

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

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département d'Electronique

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : **Electronique**

Spécialité : Industrie Electronique

Réalisé par

- Ben moussa Omar
- Yahia Abdelkamel

Encadré par :

Prof. SARRA Mustapha
Et M^{lle} BOUDECHICHE Ghania(Doctorante)

Intitulé

**Commande AW-FOPID appliquée à une source d'énergie
renouvelable interconnectée à un filtre actif de puissance**

Evalué le : 28/09/2021

Par la commission d'évaluation composée de :*

| <i>Nom & Prénom</i> | <i>Grade</i> | <i>Qualité</i> | <i>Etablissement</i> |
|--------------------------|--------------|------------------|----------------------|
| <i>M. Talbi Bilel</i> | <i>MCB</i> | <i>Président</i> | <i>Univ-BBA</i> |
| <i>M. Sarra Mustapha</i> | <i>MCB</i> | <i>Encadreur</i> | <i>Univ-BBA</i> |
| <i>M. Adoui Ibtissem</i> | <i>MCB</i> | <i>Examineur</i> | <i>Univ-BBA</i> |

Année Universitaire 2020/2021

* Conformément à :

- L'arrêté n°055 du 21 janvier 2021 Fixant dispositions exceptionnelles autorisées en matière d'organisation et gestion pédagogique, de l'évaluation et de la progression des étudiants, durant la période COVID-19 au titre de l'année universitaire 2020-2021 ;
- Procès-verbal de la réunion de l'équipe du domaine des Sciences et Technologies du mois de Mai 2021.

Remerciements

En premier lieu, nous remercions ALLAH le tout puissant de nous avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Ce travail a été réalisé à l'université Bachir El Ibrahimi département d'électronique industrielle sous la direction du Professeur **SARRA Mustapha**, à qui nous exprimons notre profonde gratitude pour l'attention portée à l'élaboration de ce mémoire, son aide précieuse, ses conseils, son soutien permanent et pour tous ses efforts.

Nos remerciements les plus vifs s'adressent les membres du jury d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer notre travail.

Nous exprimons également notre gratitude à tous les professeurs et enseignants qui ont collaboré à notre formation depuis notre premier cycle d'étude.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à nos familles pour leur soutien et leurs précieux conseils et qui ont mis à notre disposition tous les moyens possibles pour terminer nos études dans de très bonnes conditions.

Abdelkamel et Omar

Sommaire

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| Remerciements | 3 |
| Sommaire..... | 4 |
| LISTE DES FIGURES | 7 |
| Liste des tableaux | 9 |
| Liste des abréviations | 10 |
| Liste des symboles..... | 11 |
| Introduction générale..... | 1 |
| Chapitre I: Perturbation des réseaux électriques et solutions de dépollution. | 3 |
| I.1. Introduction..... | 4 |
| I.2. Carateristiques des perturbations electriques..... | 4 |
| I.2.1 Fréquence..... | 4 |
| I.2.2 Amplitude..... | 5 |
| I.2.3 Forme d'onde..... | 5 |
| I.2.4 Symétrie..... | 5 |
| I.3. Perturbation des réseaux électriques..... | 5 |
| I.3.1 Creux et coupures de tension..... | 5 |
| Conséquences des creux de tension..... | 6 |
| Réglementation..... | 7 |
| I.3.2 Fluctuations de tension (flicker)..... | 7 |
| I.3.3 Déséquilibre du système triphasé de tension..... | 8 |
| I.3.4 Variation de fréquence..... | 8 |
| I.3.5 Harmonique et inter harmonique..... | 9 |
| I.3.5.1 Perturbations harmoniques..... | 9 |
| I.3.5.2 Origines des harmoniques..... | 9 |
| I.3.5.3 Les effets des harmoniques..... | 10 |
| I.3.5.4 Caractérisation des perturbations harmoniques..... | 11 |
| I.3.5.5 Normes et recommandations..... | 12 |
| I.4. Solutions de dépollution des réseaux électriques..... | 13 |
| I.4.1 Solutions traditionnelles..... | 13 |
| I.4.1.1 Filtrage Passif :..... | 14 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| I.4.2 Solutions modernes..... | 15 |
| I.4.2.1 Filtre actif Série (FAS)..... | 16 |
| I.4.2.2 Filtre actif Parallèle (FAP)..... | 16 |
| I.4.2.3 Filtre combiné parallèle-série (UPQC)..... | 16 |
| I.4.2.4 Filtre actif hybride..... | 17 |
| I.1. Conclusion..... | 17 |
| Chapitre II: Filtre actif parallèle, stratégie de commande, régulation..... | 19 |
| II.1. Introduction..... | 20 |
| II.2. Structure générale du filtre actif parallèle..... | 20 |
| II.3. Principe de filtrage actif parallèle de puissance..... | 21 |
| II.3.1 Etude de la partie puissance..... | 23 |
| II.3.1.1 Structure tension..... | 23 |
| II.3.1.2 Structure courant..... | 23 |
| II.3.1.3 Comparaison des deux structures..... | 24 |
| II.3.2 Etude de l'onduleur de tension..... | 24 |
| II.3.2.1 Commande par hystérésis :..... | 25 |
| II.3.2.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI) :..... | 26 |
| II.4. Stratégie de commande du filtre actif parallèle..... | 27 |
| II.4.1 Méthode directe :..... | 28 |
| II.4.2 Méthode indirecte..... | 28 |
| II.5. Méthode de commande directe basée sur la méthode de puissance instantanée :..... | 29 |
| II.5.1 Régulation de la tension continue V_{dc} | 29 |
| II.5.2 Contrôle du courant du filtre par un correcteur PI..... | 30 |
| II.6. Commande Anti Wind up..... | 32 |
| II.6.1 Qu'est-ce que cela signifie Wind up et comment y remédier ?..... | 32 |
| II.6.2 Méthodes d'Anti-Wind up..... | 32 |
| II.6.2.1 La méthode de rétro-calcul..... | 32 |
| II.6.2.2 La méthode Dow..... | 33 |
| II.6.2.3 La méthode Foxboro..... | 34 |
| II.6.2.4 Méthode Blevins..... | 34 |
| II.1. Conclusion..... | 35 |
| Chapitre III: Commande AW-FOPID appliquée au Gpv interconnecté au FAP..... | 37 |
| III.1. Introduction..... | 38 |
| III.2. Modélisation de la chaîne photovoltaïque..... | 38 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| III.2.1 Algorithmes de recherche du point de puissance maximale (MPPT)..... | 38 |
| III.3. Régulateur AW-FOPID..... | 40 |
| III.4. Résultats de simulation..... | 41 |
| III.5. Conclusion..... | 45 |
| Conclusion générale | 47 |
| Références | 48 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure I.1 : Creux et coupures de tension..... | 6 |
| Figure I.2 : La fluctuation de la tension. | 7 |
| Figure I.3 : Déséquilibres du système triphasé de tension. | 8 |
| Figure I.4 : Variation de fréquence..... | 9 |
| Figure I.5 : Exemple d'une onde déformée (superposition d'une fondamentale et l'harmonique) | 9 |
| Figure I.6 : Filtrage Passif | 14 |
| Figure I.7 : Filtre passif résonant..... | 15 |
| Figure I.8 : Filtre passif amorti..... | 15 |
| Figure I.9 : Filtre actif Série (FAS) | 16 |
| Figure I.10 : Filtre actif Parallèle (FAP) | 16 |
| Figure I.11 : Filtre actif série avec un filtre passif parallèle..... | 17 |
| Figure I.12 : Filtre actif hybride. | 17 |
| Figure II.1 : Structure générale du filtre actif parallèle..... | 21 |
| Figure II.2 : Schéma de principe des signaux générés par le filtre actif parallèle. | 21 |
| Figure II.3 : Schéma de principe de l'ensemble réseau électrique, charge polluante et filtre actif et formes d'ondes des courants respectifs. | 22 |
| Figure II.4 : Onduleur de tension | 23 |
| Figure II.5 : Onduleur de courant..... | 24 |
| Figure II.6 : Principe de la commande des courants par hystérésis. | 25 |
| Figure II.7 : Commande par hystérésis | 25 |
| Figure II.8 : Principe de commande des courants par MLI..... | 26 |
| Figure II.9 : commande par modulation de largeur d'impulsions..... | 26 |
| Figure II.10 : Schéma de la commande directe..... | 28 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure II.11 : Schéma de la commande indirecte..... | 28 |
| Figure II.12 : Boucle de régulation de la tension continue | 29 |
| Figure II.13 : Commande directe par hystérésis dans le repère triphasé | 30 |
| Figure II.14 : Boucle de régulation du courant | 31 |
| Figure II.15 : Commande directe par PI dans le repère triphasé..... | 31 |
| Figure II.16 : contrôle pi d'un seul intégrateur sans protection contre Wind up..... | 32 |
| Figure II.17 : schéma de la méthode rétro-calcul..... | 33 |
| Figure II.18 : schéma de la méthode rétro-calcul..... | 33 |
| Figure II.19 : schéma de la méthode Foxboro..... | 34 |
| Figure II.20 : Schéma de la méthode Blevins | 35 |
| Figure III.1 : Modèle d'une cellule PV..... | 38 |
| Figure III.2 : Diagramme d'un système PV avec MPPT..... | 39 |
| Figure III.3 : Modèle de simulation du FAP shunt contrôlé par la commande DPC en présence du système PV..... | 40 |
| Figure III.4 : Structure du contrôleur AW-FOPID..... | 41 |
| Figure III.5 : Profil d'irradiance, courant et puissance du GPV..... | 43 |
| Figure III.6 : Résultats de la simulation avec zoom du FAP shunt basé sur le contrôle DPC avec le régulateur AW-FOPID et associé au GPV (tensions et courants de source, courants de filtre et de charge)..... | 44 |

Liste des tableaux

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau I.1 : exemples des appareils et leur conséquence néfaste..... | 6 |
| Tableau I.2 : L'ensemble des matériels électriques perturbés par la pollution harmonique. ... | 11 |
| Tableau 1.3 : Limites des émissions de courants harmoniques. | 13 |
| Tableau III.1 : Paramètres de PSO-SF..... | 42 |
| Tableau III.2 : Paramètres de simulation..... | 42 |

Liste des abréviations

| | |
|----------|----------------------------------------------------|
| F A P | Filtre Actif Parallèle. |
| F A S | Filtre Actif Série. |
| F.P | Facteur de Puissance. |
| FFT | Fast Fourier transformé (En français TFR) |
| GTO | (En anglais: Gate turn off thyristor). |
| IGBT | (En anglais: Insolated Gate Bipolar Transistor). |
| PID | Régulateur Proportionnel Intégral Dérivateur |
| THD | (En anglais : Total Harmonic distorsion). |
| MLI | Modulation de Largeur d'Impulsion |
| UPQC | Unified Power Quality Conditioner |
| MOSFET | Metal Oxyde Semi-Conductor Field Effect Transistor |
| CEI | Commission Electrotechnique Internationale |
| IEEE | Institute of Electrical and Electronics Engineers |
| AW-FOPID | Anti Wind-up Fractional Order PID |
| MPPT | Maximum Power Point Tracking |
| DPC | Direct Power Control |

Liste des symboles

| | |
|---------------------|--------------------------------------------------------|
| p | Puissance instantané active |
| Q | Puissance instantané réactive |
| S | Puissance instantané apparente |
| I_l | Courant de charge |
| I_{ref} | Courant de référence |
| R_f | Résistance de filtre de sortie |
| L_f | Inductance de filtre de sortie |
| V_{dc} | Tension continue |
| P_{dc} | Puissance continue |
| C_{dc} | Condensateur de stockage |
| I_{chr} | Composante reactive |
| I_{cha} | Composante active |
| I_s | Courant de source |
| I_f | Courant du filtre |
| C_f | La capacité du filtre |
| L_f | l'inductance du filtre |
| K_p, K_i, K_d | les facteurs de gain proportionnel, intégral et dérivé |
| ε, η | les ordres intégraux et dérivés |

A decorative red border that resembles a scroll, with rounded corners and a vertical strip on the left side that looks like a binding or a scroll edge. The text is centered within this border.

Introduction générale

Introduction générale

L'énergie renouvelable est une source d'énergie importante. Elle est actuellement considérée comme une solution économique et environnementale, et avec l'augmentation de l'utilisation de diverses sources d'énergie dans le domaine industriel, il est devenu nécessaire d'améliorer les réseaux électriques.

Dans les systèmes électriques a entraîné de plus en plus des problèmes liés aux distorsions harmoniques dans les réseaux électriques. La circulation des harmoniques dans le réseau cause une dégradation de l'onde de tension et augmente les pertes de puissance, sans oublier les perturbations au fonctionnement normal de certains équipements.

Plusieurs solutions ont été proposées pour résoudre le problème de la pollution harmonique dans les réseaux électriques de distribution. Des solutions efficaces et peu onéreuses qui permettent de diminuer l'émission des harmoniques. Parmi ces solutions, l'utilisation des filtres passifs : ils ont été utilisés pour éliminer les harmoniques de courants et améliorer le facteur de puissance. Cette solution est la plus répandue et pratiquement la plus simple et la moins chère, et de grandes efficacités, mais leurs performances dépendent énormément de l'impédance de la source et peuvent mener à une résonance non voulue avec le réseau. De plus, ce type de filtre perd de son efficacité lorsque les caractéristiques de la charge évoluent.

Pour réduire les inconvénients des filtres passifs, une autre solution consiste à mettre en œuvre un système de filtres actifs de puissance. Les filtres actifs sont un moyen efficace pour la compensation des harmoniques de courants ou de tensions générés par des charges non linéaires. Ils compensent, en temps réel, les perturbations dues à une charge non linéaire en injectant sur le réseau des harmoniques et le réactif du courant consommé par la charge afin que le réseau n'est plus qu'à fournir un courant sinusoïdal et en phase avec la tension.

De manière à atteindre ces objectifs de recherche, ce mémoire sera divisé en trois chapitres :

Le premier chapitre sera consacré à la description des perturbations en courant et en tension pouvant intervenir dans un réseau électrique. Les origines, les conséquences et les normes inhérentes à ces perturbations seront analysées. Dans ce chapitre, nous présenterons également les solutions traditionnelles et modernes de dépollution.

Dans le second chapitre de ce mémoire, nous traiterons le problème des perturbations en courant et de leur compensation à partir d'une structure de filtre actif parallèle. Nous étudierons la

structure d'un filtre actif parallèle, le principe de fonctionnement, étude de la partie de puissance et la stratégie de commande.

Dans le troisième chapitre de ce mémoire, nous aborderons la faisabilité expérimentale d'un filtre actif de puissance avec une commande AW-FOPID en utilisant MATLAB/SIMILUNK

Chapitre I

**Perturbation des réseaux
électriques et solutions de
dépollution.**

I.1. Introduction

L'énergie électrique produite et transférée aux utilisations multiples de la consommation, selon cahier de charge spécifiée, ce cahier comprend la mesure de la qualité de l'énergie, les paramètres caractéristiques de ce système comme la fréquence et l'amplitude, la forme d'onde qui doit être sinusoïdale ... etc. Ce passage de l'énergie à travers plusieurs étapes à partir du début de la production à être transportés dans les lignes du réseau électrique, en utilisant des convertisseurs statiques, celle-ci dépend essentiellement de l'électronique de puissance, de manière à obtenir de tension et courant sinusoïdale avec une qualité acceptable compatible avec le contenu de ce cahier de charge.

Chaque générateur d'énergie électrique a de nombreux problèmes qui causent une faible puissance et mauvaises performances.

La tension subit généralement beaucoup de perturbations de deux origines distinctes :

- les perturbations de tension causées par le passage, dans les réseaux électriques, des courants perturbateurs comme les courants harmoniques, déséquilibrés et réactifs.
- les perturbations de tension causées par des tensions perturbatrices comme les tensions harmoniques et déséquilibrées et les creux de tension [1].

I.2. Carateristiques des perturbations electriques

Les tensions d'un réseau électrique constituent un système alternatif triphasé, dont la fréquence de base est de (50 en Algérie, 60 en les Etats-Unis). Les paramètres caractéristiques d'un tel système sont:

- la fréquence.
- l'amplitude des trois tensions.
- la forme d'onde qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde.
- la symétrie du système triphasé, caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et de leur déphasage relatif.

I.2.1 Fréquence

Les variations de fréquence peuvent être provoquées par des pertes importantes de production, de l'ilotage d'un groupe sur ses auxiliaires ou son passage en réseau séparé, ou d'un défaut dont la chute de tension résultante entraîne une réduction de la charge. Il faut également remarquer que les variations de fréquence peuvent être bien plus importantes pour les réseaux autonomes, Selon la norme convenue [6].

I.2.2 Amplitude

L'amplitude de la tension est un facteur crucial pour la qualité de l'électricité. Elle constitue en général le premier engagement contractuel du distributeur d'énergie. Dans le cas idéal, les trois tensions ont la même amplitude, qui est une constante. Cependant, plusieurs phénomènes perturbateurs peuvent affecter l'amplitude des tensions. En fonction de la variation de l'amplitude on distingue deux grandes familles de perturbations :

- Les creux de tension, coupures et surtensions. Ces perturbations se caractérisent par des variations importantes de l'amplitude. Elles ont pour principale origine des courts-circuits, et peuvent avoir des conséquences importantes pour les équipements électriques.
- Les variations de tension. Ces perturbations se caractérisent par des variations de l'amplitude de la tension inférieure à 10% de sa valeur nominale. Elles sont généralement dues à des charges fluctuantes ou des modifications de la configuration du réseau[8].

I.2.3 Forme d'onde

La forme d'onde des trois tensions formant un système triphasé doit être la plus proche possible d'une sinusoïde. En cas de perturbations au niveau de la forme d'onde, la tension n'est plus sinusoïdale et peut en général être considérée comme une onde fondamentale à 50Hz associée à des ondes de fréquences supérieures ou inférieures à 50 Hz appelées également harmoniques. Les tensions peuvent également contenir des signaux permanents mais non-périodiques, alors dénommés bruits [6].

I.2.4 Symétrie

La symétrie d'un système triphasé se caractérise par l'égalité des modules des trois tensions et celle de leurs déphasages relatifs. La dissymétrie de tels systèmes est communément appelé déséquilibre.

I.3. Perturbation des réseaux électriques

L'énergie électrique est délivrée sous forme de tension. La qualité de la tension peut être affectée, soit par des perturbations aléatoires à caractère accidentel, soit par des perturbations existantes en permanence ou pendant des instants de durées bien déterminées. Ces perturbations sont classées comme suit :

I.3.1 Creux et coupures de tension

Le creux de tension est une diminution brutale de la tension à une valeur située entre 10% et 90% de la tension nominale pendant une durée allant de 10 min jusqu'à quelques secondes. Les creux de tension sont dus à des phénomènes naturels comme la foudre, ou à des défauts sur l'installation ou dans les réseaux tant publics que ceux des utilisateurs. Ils apparaissent également

lors de manœuvres d'enclenchement mettant en jeu des courants de fortes intensités (moteurs, transformateurs, etc.).

Les principales causes des creux de tension sont les perturbations dues à l'exploitation des réseaux comme la mise sous tension de gros transformateurs, les courts circuits, enclenchement des condensateurs, simple démarrage de gros moteurs...etc. et il a comme effets des perturbations sur les couples pour les machines tournantes, étant donné que celui-ci dépend du carré de la tension, perturbation d'appareillage électronique, pannes intempestives. . .etc[11].

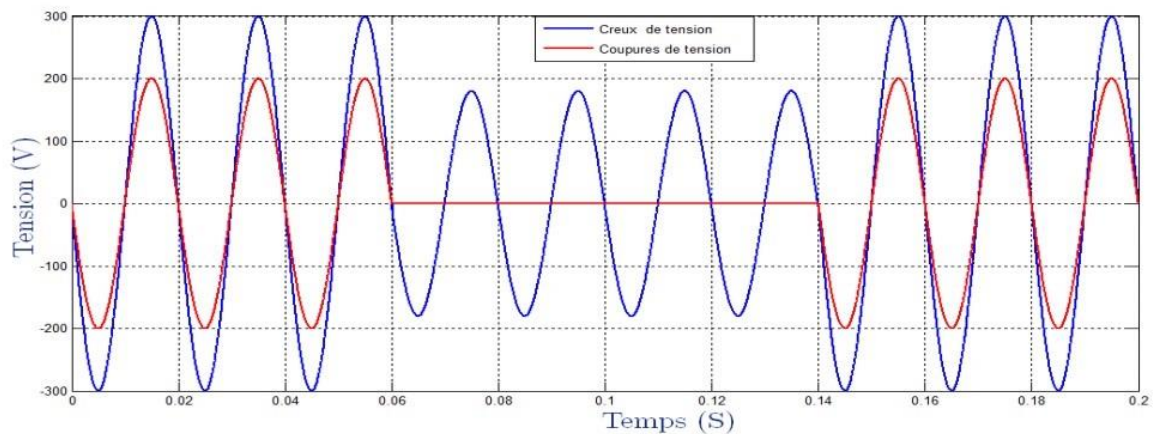


Figure I.1 : Creux et coupures de tension

Conséquences des creux de tension

Les creux de tension sont susceptibles de perturber le fonctionnement de certaines installations industrielles et tertiaires. En effet, ce type de perturbation peut causer des dégradations de fonctionnement des équipements électriques qui peuvent aller jusqu'à la destruction totale de ces équipements. Et le tableau I.1 représente des exemples des appareils et leur conséquence néfaste [13]:

Tableau I.1 : exemples des appareils et leur conséquence néfaste.

| Types d'appareils | Conséquences néfastes |
|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Eclairage | Moins de luminosité, extinction et réallumage (lampes à arc) |
| Systèmes à base d'électronique de puissance | Arrêt du dispositif |
| Dispositifs de protection | Ouverture des contacteurs |
| Moteurs asynchrones | Ralentissements, décrochage, surintensité au retour de la Tension |

| | |
|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Moteurs synchrones | Perte de synchronisme, décrochage et arrêt du moteur |
| Variateurs de vitesse pour un moteur à courant continu | <ul style="list-style-type: none"> • En mode onduleur : destruction des protections • En mode redresseur : ralentissement de la machine |
| Variateurs de vitesse pour un moteur asynchrone | Ralentissement, décrochage, surintensité au retour de la tension, destruction éventuelle de matériel au niveau du convertisseur |

Réglémentation

L'engagement de certain service de distribution se présente sous forme de seuils, les creux de tension étant caractérisés par leur profondeur et leur durée, avec des limites de 30% et de 600 ms [6].

I.3.2 Fluctuations de tension (flicker)

Les fluctuations de tension sont des variations périodiques ou erratiques de l'enveloppe de la tension qui se produisent à des intervalles de temps de quelques centièmes de secondes. L'amplitude de la tension doit se situer dans une bande de $\pm 10\%$ de sa valeur nominale.

Ces fluctuations entraînent des variations de flux lumineux pour les lampes à incandescence créant un papillotement de la lumière.

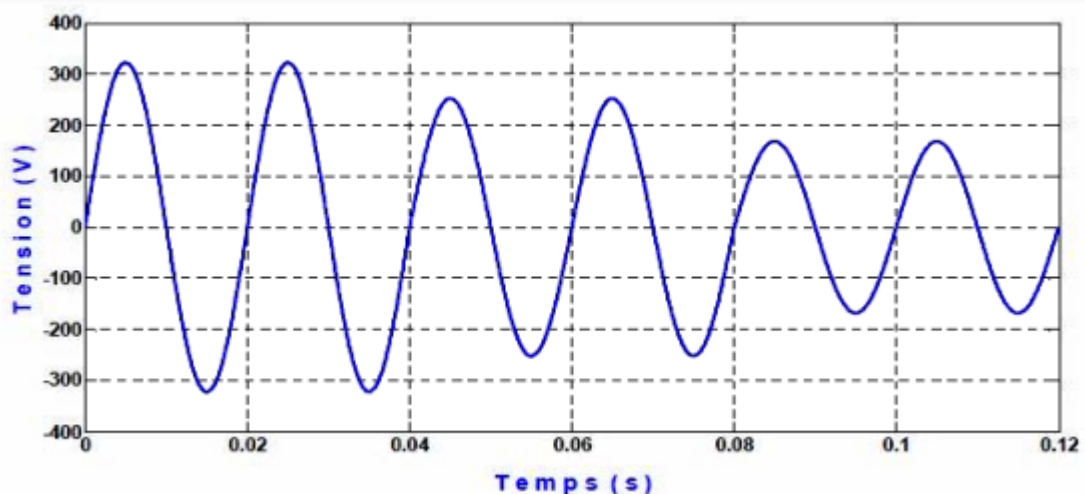


Figure I.2: La fluctuation de la tension.

I.3.3 Déséquilibre du système triphasé de tension

Lorsque les trois tensions ne sont pas identiques en amplitude et/ou ne sont pas décalés d'un angle 120° ($\frac{2\pi}{3}$ rad) les unes par rapport aux autres, on dit qu'on a un déséquilibre du système triphasé.

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

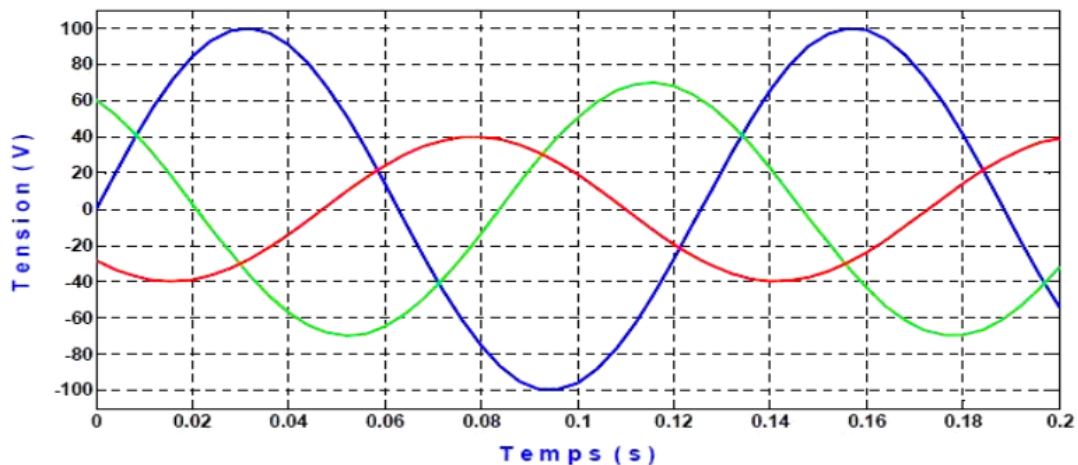


Figure I.3: Déséquilibres du système triphasé de tension.

I.3.4 Variation de fréquence

Les réseaux de distributions ou de transports ont une fréquence constante, sa variation est très rare sauf dans des circonstances exceptionnelles, comme dans le cas de certains défauts graves sur le réseau.

Dans les conditions normales d'exploitations, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle de 50 Hz $\pm 1\%$.

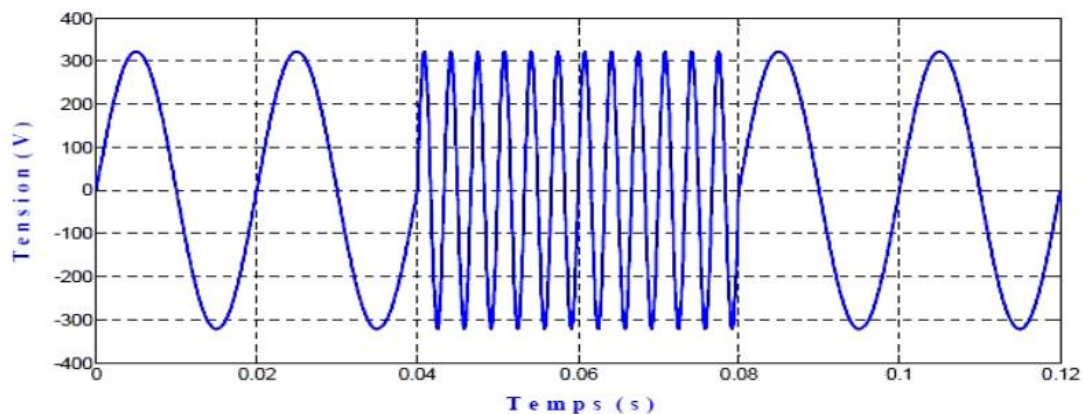
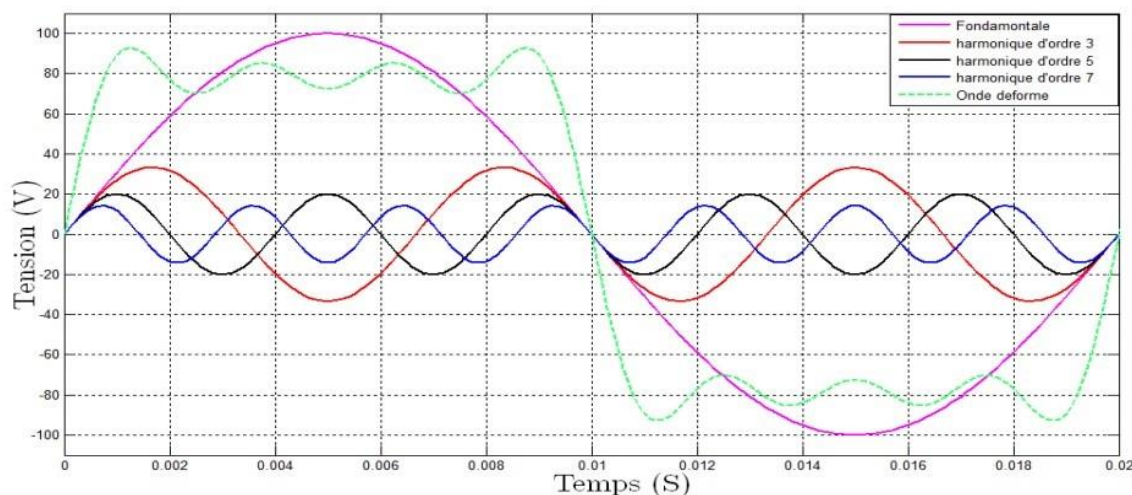


Figure I.4: Variation de fréquence**I.3.5 Harmonique et inter harmonique**

Les harmoniques sont des ondes sinusoïdales de fréquences multiples entier du fondamental superposées à l'onde fondamentale (50Hz). La principale source de la présence des harmoniques dans les réseaux électriques est l'utilisation intensive des convertisseurs statiques.

Les inters harmoniques sont superposés à l'onde fondamentale mais n'ont pas des multiples entiers de la fréquence du réseau.

**Figure I.5:** Exemple d'une onde déformée (superposition d'une fondamentale et l'harmonique)**I.3.5.1 Perturbations harmoniques**

Un harmonique est une composante sinusoïdale d'un signal périodique, de fréquence (f) multiple de celle du signal fondamental.

Le signal de rang (ordre) 1 est la composante fondamentale du signal périodique. L'harmonique de rang zéro correspond à la composante directe du signal. Par ailleurs l'amplitude de chaque harmonique est inversement proportionnelle à son ordre. Donc, les premiers rangs harmoniques sont celles proches de la fondamentale tel que (3, 5 et 7), ils ont des amplitudes élevées, d'où la raison de les limiter selon les normes [16].

I.3.5.2 Origines des harmoniques

Les appareils électriques employés dans les secteurs industriels et domestiques, se comportent comme des charges non linéaires produisant des perturbations harmoniques affectant la forme d'onde de la tension du réseau électrique. Ces harmoniques ont des effets défavorables sur le bon fonctionnement, la rentabilité et la durée de vie des équipements et installations électriques.

I.3.5.3 Les effets des harmoniques

On peut classer les effets des harmoniques en deux catégories :

➤ Effets instantanés

Ce sont les conséquences qui apparaissent immédiatement sur certains appareillages électriques ou électroniques et qui sont :

- **Des défauts de fonctionnement des équipements électriques** : les harmoniques conduisent à une modification de signe des ondes de tension et de courant plus d'une fois à la demi-période. Les appareils affectés sont ceux qui possèdent des grandeurs électriques passant à zéro lors du fonctionnement .
- **Troubles fonctionnels des micro-ordinateurs** : trouble qui s'affichent sur les micro-ordinateurs par un affaiblissement de leur qualité d'images et par des couples pulsatoires des moteurs d'entraînement de disque .
- **Erreurs dans les appareils de mesure** : Ces erreurs se manifestent sous forme de dégradations de mesure et des erreurs de lecture au niveau des appareils de mesure et des compteurs d'énergie à induction .
- **Bruits et vibrations** : Les courants harmoniques sont la source des bruits et des vibrations générés par les appareils électromagnétiques (transformateurs, inductances et machines tournantes)

➤ Effets à terme

Ils sont généralement liés à un échauffement des équipements après leur exposition aux perturbations harmoniques dans une durée assez importante, provoquant une fatigue prématurée du matériel, des lignes et conduit à une diminution du rendement des équipements. Parmi ces échauffements, nous avons :

- **Echauffement des câbles et des équipements** : Les câbles dont le neutre présente un sur-échauffement et les matériels à enroulement tels que les transformateurs ou les moteurs sont concernés par ce type d'échauffement qui peut durer quelques secondes à quelques heures ou de quelques heures à quelques années.
- **Echauffement des condensateurs** : Les surcharges dues aux harmoniques ou à l'augmentation de la tension fondamentale, engendrent un échauffement au niveau des condensateurs, cet échauffement est causé par les pertes dues au phénomène d'hystérésis dans le diélectrique et peut donner lieu à un claquage.
- **Echauffement due aux pertes supplémentaires des machines électriques et des transformateurs** : pour les machines l'échauffement est due aux pertes dans les circuits rotoriques à cause des différences importantes de vitesse entre les champs tournants inducteurs harmoniques et le rotor. Pour les transformateurs l'échauffement est due aux

perles par hystérésis et courants de Foucault dans les circuits magnétiques, et les pertes par effet Joule dans les enroulements.

Le tableau suivant montre les effets de la pollution harmonique sur les matériels électriques [21].

Tableau I.2: L'ensemble des matériels électriques perturbés par la pollution harmonique.

| Nature du matériel Electrique | Effet de la pollution harmonique |
|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Machines tournantes Moteurs triphasés, alternateurs | Echauffements supplémentaires (effet joule) dans les enroulements statiques. Couples oscillatoires. Augmentation du bruit. |
| Transformateurs | Pertes supplémentaires dans le fer (par courants de Foucault) et dans les enroulements (par effet joule). Risque de saturation en présence d'harmoniques pairs. |
| Câbles | Augmentation des pertes surtout dans le câble de neutre ou s'ajoutent les harmoniques de rang 3 et multiples de 3. Pertes diélectriques supplémentaires. |
| Électronique de puissance (Convertisseur statique) | Troubles fonctionnels liés la forme d'onde (Commutation, synchronisation). |
| Compteur d'énergie | Erreurs de mesure |
| Condensateurs de puissance | Pertes diélectriques supplémentaires aboutissant à un vieillissement prématuré des condensateurs |
| Ordinateur | Dysfonctionnement lié aux couples pulsatoires des moteurs d'entraînement des supports magnétiques |
| Dispositifs de protection (Fusibles. Disjoncteurs) | Fonctionnement intempestif |
| Téléviseurs | Déformation d'image |
| Lampes à décharge | Risque de vacillement sous l'effet de l'harmonique de rang 2. |

I.3.5.4 Caractérisation des perturbations harmoniques

Un récepteur d'énergie électrique se comporte comme une charge polluante s'il absorbe des courants non sinusoïdaux ou et déséquilibrés ou consomme de l'énergie réactive. Les perturbations harmoniques sont caractérisées par le taux de distorsion harmonique (THD) de la tension ou du courant, et la consommation de l'énergie réactive est évaluée par le facteur de puissance $\cos\varphi$.

- **Taux de distorsion harmonique**

Le taux de distorsion harmonique est un paramètre qui définit globalement la déformation de la grandeur alternative.

$$S_h = \frac{x_h}{x_1} \quad (\text{I.1})$$

Avec :

x_h = composante harmonique de rang H .

x_1 = composante fondamentale.

- **Taux d'harmonique global de distorsion**

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

$$\text{THD}(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} X_h^2}}{x_1} \times 100 \quad (\text{I.2})$$

- **Facteur de puissance F_p**

Le facteur de puissance est exprimé par le rapport de la puissance active (P) sur la puissance apparente (S). Les équipements électriques sont dimensionnés, généralement, pour les valeurs nominales de la tension et du courant. Un faible facteur de puissance se traduit par une mauvaise utilisation de ces équipements.

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

Avec

Q = représente la puissance réactive .

I.3.5.5 Normes et recommandations

Les normes sont fixées par des institutions internationales dans le but de limiter les conséquences de la pollution harmonique et garantir une énergie électrique admissible. Il existe deux principales normes au niveau international qui sont la CEI et l'IEEE. Ces normes doivent être respectées par les distributeurs et les utilisateurs d'énergie.

Parmi les normes nous avons par exemple la norme CEI-1000-3-4 qui précise les seuils des courants harmoniques générés par les équipements individuels d'intensité assignée supérieure à 16 A et allant jusqu'à 75 A. Ces limites sont conçues pour les réseaux publics dont la tension nominale se situe dans l'intervalle 230 V (monophasé) et 600 V (triphase) [23].

Tableau 1.3 : Limites des émissions de courants harmoniques.

| Rang | Courant harmonique en % du fondamental |
|--------------|-----------------------------------------------|
| 3 | 21.6 |
| 5 | 10.7 |
| 7 | 7.2 |
| 9 | 3.8 |
| 11 | 3.1 |
| 13 | 2.0 |
| 15 | 0.7 |
| 17 | 1.2 |
| 19 | 1.1 |
| 21 | ≤ 0.6 |
| 23 | 0.9 |
| 25 | 0.8 |
| 27 | ≤ 0.6 |
| 29 | 0.7 |
| 31 | 0.7 |
| ≥ 3 | ≤ 0.6 |
| paire | ≤ 0.6 ou 0.158/h |

I.4. Solutions de dépollution des réseaux électriques

Les systèmes d'électronique de puissance utilisée pour l'amélioration de la qualité de l'énergie sont essentiellement des systèmes de compensation. Ils travaillent en combinaison avec le réseau. Deux types de solutions sont envisageables. La première consiste à utiliser des convertisseurs statiques peu ou moins polluants, tandis que la seconde réalise un filtrage des composantes harmoniques. Afin de compenser toutes les perturbations, 2 groupes de solutions de dépollution, traditionnelle et moderne.

I.4.1 Solutions traditionnelles

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

- L'augmentation de la puissance de court-circuit du réseau et l'utilisation des convertisseurs peu polluants qui ont pour effet de diminuer la distorsion harmonique.
- L'utilisation de dispositif du filtrage pour réduire la propagation des harmoniques produits par les charges non-linéaires [2].

I.4.1.1 Filtrage Passif :

Un filtre passif est constitué d'éléments passifs tels que des inductances, des condensateurs et des résistances, qui forment une impédance dont la valeur varie en fonction de la fréquence. On connecte alors le filtre passif en parallèle avec le réseau de manière à absorber un harmonique de courant donné [12]. La figure I.6 représente un filtre passif.

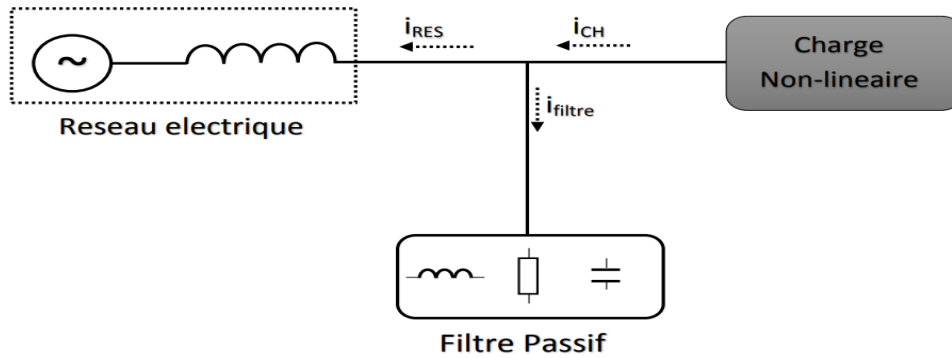


Figure I.6 : Filtrage Passif

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

a- Filtre passif résonant

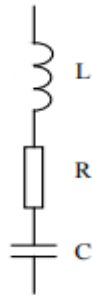
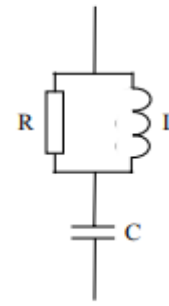
C'est un filtre sélectif constitué d'une résistance, d'un condensateur et d'une bobine en série, comme décrit sur la figure I.7 son impédance équivalente est :

$$Z_{eq}(\omega) = \frac{1 - LC\omega^2 + jRC\omega}{jC\omega} \quad (I.4)$$

b- Filtre passif amorti

C'est un filtre passe haut constituer d'une inductance en parallèle avec une résistance, le tout en série avec un condensateur comme décrit sur la Figure I.8 Son impédance équivalente est :

$$Z_{eq}(\omega) = \frac{1 - LC\omega^2 + j\frac{L}{R}\omega}{-\frac{L}{R}C\omega^2 + jC\omega} \quad (I.5)$$

**Figure I.7** : Filtre passif résonant**Figure I.8** : Filtre passif amorti

Ces dispositifs sont utilisés pour empêcher les courants harmoniques de se propager dans les réseaux électriques. Ils peuvent aussi être utilisés pour compenser la puissance réactive.

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

- Manque de souplesse à s'adapter aux variations du réseau et de la charge.
- Equipements volumineux.
- Problème de résonance avec l'impédance du réseau [2].

I.4.2 Solutions modernes

Les inconvénients inévitables aux filtres passifs et l'apparition de nouveaux composants semi-conducteurs, comme les thyristors GTO et les Transistors IGBT, ont conduit à concevoir une nouvelle structure de filtres appelée filtres actifs de puissance (FAP). Le but de ces filtres est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à ce que le courant et la tension du réseau soient rendus sinusoïdaux et parfois avec un facteur de puissance unitaire.

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

- le volume physique du filtre est plus réduit.
- la capacité de filtrage est supérieure.
- la flexibilité et adaptabilité sont très supérieures. Pourtant, ils présentent quelques inconvénients :
- Leur coût élevé a limité leur implantation dans l'industrie.
- Les pertes sont plus élevées.

Le principe du filtrage actif est l'injection des courants (ou des tensions) harmoniques en opposition de phase avec les harmoniques que l'on désire compenser : courants harmoniques absorbés par la charge et/ou tensions harmoniques présentes sur le réseau.

On trouve distingue trois types de structures de filtre actif :

I.4.2.1 Filtre actif Série (FAS)

Le but du filtre actif série est de créer une impédance en série avec le réseau qui sera nulle pour le fondamental et de valeur élevée pour les harmoniques. Il est destiné à protéger les installations sensibles aux perturbations provenant du réseau telles que les harmoniques en tension, les surtensions, déséquilibres et creux de tension. En revanche, le filtrage série ne permet pas de compenser les courants harmoniques consommés par la charge non linéaire.

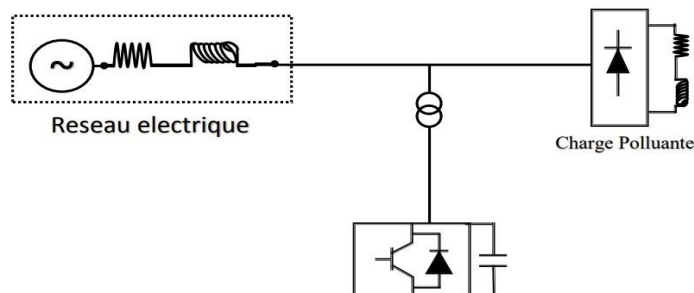


Figure I.9 : Filtre actif Série (FAS)

I.4.2.2 Filtre actif Parallèle (FAP)

Le FAP se connecte en parallèle avec le réseau. Le filtre actif est constitué d'un onduleur de tension et d'un filtre inductif en sortie. Ainsi, l'inductance en sortie de l'onduleur donne la nature de source de courant au filtre actif. Dans le cas où le réseau alimente plusieurs charges polluantes, il est préférable d'utiliser un seul filtre actif pour toutes les charges [24].

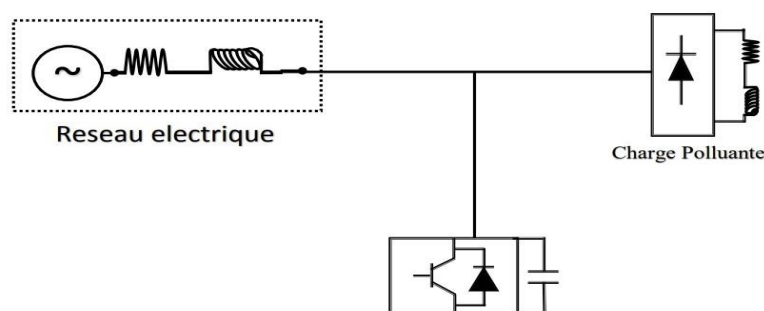


Figure I.10 : Filtre actif Parallèle (FAP)

I.4.2.3 Filtre combiné parallèle-série (UPQC)

L'UPQC (figure I.11) est principalement la combinaison de deux filtres actifs série et parallèle qui partagent la même capacité sur le bus continu. Ce type de dispositif est capable à la fois de régler la tension du réseau et d'éliminer les harmoniques. Il est considéré comme le plus puissant dispositif et il est capable d'effectuer efficacement toutes les tâches de conditionnement de puissance. Cependant, son prix important et la complexité des commandes

des nombreux interrupteurs limitent son utilisation à des applications critiques comme l'équipement médical [14].

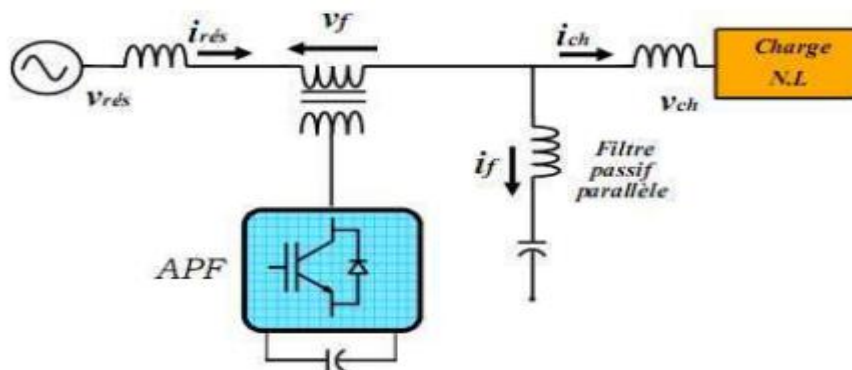


Figure I.11 : Filtre actif série avec un filtre passif parallèle.

I.4.2.4 Filtre actif hybride

Connecté avec ou sans transformateurs au réseau, le filtre actif hybride (Figure I.12) est constitué d'un filtre passif connecté directement en série avec le filtre actif, ce qui entraîne une diminution de la tension du bus continu comparativement à celle d'un filtre actif pur et une réduction du dimensionnement du filtre hybride. En plus, le filtre passif évite les oscillations dues à la commutation, car il présente une haute impédance à cette fréquence.

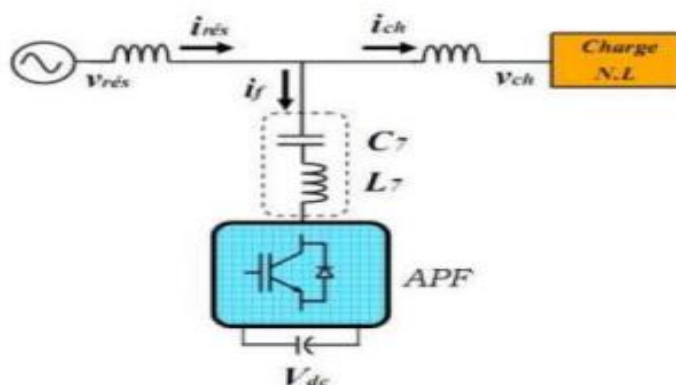


Figure I.12 : Filtre actif hybride.

I.1. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les perturbations qui existent au niveau des réseaux électriques. Comme nous l'avons mentionné, les harmoniques sont des perturbations qui engendrent des effets néfastes sur les équipements électriques. Nous avons présenté des solutions de dépollution des réseaux électriques par le filtre passif et Actif et hybride. Le prochain chapitre aborde les systèmes de dépollution des réseaux électriques par filtrage actif de puissance.

Chapitre II

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

II.1. Introduction

Des trois solutions possibles présentées (filtres passifs, actifs et hybrides) dans le chapitre précédent, dans ce chapitre on ne s'intéresse au filtre actif parallèle.

Afin de réduire les harmoniques au niveau du réseau électrique, nous proposons dans ce travail le filtrage actif parallèle, par les avantages qu'il représente, tel que l'adaptation aux variations de la charge polluante.

Le filtre actif parallèle est un onduleur de tension à modulation de largeur d'impulsions, il injecte dans le réseau des courants harmoniques égaux et en opposition de phase à ceux absorbés par la charge polluante. Cette structure a pour vocation d'éliminer de façon active tout ou une partie des harmoniques de courant.

Dans ce chapitre nous étudierons la structure générale, les différentes stratégies de commande de l'onduleur de tension et le dimensionnement du filtre actif parallèle et on parle de la commande AW FOPID et les méthodes utilisés dans cette commande.

II.2. Structure générale du filtre actif parallèle

La Figure II.1 donne la structure générale du filtre actif parallèle, laquelle se présente sous la forme de deux blocs :

- **La partie puissance est constituée :**
 - d'un onduleur à base d'interrupteurs de puissance, commandables à l'ouverture et à la fermeture (GTO, IGBT, MOSFET... etc.) avec des diodes en antiparallèle.
 - d'un circuit de stockage d'énergie.
 - d'un filtre de sortie.
- **La partie commande est constituée :**
 - de la méthode d'identification des courants perturbés.
 - de la régulation de la tension continue appliquée aux éléments de stockage d'énergie.
 - de la régulation du courant injecté sur le réseau à partir de l'onduleur de tension de la commande de l'onduleur de tension [10].

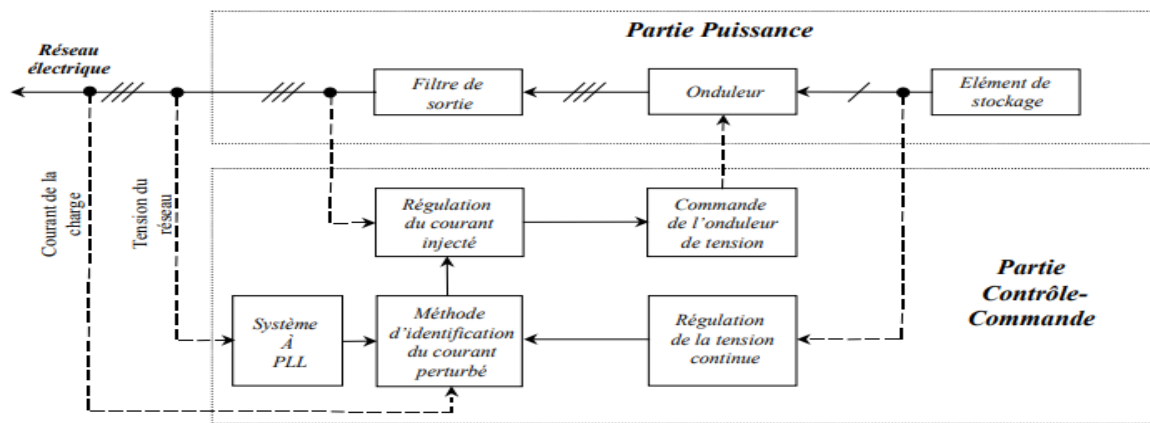


Figure II.1 : Structure générale du filtre actif parallèle

II.3. Principe de filtrage actif parallèle de puissance

Ce filtre est le plus souvent commandé comme un générateur de courant, il génère des courants harmoniques, en opposition de phase avec le réseau, afin que la somme avec ceux-ci soit nulle. On obtient alors des courants sinusoïdaux au niveau du réseau. Il permet donc de supprimer au point de raccordement tous les harmoniques de courants de la charge non linéaire. En pratique, on ne peut pas obtenir un courant de ligne purement sinusoïdal comme dans le cas idéal mais le but est d'avoir un courant qui sera le plus proche possible de la sinusoïde [24].

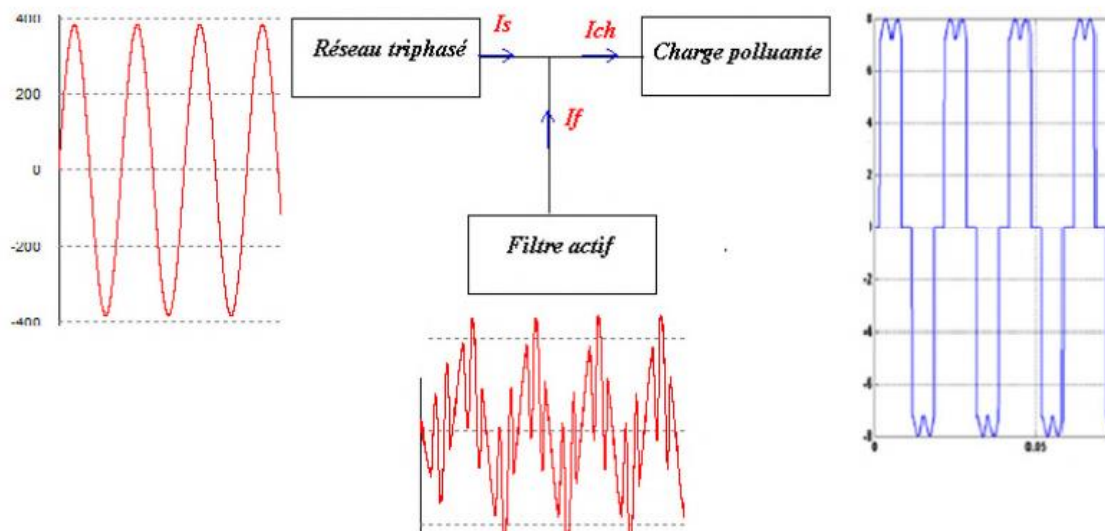


Figure II.2 : Schéma de principe des signaux générés par le filtre actif parallèle.

Pour cela, le circuit de contrôle, en agissant sur la commande MLI, doit imposer la valeur instantanée du courant débité par l'onduleur de telle sorte que le courant fourni par le réseau soit sinusoïdal et en phase avec la tension simple correspondante.

Dans le cas général, le courant absorbé par la charge comporte une composante active (i_{cha}), une composante réactive (i_{chr}) et une composante harmonique ($\sum_{i=1}^{\infty} i_{chn}$).

$$i_{ch} = i_{cha} + i_{chr} + \sum_{i=1}^{\infty} i_{chn} \quad (\text{II.1})$$

Le compensateur actif ne peut absorber ou fournir de la puissance active puisqu'il ne comporte pas de source active.

D'après la première loi de Kirchhoff, le courant fourni par la source est égale à :

$$i_s = i_{ch} - i_f \quad (\text{II.2})$$

La source fournit la puissance active absorbée par la charge :

$$i_f = i_{chr} + \sum_{i=1}^{\infty} i_{chn} \quad (\text{II.3})$$

Pour illustrer le principe de filtrage actif, considérons l'ensemble réseau électrique, charge polluante et filtre actif (figure II.3). La charge polluante est constituée d'un pont triphasé à diodes débitant sur un circuit RL.

Alors que le courant absorbé par la charge polluante est non sinusoïdal, le filtre actif injecte un courant de telle manière que le courant absorbé par le réseau doit être sinusoïdal [9].

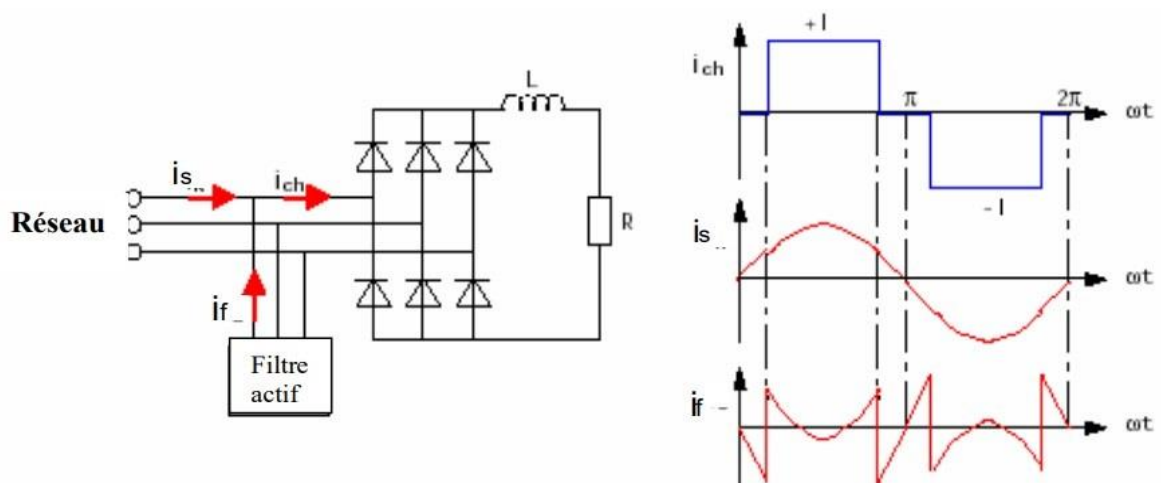


Figure II.3 : Schéma de principe de l'ensemble réseau électrique, charge polluante et filtre actif et formes d'ondes des courants respectifs.

II.3.1 Etude de la partie puissance

II.3.1.1 Structure tension

L'onduleur de tension connecté en parallèle au réseau est illustré par la figure II.4. La capacité C_f joue le rôle d'une source de tension continue. La tension à ses bornes V doit être positive et maintenue quasiment constante. Ses fluctuations doivent être faibles d'une part pour ne pas dépasser la limite en tension des semi-conducteurs constituant les interrupteurs, d'autre part pour ne pas dégrader les performances du filtre actif.

L'onduleur de tension est relié au réseau par l'intermédiaire d'un filtre du premier ordre constitué d'une inductance L_f . Deux rôles sont dévolus à ce filtre: d'une part transformer les variations de tension V_f en variations de courant, d'autre part filtrer les fréquences de commutation des bras d'onduleur.

Les interrupteurs de l'onduleur sont réversibles en courant. Ils sont constitués de semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture en antiparallèle avec une diode [4].

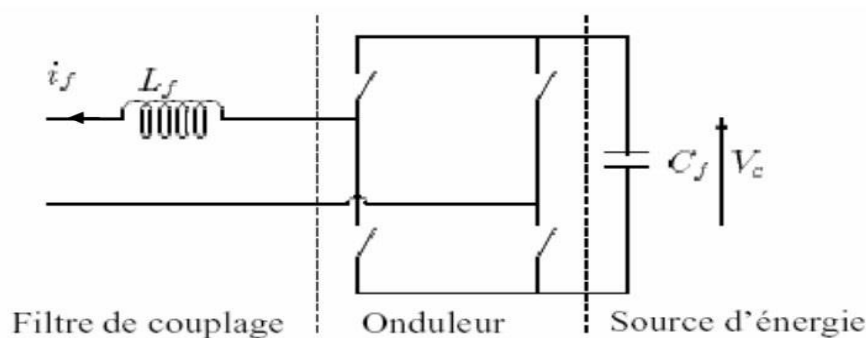


Figure II.4 : Onduleur de tension

II.3.1.2 Structure courant

La figure II.5 représente le schéma de principe d'un onduleur de courant [23]. L'inductance joue le rôle d'une source de courant continu. Le courant I_L traversant cette inductance est maintenu quasiment constant pour ne pas dégrader les performances du filtre actif.

L'onduleur de courant est relié au réseau par l'intermédiaire d'un filtre passe-bas du second ordre constitué d'une inductance L_f et d'une capacité C_f . Ainsi le courant i_f du filtre actif est égal au courant délivré par l'onduleur filtré par le filtre LC dont la fréquence propre est $\frac{1}{2\pi\sqrt{L_f C_f}}$. La bande passante du filtre actif est donc essentiellement imposée par le choix de L_f et de C_f . Ceux-ci peuvent être dimensionnés de manière à atténuer la fréquence de commutation des interrupteurs de l'onduleur.

Les interrupteurs sont unidirectionnels. Ils sont formés par des transistors commandés à l'ouverture et à la fermeture. Ceux-ci ne pouvant supporter de tension inverse, ils nécessitent une diode en série [4].

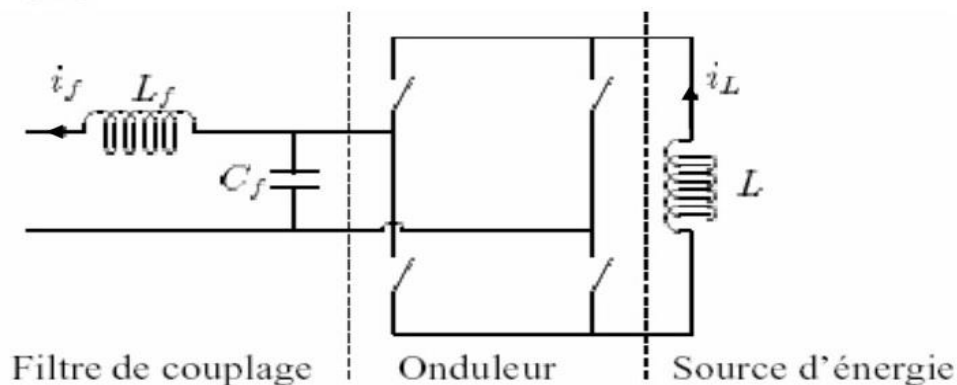


Figure II.5 : Onduleur de courant

II.3.1.3 Comparaison des deux structures

- **Dimensionnement des circuits de stockage**

Pour les faibles puissances, le stockage de l'énergie dans un condensateur (structure tension) est plus efficace et moins coûteux. En revanche, pour les fortes puissances une inductance (structure courant) est plus adaptée.

- **Protection contre les surtensions et surintensités**

Les interrupteurs constituant un onduleur de tension doivent être protégés contre les surintensités tandis qu'un onduleur de courant nécessite une protection contre les surtensions. Cette dernière est plus complexe à réaliser technologiquement.

II.3.2 Etude de l'onduleur de tension

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continue - alternative à partir d'une source de tension continue, on peut obtenir à la sortie une tension alternative. Donc, il est possible de produire à la sortie du convertisseur une tension alternative, par une séquence de commande adéquate des interrupteurs. Cette tension peut comporter un ou plusieurs créneaux par alternance suivant qu'il s'agit d'une commande à un créneau par alternance, ou d'une commande de modulation de largeur d'impulsions (MLI).

Le but de la commande de l'onduleur est de permettre la meilleure reproduction des courants de référence, à travers les ordres de commande appliqués aux interrupteurs de puissance. Les deux principales familles de commande des convertisseurs statiques sont :

- la commande par hystérésis
- la commande par modulation de largeur d'impulsions.

II.3.2.1 Commande par hystérésis :

La commande par hystérésis, appelée aussi commande en tout ou rien, est une commande non linéaire qui utilise l'erreur existant entre le courant de référence et le courant produit par l'onduleur, cette erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis, comme le montre la figure II.6 [5].

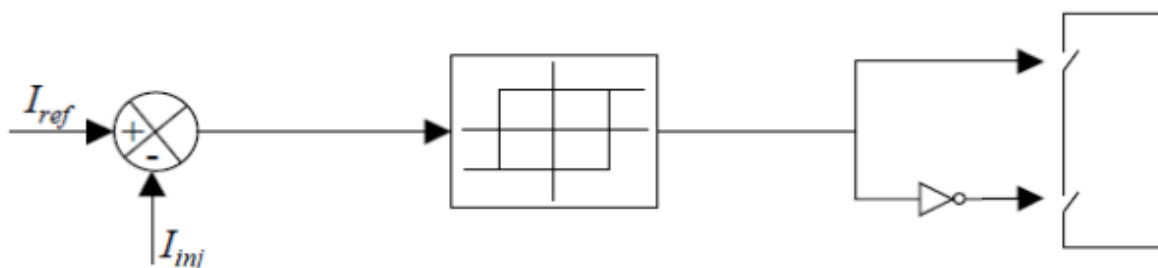


Figure II.6 : Principe de la commande des courants par hystérésis.

Dès que l'erreur atteint la bande inférieure ou supérieure (figure II.7), un ordre de commande est envoyé de manière à rester à l'intérieur de la bande. La simplicité est le principal avantage de cette technique. En revanche, les commutations évoluant librement à l'intérieur de la bande d'hystérésis, on ne peut pas maîtriser correctement le spectre haut fréquence dû aux fréquences de commutations [5].

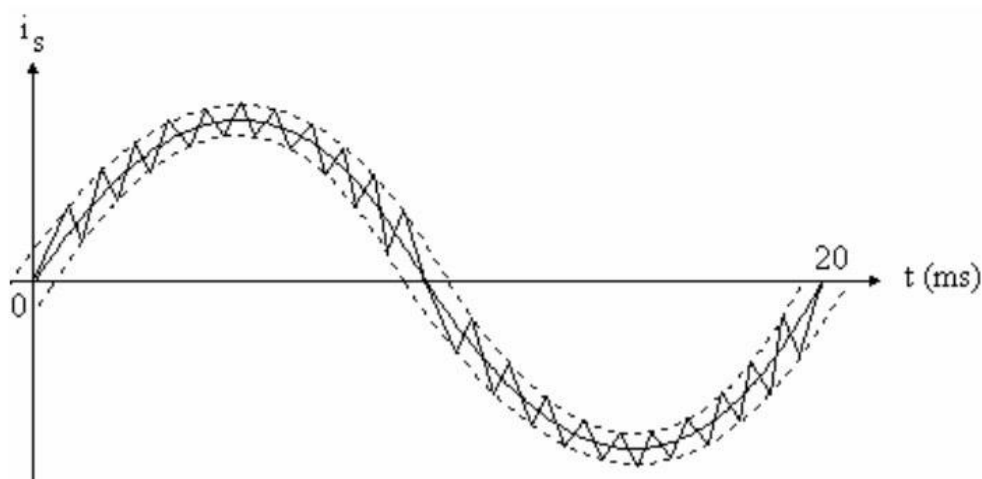


Figure II.7 : Commande par hystérésis

II.3.2.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI) :

Pour résoudre les problèmes précédents, nous introduisons une deuxième famille de commande de l'onduleur : la technique de commande par MLI, qui résout le problème de la maîtrise de la fréquence de commutation [10], dont le schéma de principe est donné par la figure II.8.

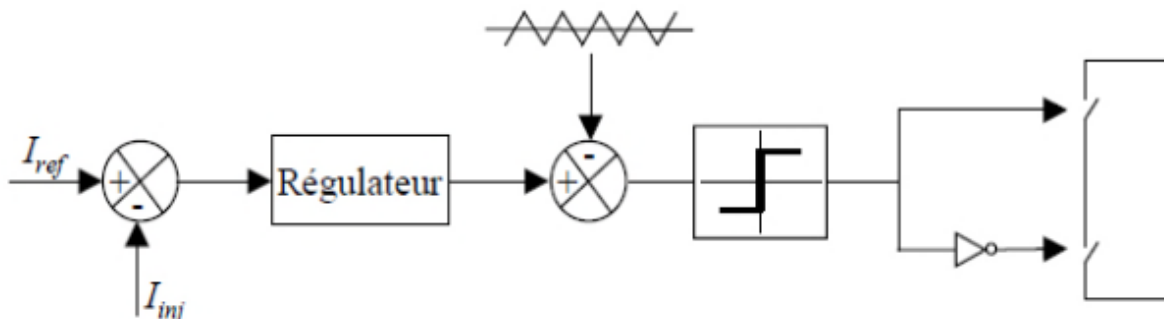


Figure II.8 : Principe de commande des courants par MLI

La plus simple et la plus connue des modulations de largeur d'impulsion est sans doute la MLI à échantillonnage naturel, comme le montre la figure II.9.

Cette technique de commande met en œuvre d'abord un régulateur qui détermine la tension de référence de l'onduleur à partir de l'écart entre le courant mesuré et sa référence. Cette dernière est ensuite comparée avec un signal triangulaire (porteuse à fréquence élevée fixant la fréquence de commutation). La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs.

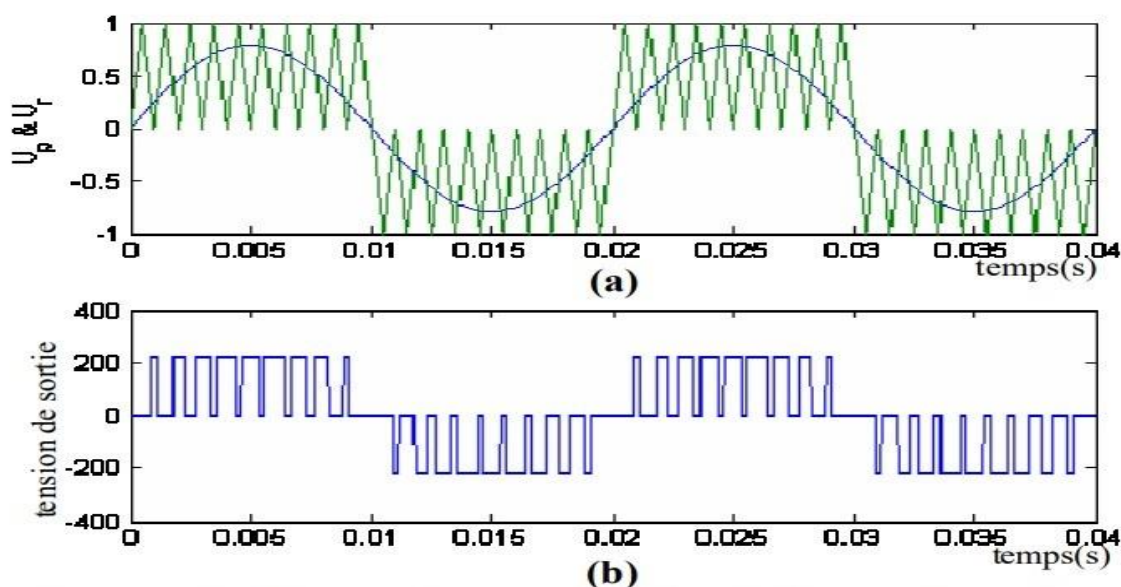


Figure II.9 : commande par modulation de largeur d'impulsions
(a) Signal de référence et de porteuse, (b) Tension de sortie

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

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

II.4. Stratégie de commande du filtre actif parallèle

Afin de commander le filtre actif parallèle, nous devons d'abord identifier les courants harmoniques de la charge polluante, qui servent en effet comme références du filtre actif parallèle. Donc, la stratégie de commande du FAP se base sur la détection des courants perturbateurs dans le domaine temporel. Trois possibilités d'identification des courants perturbateurs peuvent être utilisées :

- identification à partir de la détection du courant de la charge polluante.
- identification à partir de la détection du courant de la source.
- identification à partir de la détection de la tension de la source.

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

- Utilisation la Transformée de Fourier Rapide (TFR) dans le domaine fréquentiel, pour extraire les harmoniques de courant. Cette méthode est bien adaptée aux charges où le contenu harmonique varie lentement. Elle donne aussi l'avantage de sélectionner les harmoniques individuellement. Il est à noter que cette méthode nécessite une grande capacité de calcul.
- le calcul des puissances instantanées dans le domaine temporel. Certaines de ces méthodes se basent sur le calcul des puissances harmoniques de la charge non linéaire. D'autres peuvent être utilisées pour compenser à la fois les courants harmoniques et la puissance réactive, en se basant sur la soustraction de la partie fondamentale active du courant total.

Enfin, la méthode d'identification la plus utilisée est celle appelée méthode des puissances réelles et imaginaires instantanées. Cette méthode offre l'avantage de choisir la perturbation à compenser avec précision, rapidité et facilité d'implantation. Pour toutes ces raisons nous avons retenu cette méthode d'identification pour le reste de notre étude. En effet, afin de pouvoir compenser les courants harmoniques, les courants déséquilibrés et la puissance réactive conjointement ou individuellement, cette méthode nous a semblé la mieux appropriée [10].

II.4.1 Méthode directe :

Cette méthode est basée sur la mesure du courant de la charge polluante puis, de l'extraction des composantes harmoniques de ce courant. La figure (II.10) représente le schéma de la stratégie de commande directe. De cette manière, le filtre actif injecte les courants de compensation sans information sur les courants du réseau. Toutes les erreurs dans le système comme l'incertitude des paramètres, les erreurs de mesure ou de commande apparaîtront dans le réseau sous formes des harmoniques non-filtrés [18].

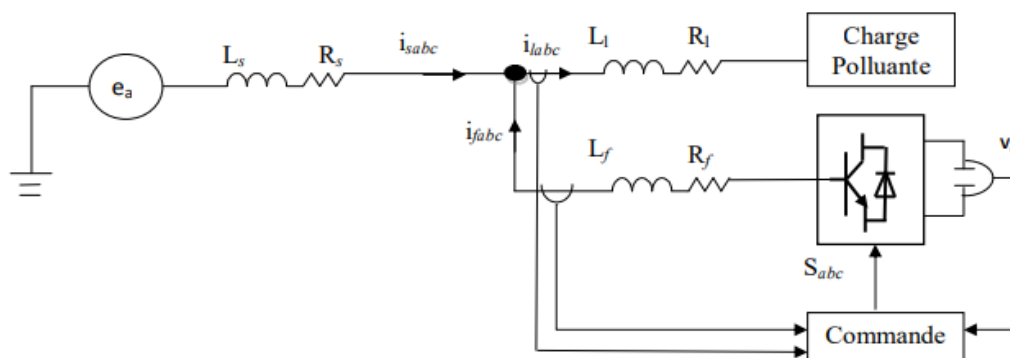


Figure II.10 : Schéma de la commande directe

II.4.2 Méthode indirecte

Cette méthode consiste à mesurer les courants du côté source, et d'imposer la forme sinusoïdale sur ces courants. L'algorithme de commande est plus moins compliqué et demande moins capteurs que celui dans la méthode directe. La figure (II.11) montre le schéma de la commande indirecte du filtre actif [18].

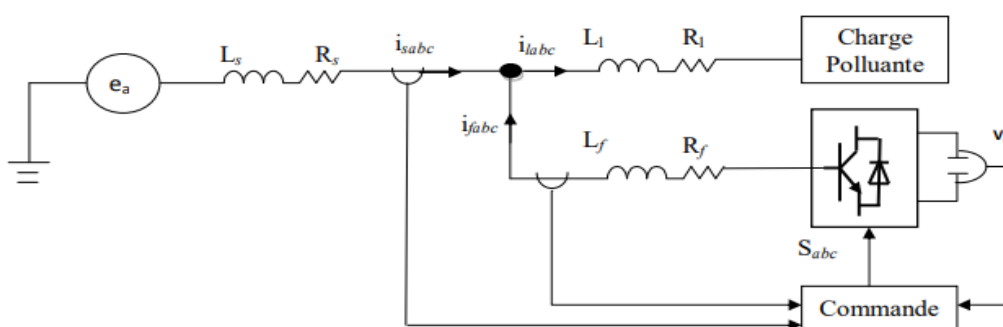


Figure II.11 : Schéma de la commande indirecte

II.5. Méthode de commande directe basée sur la méthode de puissance instantanée :

II.5.1 Régulation de la tension continue V_{dc}

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

$$P_{dc} = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} C_{dc} V_{dc}^2 \right) \quad (\text{II.4})$$

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

$$P_{dc}(s) = \frac{1}{2} s C_{dc} V_{dc}^2(s) \quad (\text{II.5})$$

La tension aux bornes du condensateur est donnée par :

$$V_{dc}^2(s) = \frac{2P_{dc}(s)}{C_{dc}s} \quad (\text{II.6})$$

A partir de la relation (II.6), et en tenant compte du régulateur (PI), la boucle de régulation de tension continue peut être représentée par la figure (II.12). Le choix des paramètres k_{pdc} et k_{idc} aura pour objectif d'obtenir un temps de réponse minimal afin de ne pas nuire la dynamique du filtre actif.

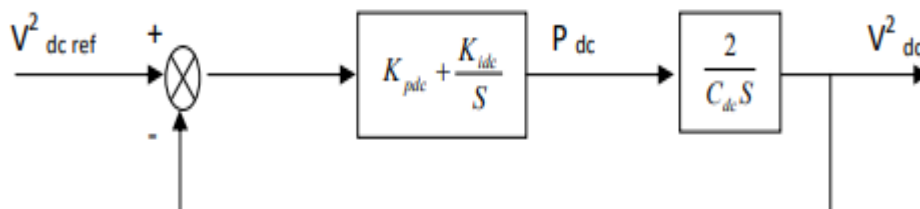


Figure II.12 : Boucle de régulation de la tension continue

A partir de la figure (II.12), la fonction de transfert représentant la régulation en boucle fermée de la tension continue est donnée par :

$$G_{BF} = \frac{(1 + \frac{K_{pdc}}{K_{idc}}s)}{s^2 + 2\frac{K_{pdc}}{C_{dc}}s + 2\frac{K_{idc}}{C_{dc}}} \quad (II.7)$$

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

$$K_{idc} = \frac{1}{2}C_{dc}\omega_c^2 \quad (II.8)$$

$$\omega_c = 2\pi f_c \quad (II.9)$$

$$K_{pdc} = \xi\sqrt{2C_{dc}K_{idc}} \quad (II.10)$$

On choisit la valeur de $\xi=0.707$ pour un bon coefficient d'amortissement du système. Pour un bon filtrage on peut choisir la fréquence de coupure $f_c=32$ Hz. La commande directe par hystérésis est présentée par le schéma suivant :

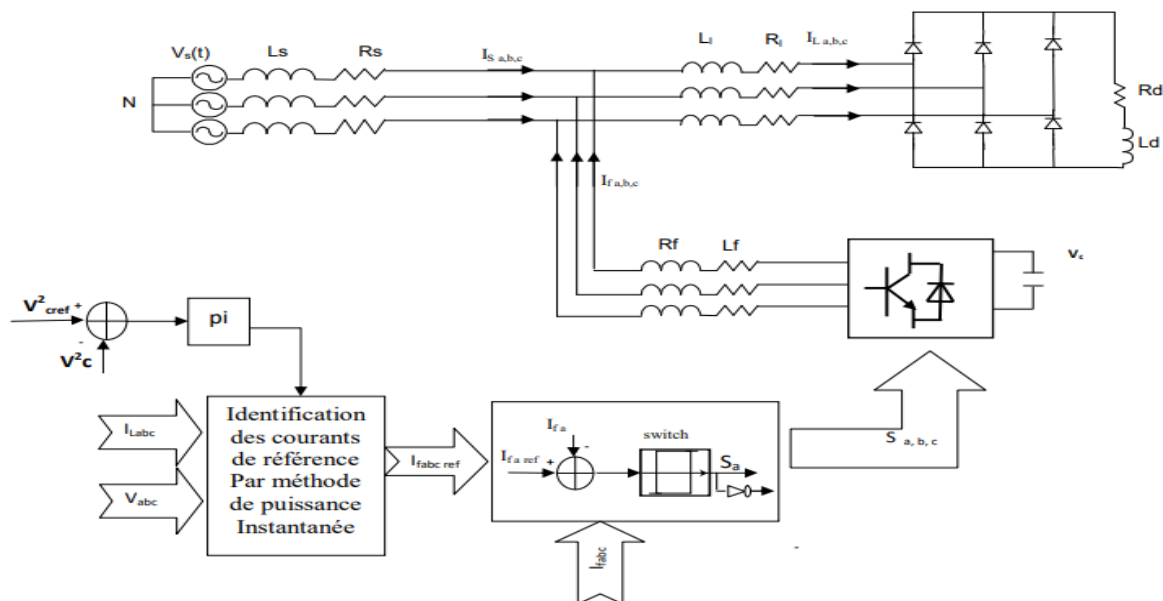


Figure II.13 : Commande directe par hystérésis dans le repère triphasé

II.5.2 Contrôle du courant du filtre par un correcteur PI

Le correcteur proportionnel-intégral est le correcteur le plus classiquement utilisé pour le contrôle du courant à cause de sa simplicité. Le schéma simplifié de la boucle de régulation du courant par ce régulateur est illustré par la figure (II.14).

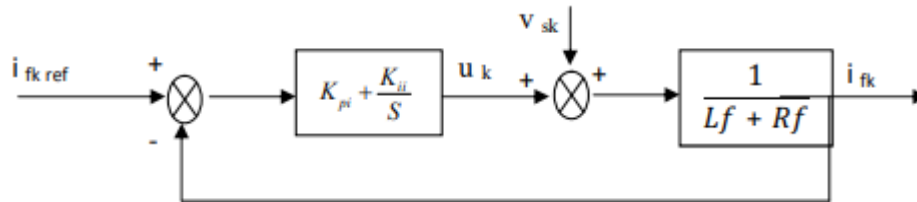


Figure II.14 : Boucle de régulation du courant

Pour une bonne réponse dynamique du système, on choisit la valeur de $\xi = 0.707$. Pour un rejet maximal d'harmoniques dus à la commutation, il faut que la pulsation de coupure soit éloignée de la pulsation de commutation du la MLI. Les valeurs des constantes du régulateur sont données par:

$$K_{pi} = 2\xi\omega_{cp}L_f - R_f \tag{II.10}$$

$$K_{ii} = L_f\omega_{cp}^2 \tag{II.11}$$

$$\omega_{cp} = 2\pi f_{cp} \tag{II.12}$$

Le signal de sortie du régulateur est sommé à une image de la tension du réseau de façon à compenser totalement l'effet de cette tension sur le comportement statique de la boucle de courant.

Le schéma de la commande directe dans le repère triphasé est :

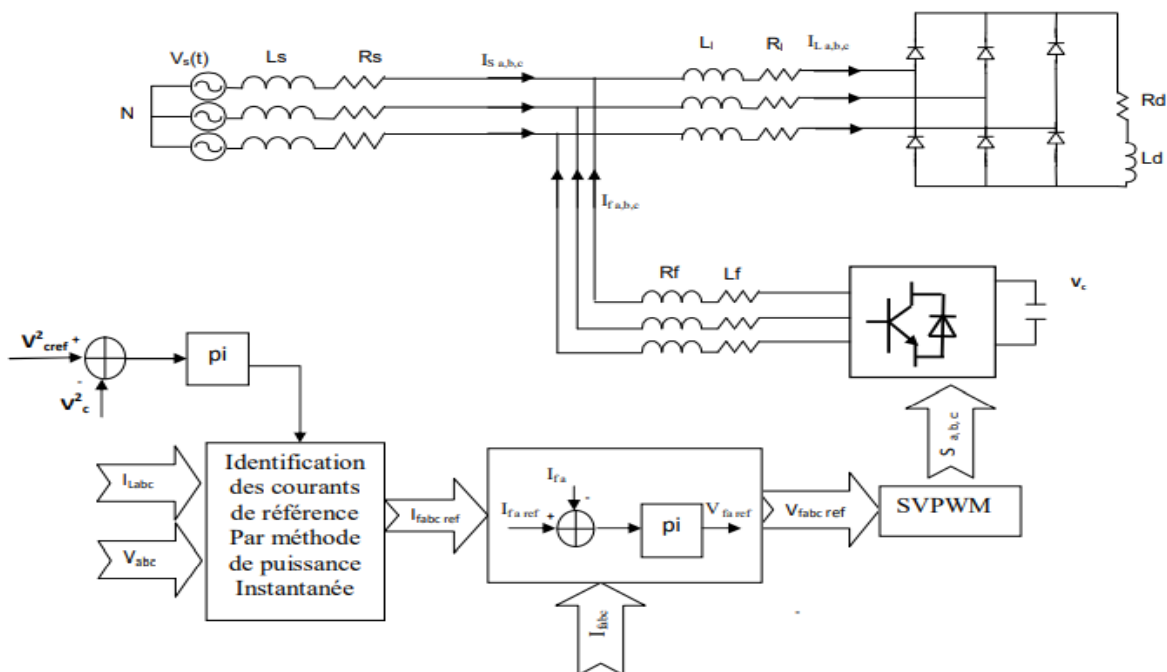


Figure II.15 : Commande directe par PI dans le repère triphasé

II.6. Commande Anti Wind up

II.6.1 Qu'est-ce que cela signifie Wind up et comment y remédier ?

Lorsqu'un actionneur est saturé, un problème de contrôle linéaire normal devient non linéaire puisque le contrôleur ne peut plus produire la sortie nécessaire. C'est un problème que tout actionneur physique peut rencontrer, car ils auront toujours des limites de performances, qu'il s'agisse d'une vanne qui ne peut pas être ouverte plus que complètement ou d'un moteur tournant à la vitesse maximale. Lorsque l'actionneur est saturé, un effet d'enroulement se produit. L'erreur devient de plus en plus importante car la sortie de contrôle ne peut pas correspondre aux exigences. Cela devient un problème lors de l'utilisation d'un contrôleur PI ou PID car la partie intégrante du contrôleur aura l'erreur passée à l'esprit, même si le signal de référence est finalement atteint. Cela conduira à un dépassement qui prendra un certain temps pour le système à gérer, et pourrait impliquer plusieurs oscillations au-dessus et en dessous de la valeur souhaitée avant de récupérer complètement, voir figure II.16. Le problème peut être résolu de différentes manières et est généralement géré par réinitialiser ou limiter la partie intégrée du signal de commande d'une manière ou d'une autre [17].

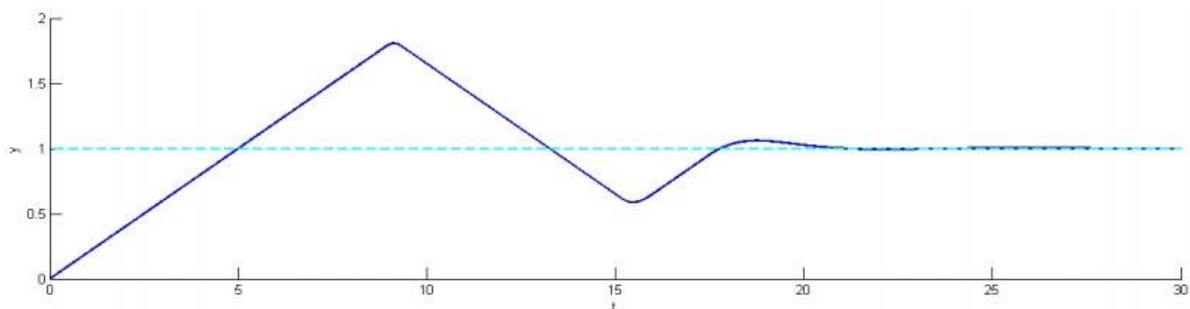


Figure II.16 : contrôle pi d'un seul intégrateur sans protection contre Wind up

II.6.2 Méthodes d'Anti-Wind up

II.6.2.1 La méthode de rétro-calcul

La méthode de rétro-calcul est un régulateur PID sous forme parallèle avec un facteur de rétro-calcul calculé à partir d'un modèle de saturation des actionneurs. Ce calcul à rebours démarre lorsque l'ensemble du signal de commande est saturé selon le modèle de l'actionneur. En prenant la valeur de dépassement multipliée par un facteur de calcul à rebours, pour être ensuite soustraite de la partie intégrale du contrôleur pour réinitialiser la liquidation intégrale. La méthode AH prend entièrement en charge le PID et le rétro-calcul conduit à un paramètre supplémentaire T_i , par rapport à un régulateur PID ordinaire. La méthode AH peut être vue dans la figure II.17, où les blocs marqués en rouge montrent les parties dérivées ajoutées pour le contrôle PID [17].

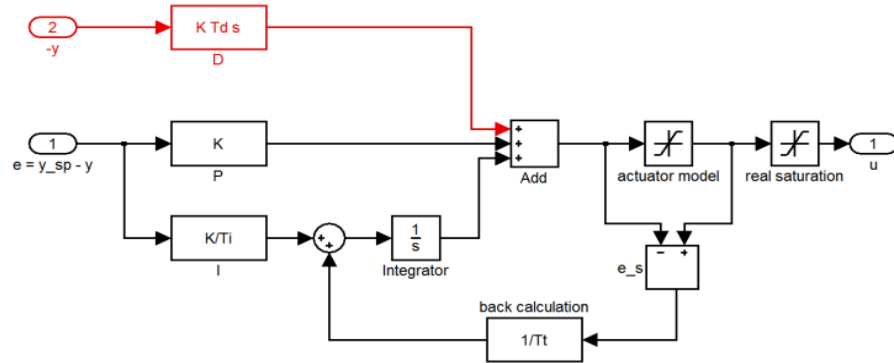


Figure II.17 : schéma de la méthode rétro-calcul

II.6.2.2 La méthode Dow

La méthode suggérée par Henry Salomons de Dow Chemical est similaire à la méthode AH, mais au lieu d'utiliser le débordement de l'ensemble du signal de commande pour le rétrocalcul, seule la partie intégrale est rétrocalculée pour réinitialiser la liquidation intégrale. Cela le rend plus similaire au contrôleur sans protection contre les enroulements puisque des mesures supplémentaires ne sont prises que lorsque l'intégrateur est saturé. La méthode Dow a un support PID complet et a un paramètre supplémentaire par rapport à un contrôleur PID ordinaire et est donc exactement comme la méthode AH à cet égard. La méthode Dow est illustrée à la figure II.18 [17].

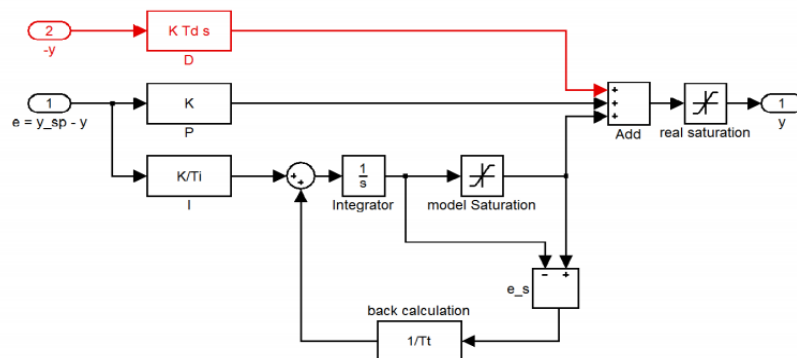


Figure II.18 : schéma de la méthode rétro-calcul

II.6.2.3 La méthode Foxboro

La méthode Foxboro est un contrôleur PI utilisant une action intégrale pour générer une réinitialisation automatique. Cette méthode utilise uniquement les deux paramètres que vous utiliseriez normalement dans un contrôleur PI. Pour la comparaison PI, la méthode de Foxboro équivaut à la méthode AH pour un $T_i = T_i$ fixe. L'implémentation PID de la méthode Foxboro est plus distincte et ne peut pas être interprétée comme un contrôleur AH. Les parties proportionnelle et dérivée sont additionnées pour l'intégrateur dans la boucle de rétroaction positive. Une partie dérivée est ajoutée pour la comparaison PID. La méthode Foxboro est illustrée à la figure II.19 [17].

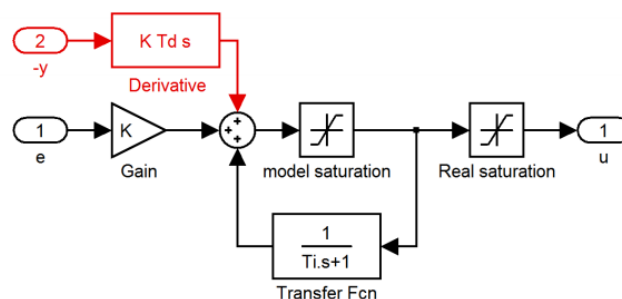


Figure II.19 : schéma de la méthode Foxboro

II.6.2.4 Méthode Blevins

Cette méthode fournie par Terry Blevins d'Emerson, est similaire à la méthode de Foxboro mais avec une précharge variable calculée qui remplace le signal de commande lorsque le contrôleur est saturé. La précharge variable est utilisée pour une réinitialisation plus rapide de l'intégrateur, ainsi que pour permettre à l'actionneur de réagir avant que l'erreur ne change de signe. Il est également conçu pour mieux fonctionner pour les systèmes avec des limites sur l'ajustement de contrôle de l'entrée de processus manipulée. Cette méthode utilise trois paramètres supplémentaires, dont deux sont utilisés dans le calcul de la précharge variable pour obtenir un bon transfert du signal de commande lors de la commutation entre la commande saturée et non saturée. Le troisième paramètre est un paramètre F spécifié par l'utilisateur qui fonctionne comme un filtre sur la rétroaction positive qui peut être utile pour des mesures significatives du bruit. F a été défini sur 1 pour faciliter la relation avec les autres méthodes. La précharge variable est réglée sur $(1 + sT_{i_{pl}})(1 + sT_{d_{pl}})$ plus la valeur limite constante.

Cette méthode n'est utilisée que pour la comparaison PI même s'il pourrait être intéressant de tester cette méthode plus avant également pour le contrôle PID. La méthode de Blevins est illustrée à la figure II.20 [17].

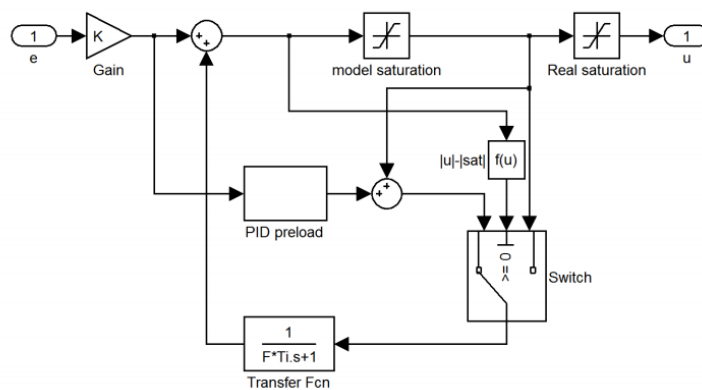


Figure II.20 : Schéma de la méthode Blevins

II.1. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le principe de fonctionnement du filtre actif parallèle de puissance, la structure générale du FAP, les différentes stratégies de commande de l'onduleur de tension et le dimensionnement de l'ensemble réseau, charge polluante et filtre actif parallèle.

Dans le chapitre suivant, nous décrivons la partie simulation d'un filtre actif parallèle avec une commande AW-FOPID

Chapitre III

**Commande AW-FOPID
appliquée au Gpv
interconnecté au FAP**

III.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à l'association d'un FAP parallèle avec un GPV afin d'injecter la puissance maximale extraite au réseau de distribution électrique.

Un régulateur Anti-Windup Fractional Order PID (AW-FOPID) est utilisé pour maintenir la tension du bus continu très proche de sa référence prédéfinie au préalable. Les avantages offerts par ce régulateur avec deux degrés de liberté supplémentaires \mathcal{E} et η permettent d'avoir une meilleure réponse dynamique et un temps de réponse plus court par rapport au régulateur PI conventionnel [19]. La sortie du régulateur participe à la fourniture de la puissance active.

L'étude débute par la modélisation de la chaîne de conversion PV. Ensuite, la commande DPC appliquée au FAP interconnecté au générateur PV basée sur la logique floue est exposée. Les résultats de simulations de ces techniques de commande seront exposés dans la dernière partie du chapitre.

III.2. Modélisation de la chaîne photovoltaïque

Le circuit équivalent d'une cellule PV est représenté par une source de courant en parallèle avec une diode ainsi que des résistances série et parallèle, comme c'est illustré dans la Figure II.1 [25, 26].

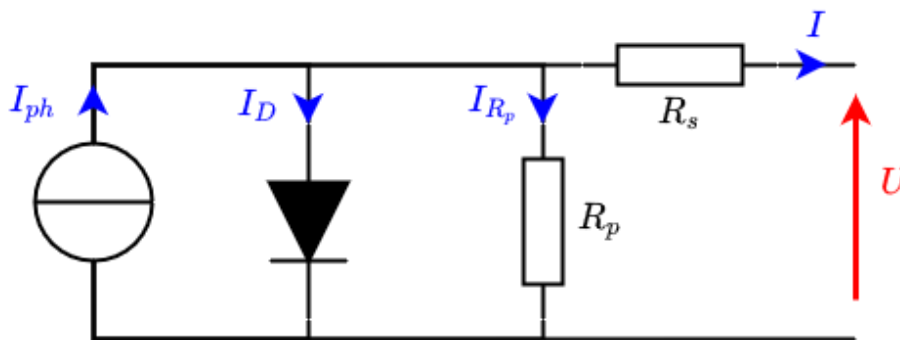


Figure III.1 : Modèle d'une cellule PV.

III.2.1 Algorithmes de recherche du point de puissance maximale (MPPT)

Plusieurs algorithmes de MPPT ont été proposés dans la littérature [20]. Dans cette section, nous exposerons la méthode d'intelligence artificielle présentée par la logique floue pour suivre le MPP du système PV.

La Figure III.2 représente une chaîne élémentaire de conversion PV associée à un algorithme MPPT.

L'algorithme MPPT est associé à un convertisseur DC-DC entre le GPV et la batterie. Généralement, ce convertisseur est utilisé comme un circuit intermédiaire entre la source et la charge pour fournir la puissance maximale. La technique de contrôle communément utilisée consiste à d'ajuster le rapport cyclique automatiquement à sa valeur optimale quelques soient les changements atmosphériques [20].

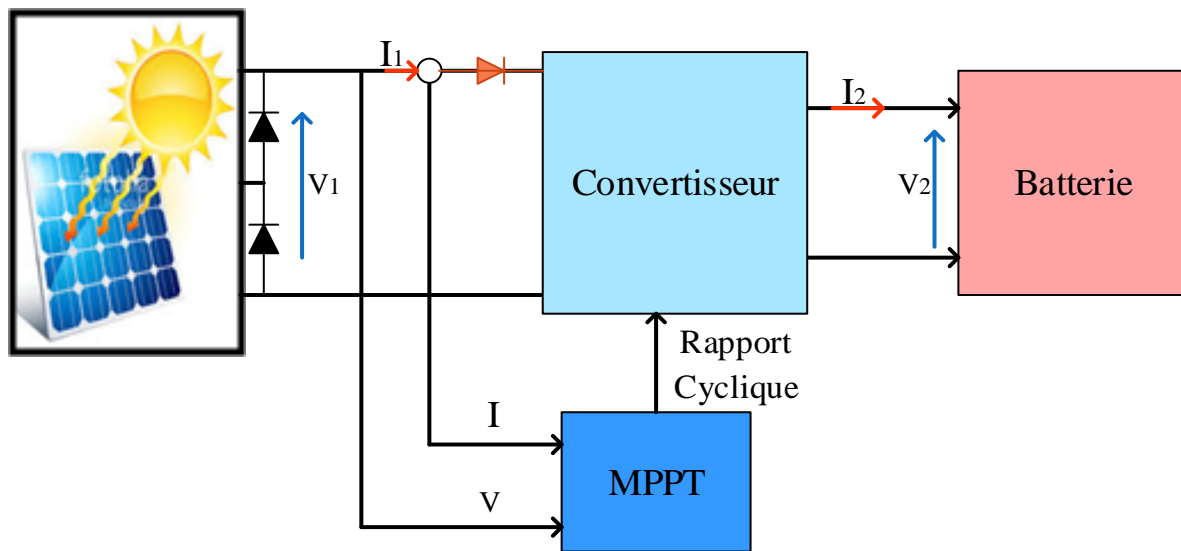


Figure III.2 : Diagramme d'un système PV avec MPPT.

La simulation du contrôle DPC avec le système global présenté dans la Figure III.3 est conduite sous l'environnement Matlab/Simulink™ afin de vérifier les performances de la commande DPC.

L'algorithme MPPT flou est appliqué à l'onduleur triphasé de tension pour extraire la puissance maximale du GPV.

La commande présentée a été simulée avec un temps d'échantillonnage $T_e = 1\mu s$ et l'algorithme MPPT flou avec un $T_{MPPT} = 4ms$.

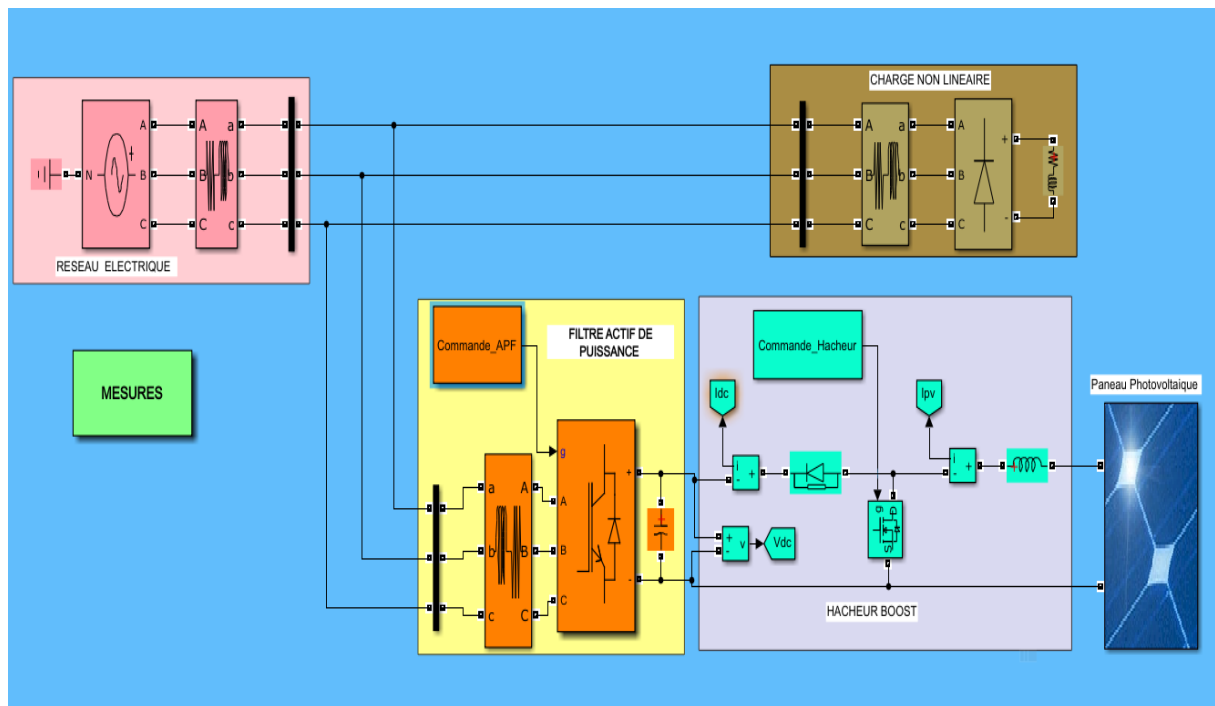


Figure III.3 : Modèle de simulation du FAP shunt contrôlé par la commande DPC en présence du système PV.

III.3. Régulateur AW-FOPID

Le régulateur PI conventionnel souffre d'une certaine faiblesse dans l'état dynamique. Pour pallier cet inconvénient, le régulateur proposé est effectué par un AW-FOPID pour maintenir la tension du bus continu à sa valeur souhaitée avec un temps de réponse plus court dans des conditions dynamiques, tandis que les dépassements et les chutes de tension sont maintenus à des niveaux minimum. Le régulateur FOPI^εD^η a été introduit en 1999 avec sa forme générale dans laquelle les ordres d'action intégrale (ε) et dérivée (η), ne sont pas des entiers [19].

Le régulateur AW-FOPID offre une meilleure réponse dynamique et une faible sensibilité aux éventuelles variations des paramètres du système.

À partir de la Figure III.4, la fonction de transfert $G(s)$ du régulateur AW-FOPID est calculée par l'équation suivante :

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + K_i s^{-\varepsilon} + K_d s^\eta \tag{III.1}$$

Où :

K_p , K_i , K_d sont respectivement les facteurs de gain proportionnel, intégral et dérivé ; ε , η sont respectivement les ordres intégraux et dérivés ;

$R(s)$ est le signal d'entrée ;

$E(s)$ est le signal d'erreur ;

$Y(s)$ est le signal de sortie.

On peut remarquer que la sélection de ε , η donne les contrôleurs conventionnels, c'est-à-dire le contrôleur PID ($\varepsilon, \eta = 1$), le contrôleur PD ($\varepsilon = 0$) et le contrôleur PI ($\eta = 0$).

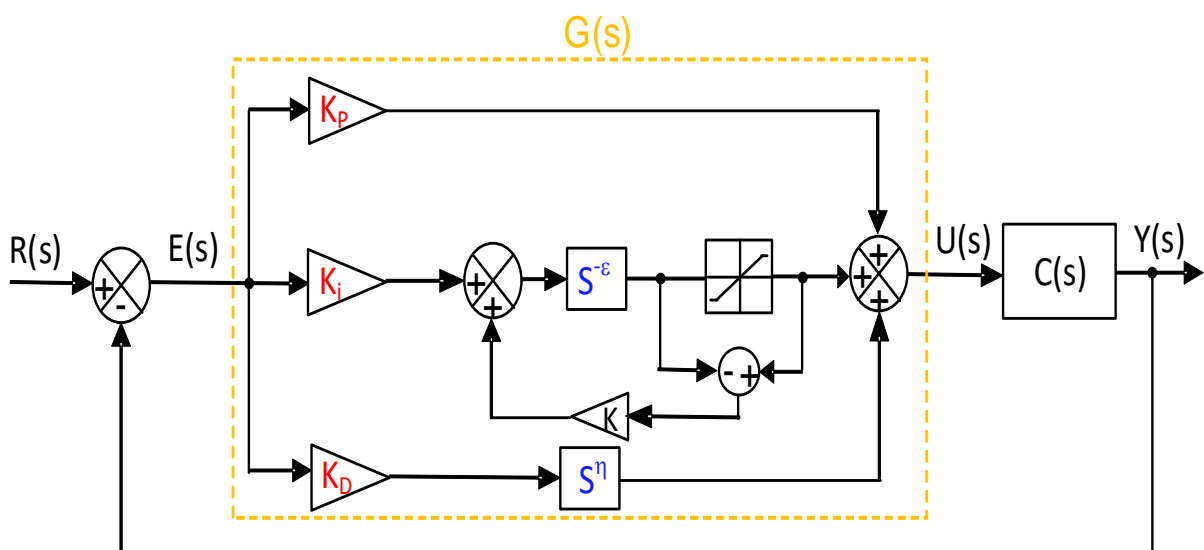


Figure III.4 : Structure du contrôleur AW-FOPID.

III.4. Résultats de simulation

Les séries de simulation effectuées ont été menées sous l'environnement Matlab/Simulink™, où un algorithme MPPT par la logique floue est utilisé pour contrôler le convertisseur DC/DC, alors que la technique DPC est utilisée pour le

contrôle du filtre (Figure III.5). Il est à noter que le régulateur AW-FOPID de la commande DPC est proposé à titre de comparaison de performances. L'ensemble des paramètres de simulation est récapitulé dans les Tableaux III.1 et III.4.

Tableau III.1 : Paramètres de PSO-SF

| Paramètres | Valeurs |
|---------------------|-----------|
| Taille de l'essaim | 10 |
| Nombre d'itérations | 100 |
| r_1, r_2 | 0.1 , 0.1 |

Tableau III.2 : Paramètres de simulation.

| Paramètres | Valeurs avec dimensions |
|--------------------------------------------|--------------------------------------------|
| V_s, F_s, V_{cref} | 70 V, 50 Hz, 227.688 V |
| $F_{switching}$ (DC/AC APF converter) | 20 KHz |
| L_s, R_s, L | 0.1 mH, 0.1 Ω , 10 mH |
| L_l, R_l, R | 0.566 mH, 0.01 Ω , 40 Ω |
| L_f, R_f, C_{dc} | 2.5 mH, 0.01 Ω , 2200 μ F |
| C_{pv}, L_{pv} | 20 μ F, 3 mH |
| $F_{switching}$ (DC/DC boost converter) | 5 kHz |
| $N, \varepsilon, \eta, \omega_b, \omega_h$ | 2, 0.4, 0.5, 10^{-2} rad/s, 10^2 rad/s |
| K_p, K_i, K_d | 0.95, 60, 0.011 |

D'autre part, la Figure III.5 montre le profil d'irradiance solaire, ainsi que la puissance et le courant du GPV. Nous pouvons noter que, de 0 à 4s avec une irradiance nulle, aucun courant et aucune puissance ne sont générés. Ensuite, de 0.4 s à 2 s, ils suivent leurs trajectoires imposées par le profil d'irradiance appliqué. C'est que, à 0.4s Par conséquent, l'irradiance augmente à 600 W/m² et reste constante jusqu'à $t=0.8$ s, fournissant ainsi, une puissance de 3 kW et un courant de 25 A en appliquant l'algorithme MPPT flou. À 0.8 s, l'irradiation solaire diminue brusquement à 400 W/m², suivie d'une diminution de puissance et du courant à 1.99 kW et à 15 A respectivement. Puis, de 0.9 s l'irradiance solaire augmente progressivement et finie par atteindre 1000W/m² à 1s, et cette valeur reste conservée se poursuit à ce niveau jusqu'à la fin du profil (2s) en générant 5 kW avec 40A.

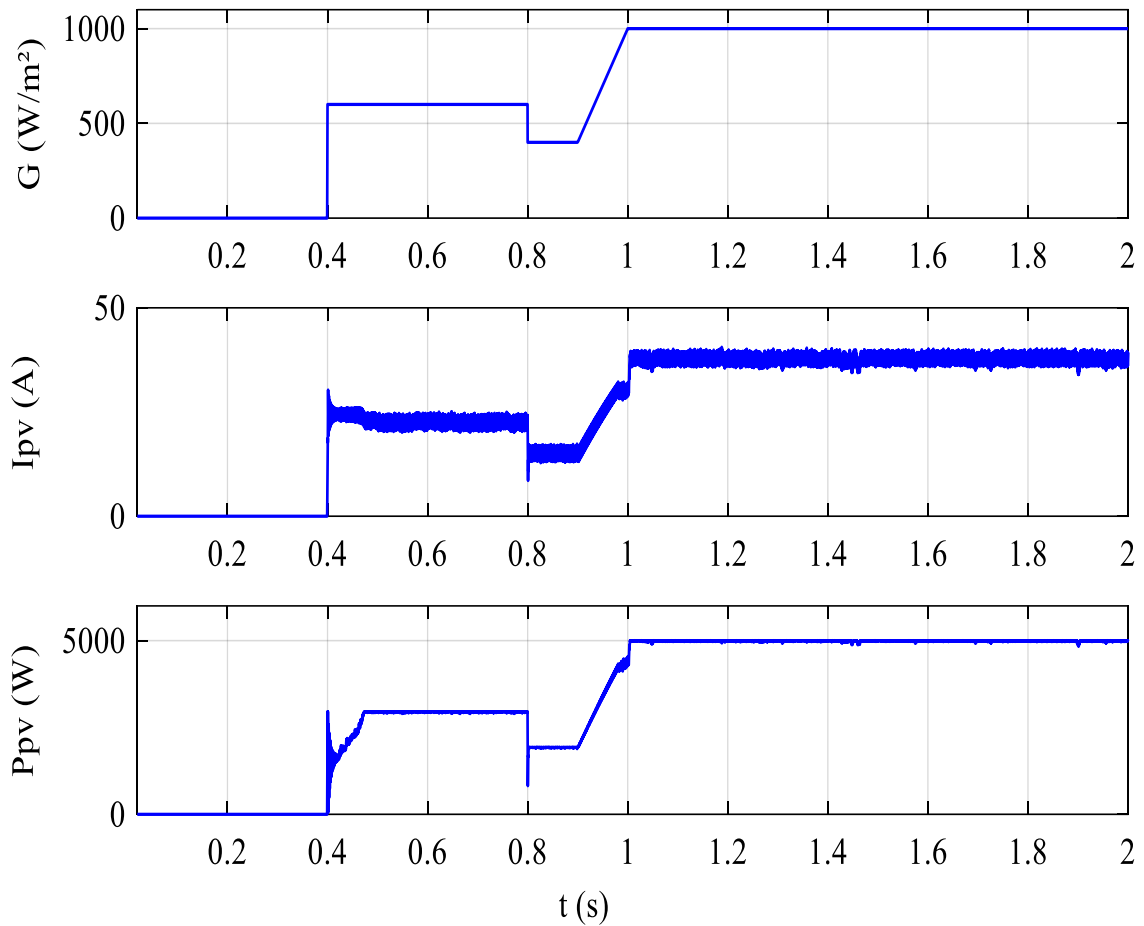


Figure III.5 : Profil d'irradiance, courant et puissance du GPV.

Avant le filtrage et entre 0 s et 0.1 s, la forme du courant source est déformée et riche en harmoniques, qui sont générées par la charge non linéaire, comme le montrent les Figures III.6. Le THD était égal à 29.58%. Cependant, le courant source devient sinusoïdal et en phase avec la tension du réseau après l'insertion du FAP shunt à 0.1 s, où le THD a diminué à 3.81% pour la commande DPC avec PI, 3.69% pour la stratégie DPC avec PID et 3.16% pour la commande DPC avec AW-FOPID, comme indiqué sur les Figures III.6.

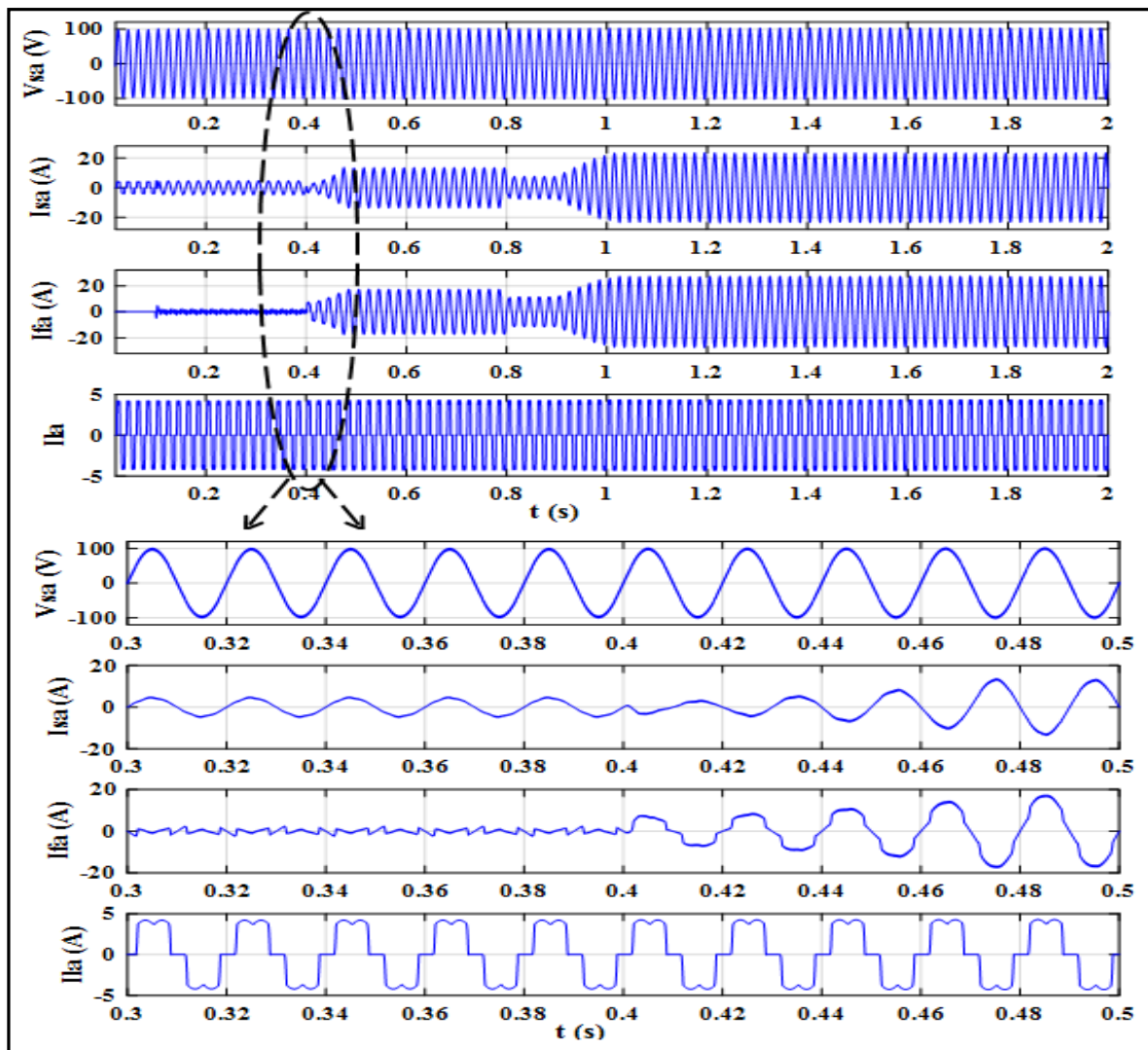


Figure III.6 : Résultats de la simulation avec zoom du FAP shunt basé sur le contrôle DPC avec le régulateur AW-FOPID et associé au GPV (tensions et courants de source, courants de filtre et de charge).–

Puis de 0.4 à 2 s, où le FAP shunt est interfacé avec le système PV, le courant de source reste sinusoïdal et s'oppose en phase avec les tensions de source. Par conséquent, le THD est de 2.95% pour les régulateurs PI, PID et AW-FOPID respectivement.

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre, un filtre actif de puissance FAP interconnecté à un générateur photovoltaïque G_{PV} et contrôlé avec un régulateur AW-FOPID est proposé dont l'objectif est d'améliorer d'une part la qualité d'énergie par l'élimination des harmoniques et la compensation d'énergie réactive, et d'autre part l'injection de l'énergie PV dans le réseau électrique. La puissance active et le courant maximal sont délivrés grâce au contrôleur remplaçant le régulateur classique PI.

Les résultats de simulation réalisés sous environnement Matlab/SimulinkTM, prouvent la robustesse et l'efficacité de la commande AW-FOPID proposée.

En utilisant cette commande AW-FOPID dans des conditions déformées ou déséquilibrées de la source d'alimentation, les performances du système se sont améliorées par rapport aux méthodes classiques.

Conclusion générale

Le travail effectué dans notre mémoire a pour objet d'identifier les problèmes majeurs affectant la qualité de l'énergie électrique, et d'analyser les creux de tension au sein d'un réseau électrique.

Les harmoniques sont beaucoup plus présentes au niveau des réseaux électriques et engendrent une dégradation de la qualité de l'énergie fournie. Afin de compenser ces harmoniques, les creux de tension...etc. plusieurs méthodes ont été mises en œuvre telles que les filtres passifs et/ou actifs.

Dans ce contexte, notre travail présenté dans ce mémoire a été consacré à l'étude et la simulation d'un filtre actif parallèle avec une commande AW FOPID afin d'éliminer les perturbations présentées dans les réseaux électriques.

Ainsi, pour commencer on a fait une présentation des paramètres de la qualité de l'énergie et les effets néfastes de la pollution qui affecte ces paramètres, ainsi que les différentes solutions existantes et les normes fixées qui permettent une réduction de la propagation des harmoniques sur les réseaux électriques.

Le deuxième chapitre, nous avons étudié le filtre actif parallèle à structure de tension et courant, on a commencé par une présentation de la structure générale composée d'une partie puissance et une partie commande.

Le troisième chapitre a présenté la validation expérimentale des résultats de simulation à partir d'un MATLAB/SIMULINK. Tous ces résultats de simulations et expérimentaux obtenus pour la commande AW-FOPID est très satisfaisant et montre bien le bon fonctionnement, l'efficacité et confirment la bonne réponse dynamique des stratégies de commande appliquées.

Comme perspectives pour les futures promotions par exemple:

- La réalisation pratique du travail réalisé en simulation.
- L'association du filtre actif parallèle avec un filtre passif pour réduire le coût de l'installation.
- L'utilisation d'autres techniques de commande de l'intelligence artificielle dans la commande du filtre actif.

Références

- [1] Alali Mohamad Alaa Eddin « Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension » THÈSE, École Doctorale Sciences Pour l'Ingénieur ULP – ENSAIS – ENGEES – URS, 2002.
- [2] Amaia Lopez de Heredia Bermeo, « Commande avancées des systèmes dédiés à l'amélioration de la qualité de l'énergie : de la basse tension à la moyenne tension», Thèse de Doctorat en génie électrique, Institut National Polytechnique de Grenoble, (France) 2006.
- [3] HİND Djeghloud « Filtrage Actif de Puissance » THÈSE UNIVERSITÉ MENTOURI CONSTANTİNE 12/12/2007.
- [4] Omeiri Amar «Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant » Thèse Doctorat, Université Annaba 2007.
- [5] Sahli Abdeslem «Filtrage actif et contrôle de puissances : application aux systèmes photovoltaïques interconnectés au réseau» mémoire de Magister Université Ferhat Abbas – Sétif 2012.
- [6] Zellouma.L, « Filtrage actif parallèles des harmoniques de courant gènère par un pont redresseur triphasé non commande », thèse de magistère de l'université de Annaba, 2006.
- [7] Xu (J.), «Filtrage actif parallèle des harmoniques des réseaux de distribution d'électricité», INPL, Thèse de doctorat, 1994.
- [8] C. COLLOMBET, J.M. LUPIN & J. SCHONEK ,« PERTURBATION HARMONIQUES DANS LES RESEAUX POLLUES ET LEUR TRAITEMENT » Schneider Electric, cahier technique no. 152, Septembre 1999.
- [9] MOHAMED MAGRAOUI, VALIDATION DE TECHNIQUES DE COMMANDE D'UN FILTRE ACTIF PARALLELE Thèse de doctorat, Université de Québec école de technologie nationale Canada, 2007.
- [10] MUSTAPHA SARRA, CONTRIBUTION A L'ETUDE DES FILTRES ACTIFS HYBRIDES Thèse de doctorat, Université de Sétif, 2013.
- [11] Brahim Berbaoui, Samira Dib, Brahim Ferdi « Amélioration de la qualité d'énergie basée sur la performance d'un filtre actif série commandé à base DE système PLL » Volume 54, 3-4, 2013 pages : 184 – 188.
- [12] Hideaki Fujita and H.Akagi Nagaoka « A practical approach to harmonic compensation in power systemes series connection of passive and actives filters» Université de Technologie Nagaoka, Japon.
- [13] P. Ferracci, “La qualité de l'énergie électrique “, Schneider Electric, cahier technique no. 199, Mai 2000.
- [14] M. M. Abdusalam " Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales". Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, France. 2008.
- [15] Simulink: www.mathworks.com/products/simulink/ (2016).
-

- [16] Djaffar Ould Abdeslam, «Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension» Thèse Doctorat, Université haut alsace, 2005.
- [17] Erik Torstensson "Comparison of Schemes for Windup Protection" Lund University Department of Automatic Control March 2013.
- [18] GHADBANE Ismail, "Commande d'un Filtre Actif Triphasé Parallèle Par Différents Régulateurs", Université Mohamed Kheider – Biskra, 2011.
- [19] G. Boudechiche, M. Sarra, O. Aissa, J.P. Gaubert, B. Benlahbib, A. Lashab, ‘**Anti-Windup FOPID-Based DPC for SAPF Interconnected to a PV System Tuned Using PSO Algorithm**’, European Journal of Electrical Engineering, Vol. 22, No. 4-5, October, pp. 313-324,2020. <http://ijeta.org/journals/ejee>, <https://doi.org/10.18280/ejee.224-503>,
- [20] G. Boudechiche, M. Sarra, O. Aissa, J.P. Gaubert, ‘**Solar SAPF based on DPC with disturbance rejection principle: study and simulation**’, Journal of Engineering Research, 2021. <https://kuwaitjournals.org/jer/index.php/JER/home>
- [21] Schneider Electric « Détection et filtrage des harmoniques ».
- [22] J. Xu, « Filtrage actif parallèle des harmoniques des réseaux de distribution d'électricité » Thèse de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy 20 Janvier 1994.
- [23] F. Vaillant & J. Delaballe, “La CEM : la compatibilité électromagnétique “ Schneider Electric, cahier technique no. 149, Août 1996
- [24] Miao-Xin Wang, « Filtrage actif de puissance : Etudes et réalisation d'un filtre actif à commande numérique temps réel » Thèse de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 18 Décembre 1992.
- [25] Villalva, M.G., Gazoli, J.R., Ruppert Filho, E. (2009). Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. IEEE Transactions on Power Electronics, 24(5): 1198-1208. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2009.2013862>
- [26] Hachana, O., Hemsas, K.E., Tina, G.M., Ventura, C. (2013). Comparison of different metaheuristic algorithms for parameter identification of photovoltaic cell/module. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 5(5): 053122. <https://doi.org/10.1063/1.4822054>

المخلص

العديد من الأسباب تقلل من جودة الطاقة مثل التوافقيات والجهد غير المتوازن وتراجع الجهد. في هذه الدراسة ، اخترنا مرشح الطاقة النشط كحل لتعويض جميع اضطرابات التيار والجهد. لذلك ، من أجل تحسين جودة نظام الطاقة ، قمنا بدراسة طريقة التحكم المتقدمة AW FOPID . التطبيقات التجريبية والنتائج التي تم الحصول عليها باستخدام المحاكى ماتلاب .
الكلمات المفتاحية: التوافقيات ، مرشح الطاقة النشط ، اضطرابات الجهد ، AW FOPID ...

Abstract

Many causes decrease the power quality such as harmonics and unbalanced voltage, voltage sag.

In this study we choose active power filter as a solution to compensate all current and voltage perturbations.

Therefore, in order to improve power system quality, we have studied advanced control method AW FOPID.

The experimental applications and the results obtained with the MATLAB Simulink.

Keywords: harmonics, active power filter, voltage perturbations, AW FOPID...

Résumé

De nombreuses causes diminuent la qualité de l'alimentation telles que les harmoniques, déséquilibrée de tension, creux de tension.

Dans cette étude, nous choisissons le filtre de puissance active comme solution pour compenser toutes les perturbations de courant et de tension.

Par conséquent, afin d'améliorer la qualité du système électrique, nous avons étudié la méthode de contrôle avancée AW FOPID.

Les applications expérimentales et les résultats obtenus avec le MATLAB Simulink.

Mots clés : harmoniques, filtre de puissance active, perturbations de tension, AW FOPID...