

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITÉ IBN KHALDOUN DE TIARET

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES

DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE



THÈSE

Présentée par :

Mr. KOUADRIA Mohamed Abdeldjabbar

En vue de l'obtention du diplôme de :

DOCTORAT (L.M.D)

Spécialité : Énergies Renouvelables

THÈME

Techniques de commande avancées d'un filtre actif parallèle pour améliorer la qualité d'énergie fournie au réseau autonome hybride.

Soutenu le 29/06/2017 devant le Jury composé de :

Président	Mr : SMAILI Atallah	Pr Université Ibn Khaldoun TIARET
Examineur	Mr : BELFEDAL Cheikh	Pr Université Ibn Khaldoun TIARET
Examineur	Mr : DAAOU Bachir	MCA Université USTO ORAN
Directeur de Thèse	Mr : ALLAOUI Tayeb	Pr Université Ibn Khaldoun TIARET
Co- Directeur de Thèse	Mr : DENAI Mouloud	Pr Université Hertfordshire, Hatfield UK

2017

Remerciements

Je remercie ALLAH le Tout-puissant de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience afin de mener à terme le présent travail.

Je souhaiterais tout d'abord remercier et exprimer toute ma gratitude à mon directeur de thèse Monsieur **ALLAOUI Tayeb** Professeur et Directeur du Laboratoire de génie énergétique et génie informatique au niveau de la faculté des sciences appliquées de l'université Ibn Khaldoun Tiaret. Je tiens à lui témoigner toute ma reconnaissance pour sa disponibilité, ses conseils toujours avisés, sa haute compétence, son savoir faire, son expérience certaine, lesquels m'ont été d'un apport précieux.

J'exprime ma profonde gratitude à Monsieur **DENAI Mouloud** Professeur au sein de l'université Hertfordshire Hatfield l'Angleterre, co-directeur de ces travaux, de m'avoir accueillie au niveau du laboratoire « Electric power system », ainsi que pour ses précieux conseils, ses encouragements, son dynamisme, ses orientations et surtout pour sa patience et sa compétence scientifique, ce qui ma aidé à mener à bien cette étude.

Je présente mes sincères remerciements à Monsieur **BELFEDHAL Cheikh**, Professeur, Doyen au sein de la faculté des sciences appliquées de l'université Ibn Khaldoun-Tiaret et responsable de la spécialité « Energies Renouvelables » d'accepter d'examiner ce travail.

Je voudrais aussi remercier Monsieur **SMAILI Atallah** Professeur au niveau de la faculté des sciences appliquées de l'université Ibn Khaldoun-Tiaret de m'honorer cette thèse par la présidence du jury.

Je suis très reconnaissant à Monsieur **DAAOU Bachir** Maitre de conférences classe A à l'université des sciences et technologie d'Oran (USTO) pour l'intérêt qu'il a bien voulu donner à ce travail en acceptant de participer à ce jury.

Enfin, je ne pourrais terminer ces gratifications sans présenter mes sincères remerciements à toute l'équipe de génie électrique ainsi qu'à toutes les personnes, qui ont contribué de près ou de loin, directement ou indirectement à l'aboutissement de ce travail. Je les remercie tous et

plus particulièrement ma famille pour son soutien sans faille durant tout ce long parcours, ainsi qu'à tous mes amis membres du laboratoire L2GEGI pour leur contribution à la création d'une ambiance de travail agréable.

.

Dédicace

Je dédie ce travail :

À ma chère mère.

À mon père.

À mes frères et sœurs.

À tous mes amis et ceux que j'aime....

Kouadria

Mohamed Abdeldjabbar

Table des matières

Liste des figures.....	v
Liste des Tableaux.....	viii
Introduction Générale.....	1

CHAPITRE I

Perturbations des réseaux électriques et principe de compensation

I.1 Introduction	5
I.2 Qualité de l'énergie	5
I.3 Perturbations des réseaux électriques	6
I.3.1 Creux et coupures de tension.....	6
I.3.2 Fluctuations de tension	6
I.3.3 Déséquilibre du système triphasé de tension.....	7
I.3.4 Variation de fréquence.....	7
I.4 Généralités sur les harmoniques	8
I.4.1 Types des harmoniques.....	9
I.4.2 Harmoniques de courant et de tension.....	9
I.4.2.1 Courants harmoniques	9
I.4.2.2 Tension harmonique	10
I.5 Généralités sur l'analyse harmonique.....	11
I.6 Effets des harmoniques.....	11
I.7 Caractéristiques des perturbations harmoniques.....	12
I.8 Normes et Réglementation	13
I.9 Solutions de dépollution du réseau électrique	14
I.9.1 Solutions traditionnelles de la dépollution.....	15
I.9.1.1 Agir sur la structure de l'installation.....	15
I.9.1.2 Compensation	15
I.9.1.3 Augmentation de la puissance de court-circuit.....	15
I.9.1.4 Surdimensionnement ou déclassement de l'installation électrique	15
I.9.1.5 Rééquilibrage des courants du réseau électrique	16
I.9.1.6 Filtrage passif	16
I.9.2 Solutions modernes de la dépollution.....	16
I.9.2.1 Pont dodécaphasé.....	17
I.9.2.2 Les redresseurs à MLI	17
I.9.2.3 Filtres actifs	18
a) Le filtre actif parallèle (FAP) :	18
b) Le filtre actif série (FAS) :.....	19
c) La combinaison parallèle-série actifs (UPQC) :.....	19
d) Combinaison hybride active et passive :.....	20

I.10 Conclusion	21
I.1 Bibliographie	22

CHAPITRE II

Filtre actif parallèle : structure et stratégies d'identifications des harmoniques

II.1 Introduction	24
II.2 Principe du filtre actif parallèle	24
II.3 Structure d'un filtre actif parallèle	25
II.3.1 Étude de la partie de la puissance	26
II.3.1.1 Modélisation de l'onduleur de tension à deux niveaux	26
II.3.1.2 Système de stockage de l'énergie	28
II.3.1.3 Filtre de sortie	29
II.3.2 Etude de la partie commande.....	30
II.3.2.1 Identification des courants de référence	30
a) Identification dans le domaine fréquentiel.....	30
b) Identification dans le domaine temporel.....	30
II.3.2.2 Généralités sur les méthodes d'identification	31
II.3.2.2.1 Méthode des puissances active et réactive.....	31
II.3.2.2.2 Nouvelle approche pour l'identification basée sur un filtre multi-variable	33
II.3.2.2.3 Méthode de détection synchrone des courants de référence	35
II.3.2.2.4 Commande indirecte du courant du filtre actif shunt.....	35
II.3.2.3 Stratégie de commande de l'onduleur du filtre active	36
II.3.2.3.1 Contrôle par MLI.....	36
II.3.2.3.2 Contrôle par hystérésis.....	37
II.4 Conclusion	39
II.5 Bibliographie	40

CHAPITRE III

Commande du filtre actif parallèle

III.1 Introduction	42
III.2 Régulation de la tension continue	42
III.3 Commande classique PI.....	43
III.4 Commande basée sur la logique floue	44
III.4.1 Logique floue Type 1.....	45
III.4.1.1 Concepts fondamentaux de la logique floue.....	45
a) Ensembles flous type-1 et fonctions d'appartenance :	45
b) Variables et règles linguistiques :	47
c) Structure d'un contrôleur flou type-1 (CF type-1) :	48
III.4.2 Application de la logique floue type-1	49

III.4.3	Logique floue Type 2.....	52
III.4.3.1	Concepts fondamentaux de la logique floue.....	52
III.4.3.1.1	Représentation d'un ensemble flou type-2	52
III.4.3.1.2	Types d'ensemble flous type-2	53
III.4.3.3	Structure d'un contrôleur flou type-2.....	54
III.4.3.3.1	Fuzzification	54
III.4.3.3.2	Base de règles	55
III.4.3.3.3	Mécanisme d'inférence.....	55
III.4.3.3.5	Réduction de type	56
III.4.3.3.5	Défuzzification	57
III.4.4	Applications de la logique floue type-2.....	57
III.5	Commande hybride floue mode de glissement.....	58
III.6	Application de la commande hybride logique floue mode glissement	60
III.7	Application de la commande hybride PI logique floue type 2.....	63
III.8	Résultats de simulation.....	63
III.8.1	Résultats de Simulation sans filtrage.....	64
III.8.2	Résultat de simulation avec le filtrage.....	65
III.8.2.1	La Commande Classique	65
III.8.2.1.1	Commande par méthode SDM	65
III.8.2.1.2	Commande par méthode pq.....	67
III.8.2.1.3	Commande par méthode FMV	68
III.8.2.1.4	Commande par la méthode du courant indirect.....	70
III.8.2.2	Application des techniques intelligentes à la commande du FAP	72
III.8.2.2.1	La Commande Flou type-1	72
III.8.2.2.2	La Commande Flou type-2.....	73
III.8.2.2.3	La Commande hybride logique floue mode glissement.	75
III.8.2.2.4	La Commande hybride PI FLC type-2	76
III.9	Conclusion.....	78
III.10	Bibliographie	79

CHAPITRE IV

Application du filtre actif à l'amélioration de la qualité d'énergie fournie au réseau autonome hybride éolien-diesel

IV.1	Introduction	81
IV.2	Les systèmes hybrides	81
IV.3	Principaux composants d'un système hybride éolien-diesel	82
IV.3.1	Éoliennes	82
IV.3.2	Générateur Diesel	84

IV.4	Problèmes rencontrés dans le fonctionnement dans un réseau autonome	85
IV.5	Qualité de l'énergie électrique dans les réseaux autonomes	86
IV.6	Principe de fonctionnement d'un système hybride éolien-diesel	86
IV.7	Modélisation des composants du système hybride	87
IV.7.1	Modélisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil.....	87
IV.7.2	Modélisation de la machine synchrone.....	93
IV.7.3	Générateur diesel	93
IV.7.4	Moteur diesel et régulateur de vitesse.....	94
IV.7.5	Modèle simplifié de la machine synchrone	95
IV.8	Modèle de la charge.....	96
IV.9	Application de filtrage actif parallèle au système hybride éolien diesel	96
IV.10	Résultats de simulation	97
IV.10.1	Validation du système éolien diesel	97
IV.10.2.1	Validation du système éolien diesel avec filtrage.....	98
IV.10.2.1	Filtre actif avec la Commande Classique pi avec la commande SDM	99
IV.10.2.2	Filtre actif avec la commande floue type-1	100
IV.10.2.3	Filtre actif avec la commande floue type-2	101
IV.11	Conclusion.....	103
IV.12	Bibliographie	104
	Conclusion Générale	106
	Liste des publications	108
	Annexes	108
	Nomenclature	116

Liste des figures

Liste des figures

CHAPITRE I

Perturbations des réseaux électriques et principe de compensation

Figure I 1: Creux et coupures de tension.....	6
Figure I 2: Fluctuations de tension.....	7
Figure I 3: Déséquilibre du système triphasé de tension.....	7
Figure I 4: Variation de fréquence.....	8
Figure I 5: Représentation d'inters-harmoniques et d'infra-harmoniques.....	9
Figure I 6: La représentation de la forme de l'onde d'un courant déformé avec les différents courants harmoniques le constituant.....	10
Figure I 7: Représentation spectrale des harmoniques.....	10
Figure I 8: Pont dodécaphasé.....	17
Figure I 9: Filtre actif parallèle.....	18
Figure I 10 : Filtre actif série.....	19
Figure I 11 : Combinaison parallèle-série de filtres actifs.....	19
Figure I 12 : Combinaison hybride active et passive.....	20

CHAPITRE II

Filtre actif parallèle : structure et stratégies d'identifications des harmoniques

Figure II 1: Principe du filtrage actif parallèle.....	24
Figure II 2: Structure générale du filtre actif parallèle.....	26
Figure II 3: Onduleur de tension deux niveaux.....	27
Figure II 4: Génération des courants de référence par la méthode des puissances instantanées.....	33
Figure II 5: Identification par la méthode des puissances instantanées avec FMVs.....	33
Figure II 6 : Schéma bloc du FMV.....	34
Figure II 7: Commande indirecte du filtre active shunt.....	36
Figure II 8: Principe de la commande par MLI.....	37
Figure II 9: Commande conventionnelle par hystérésis.....	38

CHAPITRE III

Commande du filtre actif parallèle

Figure III 1: Boucle de régulation de la tension continue.....	43
Figure III 2 : Structure de base d'un contrôleur flou type-1.....	48
Figure III 3: Commande floue type-1 du FAP.....	50
Figure III 4: Diagramme synoptique du contrôleur Flou.....	50
Figure III 5: Fonction d'appartenance des variables d'entrées et de sortie.....	51
Figure III 6: Représentation tridimensionnelle d'un ensemble flou type-2 gaussien.....	53
Figure III 7: Fonction d'appartenance d'un ensemble flou type-2.....	54
Figure III 8: Structure d'un contrôleur flou type-2.....	54
Figure III 9: Fonctions d'appartenances pour la logique floue type-2.....	58
Figure III 10: Représentation de la commande douce à un seul seuil «sat».....	60
Figure III 11: Diagramme en bloc d'isolation d'harmoniques.....	62
Figure III 12: Fonction d'appartenance des variables d'entrées et de sortie.....	62
Figure III 13: structure d'un contrôleur hybride PI FLC type-2 pour la tension V_{dc}	63
Figure III 14: Tension de charge de la phase a (V_a).....	64

Figure III 15: Courant de source de la phase a (Isa).....	64
Figure III 16: Spectre de courant de source.....	65
Figure III 17: Courant de source Isa après filtrage.....	66
Figure III 18: Courant injecté par le filtre Ifa.....	66
Figure III 19: La tension V_{dc} du condensateur.....	66
Figure III 20: Spectre de courant de la source.....	66
Figure III 21: Courant de source Isa après filtrage.....	67
Figure III 22: Courant injecté par le filtre Ifa.....	67
Figure III 23: La tension V_{dc} du condensateur.....	68
Figure III 24: Spectre de courant de la source.....	68
Figure III 25: Courant de source Isa après filtrage.....	68
Figure III 26: Courant injecté par le filtre Ifa.....	69
Figure III 27: La tension V_{dc} du condensateur.....	69
Figure III 28: Spectre de courant de la source.....	69
Figure III 29: Courant de source Isa après filtrage.....	70
Figure III 30: Courant injecté par le filtre Ifa.....	70
Figure III 31: La tension V_{dc} du condensateur.....	71
Figure III 32: Spectre de courant de la source.....	71
Figure III 33: Courant de source Isa après filtrage.....	72
Figure III 34: Courant injecté par le filtre Ifa.....	72
Figure III 35: Spectre de courant de la source.....	73
Figure III 36: La tension V_{dc} du condensateur.....	73
Figure III 37: Courant de source Isa après filtrage.....	74
Figure III 38: Courant injecté par le filtre Ifa.....	74
Figure III 39: Spectre de courant de la source.....	74
Figure III 40: La tension V_{dc} du condensateur.....	75
Figure III 41: Courant de source Isa après filtrage.....	75
Figure III 42: Courant injecté par le filtre Ifa.....	76
Figure III 43: Spectre de courant de la source.....	76
Figure III 44: La tension V_{dc} du condensateur.....	76
Figure III 45: Courant de source Isa après filtrage.....	77
Figure III 46: Spectre de courant de la source.....	77
Figure III 47: La tension V_{dc} du condensateur.....	77

CHAPITRE IV

Application du filtre actif à l'amélioration de la qualité d'énergie fournie au réseau autonome hybride éolien-diesel

Figure IV 1: Classification des systèmes hybrides.....	82
Figure IV 2: Chaîne de conversion éolienne à générateur asynchrone à cage fonctionnant à vitesse constante.....	83
Figure IV 3: Le groupe diesel.....	84
Figure IV 4 : Système hybride éolien diesel.....	85
Figure IV 5: Schéma de système global.....	87
Figure IV 6 : Les différents systèmes d'axes utilisés.....	91
Figure IV 7 : Système de commande de rétroaction de vitesse du moteur Diesel.....	94
Figure IV 8 : Schéma de système global avec filtrage actif.....	96
Figure IV 9: Vitesse du vent, tensions de source, courant de source, courant de charge secondaire courant de charge principale et la fréquence du réseau du système hybride éolien-diesel.....	98
Figure IV 10: Tension de source, courant de source, courant de la charge non linéaire, courant du filtre et la tension du bus dc.....	99
Figure IV 11: Spectres harmoniques des courants, (a) de la charge non linéaire (b) de la source.....	100
Figure IV 12: Tension de source, courant de source, courant de la charge non linéaire, courant du filtre et la tension du bus dc.....	101

Figure IV 13: Spectres harmoniques des courants, (a) de la charge non linéaire (b) de la source.101
Figure IV 14: Tension de source, courant de source, courant de la charge non linéaire, courant du filtre et la tension du bus dc.102
Figure IV 15: Spectres harmoniques des courants, (a) de la charge non linéaire (b) de la source.102

Liste des Tableaux

Liste des Tableaux

CHAPITRE II

Filtre actif parallèle : structure et stratégies d'identifications des harmoniques

Tableau II 1: Tensions générées par l'onduleur de tension deux niveaux.28

CHAPITRE III

Commande du filtre actif parallèle

Tableau III 1: Quelques fonctions d'appartenance usuelles46
 Tableau III 2: Règles floues.....51
 Tableau III 3: Paramètre de système étudié.....64
 Tableau III 4: Récapitulatif des résultats71

CHAPITRE IV

Application du filtre actif à l'amélioration de la qualité d'énergie fournie au réseau autonome hybride éolien-diesel

Tableau IV 1: paramètre de systèmes98

Introduction Générale

Introduction Générale

Actuellement, la production de l'énergie est basée en grande partie sur des ressources fossiles limitées, le pétrole, le gaz et le charbon. Ces sources deviennent de plus en plus rares pendant que les demandes énergétiques du monde s'élèvent continuellement.

De nos jours, les énergies renouvelables représentent une solution alternative en remplacement des énergies fossiles, soit de manière partielle (systèmes à énergies renouvelables reliés aux réseaux électriques classiques), soit de manière totale (systèmes à énergies renouvelables pour les sites isolés).

Le terme « Système d'Énergie Hybride » fait allusion aux systèmes de génération d'énergie électrique utilisant plusieurs types de sources. Dans cette notion, on exclut les grands réseaux interconnectés dans lesquels les sources peuvent aussi être de plusieurs types. La combinaison des sources d'énergie renouvelable comme l'éolienne, le photovoltaïque ou les petites centrales hydroélectriques peut constituer un complément ou une alternative aux groupes électrogènes diesels utilisés généralement pour la génération d'électricité dans les régions isolées [1,2].

Afin d'assurer une efficacité énergétique, les électriciens utilisent des dispositifs statiques de conversion d'énergie appelés : convertisseurs statiques. Ces convertisseurs sont composés de semi-conducteurs de puissance, qui sont considérés comme des charges non linéaires pour le réseau électrique et absorbent un courant dont la forme est non sinusoïdale.

L'utilisation de plus en plus fréquente de charges non linéaire contribue à la détérioration de la qualité de l'énergie dans le réseau électrique. Ces charges non linéaires absorbent des courants non sinusoïdaux, même si elles sont alimentées par une tension sinusoïdale. Elles se comportent par conséquent comme des générateurs d'harmoniques et échangent en plus de l'énergie réactive. Les principales sources à l'origine de la pollution harmonique du réseau sont les arcs électriques, les convertisseurs statiques, les appareillages informatiques, les appareils d'éclairage fluorescent, les téléviseurs, les appareils électroménagers... etc.

Ces dernières années, la qualité du courant électrique devient une préoccupation importante pour les distributeurs d'énergie ainsi que pour leurs clients. Plusieurs recherches ont été menées pour réduire les effets néfastes liés aux pollutions harmoniques. Notre projet d'étude rentre dans ce cadre.

Il existe plusieurs solutions de réduction d'harmoniques, parmi celles retenues, le filtrage actif. Le principe du compensateur actif d'harmoniques est d'utiliser l'électronique de puissance pour produire des composantes harmoniques qui annulent les composantes harmoniques des charges non linéaires. Il est proposé un certain nombre de topologies différentes, qui sont liées à la nature des composants et aux méthodes d'identifications des harmoniques [3,4].

L'utilisation des filtres actifs devient de plus en plus populaire à cause de la pollution croissante des réseaux électriques. Un filtre actif sert principalement à dépolluer le réseau et garder le THD selon la norme IEEE 519-1992 [5,6]. Une des tâches la plus importante des filtres actifs est d'éliminer les harmoniques. En effet, les charges non linéaires produisent des harmoniques et polluent les réseaux électriques.

Dans ce contexte, le travail de recherche présenté au sein de cette thèse, c'est l'application des techniques de commandes avancées d'un filtre actif parallèle pour améliorer la qualité d'énergie fourni par un réseau électrique hybride (éolien diesel), dont :

La première partie de ce travail est relative au problème de la qualité de l'énergie électrique qui constitue actuellement l'une des préoccupations majeures des fournisseurs de l'énergie ainsi que des organismes spécialisés en qualité d'énergie.

La deuxième partie est consacrée à la modélisation du système hybride qui est constitué d'une éolienne, d'un générateur diesel et de charges linéaires et non linéaires. Afin de compenser les harmoniques de courant générés par une charge non linéaire type source de courant connectée au réseau et, de compenser l'énergie réactive consommée par cette charge, un filtre actif est connecté en parallèle avec cette charge. Le modèle du système hybride est implanté dans l'environnement MATLAB/Simulink pour des fins de simulation.

A cet effet le travail présenté est structuré en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous présentons au préalable la problématique des harmoniques, leur origine, leur caractérisation et leurs conséquences néfastes sur le réseau de distribution. Nous rappelons aussi, les solutions de dépollution existantes, tant traditionnelles que modernes.

Dans le deuxième chapitre, nous développons une étude théorique détaillée à propos de la structure du FAP (Filtre Actif Parallèle) triphasé et de son principe de fonctionnement et les méthodes d'identifications et structures de commandes

Le troisième chapitre est consacré à l'application des commandes avancées au filtre actif shunt, où nous abordons dans un premier stade, le principe de réglage de la tension du bus continu V_{dc} du FAP triphasé par de régulateur classique PI ensuite la commande par la logique floue type 1 et 2. Cette stratégie de commande robuste a permis d'obtenir d'excellents résultats de simulation en dépit de perturbations sévères introduites dans certains essais.

Deux nouvelles stratégies de commande hybride «logique floue et le mode de glissement » et « logique floue type 2 et PI classique » sont élaborées sur le modèle du filtre.

Le dernier chapitre, présente une amélioration de la qualité d'énergie de système hybride éolien diesel par le filtrage actif avec le développement de la modélisation de la partie mécanique des deux sources d'énergie de notre système hybride.

Les principaux résultats obtenus dans le cadre de ce travail de recherche ainsi que les perspectives qui en résultent sont donnés au sein de la conclusion générale.

Bibliographie

- [1] I. Vechiu, «Modélisation et Analyse de l'Intégration de des Energies Renouvelables Dans un Réseau Autonome», Thèse de Doctorat, Université de Havre, Année 2005.
- [2] M. Lopez, «Contribution à l'Optimisation d'un Système de Conversion Eolien Pour une Unité de Production Isolée », Thèse de Doctorat, Université de Paris-Sud, 2008.
- [3] B. Singh, K. Al-Haddad, A. Chandra, «A review of active filters for power quality improvment», IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 46, no. 5, pp. 960-971, October 1999.
- [4] H. Akagi ,«Active harmonic filters»,Proceeding of IEEE, vol. 93, no. 12, pp. 2128-2141, Dec. 2005.
- [5] IEEE STD 519-1992, «IEEE Recommended Practices and Requirements for HarmonicControl in Electrical Power Systems», IEEE 519 working Group., 1992
- [6] IEEE Std 1531. 2003, «IEEE Guide for application and specification of harmonic filters».

CHAPITRE I

***Perturbations des réseaux électriques et principe
de compensation***

I.1 Introduction

L'énergie électrique, principalement produite et distribuée sous forme de tensions triphasées sinusoïdales, permet de fournir la puissance électrique nécessaire aux différentes charges sur le réseau électrique. Lorsque la forme d'onde de la tension n'est plus sinusoïdale, on rencontre des perturbations qui peuvent affecter le bon fonctionnement de nombreux équipements et de charges raccordés sur le réseau. Dans ces conditions, des problèmes de compatibilité électromagnétique peuvent survenir entre ces éléments connectés au réseau.

L'utilisation croissante des équipements de l'électronique de puissance sur les réseaux électriques contribue à la détérioration de la tension d'alimentation. En effet, ces charges dites déformantes sont non linéaires et appellent du réseau électrique un courant non sinusoïdal possédant un contenu harmonique. Ces courants harmoniques circulant à travers les impédances du réseau peuvent, lorsqu'ils sont importants en amplitude, créer des tensions harmoniques et ainsi perturber le fonctionnement des autres équipements branchés au point commun de raccordement [1,2].

L'objet de ce premier chapitre est d'analyser, l'influence des perturbations et des courants harmoniques au réseau électrique. Nous présentons également dans cette partie les normes et les réglementations adoptées dans ce domaine et nous étudierons les différentes solutions traditionnelles et avancées permettant l'atténuation des effets les plus néfastes.

I.2 Qualité de l'énergie

La qualité de l'énergie est une notion assez large qui recouvre à la fois la qualité de la fourniture électrique, la qualité de l'onde de tension et la qualité des courants. Lorsque la tension est présentée, les principaux phénomènes pouvant l'affecter sont d'une part les variations lentes : creux de tension, surtensions, coupures, déséquilibres et d'autre part des variations rapides : surtensions transitoires, flicker.

Ainsi que les harmoniques, la qualité des courants reflète par contre la possibilité des charges à fonctionner sans perturber ni réduire l'efficacité du système de puissance. C'est pourquoi certains considèrent que la qualité de l'électricité se réduit à la qualité de la tension [3].

L'énergie électrique est fournie sous forme de tension constituant un système sinusoïdal triphasé dont les paramètres caractéristiques sont les suivants :

1. La fréquence,

2. L'amplitude des trois tensions,
3. La forme d'onde,
4. Le déséquilibre.

I.3 Perturbations des réseaux électriques

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

I.3.1 Creux et coupures de tension

Un creux de tension est défini comme une baisse soudaine de 10% à 90% de la tension nominale pour une durée de 10ms jusqu'à 1min [IEEE Std. 1159]. Généralement, les creux de tension sont des perturbations (et non des pannes ou des interruptions) de moins d'une seconde présentant une baisse de tension de 60 % ou moins.

Une coupure brève représente une chute de tension supérieure à 90% de la valeur nominale et d'une durée de 10ms à 1min.

Les creux de tension et les coupures brèves sont causés par des phénomènes aléatoires. Ces phénomènes concernent soit le réseau du distributeur, soit le réseau de l'utilisateur.

La figure 1.1 montre un exemple de creux et de coupure de tension.

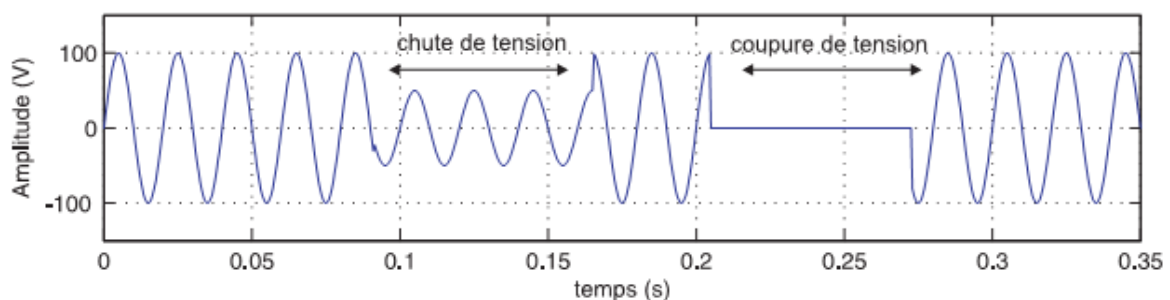


Figure I 1: Creux et coupures de tension

I.3.2 Fluctuations de tension

Les fluctuations de tension sont des variations rapides de tension, répétitives ou aléatoires (figure 1.2), elles sont provoquées par des variations rapides de puissance absorbée ou produite par des installations telles que les soudeuses, fours à arc, éoliennes...etc.

L'origine principale de ces courants est le fonctionnement d'appareil dont la puissance absorbée varie de manière rapide. Ces fluctuations se traduisent par des variations d'intensité, visible au niveau de l'éclairage causant une glène visuelle perceptible pour une variation de 1% de la tension [4].

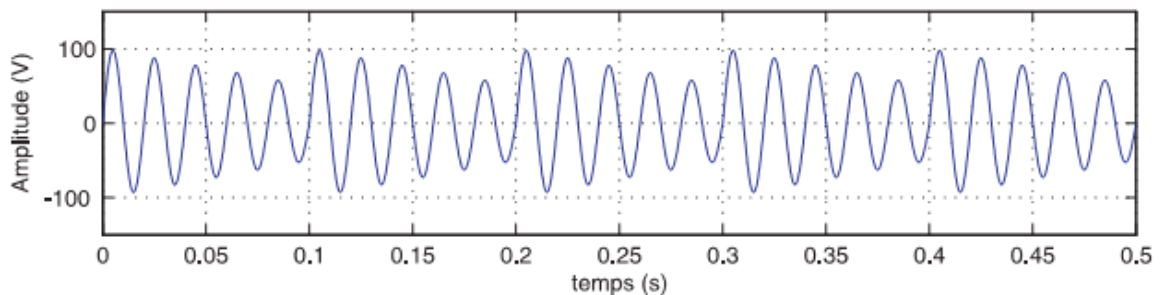


Figure I 2: Fluctuations de tension.

I.3.3 Déséquilibre du système triphasé de tension

Lorsque les trois tensions qui composent le réseau triphasé ne sont pas identiques (amplitude différente, fréquence différente ou déphasage différent de 120 degrés), ou lorsque les trois éléments qui composent le récepteur triphasé ne sont pas identiques (impédance différente, résistance différente ou réactance différente/ou nature différente) ; Alors les trois courants qui alimentent le récepteur triphasé ne sont pas identiques : amplitude différente, fréquence différente, ou déphasage différent de 120 degrés ; On dit alors que le système triphasé est déséquilibré.

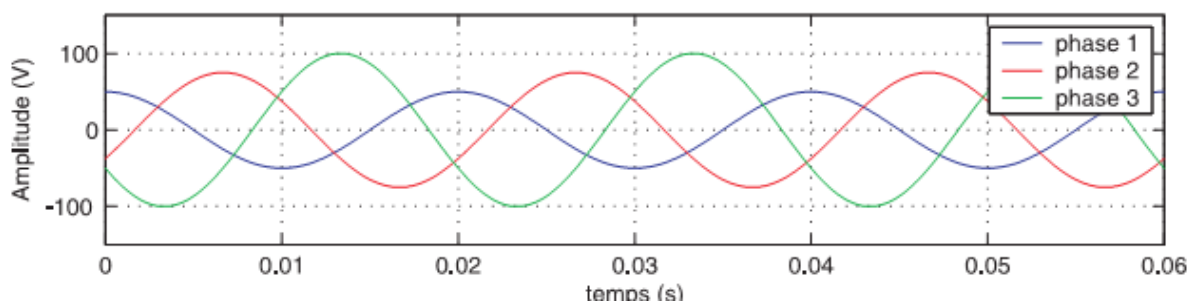


Figure I 3: Déséquilibre du système triphasé de tension.

I.3.4 Variation de fréquence

Une variation sensible de la fréquence du réseau peut apparaître sur les réseaux des utilisateurs non interconnectés ou alimentés par une source thermique autonome.

Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle $50\text{Hz} \pm 1\%$.

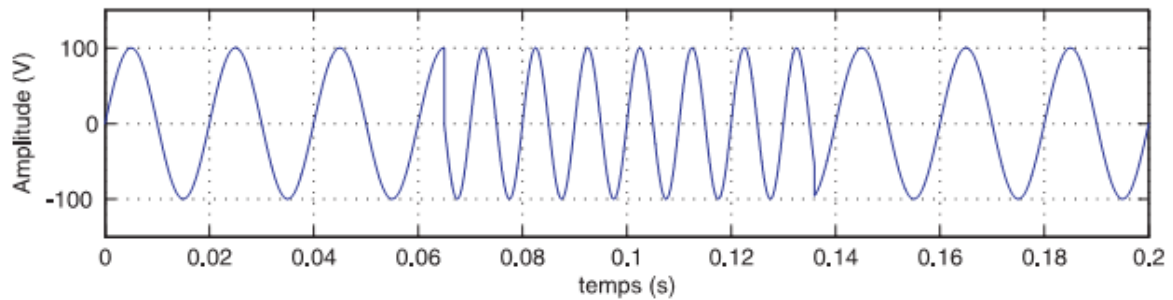


Figure I 4: Variation de fréquence.

I.4 Généralités sur les harmoniques

La présence d'harmoniques est synonyme d'une onde de tension ou de courant déformée. La déformation de l'onde de tension ou de courant signifie que la distribution de l'énergie électrique est perturbée et que la qualité de l'énergie n'est pas optimale.

Les courants harmoniques sont générés par les charges non-linéaires connectées au réseau. La circulation des courants harmoniques crée des tensions harmoniques à travers les impédances du réseau, et donc une déformation de la tension d'alimentation.

Une perturbation harmonique est définie comme une déformation de la forme d'onde d'un signal sinusoïdal pur. Sur le réseau électrique, les perturbations de la forme d'onde sont principalement dues à la présence de charges non linéaires.

Les harmoniques circulant dans les réseaux détériorent la qualité de l'énergie, et sont ainsi à l'origine de nombreuses nuisances :

- ✓ surcharge des réseaux de distribution par l'augmentation du courant actif/efficace,
- ✓ surcharge des conducteurs de neutre en raison de la sommation des harmoniques de rang 3 créés par les charges monophasées,
- ✓ surcharge, vibrations et vieillissement des alternateurs, transformateurs, moteurs, ronflement des transformateurs,
- ✓ surcharge et vieillissement des condensateurs de compensation d'énergie réactive,
- ✓ déformation de la tension d'alimentation pouvant perturber des récepteurs sensibles,
- ✓ perturbation des réseaux de communication ou des lignes téléphoniques.

I.4.1 Types des harmoniques

En générale, on distingue les harmoniques de rangs pairs (2, 4, 6,8 ...etc.) et les harmoniques de rangs impairs (3, 5,7 ...etc.) plus influentes, dans les réseaux industriels. Il existe aussi d'autres types d'harmoniques tels que :

- Les inters harmoniques : Ce sont des composantes sinusoïdales d'une grandeur qui n'est pas une fréquence multiple entière de celle du fondamentale.
- Les infra-harmoniques : Ce sont des composantes de fréquences inférieures à celle du fondamentale [5;6].

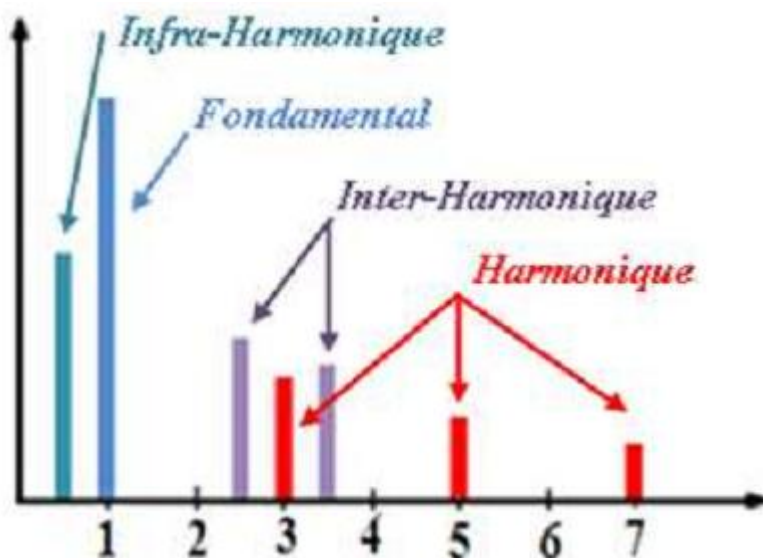


Figure I 5:Représentation d'inters-harmoniques et d'infra-harmoniques[5;6].

I.4.2 Harmoniques de courant et de tension

I.4.2.1 Courants harmoniques

Dans la plupart des cas, les harmoniques présents sur les réseaux électriques proviennent de l'utilisation de charges non linéaires.

On dit qu'une charge est non linéaire quand, soumise à une tension sinusoïdale à 50 Hz, elle n'absorbe pas un courant sinusoïdal à cette fréquence (c'est le cas des variateurs de vitesse, fours à arc, micro-ordinateur ...etc.)

Ces charges se comportent approximativement comme des sources de courant harmonique, c'est-à-dire que le courant harmonique est fixé par la charge et non pas par l'impédance ou la tension du réseau sur lesquelles elles sont raccordées.

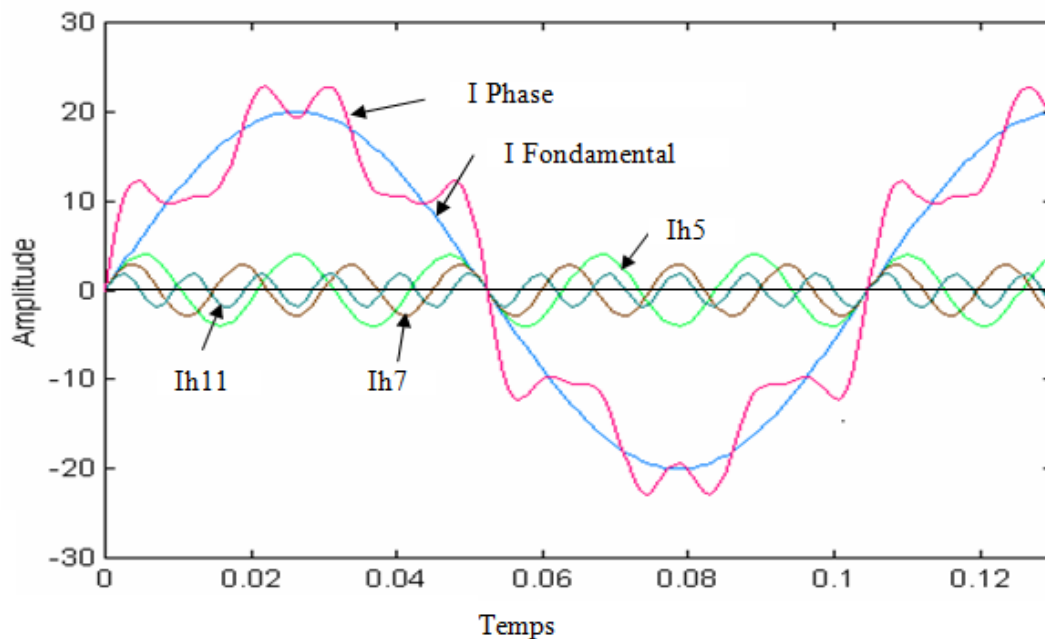


Figure I 6: La représentation de la forme de l'onde d'un courant déformé avec les différents courants harmoniques.

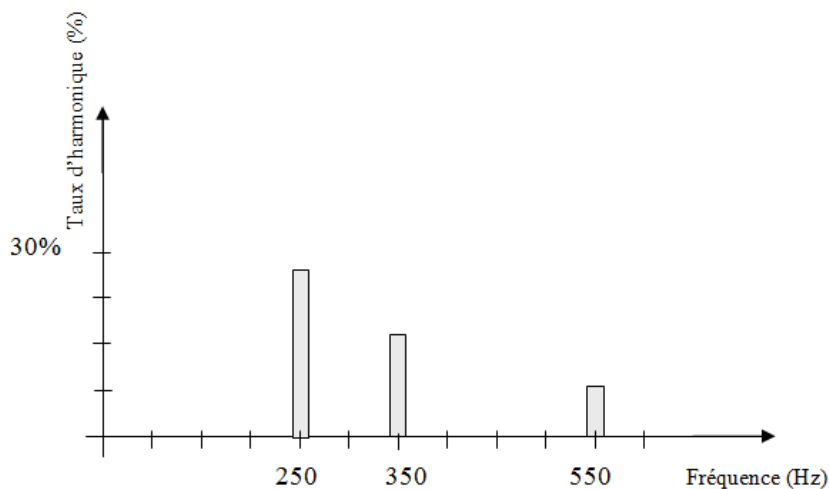


Figure I 7: Représentation spectrale des harmoniques

I.4.2.2 Tension harmonique

On peut également parler de source de tension pour décrire l'état d'un réseau perturbé par une forte charge non linéaire.

Dans ce cas, si l'on s'intéresse à l'étude de raccordement d'un récepteur de faible puissance, sa connexion au réseau ne modifie pas sensiblement le niveau précédent.

I.5 Généralités sur l'analyse harmonique

Un réseau de distribution électrique permet d'alimenter des récepteurs ou des charges à l'aide de tension monophasée ou triphasée dite sinusoïdale et de fréquence constante produite par des générateurs ou des sources de très fortes puissances par rapport à celle consommée au point d'utilisation. L'énergie est produite par des centrales nucléaire, thermique, hydraulique ou à base de sources renouvelables et des réseaux de distribution assurent le transport jusqu'au lieu de consommation. A ce niveau il existe deux catégories de récepteurs distincts : les charges dites linéaires et les charges dites non linéaires. Dans le premier cas, les variations des courants restent proportionnelles à la variation de la tension appliquée avec l'introduction d'un déphasage lié à la nature de la charge.

I.6 Effets des harmoniques

Les tensions et courants harmoniques superposés à l'onde fondamentale conjuguent leurs effets sur les appareils et équipements utilisés. Les effets les plus connus des harmoniques sont la destruction de condensateurs et de disjoncteurs suite à de fortes intensités dans les réseaux internes

En présence des harmoniques, la valeur efficace résultante est la somme des valeurs efficaces de toutes les harmoniques et la fondamentale qui traversent le circuit. Les appareils dimensionnés pour un courant fondamental donné peuvent être soumis à de sévères contraintes supplémentaires [13]. Alors comme traitement traditionnel de ces harmoniques on sur dimensionne ou on décline les installations.

Donc les courants et tensions harmoniques ont des effets néfastes sur le fonctionnement, ainsi que la rentabilité et la durée de vie de certains équipements électriques. Parmi ces effets instantanés, on peut citer :

- ✓ Perturbation des électroniques des dispositifs de mesure et de protection ;
- ✓ Perturbation des lignes de téléphones proches de lignes de puissance ;
- ✓ Résonance ;
- ✓ Vibration et bruits ;

En ce qui concerne les effets à long terme on cite :

- ✓ L'usure mécanique des matériaux due aux vibrations ;
- ✓ L'échauffement qui réduit la durée de vie de matériels (condensateur, transformateur, machine tournantes).

I.7 Caractéristiques des perturbations harmoniques

La perturbation harmonique est généralement caractérisée par le taux de distorsion harmonique (THD) défini pour la tension ou le courant. Ce critère est le plus souvent employé pour quantifier le contenu harmonique d'un signal distordu. Il mesure également le degré de déformation du signal apporté par les harmoniques par rapport à une onde sinusoïdale. Il va de soit que la répartition spectrale complète généralement l'information sur le THD en indiquant le rang des harmoniques dominants. Pour chiffrer la consommation de puissance réactive le facteur de puissance (FP) est généralement utilisé [4].

Le courant absorbé par une charge non linéaire (convertisseur statique) n'est pas sinusoïdal, mais sa valeur moyenne sur chaque phase est souvent nulle. Dans ce cas, la décomposition en série de Fourier du courant donne :

$$i(t) = \sqrt{2}I_1 \sin(\omega t + \alpha_1) + \sum_{h=2}^{\infty} \sqrt{2}I_h \sin(h\omega t + \alpha_h) \quad \text{I.1}$$

Avec : I_1, I_h : valeur efficace du courant fondamental et du courant harmonique de rang h ,

α_1, α_h : déphasage du courant fondamental et du courant harmonique de rang h ,

ω : pulsation fondamentale du réseau.

Le taux de distorsion harmonique de ce courant s'exprime sous la forme suivante :

$$THD_i = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \frac{I_h^2}{I_1^2}} \quad \text{I.2}$$

Le taux de distorsion harmonique en tension est un paramètre qui sert à évaluer la déformation de la tension et s'exprime sous la forme suivante :

$$THD_v = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \frac{V_h^2}{V_1^2}} \quad \text{I.3}$$

Il est possible aussi de caractériser les harmoniques par leur participation dans la puissance apparente. Nous utilisons alors la notion de puissance déformante "D".

Dans le cas d'un réseau équilibré à m phases, la puissance apparente S , la puissance active P et la puissance réactive q sont données par les relations suivantes :

$$S = m \sqrt{\sum_{h=1}^n V_h^2} \cdot \sqrt{\sum_{h=1}^n I_h^2} = m \cdot V_{eff} \cdot I_{eff} \quad \text{I.4}$$

$$P = m \sum_{h=1}^n V_h I_h \cos(\varphi_h) \quad \text{I.5}$$

$$q = m \sum_{h=1}^n V_h I_h \sin(\varphi_h) \quad \text{I.6}$$

A son tour la puissance déformante caractérisant la contribution des harmoniques est définie par la formule suivante :

$$D = m V_1 \sqrt{\sum_{h=1}^n I_h^2} \quad \text{I.7}$$

Finalement, le facteur de puissance s'exprime comme suit :

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{\sum_{h=1}^n V_h I_h \cos(\varphi_h)}{\sqrt{\sum_{h=1}^n V_h^2} \cdot \sqrt{\sum_{h=1}^n I_h^2}} \quad \text{I.8}$$

On constate que le facteur de puissance est dégradé par la présence des harmoniques.

Dans le cas d'un système triphasé alimentant une charge non linéaire équilibrée (cas du redresseur à diodes), les fondamentaux des courants absorbés composent un système direct (c'est-à-dire de même séquence que les tensions du réseau), les harmoniques multiples de 3, composent un système homopolaire (ils sont en phase), l'harmonique 5 un système inverse (la séquence des phases est inverse par rapport à celle du réseau), l'harmonique 7 un système direct,...

Différents facteurs sont définis pour caractériser les perturbations harmoniques. Le taux de distorsion harmonique et le facteur de puissance sont les plus significatifs pour quantifier respectivement les perturbations harmoniques et la consommation de la puissance réactive.

I.8 Normes et Réglementation

La C.E.I. (Commission Electrotechnique Internationale) et l'I.E.E.E (Institute of Electrical and Electronics Engineers) sont les deux principaux organismes internationaux de

normalisation dans le domaine de l'électrotechnique et particulièrement dans le domaine des perturbations électriques. La CEI est un organisme officiel composé de comités nationaux de 63 pays, tandis que l'IEEE est une association professionnelle américaine. Contrairement à l'IEEE qui utilise la notion de "qualité de l'énergie" dans ses normes, la CEI préfère plutôt le concept de "Compatibilité Electromagnétique". Les émissions harmoniques sont aussi soumises à différentes dispositions normatives et réglementaires :

- ✓ Normes de compatibilité adaptées aux réseaux,
- ✓ Normes d'émission applicables aux produits générateurs d'harmoniques,
- ✓ Recommandations des distributeurs d'énergie applicables aux installations.

Les normes de la CEI sont regroupées dans la publication CEI-61000. On peut y retrouver les normes qui établissent des limites pour les émissions de courants harmoniques (CEI 61000-3-2, CEI 61000- 3-4 et 61000-3-6), celles qui établissent le niveau de compatibilité (CEI 61000-2-4 et 61000-2-2) et qui déterminent le taux de distorsion harmonique de la tension de référence sur le réseau.

Les normes ci-dessus sont obligatoires mais restent incomplètes et ne permettent pas de garantir totalement la compatibilité électromagnétique sur les réseaux publics.

C'est la raison pour laquelle la compagnie EDF (Electricité de France) émet quelques recommandations concernant le raccordement des utilisateurs sur le réseau. Par exemple, les limitations en tension harmonique à respecter par ses clients sont :

- ✓ Pour chaque rang pair, la tension harmonique est limitée à 0,6%,
- ✓ Pour chaque rang impair, la tension harmonique est limitée à 1%,
- ✓ Limitation du THD à 1,6%.

Dans le cadre du contrat EMERAUDE signé avec ses abonnés tarif vert (tarif pour les entreprises dont la puissance compteur est supérieure à 250kVA), il y a un engagement réciproque : de qualité, pour EDF, et de limitation de pollution de la part de l'abonné. En plus, EDF autorise ses clients à consommer de la puissance réactive, sans être facturé, jusqu'à 40% de la puissance active absorbée [7].

I.9 Solutions de dépollution des réseaux électriques

Deux types de solutions sont envisageables. La première consiste à utiliser des convertisseurs statiques moins ou peu polluants, tandis que la seconde consiste en la mise en œuvre d'un filtrage des composantes harmoniques. La première classe de solutions s'intéresse à la conception tandis que la seconde consiste à compenser les courants ou les tensions

harmoniques [9]. Deux groupes de solutions de dépollution pour compenser toutes les perturbations peuvent être distingués : les solutions traditionnelles et les solutions modernes.

I.9.1 Solutions traditionnelles de la dépollution

Afin de dépolluer les réseaux électriques, plusieurs solutions ont été proposées dans la littérature, dont le but est de limiter la propagation et l'effet des harmoniques dans les réseaux électriques [8, 9].

I.9.1.1 Agir sur la structure de l'installation

Il est souhaitable d'alimenter un grand pollueur par un transformateur à part, afin de le séparer d'un récepteur sensible. Face à un pollueur moyen il est préférable d'effectuer l'alimentation par des câbles distincts au lieu de les connecter en parallèle. Une distribution en étoile permet le découplage par les impédances naturelles et/ou additionnelles.

I.9.1.2 Compensation

Il consiste à superposer à la source de perturbation une autre source d'énergie capable d'absorber ou de compenser les composantes non souhaités.

Ces systèmes sont généralement des compensateurs d'harmoniques et/ou d'énergie réactive placés, selon la nature de la perturbation à éliminer.

La puissance réactive est majoritairement consommée par les moteurs asynchrones et plus récemment par des dispositifs à base d'électronique de puissance. Différentes méthodes de compensation sont utilisées pour relever le facteur de puissance. La plus simple consiste à placer des batteries de condensateurs en parallèle avec le réseau.

L'inconvénient de cette méthode réside dans le fait que la puissance réactive fournie par les condensateurs est constante et qu'elle ne s'adapte pas à l'évolution du besoin.

I.9.1.3 Augmentation de la puissance de court-circuit

L'impédance de court-circuit en un point du réseau est inversement proportionnelle à la puissance de court-circuit disponible en ce point. Aussi l'impact des harmoniques sera d'autant plus réduit si la puissance de court-circuit est grande.

I.9.1.4 Surdimensionnement ou déclassement de l'installation électrique

L'objectif n'est pas d'éliminer les courants harmoniques circulant dans l'installation électrique, mais plutôt de « faire avec », en évitant leurs conséquences.

Au moment de la conception d'une installation nouvelle, l'idée consiste à surdimensionner tous les éléments de l'installation susceptibles de véhiculer des courants harmoniques, à savoir les transformateurs, les câbles, les disjoncteurs, les groupes électrogènes et les tableaux de distribution. La solution la plus largement utilisée est le surdimensionnement du conducteur neutre.

Par cette approche, les problèmes liés à la pollution harmoniques sont résolus pendant une durée limitée.

Le déclassement des équipements de distribution électrique soumis aux harmoniques est utilisé dans le cas des installations existantes. Cette méthode cause un surcoût de production et ne tire pas profit du potentiel réel de l'installation.

I.9.1.5 Rééquilibrage des courants du réseau électrique

C'est une solution qui permet de répartir les charges d'une manière identique sur les trois phases. En effet, les charges monophasées et biphasées mal réparties engendrent des courants déséquilibrés dans un réseau électrique basse tension.

I.9.1.6 Filtrage passif

C'est la solution classique pour améliorer de la qualité d'énergie, elle repose sur le principe de piéger les harmoniques dans des éléments passifs (R,L,C) connectés, en dérivation au réseau, formant des impédances dont la fréquence de résonance est accordée à celle de l'harmonique de courant que l'on veut atténuer ou éliminer.

Parmi les dispositifs du 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 :

- 1- Manque de souplesse à s'adapter aux variations du réseau et de la charge.
- 2- Equipements volumineux.
- 3- Problème de résonance avec l'impédance du réseau.
- 4- Inadaptabilité et perte d'efficacité lorsque les caractéristiques du réseau électrique évoluent.

I.9.2 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. En effet, les méthodes dites "*classiques*" de filtrage ou de dépollution des réseaux électriques présentent un certain nombre d'inconvénients. Le plus important d'entre eux est sans doute le fait d'être sensible aux évolutions de l'environnement. Ils voient leur efficacité baisser avec les variations des perturbations (variation des fréquences et des amplitudes des harmoniques).

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 [11].

I.9.2.1 Pont dodécaphasé

Ce pont est composé de deux redresseurs hexaphasés montés en série, ce pont le plus utilisé dans des applications avec des puissances importantes (Figure 1.8).

L'utilisation d'un grand nombre de semi-conducteurs et de transformateurs à deux enroulements secondaires rend cette solution onéreuse. Elle entraîne un coût supplémentaire et demande plus que le savoir faire habituel pour les mettre en œuvre.

Cette solution ne résolve pas les problèmes causés par les charges polluantes qui existent sur le marché.

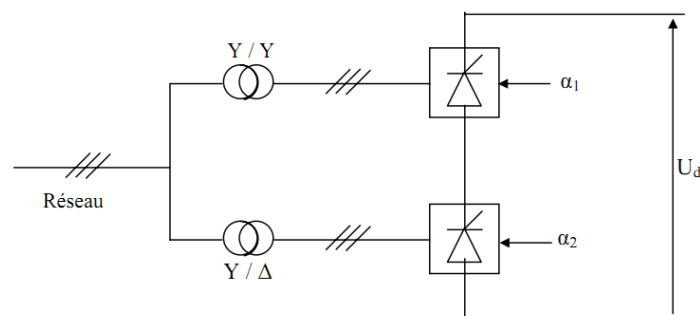


Figure I 8: Pont dodécaphasé

I.9.2.2 Les redresseurs à MLI

Les convertisseurs AC/DC à absorption sinusoïdale sont réalisés grâce à la stratégie de modulation de largeur d'impulsion MLI, C'est une bonne solution, cependant elle doit être généralisée, ce qui n'est pas le cas malheureusement de nos jours. Dans le cas monophasé, la

structure la plus répandue est une mise en parallèle d'un pont redresseur monophasé à diode et d'un hacheur, tandis que dans le cas triphasé, c'est la structure en pont triphasé à base de GTO ou IGBT qui est la plus répandue. Cette solution permet de réduire les harmoniques produits par les convertisseurs AC/DC et elle ne peut agir sur les harmoniques créés par d'autres sortes de charges polluantes.

I.9.2.3 Filtres actifs

Les filtres actifs constituent une alternative intéressante aux solutions classiques. Flexibles car auto-adaptatifs, ils viennent s'ajouter à des structures déjà existantes de convertisseurs. Ils peuvent également être utilisés comme complément aux solutions traditionnelles de dépollution.

Pour fournir aux consommateurs une énergie électrique de qualité, même dans les conditions de fonctionnement les plus perturbées, les filtres actifs sont proposés comme des solutions de dépollution des réseaux électriques. Donc le but de ces filtres est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à ce que le courant ou la tension redevienne sinusoïdale.

Il existe trois topologies possibles de filtres actifs :

a) Le filtre actif parallèle (FAP) :

Le FAP se connecte en parallèle avec le réseau et injecte en temps réel les composantes harmoniques des courants absorbés par les charges non linéaires connectées au réseau. Ainsi, le courant fourni par la source d'énergie devient sinusoïdal.

Il est conçu pour compenser les perturbations de courant comme les harmoniques, les déséquilibres et la puissance réactive.[14,15,17]

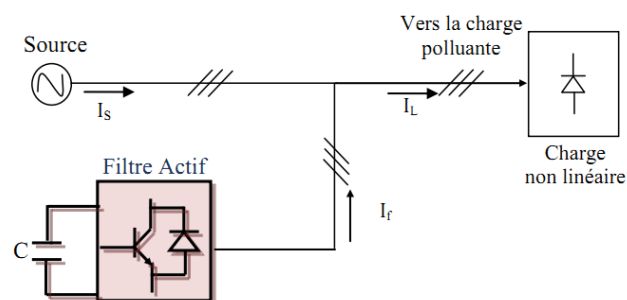


Figure I 9:Filtre actif parallèle.

b) Le filtre actif série (FAS) :

Le rôle d'un FAS est de modifier localement l'impédance du réseau. Il se comporte comme une source de tension harmonique qui annule les tensions perturbatrices (creux, déséquilibre, harmonique) venant de la source et celles générées par la circulation de courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Ainsi, la tension aux bornes de la charge peut être rendue sinusoïdale. Cependant, le FAS ne permet pas de compenser les courants harmoniques consommés par la charge. [18,19]

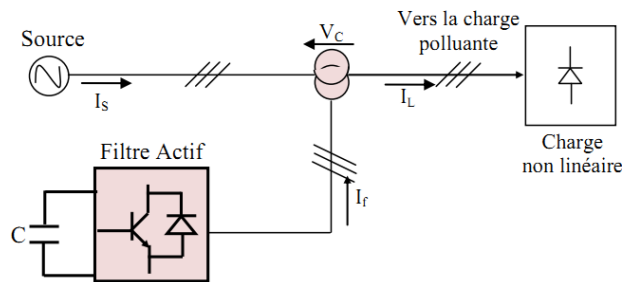


Figure I 10 :Filtre actif série.

Il est conçu pour compenser les perturbations de tension comme les harmoniques, les déséquilibres et les creux de tension.

c) La combinaison parallèle-série actifs (UPQC) :

La figure I.3 illustre l'association de deux filtres actifs parallèle et en série, appelée également « Unified Power Quality Conditioner » (UPQC). Cette structure bénéficie des avantages des deux types de filtres actifs série et parallèle. Ainsi, elle permet d'assurer simultanément un courant sinusoïdal et une tension du réseau électrique également sinusoïdale [3].

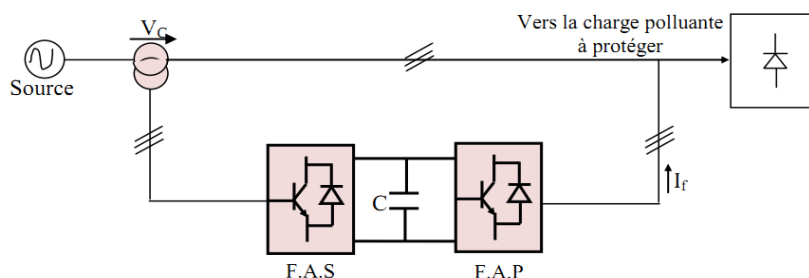


Figure I 11 : Combinaison parallèle-série de filtres actifs.

d) Combinaison hybride active et passive :

Le filtre hybride est une topologie de filtre qui combine les avantages des filtres passifs et des filtres actifs. Pour cette raison, il est considéré comme l'une des meilleures solutions pour filtrer les harmoniques de courant des réseaux de distribution. Une des principales raisons de l'utilisation du filtre actif hybride est liée au développement des semi-conducteurs de puissance tels que les transistors de puissance de types MOSFET ou IGBT.

De plus, du point de vue économique, le filtre hybride présente un atout majeur : il permet de réduire le coût du filtre actif, actuellement l'obstacle majeur à l'utilisation de filtres actifs [20 ,21].

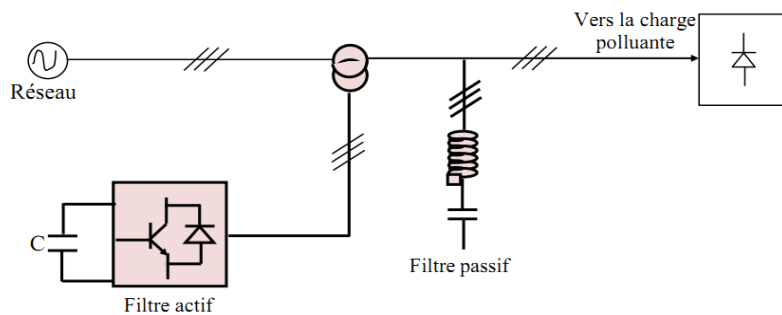


Figure I 12 : Combinaison hybride active et passive.

Afin de réduire le dimensionnement et par conséquent le prix des filtres actifs, l'association des filtres actifs de faibles puissances à des filtres passifs peut être une solution [22].

I.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons illustré, en premier lieu, le phénomène des harmoniques, leurs caractéristiques, leurs sources, leurs conséquences et leurs effets néfastes sur les équipements électriques qui y sont connectés. Ces effets sont à l'origine d'échauffements et de dégradations du fonctionnement de ces équipements. Les normes imposées ont été également présentées. Elles fixent les limites de la génération d'harmoniques.

Plusieurs solutions traditionnelles et modernes de dépollution ont été présentées. Nous avons montré que la solution classique à base de filtres passifs est souvent pénalisante en termes d'encombrements et de résonance. En revanche, la solution des filtres actifs parallèles et en séries avec leurs combinaisons se présente comme la meilleure jusqu'à ce jour pour tous types de perturbations susceptibles d'apparaître dans le réseau électrique. Par conséquent, un domaine de recherche a émergé pour les scientifiques afin d'élaborer des solutions de compensation pour cette pollution harmonique.

Ainsi, le choix de la topologie du filtre actif parallèle se présente comme la solution la plus standard pour le filtrage des courants harmoniques.

Dans ce contexte, nous avons pu mettre en évidence la contribution de l'électronique de puissance dans la lutte contre les harmoniques et l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique.

Et par conséquent nous avons retenu l'application au filtrage actif parallèle pour la suite de cette thèse.

I.1 Bibliographie

- [1] G. Benysek « Improvement in the Quality of Delivery Electrical Energy Using Power Electronics Systems», Springer-Verlag London Limited 2007.
- [2] J. H. Xu et B. Davai, « Filtrage actif parallèle des harmoniques des réseaux de distribution d'électricité », Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Lorraine, Vandoeuvre-lès-Nancy, FRANCE, 1994.
- [3] M. A. E. Alali Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension (Automatisation des systèmes de puissance électriques) Thèse ULP strasbourg Septembre 2002
- [4] I. El Baaklini « Outil de simulation de propagation des creux de tension dans les réseaux industriels », Thèse doctorat. Institut National Polytechnique de Grenoble 2001.
- [5] D. Ould 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 de Haute Alsace, 2005.
- [6] Mohamed Muftah ABDUSALAM, Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales, Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, soutenance le29/05/2008.
- [7] N.H. Mendalek « Qualité de l'onde électrique et moyens de mitigation», Thèse doctorat, Ecole de technologie supérieure, Université du Québec 2003.
- [8] S. Karimi « Continuité de service des convertisseurs triphasés de puissance et prototypage "FPGA in the loop": application au filtre actif parallèle », Thèse Doctorat. Université Nancy-I 2009.
- [9] N. Belhaouchet, "Fonctionnement a fréquence de commutation constante des convertisseurs de puissance en utilisant des techniques de commande avancées application : amélioration de la qualité de l'énergie", thèse de doctorat en sciences, Université Ferhat Abbas Sétif, Algérie, 2011.
- [10] W.-M. Lin et C.-M. Hong, « Intelligent approach to maximum power point tracking control strategy for variable-speed wind turbine generation system », *Energy*, vol. 35, n° 6, p. 2440–2447, 2010.
- [11] G.Segier « Perturbations harmoniques : Effets, origine, mesures, diagnostic, remède », Dunod, Paris 2000.
- [12] Normes IEEE Std 519-1992; IEEE recommended practices and requirements for harmonie control in electrical power systems; 12 April1993, Page(s):15- 99.
- [13] G. Gay, A. Riboulot, and A. Guignabel, "Les perturbations électromagnétiques basse et haute fréquence," *InterSection - Le magasin Schneider Electric de l'enseignement technologique et professionnel*, pp. 2 – 16, Juin 2000.
- [14] H. Akagi, E. H.Watanabe, andM. Aredes, *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*. John Wiley Sons, Inc., New Jersey, 2007.
- [15] L. H. Tey, P. L. So, and Y. C. Chu, "Adaptive neural network control of active filters," *Electric Power Systems Research*, vol. 74, no. 1, pp. 37–56, 2005.
- [16] M. Kale and E. Ozdemir, "An adaptive hysteresis band current controller for shunt active power filter," *Electric Power Systems Research*, vol. 73, no. 2, pp. 113–119, 2005.
- [17] M. E. Ortuzar, R. E. Carmi, J. Dixon, and L. Moran, "Voltage-source active power filter based on multilevel converter and ultracapacitor dc link," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, no. 2, pp. 477–485, 2006.
- [18] A. K. Jindal, A. Ghosh, and A. Joshi, "The protection of sensitive loads from interharmonic currents using shunt/series active filters," *Electric Power Systems Research*, vol. 73, no. 2, pp. 187–196, 2005.
- [19] B. Renders, K. De Gusseme, W. R. Ryckaert, and L. Vandevelde, "Converter-connected distributed generation units with integrated harmonic voltage damping and harmonic current compensation function," *Electric Power Systems Research*, vol. 79, no. 1, pp. 65–70, 2009.
- [20] C. Chen and Y.-Y. Hsu, «A novel approach to the design of a shunt active filter for an unbalanced three-phase four-wire system under nonsinusoidal conditions», *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 15, no. 4, pp. 1258 –1264, 2000.

- [21] H. Fujita, T. Yamasaki, and H. Akagi, «A hybrid active filter for damping of harmonic resonance in industrial power systems», IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 15, no. 2, pp. 215–222, 2000.
- [22] B.-R. Lin, B.-R. Yang, and H.-R. Tsai, « Analysis and operation of hybrid active filter for harmonic elimination», Electric Power Systems Research, vol. 62, no. 3, pp. 191–200, 2002.

CHAPITRE II

Filtre actif parallèle : structure et stratégies d'identifications des harmoniques

II.1 Introduction

Comme il a été mentionné au sein du premier chapitre et afin de réduire les harmoniques au niveau de la source, nous proposons le filtrage actif parallèle (ou shunt), étant donné ses avantages, telle que l'adaptation aux variations de la charge. La littérature abonde de publications sur les filtres actifs, surtout à propos des filtres parallèles [1-4].

Le filtre actif est un onduleur de tension qui traite l'élimination des harmoniques. Il doit donc, absorber les courants éliminant ainsi les harmoniques engendrées par le pont redresseur. Cette structure a pour vocation d'éliminer de façon active tout ou une partie des harmoniques de courant. L'utilisation des onduleurs pour filtrage actif, suppose l'emploi des fréquences de découpages très supérieures aux fréquences harmoniques que l'on veut éliminer.

II.2 Principe du filtre actif parallèle

Le compensateur actif est connecté en parallèle avec le réseau, et injecte en permanence de courants qui correspondent à tout moment aux composantes harmoniques des courants absorbés par la charge. De cette manière, le courant fourni par la source d'énergie reste sinusoïdal [5].

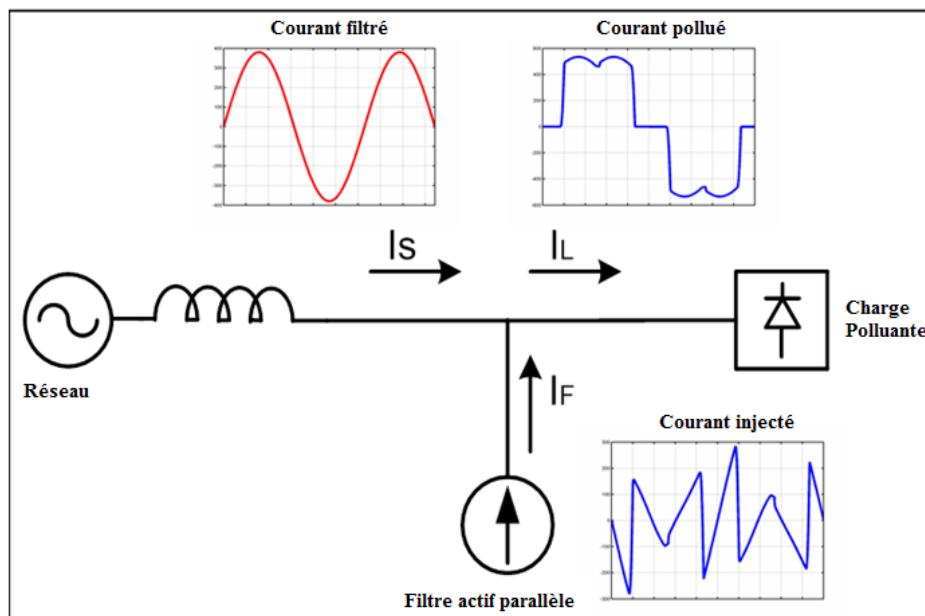


Figure II 1: Principe du filtrage actif parallèle.

II.3 Structure d'un filtre actif parallèle

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

En raison de la législation des normes de qualité de l'énergie (plutôt portée sur la compensation des harmoniques de courant) et les bonnes performances obtenues par le FAP, nous avons retenu cette topologie de compensation pour notre stratégie de dépollution des perturbations harmoniques. La figure II.2 met en évidence les deux parties essentielles du FAP.

A. La partie puissance : Constituée par plusieurs éléments électriques :

- ✓ Un réseau électrique,
- ✓ Une force électromotrice du réseau (fem),
- ✓ Une charge non linéaire constituée d'un pont redresseur à thyristors triphasé alimentant une charge R_{ch}, L_{ch} .
- ✓ Un transformateur de régulation R_c, L_c connecté à l'entrée de la charge non linéaire.
- ✓ Un onduleur à structure tension commandée à l'amorçage et au blocage constitué des IGBTs avec des diodes antiparallèles.

B. La partie contrôle-commande : Représentée par trois blocs

- ✓ Bloc d'identification des paramètres de la tension (extraction de la phase fondamentale du réseau, identification de la composante directe de la tension).
- ✓ Bloc d'identification des courants harmoniques.
- ✓ Bloc de la commande de l'onduleur pour la restitution des courants harmoniques et commande de la tension continue V_{dc} .

Le bon fonctionnement du FAP est directement lié aux choix des techniques à utiliser dans la partie contrôle-commande. Dans la suite de nos travaux, nous étudierons l'apport des techniques avancées dans l'amélioration du rendement de cette solution.

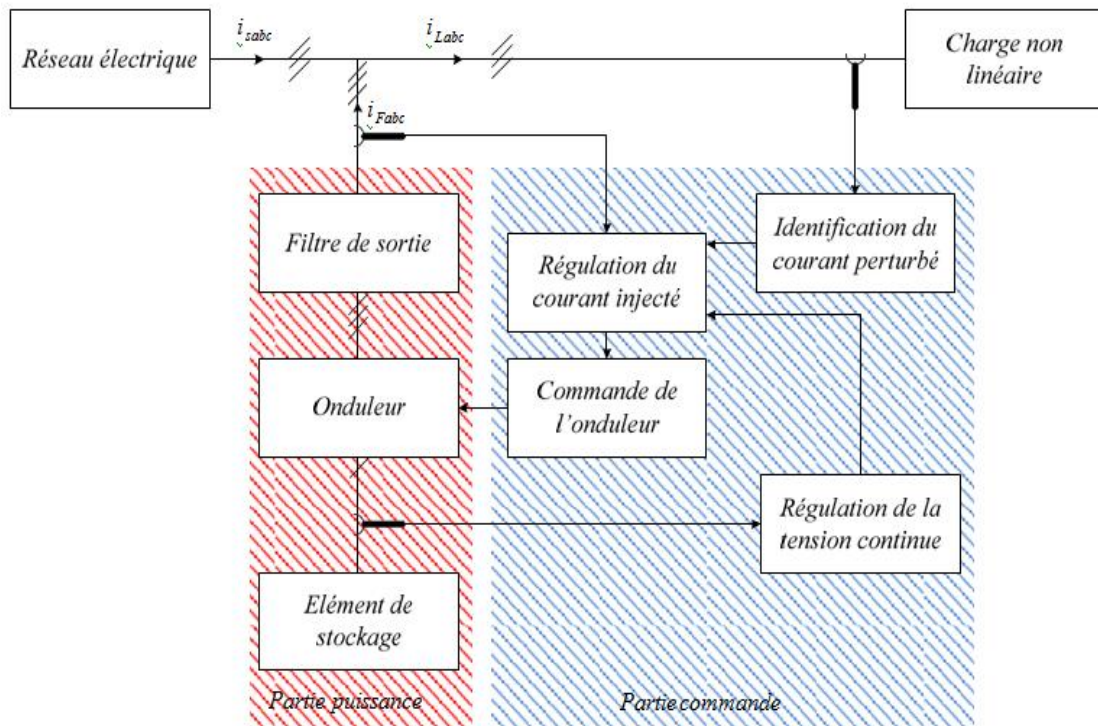


Figure II 2: Structure générale du filtre actif parallèle.

La source d'énergie composant le filtre peut être une source de tension ou de courant. Comme l'onduleur ne fournit pas de puissance active, cette source peut être un élément réactif, condensateur ou inductance, dans lequel on maintient constante la valeur moyenne de l'énergie stockée [6,7]. Cet élément de stockage d'énergie n'a pas besoin d'être lui-même alimenté par une source continue. La raison est que le filtre actif peut être contrôlé de manière à suppléer aux pertes de sa source d'énergie à partir du courant fondamental généré par la source du réseau auquel il est connecté [8].

II.3.1 Étude de la partie de la puissance

Dans cette section nous sommes intéressés à la partie puissance du FAP dont les composants sont les suivants :

- L'onduleur de tension deux niveaux,
- Le filtre de couplage,
- Le système de stockage de l'énergie.

II.3.1.1 Modélisation de l'onduleur de tension à deux niveaux

L'onduleur de tension, contrairement à celui de courant est caractérisé par son élément d'alimentation en énergie qui est un condensateur (Figure II.3). La tension aux bornes de ce condensateur doit être maintenue constante [4].

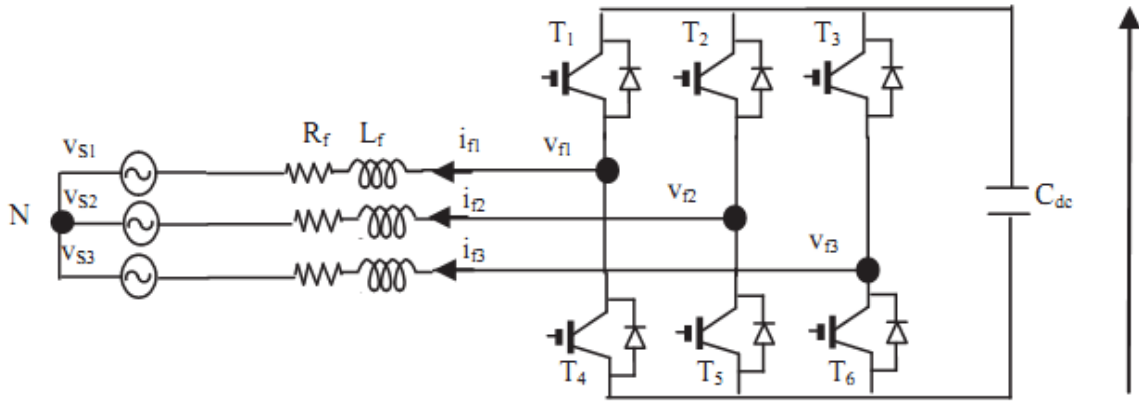


Figure II 3: Onduleur de tension à deux niveaux.

Les interrupteurs sont unidirectionnels en tension et doivent être réversibles en courant. Pour y parvenir, les éléments semi-conducteurs composant l'onduleur sont associés en parallèle avec des diodes. Ces semi-conducteurs sont commandés à la fermeture et à l'ouverture [9]. Les semi-conducteurs d'un même bras de l'onduleur sont commandés de façon alternée, la conduction de l'un entraînant le blocage de l'autre. Le fonctionnement de l'onduleur se déroule de manière à ce que les semi-conducteurs d'un même bras ne soient jamais fermés simultanément, au risque de court-circuiter le condensateur. En effet, les semi-conducteurs du même bras peuvent être ouverts pendant un temps défini comme étant un temps mort afin d'éviter ce risque.

L'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur de la Figure II.3 dépendent de l'état des signaux de commande (S_1, S_2, S_3) comme il est défini par [5]:

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

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

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

Les tensions de ligne, imposées par l'onduleur, sont alors définies par :

$$\begin{bmatrix} V_{f1} - V_{f2} \\ V_{f2} - V_{f3} \\ V_{f3} - V_{f1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1 - S_2 \\ S_2 - S_3 \\ S_3 - S_1 \end{bmatrix} V_{dc} \tag{II.1}$$

Les tensions de sortie de l'onduleur, posés par V_{fx} ; avec ($x = \{1, 2, 3\}$) , sont référencées par rapport au neutre du réseau et vérifient l'équation suivante :

$$V_{fx} = V_{sx} + L_f \frac{di_{fx}}{dt} + R_f i_{fx} \quad \text{II. 2}$$

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

$$\begin{cases} V_{S1} + V_{S2} + V_{S3} = 0 \\ i_{f1} + i_{f2} + i_{f3} = 0 \end{cases} \quad \text{II. 3}$$

Nous pouvons donc déduire des équations (II. 1) et (II. 3) la relation suivante :

$$\{V_{f1} + V_{f2} + V_{f3} = 0 \quad \text{II. 4}$$

A partir des équations (II. 1) et (II. 4), nous obtenons :

$$\begin{bmatrix} V_{f1} \\ V_{f2} \\ V_{f3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2S_1 & -S_2 & -S_3 \\ -S_1 & 2S_2 & -S_3 \\ -S_1 & -S_2 & 2S_3 \end{bmatrix} \frac{V_{dc}}{3} \quad \text{II. 5}$$

Puisque les grandeurs S_1, S_2 et S_3 peuvent prendre chacune deux valeurs (0 ou 1), il en résulte huit commandes possibles, présentées dans le tableau suivant (II.1) :

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

Tableau II 1: Tensions générées par l'onduleur de tension deux niveaux.

II.3.1.2 Système de stockage de l'énergie

Le stockage de l'énergie est réalisé côté continu à l'aide d'un système de stockage capacitif, représenté par un condensateur C_{dc} jouant le rôle d'une source de tension continue. Le choix des paramètres du système de stockage (v_{dc-ref} et C_{dc}) a une influence directe sur la

dynamique du FAP et sur ses performances de compensation. D'une part, une tension v_{dc-ref} élevée améliore la dynamique du FAP. D'autre part, les ondulations de la tension continue v_{dc} , causées par les courants engendrés par le FAP et limitées par le choix de la valeur de C_{dc} , peuvent dégrader la qualité de compensation du FAP. Une valeur élevée de C_{dc} réduit les ondulations de v_{dc} mais augmente le coût et la taille du FAP [10].

Sachant que l'augmentation de la valeur de la tension continue améliore la marge de commandabilité du FAP et sachant que le choix de cette tension se répercute en grande partie sur le choix des interrupteurs, la tension continue v_{dc} doit être choisie la plus élevée possible tout en respectant les contraintes nominales des semi-conducteurs et la contrainte de commandabilité de l'onduleur.

II.3.1.3 Filtre de sortie

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

- Assurer la dynamique en courant, définie par :

$$\frac{di_f}{dt} = \frac{di_{ref}}{dt} \quad \text{II. 6}$$

Où

i_f : Courant du filtre.

i_{ref} : Courant harmonique de la charge.

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

Un filtre de sortie du premier ordre est le plus souvent utilisé dans la littérature [9-11]. Il est composé d'une inductance L_f comportant une résistance interne R_f . Une valeur relativement faible de L_f permet d'obtenir une bonne dynamique du FAP en satisfaisant l'égalité (II. 6). Cependant, une faible valeur de L_f permet à la majorité des harmoniques, induits par les commutations, de passer du côté réseau et d'affecter ainsi les installations et les équipements électriques. Inversement, une valeur relativement élevée de L_f empêche ces harmoniques de se propager sur le réseau électrique mais nécessite une tension v_{dc} plus élevée afin de garantir les performances du filtre actif. Pour limiter la propagation de ces

harmoniques, un filtre passif auxiliaire peut être ajouté à la sortie de l'onduleur ou en amont (côté réseau) pour absorber ces harmoniques liés au découpage [12,13].

Le rôle principal du filtre de sortie est de permettre la connexion du convertisseur de tension au réseau électrique qui est très souvent considéré comme une source de courant qui génère des courants harmoniques à partir de la différence des tensions entre la sortie du convertisseur et le réseau [14].

II.3.2 Etude de la partie commande

II.3.2.1 Identification des courants de référence

La qualité de la compensation des harmoniques de courant dépend fortement des performances de la méthode d'identification choisie. En effet, un système de commande, même très efficace, ne pourra pas à lui seul effectuer un filtrage satisfaisant si les courants harmoniques sont mal identifiés. Pour cette raison, de nombreuses méthodes d'identification ont été développées dans la littérature. Elles peuvent être regroupées selon deux approches [15-18] :

a) Identification dans le domaine fréquentiel

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

b) Identification dans le domaine temporel

De nombreuses méthodes d'identification des courants de référence dans le domaine temporel ont été publiées dans la littérature scientifique [6,10-16].

Les plus significatives feront l'objet des paragraphes suivants.

Plusieurs algorithmes d'identification des grandeurs harmoniques de référence et de nombreuses techniques de commande et de régulation ont été développés depuis la mise en place des premiers filtres actifs de génération de signaux de référence. Afin de générer les

signaux de référence servant à la commande du filtre actif, nous avons opté pour les algorithmes de commande suivants :

- Identification par la méthode des puissances instantanées classique avec FPB.
- Identification par la méthode des puissances instantanées avec FMVs.
- Identification par la méthode de détection synchrone (SDM).
- Identification par la méthode du courant indirect.

II.3.2.2 Généralités sur les méthodes d'identification

II.3.2.2.1 Méthode des puissances active et réactive

La méthode des puissances active et réactive instantanées (couramment notée méthode pq) a été initialement développée par H.Akagi [13] et bien établie par N. Bruyant [17]. Elle n'est cependant valable que si les tensions appliquées à l'entrée de l'identificateur forment un système direct de tension.

Afin de remplir ces conditions, un système de verrouillage de phase (PLL) est inséré après la mesure des tensions du réseau.

La première étape de l'identification consiste à transformer les courants et les tensions du repère triphasé (1; 2; 3) vers le repère diphasé (α, β). Cette transformation, appelée transformation de Concordia Directe (TCD), permet essentiellement de réduire les contraintes de calcul. Elle est donnée par les équations [II. 7] et [II. 8] qui permettent de calculer les tensions V_α et V_β et les courants I_α et I_β .

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad \text{II. 7}$$

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{s1} \\ I_{s2} \\ I_{s3} \end{bmatrix} \quad \text{II. 8}$$

Les puissances réelle et imaginaire instantanées, respectivement p et q, sont données par [II. 9] :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad \text{II. 9}$$

Elles peuvent être décomposées selon $p = \bar{p} + \tilde{p}$ et $q = \bar{q} + \tilde{q}$.

Dans le cas sinusoïdal, \bar{p} est la partie continue liée à la composante fondamentale active du courant, \bar{q} est la partie continue liée à la composante fondamentale réactive du courant, alors que \tilde{p} et \tilde{q} sont les parties fluctuantes liées à la somme des composantes perturbatrices du courant et de la tension.

Un filtre passe-bas dans l'espace des puissances permet de séparer la composante fondamentale (autrement dit la partie continue), des composantes perturbatrices (la partie alternative). Deux filtres sont nécessaires, le premier pour isoler la partie \bar{p} de la puissance active instantanée, le second pour isoler la partie \bar{q} de la puissance réactive instantanée.

L'inverse de l'équation [II. 9] des puissances active et réactive permet d'établir la relation [II. 10] des courants I_α et I_β :

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_{s\beta} \\ V_\beta & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad \text{II. 10}$$

En remplaçant les puissances p et q par leurs parties continues et alternatives, il vient :

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_{s\beta} \\ V_\beta & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_{s\beta} \\ V_\beta & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{q} \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_{s\beta} \\ V_\beta & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad \text{II. 11}$$

Avec $\Delta = V_\alpha^2 + V_\beta^2$. Le calcul des courants perturbateurs dans le repère biphasé (α, β) est finalement donné par :

$$\begin{bmatrix} \tilde{I}_\alpha \\ \tilde{I}_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_{s\beta} \\ V_\beta & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad \text{II. 12}$$

Des parties alternatives des puissances, \tilde{p} et \tilde{q} on déduit des courants perturbateurs triphasés grâce à la Transformation de Concordia Inverse (TCI). Ces courants représentent les perturbations et correspondent à des courants de référence qui sont à réinjecter en opposition de phase sur le réseau électrique pour éliminer les harmoniques.

$$\begin{bmatrix} I_{ref1} \\ I_{ref2} \\ I_{ref3} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{I}_\alpha \\ \tilde{I}_\beta \end{bmatrix}$$

II. 13

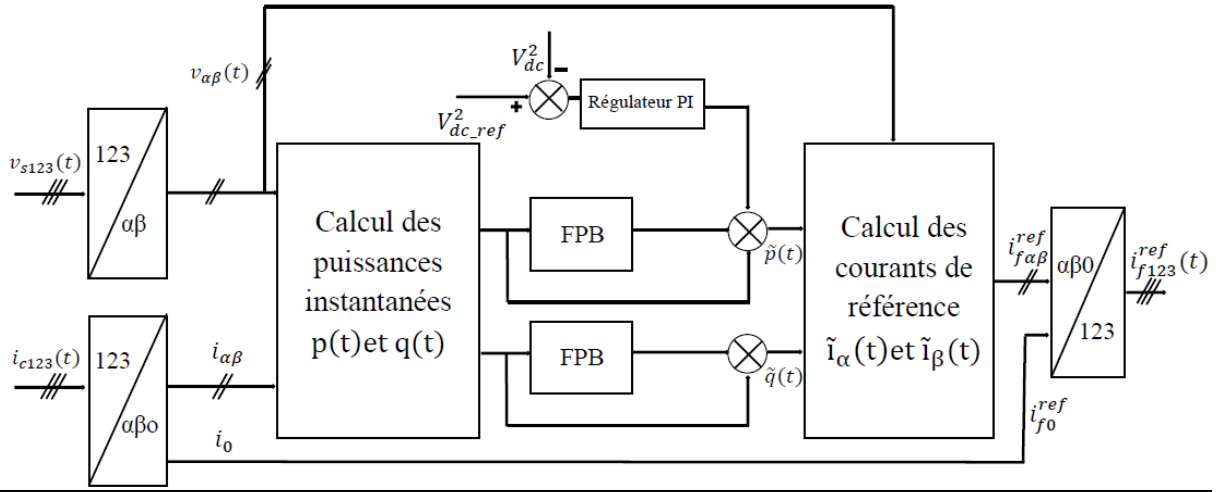


Figure II 4: Génération des courants de référence par la méthode des puissances instantanées.

II.3.2.2.2 Nouvelle approche pour l'identification basée sur un filtre multi-variable

Le filtre multi-variable est un filtre d'extraction nommé FMV, il a été développé au sein du laboratoire de Nancy. Son principe de base s'appuie sur les travaux de Song Hong-Scok, et est basé sur l'extraction de la composante fondamentale des signaux d'entrée, que ce soit une tension ou une courant, directement selon les axes directement selon les axes (α, β) . La figure II.5 illustre l'algorithme d'identification [10].

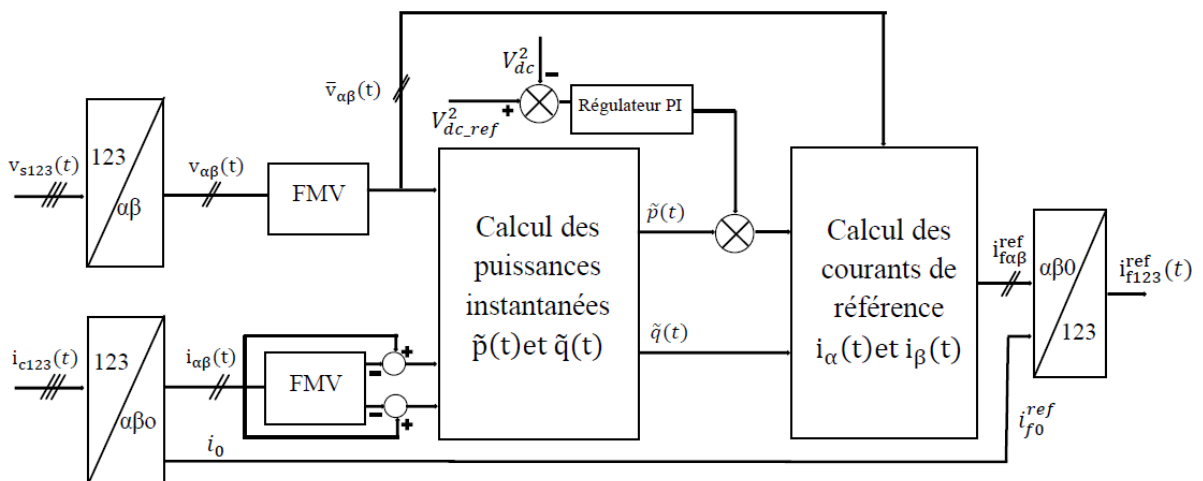


Figure II 5: Identification par la méthode des puissances instantanées avec FMVs.

Un nouveau filtre d'extraction dite FMV destiné à extraire la composante fondamentale de signaux électriques (tension ou courant) directement selon les axes $\alpha\beta$. La fonction de transfert de ce filtre est la suivante :

$$H(s) = \frac{\hat{x}_{\alpha\beta}(s)}{x_{\alpha\beta}(s)} = k \frac{(s+k) + j\omega_c}{(s+k)^2 + j\omega_c^2} \tag{II.14}$$

Dans l'expression (II.14), ω_c représente la pulsation fondamentale ($f_c = 50 \text{ Hz}$), K une constante positive, $x_{\alpha\beta}$ le signal électrique d'entrée du FMV (courant ou tension) et $\hat{x}_{\alpha\beta}$ est le signal correspondant à x en sortie du FMV.

A partir de l'équation (II.14), nous obtenons les deux expressions suivantes après un court développement :

$$\hat{x}_\alpha(s) = \frac{k(s+k)}{(s+k)^2 + \omega_c^2} x_\alpha(s) - \frac{k\omega_c}{(s+k)^2 + \omega_c^2} x_\beta(s) \tag{II.15}$$

$$\hat{x}_\beta(s) = \frac{k\omega_c}{(s+k)^2 + \omega_c^2} x_\alpha(s) + \frac{k(s+k)}{(s+k)^2 + \omega_c^2} x_\beta(s) \tag{II.16}$$

Les équations (II.15) et (II.16) peuvent également être exprimées sous la forme :

$$\hat{x}_\alpha(s) = \frac{k}{s} [x_\alpha(s) - \hat{x}_\alpha(s)] - \frac{\omega_c}{s} \hat{x}_\beta(s) \tag{II.17}$$

$$\hat{x}_\beta(s) = \frac{k}{s} [x_\beta(s) - \hat{x}_\beta(s)] - \frac{\omega_c}{s} \hat{x}_\alpha(s) \tag{II.18}$$

Nous obtenons alors le schéma bloc suivant pour le FMV :

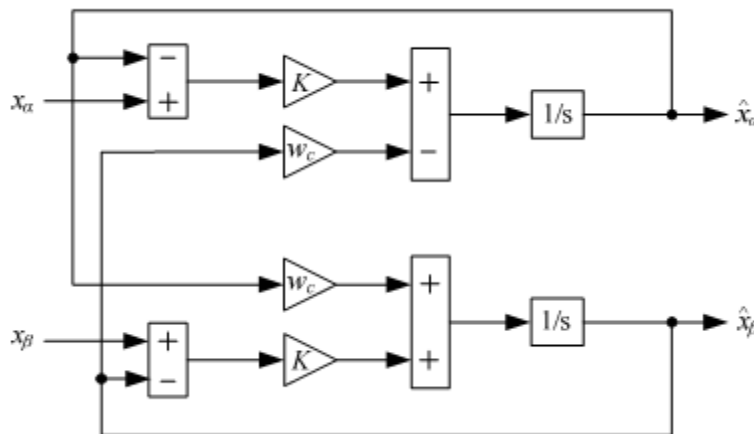


Figure II 6 :Schéma bloc du FMV.

II.3.2.2.3 Méthode de détection synchrone des courants de référence

Cette méthode repose sur la génération des courants de référence synchrone avec les trois tensions de la source [18]. Elle ne nécessite pas une PLL et permet d'obtenir d'excellentes performances en particulier dans le cas où la tension réseau n'est pas perturbée. Elle se base essentiellement sur le calcul de la pulsation fondamentale obtenue par une PLL. Cela exige une précision parfaite du calcul de cette pulsation afin de ne pas avoir des courants identifiés erronés.

II.3.2.2.4 Commande indirecte du courant du filtre actif shunt

Cette méthode de contrôle est de mise en œuvre facile et nécessite moins de calcul que les autres techniques. La tension du filtre actif v_{dc} est mesurée et comparée avec une tension de référence v_{dc}^* , l'erreur entre les deux tensions sert comme une entrée pour le régulateur, la sortie du régulateur devient une référence du courant maximum du courant de source I_{sm} ce courant prend soin de la puissance active demandée par le filtre et les pertes engendrées dans l'onduleur. Les courants de références instantanés de la source (i_{sa}^* , i_{sb}^* , i_{sc}^*) sont évalués en multipliant le courant maximal I_{sm} par trois sinusoïdes unitaires de tension de source.

La Figure II.7 ci-dessous, montre la commande indirecte du filtre shunt active [21-23].

Le principe du contrôle par MLI est décrit à la figure II.8. Dans ce cas, la différence entre le courant référence i^* et le courant réel i_f est appliqué à l'entrée d'un régulateur. Le signal de sortie du régulateur, appelé modulatrice, est ensuite comparé à un signal triangulaire de fréquence fixe (porteuse) afin de déterminer les ordres de commutations des interrupteurs. La fréquence de la porteuse triangulaire fixe donc la fréquence de découpage des semi-conducteurs de puissance [25].

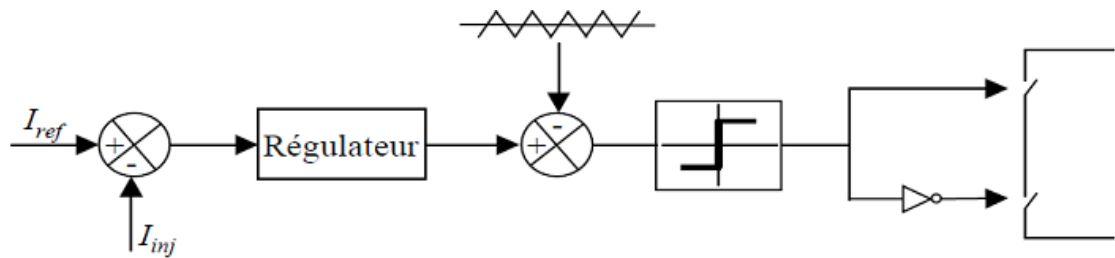


Figure II 8:Principe de la commande par MLI.

II.3.2.3.2 Contrôle par hystérésis

Ce type de contrôle non linéaire utilise le signal d'erreur entre le courant de référence et le courant produit par l'onduleur. L'erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis (B_h). Dès que l'erreur atteint la bande inférieure ou supérieure, un nouvel ordre de commande est envoyé aux semi-conducteurs de manière à maintenir le courant réel à l'intérieur de la bande. Le contrôle du courant par hystérésis est simple à mettre en œuvre et donne de bons résultats en régulation puisqu'on n'a ni erreur statique, ni erreur de poursuite. La commande est robuste vis à vis des paramètres du système et présente de bonnes dynamiques en régime transitoire. La bande permet de limiter l'amplitude des oscillations du courant de sortie.

Cependant, la fréquence de commutation obtenue est variable, ce qui permet certes d'étaler le spectre du signal de sortie, mais sans aucun contrôle de ce dernier. En effet, lors de perturbations ou de variations de la référence, des commutations à fréquences plus élevées peuvent alors être provoquées. La bande est généralement calculée pour limiter cette fréquence sans cependant tenir compte de ce type de problème

La commande conventionnelle par hystérésis est très couramment utilisée de par sa simplicité d'utilisation et sa robustesse. En fait, cette stratégie assure un contrôle satisfaisant du courant sans exiger une connaissance poussée du modèle du système à contrôler ou de ses

paramètres. La figure II.10 expose son principe qui consiste à établir dans un premier temps le signal d'erreur (différence entre le courant de référence i_f^* et le courant produit par l'onduleur i_f), où ce dernier est ensuite comparée au gabarit appelé : bande d'hystérésis afin de fixer les ordres de commande des interrupteurs. Cette commande présente cependant un inconvénient majeur : elle ne permet pas de contrôler la fréquence de commutation des semi-conducteurs, d'où la présence d'un nombre important d'harmoniques dans les courants générés.

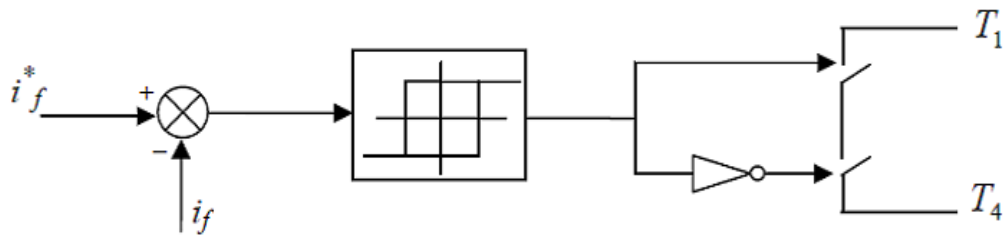


Figure II 9:Commande conventionnelle par hystérésis.

II.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le filtre actif parallèle comme solution de dépollution des réseaux électriques des courants perturbateurs tels que les courants harmoniques (déséquilibré et réactif). Le FAP est connecté en parallèle sur le réseau électrique afin d'injecter les courants de compensation permettant d'éliminer la pollution harmonique et l'énergie réactive des charges non linéaires connectés à ce réseau. Nous avons ensuite présenté les différentes méthodes d'identification des courants de référence, à savoir la méthode des puissances active et réactive instantanées, la méthode du référentiel lié au synchronisme et la méthode de détection synchrone des courants de référence. En ce qui concerne la poursuite des courants de référence, nous avons rappelé les principales techniques largement utilisées qui sont entre autres, le contrôle par hystérésis et le contrôle MLI.

Dans le chapitre qui suit nous allons étudier les principaux algorithmes de commande avancés du filtre actif parallèle en utilisant un onduleur de tension à deux niveaux.

II.5 Bibliographie

- [1] H. Akagi, «Active Harmonic Filters», Proceedings IEEE, vol. 93, n° 12, p. 2128-2141, Décembre 2005.
- [2] B. Singh, K. Al-Haddad and A. Chandra, "A review of active filters for power quality improvement", IEEE, Transactions on Industrial Electronics, Vol. 46, No. 5, October 1999.
- [3] B-R. Lin, H-K. Chiang, K-T. Yang, "Shunt Active Filter with Three-Phase Four-Wire NPC Inverter ", IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems, vol. 2, Jul. 2004, pp.II.281-II.284
- [4] Omeiri. Amar."Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant "Thèse Doctorat. Université Annaba 2007.
- [5] J. H. Xu et B. Davai, « Filtrage actif parallèle des harmoniques des réseaux de distribution d'électricité », Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Lorraine, Vandoeuvre-lès-Nancy, FRANCE, 1994.
- [6] F. Labrique, G. Seguier et R. Bausiere, « Les Convertisseurs de l'Électronique de puissance », Paris : Technique et Documentation-Lavoisier, 1995.
- [7] L. Benchaita, S. Saadate et A. Salem Nia, «A comparison of voltage source and current source shunt active filter by simulation and experimentation », *IEEE trans. Power Systems.*, Vol. 14, pp. 642-647, Mai 1999
- [8] J. Faucher, «Les plans d'expériences pour le réglage de commandes à base de logique floue»,Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse (INPT), Toulouse, 2006.
- [9] M. A. E. Alali , «Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension (Automatisation des systèmes de puissance électriques) »,Thèse ULP strasbourg Septembre 2002.
- [10] S. Karimi « Continuité de service des convertisseurs triphasés de puissance et prototypage "FPGA in the loop": application au filtre actif parallèle », Thèse Doctorat. Université Nancy-I 2009.
- [11] H. Akagi, «Modern active filters and traditional passive filters»,*Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences*, vol. 54, no. 3, 2006.
- [12] L. Asiminoaei, F. Blaabjerg, S. Hansen, «Evaluation of harmonic detection methods for active power filter applications», *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, vol. 1, pp. 635- 641, March 2005
- [13] H. Akagi, Y. Kanazawa and A. Nabae, « Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits », *Proceeding 1983 International power electronics conférence*. Tokyo, Japan, PP. 1375-13 86, 1983
- [14] G.W. Chang, S. Tai-Chang, « A comparative study of active power filter reference compensation approaches»,*IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, vol. 2, pp. 1017-1022, July 2002.
- [15] R. Ordonez, C. Karimi, M. Oueidat, D. Sadarnac, «Comparison of reference current generation techniques for non-active power compensation under distorted and unbalanced conditions»,*IECON'06*, pp. 2297-2302, Nov. 2006.
- [16] M. ShafieeKhoor , «Amélioration de la qualité de l'énergie à l'aide de compensateurs actifs : série, parallèle ou conditionneurs unifiés de réseaux électriques», Thèse de doctorat de l'école Polytechnique de l'université de Nantes, Nantes, 2006.
- [17] N. Bruyant,«Etude et commande généralisées de filtres actifs parallèles, Compensation globale ou sélective des harmoniques, Régime équilibré ou déséquilibré», Thèse de doctorat, Université de Nantes, France, 1999.
- [18] M. C. Benhabib,«Contribution à l'étude des différentes topologies et commandes des filtres actifs parallèles à structure tension, Modélisation, simulation et validation expérimentale de la commande», Thèse, Université Henri Poincaré, Nancy, (France) 2004.
- [19] Hind Djeghloud, "Filtrage actif de puissance », Thèse de doctorat en sciences, Université Mentouri Constantine, Algérie, 12 Décembre 2007.
- [20] Abdelmadjid Chaoui, «Filtrage actif triphasé pour charges non-linéaires», Thèse de doctorat en sciences, Université Ferhat Abbas Sétif (UFAS), Algérie, 05 Octobre 2010.
- [21] S. Guffon , « Modélisation et commandes à structure variable de filtres actifs de puissance», Thèse de doctorat de l'INPG, Grenoble, 2000.
- [22] A Bouafia, « Techniques de commande prédictive et floue pour les systèmes d'électronique de puissance: application aux redresseurs à MLI», Thèse de doctorat en sciences, Université Ferhat Abbas Sétif (UFAS), Algérie, 06 Octobre 2010

- [23] N. Belhaouchet, « Fonctionnement a fréquence de commutation constante des convertisseurs de puissance en utilisant des techniques de commande avancées application : amélioration de la qualité de l'énergie», thèse de doctorat en sciences, Université Ferhat Abbas Sétif, Algérie, 2011.
- [24] B. Mohamed Choukri, «Contribution à l'Etude des Différentes Topologies et Commandes des Filtres Actifs Parallèles à Structure Tension : Modélisation, Simulation et Validation Expérimentale de la Commande », Thèse de Doctorat, Univ.H.Poincaré, Nancy-I, Décembre 2004.
- [25] A. Hamadi, « Contribution a l'etude des filtres hybrides de puissance utilises pour améliorer la qualité de l'énergie dans le réseau électrique de distribution.», Thèse de doctorat de l'université du québec (2010).

CHAPITRE III

Commande du filtre actif parallèle

III.1 Introduction

Ce chapitre décrit les techniques intelligentes nouvellement introduites dans le monde de l'électronique de puissance. Il s'agit principalement de la logique floue et leur apparition dans la commande électrique.

Le filtre actif parallèle, auquel nous allons appliquer ces techniques, est largement répandu en industrie. Une telle application nécessite la prise en compte des contraintes d'implantation matérielle lors de son élaboration. Ces contraintes ont directement orienté notre choix des méthodes à utiliser dans la partie contrôle-commande du FAP.

Ce chapitre montrera aussi l'intérêt croissant que porte la communauté scientifique à l'utilisation des différentes techniques intelligentes dans le domaine des systèmes électriques. Le nombre de conférence qui leurs sont consacrées annuellement démontre cet engouement. Nous présentons un bref rappel sur la commande classique PI, la commande floue type-1 et celle de type-2 ainsi que le système de commande hybride (floue-mode glissement).

III.2 Régulation de la tension continue

La source d'alimentation du filtre n'est pas une source de tension autonome mais c'est une source flottante qui se charge à travers les diodes du redresseur et qui se décharge à travers ses transistors.

La tension aux bornes de la source flottante n'est pas constante à cause de sa sensibilité aux échanges de puissance entre la charge polluante et le réseau, c'est le filtre actif qui fournira la puissance nécessaire pour rétablir l'équilibre. Le régime transitoire de la charge non linéaire et les pertes dans les composants de puissance font aussi varier la tension aux bornes du condensateur. Une boucle externe de tension s'avère alors nécessaire, car elle permet de [1-3]:

- Maintenir la tension, coté continu, de l'onduleur constante tout en assurant une compensation des pertes dans le filtre actif.
- Limiter ses variations en régime dynamique afin préserver les performances de la commande.

Pour maintenir la tension aux bornes de la source flottante constante, il suffit alors de déterminer l'amplitude du courant actif I_o qui est nécessaire pour produire la puissance active et/ou absorbée par le filtre, et on l'ajoute aux références de courants. La correction de la

tension moyenne aux bornes du condensateur de stockage d'énergie doit se faire par l'adjonction des courants fondamentaux actifs dans les courants de référence.

III.3 Commande classique PI

Pour maintenir la tension v_{dc} constante et de compenser les pertes dans l'onduleur, on doit injecter un courant actif à travers la boucle de régulation de la tension.

Les principales causes susceptibles de la modifier sont :

- Les pertes statiques et dynamiques dans les interrupteurs de puissance du convertisseur,
- Les pertes dans les inductances de découplage L_f ,
- La variation des courants fondamentaux pendant les régimes transitoires de la charge polluante.

Un simple proportionnel-intégrale (PI) montré à la Figure III.1 est suffisant pour régler la tension v_{dc} et la maintenir fixe. L'action intégrale est fréquemment combinée à l'action proportionnelle, dans le but d'améliorer le régime permanent sans avoir à dégrader le régime transitoire. La raison de cette combinaison est que l'action intégrale seule améliore le régime permanent tout en détériorant le régime transitoire. Quand à l'action proportionnelle, elle offre la possibilité de modifier en même temps le régime transitoire et le régime permanent [1,2].

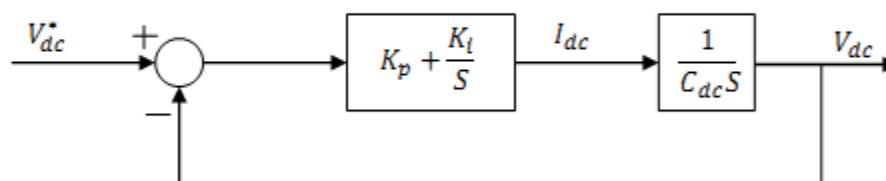


Figure III 1: Boucle de régulation de la tension continue.

Sa fonction de transfert est de la forme :

$$F_R(s) = k_p + \frac{k_i}{s}$$

III. 1

En négligeant les pertes de commutation dans le convertisseur ainsi que l'énergie stockée dans l'inductance du filtre de sortie, la fonction de transfert du système est donnée par :

$$F(s) = \frac{1}{C_{dc}s} \quad \text{III.2}$$

La fonction de transfert en boucle ouverte est donnée par :

$$F_o(s) = \left(k_p + \frac{k_I}{s}\right) \frac{1}{C_{dc}s} \quad \text{III.3}$$

La fonction de transfert en boucle fermée de la boucle de régulation de la tension continue v_{dc} est donnée par :

$$F_F(s) = \frac{\left(1 + \frac{k_p}{k_i}s\right) \frac{k_i}{C_{dc}}}{s^2 + \frac{k_p}{C_{dc}}s + \frac{k_i}{C_{dc}}} \quad \text{III.4}$$

En comparant cette équation avec la forme générale d'une fonction de transfert de deuxième ordre donnée par :

$$F_F(s) = \frac{\left(1 + \frac{k_p}{k_i}s\right) \omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad \text{III.5}$$

Après identification on trouve :

$$k_i = \omega_n^2 C_{dc} \quad \text{et} \quad k_p = 2\xi\sqrt{k_i C_{dc}} \quad \text{III.6}$$

III.4 Commande basée sur la logique floue

La Logique Floue est une forme intéressante de l'intelligence artificielle qui offre un intérêt particulier lorsqu'on ne dispose pas de modèle mathématique précis du système à contrôler ou lorsque ce dernier présente de fortes non-linéarités ou imprécisions. Elle est issue de la capacité de l'homme à décider et agir d'une façon pertinente malgré la nature floue des connaissances disponibles [4-5]. Introduite par L. Zadeh en 1965 de l'université de Berkeley aux USA, publie un article intitulé «Ensembles flous" ou "Fuzzy sets". [4], elle constitue un outil puissant pour le traitement de connaissances imprécises ou approximatives.

La logique floue permet de faire le lien entre modélisation numérique et modélisation linguistique, ce qui a permis des développements industriels spectaculaires à partir d'algorithmes très simples de traduction de connaissances symboliques en entité numérique et inversement. La théorie des ensembles flous a également donné naissance à un traitement original de l'incertitude, fondée sur l'idée d'ordre, et qui permet de formaliser le traitement de l'ignorance partielle et de l'inconsistance dans les systèmes d'informations avancés. Les ensembles flous ont également eu un impact sur les techniques de classification automatique, et ont contribué à un certain renouvellement des approches existantes de l'aide à la décision.

La Logique Floue classique, appelée encore logique floue type-1, a été étendue à une nouvelle logique floue plus efficace dite : La Logique Floue type-2 qui suscite actuellement un intérêt particulier. Cette dernière permet d'incorporer les différentes incertitudes négligées dans le cas d'un système flou classique et d'obtenir une meilleure approximation. Récemment, la Logique Floue type-2 a été largement utilisée avec succès dans les problèmes de commande et régulation des processus complexes [9-17].

III.4.1 Logique floue Type 1

III.4.1.1 Concepts fondamentaux de la logique floue

Le principe de la logique floue s'approche de la démarche humaine dans le sens que les variables utilisées ne sont pas des variables logiques $[0,1]$ mais des variables linguistiques, proches du langage humain courant. De plus, ces variables linguistiques sont traitées à l'aide de règles qui font référence à une certaine connaissance du comportement du système. Ainsi, la théorie de la logique floue, fondée sur des aspects de la théorie des possibilités, fait intervenir des ensembles d'appartenances appelés "ensembles flous" caractérisant les différentes grandeurs du système à commander. Ainsi, les éléments de base de la logique floue sont les suivants :

a) *Ensembles flous type-1 et fonctions d'appartenance :*

La notion d'ensemble flou a été proposée par L. Zadeh [4] en introduisant un caractère graduel de l'appartenance d'un élément à un ensemble donné. Un ensemble flou peut être vu comme une généralisation du concept d'ensemble classique.

Un ensemble flou type-1, noté A , est défini sur un ensemble de valeurs appelé univers de discours X par une fonction d'appartenance notée $\mu_A(x)$, comprise entre 0 et 1, qui quantifie le

degré avec lequel chaque élément x de X appartient à A . Il peut être représenté comme un ensemble de paires d'éléments x et de leurs degrés d'appartenance $\mu_A(x)$. On note alors :

$$A = \{x, \mu_A(x) / \forall x \in X, \mu_A(x) \in [0, 1]\} \tag{III.7}$$

Si X est continu, A est couramment exprimé par :

$$A = \int_X \mu_A(x) / x \tag{III.8}$$

Si X est discret, A est donné par :

$$A = \sum_{x_i \in X} \mu_A(x_i) / x_i \tag{III.9}$$

Les signes intégrale et sommation ne désignent pas une intégration et une addition arithmétique mais une collection de tous les points x appartenant à X avec leurs appartenances associées $\mu_A(x)$. Le slash (/) ne symbolise pas la division, mais attribue les éléments dans X à leurs degrés d'appartenance.

Les fonctions d'appartenance peuvent théoriquement prendre n'importe quelle forme. Pratiquement, elles sont définies par des formes géométriques ou des fonctions connues. Les principales fonctions d'appartenance utilisées sont données dans le tableau III.1.

Tableau III 1: Quelques fonctions d'appartenance usuelles.

Nom	Fonction d'appartenance	Graphique
Triangulaire	$\mu_A(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & b \leq x \leq c \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases}$	

<p>Trapézoïdale</p>	$\mu_A(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ 1 & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c} & c \leq x \leq d \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases}$	
<p>Gaussienne</p>	$\mu_A(x) = \exp\left(-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right)$	
<p>Singleton</p>	$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & x = m \\ 0 & x \neq m \end{cases}$	

b) Variables et règles linguistiques :

Une variable linguistique, appelée aussi attribut linguistique ou variable floue, est une variable dont les valeurs sont des mots ou des phrases exprimés dans un langage naturel ou artificiel [5]. Elle sert à modéliser les connaissances imprécises ou vagues sur une variable dont la valeur précise peut être inconnue.

Une variable linguistique x est généralement caractérisée par un triplet (V, X, T_V) où V est la variable linguistique définie sur un univers de discours X et $T_V = \{A_1, A_2, A_3 \dots \dots, A_n, \dots\}$ est l'ensemble des valeurs linguistiques que peut prendre la variable V [6,7]. Les systèmes basés sur la logique floue ont tendance à traduire la connaissance de l'expert sous la forme de règles linguistiques de forme :

Si "condition (prémisse)" Alors "Conséquence (conclusion)"

Les règles d'inférence sont des relations qui lient les variables d'entrées à la variable de sortie en se basant sur les connaissances des experts. Les prémisses et les conclusions sont des propositions floues qui sont combinées à l'aide des opérateurs flous, largement décrits dans la littérature [8,15]. Selon la syntaxe des règles, deux classes de modèles flous peuvent

être distinguées. Les modèles flous à conclusion fonctionnelle dits modèles de Takagi-Sugeno et ceux à conclusion symbolique nommés modèles de Mamdani [15,16].

c) Structure d'un contrôleur flou type-1 (CF type-1) :

La configuration de base d'un contrôleur flou est représentée dans la figure III.2. Cette structure est composée de quatre blocs principaux : la base de connaissance (règles et paramètres des fonctions d'appartenance), le système d'inférence, la fuzzification et la défuzzification [5].

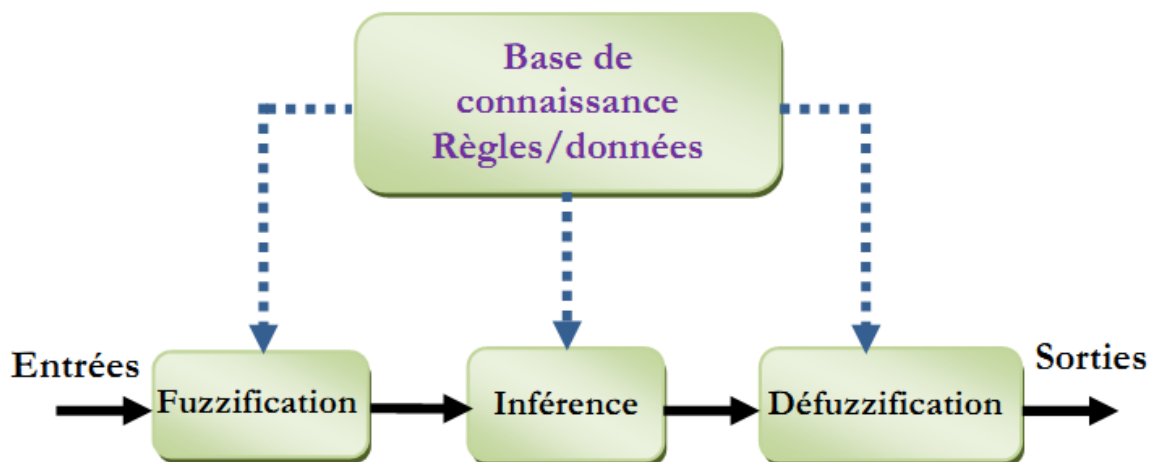


Figure III 2 : Structure de base d'un contrôleur flou type-1.

La conception d'un contrôleur flou passe par différentes étapes, la première consiste en la partition en sous-ensembles flous des différents univers de discours; ensuite on détermine la base de règles qui va caractériser le fonctionnement du système; ensuite transformation des variables réelles, c'est-à-dire celles qui ont une réalité physique en variables floues c'est l'étape de fuzzification. Ces variables floues sont utilisés dans un mécanisme d'inférence qui crée et détermine les variables floues de sortie en utilisant les opérations sur les fonctions d'appartenance. Finalement, on effectue la défuzzification qui consiste à extraire une valeur réelle de sortie à partir de la fonction d'appartenance du sous-ensemble flou de sortie (établie par le mécanisme d'inférence).

C.1 Fuzzification :

Le bloc fuzzification effectue les fonctions suivantes :

- ✓ Établit les plages de valeurs pour les fonctions d'appartenance à partir des valeurs des variables d'entrées,

- ✓ Effectue une fonction de fuzzification qui convertit les données d'entrée en valeurs linguistiques convenables qui peuvent être considérées comme l'étiquette des ensembles flous.

C.2 Base de connaissance :

Le bloc base de règles comporte une connaissance dans le domaine d'application et le résultat de commande prévu. Il consiste en une "base de données" et une "base de règles linguistiques (floues) de commande" :

- ✓ La base de données effectue des définitions qui sont nécessaires pour établir les règles de commande et manipuler les données floues dans un contrôleur à logique floue,
- ✓ La base de règles représente la stratégie de commande et le but désiré par le biais des règles de commande linguistiques.

C.3 Moteur d'inférence :

Le bloc moteur d'inférence est le cœur d'un contrôleur à logique floue, qui possède la capacité de simuler les décisions humaines et de déduire (inférer) les actions de commande floue l'aide de l'implication floue et des règles d'inférence dans la logique floue.

Dans le mécanisme d'inférence on distingue deux types d'opérateurs, l'opérateur de conjonction «ET» qui lie les différentes variables de la règle et l'opérateur de disjonction «OU» qui lie l'ensemble de règles. Ces deux opérateurs peuvent être réalisés par différentes manières, en effet l'opérateur «ET» peut être réalisé par le produit algébrique ou l'intersection floue «min», et l'opérateur «OU» par la somme algébrique ou l'union floue «max».

C.4 Défuzzification :

Le bloc défuzzification effectue les fonctions suivantes :

- ✓ Établit les plages de valeurs pour les fonctions d'appartenance à partir des valeurs des variables de sortie,
- ✓ Effectue une défuzzification qui fournit un signal de commande non floue à partir du signal flou déduit.

III.4.2 Applications de la logique floue type-1

La plupart des travaux de recherche dans le filtrage actif de puissance en utilisant les contrôleurs flous ont été principalement focalisé sur la régulation de la tension continue aux

bornes du condensateur de stockage [17-19]. Dans ce cas, le contrôleur flou possède deux entrées, le signal erreur « e » et la variation de l'erreur « de » et une sortie correspondant à l'amplitude du courant de référence I_{smax} , la commande des interrupteurs est réalisé moyennant un contrôleur à hystérésis.

Le contrôle par logique floue est l'évaluation d'un ensemble de simples règles linguistiques pour déterminer l'action de commande. Dans ce cas, le contrôleur à logique floue possède deux entrées, la première nommée « e » qui est l'erreur de la tension et la seconde est la variation de l'erreur « de » et une seule sortie nommé « u ». Pour les convertirent variable linguistique, nous avons utilisé trois ensembles flous : N (Négatif), ZE (Zéro) et P (positif).

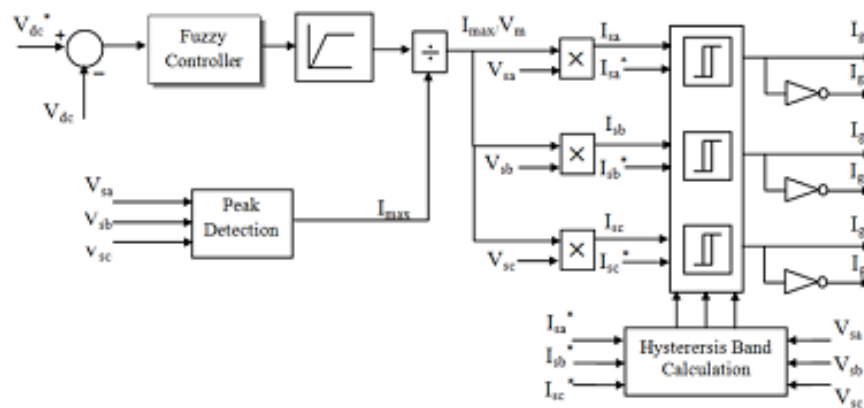


Figure III 3: Commande floue type-1 du FAP.

Le schéma synoptique du contrôleur flou est représenté par la Fig.III.4

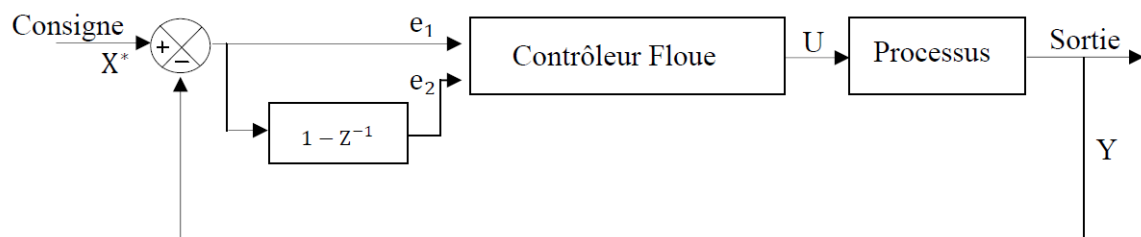


Figure III 4: Diagramme synoptique du contrôleur Flou

Le noyau de la commande par la logique floue consiste à déterminer le tableau de règles basé sur des connaissances à priori. Le tableau suivant donne l'ensemble de règles floues utilisées dans la conception de ce contrôleur. En général, plus le nombre de règles est grand, plus les performances sont bonnes.

La figure. III.5 montre les fonctions d'appartenance utilisées dans fuzzification [18],

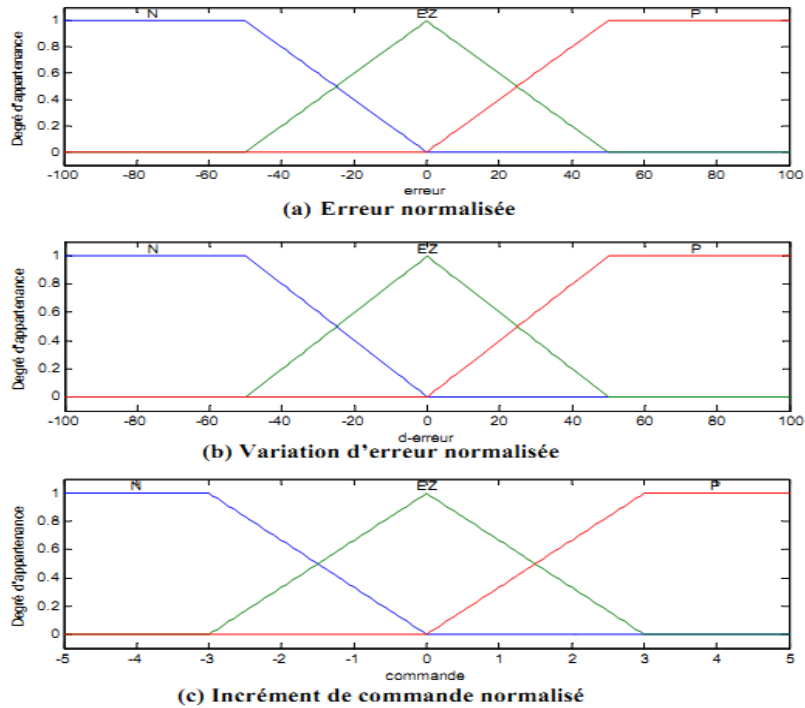


Figure III 5:Fonction d'appartenance des variables d'entrées et de sortie

Le contrôleur flou pour chaque phase est caractérisé par :

- Trois ensembles flous pour chaque entrée,
- Trois ensembles flous pour la sortie,
- Fonctions d'appartenance triangulaire et trapézoïdale,
- Implication utilisant l'opérateur « min »,
- Mécanisme d'inférence Mamdani basé sur l'implication floue,
- Défuzzification utilisant la méthode « centroid ».

Les règles linguistiques utilisées pour le contrôleur flou proposé sont donnés par le Tableau III-2:

Tableau III 2: Règles floues

Δe \ e	N	EZ	P
N	N	N	EZ
EZ	N	EZ	P
P	EZ	P	P

III.4.3 Logique floue Type 2

Les systèmes flous type-1 sont incapables de prendre en compte de telles contingences de règles. Nous introduisons dans cette partie du chapitre une nouvelle classe de systèmes flous appelée système flou type-2 dans laquelle les valeurs d'appartenance des prémisses ou des conséquences sont elles-mêmes des ensembles flous. Les ensembles flous type-2 sont très efficaces dans le cas où il nous est difficile de déterminer exactement les fonctions d'appartenance pour les ensembles flous, par conséquent ils sont pratiques pour l'incorporation des incertitudes.

Le concept des ensembles flous type-2 a été introduit [12] comme extension du concept de l'ensemble flou ordinaire appelé ensemble flou type-1. Un ensemble flou type-2 est caractérisé par une fonction d'appartenance floue. La valeur d'appartenance des éléments de l'ensemble est un intervalle $[0 ; 1]$. Lorsqu'il est difficile voire impossible de déterminer ces degrés d'appartenance d'un élément à un ensemble par 0 ou 1, le type-1 intervient de même, lorsque la détermination des fonctions d'appartenance floues par des réels dans $[0 ; 1]$ s'avère compliquée

III.4.3.1 Concepts fondamentaux de la logique floue

III.4.3.1.1 Représentation d'un ensemble flou type-2

Une fonction d'appartenance de type-2 peut être vue comme une fonction à deux variables. Pour chaque X de l'univers du discours et degré d'appartenance primaire \mathbb{Q}_1 , nous aurons une appartenance secondaire \mathbb{Q}_2 qui est un nombre ordinaire dans l'intervalle $[0, 1]$. Ainsi, une fonction d'appartenance peut être définie par :

$$\mathbb{Q}_2(x, \mathbb{Q}_1) : X \times [0, 1] \rightarrow [0, 1] \quad \text{III. 10}$$

X définit l'espace des entrées x . La figure (III.6) est une représentation en trois dimensions d'un ensemble flou type-2 gaussien, dont la fonction d'appartenance principale est gaussienne [10-12].

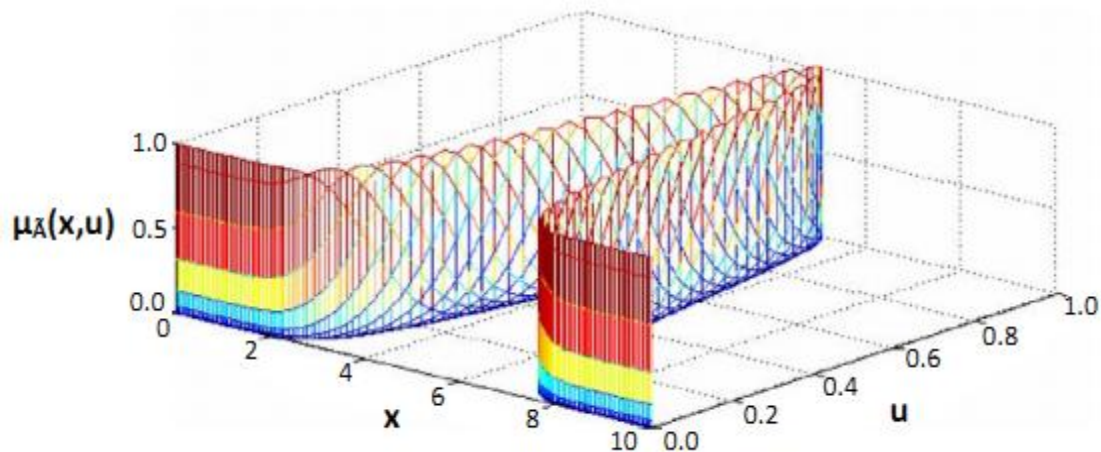


Figure III 6: Représentation tridimensionnelle d'un ensemble flou type-2 gaussien.

III.4.3.1.2 Types d'ensemble flous type-2

Selon la forme de l'appartenance primaire, on distingue principalement trois sortes d'ensembles flous type-2 :

❖ **Ensemble flou type-2 gaussien** : Le degré d'appartenance de chaque point est un ensemble flou type-1 gaussien dont le domaine de définition est inclus dans l'intervalle $[1,0]$

❖ **Ensemble flou type-2 triangulaire** : Le degré d'appartenance de chaque point est un ensemble flou type-1 triangulaire dont le domaine de définition est inclus dans l'intervalle $[1, 0]$.

❖ **Ensemble flou type-2 intervalle** : Le degré d'appartenance de chaque point est un ensemble ordinaire dont le domaine de définition est inclus dans l'intervalle $[1, 0]$. Dans ce cas, les appartenances secondaires sont égales à 1.

La figure III.7, schématise une fonction d'appartenance floue type-2 avec une zone d'incertitude [15].

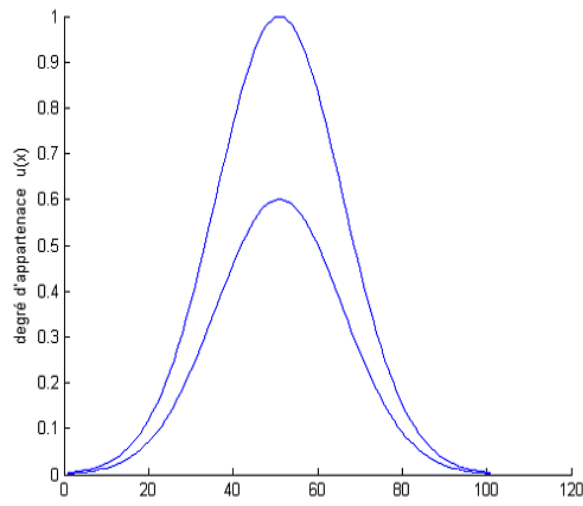


Figure III 7: Fonction d'appartenance d'un ensemble flou type-2

III.4.3.3 Structure d'un contrôleur flou type-2

Un contrôleur flou classique est composé d'une interface de fuzzification, une base de règles, un système d'inférence et une interface de défuzzification. La structure du contrôleur flou type-2 est similaire à celui classique avec la particularité de l'utilisation d'un réducteur de type pour convertir les ensembles flous type-2 à la sortie du système d'inférence en ensembles flous type-1 avant la phase de défuzzification. Ses différentes opérations sont illustrées sur la figure suivante [13] :

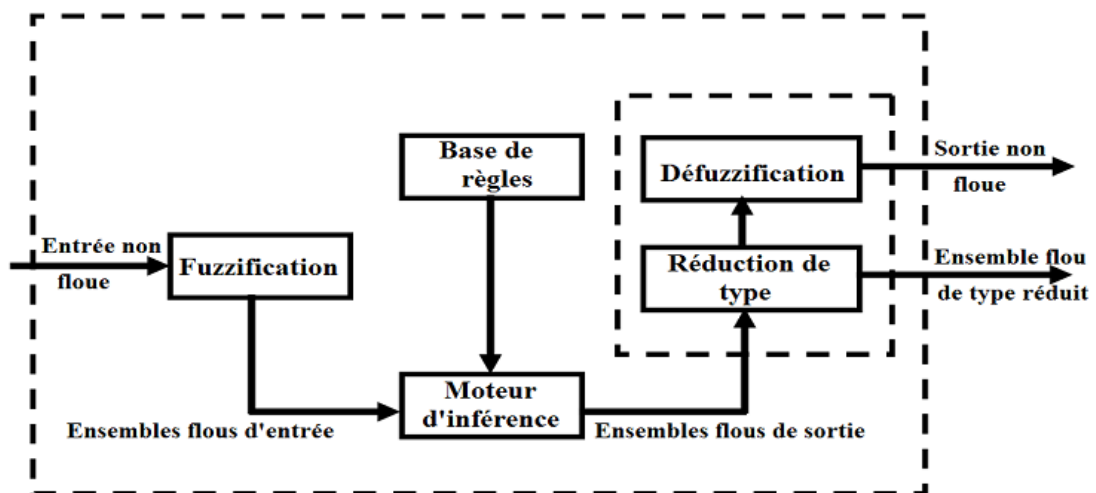


Figure III 8: Structure d'un contrôleur flou type-2.

III.4.3.3.1 Fuzzification

L'interface de fuzzification fait correspondre à l'entrée ordinaire

$$x = (x_1, \dots, x_n)^T \in X \equiv X_1 \times \dots \times X_n$$

Un ensemble flou type-2 \widetilde{A}_x qui est du type intervalle dans notre cas. Bien que différentes méthodes de fuzzification existent, nous nous intéressons à celle du type singleton définie comme suit [13] :

$$\begin{cases} \mu_{\widetilde{A}_x}(x) = 1/1 \text{ pour } x = x' \\ \mu_{\widetilde{A}_x}(x) = 1/0 \text{ pour } x \neq x' \end{cases} \quad \text{III.12}$$

Avec x' comme étant une valeur spécifique de l'entrée.

III.4.3.3.2 Base de règles

Si l'on désire faire une comparaison entre les règles d'un système de type-1 et celles d'un type-2, la différence résidera seulement dans la nature des fonctions d'appartenance, donc, la structure des règles dans le cas du type-2 va rester exactement la même que celle du type-1. La seule différence étant que quelques (ou toutes) les fonctions d'appartenance seront de type-2, alors, la $j^{\text{ème}}$ règle d'un système flou type-2 aura la forme [8], [14-16]:

$$R^j: \text{Si } x_1 \text{ est } \widetilde{F}_1^j \text{ et } x_2 \text{ est } \widetilde{F}_2^j \text{ et } \dots \text{ et } x_n \text{ est } \widetilde{F}_n^j \text{ Alors } y \text{ est } \widetilde{G}^j \quad \text{III.13}$$

Où $x_1 \in X_1, x_2 \in X_2, \dots, x_n \in X_n$ sont les entrées, les \widetilde{F}_i^j sont les ensembles flous des prémisses tels que $i = 1, 2, \dots, n$; $y \in Y$ est la sortie, et les \widetilde{G}^j sont les ensembles flous conséquents

A noter qu'il n'est pas nécessaire que toutes les fonctions d'appartenance des prémisses et des conséquences soient de type-2. Il suffit qu'une seule fonction d'appartenance dans une prémisse ou dans une conséquence le soit pour que tout le système soit de type-2.

III.4.3.3.3 Mécanisme d'inférence

Dans le cadre de ce rapport et pour des raisons de simplifications de calcul, seuls les ensembles flous type-2 intervalle sont employés.

Le système d'inférence dans un système flou type-2 utilise la base de règles floues pour effectuer une relation entre un vecteur d'entrée $\underline{x} = n(x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ et la sortie scalaire y .

La première étape dans l'opération d'inférence floue est le calcul de l'intervalle d'activation associé au $j^{\text{ème}}$ ensemble flou de sortie :

$$F(\underline{x}) = \prod_{i=1}^n \mu_{\tilde{F}_i^j} (x_i) \tag{III. 14}$$

$\mu_{\tilde{F}_i^j} (x_i)$ Est l'intervalle d'activation associé à la variable x_i .

Ensuite, si on note par \tilde{B}^l l'ensemble flou de sortie correspondant à la composition de la $l^{i\text{ème}}$ règle R^l et l'ensemble flou d'entrée \tilde{X}' , l'ensemble $F(\underline{x})$ est combiné avec l'ensemble flou conséquent \tilde{G} de la $l^{i\text{ème}}$ règle à l'aide de l'opérateur t-norme choisie \cap pour obtenir l'ensemble flou de sortie correspondant à la $l^{i\text{ème}}$ règle:

En utilisant une fuzzification singleton, c'est-à-dire le degré d'appartenance pour l'ensemble flou \tilde{X}' n'a une valeur qui est unitaire que lorsque $\underline{x} = \underline{x}'$ alors :

$$\mu_{\tilde{B}^l} (y) = \mu_{\tilde{G}^1} (y) \cap \prod_{i=1}^n \mu_{\tilde{F}_i^1} (x_i) \tag{III. 15}$$

Comme seulement les ensembles flous type-2 intervalle sont utilisés et l'opération t-norme produit est mise en œuvre, alors l'intervalle d'activation associé au $l^{i\text{ème}}$ ensemble flou de sortie est l'ensemble flou type-1 intervalle défini par :

$$F^j(\underline{x}) = [\underline{f}^j(\underline{x}), \overline{f}^j(\underline{x})] \tag{III. 16}$$

Où
$$\underline{f}^j(\underline{x}) = \underline{\mu}_{\tilde{F}_1^j}(x_1) * \underline{\mu}_{\tilde{F}_2^j}(x_2) * \dots * \underline{\mu}_{\tilde{F}_n^j}(x_n) \text{ et } \overline{f}^j(\underline{x}) = \overline{\mu}_{\tilde{F}_1^j}(x_1) * \overline{\mu}_{\tilde{F}_2^j}(x_2) * \dots * \overline{\mu}_{\tilde{F}_n^j}(x_n)$$

Les termes $\underline{\mu}_{\tilde{F}_i^j}(x_i)$ et $\overline{\mu}_{\tilde{F}_i^j}(x_i)$ sont respectivement des degrés d'appartenance inférieur et supérieur relatifs à $\mu_{\tilde{F}_i^j}(x_i)$.

III.4.3.3.5 Réduction de type

La réduction de type est proposée par Karnik et Mendel [9, 10, 14] s'appelle « réduction de type » puisque cette opération transforme un ensemble flou type2 de la sortie du moteur d'inférence à un ensemble type 1, et on appelle l'ensemble flou type-1 obtenu « ensemble de type réduit ».

La réduction de type prend en considération plus d'information au sujet des incertitudes des règles que la valeur défuzzifiée (un nombre). Cependant, cette opération nécessite des

calculs intensifs, à l'exception des SFT-2 types intervalle pour lesquels il existe une procédure simple pour la mise en œuvre de la réduction de type.

Parmi les méthodes de réduction de type utilisées on cite :

- La réduction de type par le centre de gravité.
- La réduction de type par la hauteur.
- La réduction de type par le centre des ensembles.

III.4.3.3.5 Défuzzification

A la fin de l'étape de la réduction de type, on obtient un EFT-1, type réduit, et puisque les entrées du système à commander sont des valeurs précises, alors il est nécessaire de transformer l'ensemble type réduit en une valeur numérique bien déterminée [14]. Parmi les méthodes utilisées pour la défuzzification, on cite la défuzzification par le centre de gravité.

La façon la plus naturelle de faire ceci est de trouver le centre de gravité de l'ensemble type réduit. Le calcul du centre de gravité est équivalent à trouver une moyenne pondérée des sorties de tous les ensembles flou type-1 imbriqués dans le système flou type-2, où les poids correspondent aux appartenances dans l'ensemble type réduit. Si l'ensemble type réduit Y , pour une entrée x , est discrétisé en N points, l'expression de son centre de gravité est :

$$C_Y(x) = \frac{\sum_{k=1}^N y_k u_Y(y_k)}{\sum_{k=1}^N u_Y(y_k)} \quad \text{III. 17}$$

Une fois le processus de réduction de type aura généré l'ensemble flou type-1 à partir de l'ensemble flou Type-2, le processus de défuzzification devient entièrement similaire à celui du FLC Type-1 et fera correspondre une valeur certaine à l'ensemble à ou Type-1 issu du processus de réduction de type.

III.4.4 Applications de la logique floue type-2

Dans ce cas, le contrôleur flou type-2 et le même que le contrôleur flou type-1 possède deux entrées, le signal erreur « e » et la variation de l'erreur « de » et une sortie correspondant à l'amplitude du courant de référence I_{smax} , la commande des interrupteurs est réalisé moyennant un contrôleur à hystérésis.

La figure. III-9, montre les fonctions d'appartenance utilisées dans la fuzzification [29]

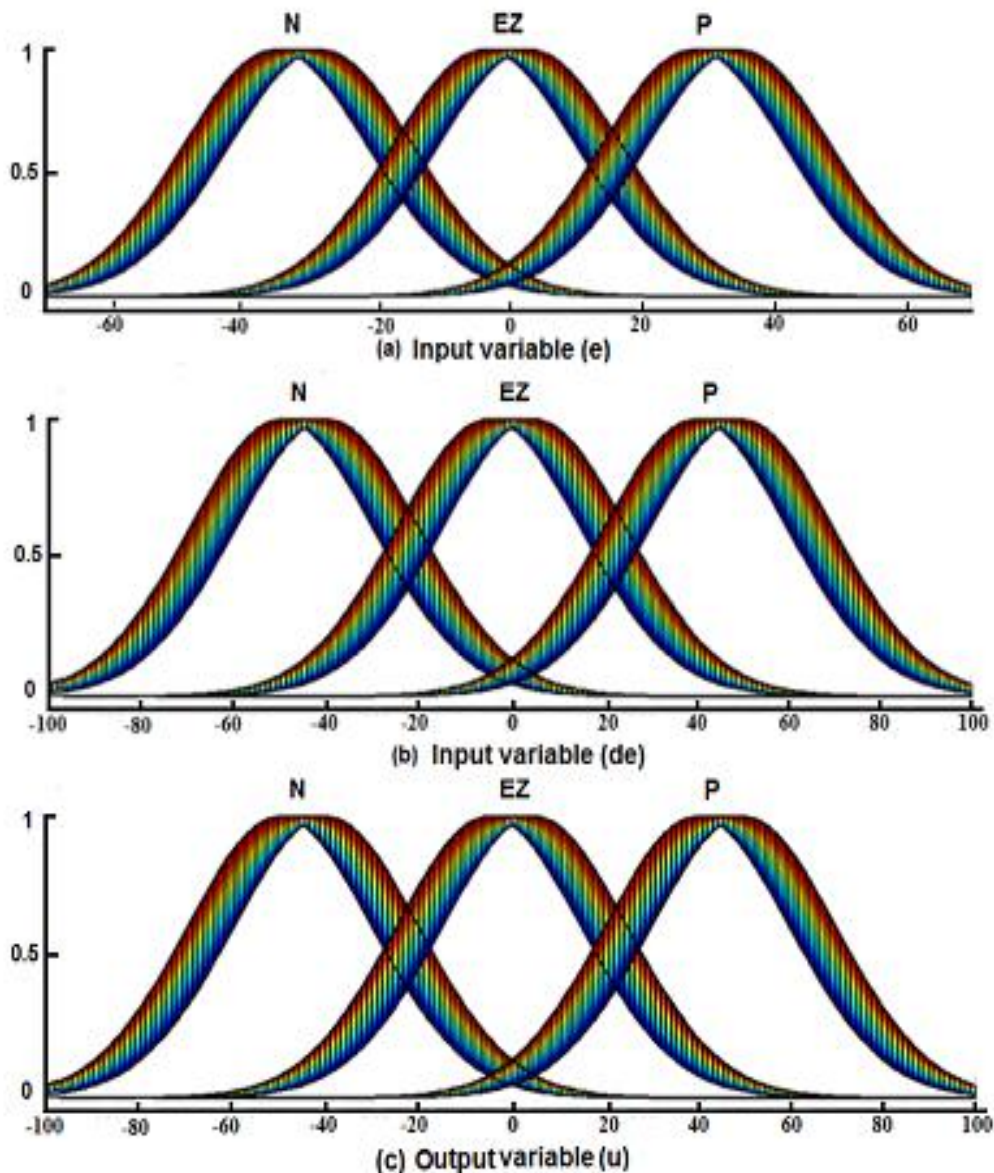


Figure III 9: Fonctions d'appartenances pour la logique floue type-2.

III.5 Commande hybride floue mode de glissement

Bien qu'un grand nombre de stratégies de commande aient été appliquées aux filtres actifs, la commande par mode de glissement s'avère une option de très haute performance. Le fait que le modèle dynamique d'un filtre actif soit variant dans le temps, rend la commande en mode de glissement très appropriée. La robustesse et la simplicité de l'implantation rendent la commande par le mode glissement fort intéressante.

Théoriquement, la commande commute entre deux valeurs à une fréquence infinie, alors que pratiquement ceci est impossible, le fait que le calcul de la commande se fait dans des intervalles de temps, on addition, la fréquence de commutation des interrupteur est bien limitée, ce qui traduit par des oscillations de hautes fréquences. Cela rend la trajectoire d'état tend à osciller au voisinage de la surface, au lieu de évoluer exactement le long de la surface. Le phénomène connu par phénomène de broutement (Chattering).

Ce phénomène est néfaste pour le bon fonctionnement du système, car il ajoute au spectre de la commande des composantes à hautes fréquences. Ces composantes peuvent détériorer le système en excitant les dynamiques négligées lors de la modélisation, ou encore endommager les actionneurs par des sollicitations trop fréquentes. Dans le but de réduire ou d'éliminer ce phénomène, de nombreuses études ont été effectuées. Parmi les solutions, et dans le but de réduire ce phénomène, on ajoutant une fonction d'intégrale pour réduire le gain k , ce qui va réduire, par conséquence, les oscillations.

Parmi les méthodes qui réduisent l'effet de la fonction *sign* dans une bande autour de la surface, nous trouvons la fonction *saturation* (*sat*) adéquate pour filtrer les hautes fréquences. Cette fonction est caractérisée par un ou deux seuils. Pour diminuer, progressivement, la valeur de U_s en fonction de l'approche de l'état vers la surface dans la région qui encadre cette dernière, la commande varie entre les deux valeurs limites $|\pm K|$.

Le contrôleur par mode de glissement est défini par la somme des deux commandes :

$$U = U_{eq} + U_s \quad \text{III. 18}$$

U_{eq} Pour but de maintenir la variable à contrôler sur la surface de glissement $\sigma = 0$ cette commande peut être considérée comme un retour d'état particulier, elle peut être aussi, considérée comme étant une valeur moyenne, lors de la commutation, entre deux valeur U_{min} et U_{max} , alors que U_s ait pour but de vérifier les conditions d'attractivité (convergence) en dépit de l'imprécision des paramètres de système.

Elle est donné par

$$U_s = K \text{ sat}(S(x, t)) \quad \text{III. 19}$$

Où *sat* est la fonction de saturation, dite commande douce à un seul seuil et elle est définie par:

$$\text{sat}(S(x, t)) = \begin{cases} S(x, t) & \text{si } |S(x, t)| < \phi \\ \text{sign}(S(x, t)) & \text{si } |S(x, t)| > \phi \end{cases} \quad \text{III. 20}$$

Avec ϕ : paramètre de valeur petite et positive

Lors de l'application de commande par mode de glissement, le paramètre k de la fonction discontinue cause un grand problème d'oscillation ('chattering') de la trajectoire autour de la surface de glissement, on peut ajouter une nouvelle technique qui va nous permettre de réduire le phénomène du 'chattering'. La structure que nous avons introduite dans le système de commande est basée sur la logique floue [28], elle consiste à contrôler le gain de la fonction discontinue en fonction de l'erreur et la dérivée de l'erreur.

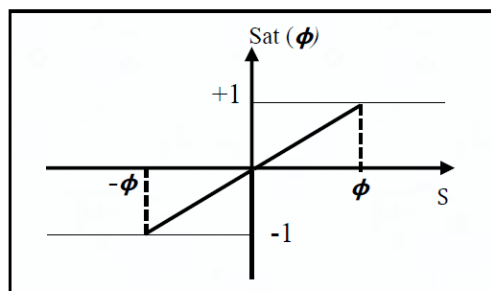


Figure III 10: Représentation de la commande douce à un seul seuil «sat».

III.6 Application de la commande hybride logique floue mode glissement

Dans ce cas, le contrôleur hybride flou mode glissement possède deux entrées, le signal erreur « e » et la variation de l'erreur « de » et une sortie correspondant à l'amplitude du courant de référence I_{smax} , la commande des interrupteurs est réalisée moyennant un contrôleur à hystérésis

L'amplitude du courant de source de référence est calculée à l'aide du contrôleur de mode de glissement au-dessus de la tension moyenne du bus de courant continu (V_{dc}) et sa valeur de référence (V_{ref}). L'erreur de la tension de bus V_{dc} au nième instant est:

$$V_e(n) = V_{ref}(n) - V_{dc}(n) = X_1 \quad \text{III. 21}$$

Et son dérivé est défini comme suit:

$$X_2 = X_1 = (V_e(n) - V_e(n-1))/T \quad \text{III. 22}$$

Où T est l'intervalle d'échantillonnage et X_1 et X_2 sont les variables d'état.

En la commande par mode de glissement, les valeurs des fonctions de commutation Y_1 et Y_2 sont définies comme suit:

$$\begin{aligned} Y_1 &= +1 \quad \text{si } ZX_1 > 0 \\ &= -1 \quad \text{si } ZX_1 < 0 \\ Y_2 &= +1 \quad \text{si } ZX_2 > 0 \\ &= -1 \quad \text{si } ZX_2 < 0 \end{aligned} \quad \text{III. 23}$$

Où Z est fonction de commutation hyperplane,

$$Z = C_1X_1 + C_2X_2 \quad \text{III. 24}$$

La sortie du SMC (U) est considérée comme l'amplitude du courant d'alimentation (I_m^*). Par conséquent, dans cette étude, l'amplitude du courant d'alimentation de référence est donnée ci-dessous:

$$U = C_3X_1Y_1 + C_4X_2Y_2 \quad \text{III. 25}$$

Où C_1, C_2, C_3 et C_4 sont des constantes de gain du mode de glissement manette.

Ces constantes de gain ont des roulements raisonnables la réponse dynamique du système. Le contrôle schéma est représenté sur la Fig. 11.

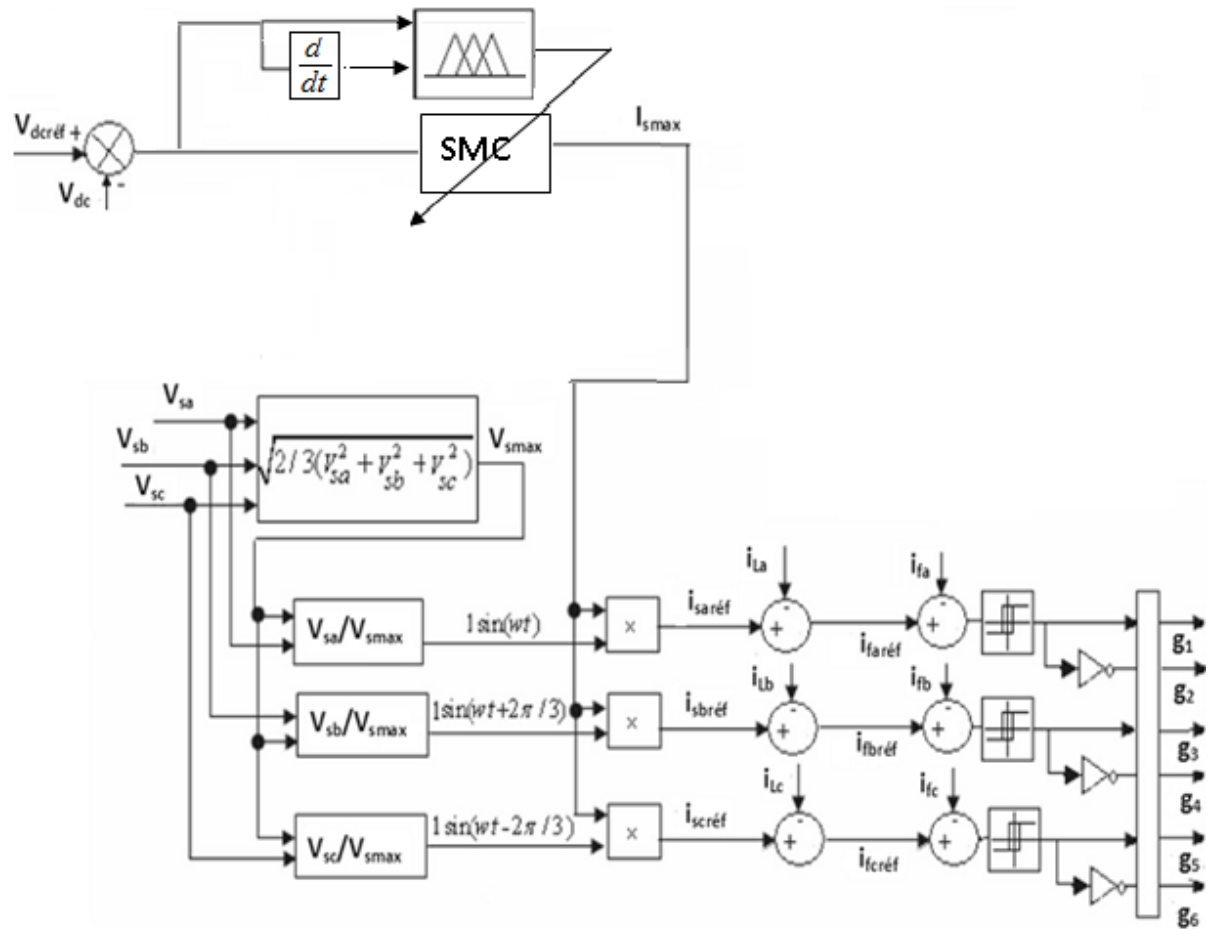


Figure III 11: Diagramme en bloc d'isolation d'harmoniques

La Figure. III-12, montre les fonctions d'appartenance utilisées dans fuzzification

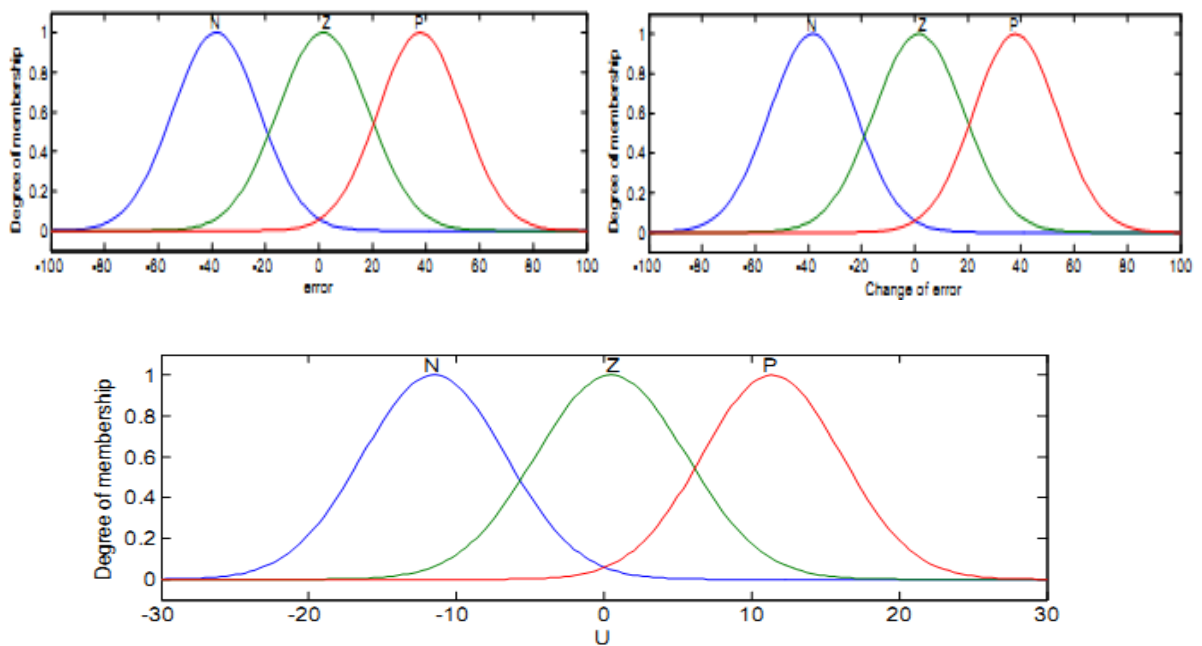


Figure III 12: Fonction d'appartenance des variables d'entrées et de sortie

III.7 Application de la commande hybride PI logique floue type 2

La commande hybride PI logique floue type 2 (IT2HFLC) est une combinaison en parallèle entre la commande IT2FLC et le régulateur PI.

Il en résulte un bon contrôle de la tension continue de la FAP. On peut constater que la THD distorsion harmonique passe de 23,74% à 2,8% après l'utilisation du filtre actif.

La figure (III.13), montre le schéma bloc d'un contrôleur hybride PI FLC type-2, qui peut être utilisé pour le réglage de la tension V_{dc} [25]

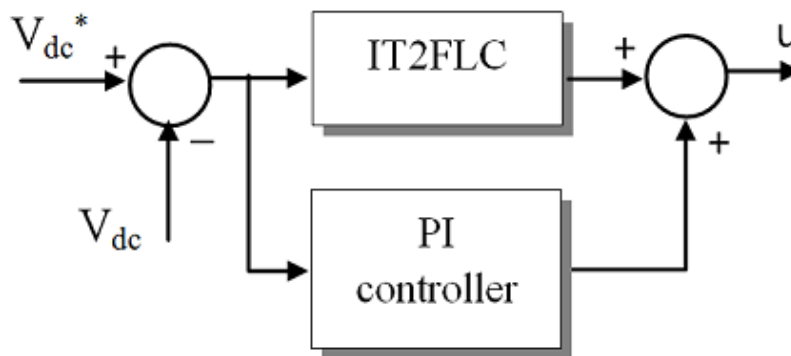


Figure III 13: structure d'un contrôleur hybride PI FLC type-2 pour la tension V_{dc}

III.8 Résultats de simulation

Dans ce paragraphe, nous allons présenter les résultats de simulation obtenus à l'aide du logiciel Matlab/Simulink en utilisant également le Toolbox « SimPowerSystem ».

Le système simulé comporte un réseau électrique triphasé à trois fils, une charge non linéaire triphasée et un filtre actif parallèle triphasé à structure de tension.

Pour la commande du filtre actif, nous avons utilisé la synchrone détection méthode, la méthode des courants indirectes et la méthode des puissances instantanées pour identifier les courants de référence. Le FMV ayant été introduit dans l'algorithme de commande au lieu des filtres d'extraction classiques.

La structure générale du système étudié est décrite auparavant. Les valeurs des éléments caractérisant cette structure ont été regroupées dans le Tableau ci-dessous (III-2) :

Tableau III 3: Paramètre de système étudié

Réseau électrique
$V_s = 220 V, f = 50 \text{ Hz}, (R_s = 0.25 \text{ m}\Omega, L_s = 19.4 \text{ }\mu\text{H})$
Charge polluante
$R_{ch} = 0.5 \Omega, L_{ch} = 3 \text{ mH}, R_c = 1.2 \text{ m}\Omega, L_c = 50 \text{ }\mu\text{H}$
Filtre parallèle
$V_{dc} = 700 V, C_{dc} = 0.22 \text{ mF}, (R_f = 5 \text{ m}\Omega, L_f = 150 \text{ }\mu\text{H})$

III.8.1 Résultats de Simulation sans filtrage

Les figures (III.14, III.15 et III.16) montrent respectivement l'allure de : la tension de charge, le courant de source et le spectre du courant de source.

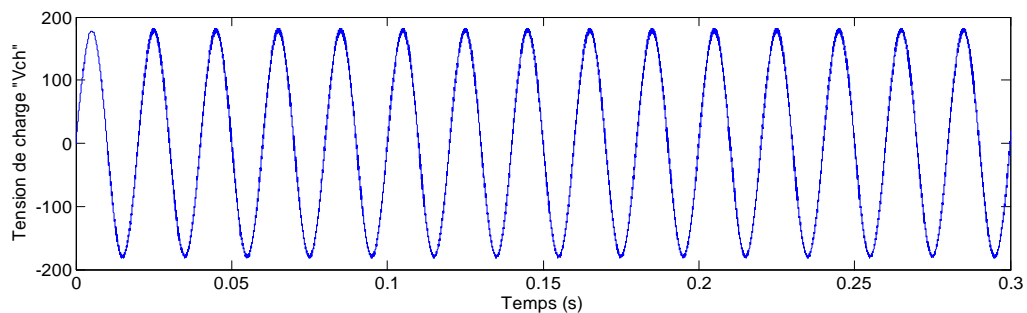


Figure III 14: Tension de charge de la phase a (Va)

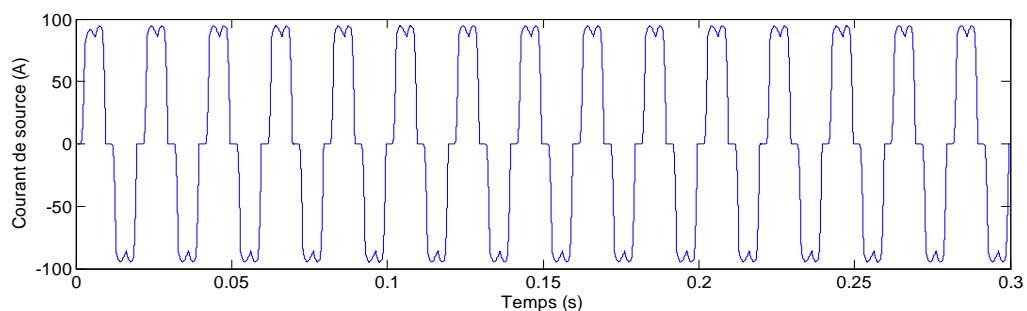


Figure III 15: Courant de source de la phase a (Ia)

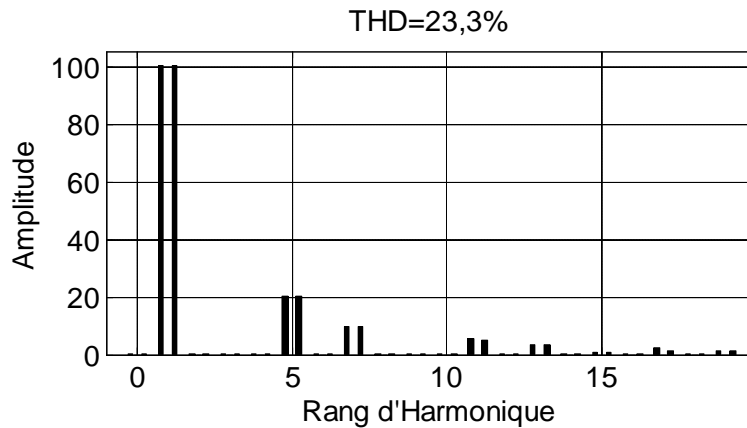


Figure III 16: Spectre de courant de source.

D'après ces résultats, nous constatons que le courant du réseau i_s est loin d'être sinusoïdal, car il est riche en harmoniques d'ordre impair et non multiples de trois, générés par la charge non linéaire avec un taux de distorsion de 23.3%. Il est identique au courant de charge, bien que la tension V_s qui l'alimente soit sinusoïdale. Par conséquent, la puissance réactive consommée par cette charge non linéaire est importante et le facteur de puissance est inférieur à un (1).

III.8.2 Résultat de simulation avec le filtrage

III.8.2.1 La Commande Classique

III.8.2.1.1 Commande par méthode SDM

Les figures (III.17, III.18, III.19, III.20) montrent respectivement l'allure du courant de la source I_{sa} , le spectre du courant de source, le courant du filtre et la tension V_{dc} avec l'utilisation du filtrage actif en utilisant l'extraction des courants harmoniques basée sur la méthode de SDM et en utilisant le régulateur PI pour contrôler la tension.

On peut constater que la tension du bus continu V_{dc} suit sa référence avec une dynamique très rapide et avec un dépassement qui vaut 1.2%.

Le taux d'harmonique en courant est diminué d'une valeur de 23.33% à une valeur de 3.7%.

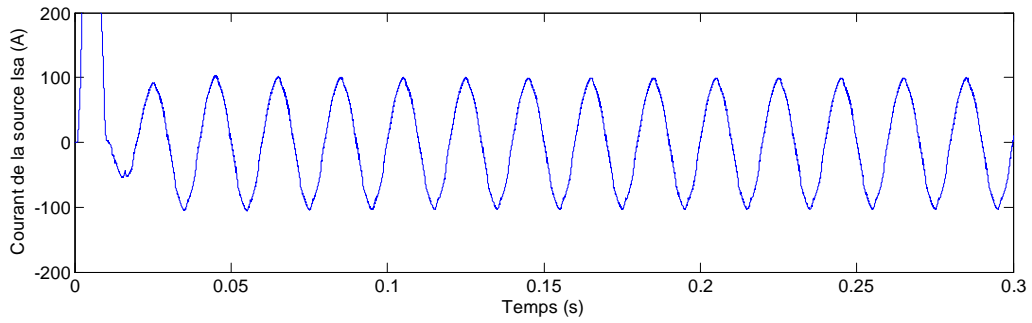


Figure III 17: Courant de source Isa après filtrage

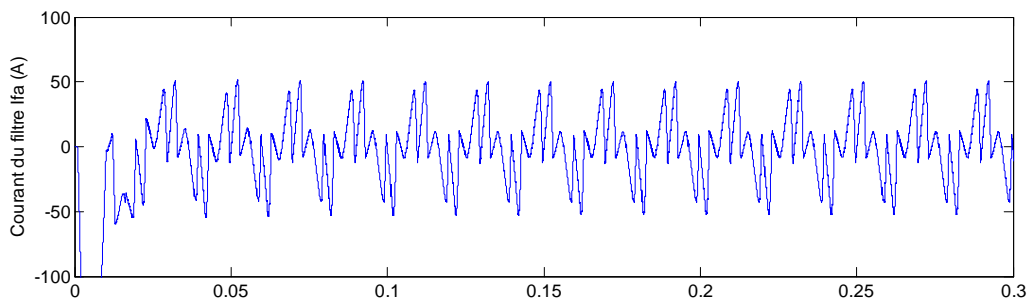


Figure III 18: Courant injecté par le filtre Ifa

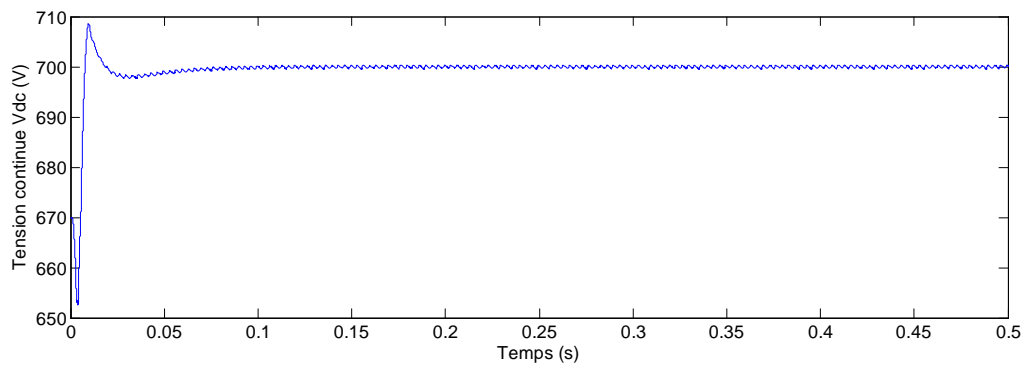


Figure III 19: La tension V_{dc} du condensateur

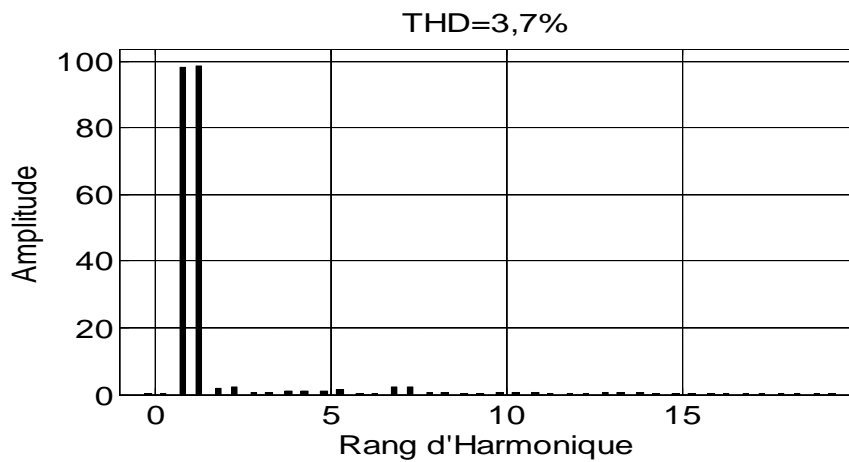


Figure III 20: Spectre de courant de la source

III.8.2.1.2 Commande par méthode pq

Les figures (III.21, III.22, III.23, III.24) montrent respectivement l'allure du courant de la source I_{sa} , le spectre du courant de source, le courant du filtre et la tension V_{dc} avec l'utilisation du filtrage actif en utilisant la méthode de la puissance instantanée traditionnelle en utilisant l'identification des courants de référence et en utilisant le régulateur PI pour contrôler la tension continue.

On peut remarquer que la méthode pq donne un THD qui vaut 3.22%, ce qui montre l'amélioration de la qualité du courant par cette méthode comparativement à la méthode précédente (SDM).

En ce qui concerne le réglage de la tension continue, on peut bien remarquer l'amélioration de la réponse transitoire avec un dépassement nul.

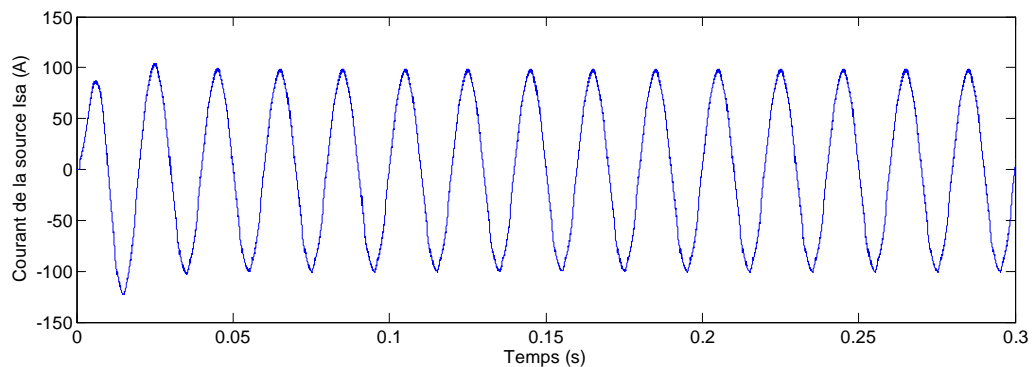


Figure III 21: Courant de source I_{sa} après filtrage

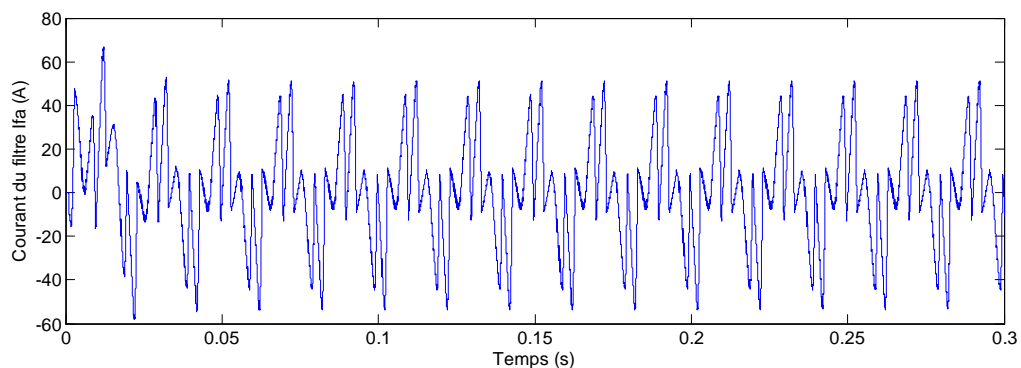


Figure III 22: Courant injecté par le filtre I_{fa}

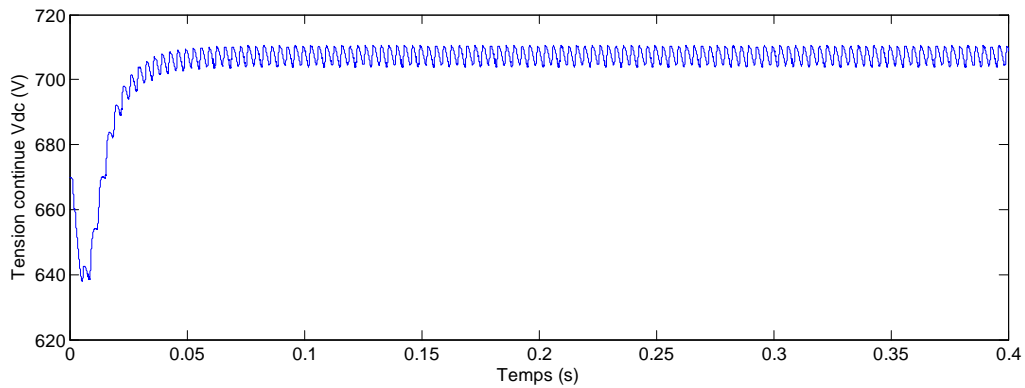
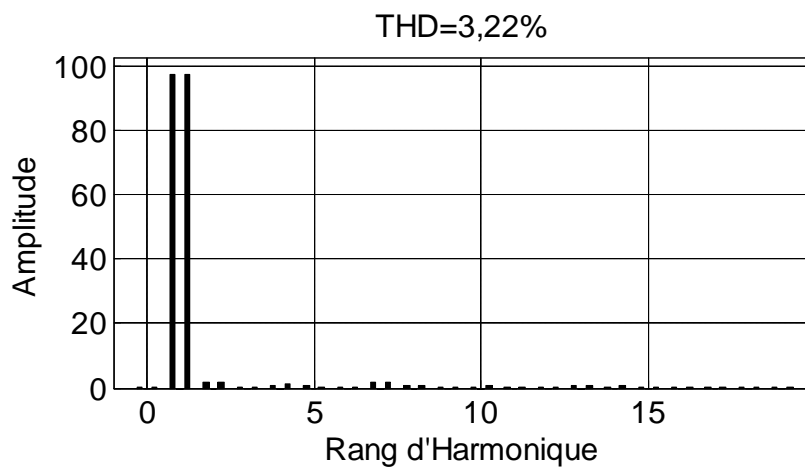
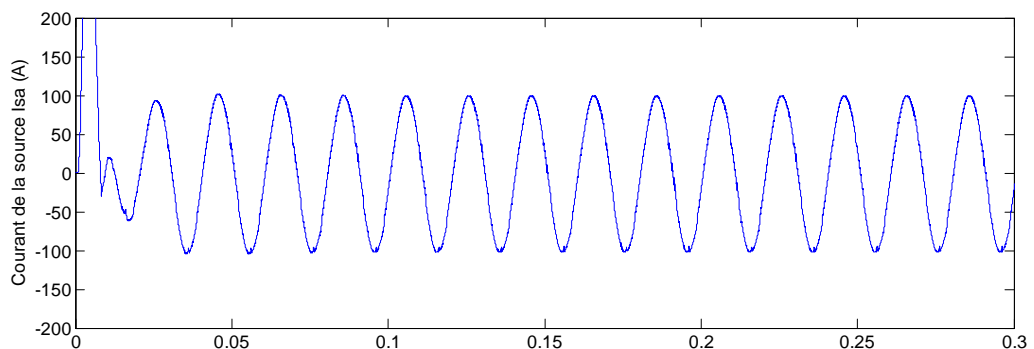
Figure III 23: La tension V_{dc} du condensateur

Figure III 24: Spectre de courant de la source

III.8.2.1.3 Commande par méthode FMV

Les figures (III.25, III.26, III.27, III.28) montrent respectivement l'allure du courant de la source I_{sa} , le spectre du courant de source, le courant du filtre et la tension V_{dc} avec l'utilisation du filtrage actif en utilisant la méthode FMV pour l'identification harmonique et avec le régulateur PI pour contrôler la tension continue.

Figure III 25: Courant de source I_{sa} après filtrage

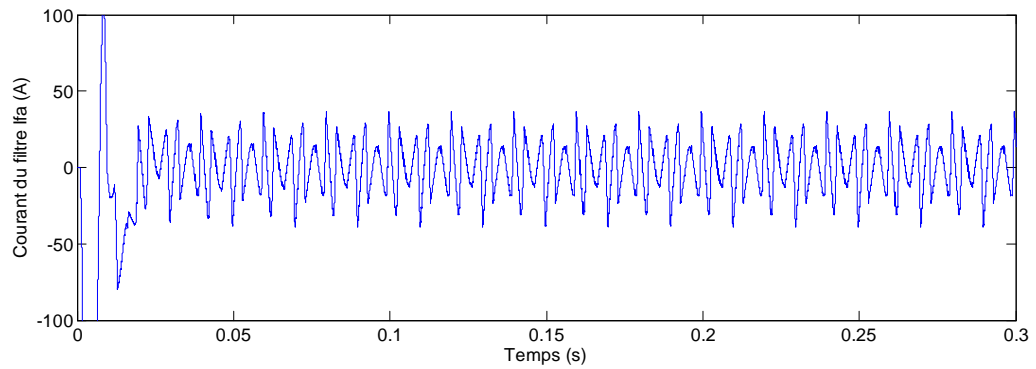


Figure III 26: Courant injecté par le filtre Ifa

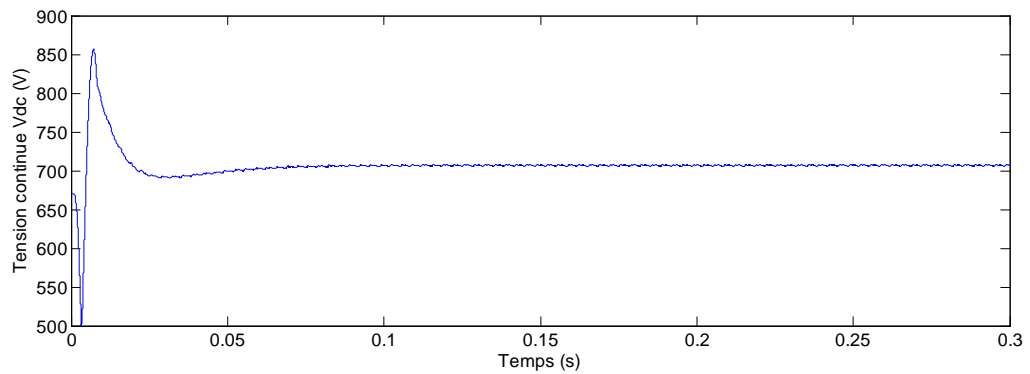
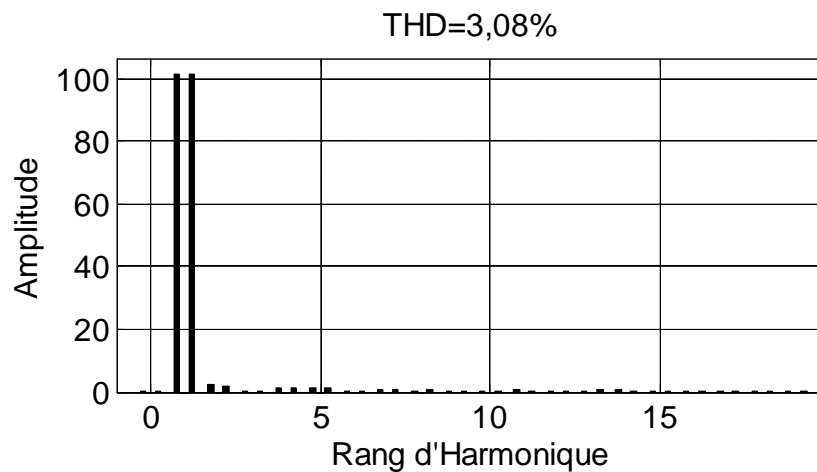
Figure III 27: La tension V_{dc} du condensateur

Figure III 28: Spectre de courant de la source

On note une amélioration remarquable du courant de la source, son spectre montre un THD d'une valeur de 3.08% qui est bien inférieur au 5% imposé par la norme IEEE, donc on peut conclure que notre courant I_{sa} a bien été dépollué à un niveau satisfaisant. Nous

remarquons aussi que la tension V_{dc} à la borne du condensateur suit sa référence mais cette fois avec un grand dépassement qui vaut 15%.

III.8.2.1.4 Commande par la méthode du courant indirect

Les figures (III.29, III.30, III.31, III.32) illustrent respectivement l'allure du courant de la source I_{sa} , le spectre du courant de source, le courant du filtre et la tension V_{dc} avec l'utilisation du filtrage actif en utilisant la méthode du courant indirect pour l'identification harmonique et avec toujours le régulateur PI pour le réglage de la tension continue.

On peut constater d'après ces résultats, que cette méthode donne un THD qui est supérieur à celui obtenu par les trois méthodes précédentes avec une valeur de 3.4%.

La régulation de la tension continue présente une bonne dynamique avec un dépassement de 1%.

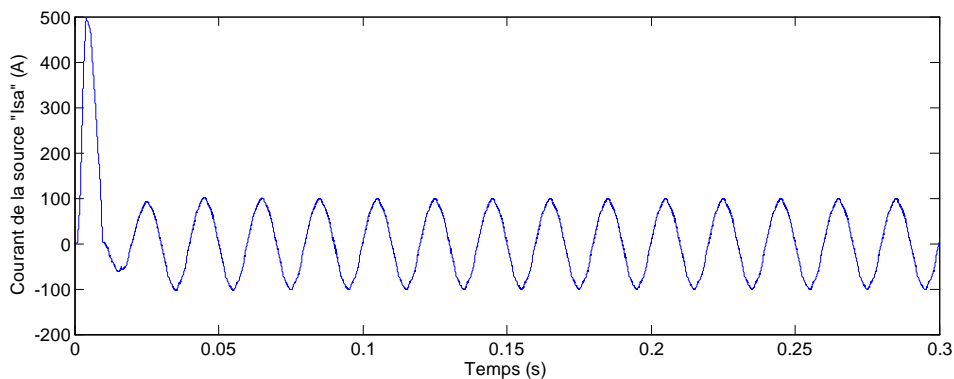


Figure III 29: Courant de source I_{sa} après filtrage

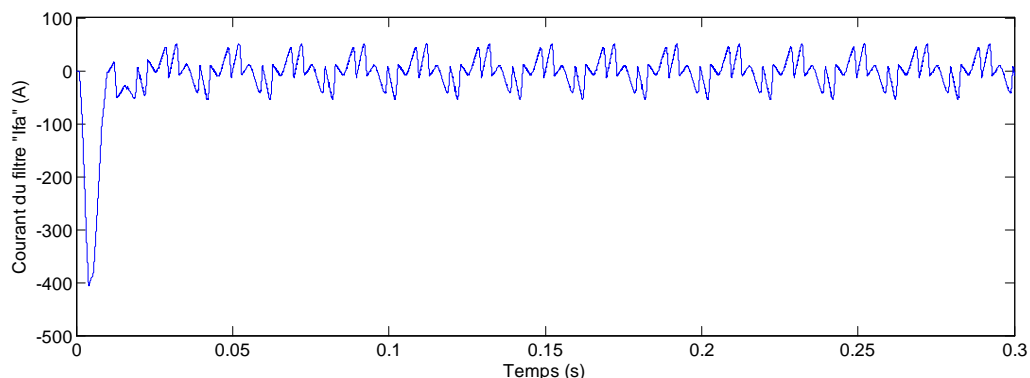


Figure III 30: Courant injecté par le filtre I_{fa}

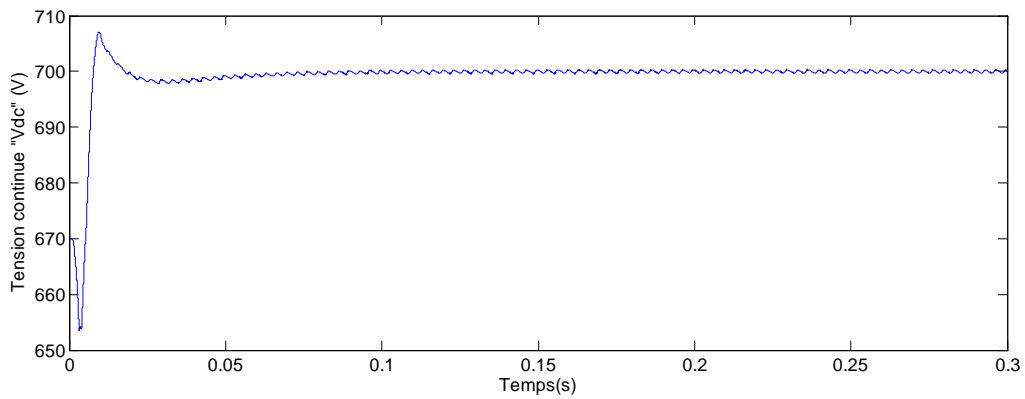


Figure III 31:La tension V_{dc} du condensateur

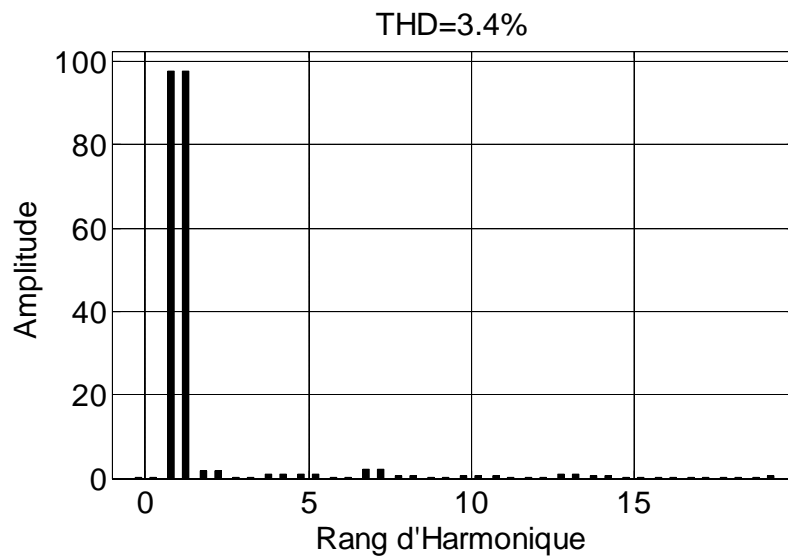


Figure III 32:Spectre de courant de la source

Concernant les résultats de simulation du système complet, le tableau suivant les résume pour les quatre méthodes d'identification étudiées précédemment :

Tableau III 4: Récapitulatif des résultats

THD sans filtre		23,3%
THD après compensation	(SDM)	3,7%
	(Commande pq theory)	3,22%
	(FMV)	3,08%
	(courant indirect)	3,4%

D'après les résultats obtenus avec les quatre méthodes d'identifications des courants de référence et avec le même régulateur PI pour la tension continue, on peut conclure que le filtre actif permet de réduire considérablement le contenu harmonique du courant de

source, ce qui se traduit par la diminution du THD après le filtrage en dessous de 5% exigé par la norme CEI, avec une réduction importante du courant du neutre.

Une étude comparative montre que le régulateur PI pour la régulation de la tension continue est presque donne une bonne dynamique avec les quatre méthodes. Néanmoins une différence se situe dans le dépassement.

III.8.2.2 Application des techniques intelligentes à la commande du FAP

III.8.2.2.1 La Commande Flou type-1

Les figures (III.33, III.34, III.35, III.36) illustrent respectivement l'allure du courant de la source I_{sa} , le spectre du courant de source, le courant du filtre et la tension V_{dc} avec l'utilisation du filtrage actif en utilisant la méthode du courant indirect pour l'identification harmonique et avec la commande floue type-1 pour le réglage de la tension continue.

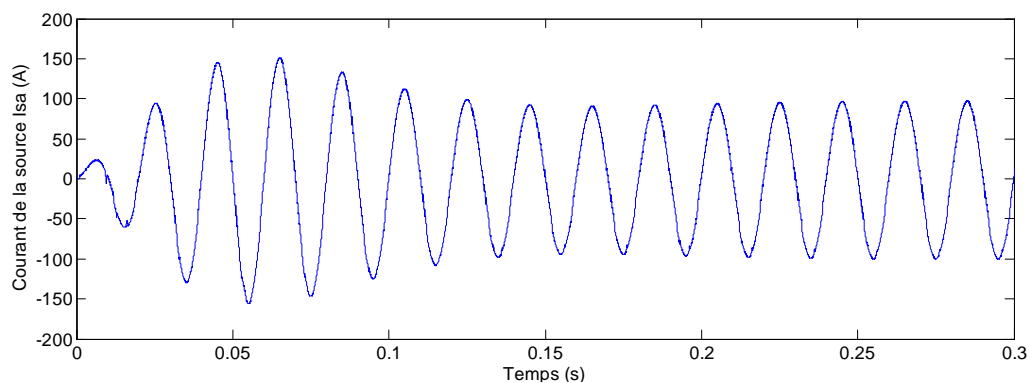


Figure III 33: Courant de source I_{sa} après filtrage

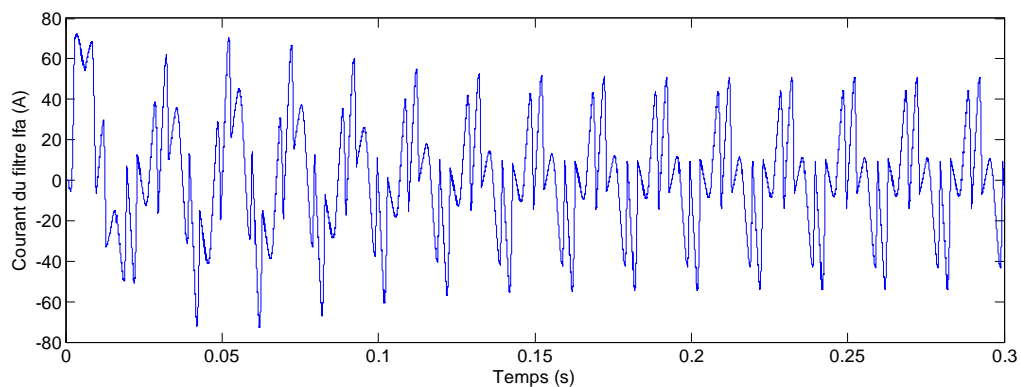


Figure III 34: Courant injecté par le filtre I_{fa}

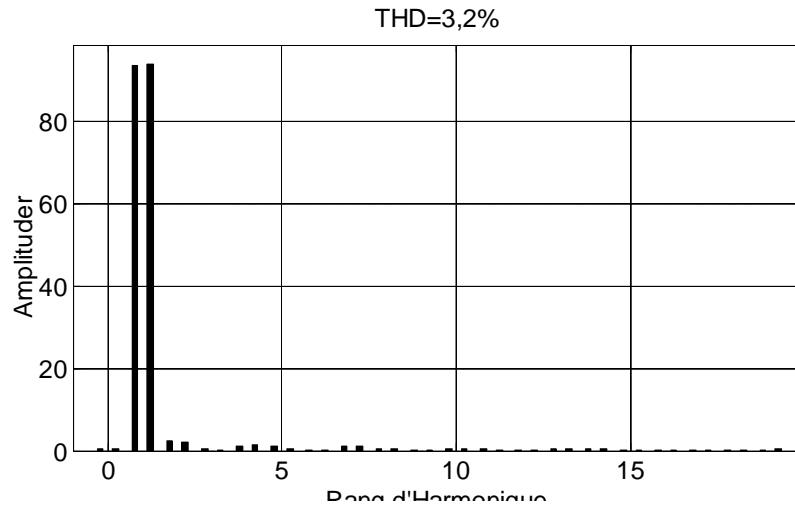
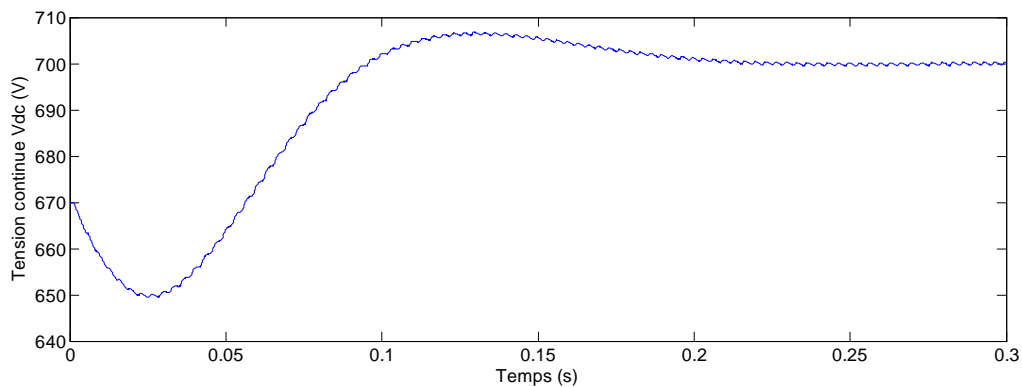


Figure III 35: Spectre de courant de la source

Figure III 36: La tension V_{dc} du condensateur

On peut remarquer que le THD par cette méthode est toujours inférieur à 5% et on peut constater que la logique flou type-1 donne une bonne dynamique mais avec un temps un peu lent par rapport au régulateur PI.

III.8.2.2.2 La Commande Flou type-2

Les figures (III.34, III.35, III.36, III.37) illustrent respectivement l'allure du courant de la source I_{sa} , le spectre du courant de source, le courant du filtre et la tension V_{dc} avec l'utilisation du filtrage actif en utilisant la méthode du courant indirect pour l'identification harmonique et avec la commande floue type-2 pour le réglage de la tension continue.

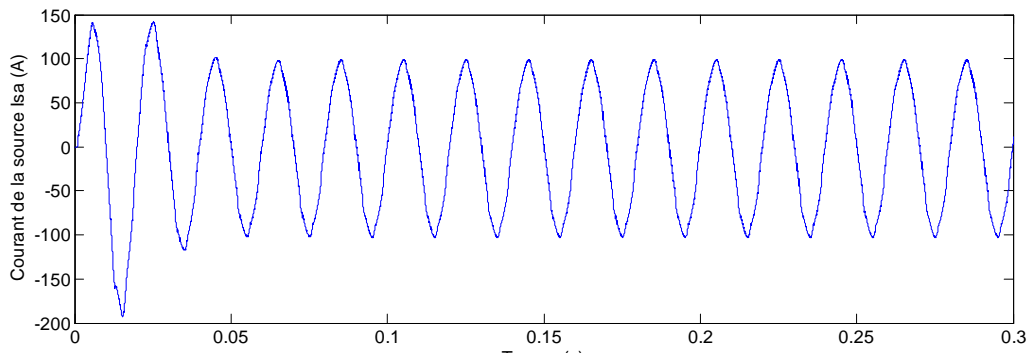


Figure III 37: Courant de source Isa après filtrage

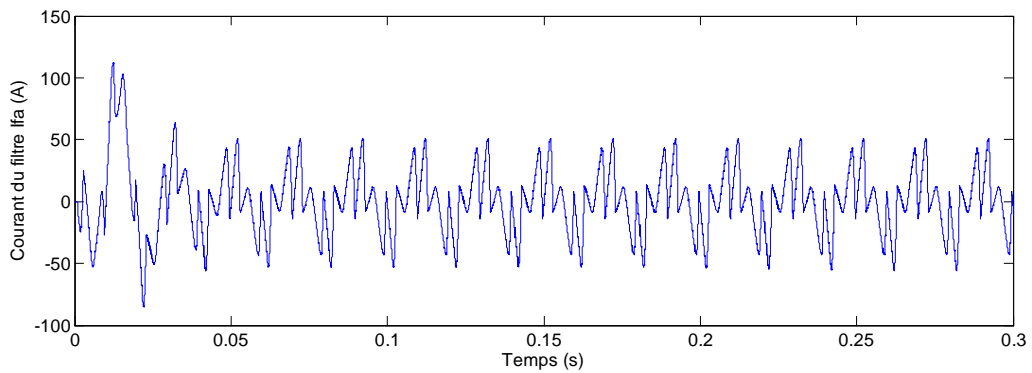


Figure III 38: Courant injecté par le filtre Ifa

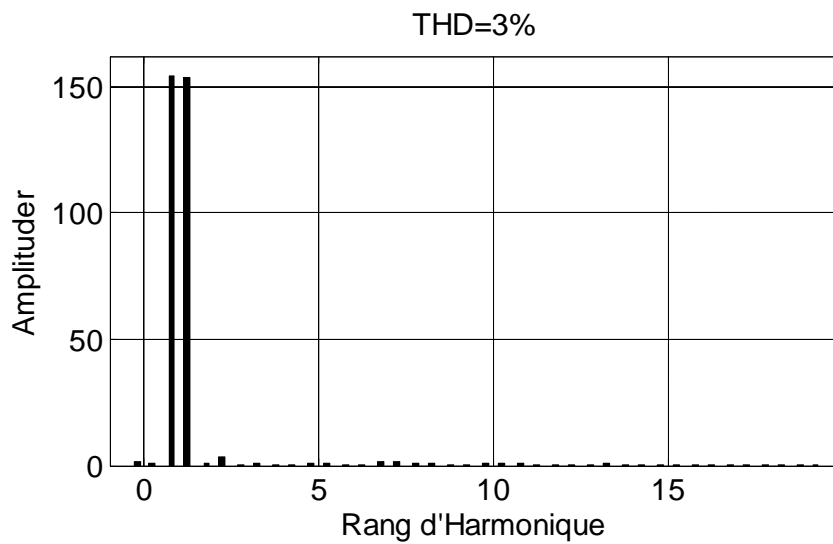


Figure III 39: Spectre de courant de la source

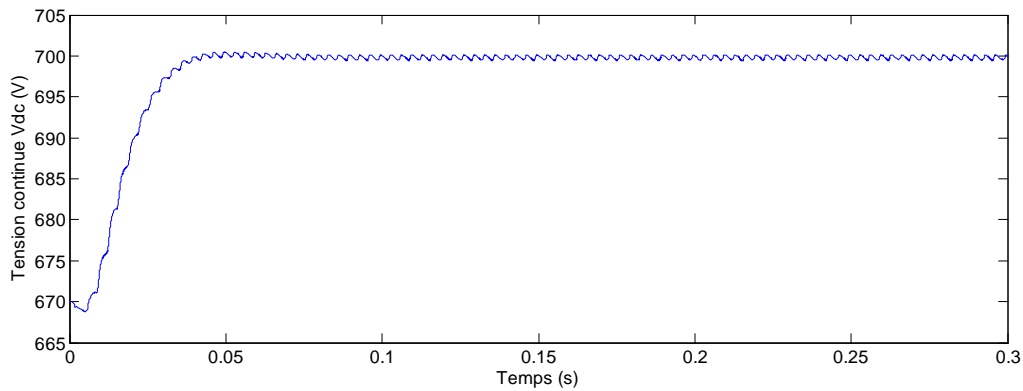


Figure III 40: La tension V_{dc} du condensateur

On peut constater une amélioration de la qualité du courant avec un THD de 3% qui est inférieur à celui obtenu dans le cas du régulateur flou type-2 et on peut remarquer une bonne dynamique avec un temps de réponse très rapide pour le réglage de la tension continue.

III.8.2.2.3 La Commande hybride logique floue mode glissement.

Nous présentons ici les résultats de simulation obtenus pour le schéma de synchrone détection méthode par commande hybride logique floue mode glissement.

La figure (III.40) représente le courant filtré de la source. Le spectre harmonique du courant de la source représenté par la figure (III.42) le THD obtenu est de 3% montre que le THD est proportionnel à la qualité de réponse du tension aux bornes du condensateur.

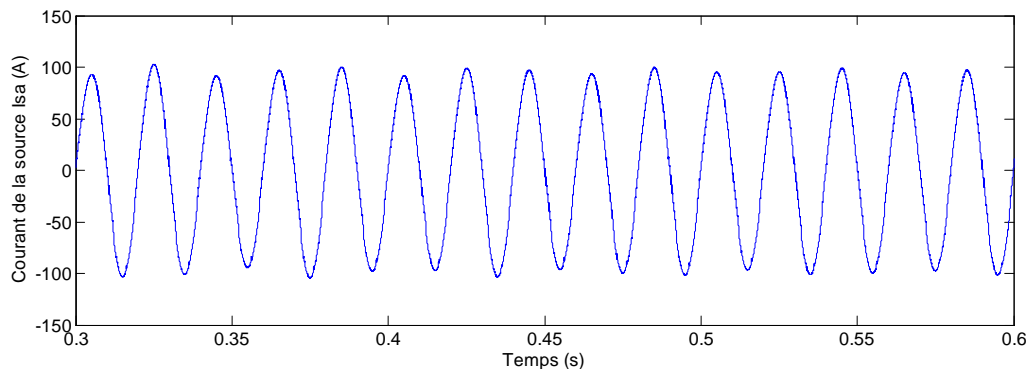


Figure III 41: Courant de source I_{sa} après filtrage

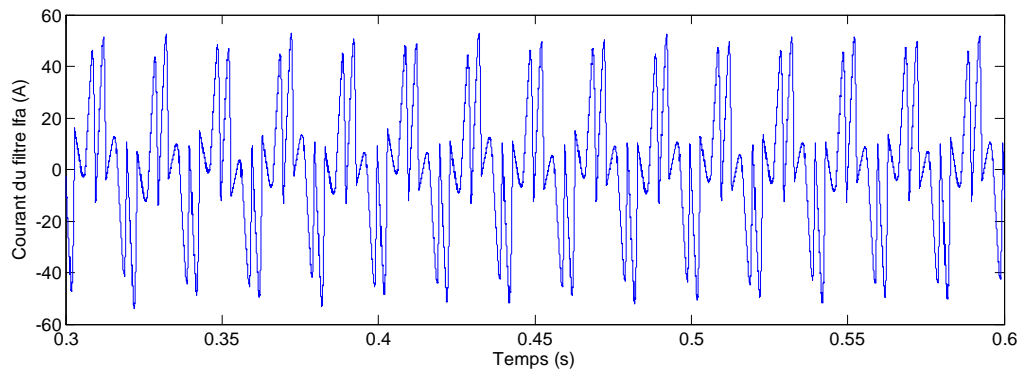


Figure III 42: Courant injecté par le filtre Ifa

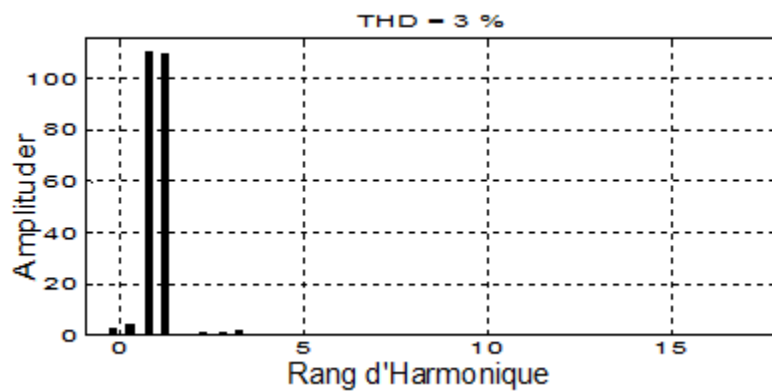
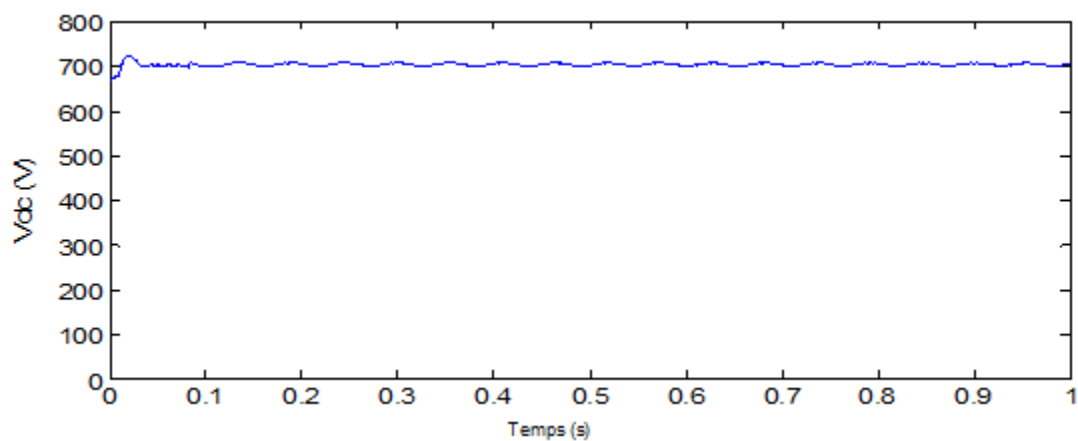


Figure III 43: Spectre de courant de la source

Figure III 44: La tension V_{dc} du condensateur

III.8.2.2.4 La Commande hybride PI FLC type-2

Dans ce paragraphe, nous allons présenter les résultats de simulation d'une commande synchrone détection méthode par commande hybride PI FLC type-2.

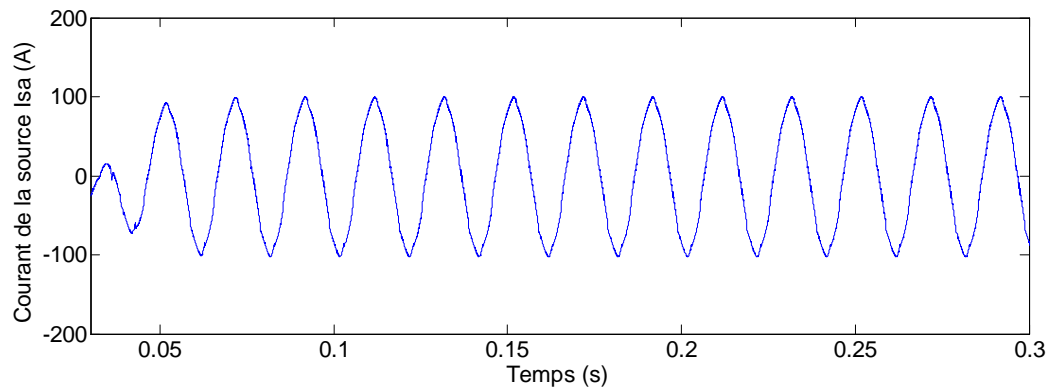


Figure III 45: Courant de source Isa après filtrage

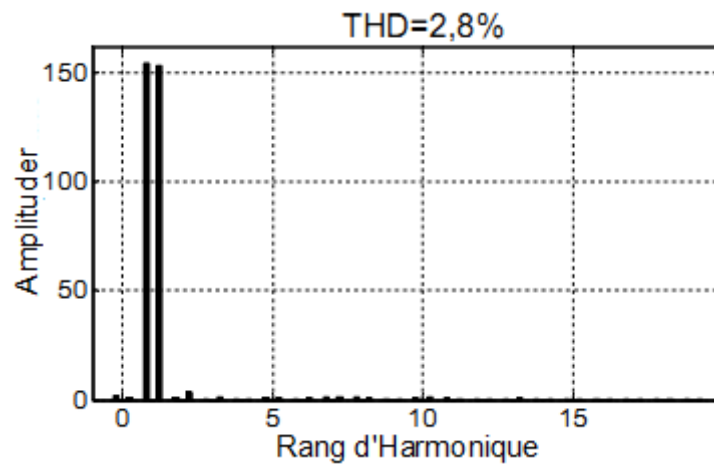
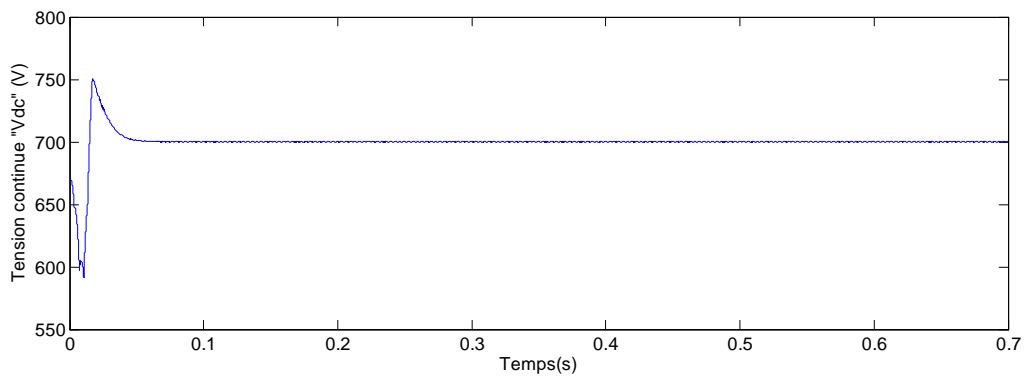


Figure III 46: Spectre de courant de la source

Figure III 47: La tension V_{dc} du condensateur

L'amélioration de la qualité de filtrage, constaté visuellement par l'allure sinusoïdale du courant de la source isa après le filtrage (figure **III.45**) et l'analyse spectrale qui présente un THD de 2.8% à cause de l'amélioration de réponse de tension aux bornes du condensateurs suit parfaitement sa référence.

III.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié quatre (04) méthodes pour l'identification des courants harmoniques, la synchrone détection méthode, la méthode des puissances instantanées, le FMV (introduit dans l'algorithme de commande au lieu des filtres d'extraction classiques) et la méthode de courant indirect.

La régulation de la tension aux bornes du condensateur à l'entrée de l'onduleur s'effectue par ajustement de l'amplitude des références des courants prélevés pour contrôler le transit de puissance active entre le réseau et le bus continu. L'option la plus commune pour le contrôle de cette boucle consiste à utiliser un correcteur PI. Bien que, pour améliorer les performances du filtre, un correcteur flou et un correcteur hybride ont été étudiés.

Les résultats obtenus avec régulateur de tension PI et avec différentes techniques d'identification ont permis de réduire considérablement le contenu harmonique du courant de source, ce qui se traduit par la diminution du THD (après le filtrage on note bien que c'est en dessous de 5%), et on remarque que le THD obtenu par la méthode de puissance instantanée classique avec FPB est supérieur à celui de THD obtenu par la méthode de puissance instantanées utilisant des FMVs et par la méthode référentiel synchrone.

Enfin, dans le but d'améliorer les performances des commandes des filtres actifs parallèles, nous avons introduit un outil intelligent pour le réglage de la tension du bus continu du FAP. Quatre types de commande, commande flou type-1, commande flou type-2, commande hybride flou mode glissement et une commande hybride PI flou type-2.

On a vu que les quatre commandes présentent une poursuite très satisfaisante de la référence et une très bonne maîtrise du régime dynamique grâce aux avantages de la logique floue et le mode glissement. D'après ces résultats, on peut conclure que l'exploitation de la technique intelligente dans la commande du filtre actif parallèle améliore remarquablement ces performances et donne de bons résultats en termes de THD.

III.10 Bibliographie

- [1] M. A. E. Alali , « Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension (Automatisation des systèmes de puissance électriques)», Thèse ULP strasbourg Septembre 2002.
- [2] Ould Abdesalam Djaffar, « Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : Application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension»,Thèse de Doctorat en génie électrique, Université de Haute-Alsace, (France) 2005.
- [3] S. Round, H. Laird, R. Duke, & C. Tuck, « An improved three-level shunt active filter»,Proc. Intern. Conf. Power Electronic Drives & Energy Systems for Industrial Growth, vol. 1, pp. 87–92, 1-3 December 1998.
- [4] L.A. Zadeh, «The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning», I, *Inf. Sci.*, vol. 8, no. 3, 1975, pp. 199-249.
- [5] J. Faucher, «Les plans d'expériences pour le réglage de commandes à base de logique floue»,Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse (INPT), Toulouse, 2006.
- [6] S.Saad, L. Zellouma, « Fuzzy logic controller for three-level shunt active filter compensating harmonics and reactive power», *Electric Power Systems Research* vol. 79, n° 10, p. 1337-1341. 2009.
- [7] S.K.Jain, P.Agrawal and H.O.Gupta, «Fuzzy Logic controlled shunt active power filter for power quality improvement», *IEE proceedings in Electrical Power Applications*, Vol 149, No.5, September 2002.
- [8] G. K. Singh, A. K. Singh, R. Mitra, «A simple fuzzy logic based robust active power filter for harmonics minimization under random load variation»,*Electr Power SystReseach*, 77:1101-1111, 2007.
- [9] Q.L. Liang, J.M. Mendel, « Interval type-2 fuzzy logic systems: theory and design»,*IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 8, no. 5, Oct. 2000, pp. 535-550.
- [10] J.M. Mendel, R. John, F. Liu, « Interval type-2 fuzzy logic systems made simple»,*IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 14, no. 6, Dec. 2006, pp. 808-821.
- [11] O. Castillo, P. Melin, « A review on interval type-2 fuzzy logic applications in intelligent control»,*Inf. Sci.*, vol. 279, no. 20, Sept. 2014, pp. 615-631.
- [12] M.B. Özek, Z.H. Akpolat, « A software tool: type-2 fuzzy logic toolbox», *Comput. Appl. in Eng. Educ.*, vol. 16, no. 2, 2008, pp. 137-146.
- [13] J.M. Mendel, R. I. B. John, « Type-2 fuzzy sets made simple»,*IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 10, no.2, Apr. 2002, pp. 117-127.
- [14] N.N. Karnik, J.M. Mendel, Q. Liang,« Type-2 fuzzy logic systems», *IEEE Trans Fuzzy Syst.*, vol. 7, no. 6, Dec. 1999, pp. 643-658.
- [15] J.M. Mendel, R. I. B. John,« Type-2 fuzzy sets made simple»,*IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 10, no.2, Apr. 2002, pp. 117-127.
- [16] A. El Oughli,« Intégration des techniques floues à la synthèse de contrôleurs adaptatifs», Thèse de Doctorat, Université de Fès, 2009.
- [17] M. Manceur, « Commande robuste des systèmes non linéaires complexes», Thèse de Doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, 2012.
- [18] Kouadria, M.A., Allaoui, T., Belfedal C. « A fuzzy logic controller of three phase shunt active filter for harmonic current compensation», *International Journal of Advances in Engineering & Technology* 7.1 (2014): 82.
- [19] A Bouafia, « Techniques de commande prédictive et floue pour les systèmes d'électronique de puissance: application aux redresseurs à MLI», Thèse de doctorat en sciences, Université Ferhat Abbas Sétif (UFAS), Algérie, 06 Octobre 2010
- [20] N. Belhaouchet, « Fonctionnement a fréquence de commutation constante des convertisseurs de puissance en utilisant des techniques de commande avancées application : amélioration de la qualité de l'énergie», thèse de doctorat en sciences, Université Ferhat Abbas Sétif, Algérie, 2011.
- [21] G.Segier « Perturbations harmoniques : Effets, origine, mesures, diagnostic, remède », Dunod, Paris 2000.
- [22] H. Mendalek « Qualité de l'onde électrique et moyens de mitigation», Thèse doctorat, Ecole de technologie supérieure, Université du Québec 2003.

- [23] S. Karimi ,« Continuité de service des convertisseurs triphasés de puissance et prototypage "FPGA in the loop": application au filtre actif parallèle », Thèse Doctorat. Université Nancy-I 2009.
- [24] G.Segier « Perturbations harmoniques : Effets, origine, mesures, diagnostic, remède », Dunod, Paris 2000.
- [25] M. George, K-P. Basu «Modeling and Control of Three-Phase Shunt Active Power Filter», American Journal of Applied Sciences 5 (8): 1064-1070, 2008.
- [26] H. Akagi, E. H.Watanabe, andM. Aredes, «Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning», John Wiley Sons, Inc., New Jersey, 2007.
- [27] Kouadria, M.A., Allaoui, T., Denai, M.« High performance shunt active power filter design based on fuzzyinterval type-2 control strategies». Int. Rev. Autom. Control (I.RE.A.CO.) 8(5), 322 (2015)
- [28] Kouadria, M. A., Allaoui, T., Denai, M. (2016).« A hybrid fuzzy sliding-mode control for a three-phase shunt active power filter», Energy Systems, 1-12.
- [29] Kouadria, M. A., Allaoui, T., Denai, M., Pissanidis, G«Grid power quality enhancement using fuzzy control-based shunt active filtering», In : SAI Intelligent Systems Conference (IntelliSys) UK , 2015. IEEE, 2015. p. 646-650.

CHAPITRE IV

Application du filtre actif à l'amélioration de la qualité d'énergie fournie au réseau autonome hybride éolien-diesel

IV.1 Introduction

Une centrale hybride se caractérise par le fonctionnement conjoint de dispositifs utilisant différentes sources d'énergie (éolienne, cellule photovoltaïque, groupe électrogène... etc.). Ce type de système peut représenter une solution pour les régions éloignées d'un grand réseau interconnecté où la production énergétique locale reste indépendante d'un grand réseau électrique. Toutefois, une telle configuration représente un certain défi technologique.

La production de l'éolienne doit être maximisée tout en assurant une stabilité de la tension et de la fréquence produite. Le cas d'un groupe diesel combiné à une éolienne fera l'objet de ce chapitre.

Le but de ce chapitre est d'améliorer la qualité de l'énergie produite par un système de production d'énergie électrique hybride en utilisant le filtre actif parallèle avec ces commandes. Tout d'abord, on présente le modèle dynamique (partie mécanique) des deux sources d'énergies : éolienne et générateur diesel, ainsi que l'étude du comportement dynamique du système hybride sans filtrage. Une application d'un système hybride sera simulée sous l'environnement le logiciel MATLAB/Simulink.

IV.2 Les systèmes hybrides

Les systèmes d'énergie hybride (SEH) sont en général constitués de sources d'énergie renouvelable et de sources d'énergie conventionnelle.

Les systèmes hybrides peuvent être divisés en deux groupes. Dans le premier groupe, on trouve les systèmes hybrides, travaillant en parallèle avec le réseau électrique, appelés aussi connectés au réseau. Ces systèmes contribuent à satisfaire la charge du système électrique du pays.

Les systèmes hybrides du deuxième groupe fonctionnent en régime isolé ou en mode autonome. Ils doivent répondre aux besoins des consommateurs situés dans des sites éloignés du réseau électrique : refuges de montagne, îles, villages isolés, panneaux de signalisation routière etc. Une généralisation de la classification présentée est illustrée sur la Figure IV 1.

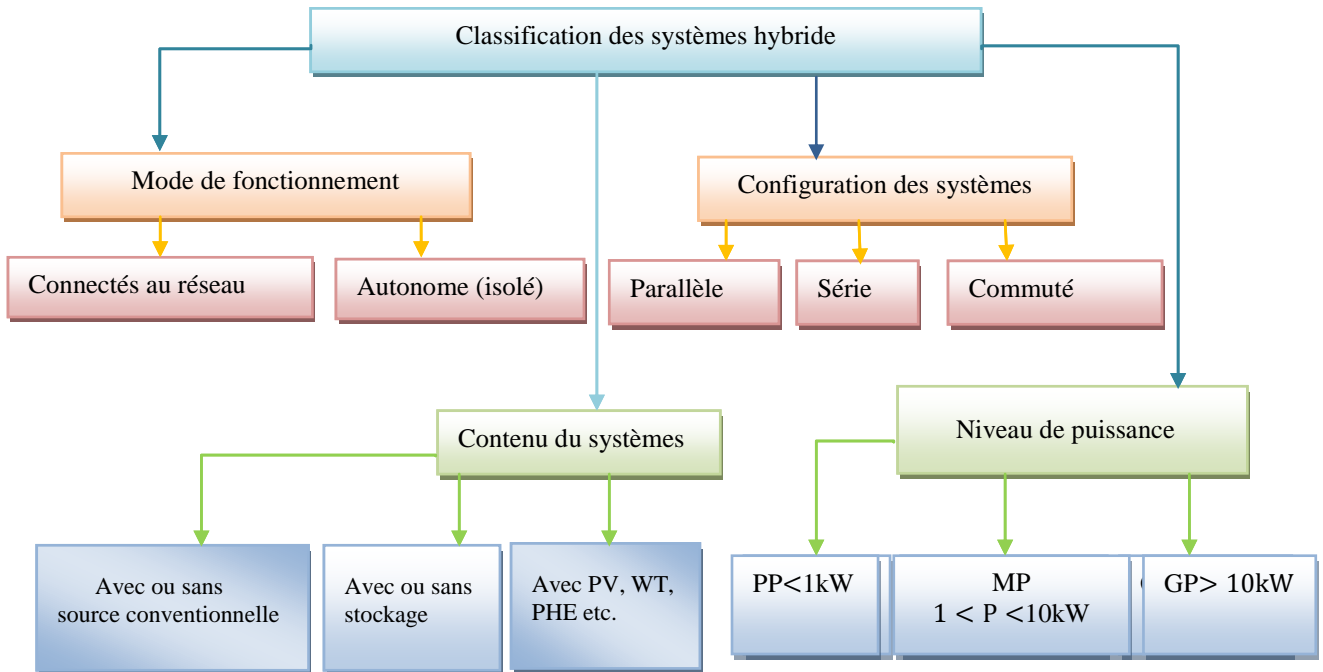


Figure IV 1: Classification des systèmes hybrides

IV.3 Principaux composants d'un système hybride éolien-diesel

IV.3.1 Éoliennes

Parmi toutes les énergies renouvelables contribuant à la production d'électricité, l'énergie éolienne tient actuellement la star des énergies renouvelables pour les régions et les pays possédants un énorme potentiel éolien. Elle est l'une des plus prometteuses, en termes d'écologie, de compétitivité, de champ d'application et de création d'emplois et de richesses.

L'éolienne, fiable et rentable, représente la source d'énergie idéale pour de nombreuses applications [1,2]. Elle est destinée à convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontal. La technologie largement dominante aujourd'hui est les turbines à axe horizontal, à turbine tripale et parfois bipale à rotor face au vent. Ces éoliennes ont une puissance nominale située entre 5KW et 5MW, elles peuvent fonctionner à vitesse fixe ou à vitesse variable [3,4]. Les types de générateurs associés aux éoliennes sont des machines asynchrones et des machines synchrones sous leurs différentes variantes.

Les grands systèmes électriques isolés peuvent utiliser les éoliennes. La plus part des éoliennes de plus de 50 KW exploitées dans les SEH utilisent des GAS [5]. Le faible coût et la standardisation des MAS ont conduit à une large domination des génératrices asynchrones à cage. Les GAS à cage ne

nécessitent qu'une installation assez sommaire. En raison de la consommation de puissance réactive, elles ne peuvent pas fonctionner indépendamment d'une source qui leur fournisse la puissance réactive. En fonctionnement à vitesse fixe, elles sont souvent associées à une batterie de condensateurs (Figure IV.2). Pour les réseaux isolés, les éoliennes à vitesse fixe couplé à la GAS fonctionnent seulement quand au moins un générateur diesel (GD) fonctionne, sauf s'il y a d'autres sources d'énergie réactive [6].

Si le générateur électrique est de type synchrone ou asynchrone directement couplé au réseau, la vitesse est sensiblement constante et le rendement aérodynamique ne peut être maximal que pour une seule vitesse du vent.

Bien que les possibilités soient nombreuses pour les sites isolés, on rencontre trois familles de Systèmes : GAS à nombre de pôles variables pouvant fonctionner à deux vitesses, GAS à cage à variateur de fréquence et les MS également à variateur de fréquence.

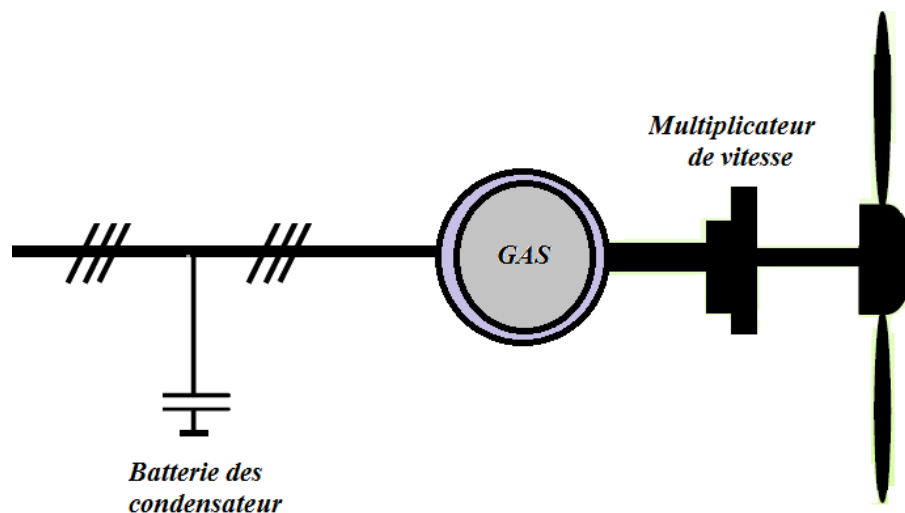


Figure IV 2: Chaîne de conversion éolienne à générateur asynchrone à cage fonctionnant à vitesse constante.

Les principales composantes d'une éolienne sont la tour, les pales de rotor, la boîte de vitesse et la nacelle qui transforme l'énergie cinétique en énergie électrique et l'injecte dans le circuit de distribution via les systèmes de raccordement au réseau électrique [7].

IV.3.2 Générateur Diesel

Pour les applications hors réseau, il est possible d'avoir un système éolien fonctionnant en parallèle avec une génératrice diesel, en toute complémentarité. Ce type de système s'applique particulièrement à des sites éloignés, où il est important d'avoir de l'électricité en continu, où les coûts de transport du carburant sont élevés et où il n'est pas encore rentable d'utiliser un système éolien seul avec batteries.

Le générateur diesel est généralement composé d'un moteur diesel directement couplé au générateur synchrone (Figure IV.3). La fréquence du courant alternatif à la sortie est maintenue par un régulateur de vitesse. Le régulateur fonctionne en ajustant le flux du fuel dans l'objectif de garder la vitesse du moteur diesel et la vitesse du générateur constantes. La fréquence du réseau est directement liée à la vitesse de rotation du générateur.

La génératrice du groupe diesel a pour fonctions spécifiques : de convertir la puissance mécanique générée par son moteur d'entraînement en puissance électrique, de répondre à la demande de puissance active du système (charges du consommateur, charge de lissage, génératrice diesel et contrôleurs), de réguler le niveau de tension du réseau, de fournir un courant de court-circuit en cas de surcharge et de fournir un courant d'appel aux machines à induction du système[4,8].

La génératrice synchrone, qui est la plus souvent exploitée, remplit toutes ces conditions.

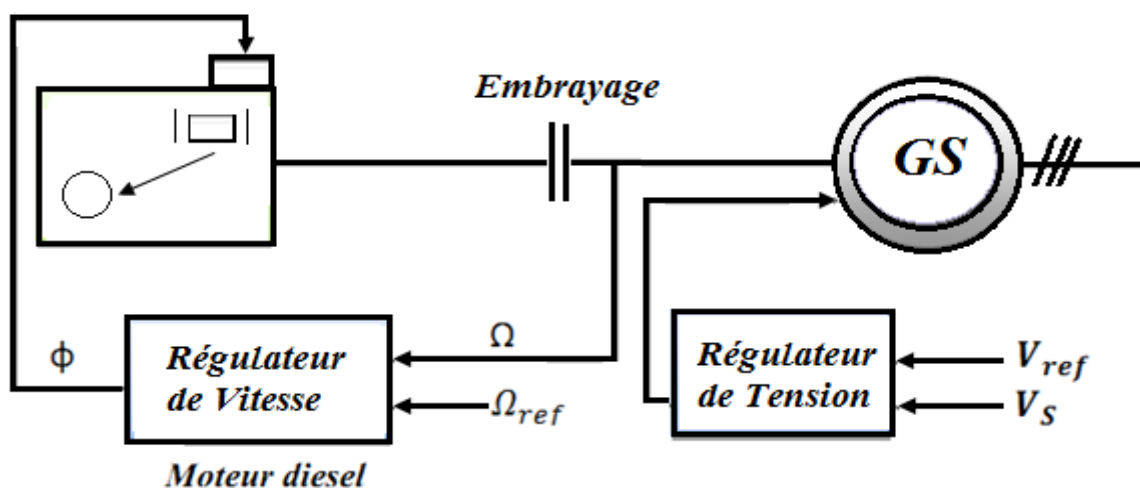


Figure IV 3: Le groupe diesel

Dans notre configuration, le système fournit de l'énergie électrique à l'aide d'un système éolien, constitué par une turbine reliée avec une génératrice asynchrone d'une puissance apparente de 250KVA et un autre système diesel qui est constitué par un moteur diesel relié à une génératrice synchrone à

aimant permanent d'une puissance apparente de 300KVA, qui fournit du réactif nécessaire pour amorcer la génératrice asynchrone. Ce système hybride de génération d'énergie, alimente une charge principale de 250KW et une charge secondaire variable (entre le 0 et 400KW) associée à un régulateur de fréquence. Le système fonctionne sur une tension de 380V et une fréquence de 50Hz.

Le temps de simulation est de 10s avec une période d'échantillonnage de 1ms. La charge primaire étant 100KW jusqu'à $t=3s$, à cet instant on ajoute une autre charge pour atteindre une totalité de 250kW (Figure IV.4).

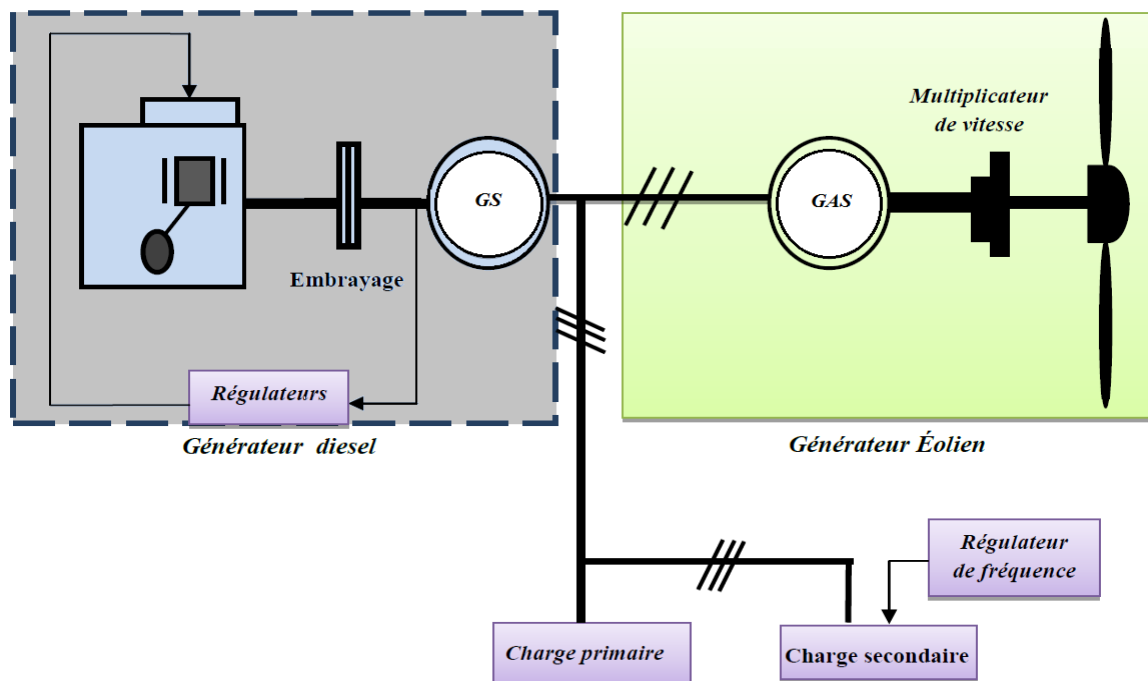


Figure IV 4 : Système hybride éolien diesel

IV.4 Problèmes rencontrés dans le fonctionnement dans un réseau autonome

L'inconvénient majeur dans les systèmes hybrides connectés en réseau triphasé isolé est le déséquilibre de tension entre les phases. Un récepteur électrique triphasé déséquilibré ou des récepteurs monophasés déséquilibrés alimentés par un réseau isolé triphasé peuvent conduire à des déséquilibres de tension. Ces déséquilibres provoquent des couples de freinage parasites et des échauffements supplémentaires dans les machines tournantes à courant alternatif.

Du point de vue de la continuité de la production et de la qualité de l'énergie, les facteurs pouvant affecter le fonctionnement d'un système autonome sont:

- Les variations de la charge à court et à long terme,

- Les ressources d'énergies renouvelables: Les ressources, tels que le vent et le soleil, sont stochastiques par leur nature et elles sont très difficiles à prédire [1].

IV.5 Qualité de l'énergie électrique dans les réseaux autonomes

Le terme «qualité de l'énergie électrique» fait référence : à la stabilité de la tension, à la stabilité de la fréquence du réseau et à l'absence de différents phénomènes électriques comme, par exemple, le flicker ou les distorsions harmoniques [9].

Bien qu'il n'y ait pas de normes internationales spécifiques pour les systèmes de génération en site isolé, les caractéristiques du réseau isolé doivent être semblables aux caractéristiques des grands réseaux interconnectés.

Les consommateurs connectés aux réseaux isolés sont tout comme ceux connectés aux grands réseaux interconnectés, utilisant les mêmes appareils. Donc les exigences de la qualité de l'énergie sont généralement les mêmes.

La plupart des mesures et définitions utilisées dans les normes sont basées sur l'analyse de la fréquence et de la tension. La norme européenne EN50160 [10] inclut des recommandations pour les valeurs de la tension des réseaux isolés, c'est-à-dire des réseaux non reliés à un grand réseau interconnecté [1,4].

Plusieurs études ont été réalisées sur la qualité de l'énergie électrique des systèmes isolés comportant des sources d'énergie renouvelable. Larsson [11] présente des mesures expérimentales de la qualité de l'énergie électrique pour les systèmes éolien-diesel. La problématique des systèmes hybrides éolien-diesel est analysée aussi par Sharma en [12]. Mulijadi dans [13] réalise une analyse de la configuration éolien-diesel et des différents types de charges du point de vue de la qualité de l'énergie électrique.

Plusieurs chercheurs ont travaillé sur les stratégies de contrôle des filtres [5]. Des solutions aux problèmes causés par le branchement des charges triphasées non équilibrées et des charges monophasées comme le filtrage actif ont été présentées par A. Chandra [14].

IV.6 Principe de fonctionnement d'un système hybride éolien-diesel

Dans le système hybride éolien-diesel, le vent est l'élément dominateur [15]. Si la vitesse du vent est suffisante, l'éolien alimentera seule la charge (WO). Le surplus de puissance est envoyé vers la charge secondaire. Rappelons que la régulation de la fréquence est assurée par cette même charge secondaire dans le cas de ce mode de fonctionnement. Durant ce fonctionnement, le MD se déconnecte

automatiquement du GS par un embrayage. Le MS fonctionne ainsi comme un condensateur synchrone en fournissant de la puissance réactive dans l'objectif de maintenir la tension d'alimentation constante. Dans le cas où la vitesse du vent est moins forte, l'éolienne produisant peu de puissance, sera dans l'incapacité d'alimenter totalement seule la charge, alors le GD interviendra en fournissant la différence (WD). Si la vitesse du vent est très faible, le GD sera contraint d'alimenter seul la charge (DO). Dans ce cas, le GD assure seul, la régulation de la tension et de la fréquence

La Figure IV.5 montre le schéma détaillé du système hybride éolien-diesel SHED [5]

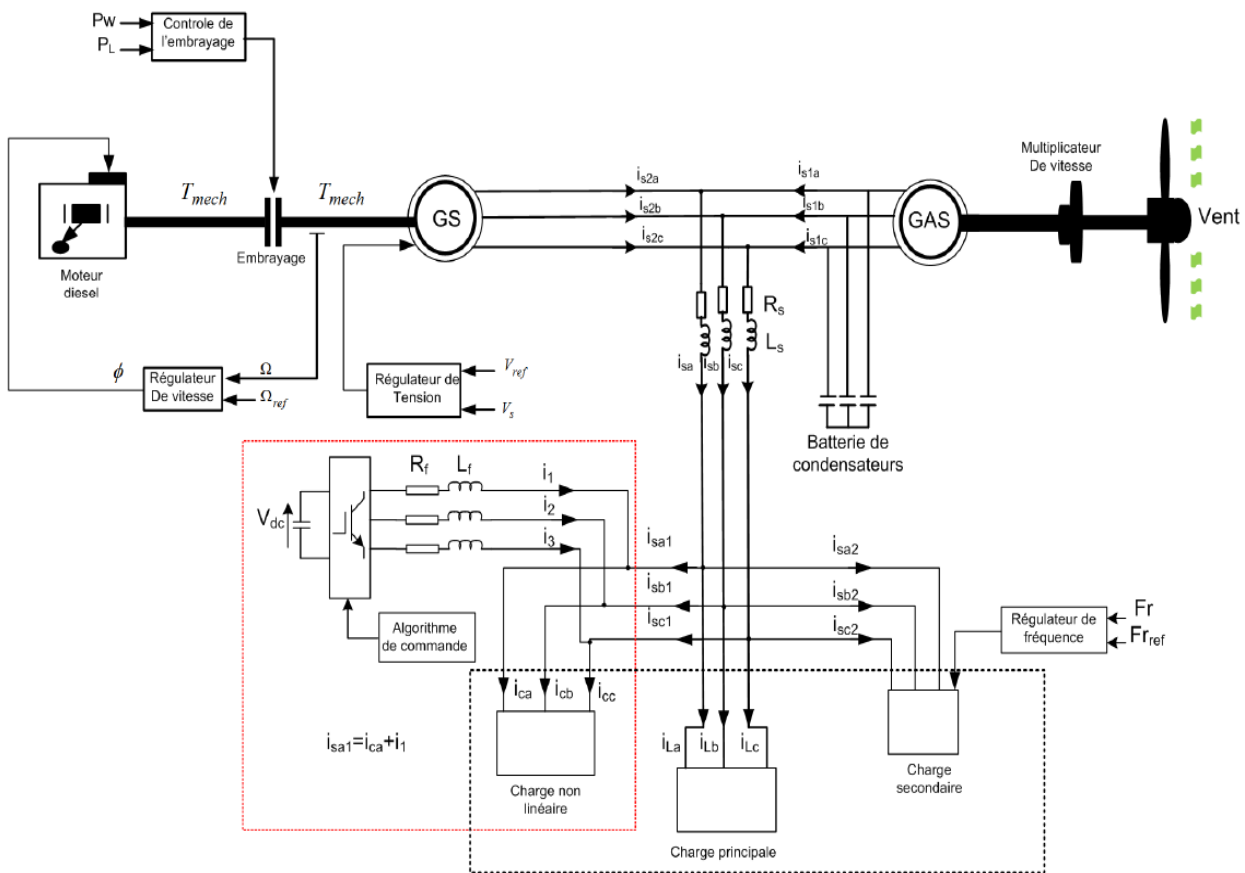


Figure IV 5:Schéma de système global

IV.7 Modélisation des composants du système hybride

IV.7.1 Modélisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil

Les machines électriques asynchrones à cage d'écureuil sont les plus simples à fabriquer. Elles sont les moins exigeantes en termes d'entretien et présentent un taux de défaillance très peu élevé [16].

Grâce aux nombreux avantages tels que, la robustesse, la simplicité d'installation, le coût modeste par rapport aux autres types de machine électrique, la machine asynchrone à cage connue également sous

le nom de machine à induction est une machine intéressante pour son utilisation comme génératrice couplée à une turbine éolienne.

La modélisation analytique classique de la machine asynchrone se fait sous les hypothèses simplificatrices résumées ci-dessous :

- ✓ L'entrefer est supposé à épaisseur constante;
- ✓ L'effet des encoches est négligé;
- ✓ L'induction dans l'entrefer est supposée à répartition sinusoïdale;
- ✓ La distribution spatiale des forces magnétomotrices d'entrefer est supposée sinusoïdale;
- ✓ Les pertes ferromagnétiques sont négligées (pas de courants de FOUCAULT ni d'hystérésis);
- ✓ Les pertes mécaniques sont négligées;
- ✓ L'influence de l'effet de peau est négligée;
- ✓ Les variations des caractéristiques dues à l'échauffement ne sont pas prises en compte;
- ✓ La cage d'écureuil est remplacée par un bobinage triphasé rotorique équivalent.

Dans un premier temps, le modèle analytique classique que nous développerons, négligera également l'effet de la saturation.

Inductances propres statoriques

$$L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} = cst \quad \text{IV. 1}$$

Inductances propres rotoriques

$$L_{AA} = L_{BB} = L_{CC} = cst \quad \text{IV. 2}$$

Inductances mutuelles stator-stator

$$L_{ab} = L_{ac} = L_{ba} = L_{bc} = L_{ca} = L_{cb} = cst \quad \text{IV. 3}$$

Inductances mutuelles rotor-rotor

$$L_{AB} = L_{AC} = L_{BA} = L_{BC} = L_{CA} = L_{CB} = cst \quad \text{IV. 4}$$

Inductances mutuelles stator-rotor

$$L_{Aa}, L_{Ab}, L_{Ac}, L_{Ba}, L_{Bb}, L_{Bc}, L_{Ca}, L_{Cb}, L_{Cc} = f(\theta) \quad \text{IV. 5}$$

Comme dans toutes les machines électriques tournantes, la production d'un couple est la conséquence de l'interaction entre deux forces magnétomotrices, l'une produite par le stator et l'autre par le rotor. Dans une machine à courant continu ou synchrone, ces deux forces peuvent être indépendantes et réglables sans trop d'efforts, mais la machine asynchrone à cage d'écureuil possède une force magnétomotrice au rotor qui dépend de celle au stator et d'une grandeur qui exprime la vitesse du rotor ω_m par

rapport à la vitesse du champ tournant ω_s , la différence de vitesse entre le champ tournant et le rotor se nomme la vitesse de glissement g :

$$g = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s} \quad \text{IV.6}$$

En appliquant la loi de FARADAY à chaque bobinage de la machine asynchrone, on peut écrire, pour chacun des six enroulements statoriques et rotoriques, l'équation électrique suivante :

$$V = R \cdot i + \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{IV.7}$$

Où R est la résistance du bobinage i, V et Φ représentent respectivement le courant dans le bobinage, la tension à ses bornes et le flux le traversant.

Les équations matricielles pour les bobinages statoriques et rotoriques s'écrivent alors sous la forme suivante [17,18] :

$$[V_{sabc}] = [R_s] \cdot [i_{sabc}] + \frac{d[\Phi_{sabc}]}{dt} \quad \text{IV.8}$$

$$[V_{rabc}] = [R_r] \cdot [i_{rabc}] + \frac{d[\Phi_{rabc}]}{dt} \quad \text{IV.9}$$

Avec :

$$[V_{sabc}] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad \text{IV.10}$$

$$[V_{rabc}] = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} \quad \text{IV.11}$$

Respectivement les vecteurs des tensions statoriques et rotoriques.

Le rotor de la machine étant en court-circuit, la relation (IV.9) devient :

$$[V_{rabc}] = 0 = [R_r] \cdot [i_{rabc}] + \frac{d[\Phi_{rabc}]}{dt} \quad \text{IV.12}$$

V_{sa}, V_{sb}, V_{sc} : Tensions instantanées aux bornes de l'enroulement statoriques.

i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} : Courant instantanés dans les phases de l'enroulement statorique.

i_{ra}, i_{rb}, i_{rc} : Courants instantanés dans les phases de l'enroulement rotorique.

R_r, R_s : Respectivement résistances rotoriques et statoriques.

$\Phi_{sa}, \Phi_{sb}, \Phi_{sc}$: Flux totalisés traversant l'enroulement statorique.

$\Phi_{ra}, \Phi_{rb}, \Phi_{rc}$: Flux totalisés traversant l'enroulement rotorique.

Les flux statoriques et rotoriques s'expriment en fonction des courants en faisant intervenir les différentes inductances :

$$[\Phi_{sabc}] = [L_s] \cdot [i_{sabc}] + [L_{sr}(\theta)] \cdot [i_{sabc}] \quad \text{IV.13}$$

$$[\Phi_{rabc}] = [L_r] \cdot [i_{rabc}] + [L_{sr}(\theta)] \cdot [i_{rabc}] \quad \text{IV.14}$$

Pour des raisons de simplicité, il est classique d'exprimer les différentes équations triphasées de la machine asynchrone dans un repère diphasé tournant « d-q ». Dans ce cas, on utilise la transformation de Park. Cette dernière, normée, assure l'invariance de la puissance instantanée entre les repères triphasés et « d-q ».

En choisissant un repère d-q diphasé, l'axe d peut être repéré par :

θ_s : L'angle électrique par rapport à l'axe de la phase « a » du stator;

Et θ_r : L'angle électrique par rapport à l'axe de la phase « a » du rotor.

A chaque instant, ces deux angles sont liés par la relation suivante :

$$\theta = p \cdot \Theta = \theta_s - \theta_r \quad \text{IV.15}$$

Où Θ est la position mécanique de l'axe rotorique par rapport à l'axe statorique

p : Nombre de paires de pôles ;

θ Étant l'angle électrique entre l'axe rotorique et l'axe statorique.

Les différents axes sont illustrés sur la figure (IV.6).

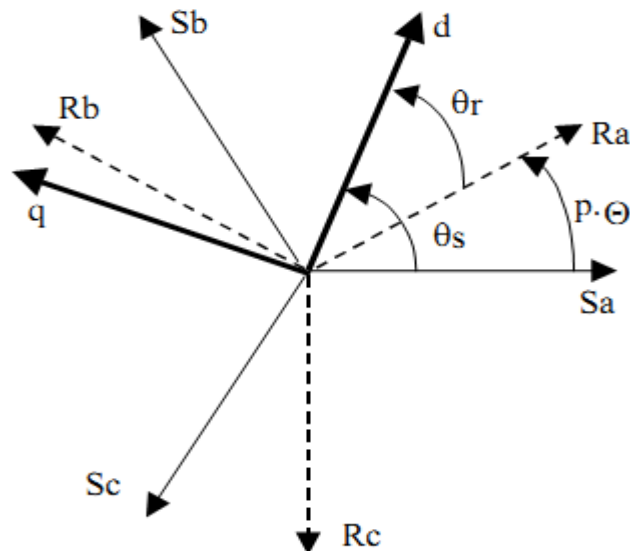


Figure IV 6 : Les différents systèmes d'axes utilisés

En appliquant alors la transformation de Park aux équations statoriques avec un angle de rotation θ_s , on aboutit aux expressions suivantes dans le repère dq:

$$V_{sd} = R_s \cdot i_{sd} - \frac{d\theta_s}{dt} \cdot \Phi_{sq} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} \tag{IV.16}$$

$$V_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + \frac{d\theta_s}{dt} \cdot \Phi_{sd} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} \tag{IV.17}$$

$$V_{so} = R_s \cdot i_{so} + \frac{d\Phi_{so}}{dt} \tag{IV.18}$$

De même, en l'appliquant aux équations rotoriques avec un angle de θ_r , on obtient les équations rotoriques dans le repère dq:

$$V_{rd} = 0 = R_r \cdot i_{rd} - \frac{d\theta_r}{dt} \cdot \Phi_{rq} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} \tag{IV.19}$$

$$V_{rq} = 0 = R_r \cdot i_{rq} + \frac{d\theta_r}{dt} \cdot \Phi_{rd} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} \tag{IV.20}$$

$$V_{ro} = R_r \cdot i_{ro} + \frac{d\Phi_{ro}}{dt} \tag{IV.21}$$

Suite à l'hypothèse de linéarité des matériaux, les flux statoriques et rotoriques s'expriment dans le repère de PARK, en fonction des courants, par la relation matricielle suivante [19] :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \\ \Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad \text{IV.22}$$

Avec:

$L_s = l_s + M$: Inductance cyclique statorique.

$L_r = l_r + M$: Inductance cyclique rotorique.

l_s : Inductance de fuite statorique.

l_r : Inductance de fuite rotorique.

M : Mutuelle inductance

Plusieurs solutions sont possibles pour orienter le repère « dq » par rapport aux repères triphasés. Dans le cadre de nos travaux, on se fixe les axes d et q solidaires du champ tournant de la machine.

Lors d'une alimentation sinusoïdale, il est possible d'écrire, en régime permanent :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s : \text{Pulsation des grandeurs statoriques}$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r : \text{Pulsation des grandeurs rotoriques}$$

Par la suite, l'expression (IV.15) peut se transformer, en régime permanent, sous la forme suivante :

$$\omega_s - \omega_r = p \cdot \Omega = \omega \quad \text{IV.23}$$

Avec

Ω : Est la vitesse mécanique.

ω : La pulsation mécanique.

Ainsi, en partant des équations (IV.16), (IV.17), (IV.19), (IV.20), et en utilisant la relation (IV.22) qui lie les flux aux courants, on obtient l'équation matricielle ci-dessous qui englobe les différentes équations électriques de la machine exprimées dans le repère dq:

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_s \cdot L_s & 0 & -\omega_s \cdot M \\ \omega_s \cdot L_s & R_s & \omega_s \cdot M & 0 \\ 0 & -\omega_r \cdot M & R_r & -\omega_r \cdot L_r \\ \omega_r \cdot M & 0 & \omega_r \cdot L_r & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{di_{sd}}{dt} \\ \frac{di_{sq}}{dt} \\ \frac{di_{rd}}{dt} \\ \frac{di_{rq}}{dt} \end{bmatrix} \quad \text{IV. 24}$$

La transformation de Park, appliquée à l'expression du couple électromagnétique, permet alors de réécrire ce dernier sous la forme suivante:

$$T_{em} = P \cdot M \cdot (i_{rd} \cdot i_{sq} - i_{rq} \cdot i_{sd}) \quad \text{IV. 25}$$

IV.7.2 Modélisation de la machine synchrone

La puissance mécanique P_{mech} fournie en sortie du bloc «moteur diesel» est convertie en puissance électrique par une machine synchrone à pôle saillant. La machine synchrone peut fonctionner autant en mode moteur qu'en mode générateur. Elle est utilisée surtout en mode.

Les générateurs diesels consomment du gasoil pour produire de l'énergie électrique. Ils sont principalement constitués d'un moteur diesel servant à entrainer une génératrice synchrone et offrent un moyen stable de production d'énergie à long terme. Même si de nombreux efforts sont faits dans la production de biocarburants et de filtres particuliers, les gaz nocifs (oxydes d'azote et de carbone) rejetés par la combustion diesel et le cours sans cesse grandissant du gasoil sont très désavantageux. La taille des réservoirs de gasoil est fonction de la capacité installée.

IV.7.3 Générateur diesel

Comme indiqué dans le générateur diesel est en général constitué d'un moteur diesel et d'un générateur synchrone [20]. Le modèle dynamique complet du groupe électrogène diesel suppose la modélisation du moteur diesel avec la boucle de réglage de la vitesse et du générateur synchrone avec le système de réglage de la tension.

Pour la simulation du système dynamique du générateur Diesel, on a besoin d'une "large order model". Mais dans notre système on a juste étudié la variation de la vitesse du rotor afin d'obtenir la puissance mécanique et ensuite celle électrique correspondante, c'est pour cela il suffit d'utiliser un "lowerorder model".

Le rôle du Générateur Diesel dans le système hybride est de délivrer la différence de puissance entre la puissance (Eolienne) et la profile de charge.

IV.7.4 Moteur diesel et régulateur de vitesse

Les moteurs diesels sont les moteurs à combustion interne les plus efficaces. La vitesse de rotation d'un tel moteur dépend de la quantité de carburant injecté et de la charge appliquée au vilebrequin du moteur. Le moteur diesel est un système non linéaire. Il présente des temps morts et des retards, ce qui rend difficile son contrôle. Les moteurs diesels sont munis d'un régulateur de vitesses: mécanique, électromécanique ou électronique [21].

Celui-ci réalise le contrôle automatique de la vitesse du moteur diesel, en réglant l'injection de carburant en fonction de la charge. Il agit sur le mécanisme d'accélération, en fournissant le carburant sans variations abruptes et répond en finesse aux variations de charge.

De nombreux ouvrages proposent des modèles plus ou moins complexes du moteur diesel, en fonction de la disponibilité des données constructeurs. Cependant, l'expérience et les mesures en exploitation ont montré que pour étudier la réponse du système face aux perturbations rapides de vitesse, il peut suffire d'utiliser un modèle simple [22]. Le diagramme bloc d'un moteur diesel simplifié et celui du régulateur de vitesse respectivement sont illustrés dans la Figure (IV.7).

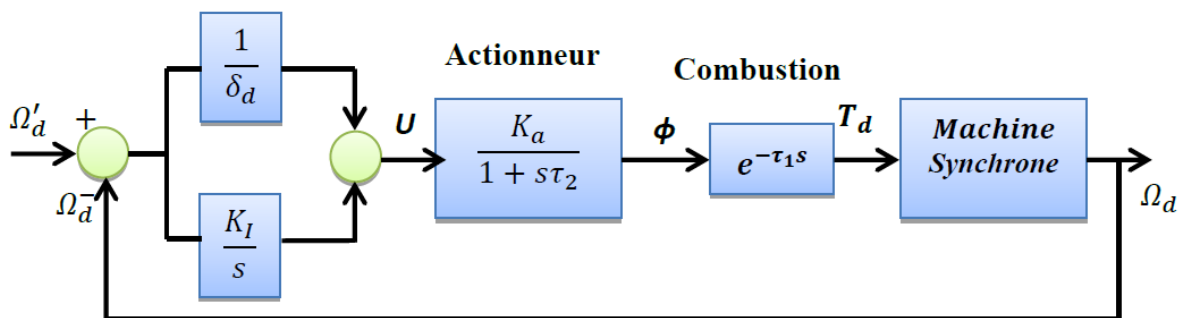


Figure IV 7 : Système de commande de rétroaction de vitesse du moteur Diesel.

Ce bloc est appelé ‘Régulateur du générateur Diesel’ ou bien ‘Diesel Engine governor’.

L'unité de commande principale et l'unité de mise à l'échelle constituent l'unité de commande de liaison inertielle proportionnelle, différentielle et seconde ordre, laquelle en ajustant les actionneurs d'accélérateur de moteur diesel pour accélérer l'effet de l'ajustement. La vitesse de sortie du moteur diesel est représentée par la valeur du couple (torque), obtenue à l'aide d'un intégrateur.

Puisque le Générateur Diesel est un système à "large time delay", donc le moment est tout d'abord multiplié par un "speed signal", ensuite il sera multiplié par la vitesse de rotation (W_m) pour obtenir la puissance mécanique correspondante à la rotation du rotor du générateur électrique.

IV.7.5 Modèle simplifié de la machine synchrone

Le modèle mathématique de la machine synchrone comprend un ensemble d'équations algébriques et différentielles, qui décrivent le comportement des variables électriques (tension et courant) et mécaniques (couple, flexibilité de l'arbre, entre autres) de la machine. Le modèle électrique tient compte des différents effets introduits par le circuit du rotor, par les bobines de champ du stator et par les phénomènes associés aux circuits d'amortissement. Le modèle utilisé dans cette thèse est un modèle simplifié.

La puissance mécanique fournie en sortie du bloc « moteur diesel » est convertie en puissance électrique par un modèle simplifié [5] de la machine synchrone. Les parties mécanique et électrique de la machine sont modélisées dans le même bloc.

Le rotor de la machine synchrone est constitué d'un enroulement parcouru par un courant d'excitation I continu, créant un champ magnétique $2p$ polaire. Il possède donc p paires de pôles. Le même nombre de pôles se retrouve dans le stator. Ses enroulements sont le siège de courants alternatifs triphasés. La liaison entre la pulsation ω_g du champ magnétique tournant et la vitesse de rotation est :

$$\Omega_s = \omega_g / p \quad \text{IV. 26}$$

Avec $\omega_g = 2\pi f$ où f est la fréquence des courants alternatifs en Hz.

Un enroulement de l'induit (stator) soumis au champ magnétique tournant de l'entrefer est le siège d'une force électromotrice $e(t)$ de valeur efficace E :

$$E = K N \Phi f = K N \Phi p n_s = K' \Phi n_s \quad \text{IV. 27}$$

Où :

K : Coefficient de Kapp Constante (dépendant de la machine, caractéristique de la machine)

N : Nombre de conducteurs d'une phase de la machine (1 spire = 2 conducteurs)

Φ : Flux maximum à travers un enroulement [Wb]

n_s : Vitesse de rotation [rpm]

$K' = K N_p$: Constante globale (caractéristique de la machine)

p : Nombre de paires de pôles.

IV.8 Modèle de la charge

Il existe deux types de charge, des charges linéaires à caractère résistif et inductif, comme, les ampoules à incandescence, les chauffe-eaux...etc. Le deuxième type de charges est représenté par les charges non linéaires qui détériorent la qualité d'énergie. La résolution des problèmes engendrés par ce type de charge fait l'objet du quatrième chapitre.

Dans l'analyse des systèmes classiques, la demande de la charge en puissance est représentée par :

$$S_L = P_L + jQ_L = Y_L |V_L|^2 \tag{IV.28}$$

S_L : Puissance apparente demandée par la charge.

P_L : Puissance active demandé par la charge.

Q_L : Puissance réactive demandé par la charge.

Y_L : Admittance de la charge.

IV.9 Application de filtrage actif parallèle au système hybride éolien diesel

La dépollution du réseau fait appel au filtrage externe qui est introduit dans notre système hybride éolien diesel pour empêcher les harmoniques de courants engendrés de se propager dans le réseau électrique, par injection des courants harmoniques dans le réseau ayant la même amplitude et en opposition de phase avec les courants harmoniques engendrés par une charge non linéaire. La Figure IV.8 montre le schéma global du système hybride éolien diesel avec filtrage actif

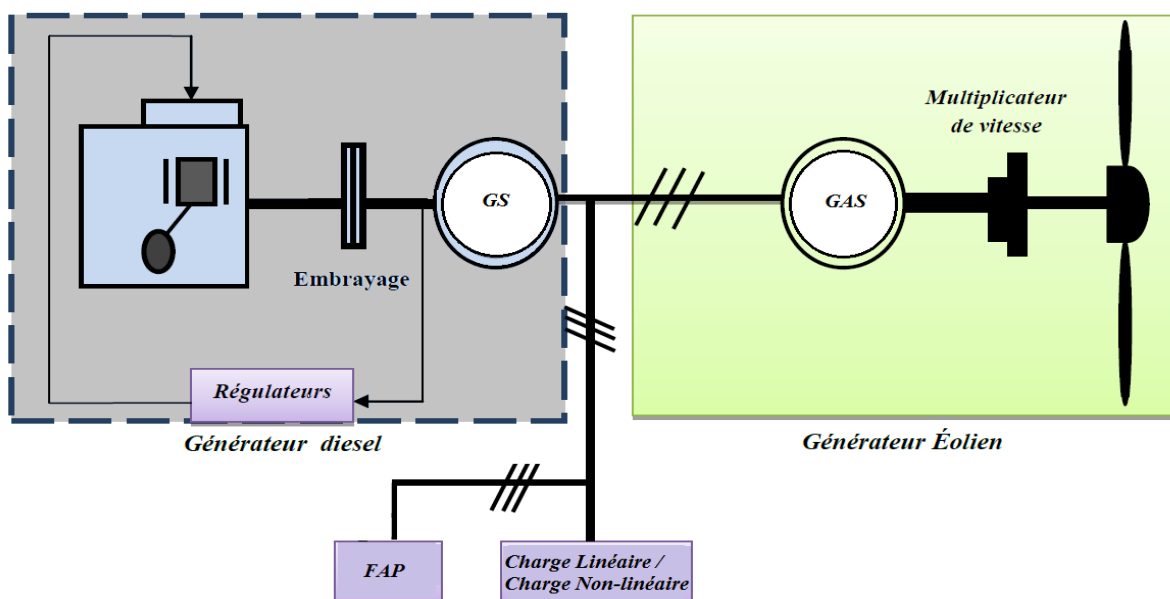


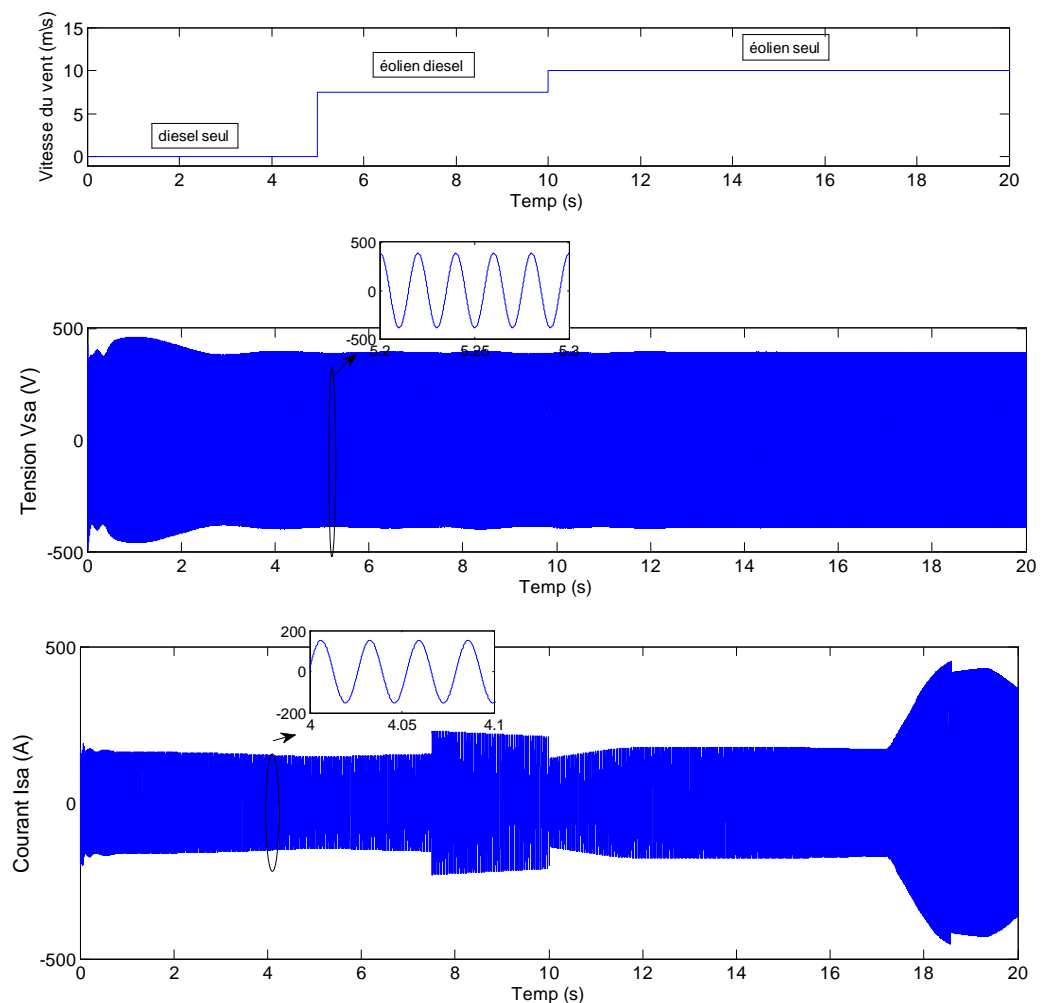
Figure IV 8 : Schéma de système global avec filtrage actif .

IV.10 Résultats de simulation

IV.10.1 Validation du système éolien diesel

L'objectif des simulations effectuées avec les deux sources d'énergie testées auparavant sont synchronisées maintenant, afin de maintenir la tension et la fréquence de notre système autonome SHED constantes, avec variation de la charge et perturbation du vent. Au début nous utilisons le GD seul pour alimenter cette charge. Après nous utilisons l'éolienne seule avec la même charge et avec une vitesse de vent égale à 10 m/s. Une synchronisation sera établie vers la fin entre les deux sources d'énergies avec une vitesse du vent qui varie de 0 à 10 m/s. Les paramètres du système sont donnés dans le tableau (Annexe).

la Figure IV.9, représentent la tension de source V_{sa} (V), le courant de source I_{sa} (A), le courant de la charge secondaire I_{sa2} (A), le courant de la charge principale I_{la} (A) et la fréquence du réseau f_r (Hz). Les tensions et les courants de la charge gardent ses formes sinusoïdales, le régulateur de fréquence maintient la fréquence de la charge à 50Hz, après chaque variation de vitesse du vent.



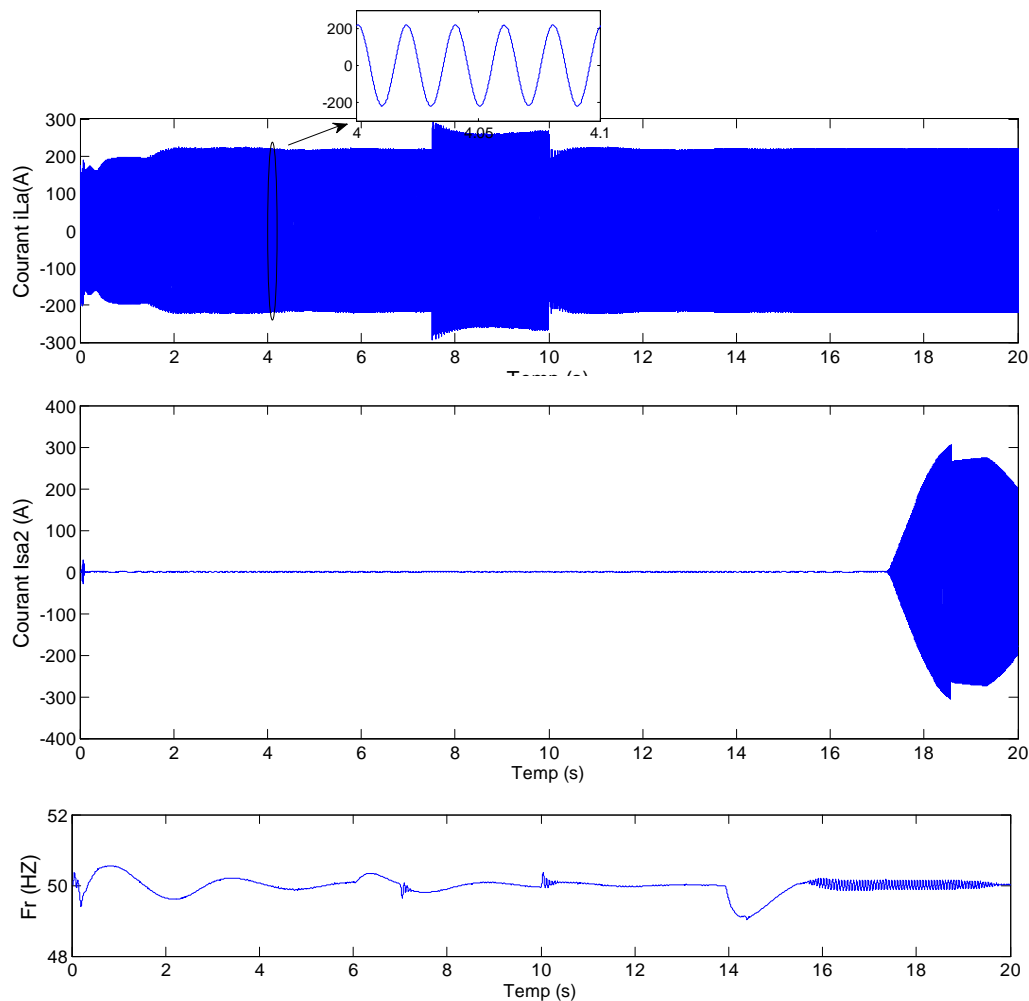


Figure IV 9: Vitesse du vent, tensions de source, courant de source, courant de charge secondaire courant de charge principale et la fréquence du réseau du système hybride éolien-diesel.

IV.10.2.1 Validation du système éolien diesel avec filtrage

On va conserver les mêmes paramètres du système global. Les paramètres du filtre shunt actif et de la charge non linéaire sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau IV 1: Paramètre de systèmes

Charge non linéaire	$R_c = 17.5\Omega$, $R_c = 20 mH$
Filtre shunt actif	$C_{dc} = 22000\mu F$, $L_f = 3 mH$, $V_{dc} = 1200V$

IV.10.2.1 Filtre actif avec La Commande Classique PI et la commande SDM

La Figure IV.10, représente la tension de source (V_{sa}), le courant de la charge (I_{ca}), le courant de source (I_{sa}), le courant injecté par le filtre (I_{fa}), la tension du bus continu (V_{dc}).

D'après cette figure, on peut bien remarquer que le courant et la tension sont en phase ce qui montre que le facteur de puissance est unitaire. Ainsi, on peut constater que la réponse de la tension continue par le régulateur PI présente un régime dynamique avec des dépassements aux instants de variations des sources.

La figure IV.10 montre que l'application du filtre actif permet de réduire considérablement le continu harmonique du courant de source, ce qui traduit par la diminution du taux harmonique de distorsion (THD) de 28.53% à 3.1%, donc il est inférieur à 5% (norme IEEE standard 514).

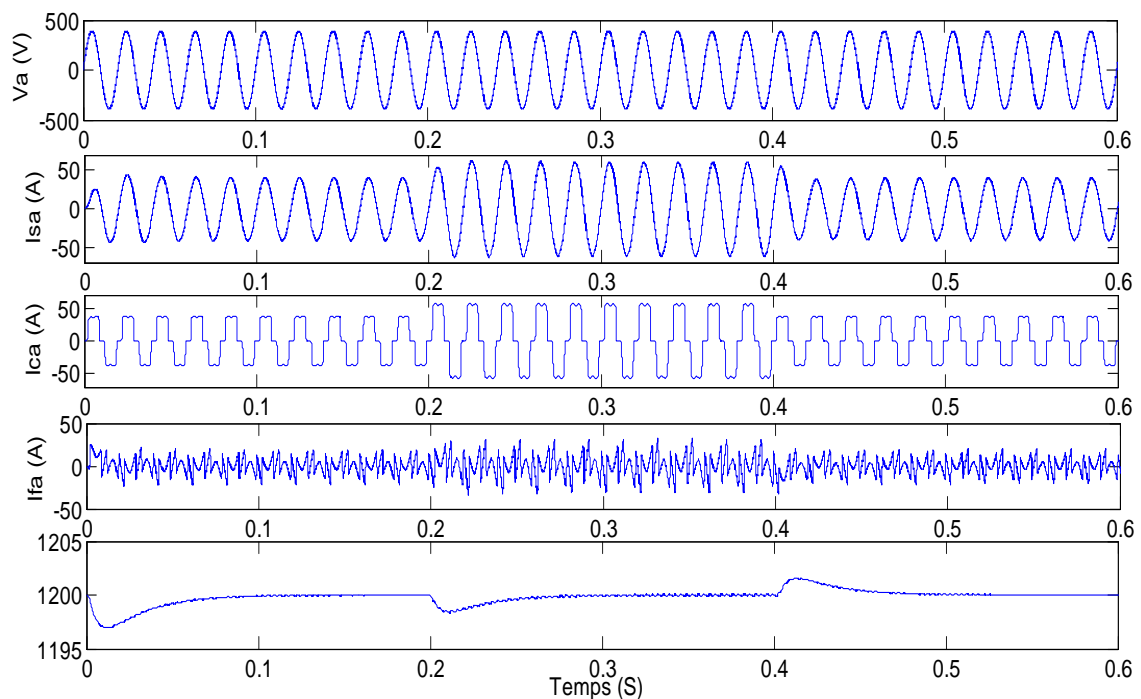


Figure IV 10: Tension de source, courant de source, courant de la charge non linéaire, courant du filtre et la tension du bus DC.

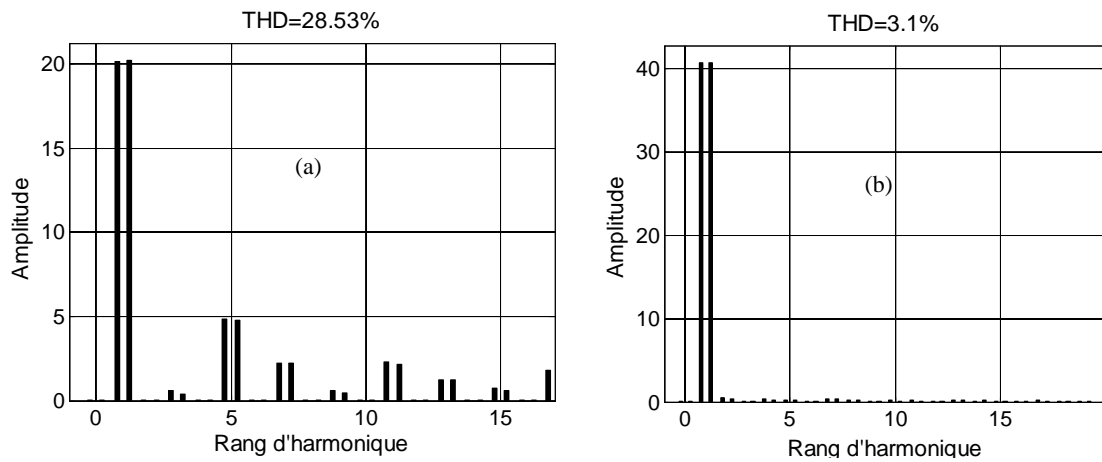


Figure IV 11: Spectres harmoniques des courants, (a) de la charge non linéaire (b) de la source.

IV.10.2.2 Filtre actif avec la commande floue type-1

La Figure IV.12, représente la tension de source (V_{sa}), le courant de la charge (I_{ca}), le courant de source (I_{sa}), le courant injecté par le filtre (I_{fa}), la tension du bus dc (V_{dc}).

On peut constater les mêmes remarques que le cas précédent, c'est-à-dire que le courant et la tension est en phase, mais la réponse de la tension continue avec la commande floue type1 présente un régime dynamique un peu lent comparativement à celui obtenu par le régulateur PI.

La figure IV.13 présente l'analyse spectrale du courant de la phase 1 de la charge non linéaire et celui du réseau après filtrage. Le THD du courant de la charge est de 28,53%, et de 2,6% côté réseau, ce qui confirme la bonne qualité de filtrage par le FAP contrôlé par la commande floue type1.

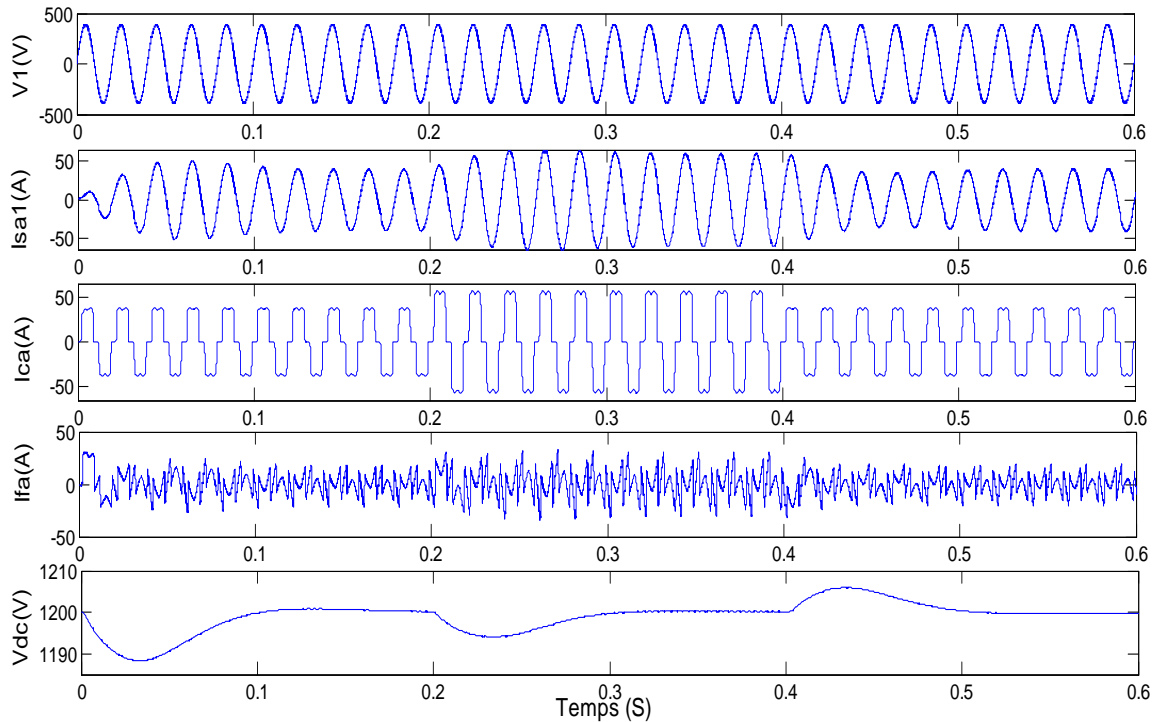


Figure IV 12: Tension de source, courant de source, courant de la charge non linéaire, courant du filtre et la tension du bus dc.

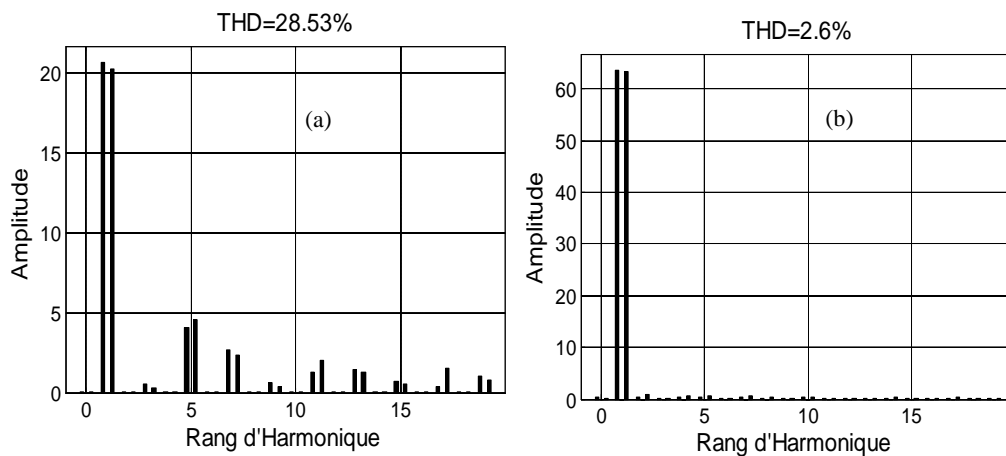


Figure IV 13: Spectres harmoniques des courants, (a) de la charge non linéaire (b) de la source.

IV.10.2.3 Filtre actif avec la commande floue type-2

La Figure IV.14, représente la tension de source (V_{sa}), le courant de la charge (I_{ca}), le courant de source (I_{sa}), le courant injecté par le filtre (I_{fa}), la tension du bus continu (V_{dc}).

On peut constater que la tension continue par la commande floue type2 présente une bonne dynamique avec des régimes transitoires très rapides et des dépassements très réduits comparativement

avec celle obtenue par les régulateur PI et flou type1. Le courant et la tension sont en phase ce qui montre un facteur de puissance unitaire.

La figure IV.15 présente l'analyse spectrale du courant de la phase 1 de la charge non linéaire et celui du réseau après filtrage. L'application du filtre actif avec la commande floue type2 permet de réduire considérablement le continu harmonique du courant de source, ce qui traduit par la diminution du taux harmonique de distorsion (THD) de 28.53% à 1.9%, donc il est très inférieur à celui obtenu dans les deux cas précédents (PI et flou type1).

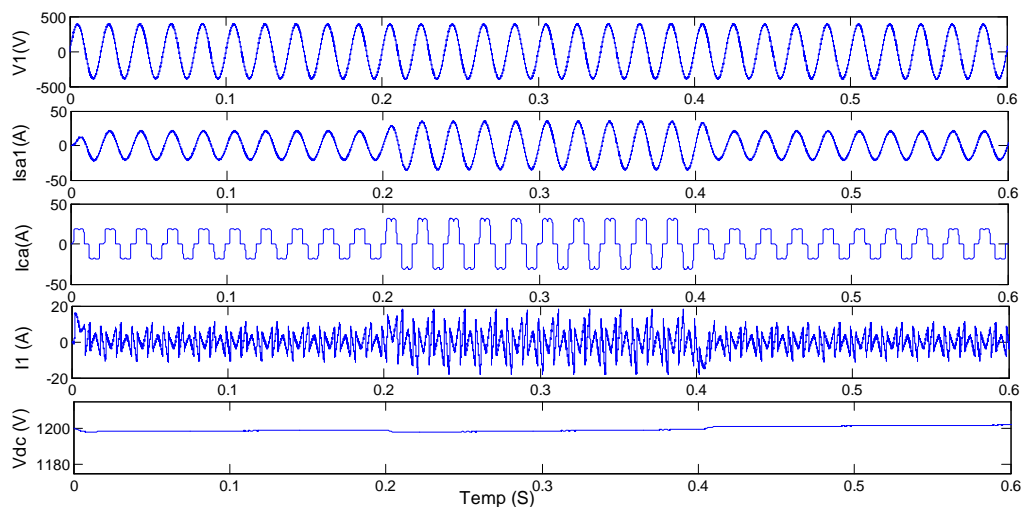


Figure IV 14: Tension de source, courant de source, courant de la charge non linéaire, courant du filtre et la tension du bus dc.

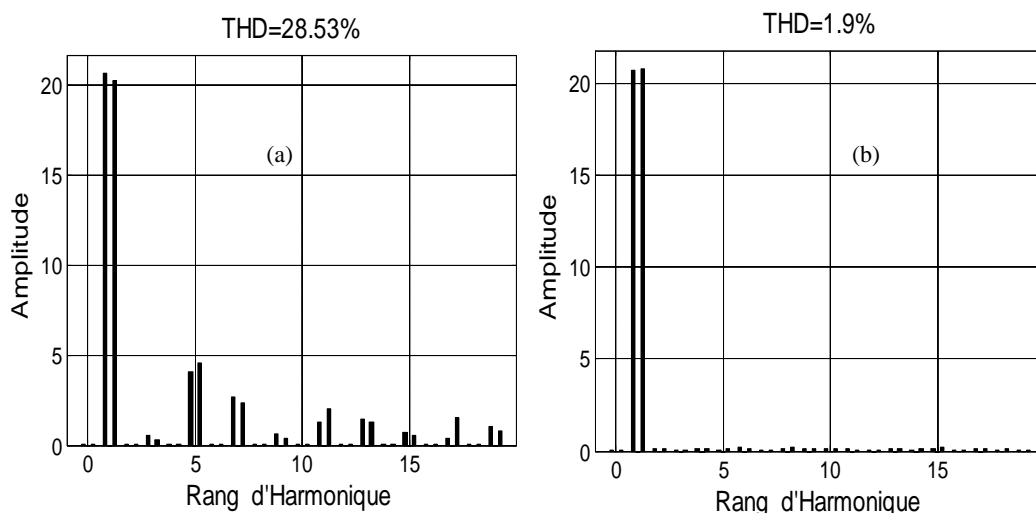


Figure IV 15: Spectres harmoniques des courants, (a) de la charge non linéaire (b) de la source.

IV.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les modèles des deux parties de notre système hybride, le générateur éolien et celui de diesel. Ensuite, nous avons mis en évidence le comportement dynamique du SHED lors du branchement d'une charge non linéaire. Les simulations ont été réalisées en exploitant le modèle global équipé du filtre actif parallèle sur lequel nous avons introduit les stratégies de commande.

La comparaison des résultats de simulation montre que dans les mêmes conditions, que le contrôleur flou type 2 donne une meilleure réponse transitoire par rapport aux PI et flou type 1 avec un temps de réponse inférieur et un dépassement réduit. D'autre part, il arrive à améliorer la qualité d'énergie, ce qui traduit par un taux d'harmonique réduit par rapport aux autres régulateurs.

IV.12 Bibliographie

- [1] I. Vechiu; « Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome », Thèse de doctorat d'état, Université du Havre- décembre 2005.
- [2] A. Mokhtari, « Diagnostic des Systèmes Hybrides : Développement d'une Méthode Associant la Détection par Classification et la Simulation Dynamique », Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, Octobre 2007.
- [3] T.L. Jensen, «Renewable energy in small islands», Forum for energy and development, SecondEdition; Denmark, August 2000.
- [4] M. Rezkallah, « Amélioration de la Qualité d'Energie fournie au Réseau Autonome Hybride Eolien- Diesel », Mémoire présenté à l'École de Technologie Supérieur, Montréal 2010.
- [5] T. Ackermann, L. Soder, « on overview of wind energy status 2002»,Renewable and sustainable energy Reviews 67-128, Elsevier 2003.
- [6] Fortunato, B., G. Mummolo et G. Cavallera, « Economic optimisation of a wind power plant for isolated locations », Solar Energy, vol. 60, no 6, p. 347-58. 1997
- [7] A. Mirecki, « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance»,thesis of Toulouse Polytechnique National Institut, April 2005.
- [8] Yeager, K. E., et J. R. Willis,« Modeling of emergency diesel generators in an 80 megawatt nuclear power plant », IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 8, 3, p. 433-41. 1993.
- [9] Fadaeinedjad, R., G. Moschopoulos et M. Moallem. « The impact of tower shadow,yaw error, and wind shears on power quality in a wind-diesel system ». IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 24, no 1, p. 102-11. 2009.
- [10] EN 50160, « Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems», CENELEC, Belgium, 1999.
- [11] A. Larsson, «Voltage and frequency variation in autonomous grids: a comparison of two different wind-diesel systems», Proc. of the European Union Wind Energy Conference, pp. 317-320, Sweden, 1996.
- [12] E. Muljadi, McKenna, «Power quality issues in a hybrid power system», NREL/CP- 500-30412, 2001.
- [13] H. Sharma, S. Islam, T. Pryor, C. V. Nayar, «Power quality issues in a wind turbine driven induction generator and diesel hybrid autonomous grid», Proc. AUPEC 2000.
- [14] Singh, B. N., A. Chandra et K. Al-Haddad. « Performance comparison of two current control techniques applied to an active filter ». In. Vol. vol.1, p. 133-8. Coll. « 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power. Proceedings (Cat. No.98EX227) ». Piscataway, NJ, USA: IEEE. 1998.
- [15] Sebastian, R. « Smooth transition from wind only to wind diesel mode in an autonomous wind diesel system with a battery-based energy storage system ». Renewable Energy, vol. 33, no 3, p. 454-66.2008.
- [16] A. Mirecki. « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance». thesis of Toulouse Polytechnique National Institut, April 2005.
- [17] K. Idjdarene, « Contrôle d'une Génératrice Asynchrone à Cage dédiée à la Conversion de l'Energie Eolienne», JCGE'08 LYON, 16 et 17, Décembre 2008.
- [18] K Idjdarene, «Contribution à l'étude et la commande de génératrices asynchrones à cage dédiées à des centrales électriques éoliennes autonomes», Thèse de doctorat, Université Abderrahmane MIRA-Béjaia, le 23 Mai 2010.
- [19] J. Lesenne, F. Notelet, G. Séguier, « Introduction à l'électrotechnique approfondie », Technique et Documentation, France, ISBN 2-85206-089-2,1981.
- [20] H. Ibrahim, « Etude et Conception d'un Générateur Hybride d'Electricité de Type Eolien-Diesel avec Elément de Stockage d'Air Comprimé »,Thèse de Doctorat, Université de Québec, Juin 2010.
- [21] A. K. Jain, V. T. Ranganathan, K. Vijay Kumar and G. Guruswamy, « Diesel Engine Driven Stand-Alone Variable Speed Constant Frequency Slip Ring Induction Generator - Theory and Experimental Results», NPEC 2010.
- [22] Kouadria, A. M., Allaoui, T., Denaï, M.«Fuzzy Control of a three-phase shunt active filter for harmonic current compensation in a wind-diesel standalone system», Series C Electrical Engineering and Computer Science.2016
- [23] Kouadria, A. M., Allaoui, T., Denaï, M., & Pissanidis, G. « Power Quality Enhancement in Off-Grid Hybrid Renewable Energy Systems Using Type-2 Fuzzy Control of Shunt Active Filter». In Intelligent Systems and Applications (pp. 345-360). Springer International Publishing. 2016.

- [24] Singh, B. N., A. Chandra et K. Al-Haddad. « Performance comparison of two current control techniques applied to an active filter ». In. Vol. vol.1, p. 133-8. Coll. « 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power. Proceedings (Cat. No.98EX227) ». Piscataway, NJ, USA: IEEE. 1998.
- [25] Sebastian, R. « Smooth transition from wind only to wind diesel mode in an autonomous wind diesel system with a battery-based energy storage system ». Renewable Energy, vol. 33, no 3, p. 454-66.2008.
- [26] A. Mirecki. « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance». thesis of Toulouse Polytechnique National Institut, April 2005.
- [27] K. Idjdarene, « Contrôle d'une Génératrice Asynchrone à Cage dédiée à la Conversion de l'Energie Eolienne», JCGE'08 LYON, 16 et 17, Décembre 2008.
- [28] K Idjdarene, «Contribution à l'étude et la commande de génératrices asynchrones à cage dédiées à des centrales électriques éoliennes autonomes», Thèse de doctorat, Université Abderrahmane MIRA-Béjaia, le 23 Mai 2010.
- [29] J. Lesenne, F. Notelet, G. Séguier, « Introduction à l'électrotechnique approfondie », Technique et Documentation, France, ISBN 2-85206-089-2,1981.
- [30] H. Ibrahim, « Etude et Conception d'un Générateur Hybride d'Electricité de Type Eolien-Diesel avec Elément de Stockage d'Air Comprimé »,Thèse de Doctorat, Université de Québec, Juin 2010.

Conclusion Générale et perspectives

Conclusion Générale

De nos jours, la qualité de l'énergie est un domaine de la plus haute importance. À l'heure où l'économie des pays industrialisés repose sur leurs capacités à produire ou à acheter l'énergie, l'utilisation adéquate et sans perte inutile est capitale.

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre de recherche de nouvelles solutions modernes, à base d'électronique de puissance, de dépollution harmonique du réseau électrique, plus particulièrement le réseau autonome hybride. Il est consacré à la réduction de l'injection de courants harmoniques dans le réseau, cette thèse, bien que ne touchant qu'un de ces domaines de la qualité de l'énergie pourtant si vaste, a permis de faire un bref survol de la problématique liée à la pollution harmonique sur les réseaux de distribution électrique ainsi que les différents moyens de mitigation utilisés.

Dans une première phase, nous avons effectué une étude théorique sur la problématique des perturbations harmoniques générées par des charges non linéaires connectées aux réseaux électriques et les normes standards. Puis, nous avons abordés les différentes solutions de dépollution, le choix d'une solution basée sur les principes de filtrage actif parallèle (FAP) à structure tension a été retenu. Les filtres actifs de puissance ont de meilleures performances de compensation que les filtres passifs conventionnels. Une attention particulière a été portée sur les différents algorithmes de commande du filtre actif de puissance. Il existe une grande variété de configuration pour le filtre actif.

Le second chapitre est consacré à l'étude du filtre actif parallèle à structure tension. L'étape d'identification des courants harmoniques est fondamentale dans le processus de filtrage. Trois méthodes différentes ont ainsi été introduites pour l'identification des courants harmoniques (puissance instantanée, puissance instantanée avec STF et la méthode SDM). La méthode des puissances instantanées a été choisie pour identifier les perturbations en courant, elle offre l'avantage de choisir la perturbation à compenser avec précision, rapidité et facilité d'implantation. Une comparaison entre les performances de compensation en régime transitoire et permanent, ainsi que le temps de réponse en régime transitoire a été effectuée.

Les aspects de commande intelligente ont été abordés dans le troisième point dans le contexte de la compensation des harmoniques. Quatre types de commandes (FLC type1, FLC type2, mode glissant flou type1 et PI FLC type2) ont été appliquées dont l'objectif est d'améliorer la régulation de tension continue du FAP en termes de la robustesse, stabilité et l'amélioration de la qualité d'énergie. Des tests de

simulation ont été effectués. Les résultats obtenus ont montré l'efficacité des différentes stratégies développées, en particulier celles basées sur la logique floue type2.

Le quatrième chapitre est dédié sur les systèmes hybrides en général, leurs architectures et les outils de dimensionnement, le module turbine éolien a été modélisé en tenant compte de tous ses éléments : rotor éolien, transmission, générateur asynchrone et batterie de condensateurs. Le générateur diesel a été aussi modélisé en tenant compte de tous ses éléments qui sont : le moteur diesel et son gouverneur de vitesse, la machine synchrone et le régulateur de tension. La régulation de la fréquence et de tension est assurée respectivement par la charge secondaire et le régulateur de tension du moteur diesel.

Dans ce chapitre, nous avons présenté les modèles des deux parties de notre système hybride, le générateur éolien et celui de diesel. Ensuite, nous avons mis en évidence le comportement dynamique du SHED lors du branchement d'une charge non linéaire. Les simulations ont été réalisées en exploitant le modèle global équipé du filtre actif parallèle sur lequel nous avons introduit les stratégies de commande.

La comparaison des résultats de simulation montre que dans les mêmes conditions, que le contrôleur flou type 2 donne une meilleure réponse transitoire par rapport aux PI et flou type 1 avec un temps de réponse inférieur et un dépassement réduit. D'autre part, il arrive à améliorer la qualité d'énergie, ce qui traduit par un taux d'harmonique réduit par rapport aux autres régulateurs.

Il reste cependant de nombreuses perspectives de poursuite et d'amélioration des travaux réalisés. Parmi ces perspectives envisageables, on peut citer les suivantes :

- Les conditions de déroulement de notre thèse nous ont obligés à limiter notre travail à une étude théorique et à des résultats de simulation. Il serait donc intéressant de confronter les résultats de simulation avec la réalité et de garder en tête que les méthodes étudiées doivent avoir comme finalité une implantation expérimentale.

- L'interconnexion avec d'autres sources d'énergie renouvelable (photovoltaïque, électrolyseur...) et un système de stockage afin de former un système hybride multi-sources de production électrique et de garantir une disponibilité énergétique et un taux de pénétration élevé des sources renouvelables.

- Développement des algorithmes de gestion et de supervision pour contrôler les échanges d'énergie entre les différents composants du système hybride complet d'une part et de réguler le processus de charge/décharge du stockage d'autre part.

Liste des publications

Liste des publications

1. PUBLICATIONS (REVUES INTERNATIONALES)

Abdeldjabbar Mohamed Kouadria, TayebAllaoui, MouloudDenäi. « High Performance Shunt Active Power Filter Design Based onFuzzy Interval Type-2 Control Strategies» International Review of Automatic Control (IREACO)Vol 8, No 5 (2015).

Abdeldjabbar Mohamed Kouadria,TayebAllaoui, MouloudDenäi. «A hybrid fuzzy sliding-mode control for a three-phase shunt active power filter» energy systems Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016.

Abdeldjabbar Mohamed Kouadria, TayebAllaoui, MouloudDenäi. « Fuzzy Control of a three-phase shunt active filterfor harmonic current compensation in a wind-diesel standalone system», Series C Electrical Engineering and Computer Science.2016

Abdeldjabbar Mohamed Kouadria, T. Allaoui, C. Belfedal. «A fuzzy logic controller of three phase shunt active filter for harmonic current compensation», International Journal of Advances in Engineering & Technology, Mars, 2014., Vol. 7, Issue 1, pp. 82-89.

2. CHAPITRE DU LIVRE

Abdeldjabbar Mohamed Kouadria, T. Allaoui, M. Denäi and G. Pissanidis. « Power Quality Enhancement in Off-Grid Hybrid Renewable Energy Systems Using Type-2 Active Filter Year» 2016, Springer International Publishing. The title of the book: Intelligent Systems and Applications

3. COMMUNICATIONS INTERNATIONALES

Abdeldjabbar Mohamed Kouadria, T. Allaoui, M. Denäi and G. Pissanidis, "Grid power quality enhancement using fuzzy control-based shunt active filtering, » SAI Intelligent Systems Conference (IntelliSys), 2015, London, 2015, pp. 646-650.

Annexes

A.1 Modélisation de la turbine

La turbine éolienne est un dispositif qui permettant de convertir l'énergie du vent en énergie mécanique.

Elle est composée de trois pales identiques de longueur R_t fixées à un arbre d'entraînement relié à un multiplicateur de vitesse ayant un rapport de transformation G . Ce multiplicateur entraîne à son tour l'arbre de la génératrice électrique, (Figure A.1).

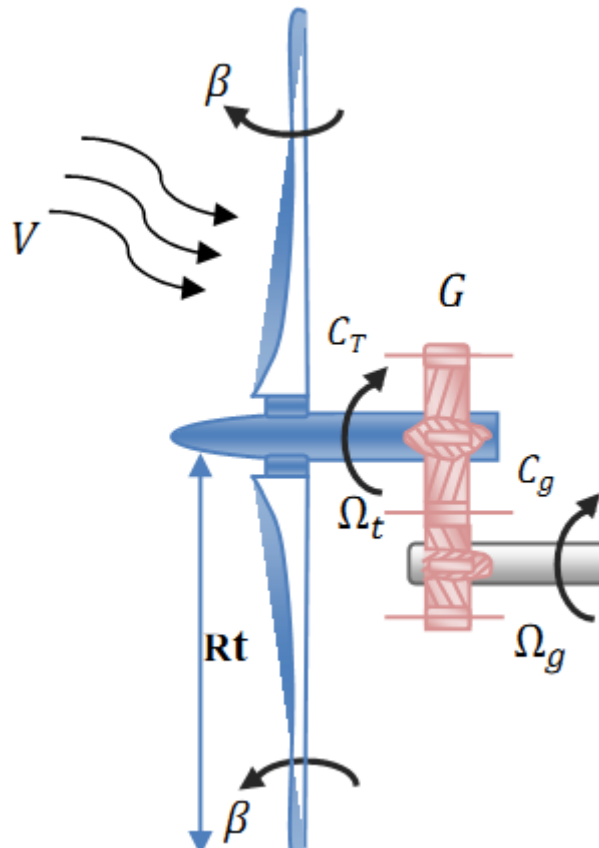


Figure A.1 : Schéma de la turbine éolienne.

A.2 Modèle aérodynamique

Le vent de vitesse, appliqué sur les pales de l'éolienne, entraîne sa mise en rotation et crée une puissance mécanique sur l'arbre de la turbine, notée P_t , s'exprimant par :

$$P_t = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho S v^3 \quad \text{A. 1}$$

Où λ est défini par :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{v} \quad \text{A. 2}$$

Avec :

λ : La vitesse relative représentant le rapport entre la vitesse linéaire à l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent ;

ρ : La masse volumique de l'air (approximativement $1,225 \text{ kg/m}^3$ à la pression atmosphérique et à 15°C) ;

S : La surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle décrit étant défini par la longueur d'une pale ;

Ω_t : La vitesse de rotation de la turbine ;

R : Le rayon de l'aérogénérateur ou la longueur d'une pale.

Le coefficient de puissance C_p représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne et dépend également de la caractéristique de la turbine. Ce coefficient présente une limite théorique, appelée limite de BETZ .

$$C_p = f(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3\beta - C_4 \right) \exp\left(\frac{-C_5}{\lambda_i}\right) + C_5\lambda \quad \text{A. 3}$$

Avec : $C_1 = 0,5176$; $C_2 = 116$; $C_3 = 0,4$; $C_4 = 5$; $C_5 = 21$; $C_6 = 0,0068$.

$$C_p = f(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3\beta - C_4 \right) \exp\left(\frac{-C_5}{\lambda_i}\right) + C_5\lambda \quad \text{A. 4}$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1} \quad \text{A. 5}$$

Connaissant la vitesse de rotation de la turbine, le couple mécanique C_T disponible sur l'arbre lent de la turbine peut donc s'exprimer par :

$$C_T = \frac{P_t}{\Omega} = \frac{\pi}{2\lambda} \rho R^3 v^2 C_p(\lambda, \beta) \quad \text{A. 6}$$

En tenant compte du multiplicateur, adaptateur de la vitesse entre la turbine et la génératrice, son gain est modélisé mathématiquement par les équations suivantes :

$$C_g = \frac{C_T}{G} \quad \text{et} \quad \Omega_t = \frac{\Omega_g}{G} \quad \text{A. 7}$$

A.3 Limite de BETZ

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la figure suivante

la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval.

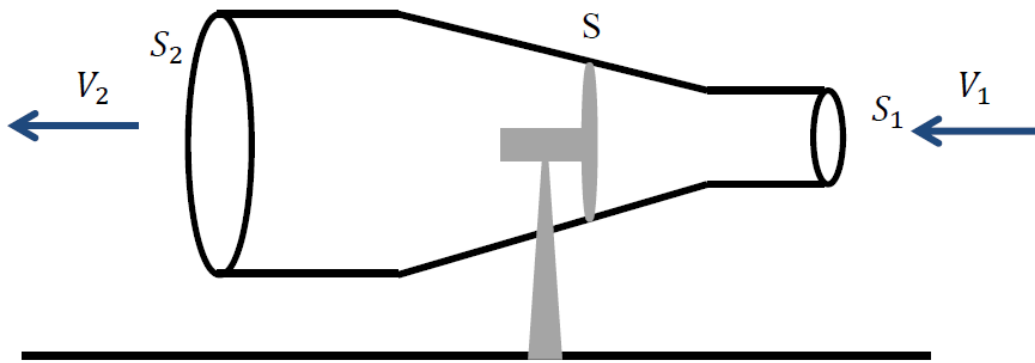


Figure A.2 Tube de courant autour d'une éolienne

En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V_2 , soit $\frac{V_1+V_2}{2}$ la masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales en une seconde est :

$$m = \frac{\rho S (V_1 + V_2)}{2} \quad \text{A. 8}$$

V_1 : vitesse du vent à l'avant de l'éolienne;

V_2 : vitesse du vent après passage à travers le rotor

S : Surface des pales.

La puissance P_m , est donnée par la loi de NEWTON qui s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent:

$$P_m = \frac{m(V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad \text{A. 9}$$

En remplaçant m par son expression dans (A.9)

$$P_m = \frac{\rho S (V_1 + V_2)(V_1^2 - V_2^2)}{4} \quad \text{A. 10}$$

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V_1 , la puissance P_{mt} correspondante serait alors :

$$P_{mt} = \frac{\rho S V_1^3}{2} \quad \text{A. 11}$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est alors :

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left(1 + \left(\frac{V_1}{V_2}\right)\right)\left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right)}{2}$$

A. 12

La figure A.3 représente la caractéristique correspondante à l'équation (A.5). On constate que le ratio $\frac{P_m}{P_{mt}}$ appelé ; aussi coefficient de puissance C_p , présente une limite égale à 0,59. Cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée.

Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprime en fonction de la vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent.

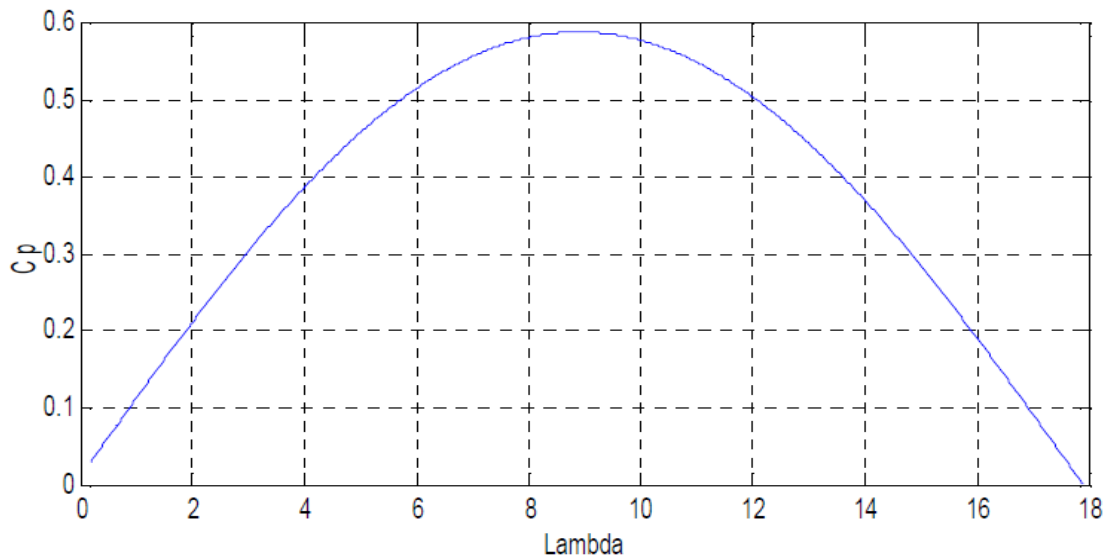


Figure A.3. Coefficient de puissance

Transformations de Clarke et de Park

Tout système triphasé, X_a, X_b, X_c , (X - tension ou courant) peut être représenté par un vecteur tournant en coordonnées α, β et 0 dans un plan tridimensionnel orthogonal. La transformation du système triphasé dans ces coordonnées orthogonales, parfois appelée la transformée de Clarke, est exprimée par :

$$[X_\alpha \ X_\beta \ X_0] = T_{\alpha\beta 0} [X_a \ X_b \ X_c] \quad \text{B.1}$$

où

$$T_{\alpha\beta 0} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad \text{B.2}$$

Avec la matrice $T_{\alpha\beta 0}$ ainsi définie, les amplitudes sont conservées. En utilisant à la place du facteur $2/3$ et de $1/2$, les racines carrées de ceux-ci, la matrice devient orthonormée et les puissances sont conservées.

La transformation inverse est donnée par l'équation Eq. B-3 :

$$[X_a \ X_b \ X_c]^T = T_{\alpha\beta 0}^{-1} [X_\alpha \ X_\beta \ X_0]^T \quad \text{B.3}$$

où

$$T_{\alpha\beta 0}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix} \quad \text{B.4}$$

Quand le système triphasé est équilibré, la composante 0 est nulle et le vecteur tourne dans un plan α - β à la vitesse ω . La trajectoire du vecteur est un cercle. Le mouvement de rotation représente la nature variable du système avec le temps. En représentant le système en coordonnées dq tournant à la

vitesse ω (Figure B-1), le vecteur devient invariant avec le temps. La transformation des coordonnées $\alpha\beta 0$ en $dq0$ (transformation de Park) est donnée par l'équation Eq. B-5 :

$$[X_d X_q X_0]^T = T_{dq0} [X_\alpha X_\beta X_0]^T \quad \text{B.5}$$

Où la matrice T_{dq0} est exprimée par :

$$T_{dq0} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) & 0 \\ -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{B.6}$$

La transformation inverse est donnée par l'équation Eq. B-7 :

$$[X_\alpha X_\beta X_0]^T = T_{\alpha\beta 0}^{-1} [X_d X_q X_0]^T \quad \text{B.7}$$

Où la matrice $T_{\alpha\beta 0}^{-1}$ a l'expression par :

$$T_{\alpha\beta 0}^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(-\omega t) & 0 \\ \sin(\omega t) & \cos(\omega t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{B.8}$$

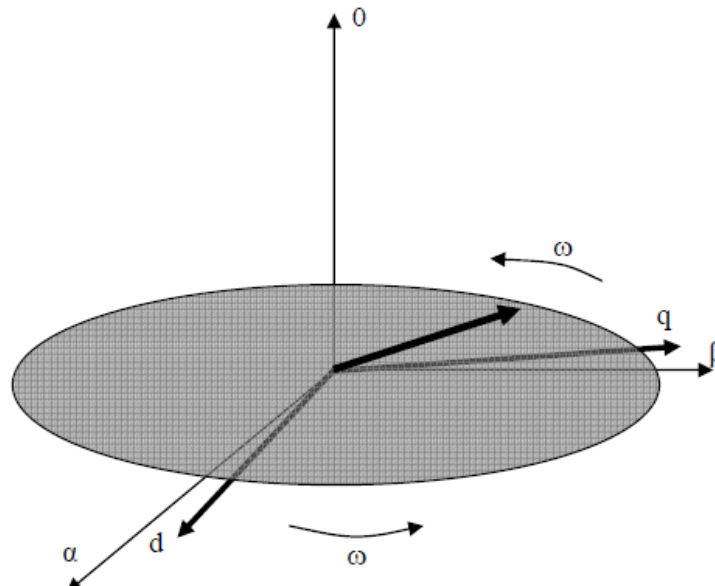


Figure B-1 : Relation entre les référentiels $\alpha\beta 0$ et $dq0$

Les deux transformations Eq. B-1 et Eq. B-5 peuvent être combinées dans une seule transformation Eq. B-9 :

$$[X_d X_q X_0]^T = T_p [X_A X_B X_C]^T \quad \text{B. 9}$$

où T_p est la matrice de Park directe définie par :

$$T_p = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\omega t) & -\sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad \text{B. 10}$$

La matrice inverse est :

$$T_p^{-1} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\omega t) & -\sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad \text{B. 11}$$

Les paramètres du système autonome éolien-diesel

Tension nominale du système	480V
Fréquence nominale	50Hz
Puissance nominale du MAS	250KVA
Puissance nominale du MS	300KVA
Courant nominale pour la MAS	378A
Courant nominale pour la MS	454A

Paramètres de la machine asynchrone GAS

Résistance statorique R_s	0.015 Pu
Résistance rotorique R_r	0.016 Pu
Inductance cyclique au stator L_s	0.06 Pu
Inductance cyclique au rotor L_r	0.06 Pu
Inductance mutuelle L_m	3.5 Pu
Vitesse	1773 (tr/s)
Nombres de pair de pôles	2

Paramètres de la machine synchrone

Résistance statorique R_s	0.017Pu
Réactance synchrones X_d, X_q	3.23 /2.79 Pu
Réactance transitoire d'axe d X'_d	0.21Pu
Réactance sous-transitoires d'axe d et q X''_d, X''_q	0.15 /0.37 Pu
Réactance X_1	0.09 Pu
Constante de temps transitoire d'axe d T'_d	4.4849 sec
Constante du temps sous-transitoires d'axe d et q T''_d, T''_q	0.0681/0.1 sec
Nombres de pair de pôles	2

Nomenclature

Abréviation	Signification
<i>PLL</i>	En anglais: Phase locked loop
<i>THD</i>	Taux de Distorsion Harmonique En anglais: Total harmonic distortion
<i>IGBT</i>	En anglais: Insolated gate bipolar transistor
<i>GTO</i>	En anglais: Gate turn off thyristor
<i>PWM</i>	En anglais: pulse width modulation.
<i>SVPWM</i>	En anglais: Space vecteur pulse width modulation
<i>MLI</i>	Modulation de largeurs d' impulsions.
<i>F.P.B</i>	Filtre passe-bas.
<i>F.P</i>	Facteur de puissance.
<i>F A P</i>	Filtre actif parallèle.
<i>F A S</i>	Filtre actif série.
<i>UPQC</i>	En anglais : Unified power quality conditioner
<i>FMV</i>	Filtre multi-variable
<i>SDM</i>	Identification par la méthode détection synchrone
FLC type-2	Fuzzy Logic Controller type-2
<i>SHÉD</i>	Système Hybride Éolienne-Diesel
<i>SEH</i>	Système d'énergie hybride
<i>MD</i>	Moteur diesel
<i>GD</i>	Générateur diesel
<i>GS</i>	Générateur synchrone
<i>GAS</i>	Générateur asynchrone
<i>MS</i>	Machine synchrone
<i>MAS</i>	Machine asynchrone
<i>WO</i>	Éolien seul (Wind only)
<i>DO</i>	Diesel seul (Diesel only)
<i>WD</i>	Éolien-diesel (Wind Diesel)
V_f	tension imposée par l'onduleur
V_{dc}	tension aux bornes du condensateur de l'onduleur
V_s	tension de la source
<i>PI</i>	Correcteur à action Proportionnelle et Intégrale
<i>TCD</i>	Transformation de <i>Concordia</i> directe.
<i>P</i>	Puissance active
<i>Q</i>	Puissance réactive
<i>S</i>	Puissance apparente

D	Puissance déformante
\bar{p}	Puissance active continue
\bar{q}	Puissance réactive continue
\tilde{p}	Puissance active alternative
\tilde{q}	Puissance réactive alternative
T	Constante de temps dépend du diamètre du rotor de l'éolien, seconde
$T1, \dots, T6$	Constantes du temps, seconde
TD	Temps mort, seconde
P	Densité spécifique de l'air, kg/m ³
S	Surface balayée par l'éolienne, m ²
R	Rayon du rotor éolien, m
Tt	Couple mécanique extraite du vent par le rotor, N.m
Tem	Couple électromagnétique, N.m
$Tmech$	Couple mécanique produit par le MD, N.m
Cp	Coefficient de conversion aérodynamique
J	Inertie, kg.m ²
Φ	Débit de carburant, Litre
V	Vitesse du vent, m/s
Ωt	Vitesse de rotation du rotor éolien, tr/s
ΩG	Vitesse de rotation du générateur électrique, tr/s
Ω	Vitesse du rotor synchrone, tr/s
Ω_{ref}	Vitesse de référence, tr/s
ω_s	Vitesse angulaire du champ tournant, rad/s
ω_m	Vitesse angulaire du rotor, rad/s
β	Angle de calage des pales de l'éolien, en degré
i_{s1abc}	Courants débités par la GAS, Ampère
i_{s2abc}	Courants débités par GS, Ampère
i_{sabc}	Courants de réseau, Ampère
i_{l23}	Courants du filtre, Ampère
i_{sabc2}	Courants de charge secondaire, Ampère
i_{Labc}	Courants de charge principale, Ampère
i_{cabc}	Courants de charge non linéaire, Ampère
i_a	Courant statorique de la phase a, Ampère
i_A	Courant rotorique de la phase A, Ampère

ملخص

يزداد استخدام المصفيات الفعالة المتوازية ، وهذا نظرا لتزايد استعمال الحمولات غير الخطية والتي تؤثر سلبا على نوعية الطاقة الكهربائية، تقوم المصفيات بتحسين نوعية الطاقة في الشبكة الكهربائية حسب المعايير **IEEE 519-1992** المرجعية

في هذه الأطروحة، نقترح منظمات تحكم جديدة في المصفي الفعال المتوازي لتحسين نوعية الطاقة التي تزود بها نظام هجين لمحرك ديزل مع توربينات الرياح ، وتشير نتائج المحاكاة التي أجريت خلال هذا العمل نتائج ممتازة تدل على أهمية الترشيح التوافقي للتيار الكهربائي الناتج عن الحمولات غير الخطية

الكلمات المفتاحية: نظام طاقة هجين، ديزل مع توربينات الرياح، نوعية الطاقة، المصفيات الفعالة المتوازية أنظمة ذكية

Abstract

The use of active filters is becoming increasingly popular due to the increasing pollution of power grids. An active filter serves mainly to clean up the network and keep the THD according to the IEEE standard 519-1992. One of the most important tasks of active filters is to eliminate harmonics. Indeed, non-linear loads produce harmonics and pollute electrical networks. In this thesis, we propose new control of a shunt power active filter to improve the quality of energy supplied to the hybrid network (wind diesel). The simulation results for the proposed methods show that the parallel active filter efficiently depollutes the electrical network of the harmonics generated by the non-linear load.

Keywords: Hybrid power system, Wind-diesel , Power quality , Shunt active filter (Shunt AF), Intelligent controllers,

Résumé

L'utilisation des filtres actifs devient de plus en plus fréquent à cause de la pollution croissante des réseaux électriques. Un filtre actif sert principalement à dépolluer le réseau et garder le THD selon la norme IEEE 519-1992. Une des tâches la plus importante des filtres actifs est d'éliminer les harmoniques. En effet, les charges non linéaires produisent des harmoniques et polluent les réseaux électriques. Dans cette thèse, nous proposons des nouvelles commande d'un filtre actif parallèle pour améliorer la qualité d'énergie fournie au réseau hybride (éolien diesel), Les résultats de simulation pour les méthodes proposées montrent que le filtre actif parallèle dépollue efficacement le réseau électrique des harmoniques générées par la charge non linéaire.

Mots clés : Système d'énergie hybride, éolien-diesel, Qualité de l'énergie, Filtre actif parallèle(FAP), Contrôleurs intelligents,
