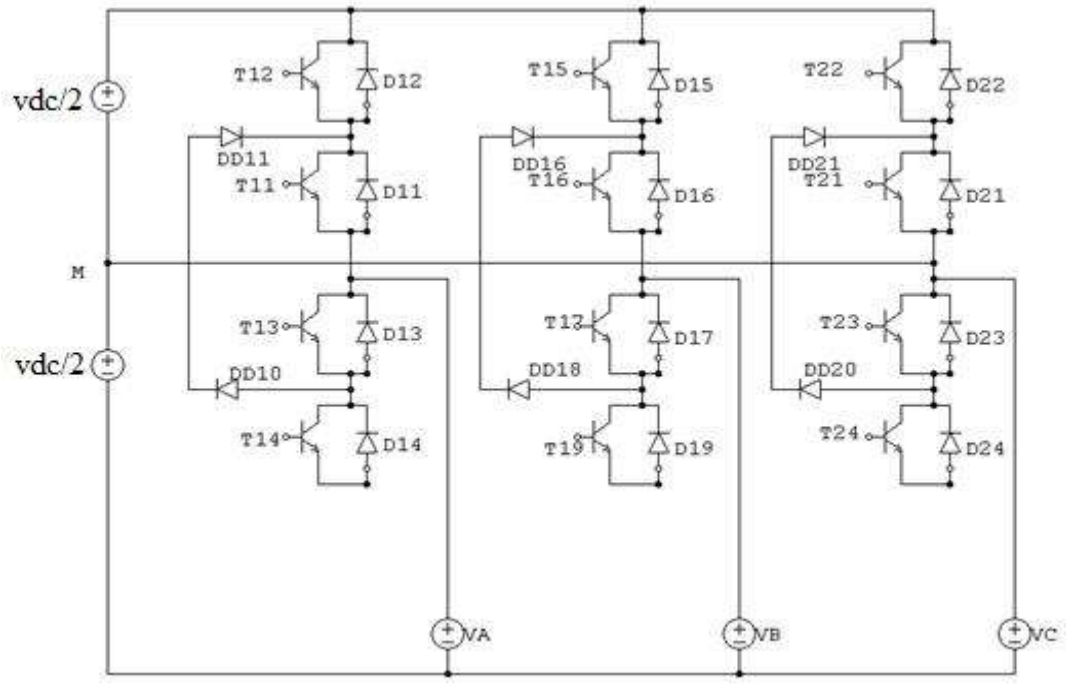


Fig.II. 4. Onduleur triphasé à trois niveaux.

II.4.2.1. Fonctionnement d'un bras d'onduleur à trois niveaux:

La symétrie des onduleurs à trois niveaux permet leur modélisation par bras sans à priori sur la commande. On montra ensuite comment déduire celui d'un onduleur complet. Les courants i_{do}, i_{d1} et i_{d2} fixent le sens de transfert d'énergie de l'élément conducteur (Transistor-Diode).

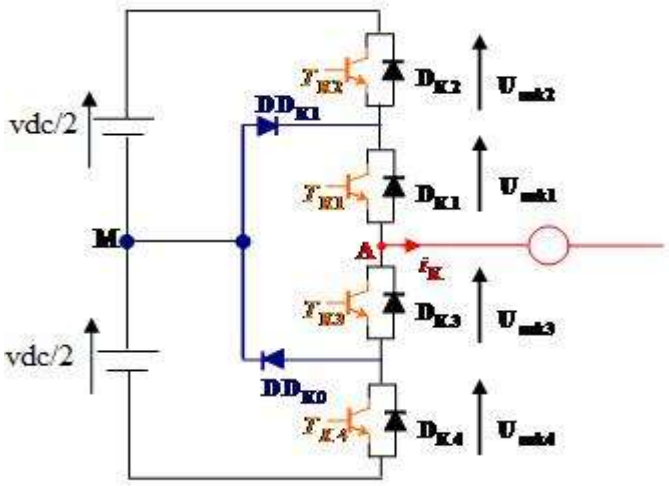


Fig.II.5. Structures d'un bras de l'onduleur à trois niveaux .

Pour simplifier la complexité de la structure de l'onduleur multiniveaux, on présente chaque paire transistor-diode par un seul interrupteur bidirectionnel TD_{kS} (figure II.6), et vu la symétrie de sa structure, on fait le raisonnement sur un seul bras [14].

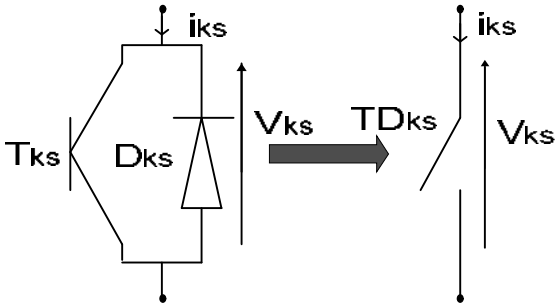


Fig.II.6: Interrupteur bidirectionnel équivalent du pair transistor–diode.

Les grandeurs électriques caractérisant chacune de ces configurations sont données dans le tableau (II.4) (avec M origine des potentiels et V_K le potentiel du nœud k du bras k.

Configuration	Grandeurs caractéristiques
E_0	$i_k = 0$
E_1	$V_k = + vdc_1$
E_2	$V_k = 0$
E_3	$V_k = - vdc_2$
E_4	$V_k = 0$

Tab .II.4 : Grandeurs électriques caractérisant chacune des configurations.

II.4.2.2.Modèle de connaissance de l'onduleur à trois niveaux :

Un convertisseur est dit en mode commandable si les transitions entre ses différentes configurations dépendent uniquement de la commande externe (commande des bases des semi-conducteurs) et par suite une conduction continue de ce convertisseur. **.**

Pour l'onduleur à trois niveaux, cette condition de commandabilité implique que les transitions entre ses différentes configurations dépendent uniquement de la commande externe (commande des bases des semi-conducteurs) et non plus des commandes internes (grandeurs électriques).Nous supposons par la suite que cette condition est toujours vérifiée. De ce fait, on peut définir les fonctions de connexion [11].

- ***Hypothèse :***

- La chute de tension aux bornes des semi-conducteurs est supposée faible (négligeable devant vdc_c).
- La charge est triphasée, couplée en étoile avec neutre isolé, alors on a :

$$\begin{cases} V_A + V_B + V_C = 0 \\ i_1 + i_2 + i_3 = 0 \end{cases} \qquad \text{(II.12)}$$

Pour éviter la conduction simultanée des quatre interrupteurs d'un seul bras, qui peut engendrer leur destruction par croissance du courant lors du court-circuit, ou à une surtension dans le cas de l'ouverture de tous les interrupteurs, on définit la commande complémentaire suivante :

$$\begin{cases} B_{k1} = \overline{B}_{k4} \\ B_{k2} = \overline{B}_{k3} \end{cases} \quad \text{(II.13)}$$

Avec *Bks* est le signal de la commande du transistor *Tks* du bras *k*.

Le tableau (II.5) résume les tensions possibles en sortie et les éléments conducteurs pour chaque état de commutation dans un bras [11],[12].

Etat de commutation				Tension Sortie	Eléments conducteurs	
B_{k1}	B_{k2}	B_{k3}	B_{k4}		$I > 0$	$I < 0$
1	*1*	*0*	*0*	$\pm$ *Vdc*	$\mathbf{TD_{K1}}$, $\mathbf{TD_{K2}}$	$\mathbf{DD_{K0}}$, $\mathbf{DD_{K1}}$
1	*0*	*1*	*0*	$\pm$ *vdc/2*	$\mathbf{DD_{K1}}$, $\mathbf{TD_{K2}}$	$\mathbf{DD_{K0}}$, $\mathbf{TD_{K1}}$
0	*0*	*1*	*1*	*0*	$\mathbf{DD_{K0}}$, $\mathbf{DD_{K1}}$	$\mathbf{TD_{K3}}$, $\mathbf{TD_{K4}}$
0	*1*	*0*	*1*		*Etat indéfini*	

Tab II. 5: Table d'excitation associée à la commande complémentaire .

II.4.2.3. Fonctions de connexion des interrupteurs :

On définit la fonction de connexion de chaque interrupteur *TDks* comme étant une fonction qui décrit l'état ouvert ou fermé de celui-ci [11] :

$$\begin{cases} F_{ks} = 1 \quad si \quad TD_{ks} \; est \quad fermé \\ F_{ks} = 0 \quad si \quad TD_{ks} \; est \quad ouverte \end{cases} \quad \text{(II.14)}$$

En traduisant la commande complémentaire par les fonctions de connexion des interrupteurs du bras *k*, on trouve :

$$\begin{cases} F_{k1} = 1 - F_{k4} \\ F_{k2} = 1 - F_{k3} \end{cases} \quad \text{(II.15)}$$

La commande complémentaire est exprimée pour les trois bras comme suit :

$$\begin{cases} F_{11} = 1 - F_{14} \\ F_{12} = 1 - F_{13} \end{cases} \qquad \begin{cases} F_{21} = 1 - F_{24} \\ F_{22} = 1 - F_{23} \end{cases} \qquad \begin{cases} F_{31} = 1 - F_{34} \\ F_{32} = 1 - F_{33} \end{cases}$$

II.4.2.4.Fonctions de connexion des demi-bras:

On définit la fonction de connexion d'un demi-bras notée F_{km}^{b} .

Où K : Numéro du bras (K=1; 2; 3).

$$\text{m} = \begin{cases} 0 & \text{pour le demi – bras du bas} \\ 1 & \text{pour le demi – bras du haut} \end{cases}$$

Les fonctions de connexion des demi-bras s'expriment au moyen des fonctions de connexion des interrupteurs comme suit :

$$\begin{cases} F_{k1}^{b} = F_{k1}.F_{k2} \\ F_{k0}^{b} = F_{k3}.F_{k4} \end{cases} \qquad \text{(II.16)}$$

Le système d'équation (II.16) montre que la fonction de connexion du demi-bras F_{km}^{b} vaut *1* dans le cas ou les deux interrupteurs du demi-bras associés à F_{km}^{b} sont tous fermés, et nulle dans tous les autres cas.

II.4.3.Onduleur multiniveaux d'ordre supérieur:

On se basant toujours sur l'étude faite pour l'onduleur de tension à trois niveaux , on peut étendre l'étude à des niveaux supérieurs. Pour un onduleur à m niveaux, le nombre des éléments constituant sa topologie, notamment les sources secondaires de tension continue *S*, les interrupteurs k et les diodes de bouclage D sont régis par les relations suivantes:

S = m-1 ; k = 2(m-1) ; D= 2(m-2)

Plus le nombre de niveaux augmente, la tension de sortie en forme d'escalier possède plusieurs paliers. Ceci permet de mieux approcher la sinusoïde [11],[12]

II.5. partie contrôle commande:

II.5.1.Méthodes d'identifications:

La stratégie de commande se base sur la détection des courants perturbateurs dans le domaine temporel. Il existe trois possibilités d'indentification des courants perturbateurs.

- Identification à partir de la détection du courant de la charge polluante.
- Identification à partir de la détection du courant de la source.
- Identification à partir de la détection de la tension de la source.

La première méthode est la plus utilisé pour le filtre actif parallèle pour compensé les courants perturbateurs causés par les charges polluantes.

II.5.1.1.La méthode d'identification des courants perturbés:

Les différentes méthodes d'identification du courant perturbateur, peuvent être regroupées en deux familles.

a) La première utilise la transformer de Fourier, rapide dans le domaine fréquentiel, pour extraire les harmoniques du courant. Cette méthode et bien adapté aux charges où le contenu harmonique varie lentement. Elle donne aussi l'avantage de sélectionner les harmoniques individuellement. Il est à noté que cette méthode nécessite une grande puissance de calcule. [13]

b) La deuxième famille est basée sur le calcul des puissances instantanées dans le domaine temporel. Certaines de ces méthodes se basé sur le calcul des puissances harmoniques de la charge non linéaire. D'autres peuvent être utilisé pour compensé a la fois les courants harmoniques et la puissance réactive, en se basant sur la soustraction de la partie fondamentale active du courant totale.

Récemment, des nouvelles méthodes d'identification on été présentées pour données le choix de compensées un, plusieurs ou voir même tout les types des courants perturbateur. [12], [13].

En effet, en se basant sur la régulation de la tension continue et sur celles du réseau électrique aux points de raccordement, nous pouvons compenser à la fois tous les courants perturbateurs, tout en offrant la possibilité de réguler la tension de la charge.

Cette méthode, qui ne peut être implantée que numériquement et ne garantit pas une compensation parfaite de la puissance réactive.

Enfin, la méthode d'identification la plus utilisée est celle appelée méthode des puissances instantanées. Cette méthode offre l'avantage de choisir la perturbation a compenser avec précision, rapidité et facilite d'implantation. Pour toutes ces raisons nous avons retenu cette méthode d'identification pour le reste de notre travail. En effet, afin de pouvoir compenser les courants harmoniques, les courants déséquilibres et la puissance réactive conjointement ou individuellement. [14]

II.5.1.2. Méthode des puissances instantanées active et réactive P, Q :

Le concept de cette méthode est très commun pour l'extraction des courants/tensions de référence d'un filtre actif. Elle consiste en une transformation variable, dans le référentiel *α-β*, des puissances, courants et tensions instantanés à partir du référentiel *a-b-c*. Les équations transformées du 1er plan triphasé au second à coordonnées diphasées, sont dérivées du diagramme de phase représenté Fig. II.7 [9].

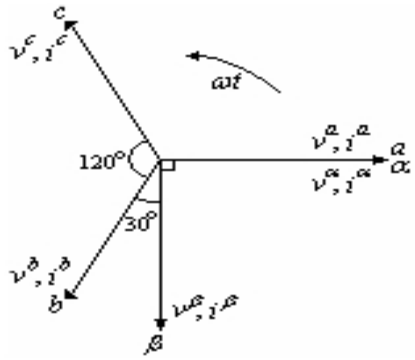


Fig.II.7. Diagramme de transformation du référentiel *a-b-c* au référentiel *α-β*.

Les valeurs instantanées des courants et tensions triphasés peuvent être obtenues dans le plan *α-β* par les équations suivantes:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = [C_{32}].\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = [C_{32}].\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad \text{(II.17)}$$

Avec C_{32} la matrice de transformation développée par Concordia [12] selon la représentation de la Fig. II.7 et dont l'expression est donnée par:

$$[C_{32}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \quad \text{(II.18)}$$

Cette transformation n'est valide que si les tensions sont équilibrées et sinusoïdales. Les puissances instantanées active et réactive dans ce repère sont calculées par:

$$p(t) = v_\alpha(t).i_\alpha(t) + v_\beta(t).i_\beta(t) \quad \text{(II.19)}$$

$$q(t) = -v_\alpha(t).i_\beta(t) + v_\beta(t).i_\alpha(t) \quad \text{(II.20)}$$

Il est évident que $p(t)$ est identique à son expression conventionnelle dans le repère *a-b-c*. Cependant, afin de définir la puissance réactive instantanée, une nouvelle expression dans l'espace vectoriel donnée par:

$$\vec{q} = \overrightarrow{v_\alpha} \times \overrightarrow{\imath_\alpha} + \overrightarrow{v_\beta} \times \overrightarrow{\imath_\beta} \quad \text{(II.21)}$$

Le vecteur $\vec{q}$ est perpendiculaire au plan α -β. Pour rester en conformité avec la *règle de la main droite*, $\overrightarrow{v_\alpha}$ est perpendiculaire à $\overrightarrow{\imath_\beta}$, et $\overrightarrow{v_\beta}$ est perpendiculaire à $\overrightarrow{\imath_\alpha}$. Le sens physique du vecteur $\vec{q}$ n'est pas une "puissance instantanée" à cause du produit de la tension dans une phase et du courant dans une autre phase. Au contraire $\overrightarrow{v_\alpha} \times \overrightarrow{\imath_\alpha}$ et $\overrightarrow{v_\beta} \times \overrightarrow{\imath_\beta}$ signifient clairement une "puissance instantanée", à cause du produit de la tension dans une phase et du courant dans la même phase. Akagi a attribué à cette nouvelle grandeur électrique, définie par l'équation (II.21), l'appellation "puissance instantanée imaginaire", représentée par le produit des valeurs instantanées du courant et de la tension, mais qui ne peut être traitée comme une grandeur conventionnelle.

A partir des équations (II.19) et (II.20), p et q peuvent être exprimées en composantes AC et DC, telles que:

$$p = \overline{p} + \tilde{p} \quad \text{(II.22)}$$

$$q = \overline{q} + \tilde{q} \quad \text{(II.23)}$$

Avec:

$\overline{p}$: Composante DC de p liée au courant actif fondamental conventionnel

$\tilde{p}$: Composante AC de p, dépourvue de valeur moyenne et liée aux courants harmoniques causés par les composantes AC de la puissance instantanée réelle.

$\overline{q}$: Composante DC de q liée à la puissance réactive générée par les composantes fondamentales des courants et des tensions

$\tilde{q}$: Composante AC de q et liée aux courants harmoniques causés par les composantes AC de la puissance instantanée réactive

Pour un filtre actif parallèle, il s'agit de l'extraction des courants de référence. L'expression des courants en fonction des puissances instantanées dans le plan α-β est donnée par:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2+v_\beta^2} \cdot \left\{ \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ q \end{bmatrix} \right\} = \begin{bmatrix} i_{\alpha p} \\ i_{\beta p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{\alpha q} \\ i_{\beta q} \end{bmatrix} \quad \text{(II.24)}$$

Maintenant, si on souhaite également compenser la puissance réactive (*c.-à-d.* le déplacement du facteur de puissance), ainsi que les courants harmoniques générés par les charges non linéaires, le signal de référence du filtre actif parallèle doit inclure $\tilde{p}$, $\overline{q}$, et $\tilde{q}$. Dans ce cas, les courants de référence sont calculés par:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha^* \\ i_\beta^* \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2+v_\beta^2} \cdot \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \overline{q} + \tilde{q} \end{bmatrix} \quad \text{(II.25)}$$

Les courants de compensation finaux dans le repère a-b-c, incluant la composante de séquence zéro, sont donnés par:

$$\begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1 & 0 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -i_0 \\ i_\alpha^* \\ i_\beta^* \end{bmatrix} \quad \text{(II.26)}$$

$$i_0 = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (i_a + i_b + i_c) \quad \text{(II.27)}$$

Le diagramme de blocs permettant de générer les courants de référence de l'équation (II.26) est représenté Fig. II.8, tel que FPB est un filtre passe-bas du second ordre, dont le principe de fonctionnement est illustré dans la Fig. II.9.

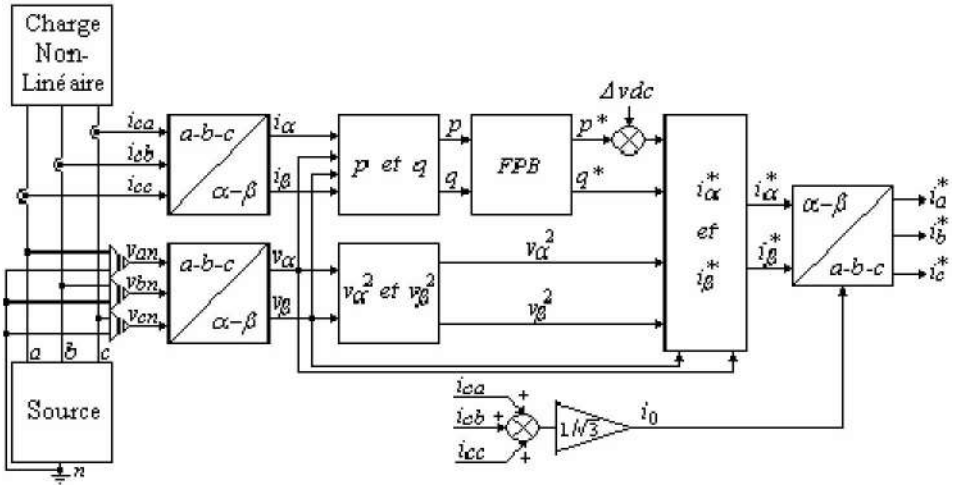


Fig.II.8. Diagramme de blocs de génération des courants de référence selon la théorie *p-q*

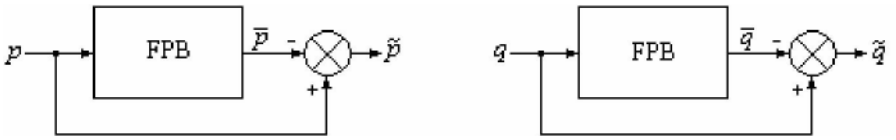


Fig. II.9. Opération du filtre passe-bas utilisé pour l'extraction des signaux AC de *p-q*.

La fonction de transfert FT du FPB est donnée par l'équation (II.28):

$$FT = \frac{\omega_0^2}{s^2+2.\xi_0\omega_0.s+\omega_0^2} \qquad \text{(II.28)}$$

avec: $\omega_{0=2\pi f_0}$, f_0 est la fréquence de coupure du filtre,

s: l'opérateur de Laplace,

ξ_0: dépassement.

L'avantage de la théorie de la puissance instantanée réactive est que les puissances active et réactive associées aux composantes fondamentales sont des quantités continues. Ces quantités sont extraites à l'aide d'un filtre passe-bas. Puisque le signal est extrait en DC, le filtrage de ce dernier dans le plan *α-β* est insensible aux erreurs de déphasage introduites par le filtre passe-bas, améliorant ainsi les caractéristiques de compensation du filtre actif [12].

II.5.2. MLI à échantillonnage périodique:

La méthode d'échantillonnage périodique permet aux semi-conducteur constituant le filtre actif de commuter durant les transitions d'une horloge à onde carrée et à fréquence fixe (fréquence d'échantillonnage). Comme illustré Fig. II.10, ce type de commande est très simple à implanter dans la mesure où il ne nécessite qu'un comparateur et une bascule D. L'avantage principal de cette méthode est que le temps minimal entre les commutations est limité par la période d'échantillonnage de l'horloge. Cependant, la fréquence de commutation actuelle n'est pas clairement définie.

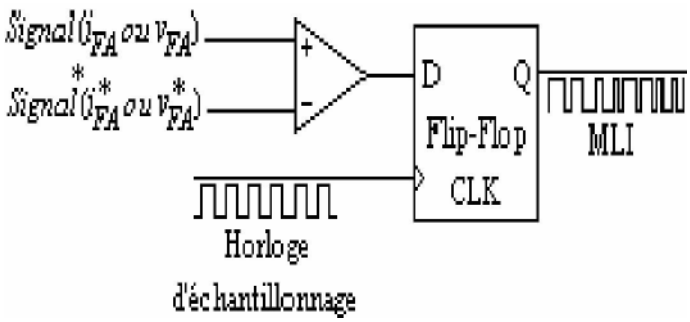


Fig.II.10. Modulateur MLI à échantillonnage périodique.

II.5.3. MLI à Bande d'hystérésis:

La méthode de la bande d'hystérésis permet la commutation des interrupteurs du filtre actif lorsque l'erreur entre le signal (courant ou tension) et sa consigne excède une amplitude fixée. Cette amplitude est communément appelée fourchette ou bande d'hystérésis. Comme illustré Fig. II.11.a, cette technique ne demande qu'un comparateur à hystérésis par phase.

Dans ce cas, la fréquence de commutation ne peut être déterminée mais plutôt estimée.

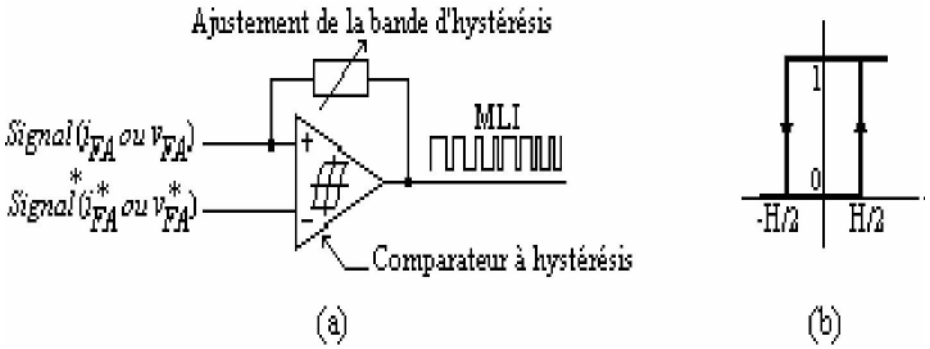


Fig. II.11. Modulateur MLI à bande d'hystérésis. (a). Schéma global. (b). Principe.

Le comparateur à hystérésis fonctionne selon le principe expliqué dans la Fig. II.11.b. L'interrupteur s'ouvre si l'erreur devient inférieure à –H/2, il se ferme si cette dernière est supérieure à +H/2, où H représente la fourchette (ou largeur) d'hystérésis. Si l'erreur est maintenant comprise entre –H/2 et +H/2 (*c.-à-d.* qu'elle varie à l'intérieur de la fourchette d'hystérésis), l'interrupteur ne commute pas [3],[15]. Par exemple, dans le cas d'un filtre actif parallèle, si l'erreur du courant généré se situe à l'intérieur de la bande, pas de réaction enregistrée de la part de la commande ; si l'erreur est trop élevée, la commande est positive et entraîne l'interrupteur à la fermeture. Par conséquent, la tension générée est supérieure ou égale à zéro, condition nécessaire pour l'accroissement du courant. Analogiquement, lorsque le courant de sortie est trop élevé, ceci incite l'interrupteur à l'ouverture, donc la tension à être inférieure ou égale à zéro et ainsi le courant à décroître.

L'interaction entre les trois phases de l'onduleur constituant le filtre est un inconvénient. En effet, si la commande est positive dans l'une des phases dans l'objectif d'accroître le courant, la tension s'accroît également sur cette phase, tandis qu'elle diminue dans les deux autres phases. Ceci peut être préjudiciable pour le contrôle du courant sur les deux autres phases.

La commande par hystérésis est excellente dans la mesure où elle assure une bonne réponse de l'onduleur vis-à-vis des changements rapides des courants de référence, puisque les comparateurs à hystérésis ont une inertie et un retard négligeables.

II.5.4. MLI à porteuse triangulaire:

La méthode de la MLI à porteuse triangulaire, montrée dans la Fig. II.12, compare l'erreur entre le signal (courant ou tension) et sa consigne avec une onde triangulaire (porteuse) d'une amplitude et d'une fréquence fixées. L'erreur passe par un correcteur Proportionnel-Intégral *PI* avant d'être comparée avec la porteuse triangulaire. En réalité, cette technique est un peu plus complexe que les deux précédentes. En effet, ce sont les deux coefficients k_p et k_i du correcteur *PI* qui permettent de déterminer la réponse transitoire et l'erreur du régime permanent de cette méthode à porteuse triangulaire. Il a été empiriquement montré que les k_p et k_i calculés par les équations (II.29) et (II.30) donnent une bonne performance dynamique indifféremment sous des conditions transitoires ou permanentes [4].

$$k_p = \frac{L.\omega_c}{2Vdc} \qquad \text{(II.29)}$$

$$k_i = \omega_c . k_p \qquad \text{(II.30)}$$

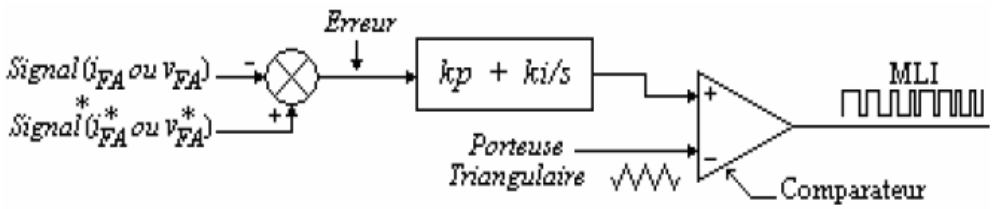


Fig. II.12. Modulateur MLI à porteuse triangulaire.

Avec: *L*, inductance totale série vue par le filtre actif ; *fp*, fréquence de la porteuse triangulaire ayant une amplitude de 1V crête à crête, et V_{dc} est la valeur moyenne de la tension du bus continu du filtre actif.

II.6. Partie de simulation:

La structure générale d'un filtre actif parallèle sous Matlab-simulink (simpower system)

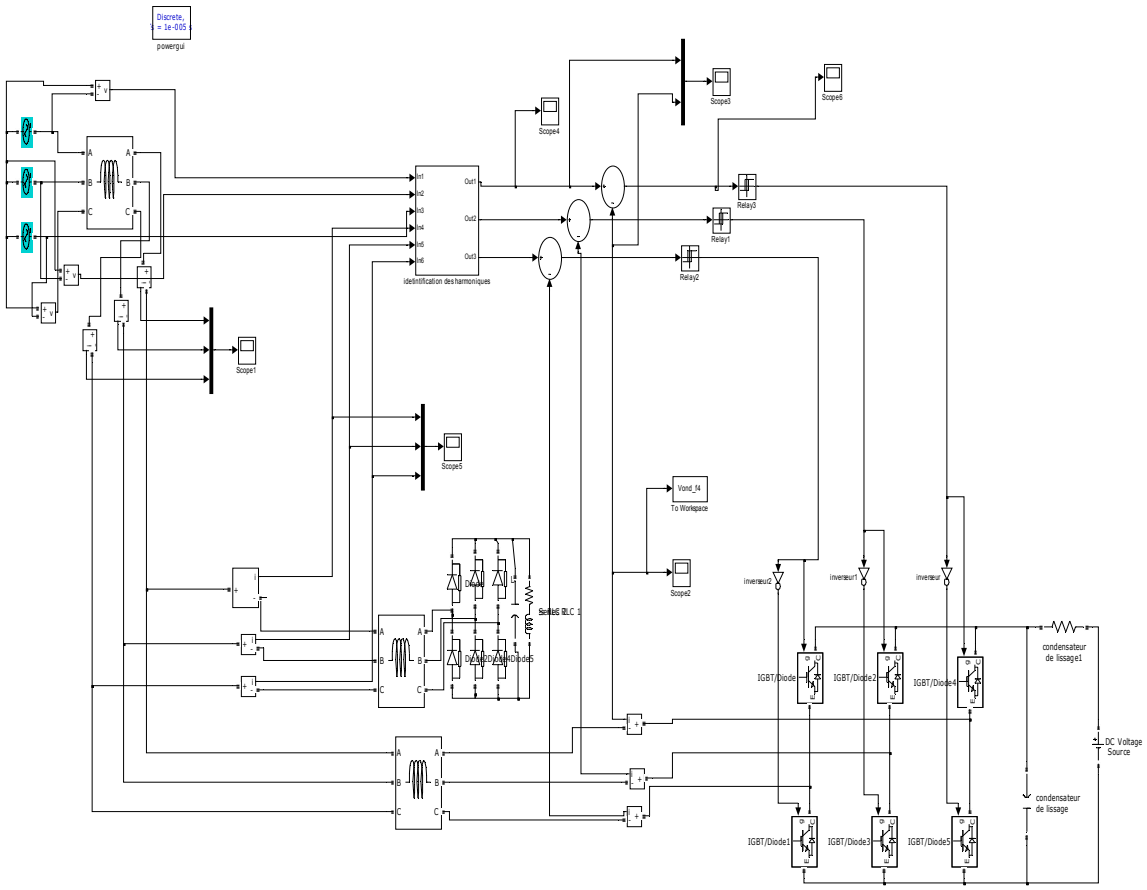


Fig.II.13. Schéma global sous Matlab-simulink du F.A.P

II.6.1. Identification des courants perturbes :

Le courant de référence pour la compensation des harmoniques identifié par la méthode des puissances instantanées (PQ) est représentée sous Matlab-simulink ,dans la figure suivante :

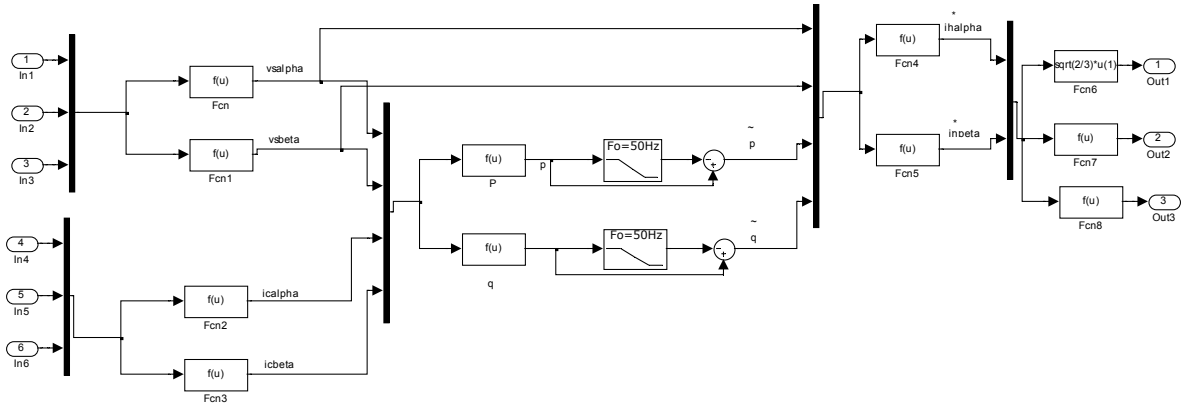


Fig.II.14.Méthode p q sous Matlab-simulink.

II.6.2.Résultats de simulation:

- **Avant le filtrage :**

Le courant de la charge polluante (absorbé du réseau) la charge polluante est alimentée par un système triphasé et équilibré de tension efficace, représenté sur la figure II.15

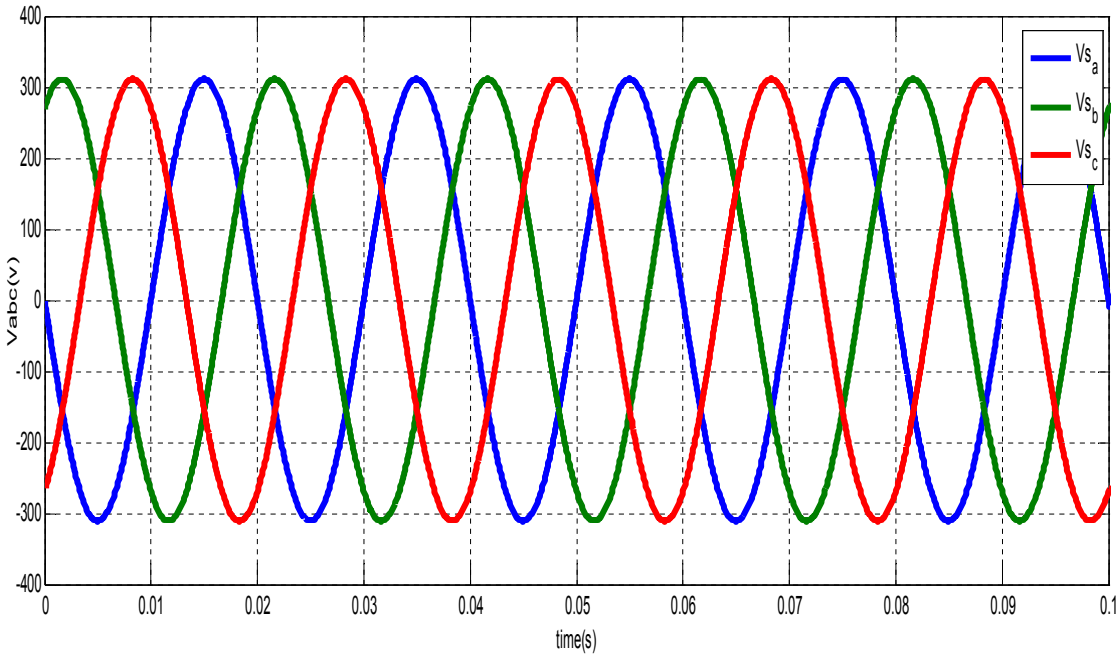


Fig.II.15 Les tensions du réseau d'alimentation.

Le courant triphasé absorbé par cette charge est représenté sur la figure suivante:

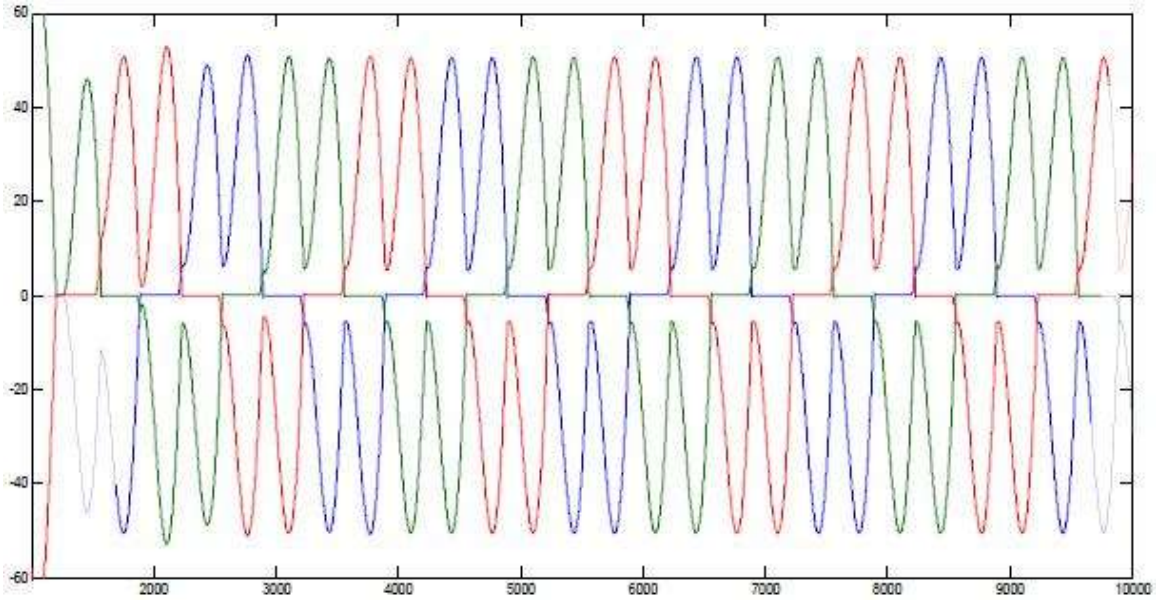


Fig.II.16. Courant absorbé par la charge polluante (en triphasé).

Le spectre d'harmonique du courant de source est représenté dans la figure suivante :

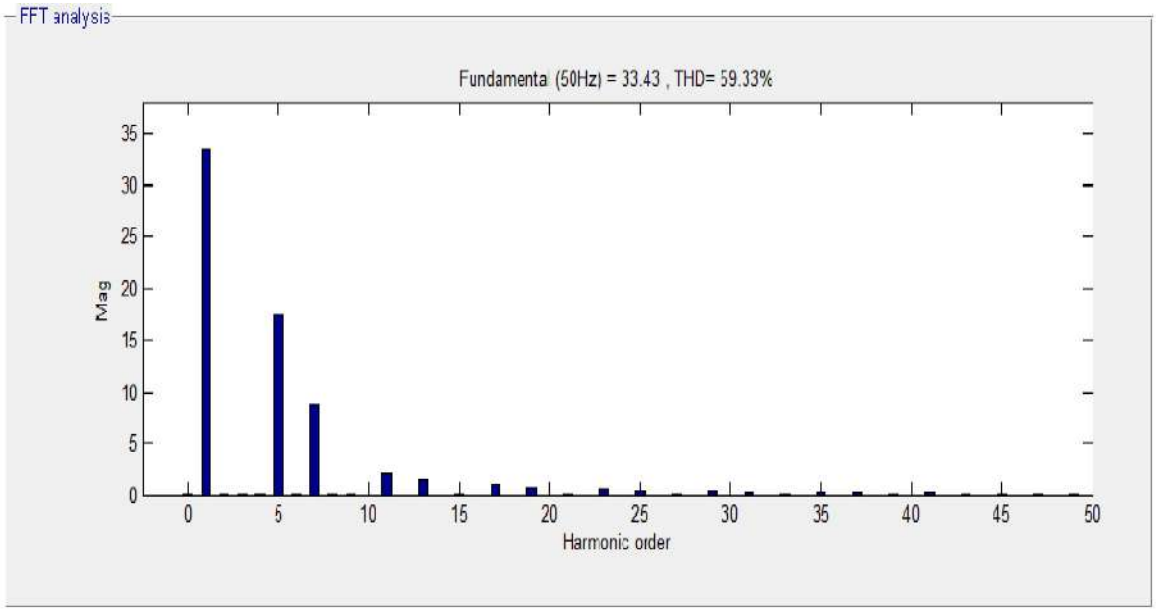


Fig.II.17.Spectre harmonique de is.

- **Apres filtrage**

Le courant de référence identifié par la méthode des puissances instantanées et le courant de filtre est représenté dans la figure suivante.

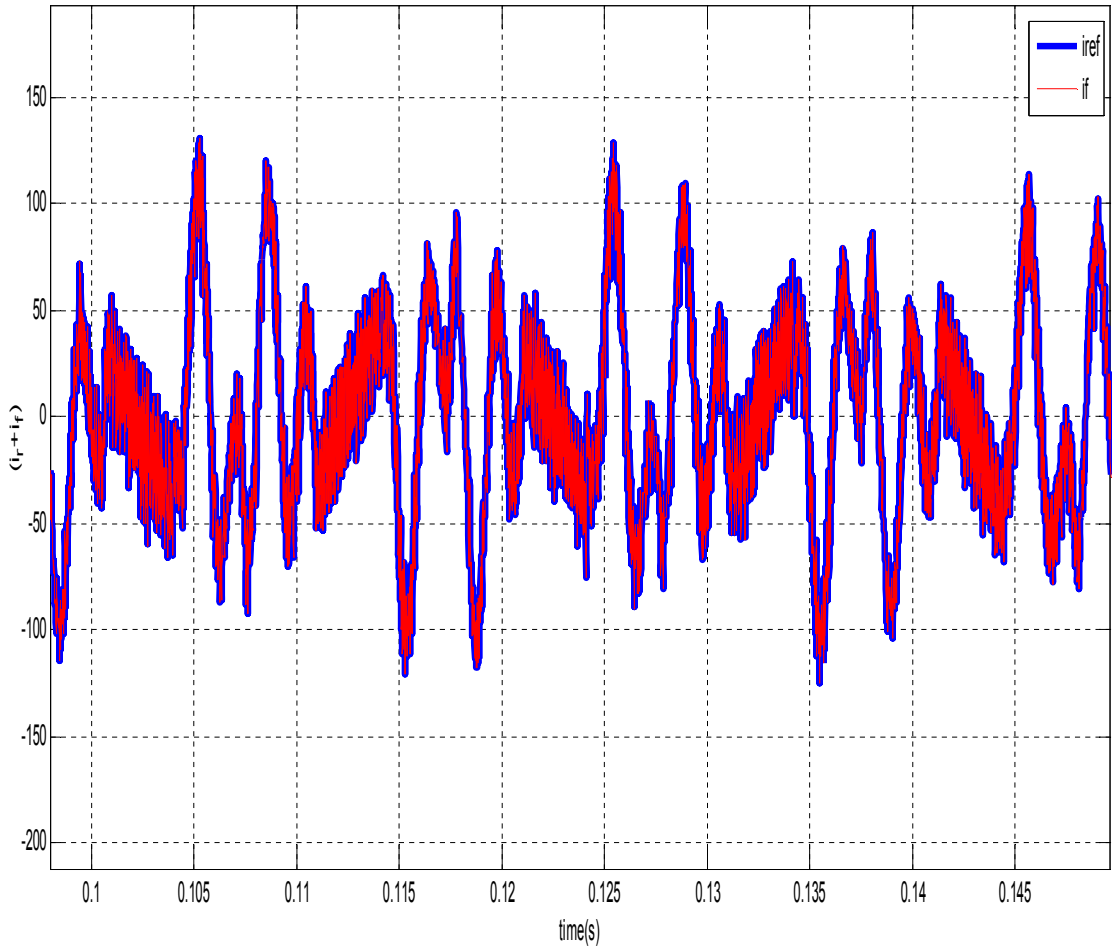


Fig.II.19. Les courants de référence triphasés et le courant de filtre

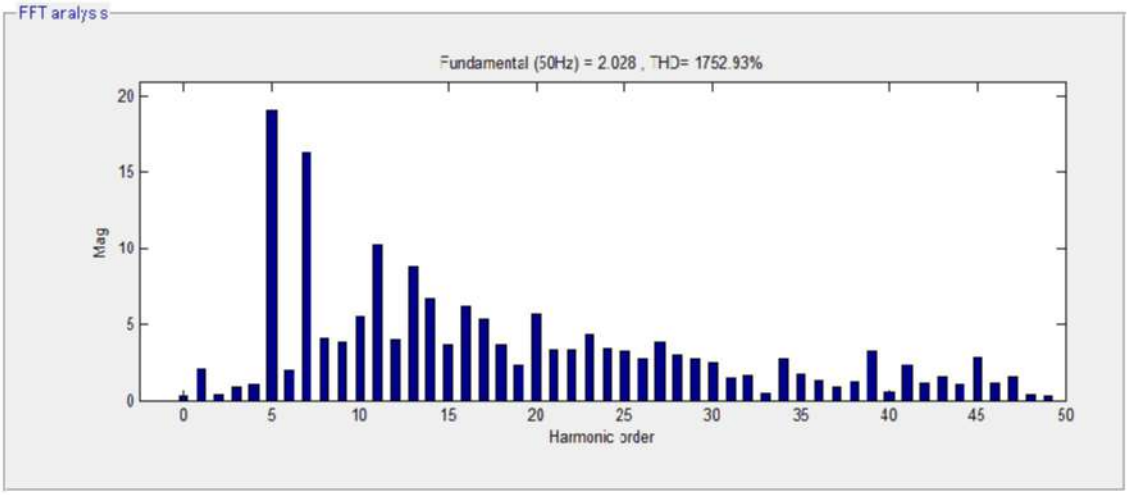


Fig.II.20.Le spectre harmonique du courant de filtre.

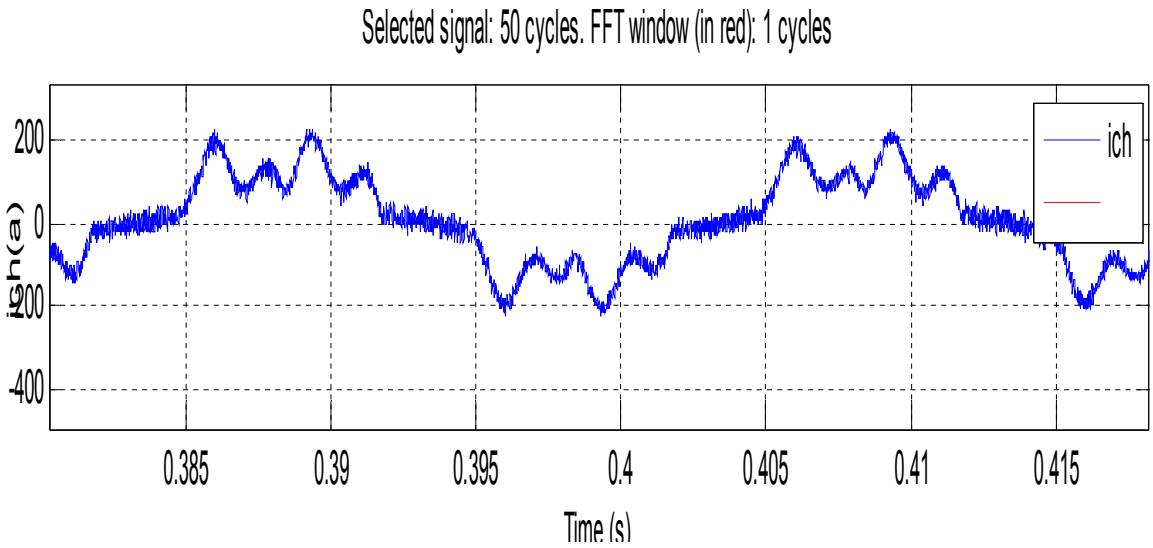


Fig.II.21 Le courant de charge.

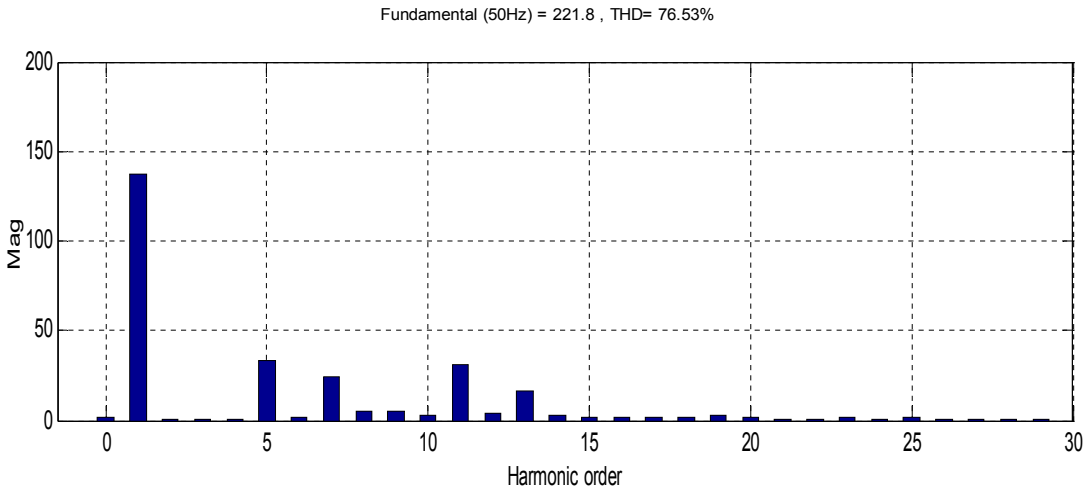


Fig.II.22. Le spectre harmonique du courant de charge

Le courant de source est représenté dans la figure II.23.

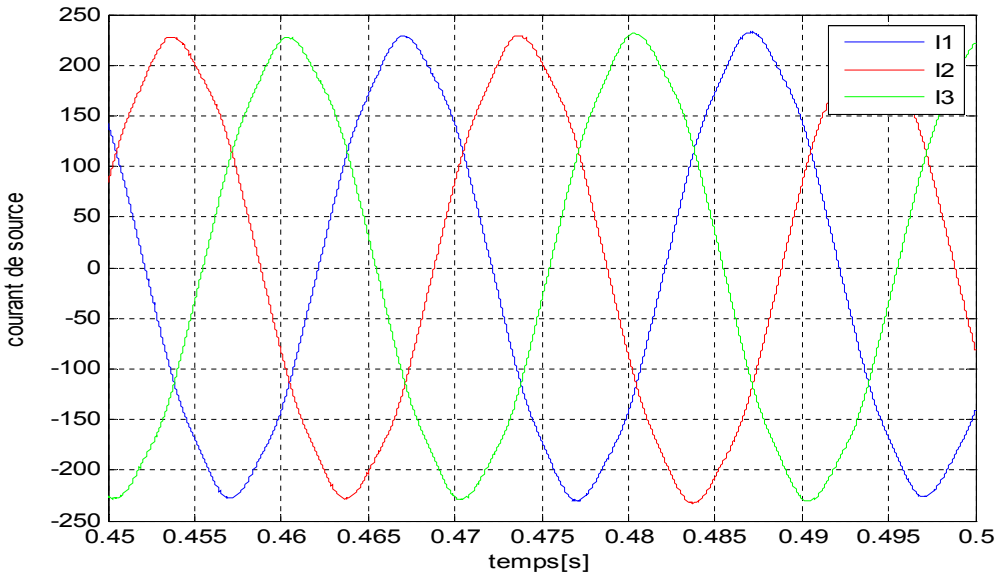


Fig.II.23 Le courant de source is

L'analyse spectrale du courant de source est représentée dans la figure II.24 Le taux de distorsion (THD) est de 2.18 %.

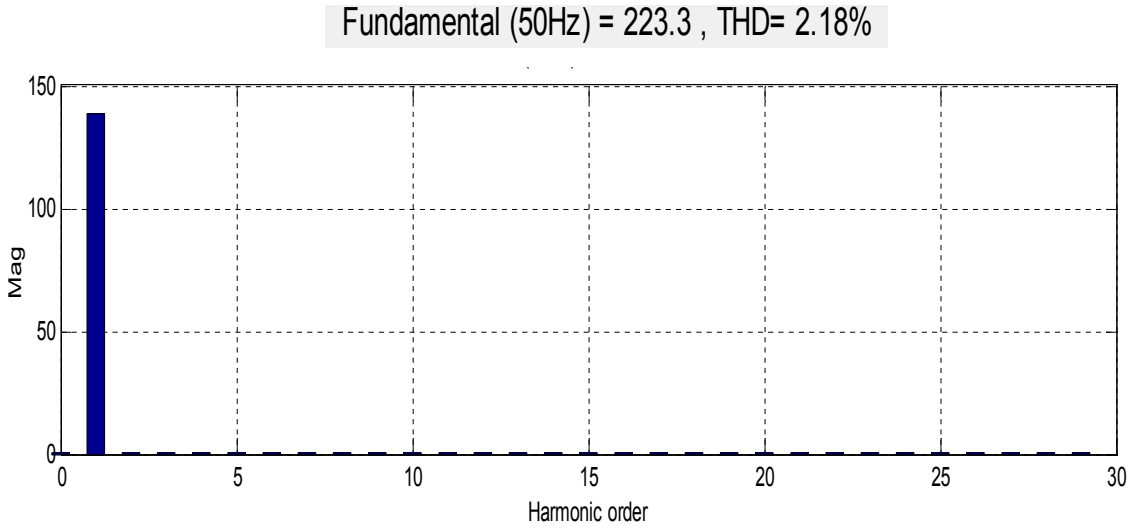


Fig.II.24 spectre harmonique de isa

II.6.3. Interprétation des résultats :

D'après les résultats obtenus en simulation il est évident que le courant de source est amélioré (de coté des harmonique) C.à.d. il est dépollué et le TDH est diminué de 51% à 2.18% aussi le courant de filtre suive le courant de référence dons la régulation fonctionne correctement et le filtre génère les harmoniques d'ordre 5,7,11,13... qui ont été polluées le réseau. Mais le courant de charge s'augmente à cause de la sommation du courant de filtre et de la source.

Les résultats obtenus montrent l'analyse temporelle et spectrale du courant de la charge, ils donnent également les courants de référence des trois phases identifiées ainsi que ceux injectés au réseau et le courant circulant au réseau. Le courant de la ligne après compensation est un courant sinusoïdal presque dépourvu des harmoniques (THD=2.18%).

II.7. Conclusion:

Dans ce chapitre, on a étudié les performances des algorithmes de commande du filtre actif parallèle appliqué sur la charge non linéaire. Et montré d'une manière très claire l'intérêt d'utiliser des convertisseurs (onduleurs) pour la dépollution des réseaux électriques, et surtout, les avantages d'utiliser ces onduleurs avec un niveau supérieur qui augmentent les performances du filtre actif parallèle.

D'abord, pour identifier les courants harmoniques de référence, l'image du courant qu'on doit injecter dans le réseau afin d'avoir un courant de source sinusoïdal, on a utilisé un filtre, qui extrait la composante fondamentale du courant imposé par la charge non linéaire , la soustraction de cette composante fondamentale du courant de charge donne la référence du filtre actif, en supposant une alimentation idéale du filtre c'est-à-dire avoir les tensions d'entrée équilibrées et constantes.

Enfin, on a conclu que l'utilisation un onduleur à trois niveaux à modulation de largeur d'impulsion, comme filtre actif parallèle des courants harmoniques engendrés par les charges non linéaires, donne des résultats très satisfaisant et une grande efficacité pour résoudre le problème de la distorsion du courant de la source .

III. 1. Introduction:

Le présent chapitre sera consacré à la modélisation d'un filtre actif série, le principe de la compensation actif série, et ainsi la topologie générale d'un filtre actif série.

Nous étudierons plusieurs structures de filtre actif série. La description complète de la structure la plus utilisée sera présentée. Puis, nous effectuerons un classement des méthodes d'identification des tensions perturbatrices et la méthode des puissances instantanées active et réactive dans l'objectif de montrer les avantages et les limites d'application des unes et des autres.

III. 2. Principe de la compensation actif série:

Le compensateur actif série est une solution pour protéger des charges sensible contre les perturbations de tension du réseau électrique. Il s'insère entre le réseau perturbé et la charge à protéger par l'intermédiaire d'un transformateur d'injection de tension. Il se comporte donc comme une source de tension qui s'oppose aux tensions perturbatrices (creux de tension, déséquilibre, harmonique) venant de la source.

Le principe de la compensation active des tensions harmoniques consiste à ajouter en série avec la charge polluante un dispositif constitué d'un onduleur de tension commandé en temps réel de telle sorte que la tension appliquée à la charge soit sinusoïdal.

Pour ce faire, il faut premièrement identifier la tension de source (v_{s1}, v_{s2}, v_{s3}) pour pouvoir connaître les tensions harmoniques (v_{h1}, v_{h2}, v_{h3}) qu'il faut ajouter pour avoir la tension de la charge sinusoïdale $(v_{ch1}, v_{ch2}, v_{ch3})$.

Dans cette étude, on a utilisé une charge non linéaire de redresseur triphasé à base des thyristors statique et dynamique.

La figure (III.1) peut facilement expliquer le fonctionnement du filtre actif série pour une tension de source perturbé (v_{s1}, v_{s2}, v_{s3}). Les valeurs des tensions harmoniques (v_{h1}, v_{h2}, v_{h3}) que doit fournir le compensateur doit être égal à des harmoniques identifie à partir de la tension de réseau perturbé.

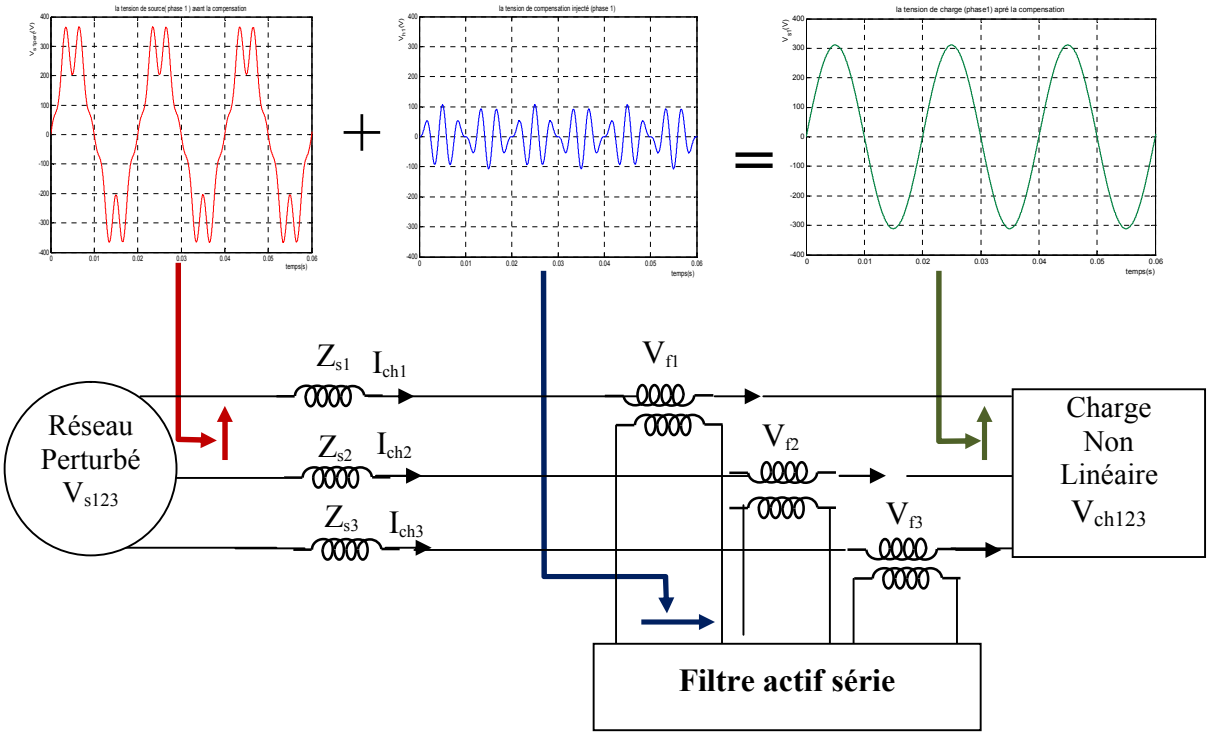


Fig. III.1 . Principe du filtrage actif série

III.3. Topologie générale d'un compensateur actif série:

Comme tous les compensateurs actifs le filtre actif série se compose essentiellement de deux parties, d'une partie puissance et d'une partie commande.

- La partie puissance ce compose d'un onduleur, d'un filtre de couplage et d'un élément passif lui servant de source d'énergie.

L'onduleur est un onduleur de tension à base d'interrupteurs de puissance, commandable à l'amorçage et au blocage avec des diodes en antiparallèle.

- La partie commande, sert au contrôle de la commutation des éléments semi conducteurs formant l'onduleur de la partie puissance. Au moyen de stratégies de contrôle appropriées [9],[10].

L'idée c'est de générer des signaux harmoniques à la sortie de l'onduleur servant à compenser ceux présents sur le réseau électrique.

III.4. Structure générale du filtre actif série:

Le filtre active série (F.A.S) est une solution adaptée à la compensation des tensions perturbatrices, harmoniques, déséquilibrées et des creux de tension.

Plusieurs structures de filtre actif série ont été proposées [13]. La plus utilisée, présentée sur la Fig. III.2, est composée d'une partie puissance et d'une partie contrôle-commande.

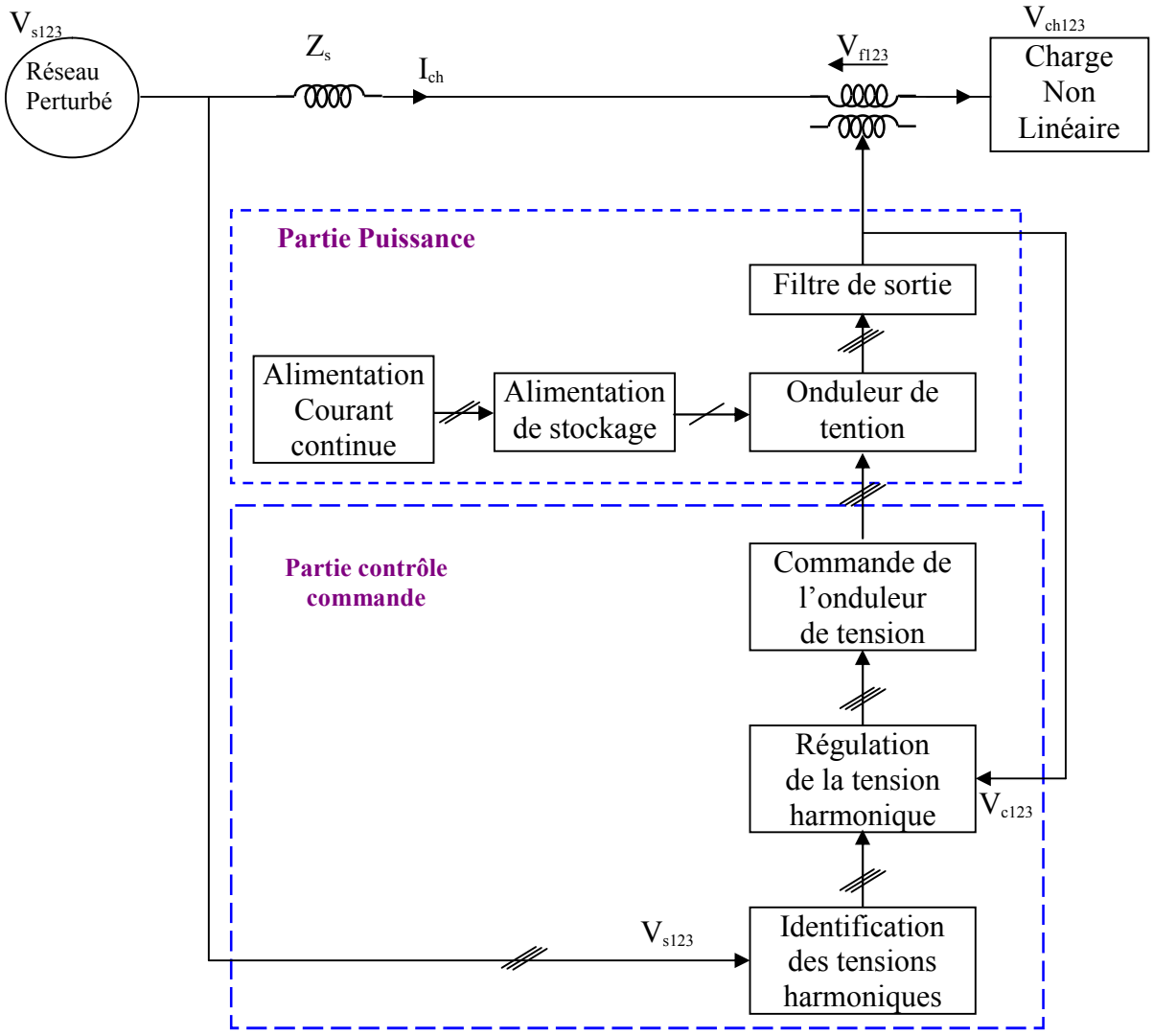


Fig.III.2 : filtre actif série.

L'onduleur est alimenté par des tensions continue Uci qui sont les tensions de sortie d'un redresseur de courant (figure III.3.a).

Dans notre application les tensions de référence ne sont plus sinusoïdales ils sont les trois tensions de sortie du bloc de régulation comme il montre la figure III.3.b, ces trois tension son comparé par poreuses (Figure III.3.a) [13],[16].

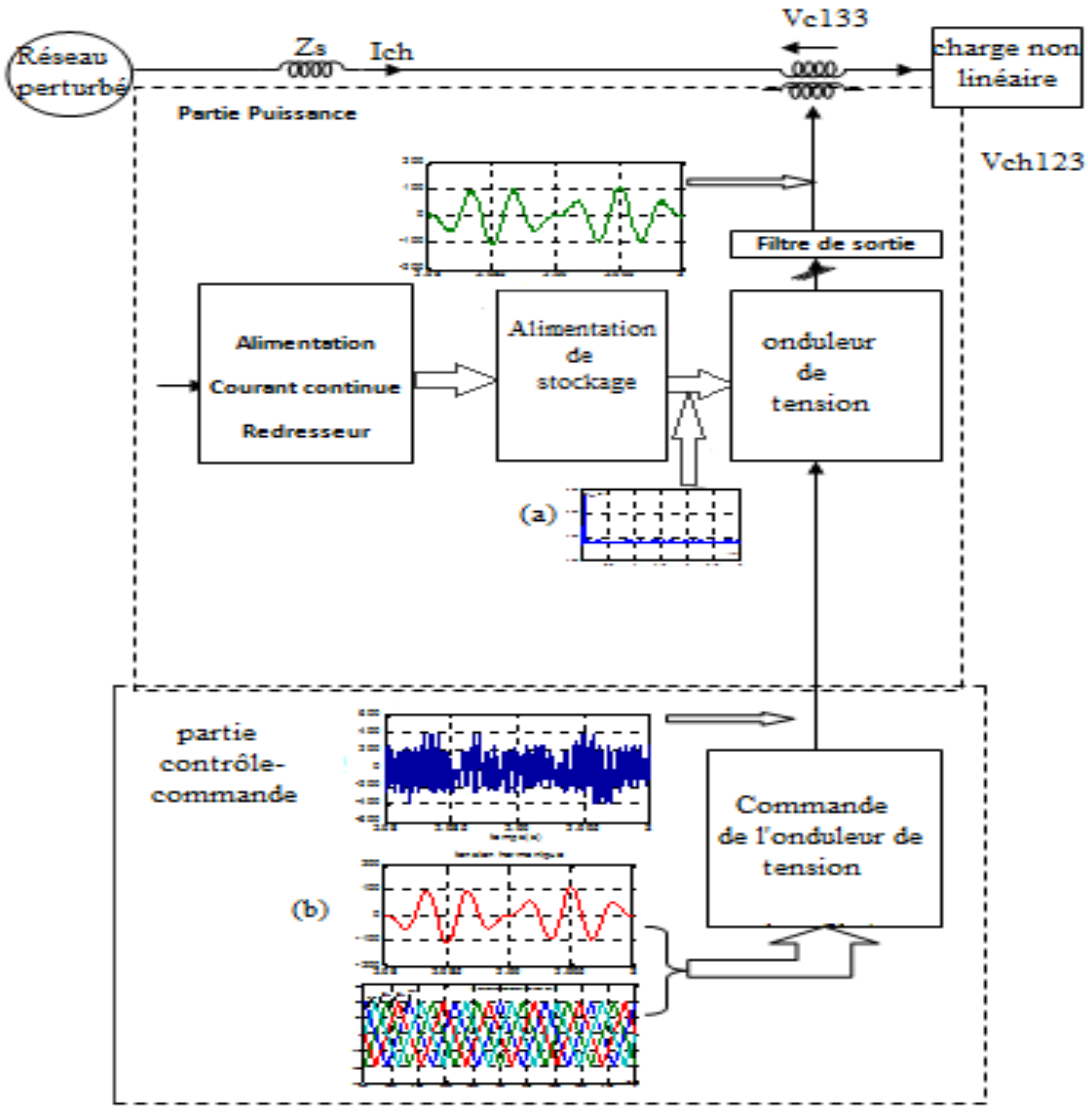


Fig.III.3. L'alimentation et stratégie de commande de l'onduleur pour asservi le filtre actif série

Les tensions de sortie de chaque bloc constituent le filtre actif série de puissance sont montrées dans la figure (III.4). La tensions identifie par la méthode des puissance réelle et imaginaire instantané (figure III.4.a), cette tension et régulé et suive ça référence chaque instant par la bloc de régulation, la figure (III.4. b) présente la tension de sortie de ce bloc qui exprime évidemment la tension d'entré du l'onduleur, la sortie de l'onduleur est une image figure (III.4.c).

Finalement la tension harmonique identifier et régule par le régulateur PI et injecté par l'onduleur doit être filtré par un filtre passif RLC pour filtré les harmoniques de haut fréquence figure (III.4.d). La tension présenté dans la figure (III.4.d) ajouté à la tension de réseau perturbé figure (III.4.e) mais de sens opposé pour amélioré la forme d'onde de la tension ou bien autrement dit diminué le taux de distorsion d'harmonique (THD) dans la forme de tension de réseau pour qu'il soit sinusoïdal figure (III.4.f) [13] .

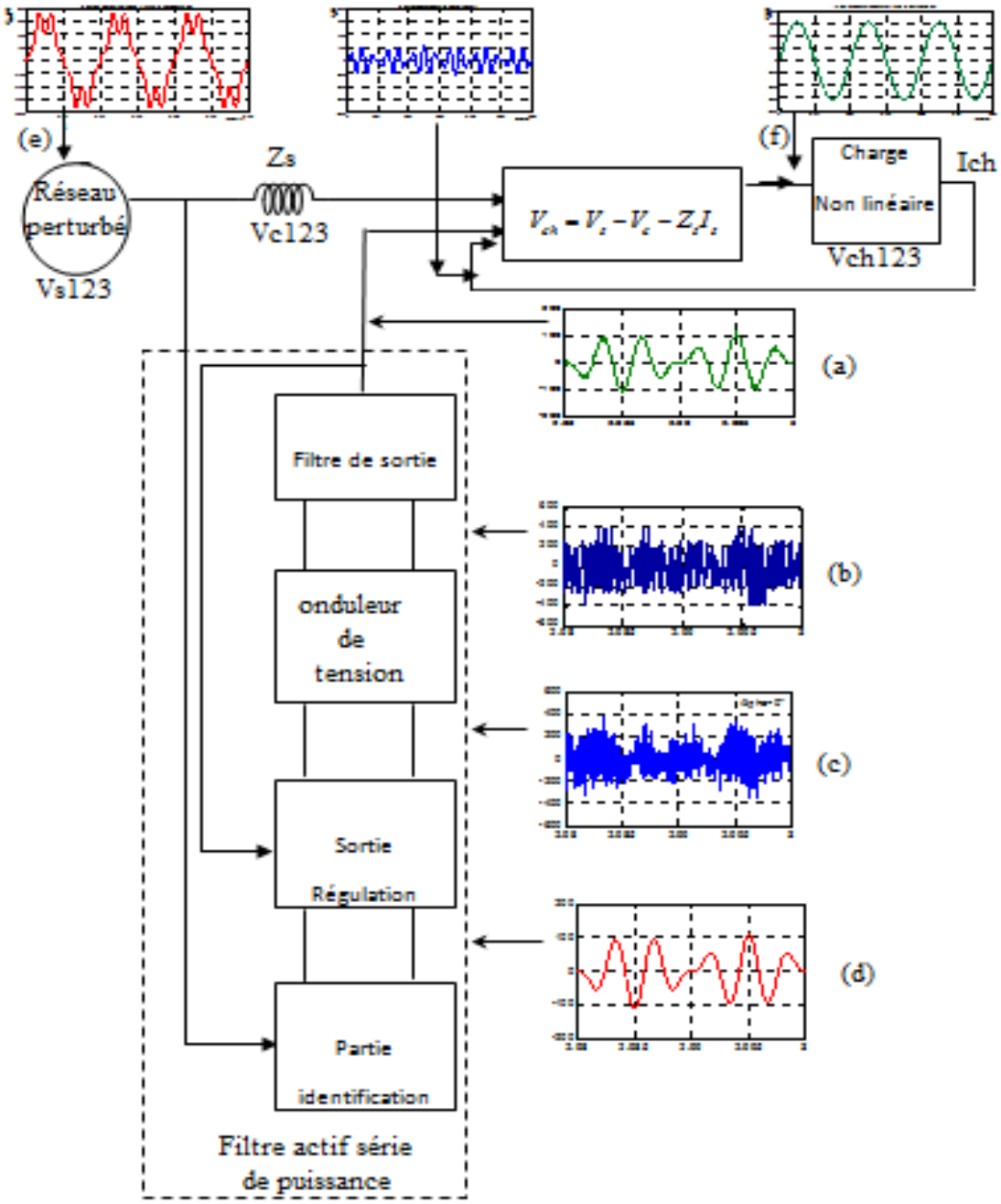


Fig. III.4.Les tensions de sortie constituent le filtre actif série.

III. 5. Etude de la partie puissance du filtre actif série:

III. 5. 1. Onduleur de tension:

Soit l'onduleur triphasé à structure de tension, on utilise dans notre travail un onduleur de tension à trois niveaux.

Le stockage d'énergie du coté continu est réalisé par un condensateur C_{dc} de tension V_{dc}, le filtre de sortie est un filtre passif du premier ordre (L_f, C_f) par lequel l'onduleur de tension est connecté au réseau électrique**.**

III. 5. 2. Système de stockage d'énergie

Le stockage d'énergie du coté continu se fait souvent par un système de stockage capacitif représenté par un condensateur C_{dc} qui joue le rôle de source de tension continue V_{dc}.

Le choix des paramètres du système se répercute à la fois sur la dynamique et la qualité de compensation du filtre actif serie. Le cas d'une tension V_{dc} élevée, nous permet d'avoir une amélioration de la dynamique du filtre actif**.**

III. 5. 3. Filtre passif de sortie

Le filtre passif représenté par l'inductance de découpage constitué le lien entre l'onduleur et le réseau électrique. Il doit empêcher les composantes dues aux commutations de se propager sur le réseau électrique.

- **Filtre du premier ordre**

Ce type de filtre est le plus utilisé dans la littérature**.** Il est composé d'une inductance *Lf* de résistance interne *Rf,* . Un filtre de ce type ne permet pas de satisfaire simultanément les deux critères de dimensionnement du filtre de sortie. En effet, seule une valeur relativement faible de *Lf* peut réaliser une bonne dynamique du filtre actif. Le bon dimensionnement du filtre de sortie du premier ordre dépendra donc du compromis à trouver entre la dynamique et l'efficacité du filtre actif série.

III.5.4 Transformateurs d'injection et protection du F.A.S:

Les transformateurs d'injection de tension (*Lt,Rt*) permettent d'injecter en série avec le réseau électrique et avec le taux de transformation souhaité la tension produite par l'onduleur, comme le montre la Fig. III.1 Par conséquent, ces transformateurs, considérés comme des

transformateurs de courant, permettent de réduire, par leurs taux de transformation, le courant de la charge traversant l'onduleur de tension. A cela s'ajoute que ces transformateurs, grâce à leurs caractéristiques magnétiques de saturation, contribuent à la protection du filtre actif série contre les défauts côté charge [4].

Les désavantages de l'emploi de ces transformateurs sont leurs coûts élevés et la chute de tension occasionnée par leurs inductances de fuite (*Lt,Rt*).

Le choix d'un filtre actif série sans transformateur d'injection nécessite l'emploi de trois onduleurs de tension monophasés avec trois sources continues indépendantes. Cette solution augmentant l'énergie nécessaire pour compenser les mêmes creux de tension, un filtre actif série avec un onduleur multicellulaire et un seul bus continu a été proposé [9].

Dans ce travail, trois transformateurs d'injection de tension seront employés et dimensionnés pour supporter le courant de la charge à protéger et la tension maximale injectée au réseau électrique. Le taux de transformation sera unitaire.

Le filtre série est protégé contre un court-circuit en aval côté charge par un système by-pass, constitué par une impédance variante, par deux thyristors en antiparallèle en série avec une petite résistance, et par des transformateurs à circuit magnétique saturable [14].

III. 6. Etude de la partie contrôle commande:

Cette partie, comporte les deux principaux éléments de la partie contrôle commande du filtre actif série ; l'identification des tensions perturbatrices et la régulation des tensions injectées au réseau électrique.

A ce point nous présentons seulement l'identification des tensions perturbatrices. La qualité du filtrage réside dans l'efficacité de la méthode utilisé pour l'identification des courants ou des tensions harmoniques, plusieurs méthodes ont été proposées, une de ces dernier est basée sur le calcul des puissances instantanées dans le domaine temporel. Certaines de ces méthodes se basent sur le calcul des puissances harmoniques de la charge non linéaire. D'autre peut être utilisée pour compenser à la fois les tensions et la puissance réactive, en se basant sur la soustraction de la partie fondamentale active de la tension totale.

Les trois méthodes les plus couramment utilisées dans les applications de compensation active sont :

La première méthode consiste à extraire la tension fondamentale du réseau à l'aide d'un filtre passe bande. Sachant que les fréquences des harmoniques ne sont pas assez éloignées de

celle du fondamental, il est donc nécessaire d'employer un filtre très sélectif. Mais ce sera difficile d'obtenir une atténuation importante du signal fondamental sans que les harmoniques ne soient affectés ni en module, et surtout, ni en argument.

Une autre méthode est basée sur l'analyse spectrale de la tension perturbée. Lorsque le réseau perturbé crée des tensions non stationnaires, La transformée de Fourier Glissante peut être utilisée. Cette méthode permet de calculer les amplitudes et les phases de tous les harmoniques, mais le temps de calcul, pour un processus numérique en temps réel, peut être trop important.

La troisième méthode utilise les notions des puissances réelle et imaginaire instantanées afin de séparer le fondamental dans le domaine fréquentiel. L'élimination de la composante fondamentale sera à ce moment là facile à mettre en œuvre.

La stratégie de commande d'un compensateur actif série se passe sur la détection des tensions perturbateurs dans le domaine temporel, deux possibilités d'identification des tensions perturbatrices.

- Identification à partir de la détection de la tension de la source ;
- identification à partir de la détection de la tension de la charge.

La première méthode est la plus approprié au compensateur actif série installé par le consommateur pour compenser les tensions perturbatrices résultant par des phénomènes perturbateurs tels que les harmoniques, les déséquilibres et les creux de tension.

III.6.1. Principe de la méthode P, Q :

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

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

La méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées basée essentiellement sur le principe de la puissance active $p(t)$ et réactive $q(t)$ instantanée a pour but la détermination de la tension fondamentale v_f et de la tension harmonique v_h d'une tension de réseau perturbé, elle utilise la transformation de $\alpha - \beta$.

Pour définir les puissances instantanées active et réactive $q(t)$ et $p(t)$ on note respectivement.

(v_{s1}, v_{s2}, v_{s3}) : Les tensions simples de la source perturbée ;

(i_{c1}, i_{c2}, i_{c3}) : Les courants de charge de notre système triphasée.

Comme nous l'avons déjà fait dans le chapitre II.

Dans ce cas (FAS), il s'agit d'extraire les tensions de référence du filtre série [11],[13]. Dans chaque phase, la tension de référence est définie comme étant la différence entre les composantes harmoniques contenues dans la tension de source et celles de la charge non linéaire.

Les composantes harmoniques de la tension de source peuvent être modélisées par le produit des composantes harmoniques du courant de source et d'un gain. Maintenant, pour obtenir à la fois les composantes harmoniques du courant de source et celles de la tension de charge, on retranche du signal instantané (courant de source/tension de charge) la composante fondamentale.

Soit *x* (*t*) un signal instantané. La composante harmonique x_h de x est définie par:

$$x_h = x - x_f \tag{III.2}$$

telle que:

$$\begin{bmatrix} x_{fa} \\ x_{fb} \\ x_{fc} \end{bmatrix} = C_{32}^{-1}.C_{pq}^{-1}\begin{bmatrix} \overline{x}_p \\ \overline{x}_q \end{bmatrix}$$

(III.3)

Avec: C_{32}^{-1} ,matrice inverse (ou transposée) de C_{32} , C_{pq}^{-1} matrice inverse (ou transposée) de C_{pq} représentant la matrice circulaire permettant le passage du plan

α-β vers la plan *p-q* [14],[15] et ayant pour expression:

$$C_{pq} = \begin{bmatrix} \sin(\omega t) & -\cos(\omega t) \\ -\cos(\omega t) & -\sin(\omega t) \end{bmatrix} \tag{III.4}$$

et

$$\begin{cases} \overline{x}_p = x_p - \tilde{x}_p \\ \overline{x}_q = x_q - \tilde{x}_q \end{cases} \tag{III.5}$$

tels que $\overline{x}_p$, $\overline{x}_q$ et $\tilde{x}_p$, $\tilde{x}_q$ sont respectivement les composantes continues et alternatives de x_p et x_q Soit:

$$\begin{bmatrix} x_p \\ x_q \end{bmatrix} = C_{pq}.C_{32}.\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \tag{III.6}$$

$\overline{x}_p$, $\overline{x}_q$ sont simplement obtenues en faisant passer x_p , x_q par un FPB semblable à *p* ,*q*.

III. 6. 2. Séparation des puissances :

En conséquence, l'élimination de la composante fondamentale p et q s'effectue à l'aide de deux filtres passe-haut de Butterworth d'ordre deux (figure III.5) :



Fig.III.5. Filtres passe-haut de Butterworth.

III.6. 3. Identification des tensions de référencées :

Après le filtrage de la puissance instantanée active et réactive, la transformation inverse permet le calcul des références de tension. La relation (II.1) indique les calculs à effectuer afin d'obtenir les références dans le repère $(\alpha\beta)$.

La relation (II.8) permet l'obtention de l'expression des signaux de référence utilisés pour la régulation des tensions dans le repère triphasé.

p_{ref} , q_{ref} : Les puissances active et réactive de référence, dépendent d'une part de la nature des tensions à compenser (éliminer les tensions harmoniques revient à compenser les composantes alternatives) et d'une autre part, le mode de régulation de la tension électrique.

Le schéma de la figure (III.6) illustre les différentes étapes permettant l'extraction des tensions de référence à partir des tensions V_{S123} et courants de charge i_{c123} [].

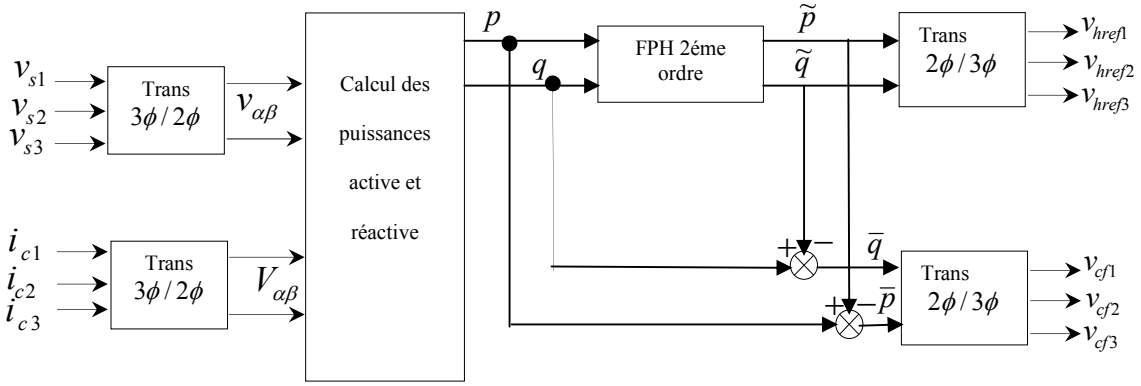


Fig. III. 6 .Méthode p-q d'extraction des tensions de référence.

III.7. Etude de la boucle de régulation:

Après avoir identifié les tensions perturbatrices et afin d'assurer une injection rapide, précise et robuste de ces tensions, plusieurs méthodes de régulation de la tension de sorti e de l'onduleur ont été proposées dans la littérature [16].

Dans ce chapitre, et a fin de réaliser les objectifs de régulation, un régulateur PI ont été étudiés. Les problèmes ainsi que les limites de ce régulateur ont été analysés (figure III.7) .

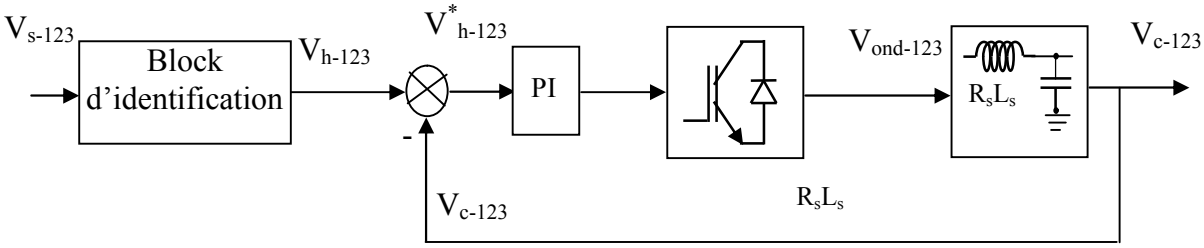


Figure III.7. Emplacement du block de régulation

III .8. L'onduleur de tension muni de son Filtre LC:

Le filtre de sortie d'un compensateur actif série est généralement un filtre passif du deuxième ordre *(Lsf,Rsf,Csf)*,comme le montre la figure III.8 et la figure III.9.

L'ensemble onduleur et filtre de sortie se comportant comme une source de tension, le filtre de sortie sert d'une part à atténuer les composantes dues aux commutations de l'onduleur, d'autre part à connecter le filtre actif au réseau électrique.

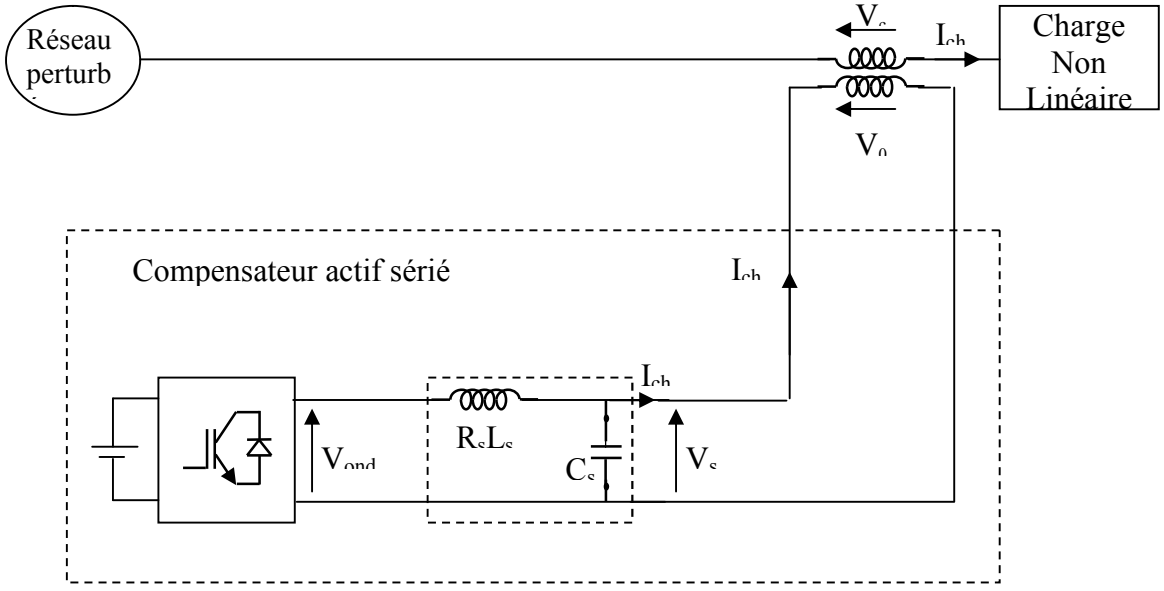


Figure III.8 : Model simplifies d'un réseau perturbé associée d'un compensateur actif

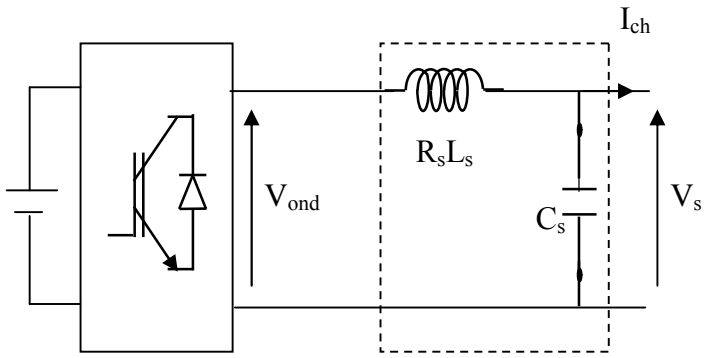


Figure III.9 Model simplifié d'un onduleur et filtre de sortie

Le système de la figure.III.9 peut être modélisé en monophasé comme suit :

$$\frac{dx(t)}{dt} = \mathrm{A}x(t) + \mathrm{B}_1 v(t) + \mathrm{B}_2 I_{ch}(t) \tag{III.7}$$

$$\begin{bmatrix} \frac{dI}{dt} \\ \frac{dV_c}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_{fs}}{L_{fs}} & \frac{-1}{L_{fs}} \\ \frac{1}{C_{fs}} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I \\ V_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{fs}} \\ 0 \end{bmatrix} . v_t + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{C_{fs}} \end{bmatrix} I_{ch} \tag{III.8}$$

L'entrée du système est la tension de l'onduleur $\mathrm{V}_t(t), V_c(t)$ est la tension aux bornes du condensateur C_{fs} et I_{ch} est le courant de la charge à protéger qui se comporte comme une perturbation. La fonction de transfert du système est:

$$V_c(p) = \frac{1}{1 + \ddot{R}_{fs} C_{fs} P + L_{fs} C_{fs} P^2} . V_t(p) + \frac{L_{fs} P + R_{fs}}{1 + R_{fs} C_{fs} P + L_{fs} C_{fs} P^2} . I_{ch}(p) \tag{III.9}$$

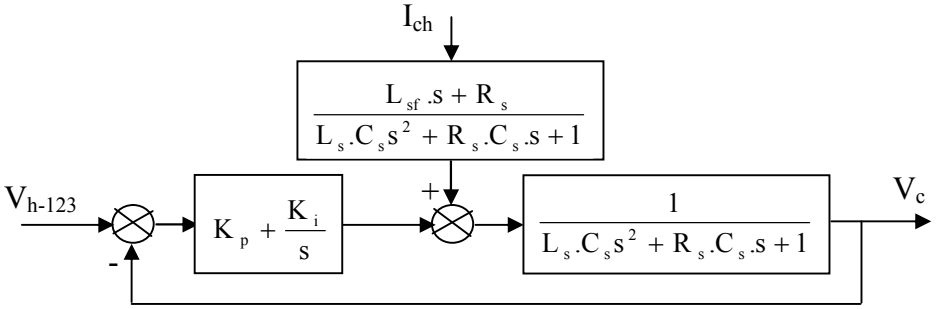


Fig. III.10 : Modélisation du block de régulation

III .9. Calcul des paramètres de régulateur PI :

On utilise un régulateur PI .Il en résulte la fonction de transfert d'ordre trois de la boucle fermée :

$$\frac{V_{inj}}{V_{ref}} = \frac{K_i}{L_{sf}C_{sf}} \cdot \frac{1+\frac{K_p}{K_i}s}{s^3 + \frac{R_{sf}}{L_{sf}}s^2 + \frac{K_i}{L_{sf}C_{sf}}} \qquad \text{(III.10)}$$

Les paramètres K_i et K_p sont calculés par la méthode de placement des pôles.

III.10.Stratégie de placement de pôles :

La méthode de placement de pôles permet d'analyser l'influence du paramètre de système asservie à partir de la position des racines de l'équation caractéristique dans le plan complexe

A l'aide du placement des pôles, il est possible de trouver la valeur du paramètre correspondant à la position à la position optimal des pôles dans le plan complexe.

On a insérée un régulateur PI dans la boucle de régulation. La fonction de transfert en boucle fermée est :

$$\frac{V_{inj}}{V_{ref}} = \frac{K_i}{L_{sf}C_{sf}} \cdot \frac{1+\frac{K_p}{K_i}s}{s^3 + \frac{R_{sf}}{L_{sf}}s^2 + \frac{K_i}{L_{sf}C_{sf}}} = \frac{N(s)}{D(s)} = P(s) \qquad \text{(III.11)}$$

Avec :

$N(s)$: Le numérateur

$D(s)$: Le dénominateur, ou encore appelé équation caractéristique du système.

Le numérateur $D(s)$ de la fonction de transfert est un polynôme de troisième degré.

On choisit deux pôles complexes conjugués P_1 et P_2 et de troisième P_3 réelle pour obtenir un bon amortissement, la racine réelle égale a partie réelle des racines complexes (figure III.11)

On obtient :

$$\begin{cases} P_1 = -\rho + j\rho \\ P_2 = -\rho - j\rho \\ P_3 = -\rho \end{cases} \quad \text{(III.12)}$$

C'est-à-dire que le dénominateur est donné par :

$$D(s) = (s - P_1)(s - P_2)(s - P_3) \quad \text{(III.13)}$$

Par identification des termes des polynômes (équation III.12 et équation III.13), on obtient :

$$\begin{cases} K_p = 4L_{sf}C_{sf}\rho^2 - 1 \\ K_i = 2L_{sf}C_{sf}\rho^3 \end{cases} \quad \text{(III.14)}$$

Avec :

$$\begin{cases} L_{sf} = 500\mu H \\ R_{sf} = 31m\Omega \\ C_{sf} = 200\mu F \end{cases}$$

ρ	0	1	2	3	4	5	6	7
K_p	0.4	-0.6	0.6	2.6	5.4	9	13.4	18.6
K_i	0	0.4	3.2	10.8	25.6	50	86.4	137.2

Tab.III.1. Valeurs de régulateur PI

Pour chaque valeur de ρ les sons valeurs de $K_p et K_I$ le régulateur PI et cabale de régulée et suive les trois tensions harmonique injecté par onduleur.

Permes la valeur montrée dans le tableau précédant on utilise dans les valeur suivant:

$$\begin{cases} K_p = 2.6 \\ K_i = 10.8 \end{cases}$$

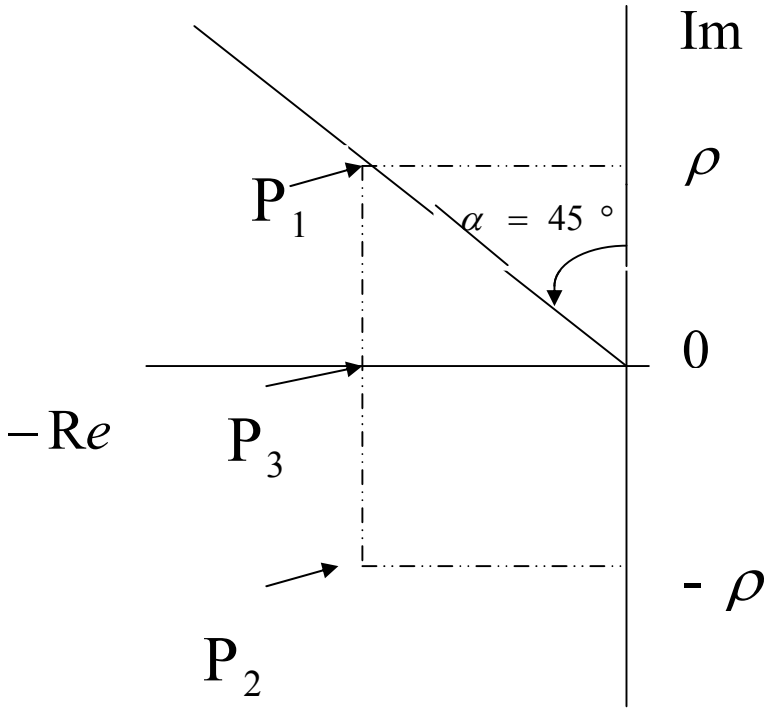


Figure III.11: stratégie de placement de pôles de D(s)

III.11. Partie de simulation:

La structure générale d'un filtre actif parallèle sous Matlab-Simulink (Fig.III.12).

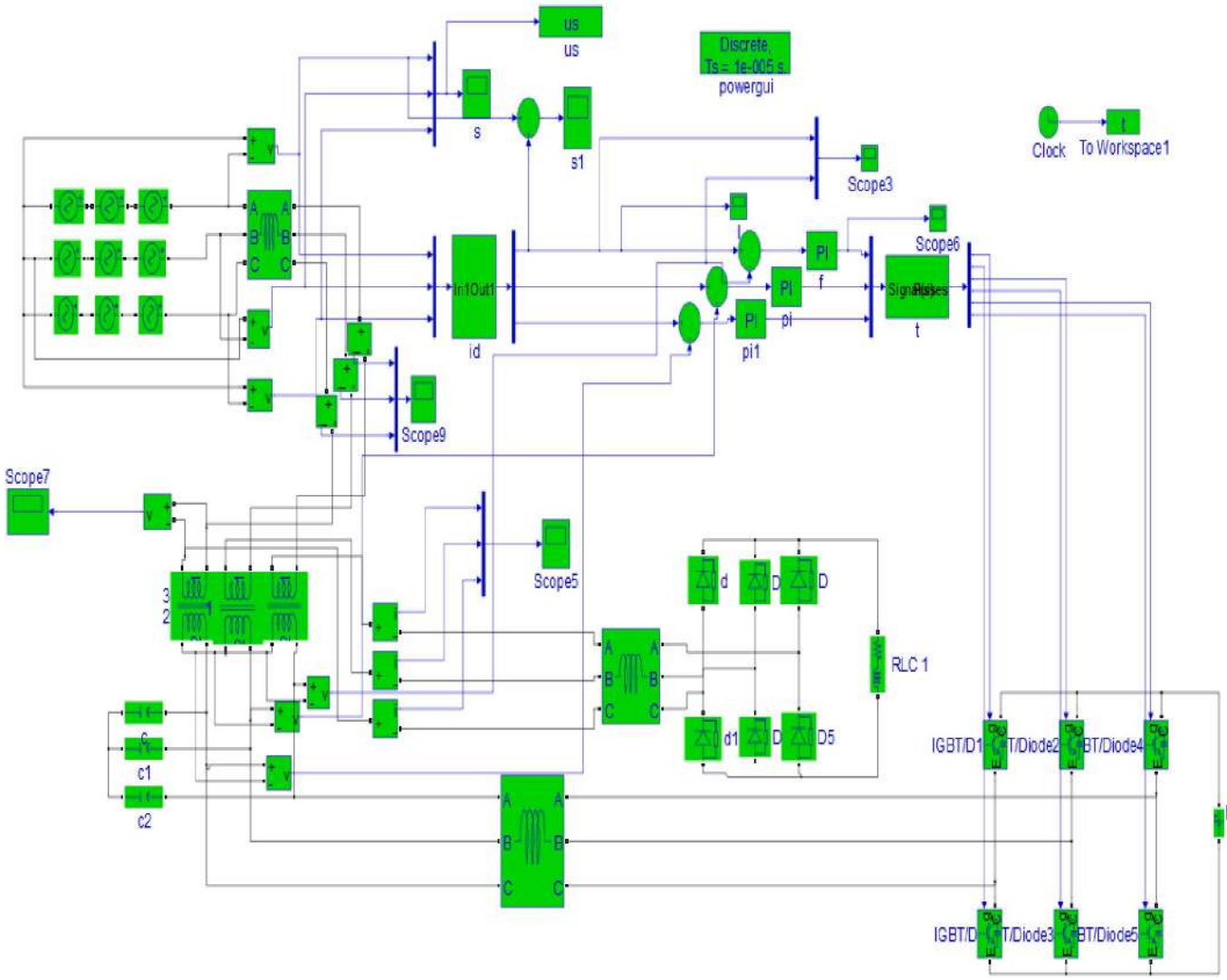


Fig.III.12. Schéma global sous Matlab-simulink du F.A.S

III-12 Partie de simulation :

L'étude théorique effectuée dans ce chapitre est étayée dans cette partie, sous des conditions réelles et parfois exagérées des réseaux électriques, à travers plusieurs simulations, avec le logiciel Matlab- Simulink.

➢ **Les résultats de simulation avant le filtrage Série :**

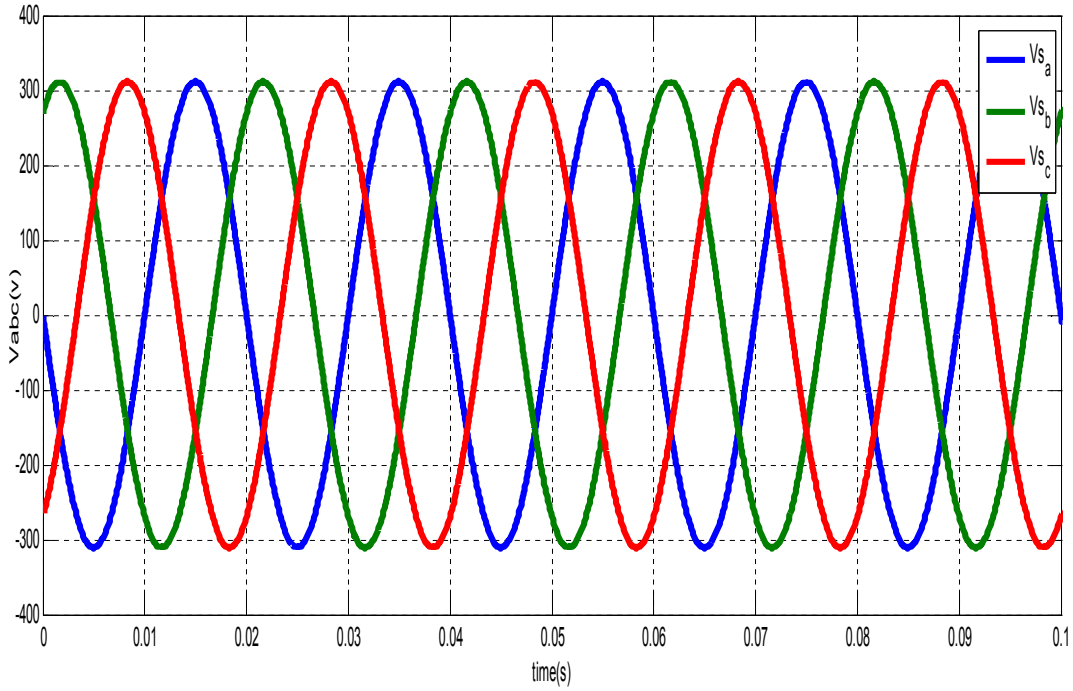


Fig .III 13. Les tension du réseau d'alimentation (V).

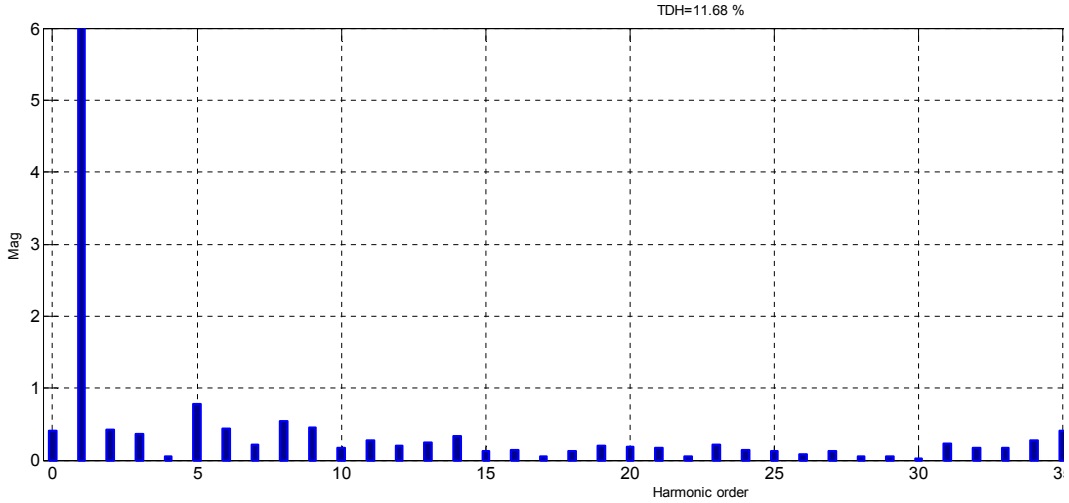


Fig .III 14. Spectre harmonique de Vc.

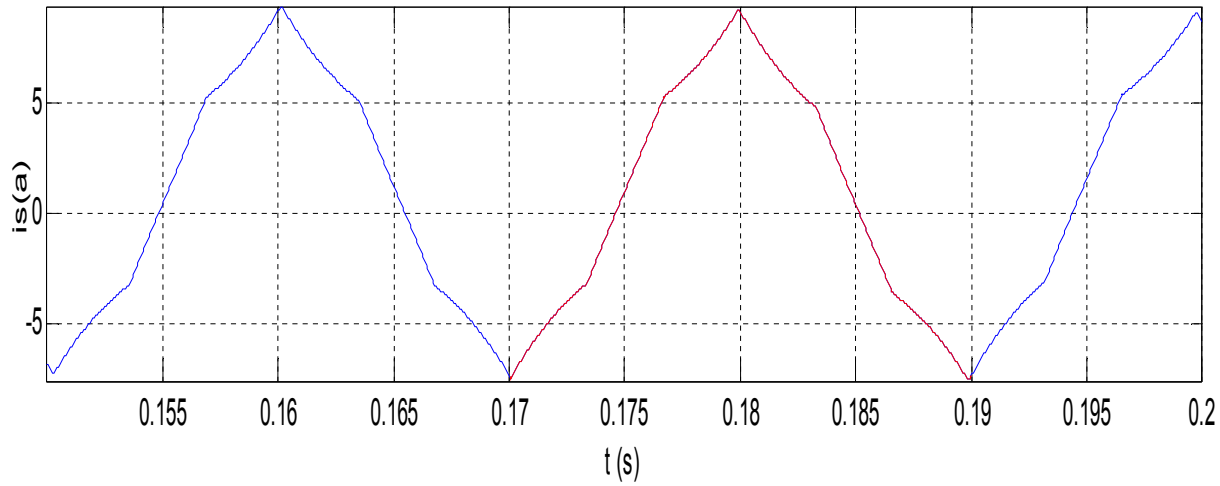


Fig .III 15. Les courants de source (A).

- **Les résultats de simulation après le filtrage Série**

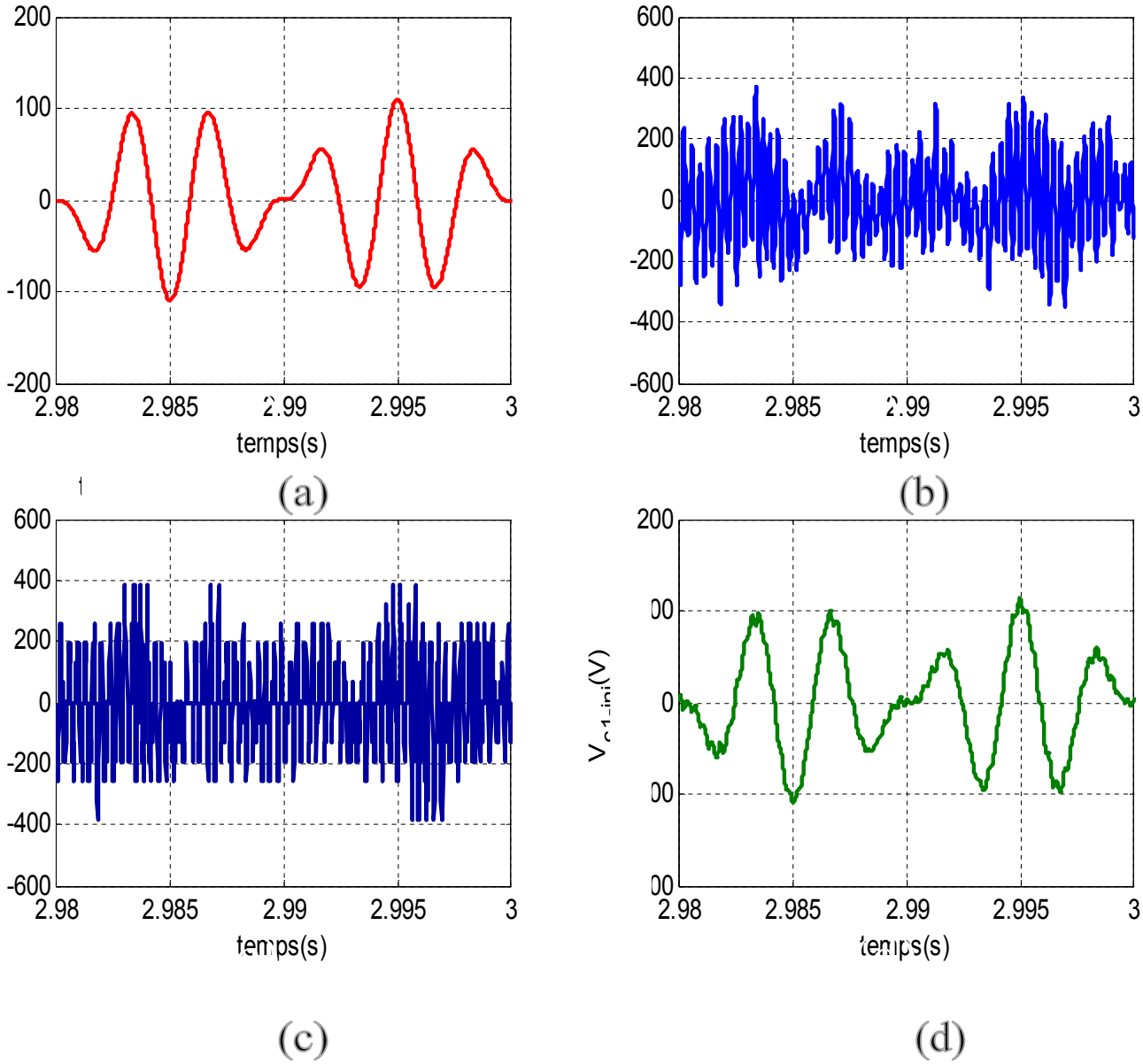


Fig .III 16. (a) Tesion harmonique (b) Tesion harmonique régulée
(c) Tension harmonique de sortie de filtre (d) Tension de compensation injecté. (V).

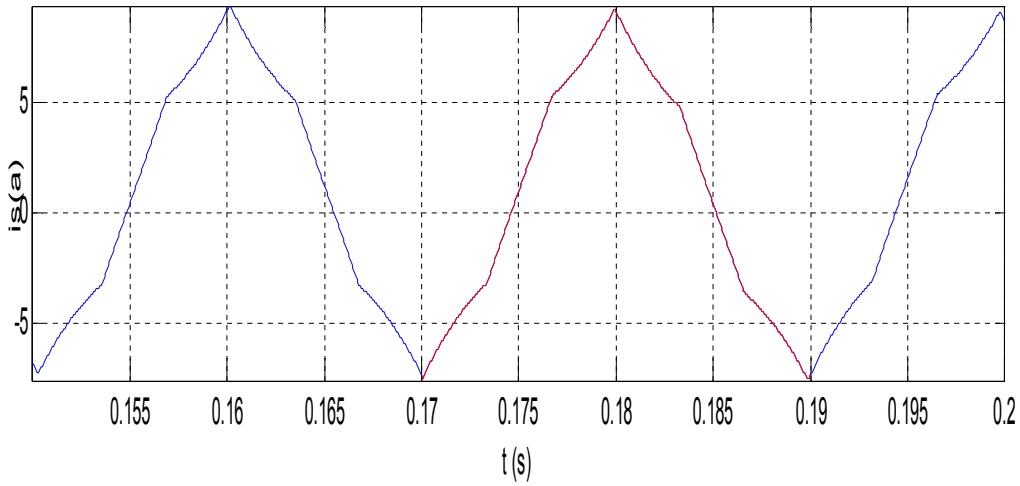


Fig .III 17. Le courant isa (A)

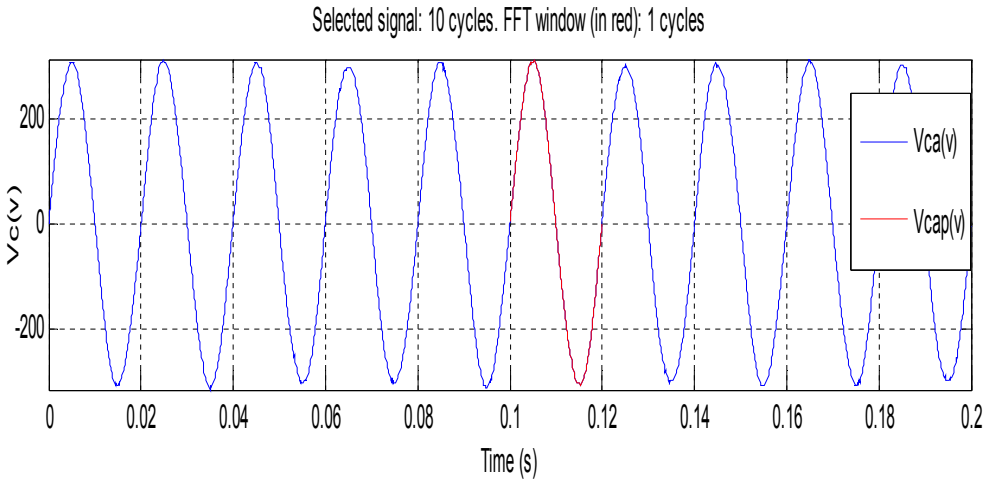


Fig .III 18. La tension de charge Vc (V)

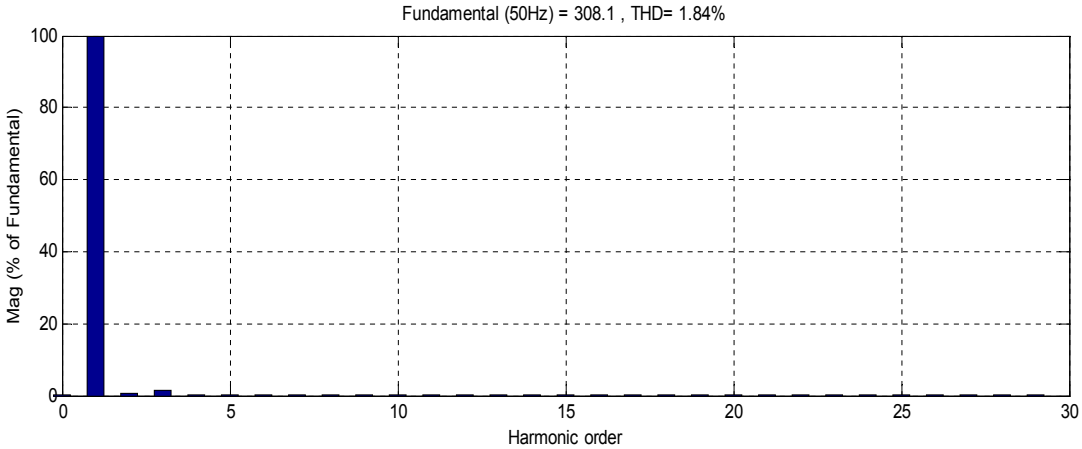


Fig. III.19. Spectre harmonique de Vc

III.12. Interprétation des résultats:

Les résultats de simulation montre que l'insertion d'un filtre actif série au réseau perturbé améliore la forme de ça tension de charge ,on enregistre une amélioration dans l'allure de *Vc* donc, *Vc* a été dépolluée à un niveau assez satisfaisant, ceci est conforté par le spectre harmonique, avec un THD = 1,84 % (Fig.III.19).

III.13. Conclusion

Ce chapitre à été consacré au filtre actif série à structure tension à basse des convertisseurs de tensions trois niveaux. La stratégie de contrôle permettant la détermination des tensions de référence adoptée est celle des puissances actives et réactives instantanées (PQ), deux approches ont été étudiées. Pour chaque configuration de FAS un modèle de simulation numérique est élaboré en utilisant le logiciel Matlab-Simulink.

D'après les résultats de simulations obtenues, on remarque que le FAS avec la topologie de convertisseur basée sur la méthode PQ et commandé par MLI. Sont nettement plus meilleurs en matière de réduction de THD.

IV.1.Introduction:

Après avoir étudié les différentes topologies, algorithmes de détection des grandeurs harmoniques de référence, les stratégies de commande et de régulation des filtres actifs parallèle et série dans les chapitres précédents, nous allons présenter ici filtrage actif UPQC et leurs applications ainsi que leur simulation sous Matlab-Simulink, selon les étapes:

- Où on montrera l'allure du courant dans la source avant application de toute opérations de filtrage, son spectre harmonique contenant les informations sur le THD et sa position angulaire par rapport à la tension de source .
- Consacrée à l'étude de la configuration, pour deux topologies d'onduleurs de tension ; on y exposera les circuits de puissance et de commande.
- Synthétise les résultats précédents d'UPQC de filtre parallèle et série de simulation.

IV.2.Dépollution universelle combinaison parallèle-série actifs (UPQC):

Cette partie sera abordée de la façon suivante : Dans un premier temps, après une brève discussion sur sa structure générale, l'emplacement de l'UPQC va être étudié.

Ensuite, nous étudierons le filtre UPQC, par le biais des simulations de la compensation de la plupart des perturbations en courant et en tension. Ces simulations, effectuées sur Matlab-Simuling, auront pour objectif de valider d'une part, le comportement des filtres actifs parallèle et série fonctionnant ensemble, d'autre part les méthodes d'identification et de régulation déjà proposées.

La structure générale de l'UPQC est composée de deux parties : FAP et FAS comme le montre la Fig. IV.1. Ces deux parties, parallèle et série, ont été largement détaillées .

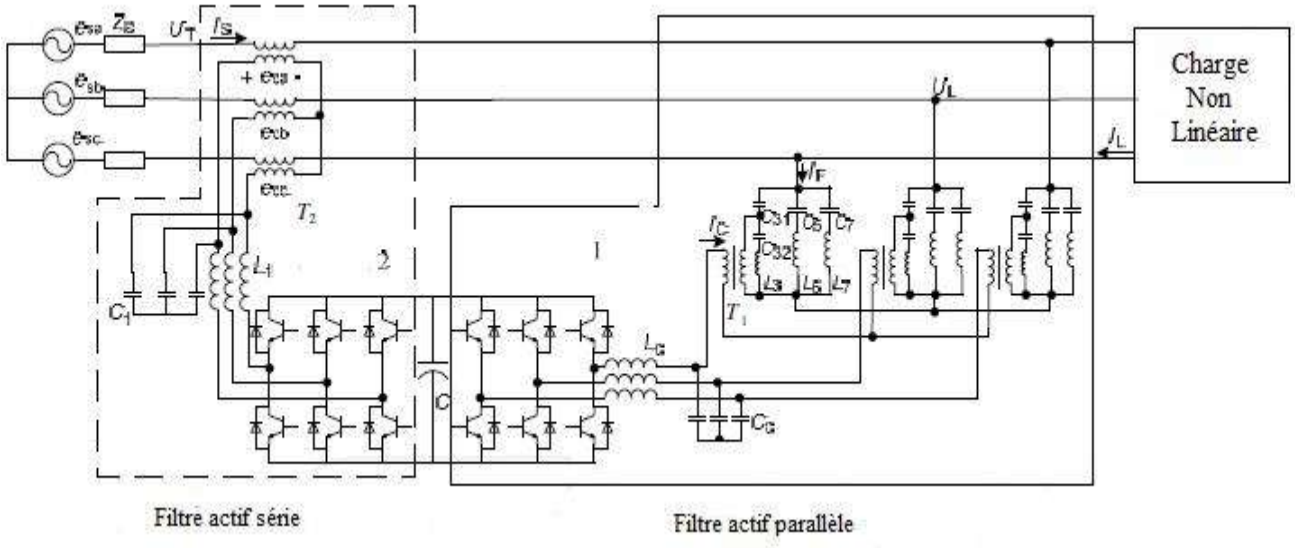


Fig.IV.1. Structure générale de l'UPQC

Suivant l'objectif de dépollution du filtre actif série, deux emplacements de l'UPQC sont possibles :

- Le filtre actif série est installé en amont du filtre actif parallèle, afin de dépolluer la source des tensions perturbatrices,
- Le filtre actif série est installé en aval du filtre actif parallèle, afin d'isoler la charge de la source perturbée.

Dans ce travail, le filtre actif série sera installé côté charge afin de ne pas le surdimensionné. En effet, un filtre actif série installé côté poste de transformation devra être dimensionné pour supporter la totalité des courants de tous les utilisateurs connectés au même point de raccordement.

Afin de réduire le nombre de calculs à effectuer, la combinaison parallèle-série actifs va bénéficier du fonctionnement commun de certains blocs. En effet, le système utilisé pour l'identification des courants et des tensions perturbateurs, le système de stockage d'énergie ainsi que la régulation de la tension continue, vont fonctionner d'une façon commune pour les deux parties de l'UPQC [17].

III.3. Techniques de Régulation des FA:

III.3.1. Régulation du courant du FA :

Le dimensionnement des gains de la boucle de commande du courant dépend du modulateur sélectionné [15]. Comme précédemment décrit, dans le cas de la technique de la porteuse triangulaire, afin de générer les signaux de gâchettes, l'erreur du courant passe d'abord par un correcteur Proportionnel-Intégral PI, puis elle est comparée avec une onde triangulaire à amplitude et fréquence fixées.

Dans le cas où le filtre actif est à base d'un onduleur de tension, le courant alternatif de sortie est défini par la tension de sortie. La boucle de commande du courant est présentée dans la Fig. IV.2.

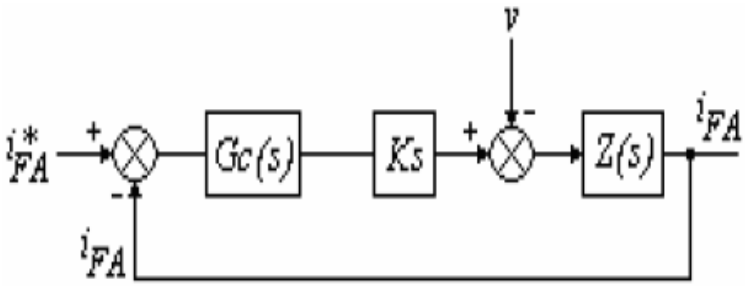


Fig.IV.2. Boucle de régulation du courant.

Avec:

Z(s), impédance du côté alternatif ,

Ks, gain du convertisseur,

Gc(s), gain du régulateur.

Les valeurs de Ks et Gs(s) sont données par les équations (IV.1) et (IV.2) [15],[16].

$$Ks = Vds/2\xi \quad \text{(IV.1)}$$

$$Gc(s) = kp + \frac{ki}{s} \quad \text{(IV.2)}$$

A partir de la Fig. IV.2 (cas d'un filtre de sortie RL), et de l'équation (IV.2), les expressions suivantes sont obtenues pour un module de Z égal en instantané à $\sqrt{R_{FA}^2 + (L_{FA}\omega)^2}$ R_{FA} , L_{FA} étant respectivement la partie résistive et la partie inductive de Z:

$$i_{FA} = \frac{[Ks.(kp+(ki/s))]/(R_{FA}+s.L_{FA})}{1+[Ks.(kp+(ki/s))]/(R_{FA}+s.L_{FA})}.i_{FA}^{*} - \frac{1/(R_{FA}+s.L_{FA})}{1+[Ks.(kp+(ki/s))]/(R_{FA}+s.L_{FA})}.v \quad \text{(IV.3)}$$

L'équation caractéristique de la boucle du courant est donnée par:

$$H(s) = 1 + \frac{(kp.s+ki/s)}{s.(R_{FA}+s.L_{FA})} \quad \text{(IV.4)}$$

L'analyse de cette équation prouve que la boucle de courant est stable pour toutes les valeurs de kp et ki. En plus, l'analyse montre que kp détermine la rapidité de la réponse, et ki définit le facteur de dépassement de la boucle de commande. Si kp est trop grand, l'erreur peut excéder l'amplitude de la porteuse triangulaire, affectant ainsi la fréquence de commutation de, et si ki est trop petit, le gain du correcteur diminue, ce qui implique que le courant généré ne sera plus apte à suivre exactement sa référence. La réponse transitoire du filtre actif peut être améliorée en ajustant le gain du correcteur de manière à ce que le kp soit égal à 1 et que le ki soit égal à la fréquence de la porteuse triangulaire [17].

III.3.2. Régulation de la tension du FA :

La régulation de la tension du bus continu du filtre actif peut être améliorée en ajustant le petit taux de puissance active s'écoulant dans le (les) condensateur(s), compensant ainsi pertes par conduction et par commutation. [8], [16]. La boucle de régulation de la tension est désignée pour être 10 fois plus petite que la boucle du courant. De là, les deux boucles se trouveront désormais découplées. Le circuit de régulation de la tension continue doit être rapide dans la mesure où il répond seulement aux conditions du régime permanent. Les changements

transitoires dans la tension continue ne sont pas permis et sont pris en considération lors de la sélection de la valeur appropriée du condensateur.

Afin d'obtenir la quantité Pdc représentant la puissance active nécessaire pour maintenir vdc proche de sa référence $vdcref$, on peut utiliser un régulateur [9].

En effet, d'une part les courants de référence ne contiennent pas de composantes fondamentales lors du régime permanent, et d'autre part, la puissance nécessaire pour la compensation des pertes est faible. Le régulateur peut être un filtre passe-bas du 1er ordre, dont la fonction de transfert est donnée par:

$$Gc(s) = \frac{K_c}{1+\tau_c s} \qquad \text{(IV.5)}$$

Avec: K_c ,τ_c gain et constante de temps du filtre passe-bas.

En négligeant les pertes par commutation dans le filtre actif ainsi que l'énergie stockée dans l'inductance de sortie L_{FA}, la relation entre la puissance absorbée par le filtre actif et la tension continue vdc s'exprime par:

$$Pdc = \frac{d}{dt}\left(\frac{1}{2}.C.vdc^2\right) \qquad \text{(IV.6)}$$

Pour des faibles variations de vdc autour de $vdcref$, l'équation (III.78) peut s'écrire:

$$Pdc = C.vdcref.\frac{d}{dt}(vdc) \qquad \text{(IV.7)}$$

Des équations (IV.5) et (IV.7), la boucle de régulation de la tension continue vdc sera présenté par le schéma bloc de la Fig.IV.3, et aura pour fonction de transfert la formule:

$$H(s) = \frac{\omega_c^2}{s^2+2.\xi_c.\omega_c.s+\omega_c^2} \qquad \text{(IV.8)}$$

Avec:

$$\omega_c = \sqrt{\frac{K_c}{C.vdcref.\tau_c}} \qquad \text{(IV.9)}$$

$$\xi_c = \sqrt{\frac{C.vdcref}{K_c.\tau_c}} \qquad \text{(IV.10)}$$

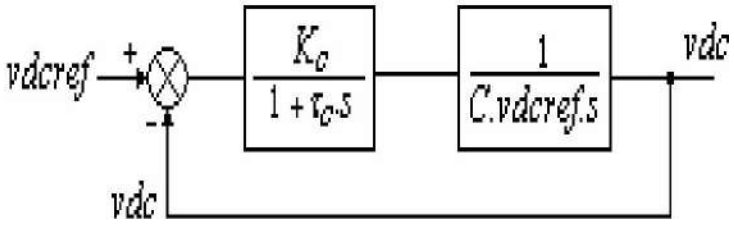


Fig.IV.3. Boucle de régulation de la tension continue.

En général, la régulation est stable, mais pour l'obtention d'un amortissement suffisant, le produitK_c ,τ_c doit être limité, et $\xi_c$compris entre 0.4 et 0.8.

VI.4.Résultat de simulation:

VI.4.1.Résultat de simulation avant le filtrage:

Les graphes du courant et tension de source avant application du filtrage (UPQC) sont représentés

Fig . IV.5 , IV.6 , IV.7 et IV.8. On constate une distorsion symétrique du courant *i* par rapport au point de demi période, ce qui signifie que les harmoniques multiples de 2 et 3 sont inexistants dans le spectre de *i* et que seuls ceux de rang $(6h \pm 1)$ sont présents; ceci est confirmé par le spectre de *i* représentant les premiers harmoniques les plus significatifs, avec un THD de 23.5 % et le spectre de *v* un

THD =15.68%.

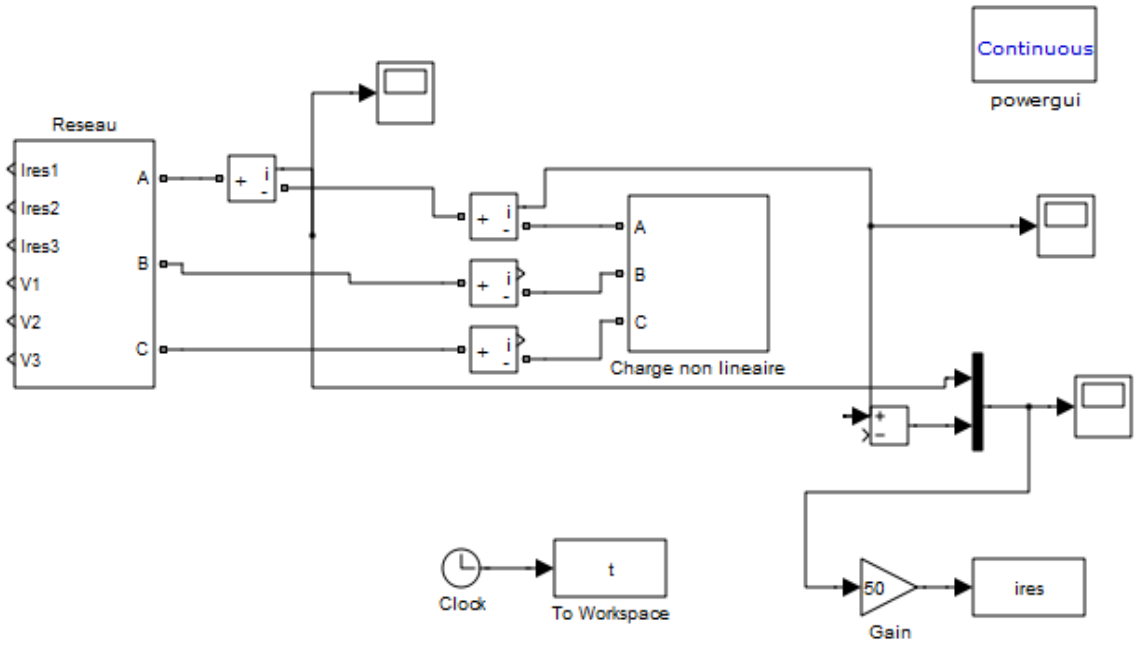


Fig. IV .4 : Blocs diagramme sans filtrage.

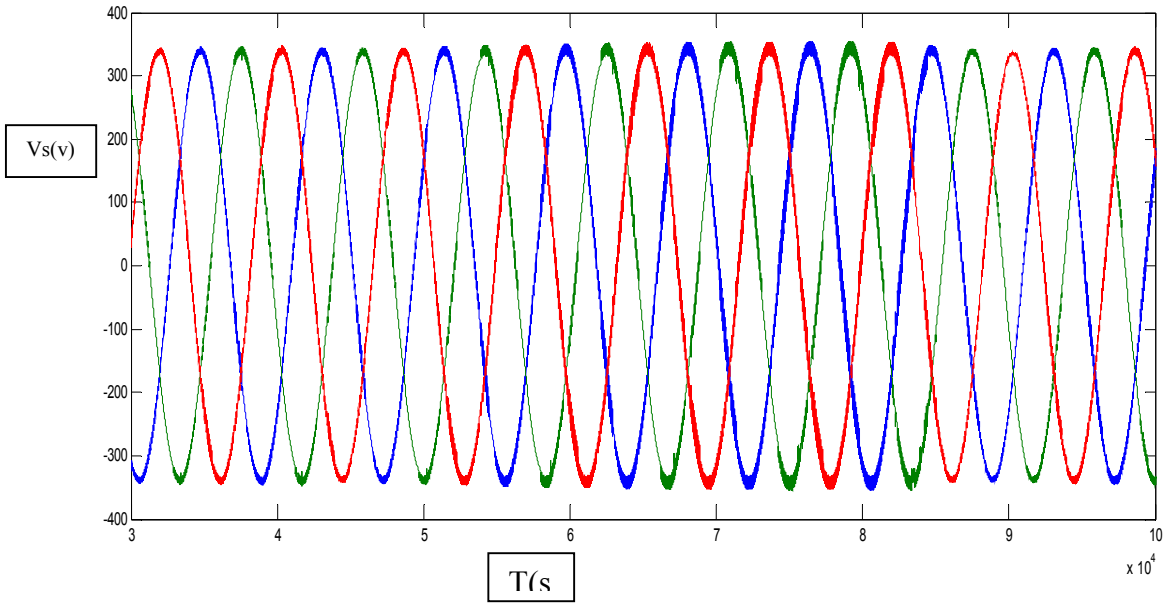


Fig. IV.5. Les tensions du réseau *vs* (V) .

Fig. IV.6. *Spectre harmonique de vs.*

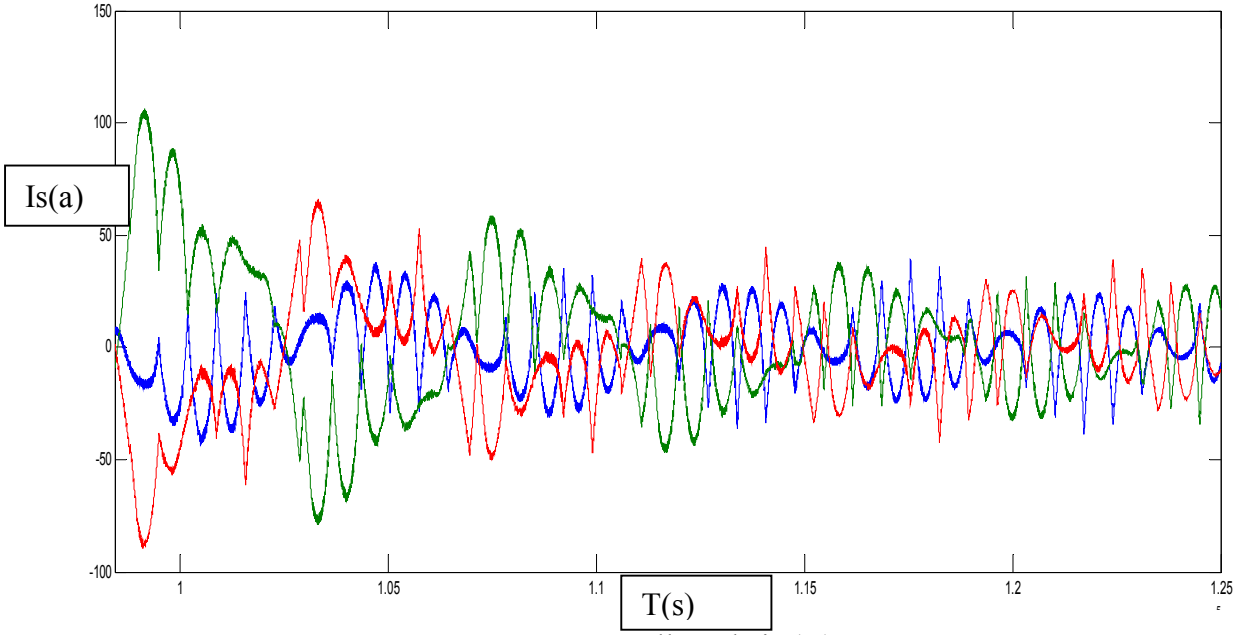


Fig. IV.7. Allure de is (A) .

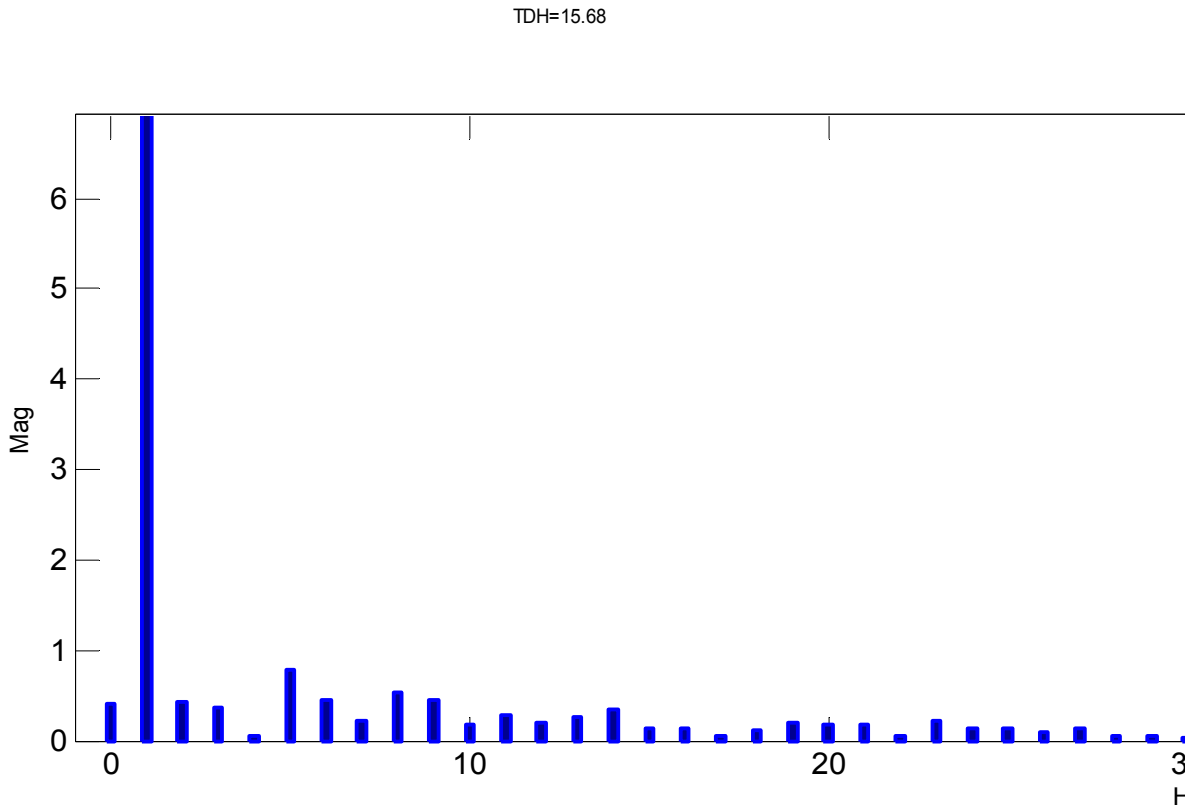


Fig. IV.8. Spectre harmonique de is.

Cependant, un THD > 5 % reste inacceptable conformément aux normes internationales. En effet, on constate des déformations dans l'onde du courant et tension de source.

IV.4.2.Résultats de simulation de l'UPQC:

Les différentes parties de l'UPQC sont modélisées et simulées sous MATLAB-SIMULINK. Nous avons fait la simulation suivant méthode de Puissances instantanées active et réactive.

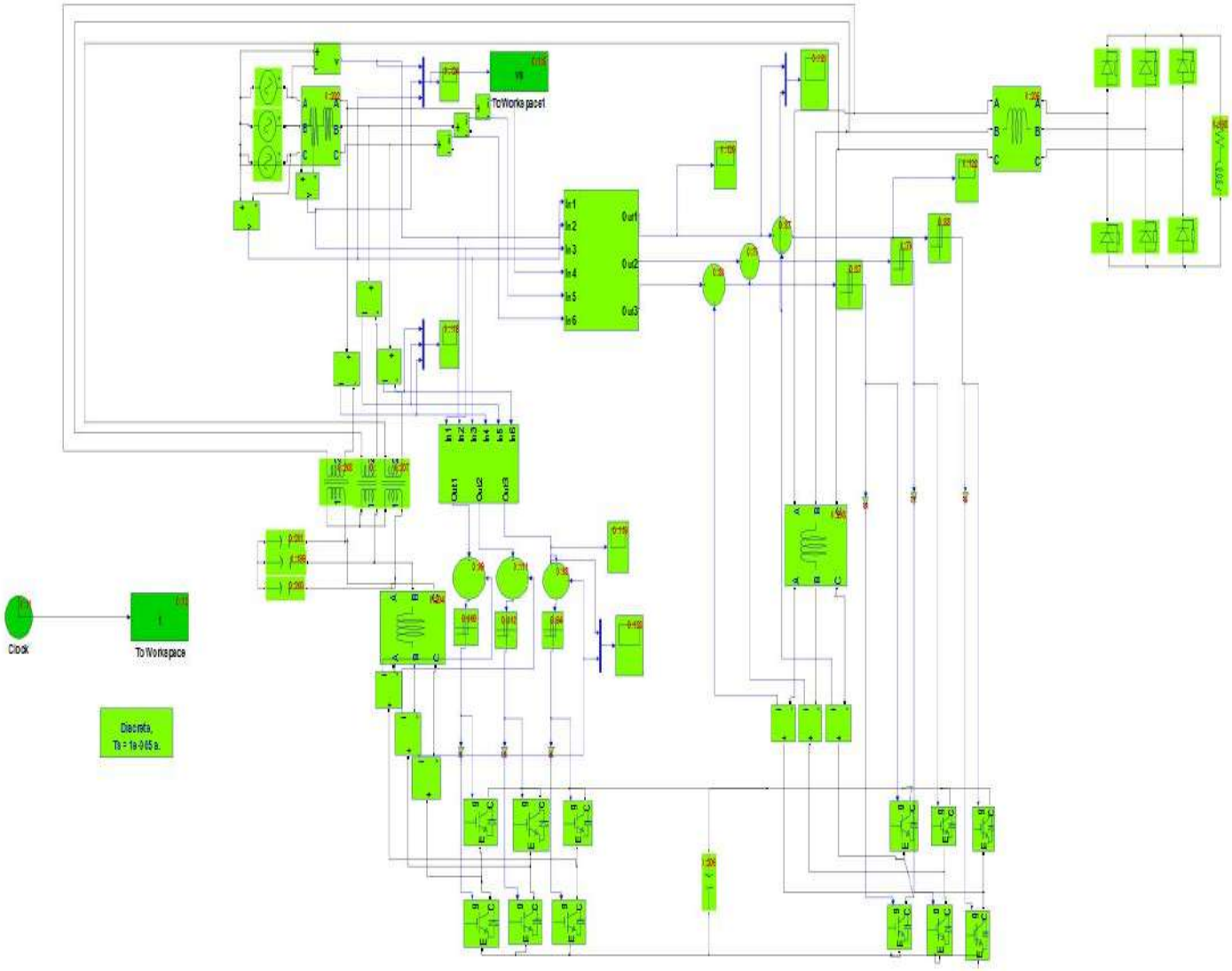


Fig.IV.9. Schéma global sous Matlab-simulink (UPQC)

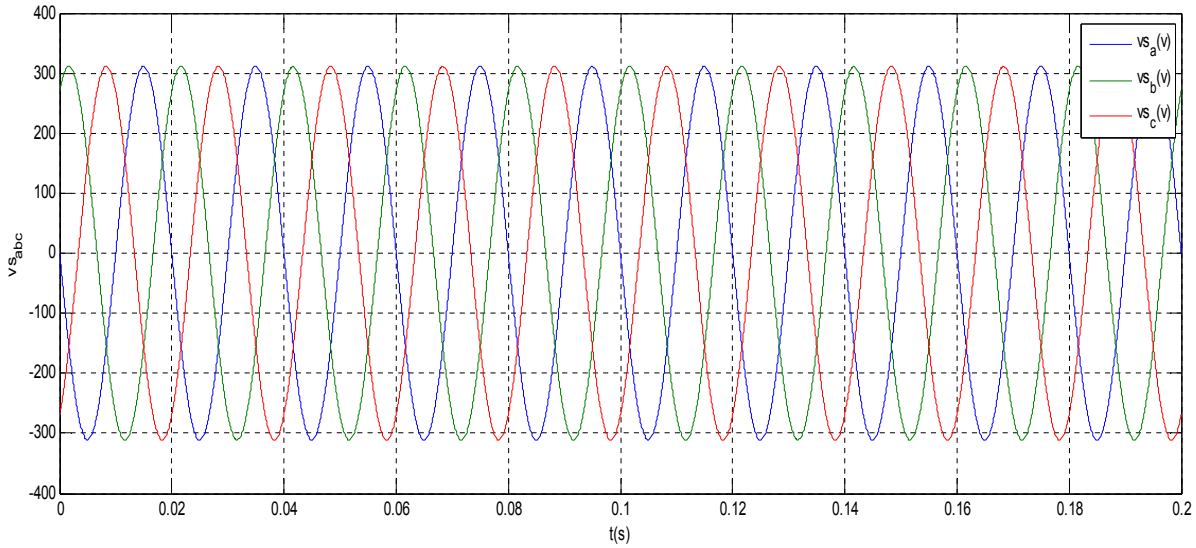


Fig .IV 11. Les tension du réseau d'alimentation (V).

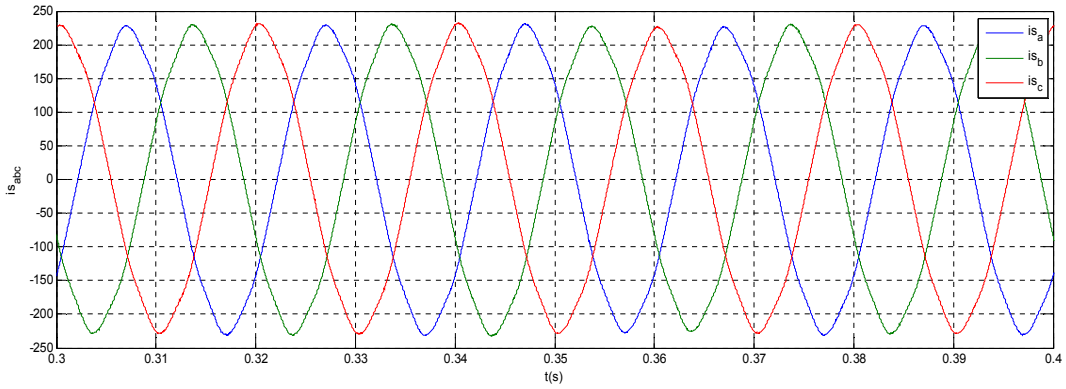


Fig.IV.12. Les courants de source (A).

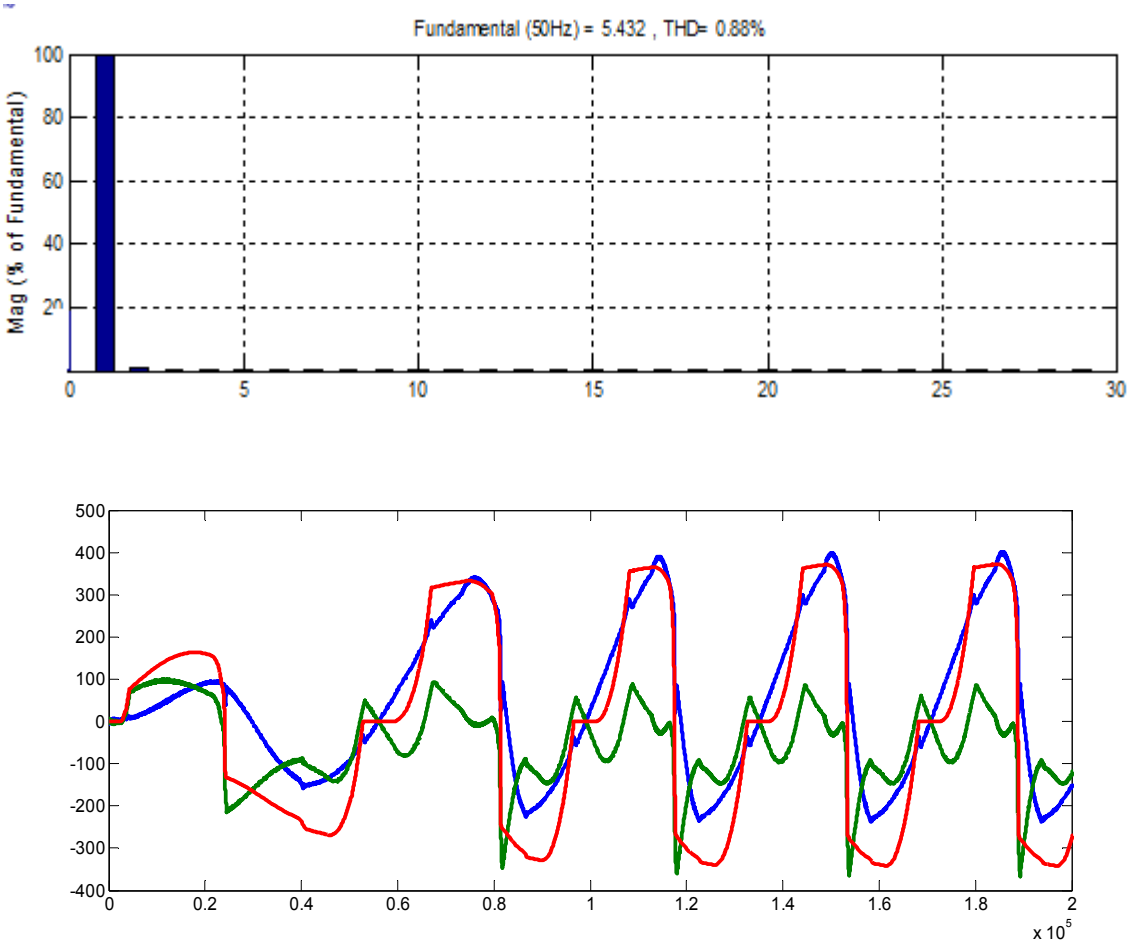


Fig .IV. 13. Les courants de charge icabc (A).

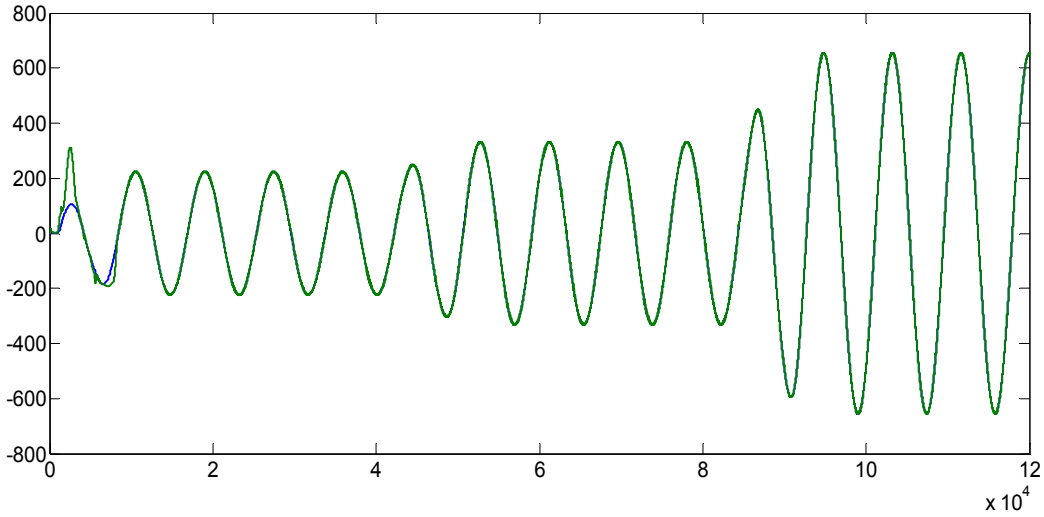


Fig.IV.14. Courant de source isa et courant de reference ira (A)

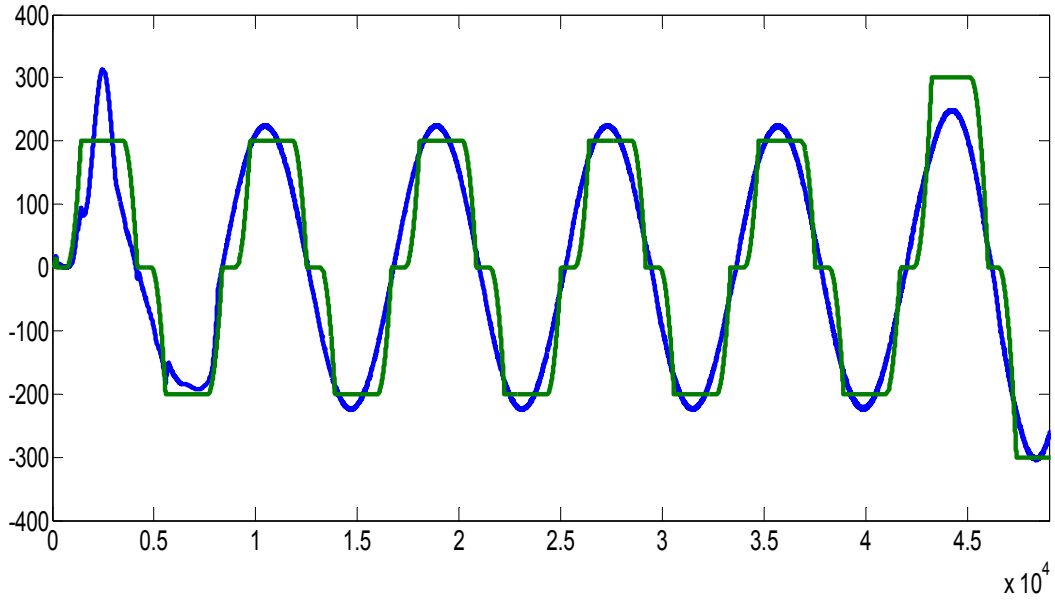


Fig.IV.15. Courant de source isa et courant de charges ica (A)

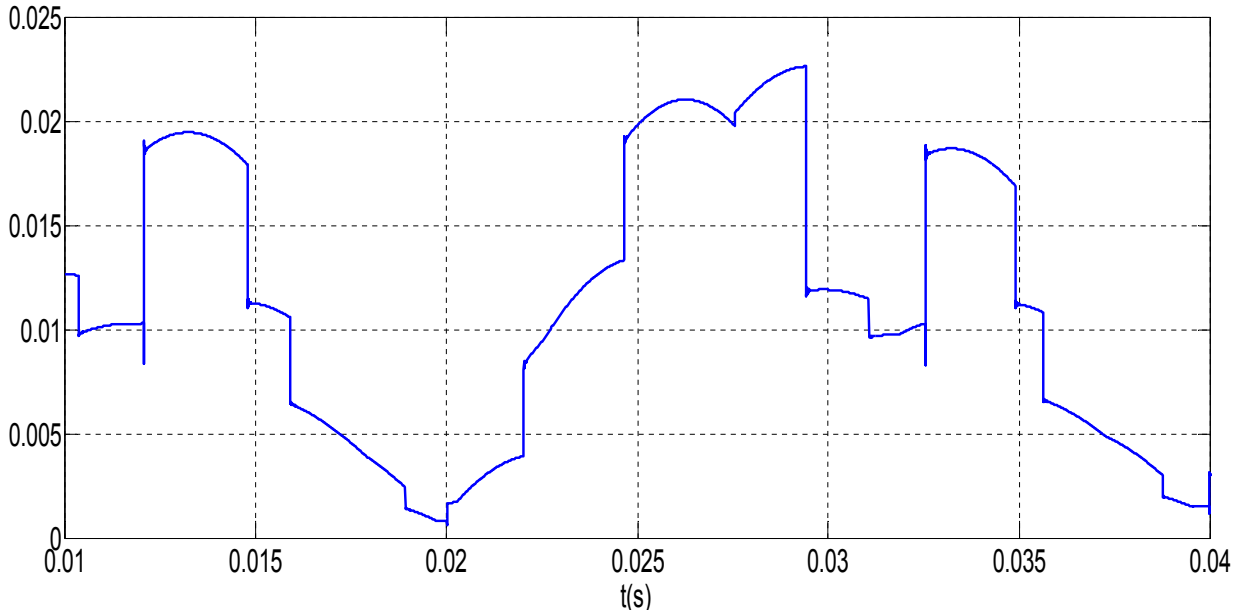


Fig.IV.16. Tesion harmonique Vh1 (V).

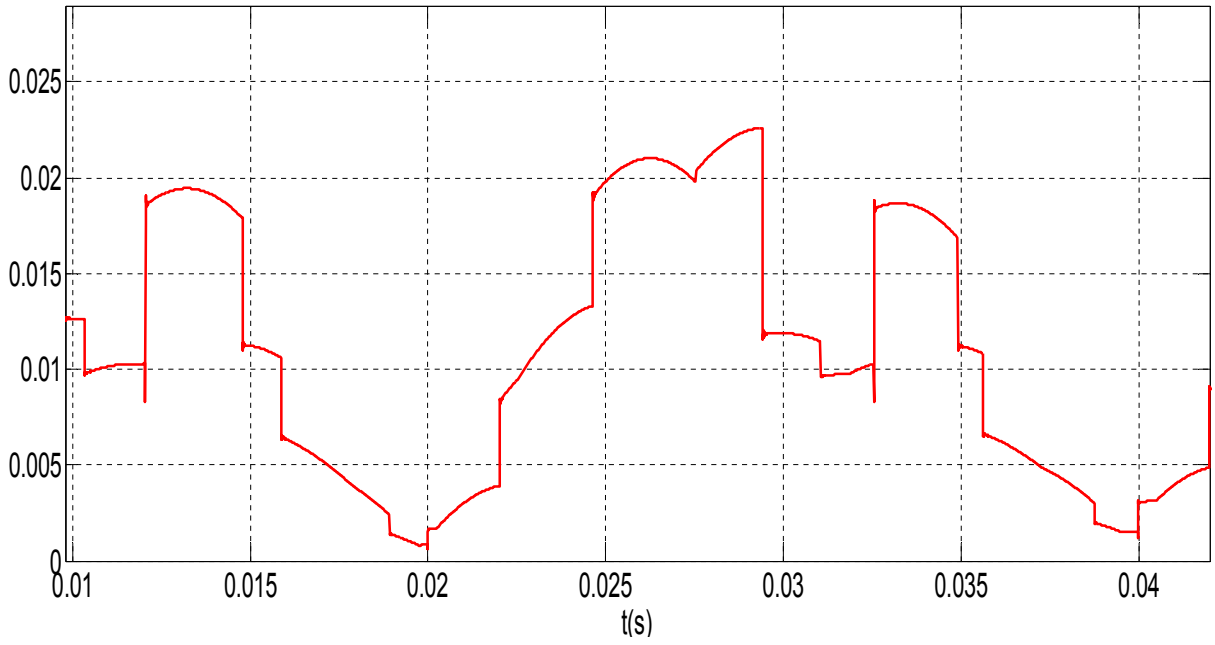


Fig .IV. 17.Tesion injectée Vc-inj1 (V)

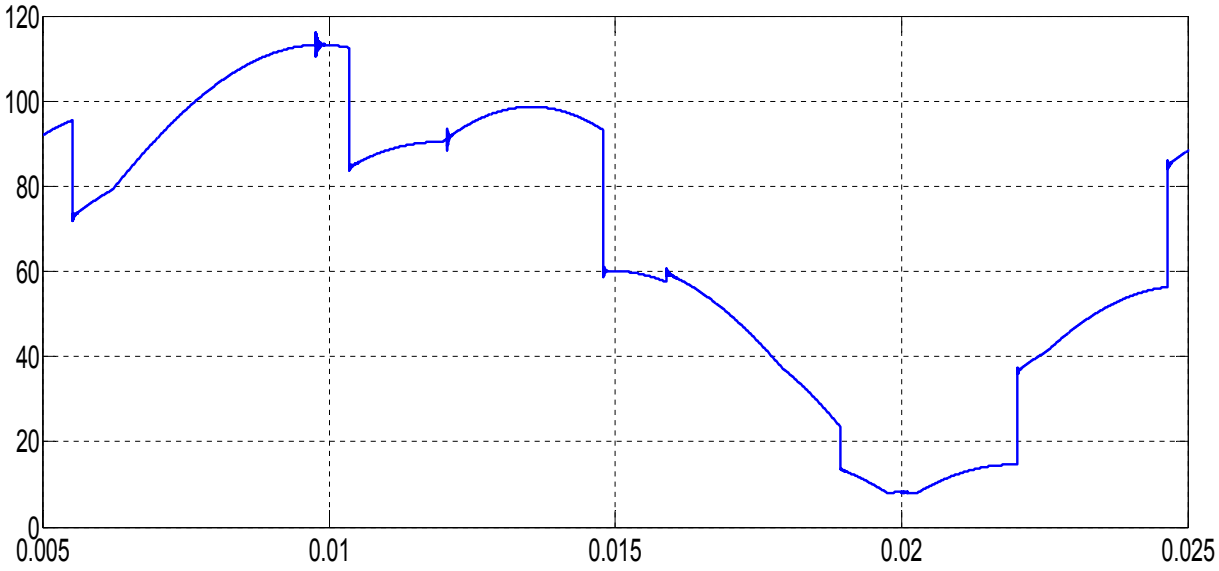


Fig .IV .18.Courant harmonique ih1 (A).

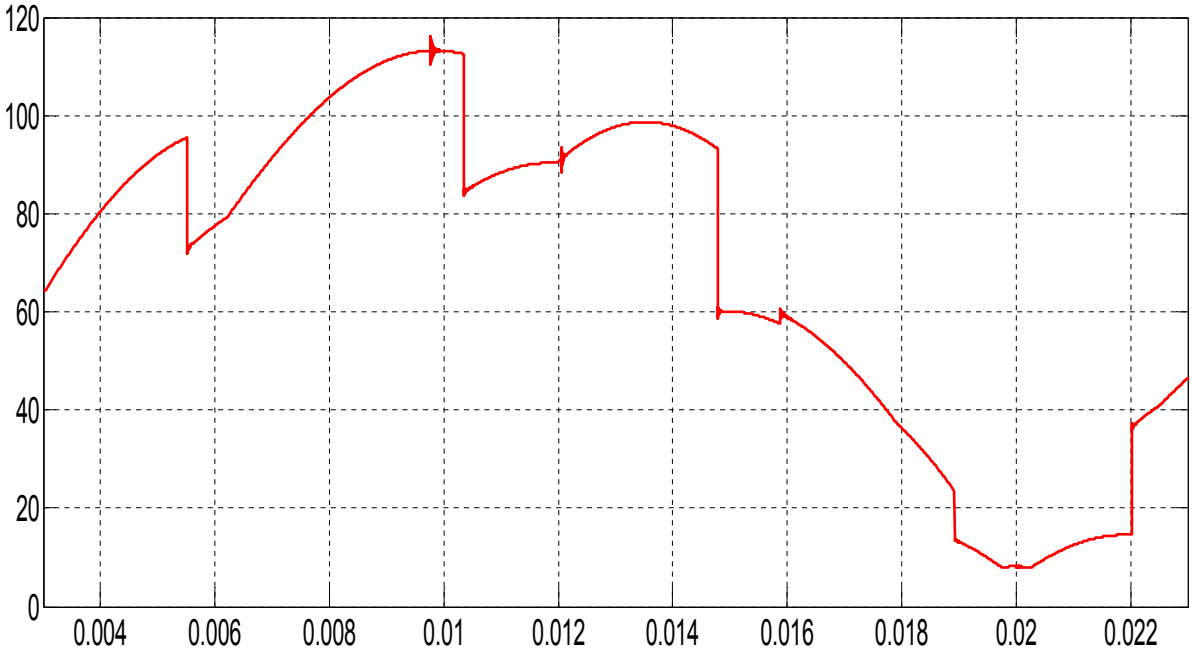


Fig .IV. 19.Courant injecté ic-inj1 (A)

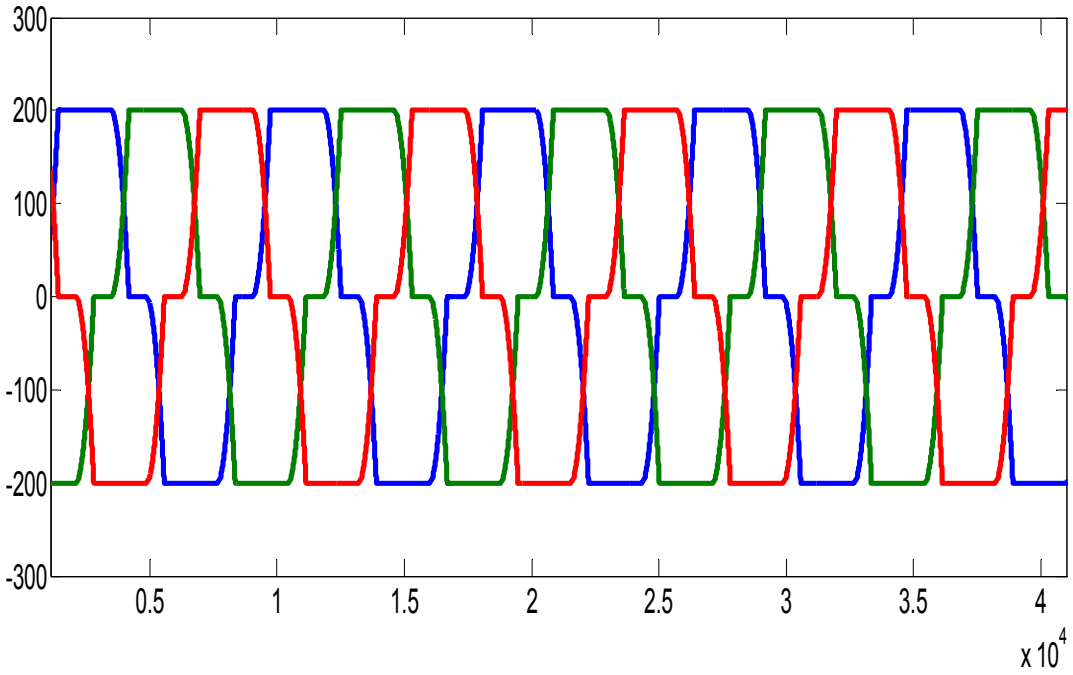


Fig .IV.20.1. Les courants de charge icabc (A)

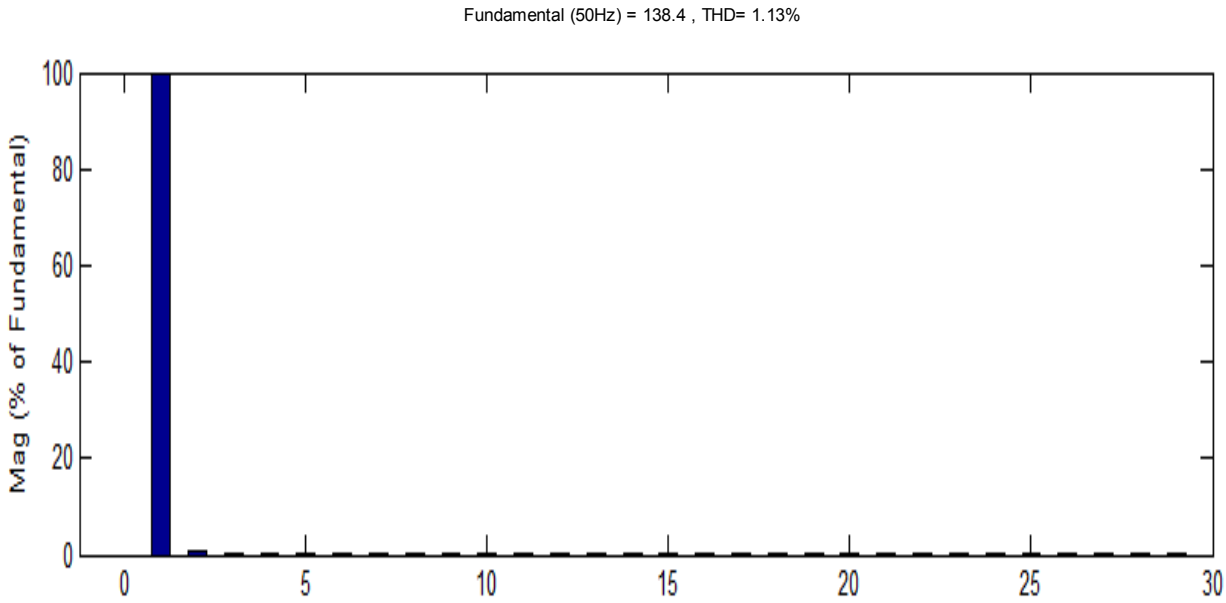


Fig. IV.21. Spectre harmonique de i

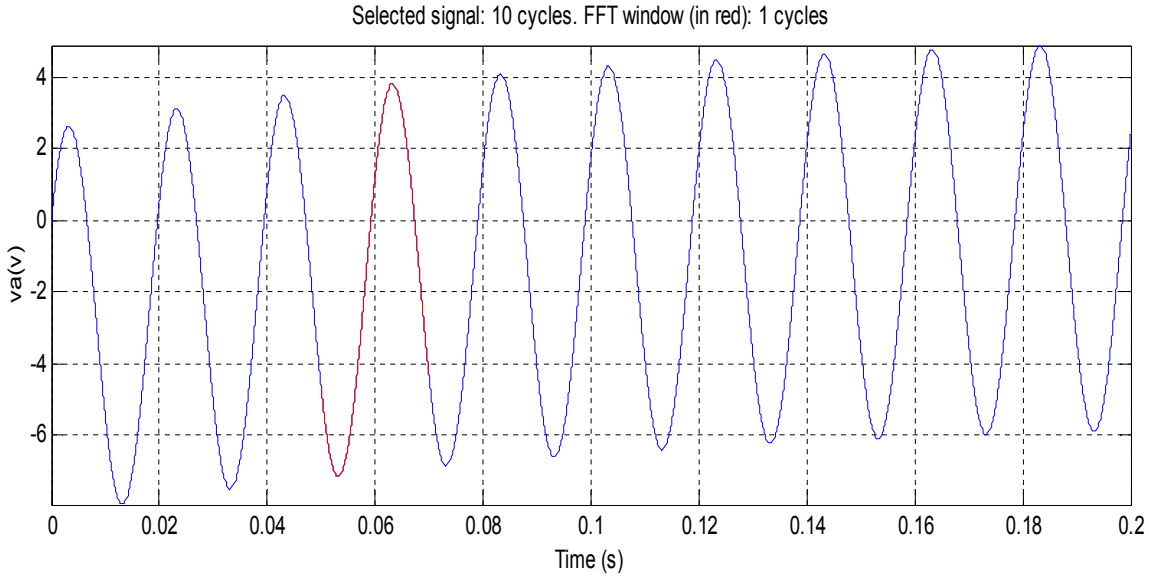


Fig.IV.22. Les tensions Va (V)

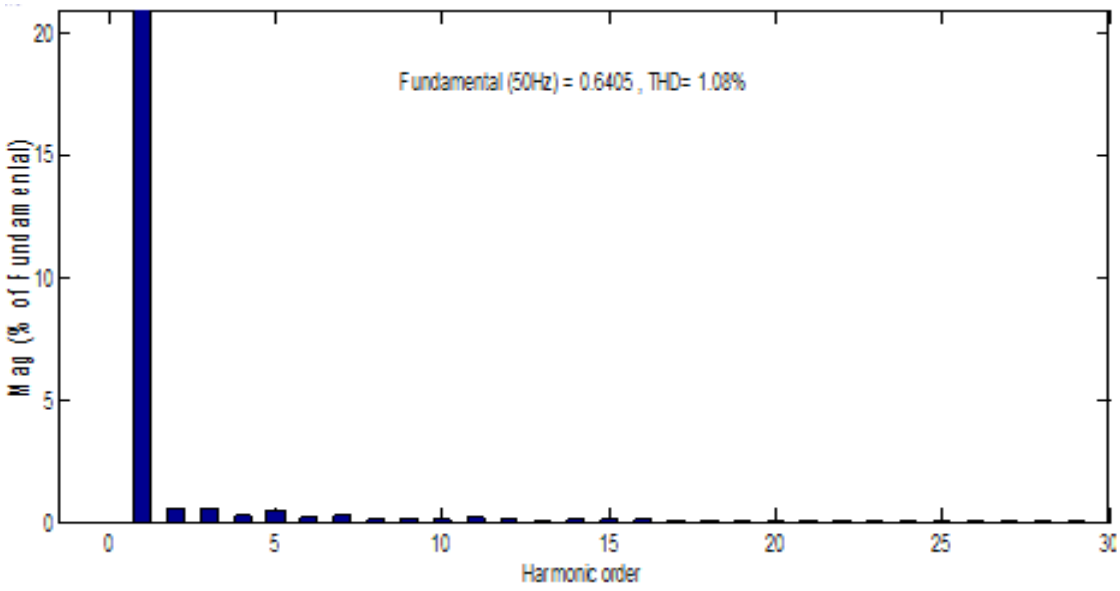


Fig. IV.23. Spectre harmonique de vsa(v)

IV.4.3 . Interprétation des résultats:

Après application du filtre actif (UPQC) proposé, on enregistre une nette amélioration dans l'allure de *i.* Donc, *i* a été dépollué à un niveau assez satisfaisant, ceci est conforté par le spectre harmonique, avec un THD = 1.13 % (Fig.IV.21). La tension après filtrage est une tension sinusoïdale presque dépourvue des harmoniques THD = 1.08 % (Fig.IV.23).

D'après les résultats obtenus par la simulation faite sous les mêmes conditions de l'UPQC la méthode PQ connue dans ce domaine, nous avons constaté que dans ce cas l'UPQC a donné des résultats satisfaisants et mieux que ceux des méthodes classiques (FAP et FAS) .

IV .5. Conclusion

Le travail présenté s'inscrit dans le cadre de la recherche des nouvelles solutions pour l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique dans le réseau électrique. Le filtre actif parallèle avait pour objectif de compenser les courants perturbateurs harmoniques et déséquilibrés, le filtre actif série dont l'objectif était la compensation des tensions perturbatrices harmoniques, et des creux de tension.

Finalement, le filtre actif combiné série-parallèle (UPQC) a été proposé comme une solution générale de la compensation de toutes les perturbations en courant et en tension .Les résultats de simulations obtenus montrent que l'UPQC permet la compensation simultanée des perturbations en courant et en tension avec de bonnes performances, par ailleurs des résultats meilleur par rapport les régulateur classique.

Conclusion générale

Le travail présenté s'inscrit dans le cadre de la recherche des nouvelles solutions pour l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique dans le réseau électrique. Ce travail présente l'étude , la modélisation et la commande d'un filtre actif combiné série-parallèle (UPQC). le filtre actif combiné série-parallèle (UPQC) a été proposé comme une solution générale de la compensation de toutes les perturbations en courant et en tension. Les résultats de simulations obtenus montrent que l'UPQC permet la compensation simultanée des perturbations en courant et en tension avec de bonnes performances. Le filtre actif parallèle avait pour objectif de compenser les courants perturbateurs harmoniques et déséquilibrés, le filtre actif série dont l'objectif était la compensation des tensions perturbatrices harmoniques, et des creux de tension.

Dans une première partie, Plusieurs solutions de dépollution ont été présentées le filtre passif, filtre hybride. Particulièrement, le filtre actif combiné série-parallèle (UPQC) qui présente la meilleure solution pour la compensation de tous les types de perturbations susceptibles d'apparaître dans un réseau.

Dans une deuxième partie ; on a exposé l'état de l'art des filtres actifs de puissance. Modélisation de l'onduleur de ce filtre et quelque technique de commande .

Cette méthode exige un courant de réseau sans perturbation, pour pouvoir fournir uniquement les perturbations en tension émises, par la charge polluante. Cette méthode est efficace, simple et facile à implanter.

Cependant, le modèle du filtre actif parallèle est validé selon une stratégie de commande basée sur la théorie de calcule des puissances active et réactive instantané.

Cette stratégie a permis de mettre au point le principe de fonctionnement du filtre actif ainsi que la loi de commande.

Nous avons étudié les cas de simulation du système de compensation des harmoniques par filtre actif parallèle commandé par méthode PQ avec une charge non linéaire .On a exposé quelques techniques de commande (génération des impulsions) MLI à échantillonnage régulier, MLI à bande d'hystérésis, MLI à porteuse

triangulaire ou plus communément appelée MLI intersective, et la MLI vectorielle. On a d'abord détaillé l'étude de son applicabilité à l'onduleur trois niveaux.

l'utilisation d' un filtre actif parallèle des courants harmoniques engendrés par les charges non linéaires, donne des résultats très satisfaisant et une grande efficacité pour résoudre le problème de la distorsion du courant de la source .

Dans la troisième partie, nous avons évoqué le principe détaillé du filtre actif série. D'abord , nous avons déterminé les tensions de référence du filtre actif série qui a été basé sur la méthode P,Q ,cette méthode a montrée que le dispositif utilisé pour le filtre actif série des perturbations en tension .

En suite nous avons abordé les structures de filtres actifs combinées (UPQC) en vue d'étudier la compensation de tous les types de perturbations susceptibles d'apparaître dans le réseau électrique.

Finalement, faisant suite à notre développement sur le filtre actif série, et indirectement sur le filtre actif parallèle, nous avons révélé la pertinence de notre approche de conception dans l'élaboration du filtre actif combiné parallèle-série (UPQC). Outre les bons résultats de compensation simultanée des perturbations en courant et en tension de l'UPQC.

ANNEXE I

Paramètre utilisés:

- Paramètres du réseau électrique : 220V, L_s=3mH ,fréquence
  f = 50 Hz
- Paramètres du filtre A. P :
  L_{Pf} =0.20 mH ,
- Paramètres du filtre A. S :
  L_{sf} =0.22 mH ,
- Transformateur d'injection de tension
  45 kva .
  R_t =0.0001 pu ,L_t=0.001pu.
- Onduleur triphasé trois niveaux avec : Vdc = 700 V Et une capacité de C= 10F.
- La charge polluante pont de graitz +RL est alimentée par un système triphasé avec : R= 2 Ω ,L= 0.02 mH

Bibliographie

[1] : Amaia Lopez de Heredia Bermeo « Commande avancée des systèmes dédies à l'amélioration de la qualité de l'énergie. Mémoire de l'ingénieur, Institut Nationale Polytechnique de Grenoble, le 14 novembre 2006.

[2] : TADJER SID-AHMED « Etude d'un système de compensation d'harmonique en utilisant un générateur photovoltaïque '' GPV''». Mémoire de Magister, Université. M'Hamed Bougara de Boumerdes. 2008.

[3] : Belhaouchet Nouri « Fonctionement De Commutation Constant Des Convertisseurs De Puissanse en Utilisant Des Techcniques De Commande Avanceé » Thése de Doctorat, Universit Ferhat Abbas-Setif ,06 /07/2011 .

[4] : Abdelmalek Boulahia , « Etude des Convertisseurs Statiques destinés à la Qualité de l'Energie Electrique»mémoire de magistére, Université de Constantine le 28/04/2009 .

[5] :D Ould Abdeslam,D Flieller ,P Wira& J Mercklé, «Adaline neural networks for online extracting the direct,inverse and homopolar voltage components from a composite voltage».31ST Annual Conference of the IEEE Industrial Society (IECON05),Raleigh,North Carolina ,USA,Nov.6-10,2005.

[6] : Mr. Tadjer Sid-Ahmed « Problematiques et Identification Des Perturbations Harmoniques Dans Un Reseau Basse Tension », Université M'Hamed Bougara .

[7] : **S. Beaulieu**, « Etude et mise au point d'un filtre actif d'harmoniques en vue d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique ». Mémoire présenté comme exigence partielle de la maîtrise en ingénierie. Université du Québec à Chicoutimi. MAI 2007.

[8] : H. Akagi, « Control strategy and site selection of a shunt active filter for damping of harmonic propagation in power distribution systems », IEEE Trans. on power delivery, vol 12, No. 1, pp. 354-363, January,1997.

[9] : Mohamad Alaa Eddin Alali, « Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension », thèse de doctorat, Université Louis Pasteur -Strasbourg, le 12 Septembre 2002.

[10]:Hansruedi BUHLER , « Réglage par logique floue » , (première édition) presses polytechniques et universitaires romandes, 1994.

[11]:Seddik Bacha , «Commande avancées des système dédies a l'amélioration de la qualité de l'energie : de la base tension a la mentée en tension »,thèse Doctorat, INPG.

[**12]:M.Habab,M.Haidas,C.Benaichiba,O.Abedkhalek,C.Benoudjafer**Etude Comparative De La Commande D'un UPQC PI Classique /Intelligente Logique Floue»,Université De Becher,Algerie Le 03-04Nouvembre 2010.

[13]:A. Rahmouni, C. Benachaiba« Compensation De La Puissance Réactive Active Déformante Par L'UPQC Ompensation De La Puissance Réactive Déformante Par L'UPQC Avec Une NouvelleO Methode D'identification Des Courants Perturbateurs» Université de Bechar ,O7/10/2012.

[14] : **Hind Djeghloud,** «Filtrage actif de puissance », thèse de doctorat, Université Mentouri Constantine, le 12.12.2007.