

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE DE M'SILA

FACULTE DE THECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME

D'INGENIEUR D'ETAT EN GENIE ELECTROTECHNIQUE

OPTION : COMMANDE ELECTRIQUE

THEME

Modélisation et commande des différentes topologies des filtres actifs parallèles

Proposé et dirigé par :

Messieurs : Saïd BARKAT

Ismail GHADBANE

Présenté par :

- CHEBABHI Rabie

- BOUDRAF Mustapha

Année Universitaire : 2010 / 2011

Remerciements

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

Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à nos encadreurs Docteur BARKAT Saïd et Mr GHADBANE Ismail pour avoir d'abord proposé ce thème, pour leur suivi continuel tout au long de la réalisation de ce mémoire et qui n'ont pas cessé de nous donner leurs conseils.

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

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

Sommaire

Introduction générale	1
-----------------------------	---

Chapitre I : Perturbations des réseaux électriques et principe de la compensation active

I .1 Introduction	4
I.2 Définition de la Perturbation	5
I.2.1 Perturbations électriques et leurs origines.....	5
I.2.1.1 Creux et coupures de tension.....	5
I.2.1.2 Fluctuations de tension.....	5
I.2.1.3 Déséquilibre du système triphasé de tension.....	6
I.2.1.4 Variation de fréquence	6
I.2.1.5 Harmoniques et inter harmoniques	7
I .2.2 Perturbation harmonique	7
I.2.3 Sources des harmoniques	7
I.2.4 Effets des harmoniques	8
I.2.5 Conséquences néfastes des harmoniques	9
I.2.6 Caractérisation des perturbations harmoniques.....	9
I.2.6.1 Taux d'harmonique de rang h	9
I.2.6.2 Taux d'harmonique global de distorsion.....	9
I.2.6.3 Facteur de puissance	10
I.3 Solutions de dépollution du réseau électrique.....	11
I.3.1 Solutions traditionnelles de la dépollution	11
I.3.2 Solutions modernes de la dépollution	11
I.3.2.1 Filtres actifs	12
I.3.2.2 Filtre actif série	12
I.3.2.3 Filtre combiné parallèle-série (UPQC)	13
I.3.2.4 Filtre actif série avec un filtre passif parallèle	13
I.3.2.5 Filtre actif parallèle	14
I.4 Applications des filtres actifs parallèles.....	16
I.5 Classement des filtres actifs parallèles.....	16
I .6 Conclusion	17

Chapitre II : Commandes des filtres actifs parallèles à trois fils

II.1 Introduction.....	18
II.2 Topologies de filtre actif de puissance parallèle relié à un réseau électrique à trois fils .	19
II.2.1 Onduleur de tension	19
II.2.2. Onduleur de tension à trois bras.....	19

II.2.3 Structure générale	19
II.2.4 Tensions de sortie de l'onduleur	20
II.3 Modèle mathématique du filtre actif parallèle dans le repère triphasé	21
II.3.1 Modèle du filtre actif dans le repère synchrone (de Park)	22
II.3.2 Modèle du filtre actif dans le repère stationnaire.....	23
II.4. Commande par hystérésis à bande fixe.....	23
II.4.1 L'Algorithme de la commande par hystérésis	24
II.5. Onduleur de tension à deux bras	25
II.5.1 Structure générale	25
II.5.2 Tensions de sortie de l'onduleur	26
II.5.3 Comparaison entre les deux topologies de FAP	27
II.5.4 Filtre de sortie	28
II.6 Système de stockage d'énergie	29
II.7. Présentation des stratégies de commande	31
II.7.1 Commande directe d'un filtre actif de puissance à trois bras.....	31
II.7.2 Commande directe d'un filtre actif de puissance à deux bras	32
II.7.3 Identification des courants de référence.....	33
II.7.3.1 Identification dans le domaine fréquentiel.....	33
II.7.3.2 Identification dans le domaine temporel.....	33
II.8 Méthode des puissances active et réactive instantanées	33
II.8.1 Régulation de la tension continue	35
II.8.1.1 Résultats de simulation de l'ensemble charge non-linéaire avant filtrage	37
II.8.1.2 Résultats de simulation de l'ensemble charge non-linéaire-filtre actif de puissance	38
II.8.1.3 Discussion des résultats	41
II.8.2 Méthode dite du référentiel lié au synchronisme (SRF: synchronous reference frame)...	41
II.8.2.1 Régulateur de la tension continue	43
II.8.2.2 Structure de la P.L.L	44
II.8.2.3 Résultats de simulation	47
II.8.2.4 Résultats de simulation de l'ensemble charge non-linéaire filtre actif.....	47
II.8.2.5 Interprétations des résultats.....	50
II.9 Conclusion	50

Chapitre III : Commandes des filtres actifs parallèles à quatre fils

III.1 Introduction	51
III.2 Analyse du FAP triphasé sur un réseau à quatre fils	52
III.2.1 Analyse spectrale du courant de neutre pour charges non linéaires déséquilibrées	53
III.3 Filtres actifs de puissance parallèle reliée à un réseau électrique à quatre fils.....	54
III.3.1 Filtre actif de puissance à trois bras avec condensateurs à point milieu	54
III.3.1.1 Schéma de représentation	54
III.3.2 Filtre actif de puissance à quatre bras.....	55

III.4	Présentation des stratégies de commande.....	57
III.4.1	Méthode des puissances réelle, imaginaire et homopolaire instantanées (pqo)	57
III.5	Résultat de simulation	61
III.5.1	Simulation de l'ensemble réseau - charge non-linéaire – filtre actif de puissance	63
III.5.1.1	Topologie à trois bras avec condensateurs à point milieu	63
III.5.1.2	Topologie à quatre bras	66
III.6	Méthode directe dite théorie p-q-r	69
II.6.1	Simulation de l'ensemble réseau-charge non-linéaire-filtre actif de puissance	72
II.6.1.1	Topologie à trois bras avec condensateurs à point milieu	72
II.6.1.2	Topologie à quatre bras.....	76
II.7	Méthode directe utilisant la théorie du référentiel lié au synchronisme (SRF)	79
II.7.1	Simulation de l'ensemble réseau-charge non-linéaire-filtre actif de puissance	81
II.7.1.1	Topologie à trois bras avec condensateurs à point milieu	81
II.7.1.2	Topologie à quatre bras.....	85
III.8.	Interprétations des résultats	88
III.8.1.	Cas d'une charge équilibrée.....	88
III.8.1.1	Filtre à trois bras avec condensateurs à point milieu.....	88
III.8.1.2	Filtre à quatre bras	88
III.8.2.	Cas d'une charge déséquilibrée	89
III.8.2.1	Filtre à trois bras avec condensateurs à point milieu.....	89
III.8.2.2	Filtre à quatre bras	89
III.9.	Conclusion.....	90

Chapitre IV : Mise en parallèle des filtres actifs de puissance

IV.1	Introduction	91
IV.2	Topologies de mise en parallèle des filtres actifs de puissance.....	92
IV.2.1	Présentation	92
IV.2.2	Topologies de mise en parallèle des deux filtres actifs de puissance pour les réseaux électriques à trois fils.....	92
IV.2.3	Topologies de mise en parallèle des deux filtres actifs de puissance pour les réseaux électriques à quatre fils	94
IV. 3	Commande de la mise en parallèle des filtres actifs de puissance	96
IV.4	Résultats de simulation pour les réseaux électriques à trois fils	98
IV.4 .1	Conductions de simulation	99
IV.4 .1.1	Topologie à trois bras	99
IV.4.1.2	Topologie à deux bras avec condensateurs à point milieu	100
IV.4.1.3	Interprétations des résultats	101
IV.4.2	Résultats de simulation pour le réseau électrique à quatre fils.....	102
IV.4 .2.1	Conductions de simulation	103
IV.4.2.2	Topologie à trois bras avec condensateurs à point milieu.....	104

IV.4.2.3 Interprétations des résultats	107
IV.4.2.4 Topologie à quatre bras	107
IV.4.2.5 Interprétations des résultats	110
IV.5 Conclusion.....	111
Conclusion générale.....	112
Annexe A	113
Annexe B.....	115
Annexe C	119
Bibliographie.....	120

Liste des symboles et abréviations

- t : Le temps.
 f_s : Fréquence fondamentale du réseau.
 f_c : Fréquence de coupure du filtre d'extraction des harmoniques.
 f_{cdc} : Fréquence de coupure du régulateur de la tension continue.
 e_{s123} : Les tensions du réseau électrique.
 v_{s123} : Les tensions du réseau électrique au point de raccordement du filtre actif.
 $v_{s\alpha\beta}$: Les tensions du réseau électrique au point de raccordement du filtre actif dans le repère stationnaire.
 v_{sdq} : Les tensions du réseau électrique au point de raccordement du filtre actif dans le repère synchrone.
 i_{s123} : Les courants du réseau électrique.
 $i_{s\alpha\beta}$: Les courants du réseau électrique dans le repère stationnaire.
 i_{sdq} : Les courants du réseau électrique dans le repère synchrone.
 i_{s123}^{ref} : Les courants de référence du réseau électrique.
 $i_{s\alpha\beta}^{ref}$: Les courants de référence du réseau électrique dans le repère stationnaire.
 i_{sdq}^{ref} : Les courants de référence du réseau électrique dans le repère synchrone.
 i_{f123} : Les courants du filtre actif.
 $i_{f\alpha\beta}$: Les courants du filtre actif dans le repère stationnaire.
 i_{fdq} : Les courants du filtre actif dans le repère synchrone.
 i_{f123}^{ref} : Les courants de référence du filtre actif.
 $i_{f\alpha\beta}^{ref}$: Les courants de référence du filtre actif dans le repère stationnaire.
 i_{fdq}^{ref} : Les courants de référence du filtre actif dans le repère synchrone.
 i_{c123} : Les courants de la charge.
 $i_{c\alpha\beta}$: Les courants de la charge dans le repère stationnaire.
 i_{cdq} : Les courants de la charge dans le repère synchrone.
 L_s : Inductance du réseau.
 R_s : Résistance du réseau.
 L_f : Inductance du filtre actif.
 R_f : Résistance du filtre actif.
 L_c : Inductance de la charge.
 R_c : Résistance de la charge.
 L_d : Inductance de la charge côté continue.
 R_d : Résistance de la charge côté continue.
 V_{dc} : Tension aux bornes du condensateur.
 V_{dc}^{ref} : Tension de référence du condensateur.

C_{dc} : Capacité du condensateur.
Courant obtenu à la sortie du régulateur de la tension continue.
 p_{dc} : Puissance obtenue à la sortie du régulateur de la tension continue.
 I_d : Courant redressé.
 p : Puissance active.
 q : Puissance réactive.
 D : Puissance déformante.
 S : Puissance apparente.
 $\tilde{i}_{c\alpha}$ et $\tilde{i}_{c\beta}$: Les courants perturbateurs.
 x_h : La composante harmonique de rang h .
 S_{123} : Etats des interrupteurs de l'onduleur.
 k_{pdc}, k_{idc} : Les constants du régulateur PI de la tension continue.
 ζ : Coefficient d'amortissement.
 ω_{cdc} : Pulsation de coupure du régulateur de la tension continue.
 p_f : Puissance de référence du filtre.

Abréviations

PLL: (En anglais: Phase locked loop).
THD: (En anglais: Total harmonic distorsion).
IGBT: (En anglais: Insolated gate bipolar transistor).
GTO: (En anglais: Gate turn off thyristor).
PWM: (En anglais: pulse width modulation).
MLI: Modulation de largeurs d'impulsions.
UPQC: (En anglais : Unified power quality conditionner).
F.P.B: Filtre passe-bas.
F A P: Filtre actif parallèle.
F A S: Filtre actif série.
F.P: Facteur de puissance.
PI: Régulateur proportionnel intégral.

Introduction générale

Ces dernières années, l'expansion de l'emploi dans l'industrie des charges non-linéaires à base de l'électronique de puissance a entraîné de plus en plus de problèmes liés aux perturbations ou distorsions harmoniques des réseaux électriques. Ce phénomène touche l'ensemble des secteurs industriels (utilisation de gradateurs, de redresseurs, de variateurs de vitesse,...), tertiaire (informatique ou éclairage des bureaux, commerce,...) et domestique (téléviseurs, appareils électroménagers grand public,...).

La distorsion harmonique est générée par les charges non linéaires connectées au réseau et qui absorbent des courants non sinusoïdaux. Ces harmoniques de courant vont à leur tour générer des tensions harmoniques aux différents points de connexion au réseau. Pour les autres équipements électriques connectés en ces points, cette pollution harmonique a des effets nocifs. Parmi ces effets, on peut notamment citer la déformation de la tension réseau au point de raccordement alors que le distributeur d'énergie est tenu de fournir une tension propre. Cette pollution peut également conduire à l'échauffement des câbles et des équipements électriques ou bien encore à l'arrêt soudain de machines tournantes, voire la destruction totale de tous ces équipements.

De ce fait, les fournisseurs de l'énergie électrique se voient donc obligés d'imposer des normes et de se protéger contre ces perturbations. Des normes sur les harmoniques ont été proposées par la Commission Internationale d'Electrotechnique IEC61000, et par les recommandations IEEE Std. 519-1992 [1, 2,3].

Pour faire face au phénomène des perturbations harmoniques, plusieurs solutions ont été proposées. Ces solutions sont basées sur des redresseurs à diodes monophasés et triphasés à structures spéciales, des redresseurs à MLI, des filtres passifs et des filtres actifs.

Les méthodes traditionnelles de réduction des harmoniques impliquent l'utilisation des filtres passifs piègeurs des courants harmoniques à base des circuits LC calculés en concordance avec les rangs d'harmonique à filtrer. Ils peuvent également être utilisés pour compenser la puissance réactive. Cependant, le filtrage passif pose certains problèmes : manque d'adaptabilité lors de variations de l'impédance du réseau, de la charge et résonance possible avec l'impédance du réseau et dans certains cas défavorables où cette résonance est excitée, celle-ci peut entraîner une tension harmonique élevée et un courant harmonique important dans la capacité du filtre et dans le réseau. Ainsi, cette solution présente un inconvénient majeur qui peut être intolérable dans ces circonstances particulières [1,3].

Une autre solution consiste à mettre en œuvre un filtrage actif afin d'éviter les inconvénients des filtres passifs. De nombreuses solutions de filtres actifs pour la dépollution des réseaux électriques ont été déjà proposées dans la littérature. Celles qui répondent le mieux aux

contraintes industrielles d'aujourd'hui sont les filtres actifs parallèle ou, série et les combinaisons parallèle-série actifs (appelés aussi Unified Power Quality Conditioner-UPQC). Dans le cas où les courants de source sont non linéaires, le filtre actif parallèle de puissance (Shunt Actif Power Filtre-SAPF) est considéré comme la meilleure solution pour la réduction des courants harmoniques dans les applications de faible à moyenne puissance. Le filtrage actif est plus avantageux où une réponse rapide est nécessaire en présence de charges dynamiques. En outre, il représente un outil puissant pour un conditionnement polyvalent car il est en mesure de compenser aussi la puissance réactive et le déséquilibre de la charge.

Le principe du filtre actif parallèle consiste à générer des courants harmoniques en opposition de phase à ceux existants sur le réseau. Le courant absorbé par les charges polluantes est non-sinusoïdal, alors que le courant généré par le filtre actif parallèle est tel que le courant du réseau soit sinusoïdal.

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 le troisième domaine traite des stratégies de commande qui génèrent les signaux de commande des interrupteurs de puissance. C'est dans ce cadre que notre sujet de mémoire s'inscrit. Les objectifs sont le développement de stratégies de commande pour les filtres à trois et quatre fils et leurs validations par simulation sous différents régimes et conditions de fonctionnement.

De façon à atteindre ces objectifs, ce mémoire est subdivisé en quatre chapitres organisés comme suit :

Dans le premier chapitre, nous présenterons les perturbations, en courant et en tension, des réseaux électriques connectés à des charges dites polluantes. Les origines de cette pollution harmonique, les conséquences et les normes inhérentes à ces perturbations sont examinées.

Dans le second chapitre, nous intéresserons à l'étude des topologies et stratégies de commande des filtres actifs de puissance, afin de compenser les harmoniques de courants générés par des charges non-linéaires reliées à un réseau électrique triphasé à trois fils. Au début, nous présenterons les différentes topologies de filtres actifs de puissance. Principalement, les deux structures à deux et à trois bras seront examinées. Pour terminer, les résultats des simulations obtenus pour les différentes topologies et les différentes stratégies de commande seront illustrés.

Dans le troisième chapitre, sera consacré plutôt à l'étude des topologies et stratégies de commande des filtres actifs de puissance, mais cette fois-ci pour compenser les harmoniques de courant générés par des charges non-linéaires reliées à un réseau électrique triphasé à quatre fils. Nous commencerons par présenter les différentes topologies de filtres actifs de puissance. Ensuite, nous étudierons en détail les stratégies de commande pour compenser ce type de réseau électrique.

Dans le quatrième et dernier chapitre, nous avons étudié la mise en parallèle des filtres actifs de puissance pour la compensation des réseaux électriques basse tension sièges de forts

courants harmoniques. Nous allons tout d'abord présenter cette structure particulière. Ensuite, nous proposerons deux commandes. La première a été réalisée pour la compensation des harmoniques de courant d'un réseau électrique à trois fils. La seconde pour la compensation des harmoniques de courant d'un réseau électrique à quatre fils. Pour finir, les résultats des simulations obtenus pour les différentes structures utilisant les deux commandes que nous avons proposées seront présentés.

Chapitre I

Perturbations des réseaux électriques et principe de la compensation active

I.1 Introduction

Depuis plusieurs années, les convertisseurs statiques (redresseurs, gradateurs) prolifèrent tant dans les équipements industriels que domestiques. Par exemple, ces dispositifs sont fréquemment employés dans la régulation de vitesse des moteurs à courant continu et alternatif. Ils sont également utilisés dans les variateurs de lumière, les régulations de systèmes de chauffage électrique et les variateurs de vitesse des moteurs universels (lave-linge, aspirateurs, outillages électroportatifs,...) [4].

L'utilisation de ces convertisseurs statiques dans les installations de conversion d'énergie électrique a considérablement contribué à améliorer les performances et l'efficacité de ces systèmes. En revanche, ils ont participé à détériorer la « qualité » du courant et de la tension des réseaux de distribution. En effet, ces systèmes consomment des courants non sinusoïdaux, même s'ils sont alimentés par une tension sinusoïdale : ils se comportent comme des générateurs de courants harmoniques. Par l'intermédiaire de l'impédance de court-circuit du réseau, les courants harmoniques déforment la tension de celui-ci.

Les déformations du courant et de la tension peuvent perturber le fonctionnement normal d'autres équipements électriques. C'est pourquoi, les distributeurs d'énergie ayant la contrainte de fournir une tension sinusoïdale, prennent en charge l'atténuation des perturbations harmoniques au moyen d'installations de forte puissance. Ainsi, le filtrage des composantes harmoniques est au centre des préoccupations des distributeurs d'une part et des utilisateurs d'énergie électrique d'autre part [4].

Dans ce chapitre, nous allons présenter les sources des harmoniques, l'influence du raccordement des convertisseurs statiques sur les réseaux électriques et leurs environnements. Ensuite, nous présentons les solutions classiquement mises en œuvre pour dépolluer les réseaux électriques [4],[5].

I.2 Définition de la perturbation

I.2.1 Perturbations électriques et leurs origines

Les perturbations électriques affectant l'un des quatre paramètres cités ultérieurement peuvent se manifester par : un creux ou une coupure de tension, une fluctuation de tension, un déséquilibre du système triphasé de tension, une variation de la fréquence et, la présence d'harmoniques et/ou d'inter-harmoniques [6],[7].

I.2.1.1 Creux et coupures de tension

Le creux de tension est une diminution brutale de la tension à une valeur située entre 100% et 90% de la tension nominale pendant une durée allant de 10 ms jusqu'à quelques secondes.

Les creux de tension sont dus à des phénomènes naturels comme la foudre, ou à des défauts sur l'installation ou dans les réseaux tant publics que ceux des utilisateurs. Ils apparaissent également lors de manœuvres d'enclenchement mettant en jeu des courants de fortes intensités (moteurs, transformateurs, etc.).

Une coupure de tension quand a elle est une diminution brutale de la tension à une valeur supérieure à 90% de la tension nominale ou disparition totale pendant une durée généralement comprise entre 10 ms et une minute pour les coupures brèves et supérieure à une minute pour les coupures longues. La plupart des appareils électriques admettent une coupure totale d'alimentation d'une durée inférieure à 10 ms. La figure (I.1.a) montre un exemple de creux et de coupure de tension [7].

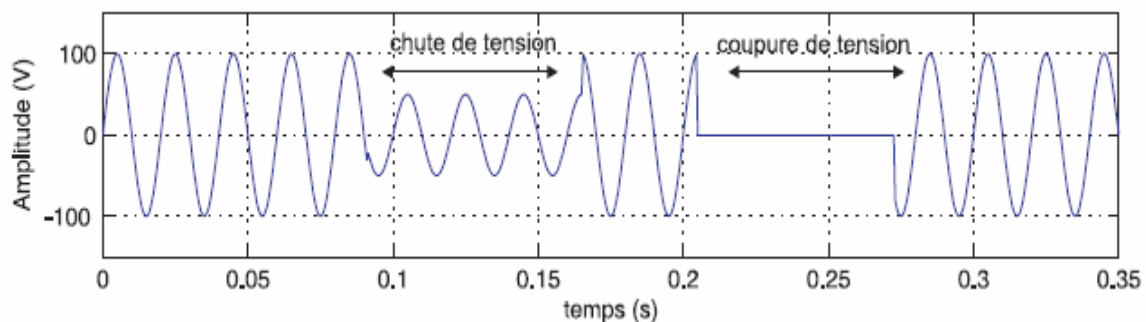


Figure (I.1.a) : Creux et coupures de tension

I.2.1.2 Fluctuations de tension

Les fluctuations de tension sont des variations périodiques ou erratiques de l'enveloppe de la tension. Ce sont des variations brutales de l'amplitude de la tension situées dans une bande de 10% et se produisent sur un intervalle de temps de quelques centièmes de secondes.

Elles sont en particulier dues à la propagation sur les lignes du réseau de courants d'appel importants. L'origine principale de ces courants est le fonctionnement d'appareil dont la puissance absorbée varie de manière rapide, comme les fours à arc des machines à souder. Ces fluctuations se traduisent par des variations d'intensité, visible au niveau de l'éclairage causant un gêne visuel perceptible pour une variation de 1% de la tension. Ce phénomène de papillotement est appelé flicker. Un exemple de fluctuation de tension est montré dans la figure (I.1.b).

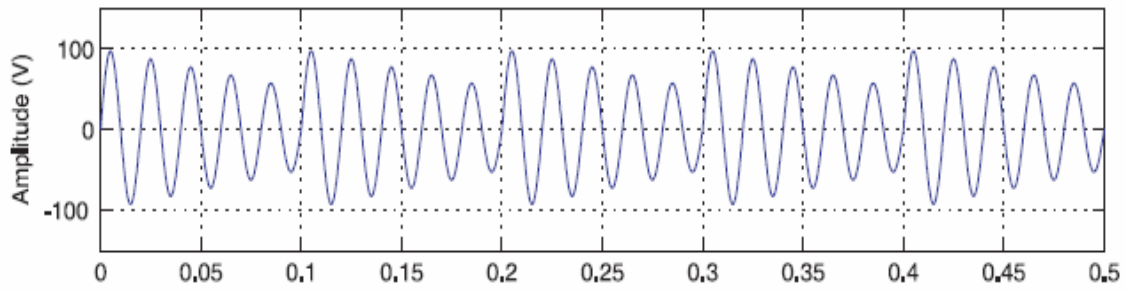


Figure (I.1.b) : Fluctuations de tension

I.2.1.3 Déséquilibre du système triphasé de tension

Lorsque les trois tensions ne sont pas identiques en amplitude et/ou ne sont pas décalées d'un angle de 120° les unes par rapport aux autres, on parlera de déséquilibre du système triphasé, voir la figure (I.1.c).

Un réseau électrique triphasé équilibré alimentant un récepteur électrique triphasé non équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau.

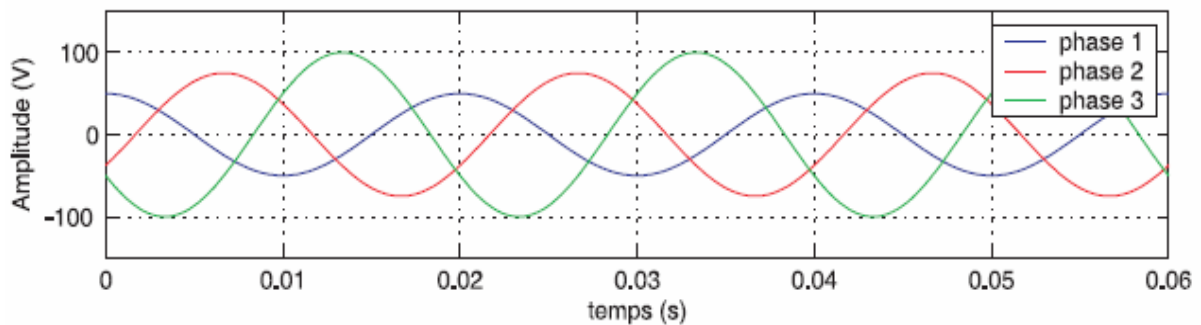


Figure (I.1.c) : Déséquilibre du système triphasé de tension

I.2.1.4 Variation de fréquence

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

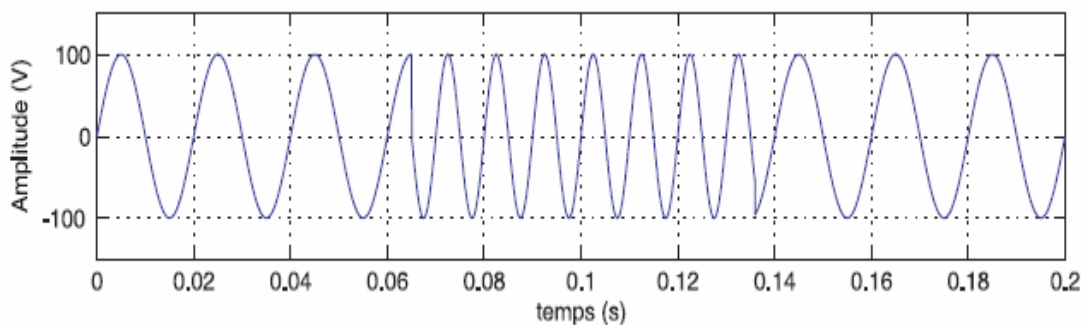


Figure (I.1.d) : Variation de la fréquence

I.2.1.5 Harmoniques et inter-harmoniques

Les harmoniques sont une superposition sur l'onde fondamentale à 50 Hz, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples entier de celle du fondamental. La figure (I.1.e) montre la superposition de l'harmonique de rang 3 sur un courant fondamental de fréquence 50 Hz. La principale source de la présence des harmoniques dans les réseaux électrique est l'utilisation de plus en plus croissante d'équipements de l'électronique de puissance à base de thyristors.

Les inter-harmoniques sont superposées à l'onde fondamentale mais ne sont pas des multiples entiers de la fréquence du réseau. L'apparition des inter-harmoniques est en augmentation et leurs origines principales sont les convertisseurs de fréquence, les variateurs de vitesse et d'autres équipements similaires de contrôle-commande [7].

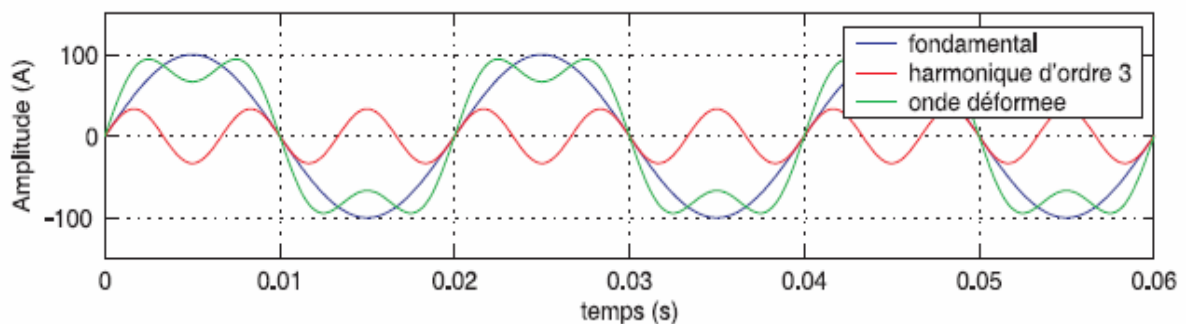


Figure (I.1.e) : Harmoniques

I.2.2 Perturbations harmoniques

Les harmoniques sont des perturbations permanentes affectant la forme d'onde de la tension du réseau. Ces perturbations résultent de la superposition, sur l'onde fondamentale à 50Hz, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples de celle du fondamental. Le domaine de fréquence qui correspond à l'étude des harmoniques est généralement compris entre l'harmonique 2 et celui du rang 40 [8].

Mais on peut également observer des sous harmoniques ou des inters-harmoniques à des fréquences non multiples entières de la fréquence fondamentale.

I.2.3 Sources des harmoniques

La cause principale des harmoniques est l'injection des courants non-sinusoïdaux par des charges non-linéaires, ainsi que les charges déséquilibrées branchées au réseau. Les onduleurs, les ponts redresseurs, les fours à arc et à induction, les variateurs de vitesse des machines électriques, les appareils domestiques tel que les téléviseurs et les lampes fluorescentes, et les alimentations à découpage représentent la majorité des sources d'émission des harmoniques [9]. Le tableau (I.1) montre quelques sources des harmoniques [4].

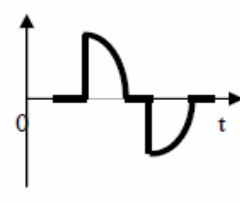
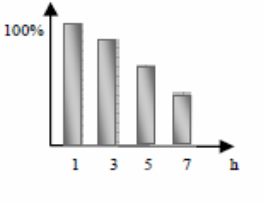
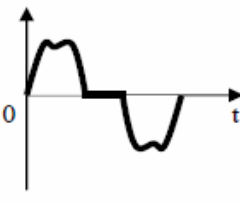
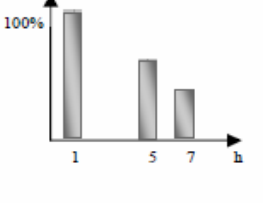
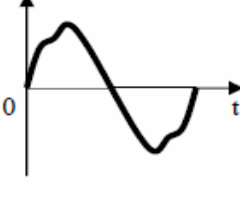
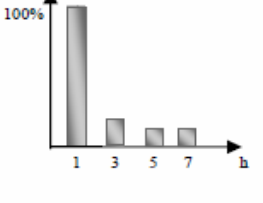
Type de charge	Appareils concernés	Courant absorbé	Spectre harmonique Correspondant
Gradateur monophasé	-Régulation de puissance de four à résistance. -Modulation de puissance des lampes halogènes.		
Redresseur triphasé à thyristor.	-Variateur de vitesse des moteurs à courant continu et des moteurs asynchrones.		
Moteur asynchrone	-Machines – Outils - Appareils électroménagers -Ascenseurs.		

Tableau (I.1) : Quelques sources des perturbations harmoniques

I.2.4 Effets des harmoniques

Les effets des harmoniques les plus connus et les plus spectaculaires sont la destruction des condensateurs ou des disjoncteurs sous l'effet des forts courants harmoniques amplifiés par des résonances.

Un autre phénomène, de plus en plus rencontré, est l'échauffement des transformateurs et des conducteurs de neutre sous l'effet des courants harmoniques de rang 3 [10].

- **Effets instantanés**

- Déclenchements intempestifs des protections;
- Perturbations induites des systèmes à courants faibles (télécommande, téléviseur, écran d'ordinateur,...);
- Vibrations et bruits acoustiques anormaux (tableaux BT, moteurs, transformateurs);
- Destruction par surcharge thermique de condensateurs;
- Perte de précision des appareils de mesure.

- **Effets à long terme**

- Une surcharge en courant provoque des échauffements supplémentaires donc un vieillissement prématuré des équipements;
- Echauffement des transformateurs et des alternateurs (par augmentation des pertes Joule, des pertes fer...);
- Fatigue mécanique (couples pulsatiles dans les machines asynchrones,...);
- Echauffement des récepteurs : des conducteurs de phases et du neutre par augmentation des pertes Joule et diélectriques;
- Destruction de matériels (condensateurs, disjoncteurs,...);
- Rayonnement électromagnétique perturbant les écrans (micro-ordinateurs, appareils de laboratoire...) [10].

I.2.5 Conséquences néfastes des harmoniques

Les courants et les tensions harmoniques ont des effets néfastes sur le fonctionnement, la rentabilité et la durée de vie de certains équipements électriques liés à la circulation des courants harmonique [11] :

- Lignes : pertes ohmiques supplémentaires;
- Transformateurs : pertes supplémentaires dans les enroulements par effet joule et dans le noyau par courant de Foucault ;
- Moteur à courant alternatif : pertes supplémentaires dans le fer et les enroulements principalement liées aux harmoniques de tension;
- Condensateur de puissance : pertes diélectrique supplémentaires conduisant aux vieillissements rapide du condensateur;
- Equipement de l'électronique de puissance : dysfonctionnement lié à la déformation de la tension;
- Ordinateurs : trouble fonctionnels liés à la distorsion de la tension;
- Lignes téléphoniques : génération des bruits importants liés au couplage électromagnétique entre les lignes de puissance et les circuits de communication [10],[11].

I.2.6 Caractérisation des perturbations harmoniques

Le récepteur d'énergie se comporte comme une charge polluante, s'il absorbe des courants non-sinusoïdaux ou déséquilibrés ou consomme de l'énergie réactive . La perturbation harmonique est généralement caractérisée par le taux de distorsion harmonique défini pour la tension ou le courant par rapport à une onde sinusoïdale. Le facteur de puissance est utilisé généralement pour définir la consommation de l'énergie réactive [12], [13].

I.2.6.1 Taux d'harmonique de rang h

Taux d'harmonique de rang h est défini par :

$$S_h = x_h / x_1 \quad (I.1)$$

ou, x_h : la composante harmonique de rang h et x_1 : la composante fondamentale.

I.2.6.2 Taux d'harmonique global de distorsion

Le taux de distorsion global (Total Harmonic Distorsion : THD) est un paramètre qui définit globalement la déformation de la grandeur alternative :

$$\text{THD}(\%) = \left(\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} x_h^2} / x_1 \right) \times 100 \quad (I.2)$$

Généralement, les harmoniques pris en compte dans un réseau électrique sont inférieurs à 2500 Hz. Les harmoniques de fréquence plus élevée sont fortement atténuées par l'effet de peau et par la présence des inductances de ligne. De plus, les appareils générateurs d'harmoniques ont, en grande majorité, un spectre d'émission inférieur à 2500 Hz. C'est la raison pour laquelle le domaine d'étude des harmoniques s'étend généralement de 100 à 2500 Hz, c'est-à-dire des rangs 2 à 50.

I.2.6.3 Facteur de puissance

Pour un signal sinusoïdal, le facteur de puissance est donné par le rapport entre la puissance active P et la puissance apparente S . Les équipements électriques sont dimensionnés généralement pour la tension et le courant nominaux. Un faible facteur de puissance se traduit par une mauvaise utilisation de ces équipements [13].

$$\text{F.P} = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (\text{I.3})$$

Où Q représente la puissance réactive.

Dans le cas où il y a des harmoniques, une puissance supplémentaire appelée la puissance déformante D donnée par la relation (I.4) apparaît comme le montre le diagramme de Fresnel de la figure (I.2).

$$D = 3v \sqrt{\sum_{h=2}^{50} i_h^2} \quad (\text{I.4})$$

Où, v représente la valeur efficace de la tension du réseau électrique.

Le facteur de puissance devient :

$$\text{F.P} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} = \cos \varphi_1 \cos \gamma \quad (\text{I.5})$$

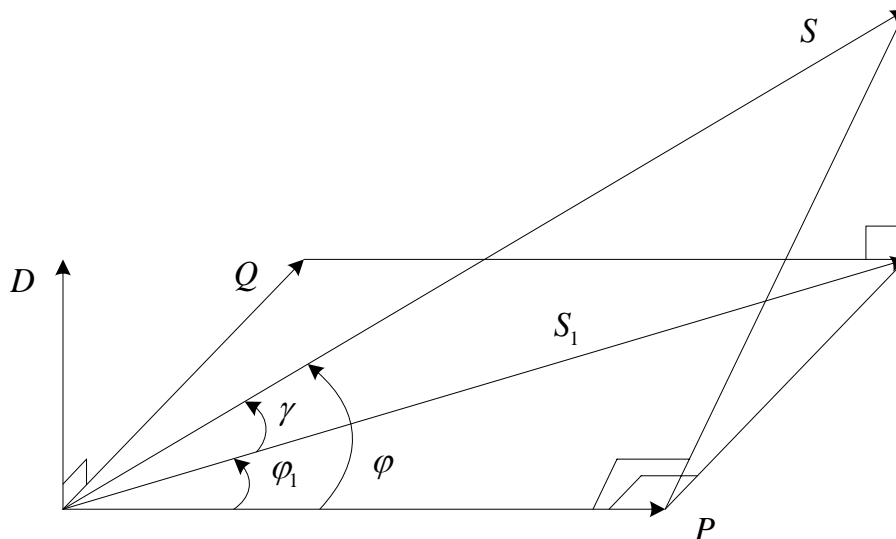


Figure (I.2) : Diagramme de Fresnel des puissances

φ : Déphasage entre la puissance active et la puissance apparente S

φ_1 : Déphasage entre la puissance active et la puissance apparente S_1

γ : Déphasage entre la puissance apparente dans le cas d'un système linéaire et celle-là dans le cas d'un système non-linéaire.

I.3 Solutions de dépollution du réseau électrique

A fin de compenser les perturbations, deux groupes de solution de dépollution, traditionnelle et moderne sont présentés [13].

I.3.1 Solutions traditionnelles de la dépollution

A fin de dépolluer les réseaux électriques, plusieurs solutions ont été proposées dans la littérature, dont le but est de limiter la propagation et l'effet des harmoniques dans les réseaux électriques [6]. On peut citer :

- L'augmentation de la puissance de court circuit du réseau et l'utilisation des convertisseurs peu polluants qui ont pour effet de diminuer la distorsion harmonique.
- L'utilisation de dispositif du filtrage pour réduire la propagation des harmoniques produits par les charges non-linéaires.
- Le pont dodécaphasé : La structure dodécaphasée présente des caractéristiques très intéressantes par rapport à celle hexaphasée. Cependant, le nombre de semi-conducteurs utilisés et le transformateur à deux enroulements au secondaire rendent cette solution onéreuse .
- Les filtres passifs : La deuxième solution de dépollution consiste à placer en parallèle sur le réseau d'alimentation une impédance très faible autour de la fréquence à filtrer et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau. Parmi les dispositifs du filtrage les plus répondus, on distingue le filtre passif résonnant et le filtre passif amorti ou passe-haut.

Malgré leur large utilisation dans l'industrie, ces dispositifs peuvent présenter beaucoup d'inconvénients dont on peut citer :

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

I.3.2 Solutions modernes de la dépollution

Deux raisons principales ont conduit à concevoir une nouvelle structure de filtrage moderne et efficace appelée filtre actif. La première raison est due aux inconvénients inhérents des solutions traditionnelles de dépollution qui ne répondent plus à l'évolution des charges et des réseaux électriques. La deuxième raison fait suite à l'apparition de nouveaux composants semi-conducteurs, comme les thyristors GTO et les transistors IGBT.

Le but de ces filtres est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à compenser les perturbations responsables de la dégradation des performances des équipements et installations électriques. Il existe trois topologies possibles de filtres actifs :

- a. Le filtre actif parallèle (FAP) : conçu pour compenser les perturbations de courant comme les harmoniques, les déséquilibres et la puissance réactive;
- b. Le filtre actif série (FAS) : conçu pour compenser les perturbations de tension comme les harmoniques, les déséquilibres et les creux de tension;
- c. La combinaison parallèle-série actifs (UPQC) : solution universelle pour compenser les perturbations en courant et en tension;
- d. Combinaison hybride active et passive : afin de réduire le dimensionnement et par conséquent le prix des filtres actifs, l'association des filtres actifs de faibles puissances à des filtres passifs peut être une solution [1],[6],[13].

I.3.2.1 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 (FAP).

Le but de ces filtres est de générer soit des courants [14], 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 ensemble ou associé avec des filtres passifs en fonction des grandeurs électriques harmoniques (courants ou tensions) à compenser [14].

Les avantages de ces filtres actifs par rapport aux filtres passifs sont les suivants :

- Le volume physique du filtre est plus réduit ;
- La capacité de filtrage est supérieure ;
- La flexibilité et adaptabilité sont très supérieures.

Pourtant, ils présentent quelques inconvénients :

- Leur coût élevé a limité leur implantation dans l'industrie ;
- Les pertes sont plus élevées ;

Deux types de convertisseurs connus dans la littérature constituent l'APF : convertisseur à source de courant (CSI) ou à source de tension (VSI) [15].

Bien que la première structure est suffisamment fiable, elle présente des pertes élevées et nécessite d'une importante et coûteuse inductance. De plus, elle ne peut être utilisée dans des applications multi-niveaux pour améliorer les performances avec un coût acceptable. Cependant, la deuxième structure en tension du FAP, où le bus continu est équipé d'un condensateur représentant l'élément de stockage, est sûrement la plus répandue car moins onéreuse, plus légère et extensible à des applications multi-niveaux. Ainsi, pour la suite nous ne présentons que les différentes structures du FAP avec source de tension en entrée.

I.3.2.2 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 détensions. 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 [15].

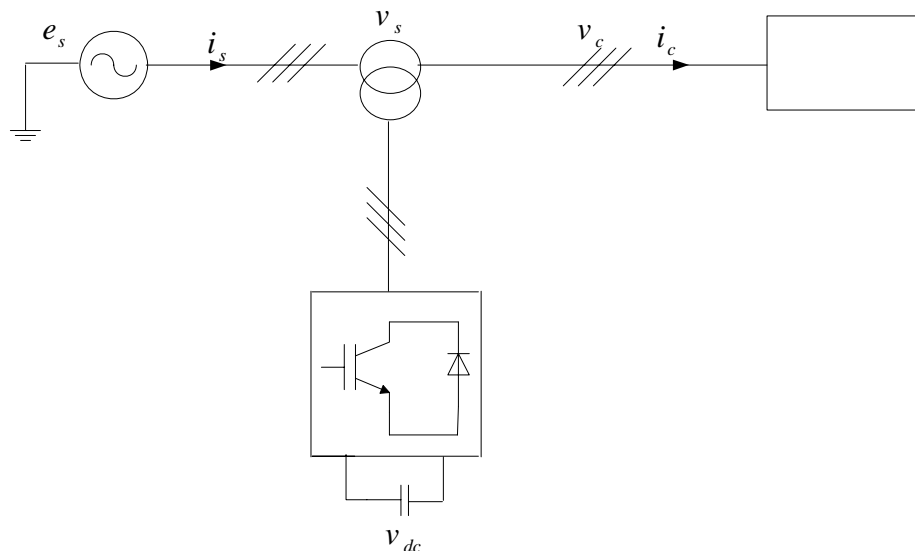


Figure (I.5) : Filtre actif série

I.3.2.3 Filtre combiné parallèle-série (UPQC)

L'UPQC est principalement la combinaison de deux filtres actifs série et parallèle qui partagent la même capacité sur le bus continu. Ce type de dispositif est capable à la fois de régler la tension du réseau et d'éliminer les harmoniques. Il est considéré comme le plus puissant dispositif et il est capable d'effectuer efficacement toutes les tâches de conditionnement de puissance. Cependant, son prix important et la complexité des commandes des nombreux interrupteurs limitent son utilisation à des applications critiques comme l'équipement médical [15].

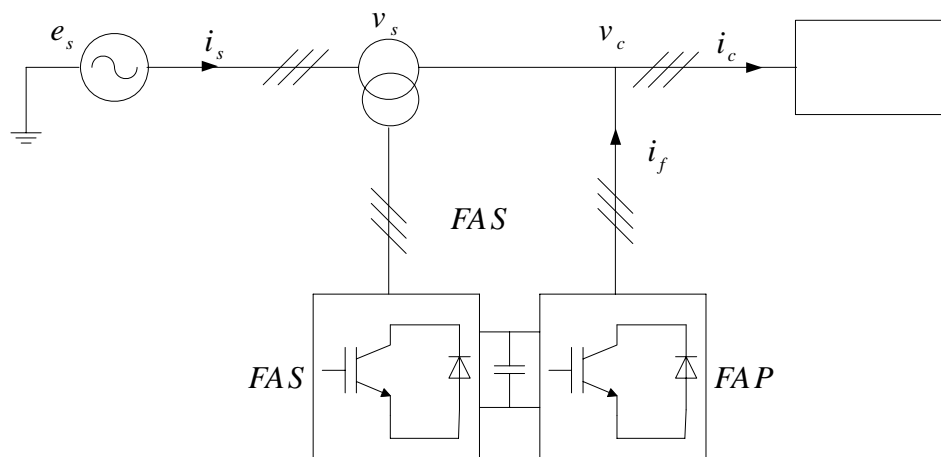


Figure (I.6) : Filtre combiné parallèle-série (UPQC)

I.3.2.4 Filtre actif série avec un filtre passif parallèle

Une version moins chère de la structure précédente est illustrée par la figure (I.4) où un filtre actif série et un filtre parallèle passif (FPP) sont exploités. Principalement, le filtre série règle la tension au point PCC 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 [15].

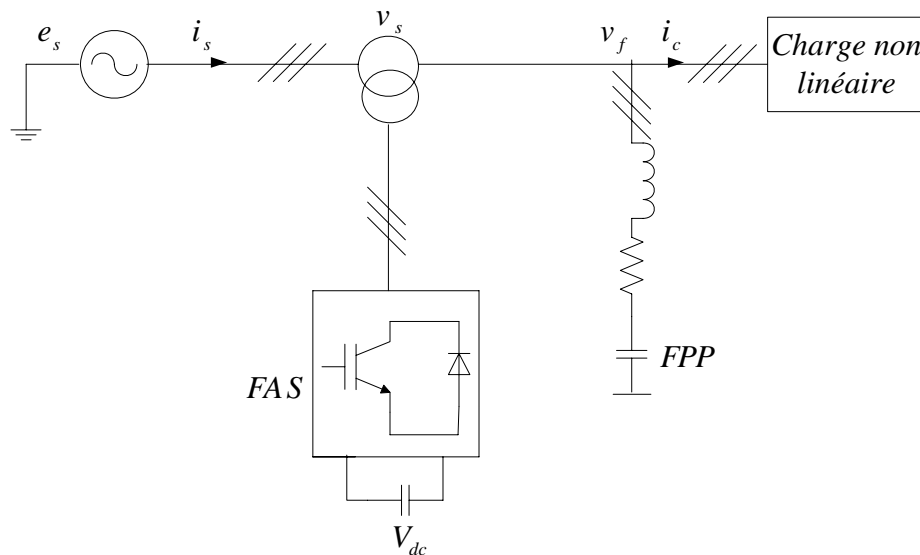


Figure (I.7) : Filtre actif série avec un filtre passif parallèle

I.3.2.5 Filtre actif parallèle

Le filtre 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. Pour la suite de l'étude, la solution de dépollution choisie sera le filtre actif parallèle en raison de son efficacité et de sa forte utilisation [15].

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau, comme le montre la figure (I.8), est le plus souvent commandé comme un générateur de courant. Il injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante. Mais en opposition de phase avec ceux-ci. Le courant côté réseau est alors sinusoïdal, figure (I.9). Ainsi l'objectif du filtre actif parallèle consiste à empêcher les courants perturbateurs (harmoniques, réactifs et déséquilibrés), produits par des charges polluantes, de circuler à travers l'impédance du réseau, située en amont du point de connexion du filtre actif. La figure (I.10) représente la structure générale du filtre actif parallèle, laquelle se présente sous forme de deux parties : la partie puissance et la partie contrôle-commande [13].

La partie puissance est constituée :

- 1- d'un onduleur de tension à base d'interrupteurs de puissance, commandables à l'amorçage et au blocage (GTO, IGBT, ...etc.) avec des diodes en antiparallèles ;
- 2- d'un circuit de stockage d'énergie, souvent capacitif ;
- 3- d'un filtre de couplage.

La partie contrôle-commande quant à elle est constituée :

- 1- de la méthode d'identification des courants perturbés ;
- 2- de la régulation de la tension continue appliquée aux éléments de stockage d'énergie ;
- 3- de la régulation des courants injectés sur le réseau à partir de l'onduleur de tension ;

4- de la commande de l'onduleur de tension [13].

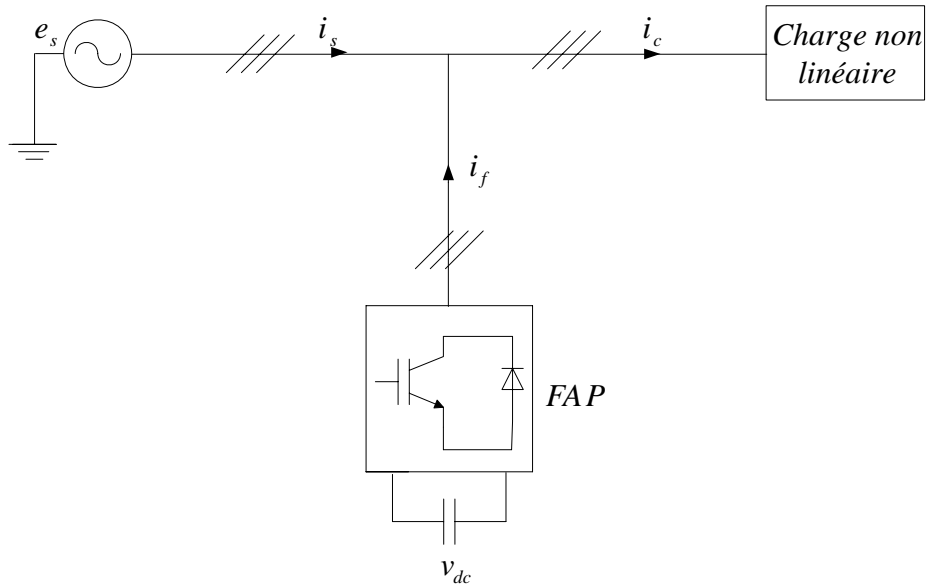


Figure (I.8) : Filtre actif parallèle

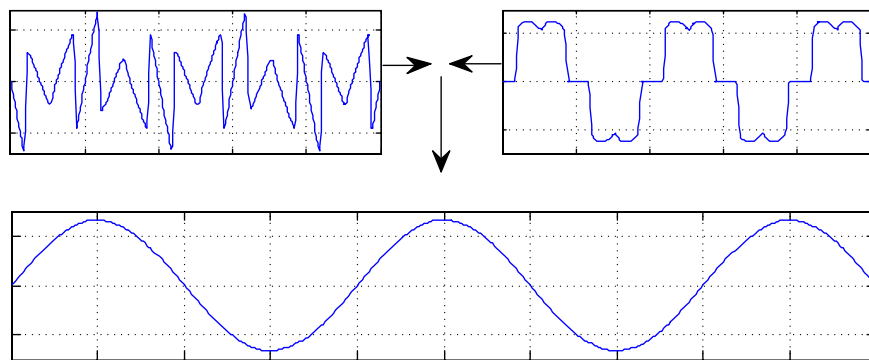


Figure (I.9) : Courant pollué, courant harmonique et courant filtré

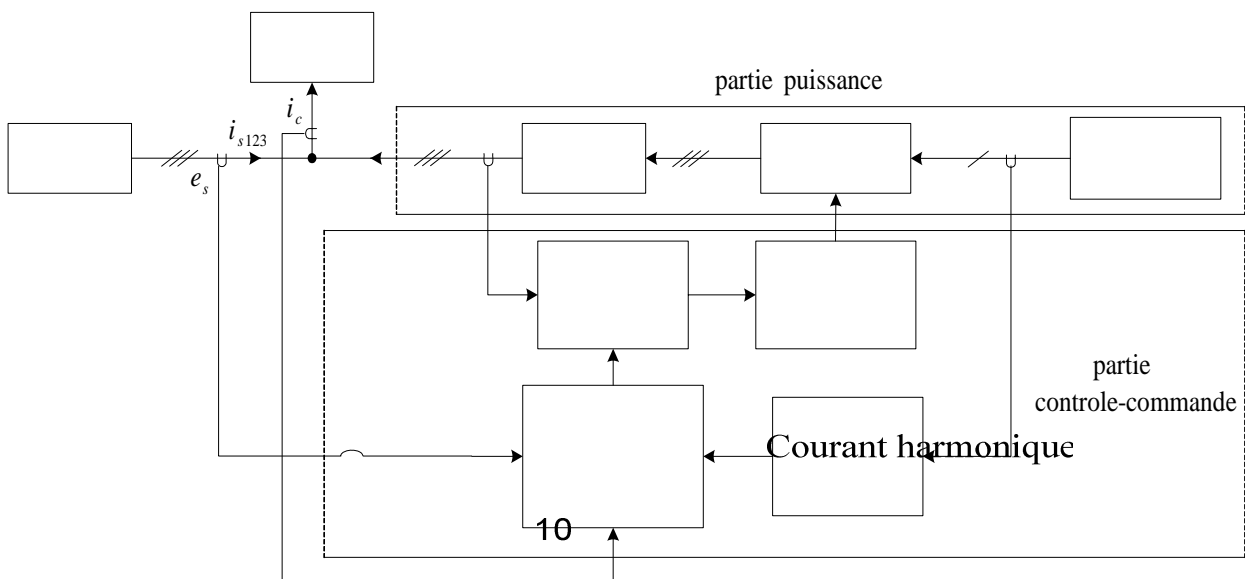


Figure (I.10) : Structure générale du filtre actif parallèle

I.4 Applications des filtres actifs parallèles

La principale charge polluante, le redresseur à diodes ou à thyristors, est très utilisée que cela soit pour alimenter des charges continues à partir du réseau ou comme un élément d'interfaçage au réseau dans une conversion à étage intermédiaire continu. De plus en plus de dispositifs de ce type se connectent au réseau électrique. De ce fait, les filtres actifs parallèles sont un champ d'utilisation naturel dans les applications de réseau, notamment dans les réseaux avec plusieurs charges polluantes et dans les réseaux à courant continu en haute tension.

Les filtres actifs sont également utilisés dans des applications industrielles, afin de dépolluer une zone avec plusieurs charges non linéaires (redresseurs, certains éclairages, etc.). En fin, le filtrage actif est également employé dans les applications tertiaires car les filtres actifs peuvent être intéressants dans les bâtiments commerciaux, hôpitaux, etc. dans lesquels il y a de nombreuses charges polluantes comme des ordinateurs, éclairage économique. Ces filtres actifs compensent les courants harmoniques, les courants réactifs et les déséquilibres des charges.

Les applications réseau, industrielles, tertiaires, domestiques et en télécommunications apparaissent comme des environnements particulièrement pollués par les harmoniques. Les filtres permettent une compensation globale des harmoniques, souvent jusqu'à l'harmonique 50. Ces filtres actifs, en plus de réduire les courants harmoniques, améliorent le facteur de puissance et équilibrent les charges triphasées. L'utilisation de ces filtres produit une réduction des coûts d'exploitation et une prolongation de la durée de vie de l'installation [16].

I.5 Classement des filtres actifs parallèles

Il existe une grande variété de types de filtres actifs parallèles. Ils sont classés de différentes manières selon le nombre de phases, la technologie de l'onduleur et la topologie :

- Filtres actifs monophasés ou triphasés ;
- Filtres actifs avec ou sans neutre raccordé ;
- Filtres actifs basés sur l'onduleur de tension ou sur le commutateur de courant.

Même si les filtres actifs monophasés ont été largement étudiés dans la littérature, dans les applications industrielles, ce sont les filtres actifs triphasés qui sont les plus répandus (pour des applications de type variateurs ou redresseurs à dépolluer) du fait que les filtres monophasés sont normalement limités aux applications en basse puissance (les redresseurs des sources d'alimentation en continu), sauf dans le cas de la traction électrique. La deuxième classification se fait autour de la topologie utilisée, avec ou sans neutre raccordé. Les filtres actifs avec neutre raccordé ont été développés afin de pouvoir injecter et compenser les composantes homopolaires. Dans la littérature la plupart des filtres sont connectés sans neutre raccordé. Toutefois, on trouve plusieurs filtres avec neutre raccordé : certains avec un onduleur à trois bras et d'autres avec un onduleur à quatre bras ; en ce qui concerne la technologie de l'onduleur, les filtres actifs sont soit basés sur l'onduleur de tension avec un condensateur du côté continu et un filtre de raccordement inductif du côté réseau, soit sur un commutateur de courant avec une inductance du côté continu et un filtre de raccordement capacitif du côté réseau. Actuellement, même si l'on trouve des articles basés sur le commutateur de courant, l'onduleur de tension est généralement préféré à cause de son meilleur rendement, de son moindre coût et de son volume plus réduit (si l'on compare le condensateur et l'inductance du côté continu). Par ailleurs, les modules à IGBT_S disponibles actuellement sur le marché sont bien adaptés aux onduleurs de tension car en général une diode en antiparallèle est rajoutée pour chaque IGBT. Le commutateur de courant a quant à lui besoin de mettre en série avec chaque IGBT une diode anti-retour. De plus, un aspect vient renforcer provisoirement le choix : le commutateur de courant ne peut pas être utilisé avec des topologies multi-niveaux classiques. En conséquence presque tous les filtres actifs qui sont sur le marché sont composés d'onduleurs de tension [16].

I.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté différents types de perturbations affectant l'onde de courant du réseau électrique. Comme nous avons pu le constater, les harmoniques ont des effets néfastes sur les équipements électriques. Ces effets peuvent aller des échauffements et de la dégradation du fonctionnement jusqu'à la destruction totale de ces équipements. Alors que pour éliminer ces effets, plusieurs solutions traditionnelles et modernes de dépollution ont été présentées. La solution classique à base de filtres passifs est souvent pénalisée en termes d'encombrement et de résonance, de plus elles ne peuvent pas s'adapter à l'évolution du réseau et aux charges polluantes. Contrairement, les filtres actifs ont un objet de s'adapter et dépolluer le réseau de tous types de perturbations.

Chapitre II

Commandes des filtres actifs parallèles à trois fils

II.1 Introduction

Dans ce chapitre nous étudierons la structure générale du filtre actif parallèle, laquelle a été divisée en deux : la partie puissance et la partie contrôle-commande. Dans la partie puissance, nous introduirons les trois principaux blocs de cette structure, à savoir l'onduleur de tension, l'élément de stockage d'énergie et le filtre de sortie. Dans la partie contrôle-commande, nous aborderons les cinq principaux blocs, soit l'identification des courants perturbés, la régulation de la tension continue et du courant du filtre actif parallèle, la commande de l'onduleur et le système à base de PLL. Le système à base de PLL sera intégré dans la méthode d'identification des courants perturbés afin de généraliser l'application de cette dernière dans les cas les plus défavorables de la tension du réseau [6].

Les objectifs du présent chapitre visent à présenter la structure du filtre actif parallèle ainsi que son fonctionnement général. Nous examinerons le rôle des multiples éléments le composant et aussi, nous ferons un survol des principaux types de commande qui ont été élaborés pour le filtrage actif. Ensuite, nous présentons les différentes stratégies de commande utilisées pour ces filtres actifs de puissance à trois fils afin d'identifier les courants harmoniques de référence. Pour terminer, les résultats de simulation obtenus seront exposés et commentés.

II.2 Topologies du filtre actif de puissance parallèle relié à un réseau électrique à trois fils

La partie puissance d'un FAP à structure de tension, comme on peut le voir sur la figure (II.1), est constituée par [17] :

- un onduleur de tension à base de semi-conducteurs de puissance, commandables à l'ouverture et à la fermeture (IGBT, MOSFET, ...) et comportant pour chacun d'entre eux une diode en antiparallèle ;
- un circuit capacitif de stockage de l'énergie;
- un filtre de sortie.

II.2.1 Onduleur de tension

Dans le cas d'un réseau triphasé à trois fils, il existe deux topologies d'onduleurs à structure de tension : l'onduleur à trois bras et l'onduleur à deux bras avec condensateurs à point milieu [18].

II.2.2. Onduleur de tension à trois bras

II.2.3 Structure générale

La figure (II.1) présente un onduleur de tension à trois bras employé dans un FAP à structure de tension relié à un réseau électrique à trois fils. Chaque bras de l'onduleur comporte deux interrupteurs bidirectionnels en courant, commandés à la fermeture et à l'ouverture. Le stockage de l'énergie côté continu se fait par l'intermédiaire d'un condensateur C_{dc} ayant à ses bornes une tension notée v_{dc} , régulée à une valeur positive. Ce condensateur joue le rôle d'une source de tension continue.

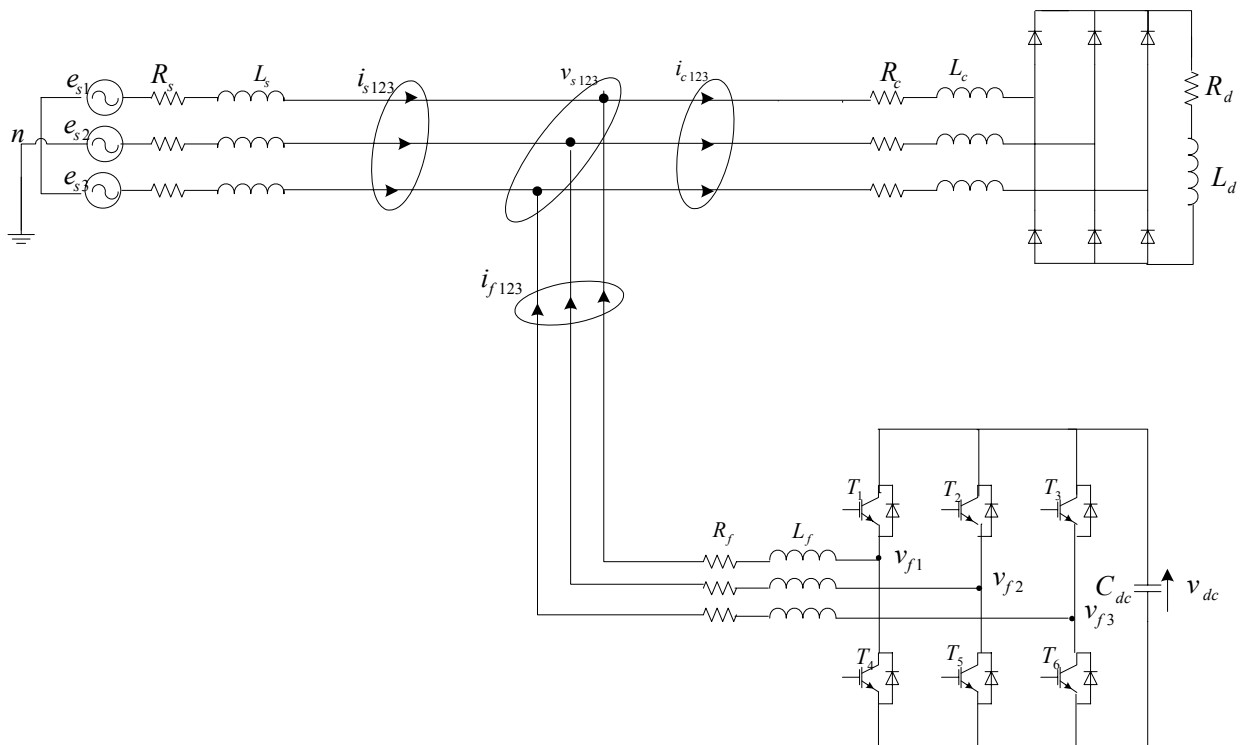


Figure (II.1) : Onduleur de tension à trois bras employé dans un FAP à structure de tension relié au réseau électrique à trois fils

II.2.4 Tensions de sortie de l'onduleur

Les deux semi-conducteurs d'un même bras sont commandés de façon complémentaire; la conduction de l'un implique alors que l'autre soit bloqué. L'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur de la figure (II.1) dépendent de l'état des signaux de commande (S_1, S_2, S_3) comme défini ci-dessous :

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

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

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

Les tensions de sortie de l'onduleur, notées v_{fk} , avec ($k = \{1, 2, 3\}$), sont référencées par rapport au neutre du réseau et vérifient les équations suivantes [18] :

$$v_{fk} = v_{sk} + L_f \frac{di_{fk}}{dt} + R_f i_{fk} \quad (\text{II.1})$$

Les tensions du réseau étant supposées équilibrées et sachant que la somme des courants injectés par l'onduleur est nulle, on peut écrire :

$$\begin{aligned} v_{s1} + v_{s2} + v_{s3} &= 0 \\ i_{f1} + i_{f2} + i_{f3} &= 0 \end{aligned} \quad (\text{II.2})$$

Nous pouvons donc déduire des équations (II.1) et (II.2) la relation suivante :

$$v_{f1} + v_{f2} + v_{f3} = 0 \quad (\text{II.3})$$

Les équations des tensions de sortie de l'onduleur en fonction des états des interrupteurs sont exprimées par :

$$\begin{bmatrix} v_{f1} \\ v_{f2} \\ v_{f3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2S_1 & -S_2 & -S_3 \\ -S_1 & 2S_2 & -S_3 \\ -S_1 & -S_2 & 2S_3 \end{bmatrix} \frac{v_{dc}}{3} \quad (\text{II.4})$$

Puisque les grandeurs (S_1, S_2 et S_3) peuvent prendre chacune deux valeurs (0 ou 1), il en résulte huit commandes possibles, présentées dans le tableau (II.1). Dans ce tableau, \vec{V}_f est la représentation vectorielle des tensions fournies par l'onduleur (v_{f1}, v_{f2} et v_{f3}) dans le repère orthogonal (α, β). La figure (II.2) représente ce vecteur dans le repère (α, β). Les commutations imposent le passage du vecteur \vec{V}_f d'une position à l'autre. A la figure (II.2), V_{ref} représente le vecteur de tension de référence que doit produire l'onduleur afin de générer en opposition de phase les courants harmoniques absorbés par la charge polluante. L'onduleur n'est capable de fournir des tensions égales aux tensions de référence que si le vecteur formé par ces dernières

reste à l'intérieur de l'hexagone tracé à la figure (II.2). Les tensions fournies par l'onduleur génèrent, selon l'équation (II.1), les courants de sortie du FAP [18].

m	S_1	S_2	S_3	v_{f1}/v_{dc}	v_{f2}/v_{dc}	v_{f3}/v_{dc}	$\bar{V}_f(m)$
0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	$2/3$	$-1/3$	$-1/3$	$\sqrt{2/3}v_{dc}$
2	0	1	0	$-1/3$	$2/3$	$-1/3$	$\sqrt{2/3}v_{dc}e^{j\frac{2\pi}{3}}$
3	1	1	0	$1/3$	$1/3$	$-2/3$	$\sqrt{2/3}v_{dc}e^{j\frac{\pi}{3}}$
4	0	0	1	$-1/3$	$-1/3$	$2/3$	$\sqrt{2/3}v_{dc}e^{-j\frac{2\pi}{3}}$
5	1	0	1	$1/3$	$-2/3$	$1/3$	$\sqrt{2/3}v_{dc}e^{-j\frac{\pi}{3}}$
6	0	1	1	$-2/3$	$1/3$	$1/3$	$\sqrt{2/3}v_{dc}e^{-j\pi}$
7	1	1	1	0	0	0	0

Tableau (II.1) : Tensions possibles à la sortie de l'onduleur à trois bras

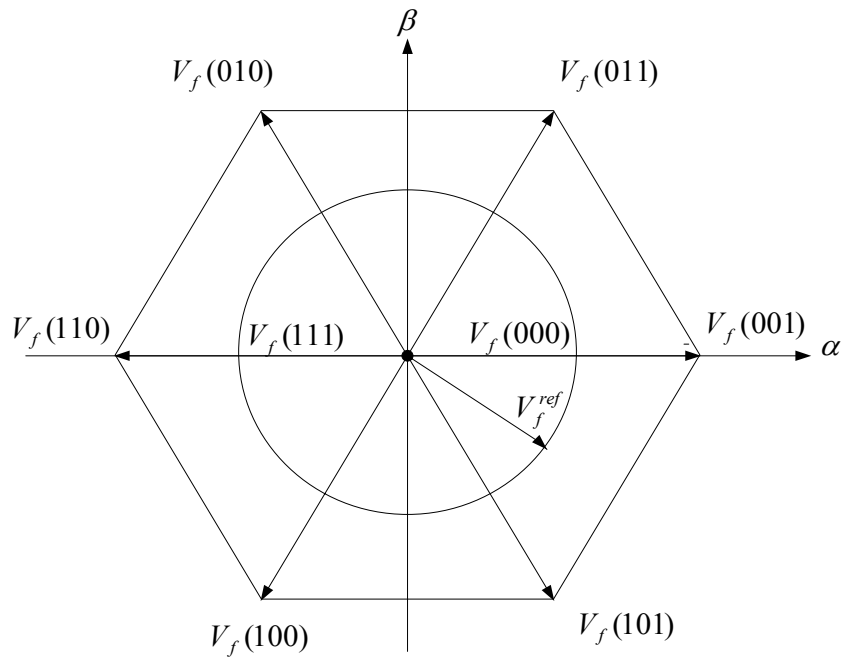


Figure (II.2) : Représentation vectorielle des tensions fournies par l'onduleur de tension à trois bras

II.3 Modèle mathématique du filtre actif parallèle dans le repère triphasé

L'équation de tension par phase du filtre actif parallèle triphasé illustré par la figure (II.1) est donnée par :

$$\begin{aligned}
 v_{sk} &= v_{fk} - v_{L_{fk}} - v_{R_{fk}} \\
 &= v_{fk} - L_f \frac{di_{fk}}{dt} - R_f i_{fk}, \quad k = 1, 2, 3
 \end{aligned}
 \tag{II.5}$$

Alors, les équations des trois phases sont donnés par :

$$L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{f1} \\ i_{f2} \\ i_{f3} \end{bmatrix} = -R_f \begin{bmatrix} i_{f1} \\ i_{f2} \\ i_{f3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{f1} \\ v_{f2} \\ v_{f3} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{s1} \\ v_{s2} \\ v_{s3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

Et pour le coté continu :

$$C_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt} = S_1 i_{f1} + S_2 i_{f2} + S_3 i_{f3} \quad (\text{II.7})$$

Le système d'équation définissant le filtre actif dans le repère triphasé est donné par :

$$\begin{cases} L_f \frac{di_{f1}}{dt} = -R_f i_{f1} + v_{f1} - v_{s1} \\ L_f \frac{di_{f2}}{dt} = -R_f i_{f2} + v_{f2} - v_{s2} \\ L_f \frac{di_{f3}}{dt} = -R_f i_{f3} + v_{f3} - v_{s3} \\ C_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt} = S_1 i_{f1} + S_2 i_{f2} + S_3 i_{f3} \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

II.3.1 Modèle du filtre actif dans le repère synchrone (de Park)

Appliquons la transformée de *Park* sur le système (II.8), nous obtiendrons le modèle de l'onduleur dans le repère synchrone *dq* comme suit [13]:

$$\begin{cases} L_f \frac{di_{fd}}{dt} = -R_f i_{fd} - L_f \omega i_{fq} + v_{fd} - v_{sd} \\ L_f \frac{di_{fq}}{dt} = -R_f i_{fq} + L_f \omega i_{fd} + v_{fq} - v_{sq} \\ C_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt} = S_d i_{fd} + S_q i_{fq} \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

Avec :

$$\begin{aligned} S_d &= S_\alpha \cos \omega t + S_\beta \sin \omega t \\ S_q &= -S_\alpha \sin \omega t + S_\beta \cos \omega t \\ S_\alpha &= \frac{1}{\sqrt{6}} (2S_1 - S_2 - S_3) \\ S_\beta &= \frac{1}{\sqrt{2}} (S_2 - S_3) \end{aligned}$$

II.3.2 Modèle du filtre actif dans le repère stationnaire

A partir du modèle du filtre actif dans le repère triphasé, et en appliquant la transformée de Concordia directe sur ce modèle, le modèle de l'onduleur dans le repère stationnaire est donné par :

$$\begin{cases} L_f \frac{di_{f\alpha}}{dt} = -R_f i_{f\alpha} + v_{f\alpha} - v_{s\alpha} \\ L_f \frac{di_{f\beta}}{dt} = -R_f i_{f\beta} + v_{f\beta} - v_{s\beta} \\ C_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt} = S_\alpha i_{f\alpha} + S_\beta i_{f\beta} \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

Où, les tensions du réseau, les courants et les tensions du filtre sont donnés par :

$$\begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{s1} \\ v_{s2} \\ v_{s3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

$$\begin{bmatrix} v_{f\alpha} \\ v_{f\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_\alpha \\ S_\beta \end{bmatrix} V_{dc} \quad (\text{II.12})$$

$$\begin{bmatrix} i_{f\alpha} \\ i_{f\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{f1} \\ i_{f2} \\ i_{f3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

II.4. Commande par hystérésis à bande fixe

Le but de la commande de l'onduleur est le contrôle des courants à la sortie du filtre afin qu'ils suivent leurs références. Le principe est basé sur la comparaison entre les courants à la sortie du filtre actif et leurs références calculées à partir des différentes méthodes d'extraction et de régulation des courants harmoniques et de la tension du condensateur de stockage d'énergie. Dans la partie suivante, nous étudierons différentes méthodes de commande de l'onduleur.

Le principe de contrôle des courants par hystérésis consiste à maintenir chacun des courants générés dans une bande enveloppant les courants de référence. Chaque violation de cette bande donne un ordre de commutation, de manière à rester à l'intérieur de la bande.

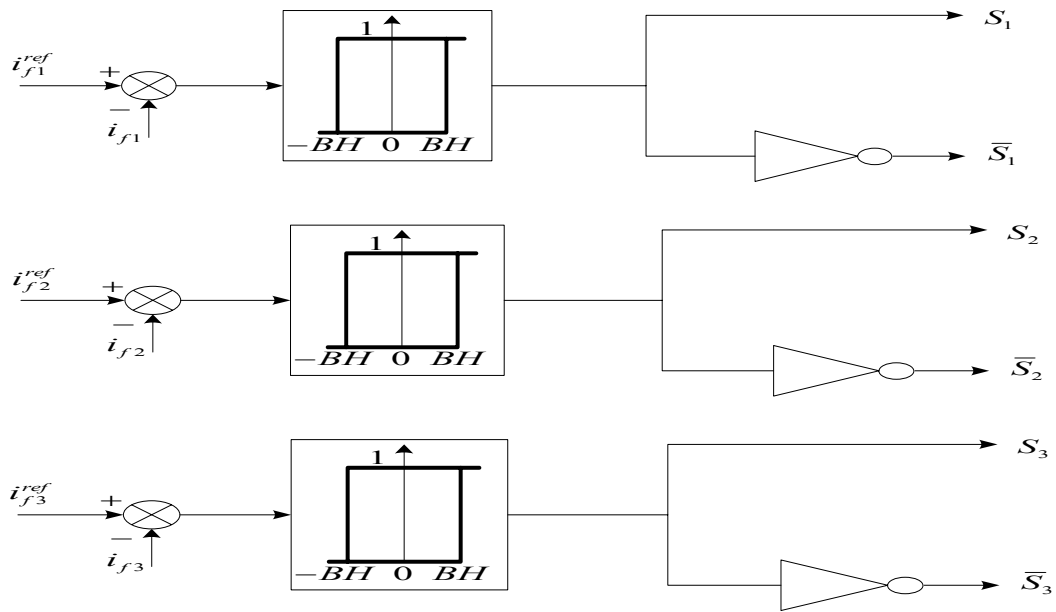


Figure (II.3) : Principe du contrôle par hystérésis

Dans ce cas de contrôle du courant, la fréquence de commutation dépend essentiellement de la dérivée du courant de consigne. Cette dernière dépend de la valeur de l'inductance de couplage et de la chute de tension à ses bornes. Il faut noter que le filtre de couplage a des effets sur la fréquence de commutation et sur le comportement dynamique du filtre actif. L'avantage principale de cette méthode est la simplicité de mise en œuvre, tandis que la fréquence de commutation variable qu'on ne peut pas maîtriser correctement peut être son majeur inconvénient [6],[13].

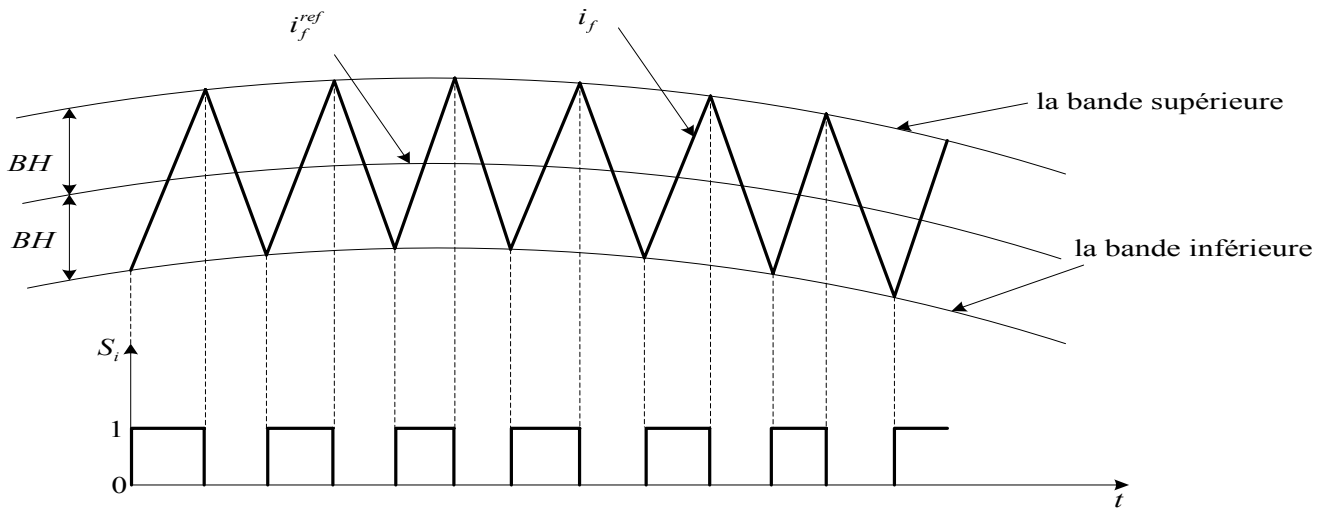


Figure (II.4) : Commande des interrupteurs par hystérésis à bande fixe

II.4.1 L'Algorithme de la commande par hystérésis

Nous désignons par ζ_i l'écart entre le courant de référence i_{fi}^{ref} et le courant réel i_{fi} tel que :

$$\begin{aligned} \varepsilon_i &= i_{fi}^{ref} - i_{fi} \\ i &= \{1, 2, 3\} \end{aligned} \tag{II.14}$$

L'algorithme de cette stratégie est donné comme suit :

$$\begin{cases} \text{si } \varepsilon_i \geq \Delta_i \Rightarrow S_{ij} = 1 & i = \{1, 2, 3\} \\ \text{si } \varepsilon_i \leq -\Delta_i \Rightarrow S_{ij} = 0 & j = \{1, 2\} \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

Δ_i : Largeur de la bande d'hystérésis.

II.5. Onduleur de tension à deux bras

II.5.1 Structure générale

La seconde topologie d'onduleur qui peut être utilisée dans un FAP à structure de tension est l'onduleur de tension à deux bras. La figure (II.3) présente le schéma de principe de cette topologie. Les deux différences par rapport à la topologie à trois bras précédente sont les suivantes [18] :

L'onduleur est constitué de quatre interrupteurs bidirectionnels en courant formant les deux bras. Ces composants sont également des composants semi-conducteurs commandés à la fermeture et à l'ouverture, comportant chacun une diode en anti-parallèle.

Le troisième bras est remplacé par deux condensateurs reliés par leur point milieu à la troisième phase du réseau électrique. Chacune des deux capacités C_{dc} joue le rôle d'une source de tension continue. La tension à leurs bornes $v_{dc}/2$, est également régulée à une valeur de consigne positive.

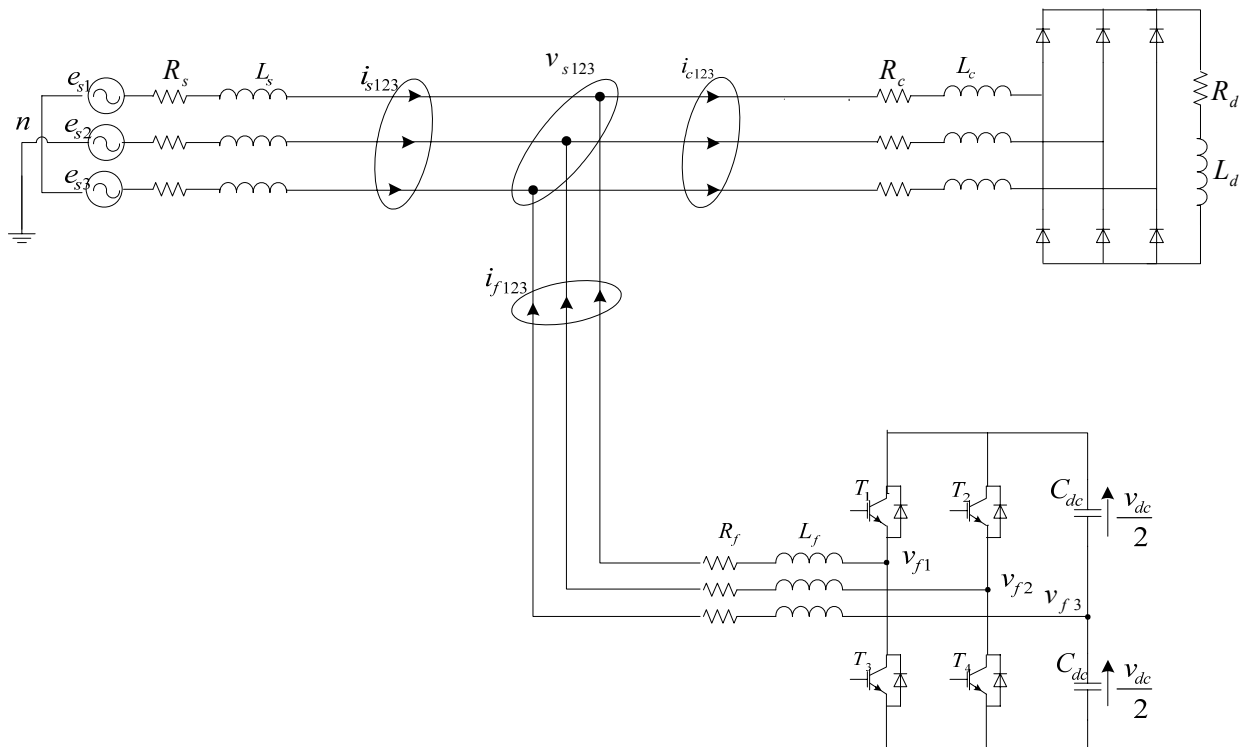


Figure (II.5) : Onduleur de tension à deux bras employé dans un FAP à structure de tension relié à un réseau électrique à trois fils

II.5.2 Tensions de sortie de l'onduleur

Pour cette topologie, les signaux de commande (S_1, S_2) sont ainsi définis :

$$S_1 = \begin{cases} 1 & \text{si } T_1 \text{ fermé et } T_3 \text{ ouvert} \\ 0 & \text{si } T_1 \text{ ouvert et } T_3 \text{ fermé} \end{cases}$$

$$S_2 = \begin{cases} 1 & \text{si } T_2 \text{ fermé et } T_4 \text{ ouvert} \\ 0 & \text{si } T_2 \text{ ouvert et } T_4 \text{ fermé} \end{cases}$$

Les tensions de sortie de l'onduleur, référencées par rapport au neutre du réseau, sont définies par les expressions suivantes :

$$\begin{aligned} v_{f1} &= v_{f10} + v_{0n} \\ v_{f2} &= v_{f20} + v_{0n} \\ v_{f3} &= v_{0n} \end{aligned} \quad (\text{II.16})$$

En sommant les trois équations de (II.16) et en tenant compte de l'équation (II.3), nous obtenons :

$$v_{0n} = -\frac{v_{f10} + v_{f20}}{3} \quad (\text{II.17})$$

En substituant l'expression (II.16) dans (II.17), nous obtenons :

$$\begin{bmatrix} v_{f1} \\ v_{f2} \\ v_{f3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{f10} \\ v_{f20} \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

Ou :

$$\begin{bmatrix} v_{f10} \\ v_{f20} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2S_1 - 1 \\ 2S_2 - 1 \end{bmatrix} \frac{v_{dc}}{2} \quad (\text{II.19})$$

Puisque les variables (S_1 et S_2) prennent chacune deux valeurs, nous distinguons pour cette topologie quatre commandes possibles, présentées dans le tableau (II.2). Les tensions (v_{f1}, v_{f2} et v_{f3}) génèrent selon l'équation (II.1) les courants de sortie du filtre actif. Ces tensions peuvent également être représentées sous la forme d'un vecteur \vec{V}_f selon les axes α, β . Les quatre vecteurs tensions correspondantes aux quatre possibilités de commande sont illustrées à la figure (II.6). Ici encore, l'onduleur n'est capable de fournir des tensions égales aux tensions de référence que si le module du vecteur \vec{V}^{ref} reste inférieur à celui du vecteur de tension $\vec{V}_f(m)$ [17],[18].

m	S_1	S_2	v_{f1}/v_{dc}	v_{f2}/v_{dc}	v_{f3}/v_{dc}	$\bar{V}_f(m)$
0	0	0	$-1/6$	$-1/6$	$1/3$	$(v_{dc}/\sqrt{6})e^{-j\frac{2\pi}{3}}$
1	1	0	$1/2$	$-1/2$	0	$(v_{dc}/\sqrt{2})e^{-j\frac{\pi}{6}}$
2	0	1	$-1/2$	$1/2$	0	$(v_{dc}/\sqrt{6})e^{j\frac{\pi}{3}}$
3	1	1	$1/6$	$1/6$	$-1/3$	$(v_{dc}/\sqrt{2})e^{j\frac{5\pi}{6}}$

Tableau (II.2) : Tensions générées par l'onduleur de tension à deux bras

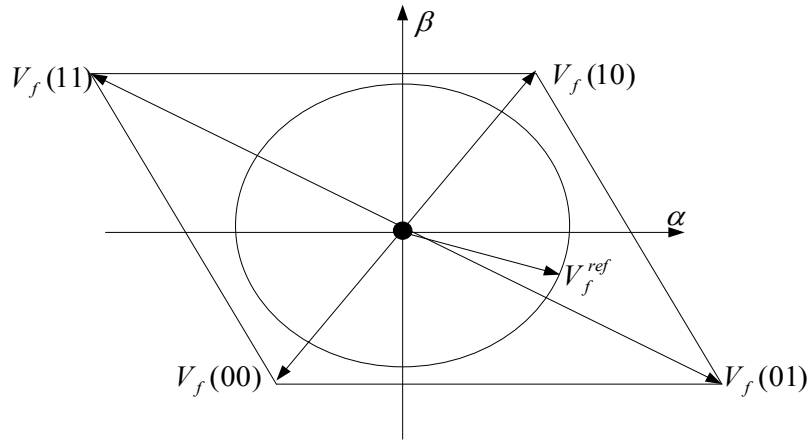


Figure (II.6) : Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur de tension à deux bras

II.5.3 Comparaison entre les deux topologies du FAP

En négligeant les résistances R_f du filtre de sortie, nous pouvons écrire à partir de l'équation (II.1) la relation suivante caractérisant le courant i_{fk} du filtre actif ($k = \{1, 2, 3\}$):

$$L_f \frac{di_{fk}}{dt} = v_{fk} - v_{sk} \quad (II.20)$$

Notons Δi_{fk} la différence entre le courant de référence et le courant mesuré :

$$\Delta i_{fk} = i_{refk} - i_{fk} \quad (II.21)$$

A partir des équations (II.20) et (II.21), nous obtenons l'expression suivante :

$$L_f \frac{d\Delta i_{fk}}{dt} = (v_{sk} + L_f \frac{di_{refk}}{dt}) - v_{fk} \quad (II.22)$$

Le terme entre parenthèse dans l'équation (II.22) peut être défini comme une tension de référence (notée ici v_{refk}), ce qui conduit à l'expression suivante :

$$v_{refk} = v_{sk} + L_f \frac{di_{refk}}{dt} \quad (II.23)$$

Comme cela a été mentionné précédemment, pour satisfaire la condition de commandabilité de l'onduleur, il faut que le module du vecteur \bar{V}_f^{ref} reste inférieur à celui du vecteur de tension $\bar{V}_f(m)$.

Dans le cas de la topologie à trois bras, il faut donc que :

$$\sqrt{2/3}v_{dv} \geq Mod(\bar{V}_f^{ref}) \quad (II.24)$$

Où $Mod(\bar{V}_f^{ref})$ est le module du vecteur (\bar{V}_f^{ref}) .

A partir de la relation (II.24), nous déduisons la tension minimale côté continu permettant de garantir la commandabilité de l'onduleur pour la topologie à trois bras :

$$(v_{dc-min})_{trois\ bras} = \sqrt{3/2}Mod(\bar{V}_f^{ref}) \quad (II.25)$$

De même, pour satisfaire la condition de commandabilité de l'onduleur à deux bras (voir figure (II.6), il faut que :

$$\frac{v_{dc}}{\sqrt{6}} \geq Mod(\bar{V}_f^{ref}) \quad (II.26)$$

A partir de la relation (II.26), nous déduisons la tension minimale côté continu permettant de garantir la commandabilité de l'onduleur pour la topologie à deux bras :

$$(v_{dc-min})_{deux\ bras} = \sqrt{6}Mod(\bar{V}_f^{ref}) \quad (II.27)$$

A partir des équations (II.25) et (II.27), nous établissons la relation suivante :

$$\frac{(v_{dc-min})_{deux\ bras}}{(v_{dc-min})_{trois\ bras}} = 2 \quad (II.28)$$

Nous obtenons ainsi un rapport théorique de 2 entre les valeurs minimales des tensions v_{dc} pour les deux topologies. Par conséquent, la topologie deux bras requiert des interrupteurs qui supportent une tension deux fois plus importante que dans le cas de la topologie à trois bras [18].

II.5.4 Filtre de sortie

Le filtre de sortie est un filtre passif utilisé pour connecter l'onduleur de tension au réseau électrique. Le filtre de sortie est dimensionné afin de satisfaire à deux critères [6],[18],[19].

- Assurer la dynamique en courant, définie par :

$$\frac{di_f}{dt} = \frac{di_{ch}}{dt} \quad (II.29)$$

Où i_f : Courant du filtre

i_{ch} : Courant harmonique de la charge

- Limiter la propagation sur le réseau électrique des harmoniques générés par les commutations.

Un filtre de sortie du premier ordre est le plus souvent utilisé dans la littérature. Il est composé d'une inductance L_f comportant une résistance interne R_f . Une valeur relativement faible de L_f permet d'obtenir une bonne dynamique du FAP en satisfaisant l'égalité. Cependant, une faible valeur de L_f , permet à la majorité des harmoniques, induits par les commutations, de passer du côté réseau et d'affecter ainsi les installations et les équipements électriques. Inversement, une valeur relativement élevée de L_f empêche ces harmoniques de se propager sur le réseau électrique mais nécessite une tension v_{dc} plus élevée afin de garantir les performances du filtre actif. Pour limiter la propagation de ces harmoniques, un filtre passif auxiliaire peut être ajouté à la sortie de l'onduleur ou en amont (côté réseau) pour absorber ces harmoniques liés au découpage.

II.6 Système de stockage d'énergie

Le choix de la tension v_{dc} et de la capacité de condensateur C_{dc} affecte la dynamique et la qualité de compensation du filtre actif parallèle. En effet, une tension v_{dc} élevée améliore la dynamique du filtre actif. De plus, les ondulations de la tension continue v_{dc} causées par les courants engendrés par le filtre actif et limitées par le choix de C_{dc} [12],[13] peuvent dégrader la qualité de compensation du filtre actif parallèle. Ces fluctuations sont d'autant plus importantes que l'amplitude du courant du filtre est grande et que sa fréquence est faible. Pour cette raison, nous pouvons estimer que seuls les premiers harmoniques sont pris en compte dans le choix des paramètres du système de stockage. Pour démontrer ceci, deux méthodes peuvent être utilisées [13] :

- Le calcul de l'énergie fournie par le filtre actif pendant une demi-période de la pulsation de puissance liée aux deux premiers harmoniques (5 et 7 pour un pont redresseur de Graëtz), est la base de la première méthode. On choisit un taux d'ondulation Δv_{dc} acceptable, généralement de l'ordre de $2\% v_{dc}$. On peut calculer C_{dc} à partir de la relation suivante :

$$C_{dc} = \frac{v_s \sqrt{I_5^2 + I_7^2 - 2I_5 I_7 \cos(5\alpha - 7\alpha)}}{2\Delta v_{dc} \omega v_{dc}^{ref2}} \quad (\text{II.30})$$

Avec v_s : la tension simple du réseau, I_h : le courant harmonique du rang h et α l'angle d'allumage des thyristors du pont de Graëtz, zéro dans le cas d'un redresseur à diodes [6]. On choisit la tension v_{dc} comme la plus grande tension respectant les contraintes des interrupteurs, la valeur minimale de la tension v_{dc} est deux fois plus grande que la valeur maximale de la tension simple du réseau pour assurer la contrôlabilité du courant du filtre de sortie en tous temps [13].

- La deuxième méthode, plus simple, se base sur la mesure du courant harmonique I_h du rang le plus faible. La capacité C_{dc} se calcule de la façon suivante [6] [13]:

$$C_{dc} = \frac{I_h}{v_{dc} \Delta v_{dc} \omega_h} \quad (\text{II.31})$$

Avec : ω_h la pulsation la plus faible des harmoniques à compenser.

- Une troisième méthode basée sur le calcul de l'énergie fournie par le filtre actif et celle de la charge polluante comme suit :

La valeur efficace du courant de la charge coté alternatif dans les trois phases est :

$$I_{c,eff} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d \quad (\text{II.32})$$

Où : I_d représente du courant de la charge coté continu.

Le fondamental du courant de la charge est donné par :

$$I_{c,fon,eff} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d \quad (\text{II.33})$$

Les courants harmoniques produits par la charge représentent la différence entre le courant coté alternatif de la charge et son fondamental. La valeur efficace de ces courants est donnée par :

$$I_{c,har} = \sqrt{I_{c,eff}^2 - I_{c,fon,eff}^2} = \sqrt{\frac{2}{3} - \frac{6}{\pi^2}} I_d = 0.2423 I_d \quad (\text{II.34})$$

Le filtre actif doit fournir la puissance correspondante aux harmoniques produites par la charge. Le rapport entre la puissance du filtre actif et celle de la charge polluante est :

$$\begin{aligned} \frac{S_f}{S_c} &= \frac{S_{c,har}}{S_c} = \frac{3I_{c,har}V_{s1,eff}}{3I_{c,eff}V_{s1,eff}} \\ &\Rightarrow \frac{I_{c,har}}{I_{c,eff}} = \frac{0.24I_d}{\sqrt{\frac{2}{3}}I_d} = 0.2968 \end{aligned} \quad (\text{II.35})$$

D'où, on peut exprimer la puissance apparente du filtre en fonction de celle de la charge polluante par :

$$S_f = 0.2968 S_c \quad (\text{II.36})$$

La puissance apparente de la charge est constituée de la puissance active, réactive et déformante. Elle est donnée par la relation suivante :

$$S_c^2 = P_c^2 + Q_c^2 + D_c^2 \quad (\text{II.37})$$

Dans le cas de compensation simultanée des harmoniques et de la puissance réactive, la puissance du filtre est donnée par :

$$S_f = \sqrt{D_c^2 + Q_c^2} \quad (\text{II.38})$$

$$\Rightarrow \frac{S_f}{S_c} = 0.2968 = \frac{\sqrt{D_c^2 + Q_c^2}}{\sqrt{P_c^2 + Q_c^2 + D_c^2}} \quad (\text{II.39})$$

A partir de la relation (II.39), la puissance du filtre peut s'exprimer en fonction de la puissance active de la charge polluante par la relation suivante :

$$S_f = 0.3036 P_c \quad (\text{II.40})$$

Le condensateur du filtre doit produire une variation d'énergie qui doit être égale ou supérieure à

l'énergie équivalente à $0.3036 P_c$. L'énergie emmagasinée dans le condensateur est donnée par :

$$\begin{aligned} E_{\min} &= \frac{1}{2} C_{dc} v_{dc.\min}^2 \\ E_{\max} &= \frac{1}{2} C_{dc} v_{dc.\max}^2 \end{aligned} \quad (\text{II.41})$$

Où E_{\min}, E_{\max} représentent respectivement l'énergie minimale et l'énergie maximale emmagasinées dans le condensateur. La variation de l'énergie du condensateur pendant une période d'ondulation de la tension continue ΔT doit être supérieure ou égale à la puissance que doit produire le filtre actif. Ce qui est exprimé par :

$$E_{\max} - E_{\min} = \frac{1}{2} C_{dc} v_{dc.\max}^2 - \frac{1}{2} C_{dc} v_{dc.\min}^2 \geq 0.3036 P_c \Delta T \quad (\text{II.42})$$

En choisissant la période de l'ondulation de la tension aux bornes du condensateur six fois inférieure à celle de la tension du réseau électrique, on peut trouver :

$$C_{dc} \geq \frac{0.3036 P_c}{3f_s (v_{dc.\max}^2 - v_{dc.\min}^2)} \quad (\text{II.43})$$

avec f_s : la fréquence fondamentale du réseau électrique .

Si on fixe l'ondulation de la tension continue à $\Delta v_{dc} = 2\% v_{dc}$, on peut écrire :

$$v_{dc.\max(\min)} = v_{dc} \pm \frac{\Delta v_{dc}}{2} \quad (\text{II.44})$$

Dans notre travail nous avons adopté la deuxième méthode avec un choix de :

$I_h \approx 183.83 A$, $v_{dc} = 700V$ On trouve alors : $C_{dc} \geq 8 mF$ nous avons choisi $C_{dc} = 10 mF$.

II.7. Présentation des stratégies de commande

Après avoir présenté les différentes topologies pour la compensation des réseaux électriques à trois fils, nous allons maintenant étudier quelques commandes des filtres actifs de puissance parallèles pour identifier les harmoniques de courants des charges non-linéaires. Depuis leur apparition, elles n'ont cessé d'évoluer, de la compensation de l'énergie réactive et des harmoniques de courant lorsque le système est équilibré, à la compensation de ces mêmes perturbations lorsque le système est déséquilibré.

A l'heure actuelle, les chercheurs continuent toujours à améliorer ces commandes afin d'obtenir de meilleurs résultats, tant du point de vue d'une meilleure extraction des perturbations (amélioration du régime dynamique, diminution du THD) que du développement de nouvelles stratégies de commandes pour une meilleure adaptation et robustesse de ces dernières face aux différents types de charges non-linéaires [17].

II.7.1 Commande directe d'un filtre actif de puissance à trois bras

La commande dite directe dont le principe est basé sur la comparaison du courant de référence $i_{fi}^{ref}(t)$ obtenu par une méthode appropriée, au courant injecté par le filtre actif de puissance $i_{fi}(t)$, comme le montre la figure (II.7).

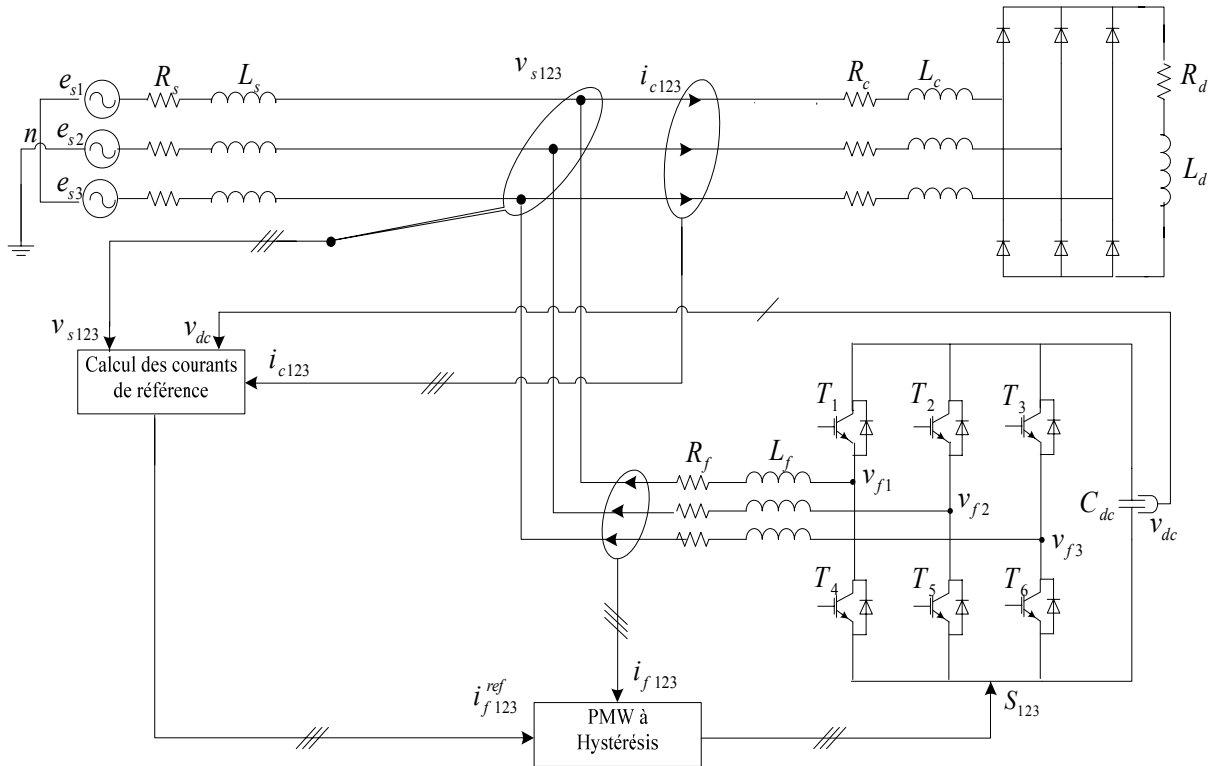


Figure (II.7) : Commande directe d'un filtre actif de puissance à trois bras

II.7.2 Commande directe d'un filtre actif de puissance à deux bras

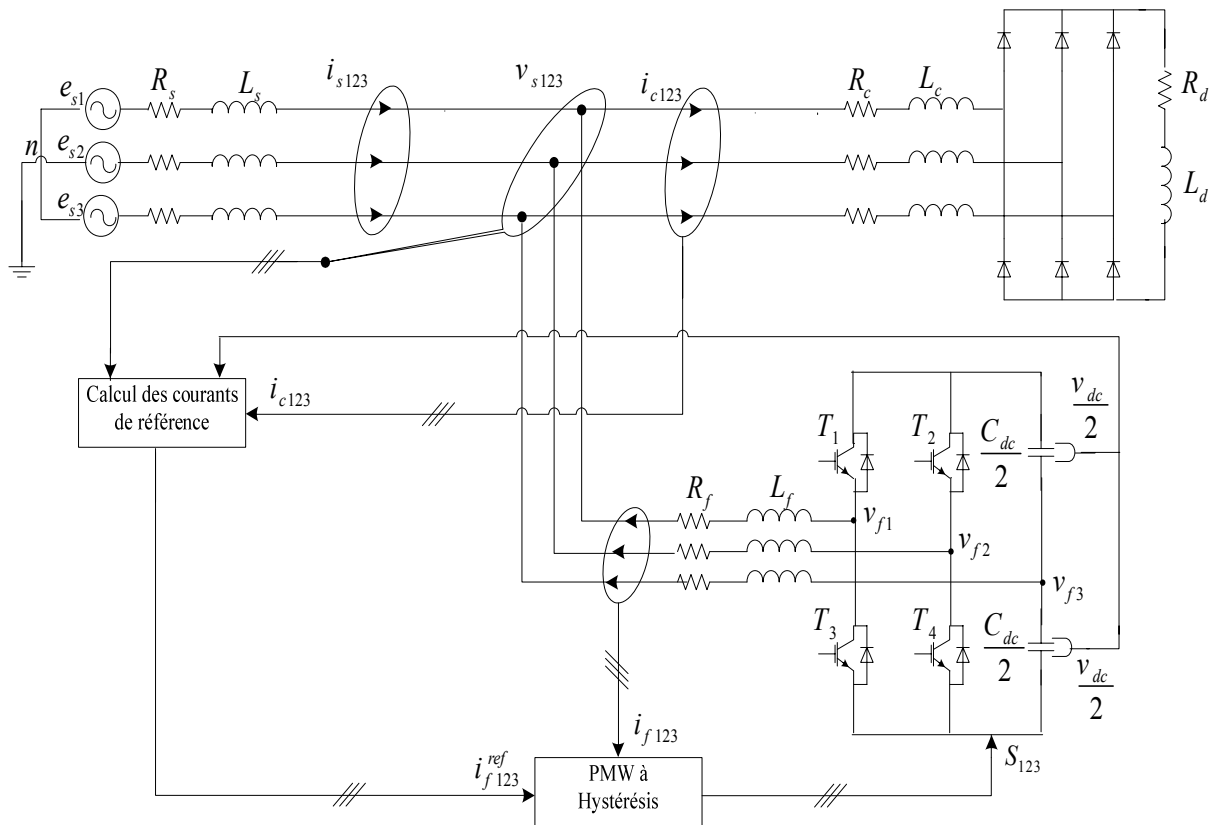


Figure (II.8) : Commande directe d'un filtre actif de puissance à deux bras

II.7.3 Identification 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. Elles peuvent être regroupées selon deux approches [18]:

II.7.3.1 Identification dans le domaine fréquentiel

Ce type d'approche utilise la transformée de Fourier rapide, pour extraire les harmoniques du courant de charge. Cette méthode est particulièrement adaptée aux charges dont le contenu harmonique varie lentement. Elle présente également l'avantage de sélectionner chaque harmonique individuellement et permet ainsi de ne compenser que les courants harmoniques prépondérants. Cependant, cette méthode nécessite des calculs lourds afin d'identifier ces courants harmoniques. Pour cette raison, les méthodes fréquentielles ne sont pas utilisées en pratique car la charge polluante peut généralement varier rapidement au cours du temps.

II.7.3.2 Identification dans le domaine temporel

De nombreuses méthodes d'identification des courants de référence dans le domaine temporel ont été publiées dans la littérature scientifique. Les plus significatives feront l'objet des paragraphes suivants.

II.8 Méthode des puissances active et réactive instantanées

La méthode des puissances active et réactive instantanées (couramment notée méthode pq) exploite la transformation de Concordia des tensions simples et des courants de ligne [18], 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. Le principe de cette méthode classique est maintenant succinctement décrit. Soient respectivement les tensions simples du point de raccordement (Pcc), sans homopolaire (connecté à une charge polluante) et les trois courants de charge, notés v_{s1}, v_{s2}, v_{s3} et i_{c1}, i_{c2}, i_{c3} . La transformation de Concordia permet de ramener ce système triphasé équilibré à un système diphasé dont les axes sont en quadrature :

$$\begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{s1} \\ v_{s2} \\ v_{s3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.45})$$

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c1} \\ i_{c2} \\ i_{c3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.46})$$

En négligeant les harmoniques de tension, la puissance réelle p_c et la puissance imaginaire q_c sont exprimées par :

$$\begin{bmatrix} p_c \\ q_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & v_{s\beta} \\ -v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{II.47})$$

Les composantes des puissances réelle et imaginaire instantanées s'expriment comme la somme d'une composante continue et d'une composante alternative :

$$\begin{bmatrix} p_c \\ q_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{p}_c + \tilde{p}_c \\ \bar{q}_c + \tilde{q}_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.48})$$

Avec :

- \bar{p}_c : La puissance continue liée à la composante fondamentale active du courant et de la tension;
- \bar{q}_c : La puissance continue liée à la composante fondamentale réactive du courant et de la tension;

\tilde{p}_c et \tilde{q}_c : Les puissances alternatives correspondantes à la somme des composantes perturbatrices du courant et de la tension.

Afin d'isoler les puissances actives et réactives conventionnelles, il faut connaître avec précision les fréquences des pulsations des puissances instantanées formées à partir de la relation (II.48). Il est à noter qu'on considère désormais que le réseau étudié est composé de trois fils ce qui empêche les composantes homopolaires d'y circuler. Après avoir identifié les pulsations des puissances instantanées, le filtre de puissance chargé d'isoler les puissances active et réactive conventionnelles peut être dimensionné. Un circuit constitué d'un filtre passe bas avec un soustracteur peut être employé, comme le présente la figure (II.9) [13].

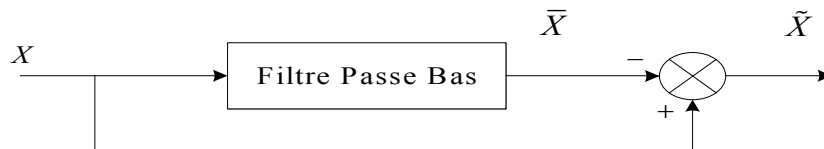


Figure (II.9) : Schéma représentant le principe de séparation des puissances

L'ordre de ce filtre passe-bas définit la dynamique et l'efficacité de la méthode d'identification. Des filtres de puissance du quatrième ou cinquième ordre ont été proposés [13]. Dans ce mémoire, un filtre passe-bas de deuxième ordre est choisi pour l'extraction des harmoniques. Les détails sur le filtre passe-bas de deuxième ordre sont disponibles dans l'Annexe C de ce mémoire. La fréquence de coupure $f_c = 25\text{Hz}$, est choisie pour que le filtre puisse bloquer toute composante perturbatrice des puissances instantanées.

De l'équation (II.47), nous pouvons déduire les composantes de courant correspondantes :

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & v_{s\beta} \\ -v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p_c \\ q_c \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{s\alpha}^2 + v_{s\beta}^2} \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & -v_{s\beta} \\ v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_c \\ q_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.49})$$

En introduisant (II.48) dans (II.49), les courants dans les axes (α, β) deviennent :

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{s\alpha}^2 + v_{s\beta}^2} \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & -v_{s\beta} \\ v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p}_c \\ \bar{q}_c \end{bmatrix} + \frac{1}{v_{s\alpha}^2 + v_{s\beta}^2} \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & -v_{s\beta} \\ v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p}_c \\ \tilde{q}_c \end{bmatrix} \quad (\text{II. 50})$$

Suivant la fonction que nous souhaitons donner au FAP, nous pouvons compenser simultanément les harmoniques de courant et l'énergie réactive ou bien uniquement l'un des deux. Le tableau (II.3) résume les modes de compensations possibles [17],[18].

Si nous voulons par exemple compenser simultanément les harmoniques de courant et l'énergie réactive, nous éliminons alors la composante continue de p_c à l'aide d'un simple FPB. Dans ce cas et après avoir ajouté à la composante alternative de la puissance active instantanée, la puissance active p_{dc} nécessaire à la régulation de la tension continue v_{dc}

Type de compensation	Paramètres de contrôle	
Compensation des harmoniques de courant	$p_f^{ref} = \tilde{p}_c + p_{dc}$	$q_f^{ref} = \tilde{q}_c$
Compensation de l'énergie réactive	$p_f^{ref} = 0 + p_{dc}$	$q_f^{ref} = \bar{q}_c$
Compensation des harmoniques de courant et de l'énergie réactive	$p_f^{ref} = \tilde{p}_c + p_{dc}$	$q_f^{ref} = q_c$

Tableau (II.3) : Modes de compensation de la commande des puissances instantanées

Les courants de référence, notés $i_{f\alpha}^{ref}$ et $i_{f\beta}^{ref}$, s'expriment selon les axes (α, β) par :

$$\begin{bmatrix} i_{f\alpha}^{ref} \\ i_{f\beta}^{ref} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{s\alpha}^2 + v_{s\beta}^2} \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & -v_{s\beta} \\ v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_f^{ref} \\ q_f^{ref} \end{bmatrix} \quad (\text{II.51})$$

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

$$\begin{bmatrix} i_{f1}^{ref} \\ i_{f2}^{ref} \\ i_{f3}^{ref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{f\alpha}^{ref} \\ i_{f\beta}^{ref} \end{bmatrix} \quad (\text{II.52})$$

La figure (II.10) illustre l'algorithme de commande.

II.8.1 Régulation de la tension continue

La tension continue v_{dc} aux bornes du condensateur de stockage, doit être maintenue constante. La cause de variation de cette tension est l'échange de puissance active avec le réseau. Les fluctuations de cette tension doivent être faibles d'une part pour ne pas dépasser la limite en tension des semi-conducteurs constituant les interrupteurs, et d'autre part pour ne pas dégrader les performances du filtre actif [13]. Afin d'assurer le rôle de source de tension continue, une régulation de cette tension est nécessaire. Pour assurer la régulation de la tension continue, on peut utiliser un régulateur PI. Si on néglige les pertes au niveau de l'onduleur et dans le filtre de

sortie. La relation entre la puissance absorbée par le condensateur et la tension à ses bornes peut s'écrire sous la forme (II.51) [13]:

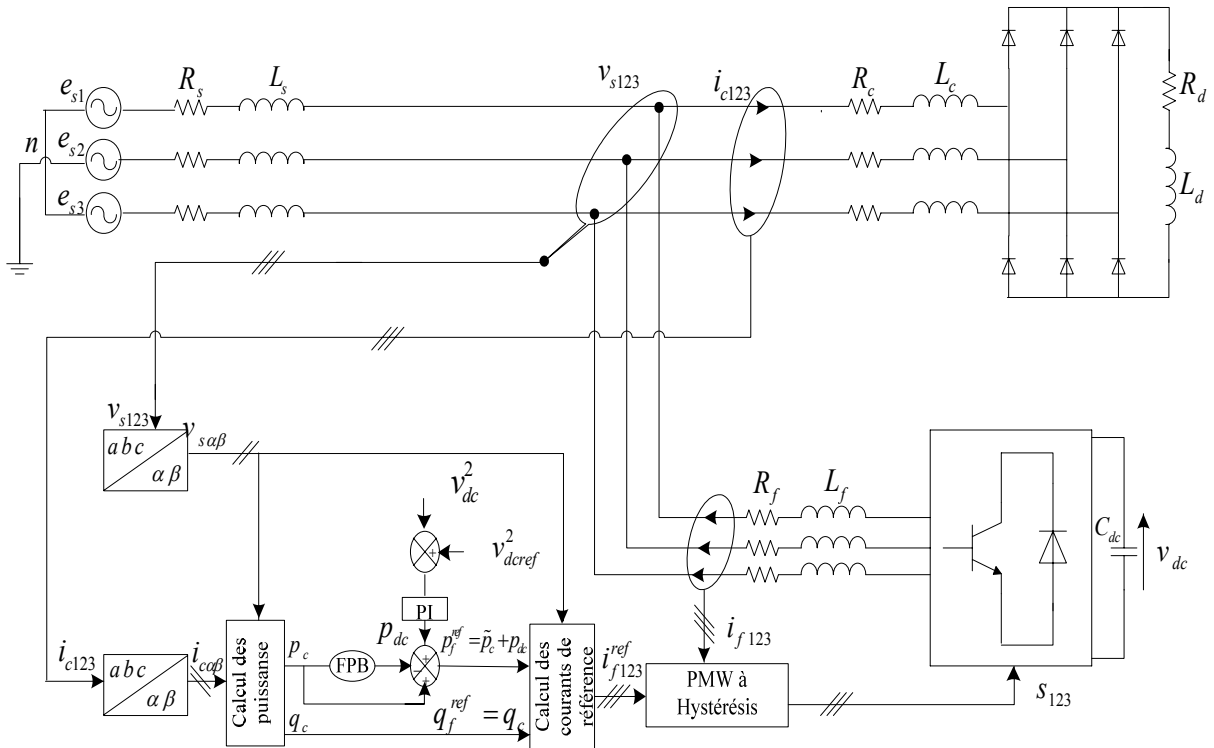


Figure (II.10) : Commande d'un filtre actif de puissance pour la compensation des courants harmoniques et l'énergie réactive par la méthode directe des puissances instantanées

$$p_{dc} = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} C_{dc} v_{dc}^2 \right) \quad (II.53)$$

Appliquons la transformation de Laplace sur cette relation, nous obtenons :

$$p_{dc}(S) = \frac{1}{2} S C_{dc} v_{dc}^2(S) \quad (II.54)$$

La tension aux bornes du condensateur est donnée par :

$$v_{dc}^2(S) = \frac{2 p_{dc}(S)}{C_{dc} S} \quad (II.55)$$

A partir de la relation (II.55), et en tenant compte du régulateur (PI), la boucle de régulation de tension continue peut être représentée par la figure (II.11). Le choix des paramètres k_{pdc} et k_{idc} aura pour objectif d'obtenir un temps de réponse minimal afin de ne pas nuire la dynamique du filtre actif [12],[13].

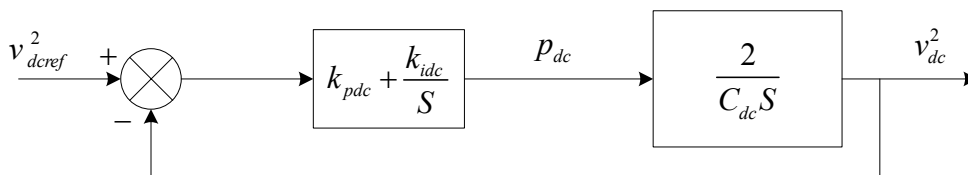


Figure (II.11) : Boucle de régulation de la tension continue

A partir de la figure (II.11), la fonction de transfert représentant la régulation en boucle fermée de la tension continue est donnée par :

$$F(S) = \frac{1 + \frac{k_{pdc}}{k_{idc}} S}{S^2 + 2 \frac{k_{pdc}}{C_{dc}} S + 2 \frac{k_{idc}}{C_{dc}}} \quad (\text{II.56})$$

En comparant cette équation avec la forme générale d'une fonction de transfert de deuxième ordre, on trouve :

$$k_{idc} = \frac{1}{2} C_{dc} \omega_c^2, \quad \omega_c = 2\pi f_c, \quad k_{pdc} = \xi \sqrt{2 C_{dc} k_{idc}}$$

On choisit la valeur de $\xi=0.707$ pour un bon coefficient d'amortissement du système. Pour un bon filtrage on peut choisir la fréquence de coupure $f_c = 8\text{Hz}$.

II.8.1.1 Résultats de simulation de l'ensemble réseau charge non-linéaire avant le filtrage

Le tableau (II.4) regroupe l'ensemble des paramètres du réseau et de la charge polluante utilisés dans la simulation.

v_{seff} [V]	f [HZ]	R_s [mΩ]	L_s [μH]	R_c [mΩ]	L_c [μH]	R_d [Ω]	L_d [μH]	L_f [μH]	R_f [mΩ]
240	50	1.59	45.56	2.73	23.19	0.79	2.6	100	6.87

Tableau (II.4) : Paramètres de simulation

La figure (II.12) illustre le courant de ligne de la première phase $i_{s1}(t)$ avant le filtrage et son spectre harmonique pour une puissance apparente du réseau électrique $S_n=400\text{kVA}$.

On va se contenter de l'étude du courant et de la tension seulement dans la phase 1, sachant que ceux des deux autres phases sont retardés par rapport à la première phase de 120° et 240° respectivement.

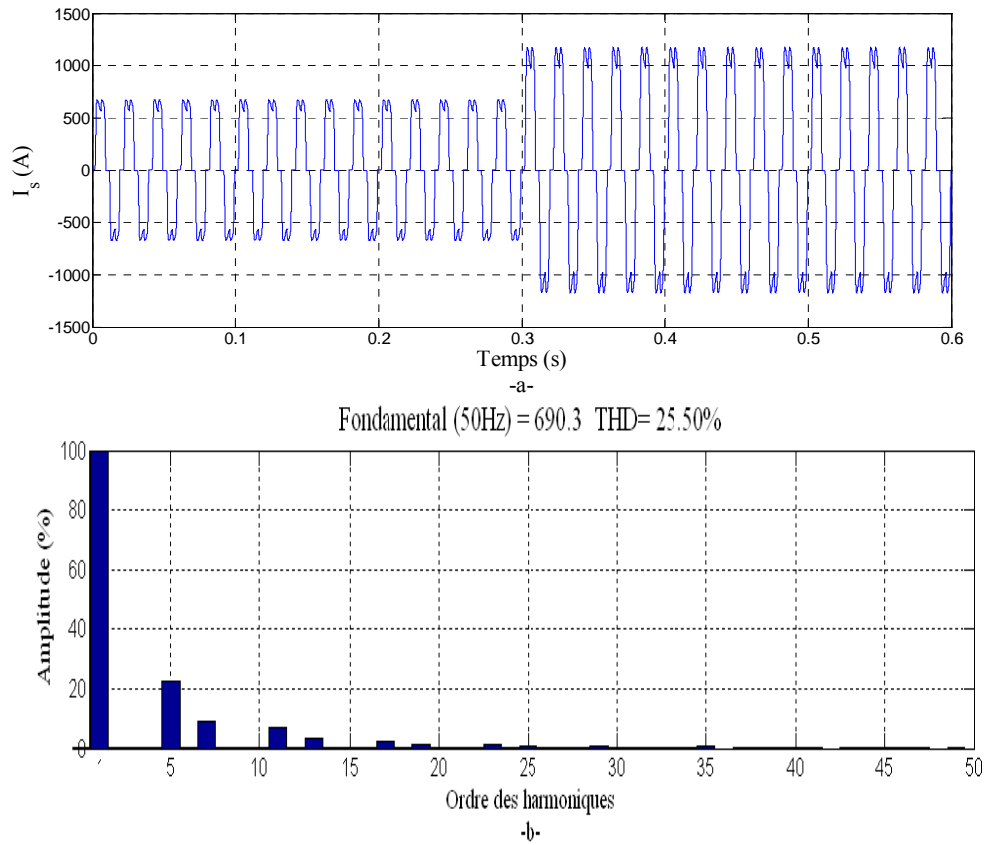


Figure (II.12) : Courant de ligne généré par la charge non-linéaire et son spectre harmonique

II.8.1.2 Résultats de simulation de l'ensemble charge non-linéaire-filtre actif de puissance

Dans ce paragraphe, nous allons présenter quelques résultats obtenus par les deux topologies de filtres actifs de puissance à trois bras et deux bras avec condensateurs à point milieu, pour la commande directe basée sur la méthode des puissances active et réactive instantanées.

Cette simulation à été réalisée avec les paramètres suivants :

- La valeur de référence de la tension continue est égale à 700V pour la structure à trois bras et à 1400V pour la structure à deux bras;
- La bande d'hystérésis est fixée à 1A ;
- Le filtre d'extraction passe-bas est du deuxième ordre avec une fréquence de coupure de 25Hz.

Les résultats obtenus présentent la réponse du filtre lors de la diminution de la résistance de charge continue jusqu'à la moitié de sa valeur initiale R_d à $t=0.3s$.

• Topologie à trois bras

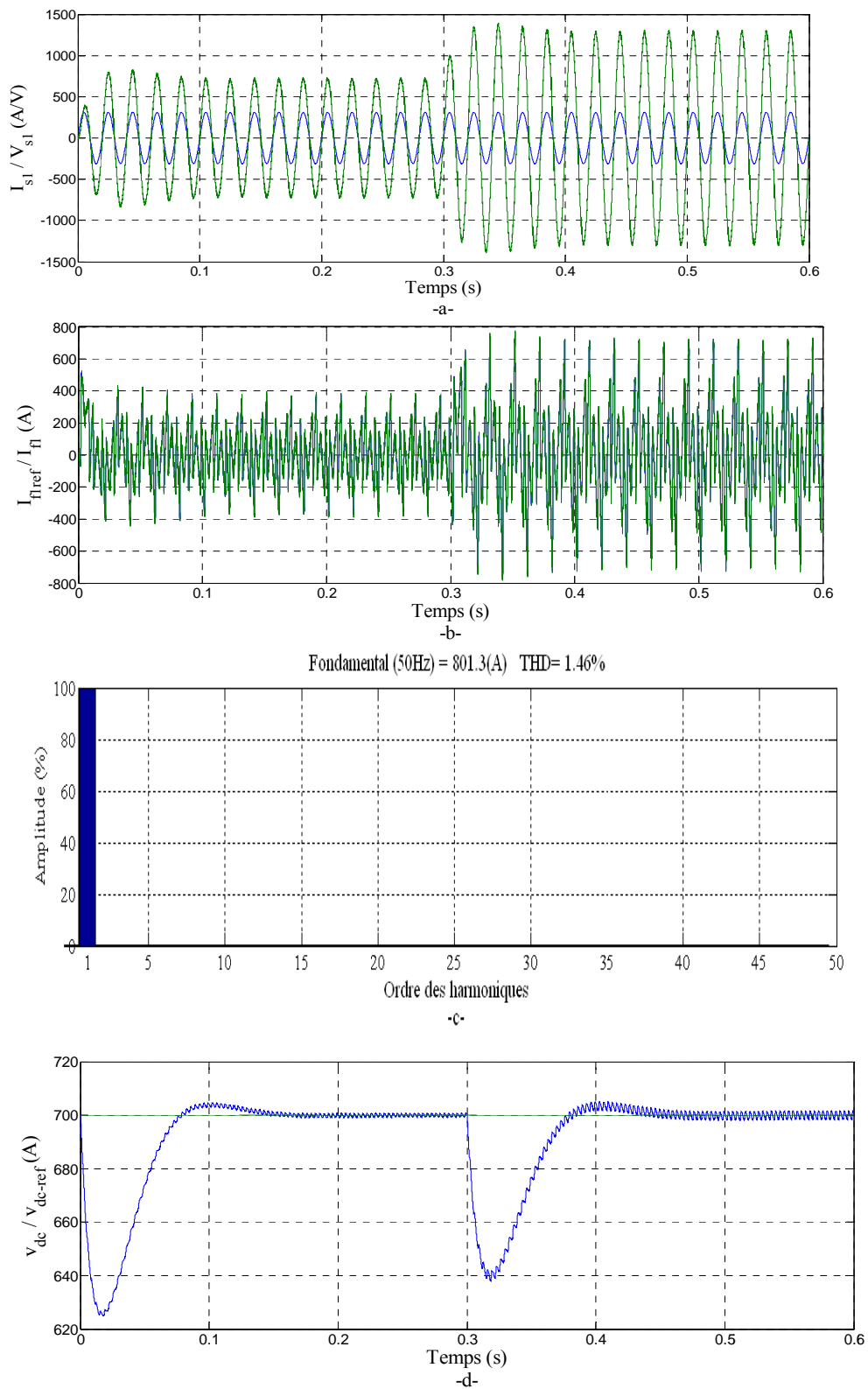


Figure (II.13) : Compensation des courants harmoniques d'un pont redresseur alimentant une charge R-L en utilisant un filtre actif de puissance à trois bras et une commande directe p-q, a) Courant et tension de la première phase de la source de après le filtrage, b) Courant injecté par le filtre actif de puissance à trois bras et sa référence, c) Spectre harmonique du courant après le filtrage, d) Tension aux bornes du condensateur

- Topologie à deux bras avec condensateurs à point milieu

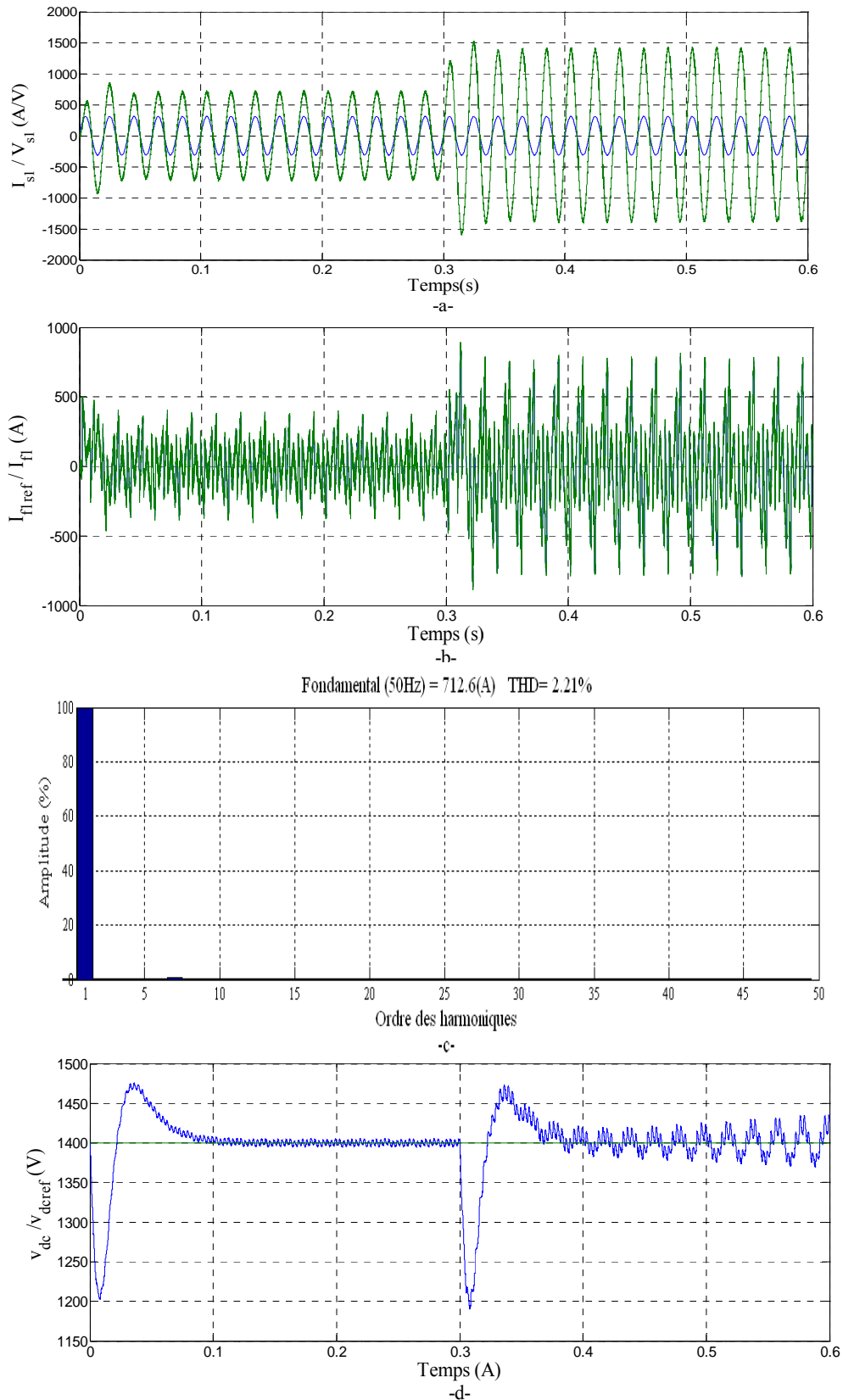


Figure (II.14) : Compensation des courants harmoniques d'un pont redresseur alimentant une charge R-L en utilisant un filtre actif de puissance à deux bras avec condensateurs à point milieu et une commande directe p-q, a) Courant et tension de la première phase de la source après le filtrage, b) Courant injecté par le filtre actif de puissance à deux bras avec condensateurs à point milieu et sa référence, c) Spectre harmonique du courant après le filtrage, d) Tension aux bornes du condensateur

II.8.1.3 Discussion des résultats

Les figures (II.13,14) présentent respectivement les résultats obtenus en utilisant l'extraction des courants harmoniques basée sur la méthode des puissances active et réactive instantanées pour les deux topologies .

Les figures (II.13,14.a,b,d) présentent les réponses temporelles du courant(I_{s1}) et de la tension(v_{s1}) de la source après filtrage, du courants injecté (I_{f1}) et sa références (I_{f1ref}) et la tension aux bornes du condensateur, pour les deux topologies. On remarque d'après ces figures que l'allure du courant du réseau après filtrage prend la forme d'une sinusoïde en phase avec la tension correspondante témoignant ainsi d'un bon filtrage des courants harmoniques et d'une compensation parfaite de la puissance réactive. Notons aussi que la tension du bus continu est bien régulée à 700V, donc le régulateur PI régule parfaitement cette tension et assure une erreur statique pratiquement nulle dans le régime permanent.

Les figures (II.13,14.c) présentent l'analyse spectrale, du courant de la premier phase du réseau après le filtrage. Le THD du courant, de 25,5%, est réduit à 1,46% côté réseau électrique pour la topologie à trois bras et à 2,21% pour la topologie à deux bras avec condensateurs à point milieu, ce qui confirme la bonne qualité de filtrage observée dans l'analyse temporelle des courants de la source.

II.8.2 Méthode dite du référentiel lié au synchronisme (SRF: Synchronous Reference Frame)

Cette méthode, introduite par [17],[18], exploite également la transformation de Concordia mais appliquée uniquement aux courants de ligne de la charge $i_{c1}(t)$, $i_{c2}(t)$ et $i_{c3}(t)$. Ensuite, une seconde transformation est opérée pour passer des courants de ligne en d-q, ce qui permet de transformer la composante fondamentale du courant en une composante continue et les composantes harmoniques du courant en des composantes alternatives. Cela nous permet d'éliminer à l'aide d'un simple filtre passe bas, la composante continue du courant. L'avantage majeur de cette méthode par rapport à la précédente réside dans le fait que les éventuelles tensions harmoniques n'ont plus d'influence sur les courants identifiés et par conséquent le filtrage sera meilleur. Son principe est énoncé ci-après.

Soient les courants de ligne d'un système triphasé sans composante homopolaire. La transformation de Concordia permet de ramener ce système triphasé équilibré à un système diphasé, comme précédemment par la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c1} \\ i_{c2} \\ i_{c3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.57})$$

En générant avec une P.L.L les signaux $\cos(\hat{\theta})$ et $\sin(\hat{\theta})$ tirés de la tension " fondamentale " du réseau, nous obtenons l'expression des courants dans le système d-q [17]:

$$\begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\hat{\theta}) & -\cos(\hat{\theta}) \\ \cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \end{bmatrix} \quad (\text{II.58})$$

Ces composantes peuvent alors être exprimées comme la somme d'une composante continue et d'une composante alternative :

$$\begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{i}_{cd} + \tilde{i}_{cd} \\ \bar{i}_{cq} + \tilde{i}_{cq} \end{bmatrix} \quad (\text{II.59})$$

Avec :

\bar{i}_{cd} et \bar{i}_{cq} : Les composantes continues de i_{cd} et i_{cq} ,

et \tilde{i}_{cd} et \tilde{i}_{cq} : les composantes alternatives de i_{cd} et i_{cq}

De l'équation (II.58), nous pouvons déduire les composantes de courant en α - β :

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\hat{\theta}) & -\cos(\hat{\theta}) \\ \cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\hat{\theta}) & \cos(\hat{\theta}) \\ -\cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix} \quad (\text{II.60})$$

Soit :

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\hat{\theta}) & \cos(\hat{\theta}) \\ -\cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_{cd} \\ \bar{i}_{cq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sin(\hat{\theta}) & \cos(\hat{\theta}) \\ -\cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_{cd} \\ \tilde{i}_{cq} \end{bmatrix} \quad (\text{II.61})$$

Suivant la fonction que nous donnons au filtre actif de puissance [17], nous pouvons également avec cette de commande compenser soit les harmoniques de courant et l'énergie réactive ou uniquement l'un des deux. Le tableau (II.5) résume les modes de compensation envisageables.

Type de compensation	Paramètres de contrôle	
Compensation des harmoniques de courant	$i_{fd}^{ref} = \tilde{i}_{cd} + i_{dc}$	$i_{fq}^{ref} = \tilde{i}_{cq}$
Compensation de l'énergie réactive	$i_{fd}^{ref} = 0 + i_{dc}$	$i_{fq}^{ref} = \bar{i}_{cq}$
Compensation des harmoniques de courant et de l'énergie réactive	$i_{fd}^{ref} = \tilde{i}_{cd} + i_{dc}$	$i_{fq}^{ref} = i_{cq}$

Tableau (II.5) : Modes de compensation de la commande du référentiel lié au synchronisme

Les courants de référence sont exprimés par:

$$\begin{bmatrix} i_{f\alpha}^{ref} \\ i_{f\beta}^{ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\hat{\theta}) & \cos(\hat{\theta}) \\ -\cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{fd}^{ref} \\ i_{fq}^{ref} \end{bmatrix} \quad (\text{II.62})$$

Après le choix des paramètres de commande, la transformation inverse de Concordia permet de remonter aux courants de référence :

$$\begin{bmatrix} i_{f1}^{ref} \\ i_{f2}^{ref} \\ i_{f3}^{ref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{f\alpha}^{ref} \\ i_{f\beta}^{ref} \end{bmatrix} \quad (\text{II.63})$$

La figure (II.16) montre le schéma de la régulation de la tension continue dans le repère synchrone :

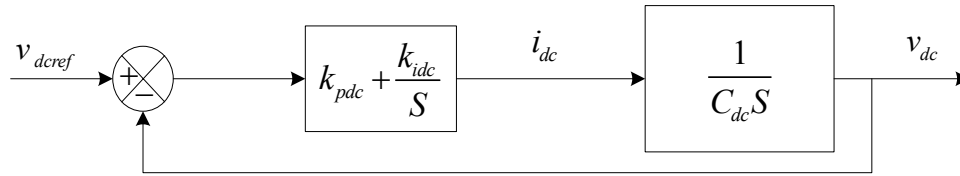


Figure (II.16) : Schéma de régulation de la tension continue

La fonction de transfert de la boucle de régulation de tension en boucle fermée sera :

$$G_{BFdc} = \frac{v_{dc}(S)}{i_{dc}(S)} = \frac{\frac{k_{pdc}}{C_{dc}}S + \frac{k_{idc}}{C_{dc}}}{S^2 + \frac{k_{pdc}}{C_{dc}}S + \frac{k_{idc}}{C_{dc}}} \quad (\text{II.67})$$

A partir de l'équation (II.67), les constantes du régulateur PI de la tension continue sont calculées par :

$$k_{pdc} = 2\xi_{dc}\omega_{cdc}C_{dc} \quad \text{et} \quad k_{idc} = C_{dc}\omega_{cdc}^2 \quad (\text{II.68})$$

On choisit la valeur de $\xi_{dc} = 0.707$ pour un bon amortissement alors que, la pulsation de coupure est choisie comme

$$\omega_{cdc} = 2\pi f_{cdc}, \quad f_{cdc} = 20\text{Hz}.$$

II.8.2.2 Structure de la P.L.L

La boucle à verrouillage de phase (Phase Locked Loop : P.L.L) est un élément clef dans les nouvelles techniques de commande en électronique de puissance [15]. Elle est utilisée comme un moyen pour récupérer les informations de la phase et de la fréquence. La forme de base de la P.L.L est présentée sur la figure (II.17), contenant un détecteur de phase (PD), un filtre de la boucle (LF) et un oscillateur de tension contrôlée (VCO).

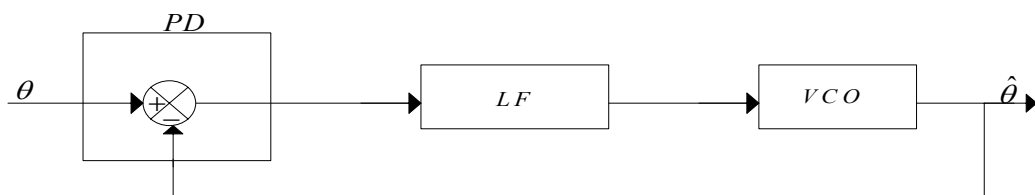


Figure (II.17) : Synoptique de la PLL

Plusieurs techniques de P.L.L. ont été développées [15], la figure (II.18) représente le synoptique détaillé de la P.L.L utilisée. Cette méthode détecte les paramètres de la composante fondamentale ($\hat{\theta}, V_m$) des tensions de sources données par l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} v_{s1}(\hat{\theta}) \\ v_{s2}(\hat{\theta}) \\ v_{s3}(\hat{\theta}) \end{bmatrix} = \sqrt{2}V_m \begin{bmatrix} \sin(\hat{\theta}) \\ \sin(\hat{\theta} - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\hat{\theta} + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{II.69})$$

avec $\hat{\theta} = \omega t$

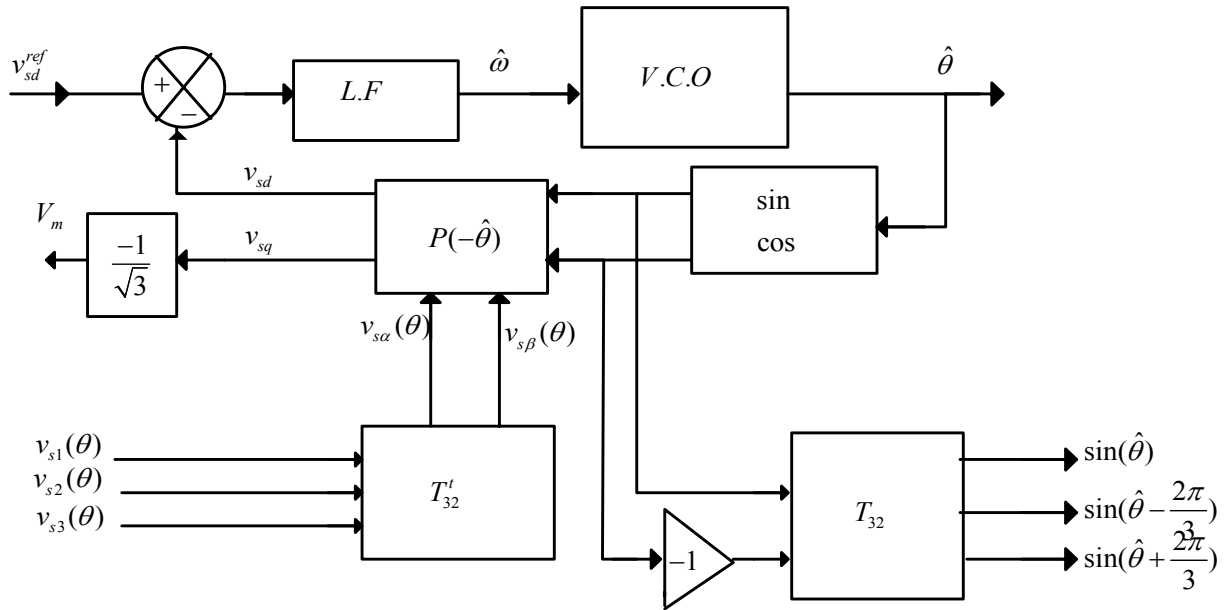


Figure (II.18) : Synoptique détaillé de la PLL

Où ω est la pulsation du terme fondamental de la tension et V_m sa valeur efficace. Les tensions simples, $v_{s123}(\theta)$ mesurées au point de raccordement, subissent en premier lieu la transformation de Concordia qui permet de passer d'une structure triphasée à la structure diphasée équivalente dans un repère de coordonnées (α, β) et qui s'écrit comme suit :

$$\begin{bmatrix} v_{s\alpha}(\theta) \\ v_{s\beta}(\theta) \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{s1}(\theta) \\ v_{s2}(\theta) \\ v_{s3}(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II.70})$$

Il en résulte :

$$\begin{bmatrix} v_{s\alpha}(\theta) \\ v_{s\beta}(\theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{3}V_m \sin(\theta) \\ -\sqrt{3}V_m \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II.71})$$

Où V_m est la valeur efficace de la tension de source.

Ces grandeurs peuvent être obtenues dans le référentiel tournant synchrone en appliquant la transformation de Park suivante [15]:

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \\ -\sin(\hat{\theta}) & \cos(\hat{\theta}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{II.72})$$

D'où on obtient :

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} = \sqrt{3}V_m \begin{bmatrix} \sin(\theta - \hat{\theta}) \\ -\cos(\theta - \hat{\theta}) \end{bmatrix} \quad (\text{II.73})$$

Supposons que l'angle de phase $(\theta - \hat{\theta})$ est petit, alors l'équation (II.73) peut s'écrire :

$$v_{sd} = \sqrt{3}V_m (\theta - \hat{\theta}) \quad (\text{II.74})$$

La P.L.L. sera verrouillée lorsque l'angle estimé $\hat{\theta}$ sera égal à θ . Dans ce cas: $v_{sd} = 0$ et $v_{sq} = -\sqrt{3}V_m$. Donc, il est possible de contrôler θ en régulant v_{sd} à zéro.

L'expression de la pulsation $\hat{\omega}$ de la figure (II.18) est donnée par :

$$\hat{\omega} = \frac{d\hat{\theta}}{dt} = LF(s)(v_{sd}^{ref} - v_{sd}) \quad (\text{II.75})$$

Où $LF(s)$ représente le filtre de la boucle (régulateur PI), qui est exprimé dans ce cas par la fonction de transfert suivante :

$$LF(S) = K_p + \frac{K_i}{S} \quad (\text{II.76})$$

Alors la position angulaire $\hat{\theta}$ à la sortie du VCO sera :

$$\hat{\theta} = \frac{1}{S} \hat{\omega} \quad (\text{II.77})$$

Afin de déterminer les paramètres du régulateur PI, le synoptique de la figure (II.18) peut être simplifié pour être similaire à celui de la de la figure (II.19) :

La fonction de transfert en boucle fermée de ce système est donnée par :

$$\frac{\hat{\theta}(s)}{\theta(s)} = \frac{\sqrt{3}V_m \left(K_p + \frac{K_i}{S} \right) \frac{1}{S}}{1 + \sqrt{3}V_m \left(K_p + \frac{K_i}{S} \right) \frac{1}{S}} \quad (\text{II.78})$$

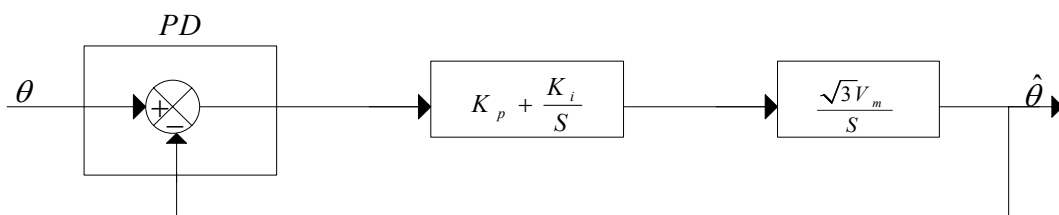


Figure (II.19) : Schéma simplifié de la P.L.L.

La fonction de transfert trouvée peut s'identifier avec le système général du deuxième ordre donné par [15]:

$$F(S) = \frac{2\xi\omega_n S + \omega_n^2}{S^2 + 2\xi\omega_n S + \omega_n^2} \quad (\text{II.79})$$

Les paramètres du $LF(s)$ s'expriment comme suit:

$$K_p = \frac{2\xi\omega_n}{\sqrt{3}V_m} \quad \text{et} \quad K_i = \frac{\omega_n}{\sqrt{3}V_m} \quad (\text{II.80})$$

Afin de réaliser un bon compromis entre la stabilité et les performances dynamiques, les valeurs suivantes sont retenues :

$$\xi = 0.707 \quad \text{et} \quad f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = 50\text{Hz}, \quad \text{donc} : K_p = 1.114, K_i = 0.755.$$

II.8.2.3 Résultats de simulation

Dans un premier temps, nous avons simulé le boucle à verrouillage de phase (Phase Locked Loop : P.L.L) utilisé pour la commande basée sur la méthode du référentiel lié au synchronisme.

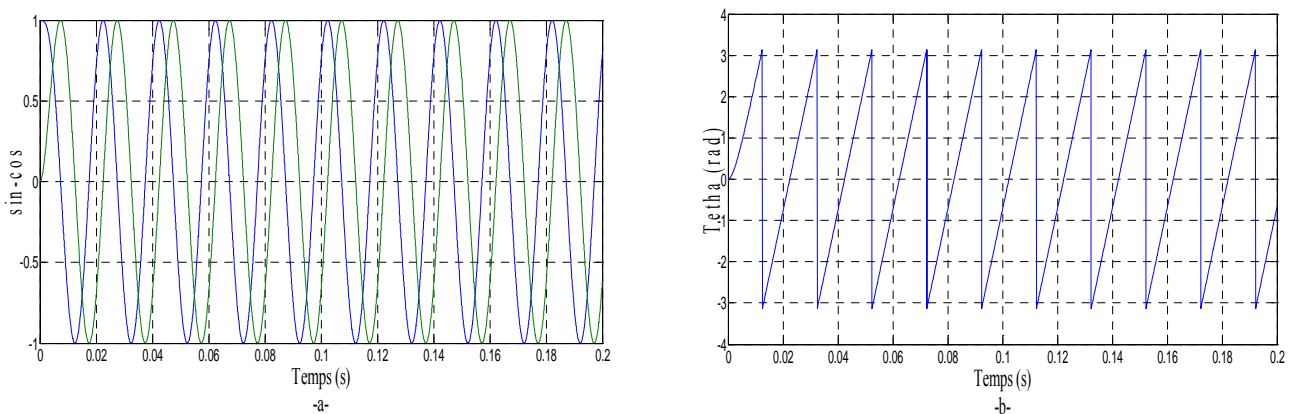


Figure (II.20) : Résultats de simulation de la P.L.L, a) Génération des signaux sinus et cosinus, b) Position angulaire estimée

A partir de cette figure, on peut observer que la P.L.L, est capable de générer des bons signaux sinus et cosinus.

II.8.2.4 Résultats de simulation de l'ensemble charge non-linéaire filtre actif

Dans ce paragraphe, nous allons présenter quelques résultats obtenus par les deux topologies de filtres actifs de puissance à trois bras et deux bras avec condensateurs à point milieu, pour la commande directe basée sur la méthode du référentiel lié au synchronisme.

La simulation de la commande directe dans le repère triphasé basée sur la méthode du référentiel lié au synchronisme à été réalisée avec les paramètres suivants :

- La valeur de référence de la tension continue est égale à 700V pour la structure à trois bras et à 1400V pour la structure à deux bras;
- La bande d'hystérésis fixée à 1A ;
- Filtre d'extraction passe-bas du deuxième ordre de fréquence de coupure égale à 25Hz.

Les résultats obtenus présentent la réponse du filtre lors de la diminution de la résistance de charge continue jusqu'à la moitié de sa valeur initiale R_d au moment, $t=0.3s$.

- **Topologie à trois bras**

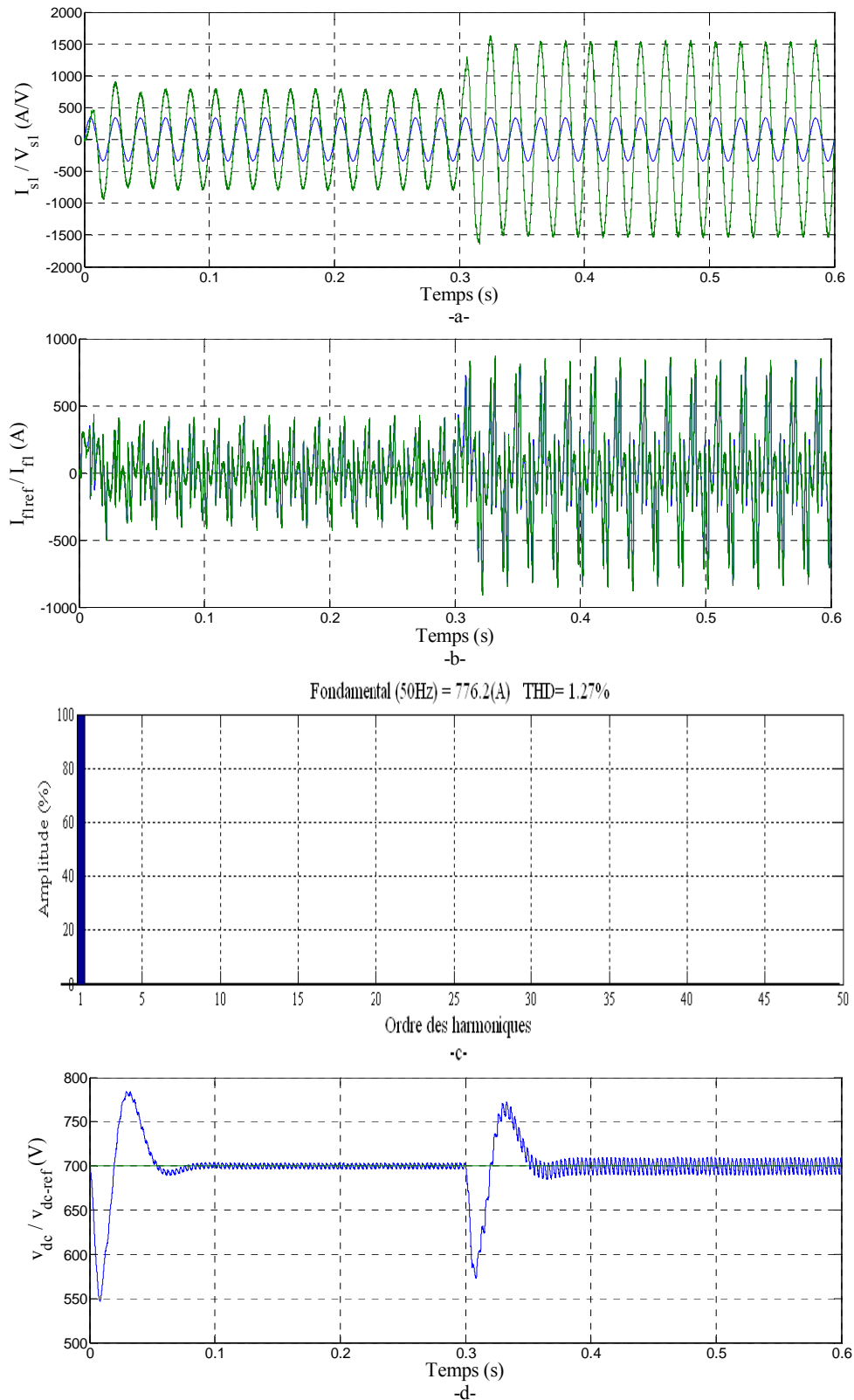


Figure (II.21) : Compensation des courants harmoniques d'un pont redresseur alimentant une charge R-L en utilisant un filtre actif de puissance à trois bras et une commande directe SFR, a) Courant et tension de la première phase de la source après le filtrage, b) Courant injecté par le filtre actif de puissance à trois bras et sa référence, c) Spectre harmonique du courant après le filtrage, d) Tension aux bornes du condensateur

• Topologie à deux bras avec condensateurs à point milieu

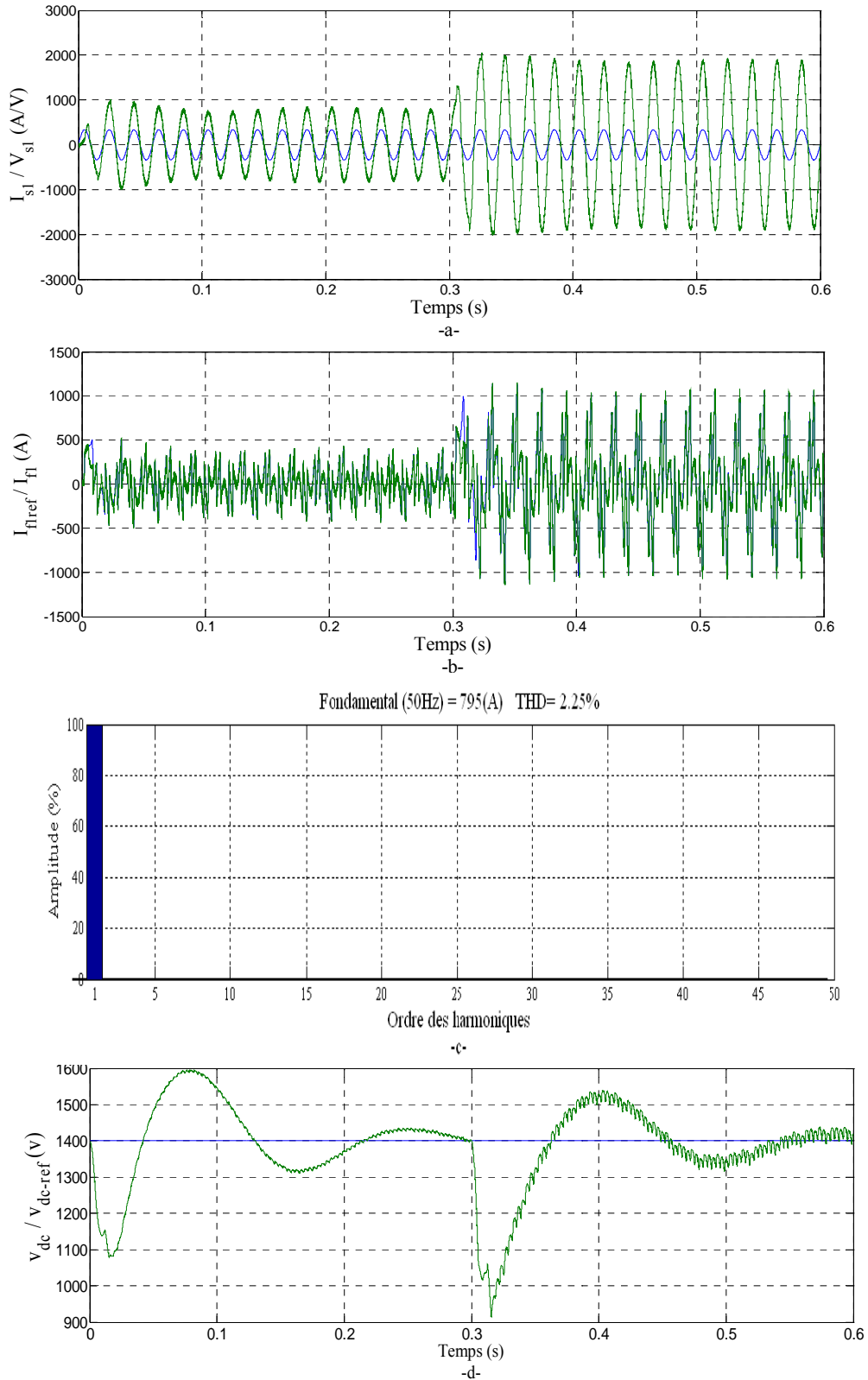


Figure (II.22) : Compensation des courants harmoniques d'un pont redresseur alimentant une charge R-L en utilisant un filtre actif de puissance à deux bras avec condensateurs à point milieu et une commande directe SFR, a) Courant et tension de la première phase de la source après le filtrage, b) Courant injecté par le filtre actif de puissance à deux bras avec condensateurs à point milieu et sa référence, c) Spectre harmonique du courant après le filtrage, d) Tension aux bornes du condensateur

II.8.2.5 Interprétations des résultats

Les figures (II.21,22) présentent respectivement les résultats obtenus en utilisant l'extraction des courants harmoniques basée sur la méthode du référentiel lié au synchronisme pour les deux topologies.

Les figures (II.21,22.a) illustrent le courant et le tension de la première phase de la source après filtrage. On note une bonne correction du facteur de puissance du côté source puisque le courant et la tension sont en phase en régime permanent.

Les figures (II.21,22.b) présentent le courant de référence (en vert) et le courant généré par le filtre actif (en bleu) dans la première phase. On voit bien que le filtre actif a bien reproduit le courant de référence. Ce courant doit être injecté dans le réseau afin d'éliminer les harmoniques la charge polluante.

Les figures (II.21,22,c) présentent l'analyse spectrale, du courant de la première phase du réseau après filtrage. Le THD est réduit à 1.27% côté réseau électrique pour la première topologie et à 2,25% pour la deuxième topologie.

La figure (II.20.d) montre la tension aux bornes du condensateur de stockage. On remarque que le régulateur PI régule parfaitement cette tension et assure une erreur statique pratiquement nulle dans le régime permanent.

II.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons d'abord présenté les différentes topologies et les éléments constitutifs d'un FAP triphasé à structure tension. Ce FAP permet de compenser les harmoniques de courant générés par des charges non-linéaires, connectées à un réseau électrique à trois fils. Nous avons ensuite successivement étudié chacun des éléments de la partie contrôle du FAP :

- l'identification des courants de référence;
- la poursuite des courants de référence;
- la régulation de la tension continue.

De même, pour la partie puissance, nous avons étudié le dimensionnement de l'onduleur, de l'élément de stockage et du filtre de sortie.

Dans ce chapitre également, nous avons étudié et comparé les performances des méthodes classiques d'identification des courants perturbés (méthodes *pq* et SRF).

Le tableau ci-dessous présente la synthèse des résultats des différentes simulations obtenus pour la stratégie de commande directe appliquées aux deux topologies de filtre actif de puissance.

Topologies	Commande directe p-q	Commande directe SRF
à trois bras	1.46%	1.27%
à deux bras avec condensateurs à point milieu	2.21%	2.25%

Nous remarquons que quelle que soit la stratégie de commande utilisée, le filtre actif de puissance à trois bras donne toujours de meilleurs résultats, car la structure à trois bras apporte un réglage plus fin que la structure à deux bras.

Chapitre III

Commandes des filtres actifs parallèles à quatre fils

III.1 Introduction

Avec le développement de l'électronique de puissance et des outils dédiés à la commande, les filtres actifs deviennent une alternative incontournable et incomparable aux filtres passifs. La structure de tension triphasée a été retenue pour ses excellentes performances en termes de compensation des harmoniques et correction du facteur de puissance.

Cependant, la plupart des installations alimentent des charges non linéaires monophasées ou des charges triphasées déséquilibrées et sont donc munies d'un fil de neutre (système à 4 fils).

Les courants de lignes sont généralement déséquilibrés et le fil de neutre est parcouru par un courant égal à la somme des courants de phases et sa valeur maximale excède celle du courant de ligne. Pour y remédier, plusieurs solutions ou précautions ont été adoptées en l'occurrence l'utilisation d'un conducteur de neutre séparé pour chaque phase. On peut aussi envisager de surdimensionner le conducteur de neutre sachant que le courant dans ce dernier peut atteindre 1.4 à 1.7 fois le courant dans une phase [19].

Les interactions entre phases font du filtre actif triphasé à trois bras classique un système non adéquat pour réduire ou éliminer les harmoniques du courant du réseau.

Dans le présent chapitre, on s'intéresse à la dépollution des réseaux électriques disposant d'un fil de neutre. Plusieurs topologies de filtres actifs sont proposées, notamment celles disposant d'un pont capacitif à point milieu ou celles comportant un quatrième bras afin de maîtriser la composante homopolaire.

III.2 Analyse du FAP triphasé sur un réseau à quatre fils

Analysons le fonctionnement d'un filtre actif triphasé connecté à un réseau à quatre fils alimentant trois charges non linéaires déséquilibrées [19].

Les courants injectés par les charges ne sont pas sinusoïdaux et contiennent des harmoniques impairs, y compris les harmoniques de rang trois. Le courant de charge d'une phase peut s'écrire sous la forme [19] :

$$\begin{aligned} i_c &= \sum_{h=1,2,5} i_{c,h} \sqrt{2} \sin(h\omega t + \varphi_h) \\ h &= 2k + 1 \end{aligned} \quad (\text{III.1})$$

Les courants du réseau avant compensation sont donnés par :

$$\begin{aligned} i_{sj} &= i_{sff} + i_{sjh} \\ \sum_{j=1,2,3} i_{sj} + i_n &= 0 \end{aligned} \quad (\text{III.2})$$

Avec $j = 1, 2, 3$ $h = 3, 5, \dots$

Où i_{sff} , i_{sjh} et i_n sont respectivement les composantes fondamentales, harmoniques et le courant homopolaire (de neutre).

L'absence de quatrième fil du filtre actif requiert que :

$$\sum_{j=1,2,3} i_{ff} = 0 \quad (\text{III.3})$$

Où i_{ff} les courants de sortie du filtre actif.

De l'équation (III.2) et (III.3), on en déduit la partie non compensée circulant dans le réseau.

$$i_j^0(t) = i_{sjh} - i_{ff} \quad (\text{III.4})$$

En combinant les équations (III.2), (III.3) et (III.4), on obtient

$$\sum_{j=1,2,3} i_j^0(t) = - \left\{ i_n + \sum_{J=1,2,3} i_{sff} \right\} \quad (\text{III.5})$$

Les courants du réseau sont donnés par :

$$i_{sj} = i_{cj} - i_{ff} \quad (\text{III.6})$$

Des équations précédentes, le courant du réseau après compensation devient :

$$i_{sj} = i_{sff} + i_j^0(t) \quad (\text{III.7})$$

Cette analyse montre que le filtre actif triphasé classique ne peut compenser les perturbations dues aux charges non linéaires monophasées connectées à un réseau à quatre fils.

Les courants harmoniques circulant dans le réseau demeurent partiellement non compensés et l'amplitude du courant homopolaire n'est pas réduite. Pour y remédier il va falloir prévoir un quatrième fil permettant de véhiculer les harmoniques de rang trois [19].

III.2.1 Analyse spectrale du courant de neutre pour des charges non linéaires déséquilibrées

Le courant du fil de neutre avant compensation, ne contient que des composantes de rang impair et multiple de 3 (Les charges triphasées non linéaires injectent principalement les harmoniques impairs de rang $6k \pm 1$. La séquence d'harmonique $6k + 3$ existerait si la charge était déséquilibrée) [19]. Son expression est donnée par :

$$i_n = \sum_{n=0} i_{n,6n+3} \sqrt{2} \sin[(6n+3)\omega t + \varphi_{6n+3}] \approx 3i_{c(\text{rang } 3)} \quad (\text{III.8})$$

Sa valeur efficace est donnée par :

$$I_n = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} i_{n,6n+3}^2} = \sqrt{3} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_c^2 dt} = \sqrt{3} I_c \quad (\text{III.9})$$

Le courant dans le conducteur neutre a donc une valeur efficace $\sqrt{3}$ fois supérieure à celle du courant dans une phase. Notons que dans les installations où l'on trouve un grand nombre de charges non linéaires monophasées (matériel informatique), le courant dans le neutre peut donc dépasser le courant dans chaque phase. Cette situation nécessite un conducteur de neutre renforcé. En considérant que l'harmonique 3 est l'harmonique prépondérant, le taux de distorsion du courant de charge est très voisin du taux d'harmonique de l'harmonique 3.

$$THD = \frac{I_{c(\text{rang } 3)}}{I_{cf}} \quad (\text{III.10})$$

Comme l'indique l'équation (III.8), le courant dans le neutre i_n est très voisin de $3i_{c(\text{rang } 3)}$. On peut donc écrire ;

$$I_n \approx 3I_{c(\text{rang } 3)} \approx 3THDI_{cf} \quad (\text{III.11})$$

Avec

$$\frac{I_c}{I_{cf}} = \sqrt{1 + THD^2} \quad (\text{III.12})$$

On obtient :

$$\frac{I_n}{I_c} \approx \frac{3THD}{\sqrt{1 + THD^2}} \quad (\text{III.13})$$

L'équation (III.9) montre que le rapport entre la valeur efficace du courant de neutre et le courant de charge est pratiquement égal à $\sqrt{3}$. Par conséquent la formule rapprochée de l'équation (III.12) reste valable tant que la proportion est inférieure à 3.

III.3 Filtres actifs de puissance parallèles reliés à un réseau électrique à quatre fils

Dans le cadre de ce chapitre, nous nous limiterons aux deux topologies suivantes :

1. Filtre actif de puissance à trois bras avec condensateurs à point milieu ;
2. Filtre actif de puissance à quatre bras ;

III.3.1 Filtre actif de puissance à trois bras avec condensateurs à point milieu

La première topologie de filtre actif de puissance est constituée de six interrupteurs réversibles en courant commandés à la fermeture et à l'ouverture (transistors bipolaires, IGBT, thyristors ou GTO) en antiparallèle avec des diodes. Ils forment les trois bras d'un onduleur triphasé. Un quatrième bras est constitué de deux condensateurs dont le point milieu est relié au neutre du réseau électrique, comme l'illustre la figure (III.1) [17],[19].

III.3.1.1 Schéma de représentation

La structure de l'onduleur utilisé pour le fonctionnement de filtrage actif parallèle est donnée par la figure (III.1)

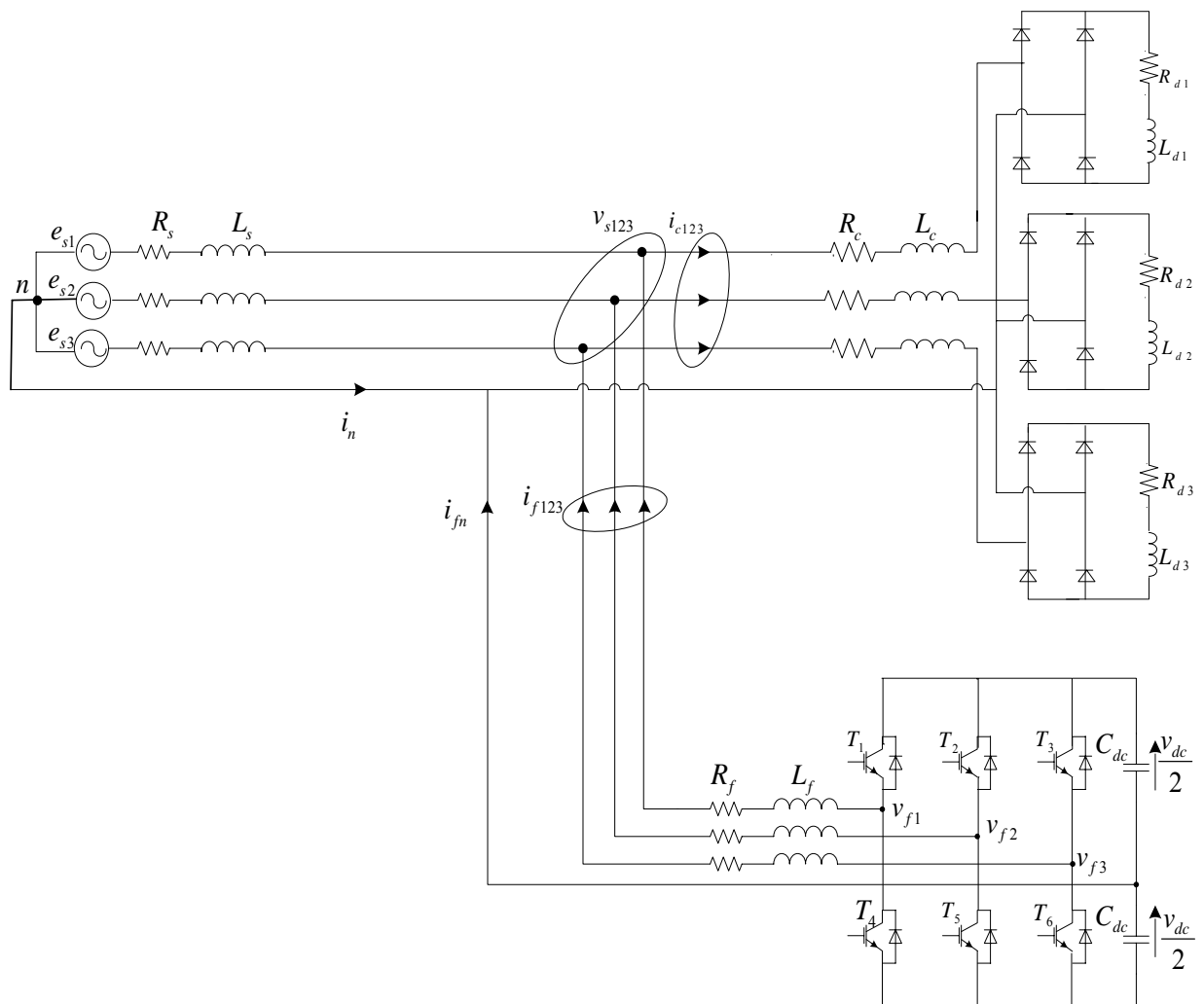


Figure (III.1) : Onduleur de tension à trois bras employé dans un FAP à structure de tension relié à un réseau électrique à quatre fils

Cette topologie contient huit combinaisons de commande possibles. Ces états de commutations sont obtenus en utilisant les expressions suivantes :

$$v_{f1} = S_1 \frac{v_{dc}}{2} - (1 - S_1) \frac{v_{dc}}{2} \quad (\text{III.14})$$

$$v_{f2} = S_2 \frac{v_{dc}}{2} - (1 - S_2) \frac{v_{dc}}{2} \quad (\text{III.15})$$

$$v_{f3} = S_3 \frac{v_{dc}}{2} - (1 - S_3) \frac{v_{dc}}{2} \quad (\text{III.16})$$

Avec : $S_i = 1$ si T_i est fermé

$S_i = 0$ si T_{i+3} est fermé

$i : 1$ à 3

Les états de commutation (m) pour ce type d'onduleur sont présentés dans le tableau (III.1)

m	S_1	S_2	S_3	v_{f1}/v_{dc}	v_{f2}/v_{dc}	v_{f3}/v_{dc}
0	0	0	0	$-1/2$	$-1/2$	$-1/2$
1	1	0	0	$1/2$	$-1/2$	$-1/2$
2	0	1	0	$-1/2$	$1/2$	$-1/2$
3	1	1	0	$1/2$	$1/2$	$-1/2$
4	0	0	1	$-1/2$	$-1/2$	$1/2$
5	1	0	1	$1/2$	$-1/2$	$1/2$
6	0	1	1	$-1/2$	$1/2$	$1/2$
7	1	1	1	$1/2$	$1/2$	$1/2$

Tableau (III.1) : Tensions générées par l'onduleur de tension à trois bras avec condensateurs à point milieu

III.3.2 Filtre actif de puissance à quatre bras

Dans cette configuration, nous utilisons un onduleur comprenant quatre bras constitués de huit interrupteurs réversibles en courant comme l'illustre la figure (III.2). Cette configuration a été proposée afin d'éviter le recours à un élément de stockage à point milieu comme celle de la configuration précédente.

La structure de l'onduleur utilisé pour le fonctionnement de filtrage actif parallèle est donnée par la figure (III.2).

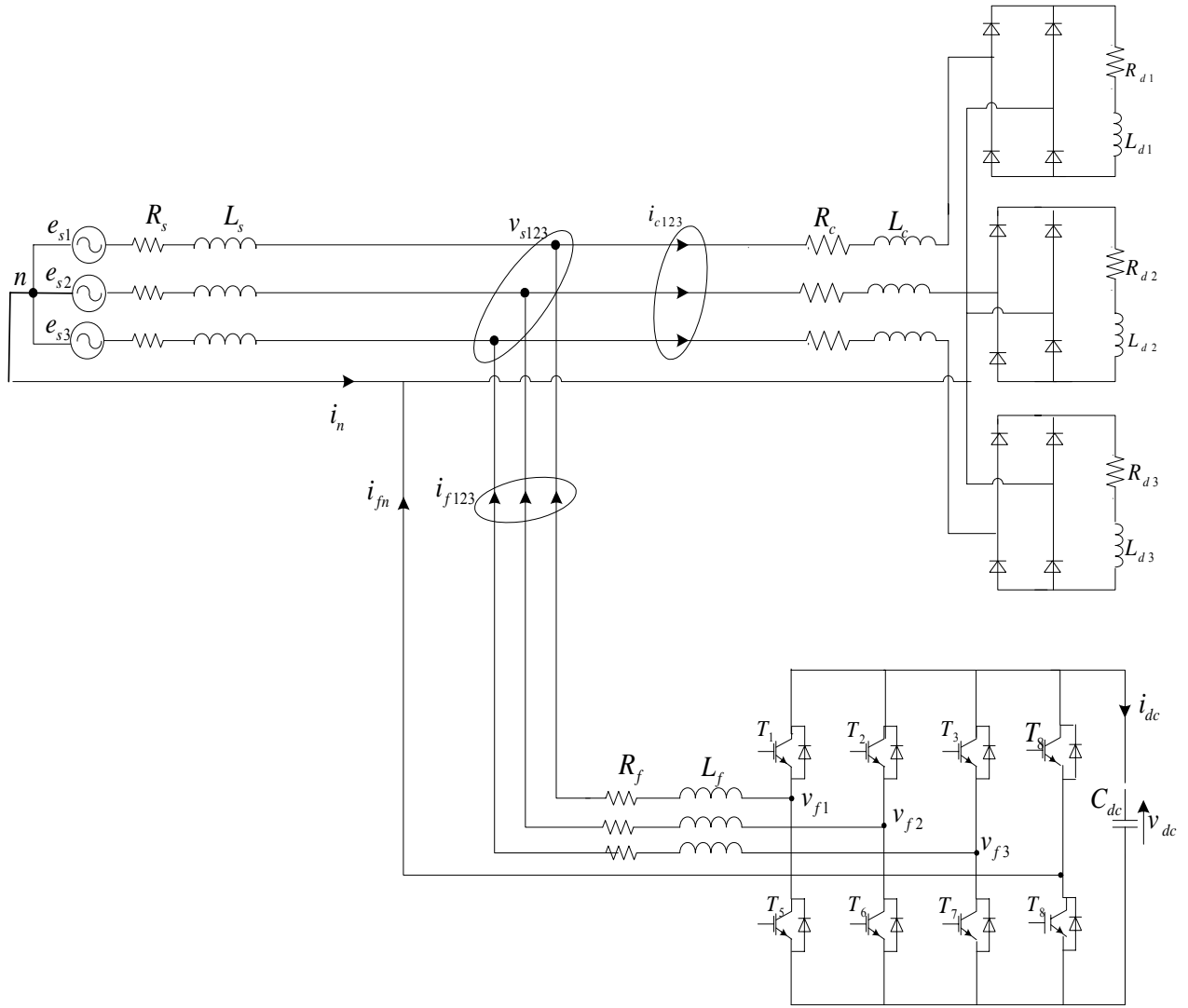


Figure (III.2) : Onduleur de tension à quatre bras employé dans un FAP à structure de tension relié à un réseau électrique à quatre fils

Les états de commutation pour ce type d'onduleur sont présentés dans le tableau (III.2). Ils sont obtenus grâce aux expressions suivantes :

$$\begin{aligned}
 v_{f1} &= (S_1 - S_4) v_{dc} \\
 v_{f2} &= (S_2 - S_4) v_{dc} \\
 v_{f3} &= (S_3 - S_4) v_{dc}
 \end{aligned}
 \tag{III.17}$$

Et

$$i_{dc} = S_1 i_{f1} + S_2 i_{f2} + S_3 i_{f3} + S_4 i_{fn}
 \tag{III.18}$$

m	S_1	S_2	S_3	S_4	v_{f1}/v_{dc}	v_{f2}/v_{dc}	v_{f3}/v_{dc}
0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	1	0	0
2	0	1	0	0	0	1	0
3	1	1	0	0	1	1	0
4	0	0	1	0	0	0	1
5	1	0	1	0	1	0	1
6	0	1	1	0	0	1	1
7	1	1	1	1	1	1	1
8	0	0	0	1	0	-1	-1
9	1	0	0	1	-1	-1	-1
10	0	1	0	1	0	0	-1
11	1	1	0	1	-1	0	-1
12	0	0	1	1	0	-1	0
13	1	0	1	1	-1	-1	0
14	0	1	1	1	0	0	0
15	1	1	1	1	-1	0	0

Tableau (III.2) : Tensions générées par l'onduleur de tension à quatre bras

III.4 Présentation des stratégies de commande

Les commandes utilisées par les filtres actifs de puissance reliés à un réseau triphasé à quatre fils sont toutes basées sur la méthode des puissances instantanées. Nous en avons étudié trois.

III.4.1 Méthode des puissances réelle, imaginaire et homopolaire instantanées (pqo)

Cette méthode introduite par [17] ,[19], exploite la transformation de Concordia des tensions simples et courants de ligne, afin de calculer, les puissances réelle, imaginaire et homopolaire instantanées. Elle permet aussi de transformer la composante fondamentale en une composante continue et les composantes harmoniques en composantes alternatives. Cette transformation est nécessaire si nous voulons éliminer facilement la composante continue. Nous allons tout d'abord présenter cette méthode dont le principe est énoncé ci-dessous. :

Soient respectivement les tensions simples du point de raccordement et les courants de ligne de la charge $v_{s1}(t)$, $v_{s2}(t)$, $v_{s3}(t)$ et $i_{c1}(t)$, $i_{c2}(t)$, $i_{c3}(t)$. La transformation de Concordia permet de ramener ce système triphasé des axes a-b-c aux axes α - β -0, comme le montre les deux relations suivantes :

$$\begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \\ v_{s0} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{s1} \\ v_{s2} \\ v_{s3} \end{bmatrix} \quad (\text{III.19})$$

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \\ i_{c0} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c1} \\ i_{c2} \\ i_{c3} \end{bmatrix} \quad (\text{III.20})$$

Il est à noter que le courant du neutre i_{cn} et le courant homopolaire i_0 sont liés par la relation ci-dessous :

$$\begin{aligned} i_{cn} &= i_{c1} + i_{c2} + i_{c3} \\ i_0 &= \frac{1}{\sqrt{3}}(i_{c1} + i_{c2} + i_{c3}) = \frac{1}{\sqrt{3}}i_{cn} \end{aligned} \quad (\text{III.21})$$

En négligeant les harmoniques de tension, la puissance réelle p_c , la puissance imaginaire q_c et la puissance homopolaire p_{c0} sont exprimées par la matrice suivante:

$$\begin{bmatrix} p_c \\ q_c \\ p_{c0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & v_{s\beta} & 0 \\ -v_{s\beta} & v_{s\alpha} & 0 \\ 0 & 0 & v_{s0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \\ i_{c0} \end{bmatrix} \quad (\text{III.22})$$

Les composantes des puissances réelle, imaginaire et homopolaire instantanées peuvent être exprimées comme la somme d'une composante continue et d'une composante alternative:

$$\begin{bmatrix} p_c \\ q_c \\ p_{c0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{p}_c + \tilde{p}_c \\ \bar{q}_c + \tilde{q}_c \\ \bar{p}_{c0} + \tilde{p}_{c0} \end{bmatrix} \quad (\text{III.23})$$

avec \bar{p}_c , \bar{p}_{c0} et \bar{q}_c : les composantes continues.

et \tilde{p}_c , \tilde{p}_{c0} et \tilde{q}_c : les composantes alternatives.

De l'équation (III.22), nous pouvons déduire les composantes de courant correspondantes :

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \\ i_{c0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & v_{s\beta} & 0 \\ -v_{s\beta} & v_{s\alpha} & 0 \\ 0 & 0 & v_{s0} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p_c \\ q_c \\ p_{c0} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{s0}(v_{s\alpha}^2 + v_{s\beta}^2)} \begin{bmatrix} v_{s\alpha}v_{s0} & -v_{s\beta}v_{s0} & 0 \\ v_{s\beta}v_{s0} & v_{s\alpha}v_{s0} & 0 \\ 0 & 0 & v_{s\alpha}^2 + v_{s\beta}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_c \\ q_c \\ p_{c0} \end{bmatrix} \quad (\text{III.24})$$

Soit :

$$i_{c0} = (v_{s\alpha}^2 + v_{s\beta}^2) \frac{p_{c0}}{v_{s0}(v_{s\alpha}^2 + v_{s\beta}^2)} = i_{c0} \quad (\text{III.25})$$

$$i_{c\alpha} = \frac{v_{s0}v_{s\alpha}}{v_{s0}(v_{s\alpha}^2 + v_{s\beta}^2)} p_c - \frac{v_{s0}v_{s\beta}}{v_{s0}(v_{s\alpha}^2 + v_{s\beta}^2)} q_c = \frac{v_{s\alpha}}{v_{s\alpha}^2 + v_{s\beta}^2} p_c - \frac{v_{s\beta}}{v_{s\alpha}^2 + v_{s\beta}^2} q_c \quad (\text{III.26})$$

$$i_{c\beta} = \frac{v_{s0}v_{s\beta}}{v_{s0}(v_{s\alpha}^2 + v_{s\beta}^2)} p_c - \frac{v_{s0}v_{s\alpha}}{v_{s0}(v_{s\alpha}^2 + v_{s\beta}^2)} q_c = \frac{v_{s\beta}}{v_{s\alpha}^2 + v_{s\beta}^2} p_c - \frac{v_{s\alpha}}{v_{s\alpha}^2 + v_{s\beta}^2} q_c \quad (\text{III.27})$$

Nous remarquons de ces équations que dans les expressions de $i_{c\alpha}$ et de $i_{c\beta}$ la puissance homopolaire est absente. De plus, nous constatons dans l'équation (III.25) que la tension homopolaire est également absente. Ainsi, il est possible de simplifier la commande des puissances réelle, imaginaire et homopolaire instantanées grâce à une P.L.L qui génère des tensions équilibrées dans les axes α - β sans homopolaire et synchrones avec la tension fondamentale du réseau électrique [17]:

$$\hat{v}_{s\alpha} = \sqrt{3}V_s \sin(\hat{\theta}) \quad (\text{III.28})$$

$$v_{s\beta} = -\sqrt{3}V_s \cos(\hat{\theta}) \quad (\text{III.29})$$

En utilisant les équations (III.20), (III.28) et (III.29), nous obtenons l'expression suivante pour les puissances réelle et imaginaire :

$$\begin{bmatrix} p_c \\ q_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{v}_{s\alpha} & \hat{v}_{s\beta} \\ -\hat{v}_{s\beta} & \hat{v}_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{III.30})$$

Les composantes des puissances réelle et imaginaire instantanées peuvent être exprimées comme la somme d'une composante continue et d'une composante alternative :

$$\begin{bmatrix} p_c \\ q_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{p}_c + \tilde{p}_c \\ \bar{q}_c + \tilde{q}_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.31})$$

avec \bar{p}_c et \bar{q}_c : les composantes continues de p_c et q_c .

et \tilde{p}_c et \tilde{q}_c : les composantes alternatives de p_c et q_c .

De l'équation (III.30), nous pouvons déduire les composantes de courant correspondantes :

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{v}_{s\alpha} & \hat{v}_{s\beta} \\ -\hat{v}_{s\beta} & \hat{v}_{s\alpha} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p_c \\ q_c \end{bmatrix} = \frac{1}{\hat{v}_{s\alpha}^2 + \hat{v}_{s\beta}^2} \begin{bmatrix} \hat{v}_{s\alpha} & -\hat{v}_{s\beta} \\ \hat{v}_{s\beta} & \hat{v}_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_c \\ q_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.32})$$

Sachant que l'équation (III.24) exprime les courants de $i_{c\alpha}$, $i_{c\beta}$ et i_{c0} , la matrice (III.32) peut être réécrite sous la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \\ i_{c0} \end{bmatrix} = \frac{1}{\hat{v}_{s\alpha}^2 + \hat{v}_{s\beta}^2} \begin{bmatrix} \hat{v}_{s\alpha} & -\hat{v}_{s\beta} & 0 \\ \hat{v}_{s\beta} & \hat{v}_{s\alpha} & 0 \\ 0 & 0 & \hat{v}_{s\alpha}^2 + \hat{v}_{s\beta}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_c \\ q_c \\ i_{c0} \end{bmatrix} \quad (\text{III.33})$$

Suivant la fonction que nous voulons donner au filtre actif de puissance, nous pouvons compenser soit les harmoniques de courant et l'énergie réactive ou uniquement l'un des deux. Le tableau (III.3) résume les modes de compensations possibles.

Type de compensation	Paramètres de contrôle	
Compensation des harmoniques de courant	$p_f^{ref} = \tilde{p}_c + p_{dc}$	$q_f^{ref} = \tilde{q}_c$
Compensation de l'énergie réactive	$p_f^{ref} = 0 + p_{dc}$	$q_f^{ref} = \bar{q}_c$
Compensation des harmoniques de courant et de l'énergie réactive	$p_f^{ref} = \tilde{p}_c + p_{dc}$	$q_f^{ref} = q_c$

Tableau (III.3) : Modes de compensation de la commande des puissances réelle, imaginaire et homopolaire instantanées

Les courants de référence du filtre sont calculés à l'aide de l'équation (III.34) .

$$\begin{bmatrix} i_{f\alpha}^{ref} \\ i_{f\beta}^{ref} \\ i_{f0}^{ref} \end{bmatrix} = \frac{1}{\hat{v}_{s\alpha}^2 + \hat{v}_{s\beta}^2} \begin{bmatrix} \hat{v}_{s\alpha} & -\hat{v}_{s\beta} & 0 \\ \hat{v}_{s\beta} & \hat{v}_{s\alpha} & 0 \\ 0 & 0 & \hat{v}_{s\alpha}^2 + \hat{v}_{s\beta}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_f^{ref} \\ q_f^{ref} \\ i_{c0} \end{bmatrix} \quad (\text{III.34})$$

Ainsi, après le choix des paramètres de commande, il est aisé de remonter aux courants de référence par la transformation inverse de Concordia :

$$\begin{bmatrix} i_{f1}^{ref} \\ i_{f2}^{ref} \\ i_{f3}^{ref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{f\alpha}^{ref} \\ i_{f\beta}^{ref} \\ i_{f0}^{ref} \end{bmatrix} \quad (\text{III.35})$$

Dans le cas d'un onduleur à quatre bras le courant de référence i_{fn}^{ref} est égal à :

$$i_{fn}^{ref} = -(i_{f1}^{ref} + i_{f2}^{ref} + i_{f3}^{ref}) \tag{III.36}$$

La figure (III.3) illustre l'algorithme de commande :

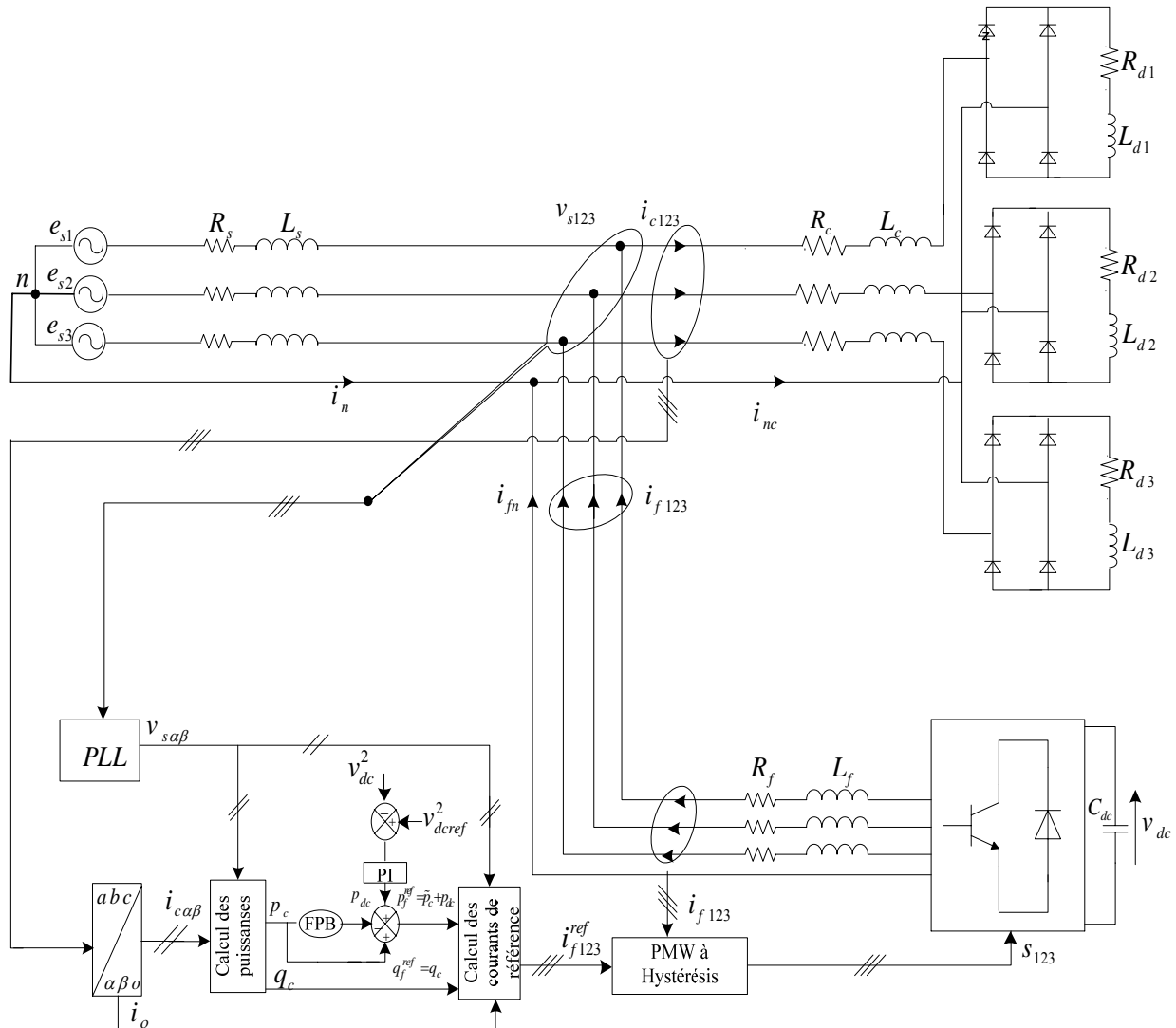


Figure (III.3) : Commande d'un filtre actif de puissance par la méthode simplifiée des puissances réelle, imaginaire et homopolaire instantanées

III.5 Résultats de simulation

Tout d'abord, nous allons définir les paramètres d'un réseau électrique triphasé à quatre fils et de ses trois charges non-linéaires. Il s'agit de trois ponts redresseurs monophasés à diodes alimentant chacun une charge RL.

Pour le cas des charges déséquilibrées nous prenons :

v_{seff} [V]	f [HZ]	R_s [mΩ]	L_s [μH]	R_c [mΩ]	L_c [μH]	R_f [mΩ]	L_f [μH]
240	50	3.63	14.12	12.87	105.98	12.87	450
R_{d1} [Ω]	L_{d1} [μH]	R_{d2} [Ω]	L_{d2} [μH]	R_{d3} [Ω]	L_{d3} [μH]	R_f [mΩ]	L_f [μH]
0.2	1	0.79	4.8	0.3	4	12.87	450

Tableaux (III.4) : Paramètres du système à simuler (système déséquilibré)

Lorsque le système est équilibre, les paramètres ont pour valeurs :

v_{seff} [V]	f [HZ]	R_s [mΩ]	L_s [μH]	R_c [mΩ]	L_c [μH]	R_d [Ω]	L_d [μH]	R_f [mΩ]	L_f [μH]
240	50	3.63	14.12	12.87	105.98	0.79	4.84	12.87	450

Tableaux (III.5) : Paramètres du système à simuler (système équilibré)

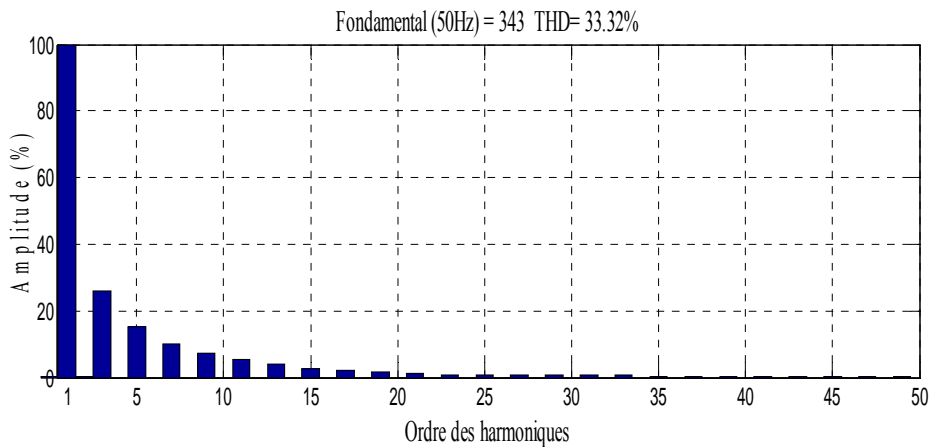
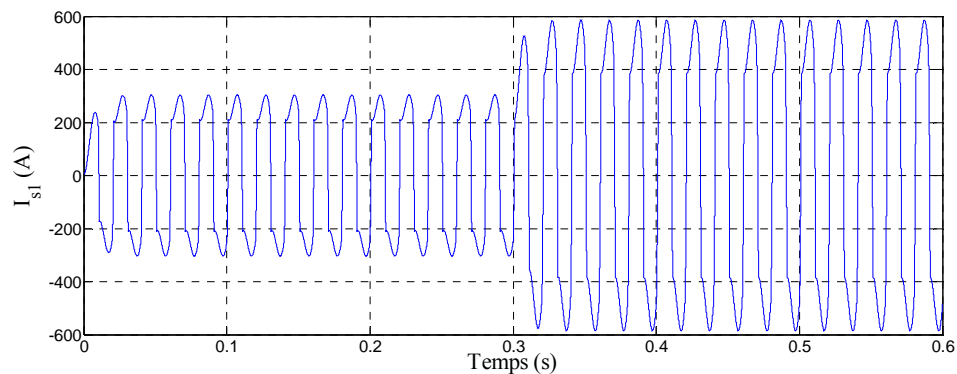


Figure (III.4) : Courant de la première phase de réseaux avant le filtrage et sont Spectre harmonique Le taux de distorsion harmonique du courant de ligne avant filtrage est de 33.32 %.

III.5.1 Simulation de l'ensemble réseau - charge non-linéaire – filtre actif de puissance

Nous effectuons des simulations dans un environnement comprenant le réseau électrique et la charge polluante.

L'identification des harmoniques est effectuée avec la même méthode pour les deux topologies. Pour que les comparaisons soient effectives, quels que soit la technique de compensation utilisée, les paramètres de simulation doivent être identiques.

III.5.1.1 Topologie à trois bras avec condensateurs à point milieu

- **Cas d'un système équilibré**

Nous présentons dans la suite de ce paragraphe les résultats de simulation du système complet-réseau électrique-charge non-linéaire-filtre actif de puissance- pour les deux topologies. Ainsi, nous commencerons par présenter dans la figure (III.5) les résultats de simulation obtenus lorsque nous utilisons la commande p-q-o, appliquée à un filtre actif de puissance à trois bras avec condensateurs à point milieu pour compenser un réseau électrique équilibré.

- La bande d'hystérésis H est fixée à 1A ;
- Pour tester la boucle de contrôle de tension, nous avons imposé une référence de tension égale à 1400V pour la structure à trois bras et à 700V pour la structure à quatre bras.

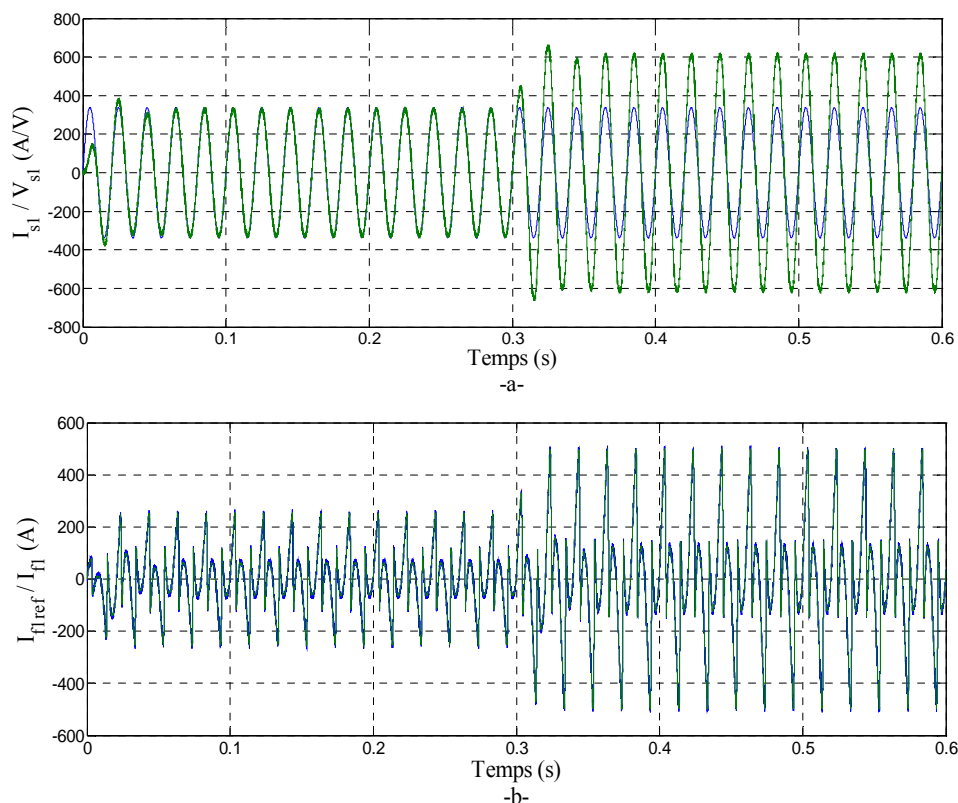


Figure (III.5) : Compensation des courants harmoniques des trois ponts redresseurs alimentant chacun une charge R-L en utilisant un filtre actif de puissance à trois bras avec condensateurs à point milieu et la commande p-q-o (charge équilibrée), a) Courant et tension de la première phase de la source après le filtrage, b) Courant injecté par le filtre actif de puissance à trois bras avec condensateurs à point milieu et sa référence

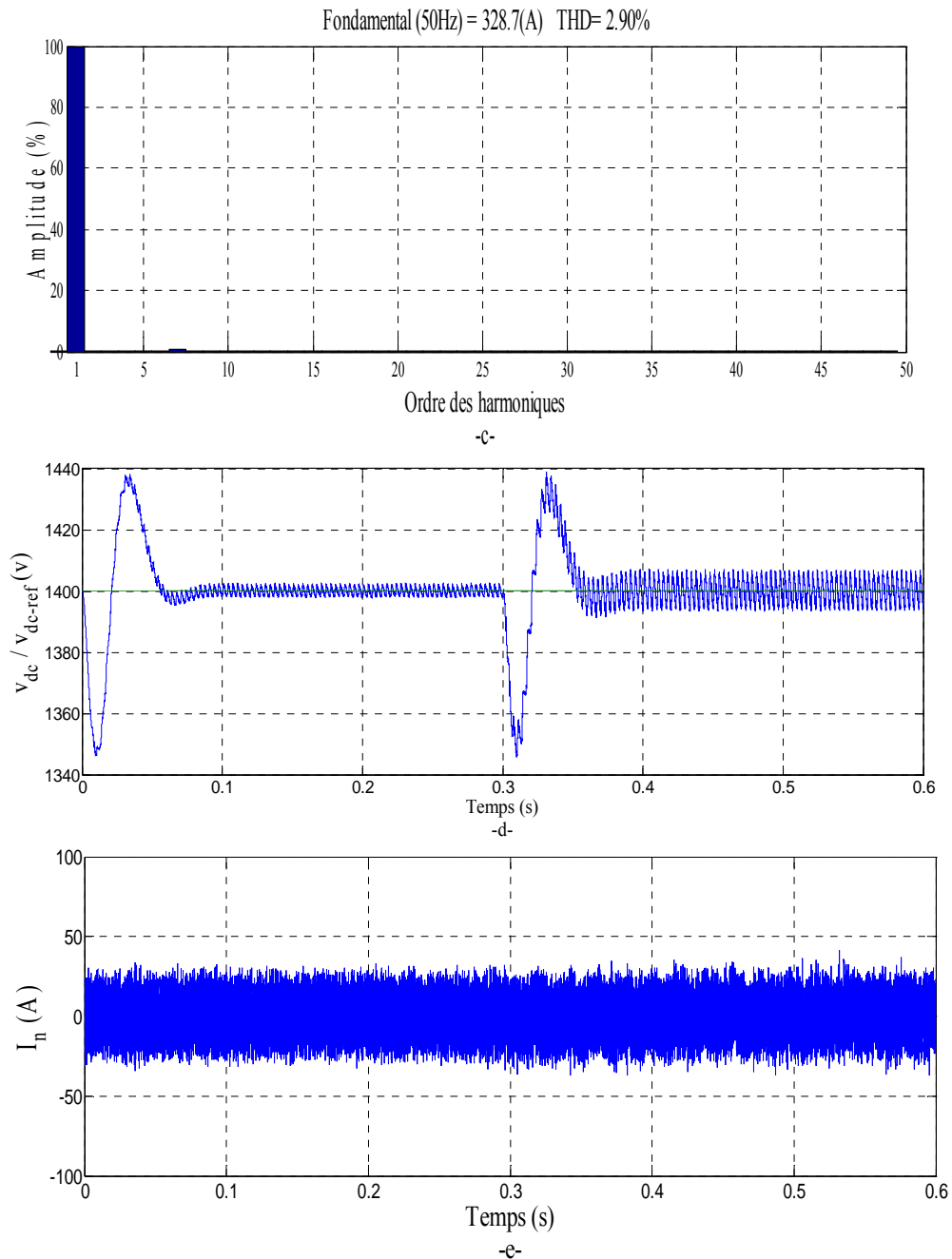


Figure (III.5-suite): Compensation des courants harmoniques des trois ponts redresseurs alimentant chacun une charge R-L en utilisant un filtre actif de puissance à trois bras avec condensateurs à point milieu et la commande p-q-o (charge équilibrée), c) Spectre harmonique du courant, d) Courant du neutre après le filtrage, e) Tension aux bornes du condensateur

- **Cas d'un système déséquilibré**

Les résultats de simulation présentés dans la figures (III.6) sont identiques aux précédents mais avec une charge déséquilibrée (différentes charges R-L pour les ponts redresseurs, voir le tableau (II.5)).

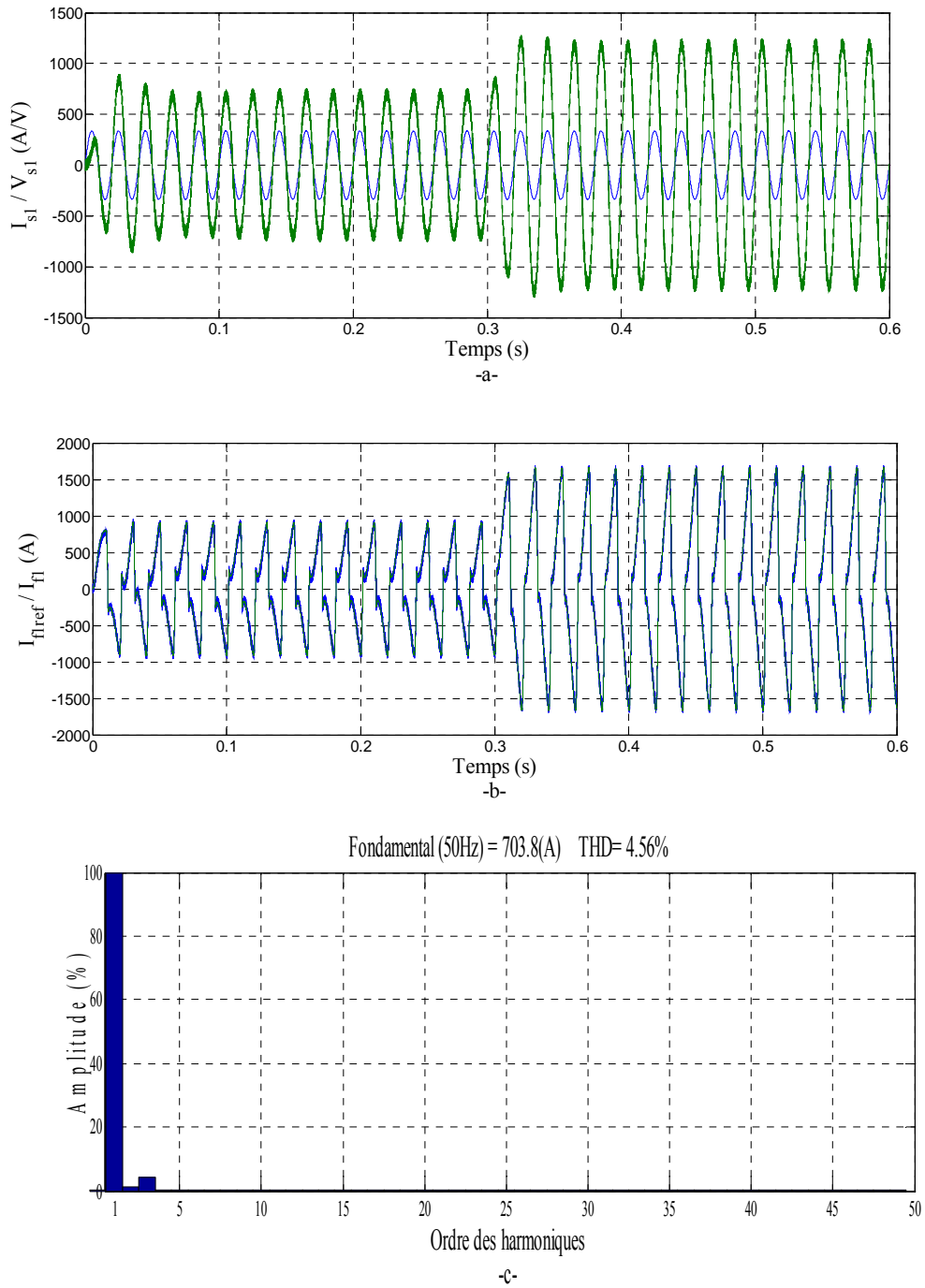


Figure (III.6) : Compensation des courants harmoniques des trois ponts redresseurs alimentant chacun une charge R-L en utilisant un filtre actif de puissance à trois bras avec condensateurs à point milieu et la commande p-q-o (charge déséquilibrée), a) Courant et tension de la première phase de la source après le filtrage, b) Courant injecté par le filtre actif de puissance à trois bras avec condensateurs à point milieu et sa référence, c) Spectre harmonique du courant

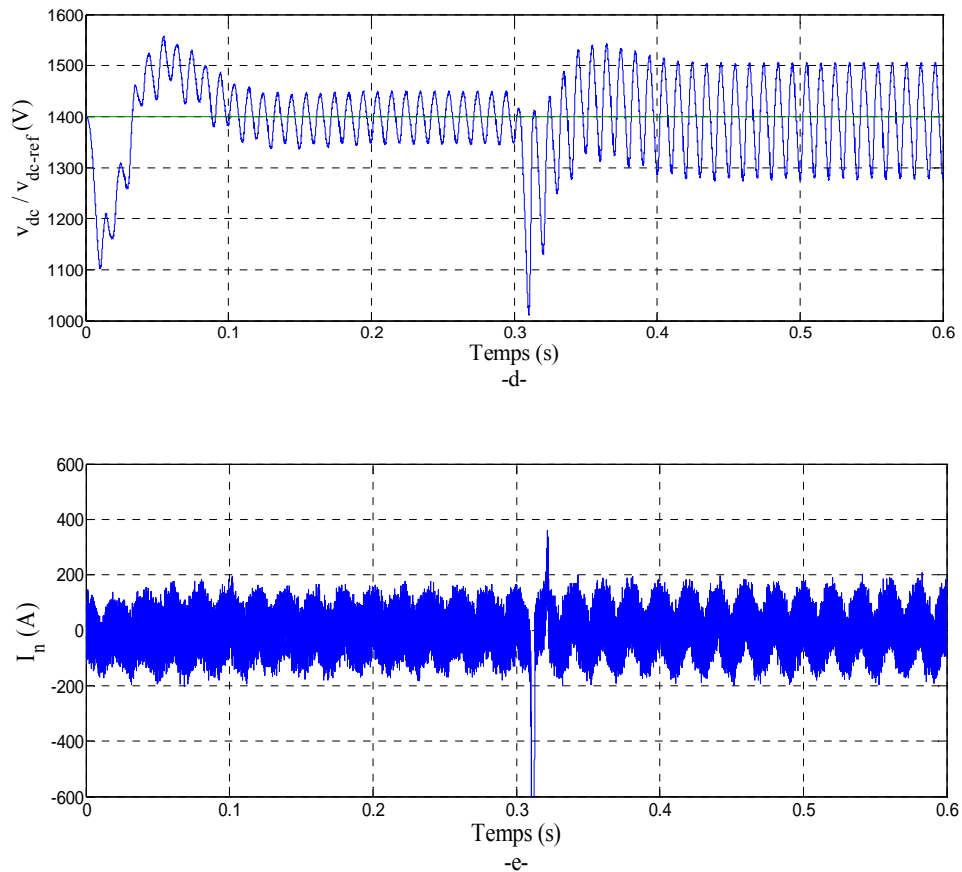


Figure (III.6) (suite) : Compensation des courants harmoniques des trois ponts redresseurs alimentant chacun une charge R-L en utilisant un filtre actif de puissance à trois bras avec condensateurs à point milieu et la commande p-q-o (charge déséquilibrée), d) Tension aux bornes du condensateur, e) Courant du neutre après le filtrage

III.5.1.2 Topologie à quatre bras

- Cas d'un système équilibré

La figure (III.12) présente les résultats de simulation obtenus lorsque nous utilisons la commande p-q-o pour un filtre actif de puissance à quatre bras afin de compenser un réseau électrique équilibré à quatre fils. Le THD après filtrage est égal à 2,36%.

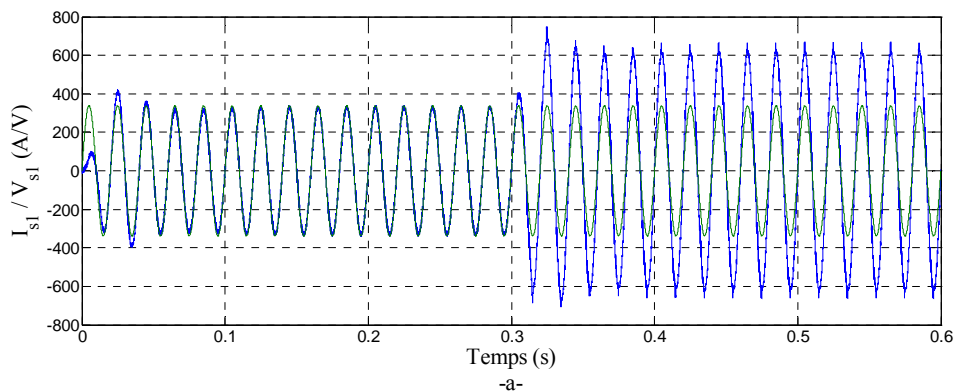


Figure (III.7) : Compensation des courants harmoniques des trois ponts redresseurs alimentant chacun une charge R-L en utilisant un filtre actif de puissance à quatre bras et la commande p-q-o (charge équilibrée), a) Courant et tension de la première phase de la source après le filtrage

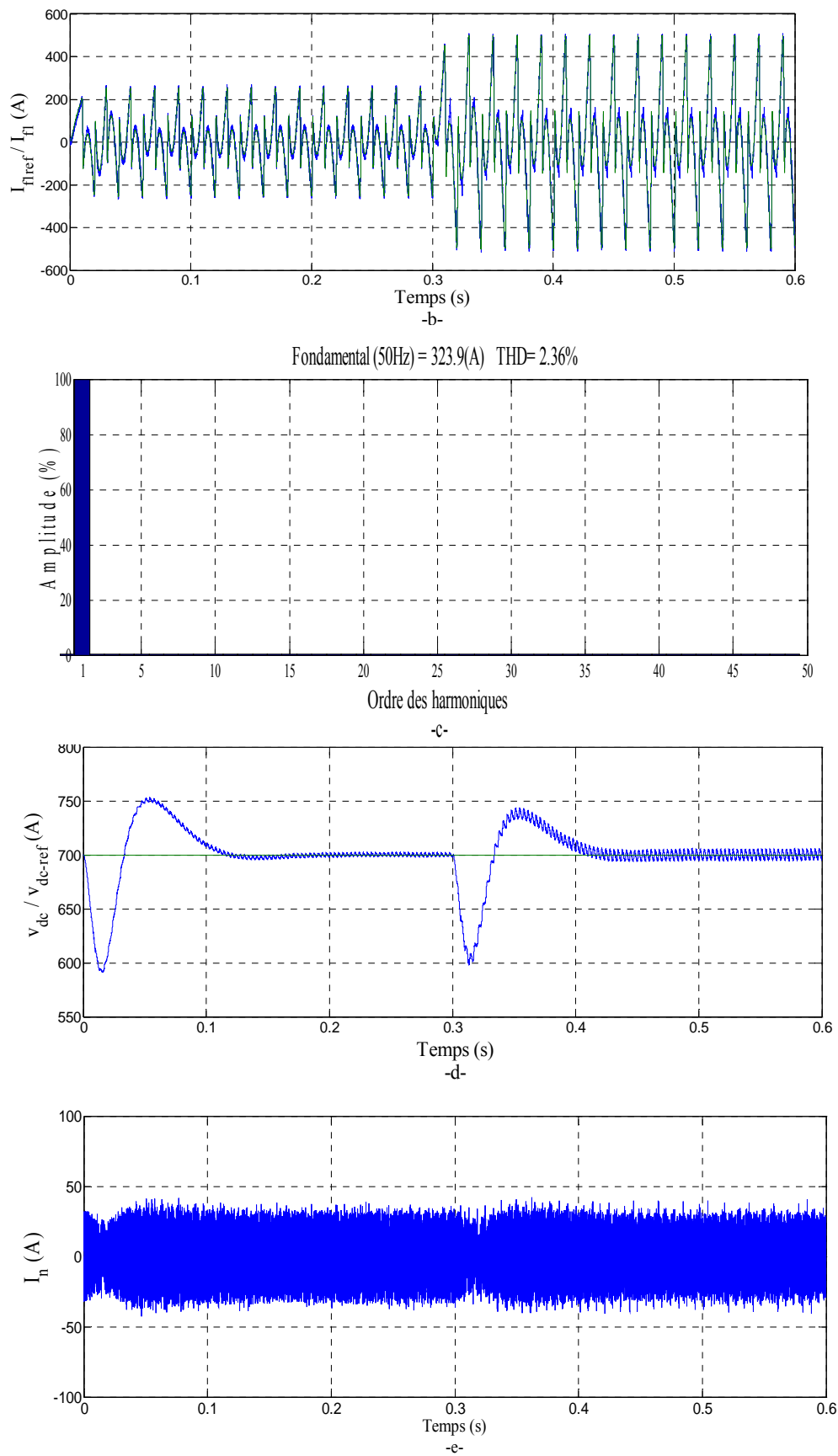


Figure (III.7) (suite) : Compensation des courants harmoniques des trois ponts redresseurs alimentant chacun une charge R-L en utilisant un filtre actif de puissance à quatre bras et la commande p-q-o (charge équilibrée), b) Courant injecté par le filtre actif de puissance à quatre bras et sa référence, c) Spectre harmonique du courant, d) Tension aux bornes du condensateur, e) Courant du neutre après le filtrage

- Cas d'un système déséquilibré

Les mêmes simulations précédentes sont refaites pour le cas d'une charge triphasée déséquilibrée. Ces résultats sont regroupés dans la figure (III.8).

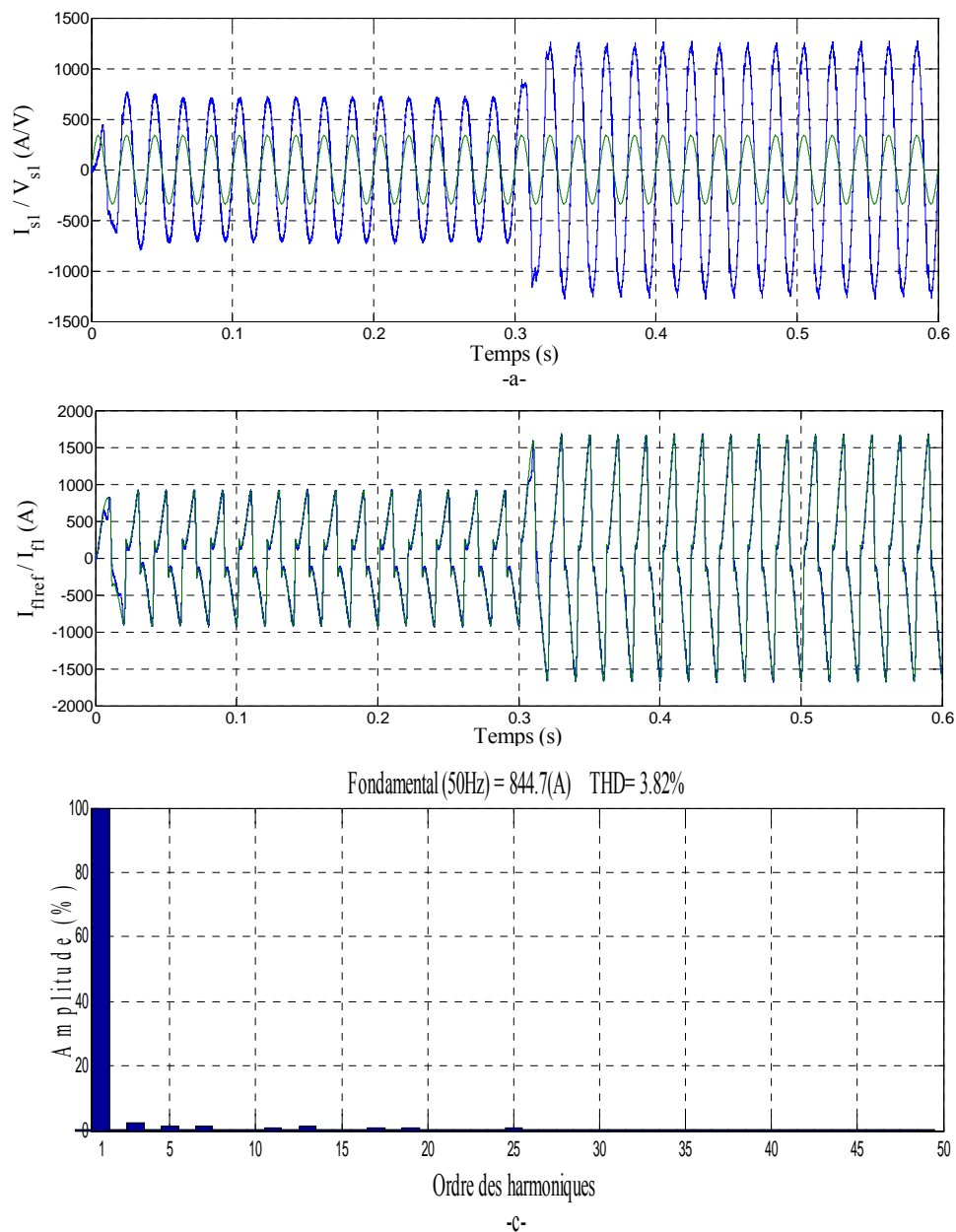


Figure (III.8) : Compensation des courants harmoniques des trois ponts redresseurs alimentant chacun une charge R-L en utilisant un filtre actif de puissance à quatre bras et la commande p-q-o (charge déséquilibrée), a) Courant et tension de la première phase de la source après le filtrage, b) Courant injecté par le filtre actif de puissance à quatre bras et sa référence, c) Spectre harmonique du courant

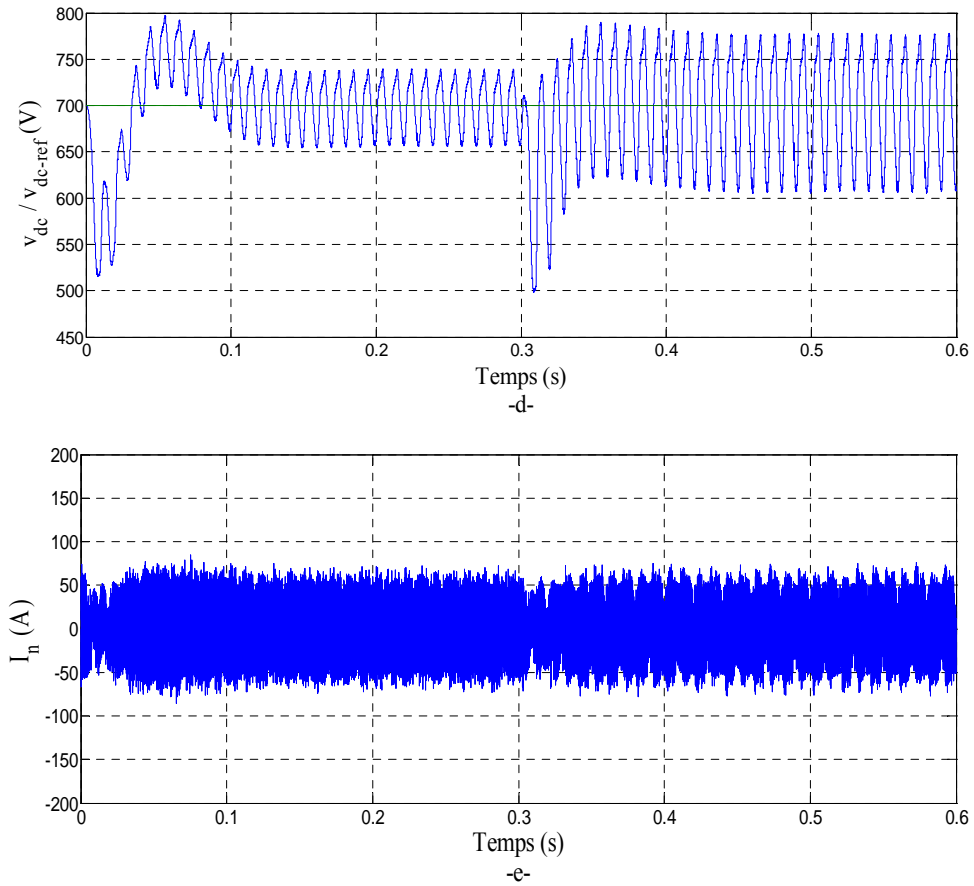


Figure (suite) : Compensation des courants harmoniques des trois ponts redresseurs alimentant chacun une charge R-L en utilisant un filtre actif de puissance à quatre bras et la commande p-q-o (charge déséquilibrée), d) Tension aux bornes du condensateur, e) Courant du neutre après le filtrage (III.8)

III.6 Méthode directe dite théorie p-q-r

Cette méthode introduite par [17],[19] réalisé une double transformation, à savoir une première transformation des tensions simples et des courants de ligne des axes a-b-c aux axes α - β -o, puis une seconde transformation des axes α - β -o aux axes p-q-r. Son principe est énoncé comme suit :

Considérons respectivement les tensions simples du point raccordement et les courants de ligne de la charge, par $v_{s1}(t), v_{s2}(t), v_{s3}(t)$ et $i_{c1}(t), i_{c2}(t), i_{c3}(t)$. La transformation de Concordia permet de ramener ce système triphasé des axes a-b-c aux axes α - β -0, comme le montre les deux relations suivantes :

$$\begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \\ v_{s0} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{s1} \\ v_{s2} \\ v_{s3} \end{bmatrix} \tag{III.37}$$

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \\ i_{c0} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c1} \\ i_{c2} \\ i_{c3} \end{bmatrix} \quad (\text{III.38})$$

Une seconde transformation dans un nouveau système appelé p-q-r, sera donc réalisée :

$$\begin{bmatrix} i_{cp} \\ i_{cq} \\ i_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{v_{s\alpha}}{v_{s\alpha\beta 0}} & \frac{v_{s\beta}}{v_{s\alpha\beta 0}} & \frac{v_{s0}}{v_{s\alpha\beta 0}} \\ -\frac{v_{s\beta}}{v_{s\alpha\beta}} & \frac{v_{s\alpha}}{v_{s\alpha\beta}} & 0 \\ -\frac{v_{s\alpha} v_{s0}}{v_{s\alpha\beta} v_{s\alpha\beta 0}} & -\frac{v_{s\beta} v_{s0}}{v_{s\alpha\beta} v_{s\alpha\beta 0}} & \frac{v_{s\alpha\beta}}{v_{s\alpha\beta 0}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \\ i_{c0} \end{bmatrix} \quad (\text{III.39})$$

$$\text{avec } v_{s\alpha\beta} = \sqrt{v_{s\alpha}^2 + v_{s\beta}^2} \quad \text{et} \quad v_{s\alpha\beta 0} = \sqrt{v_{s\alpha}^2 + v_{s\beta}^2 + v_{s0}^2}$$

Les puissances active et réactive instantanées sont données par l'expression suivante:

$$\begin{bmatrix} p_c \\ q_{cr} \\ q_{cq} \end{bmatrix} = v_{s\alpha\beta 0} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{cp} \\ i_{cq} \\ i_{cr} \end{bmatrix} \quad (\text{III.40})$$

De cette équation, nous obtenons les composantes de courant :

$$\begin{bmatrix} i_{cp} \\ i_{cq} \\ i_{cr} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{s\alpha\beta 0}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_c \\ q_{cr} \\ q_{cq} \end{bmatrix} \quad (\text{III.41})$$

Suivant la fonction que nous donnons au filtre actif de puissance, nous pouvons ici aussi compenser soit les harmoniques de courant et l'énergie réactive ou uniquement l'un des deux. Le tableau (III.7) résume les modes de compensations possibles.

Dans le cas d'un onduleur à quatre bras le courant du neutre de référence i_{fn}^{ref} est calculé par :

$$i_{fn}^{ref} = -(i_{f1}^{ref} + i_{f2}^{ref} + i_{f3}^{ref}) \quad (\text{III.42})$$

Type de compensation	Paramètres de contrôle	
Compensation des harmoniques de courant	$p_f^{ref} = \tilde{p}_c + p_{dc}$	$q_{fr}^{ref} = \tilde{q}_{cr}$ $q_{fq}^{ref} = \tilde{q}_{cq}$
Compensation des harmoniques de courant et de l'énergie réactive	$p_f^{ref} = \tilde{p}_c + p_{dc}$	$q_{fr}^{ref} = q_{cr}$ $q_{fq}^{ref} = q_{cq}$

Tableau (III.6) : Mode de compensation de la commande p-q-r

Ainsi, si nous voulons compenser simultanément les harmoniques de courant et l'énergie réactive, l'équation (III.40) deviendra :

$$\begin{bmatrix} i_{fp}^{ref} \\ i_{fq}^{ref} \\ i_{fr}^{ref} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{\alpha\beta 0}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_f^{ref} \\ q_{fr}^{ref} \\ q_{fq}^{ref} \end{bmatrix} \quad (III.43)$$

Ce qui donne dans les axes α - β -0, l'expression:

$$\begin{bmatrix} i_{f\alpha}^{ref} \\ i_{f\beta}^{ref} \\ i_{f0}^{ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{v_{f\alpha}}{v_{f\alpha\beta 0}} & \frac{-v_{f\beta}}{v_{f\alpha\beta}} & \frac{-v_{f\alpha}v_{f0}}{v_{f\alpha\beta}v_{f\alpha\beta 0}} \\ \frac{v_{f\beta}}{v_{f\alpha\beta 0}} & \frac{v_{f\alpha}}{v_{f\alpha\beta}} & \frac{-v_{f\beta}v_{f0}}{v_{f\alpha\beta}v_{f\alpha\beta 0}} \\ \frac{v_{f0}}{v_{f\alpha\beta 0}} & 0 & \frac{v_{f\alpha\beta}}{v_{f\alpha\beta 0}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{fp}^{ref} \\ i_{fq}^{ref} \\ i_{fr}^{ref} \end{bmatrix} \quad (III.44)$$

Ainsi, après le choix des paramètres de commande, il est aisé de remonter aux courants de référence par la transformation inverse de Concordia :

$$\begin{bmatrix} i_{f1}^{ref} \\ i_{f2}^{ref} \\ i_{f3}^{ref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{f\alpha}^{ref} \\ i_{f\beta}^{ref} \\ i_{f0}^{ref} \end{bmatrix} \quad (III.45)$$

La figure (III.9) illustre l’algorithme de commande

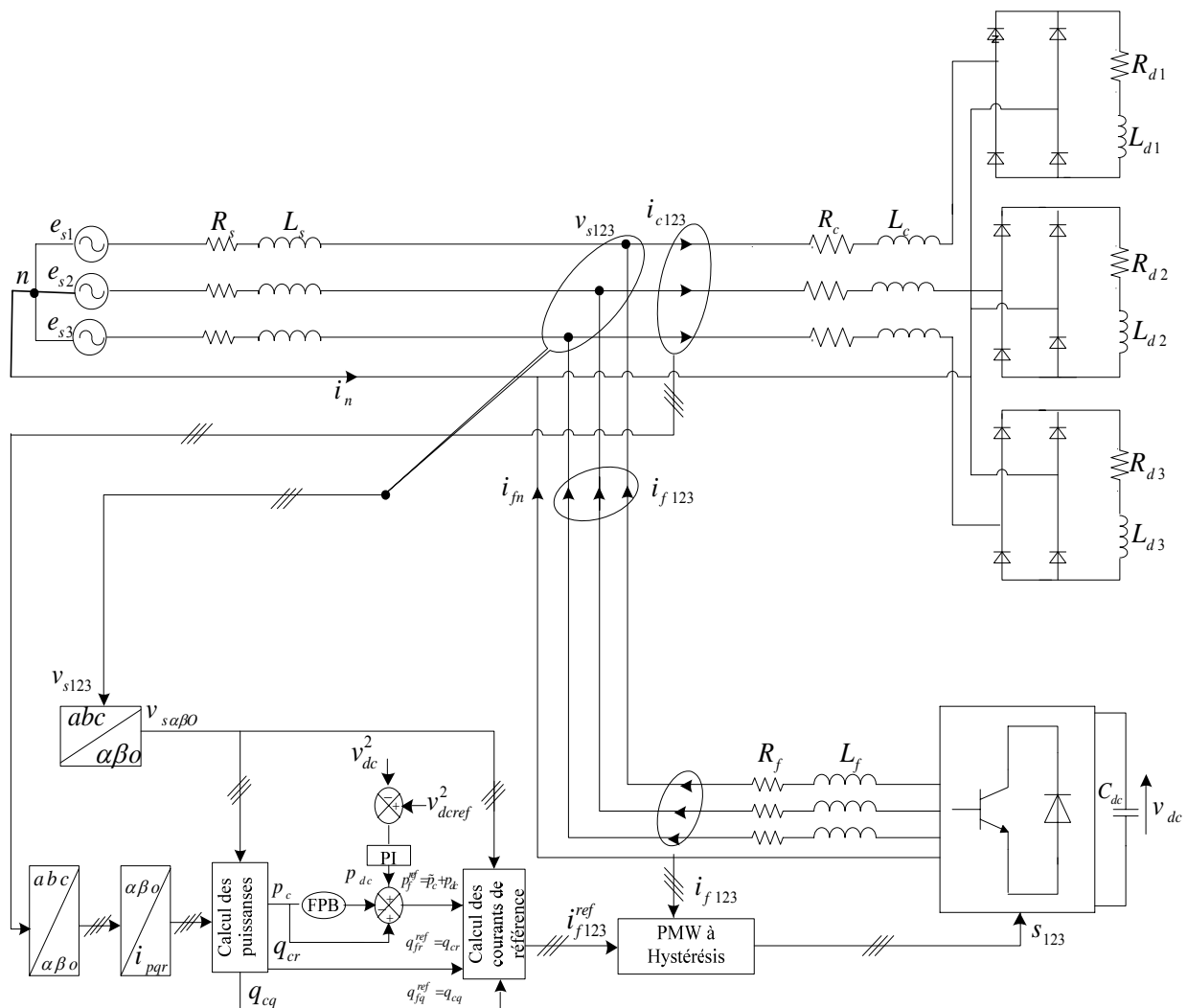


Figure (III.9) : Commande d'un filtre actif de puissance par la méthode p-q-r améliorée

II.6.1 Simulation de l'ensemble réseau-charge non-linéaire-filtre actif de puissance

II.6.1.1 Topologie à trois bras avec condensateurs à point milieu

- Cas d'un système équilibré

Nous présentons dans la suite de ce paragraphe les résultats de simulation du système complet réseau électrique-charge non-linéaire-filtre actif de puissance pour les deux topologies. Ainsi, nous commencerons par présenter dans la figure (III.10) les résultats de simulation obtenus lorsque nous utilisons la commande p-q-r, appliquée à un filtre actif de puissance à trois bras avec condensateurs à point milieu pour compenser un réseau électrique équilibré.

- La bande d'hystérésis H est égale à 1A ;
- Pour tester la boucle de contrôle de tension, nous avons imposée une référence égale à 1400V.

La figure (III.10) présente les résultats de simulation obtenus par la commande p-q-r pour un filtre actif de puissance à trois bras avec condensateurs à point milieu afin de compenser un réseau électrique équilibré à quatre fils. Le THD après filtrage est égal à 2.89 %.

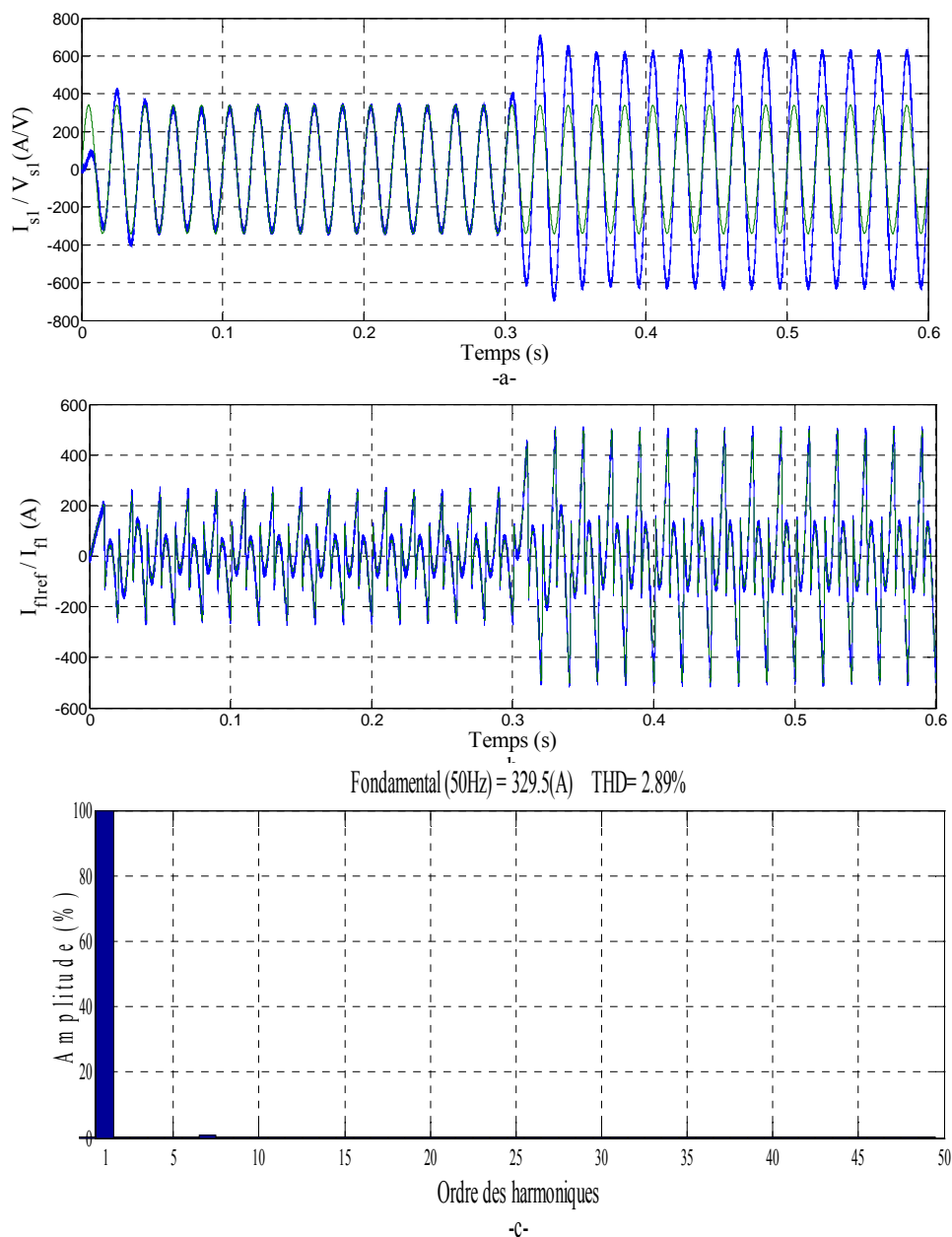


Figure (III.10) : Compensation des courants harmoniques des trois ponts redresseurs alimentant chacun une charge R-L en utilisant un filtre actif de puissance à trois bras avec condensateurs à point milieu et la commande p-q-r (charge équilibrée), a) Courant et tension de la première phase de la source après le filtrage, b) Courant injecté par le filtre actif de puissance à trois bras avec condensateurs à point milieu et sa référence, c) Spectre harmonique du courant

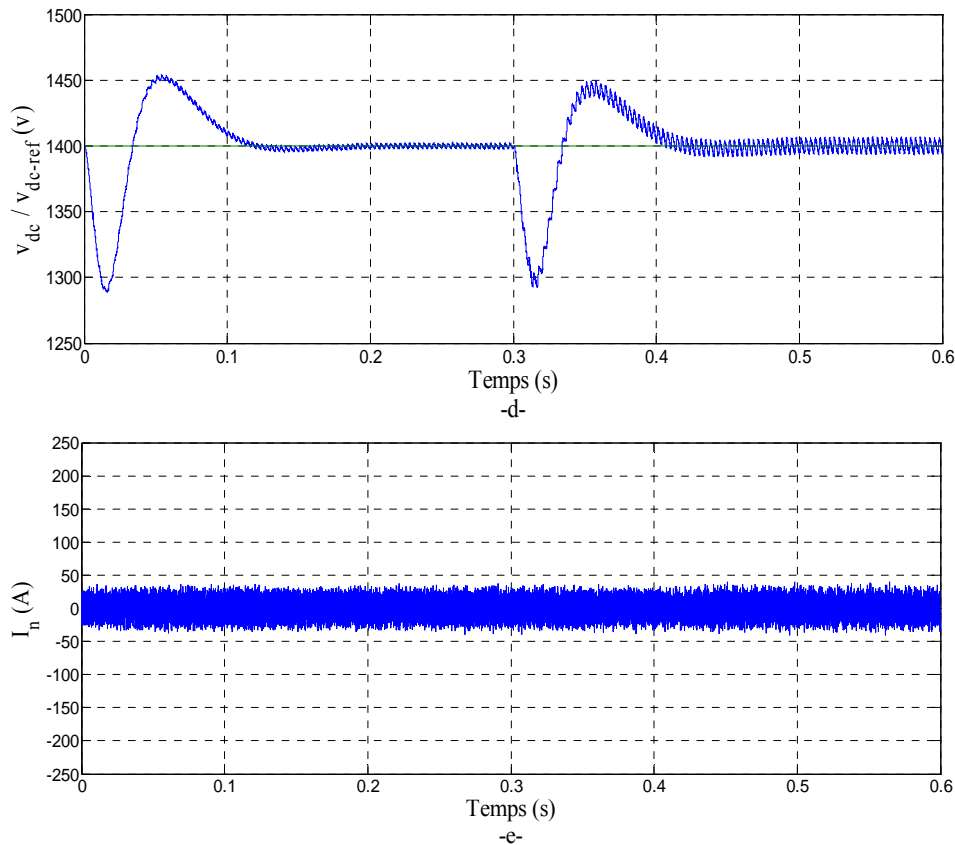


Figure (III.10)(suite) : Compensation des courants harmoniques des trois ponts redresseurs alimentant chacun une charge R-L en utilisant un filtre actif de puissance à trois bras avec condensateurs à point milieu et la commande p-q-r (charge équilibrée), d) Tension aux bornes du condensateur, e) Courant du neutre après filtrage

• Cas d'un système déséquilibré

Les résultats de simulation précédents sont également revus dans le cas d'une charge déséquilibrée. L'ensemble des résultats qui en résultent sont regroupés dans la figure (III.11).

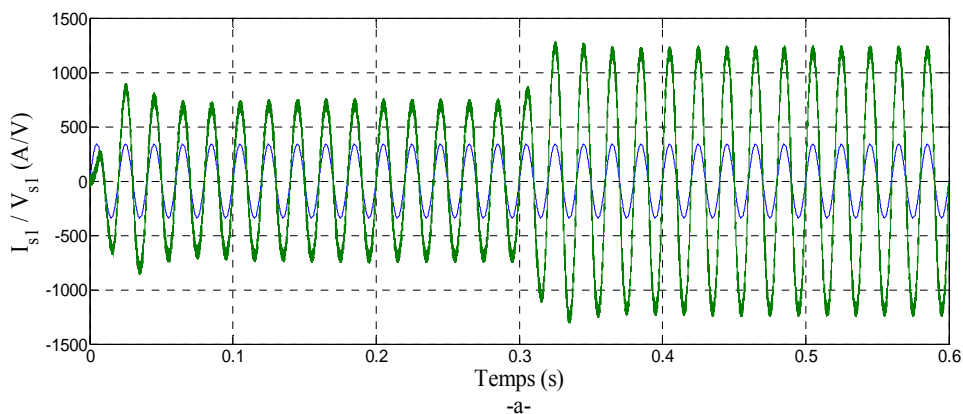


Figure (III.11) : Compensation des courants harmoniques des trois ponts redresseurs alimentant chacun une charge R-L en utilisant un filtre actif de puissance à trois bras avec condensateurs à point milieu et la commande p-q-r (charge déséquilibrée), a) Courant et tension de la première phase de la source après le filtrage

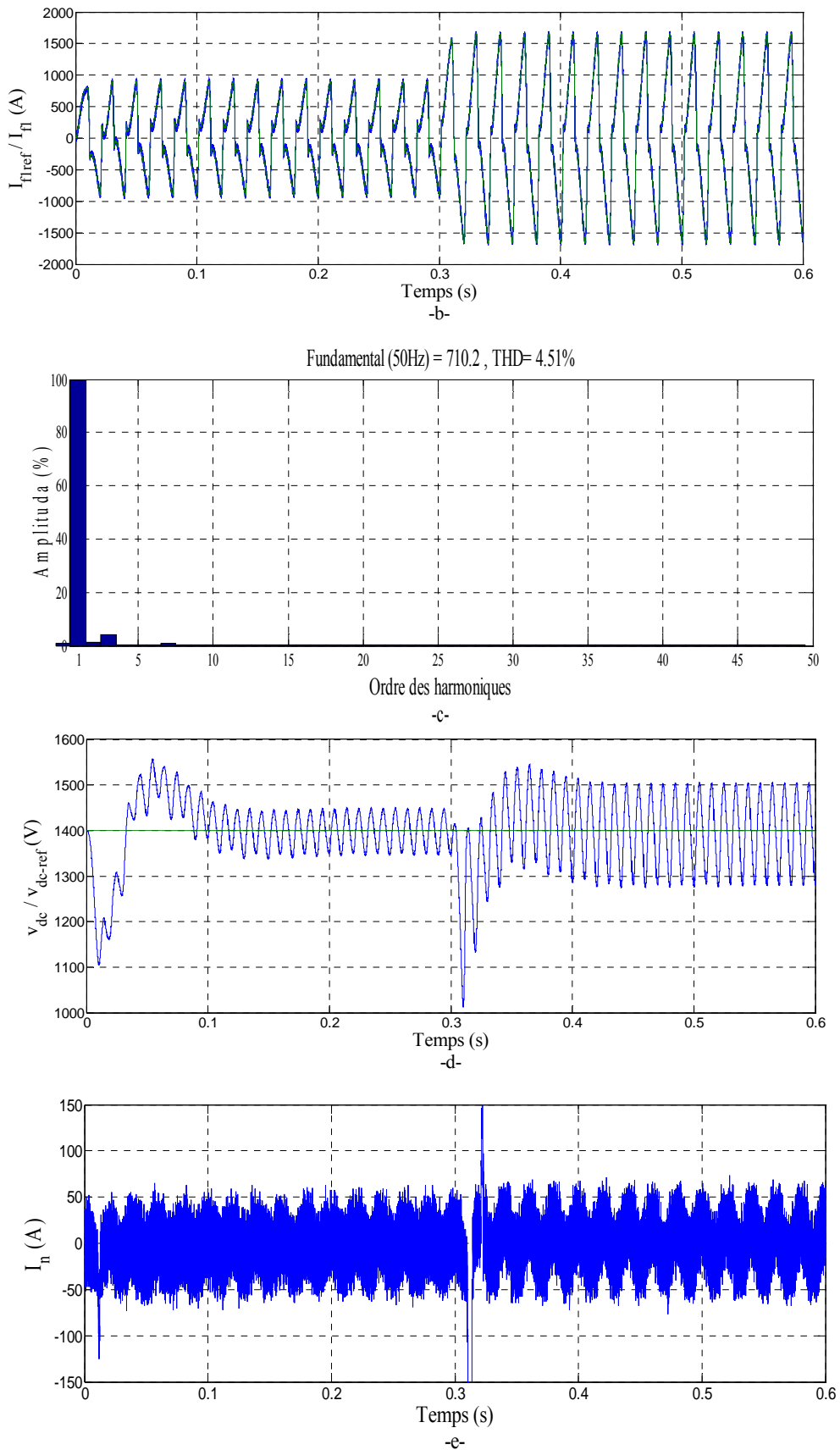


Figure (III.11) (suite) : Compensation des courants harmoniques des trois ponts redresseurs alimentant chacun une charge R-L en utilisant un filtre actif de puissance à trois bras avec condensateurs à point milieu et la commande p-q-r (charge déséquilibrée), b) Courant injecté par le filtre actif de puissance à trois bras avec condensateurs à point milieu et sa référence, c) Spectre harmonique du courant, d) Tension aux bornes du condensateur, e) Courant du neutre après le filtrage

II.6.1.2 Topologie à quatre bras

- Cas d'un système équilibré

La figure (III.12) présente les résultats de simulation obtenus lorsque nous utilisons la commande p-q-r pour un filtre actif de puissance à quatre bras afin de compenser un réseau électrique équilibré à quatre fils. Le THD après filtrage est égal à 2.35%.

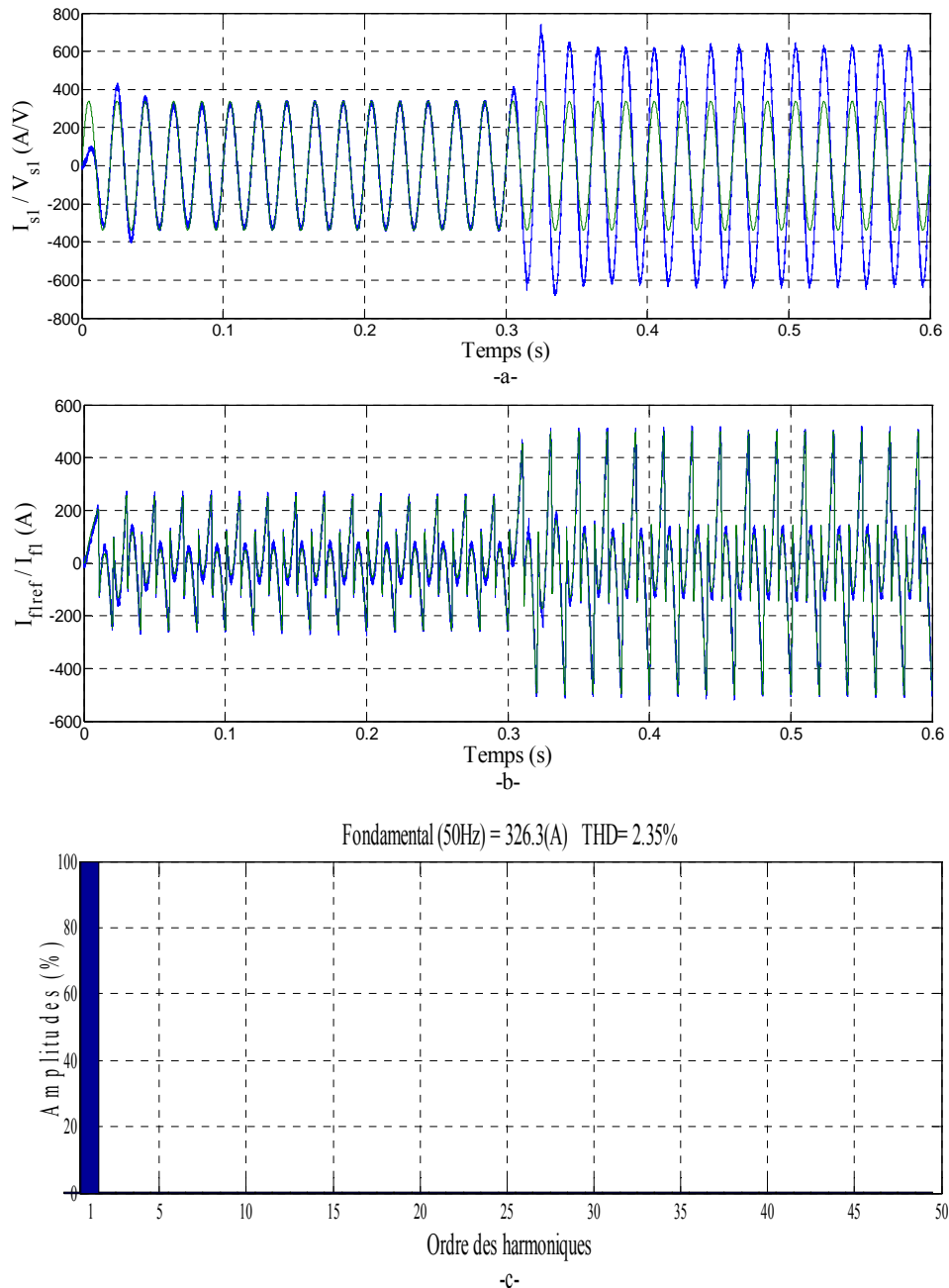


Figure (III.12) : Compensation des courants harmoniques des trois ponts redresseurs alimentant chacun une charge R-L en utilisant un filtre actif de puissance à quatre bras et la commande p-q-r (charge équilibrée), a) Courant et tension de la première phase de la source de la première phase après le filtrage, b) Courant injecté par le filtre actif de puissance à quatre bras et sa référence, c) Spectre harmonique du courant

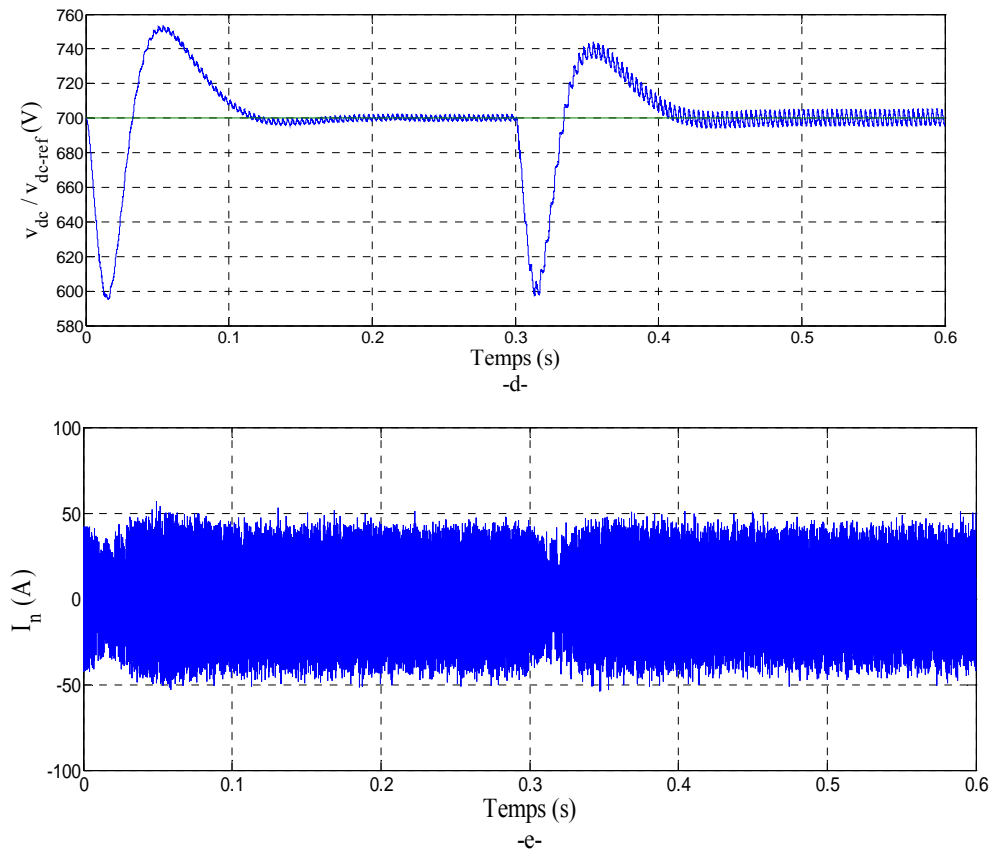


Figure (III.12) (suite) : Compensation des courants harmoniques des trois ponts redresseurs alimentant chacun une charge R-L en utilisant un filtre actif de puissance à quatre bras et la commande p-q-r (charge équilibrée), d) Tension aux bornes du condensateur, e) Courant du neutre après le filtrage

• Cas d'un système déséquilibré

Des résultats de simulation similaires peuvent être obtenus lorsque la charge est déséquilibrée. La figure (III.13) présente l'ensemble de ces simulations.

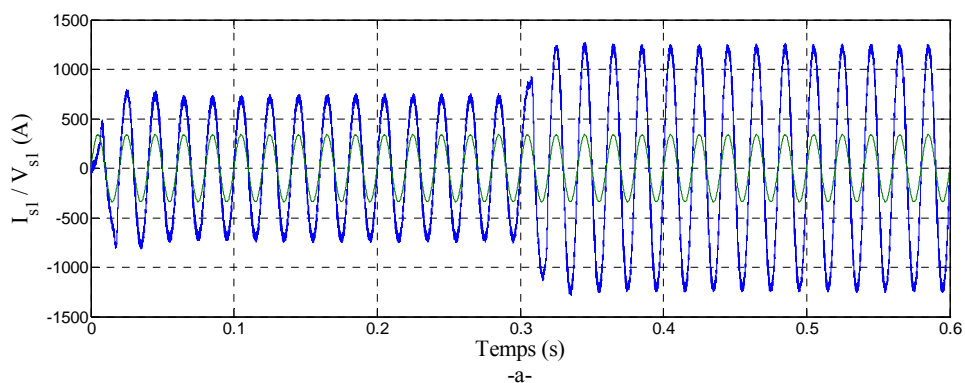


Figure (III.13) : Compensation des courants harmoniques des trois ponts redresseurs alimentant chacun une charge R-L en utilisant un filtre actif de puissance à quatre bras et la commande p-q-r (charge déséquilibrée), a) Courant et tension de la première phase de la source après le filtrage

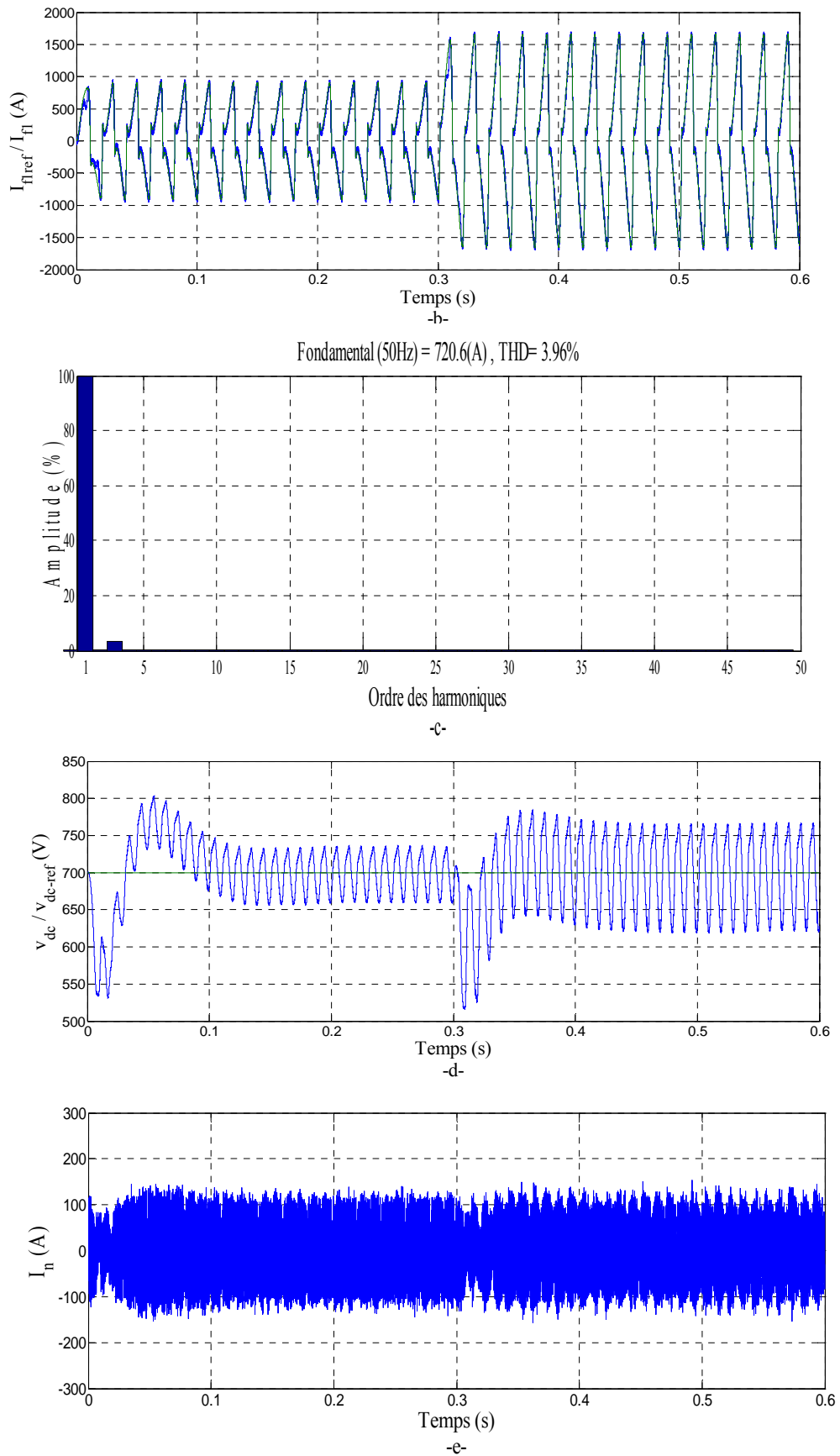


Figure (III.13) (suite) : Compensation des courants harmoniques des trois ponts redresseurs alimentant chacun une charge R-L en utilisant un filtre actif de puissance à quatre bras et la commande p-q-r (charge déséquilibrée), b) Courant injecté par le filtre actif de puissance à quatre bras et sa référence, c) Spectre harmonique du courant, d) Tension aux bornes du condensateur, e) Courant du neutre après le filtrage

II.7 Méthode directe utilisant la théorie du référentiel lié au synchronisme (SRF)

La méthode appliquant le référentiel lié au synchronisme a donné de très bons résultats pour le réseau électrique triphasé à trois fils. Cependant cette méthode peut être proposée pour un réseau électrique à quatre fils. Son principe est le suivant :

Soient les courants de ligne d'une charge triphasée avec neutre $i_{c1}(t)$, $i_{c2}(t)$, $i_{c3}(t)$. La transformation de Concordia permet de ramener ce système triphasé des axes a-b-c aux axes $\alpha, \beta, 0$, comme le montre la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \\ i_{c0} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c1} \\ i_{c2} \\ i_{c3} \end{bmatrix} \quad (\text{III.46})$$

En générant par une P.L.L, comme celle présentée par [17], les signaux $\sin(\hat{\theta})$ et $\cos(\hat{\theta})$, liés à la tension du réseau électrique, nous obtenons dans les axes d-q des courants suivants :

$$\begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \\ i_{cq\alpha} \\ i_{cq\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \sin(\hat{\theta}) & -\cos(\hat{\theta}) \\ 0 & \cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \\ -\cos(\hat{\theta}) & 0 & 0 \\ -\sin(\hat{\theta}) & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c0} \\ i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{III.47})$$

Les composantes i_{cd} et i_{cq} peuvent être exprimées comme la somme d'une composante continue et d'une composante alternative :

$$\begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{i}_{cd} + \tilde{i}_{cd} \\ \bar{i}_{cq} + \tilde{i}_{cq} \end{bmatrix} \quad (\text{III.48})$$

avec \bar{i}_{cd} et \bar{i}_{cq} les composantes continues de i_{cd} et i_{cq}

et \tilde{i}_{cd} et \tilde{i}_{cq} les composantes alternatives de i_{cd} et i_{cq}

Pour compenser à la fois les harmoniques de courant et l'énergie réactive, l'équation devient :

Suivant la fonction que nous donnons au filtre actif de puissance, nous pouvons soit compenser les harmoniques de courant et l'énergie réactive ou uniquement l'un deux. Le tableau (III.8) résume les modes de compensation.

Type de compensation	Paramètres de contrôle	
Compensation des harmoniques de courant	$i_{fd}^{ref} = \tilde{i}_d + i_{dc}$	$i_{fq}^{ref} = \tilde{i}_{cq}$
Compensation de l'énergie réactive	$i_{fd}^{ref} = 0 + i_{dc}$	$i_{fq}^{ref} = \bar{i}_{cq}$
Compensation des harmoniques de courant et de l'énergie réactive	$i_{fd}^{ref} = \tilde{i}_d + i_{dc}$	$i_{fq}^{ref} = i_{cq}$

Tableau (III .7) : Modes de compensation de la commande dite du référentiel lié au Synchronisme

$$\begin{bmatrix} i_{f0}^{ref} \\ i_{f\alpha}^{ref} \\ i_{f\beta}^{ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\cos(\hat{\theta}) \\ \sin(\hat{\theta}) & \cos(\hat{\theta}) & 0 \\ -\cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{fd}^{ref} \\ i_{fq}^{ref} \\ i_{cq\alpha} \\ i_{cq\beta} \end{bmatrix} \quad (III.49)$$

Ainsi, après le choix des paramètres de commande, il est aisé de remonter aux courants de référence par la transformation inverse de Concordia :

$$\begin{bmatrix} i_{f1}^{ref} \\ i_{f2}^{ref} \\ i_{f3}^{ref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{f\alpha}^{ref} \\ i_{f\beta}^{ref} \\ i_{f0}^{ref} \end{bmatrix} \quad (III.50)$$

Dans le cas d'un onduleur à quatre bras le courant i_{fn}^{ref} est égal a :

$$i_{fn}^{ref} = -(i_{f1}^{ref} + i_{f2}^{ref} + i_{f3}^{ref}) \quad (III.51)$$

La figure (III.14) illustre cet algorithme de commande.

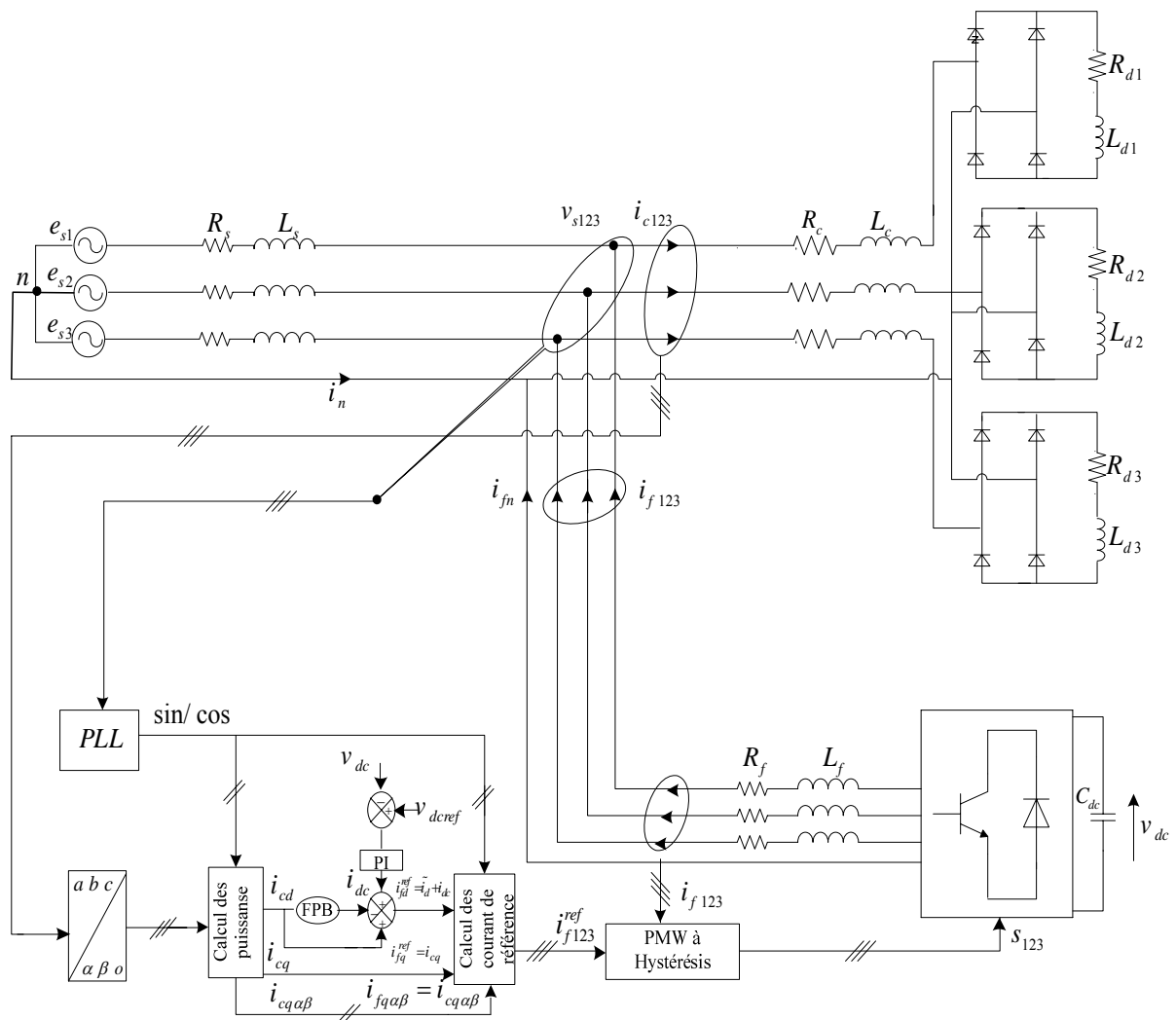


Figure (III.14) : Commande directe d'un filtre actif de puissance par la méthode du référentiel lié au synchronisme

II.7.1 Simulation de l'ensemble réseau-charge non-linéaire-filtre actif de puissance

II.7.1.1 Topologie à trois bras avec condensateurs à point milieu

- **Cas d'un système équilibré**

Nous présentons dans la suite de ce paragraphe les résultats de simulation du système complet-réseau électrique-charge non-linéaire-filtre actif de puissance pour les deux topologies. Ainsi, nous commencerons par présenter dans la figure (III.15) les résultats de simulation obtenus lorsque nous utilisons la commande SFR, appliquée à un filtre actif de puissance à trois bras avec condensateurs à point milieu pour compenser un réseau électrique équilibré, à quatre fils.

- La bande d'hystérésis est égale à 1A ;
- Pour tester la boucle de contrôle de tension, nous avons imposé une référence de 1400V.

La figure (III.15) présente les résultats de simulation obtenus lorsque nous utilisons la commande du référentiel lié au synchronisme SRF pour un filtre actif de puissance à trois bras avec condensateurs à point milieu afin de compenser un réseau électrique équilibré à quatre fils. Le THD après filtrage est égal à 2.87 %.

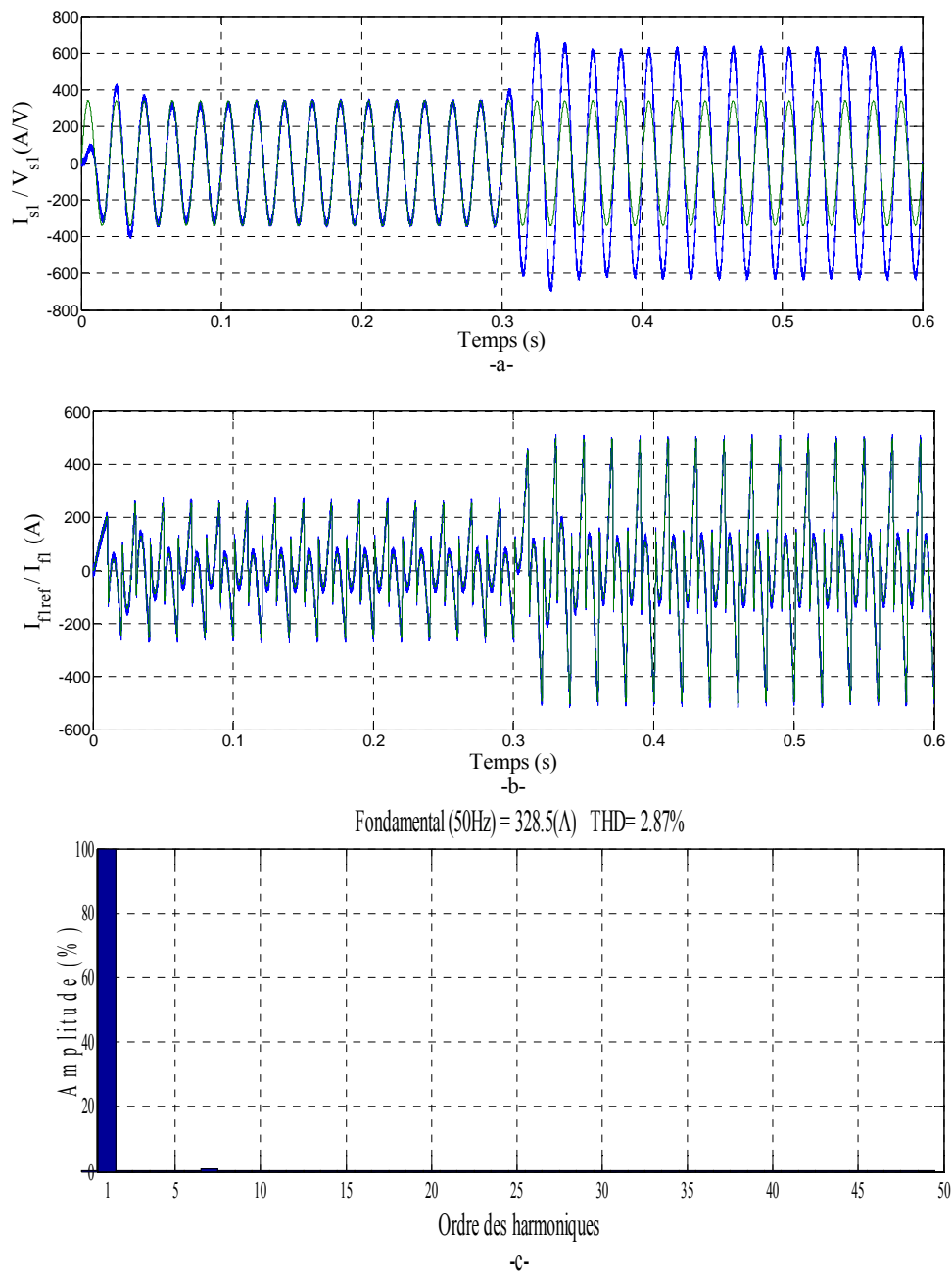


Figure (III.15) : Compensation des courants harmoniques des trois ponts redresseurs alimentant chacun une charge R-L en utilisant un filtre actif de puissance à trois bras avec condensateurs à point milieu et la commande du référentiel lié au synchronisme (charge équilibrée), a) Courant et tension de la première phase de la source après le filtrage, b) Courant injecté par le filtre actif de puissance à trois bras avec condensateurs à point milieu et sa référence, c) Spectre harmonique du courant

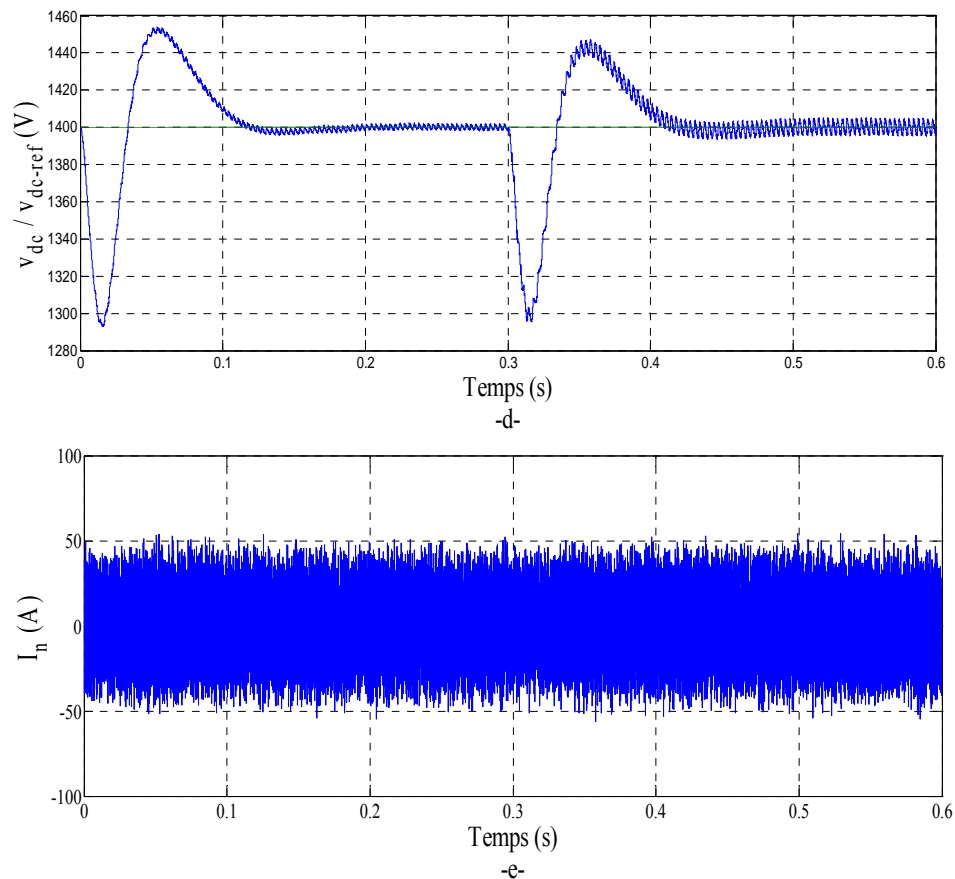


Figure (III.15) (suite) : Compensation des courants harmoniques des trois ponts redresseurs alimentant chacun une charge R-L en utilisant un filtre actif de puissance à trois bras avec condensateurs à point milieu et la commande du référentiel lié au synchronisme (charge équilibrée), d) Tension aux bornes du condensateur, e) Courant du neutre après le filtrage

• Cas d'un système déséquilibré

Les résultats de simulation présentés dans la figure (III.16) concernent le comportement du filtre lorsque la charge polluante est déséquilibrée.

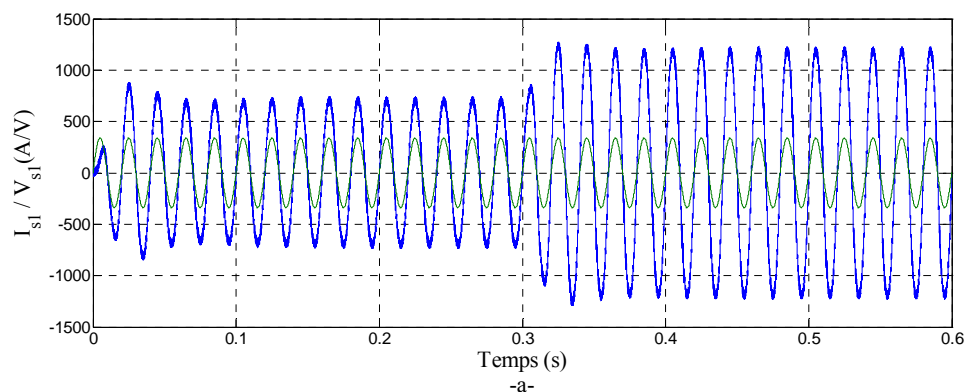


Figure (III.16) : Compensation des courants harmoniques des trois ponts redresseurs alimentant chacun une charge R-L en utilisant un filtre actif de puissance à trois bras avec condensateurs à point milieu et la commande du référentiel lié au synchronisme (charge déséquilibrée), a) Courant et tension de la première phase de la source après le filtrage

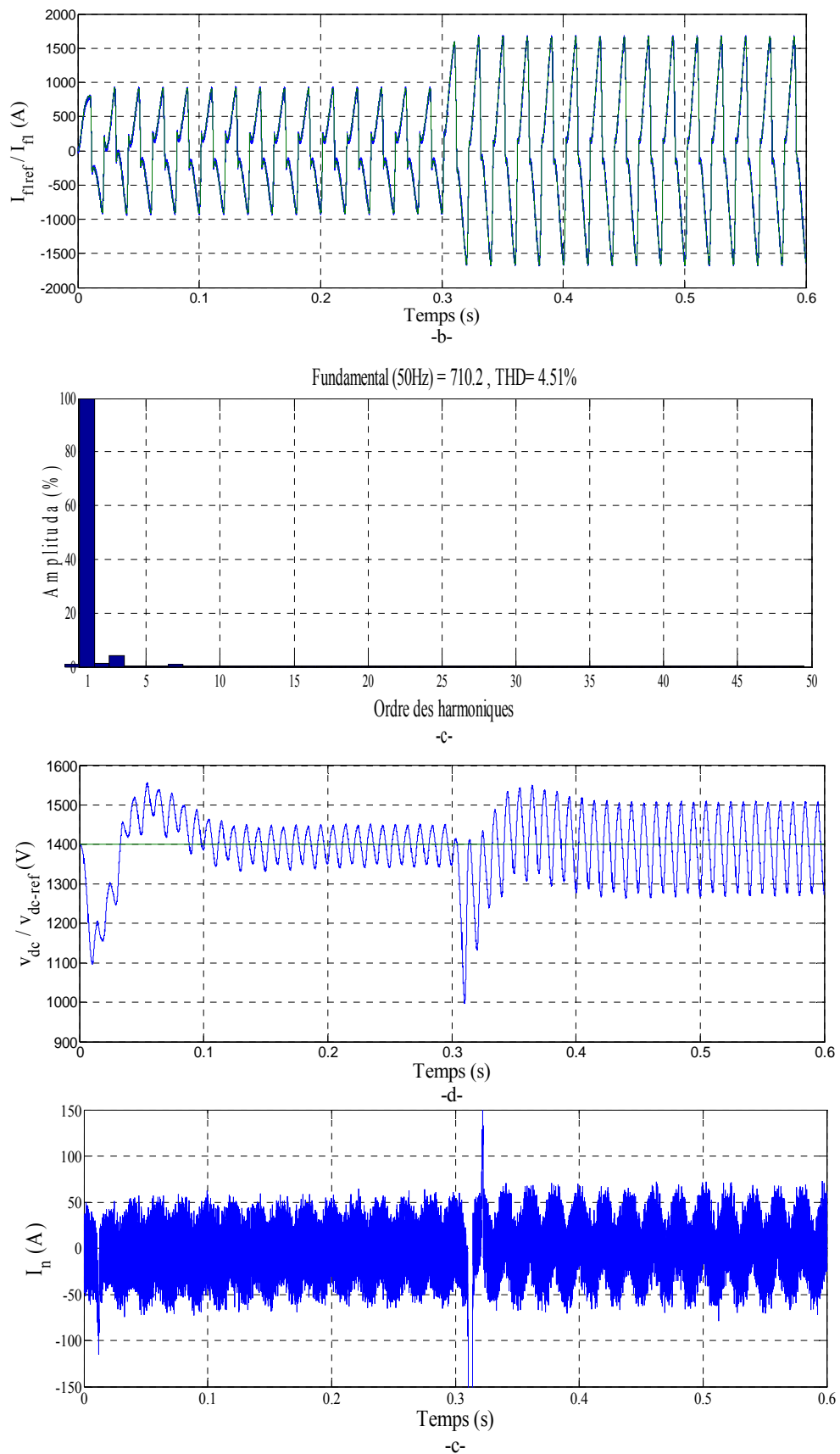


Figure (III.16) (suite) : Compensation des courants harmoniques des trois ponts redresseurs alimentant chacun une charge R-L en utilisant un filtre actif de puissance à trois bras avec condensateurs à point milieu et la commande du référentiel lié au synchronisme (charge déséquilibrée), b) Courant injecté par le filtre actif de puissance à trois bras avec condensateurs à point milieu et sa référence, c) Spectre harmonique du courant, d) Tension aux bornes du condensateur, e) Courant du neutre après le filtrage

II.7.1.2 Topologie à quatre bras

- Cas d'un système équilibré

La figure (III.17) présente les résultats de simulation obtenus lorsque nous utilisons la commande du référentiel lié au synchronisme pour un filtre actif de puissance à quatre bras afin de compenser un réseau électrique équilibré à quatre fils. Le THD après filtrage est égal à 2.34%.

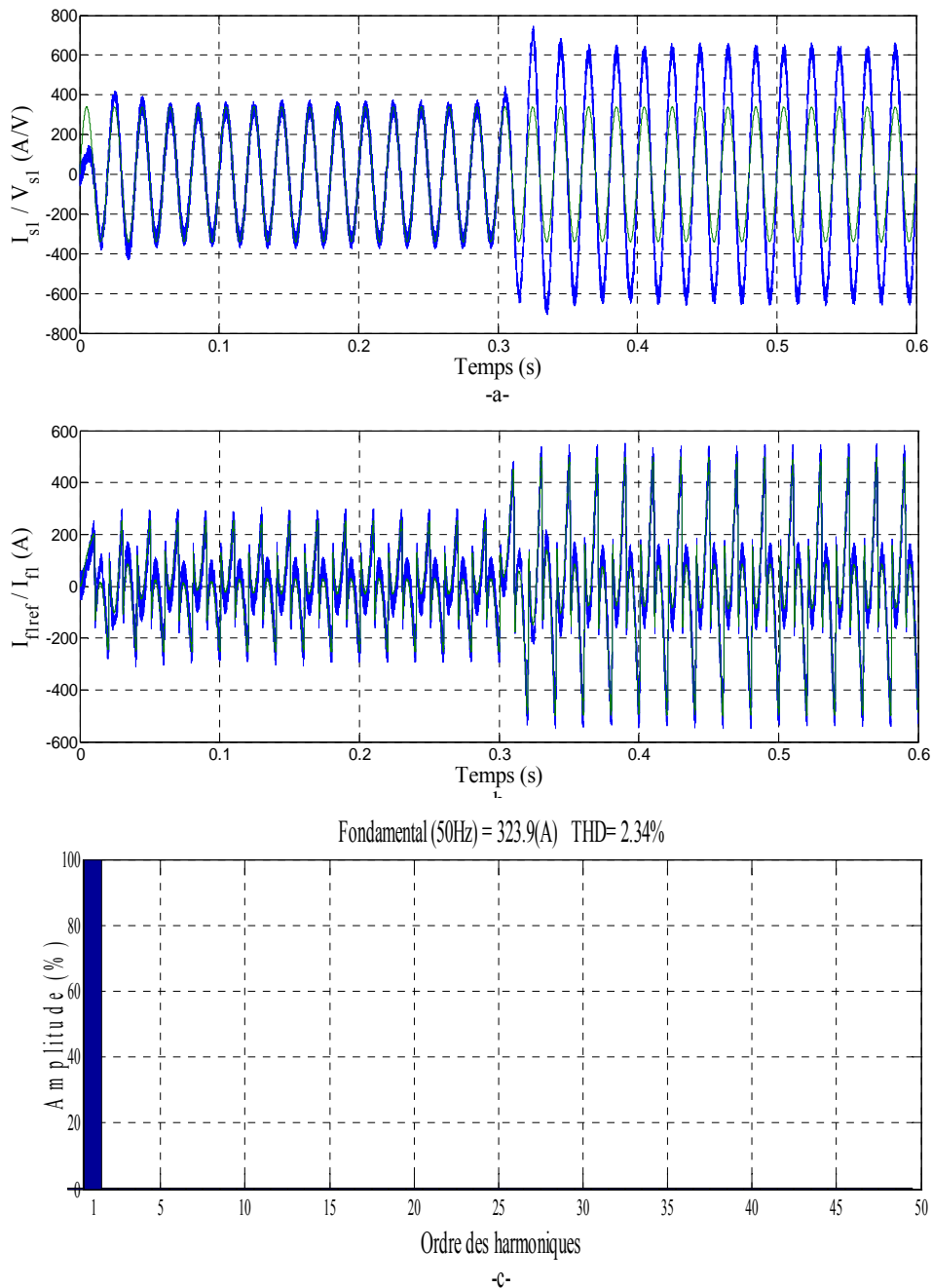


Figure (III.17) : Compensation des courants harmoniques des trois ponts redresseurs alimentant chacun une charge R-L en utilisant un filtre actif de puissance à quatre bras et la commande du référentiel lié au synchronisme (charge équilibrée), a) Courant et tension de la première phase de la source après le filtrage, b) Courant injecté par le filtre actif de puissance à quatre bras et sa référence, c) Spectre harmonique du courant

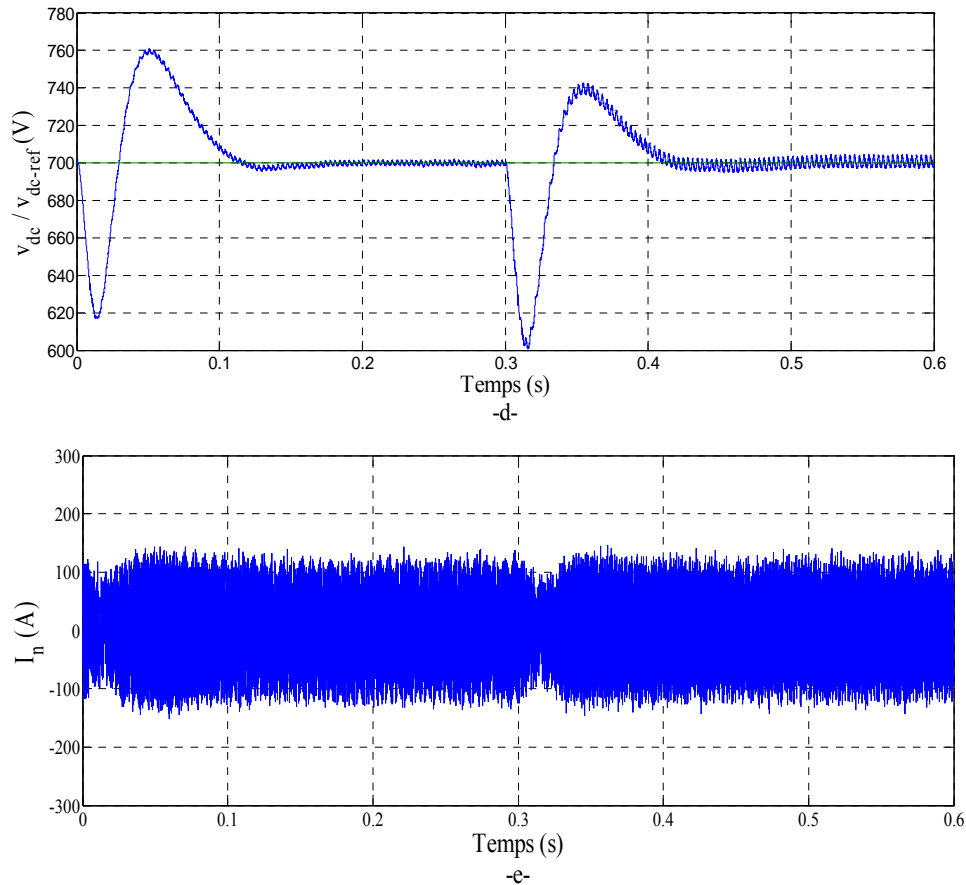


Figure (III.17) (suite): Compensation des courants harmoniques des trois ponts redresseurs alimentant chacun une charge R-L en utilisant un filtre actif de puissance à quatre bras et la commande du référentiel lié au synchronisme (charge équilibrée), d) Tension aux bornes du condensateur, e) Courant du neutre après filtrage.

- **Cas d'un système déséquilibré**

Les mêmes simulations de la figure (III.17) sont réalisées aussi pour une charge déséquilibrée. Les résultats de simulation ainsi obtenus sont groupés dans la figure (III.18).

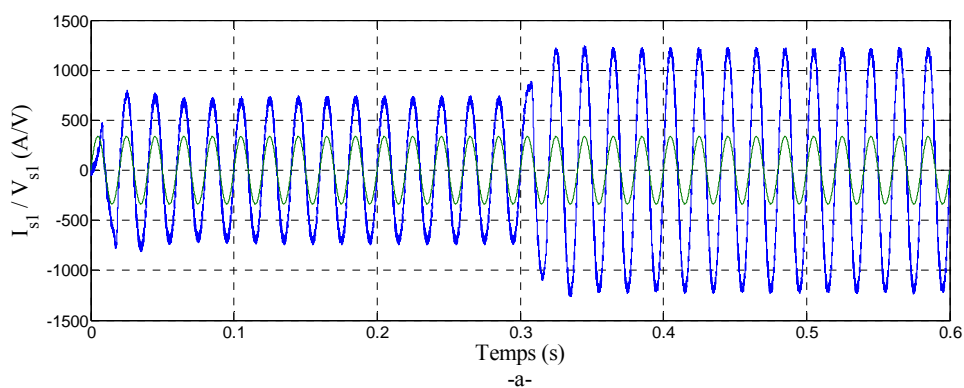


Figure (III.18) : Compensation des courants harmoniques des trois ponts redresseurs alimentant chacun une charge R-L en utilisant un filtre actif de puissance à quatre bras et la commande du référentiel lié au synchronisme (charge déséquilibrée), a) Courant et tension de la première phase de la source après le filtrage

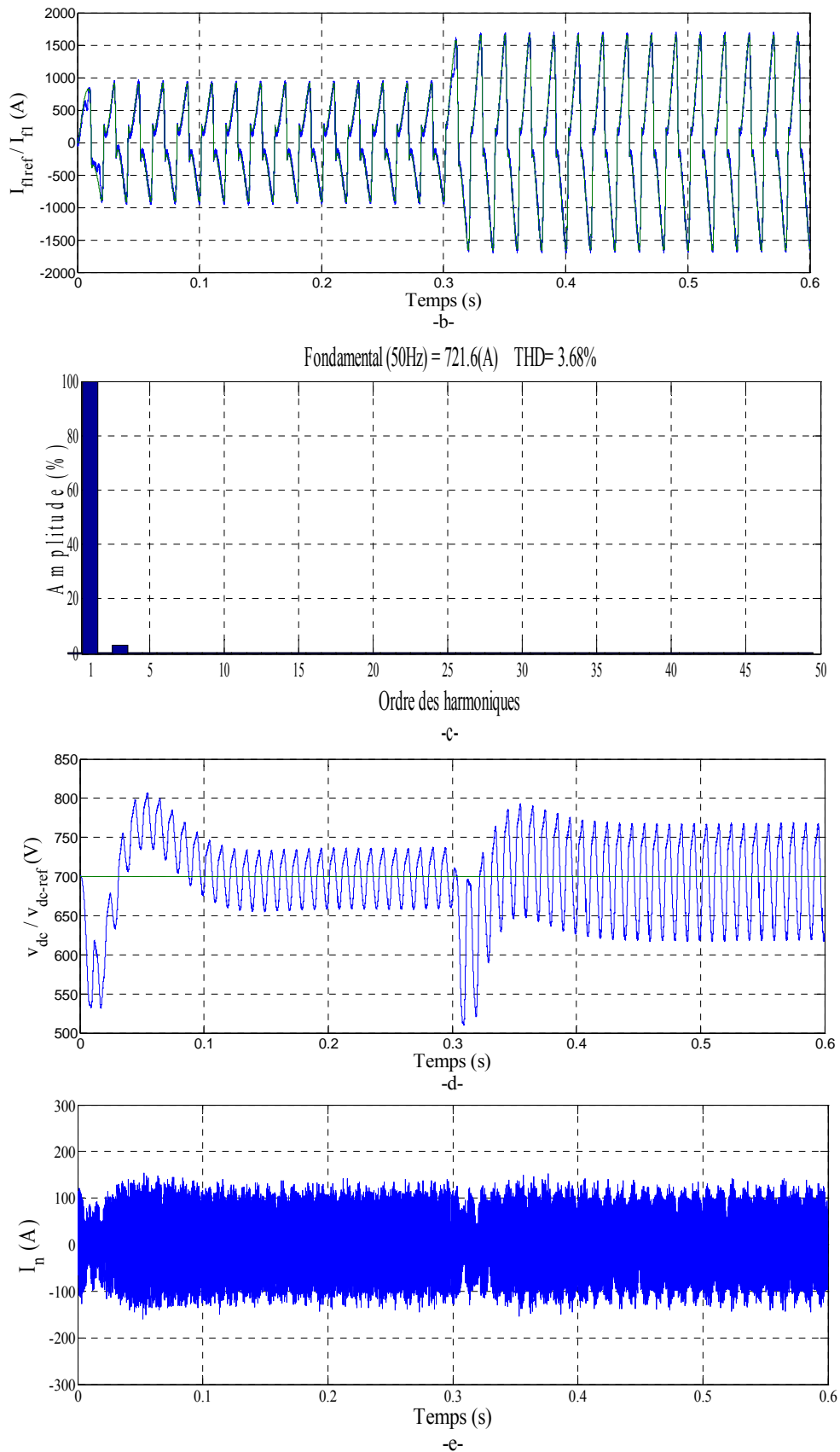


Figure (III.18) (suite) : Compensation des courants harmoniques des trois ponts redresseurs alimentant chacun une charge R-L en utilisant un filtre actif de puissance à quatre bras et la commande du référentiel lié au synchronisme (charge déséquilibrée), b) Courant injecté par le filtre actif de puissance à quatre bras et sa référence, c) Spectre harmonique du courant, d) Tension aux bornes du condensateur, e) Courant du neutre après le filtrage

III.8. Interprétations des résultats

III.8.1. Cas d'une charge équilibrée

III.8.1.1 Filtre à trois bras avec condensateurs à point milieu

D'après les résultats de simulation obtenus sur les figures (III.5,10,15) montrant la compensation en utilisant les méthodes de commandes pqo, pqr et SFR appliquées à un filtre actif de puissance à trois bras avec condensateurs à point milieu, on remarque que :

Après compensation, le courant de la première phase de la source est quasi sinusoïdal et en phase avec la tension de phase correspondante ; ainsi le facteur de puissance est unitaire coté réseau.

Le taux de distorsion harmonique (THD) du courant de la source de valeur 33.32% avant le filtrage se réduit après le filtrage aux valeurs du tableau suivant:

Méthode	pqo	pqr	SFR
THD (%)	2.90	2.89	2.87

Donc les résultats de simulation des trois stratégies de commande appliquées à la topologie de filtre à trois bras avec condensateurs à point milieu montrent que le filtre actif donne des résultats satisfaisants. Du point de vue du THD, les trois méthodes donnent des taux de distorsion harmonique $THD < 5\%$, qui répond bien aux normes internationales.

La tension du bus continu est bien régulée à sa valeur de référence. Donc le régulateur de tension assure une erreur statique nulle, mais avec un régime transitoire ayant un temps de réponse relativement lent et un dépassement inférieur à 7% de la valeur de référence. A noter que l'instabilité de la tension du bus continu a une grande influence sur le fonctionnement du filtre actif.

III.8.1.2 Filtre à quatre bras

D'après les résultats de simulation obtenus sur les figures (III.7,12,17) montrant la compensation en utilisant les méthodes de commandes pqo, pqr et SFR appliquées à un filtre actif de puissance à quatre bras, on remarque que :

Pour les différentes méthodes de commande, la compensation permet de garantir à la fois un fonctionnement à facteur de puissance unitaire côté réseau ainsi qu'un courant de ligne quasiment sinusoïdal. Les valeurs du taux de distorsion harmonique (THD) du courant de la source sont indiquées dans le tableau suivant:

Méthode	pqo	pqr	SFR
THD(%)	2.36	2.35	2.34

Indépendamment de la méthode utilisée, une faible valeur du THD est enregistrée. Cette valeur est en accord absolu avec les contraintes imposées par les normes internationales. On peut conclure donc qu'avec un système équilibré, le filtre à quatre bras permet d'offrir de son tour des résultats satisfaisants.

III.8.2. Cas d'une charge déséquilibrée

III.8.2.1 Filtre à trois bras avec condensateurs à point milieu

D'après les résultats de simulation obtenus sur les figures (III.6,11,16) montrant la compensation en utilisant les méthodes de commandes pqo, pqr et SFR appliquées à un filtre actif de puissance à trois bras avec condensateurs à point milieu pour compenser un réseau électrique déséquilibré à quatre fils, on remarque que :

- Il est visible que le déséquilibre de la charge n'affecte pas le fonctionnement à facteur de puissance unitaire. Toutefois une augmentation sensible dans le taux de distorsion harmonique causée par une déformation des tensions aux points de raccordement. Les valeurs du THD en régime déséquilibré sont données dans le tableau suivant :

Méthode	pqo	pqr	SFR
THD(%)	4.56	4.51	4.51

La tension du bus continu suit en moyenne sa valeur de référence mais avec une ondulation plus accentuée et un dépassement plus important. On constate également une augmentation du temps de réponse par rapport à celui observé lorsque le système est équilibré.

Il est remarquable qu'avec la commande SFR, le THD est le plus faible, ceci montre la robustesse de la PLL utilisée.

III.8.2.2 Filtre à quatre bras

D'après les résultats de simulation obtenus sur les figures (III.8,13,18) montrant la compensation en utilisant les méthodes de commandes pqo, pqr et SFR appliquées à un filtre actif de puissance à quatre bras en régime déséquilibré, on remarque que :

La distorsion harmonique introduite par le déséquilibre est moins prononcée par rapport à celle notée avec le filtre à trois bras avec condensateurs à point milieu. Le tableau ci-dessous montre de faibles valeurs du THD en présence du déséquilibre de la charge.

Méthode	pqo	pqr	SFR
THD(%)	3.82	3.96	3.68

Nous remarquons que quelle que soit la commande utilisée, le filtre actif de puissance à quatre bras donne toujours de meilleurs résultats que la commande à trois bras avec condensateurs à point milieu. Le filtre actif de puissance à quatre bras donne toujours de meilleurs résultats car l'onduleur à quatre bras pilote les trois courants de phase et celui du

neutre. Par contre, l'onduleur à trois bras avec condensateurs à point milieu n'en pilote directement que trois courants.

Les résultats des simulations que nous avons présentés montrent que quel que soit la stratégie de commande adoptée et quel que soit la topologie de filtre actif de puissance le THD est toujours inférieur à 5 % comme l'impose les normes internationales.

III.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté trois commandes pour deux topologies de filtre actif de puissance parallèle à structure de tension afin de compenser les harmoniques de courant d'un réseau électrique triphasé à quatre fils.

Nous avons étudié en détail les divers algorithmes permettant le calcul des courants de référence pour les deux topologies. Cette étude montre que la théorie p-q-r fournit les meilleures caractéristiques et donne la meilleure définition des puissances instantanées cette définition assure la conservation des puissances, de plus les puissances instantanées calculées par cette méthode sont linéairement indépendante cela fournit plus de degrés de liberté.

La méthode du référentiel synchrone diffère des autres méthodes par les deux points suivants:

- elle n'exige pas la connaissance de la nature de tension du réseau ;
- elle permet un traitement direct des courants.

Ainsi, l'utilisation d'un système de détection de la tension directe du réseau (PLL) permet de simplifier les méthodes de commande et rendre ces méthodes universelles et pour n'importe quelle forme de tension.

De plus, nous avons constaté que quelle que soit la topologie utilisée, la commande du référentiel lié au synchronisme (SRF) donne le meilleur THD, suivie de la commande p-q-r et la commande p-q-o. La commande du référentiel lié au synchronisme (SRF) a donné le meilleur résultat car les harmoniques de tension ne sont pas présents dans ce type de commande, grâce à la P.L.L. utilisée qui immunise complètement l'algorithme de contrôle contre ce genre de perturbation.

Chapitre IV

Mise en parallèle des filtres actifs de puissance

IV.1 Introduction

Nous allons dans ce chapitre étudier la mise en parallèle des filtres actifs de puissance. Cette solution est utilisée afin de compenser les réseaux électriques triphasés confrontés aux courants harmoniques trop importants. Les filtres actifs classiques ne peuvent-êre utilisés dans ce cas, à cause des limitations technologiques qui pèsent sur des composants semi-conducteurs, particulièrement au niveau des courants à commuter.

Ainsi, nous allons commencer par une étude théorique de cette structure particulière et voir si des interactions apparaissent entre les onduleurs triphasés parallèles qui la constituent.

Pour terminer, nous présentons les résultats des simulations obtenus pour différentes topologies de mise en parallèle des filtres actifs de puissance pour des configurations du réseau triphasé à trois et quatre fils [17].

IV.2 Topologies de mise en parallèle des filtres actifs de puissance

IV.2.1 Présentation

Les topologies étudiées sont constituées de plusieurs convertisseurs bidirectionnels mis en parallèle et dont le bus continu est généralement commun.

IV.2.2 Topologies de mise en parallèle de deux filtres actifs de puissance pour un réseau électrique à trois fils

Nous rencontrons deux familles de topologies de mise en parallèles. dans les réseaux électriques à trois fils. La première est constituée d'onduleurs à trois bras et le second est constituée d'onduleurs à deux bras avec condensateurs à point milieu comme celles illustrées sur les figures (IV.1-2).

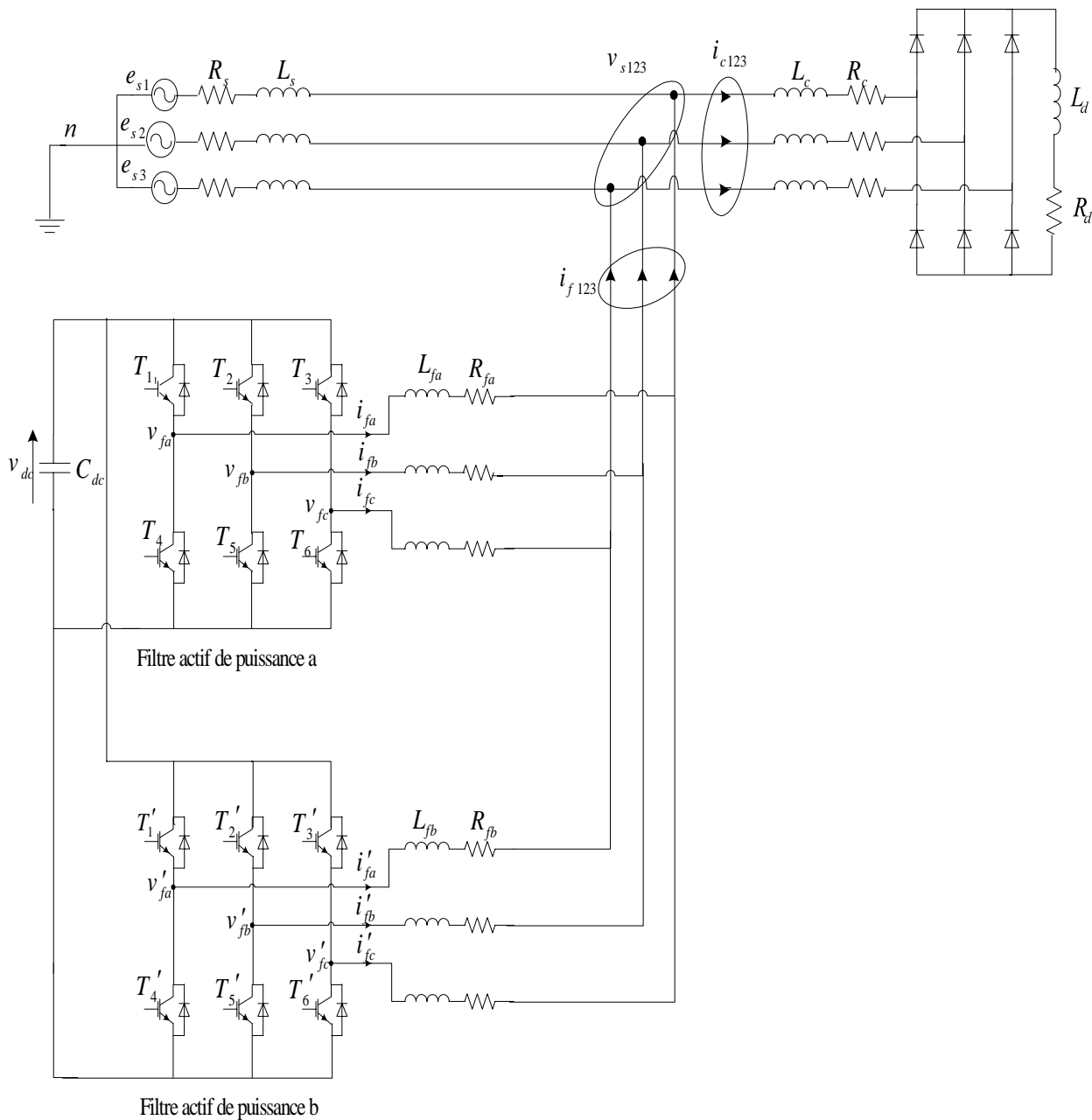


Figure (IV.1) : Mise en parallèle de deux filtres actifs à trois bras

Nous allons étendre l'idée à la topologie à deux bras avec condensateurs à point milieu. Le filtre de puissance ainsi formé et constitué de deux onduleurs à deux bras avec condensateurs à point milieu formant un filtre actif de puissance, comme le montre la figure (IV.2).

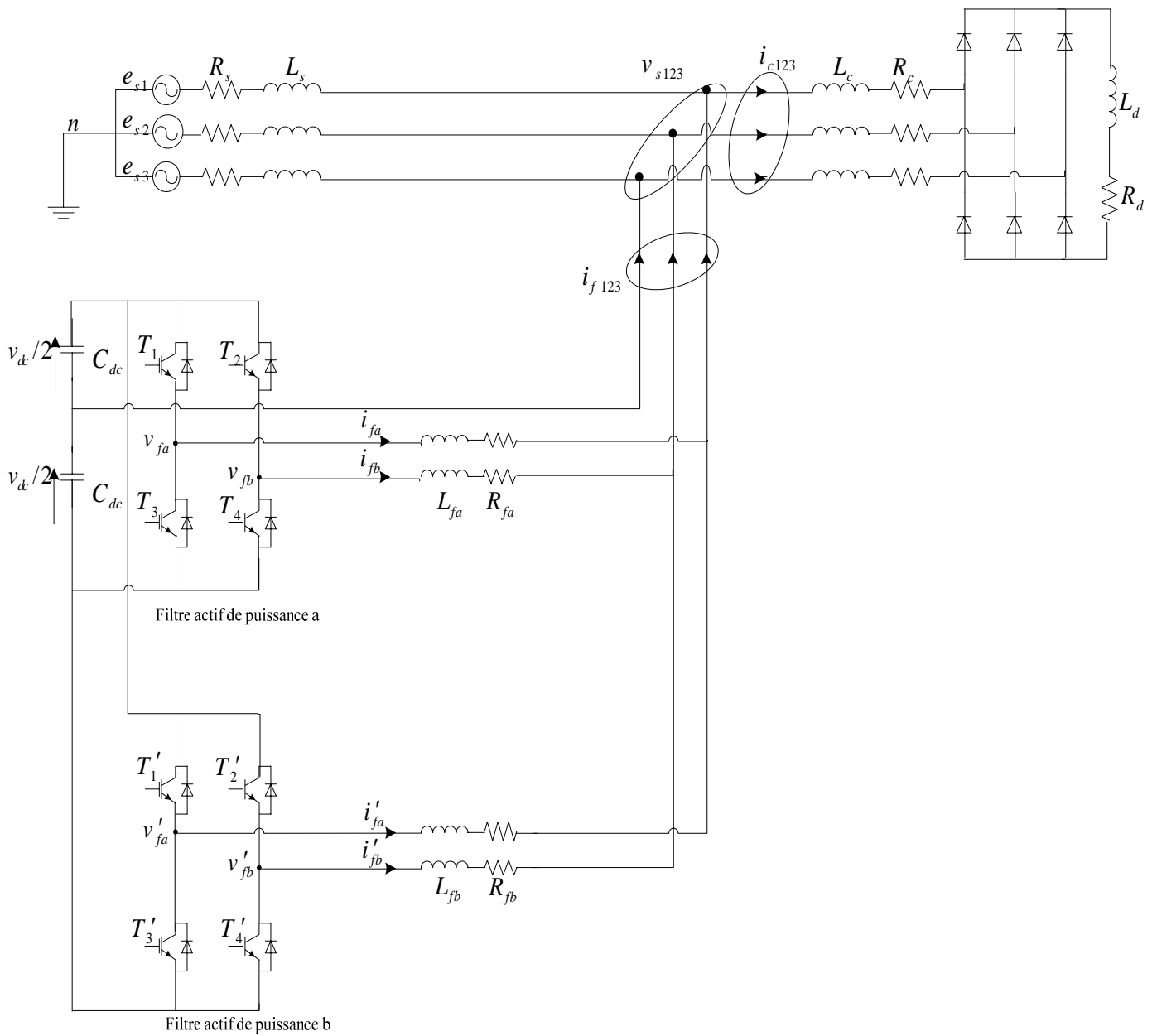


Figure (IV.2) : Mise en parallèle de deux filtres actifs à deux bras avec condensateurs à point milieu

IV.2.3 Topologies de mise en parallèle de deux filtres actifs de puissance pour un réseau électrique à quatre fils

Nous allons maintenant présenter les deux topologies de filtres parallèles généralement utilisées pour les réseaux électriques à quatre fils.

La première est constituée d'onduleurs à quatre bras et le second est constituée d'onduleurs à trois bras avec condensateurs à point milieu comme celles illustrées sur les figures (IV.3-4).

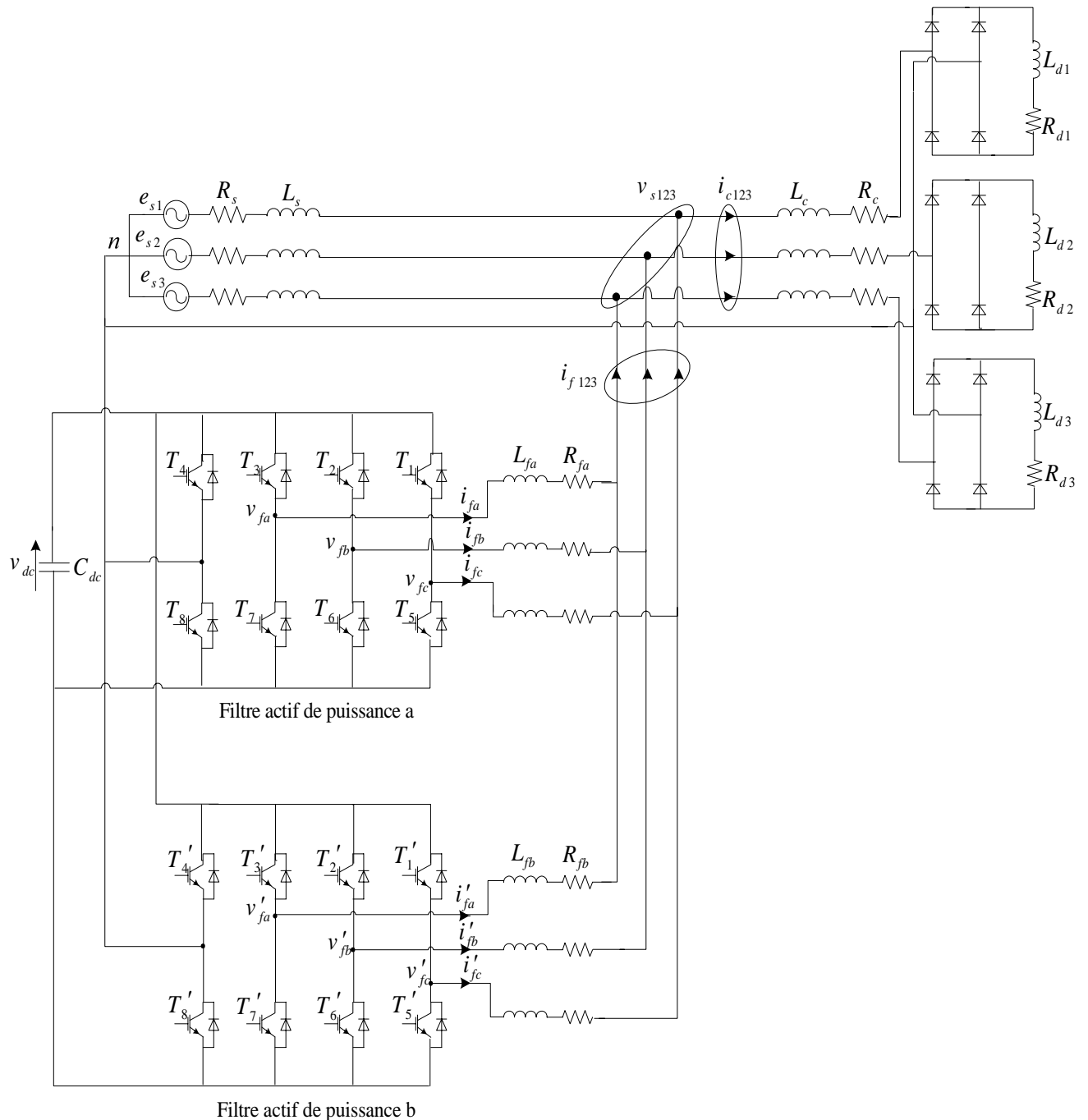


Figure (IV.3) : Mise en parallèle de deux filtres actifs à quatre bras

IV. 3 Commande de la mise en parallèle des filtres actifs de puissance

Dans la littérature [20], [21], nous rencontrons deux familles de topologies de la mise en parallèle. La première est constituée d'onduleurs à trois bras pour les réseaux électriques à trois fils et le second est constituée d'onduleurs à quatre bras pour les réseaux électriques à quatre fils. De plus, pour ces deux topologies [21] nous distinguons une commande dite de type A lorsque les commandes des onduleurs sont indépendantes et de type B lorsqu'elle est commune a tous les onduleurs.

La particularité de la commande que nous allons exposer est d'identifier les courants harmoniques de la charge non-linéaire et de réguler la capacité commune a tous les onduleurs en une seul fois. Cependant, le signal de référence obtenu sera par la suite divisé par n, le nombre d'onduleurs utilisés, afin d'obtenir une autonomie sur les boucles de contrôle.

L'avantage de cette technique, comme nous le verrons plus loin, est de permettre de faire fonctionner indépendamment chaque onduleur malgré une partie commune pour extraire les références. Ceci permet de faire fonctionner ou de mettre en arrêt n'importe quel onduleur sans influencer le fonctionnement des autres onduleurs.

Les stratégies de commande que nous allons utiliser sont la commande directe basée sur la théorie du "synchronous reference frame", pour le cas des réseaux électriques a trois fils comme le montre la figure (IV.5) et la stratégie de commande directe basée sur la théorie du "synchronous reference frame" extraite de la théorie du "cross-vector", pour les réseaux électriques à quatre fils comme le montre la figure (IV.6).

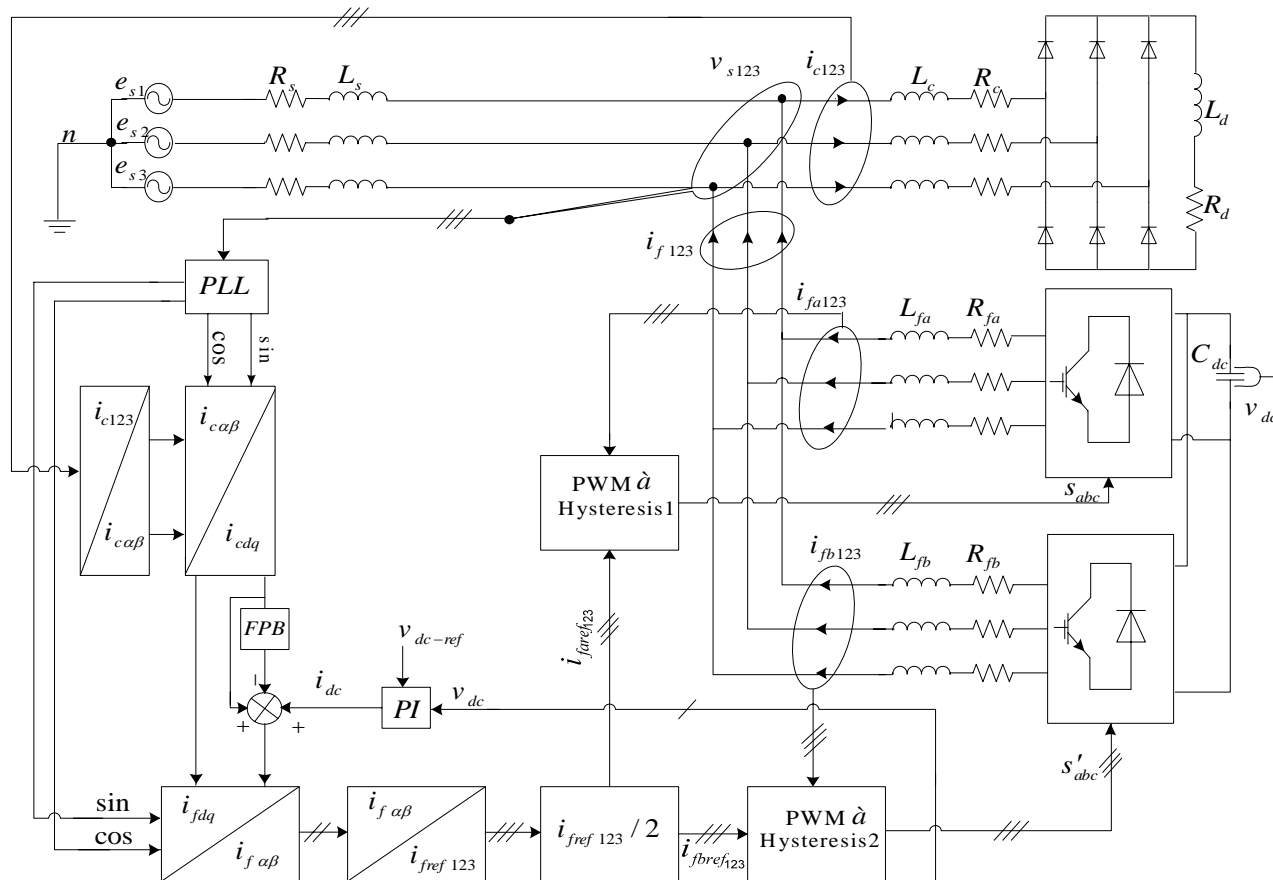


Figure (IV.5) : Commande de la mise en parallèle de deux filtres actifs de puissance à trois bras basée sur la théorie du référentiel lié au synchronisme

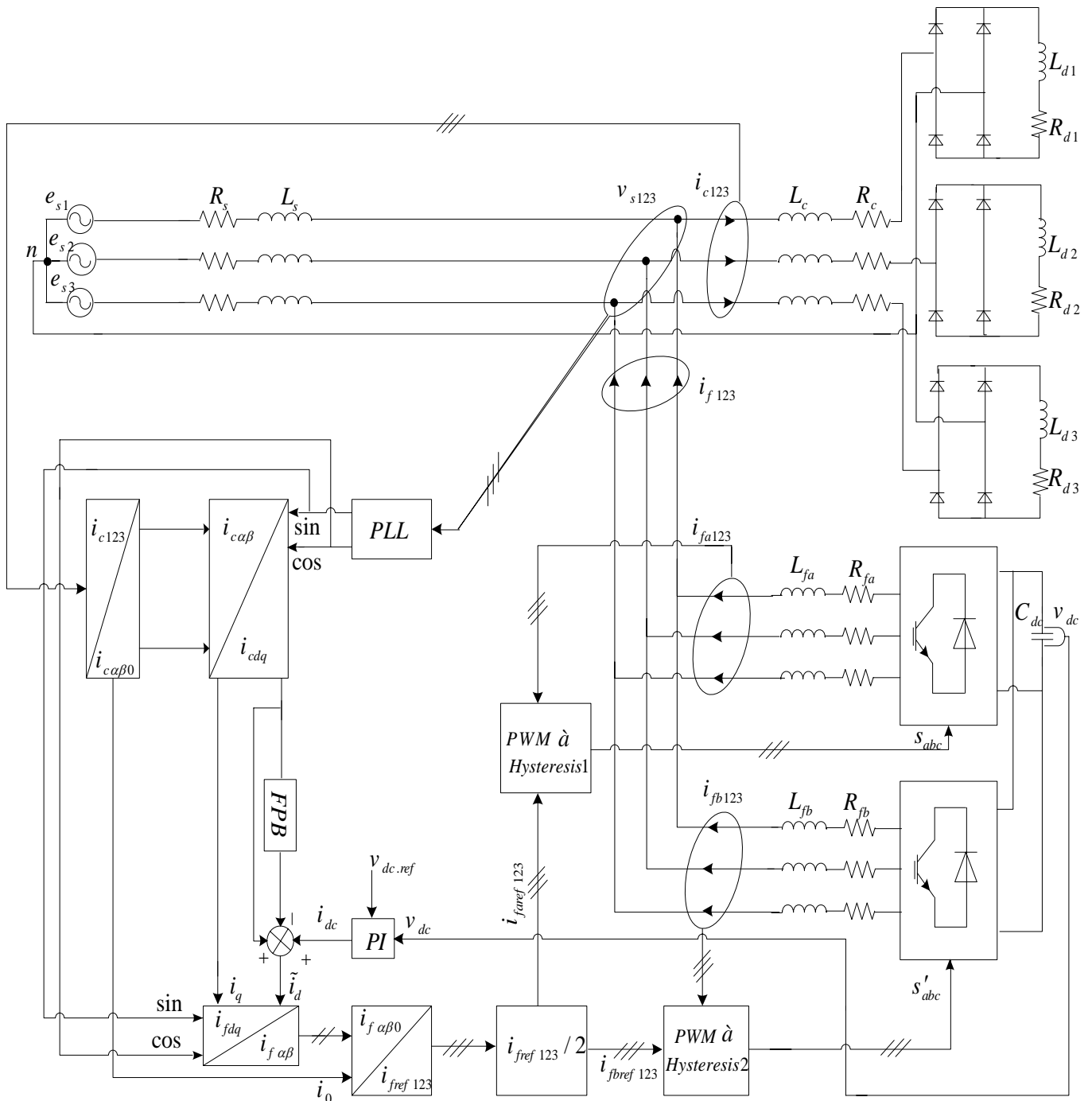


Figure (IV.6) : Commande de la mise en parallèle de deux filtres actifs de puissance à quatre bras basée sur la théorie du référentiel lié au synchronisme

De plus, nous remarquons qu'après l'identification des courants de référence, ces derniers sont divisés par deux. Cela a pour avantage d'annuler le courant homopolaire qui circule entre les onduleurs. De plus, comme nous l'avons précisé, cette division du courant de référence nous permet de faire fonctionner chaque onduleur de manière indépendante. Par conséquent, chaque onduleur aura sa propre boucle de contrôle.

Pour notre cas une boucle de courant utilisant un simple contrôle par hystérésis, ce qui nous permet de faire fonctionner ou d'arrêter n'importe quel onduleur sans perte de contrôle.

Nous remarquons que la commande de chaque structure modulaire contient un FPB d'ordre 2. Ce dernier permet d'obtenir une élimination plus ou moins suffisante de la composante continue, car : Pour obtenir une extraction satisfaisante, le régime dynamique est lent. En général, la fréquence de coupure est choisie basse, entre 5 et 35 Hz, ce qui engendre une instabilité du filtre actif de puissance lors de variation rapide de la charge [21].

IV.4 Résultats de simulation pour le réseau électrique à trois fils

Nous présentons dans ce paragraphe les résultats de simulation du système complet-réseau électrique- charge non-linéaire-filtre actif de puissance pour les deux topologies de la figure (IV.1-2) en utilisant la stratégie de commande de la figure (IV.5).

Dans un premier temps, nous avons simulé le réseau électrique triphasé à trois fils d'une puissance apparente S_n égale à 400 kVA, et sa charge non linéaire, sans y connecter le filtre actif.

Le tableau (II.4) regroupe l'ensemble des paramètres du réseau et de la charge polluante utilisés dans la simulation.

v_{seff} [V]	f [HZ]	R_s [mΩ]	L_s [μH]	R_c [mΩ]	L_c [μH]	R_d [Ω]	L_d [μH]
230	50	1.59	45.56	2.73	23.19	0.79	2.6

Tableau (IV.1) : Paramètres de simulation

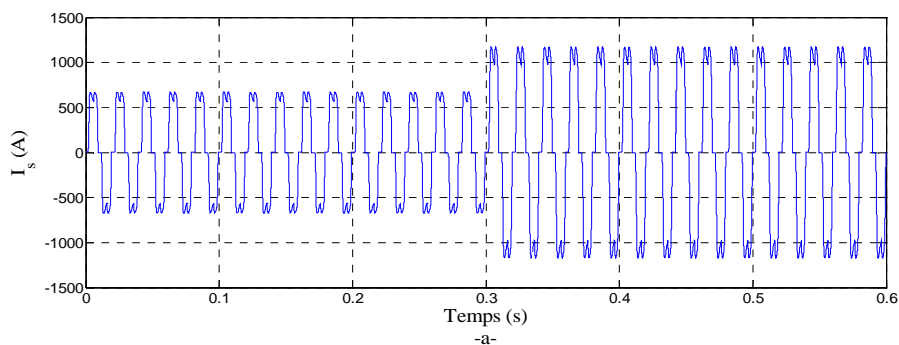


Figure (IV.7) : Courant de ligne généré par la charge non-linéaire avant le filtrage

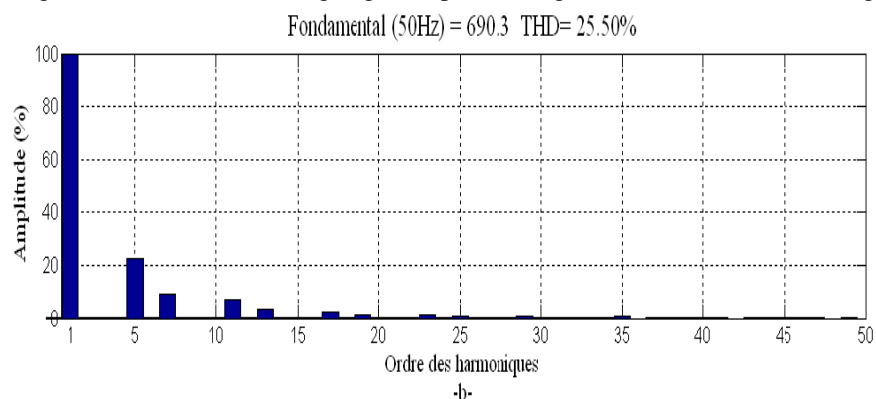


Figure (IV.8) : Spectre harmonique du courant de la source avant le filtrage

La figure précédente présente le courant de la charge de la première phase et son spectre harmonique. Le THD en courant pour cette charge est de 25,5 % pour une durée d'observation de 0.6 s. Le but du filtrage actif est de ramener ce THD à une valeur inférieure à 5 %.

IV.4.1 Condition de simulation

Les résultats de simulation présentés par les figures (IV.9-10), ont été réalisés sous les conditions suivantes :

- L'identification des courants de référence du filtre est basée sur la méthode du repère synchrone (SRF) ;
- La bande d'hystérésis est égale à 1A ;
- La référence de la tension continue est fixée à 700V pour la première topologie et à 1400V pour la seconde topologie ;
- Pour montrer l'effet d'une variation de la charge polluante sur les performances du filtre, une diminution de la résistance de charge du redresseur est effectuée à $t=0.3s$;
- La fréquence de coupure du régulateur de la tension continue est fixée à $f_c = 15Hz$.

IV.4.1.1 Topologie à trois bras

Dans ce paragraphe, nous allons présenter les résultats de simulation obtenus pour la topologie présenté par la figure (IV.1).

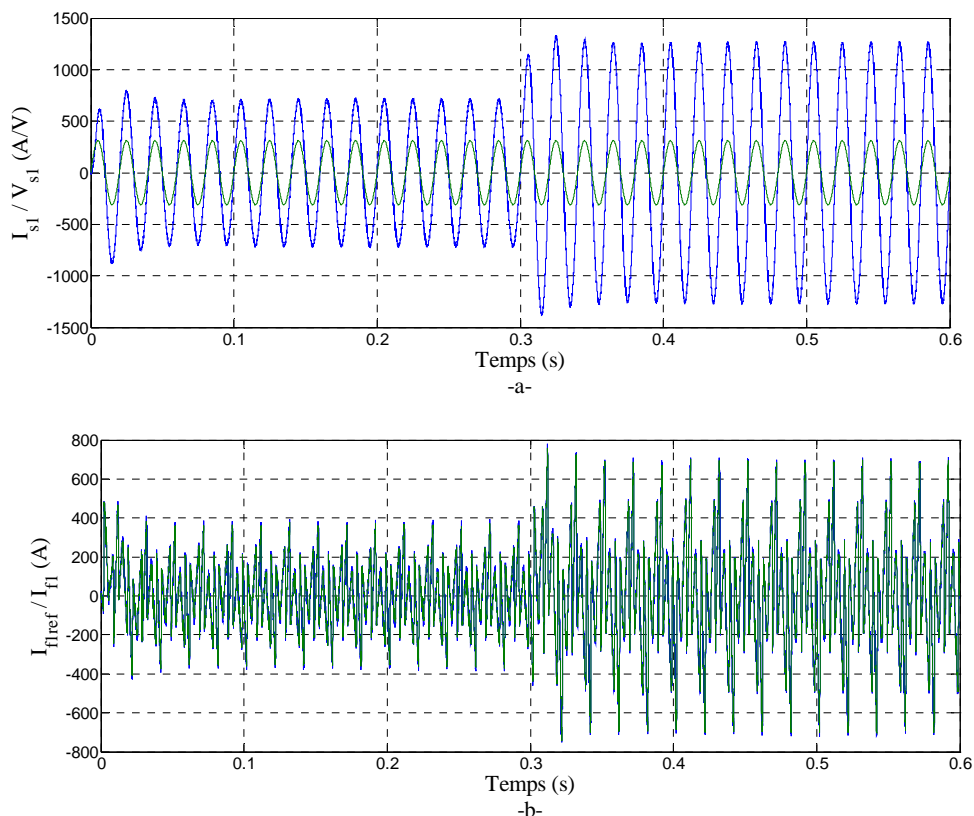


Figure (IV.9) : Compensation des courants harmoniques d'un pont redresseur alimentant une charge R-L en utilisant la mise en parallèle de deux filtres actifs de puissance à trois bras et une commande directe SRF, a) Tension et courant de la première phase de la source après le filtrage, b) Courant total injecté par l'ensemble des deux filtres actifs de puissance à trois bras et sa référence

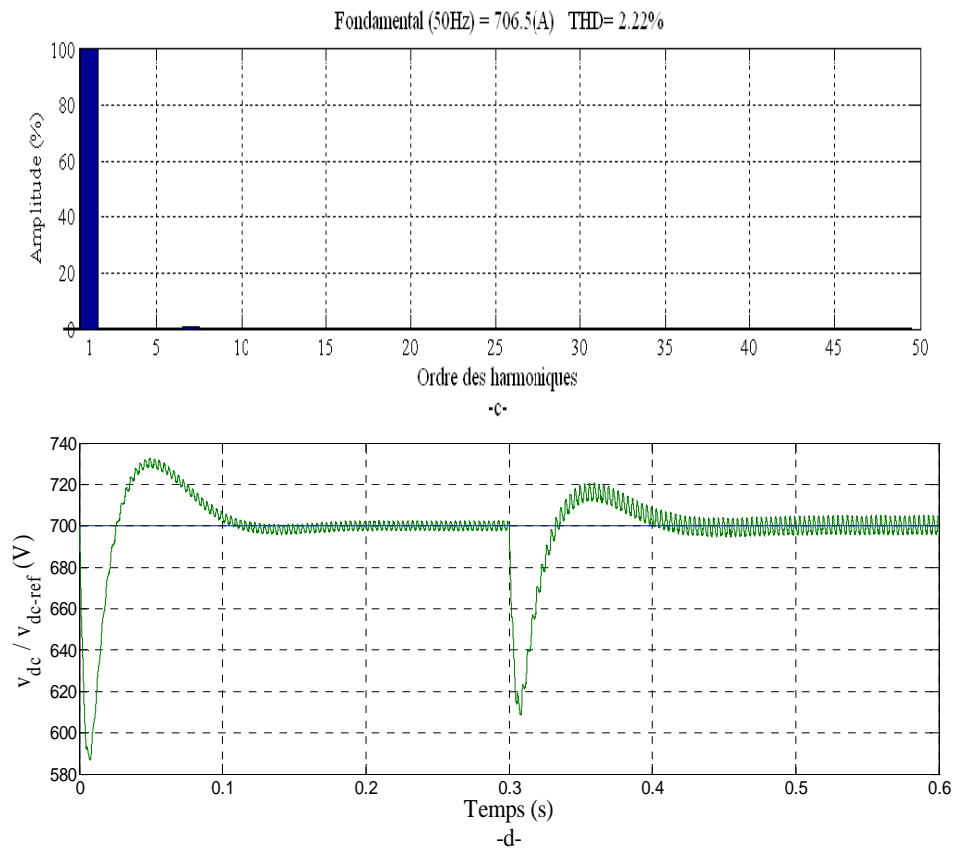


Figure (IV.9-suite) : Compensation des courants harmoniques d'un pont redresseur alimentant une charge R-L en utilisant la mise en parallèle de deux filtres actifs de puissance à trois bras et une commande directe SRF, c) Spectre harmonique du courant de la source après le filtrage, d) Tension aux bornes du condensateur

IV.4.1.2 Topologie à deux bras avec condensateurs à point milieu

Nous allons maintenant présenter les résultats de simulation pour la seconde topologie de la figure (IV.2) avec le même système et la même commande.

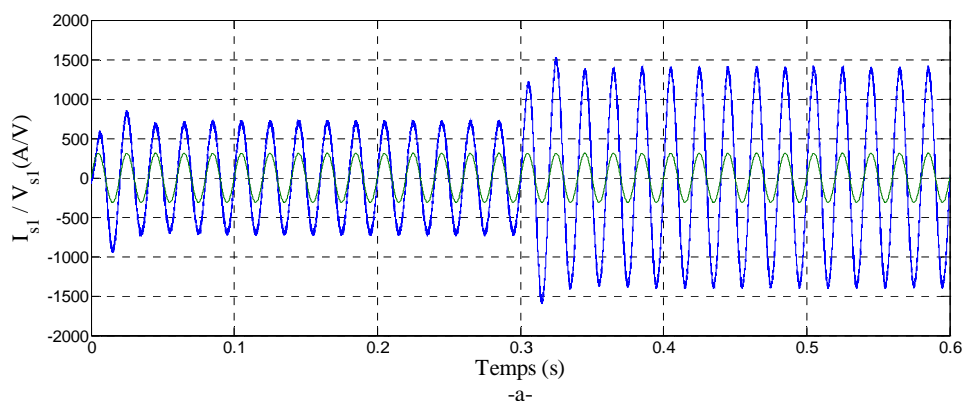


Figure (IV.10) : Compensation des courants harmoniques d'un pont redresseur alimentant une charge R-L en utilisant la mise en parallèle de deux filtres actifs de puissance à deux bras avec condensateurs à point milieu et une commande directe SRF, a) Tension et courant de la première phase de la source après le filtrage

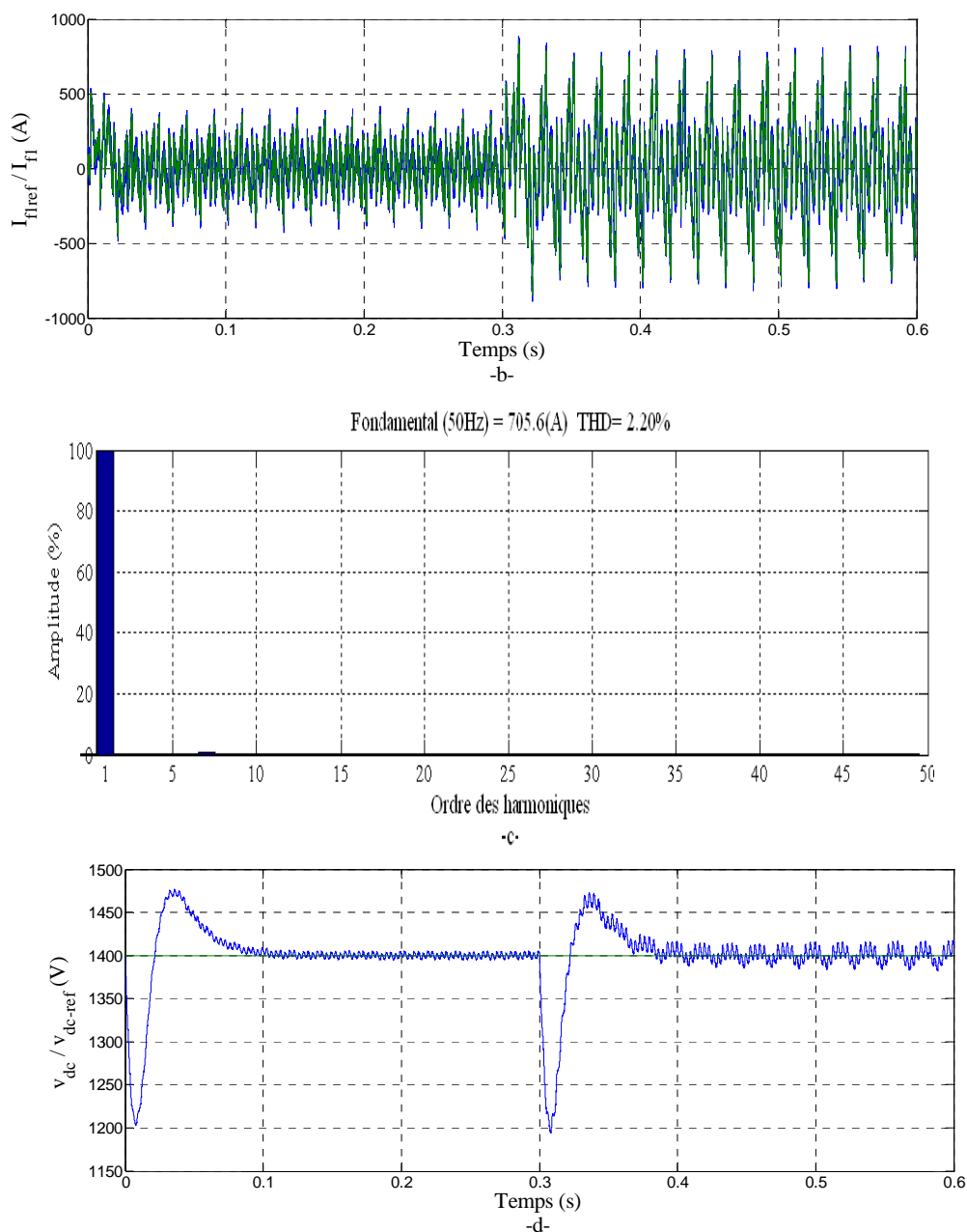


Figure (IV.10-suite) : Compensation des courants harmoniques d'un pont redresseur alimentant une charge R-L en utilisant la mise en parallèle de deux filtre actif de puissance à deux bras avec condensateurs à point milieu et une commande directe SRF, b) Courant total injecté par l'ensemble des deux filtres actifs de puissance à trois bras et sa référence, c) Spectre harmonique du courant de la source après le filtrage, d) Tension aux bornes du condensateur

IV.4.1.3 Interprétations des résultats

Les figures (IV.9-10) illustrent les résultats obtenus en utilisant l'extraction des courants harmoniques basée sur la méthode de la théorie du référentiel lié au synchronisme.

Les figures (IV.9-10.a,c) présentent respectivement la tension et le courant de la première phase de la source après le filtrage et son spectre harmonique. On remarque que la forme de ce courant devient presque sinusoïdal cela confirme l'algorithme d'indentification des courants harmoniques. En outre, on note une bonne correction du facteur de puissance du côté source puisque le courant et la tension sont en phase. Nous avons remarqué aussi que la valeur du THD après filtrage est réduite à 2.22% pour la première topologie et à 2.20% pour la seconde topologie.

Les figures (IV.9-10.b) montrent le courant total injecté par l'ensemble des deux filtres actifs de puissance commandés par PWM avec une bande fixée à 1A. On remarque que le courant généré par le filtre actif suit sa référence ce qui valide l'algorithme de la commande par hystérésis. La figure (IV.9-10.d) montre la tension aux bornes du condensateur de stockage lors du changement de la charge polluante. On remarque que le régulateur PI régule parfaitement cette tension et assure une erreur statique nulle dans le régime permanent.

IV.4.2 Résultats de simulation pour le réseau électrique à quatre fils

Nous allons définir les paramètres d'un réseau électrique triphasé à quatre fils et de ses trois charges non-linéaires. Il s'agit de trois ponts redresseurs monophasés à diodes alimentant chacun une charge RL.

Pour le cas des charges déséquilibrées nous prenons :

v_{seff} [V]	f [HZ]	R_s [m Ω]	L_s [μ H]	R_c [m Ω]	L_c [μ H]
240	50	3.63	14.12	12.87	105.98
R_{d1} [Ω]	L_{d1} [μ H]	R_{d2} [Ω]	L_{d2} [μ H]	R_{d3} [Ω]	L_{d3} [μ H]
0.2	1	0.79	4.8	0.3	4

Tableaux (III.4) : Paramètres du système à simuler (système déséquilibré)

Lorsque le système est équilibré, les paramètres ont pour valeurs :

v_{seff} [V]	f [HZ]	R_s [m Ω]	L_s [μ H]	R_c [m Ω]	L_c [μ H]	R_d [Ω]	L_d [Ω]
240	50	3.63	14.12	12.87	105.98	0.79	4.84

Tableaux (III.5) : Paramètres du système à simuler (système équilibré)

Dans un premier temps, nous avons simulé le réseau électrique triphasé à quatre fils, d'une puissance apparente S_n égale à 400 kVA, et ses trois charges non linéaires monophasées, sans y connecter le filtre actif.

Puisque tous les courants de phase (i_{s1}, i_{s2}, i_{s3}) ont des allures identiques, nous présentons donc uniquement les résultats de simulation d'une seule phase, en l'occurrence la phase 1.

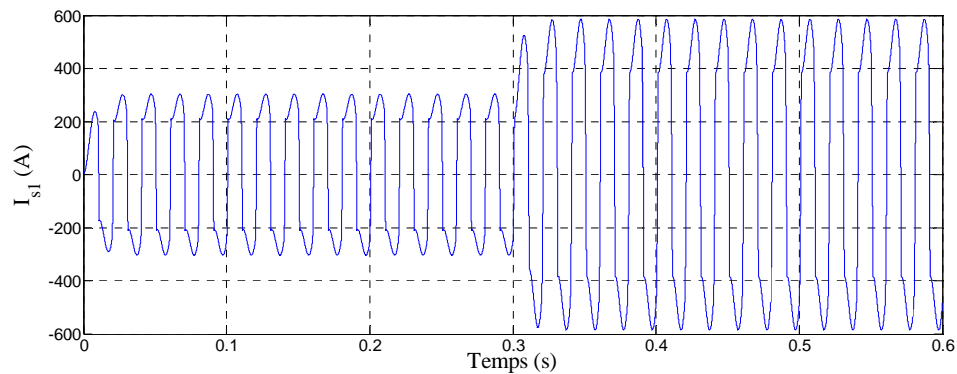


Figure (IV.11) : Courant de la première phase du réseau avant le filtrage

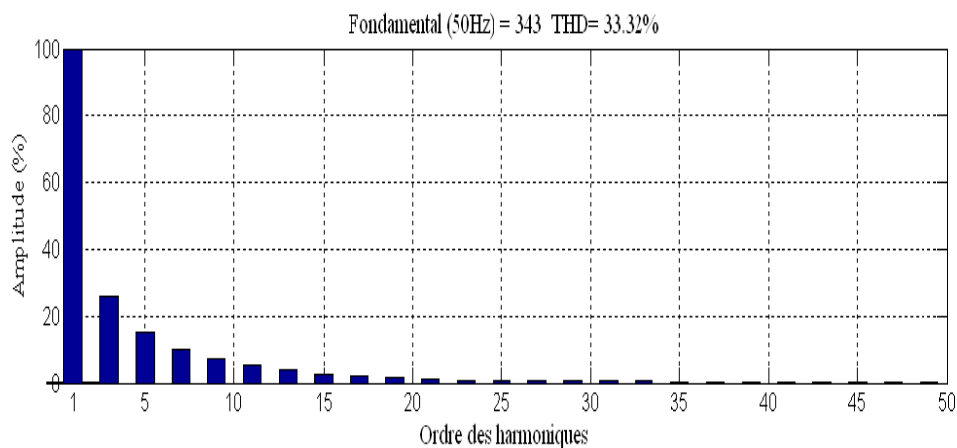


Figure (IV.12) : Spectre harmonique du courant avant le filtrage

Les figures (IV.11-12) présentent le courant de la charge i_{s1} de la première phase et son spectre harmonique. Le THD en courant pour cette charge est de 33,32 %.

IV.4 .2.1 Conductions de simulation

Les résultats de simulation sont présentés par les figures (IV.13-14). Les conditions de simulation sont les suivantes :

- L'identification des courants de référence du filtre est basée sur la méthode du référentiel lié au synchronisme ;
- La bande d'hystérésis est fixée à 1A ;
- Le filtre d'extraction passe-bas est de deuxième ordre ;
- Pour étudier les performances du système de filtrage et tester la robustesse de régulateur PI , à l'instant $t=0,3s$ on va diminuer la charge de R_d à $R_{d2}=R_d/2$;
- Pour tester la boucle de contrôle de tension, nous avons imposée une référence de la tension continue de 700V pour la première topologie et 1400V pour la deuxième topologie ;
- La fréquence de coupure du régulateur de la tension continue est fixée à $f_c = 15Hz$.

IV.4.2.2 Topologie à trois bras avec condensateurs à point milieu

a. Cas d'un système équilibré

Maintenant, nous allons présenter les résultats de simulations du système complet-réseau électrique quatre fils- charge non-linéaire-filtre actif de puissance pour les deux topologies. Ainsi, nous commencerons par présenter dans les figures (IV.13-14) les résultats de simulation obtenus lorsque nous utilisons la commande basée sur la méthode du référentiel lié au synchronisme appliquée a un filtre actif de puissance à trois bras avec condensateurs à point milieu pour compenser un réseau électrique équilibré.

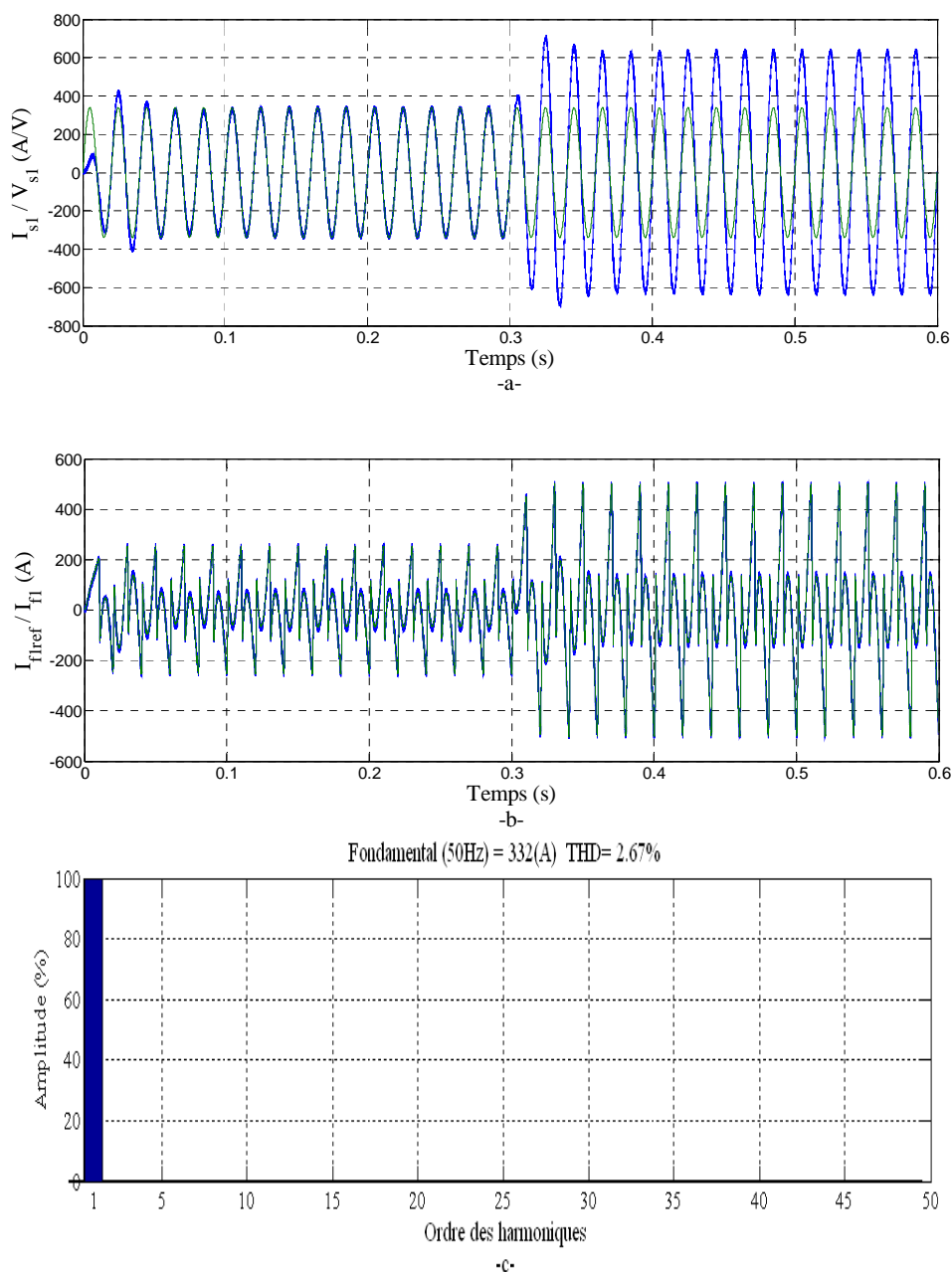


Figure (IV.13) : Compensation des courants harmoniques des trois ponts redresseurs alimentant chacun une charge R-L en utilisant la mise en parallèle de deux filtres actifs de puissance à trois bras avec condensateurs à point milieu pour compenser un réseau électrique équilibré et une commande directe SRF, a) Tension et courant de la première phase de la source après le filtrage, b) Courant total injecté par l'ensemble des deux filtres actifs de puissance à trois bras avec condensateurs à point milieu et sa référence, c) Spectre harmonique du courant de la source après le filtrage

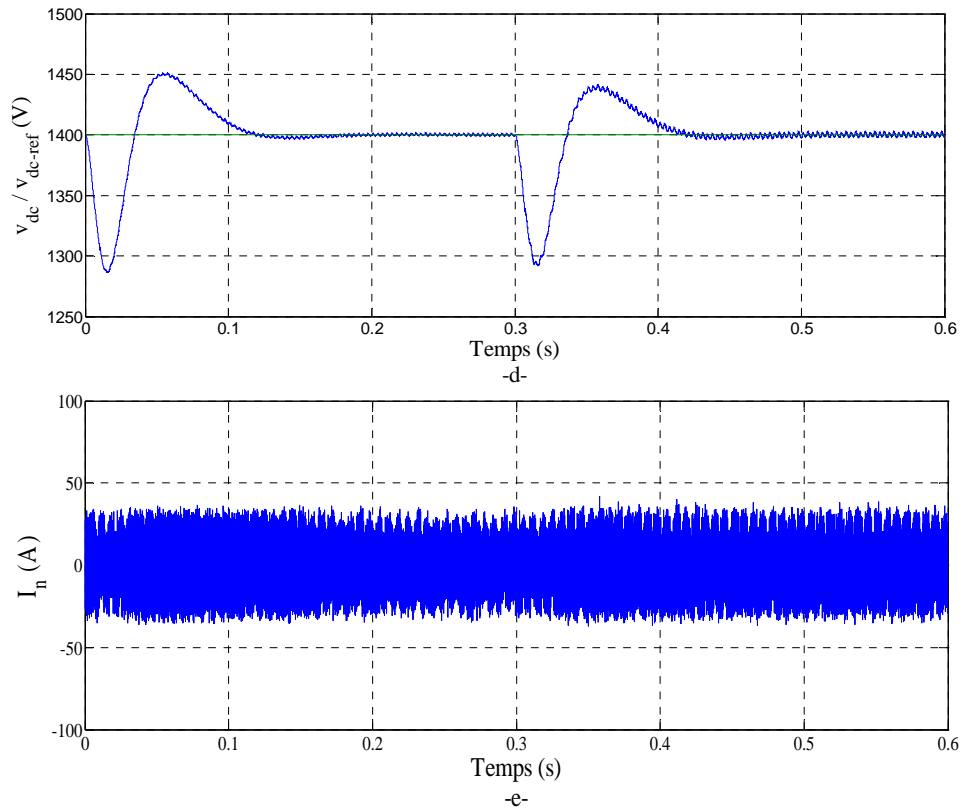


Figure (IV.13)(suite) Compensation des courants harmoniques des trois ponts redresseurs alimentant chacun une charge R-L en utilisant la mise en parallèle de deux filtres actifs de puissance à trois bras avec condensateurs à point milieu pour compenser un réseau électrique équilibré et une commande directe SRF, d) Tension aux bornes du condensateur, e) Courant du neutre après le filtrage

b. Cas d'un système déséquilibré

Nous allons maintenant présenter les résultats de simulation du même système avec la même commande, mais pour une charge déséquilibrée.

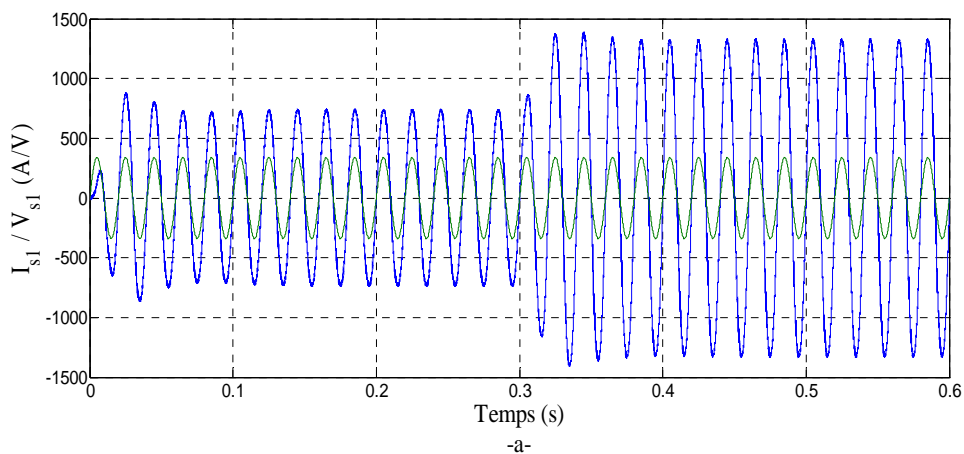


Figure (IV.14) : Compensation des courants harmoniques des trois ponts redresseurs alimentant chacun une charge R-L différente en utilisant la mise en parallèle de deux filtres actifs de puissance à trois bras avec condensateurs à point milieu pour compenser un réseau électrique déséquilibrée et une commande directe SRF, a) Tension et courant de la première phase de la source après le filtrage

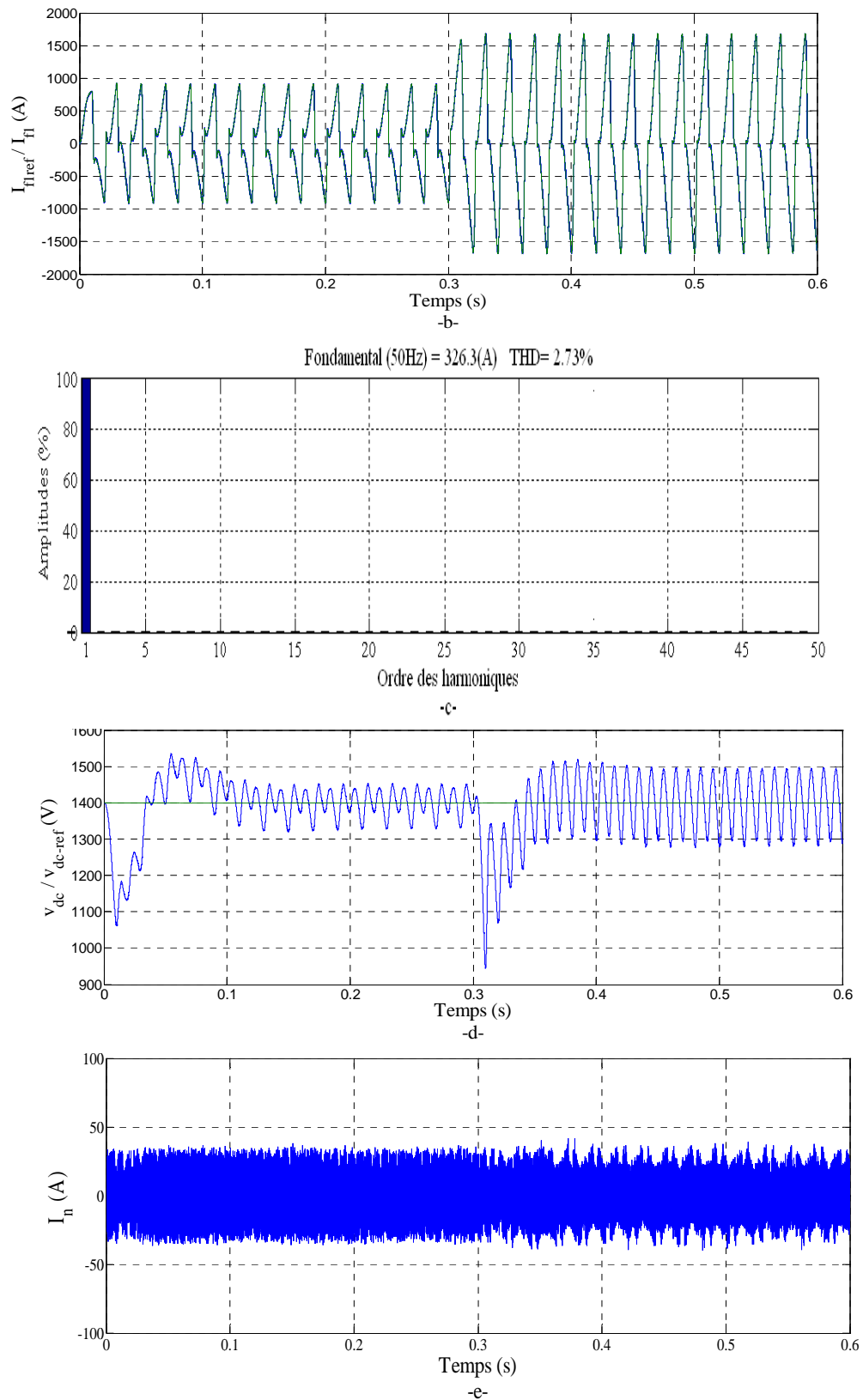


Figure (IV.14) : Compensation des courants harmoniques des trois ponts redresseurs alimentant chacun une charge R-L différente en utilisant la mise en parallèle de deux filtres actifs de puissance à trois bras avec condensateurs à point milieu pour compenser un réseau électrique déséquilibré et une commande directe SRF, b) Courant total injecté par l'ensemble des deux filtres actifs de puissance à trois bras avec condensateurs à point milieu et sa référence, c) Spectre harmonique du courant de la source après le filtrage, d) Tension aux bornes du condensateur, e) Courant du neutre après le filtrage

IV.4.2.3 Interprétations des résultats

Des simulations ont été effectuées pour étudier le comportement de la topologie constitué par la mise en parallèle de deux filtres actifs de puissance à trois bras avec condensateurs à point milieu.

Les figures (IV.13-14) représentent, le courant de la source et son spectre harmonique, le courant injecté par le filtre est sont courant de référence, la tension aux bornes du condensateur est sa référence.

On remarque d'après les courbes de simulation des figures (IV.13-14) que le courant dans le réseau devient presque sinusoïdal. Cela montre que les courants de références sont bien identifiés par la méthode du référentiel lié au synchronisme. Ceci permet également d'injecter des courants harmoniques au réseau égaux à ceux générés par la charge et de phases opposées. Le courant coté source devient alors sinusoïdal. La régulation de la tension continue est assurée par un correcteur PI minimisant l'erreur statique en régime permanent.

IV.4.2.4 Topologie à quatre bras

a. Cas d'un système équilibré

Nous présentons ici les résultats de simulation obtenus lorsque nous utilisons la commande SFR appliquée à la mise en parallèle de deux filtres actifs de puissance à quatre bras pour compenser un réseau équilibré à quatre fils.

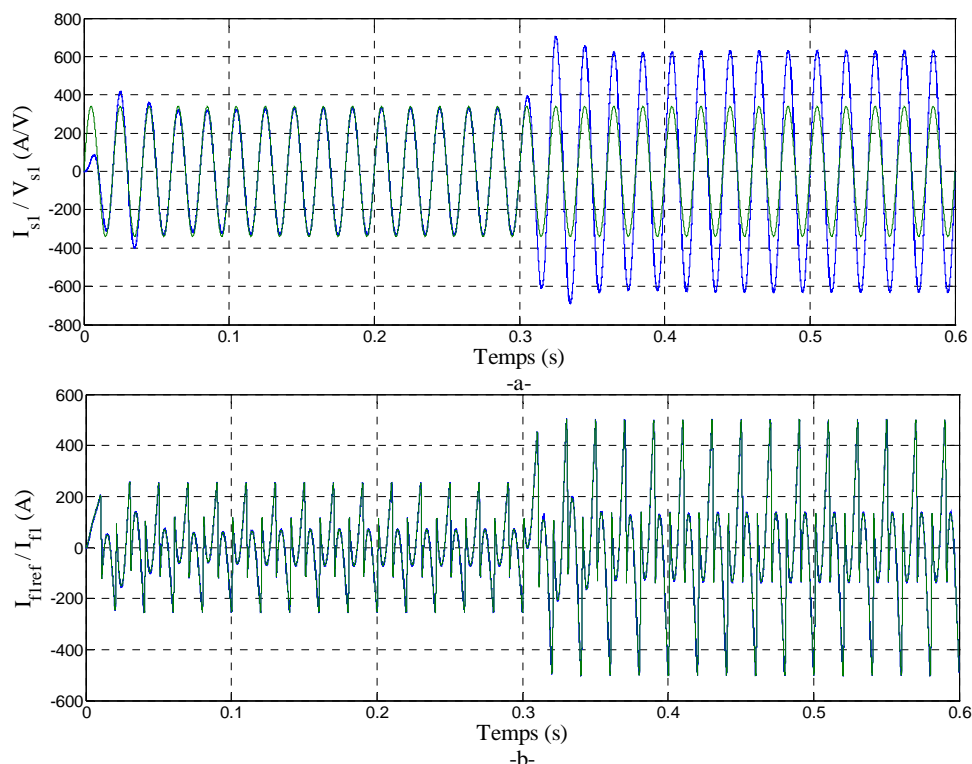


Figure (IV.15) : Compensation des courants harmoniques des trois ponts redresseurs alimentant chacun une charge R-L en utilisant la mise en parallèle de deux filtres actifs de puissance à quatre bras pour compenser un réseau électrique équilibré et une commande directe SRF, a) Tension et courant de la première phase de la source après le filtrage, b) Courant total injecté par l'ensemble des deux filtres actifs de puissance à quatre bras et sa référence

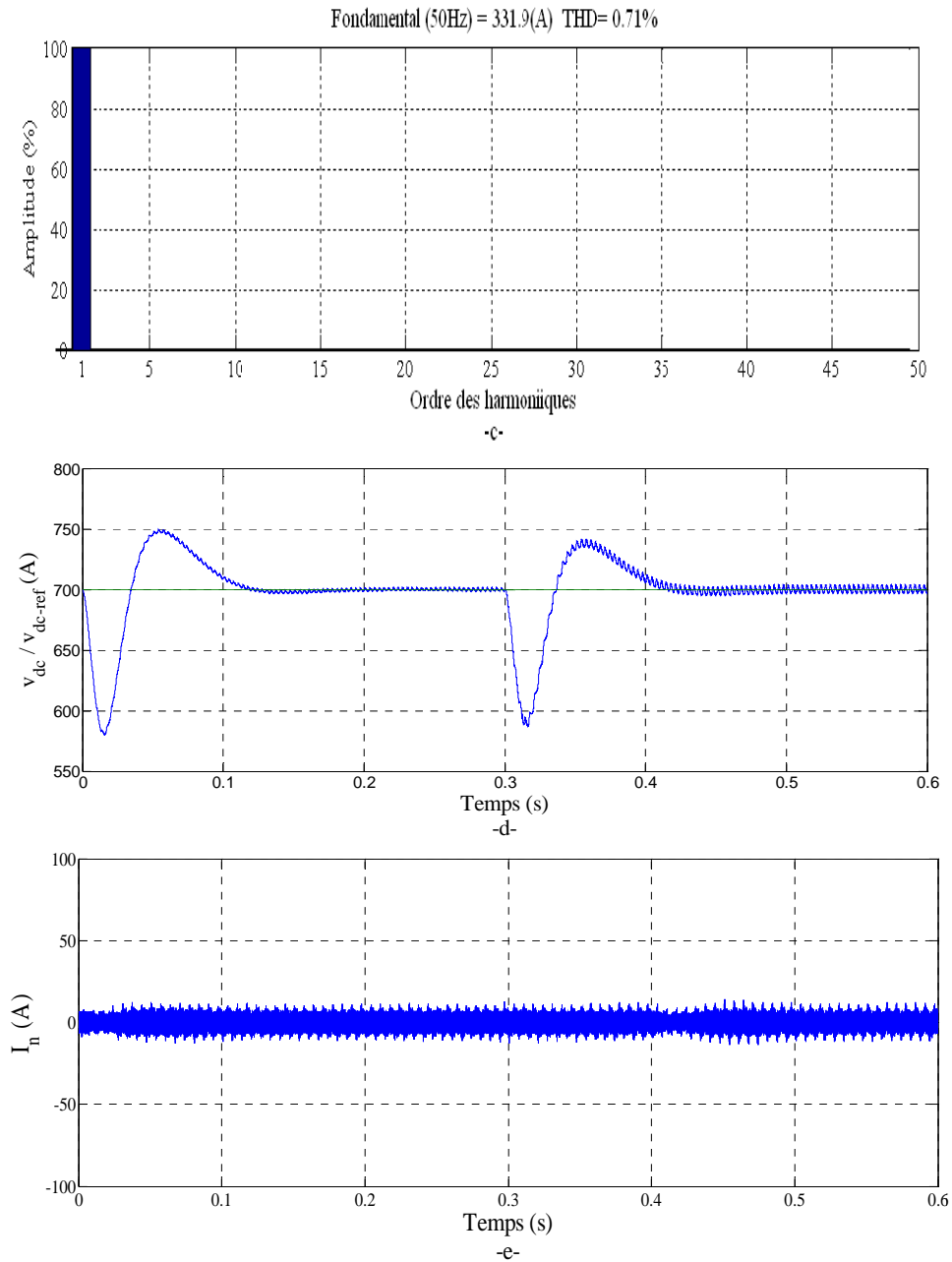


Figure (IV.15)(suite) : Compensation des courants harmoniques des trois ponts redresseurs alimentant chacun une charge R-L en utilisant la mise en parallèle de deux filtres actifs de puissance à quatre bras pour compenser un réseau électrique équilibré et une commande directe SRF, c) Spectre harmonique du courant de la source après le filtrage, d) Tension aux bornes du condensateur, e) Courant du neutre après le filtrage

b. Cas d'un système déséquilibré

Nous allons maintenant présenter les résultats de simulation du même système avec la même commande et les mêmes paramètres de simulation, mais pour une charge déséquilibrée.

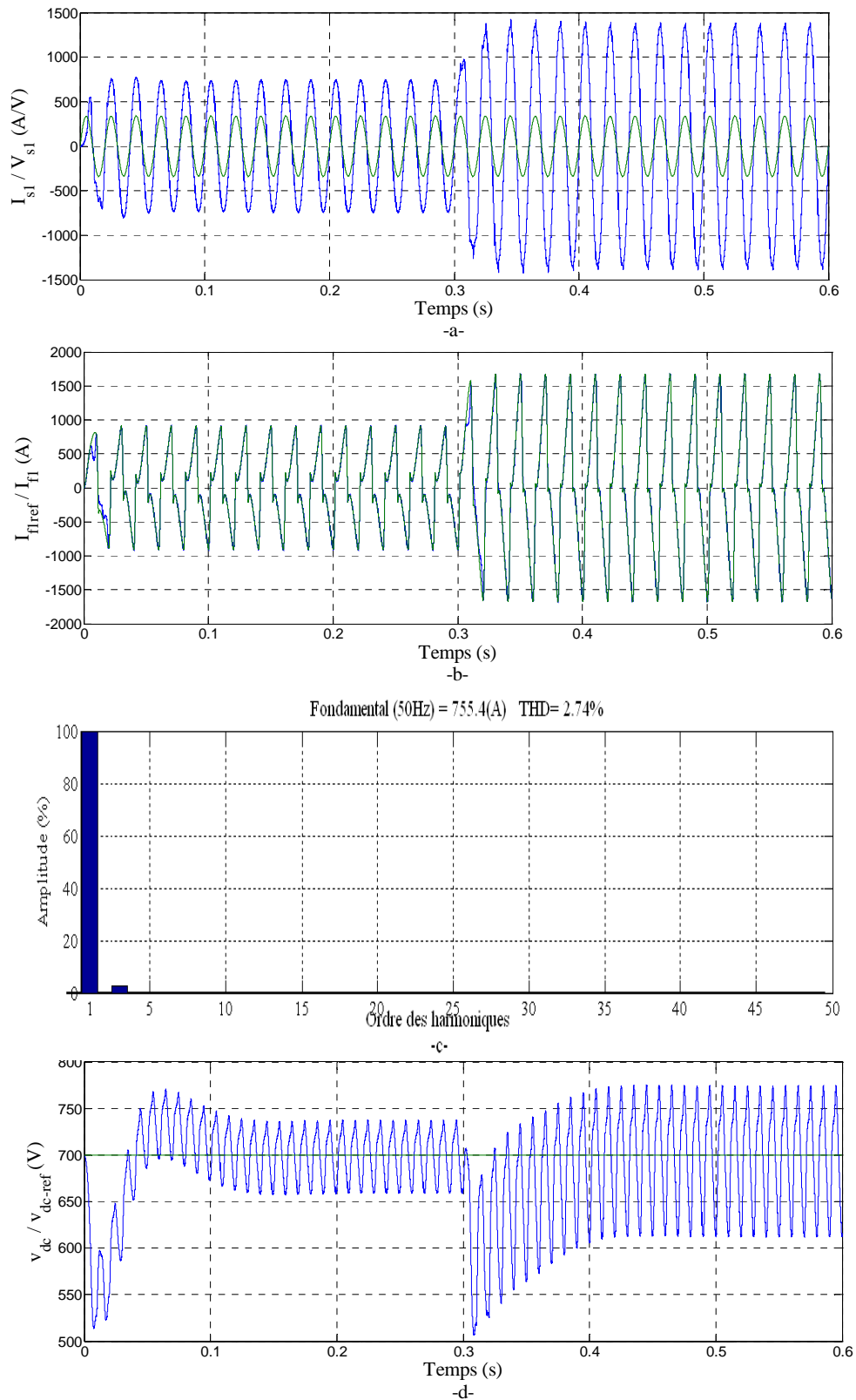


Figure (IV.16) : Compensation des courants harmoniques des trois ponts redresseurs alimentant chacun une charge R-L différente en utilisant la mise en parallèle de deux filtres actifs de puissance à quatre bras pour compenser un réseau électrique déséquilibré et une commande directe SRF, a) Tension et courant de la première phase de la source après le filtrage, b) Courant total injecté par l'ensemble des deux filtres actifs de puissance à quatre bras et sa référence, c) Spectre harmonique du courant de la source après le filtrage, d) Tension aux bornes du condensateur

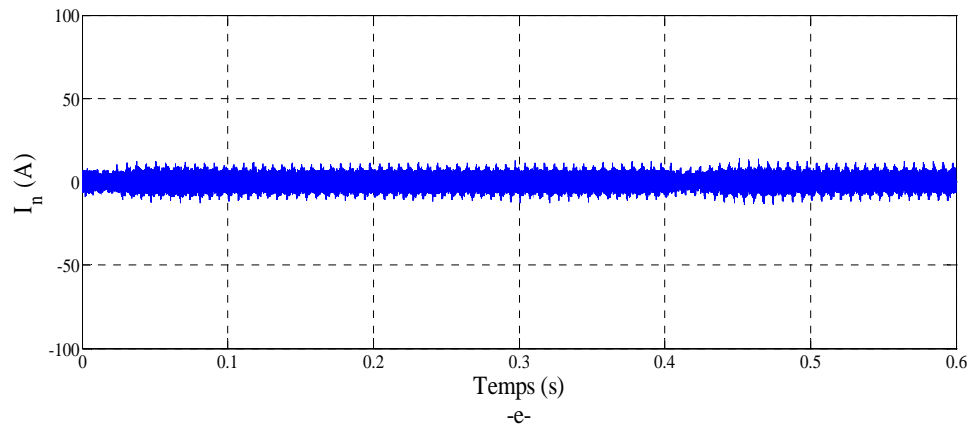


Figure (IV.16 suite) : Compensation des courants harmoniques des trois ponts redresseurs alimentant chacun une charge R-L différente en utilisant la mise en parallèle de deux filtres actifs de puissance à quatre bras pour compenser un réseau électrique déséquilibré et une commande directe SRF, e) Courant du neutre après le filtrage

IV.4.2.5 Interprétations des résultats

Les figures (IV.15-16) illustrent le fonctionnement de la mise en parallèle de deux filtres actifs de puissance à quatre bras commandés avec la méthode SRF pour compenser un réseau électrique dans les deux cas équilibré et déséquilibré.

Les figures (IV.15-16.a) illustrent le courant de la première phase de la source. On constate que le courant de source après compensation est sinusoïdal et en phase avec la tension correspondante. Ceci témoigne d'un bon filtrage des courants harmoniques et d'une compensation parfaite de la puissance réactive.

Les figures (IV.15-16.b) illustrent le courant total injecté par l'ensemble des deux filtres actifs de puissance à quatre bras dans la première phase en (vert) et sa référence obtenus par la méthode de la théorie du référentiel lié au synchronisme en (bleu). On voit bien que le filtre actif à bien reproduit le courant de référence. Ces courants doivent être injectés sur le réseau afin d'éliminer les harmoniques des charges polluantes.

Les figures (IV.15-16.c) montrent que la mise en œuvre de la mise en parallèle des deux filtres actifs de puissance à quatre bras permet de réduire considérablement le contenu harmonique du courant de source, ce qui traduit par la diminution du taux harmonique de distorsion (THD) de 33.32% à 0.71% et à 2.74% respectivement pour les cas équilibré et déséquilibré.

Les figures (IV.15-16.d) montrent la tension aux bornes du condensateur. On remarque que la tension du bus continu suit bien à sa valeur de référence.

Les courbes données par les figures (IV.15-16.e) présentent le courant du neutre après compensation. Le courant fourni par les deux FAP traversant le quatrième bras de l'onduleur qui est censé éliminer le courant du neutre et le courant circulant dans le neutre du réseau.

La différence majeure entre le filtre à quatre bras et le filtre à trois bras avec condensateurs à point milieu réside dans la valeur du THD qui est plus faible dans le cas du filtre à quatre bras du fait qu'il réduit considérablement le courant dans le neutre. En effet l'onduleur à quatre bras pilote les trois courants de phase et celui du neutre. Par contre, l'onduleur à trois bras avec condensateurs à point milieu n'en pilote directement que trois courants.

IV.5 Conclusion

Dans le quatrième et dernier chapitre, nous avons étudié la structure basée sur la mise en parallèle de deux filtres actifs de puissance pour la compensation des réseaux électriques basse tension sièges de forts courants harmoniques. Nous avons tout d'abord présenté cette structure particulière. Ensuite, nous avons proposé deux commandes. La première à été proposée pour la compensation des harmoniques de courant d'un réseau électrique à trois fils. La seconde est proposée pour la compensation des harmoniques de courant d'un réseau électrique à quatre fils. Les valeurs du THD obtenus pour les différentes structures utilisant les deux commandes sont résumées dans les tableaux suivants :

Structure	THD(%)
à trois bras	2.20
à deux bras avec condensateurs à point milieu	2.22

Tableau (IV.1): THD du courant de la source pour un réseau à trois fils

Structure	THD(%)	
Structure charge	équilibrée	déséquilibrée
à quatre bras	0.71	2.74
à trois bras avec condensateurs à point milieu	2.67	2.73

Tableau (IV.2): THD du courant de la source pour un réseau à quatre fils

Les résultats de simulation des quatre topologies appliquées pour réaliser la mise en parallèle des deux filtres actifs de puissance donnent des résultats satisfaisants. Du point de vue THD, les quatre topologies donnent des taux de distorsion harmonique $THD < 5\%$, ce qui répond bien aux normes internationales.

Conclusion générale

L'étude bibliographique montre que les filtres actifs parallèles représentent une solution efficace pour la compensation des harmoniques engendrés par les courants harmoniques.

Dans cette perspective, ce mémoire a été consacré à l'étude des différentes stratégies destinées à la commande du filtre actif parallèle. Les performances du filtre actif dépendent non seulement du dimensionnement de son circuit de puissance, mais aussi du type de commande utilisée pour le contrôle de ses courants. L'extraction des courants harmoniques a été principalement basée sur la méthode des puissances active et réactive instantanées, la méthode modifiée des puissances active et réactive instantanées et la méthode du repère synchrone.

La limitation de la pollution harmonique peut être abordée par des approches a priori ou a posteriori. Les premières regroupent l'ensemble des normes et contraintes financières utilisées par les distributeurs d'énergie pour maintenir la génération d'harmoniques dans certaines limites, limites qui sont fournies par une analyse statistique globale du problème. S'il n'est pas possible d'empêcher l'apparition des pollutions harmoniques, les méthodes a posteriori apportent la possibilité de dépolluer les réseaux électriques. Selon le cas, nous parlerons d'absorber, de compenser ou d'atténuer les harmoniques, par des d'équipements électriques tels que les filtres. En général, les solutions passives s'avèrent insuffisantes. Le filtrage actif de puissance, qui consiste à annuler en un point une pollution harmonique variable, fournit une approche plus souple et plus efficace.

Sur la base de ce constat, nous nous sommes intéressés dans ce mémoire à étudier les dispositifs de dépollution des réseaux électriques en utilisant les filtres actifs. Notre travail s'est porté plus particulièrement sur l'étude des filtres actifs parallèles à structure de tension.

Nous avons effectué, dans un premier temps, une étude théorique de deux topologies de filtre actif de puissance pour la compensation des harmoniques de courant circulant dans un réseau électrique à trois fils. La première topologie a porté sur l'utilisation d'un onduleur à trois bras, le second sur un onduleur à deux bras avec condensateurs à point milieu. Ensuite, nous avons présenté les principes des stratégies de commande que nous avons utilisées. Nous avons pour commencer étudié en détail deux commandes directes. Pour terminer, nous avons présenté la synthèse des résultats des différentes simulations obtenus pour les deux stratégies de commande appliquées aux deux topologies de filtre actif de puissance.

Dans un second temps, nous avons présenté une étude théorique de deux topologies de filtre actif de puissance afin de compenser les harmoniques de courant circulant dans un réseau électrique à quatre fils. La première topologie a porté sur l'utilisation d'un onduleur à quatre bras, le second un onduleur à trois bras avec condensateurs à point milieu. Ensuite,

nous avons présenté trois commandes que nous avons développées. Pour terminer, nous avons présenté la synthèse des résultats des différentes simulations obtenus pour les trois commandes appliquées aux deux topologies de filtre actif de puissance.

En dernier, nous avons étudié la mise en parallèle des filtres actifs de puissance. Cette catégorie de filtre actif de puissance est utilisée pour les charges polluantes importantes. Ensuite, nous avons présenté les différentes commandes que nous avons utilisées dans les quatre topologies. Les résultats des simulations ont montré la faisabilité de ces commandes.

Comme perspectives futures, il serait intéressant d'explorer les voies suivantes :

- Développement des algorithmes de modulation vectorielle pour les topologies à deux et à quatre bras ;
- Application d'autres types de commande aux différentes topologies des filtres actifs parallèles ;
- Amélioration des performances du réglage par l'application des commandes non linéaires pour le contrôle des courants et de la tension continue.

Dimensionnement

Dimensionnement du pont redresseur triphasé

Le dimensionnement du redresseur est effectué pour l'angle d'amorçage égal à 0° , c'est à dire à tension redressée maximale. Dans ce cas, les grandeurs redressées ont les valeurs suivantes :

$$I_d = \frac{S_n}{U_d} = \frac{400.10^3}{561.4} \approx 712.53 [A] \quad (A.1)$$

La résistance de charge du pont redresseur sera égale à :

$$R_d = \frac{U_d}{I_d} = 0.787 [\Omega] \quad (A.2)$$

La tension redressée présente une ondulation de fréquence égale à 300 [Hz]. Pour obtenir un courant Suffisamment lisse en sorti, il faut que la constante de temps du circuit $R_d - L_d$, notée T_d , soit supérieure à T_{ond} , d'où :

$$L_d > 2.5 [mH]$$

D'autre part l'impédance nominale du réseau est :

$$Z_n = \frac{3V_n^2}{S_n} = 0.432 [\Omega] \quad (A.3)$$

Si l'on note la somme des inductances à l'entrée du redresseur par $L_T = L_s + L_c$, L_T est généralement de l'ordre de 1 % à 10 % de l'inductance nominale, ce qui donne une valeur de L_T comprise entre 13,75 [μ H] et 137,5 [μ H].

Dimensionnement du pont redresseur monophasé

Le dimensionnement du redresseur monophasé est également effectué pour la tension redressée maximale. Dans ce cas, les grandeurs redressées ont les valeurs suivantes :

$$U_d = \frac{2\sqrt{2}V_n}{\pi} = 216.1 [V] \quad (A.4)$$

$$I_d = \frac{S_n}{U_d} = \frac{140.10^3}{216.1} \approx 648 [A] \quad (A.5)$$

La résistance de charge du pont redresseur sera égale à :

$$R_d = \frac{U_d}{I_d} = 0.33[\Omega] \quad (\text{A.6})$$

La tension redressée présente une ondulation de fréquence égale à 100 [Hz]. Pour obtenir un courant lisse en sortie, il faut que la constante de temps du circuit L_d, R_d note T_d , soit supérieure a T_{ond} , d'ou : $L_d > 3.3[mH]$.

Démonstration de la matrice d'identification des courants harmoniques utilisant la théorie p-q-r

Le passage d'un système triphasé à un système diphasé en utilisant la transformation de concordia est donnée par l'expression suivante :

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \\ x_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (\text{B.1})$$

Cette expression est obtenue de la figure (B.1).

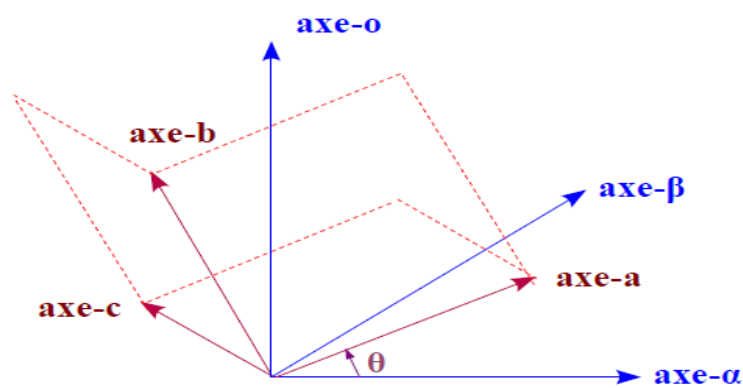


Figure (B.1) : Relation entre les axes a-b-c et les axes $\alpha - \beta - 0$

La référence [17] propose une nouvelle référence dite $\alpha' - \beta' - 0'$ en tournant autour de l'axe 0 d'un angle θ_1 comme, il est précisé sur la figure (B.2).

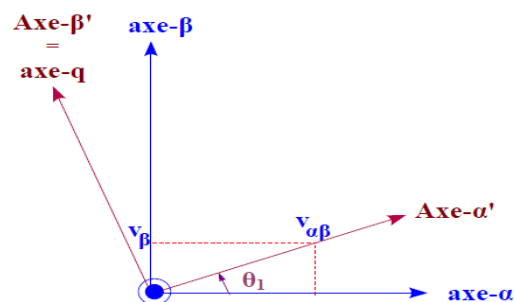


Figure (B.2) : Relation entre les axes $\alpha - \beta - 0$ et les axes $\alpha' - \beta' - 0'$ proposés par [12]

Cette transformation donne pour les courants par exemple :

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{v_\alpha}{v_{\alpha\beta 0}} & \frac{v_\beta}{v_{\alpha\beta 0}} & \frac{v_0}{v_{\alpha\beta 0}} \\ -\frac{v_\beta}{v_{\alpha\beta}} & \frac{v_\alpha}{v_{\alpha\beta}} & 0 \\ -\frac{v_\alpha v_0}{v_{\alpha\beta} v_{\alpha\beta 0}} & -\frac{v_\beta v_0}{v_{\alpha\beta} v_{\alpha\beta 0}} & \frac{v_{\alpha\beta}}{v_{\alpha\beta 0}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_o \end{bmatrix} \quad (\text{B.2})$$

De cette même figure nous trouvons également pour les tensions :

$$\cos \theta_1 = \frac{v_\alpha}{v_{\alpha\beta}} \quad , \quad \sin \theta_1 = \frac{v_\beta}{v_{\alpha\beta}} \quad \text{et} \quad v_{\alpha\beta} = \sqrt{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \quad (\text{B.3})$$

Ce qui donne

$$\begin{bmatrix} i'_\alpha \\ i'_\beta \\ i'_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{v_\alpha}{v_{\alpha\beta}} & \frac{v_\beta}{v_{\alpha\beta}} & 0 \\ -\frac{v_\beta}{v_{\alpha\beta}} & \frac{v_\alpha}{v_{\alpha\beta}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_o \end{bmatrix} \quad (\text{B.4})$$

Ensuite la référence [12] propose de faire une autre transformation des axes qu'il appela p-q-r qui est une rotation des axes $\alpha' - \beta' - 0'$ autour de l'axe β' comme l'illustre la figure (B.3) :

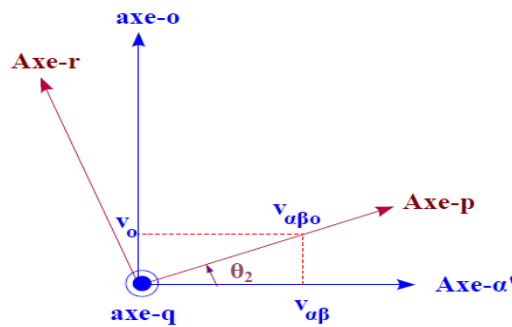


Figure (B.3) : Relation entre les axes $\alpha' - \beta' - 0'$ et les axes p-q-r

Nous obtenons alors :

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & 0 & \sin \theta_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_2 & 0 & \cos \theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_\alpha \\ i'_\beta \\ i'_o \end{bmatrix} \quad (\text{B.5})$$

Nous trouvons également :

$$\begin{aligned}\cos \theta_2 &= \frac{v_{\alpha\beta}}{v_{\alpha\beta 0}} \\ \sin \theta_2 &= \frac{v_0}{v_{\alpha\beta 0}} \\ v_{\alpha\beta} &= \sqrt{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \\ \text{et} \quad v_{\alpha\beta 0} &= \sqrt{v_\alpha^2 + v_\beta^2 + v_0^2}\end{aligned}\tag{B.6}$$

En remplaçant (B.7) et (B.5) dans (B.6), nous obtenons :

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{v_{\alpha\beta}}{v_{\alpha\beta 0}} & 0 & \frac{v_0}{v_{\alpha\beta 0}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\frac{v_0}{v_{\alpha\beta 0}} & 0 & \frac{v_{\alpha\beta}}{v_{\alpha\beta 0}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{v_\alpha}{v_{\alpha\beta}} & \frac{v_\beta}{v_{\alpha\beta}} & 0 \\ -\frac{v_\beta}{v_{\alpha\beta}} & \frac{v_\alpha}{v_{\alpha\beta}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_o \end{bmatrix}\tag{B.7}$$

Après un simple développement, nous aurons en final la relation entre les axes p-q-r et $\alpha-\beta-0$:

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{v_\alpha}{v_{\alpha\beta 0}} & \frac{v_\beta}{v_{\alpha\beta 0}} & \frac{v_0}{v_{\alpha\beta 0}} \\ -\frac{v_\beta}{v_{\alpha\beta}} & \frac{v_\alpha}{v_{\alpha\beta}} & 0 \\ -\frac{v_\alpha v_0}{v_{\alpha\beta} v_{\alpha\beta 0}} & -\frac{v_\beta v_0}{v_{\alpha\beta} v_{\alpha\beta 0}} & \frac{v_{\alpha\beta}}{v_{\alpha\beta 0}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_o \end{bmatrix}\tag{B.8}$$

Filtre passe bas

Pour la séparation des puissances et des courants de la charge polluante, on utilise généralement un filtre d'extraction passe-bas avec soustracteur ou bien un filtre passe-haut comme le montre la figure (C.1). Ces deux types des filtres permettent l'élimination de la composante continue du courant ou de la puissance.

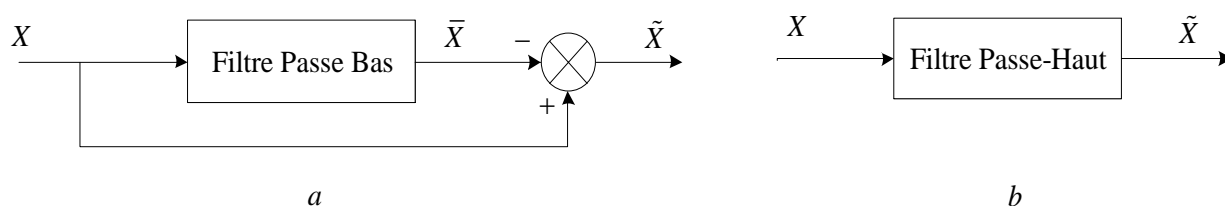


Figure (C.1) : Deux méthodes d'extraction des harmoniques

Prenons le filtre passe-bas de deuxième ordre, sa fonction de transfert est définie par :

$$H_{FPB} = \frac{\omega_c^2}{S^2 + 2\zeta\omega_c S + \omega_c^2} \quad (C.1)$$

Pour le filtre passe-haut de deuxième ordre, sa fonction de transfert est donnée par :

$$H_{FPH} = \frac{S^2}{S^2 + 2\zeta\omega_c S + \omega_c^2} \quad (C.2)$$

Dans la littérature, le filtre passe-bas avec soustracteur est le plus utilisé, puisque le filtre passe-haut présente une amplification autour de la fréquence de coupure et un résidu harmonique important [9].

Bibliographie

- [01] Mohamed Muftah Abdusalam, "Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales," Thèse de Doctorat, Université H. Poincaré, Nancy-I, Mai 2008.
- [02] N. Bruyant, "Etude et commande généralisées de filtres actifs parallèles, compensation global ou sélective des harmoniques, régime équilibré ou déséquilibré," Thèse de Doctorat, Université de Nantes, France, 1999.
- [03] A. Sahbani, M. Labben-Ben Braiek, M. A. Dami et M. Jemli, "Commande d'un filtre actif triphasé shunt par la logique floue," 3rd International Conférences SETIT, Tunisie, 27-31, Mars 2005.
- [04] G. Nabil et R. Noui, "Application de filtrage actif parallèle sur une charge dynamique non linière," Mémoire d'ingénieur, Université de M'sila, 2007.
- [05] GHADBANE Ismail , " Commande d'un filtre actif triphasé parallèle par différents régulateurs," Mémoire de Magister, Université Biskra, 2011.
- [06] M. Alaa Eddin Alali, "Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension," Thèse Doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg I, 2002.
- [07] Djaffar Ould Abdeslam, "Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension," Thèse Doctorat, Université haut alsace, 2005.
- [08] G.Tarek, "Etude et réalisation d'une compensation actif de puissance commandé par DSP," Mémoire de Magister, Ecole militaire Polytechnique, 2005.
- [09] Steeve Beaulieu, "Etude et mise au point d'un filtre actif d'harmonique en vue d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique," Mémoire de Fin d'Etudes, Université Québec à Chicoutimi, Mai 2007.
- [10] K. Med Racim et B. Karim, "Paramètres de la qualité de la tension d'un réseau électrique etude et analyse," Mémoire d'ingénieur, Ecole nationale Polytechnique, Alger 2008.
- [11] H. Abdelhamid, "Amélioration des performances du filtre actif : Application du régulateur proportionnel intégral et du régulateur flou," Mémoire de Magister, Ecole de Technologie Supérieure, Université Québec, Novembre 2004.

- [12] M. Fatiha, "Etude et commande d'un filtre actif parallèle à structure de tension," Mémoire de Magister, Université d'Oran, Octobre 2001.
- [13] Kamil Mohammed et Nouri Salih, "Commandes non linéaires d'un filtre actif parallèle," Mémoire d'Ingénieur, Université de M'sila, 2010.
- [14] Thierry Gouraud, "Identification et rejet de perturbations harmoniques dans des réseaux de distribution électrique," Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 1997.
- [15] Abdelmadjid Chaoui, "Filtrage actif triphasé pour charges non linéaires," Thèse de Doctorat, Setif, 2010.
- [16] Fateh karim and Soumia Kerrouche, "Three-phase active power filter based on fuzzy logic," International Journal of Sciences and Techniques , Vol. 3, No.1, July 2009 , pp. 942-955.
- [17] B. Mohamed Choukri, "Contribution à l'étude des différentes topologies et commandes des filtres actifs parallèles à structure tension : Modélisation, Simulation et Validation Expérimentale de la Commande," Thèse de Doctorat, Université H. Poincaré, Nancy-I, Décembre 2004.
- [18] Shahram 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] F. Henri, F. Forest et T. Maynard, "Onduleur de tension : Structures, Principes, Applications," Techniques de l'ingénieur, D 3 176.
- [20] Juan W. Dixon and Boon T. ooi " Series and parallel operation of hysteresis current-controlled PWM rectifiers, " IEEE Transactions on industry applications, vol.25, n°4,July/August, 1989 pp 644-651.
- [21] Zhihong Ye, "Modeling and control of parallel three-phase PWM conveters, " Thèse de Doctorat, Blacksburg, Virginia, USA, September 2000.

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME
D'INGENIEUR D'ETAT EN GENIE ELECTROTECHNIQUE

OPTION : COMMANDE ELECTRIQUE

Année Universitaire : 2010 / 2011

Proposé et dirigé par : Messieurs : BARKAT Saïd

GHADBANE Ismail

Présenté par : CHEBABHI Rabie

BOUDRAF Mustapha

Thème

Modélisation et commande des différentes topologies des filtres actifs parallèles

Résumé :

Ce travail entre dans le cadre générale de la dépollution des réseaux électriques par les filtres actifs. En l'occurrence, le filtre actif parallèle permet d'améliorer la qualité du prélèvement de l'énergie électrique en injectant un courant en opposition de phase avec le courant perturbateur.

A cet effet, nous exposons au début de ce mémoire, les différentes perturbations et leurs effets sur le réseau électrique ainsi que les différentes solutions classiques et modernes à leurs traitements.

Ensuite, parvient une description des diverses stratégies de commande utilisées pour le traitement des effets des charges polluantes, qui nous emmène à utiliser une compensation parallèle pour obtenir un courant de ligne de forme sinusoïdale.

Nous avons abordé principalement, les différentes topologies et stratégies de commande des filtres actifs parallèles en vue de compenser les harmoniques de courants et la puissance réactive susceptibles d'apparaître dans les réseaux électriques à trois et à quatre fils.

Mots clés :

Filtre actif parallèle, Méthodes d'extraction des harmoniques, Filtre passe-bas, PLL, PWM à hystérésis de courant.