

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**



**UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE**

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU
DIPLOME DE MASTER EN GENIE ELECTRIQUE**

SPECIALITE : COMMANDE DES SYSTEMES ELECTRIQUES

THEME

Commande floue d'un filtre actif série hybride interligne

Proposé et dirigé par :

Dr. BARKAT Said

Présenté par :

M. OULD ALY Sidi Mohamed

Année Universitaire : 2015 / 2016

N° d'ordre : CSE-207

Dédicaces

Je dédie ce travail :

A mes parents

A mes frères et soeurs

A toute ma famille

Et tous mes amis

REMERCIEMENTS

Avant tout, je remercie Allah le tout-puissant de m'avoir donné le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années d'étude et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

Ainsi, je tiens également à exprimer mes vifs remerciements à mon promoteur Docteur BARKAT Saïd pour avoir d'abord proposé ce thème, pour son suivi continué tout au long de la réalisation de ce mémoire et qui n'a pas cessé de me donner ses conseils.

Mes remerciements vont également aux membres du jury qui ont accepté d'examiner ce travail.

Enfin, je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

<i>Sommaire</i>	Page
Introduction générale	01
Chapitre I Modélisation et commande d'un filtre actif série	03
I.1 Introduction	03
I.2 Perturbations électriques	03
I.2.1 Creux et coupure de tension	04
I.2.2 Surtension	04
I.2.3 Déséquilibre du système de tension triphasé	04
I.2.4 Perturbations harmoniques	05
I.2.4.1 Caractérisation des perturbations harmoniques	05
I.2.4.1.1 Taux d'harmonique de rang h	05
I.2.4.1.2 Taux global de distorsion harmonique	05
I.2.4.1.3 Facteur de puissance	05
I.2.4.2 Sources des perturbations harmoniques	06
I.2.4.3 Conséquences des harmoniques	06
I.2.5 Solutions de dépollution du réseau électrique	06
I.2.5.1 Solutions traditionnelles de la dépollution	07
I.2.5.2 Solutions modernes de la dépollution	07
I.2.5.2.1 Filtre actif parallèle	07
I.2.5.2.2 Filtre actif série	08
I.2.5.2.3 Filtrage actif série-parallèle (UPQC)	08
I.3 Etude de la partie puissance de filtre active série	09
I.3.1 Modélisation du réseau électrique	09
I.3.2 Modélisation de la charge polluante	09

I.3.3 Modélisation de l'onduleur	11
I.3.4 Modélisation du filtre active série	13
I.4 Etude de la partie commande de filtre active série	16
I.4.1 Idéification des tensions harmoniques du FAS	16
I.4.1.1 Méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées (PQ)	16
I.4.1.1.1 Estimation et calcul des paramètres du correcteur de la phase (PLL)	20
I.4.2 Commande de l'onduleur	21
I.4.2.1 MLI vectorielle (SVM)	21
I.4.2.1.1 Déterminations des secteurs	23
I.4.2.1.2 Calcul des temps d'application des vecteurs de tension	24
I.5 Résultats de simulation	26
I.6 Interprétations des résultats	30
I.7 Conclusion	30
Chapitre II Commande par PID d'un filtre actif série hybride interligne	31
II-1 Introduction	31
II-2 Etude et dimensionnement des filtres passifs	31
II-2-1 Principe	32
II-2-2 Charges génératrices d'harmoniques de courant	32
II-2-3-2 Filtre résonant	33
II-2-3-3 Filtre amorti	34
II-2-4 Avantages et inconvénients des filtres passifs	35
II-2-5 Méthode de dimensionnement d'un filtre passif parallèle et algorithme associé	35
II- 2-5-1 Conception et modélisation d'un filtre résonant simple	35
II- 2-5-1-1 Algorithme de modélisation des filtres résonants	36
II-2-5-2 Résultats de simulation	37
II-2-5-3 Interprétations des résultats	40

II-3 Filtre actif série hybride	40
II-3-1 Structure du filtre	41
II-3-2 Résultats de simulation	42
II-3-3 Interprétations des résultats	46
II-4 Filtre actif série hybride interligne	46
II-4-1 Structure du filtre	47
II-4-2 Résultats de simulation	48
II-4-3 Interprétations des résultats	51
II-5 Conclusion	51
Chapitre III Commande par logique floue du filtre actif série hybride interligne	52
III.1 Introduction	52
III.1.2 Ensemble ordinaire et ensemble flou	52
III.1.3 Différentes formes de fonction d'appartenance	53
III.1.4 Expression mathématique des fonctions d'appartenance	54
III.1.5 Raisonnement en logique flou	55
III.1.6 Structure générale d'un système flou	56
III.2 Régulateur flou	57
III.2.1 Fuzzification des entrées	58
III.2.2 Base des règles et inférence floue	59
III.2.3 Défuzzification	59
III.2.4 Synthèse du régulateur flou	59
III.3 Commande par logique floue du filtre actif série interligne	61
III.3.1 Structure du filtre actif série interligne	62
III.3.1.2 Résultats de simulation	63
III.3.1.3 Interprétations des résultats	66

III.4 Commande par logique floue du filtre actif série hybride interligne	66
III.4.1.1 Résultats de simulation	68
III.4.1.2 Interprétations des résultats	71
III.4.1.3 Etude comparative des résultats	72
III.5 Conclusion	73
Conclusion générale	74
Annexe	76
Bibliographie	77

Notations

x_1 : Composante fondamentale.

x_h : Taux d'harmonique de rang h .

S : Puissance apparente.

P : Puissance active.

Q : Puissance réactive.

D : Puissance déformante.

v_{eff1} : Valeur efficace du fondamental de la tension du réseau électrique.

i_h : Courant harmonique de rang h .

e_{sabc1} : Tensions du réseau électrique.

ω : Pulsation du réseau.

θ : Angle de déphasage.

f : Fréquence du réseau.

i_{sabc1} : Courants du premier réseau électrique.

L_{sabc1} : Inductance du premier réseau.

R_{sabc1} : Résistance du premier réseau.

i_{labc1} : Courants de la charge du premier réseau.

R_{labc1} : Résistance à l'entrée de la charge polluante du premier réseau.

L_{labc1} : Inductance à l'entrée de la charge polluante du premier réseau.

R_{d1} : Résistance de la charge continue du pont à diodes du premier réseau.

L_{d1} : Inductance de la charge continue du pont à diodes du premier réseau.

v_{sabc1} : Tensions du réseau électrique au point de raccordement du filtre actif série du premier réseau.

U_d : Tension redressée.

i_d : Courant redressé

i_{sabc2} : Courants du deuxième réseau électrique.

L_{sabc2} : Inductance du deuxième réseau.

R_{sabc2} : Résistance du deuxième réseau.

i_{labc2} : Courants de la charge du deuxième réseau.

R_{labc2} : Résistance à l'entrée de la charge polluante du deuxième réseau.

L_{labc2} : Inductance à l'entrée de la charge polluante du deuxième réseau.

R_{d2} : Résistance de la charge continue du pont à diodes du deuxième réseau.

L_{d2} : Inductance de la charge continue du pont à diodes du deuxième réseau.

v_{sabc2} : Tensions du réseau électrique au point de raccordement du filtre actif série du deuxième réseau.

v_{dc} : Tension continue.

L_{fs1} : Valeur de l'inductance interne du filtre actif série du premier réseau.

R_{fs1} : Valeur de la résistance interne du filtre actif série du premier réseau.

C_{fs1} : Valeur de la capacité du condensateur interne du filtre actif série du premier réseau.

L_{fs2} : Valeur de l'inductance du filtre actif série du deuxième réseau. .

R_{fs2} : Valeur de la résistance interne du filtre actif série du deuxième réseau. .

C_{fs2} : Valeur de la capacité du condensateur interne du filtre actif série du deuxième réseau.

L_{f51} : Valeur de l'inductance du filtre passif parallèle de l'harmonique cinq du premier réseau.

R_{f51} : Valeur de la résistance du filtre passif parallèle de l'harmonique cinq du premier réseau.

C_{f51} : Valeur de la capacité du condensateur du filtre passif parallèle de l'harmonique cinq du premier réseau.

L_{f52} : Valeur de l'inductance du filtre passif parallèle de l'harmonique cinq du deuxième réseau.

R_{f52} : Valeur de la résistance du filtre passif parallèle de l'harmonique cinq du deuxième réseau.

C_{f52} : Valeur de la capacité du condensateur du filtre passif parallèle de l'harmonique cinq du deuxième réseau.

L_{f71} : Valeur de l'inductance du filtre passif parallèle de l'harmonique sept du premier réseau.

R_{f71} : Valeur de la résistance du filtre passif parallèle de l'harmonique sept du premier réseau.

C_{f71} : Valeur de la capacité du condensateur du filtre passif parallèle de l'harmonique sept du premier réseau.

L_{f72} : Valeur de l'inductance du filtre passif parallèle de l'harmonique sept du deuxième réseau.

R_{f72} : Valeur de la résistance du filtre passif parallèle de l'harmonique sept du deuxième réseau.

C_{f72} : Valeur de la capacité du condensateur du filtre passif parallèle de l'harmonique sept du deuxième réseau.

S_i : Secteur numéro i .

T_h : Période d'échantillonnage

t_i : Temps d'application du vecteur v_{fi}

Abréviations

THD : Total Harmonic Distorsion (Taux de distorsion harmonique).
F.P : Facteur de puissance
FAS : Filtre actif série
PLL : Phase Locked Loop (Boucle à verrouillage de phase).
FPB : Filtre pass bas.
PQ : Méthode des puissances active et réactive instantanées.
FMV : Filtre multi-variable.
SVM : Space Vector Modulation.
PID : Régulateur Proportionnel Intégral Dérivé.
FASI : Filtre Actif Série Interligne.
FASHI : Filtre Actif Série Hybride Interligne.
FLC : Fuzzy Logic Controller.
FASH : Filtre Actif Série Hybride.

<i>Liste des figures</i>	page
Chapitre I	
Figure 1.1 : Creux de tension	04
Figure 1.2 : Déséquilibre du système triphasé de tension	05
Figure 1.3 : Filtre actif parallèle	07
Figure 1.4 : Filtre active série	08
Figure 1.5: Filtrage actif série-parallèle	08
Figure 1.6 : Réseau électrique triphasé	09
Figure 1.7 : Redresseur triphasé en pont alimentant une charge RL	10
Figure 1.8: Tension redressée et tensions triphasées au point de connexion du redresseur	10
Figure 1.9 : Courant et tension de la charge de la première phase	11
Figure 1.10 : Spectre harmonique du courant de la charge	11
Figure 1.11 : Structure de l'onduleur triphasé à deux niveaux	12
Figure 1.12 : Structure de puissance du FAS	14
Figure 1.13: Schéma d'identification des tensions perturbatrices par la méthode PQ	19
Figure 1.14 : Structure d'un PLL triphasé à base de FMV	20
Figure 1.15 : Schéma d'un régulateur PI de la PLL	21
Figure 1.16 : Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur	23
Figure 1.17: Schéma bloc de la commande par SVM du FAS avec identification des harmoniques	27
Figure 1.18 : Tension de la charge avant le filtrage	28
Figure 1.19 : Spectre harmoniques de la tension après filtrage	28
Figure 1.20 : Tension et courant de la première phase de la source	28
Figure 1.21: Tension injectée par la première phase	28
Figure 1.22: Spectre harmonique de la tension de la charge après le filtrage	29
Figure 1.23: Tensions de la charge après le filtrage	29

Figure 1.24 : Tensions de la source lors d'un creux de tension	29
Figure 1.25: Tensions injectées par le FAS lors d'un creux de tension	29
Figure 1.26 : Tensions aux bornes de la charge lors d'un creux de tension	30
Chapitre 2	
Figure 2.1 : Raccordement d'une inductance anti-harmonique	33
Figure 2.2 : Filtre résonant	34
Figure 2.3 : Types des filtres amortis	35
Figure 2.4 : Structure de puissance du filtre passif résonnant parallèle avec une charge polluante	36
Figure 2.5 : Courant de la charge avant le filtrage	38
Figure 2.6 : Spectre harmonique du courant de la charge avant le filtrage	38
Figure 2.7 : Courant de la charge après le filtrage	38
Figure 2.8 : Spectre harmonique du courant de la charge après le filtrage	38
Figure 2.9 : Tension et courant de la charge	39
Figure 2.10 : Courant de la charge avant le filtrage lors d'une variation de la charge	39
Figure 2.11 : Spectre harmonique du courant de la charge avant le filtrage	39
Figure 2.12 : Courant de la charge après le filtrage lors d'une variation de la charge	39
Figure 2.13 : Spectre harmonique du courant de la charge après le filtrage	39
Figure 2.14 : Tension et courant de la charge	39
Figure 2.15 : Structure de puissance du filtre actif série hybride	41
Figure 2.16 : Réponses du FASH	42
Figure 2.17 : Réponses du FASH	43
Figure 2.18 : Courant du filtre passif de l'harmonique cinq	43
Figure 2.19 : Courant du filtre de l'harmonique sept	43
Figure 2.20 : Réponses du FASH lors d'une variation de la charge	44
Figure 2.21 : Réponses du FASH lors d'un creux de tension	45

Figure 2.22 : Structure de puissance du FASHI	47
Figure 2.23 : Réponses du FASHI du côté première réseau	48
Figure 2.24 : Réponses du FASHI côté du deuxième réseau	49
Figure 2.25 : Réponses du FASHI côté du première réseau lors d'une variation de la charge	50
Figure 2.26 : Réponses du FASHI du côté deuxième réseau lors d'une variation de la charge	50
Chapitre 3	
Figure 3.1: Exemples de fonctions d'appartenance monotones décroissantes	53
Figure 3.2: Exemples des fonctions d'appartenance monotones croissantes	54
Figure 3.3 : Différents formes de fonctions d'appartenance	54
Figure 3.4 : Structure générale d'un système basé sur la logique floue	57
Figure 3.5 : Schéma de principe de la régulation floue	58
Figure 3.6 : Fonctions d'appartenances des variables	58
Figure 3.7 : Schéma bloc du régulateur flou	59
Figure 3.8 : Commande par logique floue du FASI	62
Figure 3.9 : Réponses du FASI du côté premier réseau	63
Figure 3.10 : Réponses du FASI du côté premier réseau lors d'un creux de tension	64
Figure 3.11 : Réponses du FASI du côté deuxième réseau	64
Figure 3.12 : Réponses du FASI du côté deuxième réseau lors d'un creux de tension	65
Figure 3.13 : Commande par logique floue du FASHI	67
Figure 3.14 : Réponses du FASHI du côté premier réseau	68
Figure 3.15 : Réponses du FASHI du côté deuxième réseau	69
Figure 3.16 : Réponses du FASHI du côté premier réseau lors d'une variation de la charge	70
Figure 3.17 : Réponses du FASHI du côté deuxième réseau lors d'une variation de la charge	71

Introduction générale

En se propageant à travers les réseaux électriques, les tensions et les courants sont idéalement des ondes sinusoïdales à la fréquence fondamentale du réseau. Cependant, selon des études publiées dans la littérature [1-4], il a été constaté que la qualité de l'onde électrique est loin d'être parfaite. Le problème principal parmi les imperfections rencontrées est la présence de courants harmoniques engendrés par les charges non linéaires sensibles. La propagation de ces courants à travers les diverses impédances du réseau crée des tensions harmoniques qui se superposent à la tension fondamentale. Les tensions déformées résultantes ont des effets néfastes sur les équipements de puissance, les dispositifs de commande, les systèmes de surveillance, les circuits de protection, etc. [1].

Les perturbations provoquées par les charges non linéaires sont bien connues. Il s'agit de l'installation de courants alternatifs non sinusoïdaux et riche en harmoniques. Ces incidents sont à l'origine de la déformation de la tension de réseau, de la réduction de sa capacité de transport et de l'augmentation des pertes dans les différents éléments le constituant [1].

Pour la compensation des différentes pollutions des harmoniques ; des solutions ont été proposées dans [5,6] parmi lesquelles les filtres passifs. Cependant, cette dernière se voit pénalisée par son encombrement, ses problèmes de résonance, ainsi que de son manque de souplesse à s'adapter aux variations du réseau et de la charge [2]. Cette contrainte a conduit à d'autres solutions plus modernes et plus efficaces. En effet, celles qui répondent le mieux aux contraintes industrielles d'aujourd'hui sont les filtres actifs parallèle, série, la combinaison parallèle-série et le filtre actif série hybride interligne (FASHI).

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

Le FASHI à l'aptitude de compenser à la fois les perturbations harmoniques et les creux des tensions dans deux réseaux séparés. Cette topologie récente sera l'objet de notre étude. L'objectif fondamentale de ce travail est la modélisation et les commandes linéaire et intelligente d'un filtre actif série hybride interligne.

Le contenu, de ce mémoire sera divisé en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous présenterons la définition des perturbations dans le réseau électrique, les principales charges émettrices des harmoniques, ainsi que les solutions traditionnelles et modernes proposées pour la mitigation de ces harmoniques. Ensuite, nous étudierons la structure générale du filtre actif série (FAS) inséré dans un réseau électrique pollué, dédié à la compensation des harmoniques de tension, il est composé d'un onduleur de tension commandé en tension pour agir en tant que source de tension. Il s'agit d'une application usuelle qui représente une étape préliminaire assez importante pour mettre en valeur l'effet compensatoire.

Le FAS est divisé en deux: la partie puissance et la partie commande. Dans la première partie, nous détaillerons les différents constituants en présentant sa modélisation. Dans la partie commande nous présenterons une méthode pour l'identification des composantes harmoniques de la tension du réseau pollué. Il s'agit d'une méthode basée sur le calcul des puissances active et réactive instantanées (PQ).

Le deuxième chapitre portera sur l'étude combiné d'un filtre passif, un filtre actif série hybride et un filtre actif série hybride interligne. Il sera divisé en trois parties. La première partie s'intéresse aux filtres passifs résonnants, sur leurs configurations et le calcul des différents éléments les constituant. La deuxième partie sera consacré au filtre actif série hybride (FASH). Ce filtre actif hybride combine les avantages du filtre passif et du filtre actif et permet aussi un bon amortissement de la résonance que le filtrage harmonique peut engendrer. Dans ce sens, le dimensionnement des filtres passifs est réalisé pour répondre aux exigences de la norme IEEE 519-1992 dont le but est de limiter la distorsion harmonique totale de tension et courant, au point de raccordement entre le distributeur d'électricité et le consommateur. Dans la troisième partie nous présenterons une topologie récente, formée de deux filtres actifs séries hybrides interlignes alimentés par la même source d'alimentation continue. Les deux filtres actifs sont mis en série avec deux réseaux électriques séparés. A la fin, une série de résultats de simulation sera présentée et interprétée.

Le troisième chapitre étudiera la méthode de la commande par logique floue et son application sur le FASI ainsi que sur le FASHI en utilisant la même méthode d'identification des harmoniques PQ dans les deux réseaux pour l'extraction des harmoniques des tensions perturbées. Les résultats obtenus par simulation seront illustrés et une étude comparative entre les commandes sera présentée.

Chapitre I

Modélisation et commande d'un filtre actif série

I.1 Introduction

La demande quantitative d'électricité a connu ces dernières années un accroissement considérable. L'augmentation des usagers de l'électricité dans la vie quotidienne et l'exigence d'un plus grand confort, en sont les causes principales.

Parallèlement, dans les domaines tertiaires et industriels, l'apparition de matériels de plus en plus sophistiqués utilisant l'électronique de puissance et l'informatique, a provoqué l'émergence d'une exigence plus qualitative : le kWh électrique ne doit plus seulement être immédiatement disponible et en quantité suffisante, mais doit aussi être de qualité, c'est-à-dire propre et fiable [1].

Il va sans dire que l'objet assigné dans ce chapitre dans un premier temps est la mise en évidence des différents types de perturbations qui peuvent affecter le réseau, leurs origines et leurs conséquences sur les équipements électriques. Dans un second temps, de résoudre ce problème en utilisant un filtre actif série pour l'élimination des harmoniques de tension qui peuvent provoquer des problèmes majeurs surtout pour les charges non linéaires sensibles.

I.2 Perturbations électriques

Les tensions d'un réseau électrique constituent un système alternatif triphasé, dont la fréquence de base est de 50 ou 60 Hz. Les paramètres caractéristiques d'un tel système sont [1] :

- La fréquence ;
- L'amplitude des tensions ;
- La forme d'onde qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde ;
- La symétrie du système triphasé (égalité des amplitudes et des déphasages entre les phases).

La qualité de la tension peut être affectée, soit du fait de certains incidents inhérents à la nature physique et aux sujétions liées à l'exploitation du réseau, soit du fait de certains récepteurs. Ces défauts se manifestent sous forme de différentes perturbations affectant un ou plusieurs des quatre paramètres précédemment définis. Dans ce qui suit on va présenter les perturbations les plus fréquentes affectant les courants et les tensions dans un réseau électrique.

I.2.1 Creux et coupure de tension

Les creux de tension sont définis comme étant une diminution de 10% à 90% de l'amplitude de la tension nominale. Le temps imparti est de 10ms à 20s. Ils sont compris entre deux à-coups de tension, le premier étant son effondrement, le second sa remontée. L'effondrement de la tension est proportionnel à l'élévation du courant. Inversement, la remontée de la tension est proportionnelle à l'effondrement du courant. Cependant, l'importance de ces à-coups est d'autant plus faible que l'on s'éloigne de l'endroit où s'est produite la perturbation. Les coupures brèves sont définies comme étant des disparitions de la tension d'alimentation pendant un temps qui n'excède pas une minute [3]. Par convention de langage [5], une coupure brève est un creux de tension de 100% de l'amplitude de la tension.

Les creux de tensions sont principalement produits par les court-circuits imputables aux incidents naturels du réseau et aux manœuvres d'organes de protection éliminant ces défauts [3]. Ils sont également la conséquence d'appel de puissances importantes lors de la mise en service de certaines charges du réseau (démarrage du moteur ; etc.).

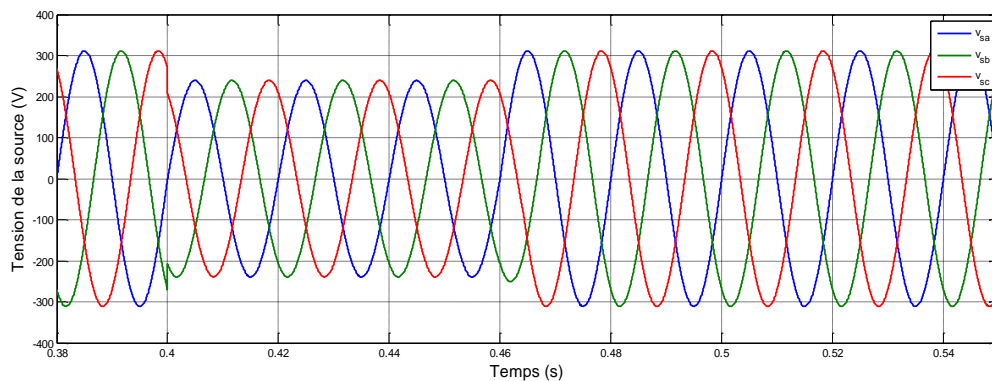


Figure (I.1) : Creux de tension

I.2.2 Surtension

Toute tension appliquée à un équipement dont la valeur de crête sort des limites d'un gabarit défini par une norme ou une spécification est une surtension. Les réseaux peuvent être le siège de surtensions impulsionnelles par rapport à la terre, due entre autres, à des coups de foudre. Des surtensions impulsionnelles dues à des manœuvres d'appareils peuvent également se produire sur les réseaux de distribution ou sur les installations des utilisateurs [2,3].

I.2.3 Déséquilibre du système de tension triphasé

Un déséquilibre est défini comme étant une différence d'au moins une des trois tensions du réseau électrique soit en amplitude et/ou en déphasage [1], [6], [7]. Il résulte presque toujours de la présence de fortes charges monophasées raccordées isolément sur le réseau triphasé.

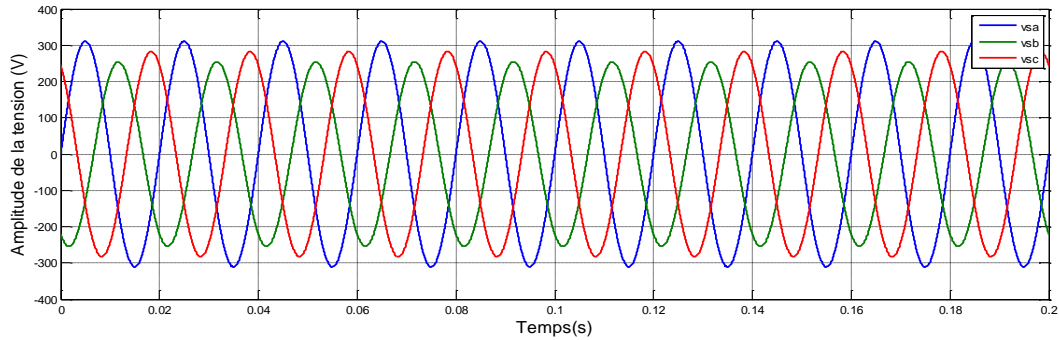


Figure (I.2) : Déséquilibre du système triphasé de tension

I.2.4 Perturbations harmoniques

Les harmoniques sont la superposition sur l'onde fondamentale à 50 ou 60 Hz, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples de celle du fondamentale. Les charges domestiques et industrielles à circuit non-linéaire tel que les appareils d'éclairage fluorescent, fours à arc, redresseur, représentent la plus grande majorité des sources d'harmoniques [8,9].

I.2.4.1 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 [3][8].

I.2.4.1.1 Taux d'harmonique de rang h

$$s_h = x_h / x_1 \quad (\text{I.1})$$

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

I.2.4.1.2 Taux global de distorsion harmonique

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

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

Généralement, les harmoniques pris en compte dans un réseau électrique sont inférieurs à 2500 Hz. Les harmoniques de fréquence plus élevée sont fortement atténués 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 [1], [3], [6].

I.2.4.1.3 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 [12].

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

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) est prise en compte dans le calcul du facteur de puissance.

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

Où, v_{eff} représente la valeur efficace de la tension du réseau électrique, et i_h le courant harmonique de rang h .

Le facteur de puissance devient :

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

où

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}$$

Avec :

φ_1 : Déphasage entre la puissance active et la puissance apparente S .

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

I.2.4.2 Sources des perturbations harmoniques

La cause principale des harmoniques est l'injection des courants non-sinusoidaux 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 [8], [10],[11].

I.2.4.3 Conséquences des harmoniques

De nombreux effets des harmoniques sur les installations et les équipements électriques peuvent être cités. Les effets les plus importants sont l'échauffement, l'interférence avec les réseaux de télécommunication, le dysfonctionnement de certains équipements électriques et le risque d'excitation de résonance [2],[10].

I.2.5 Solutions de dépollution du réseau électrique

Afin de compenser les perturbations, deux groupes de solution de dépollution, traditionnelle et moderne sont présentés.

I.2.5.1 Solutions traditionnelles de la dépollution

Afin de dépolluer les réseaux électriques, plusieurs solutions traditionnelles ont été proposées dans la littérature, dont le but est de limiter la propagation et l'effet des harmoniques dans les réseaux électriques. On peut citer principalement [3],[8][11] :

- 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,
- 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 de filtrage les plus répandus, 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 :

- 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.2.5.2 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 [3][12]. Il existe trois topologies possibles de filtres actifs :

I.2.5.2.1 Filtre actif parallèle

La figure (I.3) montre le schéma triphasé équivalent d'un filtre actif parallèle, à base d'un onduleur de tension à deux niveaux, connecté entre un réseau alternatif et une charge non linéaire. Ce compensateur shunt est une source de courant contrôlée qui échange un courant avec le réseau de façon à améliorer les caractéristiques du courant amont [13].

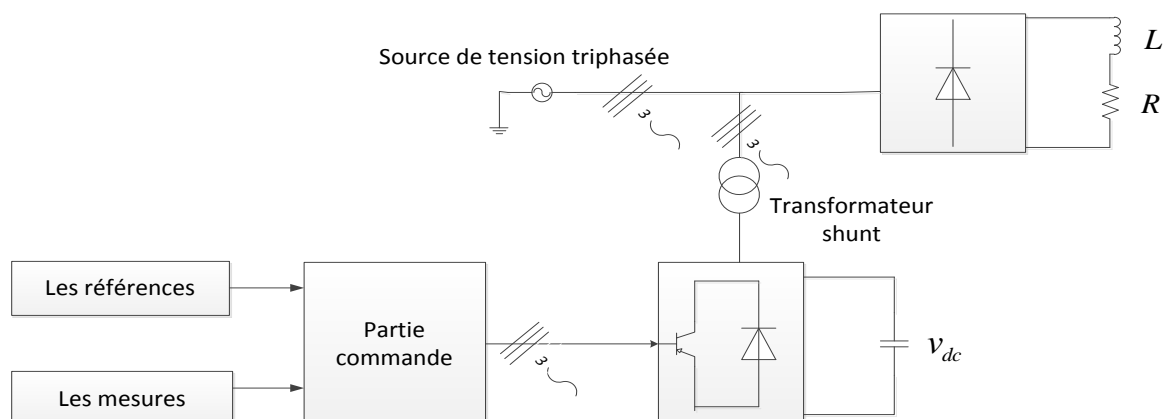


Figure (I.3) : Filtre actif parallèle

I.2.5.2.2 Filtre actif série

Le filtre actif série se comporte comme un générateur de tension en opposition de phase avec la tension harmonique venant de la source. Il est destiné aussi à protéger les installations sensibles aux perturbations provenant du réseau telles que les harmoniques en tension, les creux, etc. [2][13]. Le montage est représenté à la figure (I.4).

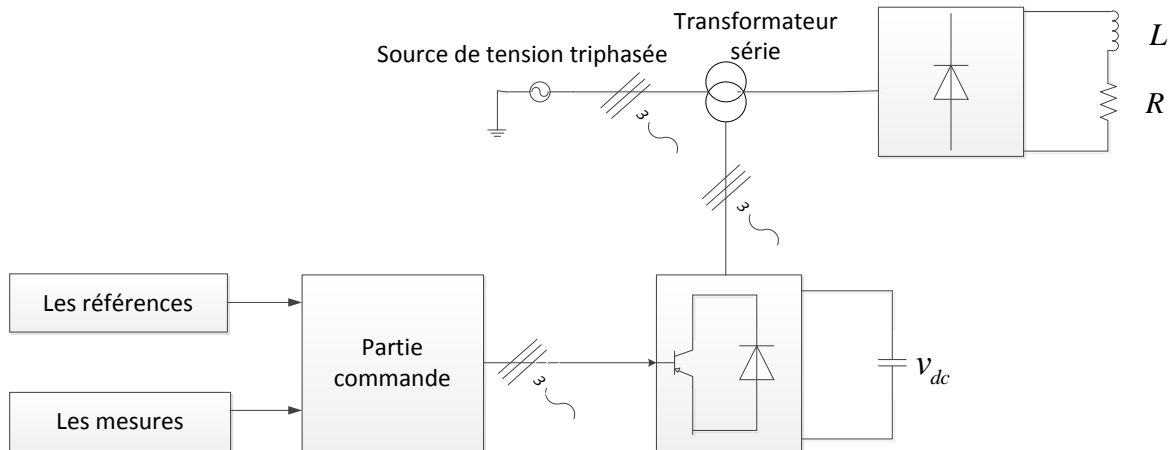


Figure (I.4) : Filtre active série

I.2.5.2.3 Filtrage actif série-parallèle (UPQC)

C'est une solution de compensation universelle basée sur le fonctionnement simultané des filtres actifs parallèle et série figure (I.5). Cette topologie est appelée combinaison parallèle série actifs ou (Unified Power Quality Conditioner). Il possède les avantages cumulés des filtres actifs parallèles et séries [2],[11][13]. Le filtre actif série, lorsqu'il est placé en amont du filtre actif parallèle permet de dépolluer la source des tensions perturbatrices. Lorsqu'il est placé en aval, il permet d'isoler la charge de la source perturbée [10].

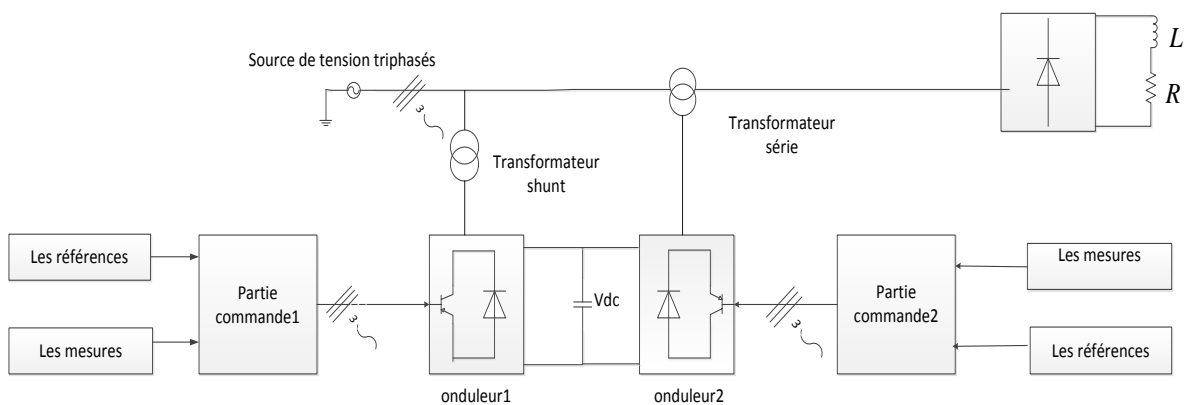


Figure (I.5): Filtrage actif série-parallèle

I.3 Etude de la partie puissance de filtre active série

I.3.1 Modélisation du réseau électrique

Le réseau est assimilable à une source de tension sinusoïdale en série avec une impédance, dite de court-circuit. D'où la représentation du réseau par un système de tensions triphasées équilibrées en série avec une impédance, figure (I.6).

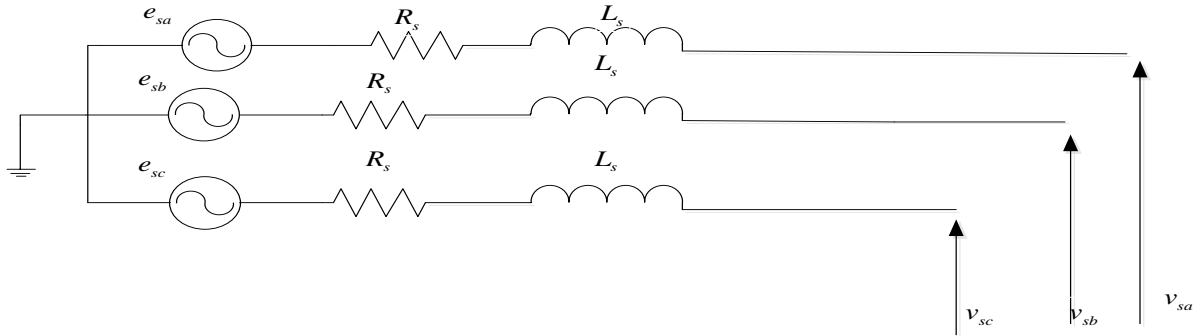


Figure (I.6) : Réseau électrique triphasé

Les tensions du réseau électrique sont données par :

$$\begin{aligned} e_{sa} &= \sqrt{2}v_{eff} \sin(\omega t) \\ e_{sb} &= \sqrt{2}v_{eff} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ e_{sc} &= \sqrt{2}v_{eff} \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{aligned} \quad (I.6)$$

Où : $\omega = 2\pi f$: pulsation du réseau et v_{eff} : la valeur efficace du réseau.

I.3.2 Modélisation de la charge polluante

La charge polluante est un redresseur de tension triphasé à diodes, connectée au réseau par l'intermédiaire d'une impédance de ligne (L_l, R_l), et alimentant une charge inductive (L_a, R_a) côté continu, figure (I.7).

Pour simplifier le calcul, on suppose que le redresseur est idéal et l'empiètement est nul (deux diodes de même bras ne peuvent pas conduire simultanément). Lorsque D_1 conduit, l'une de deux diodes D'_1 et D'_3 conduit également. Il en vient que D_1 conduit lorsque v_{sa} est supérieure à v_{sb} et v_{sc} , ou encore :

$$v_{sa} = \text{Max}(v_{sj}); j = a, b, c$$

Le même raisonnement conduit aux conditions suivantes :

$$D_i \text{ Conduit si } v_{si} = \text{Max}(v_{sj}); i = 1, 2, 3; j = a, b, c$$

$$D'_i \text{ Conduit si } v_{sj} = \text{Min}(v_{sj}); i = 1, 2, 3; j = a, b, c$$

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

$$U_d = \text{Max}(v_{si}) - \text{Min}(v_{sj}); j = a, b, c \tag{I.7}$$

La relation (I.8), permet de définir la valeur moyenne de la tension redressée comme suit :

$$\bar{U}_d = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} v_{\max} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} v_{\text{eff}} \tag{I.8}$$

La figure (I.8) représente la tension U_d à la sortie du redresseur avec la tension triphasée au point de connexion du redresseur.

En supposant que le courant redressé i_d est parfaitement filtré et constant, on a :

$$i_{sa} = i_d \text{ Pour } \frac{\pi}{6} \leq \omega t \leq \frac{5\pi}{6} \text{ et } i_{\text{soeff}} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} i_d^2 d\omega t} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d \tag{I.9}$$

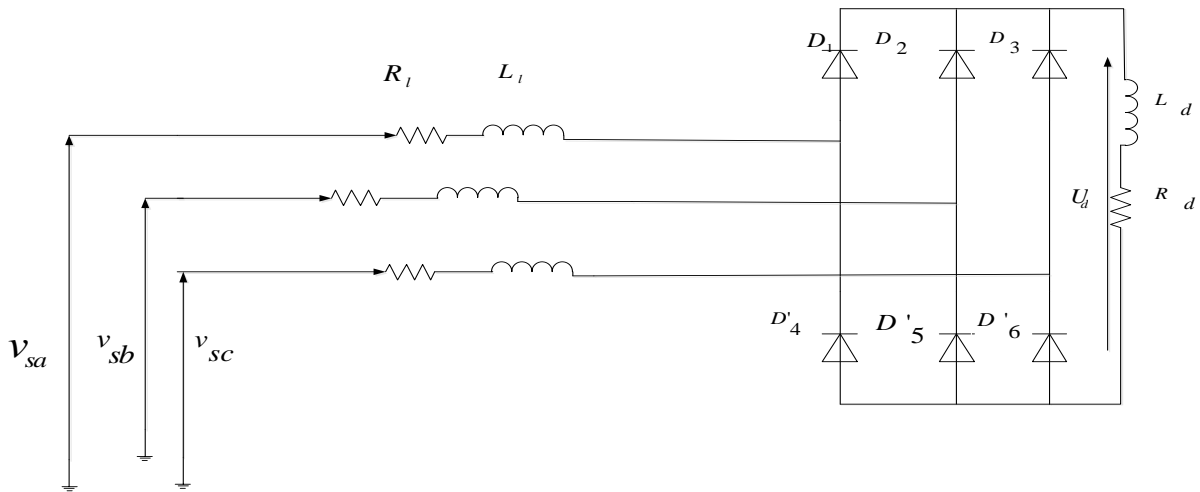


Figure (I.7) : Redresseur triphasé en pont alimentant une charge RL

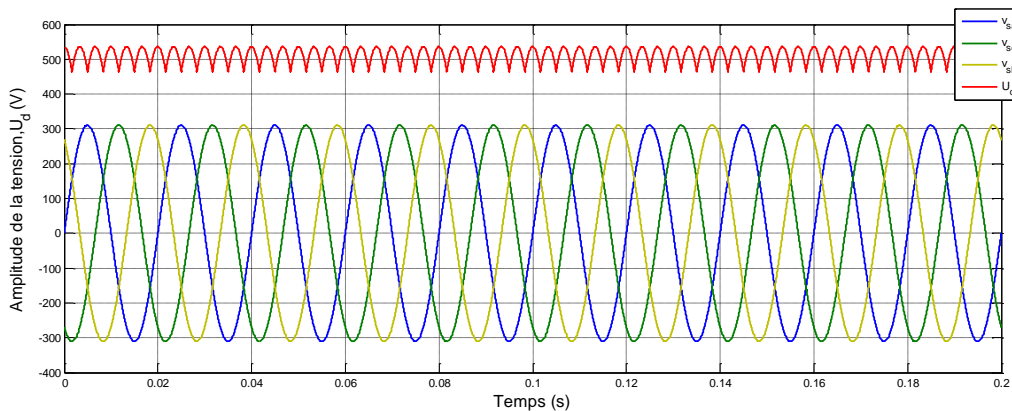


Figure (I.8) : Tension redressée et tensions triphasées au point de connexion du redresseur

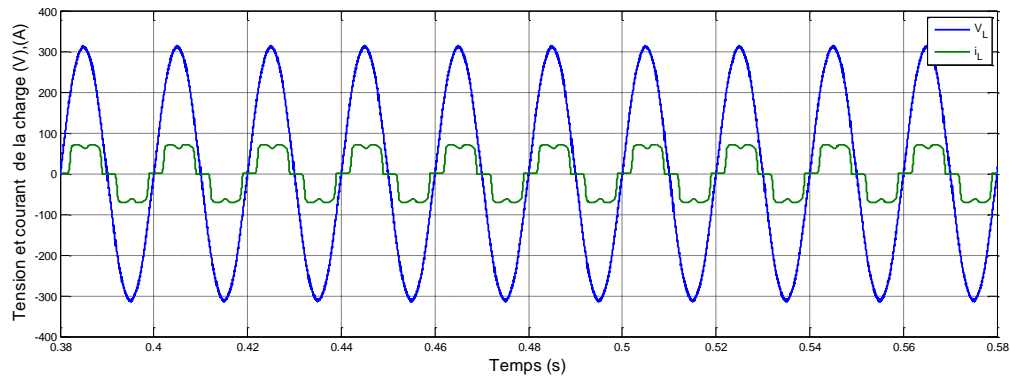


Figure (I.9) : Courant et tension de la charge de la première phase

La figure (I.9) montre le courant et la tension de la charge polluante et la figure (I.10) représente l'analyse spectrale de ce courant. La valeur THD est de 28.13%.

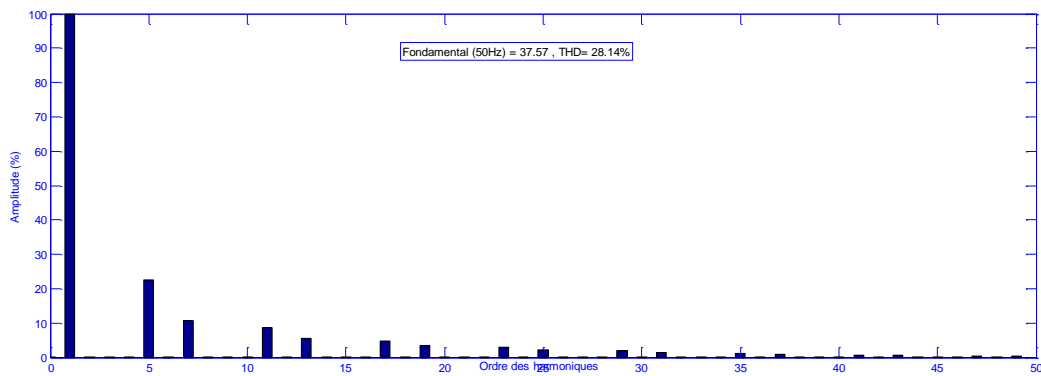


Figure (I.10) : Spectre harmonique du courant de la charge

I.3.3 Modélisation de l'onduleur

La structure générale de l'onduleur de tension à deux niveaux représentée dans la figure (I.11) est constituée de deux interrupteurs par bras. Ces derniers ont la particularité d'être bidirectionnels et entièrement commandables à l'ouverture et à la fermeture. Ils peuvent être soit des MOSFET pour les faibles puissances et fréquences très élevées, des IGBT pour les grandes puissances et fréquences élevées, ou des GTO pour les très grandes puissances et fréquences faibles [3][8]. Pour assurer la circulation du courant dans les deux sens, l'interrupteur doit être placé en antiparallèle avec une diode.

L'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur de la figure (I.11) dépendent de l'état des signaux de commande (s_a, s_b, s_c), comme défini ci-dessous :

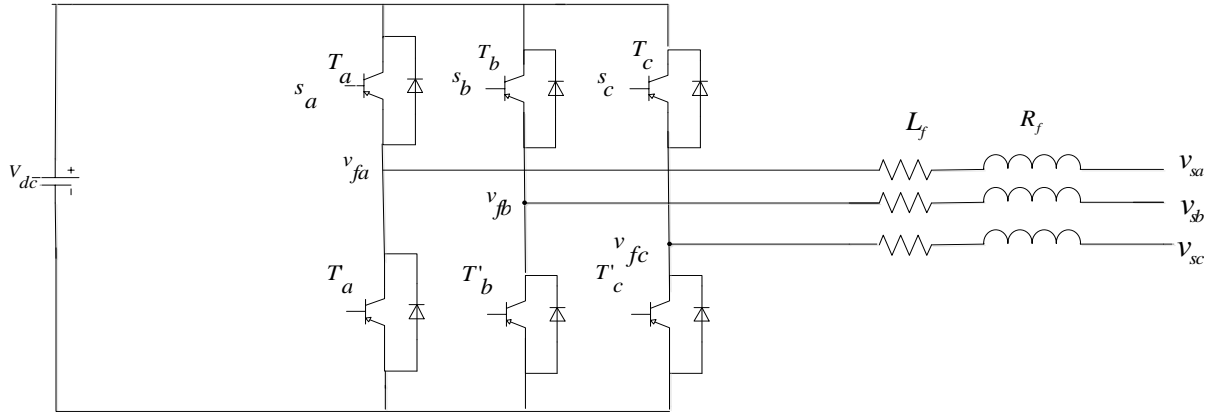


Figure (I.11) : Structure de l'onduleur triphasé à deux niveaux

$$s_i = \begin{cases} 1 & \text{si } T_i \text{ est fermé et } T'_i \text{ est ouvert} \\ 0 & \text{si } T_i \text{ est ouvert et } T'_i \text{ est fermé} \end{cases} \quad \text{avec } i = a, b, c$$

Les tensions composées de l'onduleur s'expriment en fonction des états des interrupteurs comme suit :

$$\begin{aligned} u_{fab} &= v_{fam} - v_{fbm} = v_{dc} (s_a - s_b) \\ u_{fbc} &= v_{fbm} - v_{fcm} = v_{dc} (s_b - s_c) \\ u_{fca} &= v_{fcm} - v_{fam} = v_{dc} (s_c - s_a) \end{aligned} \quad (\text{I.10})$$

Et en fonction des tensions simples de l'onduleur :

$$\begin{aligned} u_{fab} &= v_{fa} - v_{fb} \\ u_{fbc} &= v_{fb} - v_{fc} \\ u_{fca} &= v_{fc} - v_{fa} \end{aligned} \quad (\text{I.11})$$

Dans un système de trois tensions équilibrées, la somme des tensions est nulle, alors :

$$v_{fa} + v_{fb} + v_{fc} = 0 \quad (\text{I.12})$$

A l'aide des équations (I.11) et (I.12), on peut trouver les tensions simples de l'onduleur en fonction de celles composées :

$$\begin{aligned}
 v_{fa} &= \frac{u_{fab} - u_{fca}}{3} \\
 v_{fb} &= \frac{u_{fbc} - u_{fab}}{3} \\
 v_{fc} &= \frac{u_{fca} - u_{fbc}}{3}
 \end{aligned} \tag{I.13}$$

A partir des systèmes (I.11) et (I.13) les tensions simples de l'onduleur peuvent s'écrire en fonction des états s_a, s_b, s_c de la tension v_{dc} comme suit :

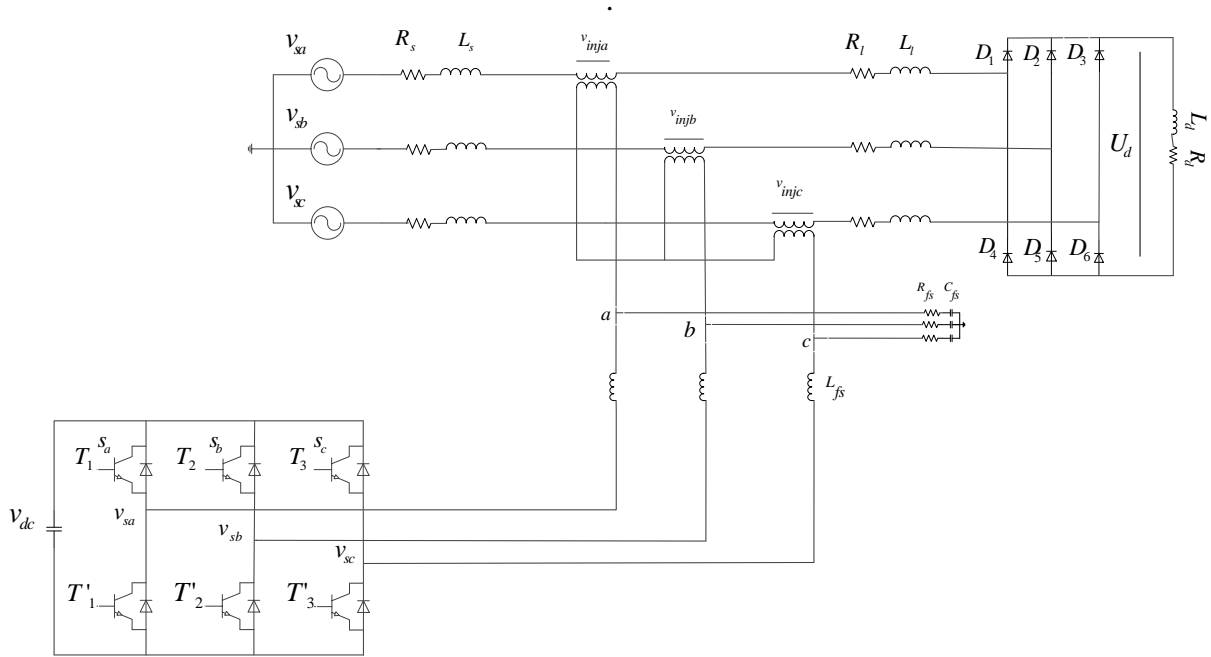
$$\begin{aligned}
 v_{fa} &= v_{dc} \frac{2s_a - s_b - s_c}{3} \\
 v_{fb} &= v_{dc} \frac{2s_b - s_a - s_c}{3} \\
 v_{fc} &= v_{dc} \frac{2s_c - s_b - s_a}{3}
 \end{aligned} \tag{I.14}$$

Et sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} v_{fa} \\ v_{fb} \\ v_{fc} \end{bmatrix} = \frac{v_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_a \\ s_b \\ s_c \end{bmatrix} \tag{I.15}$$

I.3.4 Modélisation du filtre active série

La figure (I.12) montre la structure de l'onduleur à deux niveaux fonctionnant comme un filtre active série. Ce compensateur série injecte une tension en opposition de phase avec la tension harmonique venant de la source à travers trois transformateurs d'injection (avec un rapport de transformation unitaire)



Figure(I.12) : Structure de puissance du FAS

L'application de la loi de Kirchhoff pour les tensions donne :

$$\begin{aligned}
 L_{fs} \frac{di_{fsa}}{dt} &= -R_{fs} i_{fsa} - v_{inja} + v_{fa} \\
 L_{fs} \frac{di_{fsb}}{dt} &= -R_{fs} i_{fsb} - v_{injb} + v_{fb} \\
 L_{fs} \frac{di_{fsc}}{dt} &= -R_{fs} i_{fsc} - v_{injc} + v_{fc}
 \end{aligned}
 \tag{I.16}$$

Le modèle en courants du FAS dans le repère stationnaire est :

$$\begin{aligned}
 \frac{di_{fsa}}{dt} &= \frac{-R_{fs} i_{fsa}}{L_{fs}} - \frac{1}{L_{fs}} v_{inja} + \frac{1}{L_{fs}} v_{fa} \\
 \frac{di_{fsb}}{dt} &= \frac{-R_{fs} i_{fsb}}{L_{fs}} - \frac{1}{L_{fs}} v_{injb} + \frac{1}{L_{fs}} v_{fb} \\
 \frac{di_{fsc}}{dt} &= \frac{-R_{fs} i_{fsc}}{L_{fs}} - \frac{1}{L_{fs}} v_{injc} + \frac{1}{L_{fs}} v_{fc}
 \end{aligned}
 \tag{I.17}$$

Le modèle en courants du FAS dans le repère stationnaire est :

$$\begin{aligned}\frac{di_{fs\alpha}}{dt} &= \frac{-R_{fs} i_{fs\alpha}}{L_{fs}} - \frac{1}{L_{fs}} v_{inj\alpha} + \frac{1}{L_{fs}} v_{f\alpha} \\ \frac{di_{fs\beta}}{dt} &= \frac{-R_{fs} i_{fs\beta}}{L_{fs}} - \frac{1}{L_{fs}} v_{inj\beta} + \frac{1}{L_{fs}} v_{f\beta}\end{aligned}\quad (1.18)$$

Le modèle en courants du FAS dans le repère synchrone est :

$$\begin{aligned}\frac{di_{fsd}}{dt} &= \frac{-R_{fs} i_{fsd}}{L_{fs}} - \frac{1}{L_{fs}} v_{inj d} + \frac{1}{L_{fs}} v_{fd} + \omega_s i_{fsq} \\ \frac{di_{fsq}}{dt} &= \frac{-R_{fs} i_{fsq}}{L_{fs}} - \frac{1}{L_{fs}} v_{inj q} + \frac{1}{L_{fs}} v_{fq} - \omega_s i_{fsd}\end{aligned}\quad (1.19)$$

Un deuxième modèle s'obtient par l'application de la loi de Kirchhoff pour les courants aux nœuds (a, b et c), comme suit :

$$\begin{aligned}C_{fs} \frac{dv_{inja}}{dt} &= i_{la} + i_{fsa} \\ C_{fs} \frac{dv_{inj b}}{dt} &= i_{lb} + i_{fsb} \\ C_{fs} \frac{dv_{inj c}}{dt} &= i_{lc} + i_{fsc}\end{aligned}\quad (1.20)$$

Alors le modèle en tensions du FAS dans le repère triphasé est :

$$\begin{aligned}\frac{dv_{inja}}{dt} &= \frac{1}{C_{fs}} i_{la} + \frac{1}{C_{fs}} i_{fsa} \\ \frac{dv_{inj b}}{dt} &= \frac{1}{C_{fs}} i_{lb} + \frac{1}{C_{fs}} i_{fsb} \\ \frac{dv_{inj c}}{dt} &= \frac{1}{C_{fs}} i_{lc} + \frac{1}{C_{fs}} i_{fsc}\end{aligned}\quad (1.21)$$

Le modèle en tensions du FAS dans le repère synchrone est :

$$\begin{aligned}\frac{dv_{inj d}}{dt} &= \frac{1}{C_{fs}} i_{ld} + \frac{1}{C_{fs}} i_{fsd} + \omega_s v_{inj q} \\ \frac{dv_{inj q}}{dt} &= \frac{1}{C_{fs}} i_{lq} + \frac{1}{C_{fs}} i_{fsq} - \omega_s v_{inj d}\end{aligned}\quad (1.22)$$

Avec $\omega_s = 2\pi f_s$: la pulsation du vecteur de tension v_s

I.4 Etude de la partie commande du filtre actif série

I.4.1 Identification des tensions harmoniques du compensateur active série

La méthode d'identification sert à calculer les tensions perturbatrices qui sont injectées par l'onduleur, en opposition de phase, pour dépolluer la tension aux bornes de la charge à protéger. Ces tensions perturbatrices représentent les tensions déséquilibrées et harmoniques, et les creux de tension [3]. Dans ce cas, les méthodes d'identification des tensions perturbatrices sont constitués de deux parties, partie d'extraction des harmoniques qui est propre à chaque méthode et une autre commune à toutes les méthodes, chargée de calculer la chute de tension aux bornes de la charge en cas de creux ou déséquilibre de tension.

I.4.1.1 Méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées (PQ)

Cette méthode offre l'avantage de choisir la perturbation à compenser avec précision, rapidité, et facilité d'implantation [10]. Elle n'est cependant valable que si les tensions appliquées à l'entrée de l'identificateur sont équilibrées [5], [14]. Dans le cas où la tension du réseau est polluée, un système à base de PLL est ajouté après la mesure des tensions au point de connexion du filtre actif. Une autre solution efficace de ce problème peut être l'insertion d'un filtre appelé filtre multi-variables (FMV) après la mesure ou l'estimation de ces tensions.

Cette méthode exploite la transformation des paramètres du système dans le repère triphasé abc en biphasé dans le repère stationnaire. Notons par $(v_{sa} \ v_{sb} \ v_{sc})$ et $(i_{la} \ i_{lb} \ i_{lc})$ les tensions mesurées au point de raccordement du filtre actif et les courants absorbés par le charge polluante respectivement:

$$\begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} \quad (1.23)$$

$$\begin{bmatrix} i_{l\alpha} \\ i_{l\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{la} \\ i_{lb} \\ i_{lc} \end{bmatrix} \quad (1.24)$$

Si on fait coïncider les axes α et β avec les axes réels et imaginaires du plan complexe, les systèmes triphasés des tensions et des courants s'écrivent :

$$\begin{aligned} v_s &= v_{s\alpha} + jv_{s\beta} \\ i_l &= i_{l\alpha} + ji_{l\beta} \end{aligned} \quad (1.25)$$

On n'en déduit que la puissance apparente complexe est:

$$S_l = v_s i_l^* \quad (1.26)$$

Où

i_l^* : Le vecteur conjugué de i_l donc :

$$S_l = (v_{s\alpha} + jv_{s\beta}) \begin{pmatrix} i_{l\alpha} \\ -i_{l\beta} \end{pmatrix} \quad (1.27)$$

Ce qui donne :

$$S_l = (v_{s\alpha} i_{l\alpha} + v_{s\beta} i_{l\beta}) + j(v_{s\beta} i_{l\alpha} - v_{s\alpha} i_{l\beta}) \quad (1.28)$$

Par identification avec l'expression :

$$S_l = P_l + jQ_l \quad (1.29)$$

Alors la puissance réelle instantanée peut s'écrire comme suit :

$$P_l = v_{s\alpha} i_{l\alpha} + v_{s\beta} i_{l\beta} \quad (1.30)$$

Et la puissance imaginaire instantanée peut s'écrire comme suit :

$$Q_l = v_{s\beta} i_{l\alpha} - v_{s\alpha} i_{l\beta} \quad (1.31)$$

Les puissances P_l et Q_l ont une signification plus large que les puissances active et réactive habituelles. En effet, contrairement aux puissances active et réactive, qui ne considèrent que la fréquence fondamentale, les puissances réelle et imaginaire prennent en compte toutes les composantes harmoniques de courant et de tension. C'est pourquoi on leur donne des autres dénominations (puissance réelle et puissance imaginaire) [2].

A partir des relations et (I.30) (I.31) nous pouvons établir la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} P_l \\ Q_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & v_{s\beta} \\ v_{s\beta} & -v_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{l\alpha} \\ i_{l\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{l\alpha} & i_{l\beta} \\ -i_{l\beta} & i_{l\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (1.32)$$

Dans le cas général, chacune des puissances P_l et Q_l comporte une partie continue et une partie alternative, ce qui nous permet d'écrire l'expression ci-dessous [17], [24] :

$$P_l = \bar{P}_l + \tilde{P}_l \quad (1.33)$$

$$Q_l = \bar{Q}_l + \tilde{Q}_l \quad (1.34)$$

Avec : \bar{P}_l et \bar{Q}_l : les puissances continues de P_l et Q_l liées aux fondamentales de v_s et i_l

Et \tilde{P}_l et \tilde{Q}_l : les puissances alternatives de P_l et Q_l liées aux harmoniques de v_s et i_l .

Donc en faisant passer P_l et Q_l à travers des filtres passe-bas (FPB), et en inversant (I.32), les tensions fondamentales dans le référentiel (α - β) sont données par:

$$\begin{bmatrix} \bar{v}_{s\alpha} \\ \bar{v}_{s\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{l\alpha} & i_{l\beta} \\ -i_{l\beta} & i_{l\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{P}_l \\ \bar{Q}_l \end{bmatrix} \quad (1.35)$$

Les tensions harmoniques sont calculées par :

$$\begin{bmatrix} v_{h\alpha} \\ v_{h\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{v}_{s\alpha} \\ \bar{v}_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (1.36)$$

Finalement les tensions perturbatrices de référence dans le repère abc sont données par:

$$\begin{bmatrix} v_{fa} \\ v_{fb} \\ v_{fc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{h\alpha} \\ v_{h\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta v_{la} \\ \Delta v_{lb} \\ \Delta v_{lc} \end{bmatrix} \quad (1.37)$$

Ou Δv_{lx} représente la chute de tension aux bornes de la charge.

Le schéma de principe permettant l'identification des tensions perturbatrices basée sur la méthode (PQ) est donné par la figure (I.13).

Pour estimer la phase on suppose que les trois tensions du réseau sont sinusoïdales, définies par :

$$\begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} = V_{\max} \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (1.38)$$

En faisant la transformation dans le repère synchrone, on obtient :

$$\begin{aligned} v_{s\alpha} &= \sqrt{\frac{3}{2}} V_{\max} \left[\sin(\omega t) - \frac{1}{2} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) - \frac{1}{2} \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \right] \\ v_{s\beta} &= \sqrt{\frac{3}{2}} V_{\max} \left[\frac{\sqrt{3}}{2} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \right] \end{aligned} \quad (1.39)$$

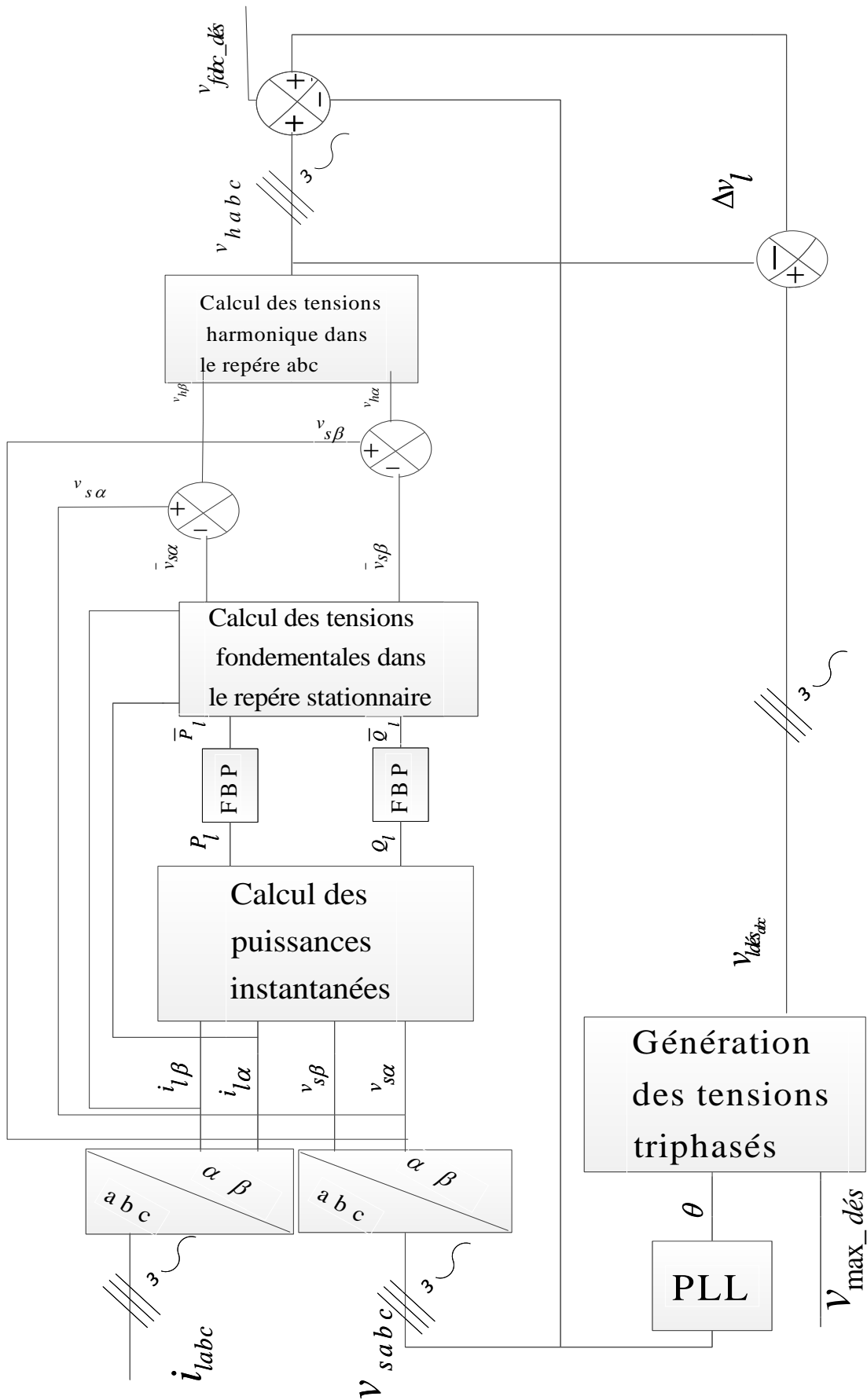


Figure (I.13): Schéma d'identification des tensions perturbatrices par la méthode PQ

Où $v_{ldés}$ représente la tension désirée aux bornes de la charge, dans notre cas

$$v_{ldés} = \sqrt{2} \ 220V$$

Le schéma du PLL adopté à base de filtre FMW est donné par la figure (I.14).

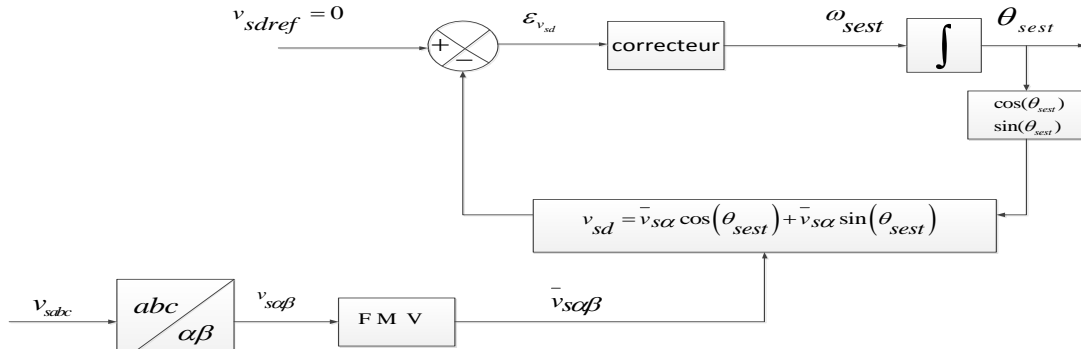


Figure (I.14) : Structure d'un PLL triphasé à base de FMV

En simplifiant des relations (I.38) et (I.39) on trouve :

$$v_{s\alpha} = 3\sqrt{\frac{3}{2}}V_{\max} \sin(\theta) \quad (I.40)$$

$$v_{s\beta} = -3\sqrt{\frac{3}{2}}V_{\max} \cos(\theta)$$

Et dans le repère synchrone :

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}}V_{\max} \begin{bmatrix} \cos(\theta_{sest}) & \sin(\theta_{sest}) \\ -\sin(\theta_{sest}) & \cos(\theta_{sest}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (I.41)$$

Avec θ_{sest} est la position angulaire estimée du vecteur de tensions triphasées

En remplaçant la relation (I.40) dans (I.41) on obtient :

$$v_{sd} = 3\sqrt{\frac{3}{2}}V_{\max} [\sin(\theta) \cos(\theta_{sest}) - \cos(\theta) \sin(\theta_{sest})] \quad (I.42)$$

$$v_{sq} = 3\sqrt{\frac{3}{2}}V_{\max} \sin(\theta - \theta_{sest})$$

En supposant que $\theta - \theta_{sest}$ est très petit, alors, l'expression précédente peut être exprimée par :

$$v_{sq} = 3\sqrt{\frac{3}{2}}V_{\max} (\theta - \theta_{sest}) \quad (I.43)$$

La pulsation angulaire estimée est donnée par :

$$\omega_{sest} = H(s)3\sqrt{\frac{3}{2}}V_{\max} (\theta - \theta_{sest}) \quad (I.44)$$

Avec $H(s)$ la fonction de transfert du régulateur PI définie par : $H(s) = k_p + \frac{k_i}{s}$

La position angulaire est donnée par :

$$\omega_{sest} = \frac{\theta_{sest}}{s} \quad (I.45)$$

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

$$\frac{\theta_{sest}}{\theta} = \frac{(k_p s + k_i) 3\sqrt{\frac{3}{2}} V_{\max}}{s^2 + (k_p s + k_i) 3\sqrt{\frac{3}{2}} V_{\max}} \quad (I.46)$$

Par identification on trouve :

$$\begin{aligned} k_p &= \frac{2\sqrt{2}}{3\sqrt{3}} \frac{\omega_n \xi}{V_{\max}} \\ k_i &= \frac{1}{3} \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{(\omega_n)^2}{V_{\max}} \end{aligned} \quad (I.47)$$

Nous obtenons donc le modèle simplifié de la PLL, illustré sur la figure (I.15)

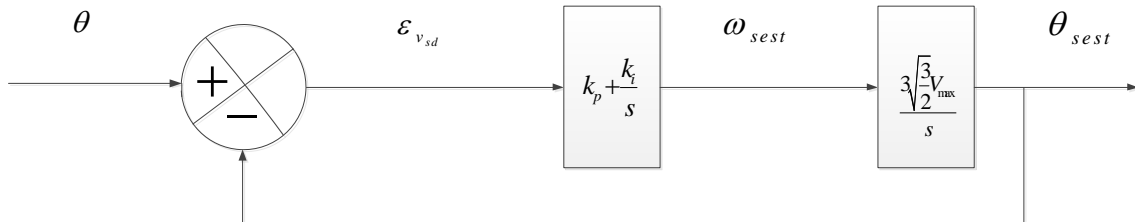


Figure (I.15) : Schéma d'un régulateur PI de la PLL

I.4.2 Commande de l'onduleur

I.4.2.1 MLI vectorielle (SVM)

La modulation de largeur d'impulsion vectorielle utilise un algorithme numérique afin d'obtenir une séquence de commande des interrupteurs de l'onduleur permettant de générer un vecteur tension de sortie qui s'approche le mieux possible du vecteur tension de référence [3][8][10][9]. Cette technique de MLI suit les principes suivants :

- Echantillonnage du signal de référence à intervalles réguliers Th appelé période de modulation,
- Réalisation dans chaque période de modulation, d'une impulsion de largeur centrée sur la période, et dont la valeur moyenne est égale à la valeur de la tension de référence au milieu de la période de modulation (MLI symétrique),

- Uniformisation des états de tous les interrupteurs d'un même demi-pont au centre et aux deux extrémités de la période.

On peut alors se ramener au contrôle d'un vecteur diphasé, nommé v_f , image du système triphasé à travers la transformation de *Concordia* exprimée par la relation (I.48):

$$\vec{v}_f = \begin{bmatrix} v_{f\alpha} \\ v_{f\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{fa} \\ v_{fb} \\ v_{fc} \end{bmatrix} \quad (\text{I.48})$$

On pourra exprimer huit cas possibles de tension de sortie du filtre actif v_k (référéés au neutre n de la source), comme le montre le Tableau (I.1):

Tableau (I.1) : Tensions générées par l'onduleur de tension triphasé

Vecteurs	s_a	s_b	s_c	v_{fa}	v_{fb}	v_{fc}	$v_{f\alpha}$	$v_{f\beta}$
\vec{v}_0	0	0	0	0	0	0	0	0
\vec{v}_1	1	0	0	$\frac{2}{3}v_{dc}$	$-\frac{1}{3}v_{dc}$	$-\frac{1}{3}v_{dc}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}v_{dc}$	0
\vec{v}_2	1	1	0	$-\frac{1}{3}v_{dc}$	$\frac{2}{3}v_{dc}$	$-\frac{1}{3}v_{dc}$	$\frac{-1}{\sqrt{6}}v_{dc}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}v_{dc}$
\vec{v}_3	0	1	0	$\frac{1}{3}v_{dc}$	$\frac{1}{3}v_{dc}$	$-\frac{2}{3}v_{dc}$	$\frac{1}{\sqrt{6}}v_{dc}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}v_{dc}$
\vec{v}_4	0	1	1	$-\frac{1}{3}v_{dc}$	$-\frac{1}{3}v_{dc}$	$\frac{2}{3}v_{dc}$	$\frac{-1}{\sqrt{6}}v_{dc}$	$-\frac{1}{\sqrt{2}}v_{dc}$
\vec{v}_5	0	0	1	$\frac{1}{3}v_{dc}$	$-\frac{2}{3}v_{dc}$	$\frac{1}{3}v_{dc}$	$\frac{1}{\sqrt{6}}v_{dc}$	$-\frac{1}{\sqrt{2}}v_{dc}$
\vec{v}_6	1	0	1	$-\frac{2}{3}v_{dc}$	$\frac{1}{3}v_{dc}$	$\frac{1}{3}v_{dc}$	$-\sqrt{\frac{2}{3}}v_{dc}$	0
\vec{v}_7	1	1	1	0	0	0	0	0

La commande basée sur une *MLI* vectorielle pilote l'onduleur dans le repère stationnaire α - β , où huit vecteurs de tensions sont accessibles et nommés ($v_0, v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7$). Parmi ces vecteurs, deux sont nuls (v_0, v_7), les autres étant répartis tous les 60° suivant un hexagone, ils possèdent tous le même module ($\|v_i\| = \frac{2}{3}v_{dc}$) et une direction donnée, figure (I.16).

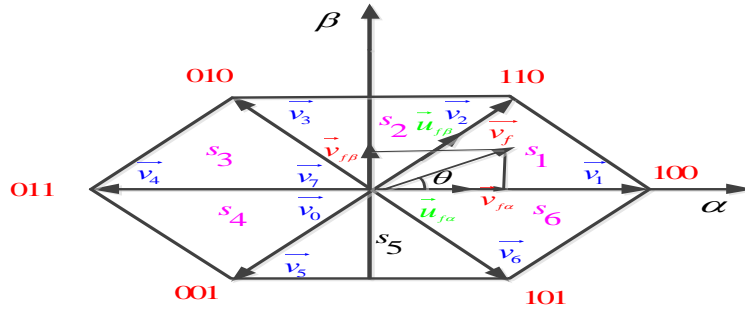


Figure (I.16) : Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur et définition des secteurs dans le plan

Supposons qu'un vecteur de référence \vec{v}_f est souhaité à la sortie de l'onduleur, situé dans le premier secteur. On peut écrire donc :

$$\vec{v}_f = \vec{u}_{f\alpha} + \vec{u}_{f\beta} \quad (1.49)$$

Le vecteur équivalent est ainsi calculé à partir d'une combinaison linéaire des deux vecteurs adjacents correspondant au secteur où l'on se trouve et les deux vecteurs nuls. Donc, nous pouvons écrire :

$$\vec{v}_f = \vec{u}_{f\alpha} + \vec{u}_{f\beta} = \frac{t_1}{T_h} \vec{v}_1 + \frac{t_2}{T_h} \vec{v}_2 + \frac{t_0}{T_h} (\vec{v}_0 \text{ ou } \vec{v}_7) \quad (1.50)$$

Où t_1, t_2 et t_0 , sont les temps d'applications des vecteurs actifs v_1, v_2 et du vecteur nul (\vec{v}_0 ou \vec{v}_7) respectivement pendant une période de modulation T_h .

I.4.2.1.1 Déterminations des secteurs

Le numéro du secteur contenant le vecteur de référence est calculé en fonction de sa position de la manière suivante :

$$S = \begin{cases} 1 \text{ si } 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{3} \\ 2 \text{ si } \frac{\pi}{3} \leq \theta \leq \frac{2\pi}{3} \\ 3 \text{ si } \frac{2\pi}{3} \leq \theta \leq \pi \\ 4 \text{ si } \pi \leq \theta \leq \frac{4\pi}{3} \\ 5 \text{ si } \frac{4\pi}{3} \leq \theta \leq \frac{5\pi}{3} \\ 6 \text{ si } \frac{5\pi}{3} \leq \theta \leq 2\pi \end{cases} \quad (\text{I.51})$$

I.4.2.2.2 Calcul des temps d'application des vecteurs de tension

Si le vecteur de référence se trouve dans le secteur $S_i = i$ ($1, \dots, 6$), donc t_i , t_{i+1} sont les temps d'application des vecteurs adjacents v_i , v_{i+1} et t_0 est le temps d'application des vecteurs nuls v_0 et v_7 [2][3].

Pour assurer l'égalité de la valeur moyenne, sur une période modulation, de la tension et sa référence à partir d'un instant t , on doit s'assurer que :

$$\frac{1}{T_h} \int_t^{t+T_h} \vec{v}_f dt = \frac{1}{T_h} \left(\int_t^{t+t_1} \vec{v}_i dt + \int_{t+t_1}^{t+t_1+t_2} \vec{v}_{i+1} dt + \int_{t+t_1+t_2}^{t+T_h} \vec{v}_0 dt \right) \quad (\text{I.52})$$

Dans une période modulation T_h très petite, la tension \vec{v}_f est constante, l'équation (I.42) peut-être simplifiée à :

$$\vec{v}_f T_h = t_i \vec{v}_i + t_{i+1} \vec{v}_{i+1} + t_0 \vec{v}_0 \quad (\text{I.53})$$

Pour le premier secteur on a :

$$\vec{v}_f = \frac{1}{T_h} (t_1 \vec{v}_1 + t_2 \vec{v}_2 + t_0 \vec{v}_0) \quad (\text{I.54})$$

Les vecteurs de tension dans le premier secteur sont :

$$\begin{aligned} \vec{v}_1 &= \sqrt{\frac{2}{3}} v_{dc} \\ \vec{v}_2 &= \sqrt{\frac{2}{3}} v_{dc} \left(\frac{1}{2} + j \sqrt{\frac{2}{3}} \right) \\ \vec{v}_0 &= 0 \end{aligned} \quad (\text{I.55})$$

D'autre part le vecteur de tension peut être décomposé dans le repère (α, β) comme suit :

$$\vec{v}_f = v_{f\alpha} + jv_{f\beta} \quad (I.56)$$

En remplaçant (I.55) et (I.56) dans (I.54) on obtient :

$$\begin{aligned} v_{f\alpha} &= \sqrt{\frac{2}{3}} v_{dc} \frac{t_1}{T_h} + \frac{1}{\sqrt{6}} v_{dc} \frac{t_2}{T_h} \\ v_{f\beta} &= \frac{1}{\sqrt{2}} v_{dc} \frac{t_2}{T_h} \end{aligned} \quad (I.57)$$

La solution de (I.57) donne :

$$\begin{aligned} t_1 &= \frac{\sqrt{6}v_{f\alpha} - \sqrt{2}v_{f\beta}}{2v_{dc}} T_h \\ t_2 &= \frac{\sqrt{2}v_{f\beta}}{v_{dc}} T_h \\ t_0 &= T_h - (t_1 + t_2) \end{aligned} \quad (I.58)$$

En effectuant le même calcul, nous obtenons les temps correspondants aux vecteurs de tension qui composent chaque secteur. Ces temps sont résumés dans le tableau (I.2).

Tableau (I.2) : Temps d'application des vecteurs de tension

s_1	s_2	s_3
$t_1 = \frac{\sqrt{6}v_{f\alpha} - \sqrt{2}v_{f\beta}}{2v_{dc}} T_h$ $t_2 = \frac{\sqrt{2}v_{f\beta}}{v_{dc}} T_h$ $t_0 = T_h - (t_1 + t_2)$	$t_2 = \frac{\sqrt{6}v_{f\alpha} + \sqrt{2}v_{f\beta}}{2v_{dc}} T_h$ $t_3 = \frac{-\sqrt{6}v_{f\alpha} + \sqrt{2}v_{f\beta}}{2v_{dc}} T_h$ $t_0 = T_h - (t_2 + t_3)$	$t_3 = \frac{\sqrt{2}v_{f\beta}}{v_{dc}} T_h$ $t_4 = \frac{-\sqrt{6}v_{f\alpha} - \sqrt{2}v_{f\beta}}{2v_{dc}} T_h$ $t_0 = T_h - (t_3 + t_4)$
s_4	s_5	s_6
$t_4 = \frac{-\sqrt{6}v_{f\alpha} + \sqrt{2}v_{f\beta}}{2v_{dc}} T_h$ $t_5 = \frac{-\sqrt{2}v_{f\beta}}{v_{dc}} T_h$ $t_0 = T_h - (t_4 + t_5)$	$t_5 = \frac{-\sqrt{6}v_{f\alpha} - \sqrt{2}v_{f\beta}}{2v_{dc}} T_h$ $t_6 = \frac{\sqrt{6}v_{f\alpha} - \sqrt{2}v_{f\beta}}{2v_{dc}} T_h$ $t_0 = T_h - (t_5 + t_6)$	$t_6 = -\frac{\sqrt{2}v_{f\beta}}{v_{dc}} T_h$ $t_1 = \frac{\sqrt{6}v_{f\alpha} + \sqrt{2}v_{f\beta}}{2v_{dc}} T_h$ $t_0 = T_h - (t_6 + t_1)$

I.5 Résultats de simulation

La simulation de la commande par SVM du FAS avec identification des harmoniques par la méthode PQ a été réalisée avec les paramètres suivants :

- source de la tension continue à la borne du condensateur est égale 900V

- valeur désirée de la tension de la charge est égale à $v_{ldés} = \sqrt{2}220$

- tension de la source perturbée est définie par le système (I.59).

$$\begin{aligned}
 v_{sa} &= \sqrt{2}v_{eff} \sin(\omega_s t) + \sqrt{2}v_{eff} / 5 \sin(5\omega_s t) + \sqrt{2}v_{eff} / 7 \sin(7\omega_s t) \\
 v_{sb} &= \sqrt{2}v_{eff} \sin(\omega_s t - \frac{2\pi}{3}) + \sqrt{2}v_{eff} / 5 \sin(5\omega_s t + \frac{2\pi}{3}) + \sqrt{2}v_{eff} / 7 \sin(7\omega_s t - \frac{2\pi}{3}) \\
 v_{sc} &= \sqrt{2}v_{eff} \sin(\omega_s t + \frac{2\pi}{3}) + \sqrt{2}v_{eff} / 5 \sin(5\omega_s t - \frac{2\pi}{3}) + \sqrt{2}v_{eff} / 7 \sin(7\omega_s t + \frac{2\pi}{3})
 \end{aligned} \tag{I.59}$$

La figure (I.19) représente le schéma bloc de la commande par MLI du FAS avec identification des harmoniques par la méthode PQ.

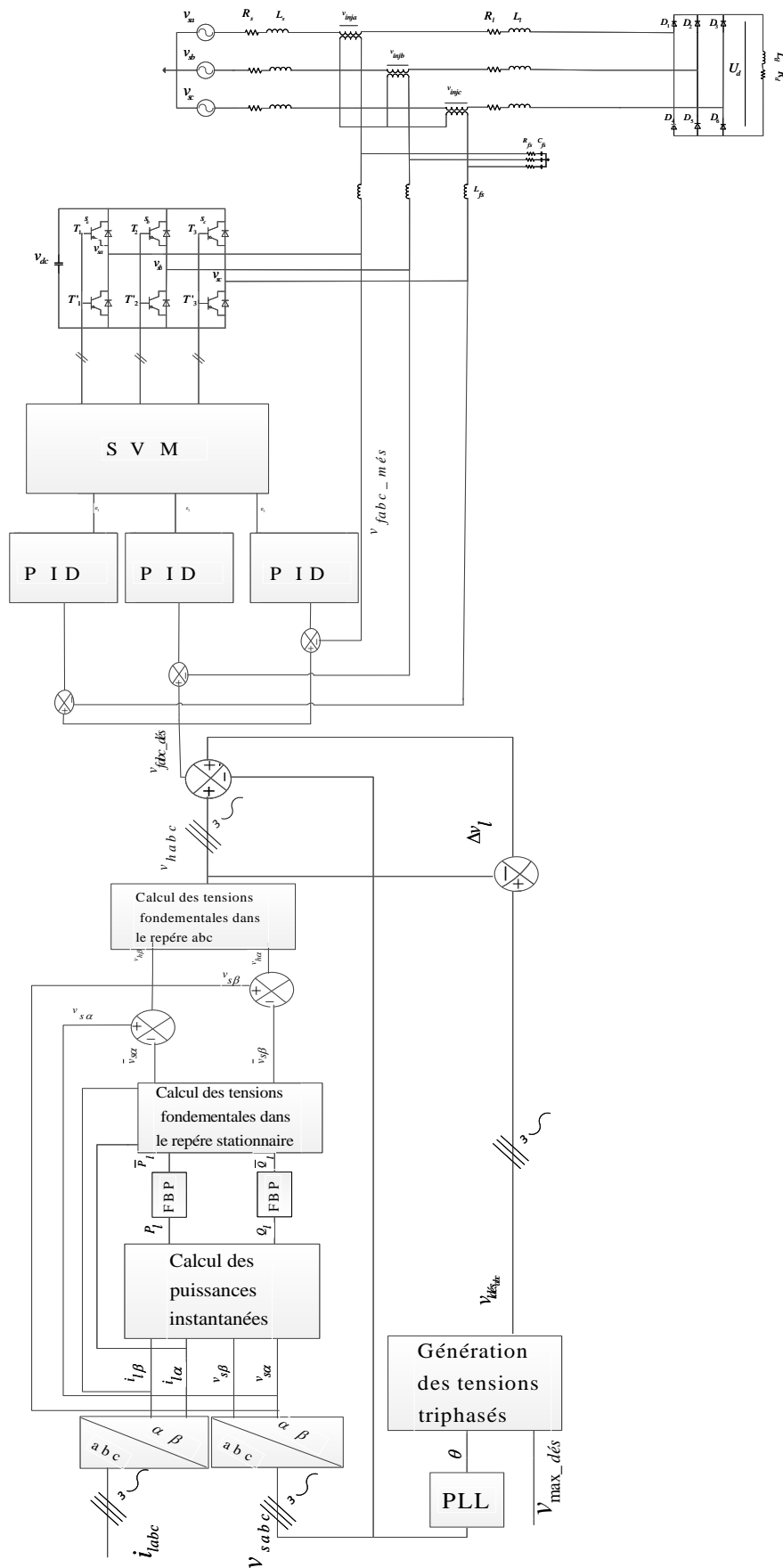


Figure (I.17): Schéma bloc de la commande par SVM du FAS avec identification des harmoniques par la méthode PQ

a) Les résultats présentés dans cette section correspondent à la compensation des perturbations affectant la tension de charge.

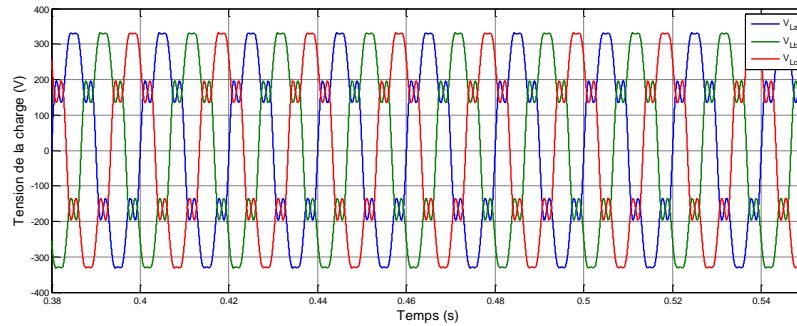


Figure (I.18) : Tension de la charge avant le filtrage

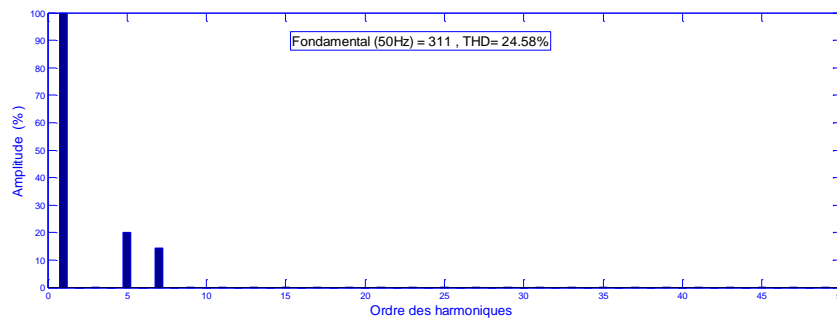


Figure (I.19) : Spectre harmonique de la tension après le filtrage

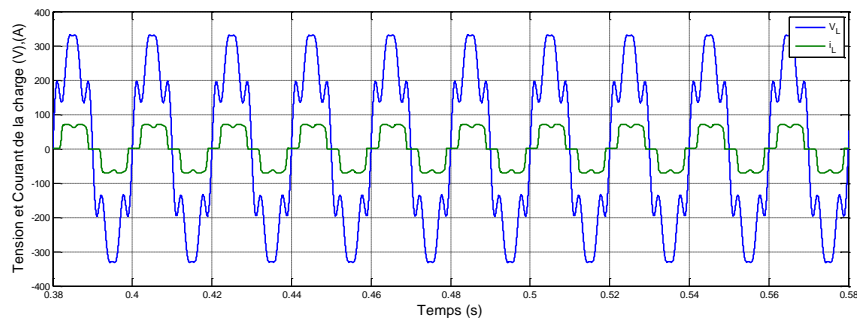


Figure (I.20) : Tension et courant de la première phase de la source

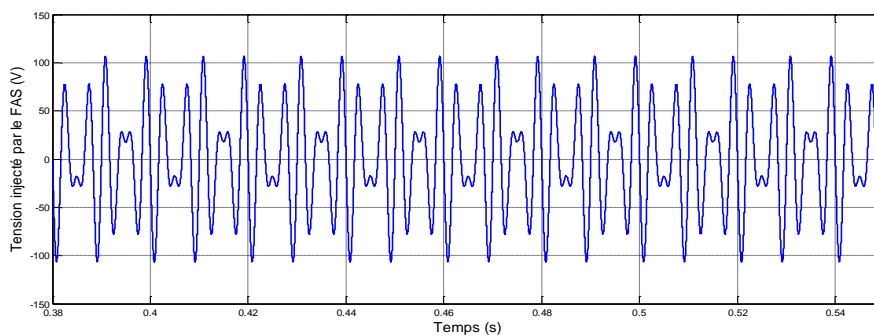


Figure (I.21) : Tension injectée par la première phase

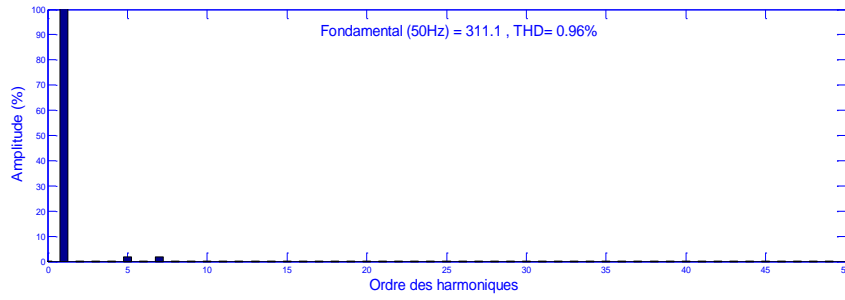


Figure (I.22): Spectre harmonique de la tension de la charge après le filtrage

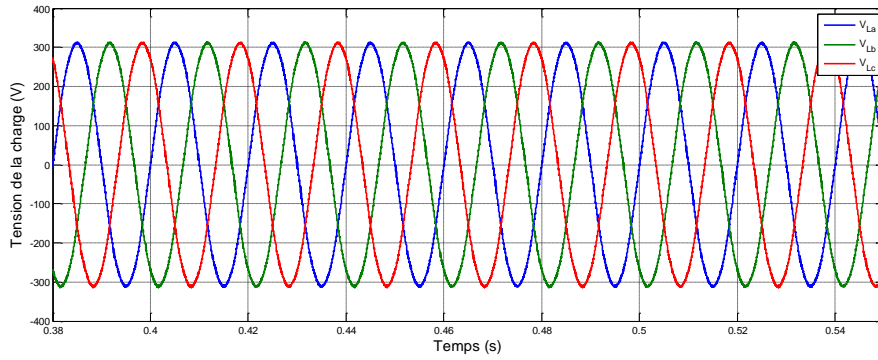


Figure (I.23): Tensions de la charge après le filtrage

b) Les résultats présentés dans cette section correspondent à la compensation d'un creux de tensions triphasées d'une profondeur de 23% et d'une durée de 60ms.

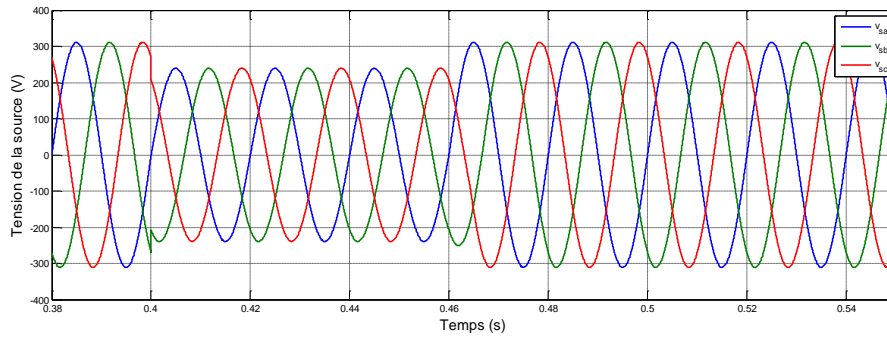


Figure (I.24) : Tensions de la source lors d'un creux de tension

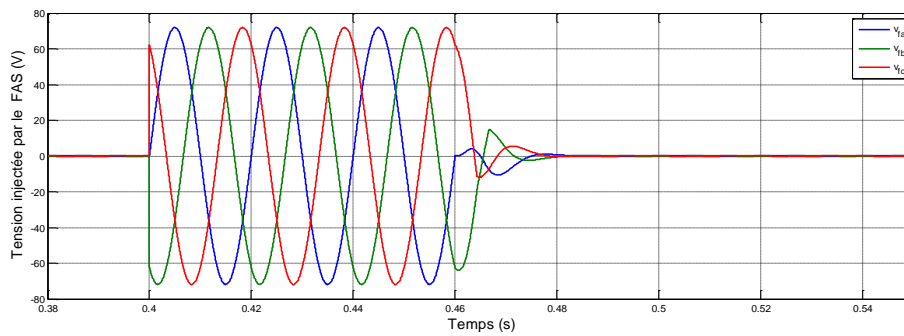


Figure (I.25): Tensions injectées par le FAS lors d'un creux de tension

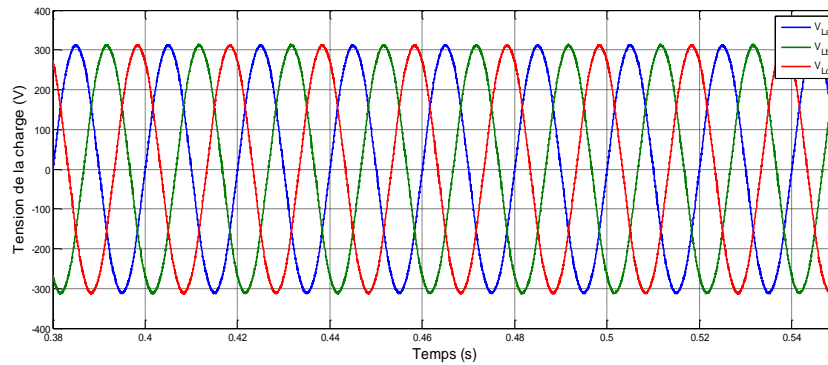


Figure (I.26) : Tensions aux bornes de la charge lors d'un creux de tension

I.6 Interprétations des résultats

La Figure (I.18) nous montre l'effet des harmoniques sur la tension de la charge avant le filtrage. Cette effet est représenté sous la forme de perturbation au niveau des ondes sinusoïdales et par conséquent une augmentation importante du THD à une valeur de 24.59% selon son spectre harmonique représenté dans la figure (I.19).

Après l'insertion du filtre actif série on constate qu'il y a une tension compensative générée par ceci égale à celle des harmoniques présents dans le réseau, voir figure (I.20), cela a pour effet une diminution brusque du THD de 24.58% à 0.98%, voir figure (I.22). Cette valeur du THD est une valeur compatible à la norme IEEE STD 519-1992 qui impose une valeur inférieur à 5%. La figure (I.23) montre l'apparition de l'effet du FAS sur la tension de la charge qui est maintenant sinusoïdale.

La figure (I.24) montre l'effet d'un creux de tension dans un délai de 60 ms sur la tension du réseau. La figure (I.25) montre le rôle de la compensation active série dans la compensation de la chute de tension, l'ors d'un creux de tension. La figure (I.26) nous montre que la tension aux bornes de la charge est toujours sinusoïdale.

I.7 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté les différents types de perturbations et les harmoniques affectant l'onde de la tension du réseau électrique ainsi que les inconvénients de ses perturbations sur le réseau électrique et les composants électroniques.

Ensuite on a proposé une solution moderne pour remédier aux perturbations et aux harmoniques néfastes. Cette solution moderne consiste à installer un filtre actif série avec le réseau. Pour le bon fonctionnement de ce filtre, la méthode d'extraction des harmoniques de tension à base des puissances actives et réactive est adoptée.

Afin d'améliorer la qualité harmonique du courant de la source, le chapitre suivant sera consacré à une solution hybride combinant le filtre actif série avec des filtres passifs.

Chapitre II

Commande par PID d'un filtre actif série hybride interligne

II-1 Introduction

D'après les résultats du premier chapitre on n'a constaté que la forme d'onde du courant relevé du réseau électrique de distribution est très polluée si la charge est non linéaire.

En effet une charge non linéaire soumise à une sinusoïdale, absorbe un courant non sinusoïdale. Dans plusieurs cas, la charge non linéaire se comporte comme une source de courant harmonique. Autrement dit, le courant harmonique est fixé par la charge et non par la tension ou l'impédance du réseau.

C'est pour cette raison que, la première partie de chapitre sera consacrée à l'installation des filtres passifs dans un réseau non polluée alimentant une charge non linéaire. Ces filtres sont dimensionnés pour faire face aux harmoniques de courant générés par la charge.

Afin de s'affranchir des harmoniques de tension et de courant, l'association du filtre actif série et les filtres passifs parallèles est une solution très évoquée dans la littérature spécialisée. Dans la dernière partie de ce chapitre, la même idée est exploitée afin de compenser les harmoniques et les perturbations dans deux réseaux simultanément via deux filtres hybrides séries partageant le même bus continu.

II-2 Etude et dimensionnement des filtres passifs

Le filtre passif consiste à insérer en amont de la charge polluante un ou plusieurs circuits accordés sur les harmoniques à rejeter. Ainsi, pour filtrer un courant à une fréquence particulière, un filtre résonant série LC est placé en parallèle sur le réseau. Cependant, ce type de filtre est très sélectif. Aussi, pour atténuer toute une bande de fréquences, un filtre passe-haut du second ordre est préférable. Le dimensionnement de ces filtres dépend des harmoniques à éliminer, des performances exigées, de la structure du réseau et de la nature des récepteurs. Il est en général plus aisé et moins coûteux de rejeter, par cette technique, les harmoniques de rang élevé que celles de rang faible [14,15].

Le filtrage reste une technique délicate. En effet, les variations de l'impédance du réseau peuvent détériorer les performances du filtre. De plus, le réseau peut former un système résonnant avec le filtre et les fréquences voisines de la fréquence de résonance sont amplifiées. Finalement, cette solution, dédiée à une charge et à un réseau, perd de son efficacité lorsque les caractéristiques de ceux-ci évoluent. Notamment, les variations de la fréquence du fondamental désaccordent le filtre passif [14,15].

II.2-1- Principe

Le principe d'un filtre passif est de modifier localement l'impédance du réseau, de façon à dériver les courants harmoniques. Des éléments capacitifs et inductifs sont, en effet, associés de manière à obtenir une résonance série accordée sur une fréquence choisie [16].

Une connaissance précise des rangs harmoniques devant être filtrés et des atténuations requises est nécessaire à la réalisation d'un filtre en fonction de l'atténuation harmonique recherchée, différents types de filtres passifs sont utilisés. Ils peuvent être classifiés selon leur emplacement, leur mode de connexion au circuit principal, leur degré d'amortissement ainsi que les fréquences de leurs résonances. On distingue généralement un filtre shunt et un filtre série. Par ailleurs, le filtre shunt est utilisé exclusivement du côté courant alternatif pour les raisons suivantes [15] :

- Le filtre série peut porter le courant en entier à partir du circuit principal et doit être isolé de la terre. Le filtre shunt, par contre, porte uniquement le courant harmonique et peut être lié à la terre à l'une des extrémités ;
 - A la fréquence fondamentale, un filtre shunt à l'avantage de fournir de la puissance réactive alors qu'un filtre série consomme de la puissance réactive.
 - Pour des performances égales, un filtre shunt est beaucoup moins cher qu'un filtre série.
- Dans ce sens, le présent chapitre s'intéresse à l'étude de filtres passifs de type shunt.

II-2-2- Charges génératrices d'harmoniques de courant

Les charges non linéaires consomment un courant non sinusoïdal et représentent les principales sources d'émission en courants harmoniques sur les réseaux. On peut distinguer différents types de charges perturbatrices.

II-2-2-1 Montages électroniques

- Redresseur monophasé à filtre capacitif

Il est utilisé comme premier étage des alimentations de télévisions, d'ordinateurs, d'imprimantes, des variateurs de vitesse, des lampes à ballast électronique, des ballasts électroniques pour rampes d'éclairage, etc.

- Gradateur monophasé

Il est utilisé pour la commande de l'intensité des lampes à incandescence halogène, la commande de certains fours de cuisson, la régulation de puissance (chaudières), les démarreurs de moteurs électriques, etc.

- Redresseur triphasé à thyristors

Il permet de réguler la tension appliquée aux bornes d'une charge en faisant varier l'angle de commande des gâchettes. Il est utilisé pour la commande en vitesse variable des moteurs à courant continu, des machines synchrones (nous rencontrons des montages redresseurs suivis d'un onduleur pour commander la machine synchrone en vitesse variable), les fours à induction lorsqu'ils sont régulés, etc. Les redresseurs triphasés à thyristors sont la principale source de pollution harmonique dans le secteur industriel.

- Redresseur triphasé à diodes et filtre capacitif

Il est utilisé pour la commande en vitesse variable des machines électriques, ces derniers servent pour l'entraînement des compresseurs, des ventilateurs, des pompes, etc.

II-2-2-2- Charges non linéaires passives

- Moteurs asynchrones

En théorie, ces moteurs génèrent des ondes de courant purement sinusoïdales ; en pratique, les taux d'harmoniques mesurés sont variables [14].

- Lampes fluorescentes et les lampes à vapeur haute pression

Elles représentent les deux tiers de la puissance consommée par l'éclairage dans le secteur tertiaire (bureaux, grands commerces, etc.).

- Appareils à arc électrique

Ils regroupent les fours à arc à courant alternatif et les machines de soudure à l'arc à courant alternatif ou continu.

II.2-3- Différents types de filtres parallèles

II-2-3-1- Inductance anti-harmonique

Cette première solution consiste à installer une inductance en série avec les condensateurs de compensation sur chaque branche monophasée, comme indique la figure (II.1).

Ce type de filtre a pour objectif essentiel de protéger les batteries de condensateurs d'une surintensité due aux harmoniques [14].

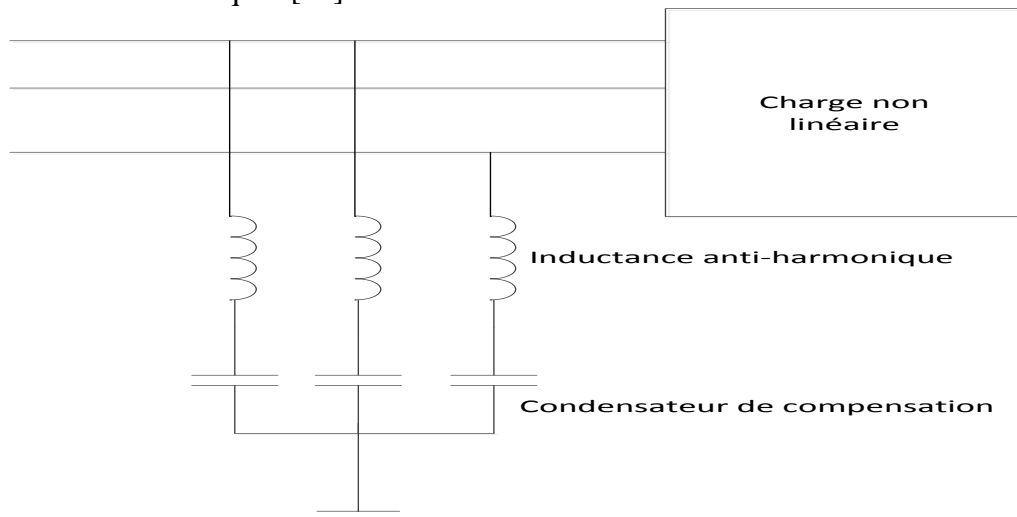


Figure (II.1): Raccordement d'une inductance anti-harmonique

II-2-3-2- Filtre résonant

Un filtre résonant a pour objet de présenter une impédance très faible au passage d'un courant harmonique à un rang déterminé.

Le facteur de qualité d'un filtre résonant est élevé; l'accord du filtre est donc très pointu [14-16].

Plusieurs filtres résonants correspondant aux différents rangs harmoniques à filtrer, sont souvent installés, en parallèle. La figure (II.2) représente l'installation d'un filtre résonant. La puissance réactive nécessaire pour l'installation est répartie entre les condensateurs des différents filtres. Ceci nécessite une étude fine du profil de charge de l'installation. Les filtres résonants présentent l'inconvénient d'être sensibles aux variations de l'inductance (dues à la qualité de réalisation) ou de la capacité (dues au vieillissement ou à la température), ce qui entraîne un désaccord de l'ensemble. Cette dérive est plus marquée pour les filtres utilisant des condensateurs de faible capacité. Afin d'ajuster la fréquence du filtre à la mise en service, l'inductance doit être munie de prises de réglage [15,16].

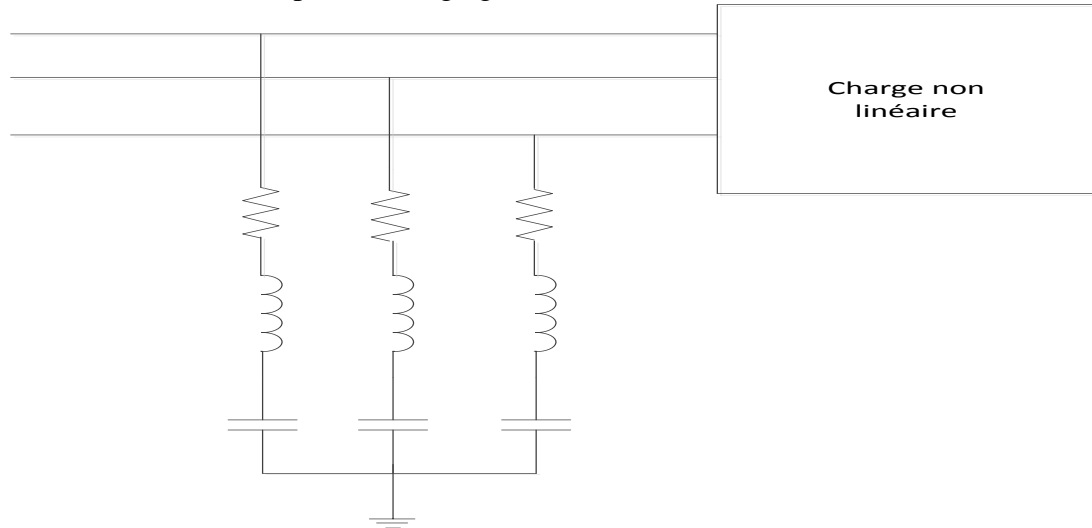


Figure (II.2): Filtre résonant

II-2-3-3- Filtre amorti

On distingue trois types de filtres amortis tels qu'illustrés en figure (II.3). Nous avons en (a) un filtre amorti de premier ordre, en (b) un filtre amorti de second ordre et en (c) un filtre de troisième ordre.

Le filtre de premier ordre exige une grande capacité et présente une perte de puissance excessive à la fréquence fondamentale. Les filtres de second ordre et d'ordre 3 sont couramment utilisés. Tous les deux sont en général conçus avec un faible facteur de qualité F_q compris entre 0,7 et 1,4. Un filtre amorti de second ordre se compose d'une capacité en série avec un ensemble constitué de la mise en parallèle d'une inductance et d'une résistance appelée résistance d'amortissement [1-3].

En pratique, il est courant de mettre en œuvre [14] :

- des filtres résonants accordés sur les premiers rangs harmoniques (rangs 5 et 7) où les injections de courant sont importantes.
- Un filtre amorti pour limiter l'impédance harmonique sur le reste du spectre (rangs > 11). L'antirésonance des filtres provoque une amplification des rangs harmoniques inférieurs à la fréquence d'accord. Le premier filtre est alors accordé sur la première fréquence d'injection de façon à ne pas faire coïncider la fréquence d'antirésonance avec une injection de courant [1,2]. Il est important de prévoir une inductance ajustable afin d'accorder correctement le filtre; en raison des tolérances sur les valeurs des condensateurs et de l'inductance dont l'effet peut être très important sur l'efficacité du filtre.

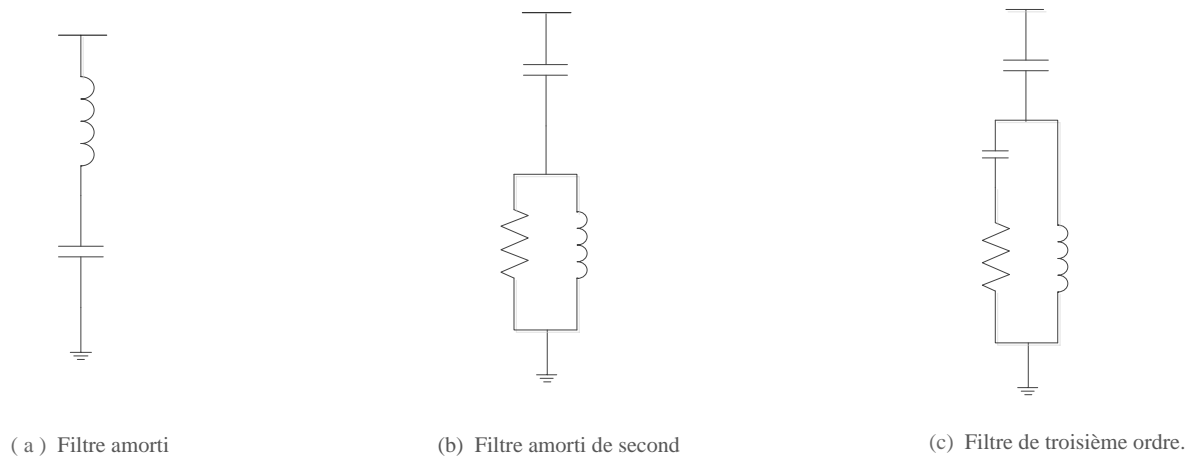


Figure (II.3): Types des filtres amortis

II-2-4- Avantages et inconvénients des filtres passifs

Le filtrage passif a déjà largement fait ses preuves dans le milieu industriel grâce à son coût faible, son efficacité et son adaptation pour des réseaux de forte puissance. Il présente cependant les inconvénients suivants [14,15] :

- La présence sur un même réseau de deux filtres passifs accordés sur un rang théoriquement égal, mais en pratique légèrement différent, provoque entre eux la circulation de courants harmoniques très importants qui provoque rapidement leur destruction. Ce cas se rencontre facilement en raison du fait que la fréquence d'accord varie lentement avec le vieillissement des éléments du filtre. Il faut absolument éviter de raccorder des filtres harmoniques de même rang sur un même réseau.
- La mise en parallèle d'un filtre anti-harmonique et d'une batterie de condensateurs provoque une contrainte pouvant amener la destruction des condensateurs.
- Lorsqu'il y a plusieurs rangs harmoniques à filtrer, il est nécessaire de mettre autant de filtres accordés sur les rangs correspondants. Ce problème peut être résolu en adoptant un filtre à large bande qui atténue plusieurs rangs harmoniques; ce avec un facteur d'atténuation moindre.
- L'implantation de filtres passifs sur un réseau nécessite une étude poussée et précise. En outre, il n'est pas toujours possible de connaître tous les paramètres du réseau, nécessaire à l'étude, lorsqu'il est de grande dimension.

II-2-5- Méthode de dimensionnement d'un filtre passif parallèle et algorithme associé

II- 2-5-1- Conception et modélisation d'un filtre résonant simple

Un filtre résonant simple est un circuit RLC série accordé sur la fréquence d'un seul harmonique (figure II.4).

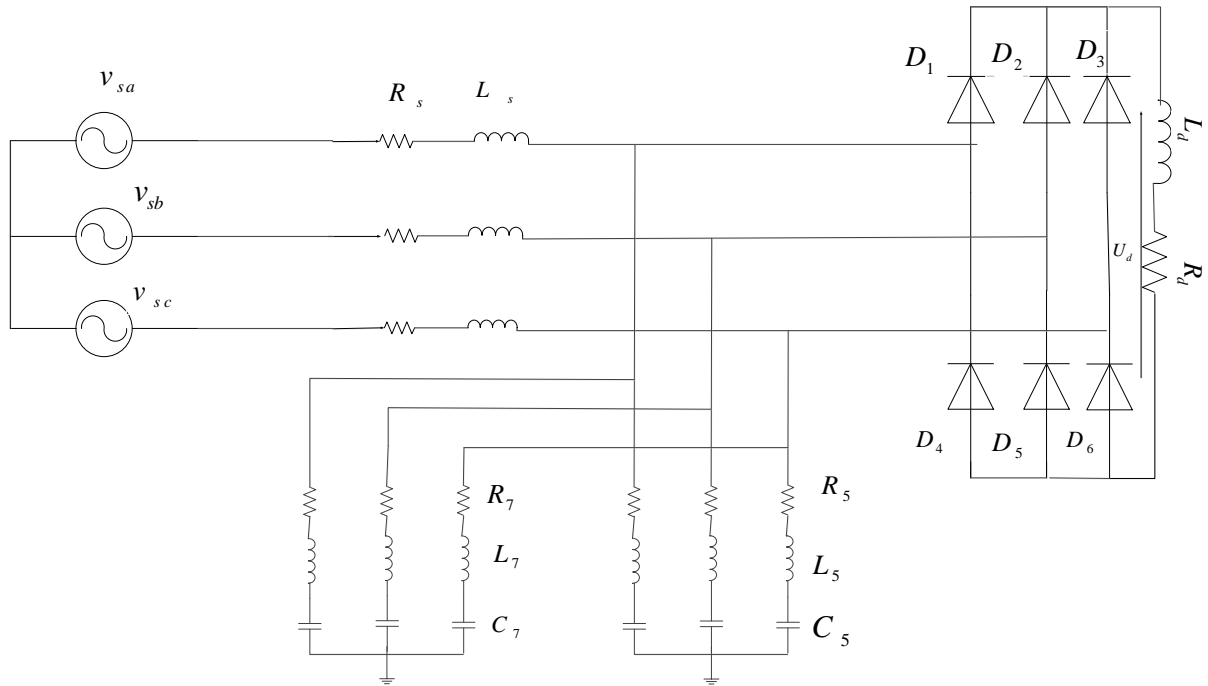


Figure (II.4) : Structure de puissance du filtre passif résonnant parallèle avec une charge polluante

L'impédance Z_f d'une phase du filtre est donnée par :

$$Z_f = R + j\left(L\omega + \frac{1}{C\omega}\right) \quad (\text{II.1})$$

Où:

R ; est la résistance du filtre (Ω) ;

L ; est l'inductance du filtre (H) ;

C ; est la capacité du filtre (F) ;

ω : est la pulsation du réseau; $\omega = 2\pi f$ avec f la fréquence du réseau.

A sa fréquence de résonance, son impédance est une résistance R de valeur relativement faible.

II- 2-5-1-1- Algorithme de modélisation des filtres résonants

On considère le schéma d'un réseau électrique avec filtres passifs, représenté à la figure (II.5), sur la base duquel les étapes de conception d'un filtre passif seront décrites [14][16].

Étape 1 : Déterminer les courants harmoniques produits par la charge non-linéaire

Les données sur les courants harmoniques (amplitudes et phases) produits par la charge non linéaire peuvent être obtenues soit par des mesures expérimentales soit par simulation numérique.

La puissance S_l (puissance apparente monophasée en VA à la fréquence fondamentale) et le facteur de puissance F_p de la charge non-linéaire doivent être spécifiés.

Étape 2 : Calculer la puissance réactive monophasée Q (var) requise pour la compensation par :

$$Q = S_l \sqrt{1 - F_p} \quad (\text{II.2})$$

$$S_l = V_{Ld} i_{Ld}$$

V_{Ld} : Valeur efficace de la tension fondamentale phase-neutre à l'entrée de la charge non linéaire.

i_{Ld} : Valeur efficace du courant fondamental nominal absorbé par la charge non-linéaire

Étape 3 : Déterminer la valeur totale du condensateur C requis par phase pour fournir la puissance réactive Q . En première approximation, C est déterminée par :

$$C = \frac{Q}{\omega V_{cl}^2} \quad (\text{II.3})$$

V_{cl} : Valeur efficace de la tension fondamentale aux bornes du condensateur.

$\omega = 2\pi f$; f est la fréquence fondamentale (50 Hz).

Étape 4 : Répartir la valeur de C entre toutes les branches constituant l'ensemble du système de filtrage.

La valeur de condensateur C est répartie entre les branches relatives aux filtres résonants accordés sur les rangs harmoniques 5 et 7.

La puissance réactive totale Q des condensateurs est répartie selon l'amplitude des courants harmoniques parcourant les filtres.

Étape 5 : Déterminer les valeurs des inductances et de capacité des filtres résonants par :

$$\begin{cases} C_5 = \frac{0.5Q}{\omega V_{cl}^2} \\ C_7 = \frac{0.5Q}{\omega V_{cl}^2} \\ L_5 = \frac{1}{(2\pi 5f)^2 C_5} \\ L_7 = \frac{1}{(2\pi 7f)^2 C_7} \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

Où f la fréquence du réseau.

Étape 6: Déterminer les valeurs des résistances des filtres résonants:

$$R_5 = \frac{5L_5\omega}{F_q} ; R_7 = \frac{5L_7\omega}{F_q} \quad (\text{II.5})$$

II-2-5-2 Résultats de simulation

a) Les résultats présentés dans cette section correspondent à la compensation des harmoniques de courant.

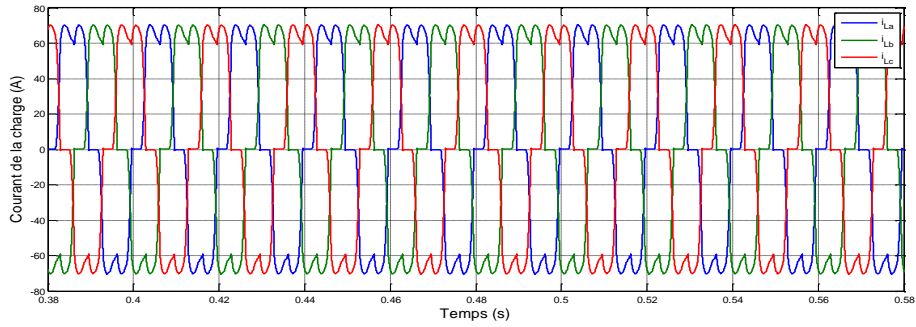


Figure (II.5) : Courant de la charge avant le filtrage

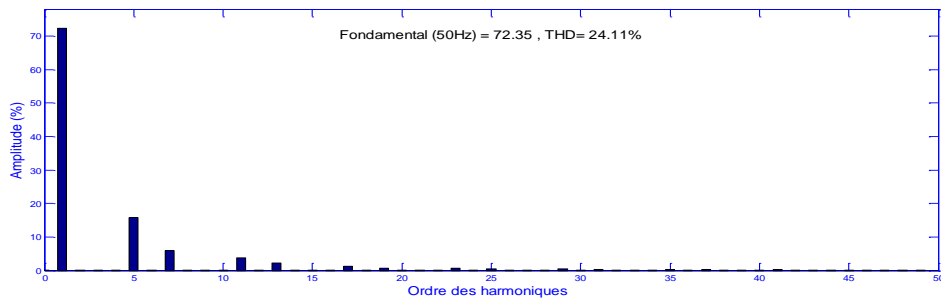


Figure (II.6) : Spectre harmonique du courant de la charge avant le filtrage

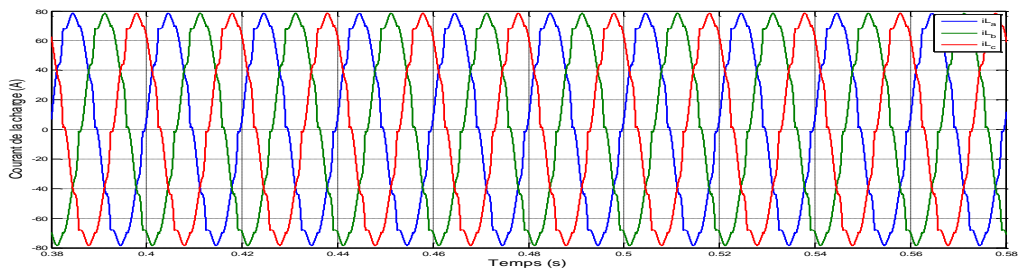


Figure (II.7) : Courant de la charge après le filtrage

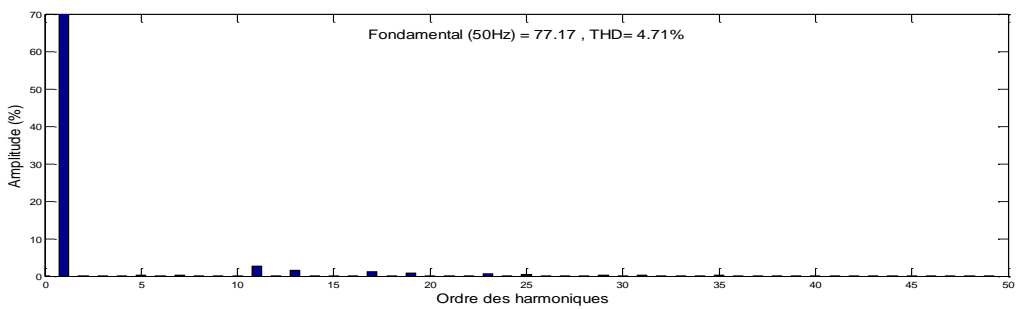


Figure (II.8) : Spectre harmonique du courant de la charge après le filtrage

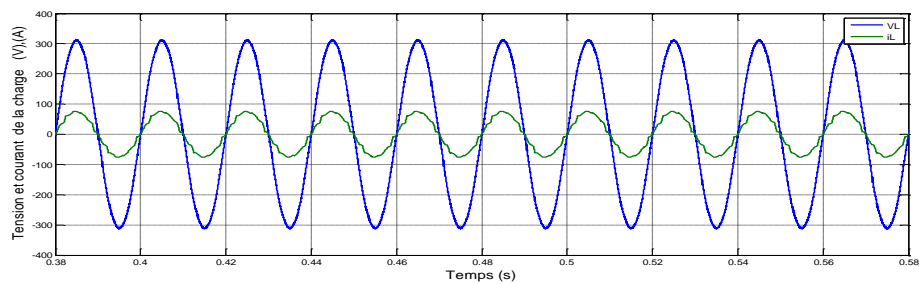


Figure (II.9) : Tension et courant de la charge

b) Les résultats présentés dans cette section correspondent au filtrage des harmoniques de courant lors d'une variation de la charge à $t=0.3\text{ms}$.

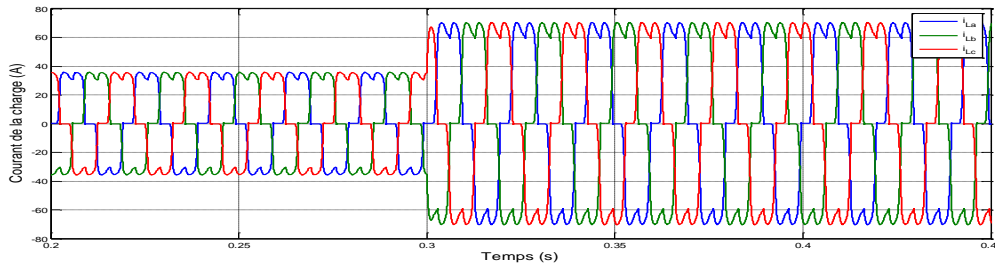


Figure (II.10) : Courant de la charge avant le filtrage lors d'une variation de la charge

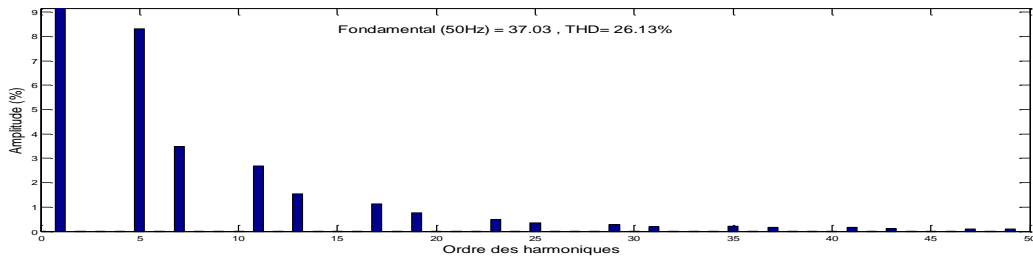


Figure (II.11) : Spectre harmonique du courant de la charge avant le filtrage

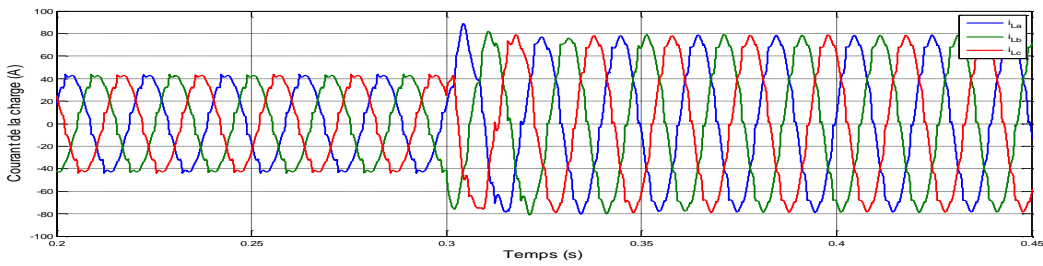


Figure (II.12) : Courant de la charge après le filtrage lors d'une variation de la charge

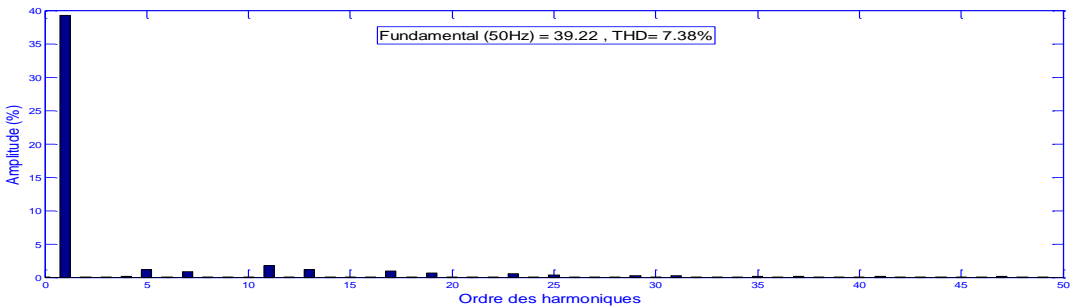


Figure (II.13) : Spectre harmonique du courant de la charge après le filtrage

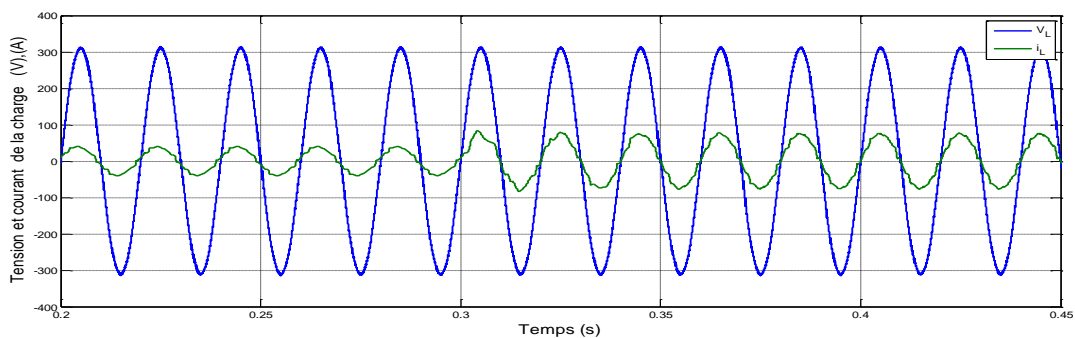


Figure (II.14) : Tension et courant de la charge

II-2-5-3 Interprétations des résultats

La figure (II.5) nous montre le courant de la charge avant le filtrage. D'après la figure (II.6) on constate que le THD est de 24.11%. Par contre la figure (II.7) représente l'effet des filtres passifs sur le courant du réseau. On remarque une diminution assez importante du THD de 24.11% à 4.7%, voir figure (II.8). La figure (II.9) montre que la tension et le courant de la charge sont pratiquement en phase. Ce qui va se traduire par une amélioration du facteur de puissance.

La figure (II.10) nous présente le courant de la charge avant le filtrage lors d'une variation de la charge à l'instant $t=0.3\text{ms}$, ce courant a comme THD de 26.13% selon la figure (II.11). Par contre, la figure (II.12) nous présente ce courant après le filtrage et on remarque que son THD est devenu 7.38% au lieu de 26.13% d'après la figure (II.13). La figure (II.14) montre que le déphasage entre la tension et le courant de la charge est pratiquement nul.

II-3 Filtre actif série hybride (FASH)

Les filtres passifs sont accordés aux fréquences des harmoniques les plus gênants présents sur le réseau. Ils absorbent une grande partie des courants harmoniques créés par la charge non linéaire. Alors que le filtre actif fournit une tension qui s'oppose à la tension harmonique venant du côté source et à la chute de tension harmonique due à la charge non linéaire de façon à contrôler la tension harmonique aux bornes de la charge.

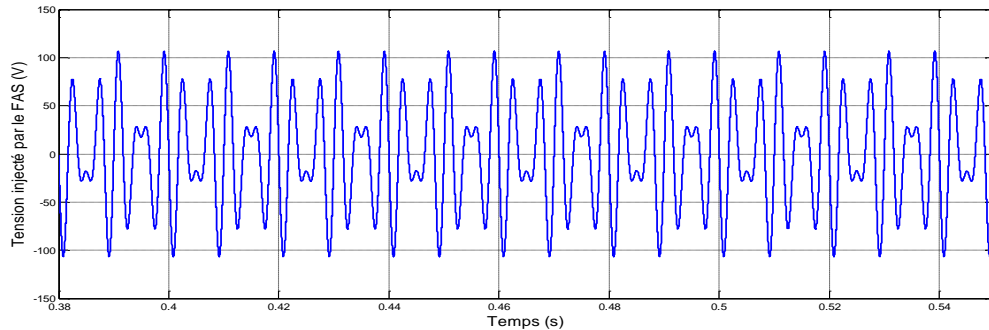
II-3-1 Structure du filtre actif série hybride

Le filtre actif est mis en série avec la source et le filtre passif est placé en parallèle avec la charge. Le schéma de principe est donné sur la figure (II.15).

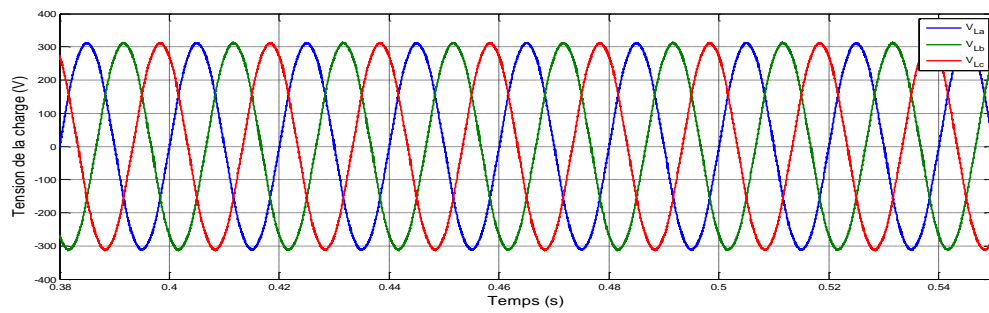
II-3-2- Résultats de simulation

a) Les résultats présentés dans cette section correspondent à la compensation des harmoniques de courant et de tension.

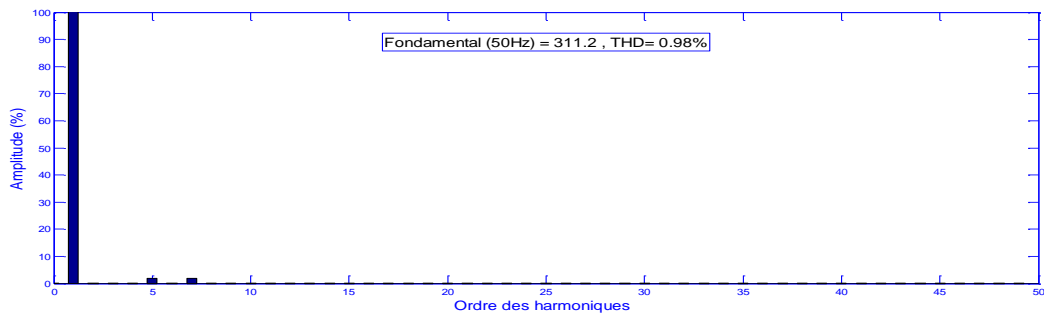
- Compensation des harmoniques de tension



(a)



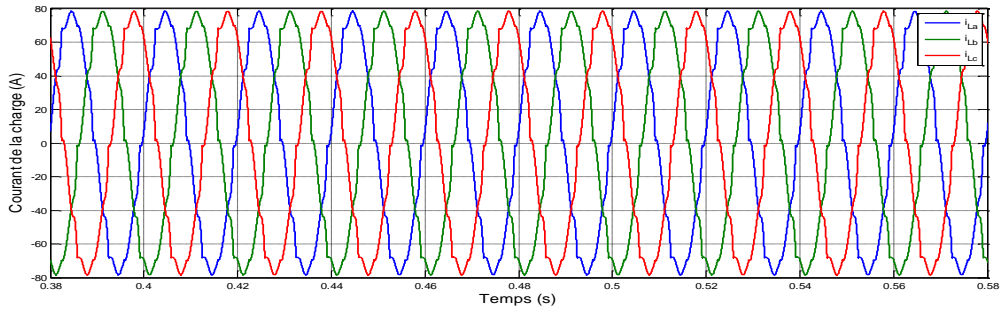
(b)



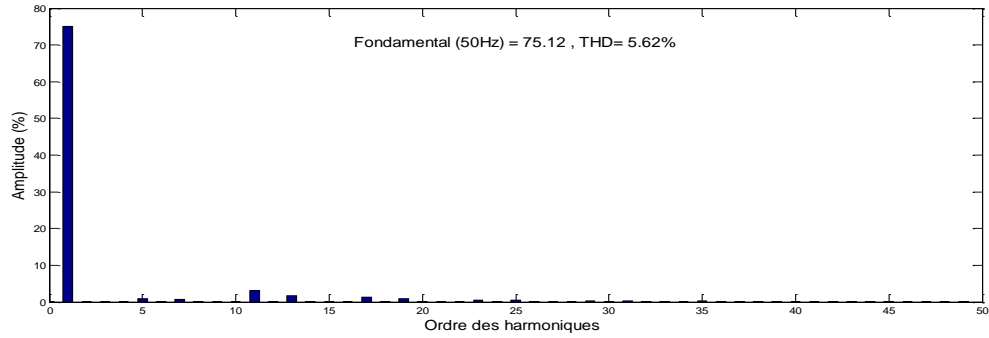
(c)

Figure (II.16) : Réponses du FASH : a) Tension injectée de la première phase, b) Tension de la charge après le filtrage, c) Spectre harmonique de tension de la charge après le filtrage

- Filtrage des harmoniques 5 et 7 du courant



(a)



(b)

Figure (II.17) : Réponses du FASH : a) Courant de la charge après le filtrage, b) Spectre harmonique de courant de la charge après le filtrage

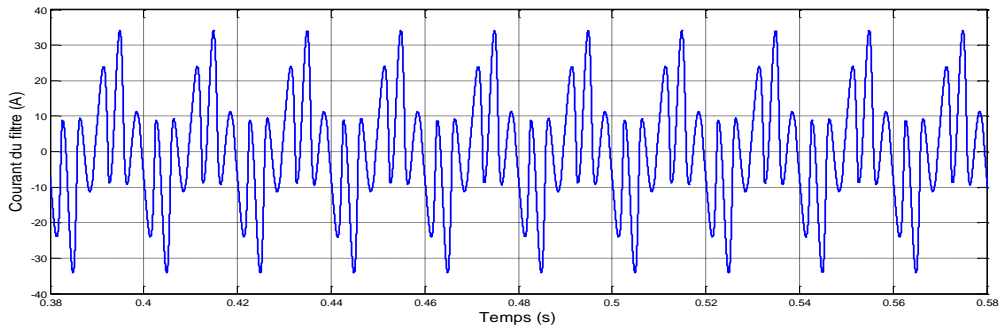


Figure (II.18) : Courant du filtre passif de l'harmonique cinq

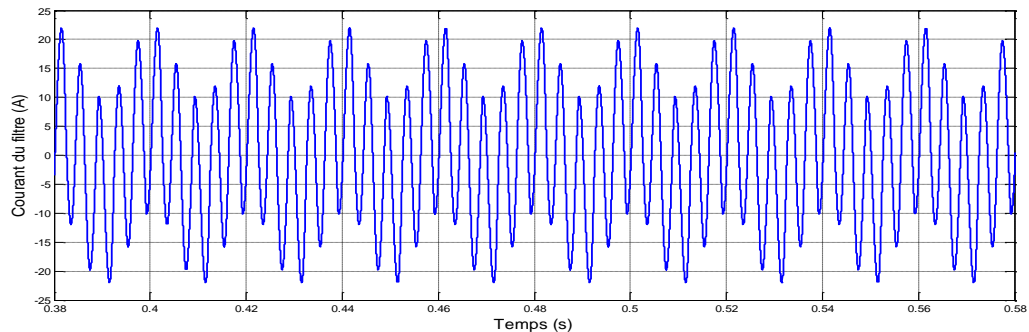


Figure (II.19) : Courant du filtre passif de l'harmonique sept

b) Les résultats présentés dans cette section correspondent au filtrage des courants des harmoniques 5 et 7 lors d'une variation de la charge à $t=0.3ms$.

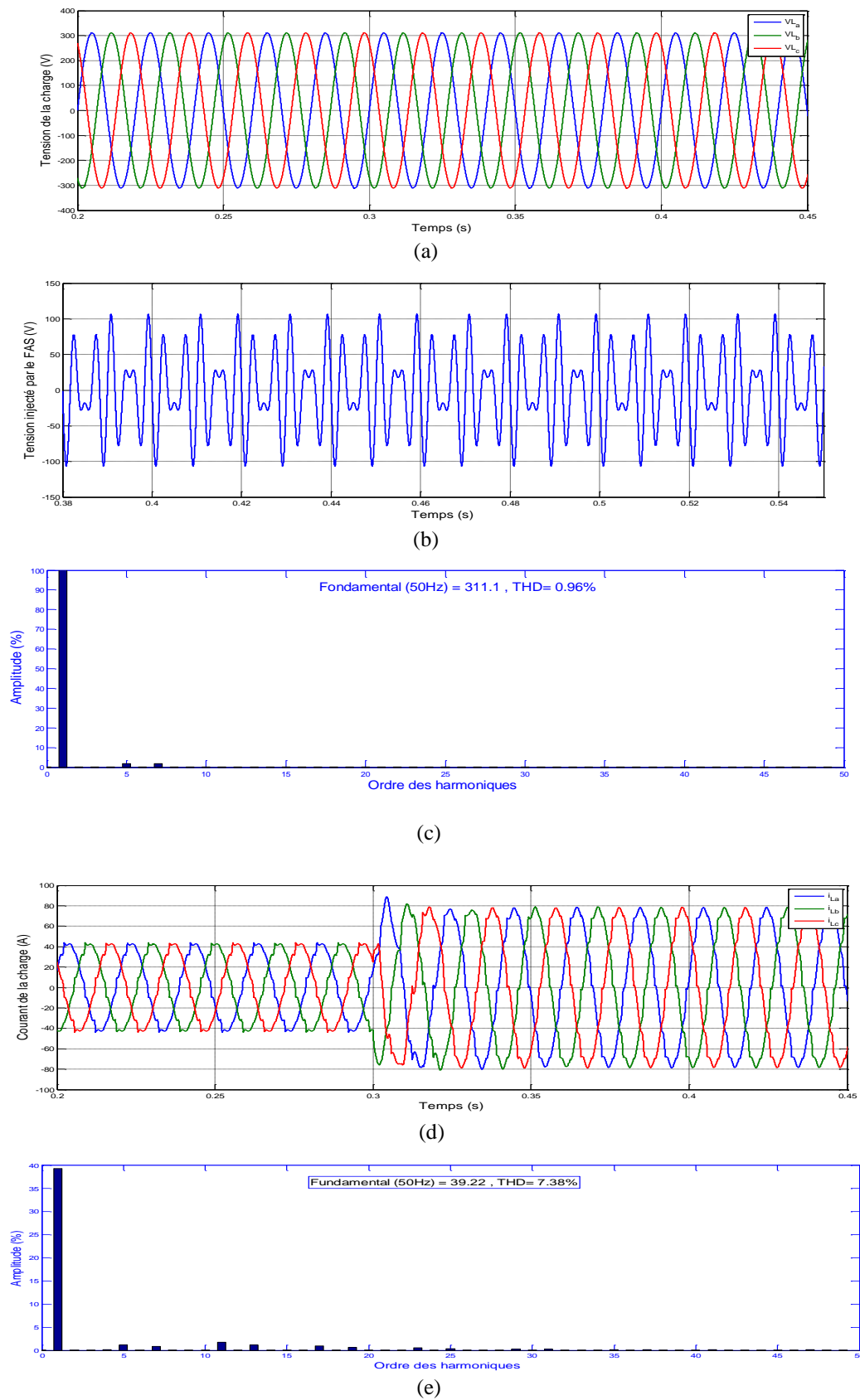


Figure (II.20) : Réponses du FASH lors d'une variation de la charge : a) Tensions de la charge, b) Tension injectée par la première phase du FASH, c) Spectre harmonique de la tension de la charge, d) Courant de la charge après le filtrage, e) Spectre harmonique du courant de la charge après le filtrage.

c) Les résultats présentés dans cette section correspondent à la compensation d'un creux de tensions triphasées d'une profondeur de 23% et d'une durée de 60ms sur les trois phases.

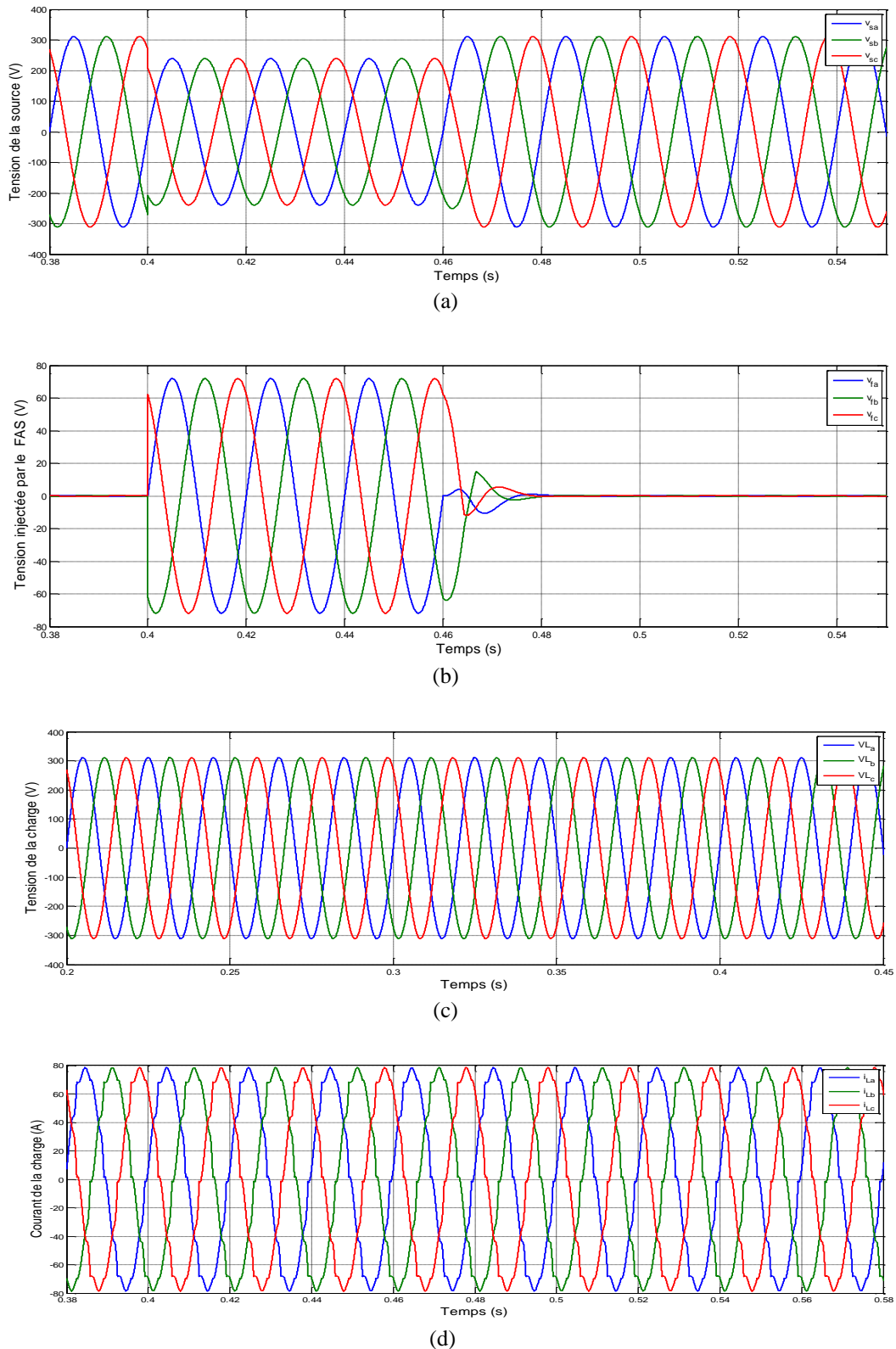


Figure (II.21) : Réponses du FASH : a) Tensions de la source lors d'un creux de tension, b) Tensions injectées par le FASH lors d'un creux de tension, c) Tensions de la charge après le filtrage, d) Courant de la charge lors d'un creux de tension

II-4-2 Interprétations des résultats

La figure (I.18) nous représente la tension de la charge avant le filtrage. Après l'insertion du filtre actif série hybride on constate qu'il y a une tension compensative générée par ceci pour faire face aux harmoniques de tension présentes dans le réseau, voir figure (II.16.a), cela a pour effet une diminution brusque du THD de 24.58% à 0.98%, voir figure (II.16.b).

Par contre la figure (II.17.a) représente l'effet du filtre passif sur le courant du réseau où on peut remarquer une diminution du THD de 24.11% à 5.62%, voir figure (II.17.d). La figure (II.18) nous montre le courant absorbé par le filtre passif résonant simple de l'harmonique 5 et la figure (II.19) représente le courant absorbé par le filtre passif d'harmonique 7. Les résultats obtenus de la Figure (II.20) représentent les réponses du filtre actif série hybride lors d'une variation de la charge. On constate que la tension aux bornes de la charge est sinusoïdale comme le montre la Figure (II.20.a). La tension injectée par la première phase du FASH, comme le montre la figure (II.20.b), est la réaction nécessaire pour compenser la tension. Le spectre harmonique de la tension de la charge après le filtrage montre que le THD est de 0.98%, voir la figure (II.20.c). Les figures (II.20.d) et (II.20.e) montrent le courant de la charge après le filtrage et son spectre harmonique. La figure (II.21.a) montre l'effet d'un creux de tension dans un délai de 60ms sur la tension du réseau. La figure (II.21.b) montre le rôle du filtre actif série dans la ré-compensation de la chute de tension. La figure (II.21.c) nous montre que la tension aux bornes de la charge est sinusoïdale de faible taux d'harmoniques. La figure (II.21.d) montre que le courant n'est pas influencé par le creux de tension appliqué sur le réseau.

II-4 Filtre actif série hybride interligne

C'est la combinaison de deux filtres actifs série hybride alimentés par la même source d'alimentation continue. Les deux filtres sont mis en série avec deux réseaux électriques séparés.

II-4-1 Structure du filtre actif série hybride interligne (FASHI)

La figure (II.22) représente le schéma bloc de la commande du FASHI avec identification des harmoniques par la méthode PQ. Dans cette partie on va se contenter de présenter le schéma bloc de ce filtre, car sa méthode de réglage est semblable à celle étudié dans le premier chapitre.

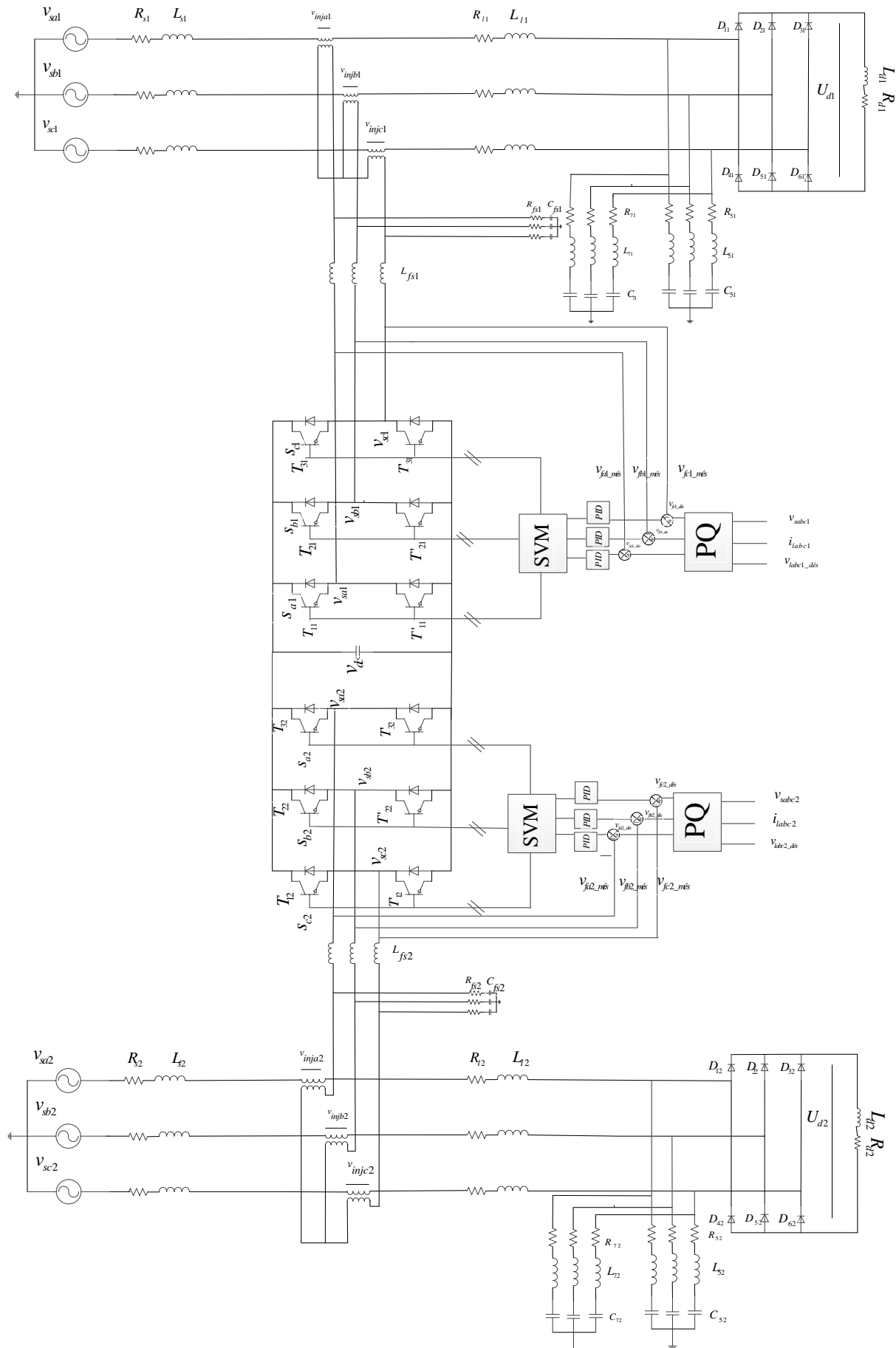


Figure (II.22) : Structure de puissance du FASHI

II-4-2 Résultats de simulation

- Les réponses du filtre hybride interligne du côté premier réseau

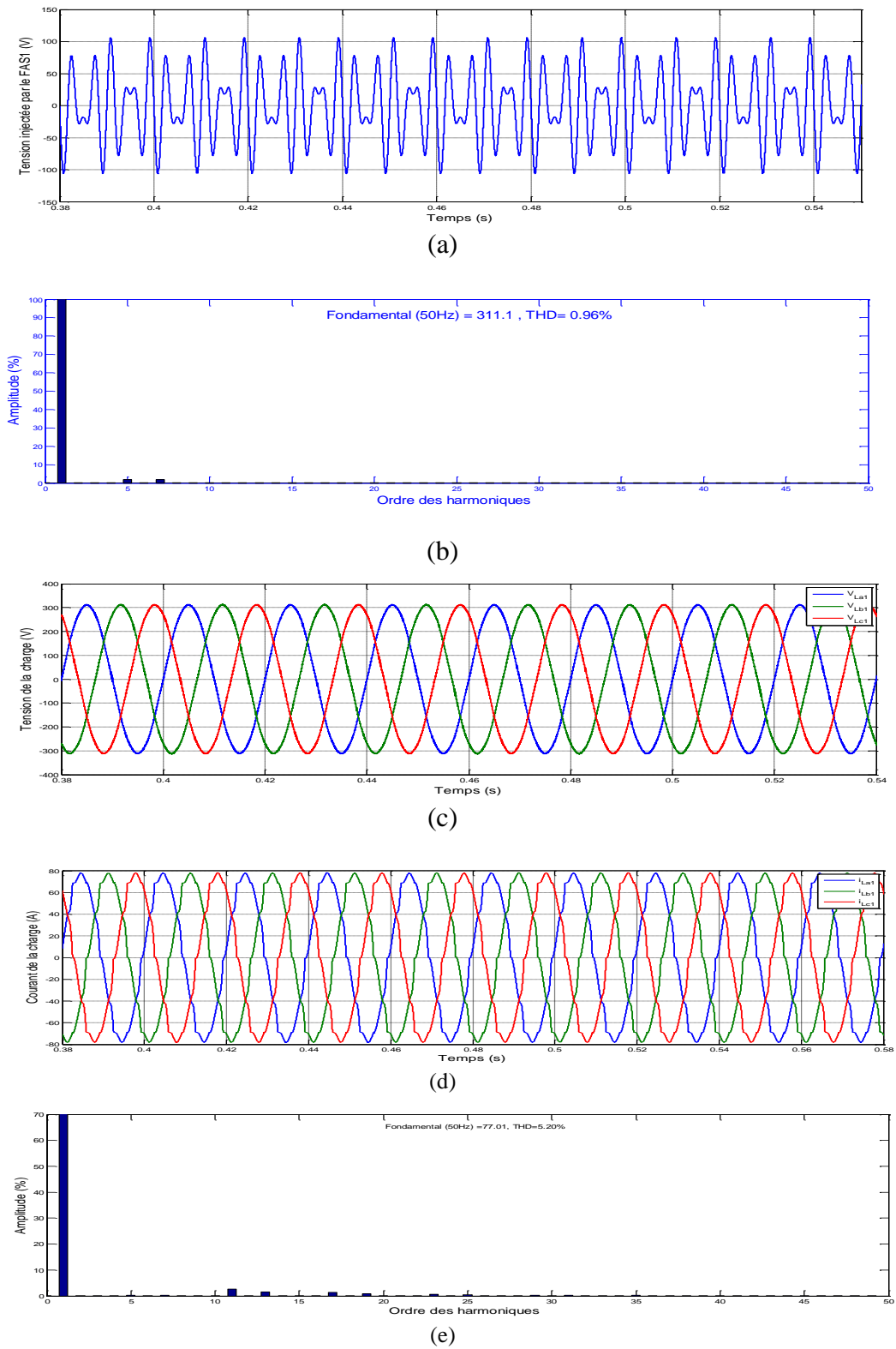
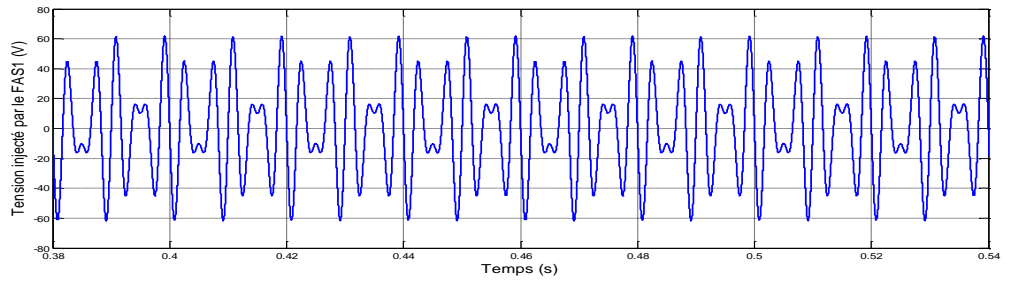
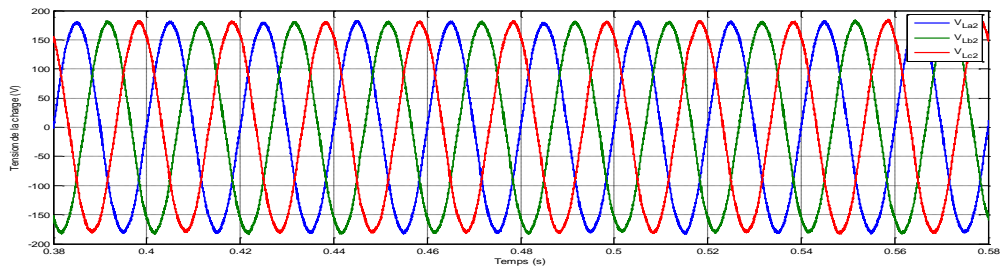


Figure (II.23) : Réponses du FASHI du côté première réseau : a) Tension injectée de la première phase, b) Spectre harmonique de la tension de la charge après le filtrage, c) Tension de la charge après le filtrage, d) Courant de la charge après le filtrage, e) Spectre harmonique de courant de la charge après le filtrage

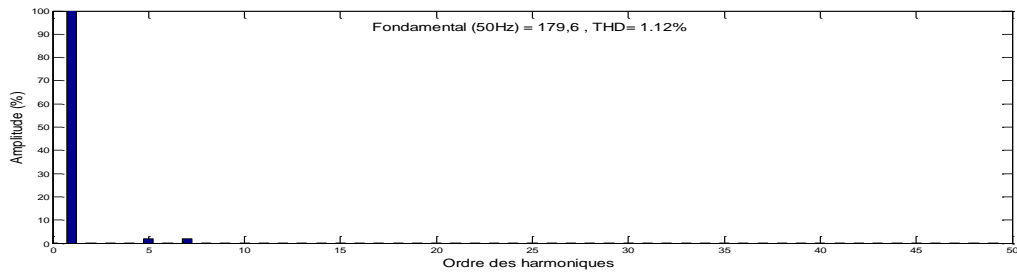
- Les réponses du filtre interligne du côté deuxième réseau



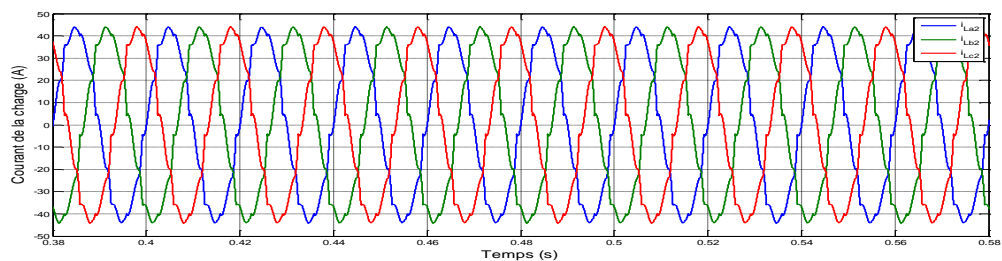
(a)



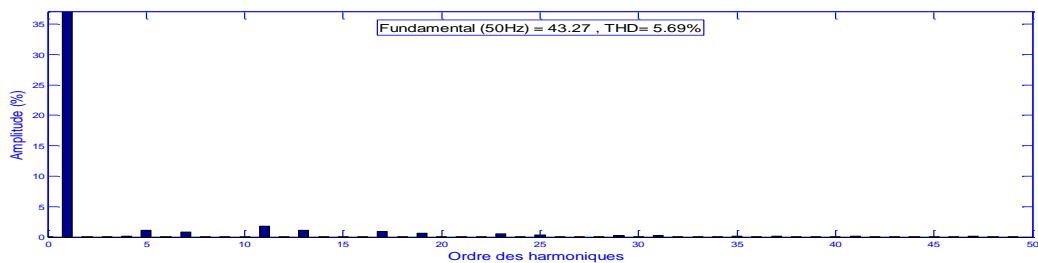
(b)



(c)



(d)



(e)

Figure (II.24) : Réponses du FASHI côté du deuxième réseau : a) Tension injectée de la première phase, b) Tension de la charge après le filtrage, c) Spectre harmonique de la tension de la charge après le filtrage, d) Courant de la charge après le filtrage e) Spectre harmonique de courant de la charge après le filtrage

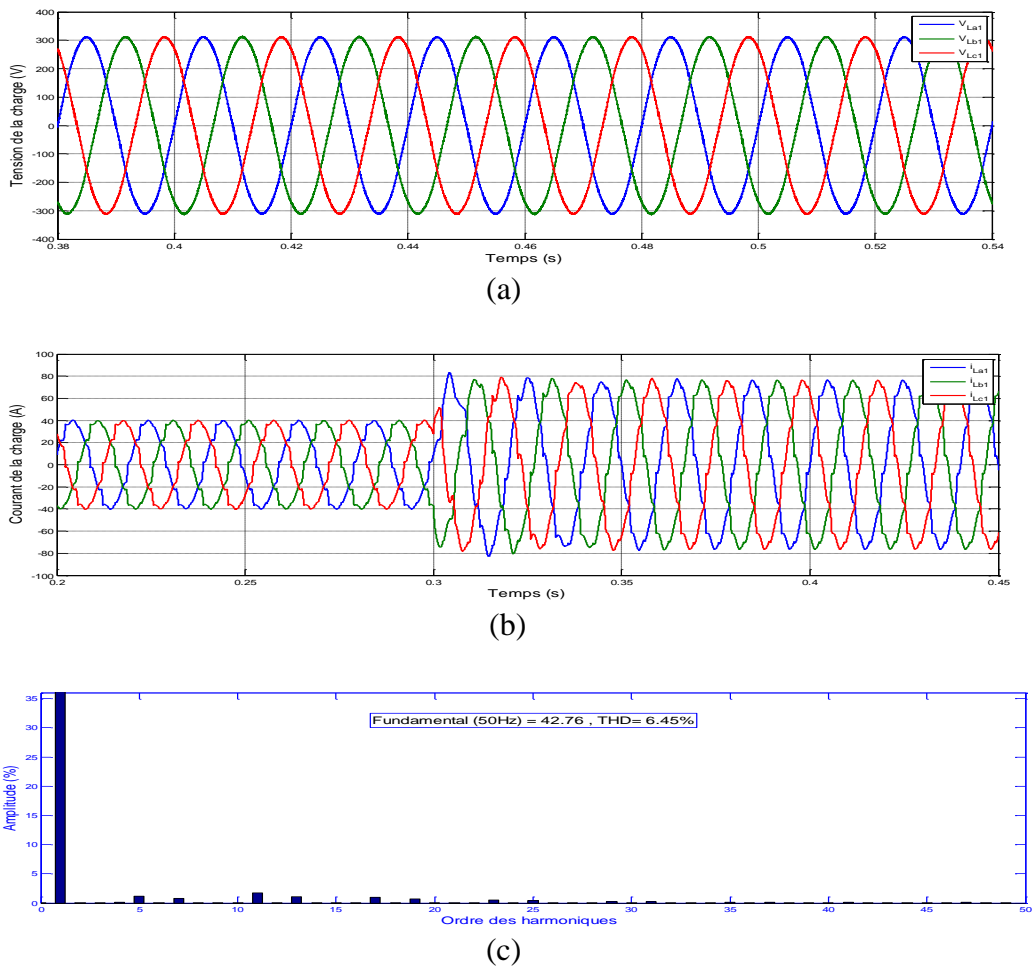


Figure (II.25) : Réponses du FASHI côté du première réseau lors d'une variation de la charge à t=0.3s: a) Tension de la charge, b) Courant de la charge après le filtrage, c) Spectre harmonique de courant de la charge après le filtrage.

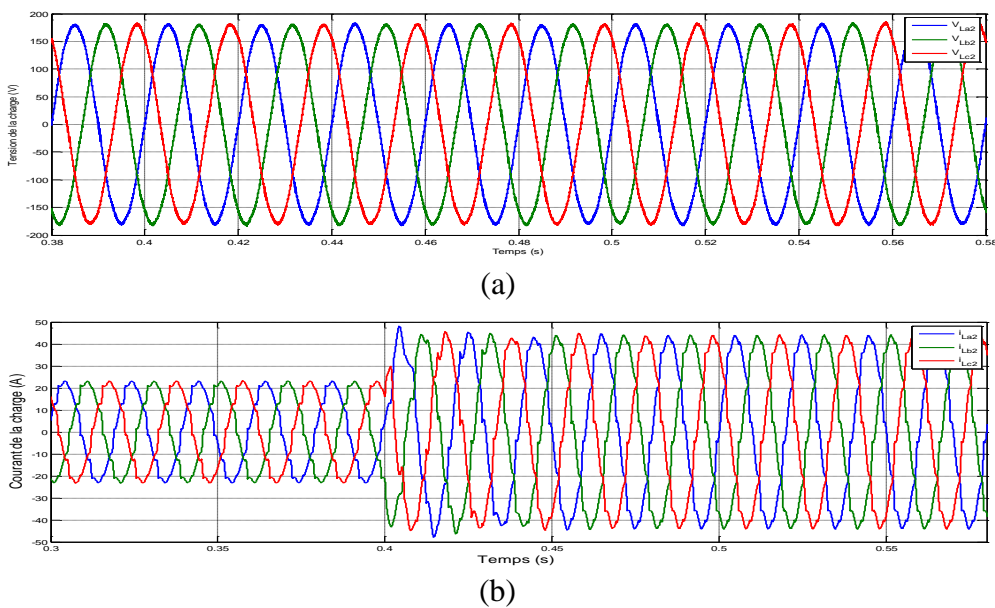


Figure (II.26) : a) Tension de la charge, b) Courant de la charge après le filtrage.

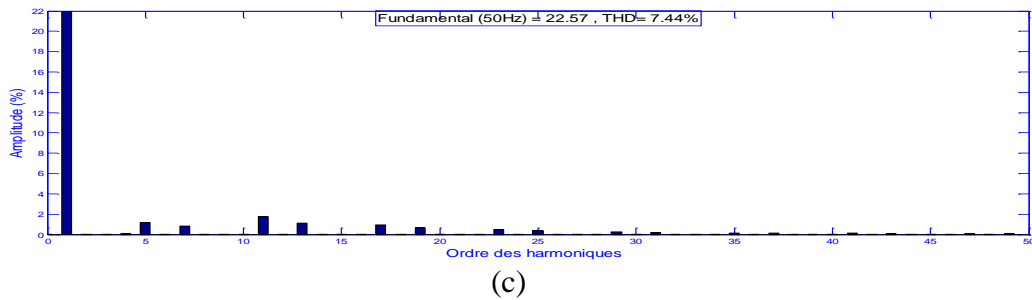


Figure (II.26 suite) : c) Spectre harmonique de courant de la charge après le filtrage

II-4-3 Interprétations des résultats

Les figures (II.23.a) et (II.24.a) prouvent que le filtre actif série hybride interligne est capable de neutraliser les harmoniques de tension dans deux réseaux séparés en générant les tensions harmoniques adéquates cela a comme conséquence une diminution du THD de la tension à 0.98% pour le premier réseau et de 1.12 % pour le deuxième réseau comme le montre les figures (II.23.b) et (II.24.c). Ces valeurs du THD sont des valeurs compatibles avec la norme IEEE STD 519-1992.

Ce qui est remarquable aussi c'est que les courants de ligne des deux réseaux illustrés par les figures (II.23.d) et (II.24.d) sont nettement améliorés. Ceci est accompagné par une réduction notable de leur THD à une valeur de 5.20% pour le premier réseau et de 5.69% pour le deuxième réseau comme le montre les figures (II.23.e) et (II.24.e).

Des performances similaires sont à constater lors des variations des charges non linéaires. Les figures (II.25.a) et (II.26.a) montrent que les figures des tensions aux bornes des charges sont sinusoïdales avec faible taux d'harmonique.

Dans un autre côté, les figures (II.25.b) et (II.26.b) donnent une idée sur les courants des deux réseaux. Ces appels de courant provoquent une augmentation du THD de courant à une valeur de 6.45% pour le premier réseau et de 7.44% pour le deuxième réseau comme le montre les figures (II.25.c) et (II.26.c).

II-5 Conclusion

Dans ce deuxième chapitre, nous avons modélisé et dimensionné un filtre passif résonant simple pour la compensation des harmoniques du courant. Les distorsions dues à la génération des harmoniques sont atténuées par ces filtres résonants.

Ensuite on a proposé une solution hybride pour remédier aux perturbations et aux harmoniques néfastes de la tension et du courant. Cette topologie hybride consiste à installer un filtre actif série et un filtre passif parallèle avec le réseau. Le filtre résultant c'est un filtre hybride capable de prendre en charge à la fois les perturbations et les harmoniques de tension. Il est aussi en mesure d'atténuer les harmoniques du courant de ligne de rangs faibles.

Quant au filtre interligne, il exploite d'avantage le filtre hybride mais cette fois-ci pour compenser à la fois deux réseaux séparés. Ce qui est remarquable est que l'interaction entre les filtres interligne n'est pas trop influente.

Afin de booster les performances du filtre interligne proposé, le recours aux régulateurs flous semblent une solution prometteuse.

Chapitre III

Commande par logique floue du filtre actif série hybride interligne

III.1. Introduction

L'incertitude et l'imprécision sont inhérentes à certains types d'informations traitées ou échangées par l'homme avec son environnement. Comme le précisait Zadeh [9], le raisonnement humain utilise couramment des étiquettes floues, "la température est élevée", "le ciel est gris",... Ce trait de caractéristique différencie l'intelligence humaine de l'intelligence artificielle [9].

Le jugement humain intervient lorsqu'il n'est pas possible ou plus significatif de quantifier numériquement un phénomène ou un état sans dénaturer sa signification par rapport à son contexte. La beauté d'une image et le confort d'une automobile ne sont pas mesurables par des moyens classiques. De même, la distance à un obstacle sur une chaussée peut être mesurée avec précision, mais la signification de cette mesure n'est pas la même pour un piéton que pour un automobiliste [9][17][20].

Ces phénomènes sont encore accentués, lorsqu'à l'issue d'une analyse ou d'une résolution de problème, il faut transmettre l'information à un homme ou à une machine pour une décision finale. L'homme apprécie, sous forme de qualificatifs nuancés, un état par rapport à son environnement et un phénomène dynamique par des tendances.

D'une manière plus précise, la théorie des ensembles flous est l'outil indispensable de formalisation mathématique de l'analyse humaine face à un système complexe, et des résultats de cette analyse. Elle intéresse des domaines très variés tant scientifiques que techniques en facilitant souvent l'intégration de l'interprétation humaine d'un problème [9][17].

L'objectif de ce chapitre est de commander le filtre actif série hybride interligne par un régulateur flou afin d'améliorer les performances obtenues par les régulateurs classiques dans le chapitre précédent. Pour ce faire on va passer par une étude théorique sur l'ensemble flou et les différentes formes et expression des fonctions d'appartenance ainsi que le raisonnement de cette logique moderne. Ensuite on doit choisir la base d'inférence et le gain d'adaptation de ce régulateur flou pour arriver aux meilleurs résultats. Enfin on va faire une comparaison entre les résultats obtenus dans les deux chapitres.

III.1 .2 Ensemble ordinaire et ensemble flou

Soit un ensemble X continu ou non, fini ou infini, tel que $x \in X$ désigne un ensemble de X . A est un sous ensemble binaire ou ordinaire de X lorsque $A \subset X$. L'ensemble ordinaire A est défini par sa fonction caractéristique (ou fonction d'appartenance) telle que :

$$\mu_A(x) : X \rightarrow [0,1]$$

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & ; \text{si } x \in A \\ 0 & ; \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

La notion d'ensemble flou permet des graduations dans l'appartenance d'un élément à une classe, c'est-à-dire autorise un élément à appartenir plus ou moins fortement à cette classe.

Soit un référentiel X dénombrable ou non et x un élément de X , alors un ensemble flou A de X est un ensemble de couples tel que :

$$A = \{(x, \mu_A(x)) / x \in X\} \quad (\text{III.2})$$

$\mu_A(x)$ est le degré d'appartenance de x à A . $\mu_A(x)$ est attribué à la fonction d'appartenance de A qui prend ses valeurs dans un ensemble totalement ordonné M . L'ensemble d'appartenance est pris généralement égal à l'intervalle $[0,1]$. La fonction d'appartenance d'un ensemble flou A est définie par :

$$\mu_A : X \rightarrow [0,1]$$

$$x \rightarrow \mu_A(x) \quad (\text{III.3})$$

III.1.3 Différentes formes de fonction d'appartenance

Nous avons vu que chaque ensemble flou peut être représenté par sa fonction, d'appartenance. Si l'ensemble de référence est discret, les fonctions d'appartenance sont des valeurs discrètes dans l'intervalle $[0, 1]$. Si l'univers du discours est un ensemble continu, nous pouvons représenter ces valeurs analytiquement comme fonction d'appartenance. Les fonctions d'appartenance peuvent avoir différentes formes :

- Monotones (croissantes ou décroissantes), comme montré sur la figure (III.1) et (III.2).
- Triangulaires : figure (III.3.a).
- Trapézoïdales : figure (III.3.b).
- En forme de cloche (Gaussiennes). Comme montré sur la figure (III.3.c).

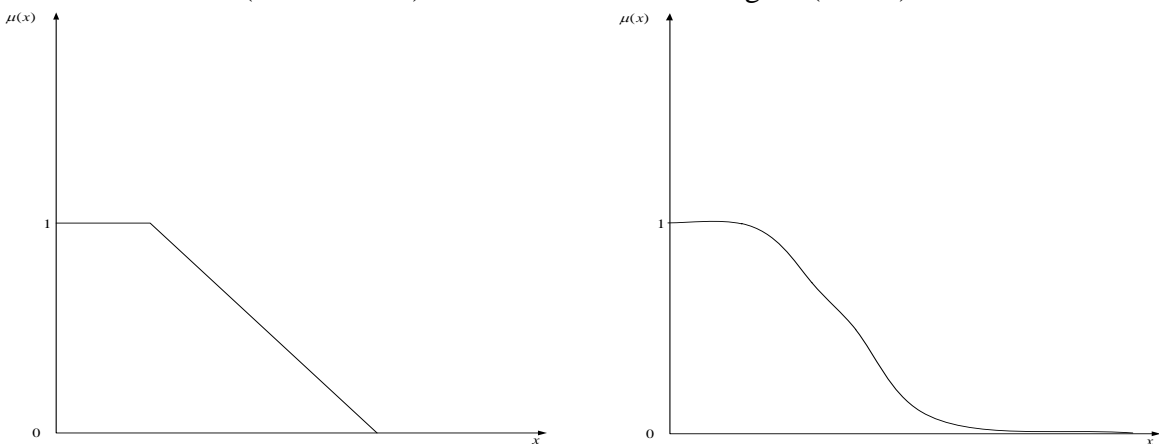


Figure (III.1): Exemples de fonctions d'appartenance monotones décroissantes

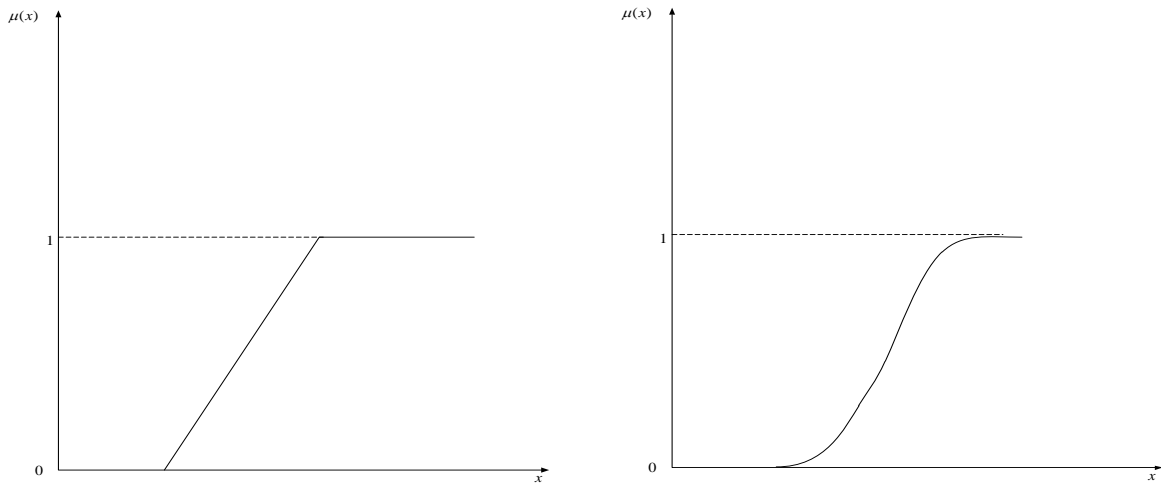


Figure (III.2): Exemples des fonctions d'appartenance monotones croissantes

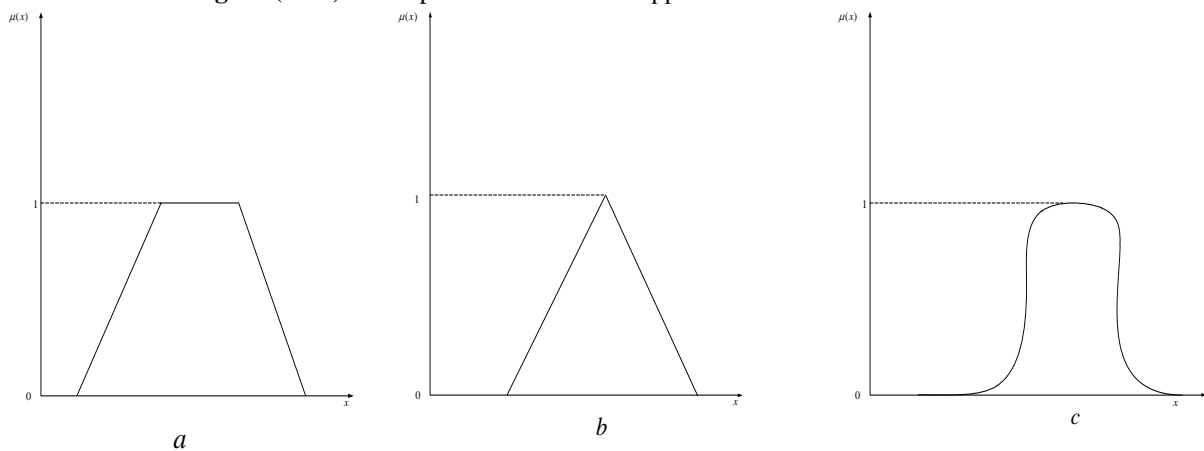


Figure (III.3) : Différents formes de fonctions d'appartenance : (a) Forme trapézoïdale, (b) Forme triangulaire, (c) Forme gaussienne

III.1.4 Expression mathématique des fonctions d'appartenance

On présente ici seulement les deux fonctions triangulaire et trapézoïdale.

III.1.4.1. Fonction triangulaire

L'allure de cette fonction est définie par trois paramètres $\{a, b, c\}$ avec :

$$\mu(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{x-b}, 1, \frac{c-x}{c-b}, 0\right), 0\right). \quad (\text{III.4})$$

III.1.4.2. Fonction trapézoïdale

Elle est définie par quatre paramètres $\{a, b, c, d\}$

Avec :

$$\mu(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{x-b}, 1, \frac{d-x}{d-c}, 0\right), 0\right) \quad (\text{III.5})$$

III.4.3 Opérations sur les sous-ensembles flous

Les opérations sur les ensembles flous sont des extensions des opérations connues sur les ensembles classiques :

Deux sous-ensembles A et B d'un même univers de discours X sont dits égaux si seulement si [18] ;

$$\forall x \in X; \mu_A(x) = \mu_B(x) \quad (\text{III.6})$$

Soit deux ensembles flous A et B dans un univers X . On dit que A est inclus dans B noté $A \subset B$ si leur fonction d'appartenance sont telles que :

$$(A \subset B) \Leftrightarrow \forall x \in X; \mu_A(x) \leq \mu_B(x) \quad (\text{III.7})$$

L'intersection de deux sous-ensemble flous A et B de X est un sous-ensemble de X qui contient tous les éléments x de X appartenant à la fois à A et B . L'intersection de deux sous-ensembles flous A et B ($A \cap B$) de X est le sous-ensemble flous C tel que :

$$\forall x \in X; \mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (\text{III.8})$$

III.1.5 Raisonnement en logique flou

La logique floue permet le traitement souple de connaissances imprécises ou incertaines, ce qui serait impossible avec la logique classique.

Les systèmes basés sur la logique floue utilise pour prendre des décisions la connaissance humaine présentée sous forme de règles floues, encore appelées règles d'inférence. Elles sont exprimées sous la forme :

SI (prémisse) ALORS (conclusion)

Nous aurons par exemple :

SI (température élevée ET humidité importante) ALORS (ventilation forte)

On peut considérer que la logique floue est une extension de la logique classique, les propositions sont des propositions floues définies à partir d'un ensemble L de variable linguistiques ($x, T(x), X$). Leurs valeurs de vérité appartient à l'intervalle $[0, 1]$ et elles sont fournies par les fonctions appartenance.

Soit x une valeur linguistique et A une caractéristique.

- Proposition :

Une proposition floue est définie à partir d'une variable linguistique ($x, T(x), X$) par la qualification :

$$x \text{ est } A \quad (\text{III.9})$$

- Conjonction :

La conjonction de deux propositions floue est réalisée par l'opérateur *ET* par exemple :

$$x_1 \text{ est } A_1 \text{ ET } x_2 \text{ est } A_2 \quad (\text{III.10})$$

- Disjonction :

La disjonction de deux propositions floues est réalisée par l'opérateur *OU* par exemple :

$$x_1 \text{ est } A_1 \text{ OU } x_2 \text{ est } A_2 \quad (\text{III.11})$$

- Implication :

Une implication entre deux propositions floues aussi une proposition floue que l'on peut exprimer par :

$$\text{SI } x_1 \text{ est } A_1 \text{ ALORS } x_2 \text{ est } A_2 \quad (\text{III.12})$$

Le raisonnement flou, fondé sur les règles d'inférence est une généralisation du *modus ponens* (du latin raisonnement par l'affirmation) qui prend en considération l'aspect graduel inhérent aux sous-ensembles flous, et que l'on exprime par [21,22][27] :

- Fait observé : $x \text{ est } A'$

- Règle floue : $\text{SI } x_1 \text{ est } A \quad \text{ALORS } y \text{ est } B$

- Conclusion : $y \text{ est } B'$

A, B, A', B' étant labels linguistiques relatifs aux sous-ensembles flous leur correspondant. L'opérateur *OU* n'est pas utilisé dans les conclusions car il introduirait une incertitude dans la connaissance, l'expertise ne permettrait pas de déterminer quelle décision prendre. De même, l'opérateur *NON* n'est pas employé, en effet si une règle avait par exemple la conclusion : << *ALORS* ventilation *NON* moyenne >>, il serait impossible de dire si cela signifie << ventilation faible >> ou << ventilation forte >>, cela serait encore un cas d'incertitude [25]. Quatre étapes sont donc nécessaires pour obtenir la conclusion finale :

- Le calcul des propositions ;
- Le calcul des relations ;
- Les compositions des règles les faits observés ;
- Agrégations des conclusions des règles.

III.1.6 Structure générale d'un système flou

Chaque système basé sur la logique floue est composé de quatre blocs principaux. La Figure (III.4) donne le schéma bloc d'un système flou.

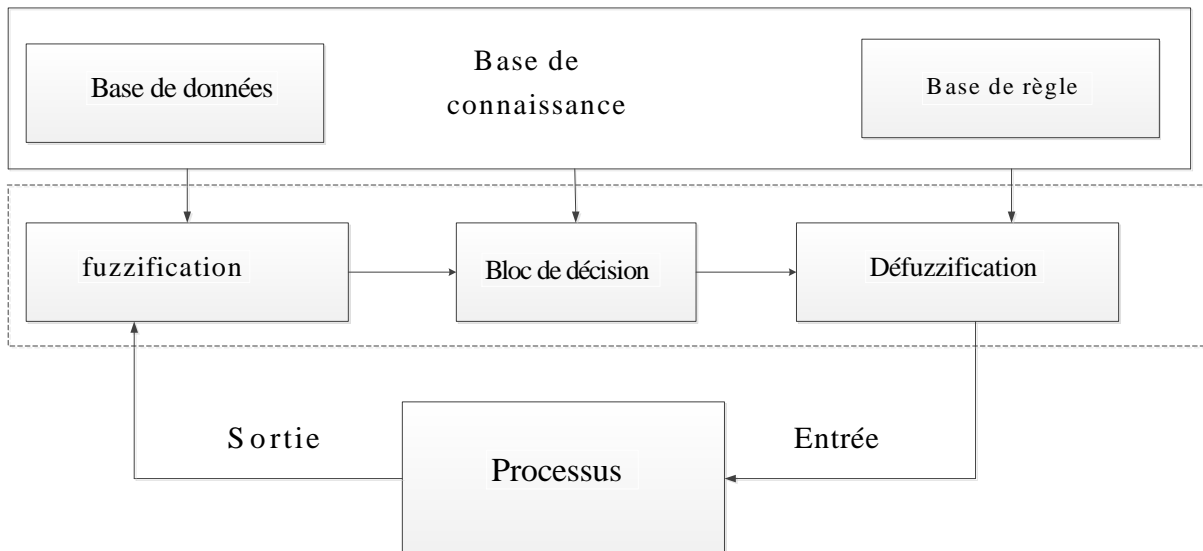


Figure (III.4) : Structure générale d'un système basé sur la logique floue.

- base de connaissance : règles et paramètres des fonctions d'appartenance.
- bloc de décision ou le moteur d'inférence : inférence des opérations sur les règles.
- fuzzification : transformation des entrées précises en degrés d'appartenance.
- défuzzification : transformation des résultats flous en sorties précises.

III.2 Régulateur flou

La commande floue aux mêmes objectifs de régulation et de poursuite qu'une commande réalisée en automatique classique. Cependant, il est possible de se passer d'un modèle explicite du procédé à commander. C'est le plus souvent, le savoir-faire d'un expert ou d'opérateurs qualifiés manipulant le procédé qui est pris en compte pour l'élaboration de la loi de commande.

Cette approche est basée sur deux concepts essentiels : celui de la décomposition d'une plage de variation d'une variable sous forme de nuances linguistique : << faible, moyen, élevé >>, et sur règles provenant de l'expertise de l'opérateur humain, qui expriment, sous forme linguistique, comment doivent évoluer les commandes du système en fonction des variables observées. [5],[9][14].

<<Si l'erreur est positivement grande Et la variation de l'erreur est positivement grande Alors la variation de la sortie est négative >>

Ces concepts sont basés sur une partie de la théorie des sous-ensembles flous introduite par Zadeh.

Un régulateur flou peut être présenté de différentes façons, mais en générale la présentation adoptée se scinde en trois parties : la fuzzification qui permet de passer de variables réelles à des variables floues, le cœur du régulateur représenté par les règles reliant les entrées et sorties, et enfin l'inférence et la défuzzification qui permettent à partir des ensembles flous d'entrée de déterminer la valeur réelle de sortie, (Figure (III.5)). L'ensemble des entrées du procédé et noté u (ensembles des actions calculées par le régulateur flou appliqué au procédé commandé). L'ensemble des sorties observées S , l'ensemble des consignes C et l'ensemble des entrées du régulateur flou X (par exemple : taille, température, vitesse...). L'ensemble des gains de normalisation des entrées GE et les gains de sorties GS du régulateur permettent d'adapter le domaine normalisé de définition des différentes variables.

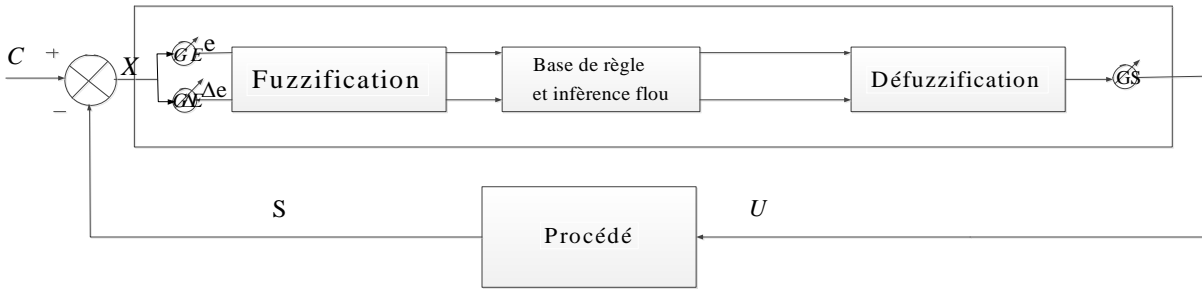


Figure (III.5) : Schéma de principe de la régulation floue

III.2.1 Fuzzification des entrées

L'objectif de la fuzzification est de transformer les variables déterministes d'entrée en variables floues, c'est-à-dire en variables linguistiques, en définissant des fonctions d'appartenance pour ces différentes variables d'entrée.

Les grandeurs physiques d'entrée X sont réduites à des grandeurs normalisées x dans une plage de variation, souvent $[-1, 1]$, appelée univers de discours, qui peut être soit discret, soit continu. Bien souvent, cet univers de discours est borné, en appliquant une limitation sur la valeur numérique de $|x| \leq 1$, pour pallier le problème des grandes variations de X . Les gains de normalisation caractérisent des facteurs d'échelles d'entrée x et X .

Dans le cas d'un univers de discours continu, le nombre de valeur linguistique (négative petite, négative moyenne, positive grande, ...), représenté par des fonctions d'appartenance, pour une variable x_i peut varier (par exemple trois, cinq ou sept). Un exemple de fuzzification continue est illustré (figure (III.6)) pour une seule variable de x , avec les fonctions d'appartenance triangulaire ; les valeurs linguistique correspondantes sont caractérisées par des symboles tel que :

ZE : zéro environ. *NG* : négative grande.
PP : positive petite. *NM* : négative moyenne. *PG* : positive grande
PM : positive moyenne. *NP* : négative petite.

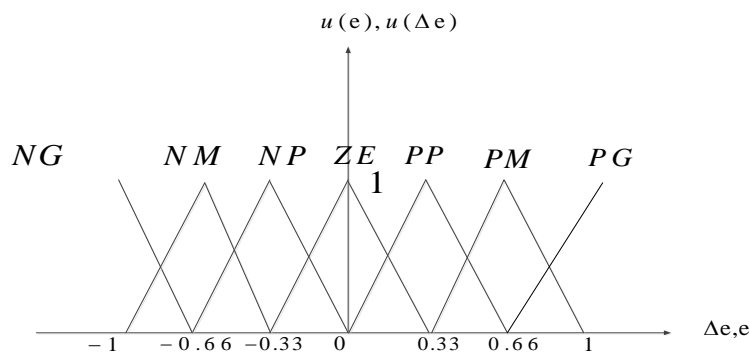


Figure (III.6) : Fonctions d'appartenances des variables e et Δe

III.2.2 Base des règles et inférence floue

Les règles floues représentent le cœur du régulateur, et permettent d'exprimer sous forme linguistique les variables d'entrée du régulateur aux variables de commande du système.

Un type de règle peut-être par exemple :

Si x_1 est "positif grand" et x_2 est "zéro environ" alors u est "négatif grand".

Où x_1 et x_2 représentent deux variables d'entrée du régulateur telles que : l'écart de réglage, sa variation et u la commande. L'expérience dans l'élaboration de ces règles joue un rôle important.

Une représentation graphique de l'ensemble des règles, appelée matrice d'inférence ou table des règles, permet de synthétiser le cœur de régulateur flou. La table (III.1) représente une table d'inférence pour les deux variables linguistiques d'entrée l'erreur de la tension de référence (e) et la variation de cette dernière (Δe) et la variable de sortie u

III.2.3 Défuzzification

La défuzzification consiste à prendre une décision, c'est-à-dire, obtenir une commande réelle à partir de la commande obtenue sous forme d'ensemble flou. Dans le cas d'un raisonnement basé sur l'inférence de règles floues, plusieurs méthodes existent, les plus couramment utilisées sont : [9]

- méthode du centre de gravité ;
- méthode de moyenne de maximum ;
- méthode de moyenne pondérée ;

III.2.4. Synthèse du régulateur flou

La majorité des contrôleurs développés utilisent le schéma simple proposé par Mamdani pour les systèmes mono entrée / mono sortie. La figure (III.7) représente le schéma bloc du régulateur flou.

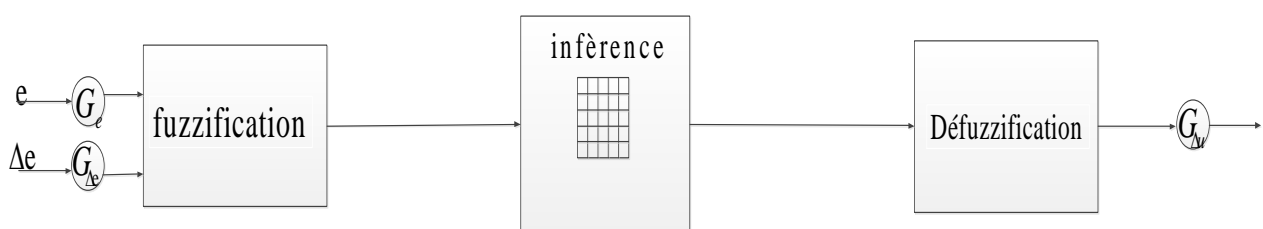


Figure (III.7) : Schéma bloc du régulateur flou

Tableau (III.1) : Base de règles [9]

e							
Δe							
	NG	NM	NP	EZ	PP	PM	PG
NG	NG	NG	NG	NM	NP	NP	EZ
NM	NG	NM	NM	NM	NP	EZ	PP
NP	NG	NM	NP	NP	EZ	PP	PM
EZ	NG	NM	NP	EZ	PP	PM	PG
PP	NM	NP	EZ	PP	PP	PM	PG
PM	NP	EZ	PP	PM	PM	PM	PG
PG	EZ	PP	PP	PM	PG	PG	PG

D'après ce schéma, le régulateur flou est composé :

- Gains d'échelle associés à l'erreur, à sa variation et la variation de la commande,
- Un bloc de fuzzification de l'erreur et de sa variation,
- Un bloc des règles du contrôleur flou (inférences),
- Un bloc de défuzzification utilisé pour convertir la variation de la commande floue en valeur numérique.

-Loi de commande

Cette loi est fonction de l'erreur et de sa variation telle que $\Delta V_{f_ref} = f(e, \Delta e)$. Par conséquent, l'activation de l'ensemble des règles de décision associées donne la variation de la commande ΔV_{f_ref} nécessaire, permettant ainsi l'ajustement d'une telle commande. Dans la plupart des cas, cette variation de commande est obtenue par une simple lecture dans une table de décision définie hors ligne [9].

La forme la plus générale de cette loi de commande est :

$$V_{f_ref}(k+1) = V_{f_ref}(k) + T_s G_{\Delta u} \Delta V_{f_ref} \quad (\text{III.15})$$

$G_{\Delta u}$: Gain de la commande.

T_s : Période d'échantillonnage.

Fuzzification

L'erreur et sa variation sont définies comme suit :

$$\begin{aligned}
 e(k) &= G_e (V_{f_ref}(k) - V(k)) \\
 \Delta e(k) &= G_{\Delta e} (e(k) - e(k-1))
 \end{aligned}
 \tag{III.16}$$

Où $G_e, G_{\Delta e}$: représentent les gains d'adaptation, généralement on les choisit faibles pour assurer la stabilité du système. Ils jouent un rôle extrêmement important. En effet, ce sont ces derniers qui fixeront les performances de la commande. Les grandeurs e et Δe sont normalisées dans un univers de discours $[-1 \ 1]$; ces grandeurs doivent être converties en variables linguistiques. On a introduit sept fonctions d'appartenance de forme triangulaires pour chaque variable d'entrée (Figure III.9).

Il est nécessaire de fuzzifier la variable de sortie car on a besoin des sous-ensembles flous au niveau des inférences et de la défuzzification.

- Inférences

La stratégie de commande dépend essentiellement des inférences adoptées, la condition pour chaque règle est de la forme:

$$\begin{aligned}
 &SI \ e(k) \text{ est NG et } \Delta e(k) \text{ est NG ALORS } \Delta V_{f_ref} \text{ est NG} \\
 &SI \ e(k) \text{ est EZ et } \Delta e(k) \text{ est EZ ALORS } \Delta V_{f_ref} \text{ est EZ} \\
 &SI \ e(k) \text{ est NP et } \Delta e(k) \text{ est NP ALORS } \Delta V_{f_ref} \text{ est NP}
 \end{aligned}
 \tag{III.17}$$

Afin de simplifier la description des inférences, on utilise une matrice d'inférence (Tableau III.1)

III.3 Commande par logique floue du filtre actif interligne

III.3.1 Structure de la commande

La figure (III.8) représente le schéma de la commande floue du FASI et l'ensemble de la structure:

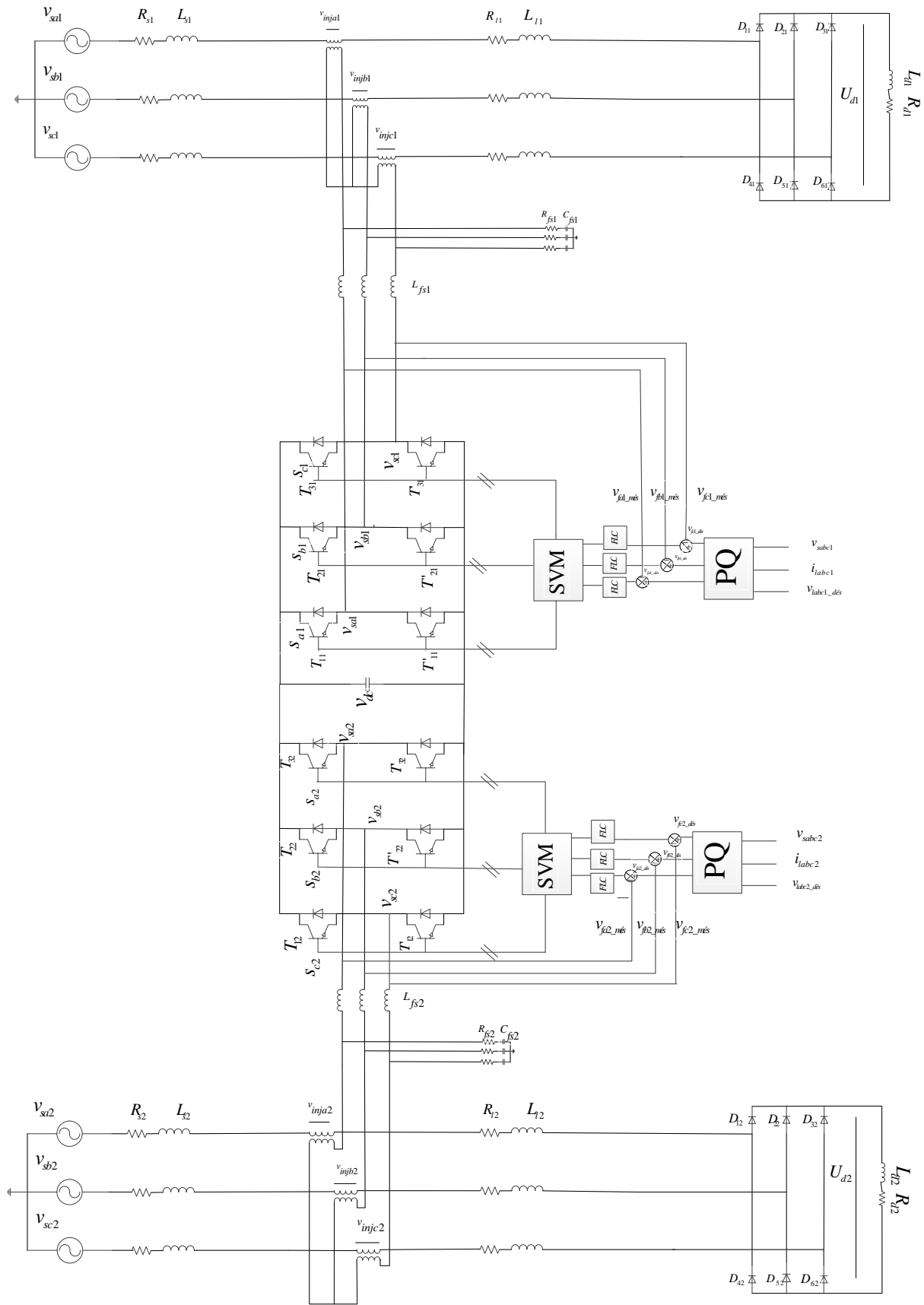


Figure (III.8) : Commande par logique floue du FASI

III.3.1.1 Résultats de simulation

a) Les résultats présentés dans cette section correspondent à la compensation des perturbations affectant la tension de la charge du premier réseau.

- Filtrage des harmoniques de tension

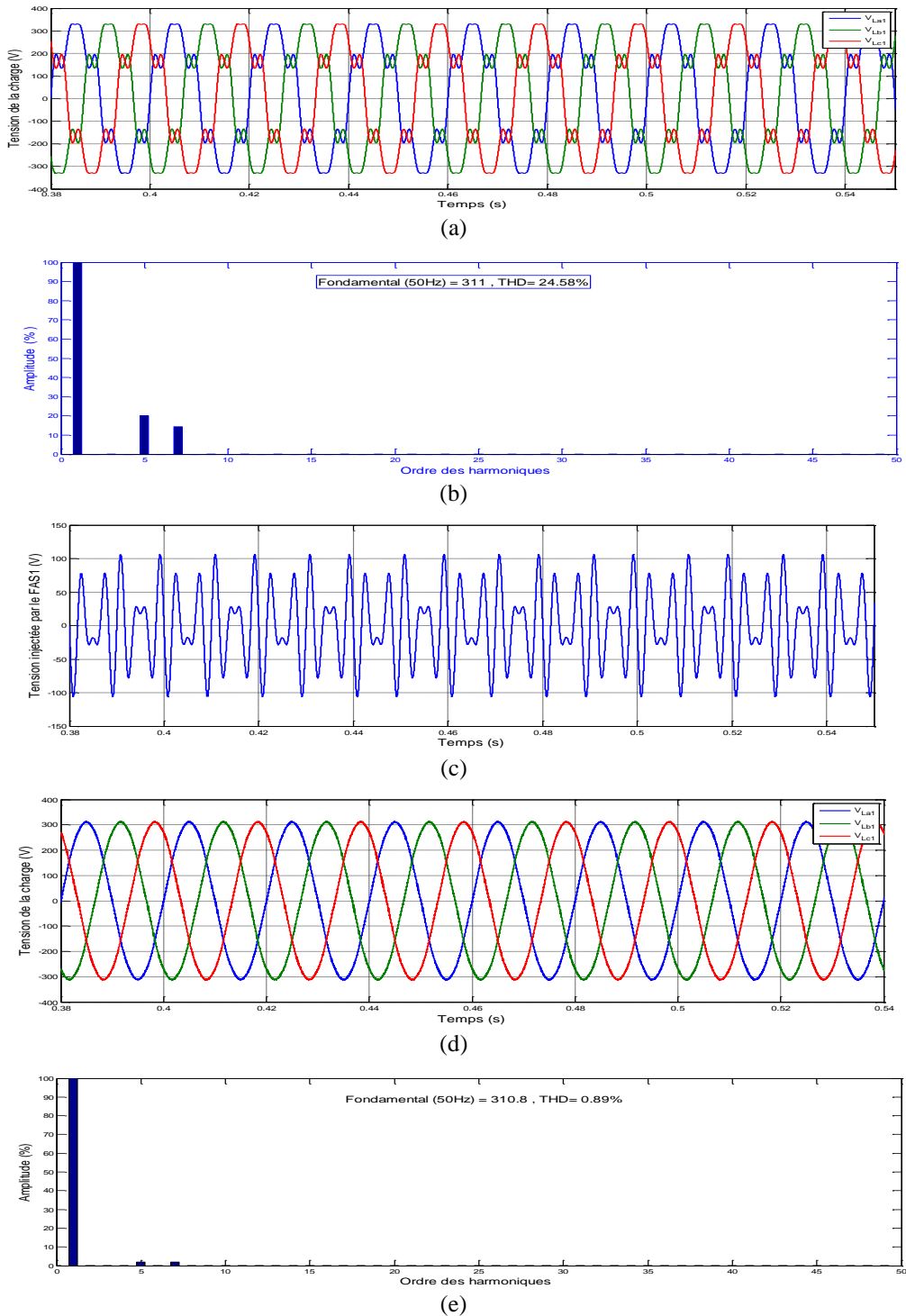


Figure (III.9) : Réponses du FASI du première réseau : a) Tension de la charge de la tension avant le filtrage, b) Spectre harmonique de tension de la première phase avant le filtrage, c) Tension de la charge après le filtrage, d) Tension injectée de la première phase, f) Tension de la charge après le filtrage, e) Spectre harmonique de la tension de la charge après le filtrage.

- Compensation d'un creux de tensions triphasées d'une profondeur de 23% et d'une durée de 60ms sur les trois phases du premier réseau.

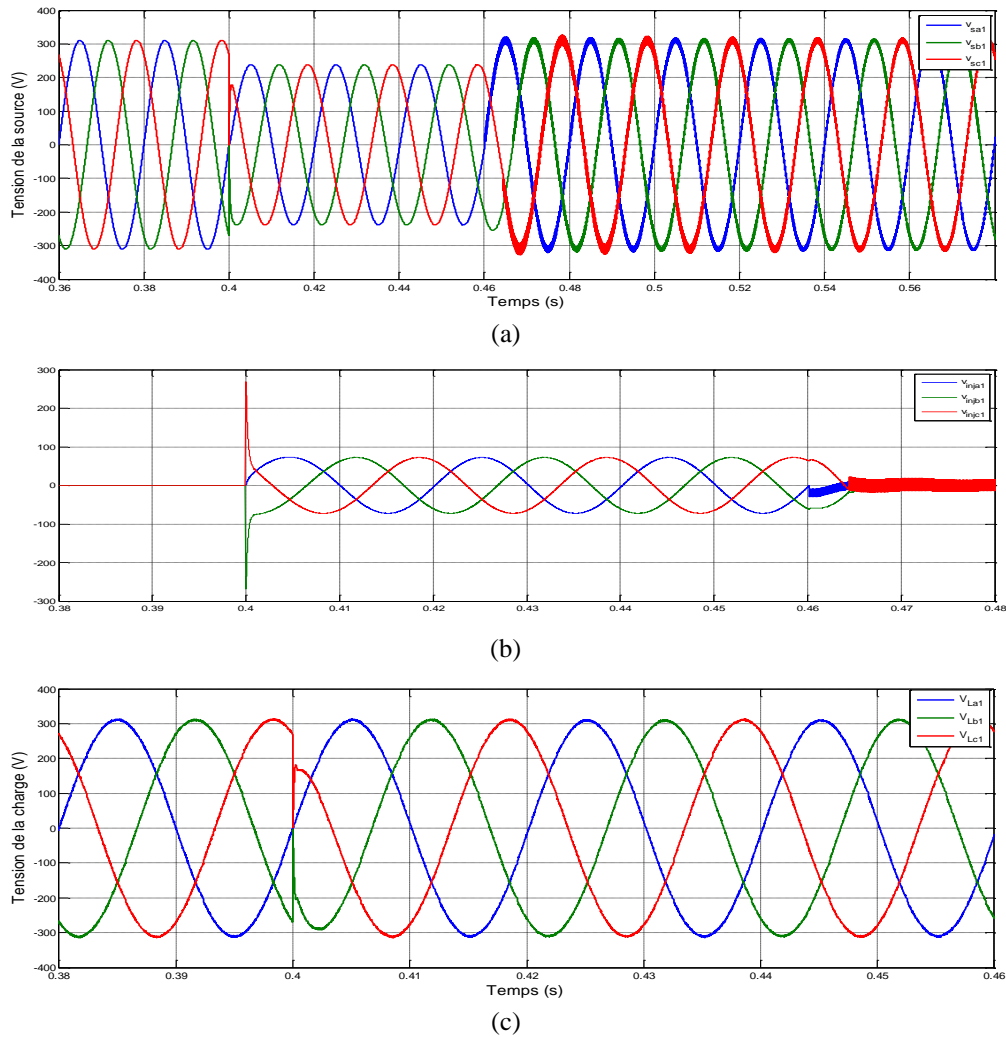


Figure (III.10) : Réponses du FASI du premier réseau : a) Tension de la charge lors d'un creux de tension, b) Tension injectée par le FASI, c) Tension de la charge après le filtrage

b) Les résultats présentés dans cette section correspondent à la compensation des perturbations affectant la tension de la charge du deuxième réseau.

- Filtrage des harmoniques de tension

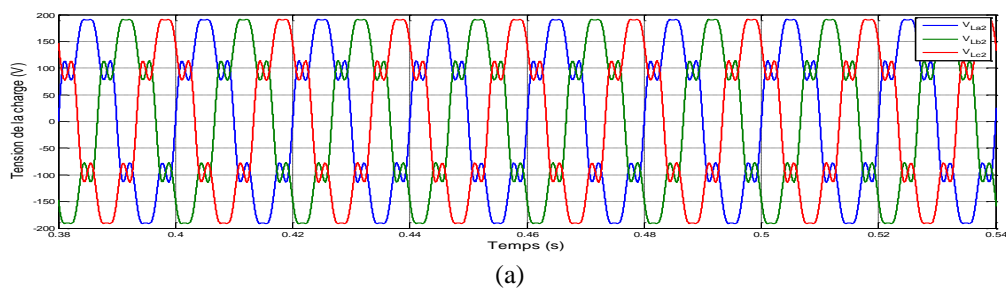


Figure (III.11) : Réponses du FASI du deuxième réseau: a) Tension de la charge avant le filtrage

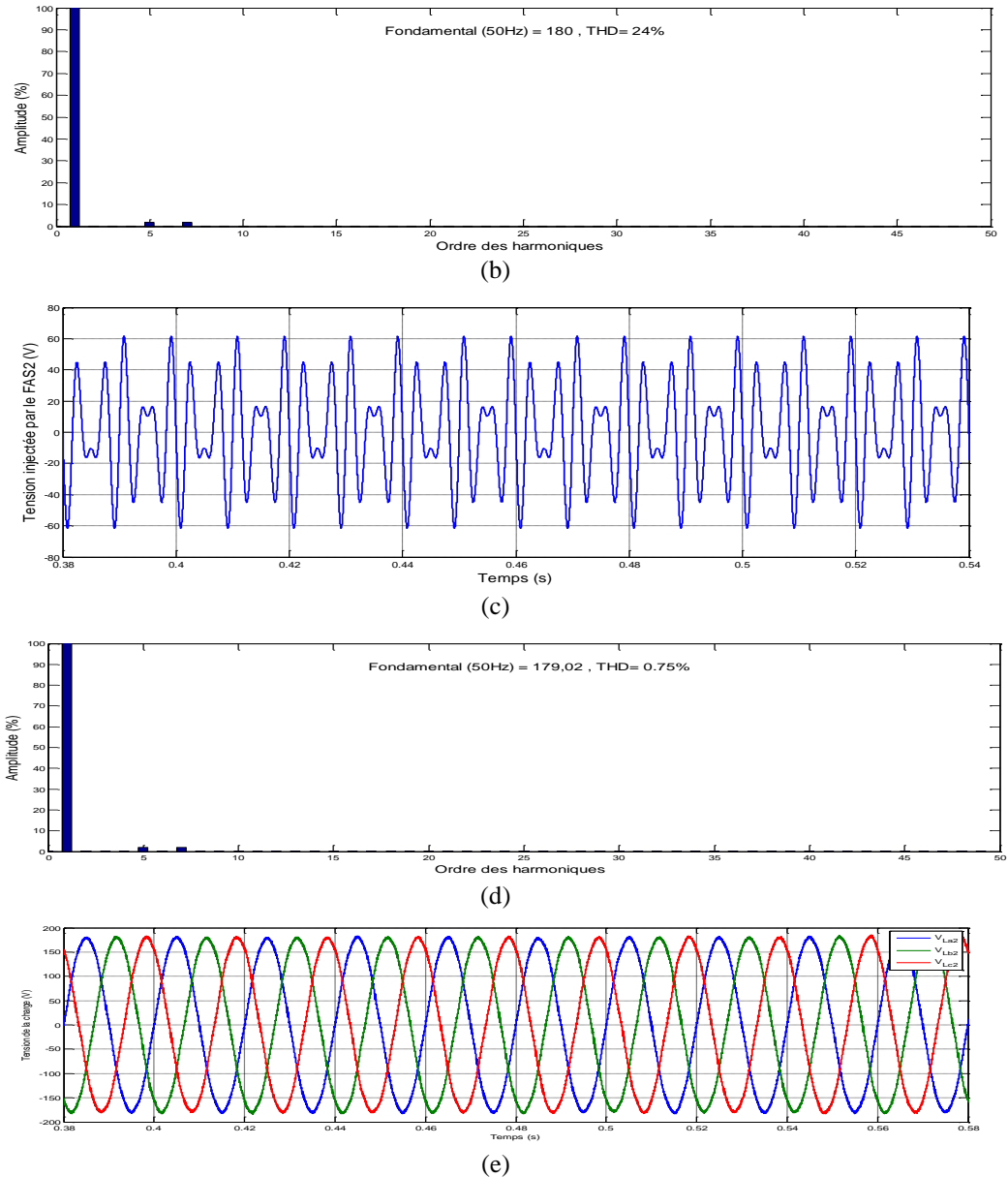


Figure (III.11 suite): Réponses du FASI du deuxième réseau: b) Spectre harmonique de la tension avant le filtrage, c) Tension injectée par FASI de la première phase, d) Tension injectée de la première phase, f) Tension de la charge après le filtrage, e) Spectre harmonique de la tension de la charge après le filtrage

- Compensation d'un creux de tensions triphasées de 23% et d'une durée de 60ms sur les trois phases du deuxième réseau.

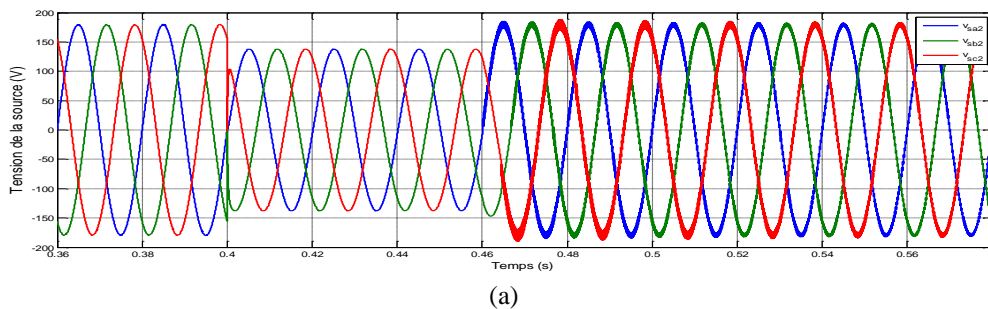


Figure (III.12) : Réponses du FASI du deuxième réseau : a) Tension de la charge lors d'un creux de tension

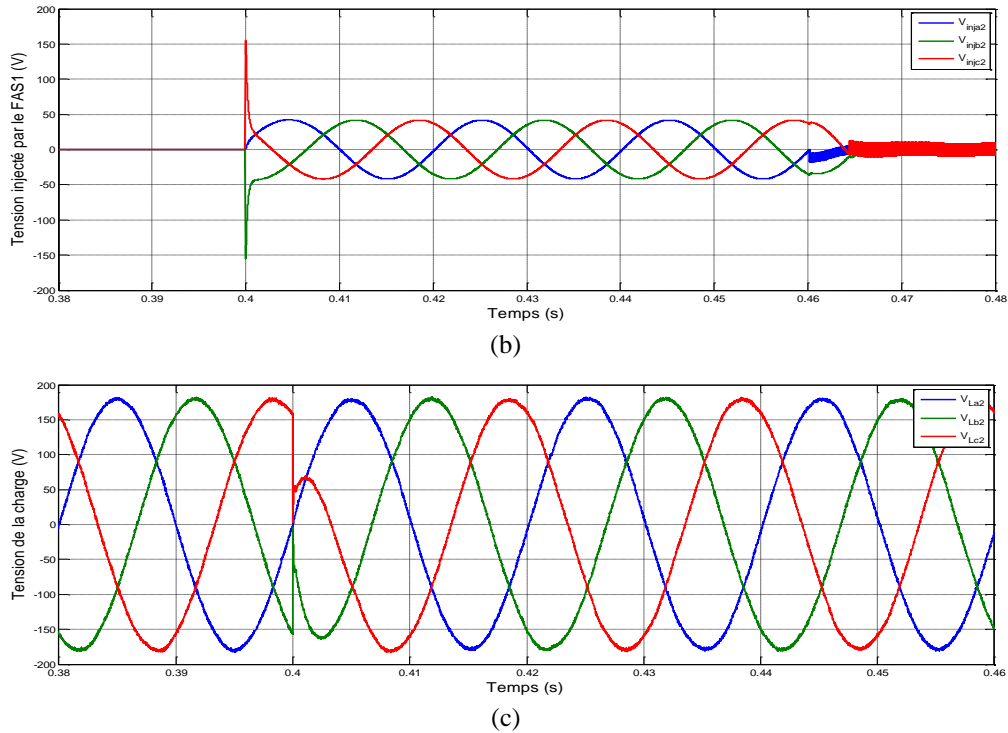


Figure (III.12 suite): Réponses du FASI du deuxième réseau : b) Tension injectée par le FASI, c) Tension de la charge après le filtrage

III.3.1.2 Interprétations des résultats

A partir des figures (III.9.a) et (III.11.a), on remarque une pollution des tensions des charges inacceptable ceci est conforté par les spectres des harmoniques présentés dans les figures (III.9.b) et (III.11.b) avec un THD de 24%.

Après application du FASI proposé on observe les tensions générées par ce filtre comme il est illustré dans les figures (III.9.c) et (III.11.c), pour la compensation des perturbations aux niveaux des tensions des charges. Cela implique une nette amélioration dans l'allure des tensions des charges non linéaires comme le montre les figures (III.9.d) et (III.11.d) et une analyse spectrale des tensions conformément aux normes internationales, voir les figures (III.9.e) et (III.11.e).

D'autre part, l'application d'un creux de tension sur les deux réseaux séparés conduit aux résultats des figures (III.10.a) et (III.12.a). On remarque que le FASI arrive à compenser ce creux des tensions par l'injection des tensions opposés selon les figures (III.10.b) et (III.12.b). Il en résulte un réglage des tensions des charges avec précision et ceci presque instantanément, comme l'illustre les figures (III.10.c) et (III.12.c).

III.4 Commande par logique floue du filtre actif série hybride interligne

Le filtre actif série hybride interligne est capable de protéger deux charges séparées alimentées par deux lignes différentes. La figure (III.13) présente l'ensemble de la structure et de son environnement fonctionnel :

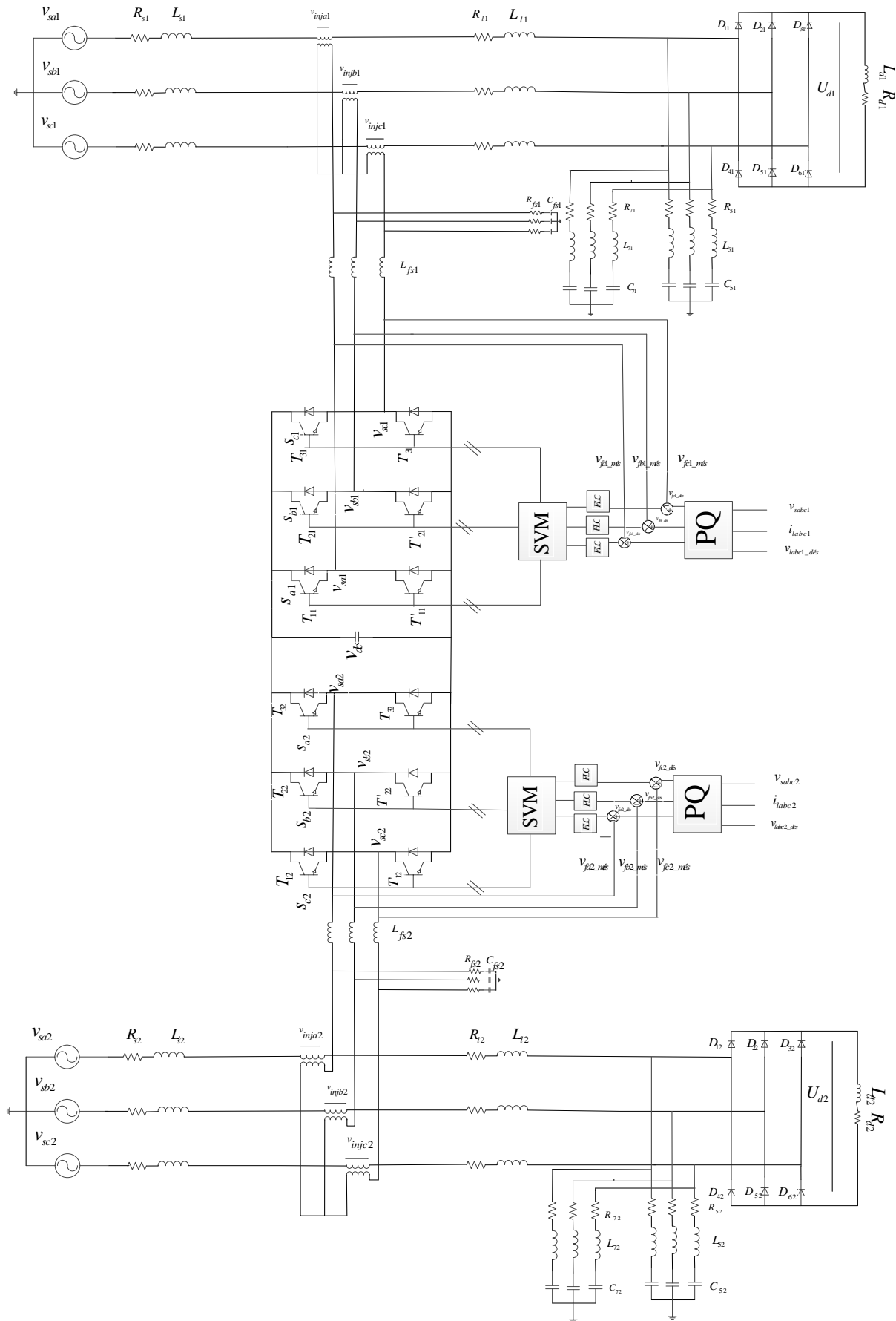


Figure (III.13) : Commande par logique floue du FASHI

III.4.1.1 Résultats de simulation

- Les réponses du filtre hybride interligne côté du premier réseau

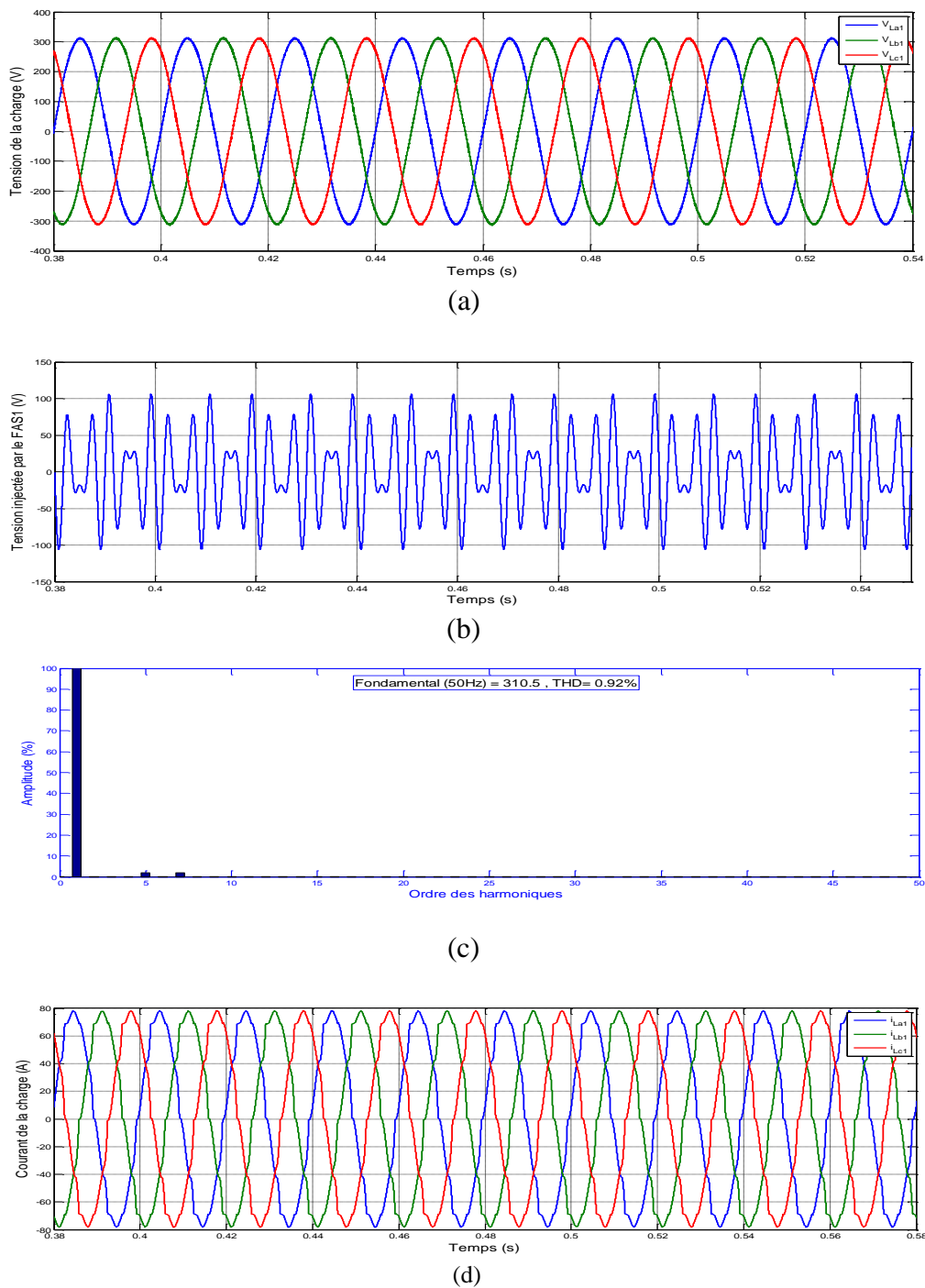


Figure (III.14) : Réponses du FASHI côté du première réseau : a) Tension de la charge après le filtrage, b) Tension injectée de la première phase, c) Spectre harmonique de la tension de la charge après le filtrage, d) Courant de la charge après le filtrage

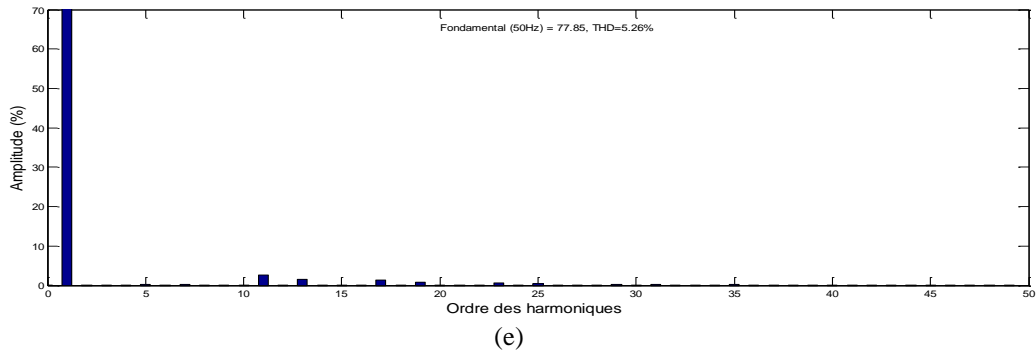


Figure (III.14 suite) : Réponses du FASHI côté du première réseau : e) Spectre harmonique de courant de la charge après le filtrage

- Les réponses du filtre interligne côté deuxième réseau

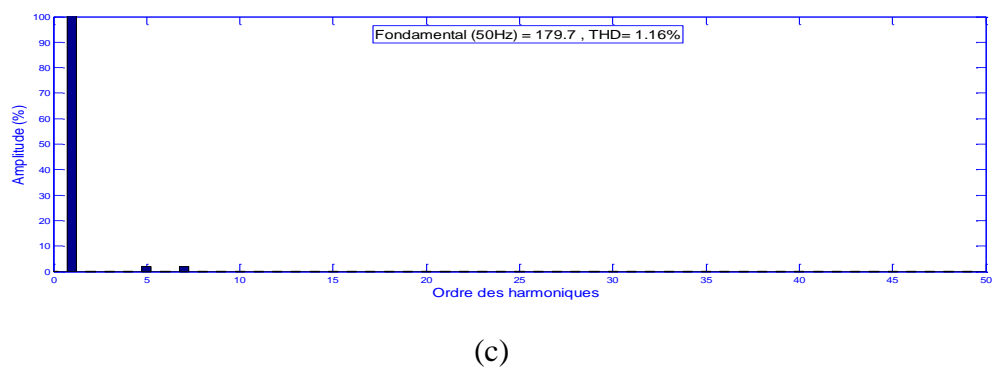
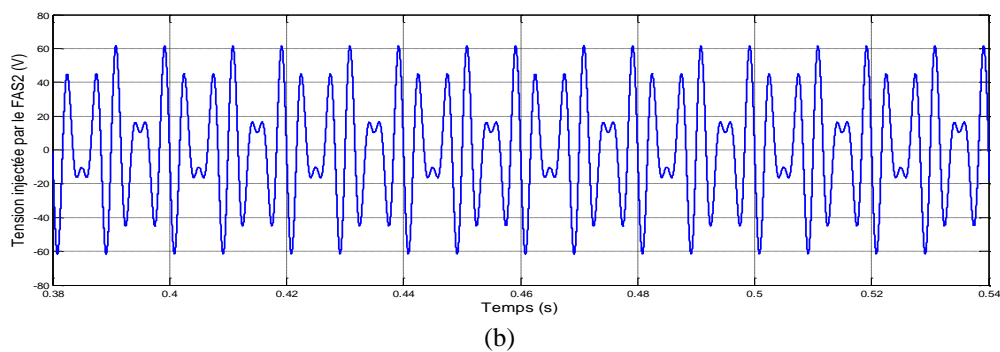
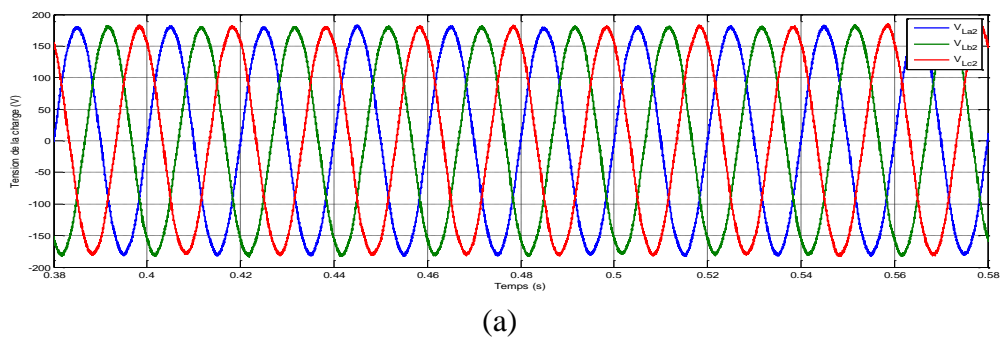
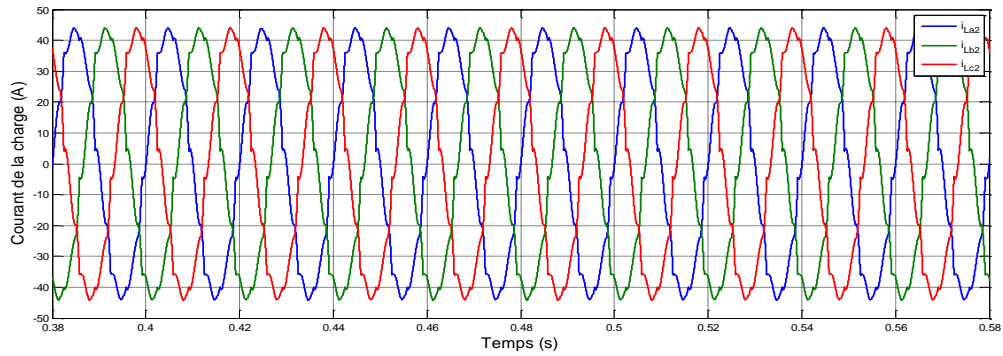
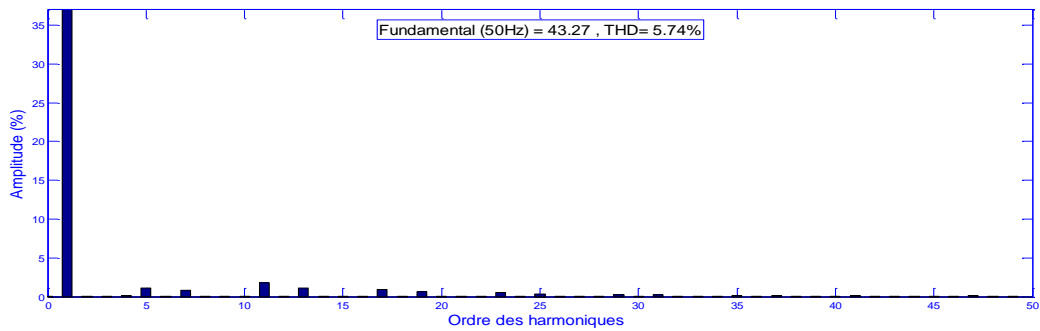


Figure (III.15) : Réponses du FASHI coté du premier réseau : a) Tension de la charge après le filtrage, b) Tension injectée de la première phase, c) Spectre harmoniques de la tension de la charge après le filtrage

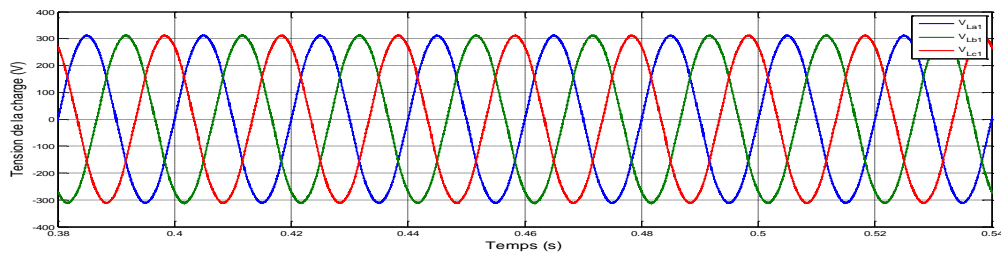


(d)

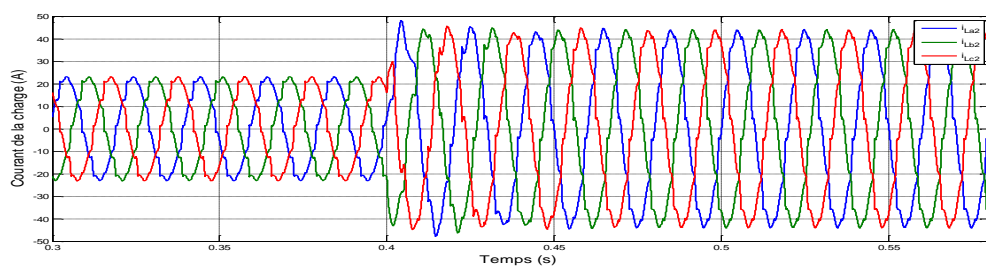


(e)

Figure (III.15 suite) : Réponses du FASHI coté du premier réseau : d) Courant de la charge après le filtrage, e) Spectre harmonique du courant de la charge après le filtrage



(a)



(b)

Figure (III.16) : Réponses du FASHI du côté première réseau lors d'une variation de la charge à t=0.3s: a) Tension de la charge, b) Courant de la charge.

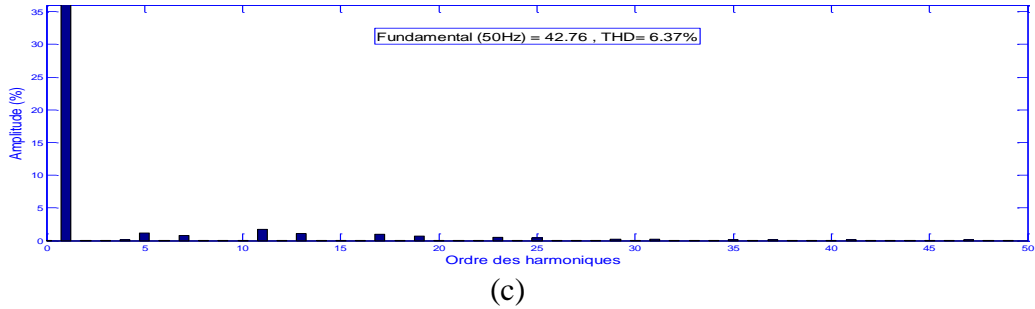


Figure (III.16 suite) : Réponses du FASHI du côté première réseau lors d'une variation de la charge à $t=0.3s$:
c) Spectre harmonique de courant de la charge

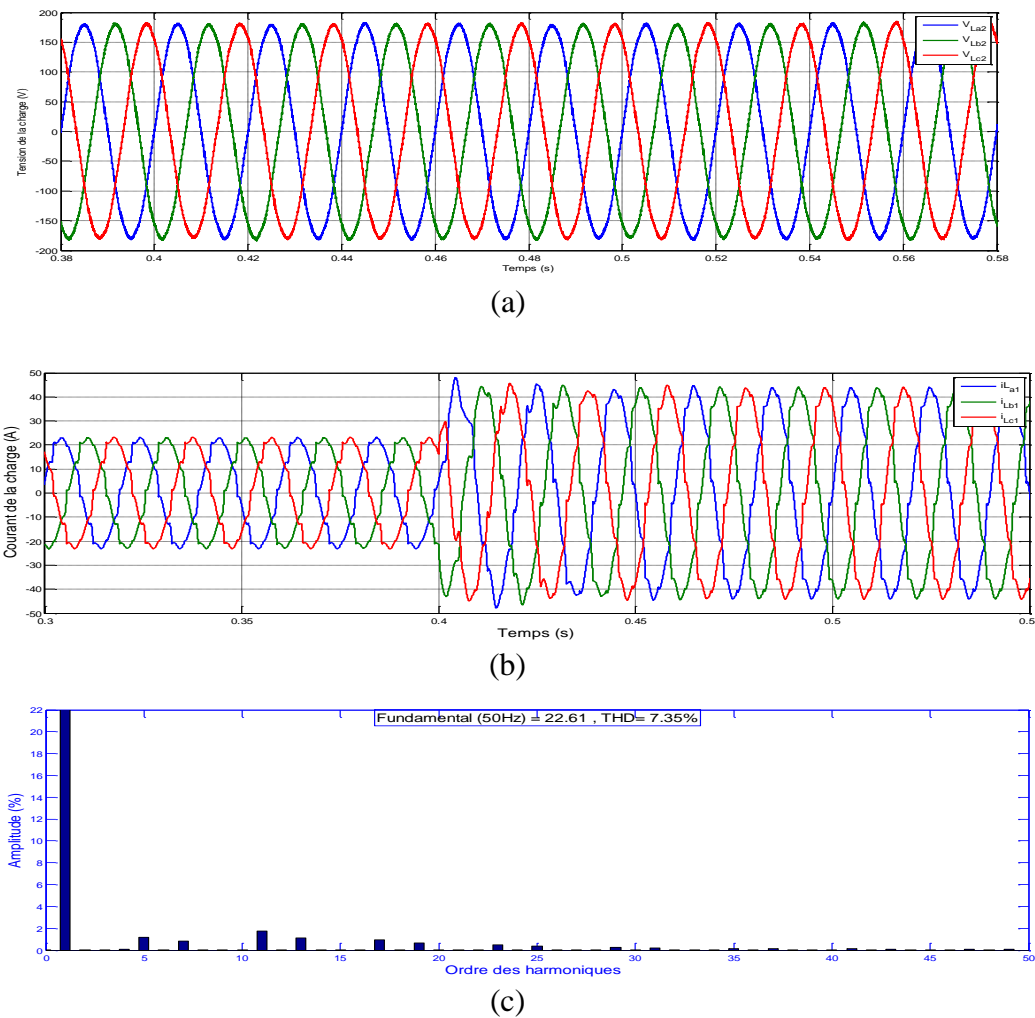


Figure (III.17) : Réponses du FASHI côté du deuxième réseau lors d'une variation de la charge à $t=0.4s$: a) Tension de la charge, b) Courant de la charge, c) Spectre harmonique du courant de la charge

III.4.1.2 Interprétations des résultats

Selon les résultats de simulation obtenus du FASHI ; les figures (III.14.a) et (III.15.a) montrent qu'il assure parfaitement sa fonction et compense bien les harmoniques des tensions dans les deux réseaux séparés.

Les figures (III.14.b) et (III.15.b) donnent une idée sur les tensions générées par les filtres actifs pour la compensation des harmoniques indésirables. Ceci est visible en observant la

valeur de THD qui passe de 24 % à 0.92% pour le premier réseau et de 24% à 1.16% pour le deuxième réseau comme le montrent les figures (III.14.c) et (III.15.c). On constate aussi que le FASHI joue un rôle très important pour diminuer les harmoniques des courants imposés par les charges non linéaires, comme il est visualisé sur les figures (III.14.d) et (III.15.d). Par conséquent des diminutions du THD de 24% à 5.26% pour le premier réseau et 24% à 5.74% pour le deuxième réseau sont observées sur les figures (III.14.e) et (III.15.e).

En plus, le FASHI assure un bon niveau de filtrage des harmoniques lors des variations des charges non linéaires même si les temps d'application sont différents ; les figures (III.16.a) et (III.17.a) représentent des tensions des charges lors de ces variations. D'après les figures (III.16.b) et (III.17.b), qui montrent les courants des charges non linéaires lors des variations, on peut constater qu'il y a une petite augmentation du THD du courant comme le témoignent les figures (III.16.c) et (III.17.c). En effet, le THD passe à 6.37% pour le premier réseau et de 7.45% pour le deuxième réseau du fait de la variation de la charge.

III.4.1.3 Etude comparative des résultats

Les résultats des simulations que nous avons présentés montrent que quelle que soit la stratégie de commande adoptée le THD est toujours en conformité avec la norme IEEE STD 519-1992. Ces résultats montrent bien que la méthode PQ donne toujours de bons résultats aux niveaux de THD. En termes de technique de commande, on constate que les THD obtenus avec la commande floue sont inférieurs à ceux obtenus par la commande linéaire. Le tableau (III.2) regroupe les différents résultats obtenus par les deux approches de commande appliquées sur le FASHI.

Tableau (III.2) : Comparaison des résultats de simulation du FASHI illustré par deux méthodes de commande en termes de THD

		THD de la tension	THD du courant sans variation de la charge	THD du courant lors de variation de la charge
Commande linéaire	1 ^{er} réseau	0.98%	5.20%	6.45%
	2 ^{ème} réseau	1.16%	5.69%	7.44%
Commande par logique floue	1 ^{er} réseau	0.92%	5.26%	6.37%
	2 ^{ème} réseau	1.12%	5.74%	7.38%

II.5 Conclusion

Dans une première partie de ce chapitre, nous avons tout d'abord présenté la théorie et la méthode de commande des systèmes par la logique floue.

Dans la deuxième partie, cette technique de commande a été appliquée dans la commande des FASI et FASHI connectés entre deux réseaux séparés. La méthode d'identification des harmoniques des tensions PQ est utilisée pour l'extraction des harmoniques des tensions dans les deux réseaux, A la fin de cette partie une série de simulations a été réalisée. Les résultats obtenus montrent que la méthode de commande par logique floue améliore remarquablement le fonctionnement du FASI ainsi que celui FASHI tant au niveau performances qu'en THD, par rapport à l'application de la commande linéaire présentée dans le deuxième chapitre.

En conclusion, le réglage flou est bien adapté au FASHI du fait que les régulateurs classiques utilisés auparavant ne sont pas dimensionnés à base du modèle du système. Dans cette situation, où le modèle est difficile à établir, la régulation par logique floue est la meilleure solution.

Toutefois, les gains de normalisation et de dénormalisation jouent un rôle très important car ils fixent les performances dynamiques de la commande floue.

Conclusion générale

Ce mémoire a été consacré à la modélisation et la commande du filtre actif série hybride interligne placé dans deux lignes séparées.

Le premier chapitre a mis-en évidence la modélisation du filtre actif série ainsi que la problématique des perturbations harmoniques. En revanche, les origines et les effets néfastes de ces perturbations ont été abordés et les normes en vigueur ont été présentées. Ces normes, notamment imposées aux distributeurs d'énergie, autorisent cependant la génération d'harmoniques dans certaines limites. En plus, le respect de ces normes motive l'étude et le développement de méthodes efficaces pour dépolluer les réseaux électriques. Nous avons alors présenté de manière générale, les solutions traditionnelles et modernes.

En noter les performances du filtre actif série dépendent non seulement du dimensionnement de son circuit de puissance, mais aussi du type de commande utilisée pour le contrôle de ses tensions. Dans notre cas, l'extraction des tensions harmoniques a été principalement basée sur la méthode des puissances active et réactive instantanées.

Dans la première partie du second chapitre nous avons présenté les différentes étapes de modélisation du filtre passif ainsi que ses avantages et ses inconvénients. D'après les résultats obtenus nous constatons que les filtres passifs diminuent les harmoniques de courant imposés par la charge non linéaire sur le réseau. Par conséquent, une diminution de puissance réactive et une augmentation du facteur de puissance. Dans la deuxième partie de ce chapitre nous avons combiné le filtre passif avec le filtre actif série pour compenser les perturbations totales au niveau du réseau. La troisième partie du second chapitre a été consacré au filtre actif série hybride interligne FASHI. Nous constatons que ce filtre peut compenser les harmoniques des tensions et des courants dans deux réseaux séparés. Le FASHI a prouvé son efficacité en offrant de bons résultats du THD de courants côtés sources et des tensions côtés charges.

La stratégie de commande utilisant les régulateurs classiques donne des résultats satisfaisants, mais qui sont de plus en plus mises en échec par le manque, de la robustesse due non seulement à une modélisation peu précise mais aussi à des conditions de fonctionnement, tel que l'effet de variation de charge ou des paramètres du FASHI.

Le troisième chapitre a été réservé à l'application de la commande par logique du filtre actif série hybride interligne. Les résultats de simulation ont montrés l'efficacité de cette méthode. En outre, l'avantage le plus important de la technique de commande par logique floue par rapport au régulateur classique est qu'on peut synthétiser le régulateur sans faire appel au modèle du système.

D'un autre côté, le choix des gains de régulateurs PID et les gains d'entrée et de sortie du contrôleur à logique floue a été subjectif et difficile à optimiser.

Enfin, pour la poursuite de ce travail, les thématiques suivantes nous semblent les plus prometteuses:

- L'utilisation des filtres passifs amortis avec les filtres passifs résonnants,
- L'utilisation d'autres méthodes pour l'extraction des harmoniques de tension,
- Commande non linéaire du FASHI,
- Étude du FASHI à base d'onduleurs multiniveaux.

Annexe

La méthode de calcul des paramètres des filtres passifs :

- D'après les résultats de simulation on a:

$$Q1=4\text{kVAR}, Q2=1.5\text{ kVAR}, \omega_1 = \omega_2 = 314\text{ rad/s}$$

- D'après (II.4) et (II.5) on a calculé les paramètres des filtres et leurs valeurs seront regroupées dans le tableau suivant:

Valeur efficace et la fréquence de la tension du premier réseau ($v_{sabc1}; f_1$) Valeur efficace et la fréquence de la tension du deuxième réseau ($v_{sabc2}; f_2$)	220 V ; 50 Hz, 127 V ; 50 Hz
Impédance du premier réseau ($R_{sabc1}; L_{sabc1}$) Impédance du premier réseau ($R_{sabc2}; L_{sabc2}$)	3 mΩ, 2.6 μH 3 mΩ, 2.6 μH
Impédance à l'entrée de la première charge polluante ($R_{labc2}; L_{labc2}$) Impédance à l'entrée de la deuxième charge polluante ($R_{labc2}; L_{labc2}$)	10 mΩ, 1 mH 10 mΩ, 1 mH
Charge continu du premier pont diode (R_{d1}, L_{d1}) Charge continu du deuxième pont diode (R_{d2}, L_{d2})	15 Ω, 2 mH 15 Ω, 2 mH
Impédance du premier FAS (R_{f1}, L_{f1}, C_{f1}) Impédance du deuxième FAS (R_{f2}, L_{f2}, C_{f2})	1.5 Ω, 3 mH, 0.1 mF 1.5 Ω, 3 mH, 0.1 mF
Impédance du premier transformateur d'injection (R_1, L_1, m) Impédance du deuxième transformateur d'injection (R_2, L_2, m)	0.1 mΩ, 1.1 μH, 1 0.1 mΩ, 1.1 μH, 1
Impédance du filtre passif résonant d'harmonique cinq 5 du premier réseau ($R_{f51}, L_{f51}, C_{f51}$) Impédance du filtre passif résonant d'harmonique cinq 7 du premier réseau ($R_{f71}, L_{f71}, C_{f71}$)	1mΩ ; 3.4 mH, 119.7 μF 1 mΩ ; 2.2 mH ; 95.7 μF
Impédance du filtre passif résonant d'harmonique cinq 5 du deuxième réseau ($R_{f52}, L_{f52}, C_{f52}$) Impédance du filtre passif résonant d'harmonique cinq 7 du deuxième réseau ($R_{f72}, L_{f72}, C_{f72}$)	1mΩ ; 6.2 mH ; 65μF 1mΩ;3.17 mH ; 65μF

Bibliographie

- [1] E. G. Shahraki, “Apport de l’UPFC à l’amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques”, Thèse de Doctorat, Université de Henri Poincaré, France, 2003.
- [2] D. O. Abdeslam, “Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques: application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension”, Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, France, 2008.
- [3] M. Dahdouh Adel, “Commande non linéaire de l’UPQC”, Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf, M’sila, Algérie, 2015.
- [4] Lucian Mandach, Ioana Gabriela sirbu, et Mircea Emilian ardeleanu “Conception optimale de filtres passifs destinés à améliorer la qualité de l’énergie requise par un réseau de traction urbaine” Annals of the University of Craiova, Electrical Engineering series, no. 32, pp. 333-336, 2008.
- [5] T Narasa Reddy and M V Subramanyam, “Fuzzy logic controlled shunt active power filter for mitigation of harmonics with different membership functions,” International Conference on Advances in Computing, Control, and Telecommunication Technologies, Trivandrum, Kerala, pp. 616 – 620, 28-29 Dec. 2009.
- [6] A. Chaoui, “Filtrage actif triphasé pour charges non linéaires,” Thèse de Doctorat, Université de Potitiers, France, 2010.
- [7] A. Saibi, “Commande par régulateurs IP et par mode de glissement d’une machine synchrone à double étoile,” Thèse de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2010.
- [8] K. Mohammed, “Commandes non linéaires d’un filtre actif parallèle”, Mémoire d’Ingénieur d’état, Université de Mohamed Boudiaf, M’sila, Algérie, 2010.
- [9] G. Ismail “Commande d’un filtre actif triphasé parallèle par différents régulateurs”, Mémoire de Magister, Université Mohamed Kheider, Biskra, Algérie, 2011.
- [10] M. A. E. Alali, “Contribution à l’étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension”, Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur Strasbourg I, France, 2002.
- [11] S. Chennai, “Etude, modélisation & commande des filtres actifs : Apport des techniques de l’intelligence artificielle“, Thèse de Doctorat, Université de Mohamed Khider, Biskra, Algérie, 2013.
- [12] M. M. Abdusalam, “Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales”, Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, France, 2008.

- [13] Hind Djeghloud, “Filtrage actif de puissance,” Thèse de Doctorat, Université Mentouri, Constantine, Algérie, 2007.
- [14] Senae Rechka, “Etude de méthodes de filtrage des harmoniques dans les réseaux électriques de distribution,” Mémoire de Maitres es Sciences Appliquées en Génie Electrique, Université de Québec à Trois-Rivières, Canada, 2002.
- [15] K. Aliouane, “Contribution à l’étude du filtrage d’harmoniques des réseaux de distribution à l’aide de l’association de filtres actif et passif parallèle,” Thèse de Doctorat, Institut Nationale Polytechnique de Lille, France, 1995.
- [16] Manjulata Badi, “Power quality important using passive shunt filter, TCR, and combination,” Master Thesis, National Institute of Technology, Rourkela, India, 2012.
- [17] F. DERNONCOURT, “Introduction à la logique floue,” Paris, Avril 2011.
- [18] Juan Dixon and Jose Contardo, “DC-link fuzzy control for an active power filter, sensing the line current only” 28th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC '97), St. Louis, MO, vol. 2, pp. 1109-1114 22-27, Jun. 1997.

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

SPECIALITE : COMMANDE DES SYSTEMES ELECTRIQUES

Proposé et dirigé par : **Dr. Said BARKAT**

Présenté par : **M. OULD ALY Sidi Mohamed**

Thème :

Commande floue d'un filtre actif série hybride interligne

Résumé :

Récemment, le problème de la pollution harmonique dans les réseaux électriques de distribution devient de plus en plus préoccupant avec l'accroissement de l'usage des charges non-linéaires. C'est dans ce contexte que dans ce mémoire, un système de filtrage actif série hybride interligne a été proposé. L'objectif étant de compenser à la fois les harmoniques de tension et de courant ainsi que les creux de tension présents dans deux réseaux séparés.

En outre, dans le but d'améliorer davantage la qualité d'énergie électrique, en la rendant conforme aux normes internationales, nous avons opté pour le réglage à base de la logique floue qui semble une solution prometteuse pour ce genre de situation.

Mots clés :

Filtre actif série, Filtre passif, Filtre actif série hybride, Filtre actif série hybride interligne
Méthode PQ d'identification des harmoniques de tension, Logique floue.