



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued
Faculté de Technologie

Mémoire de Fin d'Étude
En vue de l'obtention du diplôme de
MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Génie Électrique
Spécialité : Commande Electrique

Thème

**Commande Prédictive du Filtre
Actif Parallèle à Trois Niveaux sur
un Réseau Fortement Perturbé**

Présenté par :

KEDIDA Brahim

LEBBA Lahcen

LEKHOUIMS Faicel

Proposé et dirigé par :

Pr. MESBAHI Nadhir

Soutenu en Juin 2022

Remerciements

*Tout d'abord, c'est avec la plus grande gratitude que je remercie mon directeur de mémoire, Professeur **MESBAHI Nadhir** de l'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued, pour la confiance qu'il m'a accordée et pour m'avoir soutenu tout au long de mes travaux. Ce travail n'aurait pas pu être terminé sans l'aide et le soutien du Professeur **MESBAHI Nadhir**.*

Je présente mes remerciements les plus sincères pour les membres du jury qui m'ont fait l'honneur d'évaluer ce travail.

Je tiens à remercier tous les professeurs, le personnel du département de génie électrique, et mes collègues, qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire et à toute personne ayant contribué de près ou de loin à ce travail.

Résumé

Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique dans les réseaux triphasés alimentant des charges non linéaires sous différentes conditions de tensions de la source. L'objectif visé est l'élaboration d'une nouvelle stratégie de commande d'un filtre actif parallèle à trois niveaux basée sur le concept de la commande prédictive pour remédier aux problèmes causés par la commande classique. Le principe de la commande prédictive à modèle repose sur l'utilisation d'un modèle de prédiction permettant de prédire le comportement du système pour chaque état de commutation de l'onduleur à trois niveaux. Les résultats de simulation sont présentés pour évaluer les performances de la commande proposée. Cette commande permet de réduire nettement le taux global de distorsion harmonique et équilibrer la tension de condensateur du bus continu.

Mots clés :

- Pollution harmonique
- Réseau perturbé
- Filtre actif parallèle
- Onduleur à trois niveaux
- Commande prédictive

ملخص

يهدف هذا العمل إلى تحسين نوعية الطاقة الكهربائية في الشبكات ثلاثية الطور التي تغذي الحملات غير الخطية سواء كانت الشبكة متوازنة أو مضطربة . في هذا البحث قدمنا مراجعة لتقنية التحكم التنبؤي المعتمد على النموذج الرياضي ، و تم تطبيق هذه التقنية على مرشح فعال متوازي ذو ثلاث مستويات . تؤكد نتائج المحاكاة المتحصل عليها مدى نجاعة التقنية المقترحة و ذلك من خلال التخفيض من معدل تشويه التيار التوافقي و موازنة التوتر المستمر للمرشح .

كلمات مفتاحية :

- التلوث بالتوافقيات
- الشبكة المضطربة
- المرشح الفعال المتوازي
- المموج ذو ثلاث مستويات
- التحكم التنبؤي

Liste des Tableaux

Tableaux du Chapitre I

1. Limites des composantes harmoniques en courant.....	10
--	----

Tableaux du Chapitre II

1. Obtention des trois niveaux de tension en fonction des états des interrupteurs.....	24
2. Etats des commutateurs et des vecteurs correspondants.....	28

Tableaux du Chapitre III

1. Paramètres de simulation d'un filtre actif à trois niveaux	42
---	----

Liste des Figures

Figures du Chapitre I

1. Modélisation d'une charge non-linéaire.....	6
2.a. Relèves des formes d'ondes tension-courant pour un pont PD3 diodes sur charge $R-L$...	9
2.b. Relèves des formes d'ondes tension - courant pour un pont PD3 diodes sur charge $R-C$ parallèle.....	9
3. Raccordement d'un filtre passif.....	12
4. Filtre passif.....	13
5. Filtre passif amorti.....	13
6. Filtre passif parallèle anti- résonance.....	14
7. Filtre actif série.....	15
8. Filtre combiné parallèle-série	15
9. Filtre actif série avec un filtre passif parallèle.....	16
10. Filtre actif hybride.....	16

Figures du Chapitre II

1. Schéma synoptique de l'association réseau-compensateur actif –charge.....	19
2. Schéma synoptique d'un réseau triphasé.....	20
3. Redresseur à diodes (pont de Graëtz) avec charge $R-L$	20
4. Tension redressée et tensions triphasées au point de connexion du redresseur.....	21
5. Allure de courant de la charge (phase a).....	22
6. Spectre harmonique du courant de la charge.....	22
7. Circuit de puissance du filtre actif parallèle à trois niveaux proposé	22
8. Vecteurs de tension et états de commutation possibles générés par un onduleur à trois niveaux.....	26

Figures du Chapitre III

1. Schéma représentant le principe de séparation des puissances	33
2. Schéma de principe de la méthode d'identification des puissances instantanées	33
3. Schéma bloc du <i>FMV</i>	35

4. Schéma de principe de la méthode d'identification des puissances instantanées modifiée.....	35
5. Schéma de la commande prédictive d'un filtre actif parallèle à trois niveaux.....	39
6. Performances de la compensation des harmoniques par la méthode $p-q$ (tensions de source sinusoïdales équilibrées).....	43
7. Spectre harmonique du courant de source avant compensation et spectre harmonique du courant de source après compensation (méthode $p-q$).....	44
8. Performances de la compensation des harmoniques par la méthode $p-q$ modifiée (tensions de source sinusoïdales équilibrées).....	45
9. Spectre harmonique du courant de source avant compensation et spectre harmonique du courant de source après compensation (méthode $p-q$ modifiée)	46
10. Tensions aux bornes des deux condensateurs.....	46
11. Performances de la compensation des harmoniques par les méthodes $p-q$ et $p-q$ modifiée (tensions de source sinusoïdales déséquilibrées)	48
12. Performances de la compensation des harmoniques par les méthodes $p-q$ et $p-q$ modifiée (tensions de source équilibrées contenant des harmoniques)	49

Liste des Symboles et Notations

Symboles

h	Rang de l'harmonique
e_{sa}, e_{sb}, e_{sc}	Tensions instantanées simples du réseau
v_{sa}, v_{sb}, v_{sc}	Tensions instantanées au point de couplage
i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}	Courants débités par le réseau
i_{ca}, i_{cb}, i_{cc}	Courants de charge
i_{α}, i_{β}	Courants de charge dans le plan (α, β)
i_a^*, i_b^*, i_c^*	Courants de référence
$i_{inja}, i_{injb}, i_{inj c}$	Courants du filtre
R_s	Résistance du réseau
L_s	Inductance du réseau
R_f	Résistance du filtre de sortie
L_f	Inductance du filtre de sortie
C	Capacité de stockage
v_{dc}	Tension continue du bus continu
p	Puissance active
q	Puissance réactive
S	Puissance apparente
D	Puissance déformante
v_{dcref}	Tension continue de référence
S_{ki}	Fonction de commutation
T_s	Période d'échantillonnage

Notations

FMV	Filtre Multi-Variable
FP	Facteur de Puissance
FPB	Filtre Passe-Bas
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
NPC	Neutral Point Clamped
APF	Active Power Filter
THD	Total Harmonic Distortion

Sommaire

Introduction Générale	1
I. Perturbations des Réseaux Electriques et Solutions de Dépollution.....	3
I.1. Introduction	4
I.2. Qualité de l'énergie électrique.....	4
I.2.1. Perturbations des réseaux électriques.....	5
I.2.2. Origine des harmoniques	5
I.2.3. Effets des perturbations harmoniques	6
I.2.4. Caractérisation des perturbations harmoniques	7
I.2.4.1. Le taux de distorsion harmonique	7
I.2.4.2. Le facteur de puissance	7
I.2.5. Généralités sur l'analyse harmonique	8
I.2.6. Génération des harmoniques et inter-harmoniques.....	9
I.2.7. Normes et réglementations	10
I.3. Réduction de la pollution harmonique.....	11
I.3.1. Absorption sinusoïdale	11
I.3.2. Ajout d'une inductance de lissage du courant	11
I.3.3. Confinement des harmoniques	12
I.3.4. Les filtres passifs.....	12
I.3.4.1. Filtre passif résonant.....	13
I.3.4.2 Filtre passif amorti	13
I.3.4.3. Phénomène de l'anti-résonance	13
I.3.5. Les filtres actifs	14
I.3.5.1. Filtre actif série.....	14
I.3.5.2. Filtre actif parallèle	15
I.3.5.3. Filtre actif série avec un filtre passif parallèle	16
I.3.5.4.Filtre actif hybride.....	16
I.4. Conclusion	17
II. Modélisation des Eléments Constitutifs du Système.....	18
II.1 Introduction	19
II.2.Description et modélisation du système.....	19
II .2.1. Modélisation du réseau	19
II.2.2. Modélisation de la charge polluante.....	20
II.3. Structure du filtre à trois niveaux	22
II.3.1. Onduleur de tension à trois niveaux	23

II.3.1.1. Structure générale	23
II.3.1.2. Tension générées par l'onduleur	23
II.3.2. Modèle de l'onduleur à trois niveaux	23
II.4. Représentation vectorielle	26
II.5. Conclusion	29
III. Commande Prédictive du Filtre Actif Parallèle à Trois Niveaux.....	30
III.1. Introduction.....	31
III.2. Méthodes d'extraction des courants de référence.....	31
III.2.1. Méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées.....	31
III.2.2. Méthode des puissance réelle et imaginaire instantanées modifiée.....	34
III.2.2.1. Principe du <i>FMV</i> (filtre multi-variable).....	34
III.2.2.2. Extraction des courants harmoniques.....	35
III.3. Principe général de la commande prédictive.....	37
III.4. Commande prédictive de courants du filtre.....	39
III.4.1. Modèle prédictif du filtre.....	39
III.4.2. Fonction de coût	41
III.5. Résultats de simulation	42
III.5.1. Tensions de source sinusoïdales équilibrées	42
III.5.2. Tensions de source sinusoïdales déséquilibrées	47
III.5.3. Tensions de source équilibrées contenant des harmoniques	48
III.6. Conclusion	50
Conclusion Générale.....	51
Références Bibliographiques.....	53

Introduction Générale

Les progrès technologiques modifient considérablement les usages avec la diffusion intensive des charges basées sur l'électronique de puissance, certes économiques mais très polluantes ce qui affecte directement la qualité de l'énergie. La maîtrise de la gestion de l'énergie passe au premier plan car gérer la production et assurer la continuité de service sont garant d'une bonne qualité de l'énergie sur le réseau. Au contraire, une mauvaise qualité de l'énergie peut causer des dysfonctionnements pouvant aller jusqu'à l'arrêt des services ce qui devient très préjudiciable sur le plan économique [1].

Afin de remédier à ce problème, et dans le souci d'améliorer la qualité de l'énergie, les ingénieurs du domaine n'ont pas épargné leurs efforts pour trouver des solutions efficaces qui permettent de diminuer la propagation des courants harmoniques indésirables dans le réseau.

Parmi les premières solutions, l'utilisation des filtres passifs est la plus répandue. Elle consiste à empêcher le courant harmonique produit par la charge de se propager à travers le réseau et le piégeant dans un circuit d'éléments passifs connecté en parallèle avec la charge, cette solution est peut être la moins chère mais sans doute pas la plus efficace. Malgré sa simplicité et son faible coût, le filtre passif est lié aux variations de l'impédance de la source et peut mener à une résonance non voulue avec le réseau. De plus, ce type de filtre présente une non- adaptabilité aux variations de la charge et du réseau.

Avec le développement technologique et le progrès réalisé dans le domaine des composants semi conducteurs a permis l'apparition d'une nouvelle solution de dépollution du réseau électrique, dont le principe consiste à utiliser les convertisseurs statiques comme une source des courants qui compense les courants harmoniques provenant de la charge ainsi que la puissance réactive et cela en injectant dans le réseau électrique des courants harmoniques et réactifs en opposition de phase avec celui de la charge. L'efficacité de cette solution appelée filtre actif parallèle est bien visible dans la souplesse et la flexibilité de sa

compensation car le filtrage actif est auto adaptatif et ne nécessite pas la connaissance à priori des caractéristique du réseau et de la charge [2].

L'objectif de ce travail est d'élaborer de loi de commande basée sur une commande prédictive à modèle pour le filtre actif parallèle à trois niveaux lorsque le réseau est fortement perturbé. L'application de la stratégie prédictive au filtre parallèle à trois niveaux en fonction de la fonction coût est définie pour minimiser l'erreur entre les courants de référence et les valeurs prédites, équilibrer la tension de condensateur du bus continu et réduire le taux global de distorsion harmonique.

Le mémoire est organisé en trois parties :

Le premier chapitre de ce mémoire est consacré à l'étude des perturbations des réseaux électriques. Nous présentons les différentes origines des perturbations affectant les réseaux électriques basse tension et les solutions de réduction des harmoniques, notamment le filtre actif parallèle.

Dans le deuxième chapitre, les différents constituants du système : le réseau électrique, la charge non linéaire, ainsi que l'onduleur à trois niveaux seront modélisés.

Dans le troisième chapitre, nous nous sommes intéressés à la méthode utilisée pour la détermination des courants harmoniques qui sont utilisés comme référence pour le filtre actif parallèle. Ensuite, nous avons présentée la méthode de commande que nous avons choisie pour le contrôle de l'onduleur à trois niveaux à savoir la commande prédictive à modèle. Une série de test y est effectuée afin de confirmer l'efficacité de cette loi de commande lors des perturbations de la tension du réseau.

Enfin, ce travail sera clôturé par une conclusion générale.

CHAPITRE I

Perturbations des Réseaux Electriques et Solutions de Dépollution

I.1. Introduction

L'électronique de puissance est un domaine relativement nouveau et en pleine croissance. durant ces dernières décennies, l'évolution technologique importante a impliqué une utilisation accrue des dispositifs d'électronique de puissance moderne dans diverses applications, comme la commande électrique des moteurs, les alimentations de secours de puissance, le chauffage par induction électrique, les applications dédiées la traction électrique, la compensation des harmoniques, etc. ces large succès a mobilisé les scientifique académique d'une part et d'autre part les industriels qui ont apporté des améliorations précieuses dans la technologie des interrupteurs de puissance a base de semi-conducteurs et a leurs commandes. ces avancées ont permis une large diffusion a tout niveau de puissance et dans de très nombreux secteurs d'activités. Pour faire face a tous ces problèmes, les filtres passifs constituent une solution possibles et usuelle .plus particulièrement, les filtres passifs sont exploites pour la réduction des taux d'harmoniques alors que les condensateurs seuls permettent la correction du facteur de puissance .par contre, ces dispositifs ont montre leurs limites et inconvénient comme : une compensation fixe, taille et volume importants, résonance et dépendent des performances et des structures du réseau. La croissance importante de la pollution harmonique a conduit les chercheurs en électronique de puissance et en automatique a développer et a mettre au point des solutions plus efficaces et flexibles capable de répondre aux exigences ayant trait a la qualité de l'énergie électrique. Ce type de dispositifs est généralement désigné sous le terme des filtres actifs ou encore nommé par filtres actifs de puissance. Afin de se soumettre aux normes de qualité électrique contraignantes imposées aux fournisseurs et aux consommateurs industriels et de manière à endiguer l'augmentation des problèmes de perturbations sur les réseaux électriques, les filtres actifs doivent s'adapter et répondre à ces exigences et par conséquent optimiser leurs topologies et techniques de commande. Dans ce but, plusieurs travaux de recherche continuent d'être publiés sur le filtre actif parallèle, en considérant trois grands domaines. Le premier est l'estimation du courant à compenser, le second est d'évaluer d'autres topologies possibles et la troisième traite des stratégies de commande qui génèrent les signaux de commande des interrupteurs de puissance [3].

I.2. Qualité de l'énergie électrique

La qualité de l'énergie électrique est considérée comme une combinaison de la qualité de la tension et de la qualité du courant. Cependant le terme «qualité du courant» est rarement

utilisé, car la qualité du courant est étroitement liée à la qualité de la tension et la nature des charges. Pour cette raison, la qualité de l'énergie électrique est souvent réduite à la qualité de la tension. La qualité de cette énergie dépend directement de la qualité de la tension aux points de raccordement de la charge au réseau. L'énergie électrique est délivrée sous forme d'un système triphasé de tensions la quelle est caractérisée, dans le cas idéal, par les paramètres suivants :

Équilibre et symétrie parfaite des trois tensions en amplitude et en déphasages relatifs.

Stabilité de la fréquence.

Forme d'onde parfaitement sinusoïdale [4].

I.2.1. Perturbations des réseaux électriques

Un réseau de distribution électrique permet d'alimenter des récepteurs ou des charges à l'aide de tension monophasée ou triphasée dite sinusoïdale et de fréquence constante les produites par des générateurs ou des sources de très fortes puissances par rapport a celle consommée au point d'utilisation. L'énergie est renouvelables et des réseaux de distribution assurent le transport jusqu'au lieu de consommation. A ce niveau il existe deux catégories des récepteurs distincts : les charges dites linéaires et les charges dites non linéaires. Dans le premier cas, les variations des courants restent proportionnelles à la variation de la tension appliquée avec l'introduction d'un déphasage lié à la nature de la charge. Ces charges sont des éléments passifs de nature résistive (déphasage entre le courant et la tension nul) ou réactive : inductance (déphasage positif, le courant est en retard sur la tension) ou condensateur (déphasage négatif, le courant est en avance sur la tension). Dans le cas d'une charge inductive ou capacitive, de la puissance réactive est consommée ou générée entrainant des facteurs de puissance ou de déplacement différents de l'unité. Pour pallier ce phénomène il est nécessaire de faire de la compensation d'énergie réactive afin de rendre l'onde de courant en phase avec l'onde de tension. En revanche pour les charges non linéaires les variations des courants absorbées n'est pas proportionnelle aux ondes des tensions appliquées.

I.2.2. Origine des harmoniques

La cause principale de l'existence des harmoniques de tension est l'injection des courants non sinusoïdaux par des charges dites non linéaires. Ces charges sont principalement à l'origine de la distorsion harmonique présentée sur le réseau. Dans ce cas-là, le courant absorbé par les charges non linéaires peut être généralement modélisé comme l'addition de plusieurs sources de courant, une pour chaque composante fréquentielle, mises en parallèle comme le montre la Figure I.1 [4].

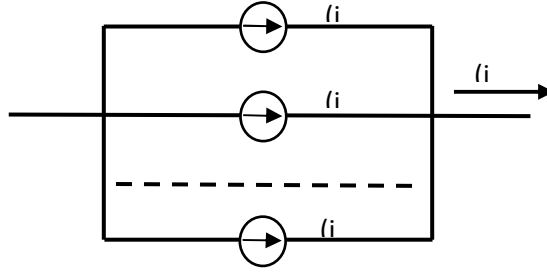


Figure I.1. Modélisation d'une charge non-linéaire.

La façon la plus simple de représenter un courant non sinusoïdal est de considérer sa série de Fourier jusqu'à un rang significatif, c'est-à-dire en représentant les fréquences discrètes qui composent ce signal avec une précision souhaitée et une complexité acceptée. Le contenu harmonique de son courant est donné par la relation (I.1) [4] :

$$(i)_h = (i)_0 + (i)_1 + \dots + (i)_n = (I)_0 + (I)_1 \sqrt{2} \cos(\omega t + \phi_1) + \dots + (I)_n \sqrt{2} \cos(n\omega t + \phi_n) \quad (\text{I.1})$$

Dans le cas d'un système triphasé équilibré, le modèle de la charge sera :

$$\begin{cases} (i_1)_h = (I)_0 + (I)_1 \sqrt{2} \cos(\omega t + \phi_1) + \dots + (I)_n \sqrt{2} \cos(n\omega t + \phi_n) \\ (i_2)_h = (I)_0 + (I)_1 \sqrt{2} \cos(\omega t + \phi_1 - \frac{2\pi}{3}) + \dots + (I)_n \sqrt{2} \cos(n\omega t + \phi_n - n\frac{2\pi}{3}) \\ (i_3)_h = (I)_0 + (I)_1 \sqrt{2} \cos(\omega t + \phi_1 + \frac{2\pi}{3}) + \dots + (I)_n \sqrt{2} \cos(n\omega t + \phi_n + n\frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (\text{I.2})$$

I.2.3. Effets des perturbations harmoniques

De nombreux effets des harmoniques sur les installations et les équipements Électriques peuvent être cités tels que les déformations des formes d'ondes entraînant des dysfonctionnements, l'augmentation des valeurs crêtes créant des claquages de diélectriques ou des valeurs efficaces induisant des échauffements et donc des pertes supplémentaires aussi bien en courant qu'en tension, ainsi qu'un étalement spectral provoquant des vibrations et des fatigues mécaniques. L'ensemble de ces effets ont un impact économique non négligeable à cause des surcoûts, de la dégradation du rendement énergétique, du surdimensionnement, des pertes de productivité ou des déclenchements intempestifs qu'ils entraînent [4].

1.2.4. Caractérisation des perturbations harmoniques

Plusieurs critères sont définis pour caractériser les perturbations. Le taux de distorsion harmonique et le facteur de puissance sont les plus employés pour quantifier respectivement les perturbations harmoniques et la consommation de puissance réactive.

1.2.4.1. Le taux de distorsion harmonique

On utilisera le terme *THD* (*Total Harmonic Distortion*) pour désigner le taux de distorsion harmonique. Le *THD* s'exprime par rapport à la fréquence fondamentale et caractérise l'influence des harmoniques sur l'onde de signal déformée. Deux taux de distorsion harmonique sont distingués [4] [5].

*le taux de distorsion harmonique en courant, noté *THDi*

*le taux de distorsion harmonique en tension, noté *THDv*

Le premier exprime sous la forme :

$$THD_i = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2} \quad (I.3)$$

Avec : I_1 la valeur efficace du courant fondamental et I_h les valeurs efficaces des différentes harmoniques du courant. Le *THDi* ne dépend que des valeurs efficaces du courant de charge. En revanche, le *THDv* est fonction des courants harmoniques, caractérisant la charge, et de l'impédance de court-circuit, imposée par le réseau :

$$THD_v = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{V_h}{V_1} \right)^2} = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{|Z_{cc}^h|}{V_1} I_h \right)^2} \quad (I.4)$$

V : désigne la valeur efficace de v_1 .

Ainsi, plus les impédances ($h > 1$) sont faibles, plus la distorsion en tension est faible.

1.2.4.2. Le facteur de puissance

Le facteur de puissance est défini dans le cas général par le rapport de la puissance active sur la puissance apparente :

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{\sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos(\theta_h)}{\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2} \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}} \quad (I.5)$$

En présence des harmoniques, on définit la notion de puissance déformante D permettant de rendre compte des harmoniques. Son expression est donnée par l'équation suivante :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (I.6)$$

L'expression du facteur de puissance peut alors se mettre sous la forme suivante :

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (I.7)$$

On voit bien que la puissance déformante dégrade le facteur de puissance.

I.2.5. Généralités sur l'analyse harmonique

Un réseau de distribution électrique permet d'alimenter des récepteurs ou des charges à l'aide de tensions monophasée ou triphasée dite sinusoïdales et de fréquence constante produites par des générateurs ou des sources de très fortes puissances par rapport à celle consommée au point d'utilisation. L'énergie est produite par des centrales nucléaire, thermique, hydraulique ou à base des sources renouvelables et des réseaux de distribution assurent le transport jusqu'au lieu de consommation. A ce niveau il existe deux catégories des récepteurs distincts : les charges dites linéaires et les charges dites non linéaires. Dans le premier cas, les variations des courants restent proportionnelles à la variation de la tension appliquée avec l'introduction d'un déphasage lié à la nature de la charge. Ces charges sont des éléments passifs de nature résistive (déphasage entre le courant et la tension nul) ou réactive : inductance (déphasage positif, le courant est en retard sur la tension) ou condensateur (déphasage négatif, le courant est en avance sur la tension). Dans le cas d'une charge inductive ou capacitive, de la puissance réactive est consommée ou générée entraînant des facteurs de puissance ou de déplacement différents de l'unité. Pour pallier ce phénomène il est nécessaire de faire de la compensation d'énergie réactive afin de rendre l'onde de courant en phase avec l'onde de tension. En revanche pour les charges non linéaires les variations des courants absorbées n'est pas proportionnelle aux ondes des tensions appliquées. Ces courants sont de formes rectangulaires, comme il est illustré à la Figure (I.2.a) pour un convertisseur PD3 à diodes sur charge $R-L$ série, impulsionsnelles

sur la Figure (I.2.b) pour le même convertisseur mais avec une charge R - C parallèle. La Figure I.2 reproduit les captures d'écrans de l'analyseur de réseaux électriques Triphasés. Sur ces figures apparaissent les valeurs efficaces, le taux de distorsion harmonique global (Total Harmonic Distorsion THD) à la fois pour la tension et le courant ainsi que leur spectre (histogramme donnant l'amplitude de chaque harmonique en fonction du rang). Ces notions sont définies et explicitées par la suite [3].

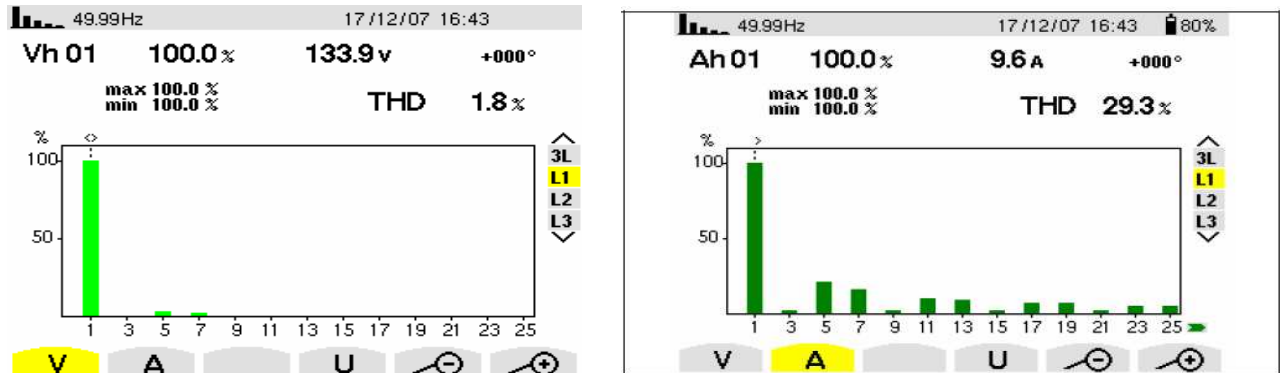


Figure I.2.a . Relèves des formes d'ondes tension-courant pour un pont PD3 diodes sur charge R - L . série.

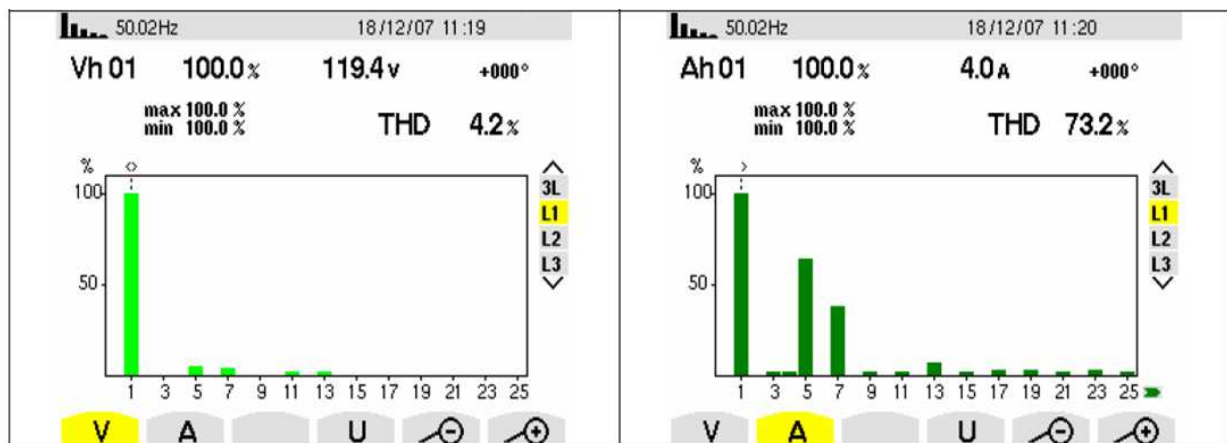


Figure I.2.b. Relèves des formes d'ondes tension-courant pour un pont PD3 diodes sur charge R - C parallèle.

I.2.6. Génération des harmoniques et inter-harmoniques

Les harmoniques présents sur le réseau de distribution électrique proviennent majoritairement des charges non linéaires qui génèrent des courants harmoniques mais ils peuvent aussi être créés par les sources génératrices de tension. Pour les réseaux de distribution terrestre, la majeure partie de l'énergie est issue d'alternateurs de très forte puissance. Or, le taux d'harmonique en tension pour un alternateur puissant est très faible, de l'ordre de 1% si sa puissance apparente est supérieure au MVA. En revanche, si la production est assurée par un groupe électrogène, la tension peut contenir des harmoniques introduits par les pulsations de couple du moteur thermique. Cependant, l'utilisation de groupes électrogènes est limitée aux réseaux embarqués ou aux alimentations de secours et

constitue donc des cas isolés qui ne sont pas pris en compte dans cette étude. Les charges non linéaires représentent de nombreux équipements industriels et domestiques et se répartissent dans de nombreux secteurs industriels. Ces appareils possèdent en entrée un système de conversion d'énergie sous une forme donnée en une autre forme en adéquation avec l'utilisation voulue. C'est des convertisseurs statiques qui sont mis en œuvre et qui peuvent être répertoriée en quatre familles :

- Convertisseurs AC-DC, cela représente l'ensemble des redresseurs ;
- Convertisseurs DC-DC, hacheurs et alimentations à découpage ;
- Convertisseurs DC-AC, onduleurs de tension ou de courant ;
- Convertisseurs AC-AC, gradateurs, convertisseurs de fréquences.

I.2.7. Normes et réglementations

Afin de limiter les dysfonctionnements occasionnés par les harmoniques et en même temps pour limiter l'influence des charges sur le réseau de façon à éviter la modification de ses caractéristiques, des normes sur la qualité de l'énergie ont été imposées. La *CEI* (*Commission Electrotechnique Internationale*) et l'*IEEE* (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) sont les deux principaux organismes de normalisation internationaux dans le domaine de l'électrotechnique. La *CEI* est un organisme officiel composé de comités nationaux de 63 pays, tandis que l'*IEEE* est une association professionnelle. Ces deux organismes réalisent la principale activité de normalisation dans le domaine des perturbations électriques au niveau mondial mais n'ont pas une uniformité de critères en ce qui concerne la définition des interactions entre le réseau et les charges connectées [4] [6].

Tableau I.1 Limites des composantes harmoniques en courant.

Harmonique impaires		Harmonique paires	
rang	Courant harmonique admissible maximal(A)	rang	Courant harmonique admissible maximal(A)
3	2.30	2	1.08
5	1.14	4	0.43
7	0.77	6	0.30
9	0.40	$8 \leq h \leq 40$	$0.23 \cdot 8 / h$
11	0.33		
13	0.21		
$15 \leq h \leq 39$	$0.15 \cdot 15 / h$		

Les limitations en tension harmonique que les clients de *EDF* doivent respecter sont:

Pour un harmonique paire:

$$\frac{V_h}{V_1} \leq 0.6\%$$

Pour un harmonique impaire :

$$\frac{V_h}{V_1} \leq 1\%$$

Pour le taux de distorsion global de tension : $THD < 1.6\%$.

Il est d'usage de dire que, dans les installations industrielles, les tensions harmoniques dont le THD est inférieur à 5 % ne produisent pas d'effet notable. Entre 5% et 7% on commence à observer des effets, et pour plus de 10 % les effets sont quasi certains.

D'autre part, la norme principale, *IEEE 519-1992, recommended practices and requirements for harmonic control in power systems*, détermine la procédure pour contrôler les harmoniques présents sur le réseau électrique. Elle impose également les limites recommandées de la pollution harmonique générée par les clients et de distorsion harmonique totale sur le réseau. Cette norme limite la distorsion harmonique THD du courant des réseaux < 69 kV à 5% [7] [8].

I.3. Réduction de la pollution harmonique

I.3.1. Absorption sinusoïdale

Le prélèvement sinusoïdal est une technique qui permet aux convertisseurs statiques d'absorber un courant très proche d'une sinusoïde avec un facteur de puissance unitaire.

Dans ce cas, ces structures se positionnent dans une stratégie préventive et non curative. Ces techniques de prélèvement sinusoïdal s'appliquent aux structures monophasées et triphasées. Ces convertisseurs propres utilisent la technique MLI (Modulation de Largeur d'Impulsions) également appelée PWM (Pulse Width Modulation) comme principe de pilotage des interrupteurs commandés. En monophasé ce type de structure est assez répandu alors que les convertisseurs triphasés propres sont rares sur le marché, car le surcoût est important.

I.3.2. Ajout d'une inductance de lissage du courant

L'ajout d'inductances de lissage en amont des dispositifs polluants est une solution communément utilisée afin d'atténuer les harmoniques de rangs élevées puisque leurs impédances augmentent avec la fréquence. Ces inductances réduisent donc la distorsion de la tension au point de raccordement mais induisent un coût supplémentaire. De plus, elles doivent être dimensionnées pour le courant nominal circulant en ligne.

I.3.3. Confinement des harmoniques

Il s'agit de limiter la circulation des courants harmoniques à une partie de l'installation la plus limitée possible. Si le montage est un montage équilibré, les harmoniques de rang $3k$ sont en phase et en l'absence de conducteur neutre connecté, ces courants ne peuvent pas circuler. Pour éviter la circulation de ces courants de rang $3h$ sur l'ensemble du réseau, il est possible d'effectuer un découplage par transformateur. Par exemple l'utilisation d'un transformateur dont le primaire est couplé en étoile et le secondaire en permet d'éliminer au primaire les courants de pulsation $3h$. Il en va de même pour un transformateur couplé en triangle au primaire et en étoile au secondaire puisque les harmoniques de rang $3h$ étant en phase, ils ne peuvent pas circuler sur le réseau en amont du transformateur.

I.3.4. Les filtres passifs

Le filtrage consiste à placer en parallèle sur le réseau d'alimentation une impédance de valeur très faible autour de la fréquence à filtrer et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau. Un filtre passif est constitué d'éléments passifs tels que des inductances, des condensateurs et des résistances, qui forment une impédance dont la valeur varie en fonction de la fréquence. On connecte alors le filtre passif en parallèle avec le réseau de manière à absorber un harmonique de courant donné.

Si on veut par exemple éliminer le courant harmonique de rang 5, on dimensionne alors les éléments passifs de manière à ce que l'impédance équivalente du filtre soit la plus petite possible à la fréquence 50 (*fondamental*) , le courant circulera alors dans l'impédance la plus faible, c'est à dire dans le filtre passif et donc plus dans l'impédance de court-circuit du réseau comme l'illustre la Figure I.3 [3].

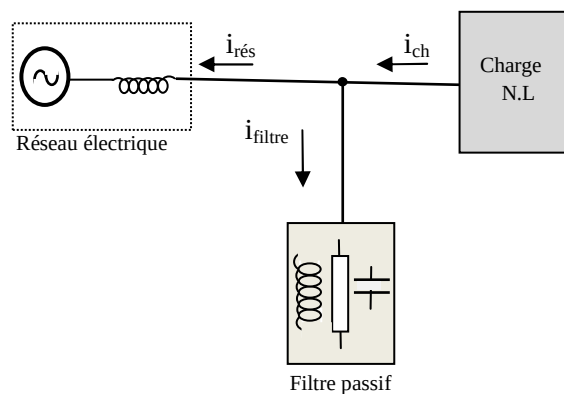


Figure I.3. Raccordement d'un filtre passif.

Equation des courants :

$$\begin{aligned}
 i_{ch} &= i_{\text{fondamental}} + i_{h-5} + i_{h-7} + i_{h-11} + i_{h-13} + \dots \\
 i_{\text{filtre}} &= i_{h-5} \\
 i_{ch} &= i_{\text{fondamental}} + i_{h-7} + i_{h-11} + i_{h-13} + \dots \\
 &\quad \sim 12 \sim
 \end{aligned}
 \tag{I.8}$$

Parmi les dispositifs de filtrage les plus répandus, on distingue le filtre passif résonnant et le filtre passif amorti ou passe-haut.

I.3.4.1. Filtre passif résonant

C'est un filtre sélectif constitué d'une résistance, d'un condensateur et d'une bobine en série, comme décrit sur la Figure I.4, son impédance équivalente est [3]:

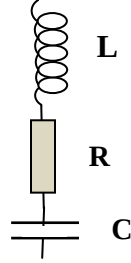


Figure I.4. Filtre passif.

Le rang d'accord 'ha' correspond au multiple, entier ou non, de la fréquence nominale du réseau.

La pulsation de résonance du filtre est $\omega_a = 2\pi \times f_a = 1/LC$

$$Z_{eq}(\omega) = \frac{1 - LC\omega^2 + jRC\omega}{jC\omega} \quad (I.9)$$

I.3.4.2. Filtre passif amorti

C'est un filtre passe haut constitué d'une inductance en parallèle avec une résistance, le tout en série avec un condensateur comme décrit sur la Figure I.5 son impédance équivalente est [3] :

$$Z_{eq}(\omega) = \frac{1 - LC\omega^2 + j\frac{L\omega}{R}}{-\frac{L}{R}C\omega^2 + jC\omega} \quad (I.10)$$

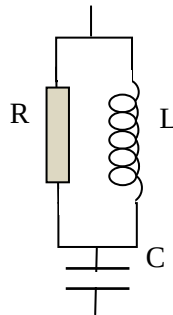


Figure I.5. Filtre passif amorti.

I.3.4.3. Phénomène de l'anti-résonance

Le phénomène de l'anti-résonance (Figure I.6) se rencontre dans les réseaux électriques quelque soit leur niveau de tension. L'impédance vue par le réseau et le filtre passif résonnant est :

$$Z_{eq}(\omega) = jL_s \omega \cdot \frac{1 - LC\omega^2 + jRC\omega}{1 - (L + L_s)C\omega^2 + jRC\omega} \quad (I.11)$$

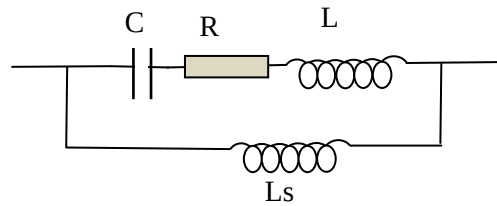


Figure I.6. Filtre passif parallèle anti- résonance.

Dans ce cas, les variations de l'impédance du réseau peuvent détériorer les performances du filtre. De plus, l'impédance du réseau peut former un système résonnant avec le filtre et les fréquences voisines de la fréquence de résonance seront alors amplifiées. Finalement, cette solution est dédiée à un type de charge et une configuration réseau et perd de son efficacité lorsque les caractéristiques de ceux-ci évoluent.

I.3.5. Les filtres actifs

Les inconvénients inhérents aux filtres passifs (non adaptatif aux variations de la charge et du réseau, phénomène de résonance) et l'apparition de nouveaux composants semi-conducteurs, comme les thyristors GTO et les Transistors IGBT, ont conduit à concevoir une nouvelle structure de filtres appelée filtres actifs de puissance. Le but de ces filtres est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à ce que le courant et la tension du réseau soient rendus sinusoïdaux et parfois avec un facteur de puissance unitaire. Le filtre actif est connecté en série, en parallèle, en combinant ces deux dernières structures ensembles ou associé avec des filtres passifs en fonction des grandeurs électriques harmoniques (courants ou tensions) à compenser [3] [4] [9].

I.3.5.1. Filtre actif série

Le but du filtre actif série est de créer une impédance en série avec le réseau qui sera nulle pour le fondamental et de valeur élevée pour les harmoniques. Il est destiné à protéger les installations sensibles aux perturbations provenant du réseau telles que les harmoniques en tension, les surtensions, déséquilibres et creux de tension. En revanche, le filtrage série ne permet pas de compenser les courants harmoniques consommés par la charge. En plus, ce filtre nécessite une protection complexe contre les courts-circuits des réseaux. En effet, lors d'un court-circuit côté réseau, ce dernier peut être amené à supporter tout le courant de court-circuit.

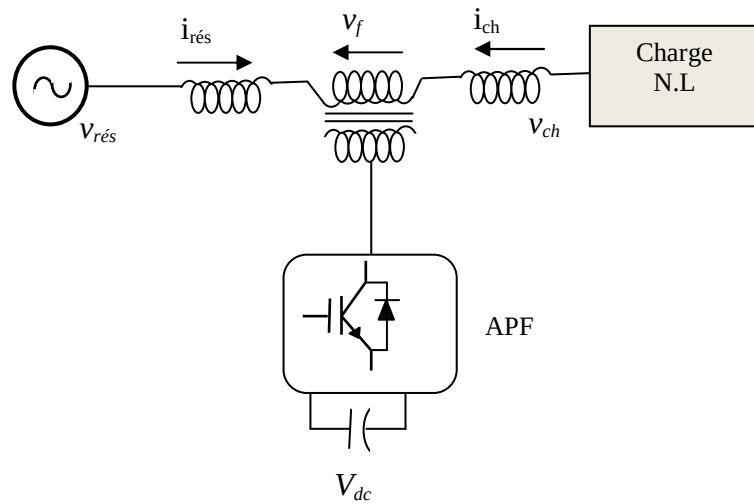


Figure I.7. Filtre actif série.

I.3.5.2. Filtre actif parallèle

Sur la Figure I.8 apparaît le synoptique d'un filtre actif parallèle. Le filtre actif est constitué d'un onduleur de tension et d'un filtre inductif en sortie. Ainsi, l'inductance en sortie de l'onduleur donne la nature de source de courant au filtre actif. Dans le cas où le réseau alimente plusieurs charges polluantes, il est préférable d'utiliser un seul filtre actif pour toutes les charges car, dans ce cas, le coût du filtrage est moindre. Cependant, lorsque la puissance des charges polluantes est élevée, la solution d'un filtre actif par charge s'avère nécessaire. Cette dernière méthode est bien sûr plus coûteuse mais elle possède l'avantage d'éviter que la stabilité des harmoniques vienne perturber le réseau dans le cas où un filtre actif est défectueux.

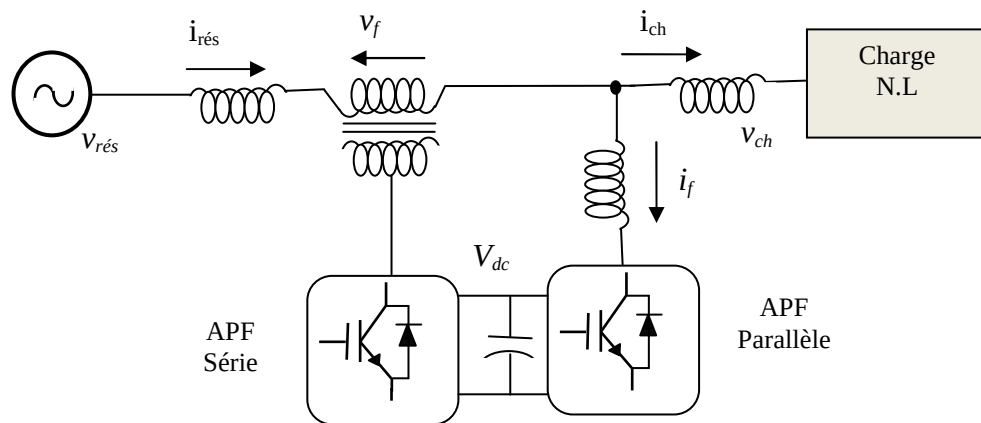


Figure I.8. Filtre combiné parallèle-série.

I.3.5.4. Filtre actif série avec un filtre passif parallèle

Une version moins chère de la structure précédente est illustrée par la Figure I.9 où un filtre actif série et un filtre parallèle passif sont exploités. Principalement, le filtre série régule la tension au point de raccordement tandis que le filtre parallèle est réglé sur quelques harmoniques de courant (rangs inférieurs) qui doivent être supprimés. Cette topologie a la possibilité de réduire les harmoniques de tension et de courant à un prix raisonnable [9].

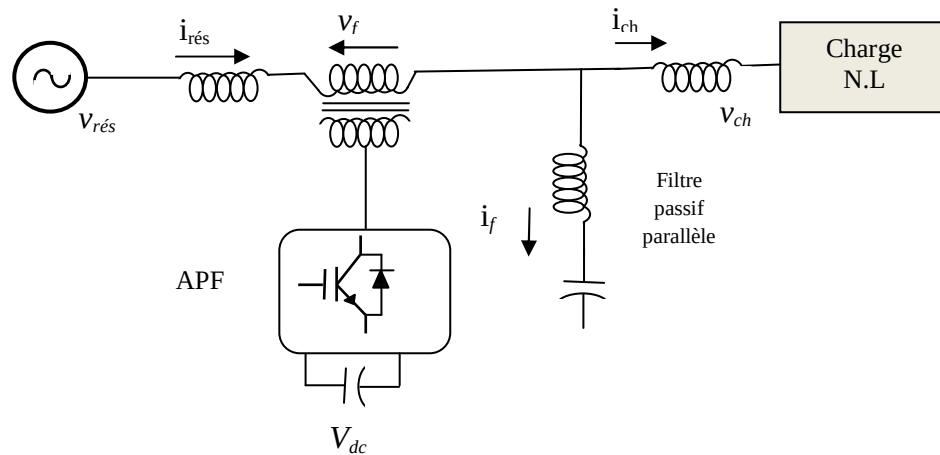


Figure I.9. Filtre actif série avec un filtre passif parallèle.

I.3.5.5. Filtre actif hybride

Connecté avec ou sans transformateurs au réseau, le filtre actif hybride Figure I.10 est constitué d'un filtre passif connecté directement en série avec le filtre actif, ce qui entraîne une diminution de la tension du bus continu comparativement à celle d'un filtre actif pur et une réduction du dimensionnement du filtre hybride. En plus, le filtre passif évite les oscillations dues à la commutation car il présente une haute impédance à cette fréquence. Cependant, la mise en place d'une inductance à l'entrée de la charge non linéaire est indispensable pour le bon fonctionnement du filtre hybride [4].

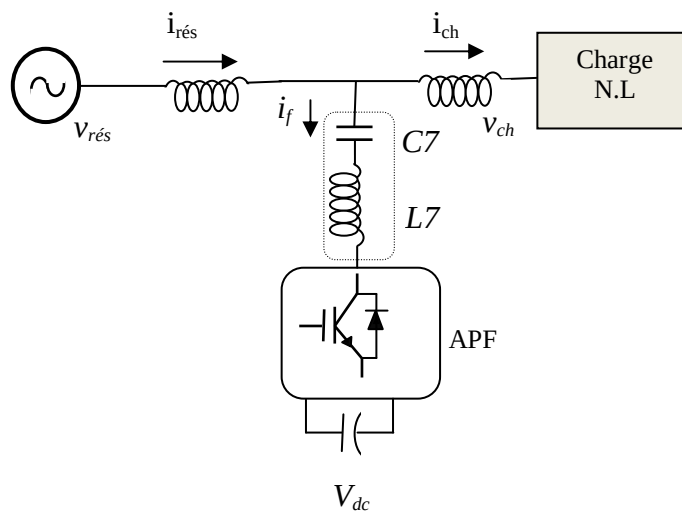


Figure I.10. Filtre actif hybride.

I.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons illustré, en premier lieu, le phénomène des harmoniques, leurs caractéristiques, leurs sources, leurs conséquences et effets néfastes qui peuvent aller des échauffements et de la dégradation du fonctionnement jusqu'à la destruction de ces équipements. Plusieurs solutions traditionnelles et modernes de dépollution ont été présentées, nous avons montré que la solution classique à base de filtres passifs est souvent pénalisée en termes d'encombrements et de résonance. De plus, les filtres passifs ne peuvent pas s'adapter à l'évolution du réseau et aux charges polluantes. En effet, profitant des progrès réalisés dans le domaine de l'électronique de puissance et de l'informatique industrielle, ces solutions peu encombrantes font preuve d'une grande flexibilité face à l'évolution du réseau électrique et des charges polluantes en assurant une bonne dépollution harmonique, compensation de l'énergie réactive et rééquilibrage des tensions du réseau.

CHAPITRE II

Modélisation des Eléments Constitutifs du Système

II.1. Introduction

Comme pour la majorité des systèmes électriques à convertisseur statique, l'étude analytique de l'ensemble réseau déséquilibré, charge polluante et compensateur actif est difficile à mener sans utilisation de plusieurs hypothèses simplificatrices souvent très réductrices. Dans ce domaine, la simulation numérique constitue un outil d'étude, d'évaluation et de préconception très efficace. En conséquence, de nombreux logiciels de simulation ont été développés et diffusés ces dernières années (exemple : Matlab). Ce chapitre est consacré à l'étude d'un réseau comportant un compensateur actif à structure tension et une charge polluante connectés en parallèle sur celui-ci. Tout d'abord, nous présentons brièvement la modélisation individuelle de chaque partie du système : le réseau, la charge polluante constituée d'un redresseur triphasé débitant dans une charge inductive [10].

II.2. Description et modélisation du système

Dans cette partie, notre étude va porter sur le système composé d'un réseau déséquilibré alimentant un redresseur à thyristor et d'un compensateur actif parallèle dont le schéma du circuit de puissance est donné sur la Figure II.1. Il est à noter que l'objectif visé par cette modélisation est l'étude du comportement global du compensateur actif parallèle en présence d'une charge polluante et en tenant compte du déséquilibre de la charge [4].

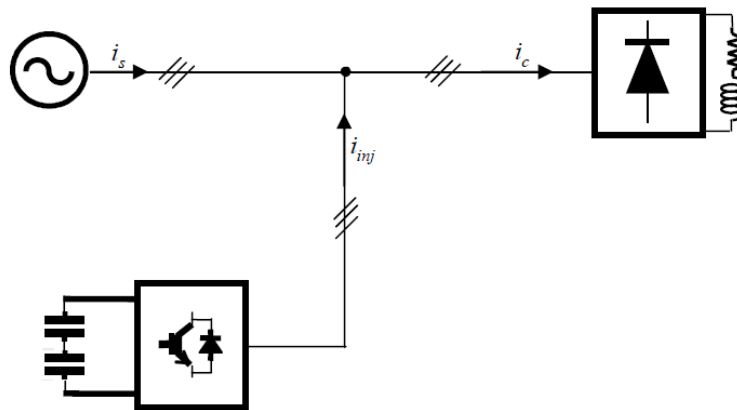


Figure II.1. Schéma synoptique de l'association réseau-compensateur actif –charge.

II.2.1. Modélisation du réseau

Puisque nous ne considérons que la perturbation harmonique venant de la charge polluante (redresseur ou la charge déséquilibrée), le réseau est représenté par phase, comme l'indique la Figure II.2, par une f.é.m sinusoïdale en série avec une impédance

(R_s - L_s) toute inductance mutuelle entre les phases est négligée [10].

$$\begin{pmatrix} e_{sa} \\ e_{sb} \\ e_{sc} \end{pmatrix} = \sqrt{2} \cdot E \begin{pmatrix} \sin(\theta) \\ \sin\left(\theta - 2\frac{\pi}{3}\right) \\ \sin\left(\theta - 4\frac{\pi}{3}\right) \end{pmatrix} \quad \theta = \omega.t \quad \omega = \text{pulsation} \quad (\text{II.1})$$

$$Z_s = R_s + jL_s \omega$$

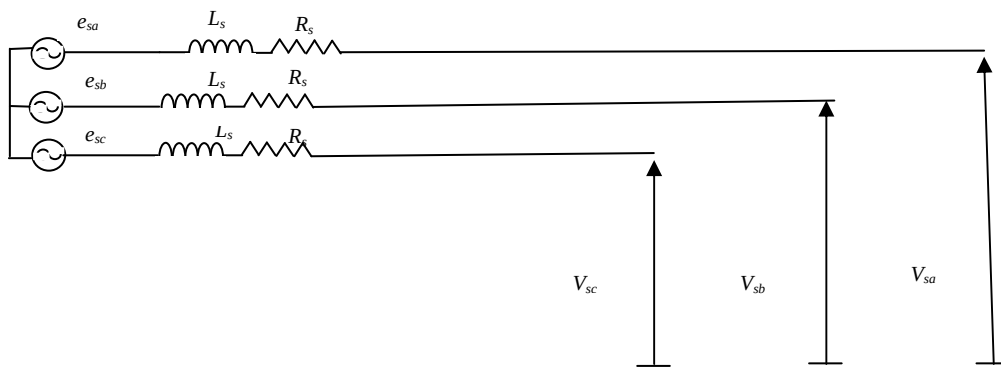


Figure II.2. Schéma synoptique d'un réseau triphasé.

II.2.2. Modélisation de la charge polluante

La charge polluante est un redresseur de tension triphasé à diodes (pont de Graëtz), connecté au réseau par l'intermédiaire d'une impédance de ligne (L_l , R_l), et alimentant une charge inductive (L_d , R_d) côté continu, représentée par le schéma de la Figure II.3 [11].

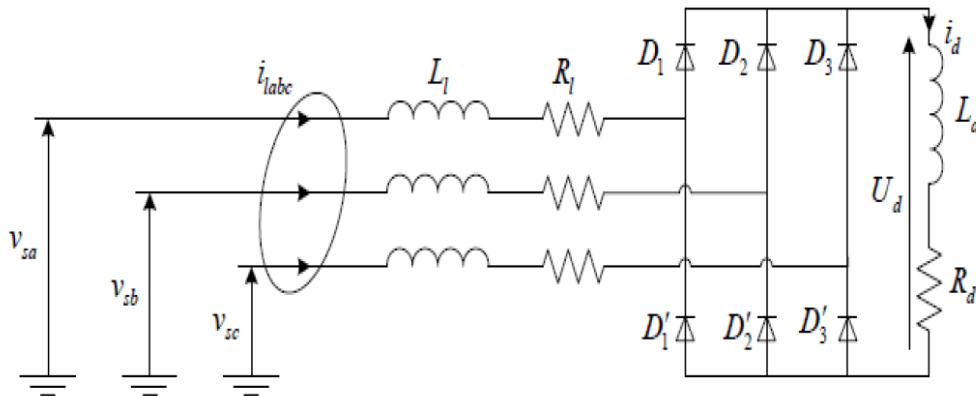


Figure II.3. Redresseur à diodes (pont de Graëtz) avec charge R-L.

Pour simplifier le calcul, on suppose que le redresseur est idéal et l'empiètement est nul. Deux diodes de même bras ne peuvent pas conduire simultanément. Lorsque D_1 conduit, l'une de deux D'_2, D'_3 conduit également. Il en vient que D_1 conduit lorsque v_{sa} est supérieure à v_{sb} et v_{sc} ou encore [11]:

Donc :

Lorsque $v_{sa} > v_{sc} > v_{sb}$, D_1, D'_2 conduisent : $U_d = v_{sa} - v_{sb}$

Lorsque $v_{sa} > v_{sb} > v_{sc}$, D_1, D'_3 conduisent : $U_d = v_{sa} - v_{sc}$

Lorsque $v_{sa} > v_{sc} > v_{sb}$, D_2, D'_3 conduisent : $U_d = v_{sb} - v_{sc}$

etc

Pendant chaque séquence de conduction, la tension U_d à la sortie du redresseur est donnée par :

$$U_d = \text{Max}(v_{sj}) - \text{Min}(v_{sj}) \quad ; \quad i, j = abc \quad (\text{II.2})$$

A partir de la relation (II.2), on peut définir la valeur moyenne de la tension redressée par :

$$\bar{U}_d = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_{\max} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \sqrt{2} V = 1.654\sqrt{2} V \quad (\text{II.3})$$

La Figure (II.4) représente la tension U_d à la sortie du redresseur avec la tension triphasée au point de connexion du redresseur [11].

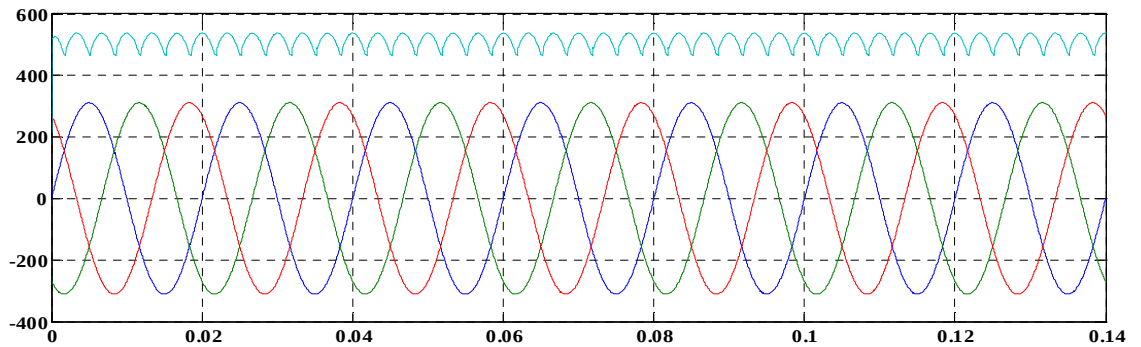


Figure II.4. Tension redressée et tensions triphasées au point de connexion du redresseur.

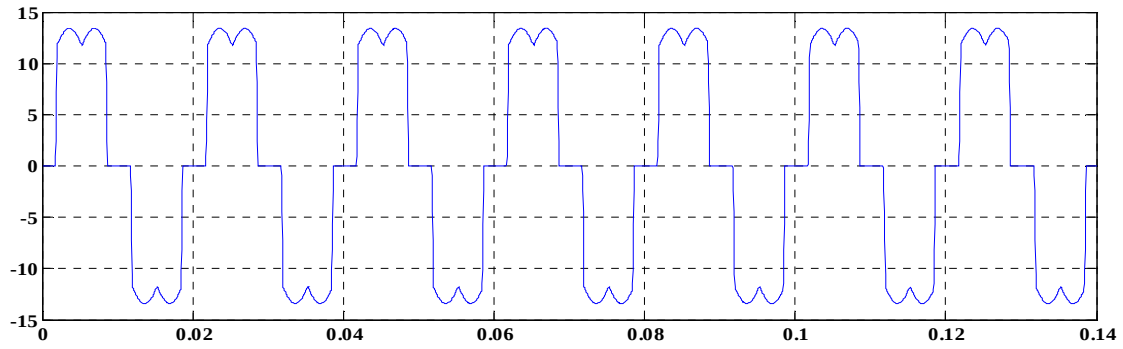


Figure .II.5. Allure de courant de la charge (phase a).

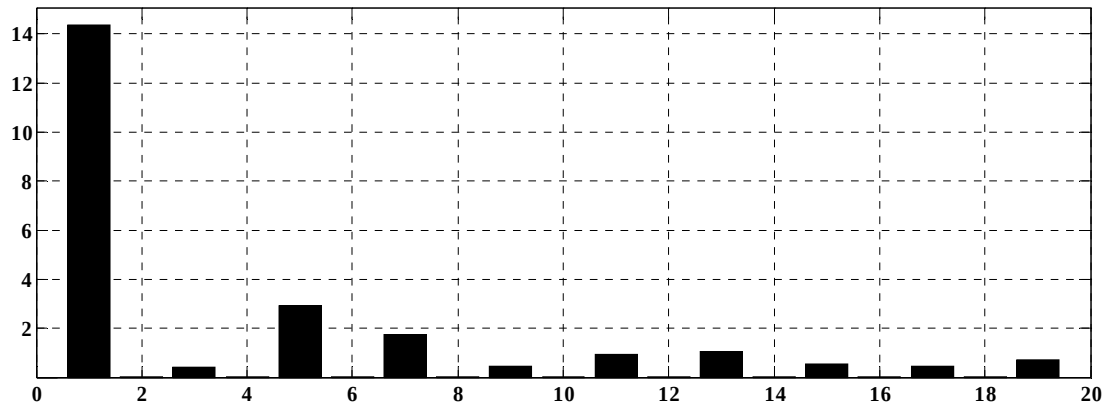


Figure .II.6. Spectre harmonique du courant de la charge.

II.3. Structure du filtre à trois niveaux

La topologie de filtre actif de puissance parallèle est à trois niveaux avec condensateurs à point milieu. Son schéma de principe est illustré sur la Figure II.7 [4].

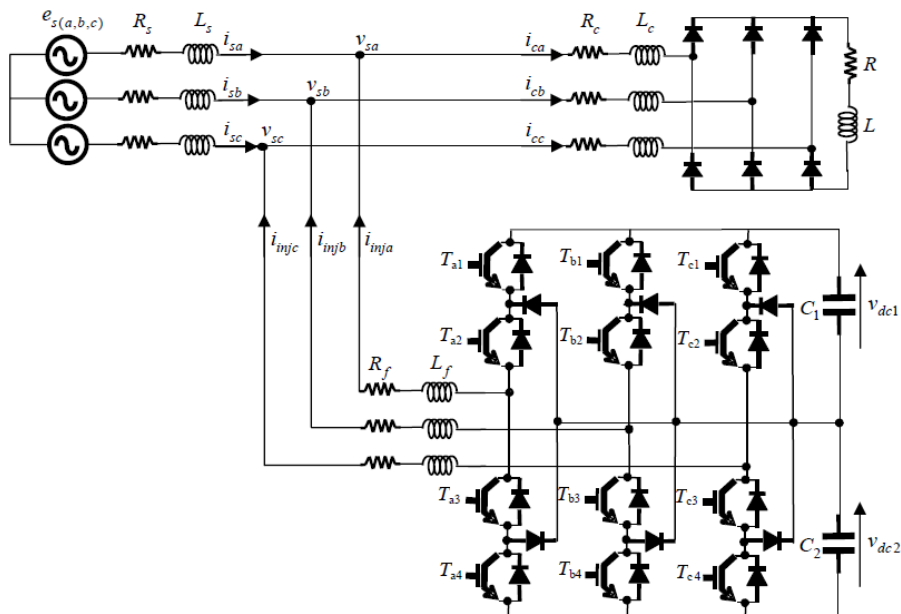


Figure. II.7. Circuit de puissance du filtre actif parallèle à trois niveaux.

II.3.1. Onduleur de tension à trois niveaux

II.3.1.1. Structure générale

L'onduleur de tension à trois niveaux à diodes clampées NPC est composé de trois bras symétriques. Chaque bras de l'onduleur est constitué de quatre paires (Diode - Transistor) représentant chacune un interrupteur bidirectionnel en courant et deux diodes médianes permettant d'avoir le niveau zéro de la tension. Cette structure impose l'utilisation des interrupteurs commandables à l'amorçage et au blocage. Dans notre cas, on utilisera des IGBTs avec des diodes en antiparallèle. On suppose que la tension v_{dc} est divisée en égalité entre les deux capacités: $v_{dc1} = v_{dc2} = \frac{V_{dc}}{2}$.

II.3.1.2. Tension générées par l'onduleur

Pour éviter la mise en conduction simultanée des quatre interrupteurs d'un seul bras, qui provoque un court-circuit aux bornes du bus continu et par conséquent le risque de destruction des condensateurs et des composants semi-conducteurs par sur intensité et qui peut engendrer la destruction par surtension des interrupteurs lors de l'ouverture simultanée de ces derniers, on doit réaliser des commandes complémentaires des différents interrupteurs d'un même bras de l'onduleur [12] [13].

II.3.2. Modèle de l'onduleur à trois niveaux

L'onduleur triphasé à trois niveaux de la Figure II.7 se compose de trois cellules de commutation reliées à un bus continu. Chaque cellule est constituée de quatre commutateurs. Puisque le courant de la charge est alternatif, les commutateurs doivent être des transistors montés en antiparallèle avec des diodes pour permettre la circulation du courant dans les deux directions. D'autres diodes sont utilisées afin de clamber la borne de chaque transistor au point milieu du bus continu. Si les tensions aux bornes des condensateurs sont maintenues égales, la tension composée peut être modulée sur cinq niveaux de tension. Dans ce cas, chaque transistor peut supporter la moitié de la pleine tension du bus continu à l'état bloqué [14][15].

Les trois commandes complémentaires qui peuvent être appliquées sur un bras sont :

$$1^0 \begin{cases} S_{a1} = \bar{S}_{a2} \\ S_{a3} = \bar{S}_{a4} \end{cases} \quad 2^0 \begin{cases} S_{a1} = \bar{S}_{a3} \\ S_{a2} = \bar{S}_{a4} \end{cases} \quad 3^0 \begin{cases} S_{a1} = \bar{S}_{a4} \\ S_{a2} = \bar{S}_{a3} \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

Parmi ces trois commandes complémentaires, celle qui permet d'exploiter tous les niveaux possibles de l'onduleur est la suivante :

$$\begin{cases} S_{a1} = \bar{S}_{a3} \\ S_{a2} = \bar{S}_{a4} \end{cases} \quad (\text{II.5})$$

La commande complémentaire pour un bras k est définie alors comme suit :

$$\begin{cases} S_{k1} = \bar{S}_{k3} \\ S_{k2} = \bar{S}_{k4} \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

Avec la commande complémentaire ainsi définie, on peut définir les fonctions de connexion des interrupteurs du bras k comme suit :

$$\begin{cases} S_{k1} = 1 - S_{k3} \\ S_{k2} = 1 - S_{k4} \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

L'onduleur de tension trois niveaux délivre, en sortie, trois niveaux de tensions $-v_{dc}/2$, 0 , et $+v_{dc}/2$ en fonction des états des interrupteurs comme expliqué dans le Tableau II.1 [12] .

Tableau II.1. Obtention des trois niveaux de tension en fonction des états des interrupteurs.

Etat de commutateur	S_{k1}	S_{k2}	S_{k3}	S_{k4}	v_{ko}
P	1	1	0	0	$+v_{dc}/2$
O	0	1	1	0	0
N	0	0	1	1	$-v_{dc}/2$

A l'aide des fonctions de connexion des interrupteurs, on peut écrire le système d'équation des tensions (a), (b), (c) de l'onduleur à trois niveaux, par rapport au point milieu « o » de la source de tension d'entrée comme suit :

$$\begin{cases} v_{ao} = (S_{a1}S_{a2} - S_{a3}S_{a4})v_{dc} \\ v_{bo} = (S_{b1}S_{b2} - S_{b3}S_{b4})v_{dc} \\ v_{co} = (S_{c1}S_{c2} - S_{c3}S_{c4})v_{dc} \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

Les tensions composées sont:

$$\begin{cases} v_{ab} = v_{ao} - v_{bo} = [(S_{a1}S_{a2} - S_{a3}S_{a4})]v_{dc} - [(S_{b1}S_{b2} - S_{b3}S_{b4})]v_{dc} \\ v_{bc} = v_{bo} - v_{co} = [(S_{b1}S_{b2} - S_{b3}S_{b4})]v_{dc} - [(S_{c1}S_{c2} - S_{c3}S_{c4})]v_{dc} \\ v_{ac} = v_{co} - v_{ao} = [(S_{c1}S_{c2} - S_{c3}S_{c4})]v_{dc} - [(S_{a1}S_{a2} - S_{a3}S_{a4})]v_{dc} \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

D'où:

$$\begin{bmatrix} v_{ab} \\ v_{bc} \\ v_{ac} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{a1}S_{a2} - S_{a3}S_{a4} \\ S_{b1}S_{b2} - S_{b3}S_{b4} \\ S_{c1}S_{c2} - S_{c3}S_{c4} \end{bmatrix} v_{dc} \quad (\text{II.10})$$

On en déduit les tensions simples (v_a , v_b , v_c) par rapport au point neutre n :

$$\begin{cases} v_a = v_{an} = v_{ao} - v_{no} \\ v_b = v_{bn} = v_{bo} - v_{no} \\ v_c = v_{cn} = v_{co} - v_{no} \end{cases} \quad (\text{II.11})$$

Avec v_{no} la tension entre le point milieu de l'alimentation continue de l'onduleur et le point neutre de la charge qui est représentée comme suit :

$$v_{no} = \frac{1}{3}(v_{ao} + v_{bo} + v_{co}) \quad (\text{II.12})$$

Si on admet que les tensions simples du récepteur forment un système triphasé équilibré, on aura :

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{a1}S_{a2} \\ S_{b1}S_{b2} \\ S_{c1}S_{c2} \end{bmatrix} v_{dc} - \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{a3}S_{a4} \\ S_{b3}S_{b4} \\ S_{c3}S_{c4} \end{bmatrix} v_{dc} \quad (\text{II.13})$$

Nous aboutissons en fin au système sous forme matricielle, qui s'écrit :

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{a1}S_{a2} - S_{a3}S_{a4} \\ S_{b1}S_{b2} - S_{b3}S_{b4} \\ S_{c1}S_{c2} - S_{c3}S_{c4} \end{bmatrix} v_{dc} \quad (\text{II.14})$$

II.4. Représentation vectorielle

Les tensions modulées simples à la sortie de l'onduleur à trois niveaux peuvent être écrites dans le référentiel $(\alpha\beta)$ de Concordia comme suit [12]:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

Le vecteur de tension v à la sortie de l'onduleur est exprimé dans le plan $(\alpha\beta)$ comme suit:

$$v = v_\alpha + j v_\beta \quad (\text{II.16})$$

A partir des équations (II.15) et (II.16) l'expression du vecteur de tension v sera donnée par :

$$v = \sqrt{\frac{2}{3}} (v_{an} + a v_{bn} + a^2 v_{cn}) \quad (\text{II.17})$$

Avec :

$$a = e^{j2\pi/3} = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}$$

La combinaison des états des interrupteurs des 3 bras engendrent 27 vecteurs de tension dans le plan $(\alpha\beta)$ comme le montre la Figure. II.8, dont 24 sont actifs et 3 sont nuls. Selon ces états, on aura 19 vecteurs de tension différents en module [12] [16].

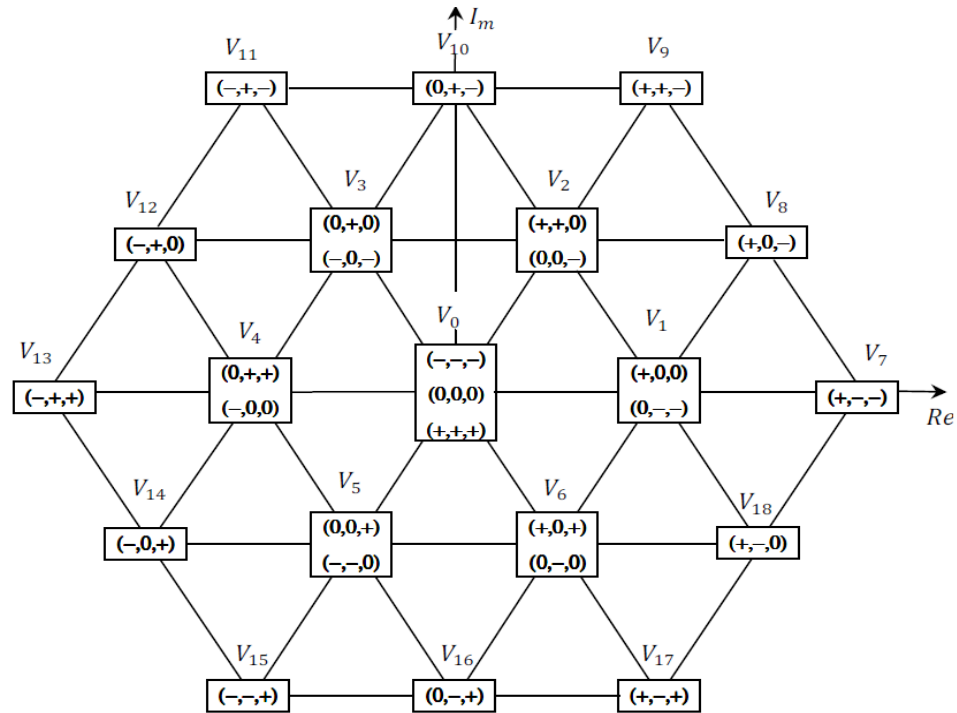


Figure. II.8. Vecteurs de tension et états de commutation possibles générés par un onduleur à trois niveaux.

La représentation de ces vecteurs montre qu'ils sont classés en quatre groupes selon leurs modules [12] [17]. On distingue alors :

- Le vecteur de tension nul ;
- Les vecteurs de tension petits ;
- Les vecteurs de tension moyens ;
- Les vecteurs de tension grands.

Le vecteur nul à trois états de commutation, les petits vecteurs ont deux états, les moyens et les grands vecteurs ont seulement un seul état de commutation.

Les vecteurs de tension nuls génèrent des tensions modulées nulles et sont obtenus à partir de trois combinaisons différentes des états d'interrupteurs: $V_0(O,O,O)$, $V_7(P,P,P)$ et $V_{14}(N,N,N)$. Ces vecteurs n'ont pas d'influence sur la tension du point milieu de l'onduleur à trois niveaux.

Les vecteurs de tension petits sont obtenus à partir de douze combinaisons différentes des états d'interrupteurs. Ces vecteurs ont un effet sur la tension du point milieu « o » car leur application connecte un ou deux courants issus de la charge au point milieu. En effet, six vecteurs parmi eux permettent de charger le condensateur du haut C_1 , tandis que, les six autres le décharge.

Les vecteurs de tension moyens sont obtenus à partir de six combinaisons différentes des états d'interrupteurs. Ils ont un effet sur la tension du point milieu car leur application induit la connexion d'un des courants de lignes au point milieu. Par conséquent, un déséquilibre des tensions aux bornes des deux condensateurs C_1 et C_2 est engendré.

Les vecteurs de tension grands sont obtenus à partir de six combinaisons différentes des états d'interrupteurs. Leur application n'a aucun effet sur la tension du point milieu car le courant traversant les deux condensateurs C_1 et C_2 est le même.

Le Tableau II.2 montre les différentes configurations des commutateurs avec les vecteurs de tension correspondants :

Tableau II.2. Etats des commutateurs et des vecteurs correspondants.

N°	S_a	S_b	S_c	Vecteur de tension V	N°	S_a	S_b	S_c	Vecteur de tension V
1	0	0	0	$V_0 = 0$	14	+	-	0	$V_{13} = \frac{1}{2}v_{dc} - j\frac{\sqrt{3}}{6}v_{dc}$
2	+	0	0	$V_1 = \frac{1}{3}v_{dc}$	15	-	-	-	$V_{14} = 0$
3	+	+	0	$V_2 = \frac{1}{6}v_{dc} + j\frac{\sqrt{3}}{6}v_{dc}$	16	+	-	-	$V_{15} = \frac{2}{3}v_{dc}$
4	0	+	0	$V_3 = -\frac{1}{6}v_{dc} + j\frac{\sqrt{3}}{6}v_{dc}$	17	+	+	-	$V_{16} = \frac{1}{3}v_{dc} + j\frac{\sqrt{3}}{3}v_{dc}$
5	0	+	+	$V_4 = -\frac{1}{3}v_{dc}$	18	-	+	-	$V_{17} = -\frac{1}{3}v_{dc} + j\frac{\sqrt{3}}{3}v_{dc}$
6	0	0	+	$V_5 = -\frac{1}{6}v_{dc} - j\frac{\sqrt{3}}{6}v_{dc}$	19	-	+	+	$V_{18} = -\frac{2}{3}v_{dc}$
7	+	0	+	$V_6 = \frac{1}{6}v_{dc} - j\frac{\sqrt{3}}{6}v_{dc}$	20	-	-	+	$V_{19} = -\frac{1}{3}v_{dc} + j\frac{\sqrt{3}}{3}v_{dc}$
8	+	+	+	$V_7 = 0$	21	+	-	+	$V_{20} = -\frac{1}{3}v_{dc} - j\frac{\sqrt{3}}{3}v_{dc}$
9	+	0	-	$V_8 = \frac{1}{2}v_{dc} + j\frac{\sqrt{3}}{6}v_{dc}$	22	0	-	-	$V_{21} = \frac{1}{3}v_{dc}$
10	0	+	-	$V_9 = j\frac{\sqrt{3}}{3}v_{dc}$	23	0	0	-	$V_{22} = \frac{1}{6}v_{dc} + j\frac{\sqrt{3}}{6}v_{dc}$
11	-	+	0	$V_{10} = -\frac{1}{2}v_{dc} + j\frac{\sqrt{3}}{6}v_{dc}$	24	-	0	-	$V_{23} = \frac{1}{6}v_{dc} + j\frac{\sqrt{3}}{6}v_{dc}$
12	-	0	+	$V_{11} = -\frac{1}{2}v_{dc} - j\frac{\sqrt{3}}{6}v_{dc}$	25	-	0	0	$V_{24} = -\frac{1}{3}v_{dc}$
13	0	-	+	$V_{12} = -j\frac{\sqrt{3}}{3}v_{dc}$	26	-	-	0	$V_{25} = -\frac{1}{6}v_{dc} - j\frac{\sqrt{3}}{6}v_{dc}$
					27	0	-	0	$V_{26} = \frac{1}{6}v_{dc} - j\frac{\sqrt{3}}{6}v_{dc}$

II.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons d'abord présenté la modélisation de l'ensemble du système constitué d'un réseau de distribution, d'une charge non linéaire et un filtre actif parallèle à trois niveaux. Le modèle mathématique de l'onduleur de tension triphasé à trois niveaux permet de représenter les tensions triphasées de sortie du convertisseur par des vecteurs d'espace. Dans le chapitre suivant, on va établir l'expression de la loi de commande prédictive à modèle.

CHAPITRE III

Commande Prédicative du Filtre Actif Parallèle à Trois Niveaux

III.1. Introduction

Le bon choix de la méthode d'identification des courants de référence dans le cas d'un filtre actif parallèle, ainsi que de la technique de commande est primordial afin que le filtre actif puisse remplir les tâches pour lesquelles il est destiné.

Ce chapitre comporte deux parties, la première partie, consiste à étudier les deux méthodes de calcul des courants de référence. Nous traitons dans la deuxième partie la philosophie et le principe de la commande prédictive, par la suite nous faisons une application de la commande prédictive d'un filtre actif parallèle à trois niveaux. Pour terminer, les résultats des simulations que nous avons obtenus sont exposés.

III.2. Méthodes d'extraction des courants de référence

La qualité de la compensation des harmoniques de courant dépend fortement des performances de la méthode d'identification choisie. En effet, un système de commande, même très efficace, ne pourra pas à lui seul effectuer un filtrage satisfaisant si les courants harmoniques sont mal identifiés. Pour cette raison, de nombreuses méthodes d'identification ont été développées dans la littérature [18].

III.2.1. Méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées

La méthode des puissances active et réactive instantanées (couramment notée méthode $p-q$) a été initialement développée par Akagi et exploite la transformation de Concordia des tensions simples et des courants de ligne, afin de calculer les puissances active et réactive instantanées. La composante fondamentale est transformée en une composante continue et les composantes harmoniques en composantes alternatives. En éliminant la composante continue de la puissance active instantanée (correspondant à la composante fondamentale du courant de la charge) à l'aide d'un simple filtre passe-bas (FPB), les composants harmoniques peuvent être identifiés.

Soient respectivement les tensions de raccordement du filtre actif parallèle à trois niveaux et les trois courants de charge, notés v_{sa} , v_{sb} , v_{sc} et i_{ca} , i_{cb} , i_{cc} . La transformation de Concordia permet de ramener ce système triphasé équilibré à un système diphasé dont les axes sont en quadrature [4] [9] [18]:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} \quad (\text{III.1})$$

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

La puissance active instantanée p et la puissance réactive instantanée q sont définies par :

$$\begin{bmatrix} p \\ -q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{III.3})$$

Les puissances active et réactive instantanées peuvent s'écrire comme la somme d'une composante continue et d'une composante alternative :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{p} + \tilde{p} \\ \bar{q} + \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (\text{III.4})$$

Avec $\bar{p}$ et $\bar{q}$ les composantes continues de p et q , et $\tilde{p}$ et $\tilde{q}$ les composantes alternatives de p et q . A partir de l'équation (III.3), nous pouvons déduire les expressions des composantes du courant de charge selon les axes $(\alpha\beta)$:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p \\ -q \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ -q \end{bmatrix} \quad (\text{III.5})$$

En remplaçant (III.4) dans (III.5), ces courants s'expriment selon les axes $(\alpha\beta)$ par :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ -\bar{q} \end{bmatrix} + \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ -\tilde{q} \end{bmatrix} \quad (\text{III.6})$$

Suivant la fonction que nous souhaitons donner au filtre actif parallèle, nous pouvons compenser simultanément les harmoniques de courant et l'énergie réactive ou bien uniquement l'un des deux. Si nous voulons par exemple compenser simultanément les harmoniques de courant et l'énergie réactive, nous éliminons alors la composante continue de p à l'aide d'un simple FPB comme le présente la Figure III.1. Dans ce cas et après avoir ajouté à la composante alternative de la puissance active instantanée, la puissance active p_c nécessaire à la régulation de la tension continue v_{dc} , les courants de référence, notés i_α^* et i_β^* , s'expriment selon les axes $(\alpha\beta)$ par :

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha}^* \\ i_{\beta}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \begin{bmatrix} v_{\alpha} & -v_{\beta} \\ v_{\beta} & v_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} + p_c \\ -q \end{bmatrix} \quad (\text{III.7})$$

Enfin, il est aisé d'obtenir les courants de référence selon les axes (abc) par la transformation inverse de Concordia :

$$\begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha}^* \\ i_{\beta}^* \end{bmatrix} \quad (\text{III.8})$$

La Figure III.2 illustre l'identification des courants de référence lors de la compensation simultanée des courants harmoniques et de l'énergie réactive par la méthode des puissances instantanées [4] [9].

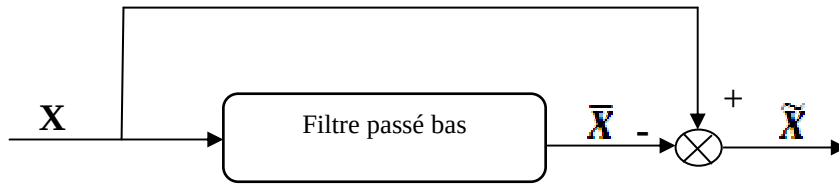


Figure III.1. Schéma représentant le principe de séparation des puissances.

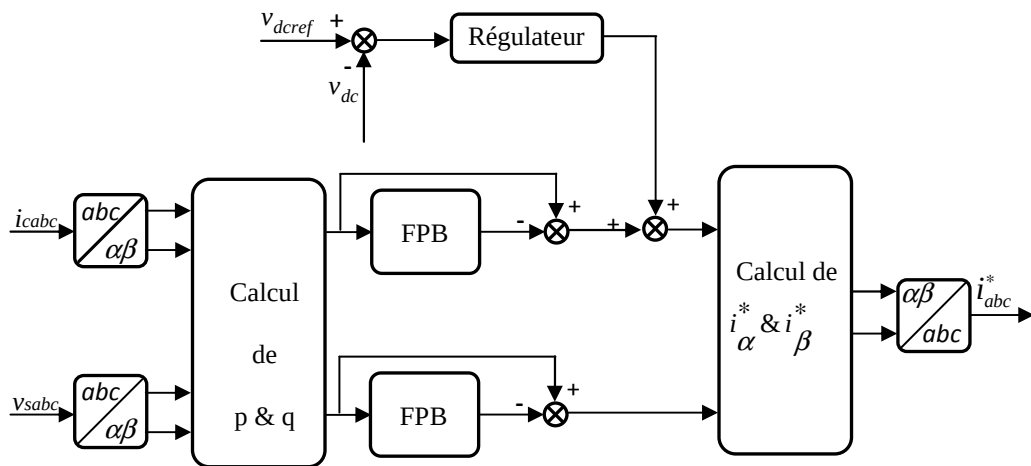


Figure III.2. Schéma de principe de la méthode d'identification des puissances instantanées.

III.2.2. Méthode des puissance réelle et imaginaire instantanées modifiée

III.2.2.1. Principe du *FMV* (filtre multi-variable)

Son principe de base s'appuie sur les travaux de Song Hong-Scok. Il est basé directement sur l'extraction de la composante fondamentale des signaux d'entrée (tension ou courant), suivant les axes $(\alpha\beta)$ [18] [19] [20] [21] [22]. La fonction de transfert de ce filtre est alors la suivante :

$$H(s) = \frac{\hat{x}_{\alpha\beta}(s)}{x_{\alpha\beta}(s)} = K \frac{(s+K) + j\omega_c}{(s+K)^2 + \omega_c^2} \quad (\text{III.9})$$

Où est ω_c défini par :

$$\omega_c = \varepsilon.n.\omega_f \quad (\text{III.10})$$

Avec :

ω_c : La pulsation de coupure du filtre ;

ω_f : La pulsation de la composante fondamentale du signal d'entrée ;

n : Le rang de la composante du signal à filtrer ;

ε : Une constante égale à ± 1 (composante directe ($\varepsilon = 1$) ou inverse ($\varepsilon = -1$)) ;

K : Une constante positive ;

$x_{\alpha\beta}$: Les signaux d'entrée du *FMV* (tension ou courant) ;

$\hat{x}_{\alpha\beta}$: Les signaux de sortie du *FMV*.

A partir de l'équation (III.9) et après un court développement, nous pouvons établir les deux expressions suivantes [18]:

$$\hat{X}_\alpha(s) = \frac{K(s+K)}{(s+K)^2 + \omega_c^2} X_\alpha(s) - \frac{K\omega_c}{(s+K)^2 + \omega_c^2} X_\beta(s) \quad (\text{III.11})$$

$$\hat{X}_\beta(s) = -\frac{K\omega_c}{(s+K)^2 + \omega_c^2} X_\alpha(s) + \frac{K(s+K)}{(s+K)^2 + \omega_c^2} X_\beta(s) \quad (\text{III.12})$$

Les équations (III.11) et (III.12) peuvent également être exprimées sous la forme :

$$\hat{X}_\alpha(s) = \frac{K}{s} [X_\alpha(s) - \hat{X}_\alpha(s)] - \frac{\omega_c}{s} \hat{X}_\beta(s) \quad (\text{III.13})$$

$$\hat{X}_\beta(s) = \frac{K}{s} [X_\beta(s) - \hat{X}_\beta(s)] - \frac{\omega_c}{s} \hat{X}_\alpha(s) \quad (\text{III.14})$$

La Figure III.3 présente le schéma bloc du filtre multi-variable [21] :

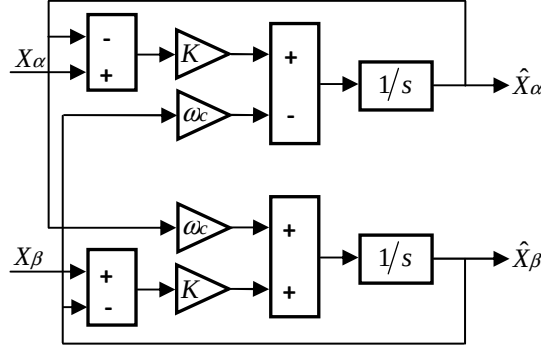


Figure III.3. Schéma bloc du FMV.

III.3.2.2. Extraction des courants harmoniques

Contrairement aux filtres passe bas, les filtres multi-variables offrent la possibilité d'extraire d'une manière précise les courants harmoniques dans le repère $(\alpha\beta)$. La Figure III.4 présente le schéma modifié de l'identification des courants de référence par la méthode des puissances instantanées en employant des FMVs [21] [22].

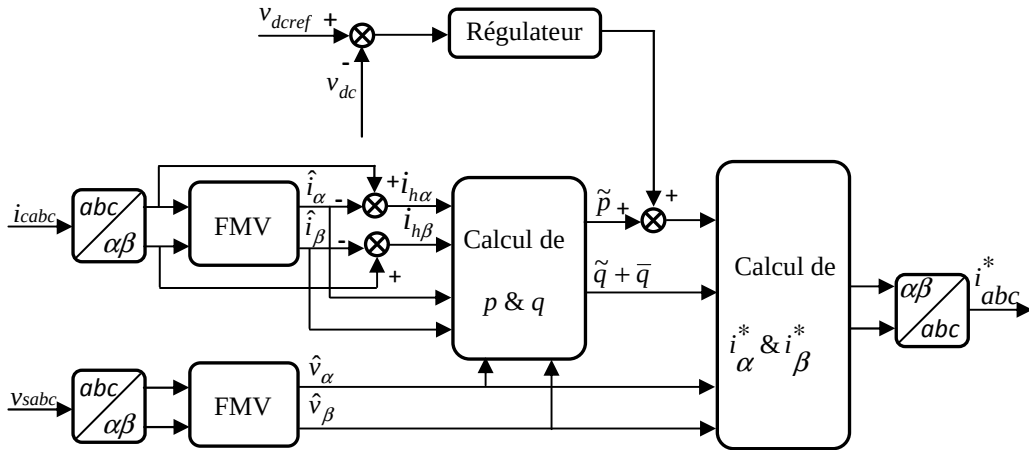


Figure III.4. Schéma de principe de la méthode d'identification des puissances instantanées modifiée.

Quant aux courants diphasés d'axes $(\alpha\beta)$, ils peuvent être définis comme la somme d'une composante fondamentale et d'une composante harmonique :

$$\begin{cases} i_\alpha = \hat{i}_\alpha + i_{h\alpha} \\ i_\beta = \hat{i}_\beta + i_{h\beta} \end{cases} \quad (\text{III.15})$$

Après isolation des composantes fondamentales en tension notées $\hat{v}_{\alpha\beta}$, et des courants harmoniques $i_{h\alpha\beta}$, nous pouvons alors calculer les composantes alternatives des puissances réelle $\tilde{p}$ et imaginaire $\tilde{q}$ instantanées par [22] :

$$\begin{bmatrix} \tilde{p} \\ -\tilde{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{v}_\alpha & \hat{v}_\beta \\ -\hat{v}_\beta & \hat{v}_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{h\alpha} \\ i_{h\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{III.16})$$

Avec $i_{h\alpha}$ et $i_{h\beta}$ définis par :

$$i_{h\alpha} = (i_{\alpha d} - \hat{i}_{\alpha d}) + (i_{\alpha inv} - \hat{i}_{\alpha inv}) \quad (\text{III.17})$$

$$i_{h\beta} = (i_{\beta d} - \hat{i}_{\beta d}) + (i_{\beta inv} - \hat{i}_{\beta inv}) \quad (\text{III.18})$$

La composante fondamentale de la puissance réactive instantanée est définie par :

$$\bar{q} = \hat{v}_\beta \hat{i}_\alpha - \hat{v}_\alpha \hat{i}_\beta \quad (\text{III.19})$$

Après avoir ajouté à la composante alternative de la puissance active instantanée, la puissance active p_c nécessaire à la régulation de la tension continue v_{dc} , les courants de référence selon les axes $(\alpha\beta)$ sont calculés par :

$$i_\alpha^* = \frac{\hat{v}_\alpha}{\hat{v}_\alpha^2 + \hat{v}_\beta^2} (\tilde{p} + p_c) + \frac{\hat{v}_\beta}{\hat{v}_\alpha^2 + \hat{v}_\beta^2} (\tilde{q} + \bar{q}) \quad (\text{III.20})$$

$$i_\beta^* = \frac{\hat{v}_\beta}{\hat{v}_\alpha^2 + \hat{v}_\beta^2} (\tilde{p} + p_c) + \frac{\hat{v}_\alpha}{\hat{v}_\alpha^2 + \hat{v}_\beta^2} (\tilde{q} + \bar{q}) \quad (\text{III.21})$$

En substituant les équations (III.16) et (III.19) dans les équations (III.20) et (III.21), nous obtenons :

$$i_\alpha^* = i_{h\alpha} + i_{q\alpha} + i_{c\alpha} \quad (\text{III.22})$$

$$i_\beta^* = i_{h\beta} + i_{q\beta} + i_{c\beta} \quad (\text{III.23})$$

Où $i_{q\alpha}, i_{q\beta}, i_{c\alpha}$ et $i_{c\beta}$ sont définis par :

$$\begin{bmatrix} i_{q\alpha} \\ i_{q\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\hat{v}_\alpha^2 + \hat{v}_\beta^2} \begin{bmatrix} 0 & -\hat{v}_\beta \\ 0 & \hat{v}_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -\bar{q} \end{bmatrix} \quad (\text{III.24})$$

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\hat{v}_\alpha^2 + \hat{v}_\beta^2} \begin{bmatrix} \hat{v}_\alpha & 0 \\ \hat{v}_\beta & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_c \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{III.25})$$

Les courants de référence obtenus à partir des équations (II.22) et (II.23) contiennent trois termes [4]:

- Le premier terme correspond aux composantes harmoniques, directes et inverses ;
- Le deuxième terme est le courant réactif destiné à compenser la puissance réactive;
- Le troisième terme est le courant actif destiné à maintenir la tension v_{dc} égale à sa

valeur de référence $v_{dc\text{ref}}$.

Grâce à la transformation de Concordia inverse, les équations (II.22) et (II.23), permettent de déduire les trois courants de référence.

III.3. Principe général de la commande prédictive

Le but de la méthode de commande est de conduire une variable système $x(t)$ qui est déterminée par l'action de commande $S(t)$ (habituellement les signaux de commutation du convertisseur) le plus près possible d'une valeur de référence souhaitée $x^*(t)$. En raison d'un nombre fini d'états de commutation S_i , avec $i = 1, \dots, n$, nous pouvons prédire toutes les variables possibles du système $x^p(k+1)$ sur une période d'échantillonnage T_s en fonction du modèle du système et des valeurs mesurées. Ensuite, une fonction de coût g qui dépend de l'objectif de la commande peut être définie. L'évaluation de la fonction coût avec les n différentes commandes possibles, entraînera n différents coûts. Enfin, l'état optimal de commutation qui minimise la fonction de coût est sélectionné et appliqué directement au convertisseur. En résumé, la commande prédictive est réalisée selon les étapes suivantes [16] [17] [23]:

- **Étape 1 : Mesures**

Obtenir les signaux de retour requis pour le modèle prédictif ou le calcul de la référence.

- **Étape 2 : Calcul et extrapolation des références**

Calculer la variable de référence en fonction de l'application spécifique, puis obtenir les valeurs futures de la référence en utilisant l'extrapolation.

- **Étape 3 : Construire des modèles en temps continu du système**

La modélisation du système s'effectue en dérivant des équations qui décrivent le comportement dynamique des variables contrôlées généralement basées sur un modèle linéaire comme suit :

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu$$

Où x représente la variable à contrôler (tension, courant, flux, puissance) et u est l'entrée de contrôle (tension de réseau, état de commutation, tension continue).

- **Étape 4 :** Construire des modèles à temps discret du système

Un modèle de temps discret du système est nécessaire pour prédire le comportement des variables évaluées par la fonction de coût. Afin de discrétiser le modèle de système, la méthode d'avant-première Euler est utilisée en raison de sa simplicité. Il donne également une précision acceptable qui est nécessaire pour de bonnes performances. Selon cette approche, nous avons la forme de temps discrète du système comme suit:

$$\frac{dx}{dt} \approx \frac{x(k+1) - x(k)}{T_s}$$

Où T_s est le temps d'échantillonnage, $x(k+1)$ et $x(k)$ sont la valeur de la variable d'état dans le prochain temps d'échantillonnage et à l'état actuel, respectivement.

- **Étape 5 :** Prédiction des variables de commande

Prédire la valeur future des variables de commande basées sur les modèles à temps discret, les valeurs mesurées et tous les états possibles de commutation du convertisseur.

- **Étape 6 :** Minimiser la fonction de coût

En dernière étape, toutes les valeurs des variables prédites $x_i^p(k+1)$ sont comparées avec leur références $x^*(k+1)$ à l'aide d'une fonction de coût g comme suit :

$$g = |x^*(k+1) - x_i^p(k+1)|, i = 1, \dots, n$$

L'objectif de l'optimisation de la fonction coût est de sélectionner la valeur de coût g aussi près que possible de zéro. L'état optimal de commutation qui

minimise la fonction de coût est choisi et ensuite appliqué au convertisseur au moment du prochain instant d'échantillonnage.

III.4. Commande prédictive de courants du filtre

La stratégie de commande prédictive de courants est basée sur la recherche de l'optimum d'une fonction de performance (fonction de coût) permettent de déterminer le vecteur de commande optimal, parmi l'ensemble des vecteurs possibles. Elle consiste donc à appliquer un seul vecteur de commande durant cette période. Le schéma fonctionnel de la commande prédictive d'un filtre actif parallèle à trois niveaux est présenté sur la Figure III.5:

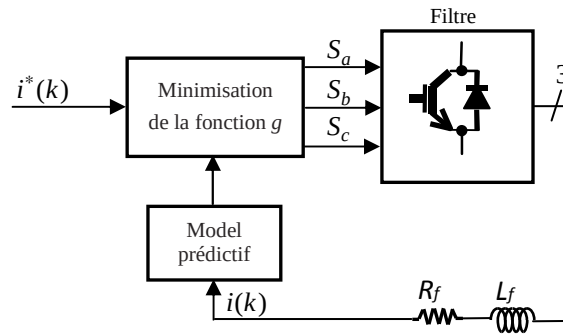


Figure III.5. Schéma de la commande prédictive d'un filtre actif parallèle à trois niveaux.

III.4.1. Modèle prédictif du filtre

Puisqu'elle basée sur la recherche du vecteur de commande optimal, cette stratégie de commande prédictive nécessite tout d'abord de déterminer l'expression analytique des variations provoquées par l'application de chacun des vecteurs de commande sur les courants et ce durant un intervalle de temps égale à la période de commutation. La dynamique de ces courants est régie par les deux équations différentielles suivantes [17] [24] [25] :

$$\begin{cases} L_f \frac{di_{inja}}{dt} + R_f i_{inja} = v_{fa} - v_{sa} \\ L_f \frac{di_{injb}}{dt} + R_f i_{injb} = v_{fb} - v_{sb} \\ L_f \frac{di_{injc}}{dt} + R_f i_{injc} = v_{fc} - v_{sc} \end{cases} \quad (III.26)$$

Dans le repère stationnaire($\alpha\beta$) le système d'équations précédent est équivalent au système d'équation ci-après :

$$\begin{cases} \frac{L_f di_{inj\alpha}}{dt} + R_f i_{inj\alpha} = v_{f\alpha} - v_{s\alpha} \\ \frac{L_f di_{inj\beta}}{dt} + R_f i_{inj\beta} = v_{f\beta} - v_{s\beta} \end{cases} \quad (III.27)$$

Le courant de chaque capacité s'exprime comme suit [16] :

$$i_{dc} = C \frac{dv_{dc}}{dt} \quad (III.28)$$

Pour passer du modèle continu au modèle discret, l'approximation de la dérivée suivante sera utilisée :

$$\frac{di_{inj}}{dt} \approx \frac{i_{inj}(k+1) - i_{inj}(k)}{T_s} \quad (III.29)$$

La loi de commande prédictive fournissant le vecteur de commande nécessaire pour chaque période d'échantillonnage est exprimée comme suit :

$$\begin{cases} i_{inj\alpha}(k+1) = \left(1 - T_s \frac{R_f}{L_f}\right) i_{inj\alpha}(k) + \frac{T_s}{L_f} (v_{f\alpha} - v_{s\alpha}) \\ i_{inj\beta}(k+1) = \left(1 - T_s \frac{R_f}{L_f}\right) i_{inj\beta}(k) + \frac{T_s}{L_f} (v_{f\beta} - v_{s\beta}) \end{cases} \quad (III.30)$$

Cependant, le vecteur de tension à la sortie du filtre $v_{f\alpha\beta}$ ne peut avoir que 19 valeurs en fonction des différents états possibles des interrupteurs. En prenant en compte cette propriété et si le même vecteur de commande est maintenu à la sortie du filtre pendant la période T_s , uniquement 19 variations du vecteur de courants sont envisageables.

Le courant de chaque capacité s'exprime comme suit :

$$i_c = C \frac{dv_{dc}}{dt} \quad (III.31)$$

Les expressions des courants (i_{c1}, i_{c2}) traversant respectivement les condensateurs (C_1, C_2) sont données comme suit [16] [23]:

$$i_{c1}(k) = i_{dc}(k) - H_{1a}i_a(k) - H_{1b}i_b(k) - H_{1c}i_c(k) \quad (III.32)$$

$$i_{c2}(k) = i_{dc}(k) + H_{2a}i_a(k) + H_{2b}i_b(k) + H_{2c}i_c(k) \quad (III.33)$$

Les variables (H_{1x}, H_{2x}) sont calculées en fonction des états d'interrupteurs de l'onduleur à trois niveaux comme suit :

$$H_{1x} = \begin{cases} 1 & \text{si } S_x = "+" \\ 0 & \text{autre} \end{cases} \quad (\text{III.34})$$

$$H_{2x} = \begin{cases} 1 & \text{si } S_x = "-" \\ 0 & \text{autre} \end{cases} \quad (\text{III.35})$$

Enfin, pour obtenir le modèle discret des tensions des deux capacités, nous avons utilisé l'approximation d'Euler :

$$\frac{dv_{cx}}{dt} \approx \frac{v_{cx}(k+1) - v_{cx}(k)}{T_s} \quad (\text{III.36})$$

Les équations en temps discret qui permet la prédiction des tensions de bus continu sont données par :

$$v_{c1}^p(k+1) = v_{c1}(k) + \frac{1}{C} i_{c1}(k) T_s \quad (\text{III.37})$$

$$v_{c2}^p(k+1) = v_{c2}(k) + \frac{1}{C} i_{c2}(k) T_s \quad (\text{III.38})$$

III.4.2. Fonction de coût

En général le choix de la fonction de coût dépend principalement de l'application visée. La fonction de coût considérée dans ce chapitre à deux objectifs :

- Le premier consiste à minimiser l'erreur entre les courants du filtre et leurs références.
- Le second vise à équilibrer le bus continu en minimisant la différence entre les tensions aux bornes des capacités.

Pour cela nous proposons la fonction de coût suivante [16] [17] [23]:

$$g = |i_{\alpha}^* - i_{\alpha}^p| + |i_{\beta}^* - i_{\beta}^p| + \lambda_{dc} |v_{c1}^p - v_{c2}^p| \quad (\text{III.39})$$

III.5. Résultats de simulation

La commande prédictive de courants générés par le filtre actif parallèle à trois niveaux a été simulée à l'aide du logiciel Matlab/Simulink. Dans les deux méthodes d'identification, différents cas sont envisagés tel que : tensions de source sinusoïdales équilibrées et tensions de source sinusoïdales déséquilibrées. Les paramètres du système utilisés dans ces simulations sont indiqués dans le Tableau III.1 [4].

Tableau III.1. Paramètres de simulation d'un filtre actif à trois niveaux.

Paramètre		Valeur numérique
Réseau électrique	E_s	220 V
	Fréquence f	50 Hz
	Résistance R_s	50 mΩ
	Inductance L_s	0.02 mH
Charge perturbatrice	Résistance R	40 Ω
	Inductance L	10 mH
	Résistance R_c	1.2 mΩ
	Inductance L_c	0.3 mH
Filtre actif parallèle	Résistance R_f	5 mΩ
	Inductance L_f	5 mH
	Tension v_{dc}	800 V
	Condensateur $C_1=C_2$	3.3 mF
	Fréquence d'échantillonnage	10 kHz

III.5.1. Tensions de source sinusoïdales équilibrées

La Figure III.6 représente les résultats de simulation obtenus par la méthode $p-q$ pour des tensions de source équilibrées. Les formes d'ondes sont données successivement : les tensions de source, les courants de la charge, les courants du filtre et les courants de source. Le spectre harmonique du courant de source avant et après compensation est représenté par les Figures III.7.a et III.7.b. Le taux de distorsion harmonique avant compensation était égal à 29.01%, après compensation il s'est réduit à 1.62%.

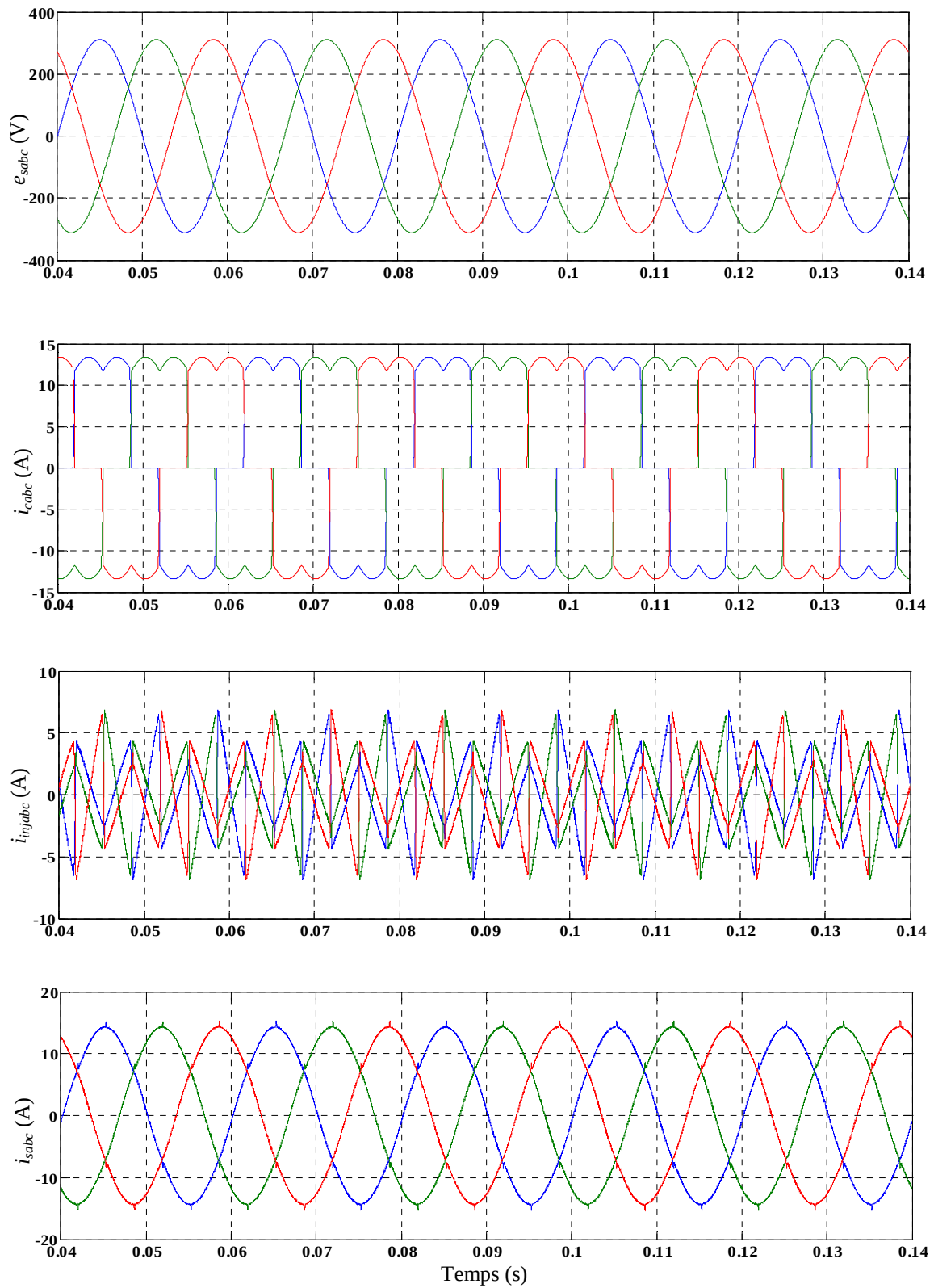


Figure III.6. Performances de la compensation des harmoniques par la méthode $p-q$ (tensions de source sinusoïdales équilibrées).

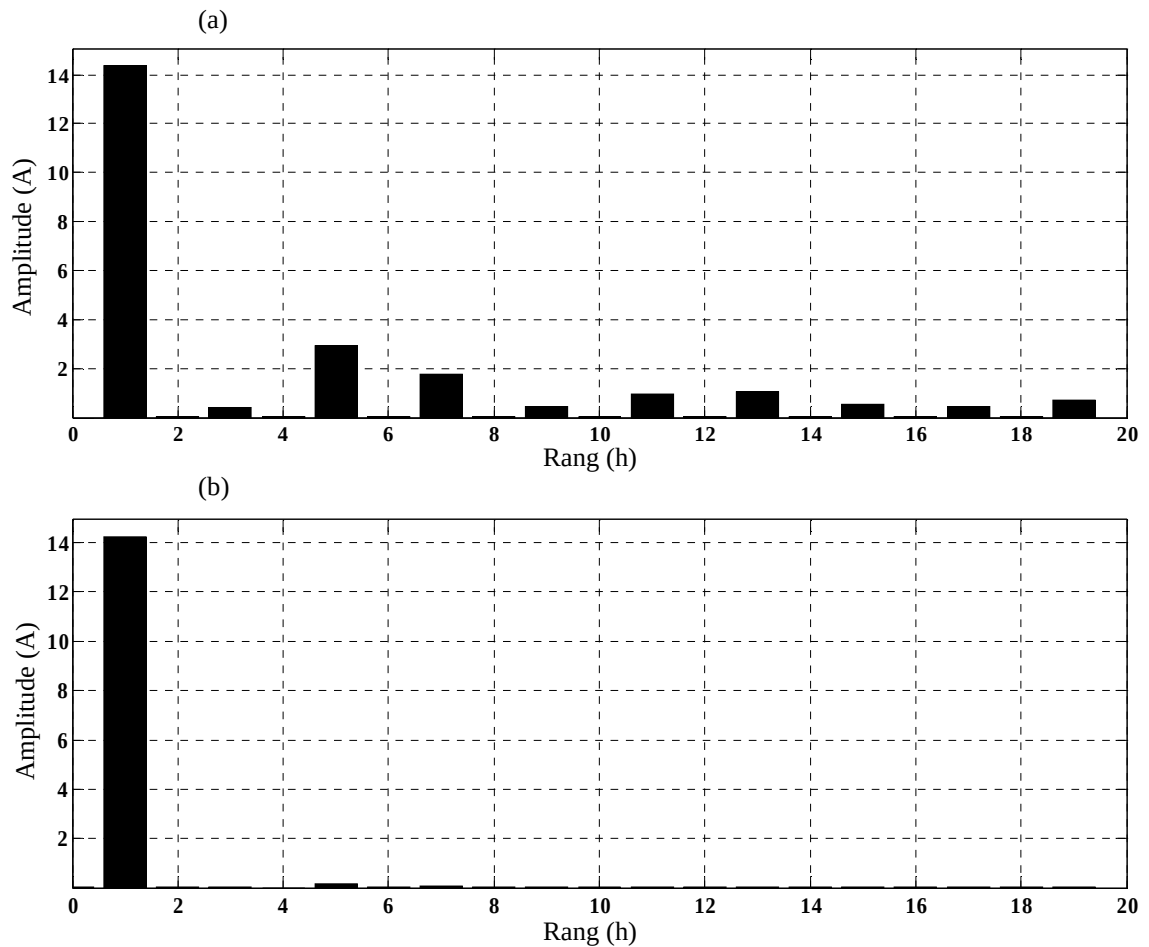


Figure III.7. Spectre harmonique du courant de source avant compensation et spectre harmonique du courant de source après compensation (méthode $p-q$).

La Figure III.8 représente les résultats de simulation du filtre actif parallèle à trois niveaux obtenus pour la méthode $p-q$ modifiée pour des tensions de source équilibrées. Les Figures III.9.a et III.9.b représentent respectivement le spectre harmonique du courant de source, dont le THD était de 29.01% avant compensation, pour se réduire à 1.05% après compensation. On constate, que pour des conditions idéales, les performances obtenues par ces deux méthodes d'identification sont quasiment identiques.

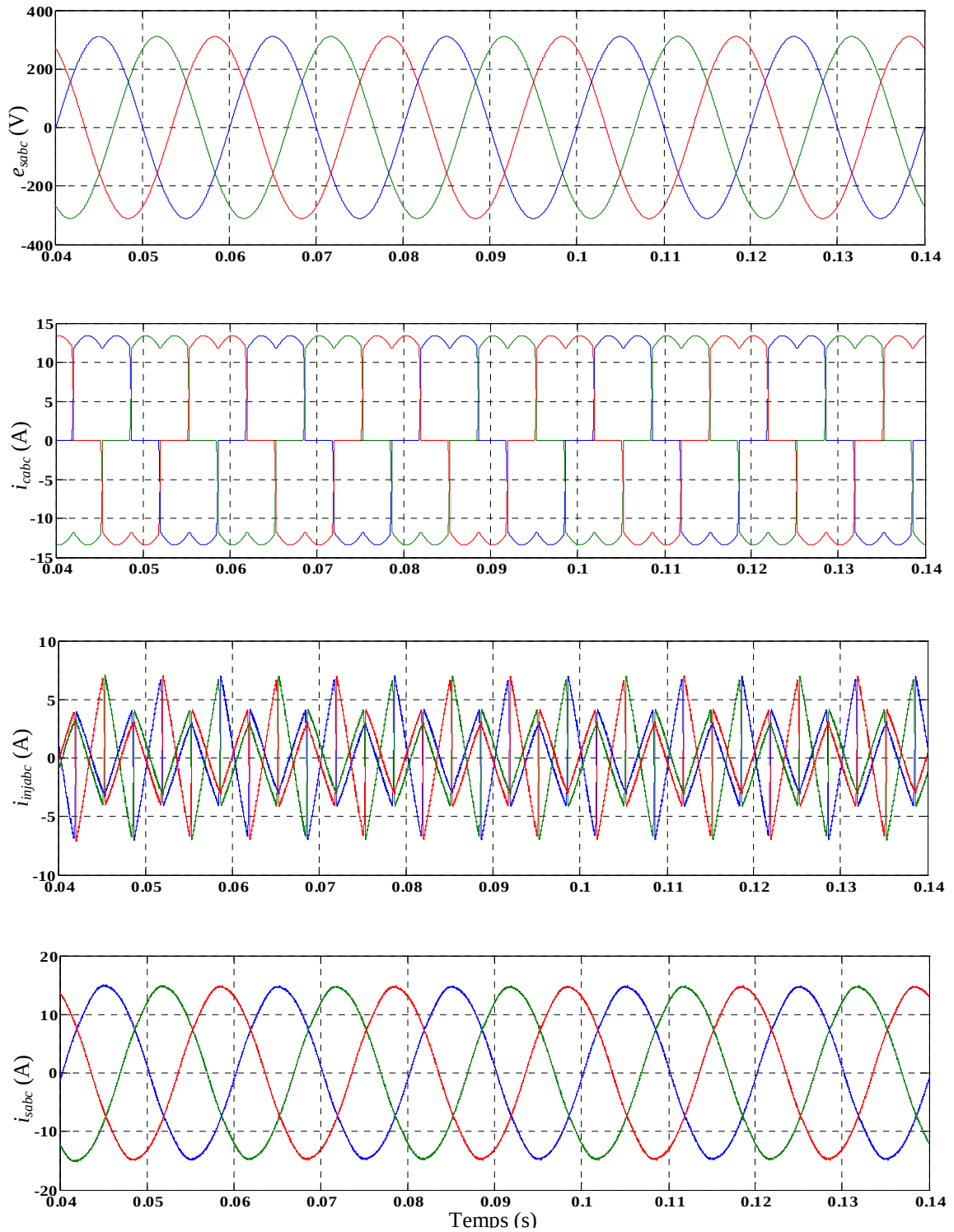


Figure III.8. Performances de la compensation des harmoniques par la méthode $p-q$ modifiée (tensions de source sinusoïdales équilibrées).

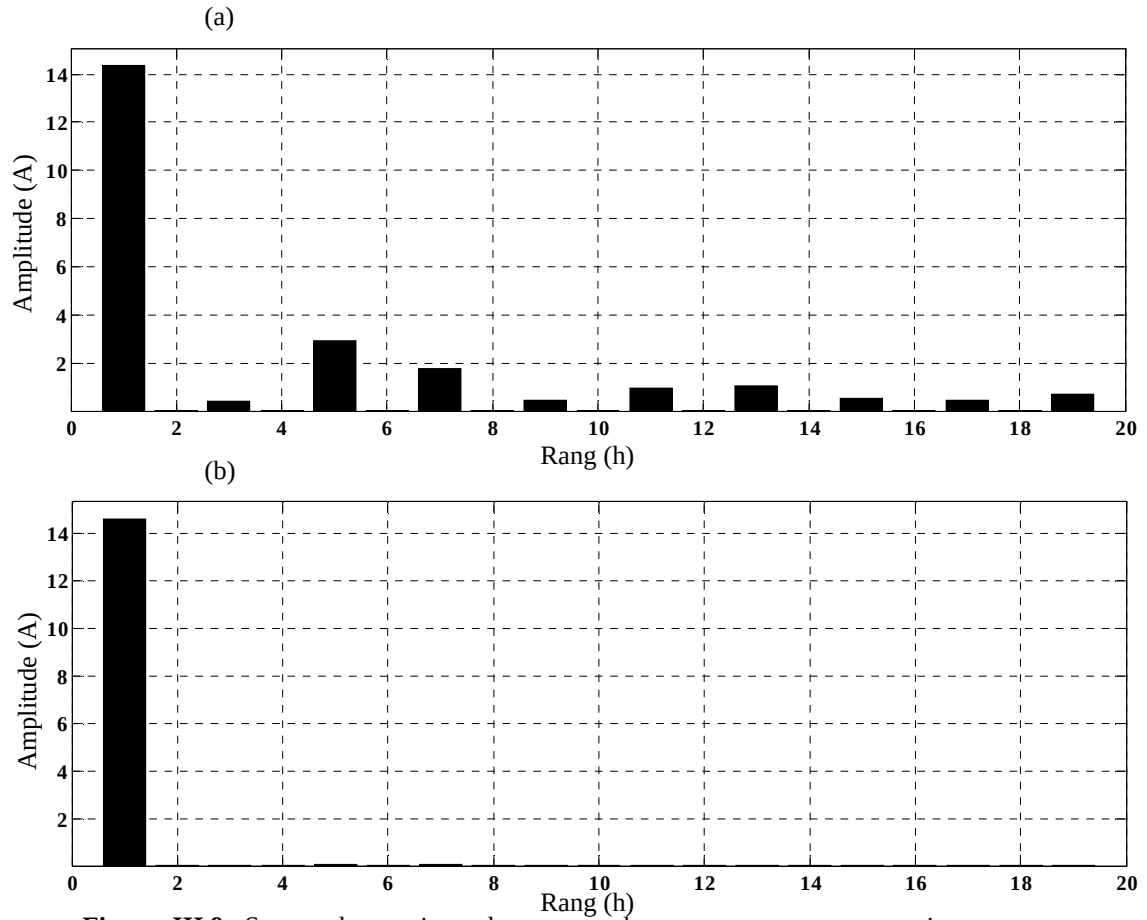


Figure III.9. Spectre harmonique du courant de source avant compensation et spectre harmonique du courant de source après compensation (méthode $p-q$ modifiée).

De plus, La Figure III.10 montre la régulation du bus continu à la valeur désirée et le maintien des tensions aux bornes des condensateurs au même niveau.

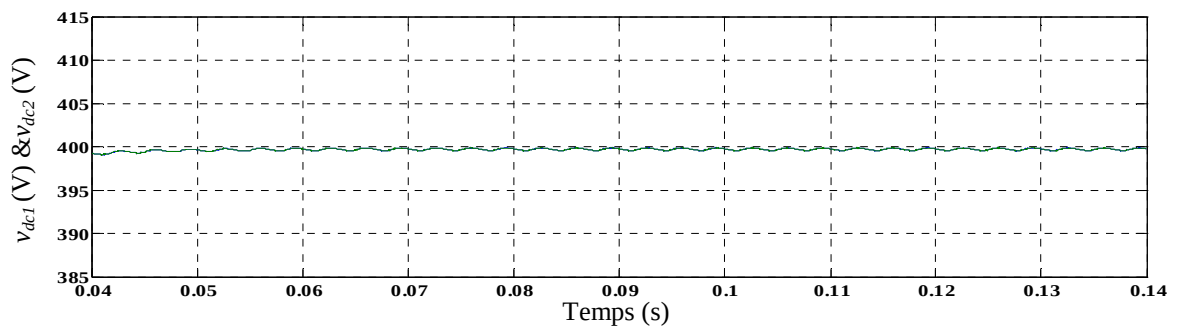


Figure III.10. Tensions aux bornes des deux condensateurs.

III.5.2. Tensions de source sinusoïdales déséquilibrées

Afin de tester le fonctionnement du filtre actif parallèle à trois niveaux sous une tension perturbée du réseau électrique, on étudie le cas d'un réseau déséquilibré: $E_{sa}=230$ V, $E_{sb}=220$ V, $E_{sc}=190$ V. La Figure III.11 représente les résultats de simulation obtenus par les deux méthodes d'identification dans ces conditions. Sur cette figure sont représentés : les tensions de source, les courants de la charge non linéaire, les courants de la source après filtrage pour la méthode $p-q$, les courants de la source après filtrage pour la méthode $p-q$ modifiée. Dans ce cas, les $THDs$ des courants de source avant filtrage sont égaux, dans l'ordre des phases (a), (b) et (c), à 27.02%, 28.19% et 32.20%. Ces $THDs$ deviennent respectivement égaux à 7.23%, 7.77% et 6.78% après filtrage pour la méthode $p-q$ et 1.44%, 1.23% et 1.25% pour la méthode $p-q$ modifiée. La réduction significative du THD , exprime principalement les bons résultats obtenus par cette approche.

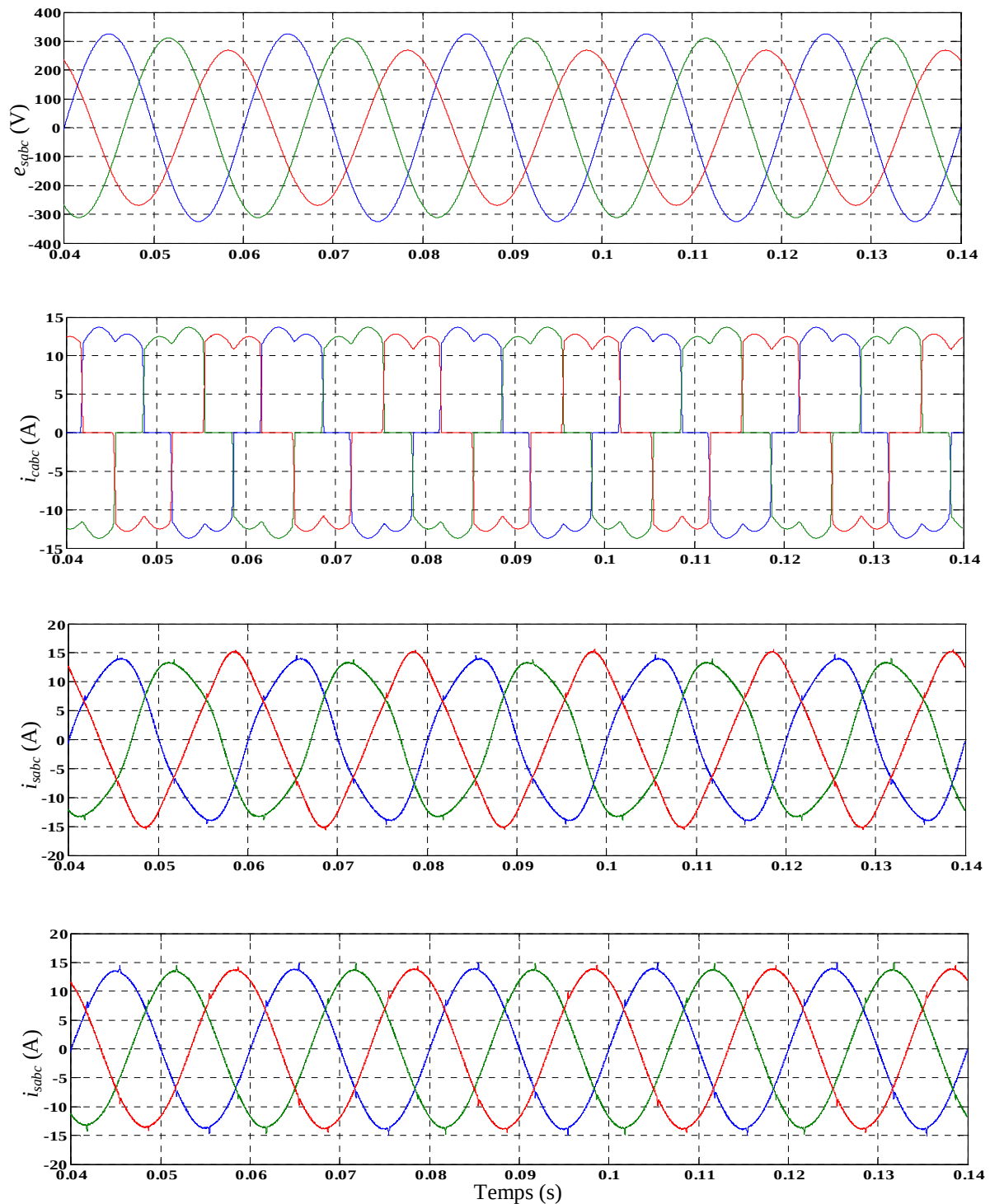


Figure III.11. Performances de la compensation des harmoniques par les méthodes $p-q$ et $p-q$ modifiée (tensions de source sinusoïdales déséquilibrées).

III.5.3. Tensions de source équilibrées contenant des harmoniques

La Figure III.12 représente les résultats de simulation obtenus lorsque les tensions de source sont équilibrées et contiennent l'harmonique d'ordre 7. Le THD des tensions de source est égal à 14.29%. Dans ces conditions, les $THDs$ des courants de source avant filtrage sont égaux, dans l'ordre des phases (a), (b) et (c) à 30.66%, 30.64 % et 30.64%.

Ces *THDs* deviennent respectivement égaux à 16.12%, 16.12% et 16.13% après filtrage pour la méthode *p-q* et 4.14%, 4.12% et 4.22% pour la méthode *p-q* modifiée. On constate que la méthode *p-q* modifiée donne de meilleurs résultats, dont un plus petit taux de distorsion.

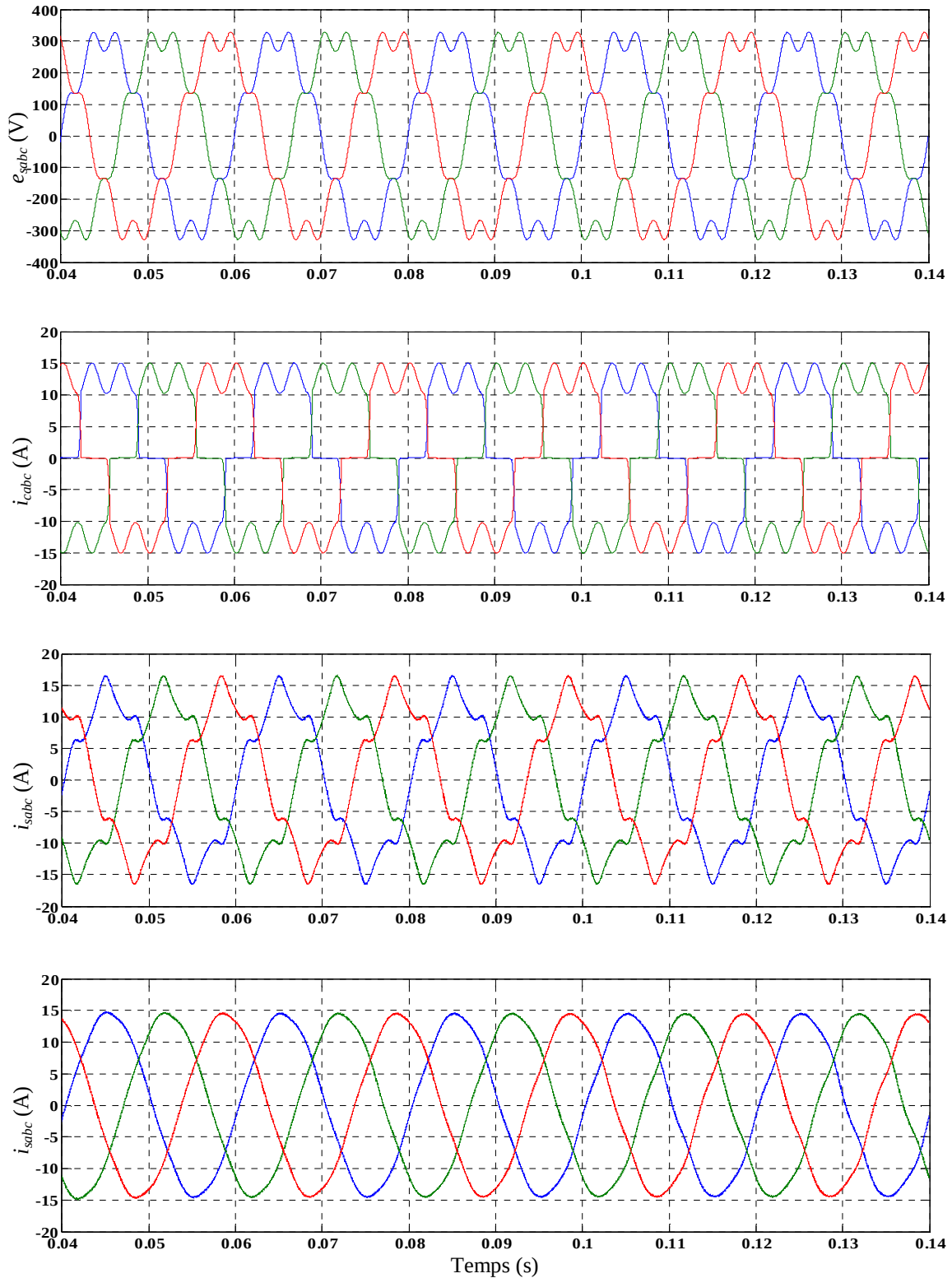


Figure III.12. Performances de la compensation des harmoniques par les méthodes *p-q* et *p-q* modifiée (tensions de source équilibrées contenant des harmoniques).

III.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées pour l'identification des courants de référence. Puis, nous avons élaboré un algorithme de commande du filtre actif parallèle à trois niveaux basée sur l'approche prédictive. Cette approche est basée sur la recherche du vecteur de commande optimal minimisant une fonction de coût. Les résultats obtenus montrent que la commande prédictive donne des performances très satisfaisantes. De plus, nous avons constatés par les résultats de la simulation par cette méthode " p - q modifiée" que ce filtre actif parallèle à trois niveaux permet d'obtenir de bonnes performances même si la tension du réseau est perturbée.

Conclusion Générale

Les travaux effectués dans ce mémoire ont porté sur l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique via le filtre actif parallèle à base d'un onduleur de tension trois niveaux piloté par la commande prédictive à modèle. Nous nous sommes orientés vers l'onduleur à trois niveaux comme il offre le double avantage de délivrer une tension de sortie à contenance harmonique minimale, et vers la commande prédictive grâce à ses avantages.

La commande prédictive offre de nombreux avantages par rapport aux commandes classiques telles que simples à appliquer dans des systèmes multivariables et considèrent les non-linéarités et les contraintes dans le système à commande et présentent une rapide réponse dynamique.

Dans le premier chapitre, nous avons fait un survol des causes de la pollution harmonique sur les réseaux électriques, des effets ainsi que des moyens existants qui permettent de minimiser ces effets.

Le second chapitre est plus particulièrement dédié à la modélisation du système (réseau - charge non linéaire - filtre actif parallèle à trois niveaux).

Le troisième chapitre a été consacré à la description d'une méthode d'identification des courants de référence du filtre actif parallèle. Nous avons montré que cette méthode, appelée méthode " $p-q$ modifiée", permet d'identifier les composantes harmoniques directes et inverses des courants de charge, quelles que soient les tensions de réseau. Enfin, pour la poursuite des courants de référence, la stratégie dite commande prédictive à modèle a été choisie et étudiée dans le troisième chapitre. Cette commande permet de prédire le comportement du système, pour tous les états de commutation possibles, en se basant sur son modèle discret. Chaque prédiction a été utilisée pour évaluer une fonction de coût prédéfinie. Le vecteur de tension correspondant à l'état de commutation, qui minimise la fonction de coût, a été sélectionné et généré.

Les résultats de simulation ont été très satisfaisants, en effet, les objectifs de compensations ont été correctement achevés avec des taux de distorsion harmonique dans des limites très acceptables même si la tension du réseau est perturbée.

Références Bibliographiques

- [1] A.H. Nohra, “ Commande de filtres actifs parallèles sur un réseau fortement perturbé”, *Thèse de Doctorat*, Université de Toulouse, Janvier 2017.
- [2] M. Aissani, “ Commande numérique d'un convertisseur triphasé à quatre bras par MLI vectorielle à trois dimensions (application au filtrage actif), *Mémoire de Magister*, Ecole Militaire Polytechnique d'Alger, Février 2009.
- [3] A. Chaoui, “ Filtrage actif triphasé pour charges non linéaires”, *Thèse de Doctorat*, Université Ferhat Abbas Sétif 1, Octobre 2010.
- [4] N. Mesbahi, “Contribution à l'étude des performances des onduleurs multiniveaux sur les réseaux de distribution”, *Thèse de Doctorat*, Université Badji Mokhtar Annaba, Mai 2014.
- [5] P. Ferracci, “La qualité de l'énergie électrique “, Schneider Electric, cahier technique no. 199, Mai 2000.
- [6] S.H. Shahalami, “Filtrage hybride des perturbations harmoniques produites par des systèmes d'entraînement asynchrone à vitesse variable”, *Thèse de Doctorat*, Université Henri Poincaré, Nancy-I, Novembre 2001.
- [7] T. Gouraud, “Identification et rejet de perturbations harmoniques dans des réseaux de distribution électrique”, *Thèse de Doctorat*, Ecole Centrale de Nantes, Université de Nantes, Janvier 1997.
- [8] F. Defaÿ, “Commande prédictive directe d'un convertisseur multicellulaire triphasé pour une application de filtrage actif”, *Thèse de Doctorat*, Institut National Polytechnique de Toulouse, Université de Toulouse, Décembre 2008.
- [9] M.A. Alali, “Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension”, *Thèse de Doctorat*, Université Louis Pasteur, Strasbourg I, Septembre 2002.

- [10] T. Ghennam, “Etude et réalisation d’un compensateur actif de puissance commandé par DSP”, *Mémoire de Magister*, Ecole Militaire Polytechnique d’Alger, Janvier 2005.
- [11] A. Djerioui, “contrôle d’un convertisseur AC/DC à MLI avec fonction de filtre actif”, *Mémoire de Magister*, Ecole Militaire Polytechnique d’Alger, Novembre 2011.
- [12] T. Ghennam, “Supervision d’une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d’un réseau électrique, apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation”, *Thèse de Doctorat*, Ecole Militaire Polytechnique d’Alger, Septembre 2011.
- [13] D. Lalili, “MLI vectorielle et commande non linéaire du bus continu des onduleurs multiniveaux : application à la conduite de la machine asynchrone”, *Thèse de Doctorat*, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique Alger, Avril 2009.
- [14] E.M. Berkouk, “Contribution à la conduite des machines asynchrones monophasée et triphasées alimentées par des convertisseurs directs et indirects : application aux gradateurs et aux onduleurs multiniveaux”, *Thèse de Doctorat*, CNAM Paris, Décembre 1995.
- [15] R. Zaimeddine, “Contrôle direct du couple d’une machine asynchrone alimentée par des onduleurs multiniveaux”, *Thèse de Doctorat*, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique Alger, Juillet 2007.
- [16] J. Rodriguez and P. Cortes, “*Predictive Control of Power Converters and Electrical Drives*”, New York, NY, USA: Wiley–IEEE Press, 2012.
- [17] L. Riachy, “Contribution à la commande d’un onduleur multiniveaux, destinée aux énergies renouvelables, en vue de réduire le déséquilibre dans les réseaux électriques”, *Thèse de Doctorat*, Université de Rouen Normandie, Décembre 2017.
- [18] S. Karimi, “Continuité de service des convertisseurs triphasés de puissance et prototypage "FPGA in the loop":application au filtre actif parallèle”, *Thèse de Doctorat* Université Henri Poincaré, Nancy-I, Janvier 2009.
- [19] H.S. Song, H.G. Park, and K. Nam, “An instantaneous phase angle detection algorithm under unbalanced line voltage condition”, in *Proc. IEEE 30th annual power electronics specialist conference*, vol. 1, pp. 533–537, August 1999.
- [20] A. Gaillard , P. Poure , S. Saadate , and M. Machmoum, “Variable speed DFIG wind energy system for power generation and harmonic current mitigation”, *Renewable Energy*, vol. 34, no. 6 , pp. 1545–1553, June 2009.

- [21] M. Abdusalam, P. Poure, S. Karimi, and S. Saadate, “New digital reference current generation for shunt active power filter under distorted voltage conditions”, *Electric Power Systems Research*, vol. 79, no. 5, pp. 759–765, May 2009.
- [22] A. Gaillard, “Système éolien basé sur une MADA : contribution à l’étude de la qualité de l’énergie électrique et de la continuité de service”, *Thèse de Doctorat*, Université Henri Poincaré, Nancy-I, Avril 2010.
- [23] V.Q.B. Ngo, “Algorithmes de conception de lois de commande prédictives pour les systèmes de production d’énergie”, *Thèse de Doctorat*, Université Paris-Saclay, Juin 2017.
- [24] R. Guzmán, L.G. de Vicuña , M. Castilla , J. Miret and A. Camacho, “Finite control set model predictive control for a three-phase shunt active power filter with a Kalman filter-based estimation”, *Energies*, 2017.
- [25] R. Panigrahi, B. Subudhi, P.C. Panda, “Model predictive-based shunt active power filter with a new reference current estimation strategy”, *IET Power Electronics*, vol. 8, no. 2, pp. 221–233, 2015.