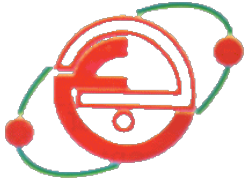


وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة باجي مختار عنابة



BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA



Faculté : Sciences de l'ingénieur
Département : Electromécanique

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de MAGISTER

COMPENSATEURS ACTIFS DES RÉSEAUX
ÉLECTRIQUES BASSE TENSION

Option

Electromécanique

Par : GUENDOUZ HALIM

Directeur de Mémoire : Dr Benretem A/ wahab Maître de conférence U.ANNABA

DEVANT LE JURY

| | | | |
|-------------------|-------------------------|-----------------------------|-----------------|
| Président | : Dr SAAD.S | Maître de conférence | U.ANNABA |
| Examineurs | : Dr BELHAMRA. A | Maître de conférence | U.ANNABA |
| | : Dr HEROUS. L | Maître de conférence | U.ANNABA |

Année : 2008

DEDICACE

Je tiens à dédier ce modeste travail avant tout :

A mon père, ma mère, ma belle mère et ma femme

Pour leur prières, sacrifices et leur soutien moral et psychique.

A mes frères : FARID, TAREK et à mes sœurs WARDA et

HANNENE

A mes beaux frères : ILYES, MOUTEZ-BILLEH et à mes belles sœurs

SELMA et KHADIDJA.

A tout les membres de la famille ☆ GVENDOUZ ☆

A tout mes amis sans exception

A tout mes collègues du Département d'Electromécanique

Remerciements

Je remercie avant tout **ALLAH** qui ma donner la santé, la volonté et la patience pour atteindre et réaliser ce modeste travail.

Je voudrais exprimer toute ma reconnaissance à Monsieur **BENRETEM A.** Maître de Conférence à l'Université BADJI MOKHTAR-ANNABA, pour ses orientations et surtout sa gentillesse afin de nous permettre l'accomplissement de ce travail.

Je remercie Monsieur **SAAD. S.** Maître de Conférence (U. BADJI MOKHTAR-ANNABA) de m'avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance.

Je remercie Monsieur **BELHAMRA. A.** Maître de Conférence (U. BADJI MOKHTAR-ANNABA) et Monsieur **HEROUS. L.** Maître de Conférence (U. BADJI MOKHTAR-ANNABA), pour l'honneur qu'ils me font en acceptant de participer au jury de soutenance.

Finalement je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin à élaborer et réaliser ce travail.

ملخص

هذا العمل يركز أو يهتم بالتعديل للتوفيقات والقدرة المفعلة بواسطة المصفاة الفعالة المتوازية. هذه المصفاة عبارة عن مموج للتوتر الكهربائي ثلاثي الطور يتحكم فيه عن طريق تعديل عرض الدفع (MLI) مخصص لتخفيض التوفيقات للتيار الكهربائي وتعويض القدرة المفعلة المستهلكة من طرف مستقبل غير خطي, وهو عبارة عن مقوم كهربائي ثلاثي الطور متحكم فيه.

لكي تتمكن من التعديل الجيد للمصفاة للتكيف مع المتغيرات في الحمولة, لدينا مخططان للضبط والتدقيق بواسطة مضبط مقترح (P), الأول يستعمل للتوتر الكهربائي المستمر للمموج, أما الثاني فيستعمل للتيار الكهربائي المحقن.

النتائج المتحصل عليها بالمحاكاة بواسطة برنامج (MATLAB) تبين مدى نجاعة المصفاة الفاعلة والتكيف الجيد مع تغيرات الحمولة. فالتوفيقات إنخفضت إلى أقل من 5% والتيار الكهربائي والتوتر الكهربائي للمنبع إنهما على توافق

Abstract

The purpose of this work is to compensate harmonic current and reactive power using shunt active filter. This filter is a PWM inverter used to reduce harmonic currents generated and compensate reactive power consumed by controlled three phase bridge rectifier (non linear load).

To ensure a high compensation, two control schemes based on P controller are proposed; one for dc voltage control and the other for the injected current (active filter current) control.

The obtained results by simulation have showed effectiveness and improvement in the performances of the filter in compensating harmonics and reactive power. The calculated total harmonic distortion (THD) factor is less than 5%, the filter copes with load variations and the source current and voltage are in phase.

Résumé

Ce travail s'intéresse à la compensation des harmoniques et de la puissance réactive par le filtre actif parallèle. Ce filtre est un onduleur de tension à MLI destiné à éliminer les harmoniques de courant et compenser la puissance réactive consommée par l'utilisation d'un pont redresseur triphasé commandé (charge non linéaire).

Pour assurer une bonne compensation le filtre doit s'adapter aux variations de la charge, deux schémas de régulation à base du régulateur P sont proposés, l'un pour la tension continue et l'autre pour le courant injecté.

Les résultats obtenus par simulation ont montrés une amélioration des performances de ce filtre. Le taux de distorsion harmonique (THD) calculé après filtrage est inférieur à 5%, le filtre s'adapte parfaitement aux variations de la charge et le courant et la tension de la source sont en phase.

Liste des figures

| Figure | Désignation | Chapitre | Page |
|---------------|--|-----------------|-------------|
| Figure I.1 | Fluctuation de tension | I | 2 |
| Figure I.2 | creux et coupure de tension | I | 3 |
| Figure I.3 | déséquilibre de tension | I | 4 |
| Figure I.4 | variation de fréquence | I | 4 |
| Figure I.5 | surtension | I | 5 |
| Figure I.6 | harmonique | I | 6 |
| Figure I.7 | caractéristiques de quelques générateurs d'harmoniques | I | 7 |
| Figure. I.8 | Diagramme de Fresnel des puissances | I | 10 |
| Figure I.9 | Principe de connexion du filtre passif | I | 13 |
| Figure I.10 | (a) Filtre passif amorti, (b) Impédance d'un Filtre passif amorti | I | 13 |
| Figure I.11 | (a) Filtre passif résonnant. (b) Impédance d'un Filtre passif résonnant | I | 14 |
| Figure. I.12 | Schéma de principe de convertisseur à MLI | I | 15 |
| Figure.I.13 | Filtre actif parallèle | I | 16 |
| Figure.I.14 | Filtre actif série | I | 17 |
| Figure.I.15 | Combinaison des filtres actifs série et parallèle | I | 18 |
| Figure II.1 | Schéma équivalent d'un onduleur de tension triphasé | II | 22 |
| Figure II.2 | Déplacement du point neutre dans un système sans neutre raccordé | II | 24 |
| FigureII.3 | Couplage en triangle de la charge de l'onduleur | II | 24 |
| Figure II.4 | Bus continu de l'onduleur de tension avec neutre raccordé | II | 26 |
| Figure. II.5 | Allure des tensions d'un onduleur triphasé pour une commande en pleine onde (configuration neutre raccordée) | II | 28 |
| Figure II-6 | Application de l'onduleur de tension à la compensation d'énergie réactive | II | 29 |
| Figure II.7 | Détermination des instants de commutation dans le cas d'une MLI intersective | II | 30 |
| Figure II.8 | Détermination des instants de commutation | II | 31 |
| Figure.II.9 | Instants de commutation des interrupteurs | II | 32 |
| Figure.II.10 | formes d'onde des tensions de branche | II | 33 |
| Figure.II.11 | formes d'onde de la tension composée | II | 34 |
| Figure.II.12 | formes d'onde des tensions de phase | II | 35 |
| Figure. III.1 | Structure générale du filtre actif parallèle | III | 38 |
| Figure. III.2 | Onduleur de tension triphasé | III | 39 |
| Figure. III.3 | Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur | III | 40 |
| Figure. III.4 | Schéma représentant le principe de séparation des puissances | III | 45 |

| | | | |
|---------------|--|-----|----|
| Figure. III.6 | Boucle de régulation de la tension continue | III | 49 |
| Figure. III.7 | Principe de commande des courants par hystérésis | III | 50 |
| Figure. III.8 | Principe de commande des courants par MLI | III | 51 |
| Figure. III.9 | Schéma de la régulation des courants du F.A.P | III | 52 |
| Figure. IV.1 | Rapport des puissances du filtre actif parallèle et de la charge non linéaire pour la compensation des courants harmoniques | IV | 56 |
| Fig. IV.2 | Rapport des puissances du filtre actif parallèle et de la charge non linéaire pour la compensation du courant harmonique et de la puissance réactive | IV | 57 |
| Figure. IV.3 | Schéma de principe du filtre utilisé pour l'extraction des composantes harmoniques | IV | 58 |
| Figure IV.4 | Schéma global d'un filtre actif parallèle | IV | 60 |
| Figure. IV.5 | schémas de la compensation des courants harmoniques | IV | 61 |
| Fig. IV.6 | Courants des références déduit par la méthode des puissances Actives et réactives instantanées | IV | 62 |
| Fig. IV.7 | Analyse temporelle de la compensation des courants harmoniques | IV | 63 |
| Fig. IV.8 | Analyse spectrale de la compensation des courants harmoniques | IV | 63 |
| Figure.IV.9 | Courants des références déduit par la méthode des puissances Actives et réactives instantanées | IV | 64 |
| Figure. IV.10 | Analyse temporelle de la compensation des courants harmoniques | IV | 65 |
| Figure. IV.11 | Analyse spectrale de la compensation des courants harmoniques | IV | 66 |
| Figure. IV.12 | schémas de la compensation des courants harmoniques et la puissance réactive en même temps | IV | 67 |
| Figure. IV.13 | Courants des références déduit par la méthode des puissances Actives et réactives instantanées | IV | 68 |
| Figure. IV.14 | Analyse temporelle de la compensation des courants harmoniques et la puissance réactive en même temps | IV | 69 |
| Figure. IV.15 | Analyse spectrale de la compensation des courants harmoniques et la puissance réactive en même temps | IV | 70 |
| Figure. IV.16 | Courants des références déduit par la méthode des puissances Actives et réactives instantanées | IV | 71 |
| Figure. IV.17 | Analyse temporelle de la compensation des courants harmoniques et la puissance réactive en même temps | IV | 72 |
| Figure. IV.18 | Analyse spectrale de la compensation des courants harmoniques et la puissance réactive en même temps | IV | 73 |

Liste des tableaux

| Tableau | Désignation | Chapitre | Page |
|----------------|---|-----------------|-------------|
| Tableau I 1 | Gêne due à la pollution harmonique et seuils réputée tolérables | I | 9 |
| Tableau I.2 | Niveau de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles sur les réseaux basse tension. | I | 12 |
| Tableau I.3 | Récapitulatif des solutions de dépollution | I | 19 |
| Tableau. III.1 | Tensions générées par l'onduleur | III | 40 |
| Tableau. IV.1 | Les expressions de $P_{réf.}$ et $q_{réf.}$ | IV | 59 |
| Tableau. IV.2 | Valeur des harmoniques avant et après compensation (compensation des courants harmoniques) | IV | 75 |
| Tableau. IV.3 | Valeur des harmoniques avant et après compensation (compensation des courants harmoniques et la puissance réactive en même temps) | IV | 75 |

Symboles utilisés

A_r : Amplitude de la référence

A_p : Amplitude de la porteuse

D : Puissance déformante

f : Fréquence

f_m : Fréquence de commutation

$f_{réf}$: Fréquence de référence

h : Rang des harmoniques de courant

i : Courant instantané

I_d : Courant redressé

I_h : Courant harmonique

I_{inj} : Courant injecté par le filtre

I_s : Courant de source

I_{ch} : Courant absorbé par la charge polluante

I_r : Courant de référence à la sortie de bloc d'identification

I_α, I_β : Courant au repère α - β

K : Etat des interrupteurs ($k = \alpha, b, c$)

L : Inductance de phase

L_C : Inductance à l'entrée du pont redresseur

L_f : Inductance de filtre de sortie

L_{ch} : Inductance de charge non linéaire

L_s : Inductance de source

m : Indice de modulation

P : Puissance active

\bar{p}, \bar{q} : Puissance continues

\tilde{p}, \tilde{q} : Puissance alternatives

$P_{\text{réf}}, q_{\text{réf}}$: puissances perturbatrices
 q : Puissance réactive
 r : Coefficient de réglage (MLI)
 R_s : Résistance de source
 R_{ch} : Résistance de charge non linéaire
 R_c : Résistance à l'entrée du pont redresseur
 R_f : Résistance de filtre de sortie
 R_d : Résistance de redresseur
 S : Puissance apparente
 S_f : Puissance de filtre actif
 S_{cc} : Puissance de court-circuit du réseau
 τ_h : Rapport des puissances
 τ : Temps de retard
 V_d : Tension redressée continue
 V_s : Tension de source
 V_h : Tension harmonique
 V_a, V_b, V_c : tensions des phases
 V_{DC} : Tension continue de l'onduleur de tension
 V_{a0}, V_{b0}, V_{c0} : Tensions des branches
 V_0 : Composantes homopolaires de tension
 V_α, V_β : Tension au repère α - β
 α : Angle d'allumage des thyristors du pont graetz
 ω_h : Pulsation la plus faible des harmoniques à compenser
 φ : Déphasage
 ε : Taux d'ondulation
 C_{dc} : Condensateur
THD : Taux de distorsion harmonique
 F_f : Facteur de puissance

SOMMAIRE

| | |
|--|----------|
| Introduction générale | <u>x</u> |
| CHAPITRE I : perturbation des réseaux électrique et principes de compensation actifs. | |
| I.1.Introduction | 1 |
| I.2 .Les perturbations électriques | 1 |
| <i>I.2.1 Fluctuation de tension</i> | 1 |
| <i>I.2.2. Creux et coupures de tension</i> | 2 |
| <i>I.2.2. Creux et coupures de tension</i> | 2 |
| <i>I.2.3. Déséquilibre de tension</i> | 3 |
| <i>I.2.4. Variation de fréquence</i> | 4 |
| <i>I.2.5. Surtensions</i> | 4 |
| <i>I.2.6. Consommation de la puissance réactive</i> | 5 |
| <i>I.2.7. Harmonique</i> | 6 |
| I.3. Caractérisation des perturbations harmoniques | 10 |
| <i>I.3.1. le facteur de puissance</i> | 10 |
| <i>I.3.2. Taux de distorsion harmonique</i> | 11 |
| I.4. Réglementation | 11 |
| I.5.Solutions aux problèmes engendrés par les perturbations | 12 |
| <i>I.5.1. solutions traditionnelles</i> | 12 |
| <i>I.5.1-1 Réduction de la pollution harmonique</i> | 12 |
| <i>I. 5.1-1-1 Agir sur la structure de l'installation</i> | 12 |
| <i>I. 5.1.1.2 Transformateur à couplage spécial</i> | 12 |
| <i>I. 5.1.1.3 Filtrage passif</i> | 12 |
| <i>I.5.1.1.3.a Filtre passif amorti</i> | 13 |
| <i>I. 5.1.1.3.b Filtre passif résonnant</i> | 13 |
| <i>I.5.1-2 Compensation de l'énergie réactive</i> | 14 |
| <i>I.5.2. solutions modernes</i> | 14 |
| <i>I.5.2.1 Redresseur à MLI</i> | 14 |
| <i>I.5.2.2 filtre actif</i> | 15 |
| <i>I.5.2.2-a. Le filtre actif parallèle</i> | 15 |
| <i>I.5.2.2-b. le filtre actif série</i> | 16 |
| <i>I.5.2.2-c. La combinaison parallèle-série actifs</i> | 17 |
| <i>I.5.3 Comparatif et choix du FAP</i> | 18 |
| I.6.Conclusion | 20 |
| CHAPITRE II : modulation et commande de l'onduleur de tension | |
| II.1.Introduction | 21 |
| II .2. Configurations de l'onduleur de tension | 21 |

| | |
|--|----|
| II.3. Modélisation de l'onduleur de tension | 25 |
| II.4. commande d'un onduleur triphasé | 27 |
| <i>II.4.1 Commande à la fréquence des grandeurs de sortie (pleine onde)</i> | 27 |
| <i>II.4.2 Commande à des fréquences supérieures</i> | 29 |
| <i>II.4.2.1 Commande en MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion)</i> | 30 |
| <i>II.4.2.2 MLI vectorielle</i> | 31 |
| II.5. Exemple de simulation d'un onduleur de tension avec neutre raccordé | 31 |
| II.6. Conclusion | 36 |

CHAPITRE III : Filtre actif parallèle, stratégie de commande, régulation et dimensionnement

| | |
|---|-------|
| III.1. Introduction | 37 |
| III.2. structure générale du filtre actif parallèle | |
| <i>III.2.1 Topologie générale</i> | 38 |
| <i>III.2.2 Etude de la partie puissance</i> | 38 |
| <i>III.2.2.1 Onduleur de tension</i> | 38 |
| <i>III.2.2.1.1 Structure générale</i> | 38 |
| <i>III.2.2.1.2 Tension fournie par l'onduleur</i> | 39 |
| <i>III.2.2.1.3 Représentation vectorielle</i> | 40 |
| <i>III.2.2.2 Système de stockage d'énergie</i> | 41 |
| <i>III.2.2.3 Filtre de sortie</i> | 42 |
| <i>III.2.3 Etude de la partie contrôle-commande</i> | 42 |
| <i>III.2.3.1 Introduction à la stratégie de commande</i> | 42 |
| <i>III.2.3.2 La méthode d'identification des courants perturbés</i> | 42 |
| <i>III.2.3.2.1 Généralités sur les méthodes d'identification</i> | 42 |
| <i>III.2.3.2.2 Principe du fonctionnement de la méthode des puissances instantanées</i> ... | 44 |
| <i>III.2.3.2.2.1 Généralités sur les puissances instantanées</i> | 44 |
| <i>III.2.3.2.2.2 Séparation des puissances perturbatrices</i> | 45 |
| <i>III.2.3.2.2.3 Calcul des courants perturbateurs</i> | 46 |
| <i>III.2.3.2.2.4 Algorithme d'identification</i> | 47 |
| <i>III.2.3.4 Régulation de la tension continue</i> | 48 |
| <i>III.2.3.5 La commande de l'onduleur</i> | 50 |
| <i>III.2.3.5.1 Commande par hystérésis</i> | 50 |
| <i>III.2.3.5.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion</i> | 51 |
| <i>III.2.3.6 La Régulation du courant du filtre actif parallèle</i> | 52 |
| III.3. Conclusion | .. 53 |

CHAPITRE IV : Etude de la puissance apparente du filtre actif et simulation

| | |
|--|----|
| IV.1. Introduction | 54 |
| IV.2. étude de la puissance apparente | 54 |
| <i>IV.2.1. Compensation des courants harmoniques</i> | 54 |

| | |
|--|----|
| <i>IV.2.2. Compensation des courants harmoniques et de puissance réactive en même temps</i> | 56 |
| IV.3. séparation des puissances perturbatrices | 58 |
| IV.4.Simulation par matlab | 59 |
| <i>IV.4.1 : Modèle de la source (réseau)</i> | 60 |
| <i>IV.4.2 : Modèle de la charge polluante</i> | 60 |
| <i>IV.4.3 : une résistance et inductance ($R_c - L_c$)</i> | 60 |
| <i>IV.4.4 : Modèle du filtre actif parallèle</i> | 60 |
| <i>IV.4.5 : Résultat de simulation et analyse</i> | 60 |
| <i>IV.4.5.1 compensation des courants harmoniques</i> | 60 |
| <i>IV.4.5.1.1 filtre passe haut</i> | 62 |
| <i>IV.4.5.1.2 filtre passe bas</i> | 64 |
| <i>IV.4.5.2 compensation des courants harmoniques et la puissance réactive en même temps</i> | 67 |
| <i>IV.5.2.1 filtre passe haut</i> | 68 |
| <i>IV.5.2.2 filtre passe bas</i> | 71 |
| <i>IV.5.3. Analyse des résultats</i> | 74 |
| IV.6.Conclusion. | 76 |
| Conclusion générale | 77 |
| Référence bibliographique | 78 |

Introduction générale

L'utilisation des convertisseurs statiques dans les installations industrielles devient la cause principale de la pollution des réseaux de distribution électrique. Ils se comportent comme des générateurs d'harmoniques tout en consommant de la puissance réactive [1-8].

Ces harmoniques sont principalement à l'origine de l'échauffement, vieillissement et destruction des équipements et appareils électriques ainsi que les perturbations des lignes téléphoniques.

Il est nécessaire de réduire ces harmoniques pour protéger le réseau contre cette pollution harmonique ainsi que la compensation de la puissance réactive consommée.

Le filtrage actif parallèle présente actuellement, la solution la plus fiable pour la compensation des harmoniques et l'énergie réactive en même temps, surtout après le développement des semi-conducteurs de puissance, les DSP et les microcontrôleurs. La réussite de ce type de compensateur est du aussi aux développements des techniques de commandes des onduleurs (MLI, Hystérésis, et plus récemment MLI vectorielle) [3, 4, 24, 25, 26].

Plusieurs recherches liées à ce problème [4, 26, 7, 9, 10] portent essentiellement sur le modèle de puissance du filtre, méthodes d'identification des courant harmonique et les méthodes de générations des signaux de références. Dans ce travail nous nous intéressons à la compensation des harmoniques et l'énergie réactive en même temps ainsi que l'amélioration des performances par l'utilisation d'un schéma de régulation adéquat pour que le filtre s'adapte aux variations de charges. Cette adaptation est l'avantage principal du filtre actif par rapport au filtre passif qui devient inefficace une fois la charge subit des variations.

Pour compenser les harmoniques de courant et l'énergie réactive, les compensateurs passifs sont traditionnellement employés [10-24]. Leur principe consiste à dévier le courant harmonique dans une faible impédance placée en parallèle avec la charge polluante pour éviter sa propagation dans le réseau. Ces compensateurs sont pénalisés à cause de l'encombrement, la résonance et ne s'adaptent pas aux variations de la charge.

Actuellement, les filtres actifs sont mieux adaptés pour la compensation des harmoniques et l'énergie réactive. Leur principe est d'injecter dans le réseau des courants harmoniques égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase et ainsi on obtient un courant de source sinusoïdal et en phase avec la tension.

I. 1.INTRODUCTION

Le distributeur d'énergie électrique a pour objectif de fournir un système de tensions sinusoïdales triphasées équilibrées aux utilisateurs. Par contre l'utilisation des convertisseurs statique entraîne une augmentation de la pollution harmonique des réseaux et une forte consommation de la puissance réactive. Cette dégradation peut être également créée par des dysfonctionnements de matériels sur le réseau (saturation des transformateurs, création de pertes supplémentaires dans les lignes de transport...) des incidents climatiques (foudre).

L'objectif de ce chapitre est d'étudier, les origines des perturbations électriques et leur influence sur les réseaux électriques. Ensuite, nous présentons les solutions conventionnelles utilisées pour limiter cette pollution. Finalement, nous étudions les compensateurs actifs d'harmoniques et de puissance réactive comme nouvelle solution qui peut être utilisée pour résoudre ce problème.

I.2 .Les perturbations électriques

L'énergie électrique est délivrée sous forme de tension caractérisée par sa fréquence, son amplitude et sa forme d'onde sinusoïdale. La qualité de la tension peut être affectée, par des perturbations engendrées par des appareils installés chez les utilisateurs de l'énergie électrique, et peuvent être classées selon les catégories suivantes :

I.2.1 Fluctuation de tension

Les fluctuations de tensions sont définies comme des variations rapides de tension, répétitives ou aléatoires, Ce sont des variations brutales de l'amplitude de la tension situées dans une bande de $\pm 10\%$ de sa valeur nominale et se produisent sur un intervalle de temps de quelques centièmes de secondes.

Elles sont en particulier dues à la propagation sur les lignes du réseau de courants d'appel importants. L'origine principale de ces courants est le fonctionnement d'appareil dont la puissance absorbée varie de manière rapide, comme les fours à arc et des machines à souder. Ces fluctuations entraînent des variations de flux lumineux pour les lampes à incandescence créant un papillotement de la lumière ou Flicker. [1]

Un exemple de fluctuation de tension est montré dans la figure I.1.

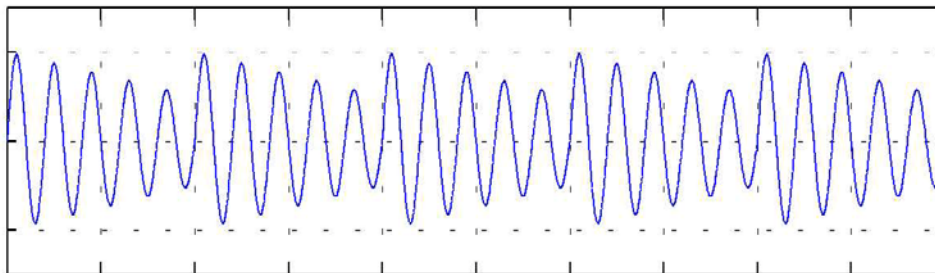


Figure I.1: Fluctuation de tension [1]

I.2.2. Creux et coupures de tension :

Un creux de tension est une baisse brutale de la tension de fourniture u_f en un point d'un réseau d'énergie électrique, à une valeur comprise entre 90 % et 10 % de la tension nominale u_n . Pendant un temps de 10 millisecondes à quelques secondes.

Il y a deux types de phénomènes à l'origine des creux de tension:

- ▣ ceux provenant du fonctionnement d'appareils à charge fluctuante ou de la mise en service d'appareils appelant un courant élevé au démarrage (moteurs, transformateurs... etc.),
- ▣ ceux liés aux phénomènes aléatoires, comme la foudre ou tous les courts-circuits accidentels sur les réseaux de distribution, ou les réseaux internes des clients (défaut d'isolation, blessure de câble, projection de branches sur les lignes aériennes).

Les creux de tension sont caractérisés par leur amplitude et par leur durée. Ils sont monophasés, biphasés ou triphasés.

● Conséquences des creux de tension :

Les creux de tension sont susceptibles de perturber le fonctionnement de certaines installations industrielles et tertiaires. En effet, ce type de perturbation peut causer des dégradations de fonctionnement des équipements électriques.

Une coupure de tension quand à elle est une diminution brutale de la tension à une valeur supérieure à 90 % de la tension nominale ou disparition totale pendant une durée généralement comprise entre 10 ms et une minute pour les coupures brèves et supérieure à une minute pour les coupures longues. La plupart des appareils électriques admettent une coupure totale d'alimentation d'une durée inférieure à 10ms[1,2]. La figure I.2 montre un exemple de creux et de coupure de tension.

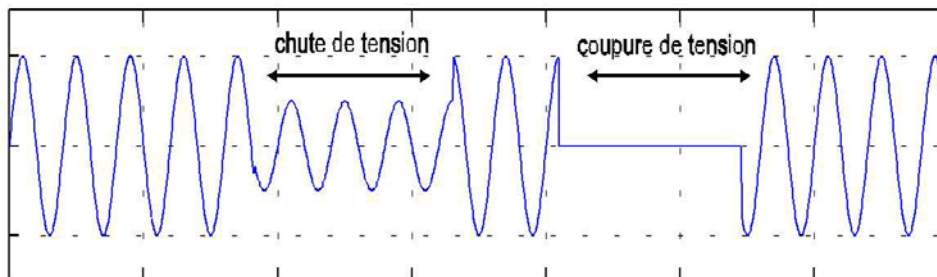


Figure I.2: creux et coupure de tension. [1,2]

I.2.3. Déséquilibre de tension :

Lorsque les trois tensions ne sont pas identiques en amplitude et/ou ne sont pas décalées d'un angle de 120° les unes par rapport aux autres, on parlera de déséquilibre du système triphasé (voir la figure I.3).

- Origine du déséquilibre

Un récepteur électrique triphasé, qui n'est pas équilibré et que l'on alimente par un réseau triphasé équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau. Ceci est fréquent pour les récepteurs monophasés basse tension. Mais cela peut également être engendré, à des tensions plus élevées, par des machines à souder, des fours à arc ou par la traction ferroviaire. [2]

- Conséquences du déséquilibre

Il est plus intéressant d'aborder le problème du déséquilibre par type d'équipement. Le déséquilibre d'une installation triphasée peut entraîner un dysfonctionnement des appareils basses tensions connectés, [3]:

- ▣ Mauvais fonctionnement d'un appareil monophasé alimenté par une tension très faible (lampe à incandescence qui fournit un mauvais éclairage),
- ▣ Destruction d'un appareil monophasé alimenté par une tension trop élevée, il peut être détruit (claquage d'un filament de lampe par surtension).

Concernant les dispositifs triphasés d'électronique de puissance, principalement les ponts redresseurs, le fonctionnement en présence de déséquilibre entraîne l'apparition de composantes harmoniques non caractéristiques, notamment des harmoniques de rang multiple de 3. L'apparition de ces courants harmoniques peut poser des problèmes, comme la génération d'une anti-résonance lors du filtrage de l'harmonique de rang 5. Outre les effets classiques des harmoniques, ces fréquences non caractéristiques peuvent conduire, dans certains cas, au blocage de la commande [4].

La conséquence des composantes inverses sur les machines tournantes est la création d'un champ tournant en sens inverse du sens de rotation normal, d'où un couple de freinage parasite et des pertes supplémentaires qui provoquent l'échauffement de la machine.

Concernant l'effet du déséquilibre homopolaire, il faut signaler le risque d'échauffement du conducteur neutre dans un réseau BT qui, lorsque le conducteur est d'un diamètre trop faible, peut provoquer une rupture du conducteur ou un incendie.

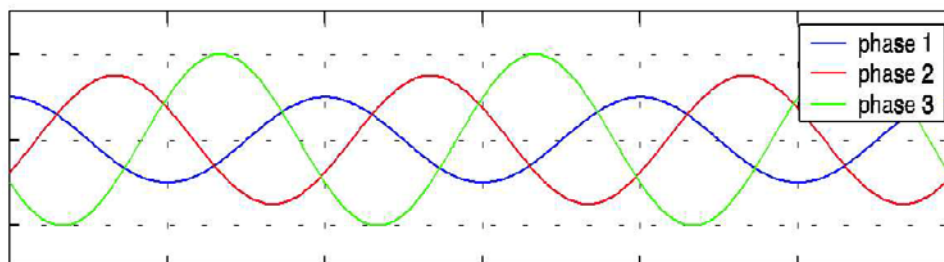


Figure I.3: déséquilibre de tension. [3]

I.2.4. Variation de fréquence :

Une variation sensible de la fréquence du réseau peut apparaître sur les réseaux des utilisateurs non interconnectés ou alimentés par une source thermique autonome (voir la figure (I.4) Au niveau des réseaux de distribution ou de transport, cette variation de la fréquence est très rare et n'est présente que lors de circonstances exceptionnelles, comme dans le cas de certains défauts graves sur le réseau. Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle $50\text{Hz} \pm 1\%$ [5].

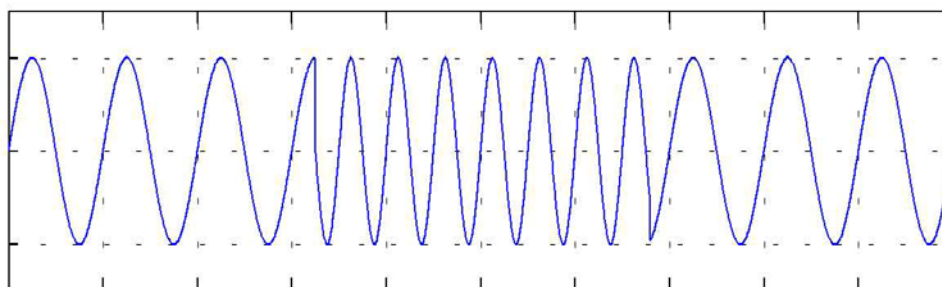


Figure I.4: variation de fréquence. [5]

I.2.5. Surtensions:

- *Origine*

Toute tension appliquée à un équipement dont la valeur de crête sort des limites

D'un Gabarit défini par une norme ou une spécification est une surtension. Les surtensions sont de trois natures [6, 7,8]:

■ Temporaires à fréquence industrielle : - Rupture du conducteur de neutre - Ferro résonance (phénomène oscillatoire non linéaire rare) - Défauts du régulateur d'un alternateur ou d'un régleur en charge du transformateur - Surcompensation de l'énergie réactive.

■ Surtensions de manoeuvre : Elles sont provoquées par des modifications rapides de la structure du réseau (ouverture d'appareils de protection...).

■ Surtensions atmosphériques : (la foudre).

● *Conséquences des surtensions :*

◇ Claquage diélectrique, cause de destruction de matériel sensible (composants électroniques...)

◇ Dégradation de matériel par vieillissement (surtensions non destructives mais répétées)

◇ Coupure longue entraînée par la destruction de matériel (perte de facturation pour les distributeurs, pertes de production pour les industriels)

◇ Perturbations des circuits de contrôle commande et de communication à courant faible

◇ Contraintes électrodynamiques et thermiques.

Un exemple de surtension est montré dans la figure (I.5).

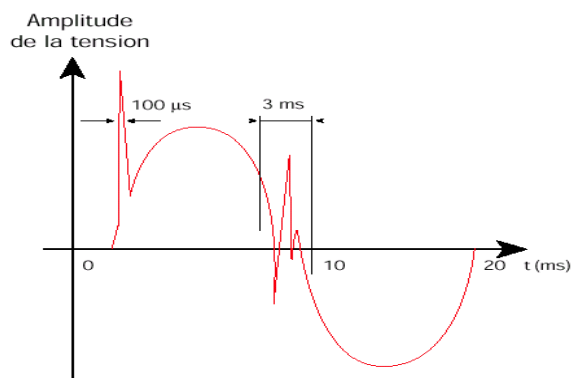


Figure I.5: surtension [9].

I.2.6. Consommation de la puissance réactive :

La consommation de puissance réactive par des convertisseurs statiques a des conséquences économiques. Tous les équipements du réseau en particulier les générateurs, les transformateurs et les lignes sont dimensionnés pour un courant nominal et une tension nominale. L'équation (I.1) montre que, pour une valeur donnée de la puissance active (P), un faible facteur de puissance (F) nécessite une puissance apparente (S) plus forte ou pour une valeur donnée de S, un faible facteur de puissance se traduit par une mauvaise utilisation des équipements du réseau, d'où un rendement médiocre [10].

$$\mathbf{P = F.S} \quad (\text{I.1})$$

En plus, la consommation de puissance réactive est à l'origine de la fluctuation de tension du réseau ΔV .

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta Q}{S_{cc}} \quad (I.2)$$

avec : S_{cc} : puissance de court-circuit du réseau.

Actuellement afin de maintenir un facteur de puissance convenable et de limiter les

chutes de tensions en ligne, EDF par exemple, impose une valeur de $\text{tg}\phi$ inférieure à 0.4. Dans le cas contraire, l'excédant de puissance est facturé au taux de 1/8 du KWh.

I.2.7. Harmonique :

Les harmoniques sont la superposition sur l'onde fondamentale à 50Hz, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples de celle du fondamental.

La figure (I.6) montre un exemple d'harmonique.

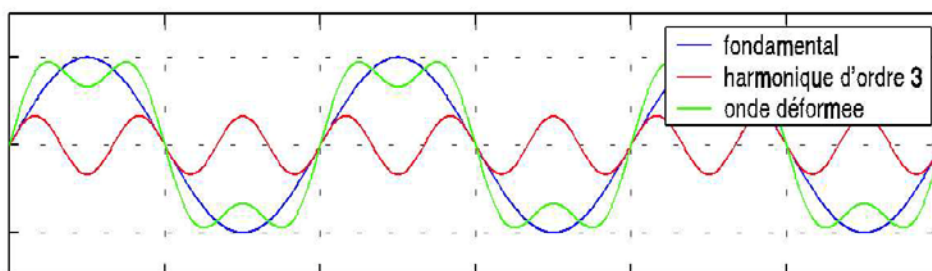


Figure I.6: harmonique. [3]

● Origine des harmoniques :

La prolifération des équipements électriques utilisant des convertisseurs statiques a entraîné ces dernières années une augmentation sensible du niveau de pollution harmonique des réseaux électriques. Ces équipements électriques sont considérés comme des charges non linéaires émettant des courants harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale, ou parfois à des fréquences quelconques. Le passage de ces courants harmoniques dans les impédances du réseau électrique peut entraîner des tensions harmoniques aux points de raccordement et alors polluer les consommateurs alimentés par le même réseau[1,11,12].

Les différents secteurs industriels concernés sont aussi bien du type secondaire (utilisation des gradateurs, des redresseurs, des variateurs de vitesse...), que du type tertiaire (informatique ou éclairage dans les bureaux, commerces,...) ou domestique (téléviseurs, appareils électroménagers en grand nombre). Voir la figure (I.7)

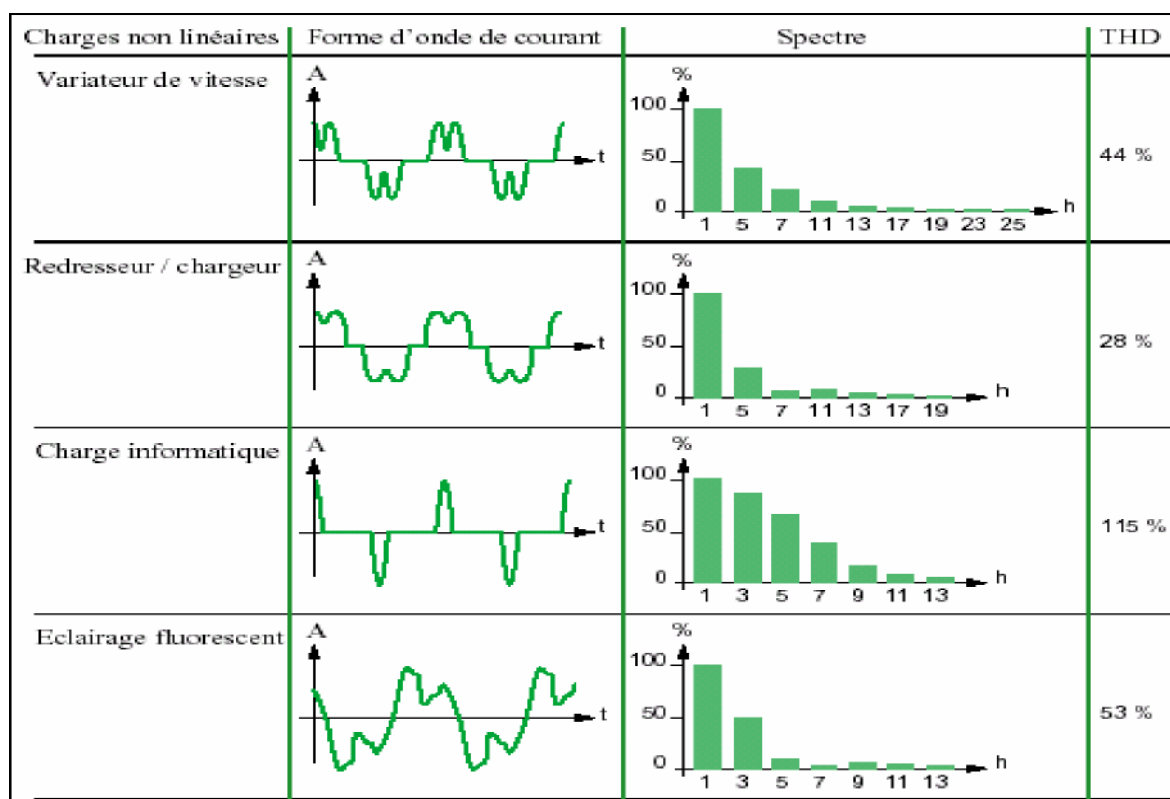


Figure I.7: caractéristiques de quelques générateurs d'harmoniques [13].

● *Conséquences des harmoniques :*

Leurs conséquences sont liées à l'augmentation des valeurs crêtes (claquage diélectrique) et efficaces (échauffement supplémentaire) et au spectre en fréquence (vibration et fatigue mécanique) des tensions et des courants. De nombreux effets des harmoniques sur les installations et les équipements électriques peuvent être cités. Les effets les plus importants sont l'échauffement, l'interférence avec les réseaux de télécommunication, les défauts de fonctionnement de certains équipements électriques et le risque d'excitation de résonance [14,15]:

- *Echauffement* : Les courants harmoniques gènèrent des pertes et par conséquent des échauffements. Ces pertes joule dans les équipements dépendent de la valeur efficace du courant de charge absorbé et réduisent également le rendement de ces équipements et leur durée de vie.
- *Interférence avec les réseaux de télécommunication* : Le couplage électromagnétique entre les lignes de puissance et les circuits de communication peut induire dans ces derniers des bruits importants et par conséquent les rendre inutilisables.

- *Mauvais fonctionnement pour les dispositifs électriques* : En présence des harmoniques, les tensions (ou les courants) peuvent changer de signe plusieurs fois dans une demi-période du réseau. Par conséquent, tout appareil de mesure ou système de régulation numérique dont le fonctionnement est basé sur le passage par zéro de grandeurs électriques peut être perturbé.
- *Le risque d'excitation de résonance* : Les fréquences de résonance des circuits formés par des câbles et des inductances des transformateurs sont normalement assez élevées. En cas de présence de batterie de condensateurs, raccordée au réseau pour relever le facteur de puissance, la fréquence de résonance peut être assez faible et peut correspondre à la fréquence d'un harmonique existant. Dans ce cas, il y aura un phénomène d'amplification d'harmonique qui peut détruire les équipements raccordés sur le réseau.
- *Autres effets* : Ils sont cités ci après:
 - ☼ L'augmentation du niveau sonore et la pulsation du couple dans les machines électriques
 - ☼ Accélération du vieillissement des équipements d'éclairage et des batteries de condensateurs.
 - ☼ Influence sur les relais de protection.

Le tableau N° I.1 montre l'ensemble de ces gênes et indique les seuils de distorsion.

| Matériels | Gêne liée à la pollution harmonique | Seuils admissibles pour lesquels des incidents ont été signalés |
|---|--|--|
| Alternateurs | <ul style="list-style-type: none"> Pertes supplémentaires dans les enroulements statiques et principalement dans les amortisseurs, liées à la circulation des courants harmoniques. | Distorsion de tension =10% (pour petites machines) Distorsion de courant =5% (machines de fortes puissances) |
| Lignes | Pertes ohmiques supplémentaires. | |
| Câbles | <ul style="list-style-type: none"> Pertes ohmiques supplémentaires, surtout dans les câbles de retour du neutre où circulent les courants harmoniques trois homopolaires. Pertes diélectriques liées à la distorsion de tension pouvant entraîner des détériorations. Corrosion des câbles en aluminium sous l'effet de la circulation des courants harmoniques pairs associés à une composante continue. | Distorsion de tension =10 % Tension harmonique individuelle $\frac{U_h}{U_1} = 7\%$ |
| Transformateurs | <ul style="list-style-type: none"> Pertes supplémentaires dans les enroulements liées à la circulation des courants harmoniques. Pertes supplémentaires dans le fer (par courants de Foucault principalement) Risque de saturation en présence des composantes continues (associées aux harmoniques paires). | |
| Moteurs | <ul style="list-style-type: none"> Pertes supplémentaires dans les enroulements principalement liées à la distorsion de tension. Ordre de grandeur: majoration proportionnelle à $\frac{U_h^2}{h^2}$ avec h: rang de l'harmonique | |
| Circuits de protection divers de la clientèle | de Risque de déclenchements Impératifs attribués aux distorsions de tension et à des particularités des circuits clientèle alimentés. | Perturbation si $\frac{U_h}{U_1}$ entre 6 % et 12 % |
| Lampes à décharge pour éclairage Appareils médicaux générateurs de rayons x | <ul style="list-style-type: none"> Risque de vacillement sous l'effet de tension médicaux harmonique de rang 2. Perturbation par surtension en valeur de crête liée aux distorsions de la tension. | Perturbation si $\frac{U_h}{U_1} = 3\%$ Perturbation si $\frac{U_h}{U_1} = 10\%$ |
| Ordinateurs, électronique de puissance | Troubles fonctionnels liés à la distorsion de tension | Distorsion de tension =5 % |
| Condensateurs de puissance | Pertes diélectriques supplémentaires aboutissant au vieillissement du condensateur. | Tension harmonique individuelle $\frac{U_h}{U_1} = \frac{83\%}{h}$ Non cumulable avec d'autres fréquences harmoniques. |

Tableau I 1 : Gêne due à la pollution harmonique et seuils réputée tolérables.

I.3. Caractérisation des perturbations harmoniques :

Le récepteur d'énergie est considéré comme une charge polluante, s'il absorbe des courants non sinusoïdaux ou déséquilibrés ou consomme de l'énergie réactive. La perturbation harmonique est généralement caractérisée par le taux de distorsion harmonique défini pour la tension ou le courant par rapport à une onde sinusoïdale. Pour chiffrer la consommation de la puissance réactive, le facteur de puissance est généralement utilisé. Nous limitons l'analyse du régime déformé au cas où la source de tension est sinusoïdale et le courant absorbé par la charge est pourvu de composantes harmoniques.

I.3.1. le facteur de puissance :

Normalement, pour un signal sinusoïdal le facteur de puissance est donné par le rapport entre la puissance active P et la puissance apparente S . Les générateurs, les transformateurs, les lignes de transport et les appareils de contrôle et de mesure sont dimensionnés pour la tension et le courant nominaux. Une faible valeur du facteur de puissance se traduit par une mauvaise utilisation de ces équipements. Dans le cas où il y a des harmoniques, une puissance supplémentaire appelée la puissance déformante (D) [4,5] donnée par la relation (I.3), apparaît comme le montre le diagramme de Fresnel de la Fig.I.8

$$D = 3V_1 \sqrt{\sum_{h=2}^{50} I_h^2}$$

(I.3)

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

$$F.P. = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} = \cos \varphi_1 \cos \gamma$$

(I.4)

On voit bien que les harmoniques affectent aussi le facteur de puissance.

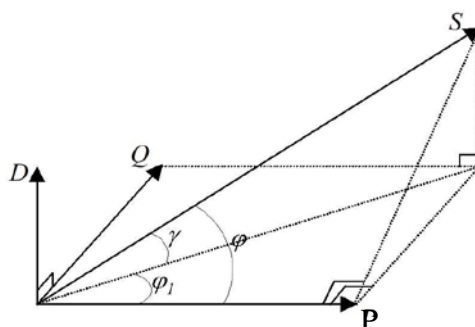


Fig. I.8 : Diagramme de Fresnel des puissances.

I.3.2. Taux de distorsion harmonique :

Le taux de distorsion est un paramètre qui définit globalement la déformation de la grandeur alternative. La perturbation harmonique est généralement caractérisée par le taux de distorsion en harmonique en tension ou en courant. Cette notion permet de caractériser la déformation créée par les harmoniques par rapport à une onde sinusoïdale. Le taux de distorsion harmonique en tension est exprimé par[4,5,14]:

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \frac{V_{sh}^2}{V_{s1}^2}} \quad (I.5)$$

Avec :

V_{s1} : valeur efficace du fondamental de la tension.

V_{sh} : valeur efficace de la tension harmonique de rang h.

Le taux de distorsion harmonique en courant est exprimé par :

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \frac{I_{Lh}^2}{I_{L1}^2}} \quad (I.6)$$

I_{Lh} : valeur efficace du courant harmonique de rang h.

I.4. Réglementation :

Afin de concilier distributeur et les consommateurs, des normes ont été étudiées. Elles régissent l'immunité des équipements aux harmoniques. Par exemple la norme CEI 1000- 2-2 pour les équipements raccordés à un réseau basse tension permet de garantir à l'utilisateur un fonctionnement de l'équipement sur un réseau perturbé dans certaines limites. Un extrait de la norme CEI 1000-2-2 est donné au tableau I.2.

| Harmoniques impairs non multiples de 3 | | Harmoniques impairs multiples de 3 | | Harmoniques pairs | |
|--|-----------------------|------------------------------------|-----------------------|-------------------|-----------------------|
| Rang Harmonique h | Tension harmoniques % | Rang Harmonique h | Tension harmoniques % | Rang Harmonique h | Tension harmoniques % |
| 5 | 6 | | | 2 | 2 |
| 7 | 5 | | | 4 | 1 |
| 11 | 3,5 | 3 | 5 | 6 | 0,5 |
| 13 | 3 | 9 | 1,5 | 8 | 0,5 |
| 17 | 2 | 15 | 0,3 | 10 | 0,5 |
| 19 | 1,5 | 21 | 0,2 | 12 | 0,2 |
| 23 | 1,5 | >21 | 0,2 | >12 | 0,2 |
| 25 | 1,5 | | | | |
| >25 | $0,2+0,5*25/h$ | | | | |

Tableau I.2 : Niveau de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles sur les réseaux basse tension.

I.5.Solutions aux problèmes engendrés par les perturbations :

I.5.1. solutions traditionnelles.

I.5.1-1 Réduction de la pollution harmonique :

Plusieurs solutions traditionnelles ont été adoptées pour réduire les perturbations harmoniques.

I. 5.1-1-1 Agir sur la structure de l'installation :

Il faut éviter de connecter un récepteur sensible en parallèle avec un pollueur tel que les redresseurs par exemple, si le pollueur est de forte puissance, il est souhaitable de l'alimenter par un autre transformateur [5,15].

I. 5.1.1.2 Transformateur à couplage spécial :

Il s'agit de limiter la circulation des courants harmoniques à une partie aussi petite que possible de l'installation à l'aide de transformateurs à couplage appropriés. L'utilisation d'un transformateur d'isolement, de rapport 1/1 à couplage triangle-étoile ou triangle zigzag, empêche la propagation des courants harmoniques de rang 3 et leurs multiples circulant dans le neutre, ce procédé n'a aucun effet sur les autres rangs harmoniques [14,15].

I. 5.1.1.3 Filtrage passif :

Le filtrage le plus ancien et le plus répandu sur le réseau industriel est le filtrage passif Le parallèle (figure I.9). Son principe consiste à dériver le courant harmonique dans une faible impédance placée en parallèle avec la charge polluante pour éviter sa propagation dans le réseau. Deux types de filtre passif sont généralement utilisés, le Filtre résonnant et le filtre amorti [4, 5, 10,14].

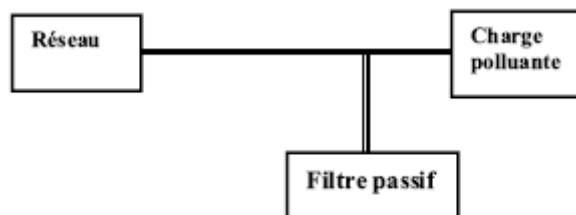


Figure I.9.: Principe de connexion du filtre passif

I.5.1.1.3.a Filtre passif amorti :

Ce filtre est constitué d'une inductance en parallèle avec une résistance et le tout en série avec une capacité comme le montre la figure I.10.a. Son influence est moins importante au rang d'accord, par contre, il présente une impédance faible sur une large bande de fréquence. Cependant, le filtre amorti est encore efficace aux fréquences supérieures à celle du rang d'accord. L'impédance d'un filtre amorti ($Z(\omega)$) en fonction de la pulsation est donnée à la figure I.10.b.

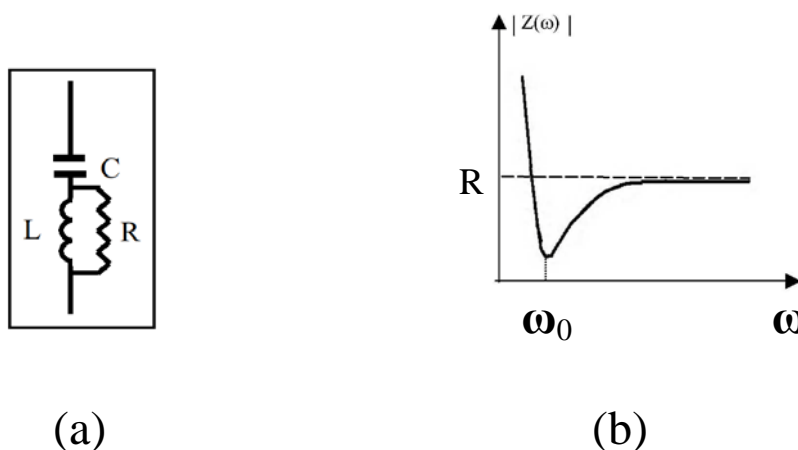


Figure I.10: (a) Filtre passif amorti, (b) Impédance d'un Filtre passif amorti [5,10]

I. 5.1.1.3.b Filtre passif résonnant :

Le filtre résonnant est constitué d'éléments passifs en série (self, résistance, capacité) comme le montre la figure I.11.a. Ce type de filtre est très sélectif, son influence est importante au voisinage du rang d'accord et moins importante en dehors de cette bande. L'impédance d'un filtre passif résonnant ($Z(\omega)$) en fonction de la pulsation est donnée à la figure I.11.b. Généralement, on utilise les filtres résonnants accordés pour les basses fréquences (rangs 5 et 7) et un filtre amorti à large bande pour filtrer les harmoniques de rangs supérieurs.

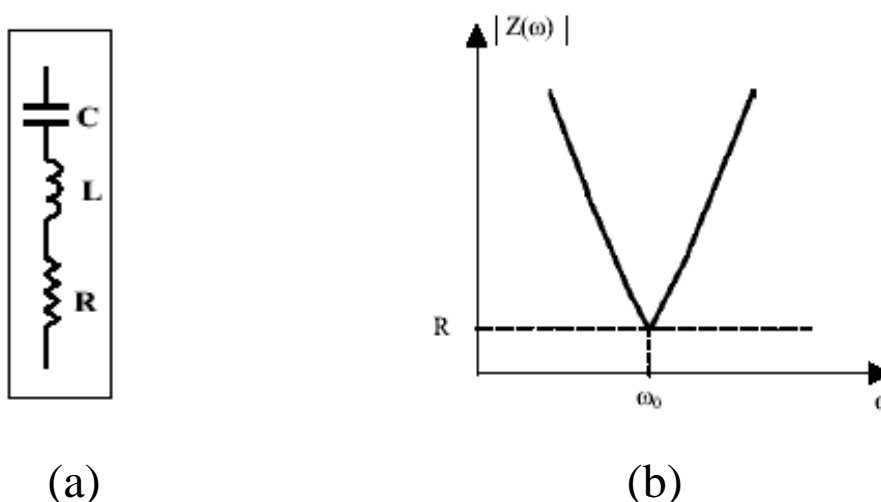


Figure I.11: (a) Filtre passif résonnant. (b) Impédance d'un Filtre passif résonnant[5,10]

Cette solution qui est simple, de coût peu élevé, demande toutefois une étude soignée de l'installation et donc des connaissances très approfondies du réseau, elle est limitée par sa non-adaptabilité au réseau et aux charges pour les raisons suivantes.

- L'installation d'un filtre sur le réseau fait apparaître une anti-résonance dont la fréquence est variable avec le réseau.
- La fréquence d'accord du filtre est fixe ce qui entraîne une dégradation du filtrage lors d'une variation de la fréquence du réseau.

I.5.1-2 Compensation de l'énergie réactive :

La solution usuelle est l'utilisation de batteries de condensateurs afin de fournir de la puissance réactive. Cette compensation peut être locale où le compensateur est placé directement à proximité des charges ayant un mauvais facteur de puissance ou globale où l'installation du compensateur est proche du transformateur d'alimentation. Dans ces deux cas, une puissance réactive non réglable est fournie au réseau. Pour y remédier, des statocompensateurs ont été utilisés, mais ces dispositifs sont très encombrants et sont eux même des générateurs d'harmoniques [10]

I.5.2. solutions modernes :

Le développement récent des semi-conducteurs de puissance entièrement commandables, les thyristors, les GTOs et les IGBTs en particulier, a permis de répondre aux problèmes de perturbations des réseaux. Parmi-celles-ci, les redresseurs MLI et les filtres actifs.

I.5.2.1 Redresseur à MLI :

Le prélèvement sinusoïdal est une technique qui permet aux convertisseurs statiques d'absorber un courant sinusoïdal.

Les convertisseurs propres, tel que les redresseurs MLI, figure 1.12, sont formés par des semi-conducteurs à fermeture et ouverture commandée, auxquels sont associées des diodes. Ils utilisent de façon générale la technique de commutation dite MLI qui a pour rôle de repousser les harmoniques vers les fréquences élevées. Deux grandes applications

Utilisant ces convertisseurs qui sont les suivants:

- ☀ Fonctionnement en convertisseur d'énergie à faible taux de pollution harmonique et à consommation de puissance réactive nulle. Ce convertisseur permet une consommation ou un renvoi d'énergie active sur le réseau [10,16].
- ☀ Fonctionnement en compensateur d'énergie réactive à forte dynamique et à encombrement réduit. L'application principale est la compensation de la fluctuation rapide de la tension (flicker) et la stabilisation de réseau à haute tension.

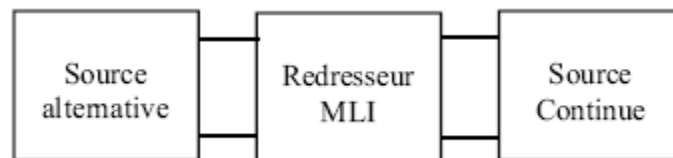


Figure. I.12.: Schéma de principe de convertisseur à MLI

I.5.2.2 filtre actif :

Deux raisons principales ont conduit à concevoir une nouvelle structure de filtrage moderne et efficace appelée filtre actif. La première raison est due aux inconvénients inhérents des solutions traditionnelles de dépollution qui ne répondent plus à l'évolution des charges et des réseaux électriques. La seconde raison fait suite à l'apparition de nouveaux composants semi-conducteurs, comme les thyristors GTO et les transistors IGI3T. Le but de ces filtres est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à compenser les perturbations responsables de la dégradation des performances des équipements et installations électriques Nous citerons trois topologies possibles de filtres actifs [4,5 ,10,13,14]:

- Le filtre actif parallèle (FAP) : conçu pour compenser toutes les perturbations de courant comme les harmoniques, les déséquilibres et la puissance réactive.
- Le filtre actif série (FAS) : conçu pour compenser toutes les perturbations de tension comme les harmoniques, les déséquilibres et les creux de tension.
- La combinaison parallèle-série actifs: solution universelle pour compenser toutes les perturbations en courant et en tension.

I.5.2.2-a. Le filtre actif parallèle:

Appelé aussi compensateur shunt, il est connecté en parallèle sur le réseau de distribution (figure I.13). Il est le plus souvent commandé comme un générateur de courant. Il restitue dans le réseau électrique les courants harmoniques I_{inj} égaux à ceux

Absorbés par la charge non linéaire mais en opposition de phase, de telle sorte que le courant fourni par le réseau I_s soit sinusoïdal et en phase avec la tension simple correspondante. Son indépendance vis-à-vis de la source et de la charge lui assure auto-adaptabilité, fiabilité et performance.

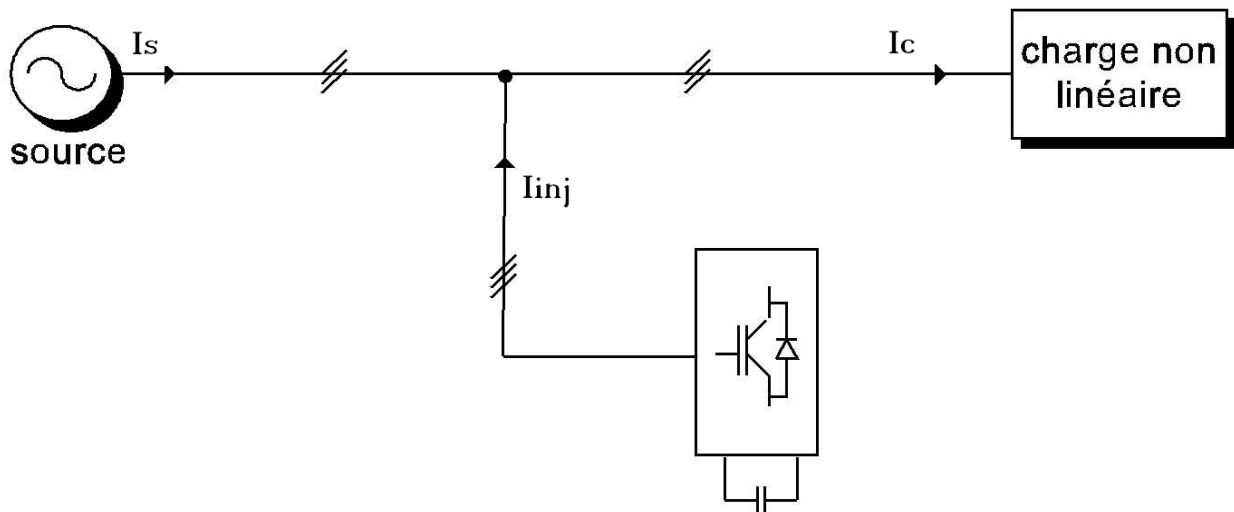


Figure.I.13. Filtre actif parallèle [13].

Le filtre actif parallèle empêche les courants harmoniques, réactifs et déséquilibrés de circuler à travers l'impédance du réseau. Il améliore ainsi les taux de distorsion en courant et en tension.

I.5.2.2-b. le filtre actif série:

Le filtre actif série est connecté en série sur le réseau (figure I.14). Il se comporte comme une source de tension qui engendre des tensions harmoniques dont la somme avec la tension réseau est une onde sinusoïdale. Il est destiné à protéger les installations sensibles aux tensions perturbatrices (harmoniques, creux, déséquilibres) provenant de la source et également celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Cette structure est proche, dans le principe, des conditionneurs de réseau. Toutefois, cette topologie présente quelques difficultés et inconvénients lors de sa mise en oeuvre: elle ne permet pas, par exemple, de compenser les courants harmoniques consommés par la charge.

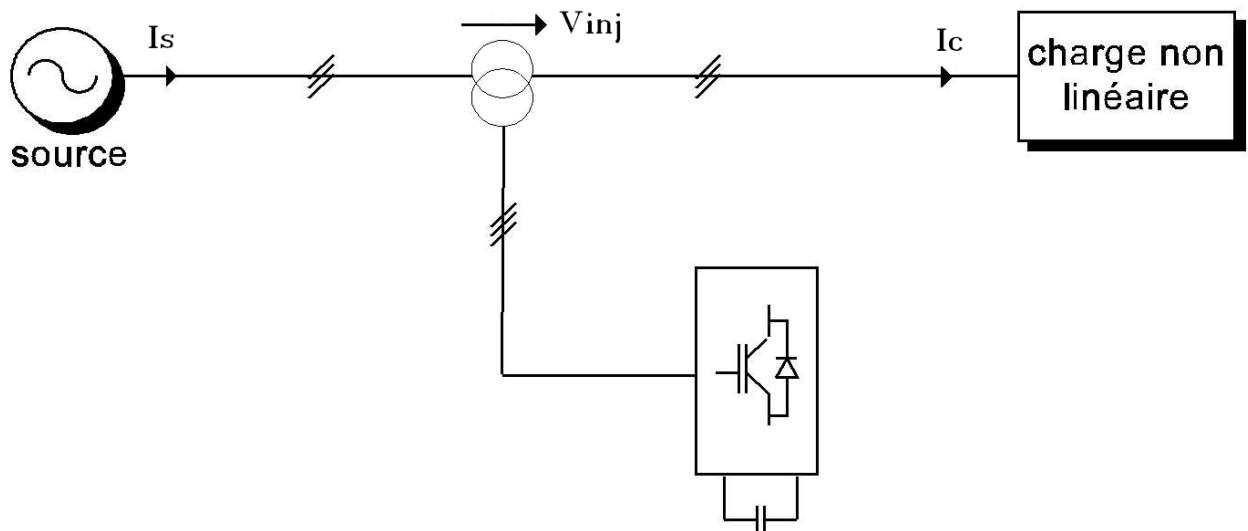


Figure.I.14 Filtre actif série [13].

I.5.2.2-c. La combinaison parallèle-série actifs:

C'est une solution de compensation universelle basée sur le fonctionnement simultané des filtres actifs parallèle et série (figure I.15). Cette nouvelle topologie est appelée combinaison parallèle- série actifs ou Unified Power Quality Conditioner (UPQC). L'UPQC possède les avantages cumulés des filtres actifs parallèle et série.

Le filtre actif série, lorsqu'il est placé en amont du filtre actif parallèle comme montré sur la figure I.15, permet de dépolluer la source des tensions perturbatrices. Lorsqu'il est placé en aval, il permet d'isoler la charge de la source perturbée.

Il faut noter l'existence de plusieurs autres combinaisons mixtes de filtres actifs avec cette fois-ci les filtres passifs. Ces structures sont conçues dans le but d'optimiser le rapport performance/coût. On peut citer trois configurations:

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

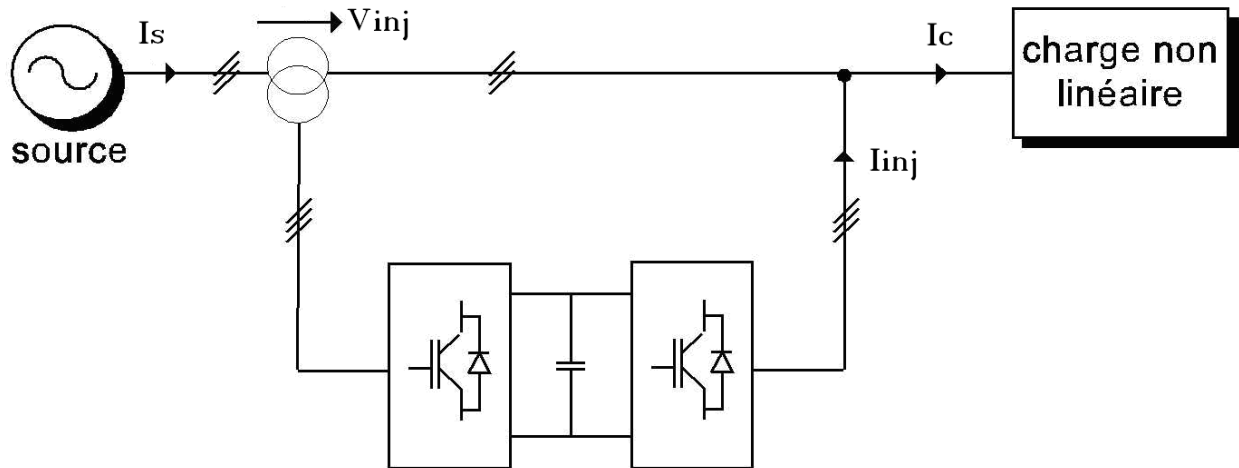


Figure.I.15. Combinaison des filtres actifs série et parallèle [13].

I.5.3 Comparatif et choix du FAP :

Le tableau I.3 montre un récapitulatif des avantages et inconvénients de cinq schémas de dépollution: renforcement de la puissance de court-circuit, filtrage passif, filtrage actif série, filtrage actif parallèle et le filtrage parallèle-série actifs.

Le filtre parallèle-série actifs compense toutes les perturbations liées à la tension et au courant. Néanmoins, cette solution dite universelle reste difficilement réalisable en pratique.

Le filtre actif parallèle génère des composantes harmoniques aux mêmes fréquences et en opposition de phase aux perturbations mesurées. Il compense les courants harmoniques engendrés par une charge non linéaire, tout en s'adaptant aux évolutions du récepteur. Cependant, la compensation des harmoniques de tension n'est toujours pas évidente avec cette approche.

En raison de la législation des normes de qualité de l'énergie (plutôt portée sur la compensation des harmoniques de courant) et les bonnes performances obtenues par le FAP, nous avons retenu cette topologie de compensation pour notre stratégie de dépollution des perturbations harmoniques. Le filtre actif parallèle a été divisé en deux : la partie puissance et la partie contrôle commande. (Chapitre III).

| principes | avantages | inconvénients |
|---|---|--|
| renforcement de la puissance de court-circuit | amélioration de la forme de la tension | pas d'amélioration de la forme du courant, pas toujours réalisable |
| filtrage passif | amélioration de la forme du courant | risque de résonance, pas d'adaptabilité |
| filtrage actif série | amélioration de la forme de la tension, adaptabilité aux variations de charge et du réseau | pas d'amélioration de la forme du courant |
| filtrage actif parallèle | amélioration de la forme du courant, adaptabilité aux variations de charge et du réseau | amélioration de la forme de la tension pas toujours évidente |
| la combinaison parallèle-série actifs | amélioration de la forme du courant, amélioration de la forme de la tension, adaptabilité aux variations de charge et du réseau | réalisation difficile |

Tableau I.3 Récapitulatif des solutions de dépollution.

I.6.Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes origines des perturbations affectant les réseaux électriques basse tension et les solutions de dépollution existantes.

Plusieurs solutions ont été proposées. Les solutions classiques, tels que les filtres passifs utilisés ne donnent plus de satisfaction car ils sont limités par une non adaptabilité au réseau et aux charges. Aujourd'hui les filtres actifs sont non seulement utilisés pour la compensation d'harmonique, mais aussi pour la compensation d'autres types de perturbations tels que les creux de tension, les déséquilibres et la puissance réactive.

Le filtre actif parallèle est actuellement le plus répandu, cependant les configurations combinées de filtres actif et passif sont des solutions très prometteuses qui peuvent considérablement augmenter le potentiel d'application des filtres actifs et assurent un compromis entre le coût et l'efficacité de la compensation.

Chapitre II

Modulation et commande de l'onduleur de tension

II.1.Introduction :

L'onduleur de tension, de par sa capacité à réaliser un grand nombre de fonctionnalités, a été naturellement mis à contribution pour réaliser des objectifs de compensation.

L'objectif de cette commande appliquée aux compensateurs est de déterminer les instants d'ouverture et fermeture des interrupteurs qui composent de façon à obtenir une tension de sortie, côté alternatif, qui suit le plus fidèlement possible la consigne (pas forcément sinusoïdale) en minimisant ses harmoniques non désirées (harmoniques de commutation) et ce, en optimisant l'amplitude pour une tension du bus continue donnée.

Le choix du type de commande rapprochée dépend essentiellement de deux paramètres : d'une part des caractéristiques souhaitées de la tension de sortie (distorsion admissible, spectre basse fréquence souhaité, etc.) et d'autre part **de la fréquence de découpage** des semi-conducteurs utilisables à la puissance de l'application.

Pour les applications de haute puissance (où il n'y a pas de semi-conducteurs disponibles pouvant commuter à haute fréquence) ou pour les applications où les contraintes sur la tension de sortie ne sont pas très exigeantes (par exemple des Alimentations Sans Interruption -ASI- fonctionnant à pleine onde), on utilise des commandes dites à fréquence réseau. Dans le domaine des compensateurs, l'application principale est la compensation de réactif et ses différents corollaires : réglage de tension de lignes alternatives, compensation de charges fluctuantes, stabilisateurs de puissance, etc.

L'utilisation de techniques de commande à fréquences de découpage supérieures permet de repousser les harmoniques de commutation à des fréquences plus élevées et plus faciles à filtrer, ce qui permet un spectre de la tension de sortie de meilleure qualité. Ces techniques ne permettent pas seulement le contrôle du fondamental de la tension côté alternatif mais également de tout son spectre basse fréquence permettant ainsi une fonction supplémentaire: *la compensation de perturbations harmoniques et de dynamiques rapides.*

II .2. Configurations de l'onduleur de tension :

Il y a deux configurations possibles pour l'onduleur de tension : avec ou sans neutre raccordé. L'onduleur à neutre raccordé consiste à connecter le neutre de la charge à un neutre créé au point milieu du bus continu de l'onduleur. Cette connexion autorise la circulation de courants homopolaires et permet de contrôler de façon découplée les tensions appliquées aux trois phases de la charge tout comme si elles représentaient trois systèmes monophasés. On utilisera donc cette configuration dans les applications de compensation de composantes homopolaires. Voir la figure (II.1)

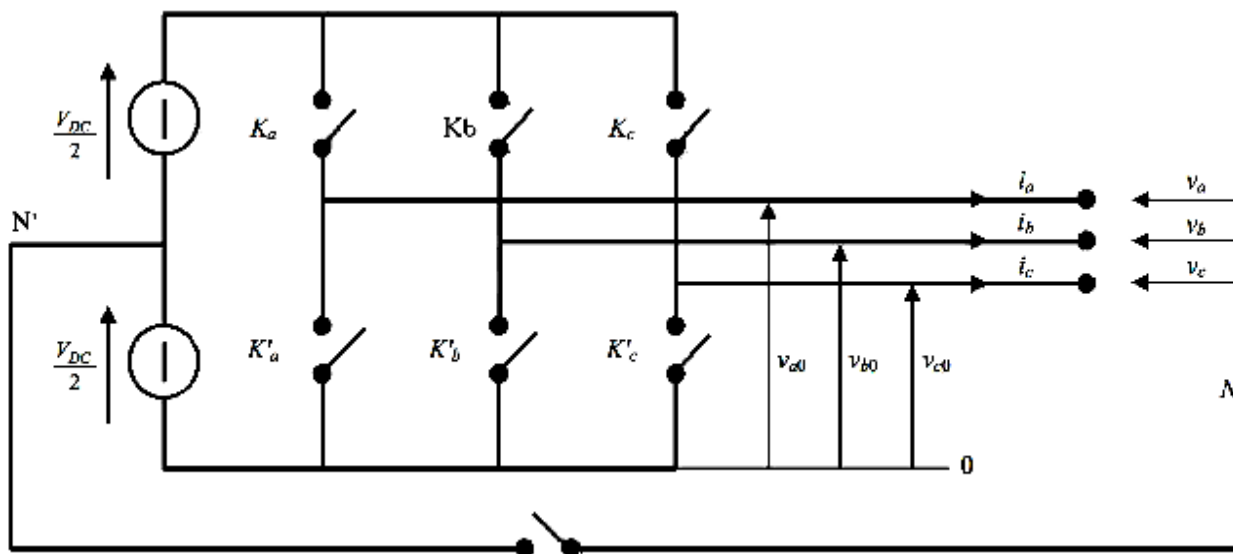


Figure II.1. Schéma équivalent d'un onduleur de tension triphasé.

On peut distinguer d'une part les tensions des branches (V_{a0} , V_{b0} et V_{c0} par rapport à la borne négative du bus continu) qui sont directement fixées par la commande et d'autre part les tensions de phase (V_a , V_b et V_c par rapport au neutre de la charge N) qui peuvent dépendre non seulement de la commande mais aussi des caractéristiques de la charge. Pour trouver la relation entre ces deux tensions, on va supposer dans un premier temps que le neutre n'est pas raccordé et que l'onduleur est connecté à une charge triphasée équilibrée. [16]

Les tensions V_{k0} ($k = a, b, c$) sont directement imposées par la commande et on les utilisera pour déterminer les tensions de phase :

$$+ \begin{cases} V_{ao} - V_a + V_b - V_{bo} = 0 \\ V_{ao} - V_a + V_c - V_{co} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

$$\hline 2V_{ao} - 2V_a + V_b + V_c - V_{bo} - V_{co} = 0$$

Si la charge est équilibrée :

$$V_a + V_b + V_c = 0 \quad (\text{II.2})$$

Donc :

$$\begin{aligned}V_a &= \frac{1}{3}(2.V_{ao} - V_{bo} - V_{co}) \\V_b &= \frac{1}{3}(2.V_{bo} - V_{ao} - V_{co}) \\V_c &= \frac{1}{3}(2.V_{co} - V_{bo} - V_{ao})\end{aligned}\tag{II.3}$$

En cas de charge déséquilibrée, l'onduleur sans neutre raccordé n'est pas capable de fournir un courant homopolaire (la somme de courants de ligne doit être forcément nulle). Ainsi, si la charge est déséquilibrée et couplée en étoile, les tensions de phase seront aussi déséquilibrées : la tension de chaque phase est modifiée (c'est-à-dire, la tension entre neutres varie) pour obtenir un courant homopolaire nul. [16]

Si on suppose une commande équilibrée, les tensions de branche sont aussi équilibrées :

$$V_{ao} + V_{bo} + V_{co} = 0\tag{II.4}$$

Donc la tension entre le neutre de la charge (N) et la référence des tensions de branche (0) est :

$$V_{No} = \frac{V_a + V_b + V_c}{3}\tag{II.5}$$

En cas de déséquilibre, le potentiel du neutre de la charge oscillera par rapport à celui de l'onduleur de façon à déséquilibrer les tensions et forcer l'élimination du courant homopolaire. Voir la figure II.2

Les tensions de phase sont donc (k = a, b, c) :

$$V_{Ko} = V_K + V_{No}\tag{II.5}$$

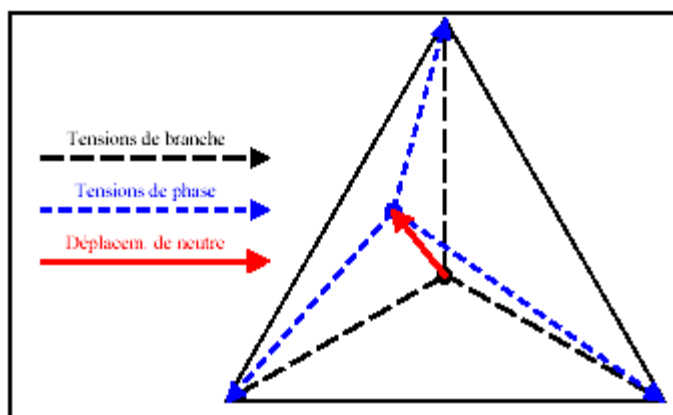
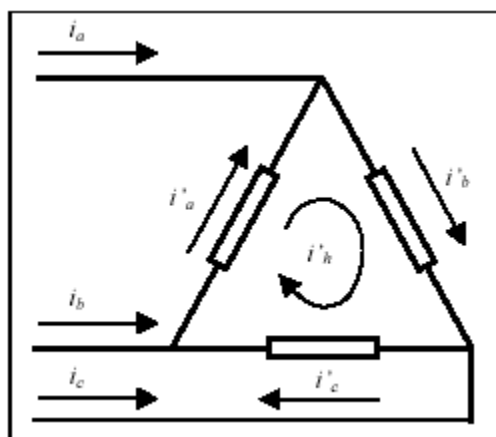


Figure II.2. Déplacement du point neutre dans un système sans neutre raccordé.

En revanche, si la charge est couplée en triangle (voir figure II.3), il n'y a pas de problème de déséquilibre de tension. La commande impose directement la tension aux bornes de la charge, et donc les tensions de phase sont équilibrées (indépendamment du déséquilibre de la charge). En effet, la possibilité d'avoir un courant homopolaire à l'intérieur du triangle permet de remplir la contrainte de courant homopolaire de ligne nul sans déséquilibrer les tensions de phase.



$$i_a + i_b + i_c = 0$$

$$i'_a + i'_b + i'_c = i'_h \neq 0$$

Figure II.3. Couplage en triangle de la charge de l'onduleur.

De la même façon, si les neutres sont raccordés, l'onduleur pourra fournir le courant homopolaire en cas de déséquilibre de la charge et donc la tension de phase sera équilibrée et identique à la tension de branche.

En terme de fondamentaux, les tensions de phase obtenues avec les deux configurations (avec ou sans neutre raccordé) sont identiques dans le cas équilibré, mais sans neutre raccordé les harmoniques d'ordre 3 présents sur la tension de branche

Disparaissent, la qualité spectrale de la tension de charge n'en est alors que meilleure.

II.3.Modélisation de l'onduleur de tension :

Pour la modélisation de l'onduleur, on considère un fonctionnement idéalisé :

☀ *Interrupteurs parfaits* : La commutation des interrupteurs est instantanée (temps de fermeture et ouverture nul) et sans pertes. Enfin, la chute de tension dans les interrupteurs est considérée nulle en conduction.

☀ *Sources parfaites* : La tension aux bornes du dipôle continu est constante et ne varie pas avec la puissance échangée. L'objectif de la modélisation est de trouver une relation entre les grandeurs de commande et les grandeurs électriques de la partie alternative et continue de l'onduleur. Ainsi, comme les grandeurs de commande agissent sur les interrupteurs commandables, on peut définir la fonction de commutation suivante pour définir l'état des interrupteurs (k = a, b, c) :

- $d_k = 1$ quand K_k est fermé et $d_k = 0$ quand K_k est ouvert.
- $d_k = 0$ quand K'_k est fermé et $d_k = 1$ quand K'_k est ouvert.

Ainsi, on peut calculer les tensions de la partie alternative de l'onduleur en fonction de ces fonctions de commutation. La tension de branche de l'onduleur par rapport à la borne négative du bus continu sera[16] :

$$\begin{bmatrix} V_{ao} \\ V_{bo} \\ V_{co} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} d_a \\ d_b \\ d_c \end{bmatrix} \cdot V_{Dc} \quad (\text{II.6})$$

Et par rapport au point milieu du bus continu (N') :

$$\begin{bmatrix} V_{aN'} \\ V_{bN'} \\ V_{cN'} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} 2 \cdot (d_a - 0.5) \\ 2 \cdot (d_b - 0.5) \\ 2 \cdot (d_c - 0.5) \end{bmatrix} \cdot \frac{V_{Dc}}{2} \quad (\text{II.7})$$

Si le neutre n'est pas raccordé et la charge équilibrée, la tension de phase sera :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} d_a \\ d_b \\ d_c \end{bmatrix} \cdot \frac{V_{Dc}}{3} \quad (\text{II.8})$$

Finalement, si le neutre est raccordé au point milieu du bus continu, la tension de phase sera égale à la tension de branche par rapport à ce point milieu :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{aN'} \\ V_{bN'} \\ V_{cN'} \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

En ce qui concerne la partie continue de l'onduleur, le bus continu est composé en général de deux condensateurs avec leur résistance shunt d'équilibrage (on peut y inclure certaines pertes).

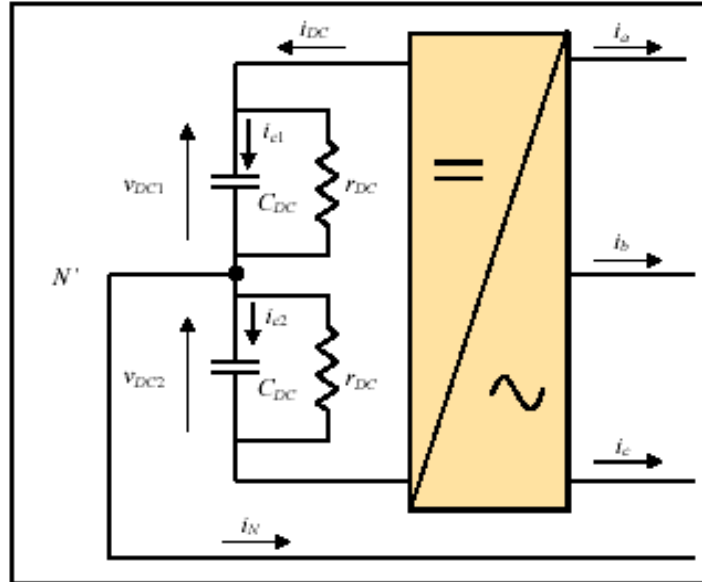


Figure II.4. Bus continu de l'onduleur de tension avec neutre raccordé.

Si on considère le neutre raccordé, les équations qui relient la tension des condensateurs aux courants du coté alternatif et aux fonctions de commutation sont :

$$\begin{bmatrix} \frac{dV_{Dc1}}{dt} \\ \frac{dV_{Dc2}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{r_{Dc} \cdot C_{Dc}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{r_{Dc} \cdot C_{Dc}} \end{pmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{Dc1} \\ V_{Dc2} \end{bmatrix} + \begin{pmatrix} -\frac{d_a}{C_{Dc}} & -\frac{d_b}{C_{Dc}} & -\frac{d_c}{C_{Dc}} \\ \frac{1-d_a}{C_{Dc}} & \frac{1-d_b}{C_{Dc}} & \frac{1-d_c}{C_{Dc}} \end{pmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

Si le neutre n'est pas raccordé, le courant du neutre sera nul, et donc les équations deviennent :

$$\begin{bmatrix} \frac{dV_{Dc1}}{dt} \\ \frac{dV_{Dc2}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{r_{Dc} \cdot C_{Dc}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{r_{Dc} \cdot C_{Dc}} \end{pmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{Dc1} \\ V_{Dc2} \end{bmatrix} - \begin{pmatrix} \frac{d_a}{C_{Dc}} & \frac{d_b}{C_{Dc}} & \frac{d_c}{C_{Dc}} \\ \frac{d_a}{C_{Dc}} & \frac{d_b}{C_{Dc}} & \frac{d_c}{C_{Dc}} \end{pmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

II.4. commande d'un onduleur triphasé :

II.4.1 Commande à la fréquence des grandeurs de sortie (pleine onde)

Une fois analysée la relation entre les différentes grandeurs électriques de l'onduleur et les fonctions de commutation, on étudie les techniques pour déterminer ces fonctions de commutation, ou autrement dit, la commande rapprochée.

Dans la commande en pleine onde, on ferme les interrupteurs d'une même branche de façon complémentaire pendant une demi-période et en décalant la commande de chaque bras d'un tiers de la période ($2\pi/3$). Par conséquent, on obtient trois ondes carrées de tension décalées de $2\pi/3$ aux bras de l'onduleur, dont l'amplitude est égale à la tension continue (V_{DC}), et de même période que la tension du réseau [16,23]. (Voir la figure II.5)

La valeur efficace du fondamental de la tension de phase est $(V_k)_1$:

$$(V_k)_1 = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot V_{Dc} \quad (\text{II.12})$$

Le développement en série de Fourier de la tension de phase contient tous les harmoniques impairs sauf ceux de rang 3. La valeur efficace des harmoniques est inversement proportionnelle à leur pulsation :

$$\frac{(V_k)_{2h+1}}{(V_k)_1} = \frac{1}{2h+1} \quad (\text{II.13})$$

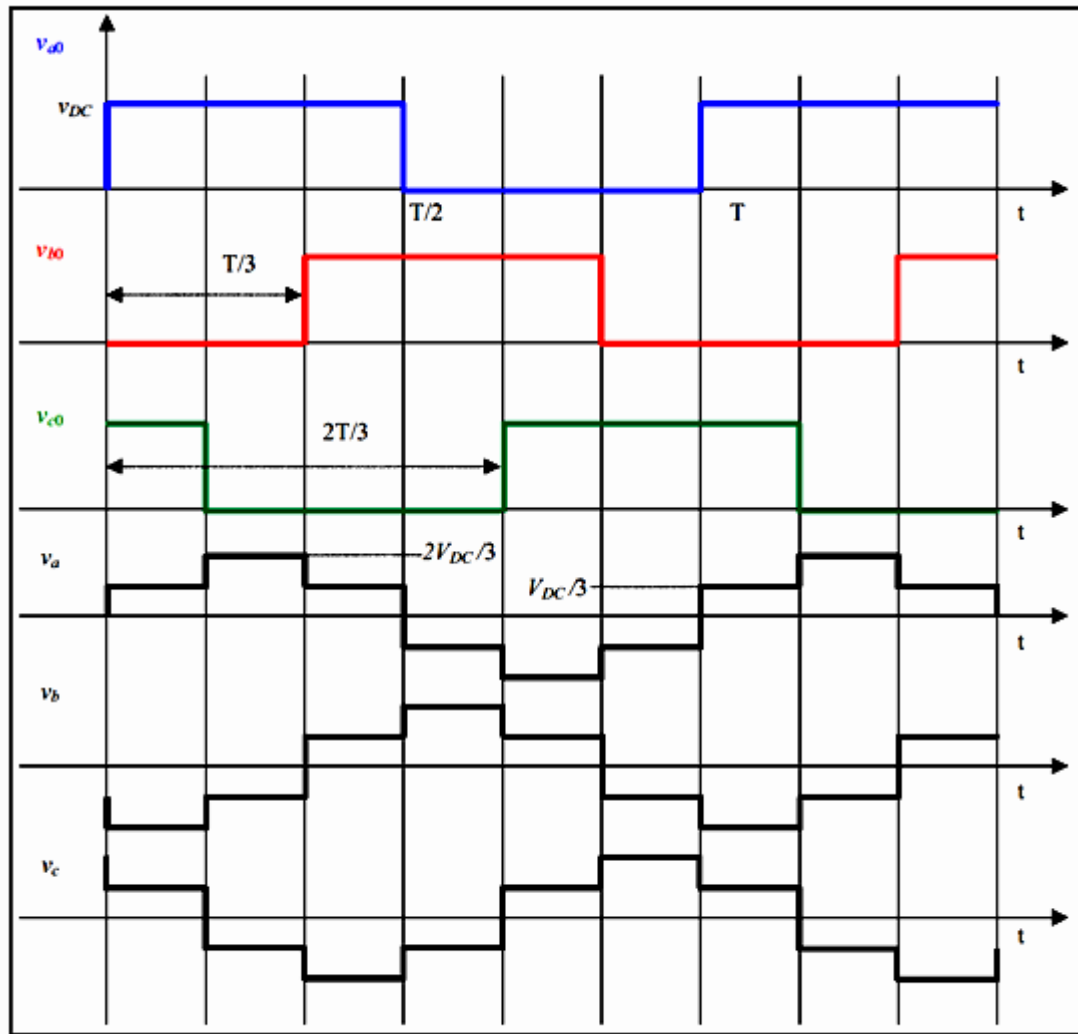


Figure. II.5. Allure des tensions d'un onduleur triphasé pour une commande en pleine onde (configuration neutre raccordée).

Cette commande ne permet que le contrôle de la tension fondamentale et ne peut donc être utilisée que dans les applications où l'on veut contrôler des grandeurs liées aux fondamentaux, comme par exemple la compensation d'énergie réactive. Dans ce type d'application, la charge étant le réseau lui-même, on peut contrôler l'énergie réactive échangée avec ce réseau en appliquant une tension fondamentale d'onduleur (V_1) d'amplitude et phase variables[16].

$$P = \frac{V_1 \cdot E}{\omega \cdot L} \cdot \sin(\delta) \quad (\text{II.14})$$

$$Q = \frac{E^2}{\omega \cdot L} - \frac{V_1 \cdot E}{\omega \cdot L} \cdot \cos(\delta) \quad (\text{II.15})$$

Où L est l'inductance de raccordement au réseau et ω la pulsation fondamentale. Ainsi, si on considère un déphasage nul entre la tension réseau (E) et la tension de

L'onduleur ($\delta = 0$), l'échange d'énergie dépend du rapport entre les amplitudes :

Si $V_1 > E$, l'onduleur fournit de la puissance réactive.

Si $V_1 < E$, l'onduleur absorbe de la puissance réactive.

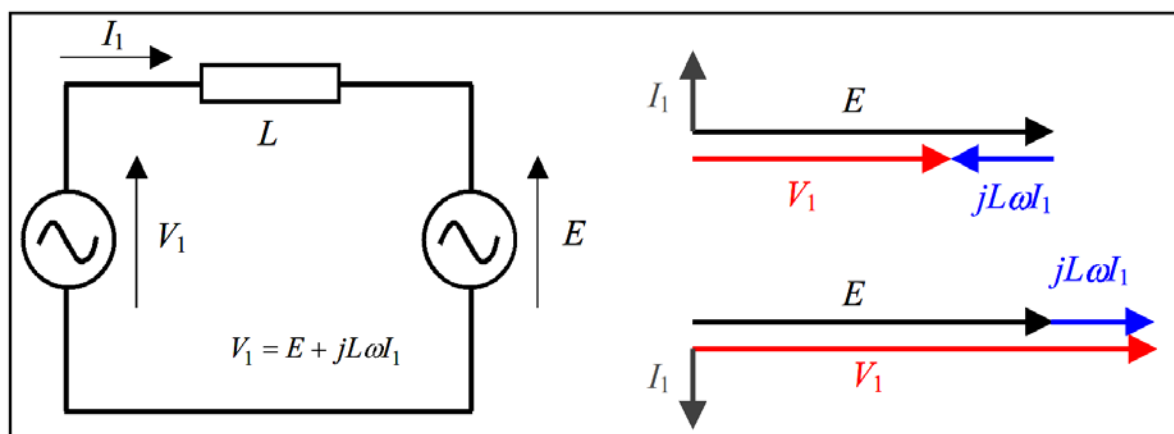


Figure II-6. Application de l'onduleur de tension à la compensation d'énergie réactive.

Le déphasage entre le fondamental de la tension et la tension réseau est directement imposé par la commande. Par contre l'amplitude de la tension d'onduleur fondamentale ne peut être contrôlée qu'indirectement, à travers du contrôle de la tension du bus continu de l'onduleur.

On constate que l'on ne peut pas avoir un contrôle découplé de la puissance active et réactive. Cependant, si on impose la bonne valeur de tension d'onduleur et un déphasage nul, on peut arriver à échanger en régime permanent la puissance réactive souhaitée à puissance active nulle. Pour régler la tension de l'onduleur à la valeur nécessaire il suffit de charger ou décharger le condensateur en appliquant un déphasage positif (pour augmenter la tension de bus) ou négatif (pour la diminuer). Il faut constater que pendant ce transitoire l'échange d'énergie réactive ne sera pas contrôlé. De plus il faudra assurer un minimum de flux de puissance active vers le compensateur de façon à maintenir le bus continu chargé et compenser ainsi les pertes du système.

II.4.2 Commande à des fréquences supérieures :

On a montré que la commande en pleine onde ne permet qu'un contrôle direct de la phase du fondamental de la tension de l'onduleur, et ne permet donc pas un contrôle découplé de l'échange de puissance active et réactive avec le réseau.

On peut régler l'amplitude et la phase des composantes basse fréquence de la tension d'onduleur (fondamental + harmoniques basse fréquence) tout en repoussant les harmoniques non désirés, et ce, en augmentant la fréquence de commutation des interrupteurs par rapport à la fréquence des grandeurs fondamentales ; on réalise ainsi une véritable source de tension contrôlée qui sera le cœur de la plupart des compensateurs de basse et moyenne puissances.

II.4.2.1 Commande en MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) :

Cette commande consiste à adopter une fréquence de commutation (f_m) suffisamment élevée par rapport à la fréquence maximum du signal de sortie souhaité ($x_{réf}$), et de reproduire la valeur moyenne de ce signal à chaque période de commutation en jouant sur la durée d'application des tensions positives et négatives par rapport au point milieu du bus continu (V_{KN}).

La méthode classique pour déterminer les instants de commutation des interrupteurs (et donc d'application de tensions positives ou négatives) est la MLI intersective.

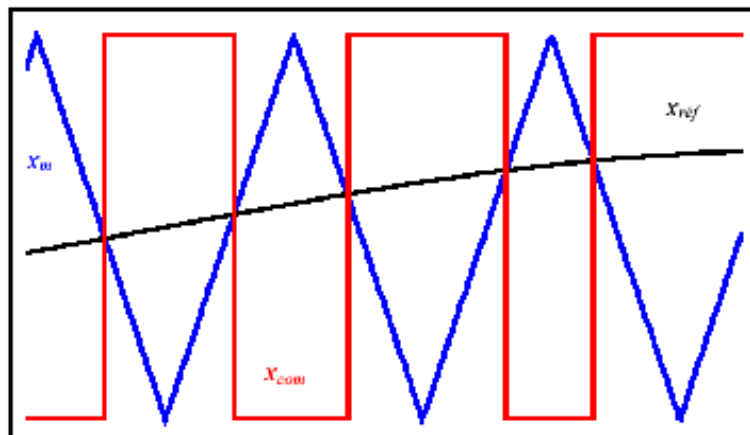


Figure II.7. Détermination des instants de commutation dans le cas d'une MLI intersective

Elle se base sur la comparaison d'une onde de modulation (X_m), qui est en général un signal triangulaire de fréquence élevée (F_m) chargée d'imposer les périodes de modulation, avec une onde de référence ($X_{réf}$), qui représente la tension de sortie souhaitée (qui peut être sinusoïdale ou non en fonction de l'application). Le signal de commutation (X_{com}) est déterminé à partir de l'intersection de ces deux signaux (voir figure II-7). Dans le cas de l'onduleur triphasé on aura 3 signaux de référence (un pour chaque bras de l'onduleur) [16].

II.4.2.2 MLI vectorielle :

En se basant sur la théorie des phaseurs et à partir des tensions de phase, on peut calculer le phaseur de tension qui représente la tension de sortie souhaitée. Si le phaseur souhaité correspond à un système équilibré de tensions sinusoïdales, il tournera à vitesse constante et avec une amplitude également constante. Très souvent dans les

Compensateurs, la tension à injecter peut contenir des harmoniques et des séquences inverse ou homopolaire ; dans ce cas, ni l'amplitude ni la vitesse du phaseur ne seront constantes.

Du fait de la nature discrète des onduleurs de tension, on ne peut pas reconstruire instantanément le phaseur de tension souhaité, mais indirectement, en le remplaçant à chaque période de modulation par un phaseur équivalent. Ce phaseur équivalent est construit à partir des 8 phaseurs spatiaux disponibles dans un onduleur.

II.5.Exemple de simulation d'un onduleur de tension avec neutre raccordé :

II.5.1 valeurs et paramètre de simulation :

$$V_{Dc} = 220 \text{ V}$$

$$f_m = 500 \text{ Hz} , f_{réf} = 50 \text{ Hz}$$

$A_r = 110$, $A_p = 130 \text{ V}$. Interrupteurs : à base des MOSFET , l'indice de modulation $m = 10$

II.5.2 valeurs et paramètre de simulation :

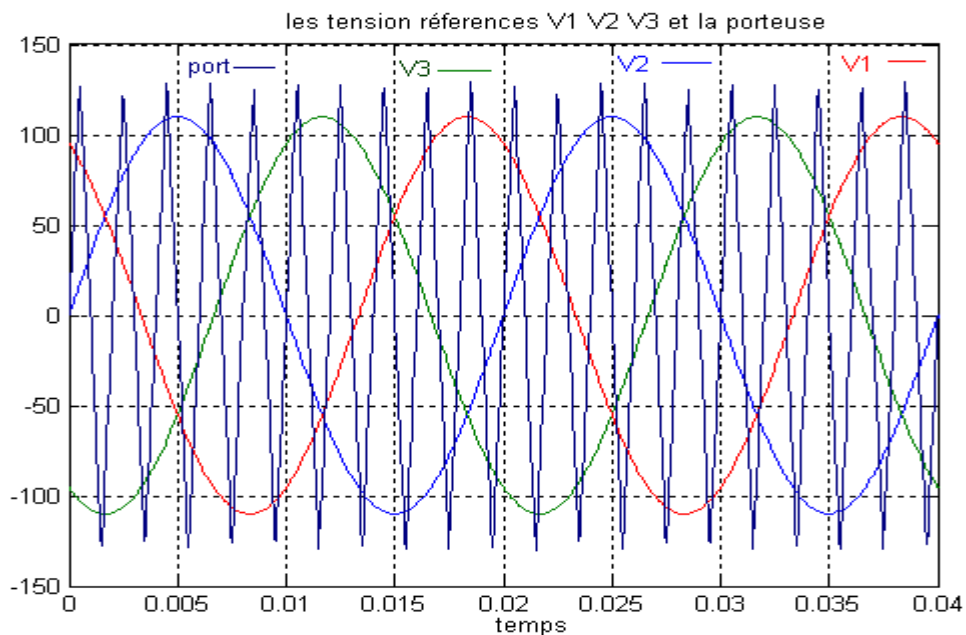


Figure II.8.Détermination des instants de commutation.

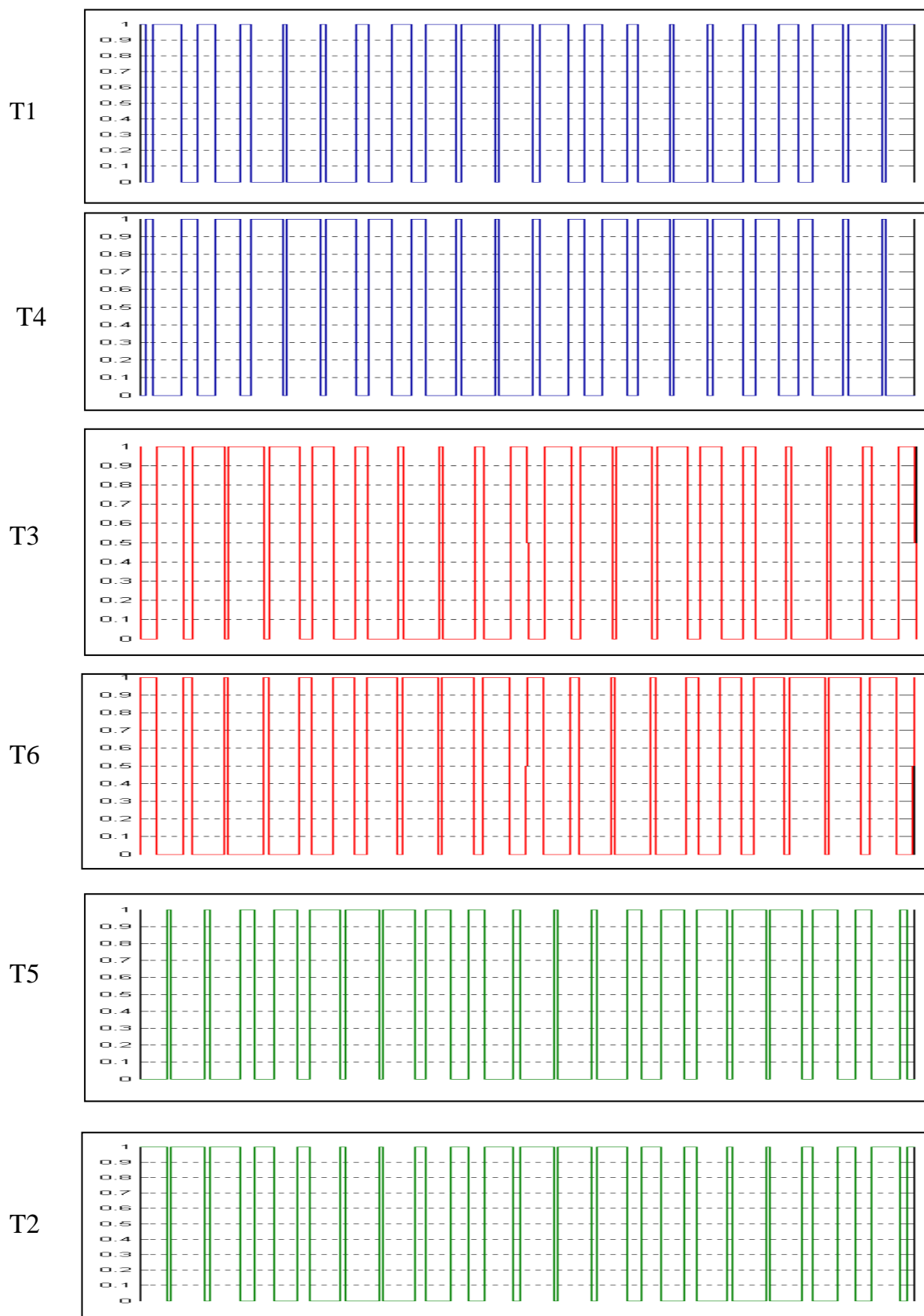


Figure.II.9. Instants de commutation des interrupteurs

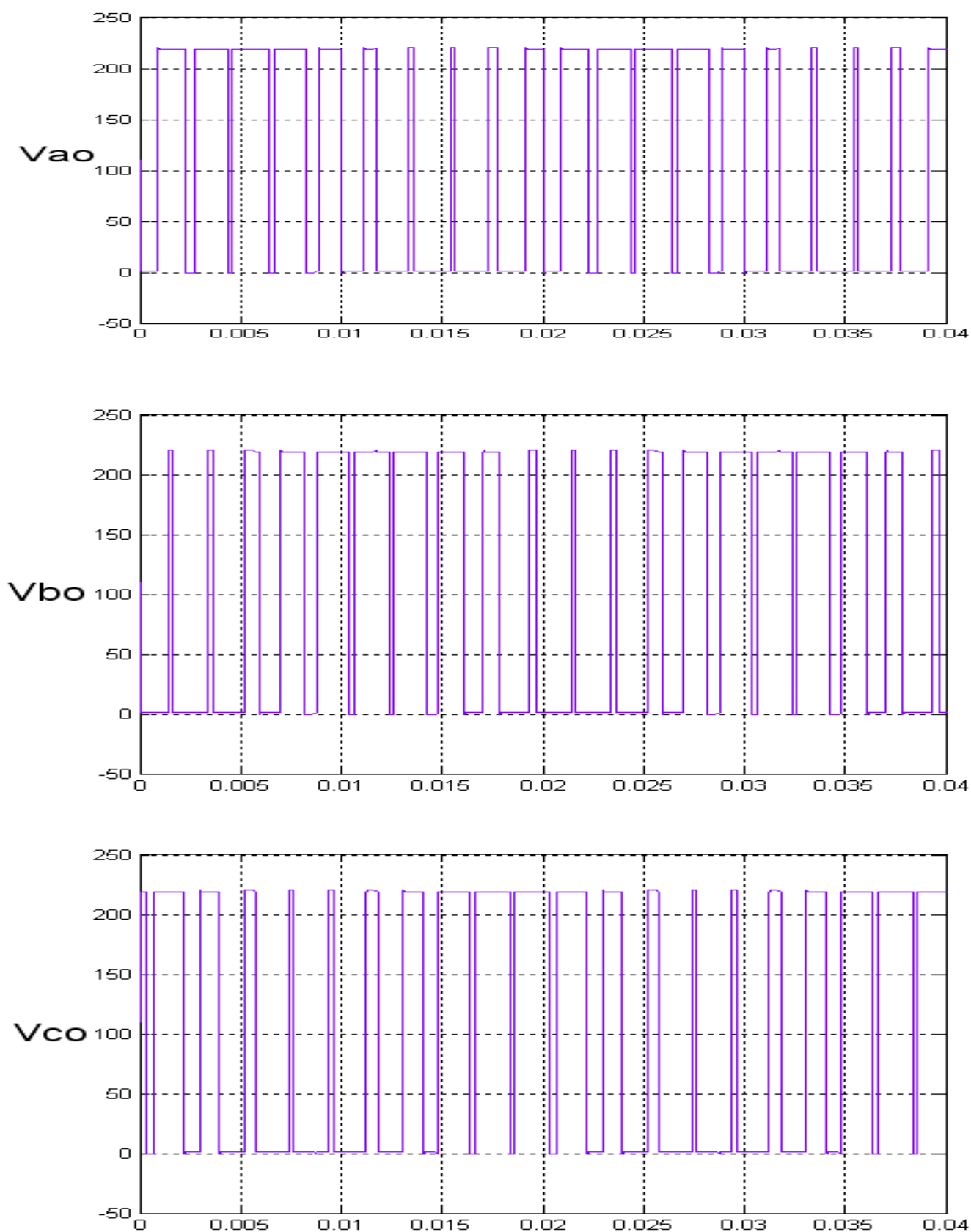


Figure.II.10. formes d'onde des tensions de branche

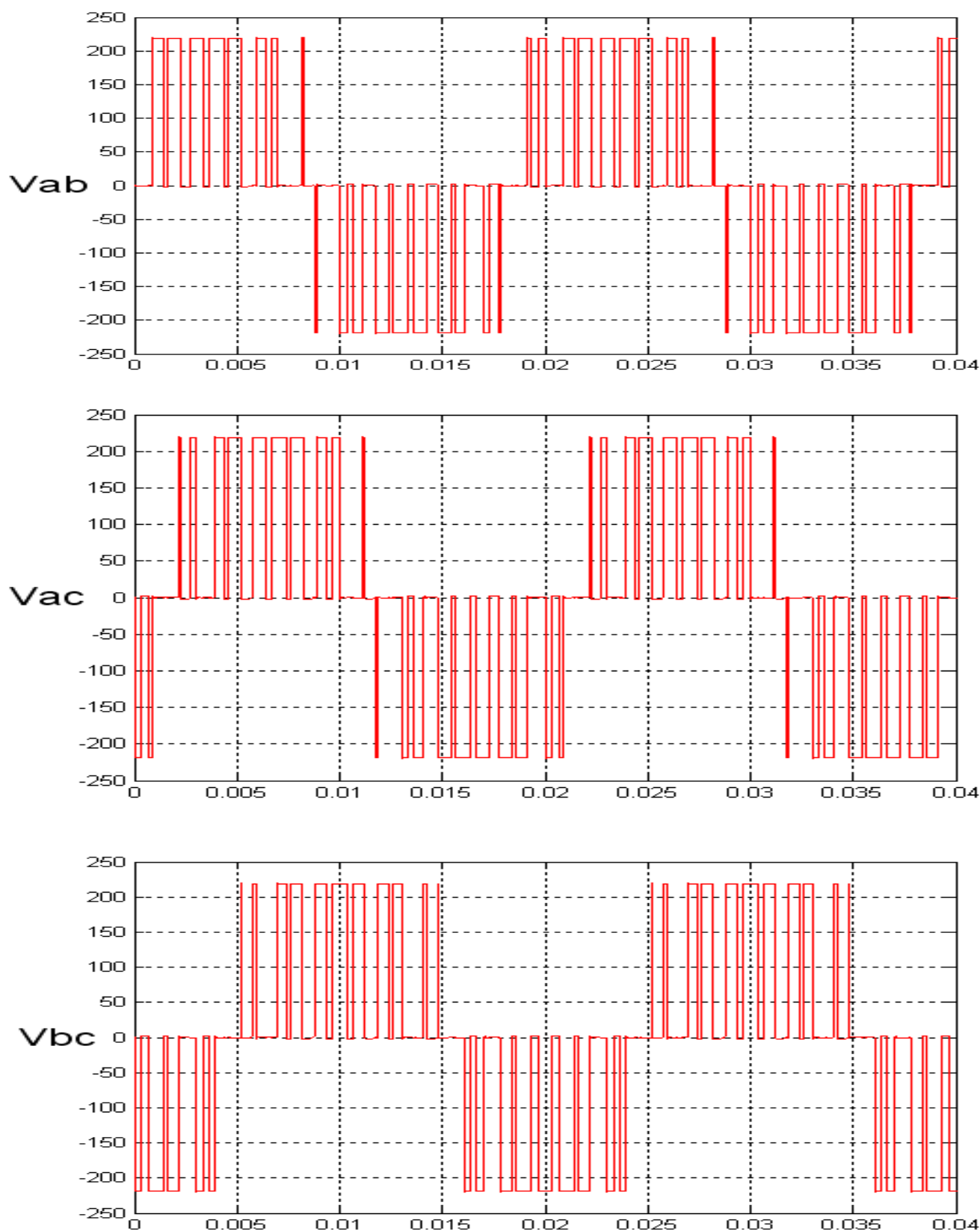


Figure.II.11. formes d'onde de la tension composée

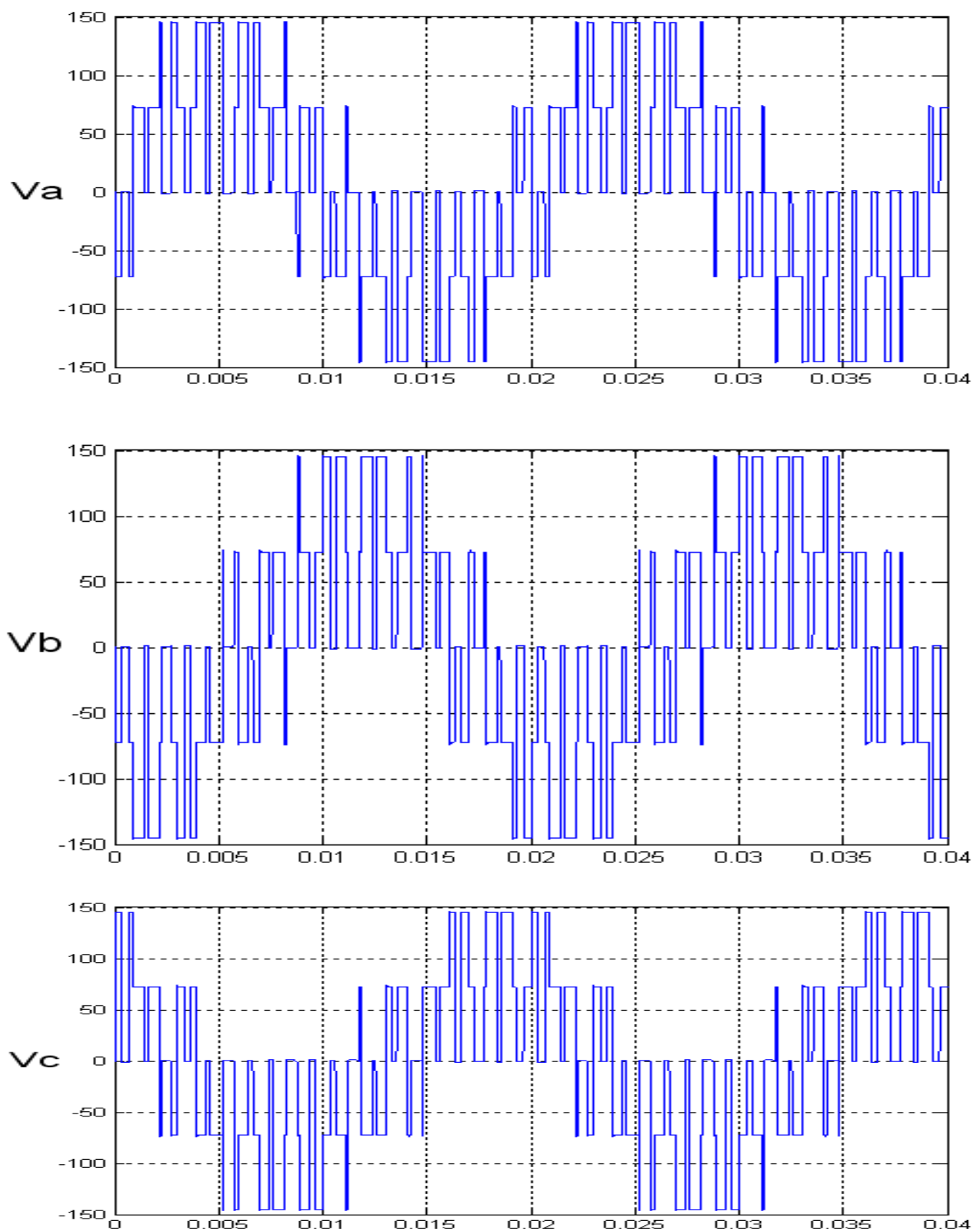


Figure.II.12. formes d'onde des tensions de phase

II.6. Conclusions

On a montré que la commande en pleine onde ne permet qu'un contrôle direct de la phase du fondamental de la tension de l'onduleur, et ne permet donc pas un contrôle découplé de l'échange de puissance active et réactive avec le réseau.

La commande à des fréquences de commutation supérieures aux grandeurs de sortie permet d'une part un contrôle total de la tension (amplitude et phase) et donc le contrôle indépendant des puissance active et réactive échangées avec le réseau dans les applications de compensation. D'autre part, il est aussi possible de contrôler le spectre basse fréquence de la tension de sortie ce qui permet son utilisation dans des applications de filtrage des tensions ou courants harmoniques.

Chapitre III

*Filtre actif parallèle, stratégie de commande,
régulation et dimensionnement*

III.1. INTRODUCTION

Le filtre actif parallèle est une solution efficace pour restituer la forme sinusoïdale du courant provenant du réseau électrique lorsque celui-ci est déformé par une charge non linéaire. L'introduction d'un filtre actif dans un réseau électrique permet d'éliminer, par compensation, les harmoniques et l'énergie réactive introduite par une charge non linéaire.

Dans ce chapitre nous étudierons la structure générale du *filtre actif parallèle*, laquelle a été divisée en deux :

La partie puissance et la partie contrôle commande.

Dans la *partie puissance*, nous introduirons les trois principaux blocs de cette structure, à savoir l'onduleur de tension, l'élément de stockage d'énergie et le filtre de sortie.

Dans la *partie contrôle-commande*, nous aborderons les quatre principaux blocs, Soit l'identification des courants perturbés, la régulation de la tension continue et du courant du *filtre actif parallèle* et la commande de l'onduleur.

III.2. STRUCTURE GENERALE DU FILTRE ACTIF PARALLELE

III.2.1 Topologie générale

La Fig. III.1 donne la structure générale du *filtre actif parallèle*, laquelle se présente sous la forme de deux blocs : la *partie puissance* et la *partie contrôle-commande*.

La partie puissance est constituée :

- D'un onduleur de tension à base d'interrupteurs de puissance, commandables à l'amorçage et au blocage (GTO, IGBT, MOSFET ... etc.) avec des diodes en antiparallèle,
- D'un circuit de stockage d'énergie, souvent capacitif,
- D'un filtre de sortie.

La partie contrôle-commande quant à elle est constituée :

- De la méthode d'identification des courants perturbés,
- De la régulation de la tension continue appliquée aux éléments de stockage d'énergie,
- De la régulation du courant injecté sur le réseau à partir de l'onduleur de tension,
- De la commande de l'onduleur de tension. [4.24, 25]

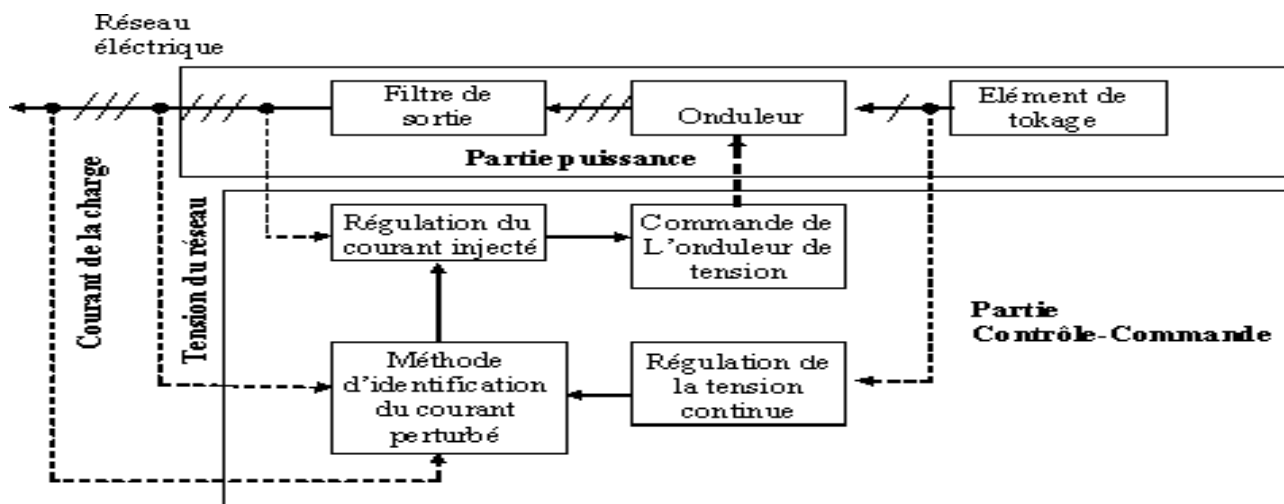


Figure. III.1 : Structure générale du filtre actif parallèle

III.2.2 Etude de la partie puissance

III.2.2.1 Onduleur de tension

III.2.2.1.1 Structure générale

La Fig. III.2 présente un onduleur triphasé à structure de tension. Il se compose de trois bras à interrupteurs réversibles en courant, commandés à la fermeture et à l'ouverture, réalisés à partir d'un transistor (MOSFET ou IGBT) et d'une diode en antiparallèle. Le stockage de l'énergie du côté continu se fait par l'intermédiaire d'un condensateur C_{dc} de tension V_{dc} .

Le filtre de sortie est un filtre passif habituellement du premier ordre (L_f, R_f) employé pour connecter l'onduleur de tension au réseau électrique.

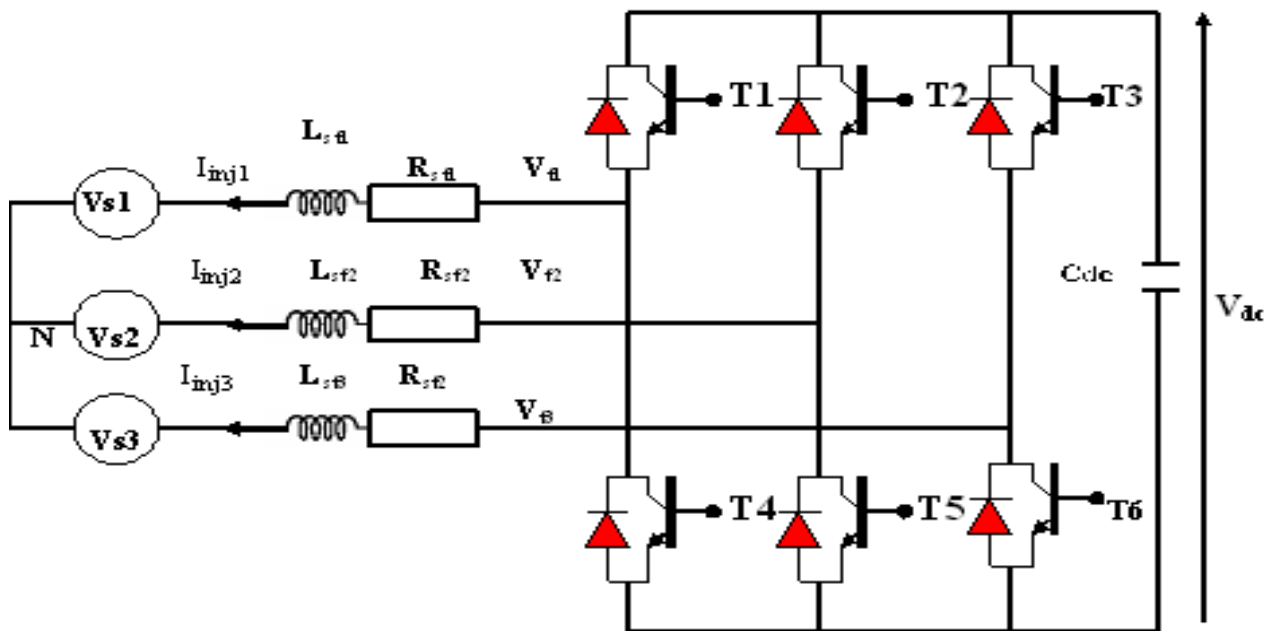


Figure. III.2 : Onduleur de tension triphasé

Cette structure du *filtre actif parallèle* ne permet pas la fermeture simultanée des semi-conducteurs d'un même bras sous peine de court-circuiter le condensateur de stockage. Par contre, ils peuvent être tous les deux ouverts (pendant un temps mort). La continuité des courants est alors assurée par la mise en conduction d'une des diodes d'un même bras.

En pratique, nous commandons les deux semi-conducteurs d'un même bras de façon complémentaire : la conduction de l'un entraîne le blocage de l'autre. En réalité, le mode, où les semi-conducteurs d'un même bras sont tous les deux fermés, n'existe que durant les commutations. Afin d'éviter un court-circuit à cause du délai de blocage des interrupteurs, il faut insérer sur un même bras, un temps d'attente, également appelé *temps mort*, entre la commande de blocage d'un interrupteur et la commande d'amorçage de l'autre [4,25]. Avec l'hypothèse des commutations instantanées, ce mode de fonctionnement ne sera pas pris en compte et par conséquent, aucun risque de court-circuiter le condensateur n'est à craindre.

III.2.2.1.2 Tension fournie par l'onduleur

L'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur de la Fig. II.2 dépendent de l'état des signaux de commande (S_1, S_2, S_3), comme défini ci-dessous :

$$S_1 = \begin{pmatrix} 1 & T_1 \text{ fermé et } T_4 \text{ ouvert} \\ 0 & T_1 \text{ ouvert et } T_4 \text{ fermé} \end{pmatrix}$$

$$S_2 = \begin{pmatrix} 1 & T_2 \text{ fermé et } T_5 \text{ ouvert} \\ 0 & T_2 \text{ ouvert et } T_5 \text{ fermé} \end{pmatrix}$$

$$S_3 = \begin{pmatrix} 1 & T_3 \text{ fermé et } T_6 \text{ ouvert} \\ 0 & T_3 \text{ ouvert et } T_6 \text{ fermé} \end{pmatrix}$$

Ainsi, on pourra exprimer huit cas possibles de tension de sortie du filtre actif V_f (référéés au neutre n de la source), comme le montre le Tab. III.1.

III.2.2.1.3 Représentation vectorielle

Dans le plan biphasé (α, β) , en considérant V_f le vecteur correspondant aux tensions de l'onduleur, les huit cas possibles du vecteur \vec{V}_f sont donnés par la Fig.III.3

| N° du cas | S_3 | S_2 | S_1 | V_{f3} | V_{f2} | V_{f1} |
|-----------|-------|-------|-------|--------------|--------------|--------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 1 | $-V_{dc}/3$ | $-V_{dc}/3$ | $2V_{dc}/3$ |
| 2 | 0 | 1 | 0 | $-V_{dc}/3$ | $2V_{dc}/3$ | $-V_{dc}/3$ |
| 3 | 0 | 1 | 1 | $-2V_{dc}/3$ | $V_{dc}/3$ | $V_{dc}/3$ |
| 4 | 1 | 0 | 0 | $2V_{dc}/3$ | $-V_{dc}/3$ | $-V_{dc}/3$ |
| 5 | 1 | 0 | 1 | $V_{dc}/3$ | $-2V_{dc}/3$ | $V_{dc}/3$ |
| 6 | 1 | 1 | 0 | $V_{dc}/3$ | $V_{dc}/3$ | $-2V_{dc}/3$ |
| 7 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |

Tableau. III.2 : Tensions générées par l'onduleur

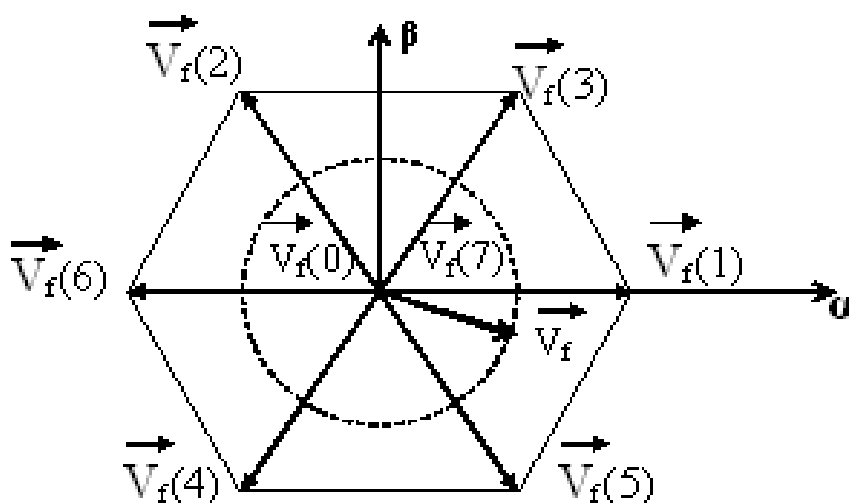


Figure. III.3 : Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur

Où $\overline{V_f}$ représente la tension de référence que doit produire l'onduleur pour pouvoir créer les courants perturbateurs identifiés. Ceci signifie que l'onduleur n'est capable de fournir des tensions égales aux tensions de référence que si le vecteur formé par ces derniers reste à l'intérieur de l'hexagone montré dans la Fig. III.3

III.2.2.2 Système de stockage d'énergie

Le stockage de l'énergie du côté continu se fait souvent par un système de stockage capacitif représenté par un condensateur C_{dc} qui joue le rôle d'une source de tension continue V_{dc} , comme le montre la Fig. III.2. Le choix des paramètres du système de stockage (V_{dc} et C_{dc}) se répercute sur la dynamique et sur la qualité de compensation du filtre actif parallèle. En effet, une tension V_{dc} élevée améliore la dynamique du filtre actif. De plus, les ondulations de la tension continue V_{dc} , causées par les courants engendrés par le filtre actif et limitées par le choix de C_{dc} , peuvent dégrader la qualité de compensation du *filtre actif parallèle*. Ces fluctuations sont d'autant plus importantes que l'amplitude du courant du filtre est grande et que sa fréquence est faible. Pour cette raison, nous pouvons estimer que seuls les premiers harmoniques sont pris en compte dans le choix des paramètres du système de stockage. Pour démontrer ceci, deux méthodes peuvent être utilisées :

■ **La première méthode** se base sur le calcul de l'énergie fournie par le filtre actif pendant une demi-période de la pulsation de puissance liée aux deux premiers harmoniques (5 et 7 pour un pont redresseur de Graetz) En choisissant un taux d'ondulation acceptable (ϵ), généralement de l'ordre de 5% de V_{dc} , nous pouvons calculer la capacité C_{dc} à partir de la relation suivante :

$$C_{dc} = \frac{V_s \sqrt{I_5^2 + I_7^2 - 2I_5 I_7 \cos(5\alpha - 7\alpha)}}{2\omega \cdot \epsilon \cdot V_{dc}^2} \quad (III.1)$$

Avec V_s la tension simple du réseau, I_h le courant harmonique du rang h et α l'angle d'allumage des thyristors du pont Graetz. Puisque l'augmentation de la valeur de la tension continue améliore la commandabilité du filtre actif (Cf. Tab. III.1 et Fig. III.3) et sachant que le choix de cette tension se répercute en grande partie sur le choix des interrupteurs, la tension continue V_{dc} doit être choisie comme la plus grande tension respectant les contraintes des interrupteurs.

■ **La deuxième méthode**, plus simple, se base sur la mesure du courant harmonique I_h du rang le plus faible. La capacité C_{dc} se calcule de la façon suivante

$$C_{dc} = \frac{I_h}{\epsilon \cdot V_{dc} \cdot \omega_h} \quad (III.2)$$

Avec ω_h , la pulsation la plus faible des harmoniques à compenser. [4]

III.2.2.3 Filtre de sortie

Le filtre de sortie est un filtre passif utilisé pour connecter l'onduleur de tension au réseau électrique. Le filtre de sortie est dimensionné pour satisfaire les deux critères suivants :

► *assurer la dynamique du courant :*

$$\frac{d}{dt} I_{h-ch} = \frac{d}{dt} I_{inj} \quad (\text{III.3})$$

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

► *empêcher les composantes dues aux commutations de se propager sur le réseau électrique.* Le filtre de première ordre est le plus utilisé. Il est composé d'une inductance L_f de résistance interne R_f , comme le montre la Fig. III.2. Un filtre de ce type ne permet pas de satisfaire simultanément les deux critères de dimensionnement du filtre de sortie. En effet, seule une valeur relativement faible de L_f peut réaliser une bonne dynamique du filtre actif en satisfaisant l'égalité (III.3). Malheureusement, une valeur faible de L_f permet à la majorité des composantes dues aux commutations de se retrouver côté réseau et par

conséquent d'affecter les installations et les équipements électriques. Inversement, une valeur relativement élevée de L_f va empêcher ces composantes de se propager sur le réseau électrique mais affectera la dynamique du filtre actif et dégradera alors la qualité de compensation. 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 parallèle*. [4]

III.2.3 Étude de la partie contrôle-commande

III.2.3.1 Introduction à la stratégie de commande

La stratégie de commande se base sur la détection des courants perturbateurs dans le domaine temporel. Trois possibilités d'identification des courants perturbateurs ont déjà été proposées

- ☐ *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 appropriée au filtre actif parallèle installé par le consommateur pour compenser les courants perturbateurs causés par ses charges polluantes. C'est pourquoi cette méthode de détection sera employée dans ce travail.

III.2.3.2 La méthode d'identification des courants perturbés

III.2.3.2.1 Généralités sur les méthodes d'identification

Les différentes méthodes d'identification de courant perturbateur peuvent être regroupées en deux familles d'approche.

La première utilise la transformée de Fourier rapide dans le domaine fréquentiel, pour extraire les harmoniques du courant. Cette méthode est bien adaptée aux charges où le contenu harmonique varie lentement. Elle donne aussi l'avantage de sélectionner les harmoniques individuellement. Il est à noter que cette méthode nécessite une grande puissance de calcul afin de réaliser, en temps réel, toutes les transformations nécessaires Pour extraire les harmoniques [4, 26,27]

La deuxième famille est basée sur le calcul des puissances instantanées dans le domaine temporel. Certaines de ces méthodes se basent sur le calcul des puissances harmoniques de la charge non linéaire D'autres peuvent être utilisées pour compenser à la fois les courants harmoniques et la puissance réactive, en se basant sur la soustraction de la partie fondamentale active du courant total.

Récemment, des nouvelles méthodes d'identification ont été présentées pour donner le choix de compenser un, plusieurs ou voire même tous les types de courants perturbateurs. 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, ne garantit pas une compensation parfaite de la puissance réactive de même que la régulation de tension n'assure pas toujours une bonne qualité à la tension de la charge.

Enfin, la méthode d'identification la plus utilisée est celle appelée méthode des puissances réelles et imaginaires instantanées. Cette méthode offre l'avantage de choisir la perturbation à compenser avec précision, rapidité et facilité d'implantation. Pour toutes ces raisons nous avons retenu cette méthode d'identification pour le reste de notre étude.

En effet, afin de pouvoir compenser les courants harmoniques, les courants déséquilibrés et la puissance réactive conjointement ou individuellement, cette méthode nous a semblé la mieux appropriée. [4, 17, 26,27]

III.2.3.2.2 Principe du fonctionnement de la méthode des puissances instantanées

III.2.3.2.2.1 Généralités sur les puissances instantanées

En présence des harmoniques, la puissance apparente est composée de trois parties : active (P), réactive (Q) et déformante (D) comme le montre la relation (III.4)

$$S = \sqrt{(P^2 + Q^2 + D^2)} \quad (\text{III.4})$$

Cette méthode exploite la transformation α - β pour obtenir les puissances réelles et imaginaires.

Notons par (V_α, V_β) et (I_α, I_β) les composantes orthogonales du repère α - β associées respectivement aux tensions de raccordement du *filtre actif parallèle* (V_s) et aux courants absorbés par les charges polluantes (I_s). La transformation α - β -0 triphasée permet d'écrire, la relation des tensions suivante :

$$\begin{pmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{pmatrix} = \sqrt{2/3} \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_{s1} \\ v_{s2} \\ v_{s3} \end{pmatrix} \quad (\text{III.5})$$

Et la relation des courants ci-dessous :

$$\begin{pmatrix} I_0 \\ I_\alpha \\ I_\beta \end{pmatrix} = \sqrt{2/3} \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{s1} \\ I_{s2} \\ I_{s3} \end{pmatrix} \quad (\text{III.6})$$

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

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

$$\begin{cases} P(t) = V_{s1} \cdot I_{s1} + V_{s2} \cdot I_{s2} + V_{s3} \cdot I_{s3} = P(t) + V_0(t) \\ P(t) = V_\alpha \cdot I_\alpha + V_\beta \cdot I_\beta \\ P_0(t) = V_0 \cdot I_0 \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

Avec $p(t)$ la puissance réelle instantanée, $p_0(t)$ la puissance homolaire instantanée.

L'avantage de la transformation α - β -0 est la séparation des séquences homopolaires du système triphasé de courant ou de tension. De la même manière, la puissance imaginaire instantanée peut s'écrire sous la forme suivante :

$$q(t) = -\frac{1}{\sqrt{3}} \left[(V_{s1} - V_{s2}) I_{s3} + (V_{s2} - V_{s3}) I_{s1} + (V_{s3} - V_{s1}) I_{s2} \right] = V_\alpha I_\beta - V_\beta I_\alpha \quad (\text{III.8})$$

La puissance q a une signification plus large que la puissance réactive habituelle. En effet, contrairement à la puissance réactive, qui ne considère que la fréquence fondamentale, la puissance imaginaire prend en compte toutes les composantes harmoniques de courant et de tension. C'est pourquoi on lui donne une

autre dénomination (puissance imaginaire) avec comme unité le *volt-ampère imaginaire*(VAI). A partir des relations (III.7) et (III.8), nous pouvons établir la relation matricielle suivante

$$\begin{pmatrix} p \\ q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{s\alpha} & v_{s\beta} \\ -v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{\alpha} \\ I_{\beta} \end{pmatrix} \quad (III.9)$$

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

$$\begin{cases} p = \bar{p} + \tilde{p} \\ q = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad (III.10)$$

Avec :

- \bar{P} une puissance continue liée à la composante fondamentale active du courant et de la tension, [17, 18,19]
- \bar{Q} une puissance continue liée à la composante fondamentale réactive du courant et de la tension
- \tilde{P} et \tilde{Q} des puissances alternatives liées à la somme des composantes perturbatrices du courant et de la tension

III.2.3.2.2 Séparation des puissances perturbatrices

Après avoir identifié les pulsations des puissances instantanées, le filtre de puissance chargé d'isoler les puissances active et réactive conventionnelles peut être dimensionné.

Un circuit constitué d'un filtre passe bas avec un soustracteur peut être employé, comme le présente la Fig. III.4.

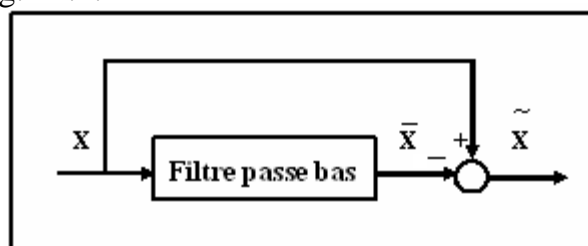


Figure. III.4 : Schéma représentant le principe de séparation des puissances

L'ordre de ce filtre passe-bas définit la dynamique et l'efficacité de la méthode d'identification. Des filtres de puissance du quatrième ou cinquième ordre ont été proposés. Dans notre étude, nous avons choisi un filtre passe-bas du deuxième ordre en vue de simplifier l'approche d'implantation numérique de ce dernier. En effet, un ordre plus élevé entraînerait des temps de calcul plus longs ce qui peut être préjudiciable dans notre étude. La relation suivante donne l'expression générale d'un filtre passe-bas du deuxième ordre :

$$(III.11) \quad \frac{\omega_0^2}{S^2 + 2\zeta \omega_0 S + \omega_0^2}$$

La fréquence de coupure, $f_0 = \omega_0/2\pi$, est choisie pour que le filtre de puissance puisse bloquer toute composante perturbatrice des puissances instantanées (\tilde{X}). Elle doit aussi permettre aussi le passage des composantes continues représentant les puissances active et réactive à la fréquence fondamentale (\bar{X}).

III.2.3.2.2.3 Calcul des courants perturbateurs

En inversant la relation (III.9), nous pouvons recalculer les courants dans le repère (α - β) comme le montre l'équation (III.12) :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_\alpha \\ \mathbf{I}_\beta \end{bmatrix} = \frac{\mathbf{1}}{V_{s\alpha}^2 + V_{s\beta}^2} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{P} \\ \mathbf{q} \end{bmatrix} \quad (III.12)$$

En considérant les équations (III.10) et (III.12), nous pouvons séparer le courant dans le repère (α - β) en trois composantes, active et réactive à la fréquence fondamentale et les harmoniques. Ceci conduit à:

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ 0 \end{bmatrix}}_{\text{Courant actif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{q} \end{bmatrix}}_{\text{Courant réactif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix}}_{\text{Courant harmonique}} \quad (III.12)$$

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

Cette expression montre donc que l'identification des différentes composantes du courant dans le repère (α - β) revient à séparer des termes continus des puissances réelle et imaginaire instantanées. Les courants perturbateurs triphasés qui représentent les courants identifiés, *dits courants de référence* (I_{ref}), sont calculés à partir de la transformation (α - β) inverse (*transformation C2-3*) donnée par la relation (III.14) :

$$\begin{bmatrix} I_{ref1} \\ I_{ref1} \\ I_{ref1} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{P\alpha} \\ I_{P\beta} \end{bmatrix} \quad (III.14)$$

Avec $I_{p\alpha}$, $I_{p\beta}$ courants perturbateurs calculés dans le repère α - β à partir des courants réactifs et harmoniques de la relation (III.13).

III.2.3.2.2.4 Algorithme d'identification

Finalement, l'algorithme d'identification que nous avons défini peut être représenté par le synopsis de la Fig. III.5

En plus de l'algorithme général de la méthode d'identification, nous représentons sur la Fig. III.5, trois des blocs appartenant à la partie de contrôle-commande et que aborderons dans ce qui suit : le bloc régulation de tension continue, le bloc régulation du courant du filtre actif.

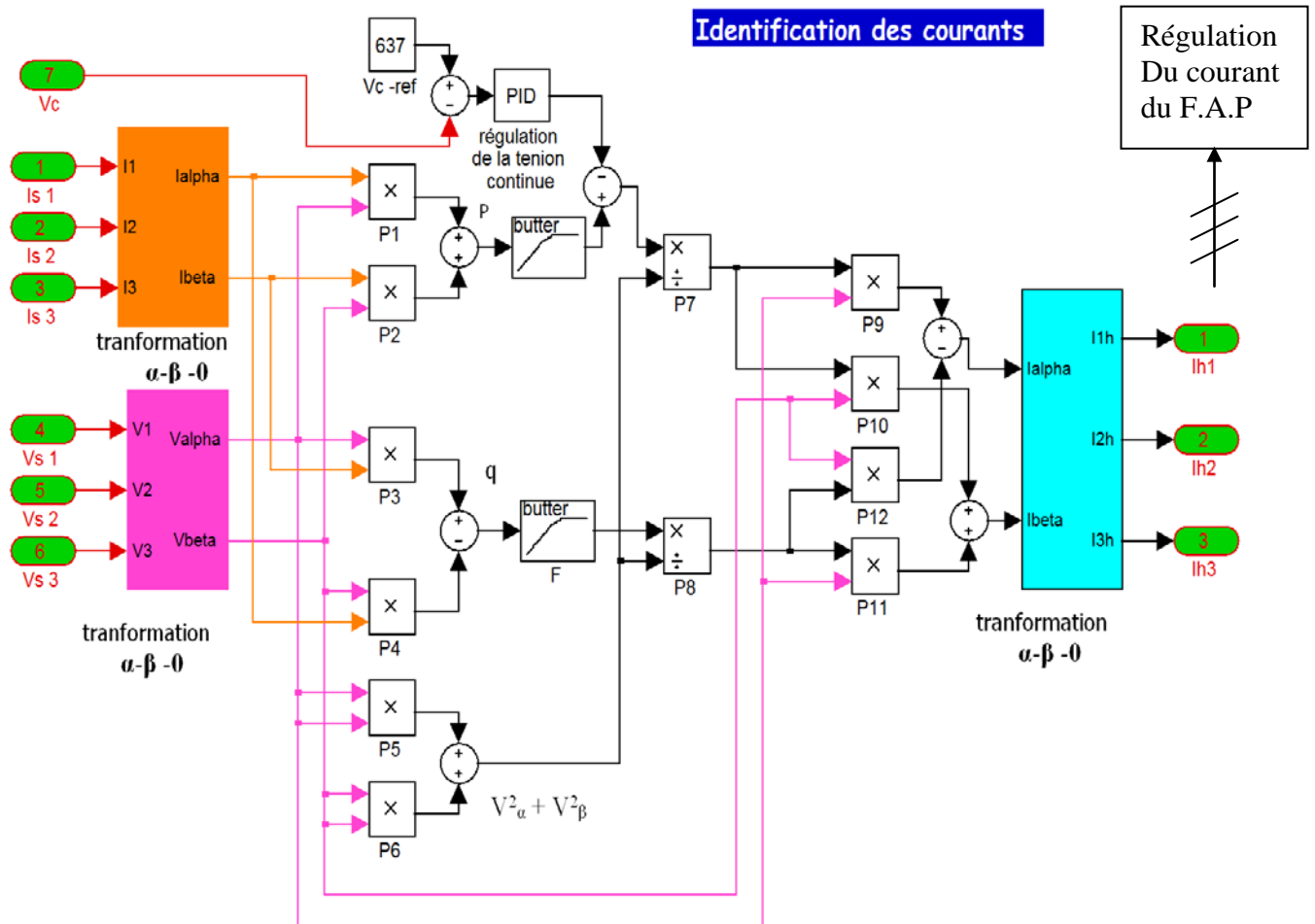


Figure. III.5 : schéma de principe de la méthode d'identification des puissances instantanées

III.2.3.4 Régulation de la tension continue

La tension moyenne V_{dc} aux bornes du condensateur doit être maintenue à une valeur fixe. La principale cause susceptible de la modifier est les pertes dans le filtre actif (interrupteurs et filtre de sortie). La régulation de la tension moyenne aux bornes du condensateur de stockage d'énergie doit se faire par l'adjonction des courants fondamentaux actifs dans les courants de référence. La sortie du régulateur P_c s'ajoute, à un signe près, à la puissance active perturbatrice p et donne lieu à un courant fondamental actif corrigeant ainsi V_{dc} (C_f . Fig. III.5). La puissance P_c représente la puissance active nécessaire pour maintenir la tension V_{dc} égale à la valeur de la tension de référence souhaitée (V_{dc-ref}). Le régulateur employé ici est un régulateur proportionnel simple (K_c) avec une action de filtrage au préalable sur la tension mesurée

V_{dc} , réalisée par un filtre passe-bas du deuxième ordre de manière à atténuer les fluctuations à 300 Hz.

En négligeant les pertes de commutations dans l'onduleur ainsi que l'énergie stockée dans l'inductance du filtre de sortie, la relation entre la puissance absorbée par le filtre actif et la tension aux bornes du condensateur peut s'écrire sous la forme suivante[4,20,27] :

$$P_c = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} C_{dc} \cdot V_{dc}^2 \right) \quad (III.15)$$

Notons que la relation (III.15) est non linéaire. Pour des faibles variations de la tension V_{dc} autour de sa référence V_{dc-ref} , elle peut être linéarisée à travers les relations suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} P_c = C_{dc} \cdot V_{dc-ref} \frac{d}{dt} (V_{dc}) \\ \Rightarrow V_{dc}(s) = \frac{P_c(s)}{V_{dc-ref} \cdot C_{dc} \cdot s} \end{array} \right. \quad (III.16)$$

A partir de la relation (III.16), et en prenant en compte le régulateur proportionnel (K_c), la boucle de régulation de la tension continue peut être représentée par le schéma de la Fig. III.6. Le choix du paramètre K_c aura pour objectif d'obtenir un temps de réponse minimal afin de ne pas nuire à la dynamique du filtre actif.

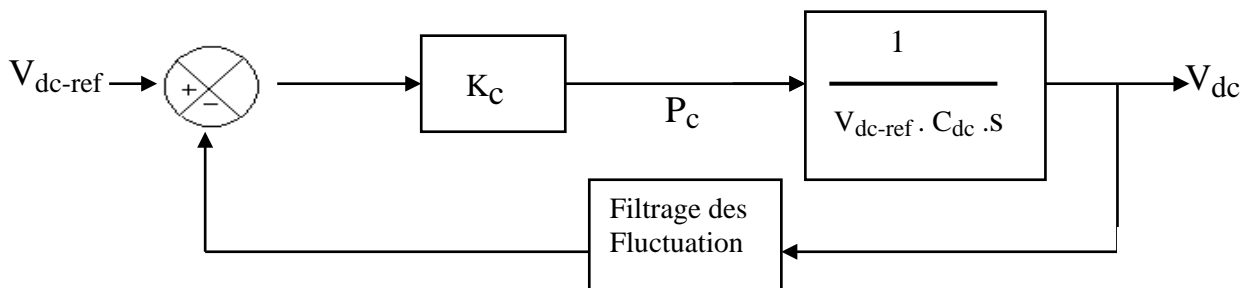


Figure. III.6 : Boucle de régulation de la tension continue

III.2.3.5 La commande de l'onduleur

Le but de la commande de l'onduleur est de permettre la meilleure reproduction des courants perturbés de référence, à travers les ordres de commande appliqués aux drivers

Interrupteurs de puissance. Les deux principales familles de commande des convertisseurs statiques sont [21,22] :

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

III.2.3.5.1 Commande par hystérésis

La commande par hystérésis, appelée aussi commande en tout ou rien, est une commande non linéaire qui utilise l'erreur existant entre le courant de référence et le courant produit par l'onduleur. L'erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis. Dès que l'erreur atteint la bande inférieure ou supérieure, un ordre de commande est envoyé de manière à rester à l'intérieur de la bande. La simplicité de la mise en œuvre, comme le montre la Fig. III.7, est le principal atout de cette technique. En revanche, les commutations évoluant librement à l'intérieur de bande d'hystérésis, on ne peut maîtriser correctement le spectre haute fréquence dû aux fréquences de commutations.

Afin de résoudre ce problème de la maîtrise des fréquences de commutation et de sa répercussion sur les interrupteurs, une autre stratégie de commande peut être proposée à savoir la *commande par hystérésis modulée*. Mais dans cette stratégie de commande, il est difficile de définir la largeur de la bande de l'hystérésis. De plus, le fonctionnement avec une fréquence de commutation quasi fixe nous empêche de conserver l'avantage d'une rapidité illimitée obtenue par la commande par hystérésis[4,21].

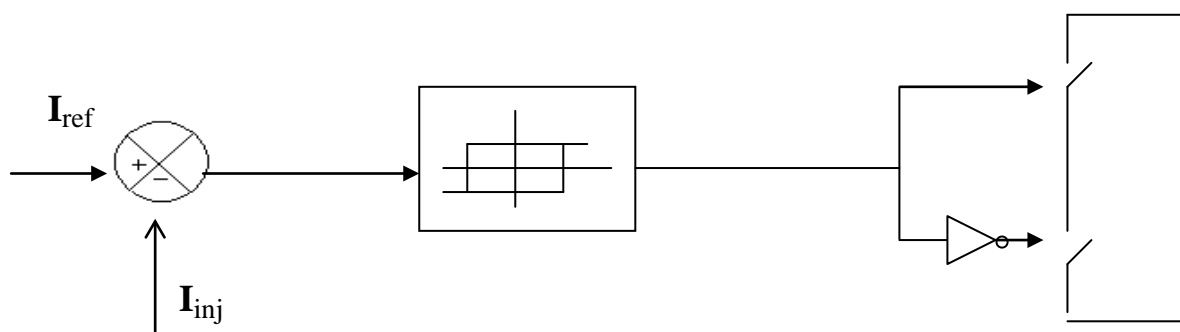


Figure. III.7 : Principe de commande des courants par hystérésis

III.2.3.5.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion

Afin de contourner les problèmes précédents, nous introduisons une deuxième famille de commande de l'onduleur : la *commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)*. La technique de commande par MLI résout le problème de la maîtrise de la fréquence de commutation en fonctionnant avec une fréquence fixe facile à filtrer en aval de l'onduleur.

La plus simple et la plus connue des modulations de largeur d'impulsion est sans doute la MLI à échantillonnage naturel, dite *MLI intersective*. Cette technique de commande met en œuvre d'abord un régulateur qui détermine la tension de référence de l'onduleur (modulatrice) à partir de l'écart entre le courant mesuré et sa référence. Cette dernière est ensuite comparée avec un signal triangulaire (porteuse à fréquence élevée fixant la fréquence de commutation) [4,21]. La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs. Le schéma de principe est donné par la Fig. III.8.

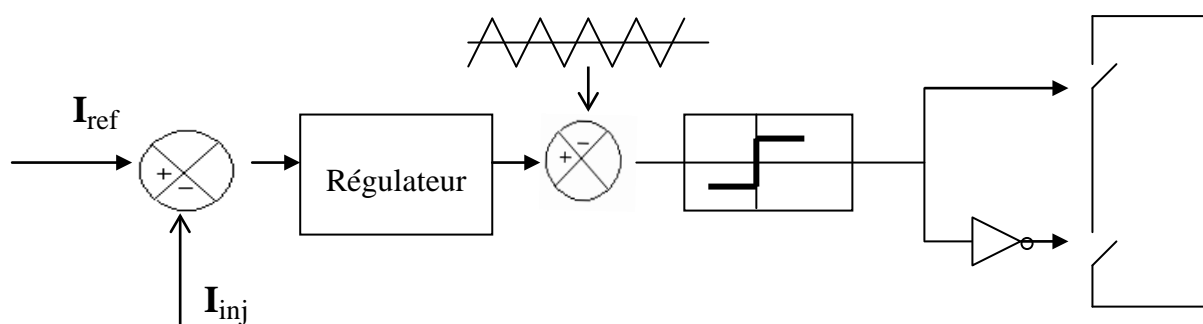


Figure. III.8 : Principe de commande des courants par MLI

D'autres techniques de MLI existent également dans la littérature comme la MLI à échantillonnage régulier où on peut distinguer deux méthodes :

- la MLI à échantillonnage régulier symétrique où la référence est échantillonnée à chaque période de la porteuse,
- la MLI à échantillonnage régulier asymétrique où la référence est échantillonnée à la demi période de la porteuse.

Plus récemment, nous avons vu apparaître une technique de commande, dite *commande à modulation vectorielle*. Cette dernière diffère des techniques présentées précédemment par le fait qu'elle ne s'appuie pas sur des modulations appliquées à chacun des interrupteurs. Finalement, nous avons choisi, dans la suite de notre étude, la technique de commande à MLI à échantillonnage naturel. Cette technique représente en réalité la MLI analogique et pourra être employée dans la partie de simulation profitant en cela de sa facilité de modélisation.

III.2.3.6 La Régulation du courant du filtre actif parallèle

Le choix du régulateur du courant du filtre actif se fait en fonction des objectifs de régulation et de l'ordre du filtre de sortie. Deux régulateurs P et PI, correspondant respectivement aux filtres de sortie du premier et du troisième ordre, ont été déjà proposés pour réguler le courant du *filtre actif parallèle*.

L'objectif de la régulation de la partie parallèle est de contrôler le courant à la sortie de l'onduleur parallèle. La mise au point d'un régulateur doit prendre en compte les critères suivants :

- ☀ la bande passante du régulateur doit être assez large afin de ne pas introduire un retard important,
- ☀ le fonctionnement de la régulation ne doit pas être perturbé par les harmoniques dus aux découpages de l'onduleur. ces harmoniques doivent être atténués à la sortie du régulateur.

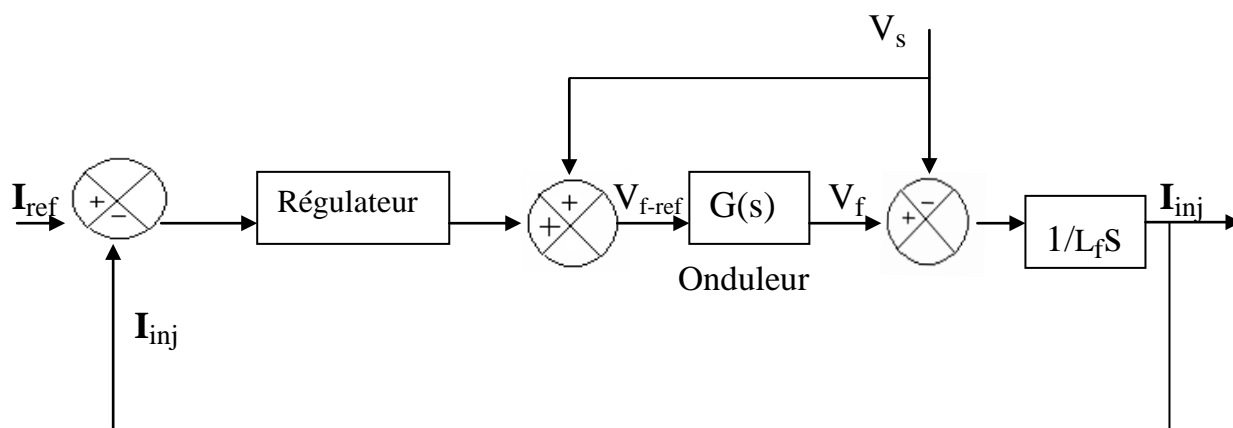


Figure. III.9 : Schéma de la régulation des courants du F.A.P

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

$$\left\{ \begin{array}{l} G(s) = K \frac{1}{1 + \tau s} \\ K = \frac{V_{dc}}{2V_p} \end{array} \right. \quad (III.17)$$

Avec V_{dc} la tension côté continu de l'onduleur, V_p l'amplitude de la porteuse triangulaire et (τ) représentant le retard causé par le calcul des courants perturbateurs.

III.3. Conclusion

Enfin, nous avons pu présenter et définir, dans la première partie de ce chapitre, la plupart des éléments constituant la structure générale du filtre actif parallèle.

Cette structure a d'abord été partagée en deux parties, l'une dite partie puissance, et l'autre dite partie contrôle-commande. Nous avons exprimé les critères qui nous ont guidés dans le choix de chacun des éléments des parties concernées. Ainsi, nous avons pu fixer le choix des éléments de la partie contrôle-commande, tels que la méthode d'identification des courants perturbés, la commande de l'onduleur, la régulation de la tension continue et la régulation du courant du filtre actif, de même que ceux de la partie puissance, comme l'onduleur, l'élément de stockage et le filtre de sortie.

Chapitre IV

Etude de la puissance apparente du filtre actif et simulation

IV.1. Introduction

Dans cette partie, nous étudierons la puissance apparente (S_f) et la séparation des puissances perturbatrices dans les deux cas de compensation: -compensation des courants harmoniques -compensation des courants harmoniques et de la puissance réactive en même temps. En suite on passe à la partie simulation en utilisant MATLAB *simulink*.

IV.2. étude de la puissance apparente

La puissance apparente d'une charge non linéaire (S_{ch}) est composée de trois termes de puissance : la puissance active P_{ch} , la puissance réactive Q_{ch} et la puissance déformante D_{ch} , comme l'indique la relation suivante :

$$\begin{aligned} S_{ch}^2 &= P_{ch}^2 + Q_{ch}^2 + D_{ch}^2 \\ S_{ch} &= \sqrt{P_{ch}^2 + Q_{ch}^2 + D_{ch}^2} = 3.V_s.I_{ch} \end{aligned} \quad (IV.1)$$

Avec V_s la tension du réseau et I_{ch} le courant de la charge non linéaire.

IV.2.1 Compensation des courants harmoniques

La puissance apparente du filtre actif (S_f) compensant le courant harmonique I_h injecté par un pont redresseur triphasé à thyristors (pont de Graetz), est donnée par l'équation suivante :

$$S_f = \sqrt{D_{ch}^2} = 3.V_s.I_h \quad (IV.2)$$

Ce courant harmonique I_h qui doit être créé par le filtre actif peut s'écrire de la façon suivante :

$$I_{ch}^2 = I_{fon}^2 + I_h^2 \quad (IV.2)$$

$$I_h = \sqrt{I_{ch}^2 - I_{fon}^2} \quad (IV.3)$$

Avec I_{fon} le courant fondamental consommé par la charge non linéaire.

Le courant fondamental et le courant de la charge peuvent être écrits en fonction du courant direct de la charge non linéaire, I_d , de la façon suivante :

$$i_s = 2I_d \frac{\sqrt{3}}{\pi} \left[\sin(n\omega t) - \frac{1}{5} \sin(5n\omega t) - \frac{1}{7} \sin(7n\omega t) + \frac{1}{11} \sin(11n\omega t) + \frac{1}{13} \sin(13n\omega t) - \dots \right]$$

$$I_{ch} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_{d-\alpha} \quad , \quad I_{fon} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_{d-\alpha} \quad (IV.4)$$

Donc le courant harmonique peut s'écrire comme suit :

$$I_h = \sqrt{\left(\sqrt{\frac{2}{3}} I_{d-\alpha} \right)^2 - \left(\frac{\sqrt{6}}{\pi} I_{d-\alpha} \right)^2}$$

$$I_h = 0.24 I_{d-\alpha} \quad (IV.5)$$

D'où la puissance apparente du filtre :

$$s_f = 3.V_s . 0.24 I_{d-\alpha} \quad (IV.6)$$

Et la puissance de la charge :

$$s_{ch} = 3.V_s . 0.8 I_d \quad (IV.7)$$

L'expression du courant continu du redresseur est donné par :

$$I_{d-\alpha} = \frac{U_d \cos(\alpha)}{R_d} \quad (IV.8)$$

Avec (α) l'angle d'allumage du thyristor.

R_d Résistance du redresseur.

U_d La tension redresse continu pour $\alpha = 0$ tel que :

$$U_d = \frac{3\sqrt{3}V_{\max}}{\pi} = \frac{3\sqrt{6}V_s}{\pi} \quad (IV.9)$$

$$I_{d-\alpha} = \frac{3\sqrt{6}V_s \cos(\alpha)}{\pi Z_d} \quad (IV.10)$$

On obtient le rapport des puissances (τ_h) donné par l'expression suivante :

$$\tau_h = \frac{s_f}{s_{ch}} = \frac{0.24 I_{d-\alpha}}{\sqrt{(2/3)} I_d} \quad (IV.11)$$

L'expression finale de (τ_h) donner par la relation :

$$\tau_h \approx 0.3 \cos \alpha \quad (IV.12)$$

La Fig. IV.1 suivante montre la variation du rapport des puissances, (τ_h) du *filtre actif parallèle* par rapport à celle de la charge non linéaire, en fonction de l'angle d'allumage des thyristors (α).

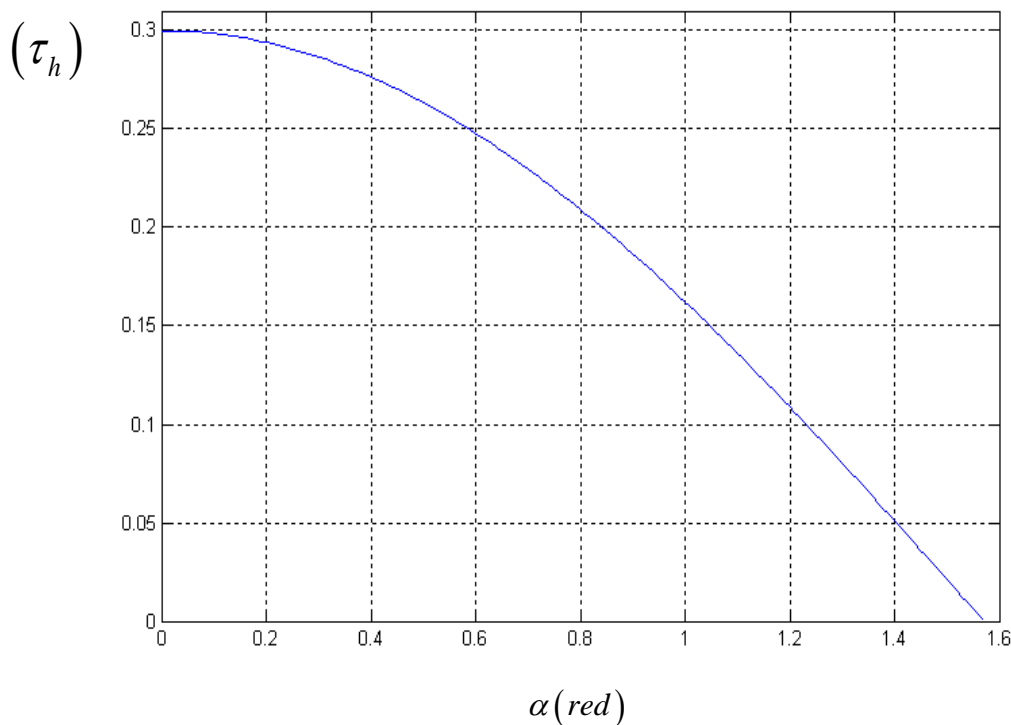


Figure. IV.1 : Rapport des puissances du filtre actif parallèle et de la charge non linéaire pour la compensation des courants harmoniques.

On remarque que pour $\alpha = 0^\circ$ la puissance maximale du filtre actif est de $S_f \approx 30\%S_{ch}$. Cette puissance diminue avec l'augmentation de l'angle d'allumage (α) grâce à la diminution du courant harmonique.

IV.2.2 Compensation des courants harmoniques et de puissance réactive en même temps

Dans cette étude, nous nous intéresserons au calcul du rapport des puissances apparentes dans le cas d'une compensation du courant harmonique et de la puissance réactive consommés par la même charge non linéaire. Dans ce cas, le rapport des puissances apparentes (τ_{hr}) du filtre actif parallèle par rapport à celle de la charge

non linéaire est donné par la relation suivante :

$$\tau_{hr} = \frac{S_f}{S_{ch}} \quad (IV.13)$$

$$S_f = \sqrt{Q_{ch}^2 + D_{ch}^2} \quad (IV.14)$$

$$\text{Avec : } S_{ch} = 3.V_s.I_{ch} \quad (IV.15)$$

$$S_f = \sqrt{(3.V_s.I_h)^2 + (3.V_s.I_{fon} \cdot \sin \alpha)^2} \quad (IV.16)$$

En remplace les relations (IV.3), (IV.4), (IV.15) et (IV.16) dans celles de (IV.10) et (IV.13) on obtient l'expression du rapport des puissances suivante :

$$\tau_{hr} = \cos \alpha \sqrt{1 - \frac{9}{\pi^2} \cos^2 \alpha}$$

La Fig. IV.2 donne la représentation graphique du rapport des puissances (τ_{hr}) en fonction de l'angle d'allumage des thyristors de la charge non linéaire.

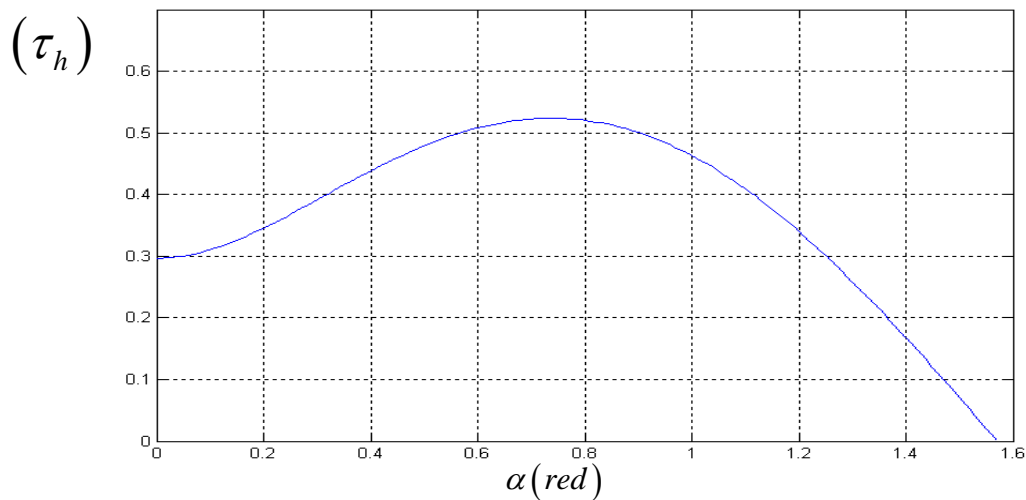


Fig. IV.2 : Rapport des puissances du filtre actif parallèle et de la charge non linéaire pour la compensation du courant harmonique et de la puissance réactive

A partir de la Fig. IV.2 : on montre que pour un angle d'amorçage=0, on trouve le même rapport de puissance que celui obtenu dans le cas de compensation précédent ($S_f \approx 30\% S_{ch}$). Par contre, dans ce cas de compensation, le filtre actif atteint ici un rapport maximum de puissance de ($S_f \approx 52\% S_{ch}$) pour un angle de $\approx 42^\circ$.

Les résultats graphiques de la Fig. V.2 montrent également que le *filtre actif parallèle*, et du point de vue économique, peut être appliqué pour compenser à la fois le courant harmonique et de la puissance réactive.

IV.3. séparation des puissances perturbatrices

Les puissances définies précédemment (III.10) contiennent un terme constant relatif au fondamental ainsi qu'un terme alternatif correspondant aux harmoniques. Afin de ne garder que la partie relative aux harmoniques, la composante continue de la puissance doit être réalisée en utilisant l'un des deux artifices de filtrage, un filtre passe-haut ou un filtre passe-bas comme ceux représentés sur les figures suivantes.

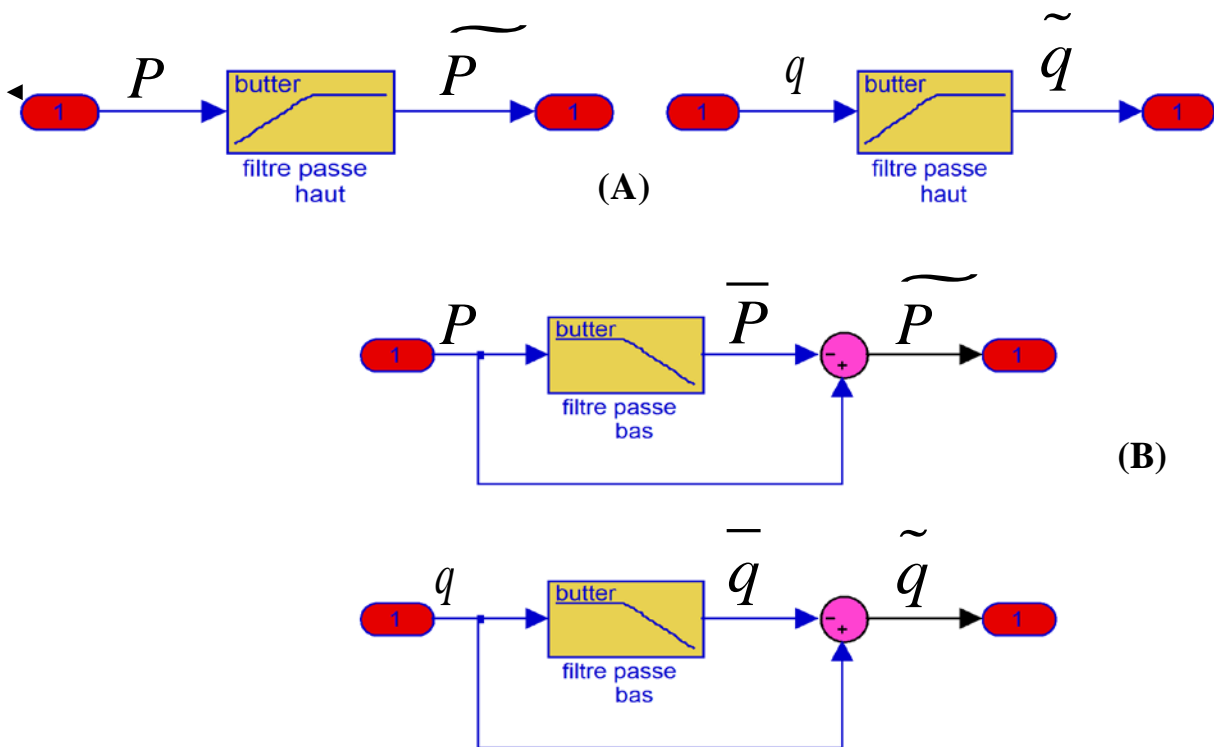


Figure. IV.3 Schéma de principe du filtre utilisé pour l'extraction des composantes harmoniques.

(A) : filtre passe haut. (B) : filtre passe bas.

Ces deux filtres réalisent une parfaite élimination de la composante continue, mais leurs caractéristiques pour le résidu harmonique et la puissance réactive sont différentes voir les figures (IV.8) et (IV.11) ;(IV.16) et (IV.19).

Les expressions de $P_{\text{réf.}}$ et $q_{\text{réf.}}$ Permettant de déterminer les courants de référence

Suivant la nature de compensation, harmonique et/ou la puissance réactive, sont résumées dans le tableau (IV.1)

| | P_{ref} | q_{ref} |
|--|-------------|-----------------------|
| Compensation des courants harmoniques | \tilde{p} | \tilde{q} |
| Compensation de la puissance réactive | 0 | \bar{q} |
| Compensation des courants harmoniques et la puissance réactive en même temps | \tilde{p} | $\bar{q} + \tilde{q}$ |

Tableau. IV.1 Les expressions de P_{ref} et q_{ref}

IV.4.SIMULATION PAR MATLAB.

Dans notre travail nous avons utilisé le simulink comme outil de simulation, la figure IV.4 présente l'ensemble de la structure du filtre actif parallèle et de son environnement fonctionnel, lequel se compose:

- ▶ D'un réseau électrique triphasé à trois fils représenté par les grandeurs ($V_s - R_s - L_s$).
- ▶ d'un pont redresseur à thyristors triphasé (pont de graetz) alimentant une charge ($R_{ch} - L_{ch}$) pour la représentation d'une charge non linéaire génératrice des courant harmonique et consommant de la puissance réactive.
- ▶ d'une résistance et inductance ($R_c - L_c$) a l'entrée du pont redresseur.
- ▶ D'un onduleur de tension triphasé (Mosfet avec des diodes antiparallèles).
- ▶ Un bloc de commande de l'onduleur par (MLI).
- ▶ Un bloc d'identification de courant harmonique.
- ▶ un filtre de sortie passif de premier ordre représenté par ($R_f - L_f$).

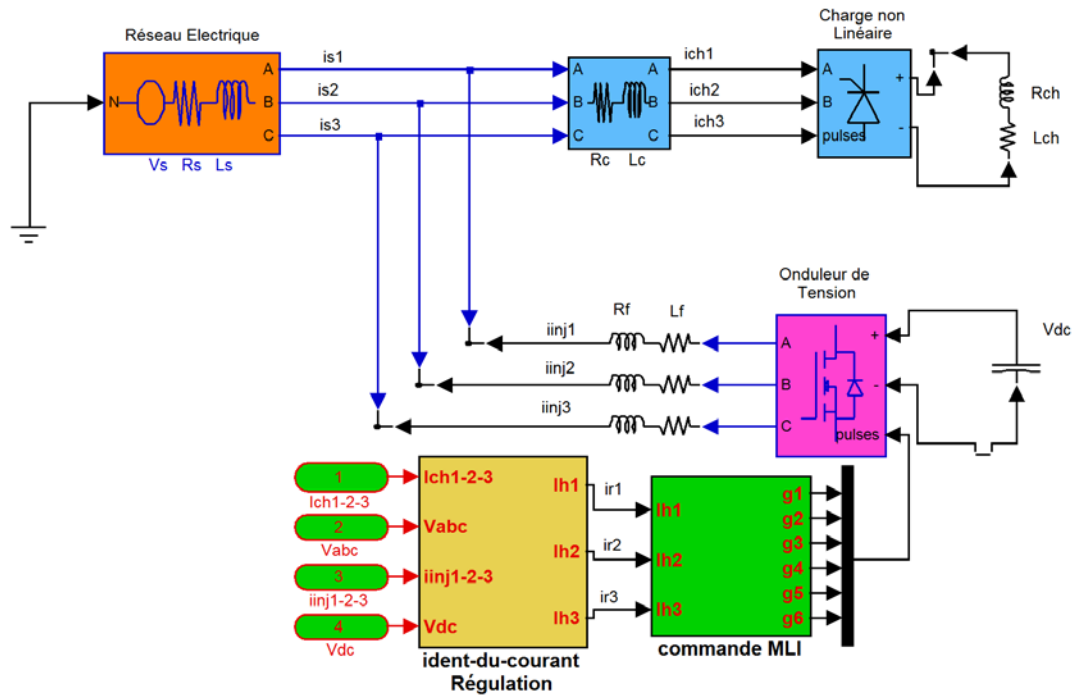


Figure IV.4 : Schéma global d'un filtre actif parallèle.

La modélisation globale de la structure, présentée sur la Fig.IV.4, a permis d'étudier la validité fonctionnelle du filtre actif parallèle à travers plusieurs simulations. Les valeurs des éléments caractérisant cette structure sont :

IV.4.1 : Modèle de la source (réseau)

Le réseau est un système de la tension triphasé parfaitement sinusoïdal, tel que :

La tension simple : $V_s = 220\text{v}$ la fréquence : $f = 50\text{Hz}$;
 Résistance du réseau : $R_s = 0.00013 \Omega$, Inductance du réseau : $L_s = 0.000015 \text{ H}$.

IV.4.2 : Modèle de la charge polluante

La charge polluante se compose d'un redresseur (pont de graetz) commandé alimente une charge composée d'une résistance $R_{ch} = 2.4 \Omega$ et une inductance : $L_{ch} = 0.0025 \text{ H}$.

IV.4.3 : une résistance et inductance ($R_c - L_c$) a l'entrée du pont redresseur avec :

$R_c = 0.0000013 \Omega$. $L_c = 0.0005 \text{ H}$.

IV.4.4 : Modèle du filtre actif parallèle

Le filtre actif c'est l'ensemble, onduleur de tension (f_m ; $f_{réf}$; A_r ; A_p ; r) (commande MLI), filtre de sortie du premier ordre (R_f ; L_f), et système de stockage de l'énergie avec : $f_{réf} = 50 \text{ Hz}$; $f_m = 10000 \text{ Hz}$; $A_r = 100 \text{ A}$; $A_p = 118.76 \text{ A}$; $r = 0.842$.

$R_f = 1.5 \Omega$; $L_f = 0.004\text{H}$; $V_{dc} = 889\text{v}$; $C_{dc} = 0.1 \text{ mF}$.

IV.4.5 : Résultat de simulation et analyse

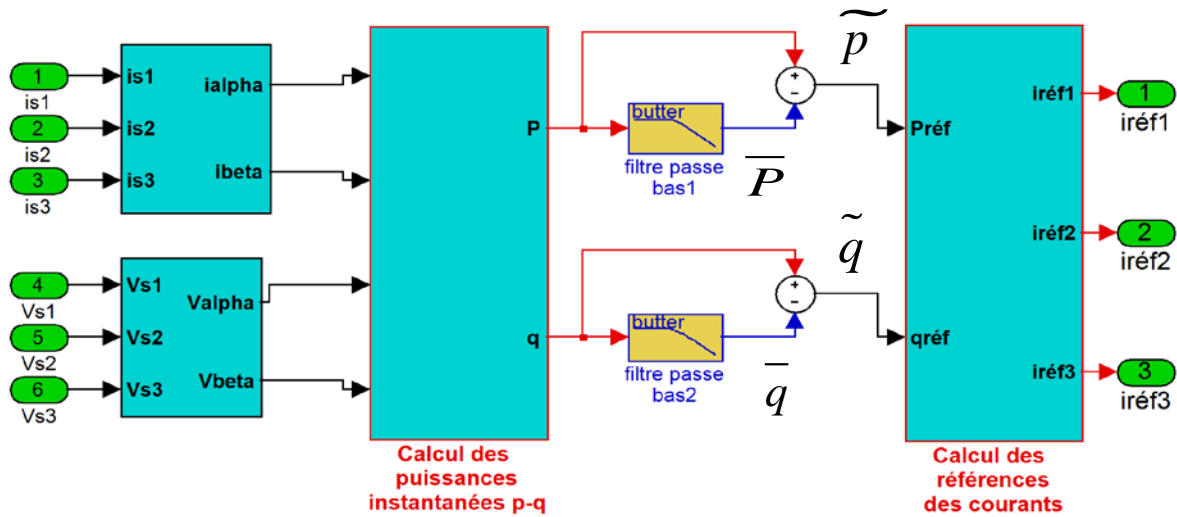
IV.4.5.1 compensation des courants harmoniques

Pour la compensation des courants harmonique on pose l'angle d'allumage $\alpha = 0^\circ$ et

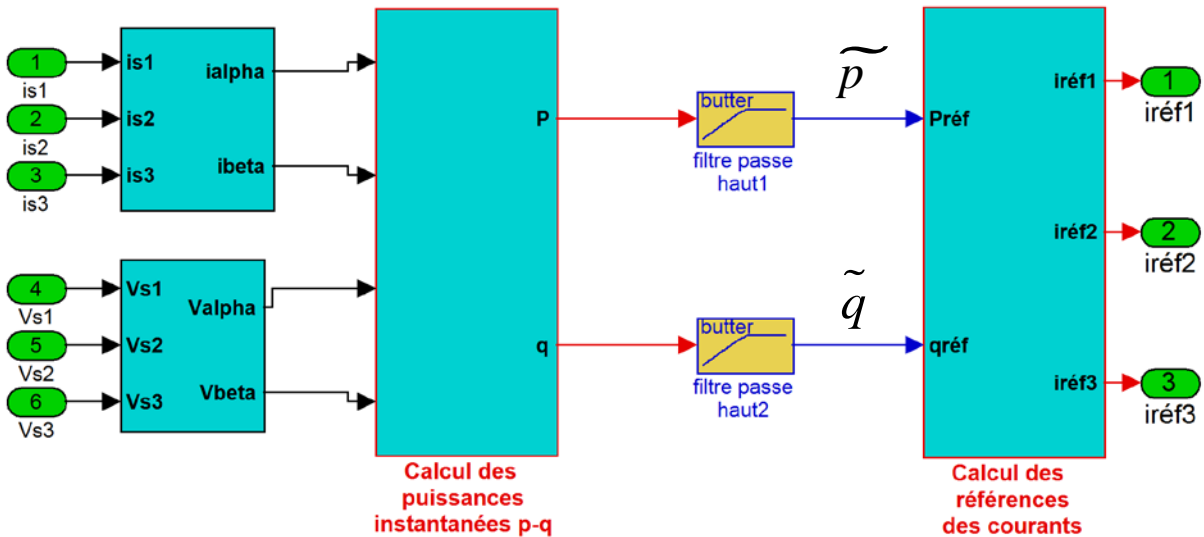
$$P_{réf} = \widetilde{p}$$

$$q_{réf} = \widetilde{q} \quad \text{Voir le tableau IV.1}$$

On simule pour deux cas (Séparation des puissances perturbatrices en utilisant deux filtres : passe haut et filtre passe bas). « Figure IV.5 »



A- utilise filtre passe haut



B- utilise filtre passe bas

Figure. IV.5 schémas de la compensation des courants harmoniques (A-B)

IV.4.5.1.1 filtre passe haut (Voir Fig. IV.5 –A)

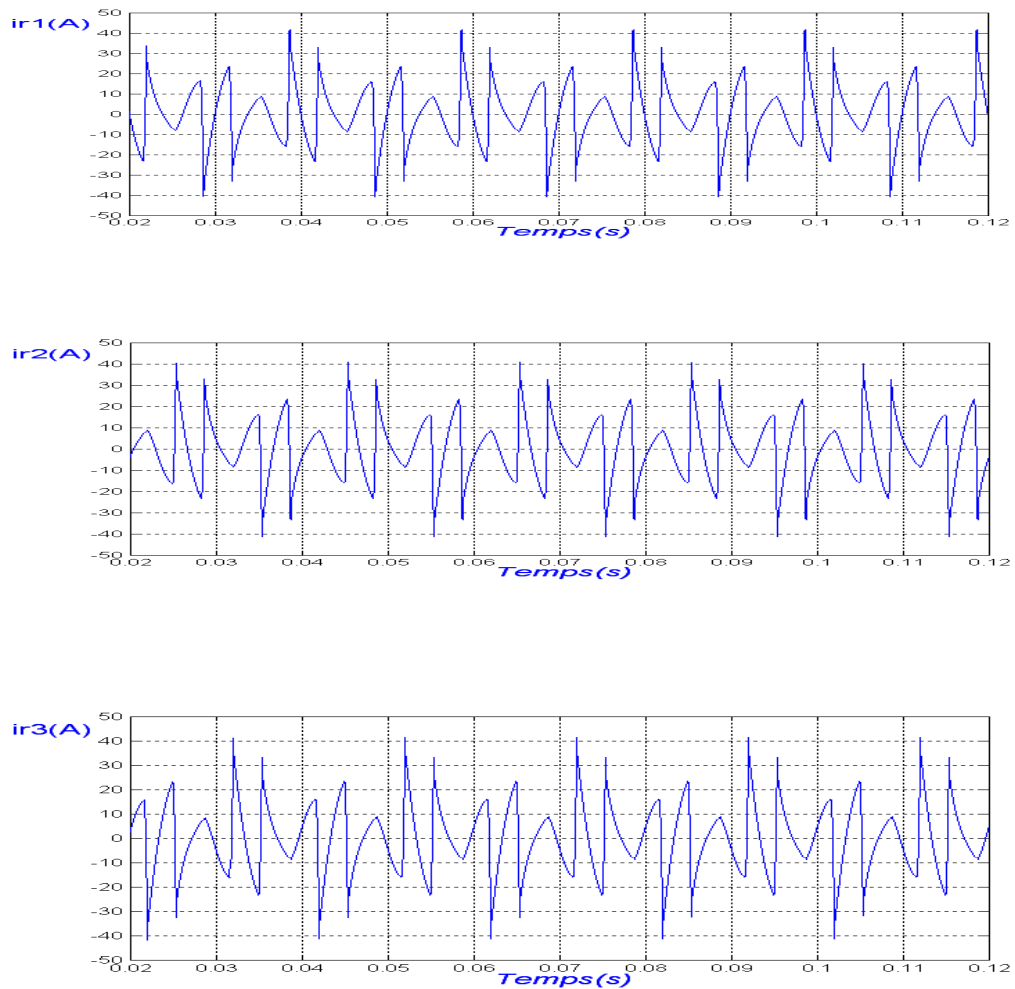


Fig. IV.6 : Courants des références déduites par la méthode des puissances Actives et réactives instantanées (p-q theory)

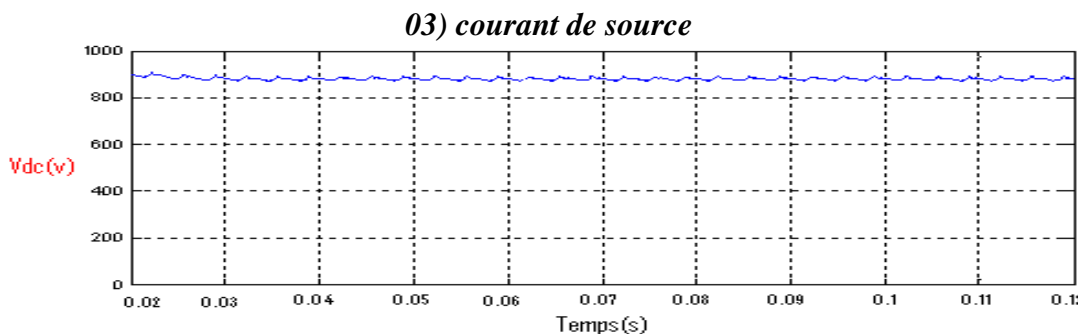
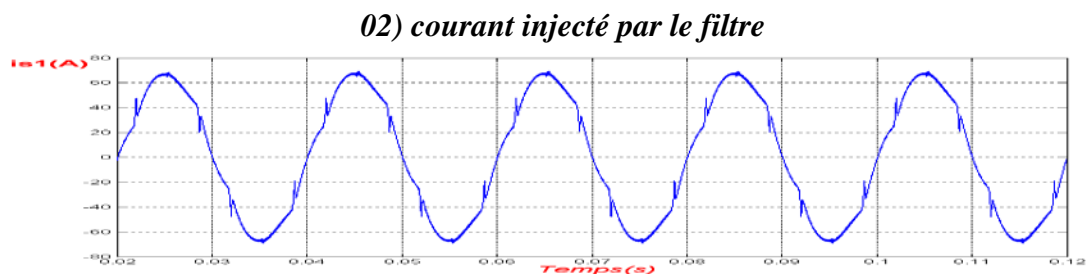
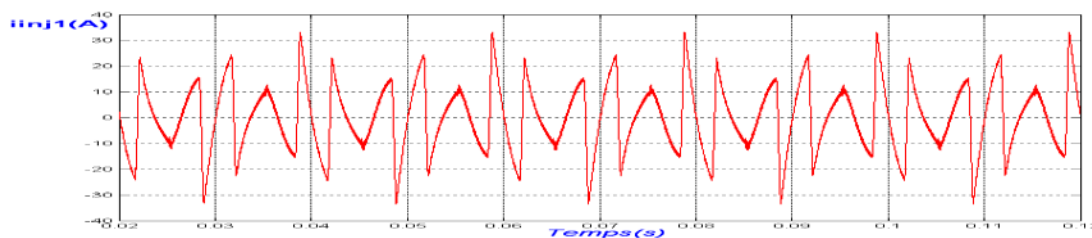
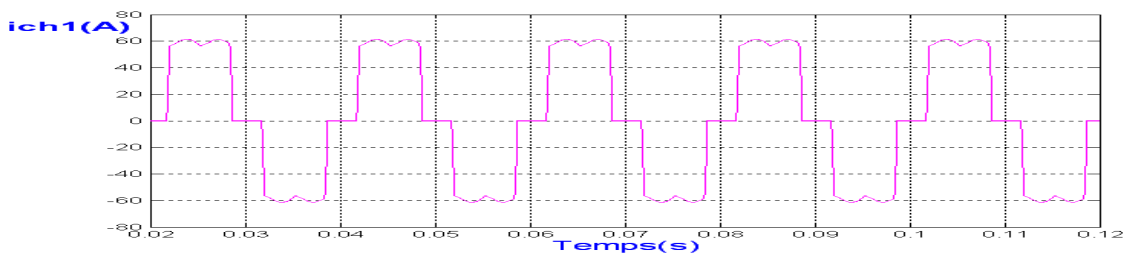
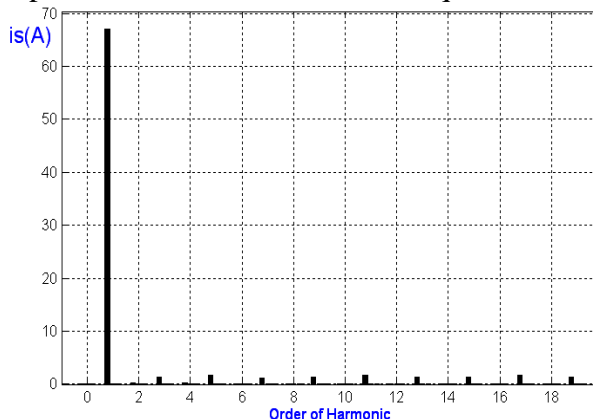
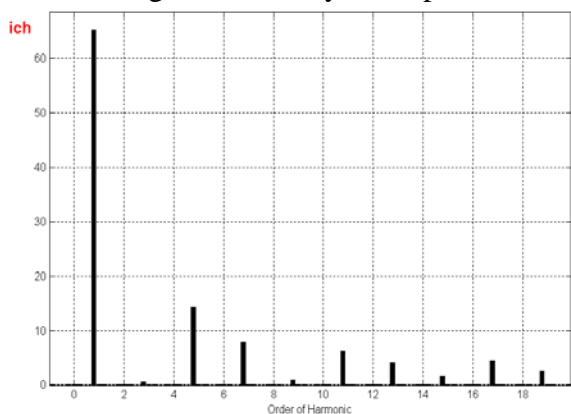


Fig. IV.7 : Analyse temporelle de la compensation des courants harmoniques



IV.8 : Analyse spectrale de la compensation des courants harmoniques

IV.4.5.1.2 filtre passe bas (Voir Fig. IV.5 –B)

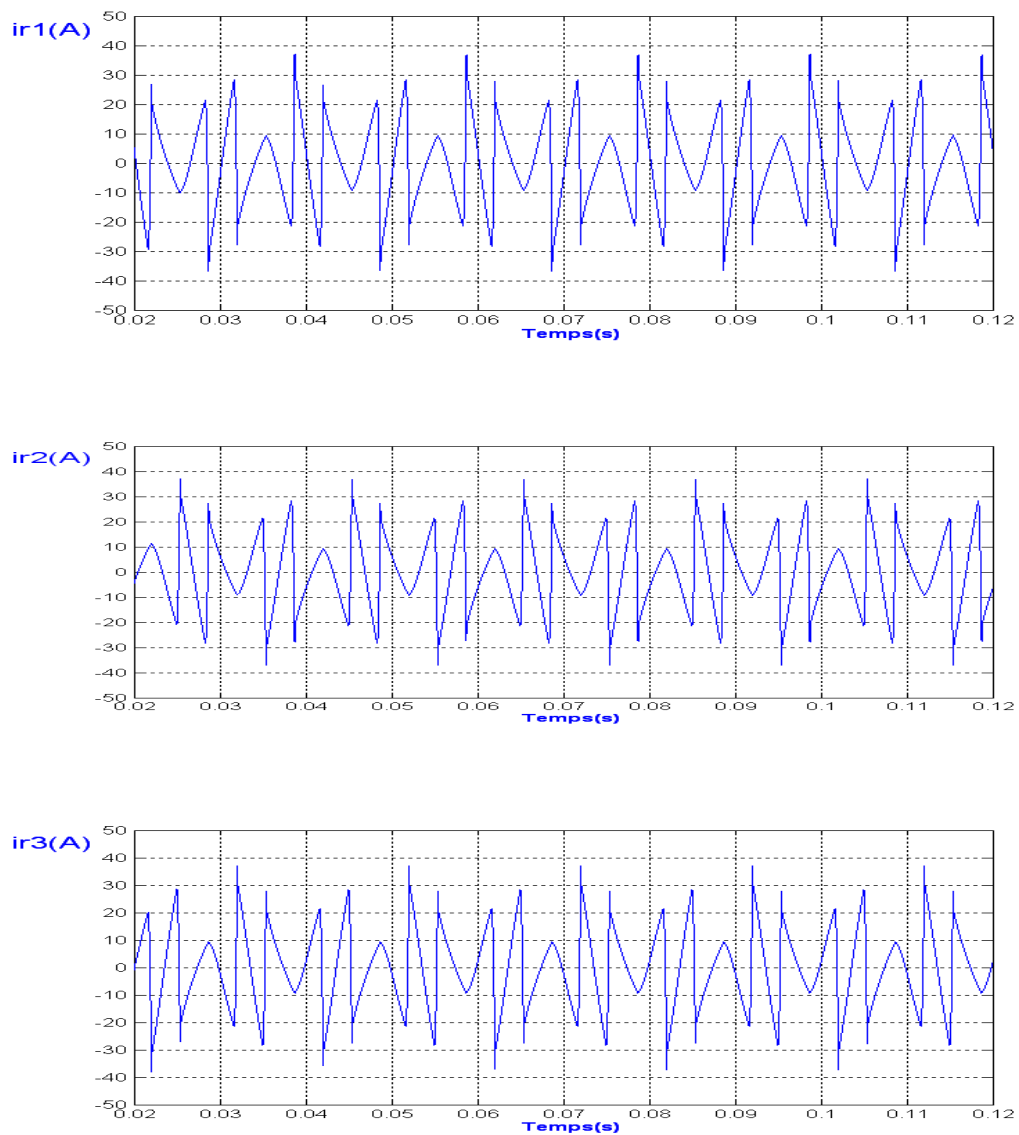


Figure.IV.9 : Courants des références déduit par la méthode des puissances Actives et réactives instantanées (p-q théorie)

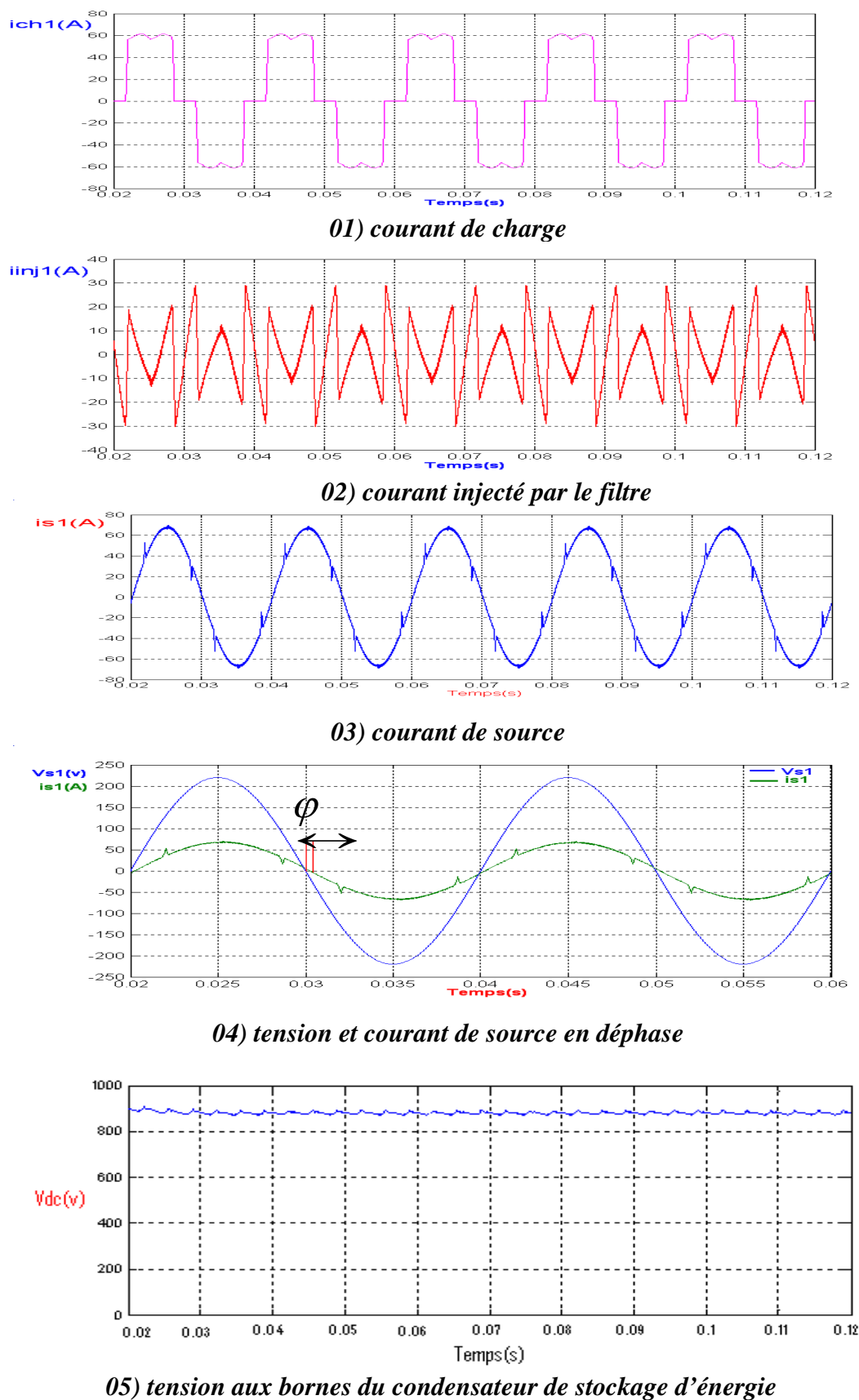
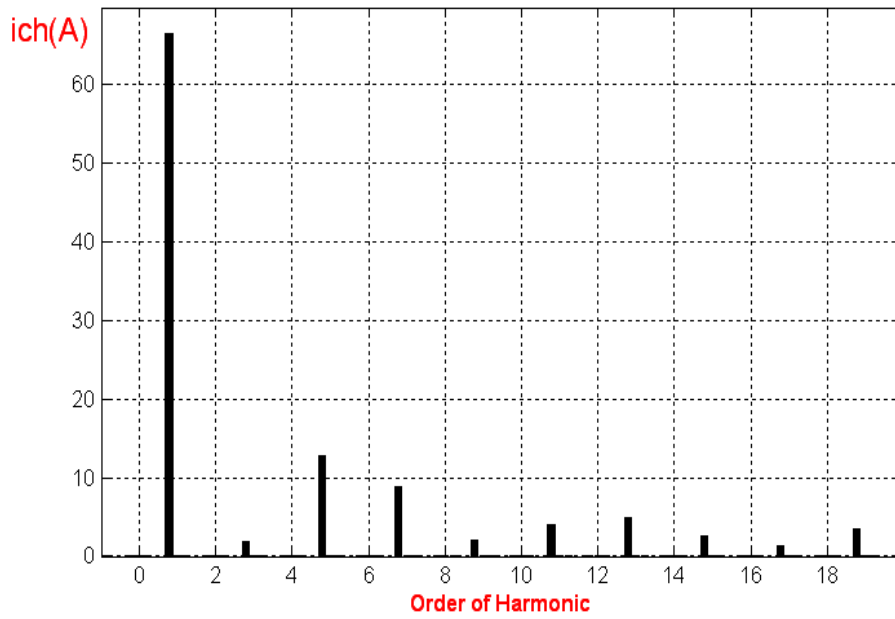
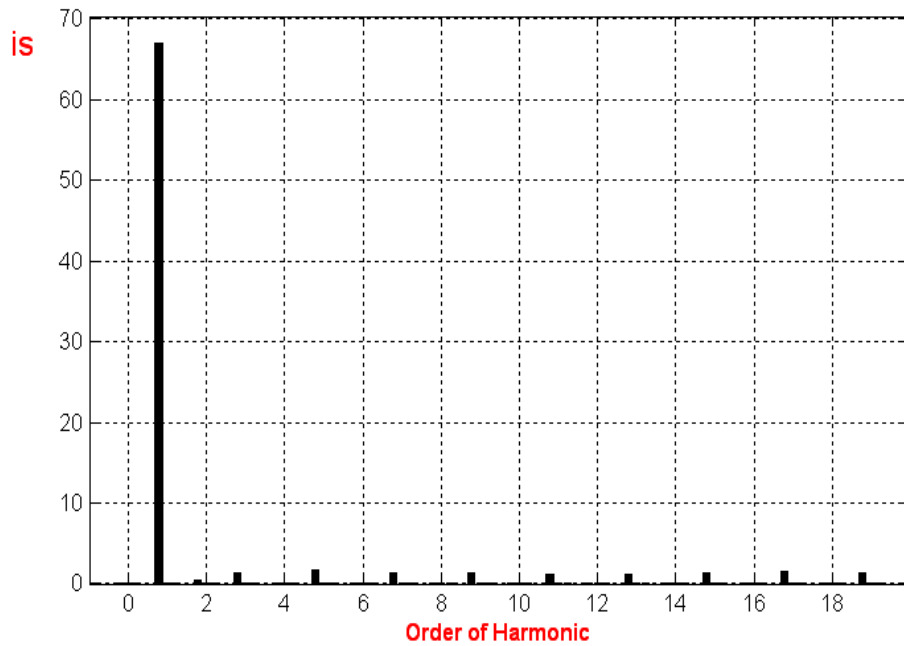


Figure. IV.10 : Analyse temporelle de la compensation des courants harmoniques



(A) : Avons la compensation THD = 28.56 %



(B) : Après la compensation THD = 4.77 %

Figure. IV.11 : Analyse spectrale de la compensation des courants harmoniques

IV.4.5.2 compensation des courants harmoniques et la puissance réactive en même temps

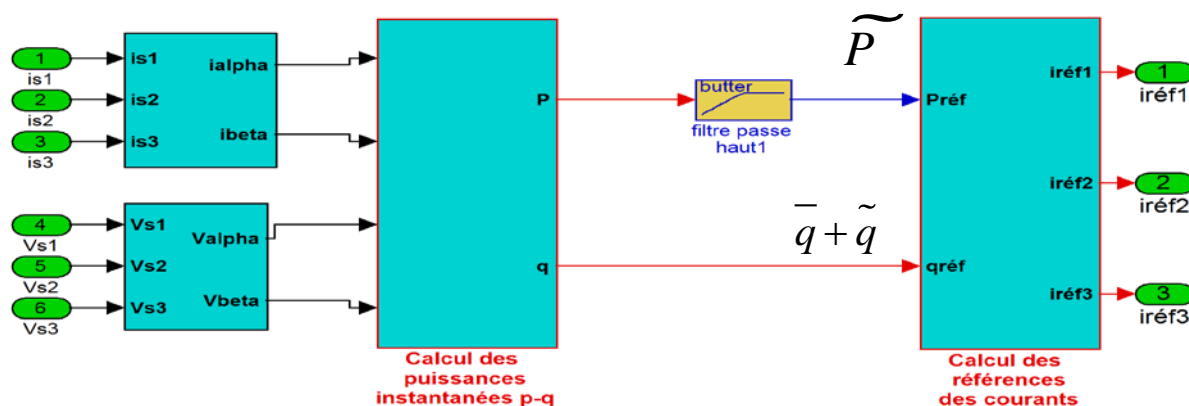
Pour la compensation des courants harmoniques et la puissance réactive en même temps on pose l'angle d'allumage $\alpha = 22.5^\circ$ [puisque dans ce cas α varie entre $\alpha = .5^\circ$ et $\alpha = 42^\circ$] Fig. IV.2 et on pose :

$$P_{réf} = \tilde{P}$$

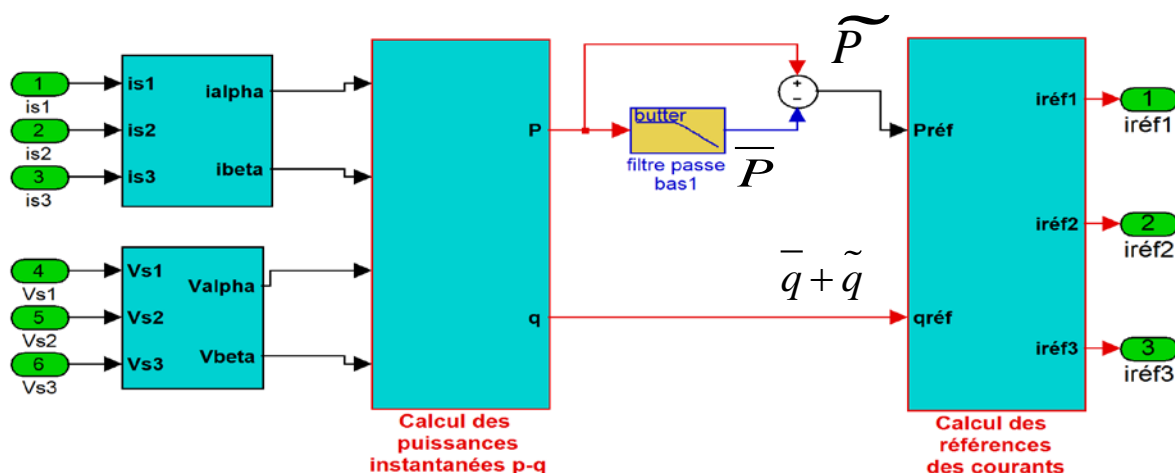
Voir le tableau IV.1

$$q_{réf} = \bar{q} + \tilde{q}$$

On simule pour deux cas (Séparation des puissances perturbatrices en utilisant deux filtres : passe haut – passe bas). « figure IV.12 »



A- utilise filtre passe haut



B- utilise filtre passe bas

Figure. IV.12 : schémas de la compensation des courants harmoniques et la puissance réactive en même temps

IV.5.2.1 filtre passe haut (Voir Fig. IV.12 –A)

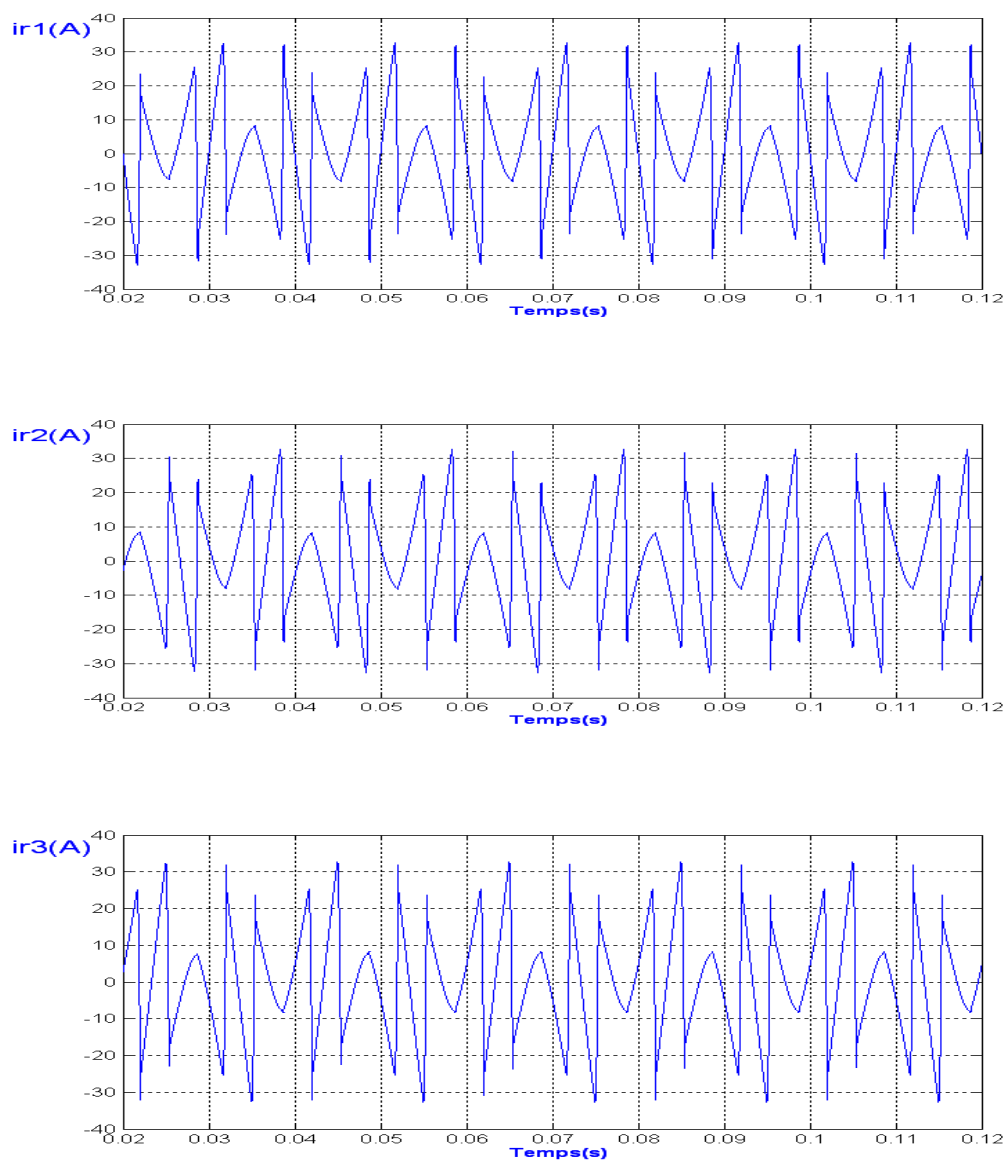
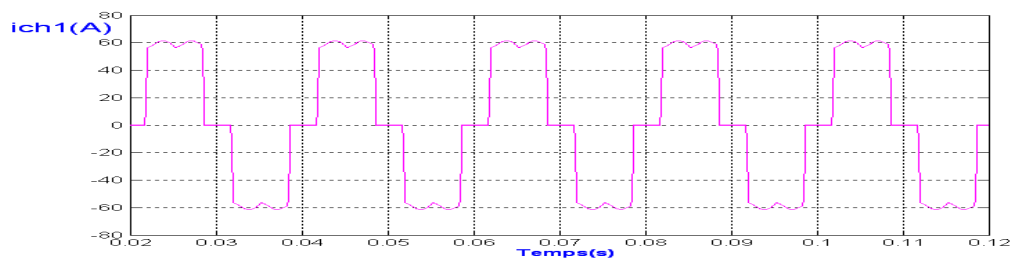
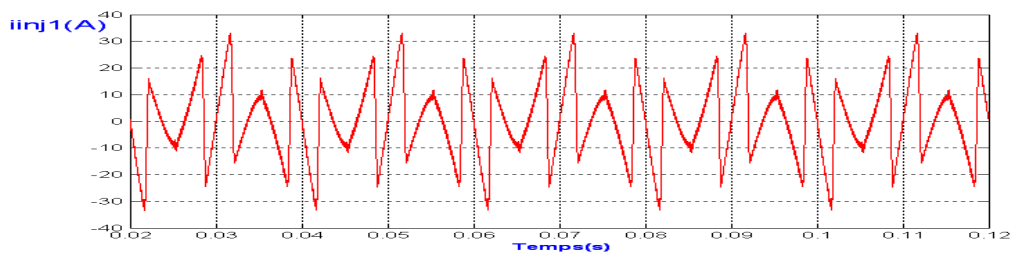


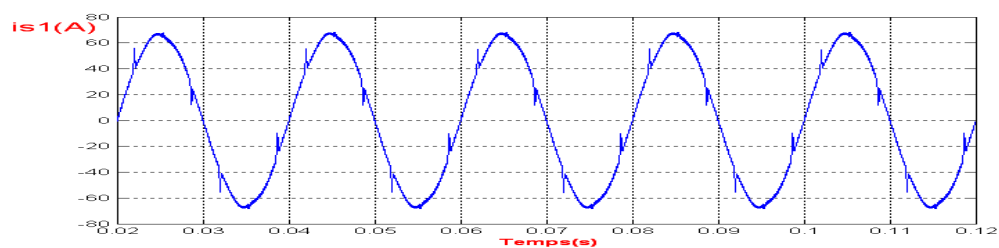
Figure. IV.13 : Courants des références déduit par la méthode des puissances Actives et réactives instantanées (p-q théorie)



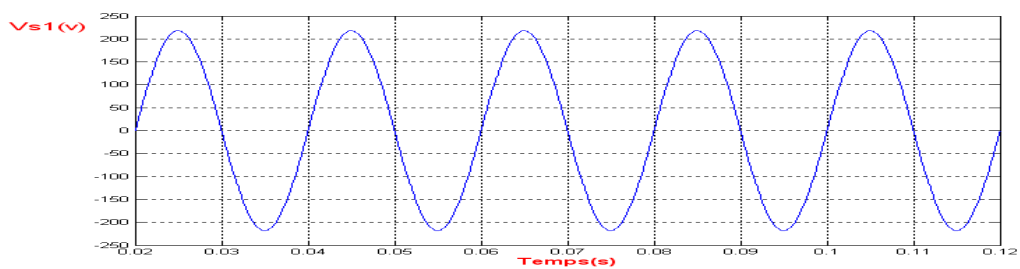
01) courant de charge



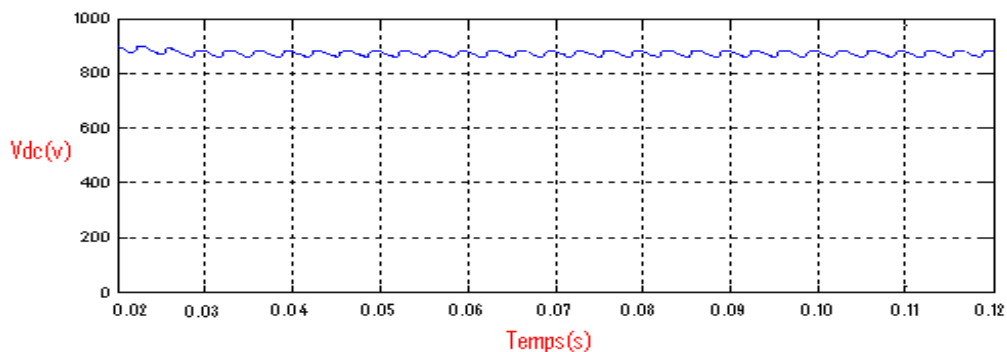
02) courant injecté par le filtre



03) courant de source

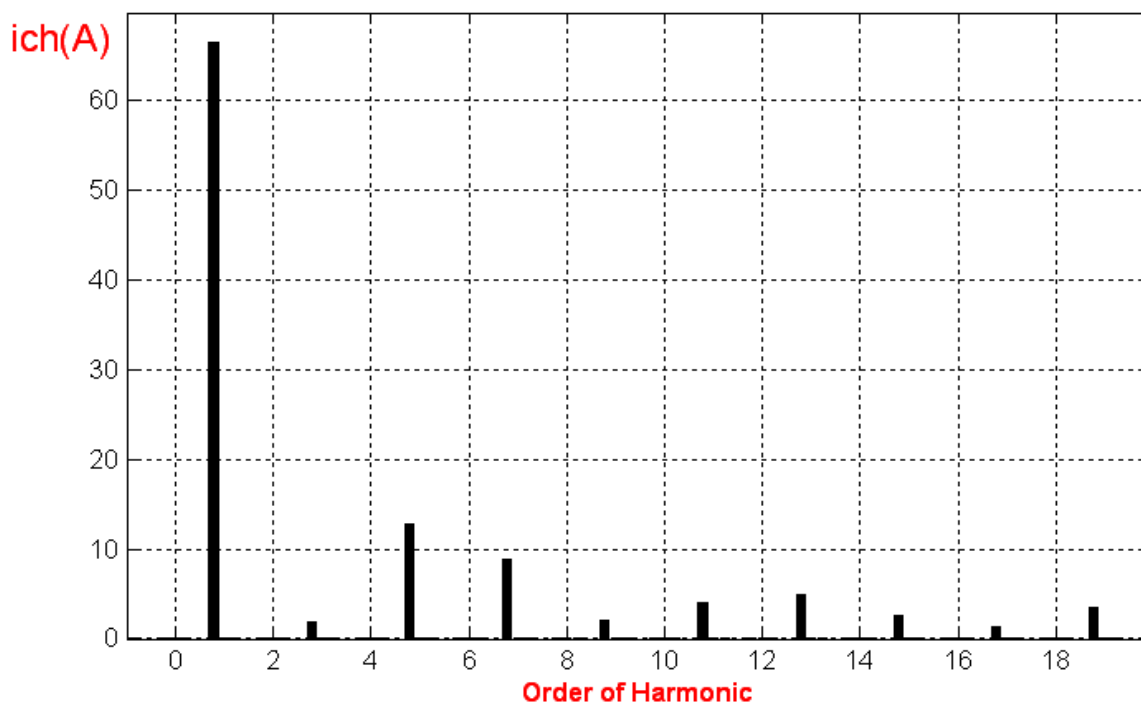


04) tension de source

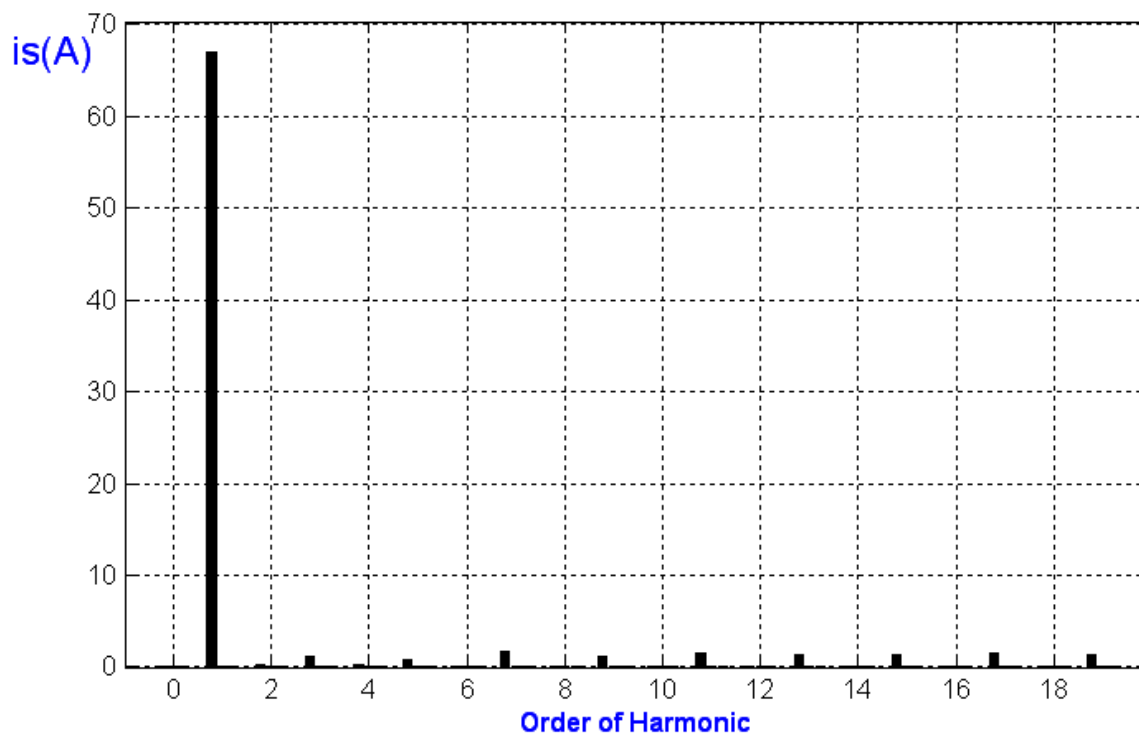


05) tension aux bornes du condensateur de stockage d'énergie

Figure. IV.14 : Analyse temporelle de la compensation des courants harmoniques et la puissance réactive en même temps



(A) : Avons la compensation THD = 28.56 %



(B) : Après la compensation THD = 4.67 %

Figure. IV.15 : Analyse spectrale de la compensation des courants harmoniques et la puissance réactive en même temps

IV.5.2.2 filtre passe bas (Voir Fig. IV.12 -B)

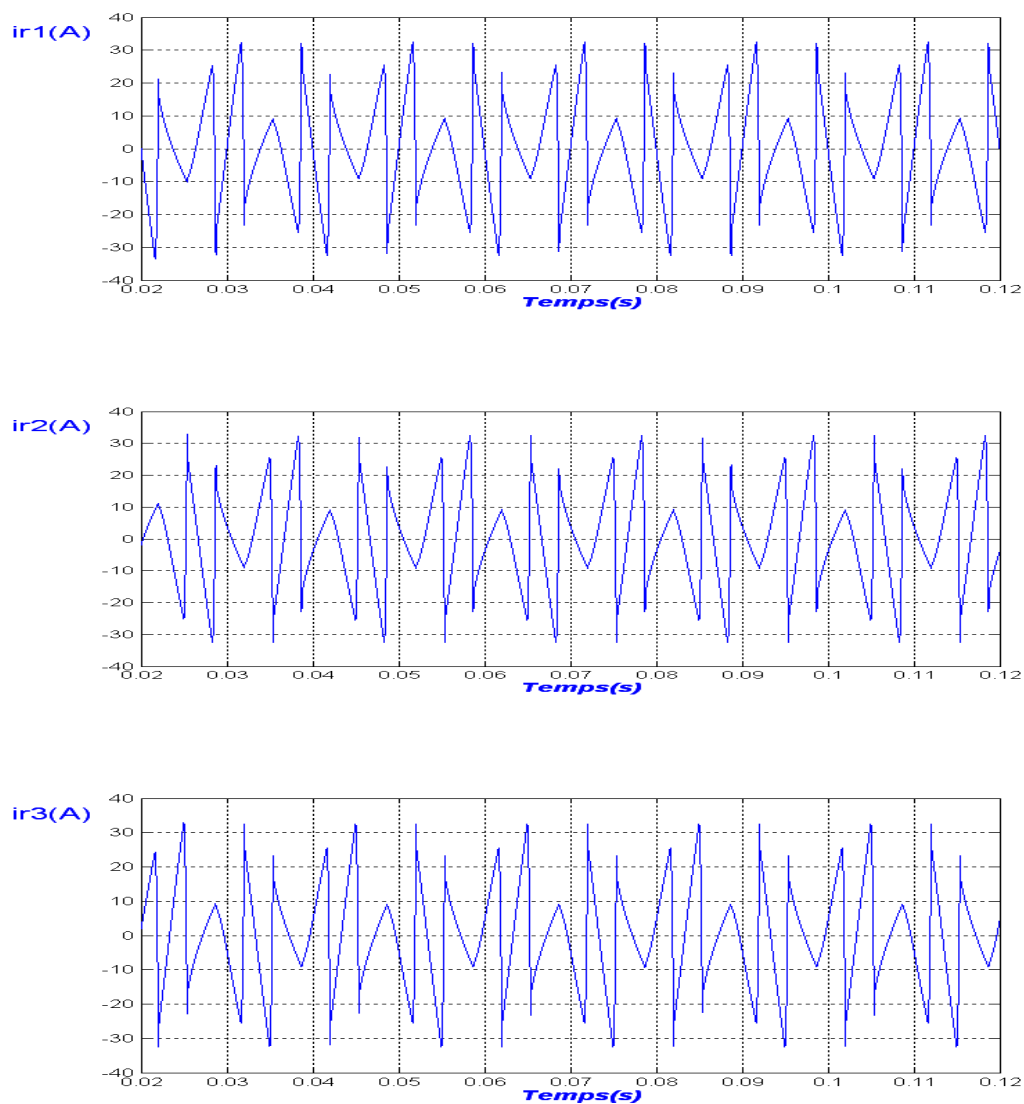
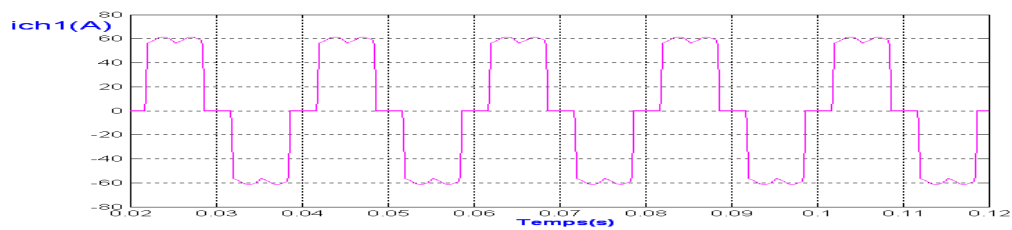
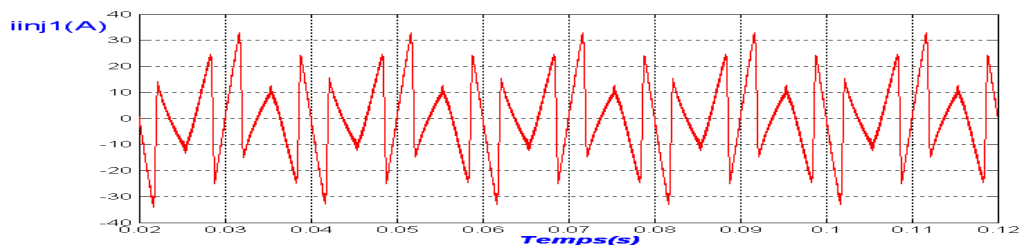


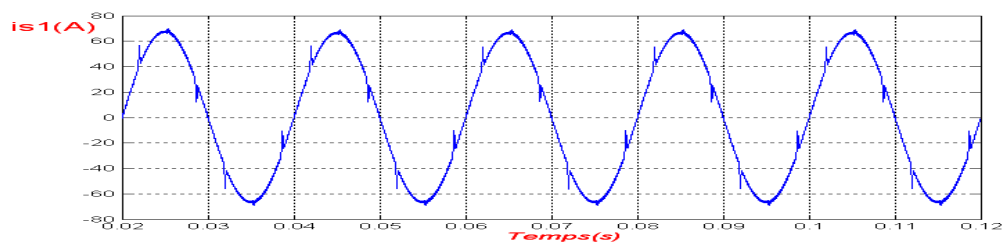
Figure. IV.16 : Courants des références déduites par la méthode des puissances Actives et réactives instantanées (p-q théory)



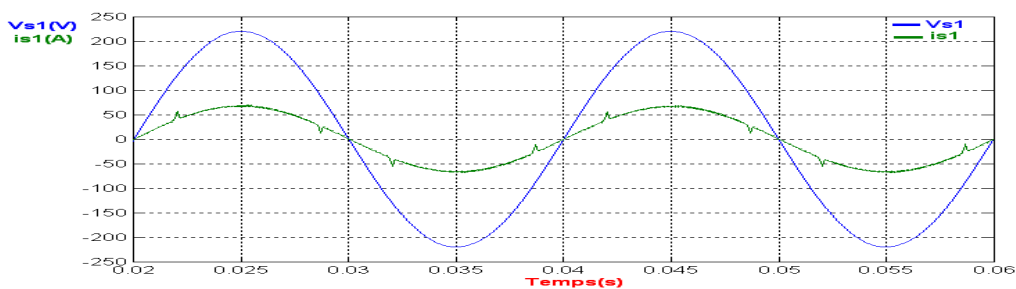
01) courant de charge



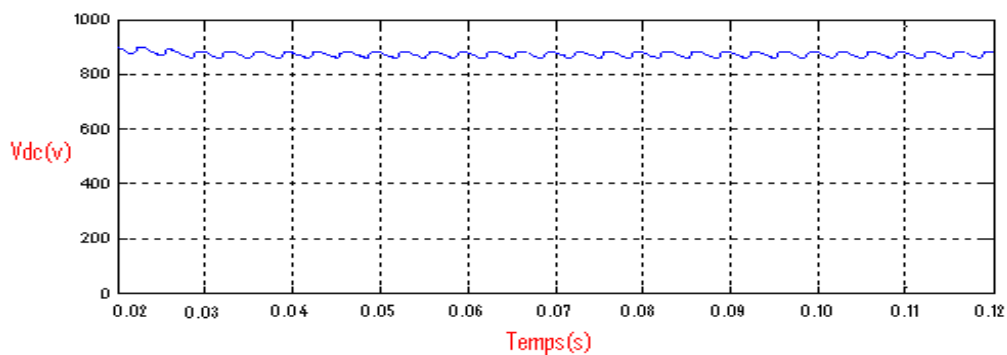
02) courant injecté par le filtre



03) courant de source

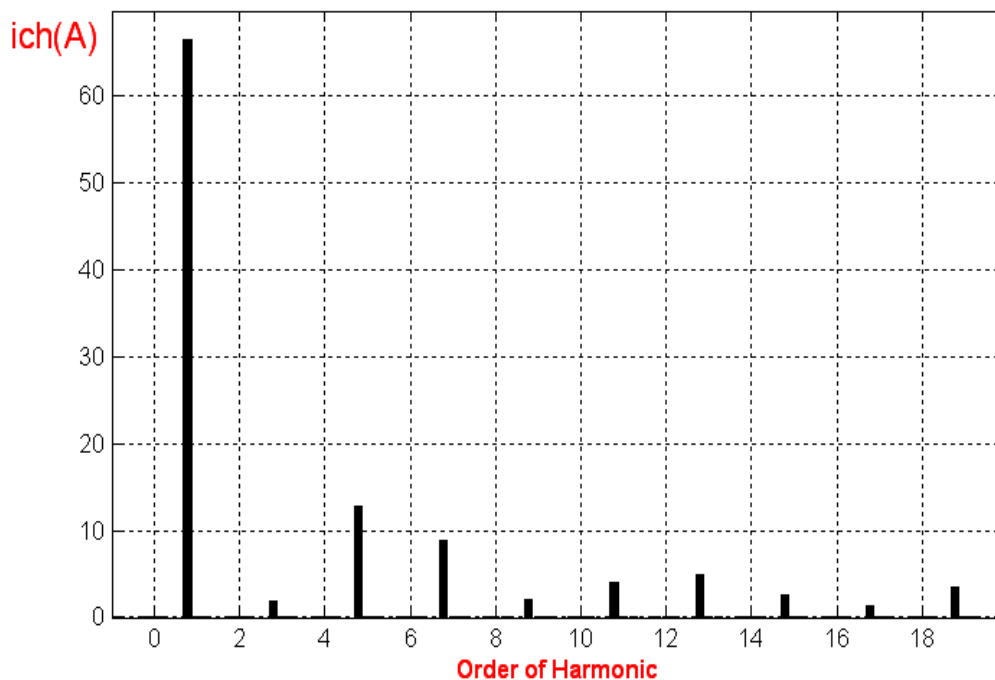


04) tension et courant de source en phase

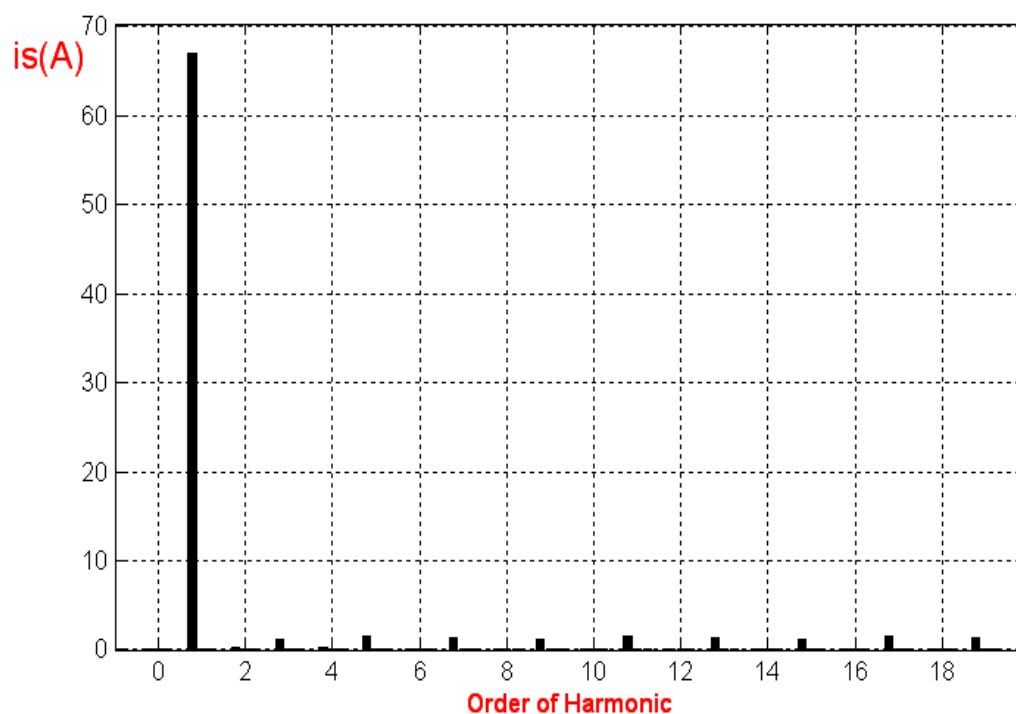


05) tension aux bornes du condensateur de stockage d'énergie

Figure. IV.17 : Analyse temporelle de la compensation des courants harmoniques et la puissance réactive en même temps



(A) : Avons la compensation THD = 28.56 %



(B) : Après la compensation THD = 4.52 %

Figure. IV.18 : Analyse spectrale de la compensation des courants harmoniques et la puissance réactive en même temps

IV.5.3. Analyse des résultats :

Les Fig. IV.6, IV.9 illustre les courants de référence identifiés par la méthode des puissances actives et réactives instantanées provoqués par la charge perturbatrice dans le cas de la compensation des courants harmoniques.

Les Fig. IV 14, IV 17 illustre les courants de référence identifiés par la méthode des puissances actives et réactives instantanées provoqués par la charge perturbatrice dans le cas de la compensation des courants harmoniques et la puissance réactive en même temps.

Les Fig. IV.7, IV.10 présente l'analyse temporelle de la phase 1 du courant de la charge (i_{ch1}), du courant injecté par l'onduleur de tension ($iinj1$) et du courant du réseau après filtrage ($is1$) dans le cas de la compensation des courants harmoniques.

Les Fig. IV 15, IV 18 présente l'analyse temporelle de la phase 1 du courant de la charge (i_{ch1}), du courant injecté par l'onduleur de tension ($iinj1$) et du courant du réseau après filtrage ($is1$) dans le cas de la compensation des courants harmoniques et la puissance réactive en même temps.

Les Fig. IV.8, IV.11 présente l'analyse spectrale du courant de la phase 1 de la charge non linéaire et celui du réseau après filtrage pour la compensation des courants harmoniques dans les deux cas :

01) filtre passe haut : Le THD du courant de la charge est de 28.56% avant filtrage et celle du réseau après compensation est de 5.55% ce qui confirme la bonne qualité de filtrage remarquée dans l'analyse temporelle.

02) filtre passe bas : Le THD du courant de la charge est de 28.56% avant filtrage et celle du réseau après compensation est de 4.77% ce qui confirme la bonne qualité de filtrage remarquée dans l'analyse temporelle. La réduction relative du THD par rapport au cas précédent est due au filtre passe bas ; puisque le filtre passe haut présente une amplification aux fréquences et un résidu harmonique plus important aux fréquences élevées.

Les Fig. IV.16, IV.19 présente l'analyse spectrale du courant de la phase 1 de la charge non linéaire et celui du réseau après filtrage pour la compensation des courants harmoniques et la puissance réactive en même temps dans les deux cas :

01) filtre passe haut : Le THD du courant de la charge est de 28.56% avant filtrage et celle du réseau après compensation est de 4.67% ce qui confirme la bonne qualité de filtrage remarquée dans l'analyse temporelle.

02) filtre passe bas : Le THD du courant de la charge est de 28.56% avant filtrage et celle du réseau après compensation est de 4.52% ce qui confirme la bonne qualité de filtrage remarquée dans l'analyse temporelle. La réduction relative du THD par rapport au cas précédent est due au filtre passe bas ; puisque le filtre passe haut présente une amplification aux fréquences et un résidu harmonique plus important aux fréquences élevées.

| | | Fondamental | 5 ^{ème} har | 7 ^{ème} har | 11 ^{ème} har | 13 ^{ème} har | 17 ^{ème} har | THD (%) |
|--|--------------------|--------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------|
| Cas 1 Filtre passé haut | Avant compensation | 64.81 | 14.94 | 7.68 | 7.02 | 4.14 | 5.44 | 28.56 % |
| | Après compensation | 67.08 | 1.64 | 1.37 | 1.17 | 1.18 | 1.53 | 5.55 % |
| Cas 2 Filtre passé bas | Avant compensation | 64.81 | 14.88 | 7.70 | 6.94 | 4.13 | 5.35 | 28.56 % |
| | Après compensation | 67.08 | 1.74 | 1.22 | 1.71 | 1.40 | 1.73 | 4.77 % |

Tableau. IV.2 : Valeur des harmoniques avant et après compensation (compensation des courants harmoniques)

| | | Fondamental | 5 ^{ème} har | 7 ^{ème} har | 11 ^{ème} har | 13 ^{ème} har | 17 ^{ème} har | THD (%) |
|--|--------------------|--------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------|
| Cas 1 Filtre passé haut | Avant compensation | 64.88 | 14.86 | 7.71 | 6.91 | 4.13 | 5.32 | 28.56 % |
| | Après compensation | 66.97 | 0.86 | 1.79 | 1.50 | 1.36 | 1.57 | 4.67 % |
| Cas 2 Filtre passé bas | Avant compensation | 64.88 | 14.85 | 7.71 | 6.91 | 4.13 | 5.31 | 28.56 % |
| | Après compensation | 66.97 | 1.51 | 1.36 | 1.54 | 1.34 | 1.56 | 4.52 % |

Tableau. IV.3 : Valeur des harmoniques avant et après compensation (compensation des courants harmoniques et la puissance réactive en même temps)

IV.6.Conclution

Ce chapitre est consacré à l'étude de la puissance apparente du filtre actif et à la séparation de la puissance perturbatrice ; pour montrer comment utiliser la compensation des courants harmoniques tout seuls et avec la puissance réactive en même temps. La deuxième partie de ce chapitre est réservée à la simulation par MATLAB-SUMILINK (power system) de l'ensemble réseau, charge non linéaire, filtre actif parallèle ainsi que la méthode d'identification des courants des références (courants harmoniques).

La simulation est réalisée par deux cas ; avec filtre passe haut et filtre passe bas pour la compensation des courants harmoniques tout seuls et en suite pour la compensation des courants harmoniques et la puissance réactive en même temps.

La simulation est réalisé par testé le schéma proposé et validé les résultats obtenus, Concernant les résultats obtenus sont très satisfont une THD inférieur à 5% et le courant et tension de source sont en phase.

Conclusion générale

Dans ce travail nous avons montré que le filtre actif peut compenser les harmoniques et la puissance réactive simultanément. L'efficacité de cette méthode de compensation dépend de la méthode d'identification du courant harmonique et les schémas de régulation utilisés pour contrôler le courant harmonique et la tension continue de l'onduleur. La méthode employée pour l'identification est la méthode pq des puissances. Concernant la génération des signaux de commande MLI est utilisée avec comme référence le courant harmonique identifié par la méthode pq . Le choix des schémas de régulation des deux paramètres ; la tension continue et le courant harmonique est très important pour l'auto-adaptivité du filtre actif aux variations de la charge. Les résultats obtenus ont montrés l'efficacité des schémas de régulation présentés, un taux d'harmoniques inférieur à 5% et la tension et le courant de source sont en phase.

Les futures travaux vont s'orientés vers d'autre techniques de commande des onduleurs des filtres actif plus performante tel que les onduleurs multi-niveaux commandé par MLI vectorielle et l'implantation des algorithmes de commandes dans les microcontrôleurs.

Pour la régulation, les régulateurs à logique floue qui ne nécessite pas de model mathématique, ainsi que les régulateurs PI seront étudiés et comparés dans les prochains travaux pour améliorer le temps de réponse du système.

Référence bibliographique

- [1] P.Meynaud " Qualité de la tension dans les réseaux électrique – creux de tension, flicker et harmonique " ,Technique de l'ingénieur ,traité génie électrique , D4260, pp.1-25,1990.
- [2] C.Fetha, « Analysis of Essential index on Electric Energy Quality In the case of Voltage Dips and Interruption », JEE, Vol.2, No.4, 2004.
- [3] P.Meynaud , P.Pene,G.desquilbet , « Déséquilibre de tension » Notes EDF, 96NR00003,1996
- [4] M.A.Alali, « Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension (Automation des systèmes de puissance électriques) » Thèse de doctorat de l'université Louis Pasteur- Strasbourg I, Strasbourg Septembre 2002.
- [5] D.ould Abdeslam. « Techniques neuromimétriques pour la commande dans les systèmes électrique,Application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électrique basse tension » Thèse de doctorat de l'université de HAUTE-ALSACE. Décembre 2005.
- [6] Ch.SERAUDIE, « Surtensions et parafoudres en BT- coordination de l'isolement BT » CTn°179,Sept 1995.
- [7] D.FULCHIRON, « Surtensions et coordination de l'isolement »,CTn°151, Fev 1995.
- [8] R.CALVAS, « Les perturbations électriques en BT »,CTn°141, Mai 2000.
- [9] Power quality courses,the Belgium Laboratory of the Electricity Industry, Laboralec 2003.
- [10] Mekri Fatiha . « Etude Et commande d'un filtre actif parallèle à structure tension » Thèse de magister. Octobre 2001 « université d'Oran » Mohamed boudiaf.
- [11] J.SCHONEK, « Low voltage hybrid harmonic filters,technical- economic analysis » power quality,1999.
- [12] D.KOCH, « Manœuvre et protection des batteries de condensateurs MT» ,CTn°189,jun1997.
- [13] E.BETTEGA,J.N.FIORINA, « Harmonique :convertisseurs propres et compensateurs actifs »,CTn°183,Jan 2000.
- [14] T.Deflandre, P.Mauras, « Les harmonique sue les réseaux électriques », Edition Eyrolles,1998

- [15] S.Bernard, G.Eescriva « Surcoût engendrée par les harmoniques et économique réalisées grâce à la compensation active ».
- [16] IONE TXEBERRIA-OTADUI « sur les systèmes de l'électronique de puissance dédiés à la distribution électrique-application à la qualité de l'énergie » Thèse de doctorat , l'institut national polytechnique de grenoble avec le « label européen »
- [17] F.Labrique ,H.Bayse,G.seguier,R.bausiere. « commande et comportement dynamique » Londers new yourk .paris 1998.
- [18] F.Labrique, R.bausiere « La convesion continu-alternatif » Londers new yourk paris 1992.
- [19] SKIM, N. njeti. « Anew hybrid active power filtre (APF) topology » iee Transon power electronic Vol.17,N°.2,2002.
- [20] P.La doux,G.ollé « Compensateur d'harmonique et de puissance réactive » publication RESELEC 2002.
- [21] M.Aredes ,K.Heumann. « three phase four wire shunt active filter control strategies » ieee Trans .on power electronic , Vol.12,N°.2,1997.
- [22] M.Rivoire,J-L.Ferrier . « Matlab , simulink, state flow » Edition Technik paris 2001.
- [23] J.N.FIORINA « onduleurs et harmoniques (cas des charges non linéaires) » cahier Technique Merlin Gerin N°160,Jun 1992.
- [24] ZELLOUMA Laid, Mémoire de Magistère, Filtrage actif parallèle du courant généré par un pont redresseur triphasé non commandé, Département de l'électrotechnique Université de Annaba, 2006.
- [25] L. Merabet, S. Saad et A. Omeiri «Compensation des courant harmoniques par filtre actif parallèle » Revue synthèse N°14 Juin 2005.
- [26] H. Akagi « New trends in active power filter». in proc. EPE '95, 1995, vol, 0, pp, 17-26..
- [27] H. Akagi, Y , Kanazawa and A, Nabae «generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits» in proceedings of the 1985 international power electronics conference, Tokyo, Japan,pp,1375-1386,1983.