



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET
POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

كلية التكنولوجيا

FACULTE DE TECHNOLOGIE

قسم الالكترونيك

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE

FILIERE : ELECTRONIQUE

Spécialité : instrumentation

THEME

Etude et simulation d'une filtre actif de puissance avec la commande DPC et un régulateur fractionnaire

Présenté par :

Boudiaf marouane

Salamani heythem

Proposé et dirigé par :

Dr. DJAZIA Kamel



Remerciements :

Nous souhaitons exprimer notre gratitude envers Dieu avant tout, car c'est lui qui nous a accordé la force, la patience et la volonté tout au long de ces années. Tout d'abord, nous tenons à remercier notre directeur de thèse, le Dr Kamal Fazia, pour avoir suggéré ce sujet et l'avoir supervisé. Merci infiniment.

Nous remercions également tous les professeurs du Département d'électronique qui ont contribué de manière directe ou indirecte à la réalisation de cette thèse, et nous adressons nos remerciements spéciaux au talentueux professeur Benguesmia Hani, qui nous a aidés à achever notre thèse. Merci sincèrement.

Enfin, nous souhaitons exprimer nos remerciements à tous nos amis et collègues. Merci à tous.

Dédicace :

À celle que je préfère plus que moi-même, et pourquoi pas ; elle s'est sacrifiée pour moi et n'a pas ménagé ses efforts pour me rendre heureux en permanence (ma chère mère).

Dans les chemins de la vie, celui qui domine nos esprits à chaque pas que nous faisons est celui au visage bienveillant et aux actions bonnes. Il ne m'a jamais lésé tout au long de sa vie (mon cher père).

Sans oublier mon cher Ibrahim et ma chère Zahra, que Dieu vous garde et vous accorde une longue vie.

À ma chère tante bien-aimée, et à mon oncle H'mida et mon oncle Khaydar.

À mon cher oncle Sami.

À mes amis et à tous ceux qui ont été à mes côtés et m'ont aidé de toutes leurs forces.

إلى أسرة السواعد من صغيرها الى كبيرها

B. Marouane

Dédicace :

À celui qui possède une noble réputation et une pensée éclairée ; il a été le premier à contribuer à ma poursuite d'une éducation supérieure (mon cher père), que Dieu prolonge sa vie. À celle qui m'a placé sur le chemin de la vie, qui m'a inculqué le courage et qui m'a soutenu jusqu'à ce que je devienne grand (ma chère mère), que Dieu bénisse son âme.

À ma chère tante bien-aimée Nassira

Et ma grande mère Torkiya

À mes frères qui ont eu une grande influence dans de nombreuses épreuves et difficultés.

Et mon frère Abdo selama fi elgorba

إلى إدارة السواعد المتحدة (ملوزة)

S. Heythem

RESUME

La qualité de l'onde électrique est loin d'être parfaite, en raison de l'utilisation de charges non linéaires qui génèrent des harmoniques de courant et consomment de la puissance réactive. Ces deux phénomènes génèrent quelques perturbations du dysfonctionnement des équipements jusqu'à la détérioration d'une partie ou de la totalité des équipements connectés sur le réseau. La qualité des ondes peut être altérée par plusieurs types de perturbations. Connaissant les origines et les effets des harmoniques de pollution sur les réseaux électriques. Cette étude a pour solution de mettre en place un système de filtres actifs à trois niveaux de contrôle par hystérésis inverseur qui injecte dans le réseau un courant égal à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci, conduisant ainsi le courant d'alimentation à être sinusoïdal. La régulation et la stabilité de l'alimentation du filtre lors d'une variation de charge est assurée par un PI classique puis par un PI_{α} fractionnaire. La modélisation et la simulation du réseau d'alimentation, de la charge non linéaire et du filtre actif parallèle ont été présentées. La validation de ces méthodes suggérées a été réalisée par simulation numérique. Une analyse temporelle et une analyse spectrale ont été réalisées à partir du modèle du réseau d'alimentation, de la charge non linéaire et du filtre actif parallèle. Les résultats de simulation de ces méthodes proposées montrent que le filtre actif parallèle peut efficacement supprimer l'harmonique de courant pour forcer le courant d'alimentation à être sinusoïdal et compenser la puissance réactive générée par la charge non linéaire. Une étude comparative a été réalisée et les résultats ont été validés.

Les mots clés : filtres actifs, filtres actifs parallèles, puissances réactives, les harmoniques, PI classique, PI_{α} fractionnaire

TABLE DES MATIERES

Chapitre I : Qualité de l'énergie et Les Perturbations harmoniques

I. Introduction.....	01
I.1 Qualité de l'énergie.....	01
I.1.1 Qualité de la tension.....	01
I.1.1.1. Creux et coupures de tension	02
I.1.1.2 Fluctuations de tension	03
I.1.1.3.Déséquilibre du système triphasé de tension.....	03
I.1.1.4 Variation de fréquence	04
I.1.2 Qualité du courant	04
I.2 Problématique des harmoniques.....	05
I.3 Sources des harmoniques et leurs effets.....	05
I.4 Caractérisations des harmoniques	06
I.4.1 Taux Harmonique de Rang h	07
I.4.2. Taux Global de Distorsion Harmonique	07
I.4.3 Facteur de puissance FP	08
I.5 Normes & Règlements.....	08
I.6. Conclusion.....	10

Chapitre II : Solutions pour l'amélioration de la qualité d'énergie

II. Introduction.....	12
II.1 Solutions classiques et traditionnelles de dépollution	12
II.1.1 Agir sur la structure de l'installation.	12
II.1.2 Surdimensionnement de l'installation électrique.....	13
II.1.3 Renforcement de la puissance de court –circuit	13
II.1.4 Rééquilibrage des courants du réseau électrique	13
II.1.5 Les filtres passifs	13
II.2 Solutions modernes.....	14
II.2.2 Le principe de fonctionnement du filtre actif	14
II.3 Classification des filtres actifs	16
II.3.1 le filtre actif série	17

II.3.2	Filtre combiné parallèle-série (UPQC)	18
II.3.3	Filtre actif hybride.....	18
II.3.3.1	filtres hybrides actifs et passifs	18
II.3.3.2	Association Filtre actif série en parallèle avec un Filtre passif	18
II.3.3.3	Association filtre actif série en série avec un filtre passif	19
II.3.3.4	Filtre actif parallèle avec un Filtre passif en parallèle	19
II.3.4	Filtre actif parallèle	20
II.4	Comparaison entre les différentes topologies de filtrage actif.....	21
II.5	Conclusion	22

Chapitre III : Commande directe de puissance du filtre actif parallèle

III.	Introduction	24
III.1.	Principe de fonctionnement.....	24
III.2.	Structure général du filtre actif parallèle	25
III.2.1	Etudes de la partie puissance	26
III.2.1.1	Modélisation de l'onduleur de tension deux niveaux	26
III.2.1.2	Système de stockage d'énergie.....	29
III.2.1.3	Filtre de sortie.....	30
III.2.2.	Etudes de la Partie command	30
III.2.2.1.	La commande par hystérésis.....	30
III.2.2.2.	Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI).....	31
III.2.2.3	Commande par MLI vectorielle	32
III.2.3	Régulation de la tension continue.....	32
III.2.4	Principe.....	33
III.3.	la commande directe de puissance DPC.....	33
III.3.1.	Principe de la commande directe de puissance	34
III.3.2.	Etat de l'art du contrôle direct de puissance.....	34
III.3.3.	Principe Du <i>Dpc</i> Classique.....	35
III.3.4.	Calcul des puissances instantanées.....	36
III.3.4.1.	Calcul des puissances instantanées injectées par SAPF.....	37
III.3.5.	Choix du secteur	37
III.3.6.	Table de commutation	38

III.3.7 Contrôle de la tension du bus continu utilisant le régulateur PI conventionnel	39
III.4 Régulation du bus continu du FAP triphasé	40
III.4.1 Le régulateur PI conventionnel.....	41
III.4.2 Le régulateur IP classique.....	42
III.4.3 Les régulateurs fractionnaires.....	43
III.4.3.1 Etat de l'art du calcul fractionnaire et des régulateurs PID d'ordre fractionnaire	43
III.4.3.2 Régulateur PI et IP d'ordre fractionnaire	44
III.4.3.3 Calcul des paramètres des régulateurs FO-PI et FO-IP.....	47
III.4.3.4 Approximation par la méthode d'Oust loup	48
III.5. Conclusion.....	50

Chapitre IV Résultats de simulation sous Matlab-Simulink

Introduction	52
IV.1. Simulation numérique sous Matlab Simulink	52
IV.2.Etape1. réseau électrique alimente une charge non linéaire avant application de toute opération de filtrage.....	53
IV.3. Etape2. Réseau électrique alimente une charge non linéaire avec filtre actif parallèle à commande classique (IP anti-emballement).....	56
IV.4.Etape3. réseau électrique alimente une charge non linéaire avec filtre actif parallèle à commande fractionnaire (PI FO).....	58
IV.5. Etudes comparaison entre les deux stratégies de commande.....	60
Conclusion.....	62

Liste des Figures

Figure I.1	Creux et coupures de tension
Figure I. 2	Fluctuations de tension
Figure I. 3	Déséquilibre du système triphasé de tension
Figure I. 4	Répartition des commutations sur un bras d'un onduleur
Figure I. 5	Harmoniques
Figure 1.6	Spectre de fréquence d'un courant non-sinusoidal
Figure II.1	Filtre passif résonant
Figure II.2	Filtre passif amorti
Figure II.3	Schéma généralisé pour le filtre actif
Figure II.4	Principe de fonctionnement du filtre actif
Figure II.5	Les différents types de filtres actifs
Figure II.6	Filtre actif série (FAS)
Figure II.7	Filtre UPQC
Figure II.8	Filtre actif série en parallèle avec un filtre passif parallèle
Figure II.9	Filtre actif série en série avec un filtre passif
Figure II.10	Filtre actif parallèle avec un filtre passif en parallèle
Figure II.11	Filtrage Filtre Actif Parallèle (shunt)
Figure III 1	Schéma de principe du filtre actif parallèle
Figure III.2	Schéma de principe de l'ensemble réseau électrique, charge polluante et filtre actif et formes d'ondes des courants respectifs
Figure III 3	Structure d'un filtre actif parallèle
Figure III 4	Onduleur de tension deux niveaux
Figure III.5	Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur
Figure III.6	Commande par hystérésis
Figure III.7	Principe de commande des courants par MLI
Figure III.8	Répartition des commutations sur un bras d'un onduleur
Figure III.9	Schéma synoptique de contrôle du FAP avec la commande DPC
Figure III.10	Configuration générale de la commande directe de puissance
Figure.III.11	Schéma bloc de la technique DPC classique

-
- Figure.III.12 Plan $\alpha\beta$ divisé en douze secteurs pour détecter la phase du vecteur de tension
- Figure III.13 Boucle de régulation du bus continu du FAP triphasé
- Figure III.14 Schéma de principe de la partie commande de l'onduleur avec contrôle de la tension du condensateur
- Figure III 15 Boucle fermée de la régulation de dc V par un régulateur PI classique
- Figure III.16 Régulateur PI anti-emballement utilisé en simulation et en pratique
- Figure III.18 Boucle fermée de la régulation de dc V par un régulateur IP classique
- Figure III.19 Régulateurs d'ordre fractionnaire, a (FO-PI anti-emballement, b) FO-IP
Emballement
- Figure III.20 Boucle fermée de la régulation de dc V par un régulateur FO-IP
- Figure III.21 Courbes de Bode de l'intégrateur fractionnaire I (s)
- Figure IV.1 Réseau électrique alimente une charge non linéaire
- Figure IV.2 Tensions trois phases de source pour une charge non linéaire
- Figure IV.3 Courants des charges non linéaire avant l'injection du filtre
- Figure IV.4 Courants de source avant l'injection du filtre
- Figure IV.5 Spectre harmonique de la courante source avant filtre
- Figure IV.6 Réseau électrique alimente une charge non linéaire avec FAP à commande
- Figure IV.7 Tensions trois phases de source après l'injection du filtre
Classique (IP anti-emballement)
- Figure IV.8 Courants des charges non linéaire après l'injection du filtre
- Figure IV.9 Courants de source après l'injection du filtre
- Figure IV.10 Courant harmonique injecté par le FAP
- Figure IV.11 Spectre d'harmonique de courant de source Après filtrage avec
(IP anti- emballement)
- FigureIV.12 Réseau électrique alimente une charge non linéaire âpre FAP à commande
par
Régulation fractionnaire (PI FO)
- FigureIV.13 illustre les différentes formes d'onde et après la mise en service du FAP
(FO_PI)
- Figure IV.14 Spectre d'harmonique de courant de source

Après filtrage avec (FO PI)

Figure IV.16 La tension V_{dc} après filtrage avec (FO PI)

LISTE DES Tableaux

Tableau. I.1	Niveau de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles sur les réseaux électriques
Tableau I.2	Limite des composantes harmoniques en courant (norme CEI 61000-3-2)
Tableau II.1	Récapitulatif des méthodes de rejet des courants et de tensions harmoniques
Tableau III.1	Tensions générées par l'onduleur de tension deux niveaux
Tableau III.2	Table de commutation de la DPC
Tableau IV.1	Paramètres du système simulé
Tableau IV.2	Comparaison des indexes de performance : entre le régulateur IP anti emballement et régulateur PI Fractionnaire

Symboles et Acronymes

V_s	Tension de source.
I_s	Courant de source
P	puissance active
S	puissance apparente
Q	la puissance réactive associée au courant fondamental
D	la puissance déformante due aux harmoniques du courant
Φ_1	le déphasage entre le courant fondamental et la tension
I_h	Le courant harmonique du rang h
I_1	Valeurs efficaces du courant fondamental
$I_\alpha \ I_\beta$	Courants perturbateurs calculés dans le repère α - β
I_{ch}	Courant efficace de la charge non linéaire
$V_\alpha \ V_\beta$	Tensions perturbateurs calculés dans le repère α - β
FP	Facteur de puissance
p	Puissance instantané active.
q	Puissance instantané réactive.
$d_p \ d_q$	Sortie digitale des comparateurs à hystérésis des puissances P et q
p^-, q^-	Puissance continue liée à la composante fondamentale active et réactive du courant
R_s	Résistance de court-circuit de réseau
L_s	Inductance de court-circuit de réseau
$R_{ch} \ L_{ch}$	Résistance et inductance côté continu (charge non linéaire)
$R_f \ L_f$	Résistance et inductance du filtre actif
$R_c \ L_c$	Résistance et inductance de la charge côté réseau
THD_i	Taux de distorsion harmonique en courant
THD_v	Taux de distorsion harmonique en tension
V_{dc}	Tension du bus continu
V_{dc}^*	Tension du bus continu de référence
C_{dc}	Capacité du condensateur
V_{eff}, I_{eff}	Tension et courant efficace

DCC	Direct Current Control
DPC	Direct Power Control
FAP	Filtre Actif de Puissance
FAS	Filtre actif série
IP	Integral Proportional controller
PI	Order Proportional Integral controller
FO-IP	Fractional Order Integral Proportional controller
FO-PI	Fractional Order Proportional Integral controller
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
MLI	Modulation de la Largeur d'Impulsions

Introduction Générale

L'utilisation croissante de systèmes de commande basés sur l'électronique de puissance dans l'industrie entraîne de plus en plus de perturbations dans les réseaux électriques. Les utilisateurs connaissent une augmentation régulière des taux d'harmoniques et de déséquilibre des courants, ainsi qu'une consommation importante de puissance réactive. Ces courants perturbés entraînent également des harmoniques et des déséquilibres de tension, qui se superposent à la tension nominale du réseau électrique. De plus, des incidents tels que des coups de foudre ou le démarrage soudain de machines tournantes à forte puissance peuvent provoquer une chute soudaine et importante de tension, appelée creux de tension. Ces perturbations ont des conséquences néfastes sur les équipements électriques, allant d'un échauffement excessif ou d'un arrêt brutal des machines tournantes à leur destruction totale.

Cependant, les nouvelles réglementations internationales imposent des limites aux harmoniques générés par ces systèmes, tant en termes de courant que de tension, pour les consommateurs. Ainsi, le filtrage des harmoniques est une préoccupation majeure à la fois pour les fournisseurs d'énergie électrique et les utilisateurs. Ils adoptent donc les limites proposées par les normes IEEE 519-1992, IEEE 1159-1995, CEI 61000-2-2 et CEI 61000-3-2.

Pour respecter les normes de qualité de l'énergie électrique, il est nécessaire de concevoir un système qui limite la dissipation des harmoniques lorsque des charges non linéaires sont connectées au réseau électrique. Deux types de solutions sont envisageables. La première consiste à utiliser des convertisseurs statiques présentant moins de pollution, tandis que la seconde consiste à filtrer les harmoniques. La solution classique de filtrage, largement répandue et économique, est l'utilisation de filtres passifs. Cependant, cette solution présente deux inconvénients majeurs. Tout d'abord, il peut y avoir un phénomène de résonance avec le réseau, ce qui amplifie les harmoniques proches de la fréquence du réseau. Deuxièmement, les performances du filtre passif dépendent des caractéristiques du réseau auquel il est connecté.

Face à l'augmentation des problèmes de perturbation sur les réseaux électriques et aux nouvelles réglementations, les fournisseurs et les consommateurs industriels seront de plus en plus contraints par les normes de qualité électrique. Les compensateurs actifs doivent donc

Introduction Générale

s'adapter en rendant leurs structures et leurs méthodes de régulation plus complexes. Cependant, ces solutions doivent également respecter les limites physiques et technologiques des dispositifs de filtrage actifs.

Jusqu'à présent, plusieurs solutions de dépollution des réseaux électriques ont été proposées dans la littérature. Elles se distinguent par leur mode de connexion au réseau (parallèle ou série), leur mode de contrôle ou la structure de leur circuit de puissance. Les filtres actifs parallèles, série et parallèle-série actifs sont considérés comme les solutions les plus adaptées aux contraintes industrielles.

Chapitre I

**Chapitre I : Qualité de l'énergie et Les
Perturbations harmoniques**

I. Introduction

Le consommateur est alimenté par le réseau électrique avec une tension et une fréquence conformes aux normes. Malheureusement, ces grandeurs sont généralement perturbées par divers facteurs. Les perturbations de tension sont causées par des courants harmoniques, des déséquilibres de courant et des courants réactifs qui circulent dans le réseau. De plus, il existe des perturbations provoquées par des tensions harmoniques, des déséquilibres de tension et des chutes de tension [1]. Ces perturbations sont principalement causées par la connexion au réseau de charges non linéaires telles que les onduleurs, les ponts redresseurs, les fours à arc et à induction, les variateurs de vitesse des machines électriques, ainsi que les appareils domestiques tels que les téléviseurs et les lampes fluorescentes. Ces dispositifs à base de composants semi-conducteurs génèrent des harmoniques qui ont des effets indésirables sur le fonctionnement du réseau électrique. Par conséquent, il est important de compenser ces harmoniques pour atténuer leurs effets néfastes et améliorer la qualité de l'énergie électrique. Ce chapitre examine les principales perturbations de tension et de courant, leurs origines et leurs conséquences. De plus, il aborde les solutions traditionnelles (filtrage passif) et modernes (filtrage actif) qui sont utilisées pour résoudre les problèmes liés aux perturbations harmoniques [1].

I.1 Qualité de l'énergie

L'énergie électrique est distribuée sous forme de tension formant un système sinusoïdal triphasé ayant les paramètres caractéristiques suivants :

- la fréquence,
- l'amplitude des trois tensions,
- la forme d'onde,
- le déséquilibre.

La mesure de ces paramètres permet de déterminer la qualité de la tension. Si l'un ou plusieurs d'entre eux sont endommagés, cela suggère une défaillance dans le réseau électrique. Des normes ont été établies (voir la section 1.4) afin de détecter certaines perturbations et d'évaluer le niveau de conformité de l'énergie fournie.

I.1.1 Qualité de la tension

La qualité de tension alternative est étroitement liée aux caractéristiques de ses constituants représentés dans :

1/ La forme d'onde qui doit être sinusoïdale : sans de distorsions, de pics, de creux...

2/ L'amplitude.

3/ La fréquence.

3/La symétrie du système triphasé, caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et de leurs déphasages relatifs. [2]

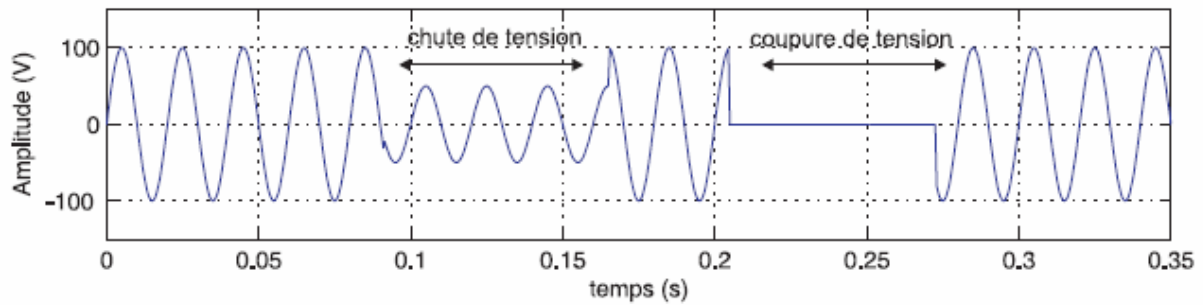
La qualité de la tension peut être modifiée en raison d'incidents liés à la nature physique et aux limitations de l'exploitation du réseau, ainsi que par certains récepteurs. Ces dysfonctionnements se manifestent sous différentes formes de perturbations qui impactent un ou plusieurs des quatre paramètres préalablement définis. [3]

I.1.1.1. 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 ms jusqu'à quelque second.

Les baisses de tension sont causées par des phénomènes naturels tels que la foudre, ou par des défauts dans les installations ou les réseaux, qu'ils soient publics ou appartenant aux utilisateurs. Elles se produisent également lors de la mise en marche de dispositifs à forte intensité de courant tels que les moteurs ou les transformateurs [2].

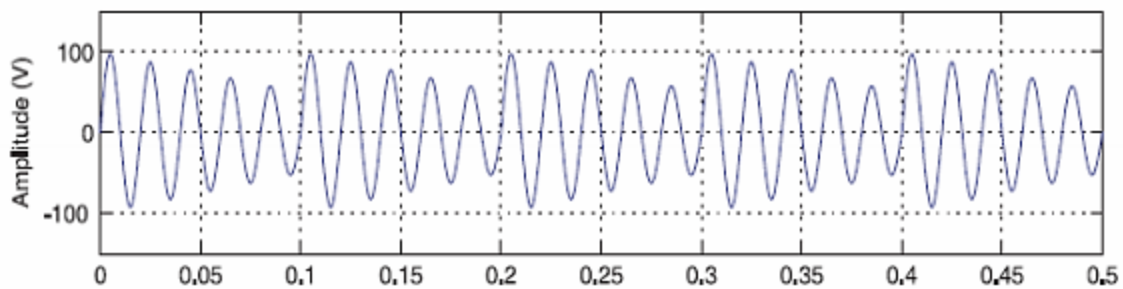
En revanche, une coupure de tension correspond à une diminution soudaine de la tension à une valeur supérieure à 90% de la tension nominale, ou à une disparition totale pendant une durée généralement comprise entre 10 millisecondes et une minute pour les coupures courtes, et supérieure à une minute pour les coupures longues. La plupart des appareils électriques tolèrent une coupure totale d'alimentation d'une durée inférieure à 10 millisecondes. La figure (I.1) illustre un exemple de baisses de tension et de coupures de tension.

**Figure I. 1 Creux et coupures de tension**

I.1.1.2 Fluctuations de tension

Les fluctuations de tension sont des variations périodiques ou erratiques de l'enveloppe de la tension. Ce sont des variations brutales de l'amplitude de la tension situées dans une bande de $\pm 10\%$ et se produisent sur un intervalle de temps de quelques centièmes de Secondes. [2]

Ces perturbations sont principalement causées par la propagation de courants d'appel importants sur les lignes du réseau. La principale source de ces courants est le fonctionnement d'appareils à consommation électrique variable, tels que les fours à arc et les machines à souder. Ces fluctuations se manifestent par des variations d'intensité, visibles au niveau de l'éclairage, ce qui entraîne une gêne visuelle perceptible pour une variation de tension de seulement 1%. Ce phénomène de variation rapide de tension est appelé "flicker". Un exemple de fluctuation de tension est illustré dans la figure (I.2).

**Figure I. 2 Fluctuations de tension**

I.1.1.3. Déséquilibre du système triphasé de tension

Ces perturbations sont principalement causées par la propagation de courants d'appel importants sur les lignes du réseau. La principale source de ces courants est le fonctionnement d'appareils à consommation électrique variable, tels que les fours à arc et les machines à souder. Ces fluctuations se manifestent par des variations d'intensité, visibles au niveau de l'éclairage, ce qui entraîne une gêne visuelle perceptible pour une variation de tension de seulement 1%.

Ce phénomène de variation rapide de tension est appelé "flicker". Un exemple de fluctuation de tension est illustré dans la figure (I.3).

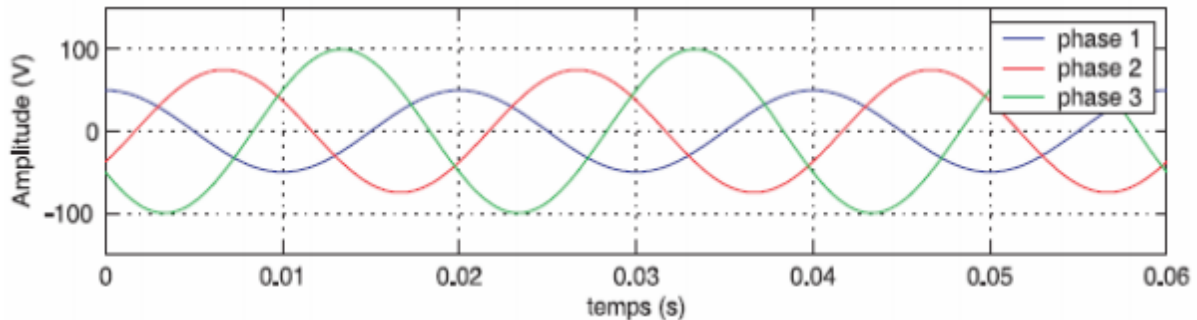


Figure I. 3 Déséquilibre du système triphasé de tension

I.1.1.4 Variation de fréquence

Une variation sensible de la fréquence du réseau peut apparaître sur les réseaux des utilisateurs non interconnectés ou alimentés par une source thermique autonome, voir la figure (I.4). Au niveau des réseaux de distribution ou de transport, cette variation de la fréquence est très rare et n'est présente que lors de circonstances exceptionnelles, comme dans le cas de certains défauts graves sur le réseau. Dans les conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle 50 Hz 1% \pm . [2]

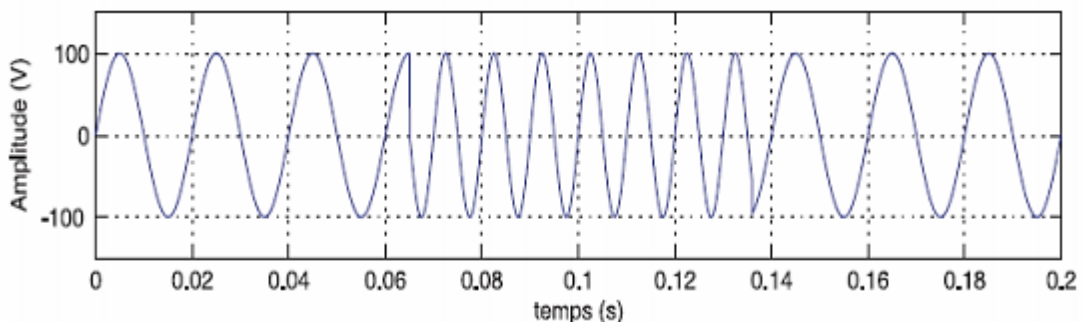


Figure I. 4 Répartition des commutations sur un bras d'onduleur

I.1.2 Qualité du courant

La qualité du courant est relative à une dérive des courants de leur forme idéale, et se caractérise de la même manière que pour les tensions par quatre paramètres. Le terme « qualité du courant » est rarement utilisé, car la qualité du courant est étroitement liée à la qualité de la tension et la nature des charges. Pour cette raison, « la qualité de l'énergie électrique » est souvent réduite à « la qualité de la tension ». [2]

I.2 Problématique des harmoniques

Ces dernières années, l'intégration de convertisseurs de puissance dans les processus industriels et d'autres charges non linéaires connectées au réseau électrique a entraîné une augmentation significative de la pollution harmonique [4]. Ces charges contribuent à la détérioration de la qualité du courant et de la tension dans les réseaux de distribution, ce qui peut perturber le fonctionnement des dispositifs connectés au réseau. Il est donc essentiel d'éliminer ou de réduire au minimum ces harmoniques [5]. Dans le réseau de distribution, la plupart des charges électriques ont été considérées comme des charges polluantes consommant de la puissance réactive et générant des courants non sinusoïdaux et déséquilibrés. Le premier effet réduit la capacité de production ou de transmission de la puissance active des générateurs, des transformateurs et des lignes électriques [5]. Le deuxième effet peut causer une déformation ou un déséquilibre des tensions du réseau lorsque son impédance n'est pas négligeable [8]. Les harmoniques de courant, une fois injectées par des charges non linéaires, se propagent à travers le réseau électrique et altèrent ainsi la forme d'onde des tensions aux différents points du réseau [6].

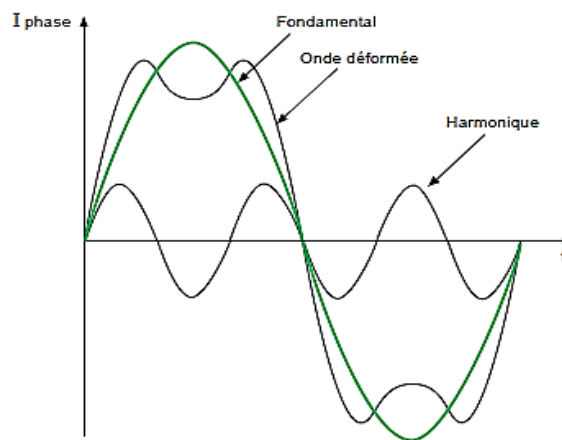


Figure I. 5 Harmoniques

I.3 Sources des harmoniques et leurs effets

Il existe différents types de charges non linéaires qui entraînent des harmoniques de courant ou de tension. La plupart de ces charges sont des convertisseurs de puissance tels que les variateurs de vitesse (CC ou CA) et les redresseurs à diodes utilisés dans de nombreuses applications. D'autres sources d'harmoniques sont les ordinateurs et leurs périphériques, les téléviseurs, les fours à micro-ondes, etc. Tous ces systèmes entraînent une pollution harmonique du réseau auquel ils sont connectés. Les harmoniques de courant injectées dans le réseau

électrique par ces charges polluantes peuvent endommager les tensions du système et affecter par la suite les équipements des consommateurs. En termes de distribution, les harmoniques de courant sont considérées comme des sources de distorsion qui entraînent la surchauffe des équipements et la dégradation des performances des appareils électroniques. L'impact est encore plus grave en cas de phénomène de résonance, qui a tendance à amplifier le courant. La présence d'harmoniques de courant ou de tension a des effets néfastes sur le fonctionnement, la rentabilité et la durée de vie des équipements électriques. Parmi ces effets, on peut citer, par exemple [7] :

_Facteur de puissance.

_Les pertes supplémentaires en cuivre et en fer causent l'échauffement des conducteurs, des câbles, des condensateurs et des machines tournantes.

_Les erreurs se produisent dans les dispositifs de mesure.

_Les isolants des transformateurs se chauffent.

_Le couplage électromagnétique entre les réseaux électriques et de télécommunication provoque des interférences, ce qui peut générer d'importants bruits.

_Les circuits formés par les inductances du transformateur et les capacités des câbles peuvent avoir des fréquences de résonance qui coïncident avec celles des harmoniques. Cela peut entraîner une amplification significative pouvant endommager les équipements connectés au réseau.

_La régulation des dispositifs, tels que la commutation des thyristors, est perturbée lorsque le passage par zéro de la tension est décalé.

_Les transformateurs et les inductances produisent du bruit.

I.4 Caractérisations des harmoniques

Il est nécessaire de mesurer précisément les tensions du système et les courants harmoniques pour analyser et prédire le comportement des harmoniques dans le système global [8]. Différentes grandeurs sont introduites pour évaluer ces perturbations. Parmi ces grandeurs, on cite les plus utilisées comme : le taux harmonique de rang n , le taux global de distorsion harmonique, le facteur de puissance FP, et le facteur de crête.

I.4.1 Taux Harmonique de Rang h

Il est défini comme le rapport entre la valeur efficace de l'harmonique (de courant ou de tension) de rang h et la valeur efficace du fondamental (de courant ou de tension).

$$\frac{I_h}{I_1} \text{ ou } \frac{V_h}{V_1}$$

Où I_h et V_h représentent les composantes harmoniques de rang h ; I_1 et V_1 représentent les composantes fondamentales. En général, la valeur de chaque harmonique est exprimée par son taux individuel (en pourcentage du fondamental) comme représenté à la figure 1.2.

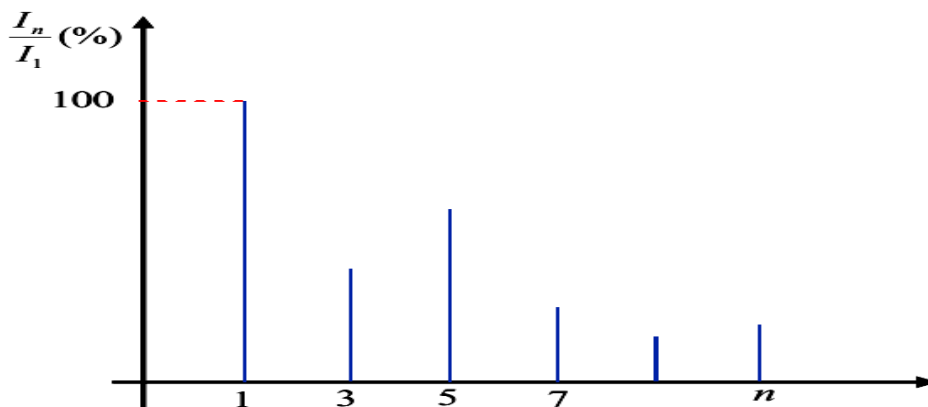


Figure 1.6 Spectre de fréquence d'un courant non-sinusoidal.

I.4.2. Taux Global de Distorsion Harmonique

Le taux global de distorsion harmonique est la grandeur la plus utilisée pour mesurer la déviation d'une onde périodique contenant des harmoniques par rapport à une onde purement sinusoïdale. Le THD est défini comme la racine carrée de la somme des carrés des valeurs efficaces de toutes les harmoniques divisé par la valeur efficace du fondamental. Dans cette thèse, THD_v est utilisé pour définir les distorsions de tension et THD_i pour les courants. Les deux grandeurs sont définies par l'équation (1.51) [9] :

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \frac{X_h^2}{X_1^2}} \quad [I. 1]$$

X étant la valeur efficace du courant ou de la tension. En général, le rang d'harmonique h est limité jusqu'au rang 19^{eme} ou 50^{eme} selon la précision désirée [9]. Pour les harmoniques de fréquences élevées supérieures à 2500 Hz, elles sont atténuées par l'effet de peau et par la

présence des inductances de lignes [10]. Lorsque le *THD* vaut zéro, on peut conclure qu'il n'y a pas d'harmoniques sur le réseau.

I.4.3 Facteur de puissance FP

Le facteur de puissance *PF* (Power Factor) n'est pas simplement le cosinus de l'angle entre la tension et le courant. Il est connu sous le nom de facteur de déformation (FD) qui est égal au *PF* seulement dans le cas des charges linéaires avec des tensions et courants sinusoïdaux [9].

Les générateurs, les transformateurs, les lignes de transport et les appareils de contrôle et de mesure sont dimensionnés pour la tension et le courant nominaux. Une faible valeur du facteur de puissance conduit à une mauvaise utilisation de ces équipements [6, 10].

Différentes définitions du facteur de puissance ont été données au *paragraphe 1.2.2* selon les différents points de vue des chercheurs. D'après la *définition de Budeanu*, il s'agit du facteur de puissance arithmétique PF_a de l'équation (1.18) et du facteur de puissance vectoriel PF_v de l'équation (1.28). D'après *Depenbrock and Emanuel*, le facteur de puissance est donné par l'équation (1.49).

Le facteur de crête *CF* (Crest Factor), donné par l'équation (1.52), est défini comme le rapport entre la valeur crête du courant ou de la tension et la valeur efficace. Il vaut $\sqrt{2}$ en cas où un courant ou une tension sont sinusoïdaux et peut être supérieur ou inférieur à $\sqrt{2}$ dans le cas d'un signal non-sinusoïdal.

$$CF = \frac{X_{max}}{X_{eff}}$$

I. 2

I.5 Normes & Réglementation

Normes et réglementations Les deux principaux organismes de normalisation électrotechnique Internationale), et IEEE (Institute of Electric al and Electroniques Engainées).

L'objectif de ces normes est de limiter les dysfonctionnements occasionnés par les harmoniques. La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) définit le niveau des courants et des tensions harmoniques à ne pas dépasser par une série de normes de compatibilité électromagnétique (CEI 61000) [11]. Ces normes sont appliquées suivant 4 règles :

_garantissent le maintien, en tout point, des niveaux de compatibilité.

Chapitre I : Qualité de l'énergie et Les Perturbations harmoniques

- Niveaux d'immunité : Ils permettent de garantir à l'utilisateur un fonctionnement de l'équipement sur un réseau perturbé dans certaines limites.

-Niveaux de compatibilité : Ils sont, généralement, des taux de tension harmonique à ne pas dépasser en tout point du réseau. Le maintien de ces niveaux garantit un fonctionnement correct de tous les appareils.

-Niveaux de planification : Ils représentent des seuils de perturbations décidés par un gestionnaire de réseau, tel que le niveau de compatibilité qu'il ne soit pas dépassé. [12]

par exemple, la norme CEI 61000-2-2 pour les équipements raccordés à un réseau basse tension permet de garantir à l'utilisateur un fonctionnement de l'équipement sur un réseau perturbé dans certaines limites. Un extrait de la norme CEI 61000-2-2 est donné au tableau I.1.

Tableau. I.1_Niveau de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles sur les réseaux électriques

Harmoniques impairs non multiples de 3		Harmoniques impairs Harmoniques pairs multiples de 3		Harmoniques pairs	
Range harmonique h	Tension harmonique %	Range harmonique h	Tension harmonique %	Range harmonique h	Tension harmonique %
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.3	6	0.5
13	3	21	0.2	8	0.5
17	2	21>	0.2	10	0.5
19	1.5			12	0.2
23	1.5			12>	0.2
25	1.5				
>25	12.7				

La norme CEI 61000-3-2 : cette norme (tableau I.1) fixe la limitation des courants injectés dans le réseau publique pour des équipements dont le courant par phase est inférieur à 16A. Il s'agit des appareils du domaine domestique. [13]

	Range harmonique	Courant harmonique maximal autorisé
Harmoniques impaires	3	2.3
	5	1.14
	7	0.77
	9	0.40
	11	0.33
	13	0.21
	15<h<39	0.15*15/h
Harmoniques Paires	2	1.08
	4	0.43
	6	0.3
	8<h<40	0.23*8/h

I.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté différents types de perturbations affectant l'onde de tension du réseau électrique. Comme nous avons pu le constater, les harmoniques et les déséquilibres de courant et de tension, les creux de tension ont des effets néfastes sur les équipements électriques. Ces effets peuvent aller des échauffements et de la dégradation du fonctionnement jusqu'à la destruction totale de ces équipements. Nous avons donné des définitions dont la connaissance nécessaire pour comprendre L'ensemble des développements de ce mémoire. Nous avons constaté l'importance de différentes solutions du filtrage, il y'a des points positifs ainsi que des points négatifs pour chaque type de solution. En vue de leur importance, les filtres actifs du courant sont aujourd'hui au stade de la recherche. On trouve des nouvelles techniques d'identification des perturbations, de commande, et de régulation ; le domaine du filtrage actif est en plein évolution.

Nous avons s'intéressé dans la suite aux solutions modernes tel que le filtre actif qui sera détaillé dans le chapitre suivant

Chapitre II

Solutions pour l'amélioration de la qualité d'énergie

II. Introduction

L'objectif de l'amélioration de la qualité de l'énergie est l'élimination ou la minimisation des perturbations en tension et/ou en courant dans les réseaux électriques, l'a où

le niveau de la qualité n'est pas suffisamment élevé pour une charge donnée, quand les coûts et les inconvénients de son dysfonctionnement sont inacceptables. L'aspect de la qualité de l'énergie est très large, par conséquent son amélioration peut s'étendre à l'amélioration de plusieurs facteurs comme : l'architecture du réseau, les automatismes de réalimentation, le niveau de fiabilité de ses ouvrages, leurs protections, et leurs maintenances. 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 composants harmoniques. La première classe de solutions s'intéresse la conception des circuits, tandis que la seconde consiste à compenser les courants ou les tensions harmoniques. Deux groupes de solutions de dépollution pour compenser toutes les perturbations peuvent être distingués.

- Les solutions traditionnelles (filtres passifs) qui sont les plus utilisés industriellement,
- Les solutions modernes (filtre actifs) qui sont conçus afin de surmonter les limitations des filtres passifs.

Ce sont des techniques qui doivent être maîtrisées par la majorité des électrotechniciens. Elles proposent une solution simple et rapide pour certains cas de perturbations bien localisés et manipulent des composants passifs (inductances, condensateurs, transformateurs) et/ou des branchements qui effectuent des modifications sur le schéma de l'installation.

II.1 Solutions classiques et traditionnelles de dépollution

Ces techniques doivent être maîtrisées par la plupart des professionnels en électrotechnique. Elles offrent une solution rapide et simple pour traiter certains cas de perturbations localisées spécifiques. Elles impliquent l'utilisation de composants passifs tels que des inductances, des condensateurs et des transformateurs, ainsi que des connexions qui modifient le schéma de l'installation.

II.1.1 Agir sur la structure de l'installation :

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

II.1.2 Surdimensionnement ou déclassement de l'installation électrique

On procède généralement au surdimensionnement des équipements afin d'assurer leur tenue aux surcharges harmoniques. Cette solution n'agit pas sur les harmoniques qui ne subissent aucune action curative de la part de l'utilisateur.

II.1.3 Renforcement de la puissance de court –circuit

L'impédance totale diminuée en amont de la charge non linéaire permet de réduire la tension créée par les harmoniques de courant, et donc de minimiser le taux de distorsion harmonique en tension au point de raccordement. Cependant, les courants harmoniques ne sont pas atténués.

II.1.4 Rééquilibrage des courants du réseau électrique

Cette solution va permettre de répartir les charges d'une manière similaire sur les trois phases. En effet, les charges monophasées et biphasées mal réparties engendrent des courants déséquilibrés dans un réseau électrique de tension basse.

II.1.5 Les filtres passifs

La technique et principe du filtrage passif consiste à insérer en amont de la charge, un ou plusieurs circuits accordés sur les harmoniques à rejeter. Ainsi pour filtrer un courant à une fréquence particulière, un filtre résonnant série est placé en parallèle sur le réseau (figure II.1). Cependant, ce type de filtre est très sélectif. Pour atténuer toute une bande de fréquences, un filtre passif amorti du second ordre (figure II.2) est préférable. Le dimensionnement de ces filtres dépend des harmoniques à éliminer, des performances exigées, de la structure du réseau et de la nature des récepteurs. Par cette technique, il est en général plus simple de rejeter les harmoniques de rang élevé que celles de rang faible. Malgré sa large utilisation dans l'industrie, ce dispositif simple a tout de même certains inconvénients :

- une connaissance approfondie de la configuration du réseau électrique est nécessaire, les variations de l'impédance du réseau peuvent détériorer les performances du filtre,
- le réseau peut former un système résonnant avec le filtre et les fréquences voisines de la fréquence de résonance sont amplifiées,
- Equipement volumineux,
- inadaptabilité et perte d'efficacité lorsque les caractéristiques du réseau électrique évoluent.

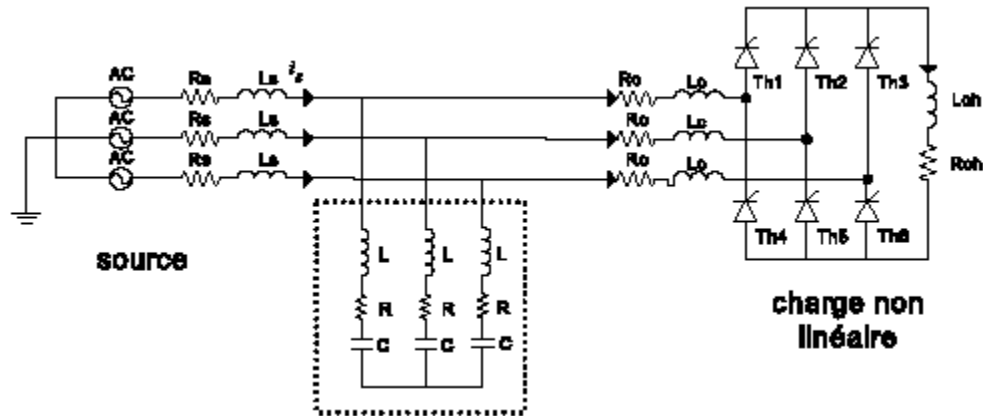


Figure II.1 Filtre passif résonant

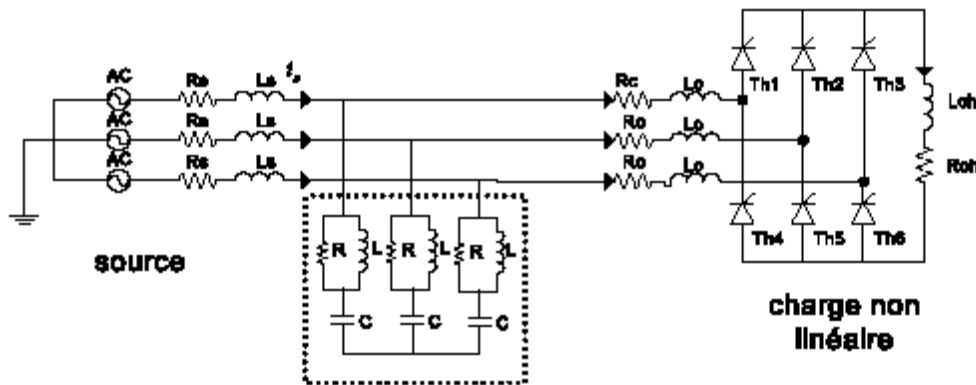


Figure II.2 Filtre passif amorti.

II.2 Solutions modernes

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

II.2.1 Le filtrage actif

Les filtres actifs sont des sources de courant ou de tension qui éliminent les perturbations harmoniques en injectant en série ou en parallèle sur le réseau des courants, des tensions, ou les deux à la fois, en opposition par rapport aux perturbations existantes : courants harmoniques créés

par la charge, ou tensions harmoniques présentes sur le réseau. En raison de leur grande souplesse d'adaptation, ces filtres ne nécessitent pas, en général, une étude approfondie avant l'installation, et offrent de nombreux avantages :

- Ils peuvent compenser tous les courants harmoniques dans leur bande passante.
- Ils s'adaptent à la charge quelles que soient les modifications apportées à l'installation.
- Ils ne présentent pas de risque de surcharges.
- Le risque de résonance entre le filtre et l'impédance du réseau qui existe avec le filtre passif est supprimé.

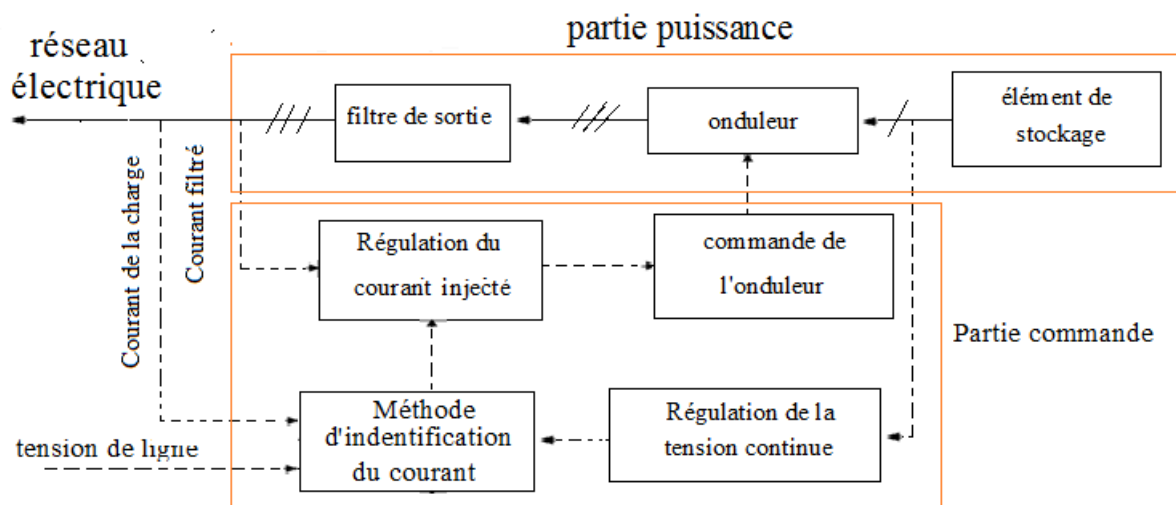


Figure II.3 schéma généralisé pour le filtre actif.

Le but de ce type de filtre est d'annuler les harmoniques de courant que la charge fournit à la source. Il peut également contribuer à la compensation de la puissance réactive et équilibrer les 3 phases du courant. Les filtres actifs parallèles ont l'avantage d'apporter seulement le courant de compensation et un peu du fondamental du courant fournit pour compenser les pertes du système. Il est aussi possible de connecter plusieurs filtres en parallèle pour approvisionner des courants importants, ce qui rend ce type de circuit adapté pour une large gamme de puissance [14].

II.2.2 Le principe de fonctionnement du filtre actif

Les filtres actifs sont composés d'onduleurs qui sont des convertisseurs statiques de puissance. Alimenté par une source de courant ou de tension continue, l'onduleur peut délivrer un courant ou une tension dont le contenu harmonique dépend uniquement de la loi de commande de commutation des interrupteurs. Les filtres actifs agissent donc Comme des sources de tension ou de courant harmoniques en opposition de phase avec ceux du réseau afin de rétablir un courant de source quasi sinusoïdal. Le filtre actif peut être connecté au réseau

en série ou en parallèle, suivant qu'il est conçu pour compenser les tensions ou les courants harmoniques [15]. Le principe de fonctionnement du filtre actif réside dans le fait que celui-ci produit des courants qui s'opposent aux courants harmoniques créés par les charges non linéaires, tendant ainsi à rétablir un courant appelé par la charge quasi sinusoïdal. Ces filtres actifs, encore appelés compensateurs actifs, sont utilisés en parallèle ou en série au sein d'une installation nécessitant un traitement harmonique. Le filtre actif est d'une utilisation plus large que le filtre passif puisqu'il peut compenser plusieurs rangs d'harmoniques à la fois [16].

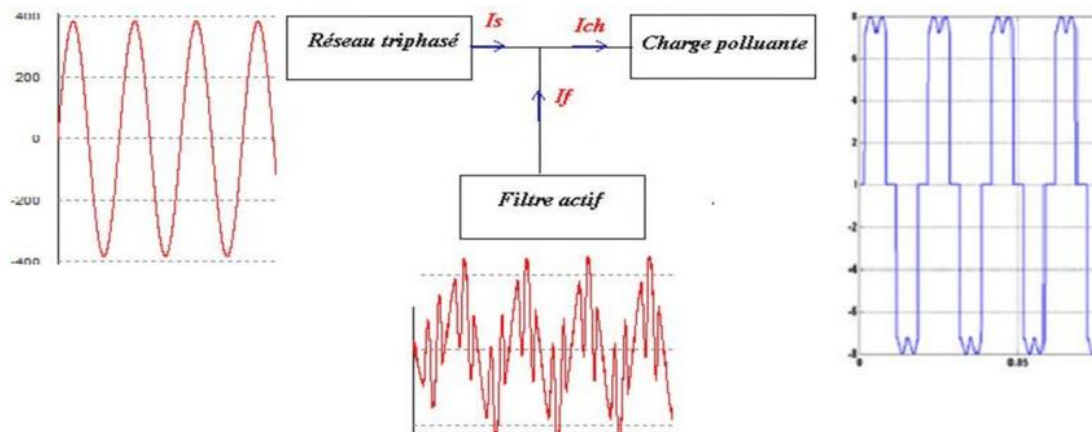


Figure II.4 Principe de fonctionnement du filtre actif.

II.3 Classification des filtres actifs

Les filtres actifs peuvent être classifiés à partir du type de convertisseur qu'ils utilisent, de leur topologie ou encore de leur nombre de phases. Nous nous limiterons ici à la classification selon leurs différentes topologies. Suivant leurs topologies, les FA peuvent être en série, en parallèle ou mixtes.

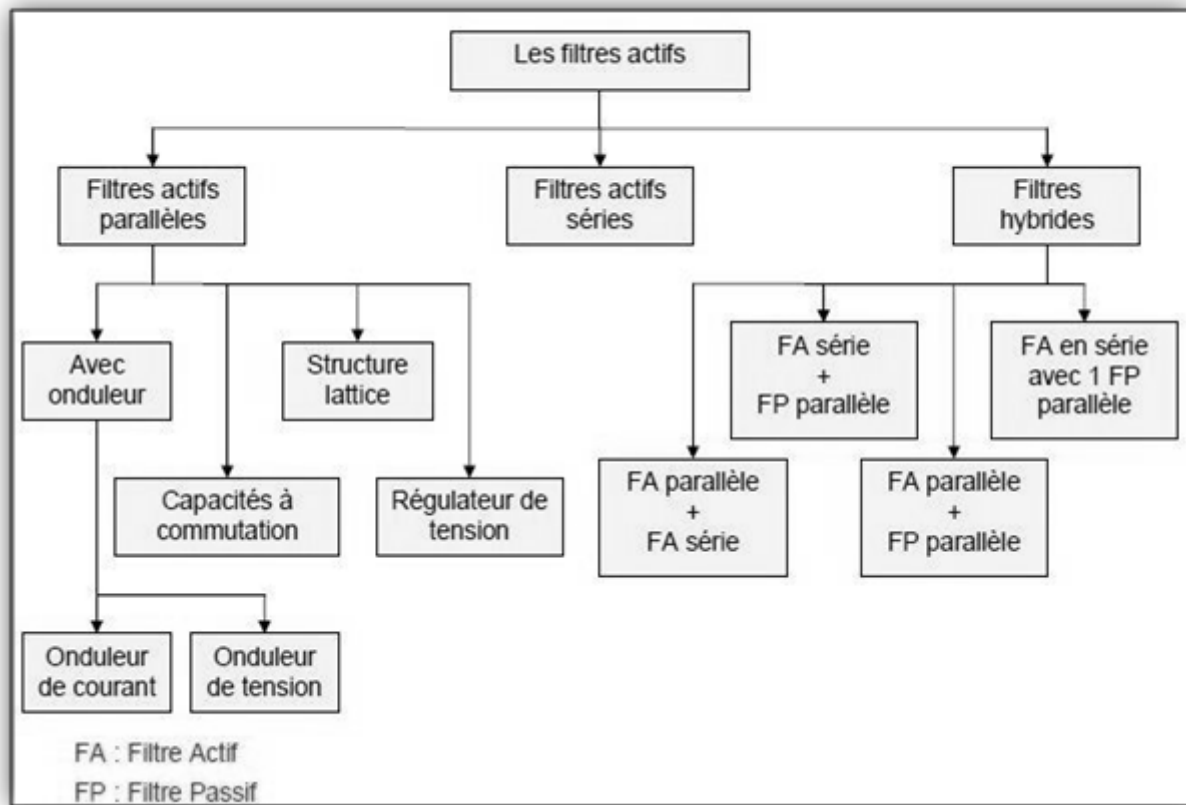


Figure II.5 Les différents types de filtres actifs

II.3.1 le filtre actif série :

Le filtre actif série est relié en série avec le réseau et compense les harmoniques de tension au point de connexion. Un FAP série fonctionne comme une source de tension contrôlée qui peut être adéquate à la compensation des harmoniques de tension générées par exemple par un redresseur avec une charge capacitive dans le bus continu (DC) ; par conséquent il peut offrir une isolation entre la charge polluante et le réseau électrique [17].

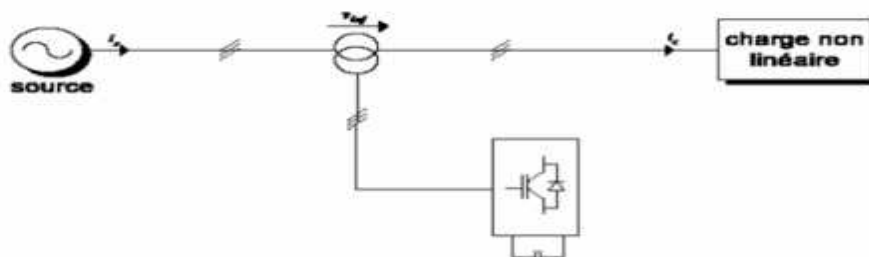


Figure II.6 Filtre actif série (FAS)

II.3.2 Filtre combiné parallèle-série (UPQC) :

Les FAP s série ou parallèle réalisent une seule tâche, soit le filtrage des harmoniques de courant dans le cas parallèle ou bien le filtrage des harmoniques de tension dans le cas série. La topologie de la figure 1.6 combine les deux topologies série et parallèle en un seul filtre actif qui s'appelle le conditionneur d'énergie unifié (*Unified Power Quality Conditioner UPQC*) [18]. Cette architecture donne presque une solution globale à tous les types de perturbation tels que : les harmoniques de courant et de tension, les creuses tensions, la surtension et le déséquilibre de tension [19]. Néanmoins, cette structure n'est pas très utilisée à cause de la complexité du circuit de puissance de sa commande et de son coût élevé par rapport au FAP parallèle et les autres types de solutions proposées.

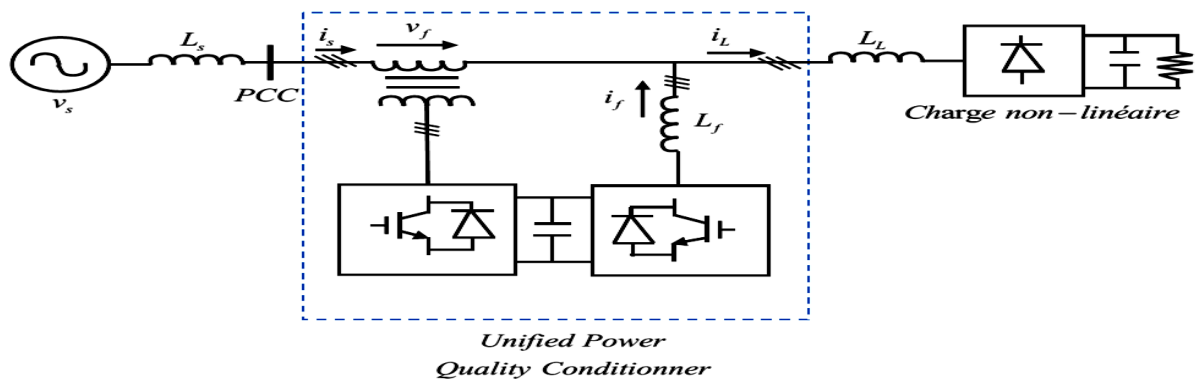


Figure II.7 Filtre UPQC

II.3.3 Filtre actif hybride

II.3.3.1 filtres hybrides actifs et passifs

La combinaison entre un filtre actif de faible puissance et un filtre passif est appelée le filtre hybride de puissance. Cette association permet de réduire le dimensionnement du FAP et contourner les inconvénients du filtre passif [20]. Donc, le filtre passif vise la compensation des fréquences dominantes et le filtre actif compense le reste des fréquences [19, 21]. Trois combinaisons de filtres hybrides ont été utilisées et sont décrites dans les sections suivantes.

II.3.3.2 Association Filtre actif série en parallèle avec un Filtre passif

Cette configuration exploite le filtre actif série et le filtre parallèle passif (figure II.8). Généralement le FAS est utilisé afin de compenser les problèmes de la résonance et l'influence de l'impédance de source engendrés par le filtre passif et améliorer les performances de compensation,

tandis que le deuxième filtre a pour rôle de piéger les courants harmoniques qui doivent être supprimés par sa capacité de modifier localement l'impédance du réseau. Cette topologie a la possibilité de réduire les harmoniques de tension et de courant a un prix raisonnable.

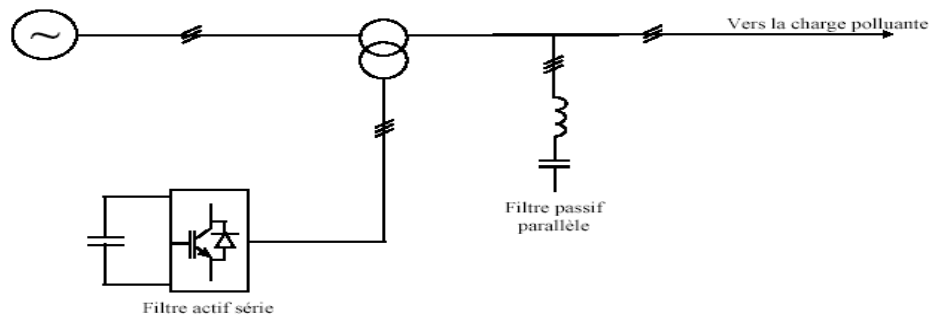


Figure II.8 Filtre actif série en parallèle avec un filtre passif parallèle

II.3.3.3 Association filtre actif série en série avec un filtre passif

Le schéma de principe de cette configuration est représenté par la Figure(II.9), c'est pratiquement la même configuration que la précédente avec l'avantage de réduire encore le dimensionnement du filtre actif série car le courant qui le Traverse est plus faible. De plus, le filtre actif série est à l'abri d'un éventuel court-circuit de la charge [22].

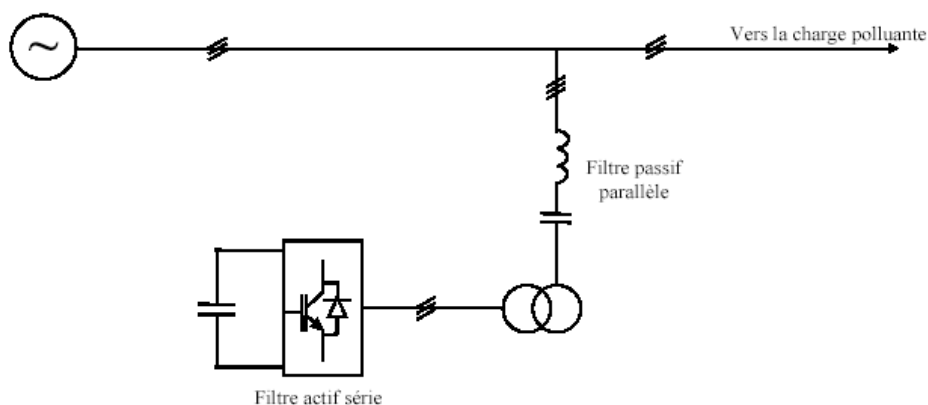


Figure II.9 Filtre actif série en série avec un filtre passif

II.3.3.4 Filtre actif parallèle avec un Filtre passif en parallèle

Le schéma de son principe est donné par la figure(II.10) dont lequel le filtre actif parallèle est pour but de compenser les courants harmoniques basses fréquences émis par la charge polluante.

Tandis que le filtre passif est généralement accordé sur une fréquence élevée, élimine les harmoniques hautes fréquences y compris ceux créés par le filtre actif parallèle.

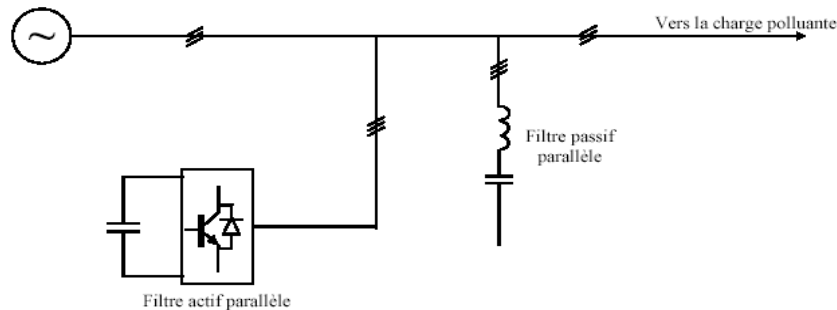


Figure II.10 Filtre actif parallèle avec un filtre passif en parallèle

II.3.4 Filtre actif parallèle

Un FAP est un onduleur connecté en parallèle avec le réseau via un filtre de découplage (généralement une résistance TF en série avec une inductance UF), ce dispositif injecte en temps réel des courants harmoniques égaux et en opposition de phase avec ceux absorbés par les charges non-linéaires connectées au réseau. De ce fait, le courant côté réseau devient sinusoïdal. L'objectif du filtre actif parallèle (F.A.P) consiste à empêcher les courants perturbateurs (harmoniques, réactifs et déséquilibres), produits par des charges polluantes, de circuler à travers l'impédance du réseau, située en amont du point de connexion du filtre actif. Les caractéristiques techniques principales d'un filtre actif sont :

Le nombre de phase (monophasé, triphasé, équilibré, déséquilibré).

La composition globale ou rang par rang des harmoniques (exemple : de 2a25).

La compensation du facteur de déphasage(DPF).

Le calibre des capteurs de courant (TI).

Le temps de réponse (exemple : 40ms) [23].

Le schéma de principe d'un FAP est donné par la Fig. (II.10)

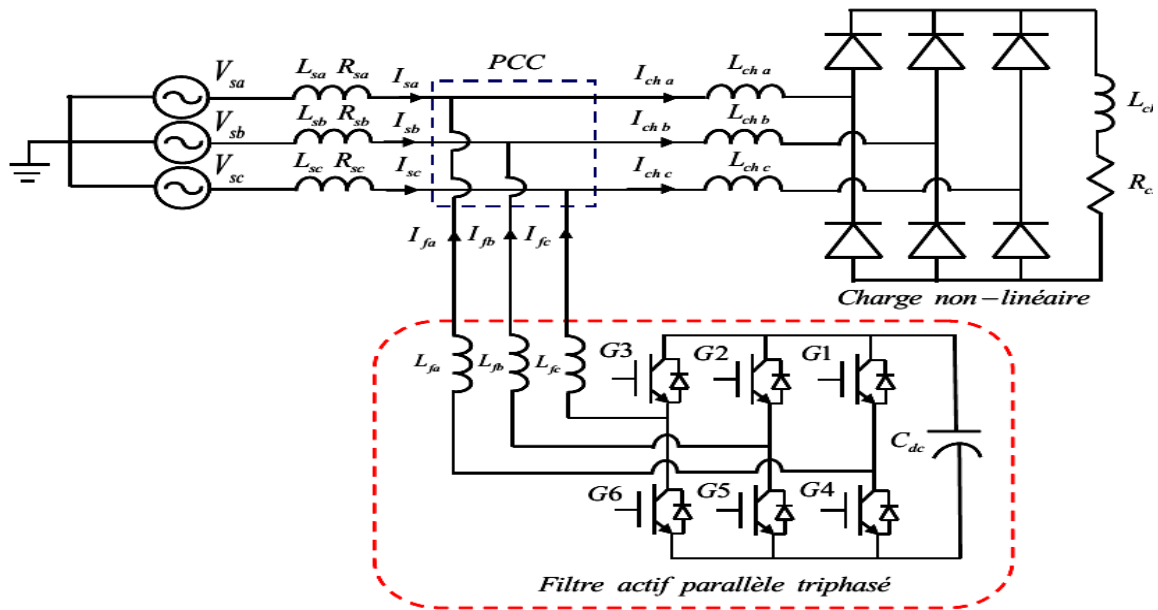


Figure II.11 Filtrage Filtrage Actif Parallèle (shunt)

II.4 Comparaison entre les différentes topologies de filtrage actif

Le tableau (II.1) récapitule les avantages et les inconvénients des 3 configurations de filtrage actif. Le filtrage série présente l'avantage d'améliorer la qualité de l'onde de tension, et permet de fournir une énergie de qualité. Cependant, il ne permet pas d'éliminer les harmoniques engendrées par les charges non linéaires. Par contre, le filtrage shunt permet de les éliminer et de contrôler le courant absorbé du réseau. Par conséquent, il réduit les déformations de l'onde de tension causées par la circulation des composantes harmoniques de courant. Par ailleurs, le filtre universel permet de cumuler les avantages des 2 configurations. Cependant, il est difficile à réaliser en pratique. Par ailleurs, les normes de qualité de l'énergie sont plutôt portées sur la compensation des harmoniques. Pour ces raisons, le filtrage actif shunt est considéré le plus important dans ce sens [24].

Tableau II.1 : Récapitulatif des méthodes de rejet des courants et de tensions harmoniques

Topologie	Avantages	Inconvénients
Filtre actif série	<input type="checkbox"/> Amélioration de la forme de tension.	<input type="checkbox"/> Pas d'amélioration de la forme de courant.
Filtre actif shunt	<input type="checkbox"/> Amélioration de la forme de courant et de tension.	<input type="checkbox"/> Amélioration de la forme de tension pas toujours évidente.

	<input type="checkbox"/> Amélioration du facteur de puissance.	
Filtre universel	<input type="checkbox"/> Amélioration de la forme du courant, amélioration. <input type="checkbox"/> de la forme de la tension. <input type="checkbox"/> Adaptabilité aux variations de charges et du réseau.	<input type="checkbox"/> Réalisation difficile.

II.5 Conclusion

Les convertisseurs de puissance consomment des courants non sinusoïdaux, même s'ils sont alimentés par une tension sinusoïdale. Se comportent donc comme des générateurs de courants harmoniques. Les solutions classiques, notamment le filtrage passif, l'optimisation des topologies des convertisseurs, les transformateurs à couplage spécial et autres, ne sont plus suffisantes pour la dépollution. Ainsi, le filtre actif est de plus en plus souvent utilisé comme filtre harmonique en plus des solutions classiques. Plusieurs topologies de filtres actifs sont réalisables. Ils peuvent être connectés en Parallèle ou en série avec le réseau, comme ils peuvent être seuls ou en association avec les filtres passifs pour former les filtres hybrides. La structure du filtre actif parallèle(FAP), est considérée dans chapitre suivant. Qui présente la structure du filtre actif parallèle ainsi que son principe de fonctionnement. Par ailleurs les différentes stratégies de commande.

Chapitre III

**FILTRE ACTIF PARALLELE DE
PUISSANCE**

III. Introduction

Afin de réduire les harmoniques au niveau du réseau électrique, nous proposons dans ce travail le filtrage actif parallèle, car il représente des avantages, comme 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. Ceci a l'avantage d'éliminer de façon active tout ou une partie des harmoniques de courant.

Nous proposons donc d'étudier la structure générale, les différentes stratégies de commande de l'onduleur de tension et le dimensionnement du filtre actif parallèle.

III.1 Principe de filtrage actif parallèle de puissance

Sur la figure III.1, le schéma de principe du filtre actif parallèle est représenté, il doit fournir la puissance déformante et la puissance réactive. Par conséquent, le réseau fournit uniquement la puissance active.

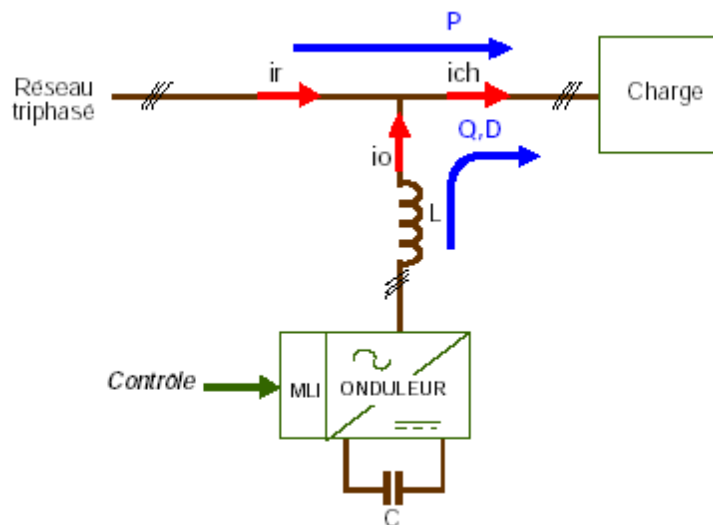


Figure III .1 Schéma de principe du filtre actif parallèle

Généralement, le courant absorbé par la charge comporte une composante active I_{cha} , une composante réactive I_{chr} et une composante harmonique $\sum_{n=1}^{\infty} I_{chn}$

$$I_{cha} = I_{cha} + I_{chr} + \sum_{n=1}^{\infty} I_{chn}$$

III .1

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

La première loi de Kirchoff donne que le courant fourni par la source est égale à

$$I_s = I_{ch} - I_f \tag{III.2}$$

La source fournit la puissance active absorbée par la charge

$$I_s = I_{ch} \tag{III.3}$$

Le filtre actif parallèle fournit la puissance réactive et déformante

$$I_f = I_{chr} + \sum_{n=1}^{\infty} I_{chn} \tag{III.4}$$

Afin de montrer le principe de filtrage actif, on considère l'ensemble réseau électrique, charge polluante et filtre actif selon (figure III.2). La charge polluante est constituée d'un pont triphasé à diodes débitant sur un circuit RL.

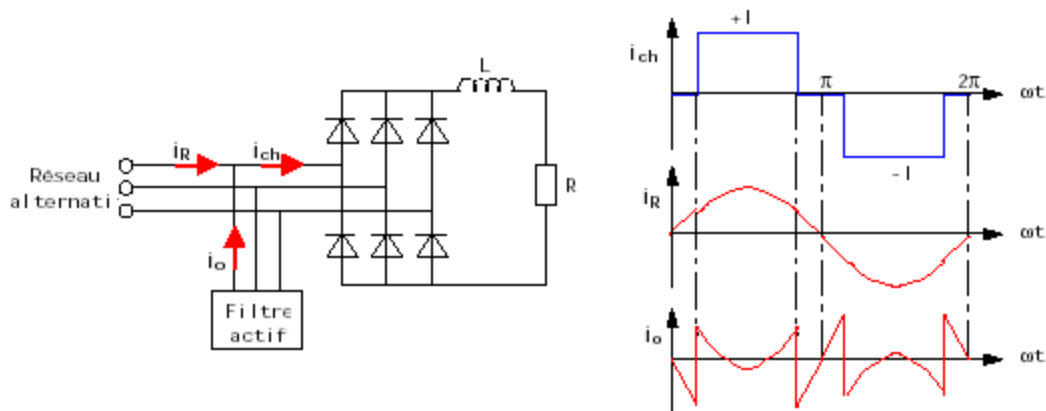


Figure III.2 Schéma de principe de l'ensemble réseau électrique, charge polluante et filtre actif et formes d'ondes des courants respectifs

Notons 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.

III.2 Structure du filtre actif parallèle

Les filtres actifs sont composés de deux parties distinctes : une partie puissance, une partie commande figure III.3. La première est composée d'un onduleur, d'un filtre de couplage au réseau et d'une source d'énergie. Ces deux derniers déterminent la nature du filtre actif. Il

peut être à structure tension ou courant suivant qu'il est réalisé à l'aide d'un onduleur de tension ou de courant.

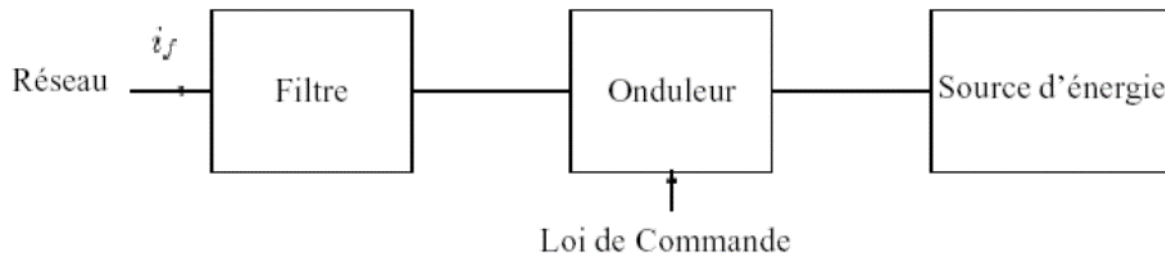


Figure III. 3 Structure d'un filtre actif parallèle

-La partie puissance est constituée

1/ d'un onduleur à base d'interrupteurs de puissance, commandables à l'ouverture et à la fermeture GTO, IGBT, MOSFET, etc.... avec des diodes de roue libre

2/ d'un circuit de stockage d'énergie

3/ d'un filtre de sortie

-La partie commande est constituée

1/ de la méthode d'identification des courants perturbés.

2/ de la régulation de la tension continue appliquée aux éléments de stockage d'énergie.

3/ de la régulation du courant injecté sur le réseau à partir de l'onduleur de tension.

4/ de la commande de l'onduleur de tension.

III.2.1 Etude de la partie puissance

III.2.1.1 Modélisation de l'onduleur de tension deux niveaux

Contrairement à l'onduleur de courant, l'onduleur de tension se distingue par l'utilisation d'un condensateur comme source d'alimentation en énergie (Figure III.4). Il est essentiel de maintenir une tension constante aux bornes de ce condensateur [25].

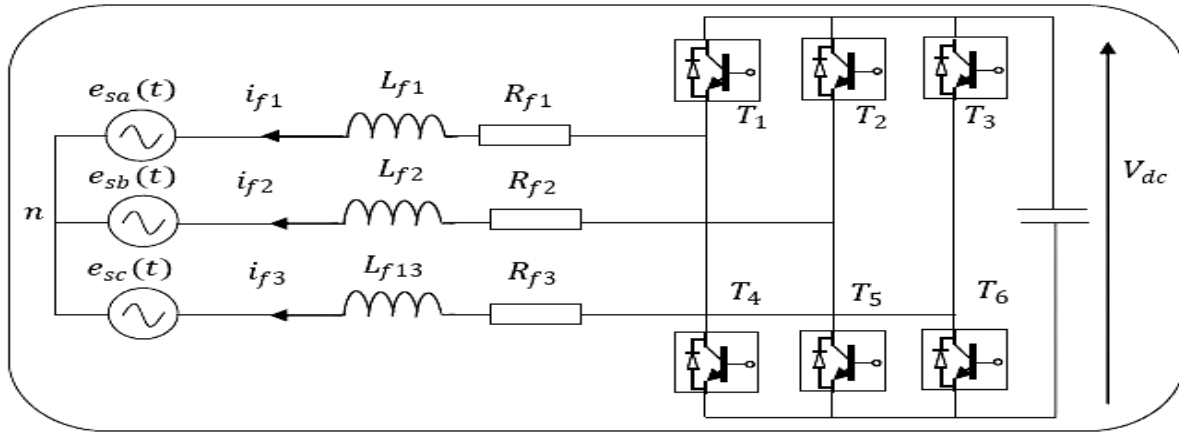


Figure III.4 Onduleur de tension deux niveaux

Les interrupteurs utilisés dans l'onduleur sont conçus pour fonctionner de manière unidirectionnelle en tension et réversible en courant. Pour atteindre cet objectif, les composants semi-conducteurs de l'onduleur sont associés en parallèle avec des diodes. Ces semi-conducteurs sont commandés pour s'ouvrir et se fermer [26]. Les semi-conducteurs d'un même bras de l'onduleur sont commandés de manière alternative, de sorte que la conduction de l'un entraîne le blocage de l'autre. Le fonctionnement de l'onduleur est organisé de manière à éviter la fermeture simultanée des semi-conducteurs d'un même bras, ce qui pourrait court-circuiter le condensateur. En effet, les semi-conducteurs d'un même bras peuvent être ouverts pendant une période définie comme un temps mort afin de prévenir ce risque [26]. L'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur représentés dans la Figure III.5 dépendent de l'état des signaux de commande (S1, S2, S3) tel que défini par [27]

$$S1 = \begin{cases} 1 & T1 \text{ fermé} & T4 \text{ ouvert} \\ 0 & T4 \text{ fermé} & T1 \text{ ouvert} \end{cases}$$

$$S2 = \begin{cases} 1 & T2 \text{ fermé} & T5 \text{ ouvert} \\ 0 & T5 \text{ fermé} & T2 \text{ ouvert} \end{cases}$$

$$S3 = \begin{cases} 1 & T3 \text{ fermé} & T6 \text{ ouvert} \\ 0 & T6 \text{ fermé} & T3 \text{ ouvert} \end{cases}$$

$$\begin{pmatrix} V_{f1} - V_{f2} \\ V_{f2} - V_{f3} \\ V_{f3} - V_{f1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s1 - s2 \\ s2 - s3 \\ s3 - s1 \end{pmatrix} V_{dc}$$

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

$$Vfx = Vsx + Lf * difx / dt + Rf ifx \quad \text{III .5}$$

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

$$Vs1 + Vs2 + Vs3 = 0ff \quad \text{III .6}$$

$$if1 + if2 + if3 = 0 \quad \text{III .7}$$

Nous pouvons donc déduire des équations (III.2) et (III.3), (III.4) la relation suivante :

$$Vf1 + Vf2 + Vf3 = 0 \quad \text{III .8}$$

A partir des équations (III.1) et (III.5), nous obtenons :

$$\begin{cases} Vf1 \\ Vf2 \\ Vf3 \end{cases} = \begin{pmatrix} 2S1 & -S2 & -S3 \\ -S1 & 2S & -S3 \\ -S1 & -S2 & 2S3 \end{pmatrix}$$

Puisque les grandeurs S1, S2 et S3 peuvent prendre chacune deux valeurs (0 ou 1), il en résulte huit commandes possibles, présentées dans le tableau III.1.

État	S1	S2	S3	Vf1	Vf2	Vf3
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	$-V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$
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

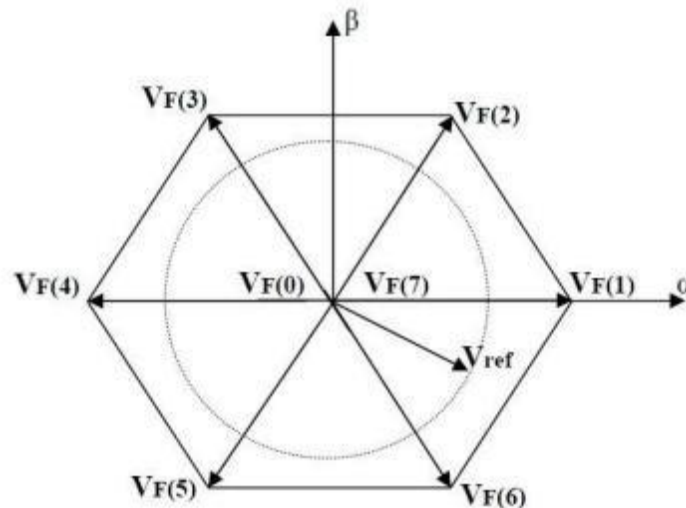


Figure III.5 Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur.

Où V_{f*} représente la tension de référence que doit produire l'onduleur pour pouvoir créer les courants perturbateurs identifiés. Ceci signifie que l'onduleur n'est capable de fournir des tensions égales aux tensions de référence que si le vecteur formé par ces derniers reste à l'intérieur d'hexagone montré dans la Figure (III.5) [28].

III.2.1.2 Système de stockage d'énergie

Le stockage de l'énergie du côté continu est souvent réalisé au moyen d'un système de stockage capacitif représenté par un condensateur C_{dc} , qui joue le rôle d'une source de tension continue V_{dc} . Le choix des paramètres du système de stockage $\{V_{dc}$ et $C_{dc}\}$ a un impact sur la dynamique et la qualité de compensation du filtre actif parallèle. En effet, une tension V_{dc} élevée améliore la dynamique du filtre actif. De plus, les fluctuations de la tension continue V_{dc} , causées par les courants générés par le filtre actif et limitées par le choix de C_{dc} , peuvent affecter la qualité de compensation du filtre actif parallèle. Ces fluctuations sont d'autant plus importantes lorsque l'amplitude du courant du filtre est élevée et que sa fréquence est faible. Le condensateur du côté continu remplit deux fonctions principales :

Maintenir une tension avec un faible taux d'ondulation en régime permanent, agissant comme un réservoir qui fournit la différence d'énergie entre la charge et la source pendant le régime transitoire.

En régime permanent, la puissance active fournie par la source doit être égale à la puissance active absorbée par la charge, plus une faible puissance active utilisée pour compenser les pertes dans le filtre. La tension du côté continu peut être maintenue à une valeur de référence

souhaitée. Cependant, lorsque les conditions de charge changent, la puissance transitant entre la source et la charge est perturbée, et la différence d'énergie est compensée par le condensateur du côté continu, ce qui écarte cette tension de sa référence. Afin de satisfaire les fonctionnalités du filtre actif, la valeur maximale du courant de référence doit être ajustée proportionnellement à l'énergie fournie par la source. Lorsque la tension aux bornes du condensateur a été régulée et a atteint sa tension de référence, on suppose que l'énergie fournie par la source est égale à l'énergie consommée par la charge. La valeur maximale du courant de référence est obtenue par régulation de la tension du côté continu [29].

III.2.1.3 Filtre de sortie

Le filtre de sortie a pour rôle d'assurer la liaison entre le réseau et l'onduleur de tension. Le dimensionnement de ce filtre doit tenir compte les deux points importants suivants :

- ✓ Il doit fournir une atténuation suffisante des rebondissements causés par la commutation des semi-conducteurs de l'onduleur du filtre actif,
- ✓ Il doit préserver les performances du filtre actif, définie par :

$$dif/dt = diref/dt$$

III.9

Un filtre de sortie du premier ordre est le plus souvent utilisé dans la littérature, il est composé d'une inductance L_f et de résistance interne R_f . Une valeur relativement faible de L_f permet d'obtenir une bonne dynamique du FAP en satisfaisant l'égalité (2.9) [30] [31]

III.2.2 Etudes de la Partie commande

Les performances du filtre actif et notamment la diminution du THD du courant de source sont certes liées aux performances de la génération des références de courants harmoniques, mais dépendent également de la stratégie de commande de l'onduleur de tension (poursuite des références de courant).

Pour maintenir le courant à la sortie du filtre actif autour de sa référence, trois techniques de commande peuvent être utilisées :

- La commande par hystérésis.
- La commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI).
- La commande par MLI vectorielle.

L'objectif de la commande, que ce soit à MLI ou par hystérésis, est de générer les ordres d'ouverture et fermeture des interrupteurs de manière à ce que le courant du filtre actif soit le plus proche de sa référence [32].

III.2.2.1 La commande par hystérésis

La commande conventionnelle par hystérésis est très couramment utilisée de par sa simplicité 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 (III.6) expose son principe qui consiste à établir dans un premier temps le signal d'erreur, différence entre le courant de référence i_{refk} et le courant produit par l'onduleur. Cette erreur est ensuite comparée à un 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. [33]

Afin de résoudre le problème de maîtrise des fréquences de commutation, différentes solutions ont été proposées. On peut notamment citer les méthodes dites 'hystérésis à bande Variables' ou 'hystérésis modulé' pour poursuivre les courants de référence [34]. Cette dernière méthode fera l'objet du paragraphe suivant

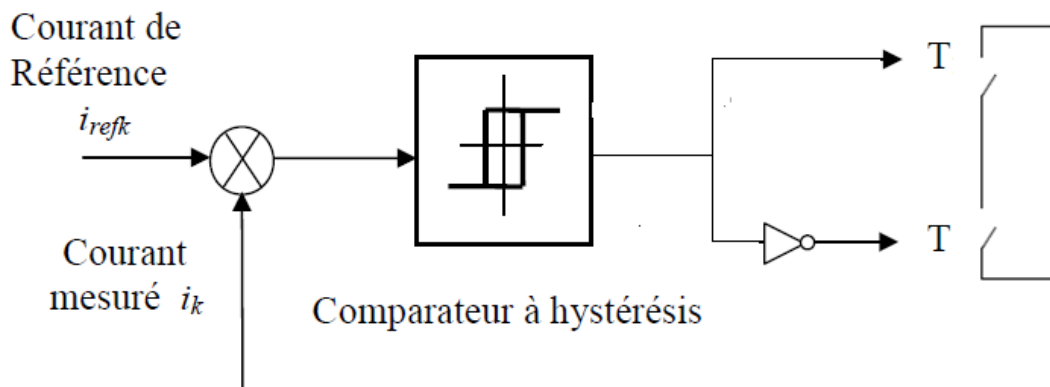


Figure III.6 commande par hystérésis

III.2.2.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)

La technique de commande par MLI : la commande par modulation de largeur d'impulsion résout le problème de la maîtrise de la fréquence de commutation en fonctionnant avec une fréquence fixe facile à filtrer en aval de l'onduleur.

La plus simple et la plus connue des modulations de largeur d'impulsion est sans doute la MLI à échantillonnage naturel, dite MLI interjective. Cette technique de commande met en œuvre d'abord un régulateur qui détermine la tension de référence de l'onduleur (modulatrice) 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. [32]

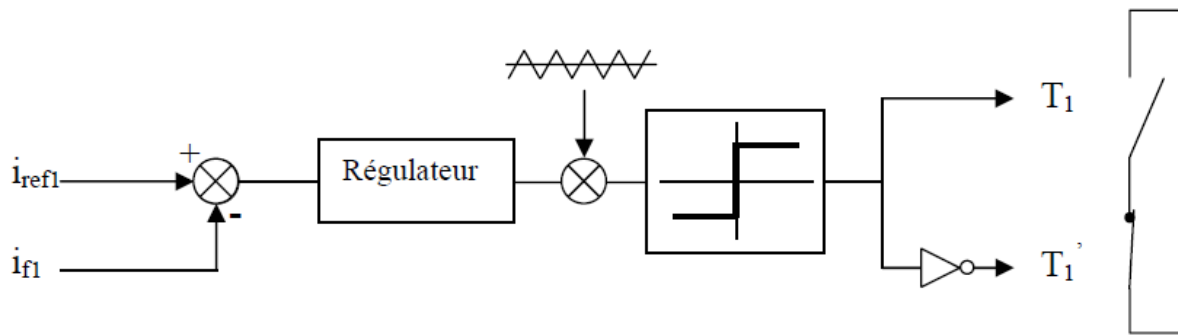


Figure III. 7 Principe de commande des courants par MLI

Les signaux logiques C qui en résultent donnent l'ordre de commutation des interrupteurs du filtre (Figure II.8)

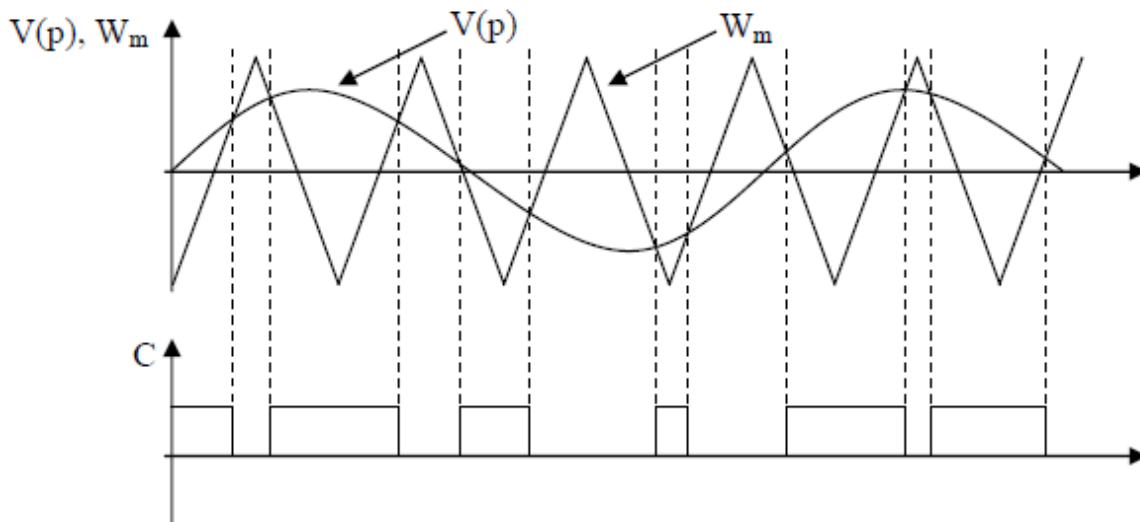


Figure III.8 Répartition des commutations sur un bras d'un onduleur

III.2.2.3 Commande par MLI vectorielle

La méthode MLI vectorielle est largement utilisée dans la commande des onduleurs, elle peut augmenter la valeur maximale de la tension de sortie de l'onduleur avec un taux de distorsion harmonique réduit par rapport à ceux obtenus par la méthode MLI sinusoïdale. Il y a plusieurs algorithmes utilisant la MLI vectorielle pour commander l'onduleur ou le redresseur. Le but de toutes les stratégies de modulation est de réduire les pertes de commutation et les harmoniques, et d'assurer une commande précise [32].

III.2.3 Régulation de la tension continue

La source d'alimentation du filtre n'est pas une source de tension autonome mais une capacité qui se charge à travers le redresseur formé par la diode monté en antiparallèle aux bornes des transistors, cette source est dite source flottante. La tension aux bornes de cette dernière n'est pas constante, à cause de sa sensibilité aux échanges de puissance active entre la charge polluante et le réseau. En cas de déséquilibre de puissance entre la charge polluante et le réseau, c'est le filtre actif qui fournira la puissance nécessaire pour rétablir l'équilibre. Les pertes dans les composantes de puissance font aussi varier la tension aux bornes de la capacité, d'où la nécessité de réguler cette tension de la maintenir à un niveau constant. Les principales causes susceptibles de modifier cette tension sont [35] :

- Les pertes dans le filtre actif,
- L'injection des courants fondamentaux pendant les régimes transitoires de la charge polluante,
- Les pertes de commutation et par conduction des interrupteurs de puissance.
- Les pertes par effet Joule dans les composantes passifs L_f et C_f .

III.2.4 Principe

Les tensions de référence sont la tension simple désirée. Cette technique de MLI suit les principes suivants :

- Signal de référence est échantillonné à intervalles régulier T .
- Pour chaque phase, réalisation d'une impulsion de largeur T centrée sur la période dont la valeur moyenne est égale à la valeur de la tension de référence à l'instant d'échantillonnage.
- tous les interrupteurs d'un même demi-point ont un état identique au centre et aux deux extrémités de la période (pour une MLI discontinue, l'état d'un des interrupteurs de chaque demi-point reste constant ce qui diminue les pertes de commutation mais augment les harmoniques) [36].

III.3 La Commande directe de puissance DPC

Le contrôle direct de puissance (*DPC*) est basé sur le concept du contrôle direct du couple appliqué aux machines électriques. Le but est de contrôler directement la puissance active et réactive dans un redresseur MLI. Les erreurs entre les valeurs de référence des puissances active et réactive instantanées et leurs mesures sont introduites dans deux comparateurs à hystérésis qui déterminent l'état de commutation des semi-conducteurs, avec l'aide d'un tableau de commutation et la valeur du secteur où se trouve la tension de la

génératrice [37]. La boucle de tension du bus continu est réglée avec un correcteur PI. L'idée principale du DPC classique est illustrée par la figure (III.9).

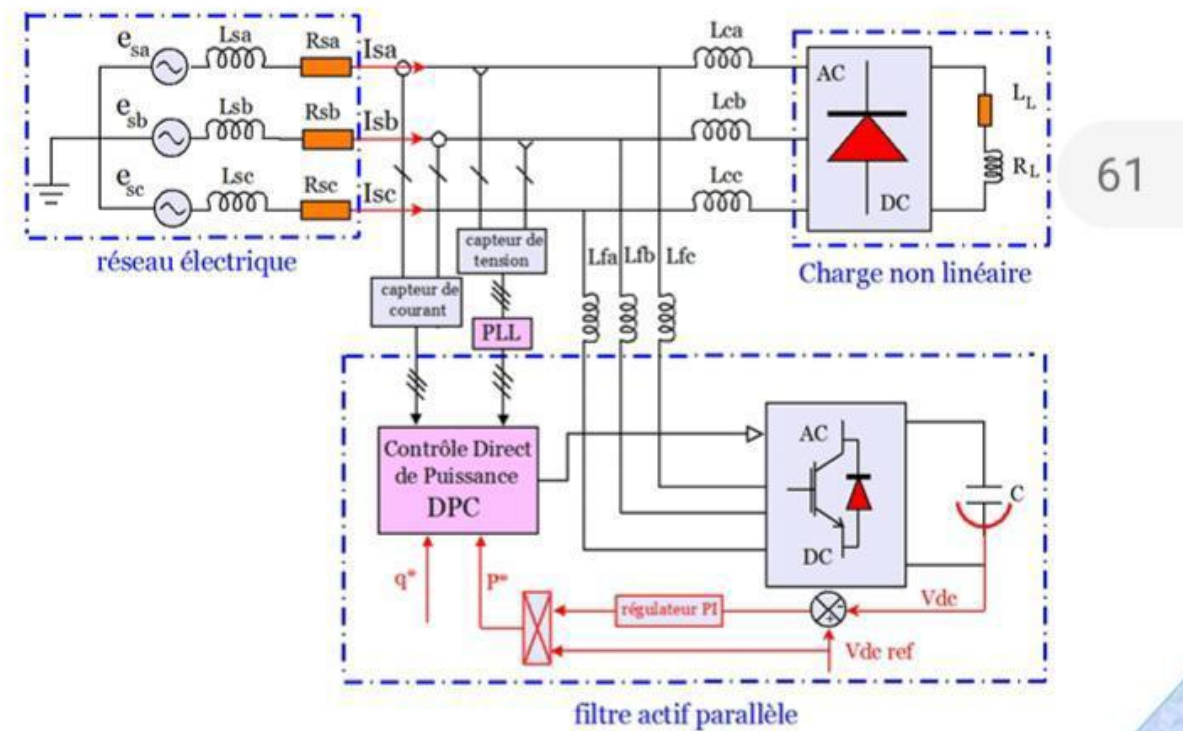


Figure III.9 schéma synoptique de contrôle du FAP avec la commande DPC

III.3.1. Principe de la commande directe de puissance

La figure (III.9) montre la configuration globale de la commande directe de puissance sans capteur de tension pour un onduleur triphasé. La DPC consiste à sélectionner un vecteur de commande d'après une table de commutation. Cette dernière est fondée sur les erreurs numérisées S_p, S_q des puissances active et réactive instantanées, fournies par les régulateurs à hystérésis à deux niveaux, aussi bien que sur la position angulaire de la vectrice tension estimée. En fonction de la valeur de cette position, le plan $(\alpha-\beta)$ est divisé en douze secteurs ou on doit associer à chaque secteur un état logique du redresseur. La référence de la puissance active est obtenue par régulation de la tension continue, en utilisant un régulateur PI. Tandis que pour assurer un facteur de puissance unitaire un contrôle de la puissance réactive à zéro est effectué. [38]

III.3.2 Etat de l'art du contrôle direct de puissance

Le principe de base de commande directe de puissance a été originalement présenté par Takahashi et al. En 1986 et il a été développé plus tard pour plusieurs applications. Le but était d'éliminer le bloc de modulation de largeur d'impulsion et les boucles internes des variables

contrôlées en les remplaçant par une table de commutation dont les entrées sont les erreurs entre les valeurs de référence et les mesures. En 1998, Noguchi et al. ont introduit la première application pratique du concept de la commande directe de puissance. Cette application est utilisée pour contrôler les puissances instantanées active et réactive du redresseur à MLI triphasé sans capteurs de tension du réseau. En 2001, Malinowski et al. ont introduit une nouvelle configuration de DPC basée sur un estimateur de flux virtuel. Cependant, les deux dernières structures présentent un inconvénient majeur réside dans sa fréquence de commutation variable. Pour surmonter ce problème, dans Malinowski et al. ont présenté un nouveau schéma de commande direct de puissance utilisant une modulation de largeur d'impulsion vectorielle (SVM) afin d'obtenir une fréquence de commutation constante où les régulateurs à hystérésis et la table de commutation sont remplacés par des régulateurs PI et une commande SVM. Par conséquent, les performances de la commande dépendent fortement de l'aptitude de la boucle des régulateurs PI. Récemment, d'autres structures du DPC basées sur des approches prédictives ont fait l'objet de publications internationales. Dans ce sens, en 2008, Cortes et al. ont exposé une structure de DPC basée sur la commande prédictive. Les avantages principaux de cette stratégie consistent dans l'absence de régulateurs PI pour le courant, de transformation de repères et de modulation MLI. Une année plus tard, dans [42], une commande basée sur l'application des règles floues des règles floues a été proposée. Dans ce cas, les erreurs de suivi de référence des puissances active et réactive, converties en variables floues, sont utilisées directement pour la sélection du vecteur de commande adéquat. Plus récemment encore, Portillon et al. ont proposé d'appliquer la commande directe de puissance pour le convertisseur triphasé NPC à trois niveaux. Par ailleurs, il est intéressant de me notionnel que la majorité des travaux utilisant la commande DPC est appliquée aux redresseurs à MLI et peu s'intéressent aux filtres actifs [29], [39].

III.3.3. Principe Du DPC Classique :

La figure III.10 [40] montre la configuration globale de la commande directe de puissance appliquée au SAPF. Elle est analogue à celle du contrôle direct de couple (DTC) des machines à induction.

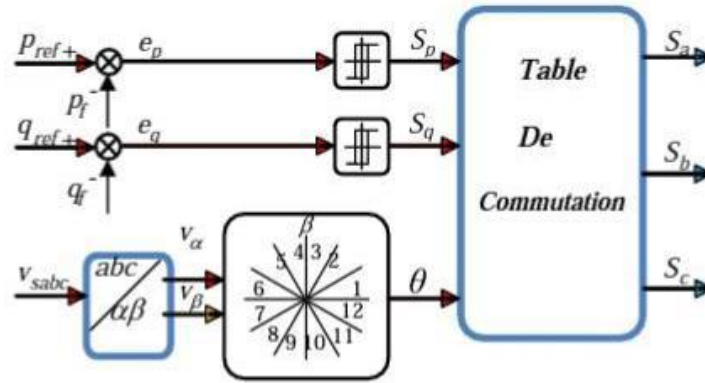


Figure III.10. Configuration générale de la commande directe de puissance.

La DPC consiste à sélectionner un vecteur de commande d'après une table de commutation. Cette dernière est fondée sur l'erreur numérisée S_p, S_q qui sont limitées par une bande d'hystérésis, aussi bien que sur la position angulaire de la tension au point de raccordement de la charge au réseau PCC. Le plan (α, β) est divisé en douze secteurs pour déterminer le secteur de travail [41].

III.3.4. Calcul des puissances instantanées

Pour étudier la stratégie de contrôle directe de puissance (DPC), la théorie des puissances instantanées est utilisée pour calculer les valeurs instantanées des puissances active et réactive. Les valeurs instantanées des tensions et des courants triphasés sont respectivement : ea, eb, ec et ia, ib, ic . Après la transformation de Clark, on obtient les tensions $e\alpha, e\beta$ et les courants $i\alpha, i\beta$ sous le système de coordonnées stationnaires biphasés $\alpha\beta$. [42] On sait que le calcul de la puissance active P est un produit scalaire entre les tensions et les courants, alors que la puissance réactive q peut être calculée par un produit vectoriel entre eux :

$$P = e\alpha i\alpha + e\beta i\beta \tag{III .10}$$

$$q = e\alpha i\beta - e\beta i\alpha \tag{III .11}$$

L'erreur de la puissance active ΔP est la différence entre la valeur de la puissance active désirée P^* et la valeur réelle de la puissance active

$$P : \Delta p = P^* - P \tag{III .12}$$

L'erreur de la puissance réactive Δq est liée à la différence entre la valeur de puissance réactive désirée q^* et à la valeur de puissance réactive réelle q :

$$\Delta q = q^* - q \tag{III .13}$$

III.3.4.1. Calcul des puissances instantanées injectées par SAPF

En se basant sur la mesure des tensions au point PCC : $V(t)_{sa}, V(t)_{sb}, V(t)_{sc}$ et des courants injectés $i(t)_{fa}, i(t)_{fb}, i(t)_{fc}$ par SAPF, les puissances injectées active et réactive instantanées peuvent être calculées respectivement par les relations [40].

$$P_s(t) = V_{sa} i_{fa} + V_{sb} i_{fb} + V_{sc} i_{sc} \quad \text{III.13}$$

$$q_s(t) = \frac{1}{\sqrt{3}} [(V_{sa} - V_{sb})i_{fc} + (V_{sb} - V_{sc})i_{fa} + (V_{sc} - V_{sa})i_{fb}] \quad \text{III.14}$$

III.3.4.2. Calcul des puissances instantanées de référence :

Le schéma de la Figure III.11 illustre les différentes étapes permettant l'obtention des composantes active et réactive de puissances de référence [41].

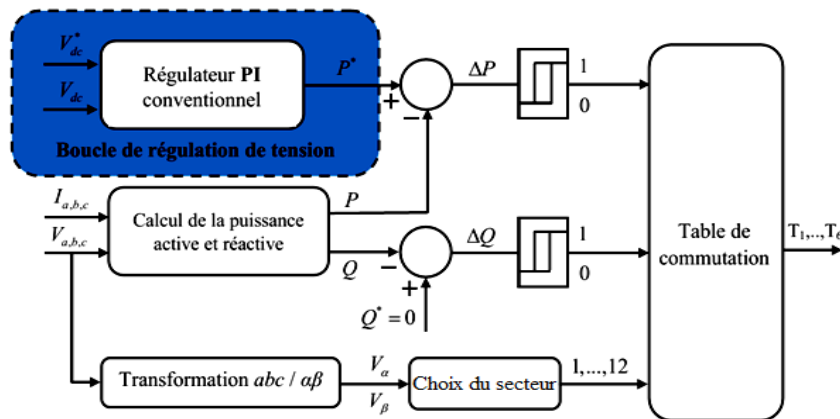


Figure.III.11 Schéma bloc de la technique DPC classique.

III.3.5. Choix du secteur

L'influence de chaque vecteur de sortie résultant du FAP sur les puissances active et réactive est très dépendante de la position réelle du vecteur de la tension de source. Ainsi, outre les signaux des deux contrôleurs à hystérésis, la table de commutation fonctionne selon la position du vecteur de la tension de source, qui tourne à la pulsation (ω), dans le plan complexe. Toutefois, au lieu d'introduire dans la table de commutation la position exacte du vecteur de la tension, le bloc du choix de secteur nous informe dans quel secteur se trouve le vecteur réel de la tension de source [43].

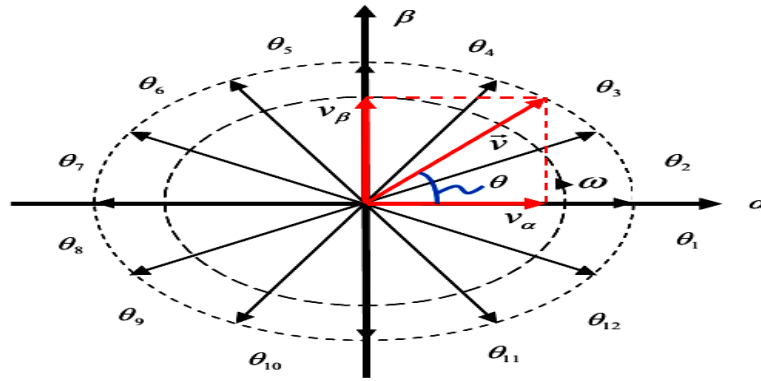


Figure.III.12 Plan $\alpha\beta$ divisé en douze secteurs pour détecter la phase du vecteur de tension

Afin d'augmenter la précision, le plan α - β est divisé en douze secteurs égaux de 30° , comme l'illustre le graphique de la figure, où le premier secteur est défini entre $-\pi/3 < \theta_1 < 0$. Les régions consécutives suivent dans le sens trigonométrique le même critère, qui peut être génériquement exprimé par :

$$(n - 2) \pi/6 < \theta_n < (n - 1) \frac{\pi}{6} \quad n = 1, 2 \dots 12 \quad \text{III .15}$$

L'angle est calculé en utilisant la fonction trigonométrique inverse, basée sur les composantes du vecteur de la tension dans le repère $(\alpha \beta)$ indiquée par l'équation (2.12) :

$$\theta = \tanh^{-1} \frac{v_\beta}{v_\alpha} \quad \text{III .16}$$

III.3.6 Table de commutation

Le tableau de commutations présenté dans cette partie a été développé dans [44]. L'auteur divise le tableau en douze secteurs afin d'améliorer la précision. Lorsque le vecteur de tension est aligné avec le référentiel tournant choisi, la puissance active instantanée est proportionnelle à la composante directe du courant de sortie et la puissance réactive instantanée au courant en quadrature.

Les signaux d'erreur numérisés et la position angulaire sont introduits dans une table de commutation dans laquelle sont mémorisés tous les états de commutation dp et dq du convertisseur qui prennent l'état "1" pour une augmentation de la variable contrôlée (P ou q) et l'état "0" pour une diminution. La largeur de la bande d'hystérésis a une influence sur la performance du filtre actif parallèle en particulier, sur la distorsion du courant harmonique, et sur la fréquence moyenne de commutation. Les régulateurs à hystérésis à deux niveaux pour les puissances active et réactive instantanées peuvent être décrits comme suit :

- Pour la puissance active :

$$Si P * -P \geq HBp Sp = 1 \quad \text{III .17}$$

$$Si P * -P \leq HBp Sp = 0 \quad \text{III .18}$$

• De même manière pour la puissance réactive :

$$Si q * -q \leq HBp Sq = 1 \quad \text{III .19}$$

$$Si q * -q \leq HBp Sq = 0 \quad \text{III .20}$$

En utilisant cette table de commutation ; les états de commutation optimales du convertisseur peuvent être sélectionnés de manière unique à chaque instant spécifique selon la combinaison des signaux d'entrée numérisés comme il est montré sur le tableau III.2 : [45]

Tableau III.2 : Table de commutation de la DPC

dp	dq	$\theta 1$	$\theta 2$	$\theta 3$	$\theta 4$	$\theta 5$	$\theta 6$	$\theta 7$	$\theta 8$	$\theta 9$	$\theta 10$	$\theta 11$	$\theta 12$
1	0	V6	V7	V1	V0	V2	V7	V3	V0	V4	V7	V5	V0
0	1	V7	V7	V0	V0	V7	V7	V0	V0	V7	V7	V0	V0
0	0	V6	V1	V1	V2	V2	V6	V6	V4	V4	V5	V5	V6
0	1	V1	V2	V2	V6	V6	V4	V4	V5	V5	V6	V6	V1

$V1(100); V2(110); V3(010); V4(011); V5(001); V6(101); V0(000); V7(111).$

III.3.7 Contrôle de la tension du bus continu utilisant le régulateur PI conventionnel

Le rôle de la boucle de régulation de la tension du bus continu est de maintenir cette tension à une valeur de référence constante comme le montre la figure III.13, en contrôlant le processus de chargement et de déchargement du condensateur. Dans l'objectif d'assurer une bonne qualité de compensation des perturbations de tension dans des cas de fonctionnements extrêmes du réseau électrique, les régulateurs classiques de type PI ont été employés. Ainsi, la multiplication de l'amplitude maximale des courant de source (I_{smax}) avec la tension du condensateur (V_{dc}) donne la puissance active de référence (P^*) qui a été utilisée comme Variable de contrôle dans la commande DPC conventionnel

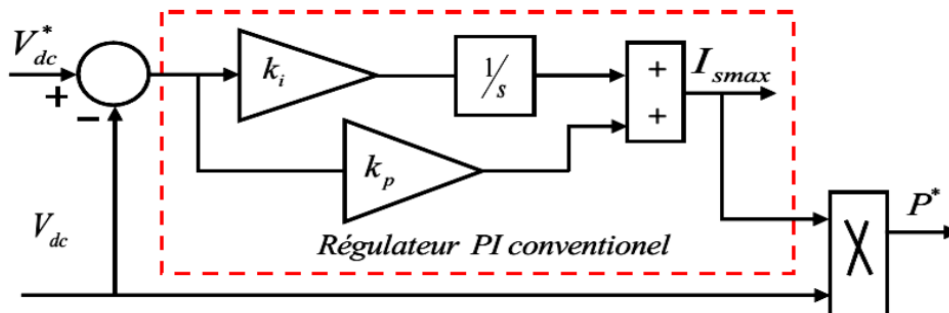


Figure III.13 Boucle de régulation du bus continu du FAP triphasé.

III.4 Régulation du bus continu du FAP triphasé

La source d'énergie associée au bus continu de l'onduleur est un condensateur qui joue rôle d'une source de puissance pour produire les tensions alternatives à la sortie de l'onduleur de tension [46]. La tension aux bornes de ce condensateur doit être constante et Convertisseur, les pertes par effet de Joule dans les composants du filtre de sortie, la variation De la charge non-linéaire connectée au réseau et l'injection des courants fondamentaux Pendant le régime transitoire de la charge polluante affectent cette tension [46, 47]. A cet Effet, le rôle de la boucle de régulation est de maintenir le bus continu chargé à une valeur de référence. Donc, le contrôle du bus continu est une procédure indispensable pour la Commande du Rapla figure 2.9 présente le schéma de principe du contrôleur de tension. La valeur de la Tension mesurée V_{dc} est soustraite à la tension de référence V_{dc}^* De telle manière que l'erreur de Tension puisse être annulée par l'action du régulateur. La sortie du correcteur est une image de L'amplitude de courant fondamental actif nécessaire pour corriger la tension aux bornes du Condensateur. Si cette tension est inférieure à la référence, cela signifie que la puissance réelle N'est pas suffisante. C'est pourquoi, le courant et la puissance réelle du réseau sont Augmentés. De même, si la tension aux bornes du condensateur est supérieure à la référence, L'amplitude du courant du réseau doit être réduite pour limiter la puissance réelle fournie [47].

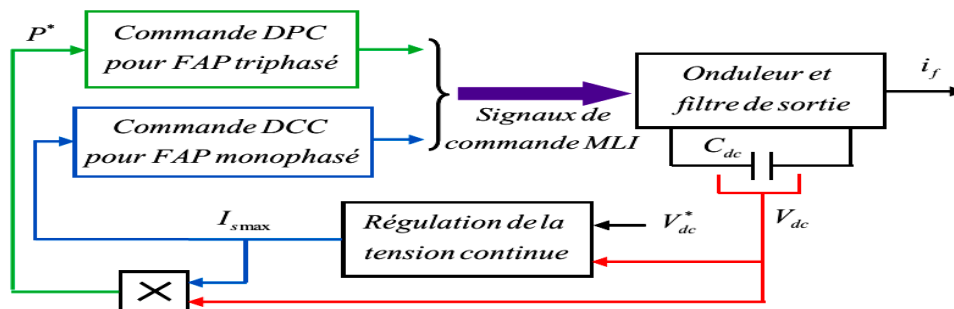


Figure III.14 Schéma de principe de la partie commande de l'onduleur avec contrôle de la Tension du condensateur

Pour contrôler la tension aux bornes du condensateur, nous avons utilisé différents Régulateurs cités dans la littérature ou proposés dans le cadre de nos travaux. Ces régulateurs Sont :

- 1/ Régulateur PI ou IP conventionnel,
- 2/ Régulateur PI ou IP d'ordre fractionnaire,

III.4.1 Le régulateur PI conventionnel

Afin de déterminer les paramètres du régulateur PI, nous suivons la procédure décrite ci-dessous [48, 17] :

La fonction de transfert (FT) du régulateur PI utilisé dans notre étude est donnée par la relation suivante :

$$C_c(S) = K_{pc} + \frac{K_{ic}}{S} \quad \text{III .21}$$

Avec :

K_{pc} : Gain proportionnel du régulateur PI classique.

K_{ic} : Gain intégral du régulateur PI classique.

La boucle de régulation de la tension du bus continu du FAP à base d'un régulateur PI classique est présentée en figure III.15 [48, 17]. Le bloc $P(S)$ qui représente la TF de L'onduleur est défini par :

$$P(S) = \frac{1}{C_{dc} S} \quad \text{III .22}$$

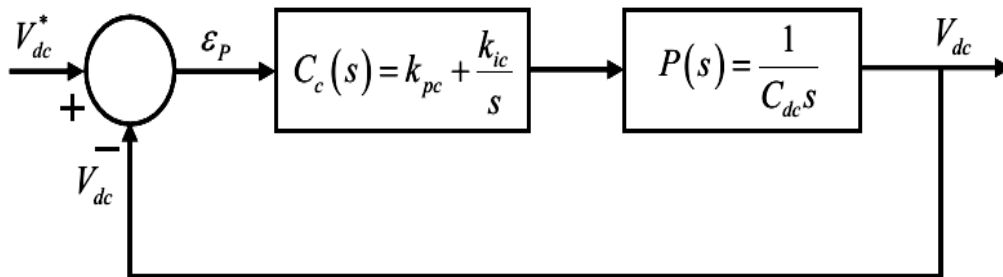


Figure III.15 Boucle fermée de la régulation de dc V par un régulateur PI classique

La FT en boucle fermée du système de la figure III.15 est alors donnée par [48, 17] :

$$G_{PI}(S) = \frac{V_{dc}}{V_{DC}^*} = \frac{\frac{K_{pc}S + K_{ic}}{C_{dc}}}{s^2 + \frac{K_{pc}}{C_{dc}}s + \frac{K_{ic}}{C_{dc}}} \quad \text{III .23}$$

L'expression générale d'une FT du second ordre est [48, 17] :

$$G_S = \frac{V_{dc}}{V_{DC}^*} = \frac{2\xi\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + \frac{K_{pc}}{C_{dc}}s + \frac{K_{ic}}{C_{dc}}} \quad \text{III .24}$$

Après identification avec l'équation (2.15), on obtient [48, 17] :

$$\begin{cases} K_{ic} = C_{dc} \cdot \omega_n^2 \\ K_{pc} = 2\xi \omega_n \cdot C_{dc} \end{cases} \quad \text{III .25}$$

Nous avons choisi :

$$2\pi * 18 \text{ rad/s et } \xi=0.7 \quad \text{III .26}$$

La structure classique d'un régulateur PI intègre l'erreur entre la tension du condensateur et sa référence, de façon excessive avec un risque de perdre le contrôle. Donc, La structure anti-emballement [43] de la figure III.16 est utilisée pour diminuer l'amplitude de la tension dc V durant un transitoire [43]. Cette structure a été utilisée dans nos travaux.

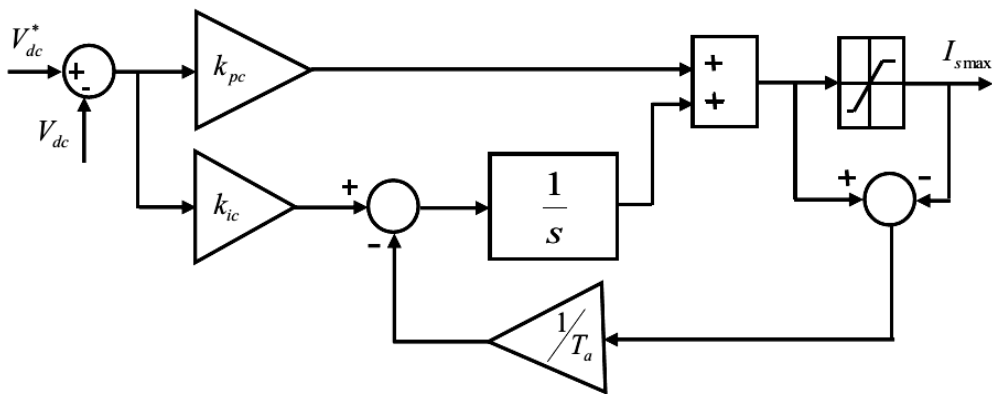


Figure III.17 Régulateur PI anti-emballement utilisé en simulation et en pratique

III.4.2 Le régulateur IP classique

On suit les mêmes étapes décrites au paragraphe précédent mais en utilisant cette fois une autre structure du régulateur conventionnel de type IP [43]. Le schéma synoptique de ce Régulateur est donné par la figure III.17

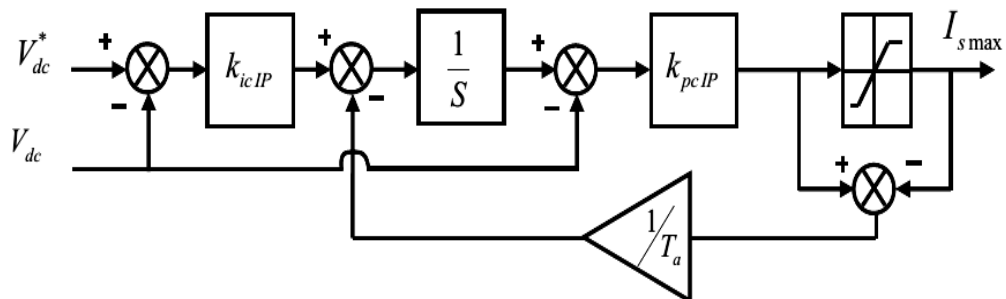


Figure III.18 Régulateur IP anti-emballement utilisé en simulation et en pratique

A partir de la figure III.19 nous pouvons obtenir la FT en boucle fermée suivante :

$$G_{PI}(s) = \frac{V_{dc}}{V_{DC}^*} = \frac{\frac{K_{ic\ ip} K_{pc\ ip}}{C_{dc}}}{s^2 + \frac{K_{pc\ ip}}{C_{dc}} s + \frac{K_{ic\ ip} K_{pc\ ip}}{C_{dc}}} \quad \text{III .27}$$

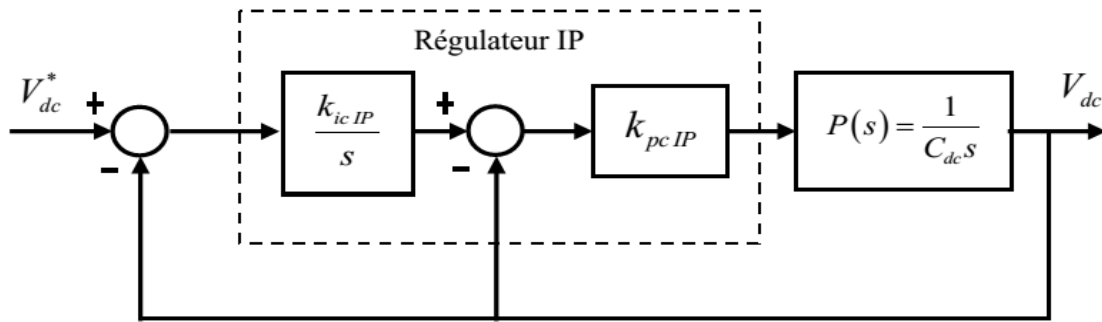


Figure III.19. Boucle fermée de la régulation de de V_{dc} par un régulateur IP classique

Cette équation est du deuxième ordre et donc similaire à cette équation :

$$G(s) = \frac{V_{dc}}{V_{DC}^*} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad \text{III .28}$$

Par identification de l'équation (2.18) avec l'équation (2.19), on obtient [43] :

$$\begin{cases} K_{ic\ ip} = \frac{\omega_n}{2\xi} \\ K_{pc\ ip} = 2\xi\omega_n \cdot C_{dc} \end{cases} \quad \text{III .29}$$

III.4.3 Les régulateurs fractionnaires

III.4.3.1 Etat de l'art du calcul fractionnaire et des régulateurs PID d'ordre fractionnaire

L'état de l'art du calcul fractionnaire et des régulateurs PI (proportionnels-intégrateurs) d'ordre fractionnaire englobe les développements et les applications de techniques mathématiques avancées et de contrôle qui utilisent des opérations fractionnaires et des régulateurs PI d'ordre fractionnaire.

Le calcul fractionnaire est une extension du calcul classique dans lequel les opérations de dérivation et d'intégration sont généralisées pour inclure des ordres non entiers. Les opérateurs fractionnaires, tels que les dérivées et les intégrales fractionnaires, permettent de caractériser des systèmes dynamiques complexes qui ne peuvent pas être entièrement décrits par des opérations classiques.

Les régulateurs PI d'ordre fractionnaire sont des variantes des régulateurs PI traditionnels, dans lesquels les opérations d'intégration sont remplacées par des opérations fractionnaires. Ces régulateurs offrent des avantages potentiels dans la commande de systèmes non linéaires, non stationnaires et présentant des retards ou des retards variables.

L'état de l'art du calcul fractionnaire comprend des méthodes analytiques, numériques et expérimentales pour résoudre des équations différentielles fractionnaires et étudier les propriétés des opérateurs fractionnaires. Il existe également des approches de modélisation basées sur des équations différentielles fractionnaires pour représenter des phénomènes physiques complexes tels que la diffusion anormale, les processus stochastiques et les systèmes viscoélastiques.

En ce qui concerne les régulateurs PI d'ordre fractionnaire, la conception et la mise en œuvre de ces régulateurs ont été largement étudiées. Les méthodes de réglage traditionnelles des régulateurs PI ne s'appliquent pas directement aux régulateurs d'ordre fractionnaire, nécessitant le développement de nouvelles techniques de réglage. Des approches basées sur des critères de performance, des optimisations numériques et des méthodes d'identification de système ont été proposées pour régler les paramètres des régulateurs PI d'ordre fractionnaire.

Les applications du calcul fractionnaire et des régulateurs PI d'ordre fractionnaire sont variées. Elles incluent le contrôle de processus industriels, la robotique, la commande de véhicules autonomes, la médecine, la finance et d'autres domaines où des systèmes complexes doivent être modélisés et contrôlés avec précision.

En résumé, l'état de l'art du calcul fractionnaire et des régulateurs PI d'ordre fractionnaire englobe les développements théoriques, les méthodes de modélisation, les techniques de réglage et les applications pratiques liées à l'utilisation de l'arithmétique fractionnaire et des régulateurs PI d'ordre fractionnaire dans le domaine du contrôle et de la commande des systèmes dynamiques.

III.4.3.2 Régulateur PI et IP d'ordre fractionnaire

Malgré les événements significatifs des années récentes dans la théorie de la commande, Le correcteur PID est le plus industriellement employé comme algorithme de commande. On

peut expliquer cela par sa simplicité et la capacité de résoudre la plupart des problèmes de commande [54]. Mais, les trois gains (proportionnel, intégrateur, dérivateur) à réglé limite leur rôle en régime dynamique, cela justifie la recherche d'une solution plus adéquate ou au moins d'un régulateur avec plus de paramètres à régler.

L'idée d'utiliser des régulateurs d'ordre fractionnaire pour la commande des systèmes dynamiques revient à Oust loup. Plus tard, Podlubny en 1999 [55] a proposé un régulateur d'ordre fractionnaire $PI^\alpha D^\lambda$ dont la fonction de transfert est donnée par $K_p + T_i s^{-\lambda} + T_d s^\mu$, où λ et μ sont des nombres réels positifs ; K_p est le gain proportionnel, T_i la constante d'intégration et T_d la constante de différentiation. Il est évident qu'en prenant $\lambda = 1$ et $\mu = 1$ on obtient le régulateur PID classique. Si $T_i = 0$ on obtient le régulateur PD^λ même si $T_d = 0$ on obtient le régulateur PI^α etc. [26]. Tous ces types de régulateurs sont des cas particuliers du régulateur $PI^\alpha D^\lambda$. Logiquement, ce régulateur peut améliorer le niveau de performances du système de commande, vu qu'il présente plus de paramètres de réglage comme montré par Podlubny.

Nos travaux nécessitent les fonctions proportionnel et intégral d'ordre fractionnaire Pour réaliser un régulateur de type PI anti-emballement d'ordre fractionnaire (FO-PI₇) comme montré dans la figure 2.14-a ou de type IP anti-emballement d'ordre fractionnaire (FO-IP₈) comme illustré dans la figure 2.14-b qui vont s'intégrer à la commande DCC ou DPC selon l'application en monophasé ou en triphasé.

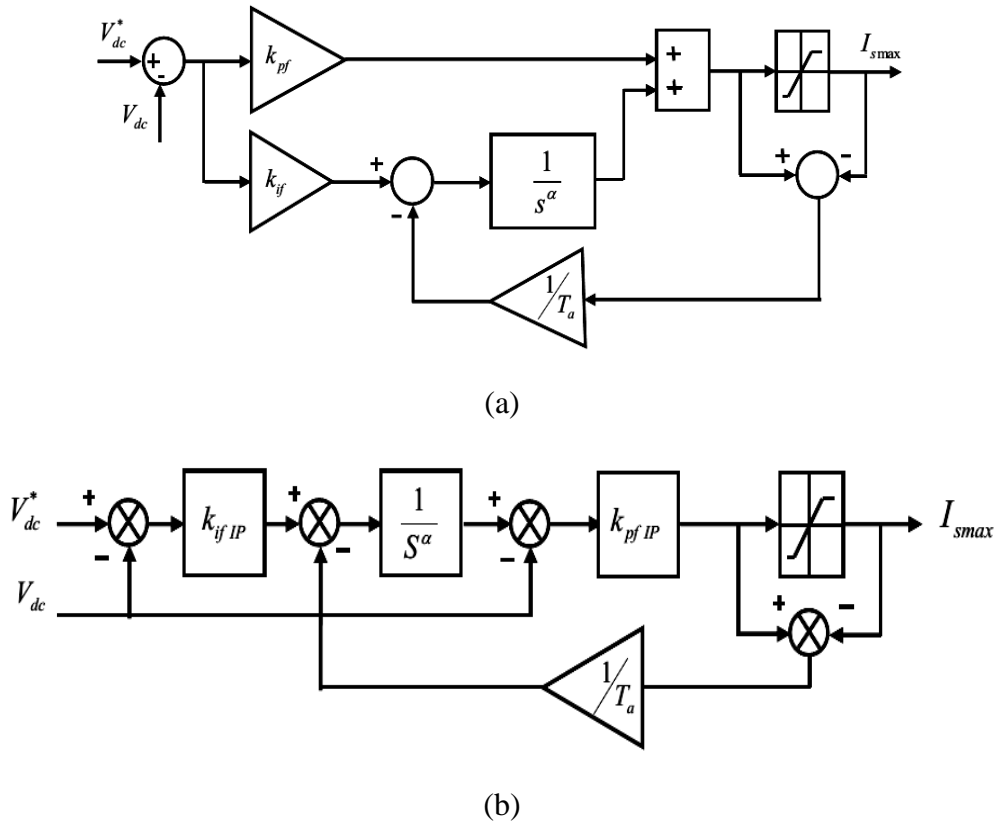


Figure III.20 Régulateurs d'ordre fractionnaire, a (FO-PI anti-emballement, b) FO-IP anti emballement

Les objectifs de cette structure de commande sont d'améliorer la qualité de commande des systèmes et d'augmenter leurs performances. Dans ce contexte, nous proposons une généralisation du correcteur PI / IP, appelé le correcteur PI / IP α d'ordre fractionnaire, qui implique une action d'intégration d'ordre fractionnaire α .

L'intérêt pour ce type de correcteur est justifié par sa plus grande flexibilité, car il comporte un paramètre supplémentaire qui est l'ordre fractionnaire de l'action d'intégration α . Ces paramètres peuvent être utilisés pour répondre à des spécifications complémentaires lors de la conception ou pour satisfaire d'autres exigences spécifiques du système à commander. La présence de trois paramètres à régler rend la tâche de conception du correcteur PI / IP α d'ordre fractionnaire plus complexe que celle du correcteur PI / IP classique.

Dans le paragraphe suivant, nous présenterons une méthode largement utilisée pour calculer les paramètres des régulateurs d'ordre fractionnaire intégrés aux techniques de commande DCC ou DPC.

III.4.3.3 Calcul des paramètres des régulateurs FO-PI et FO-IP

La méthode de calcul des paramètres K_{if} , k_{pf} du régulateur FO-PI a été expliquée brièvement dans cette partie. Celle-ci est aussi valable pour le calcul des paramètres K_{if} , k_{pf} du régulateur FO-IP lorsque l'ordre d'intégration est donné.

La FT du régulateur FO-PI est donnée, figure III.20 -a, par [43]

$$C(s) = k_{PF} + \frac{K_{if}}{s^\alpha} \quad \text{III .30}$$

Supposons que la fréquence de coupure ω_c et la marge de phase ϕ_m ont été données. De la définition fondamentale de la fréquence de coupure et la marge de phase, on a les Spécifications suivantes [43] :

1) Spécification de la marge de phase :

$$\text{Arg}[G(\omega_c)] = [C_f(j\omega_c)P(j\omega_c)] \quad \text{III .31}$$

2) Robustesse à la variation du gain :

$$\frac{d(\text{Arg}(C_f(j\omega)P(j\omega)))}{d\omega} = 0 \quad \text{III .32}$$

Dans le plan de Bode, la phase est plate autour de la fréquence de coupure cela veut dire que le système est plus robuste au changement de gain.

3) Spécification de l'amplitude :

$$|G(j\omega_c)| = |C_f(j\omega_c)P(j\omega_c)| = 1 \quad \text{III .34}$$

En considérant ces spécifications, on peut résoudre les équations (2.25), (2.26) et (2.27)

Pour obtenir les gains K_{if} , k_{pf} [49].

$$K_{if} = \frac{\tan(\frac{-\pi}{2} + \phi_m)}{[\omega_c^{-\alpha} \sin \frac{\alpha\pi}{2} - \omega_c^{-\alpha} \cos \frac{\alpha\pi}{2} \tan(\frac{-\pi}{2} + \phi_m)]} \quad \text{III .35}$$

$$\left(\frac{d(\text{Arg}(G(j\omega)))}{d\omega}\right) = \left(\frac{d(-\tan^{-1}\left[\frac{K_{if}\omega_c^{-\alpha} \sin \frac{\alpha\pi}{2}}{1+K_{if}\omega_c^{-\alpha} \cos \frac{\alpha\pi}{2}}\right] - \frac{\pi}{2})}{d\omega}\right) = 0 \quad \text{III .36}$$

$$k_{pf} = \frac{c_{dc}}{\sqrt{(1+K_{if}\omega_c^{-\alpha} \cos \frac{\alpha\pi}{2})^2 + (K_{if}\omega_c^{-\alpha} \sin \frac{\alpha\pi}{2})^2}} \quad \text{III .37}$$

Après le calcul des paramètres du régulateur FO-PI et de même pour le régulateur FOIP,

il faut approximer le terme d'intégration $\frac{1}{s^\alpha}$ à une FT pour faciliter la simulation et l'implémentation pratique.

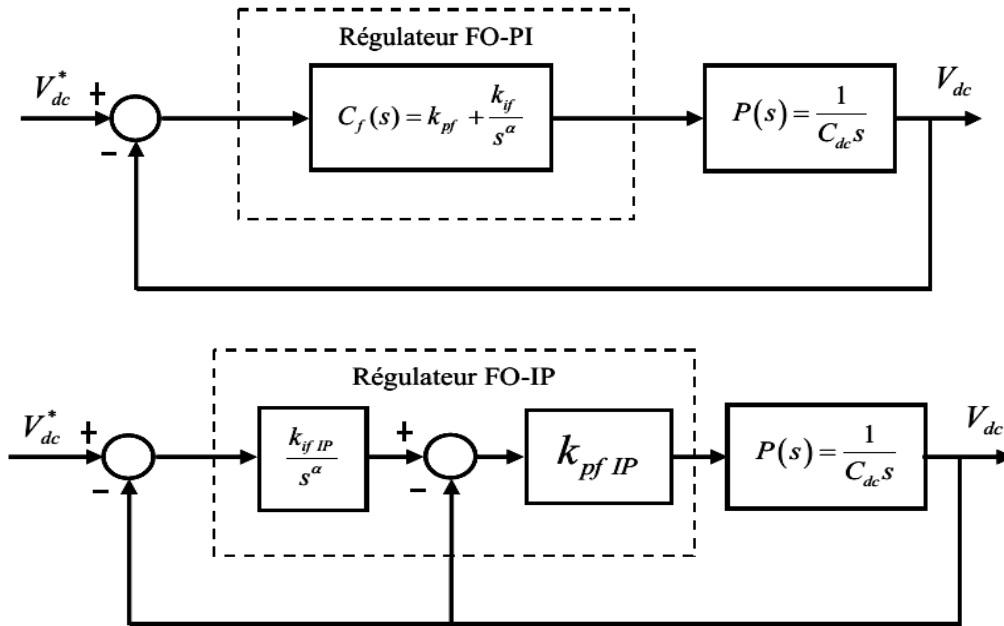


Figure III.20 Boucle fermée de la régulation de V_{dc} par un régulateur FO-IP.

III.4.3.4 Approximation par la méthode d'Oust loup

Les travaux d'Oust loup sur la modélisation fractionnaire ont engendré de nombreuses applications. Cette approche repose essentiellement sur la synthèse d'un dérivateur non entier à bande limitée en fréquence [50]. Dans notre cas, nous utilisons cette approximation pour un intégrateur d'ordre fractionnaire.

Dans une première étape, cette approche implique de remplacer un intégrateur non entier par un intégrateur non entier à bande limitée en fréquence, comme illustré dans la figure III.21. Symboliquement, cela peut être représenté par...

$$\frac{1}{s^\alpha} \quad I(s) = \frac{1}{s} C_\alpha \left(\frac{1 + \frac{s}{\omega_b}}{1 + \frac{s}{\omega_h}} \right)^{1-\alpha} \quad \text{III .38}$$

Où ω_b et ω_h désignent les fréquences transitionnelles basse et haute, α étant l'ordre d'intégration tel que $0 < \alpha < 1$, C'est un coefficient de normalisation et $s=j\omega$

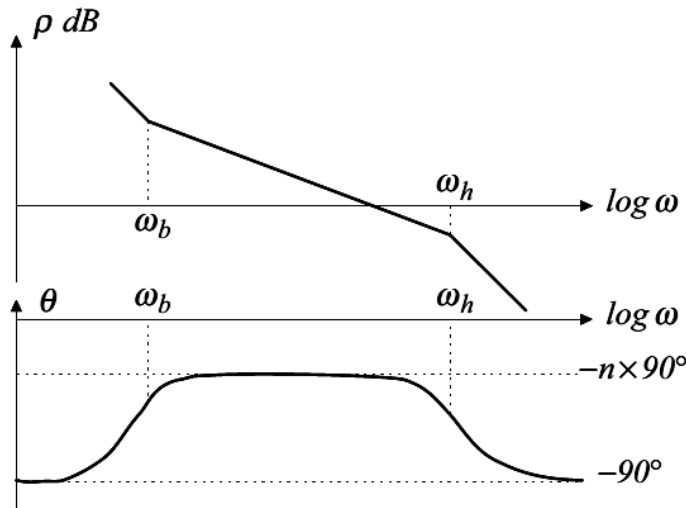


Figure III.21. Courbes de Bode de l'intégrateur fractionnaire I (s)

La réalisation de cet opérateur (équation (2.28)) est basée sur une approximation utilisant une distribution récursive de pôles et de zéros [51], ce qui conduit à l'opérateur d'intégration fractionnaire décrit par l'expression suivante :

$$I_{\alpha s} = \frac{G_{\alpha}}{s} \prod_{i=\alpha}^N \frac{1 + \frac{s}{\omega_i}}{1 + \frac{s}{\omega_j}} \quad \text{III.39}$$

Cette approximation pôles, zéros a été établie pour synthétiser des correcteurs par approche fréquentielle. Par ailleurs, la simulation d'un modèle fractionnaire peut se faire en remplaçant chaque opérateur de dérivation par son approximation pôles, zéros (équation 2.29).

Dans le même contexte, on peut citer l'approche fréquentielle [52], où l'auteur propose une transformation de type fréquentielle (produit de fonctions du premiers ordre) de l'opérateur d'intégration fractionnaire qui se traduit par une récursivité de pôles et zéros de l'opérateur fractionnaire [53] :

$$\left(\frac{1 + \frac{s}{\omega_b}}{1 + \frac{s}{\omega_h}} \right)^{1-\alpha} \prod_{i=\alpha}^N \frac{1 + Z_i s}{1 + p_i s} \quad \text{III.40}$$

Pour un modèle d'ordre non entier $H(s)$, tel que :

$$H(s) = G \left(\frac{1 + \frac{s}{\omega_b}}{1 + \frac{s}{\omega_h}} \right)^{1-\alpha} \quad \text{III.41}$$

L'intégrateur à ordre non entier $\frac{1}{s^{\alpha}}$ est remplacé par une approximation fréquentielle représentée par un produit de pôles et zéros

$$\prod_{i=\alpha}^N \frac{1 + Z_i s}{1 + p_i s} \quad \text{III.42}$$

A partir de cette approximation pôles et zéros, on obtient un modèle paramétrique entier $H(s)$, facilement simulable en utilisant les outils numériques conventionnels.

$$H(s) = \frac{b_0 + b_1s + \dots + b_ns^n}{a_0 + a_1s + \dots + a_ms^m} \quad \text{III.43}$$

Où les a_m et a_n les N b sont les pôles et les zéros de l'approximation. Donc, le modèle obtenu (équation (2.32)) relie implicitement les paramètres (ω_b , ω_n et N) au coefficient (a_m, b_n).

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le principe du filtre actif parallèle comme une solution de dépollution des réseaux électriques des courants perturbateurs comme le courant harmonique, la partie puissance et la partie commande ont été présente d'une manière détaillé. Nous avons présenté successivement l'onduleur tension de deux niveaux ainsi que l'élément de stockage et le filtre de sortie pour la partie puissance et les techniques de commandes de l'onduleur pour la partie commandent. constituée d'un circuit d'identification des courant perturbés d'une commande pour l'onduleur et de la partie régulation appliqué au élément de stockage d'énergie. Ainsi, nous avons présenté la méthode pour déterminer les courant d'harmonique pour le contrôle ou commande dans notre système, on a vue aussi la commande de l'onduleur alimenter de source continue de régulation de la tension continue, comme l'onduleur, l'élément de stockage et le filtre de sortie.

Nous avons modifié la méthode classique des puissances instantanées en application directement les FAP aux courants mesures de la charge non linéaire et de remplacer le contrôleur PI du bus continu par un régulateur base sur la commande par la méthode PI fractionnaire. Les résultats de simulation de comparaisons deux méthode, Ces résultats ont été obtenus à l'aide du logiciel Matlab/Simulink en utilisant également la tombaux « SimPowerSystem » qui présenté dans ce chapitre suivant.

Chapitre IV

**Résultats de simulation sous Matlab-
Simulink**

Introduction

Après avoir étudié les différentes topologies, algorithmes de détection des grandeurs harmoniques de références, les stratégies de commande et de régulation de filtre actif parallèle et voir l'application de l'optimisation par l'intelligence artificielle comme l'algorithme décolonise des fourmis dans les chapitres précédents, on va présenter toutes les étapes d'applications ainsi que leurs simulations dans ce sujet

etape1 : réseau électrique alimente une charge non linéaire avant application de toute opération de filtrage.

Etape2 : réseau électrique alimente une charge non linéaire avec filtre actif parallèle a commandé classique (régulateur pi).

Etape3 : réseau électrique alimente une charge non linéaire avec filtre actif parallèle a commandé fractionnaire (régulateur pi Fo).

Etape4 : Etudes Comparatives Entre les Méthodes de Commande

IV.1. Simulation numérique sous Matlab Simulink

Dans cette partie, nous présenterons les résultats de simulation obtenus pour les trois méthodes d'identification des courants de référence précédemment étudiées, à savoir la théorie p.q.

La charge polluante est constituée par un pont redresseur triphasé à diodes et le réseau d'alimentation est un réseau triphasé. Le réseau d'alimentation est modélisé par phase par une f.é.m. sinusoïdale en série avec une inductance (L_s) et une résistance (R_s) caractérisant l'impédance de court-circuit du réseau, voir Fig. (IV.1). Le redresseur débite dans une charge (RL). L'inductance (L_c) et la résistance (RC) a l'entrée du redresseur modélisent l'impédance de ligne et les éventuelles inductances additionnelles mises en œuvre pour limiter les variations de courant. Un filtre actif parallèle triphasé à structure tension, Pour la commande de l'onduleur du filtre actif parallèle, nous avons utilisé la commande par puissances instantanées.

Tableau IV.1 Paramètres du système simulé

Réseau d'alimentation

paramètre	$V_s(s)$	F(Hz)	$R_s(\Omega)$	$L_s(H)$	$R_c(\Omega)$	$L_c(H)$
valeurs	380	50	0.1	50 e-6	0.1	566e-6

Charge non-linéaire

paramètre	$R_{ch}(\Omega)$	$L_{ch}(H)$
valeurs	30	1e-3

Filtre actif parallèle

paramètre	Vdc(v)	Cdc(F)	Lf(H)	Rf(Ω)
valeurs	240	1100 e-6	1 e-3	0.01

IV.2.Etape1 : réseau électrique alimente une charge non linéaire avant application de toute opération de filtrage.

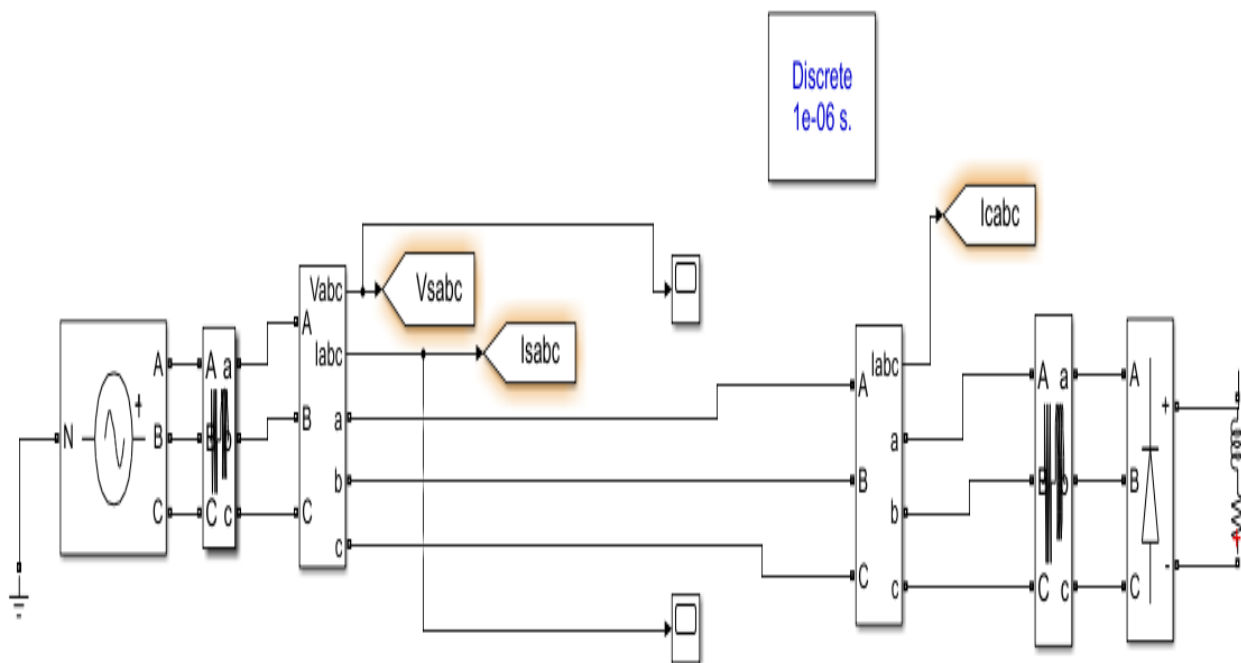


Figure IV.1 Réseau électrique alimente une charge non linéaire

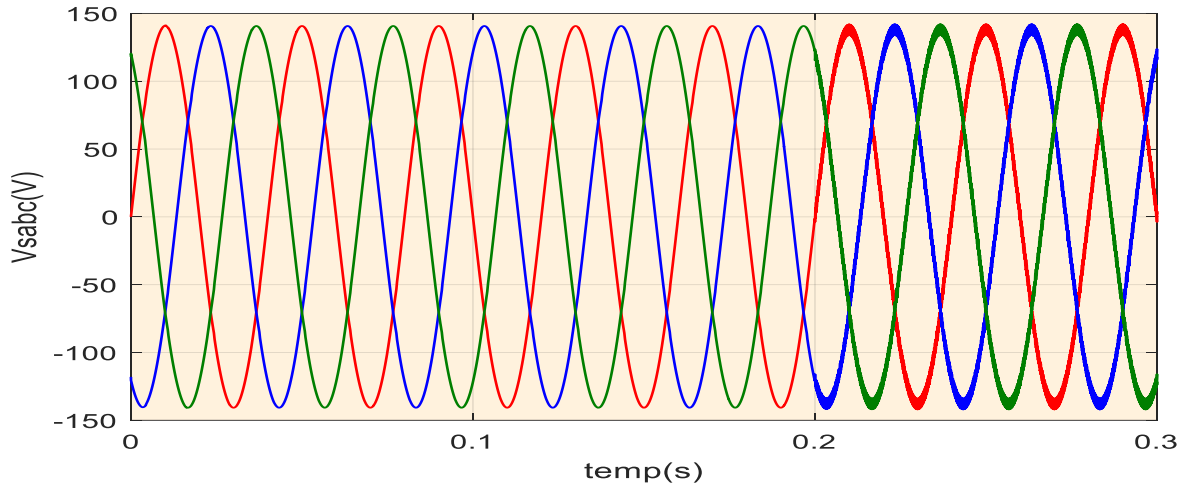


Figure IV.2 Tensions trois phases de source pour une charge non linéaire

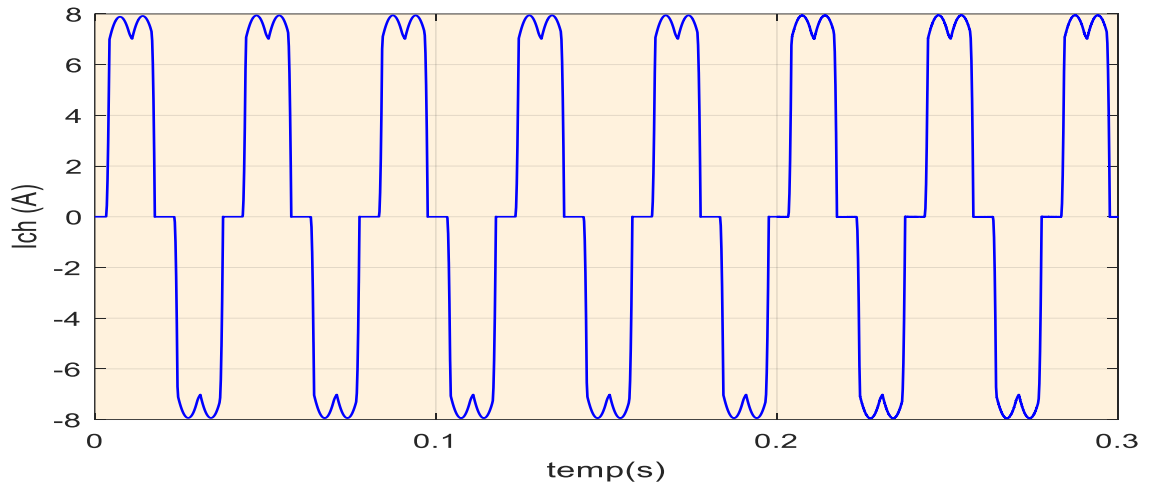


Figure (IV.3) : Courants des charges non linéaire avant l'injection du filtre

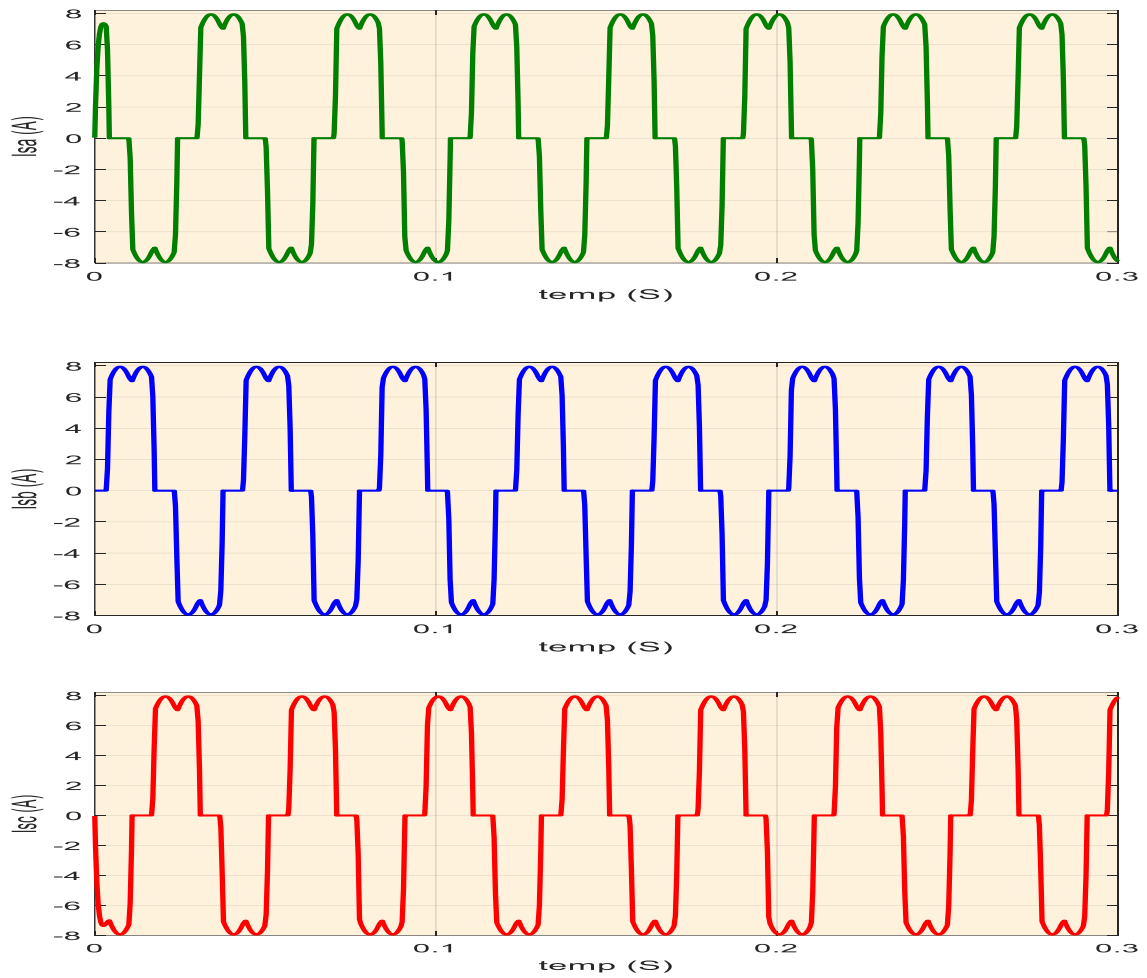


Figure IV.4 Courants des trois phases du réseau électrique avant l'injection du filtre

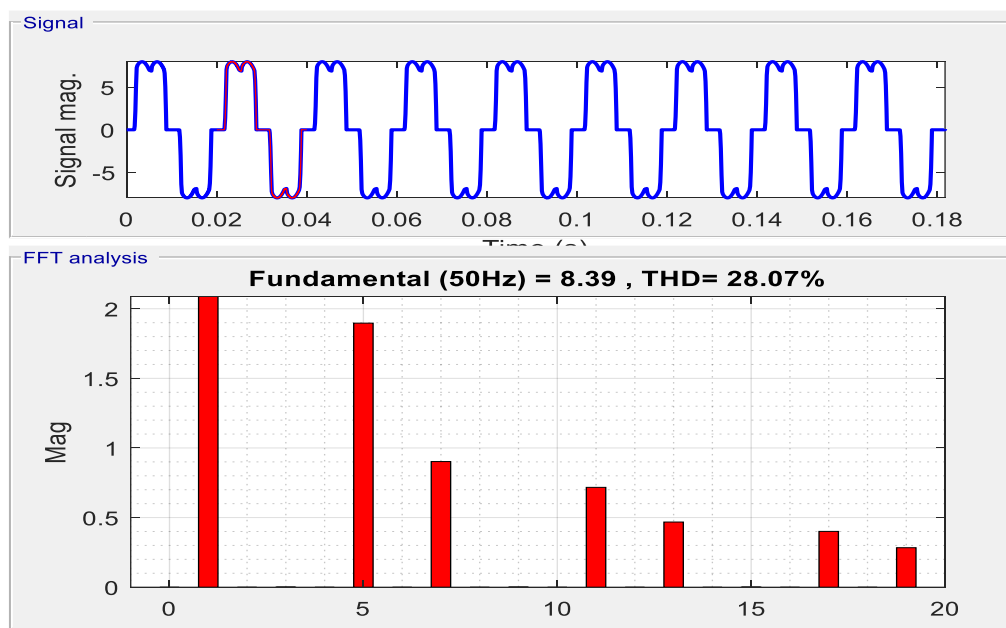


Figure IV.5 Spectre harmonique de la courante source avant filtre

IV.3. Etape2 : réseau électrique alimente une charge non linéaire avec filtre actif parallèle à commande classique (IP anti-emballement)

Le régulateur IP anti-emballement qui est présenté par sa fonction de transfert $G_s(s)$ ce dernier est utilisé dans notre système de filtrage pour stabiliser la tension de V_{dc} .

Les valeurs des paramètres K_p et K_i utilisés pour le régulateur PI ont été définies par la méthode classique de calcul nicol zigler. $K_p=0.1583$, $K_i=53.98$

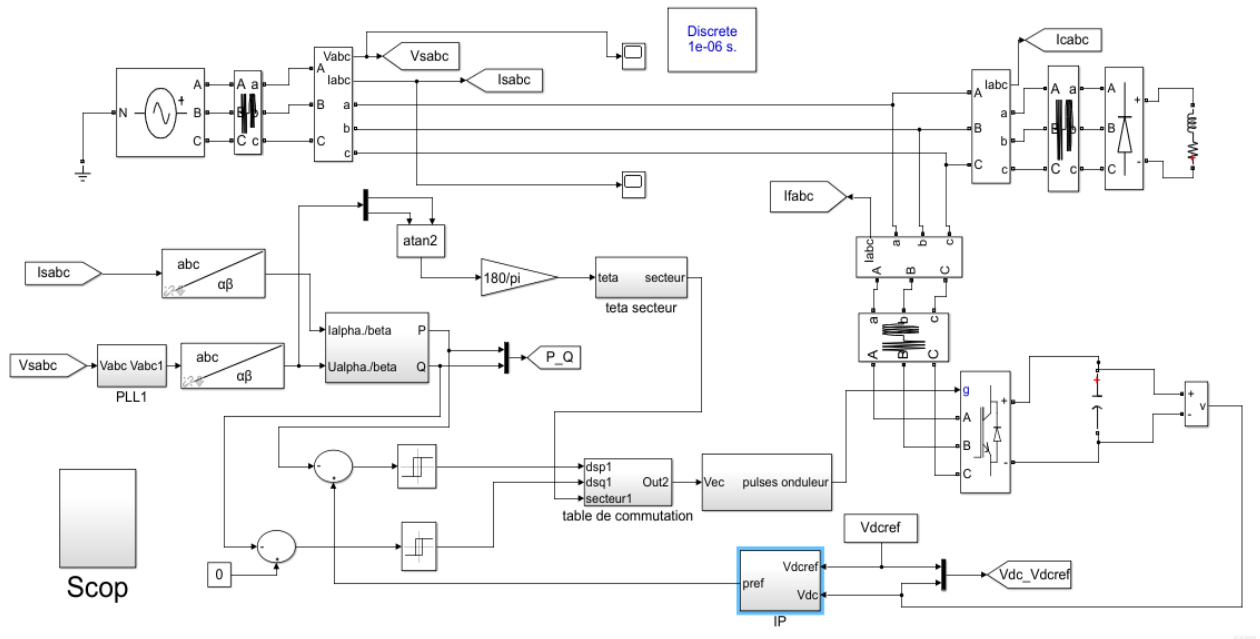


Figure IV.6 réseau électrique alimente une charge non linéaire avec FAP à commande classique (IP anti-emballement)

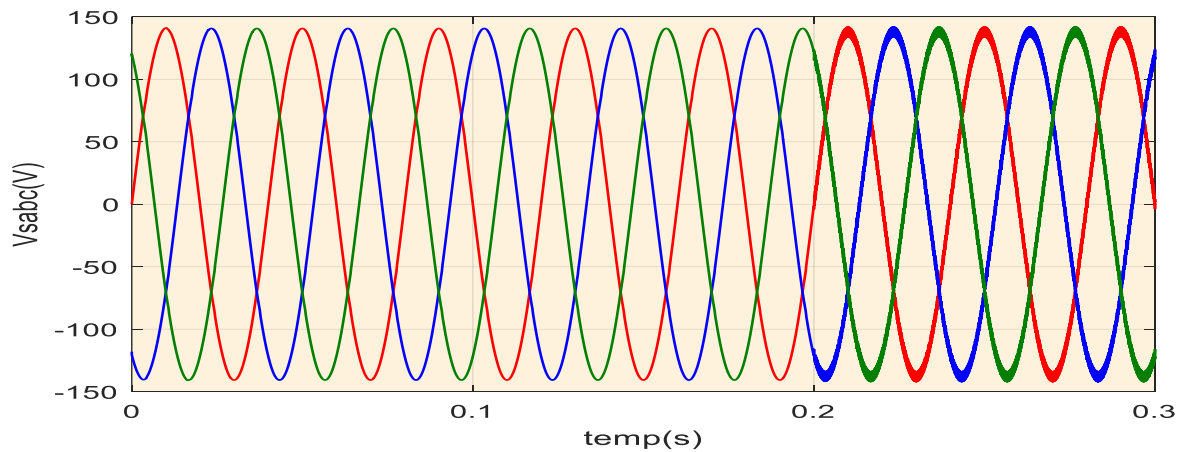


Figure IV.7 Tensions trois phases de source après l'injection du filtre

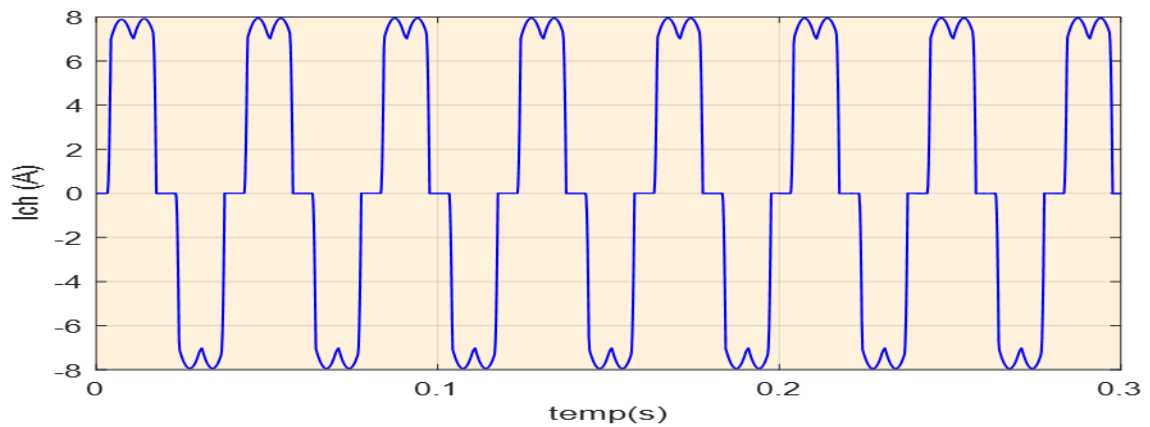


Figure IV.8 Courants des charges non linéaire après l'injection du filtre

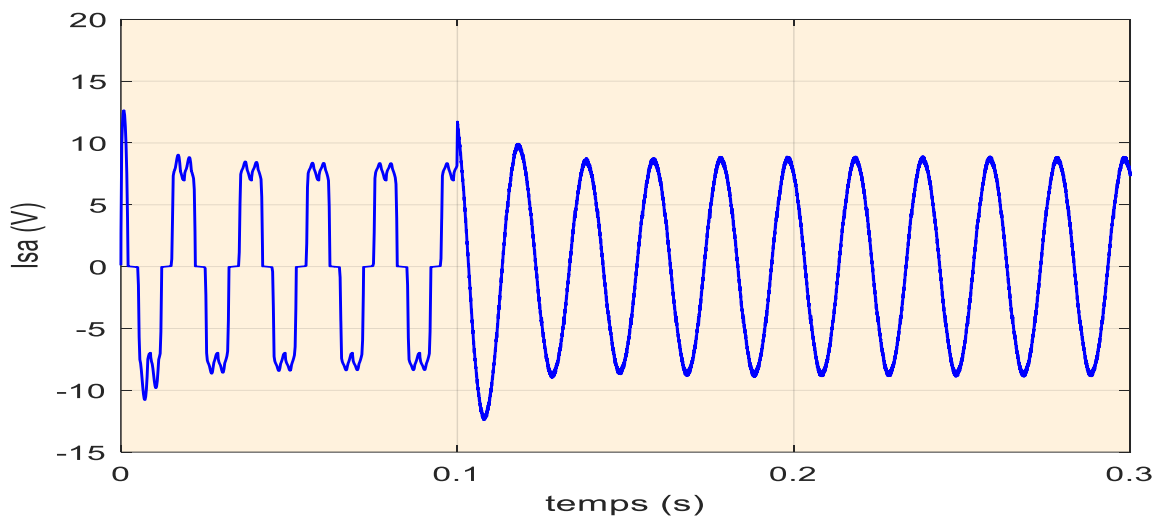


Figure IV.9 Courants de source après l'injection du filtre

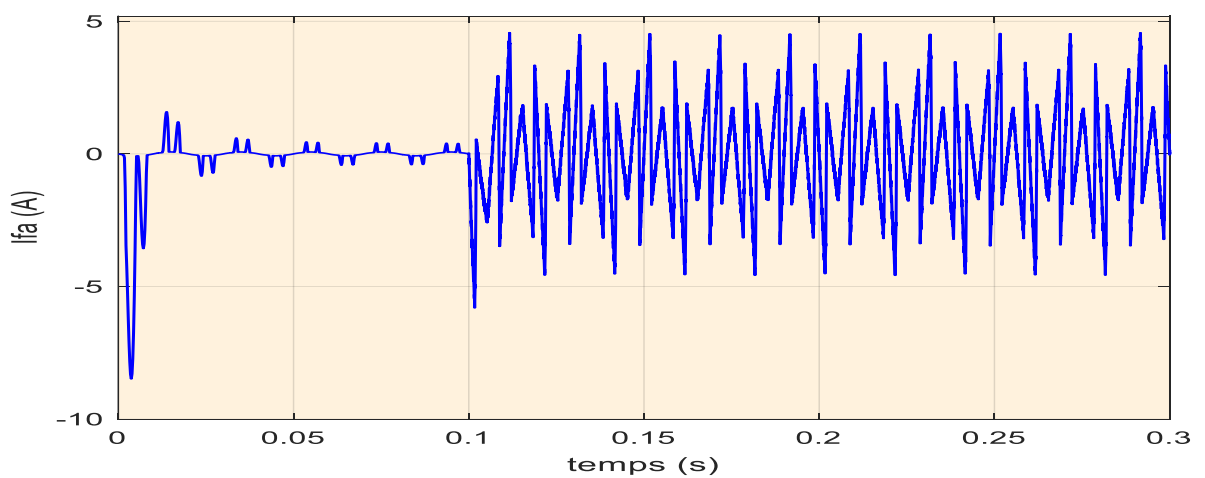


Figure IV.10 Courant harmonique injecté par le FAP

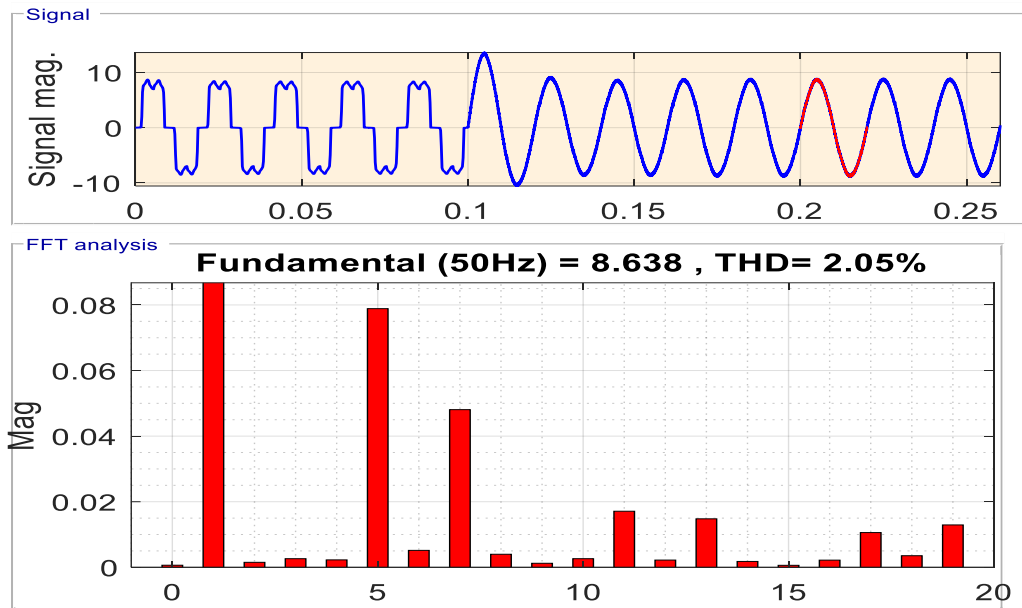
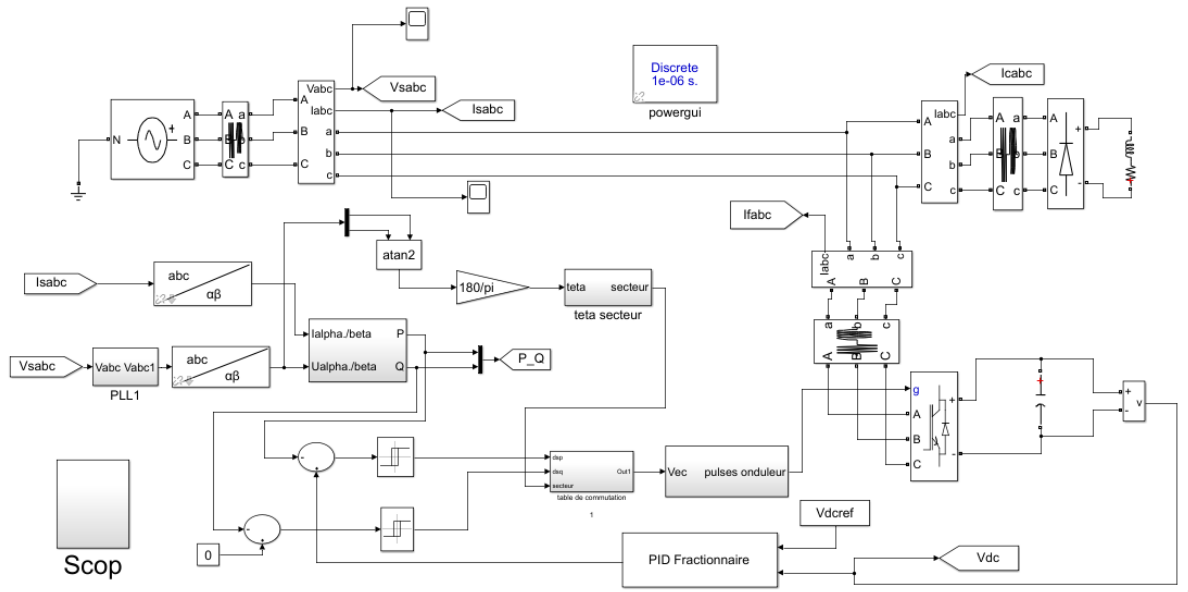


Figure IV.11 Spectre d'harmonique de courant de source
Après filtrage avec (IP anti-emballement)

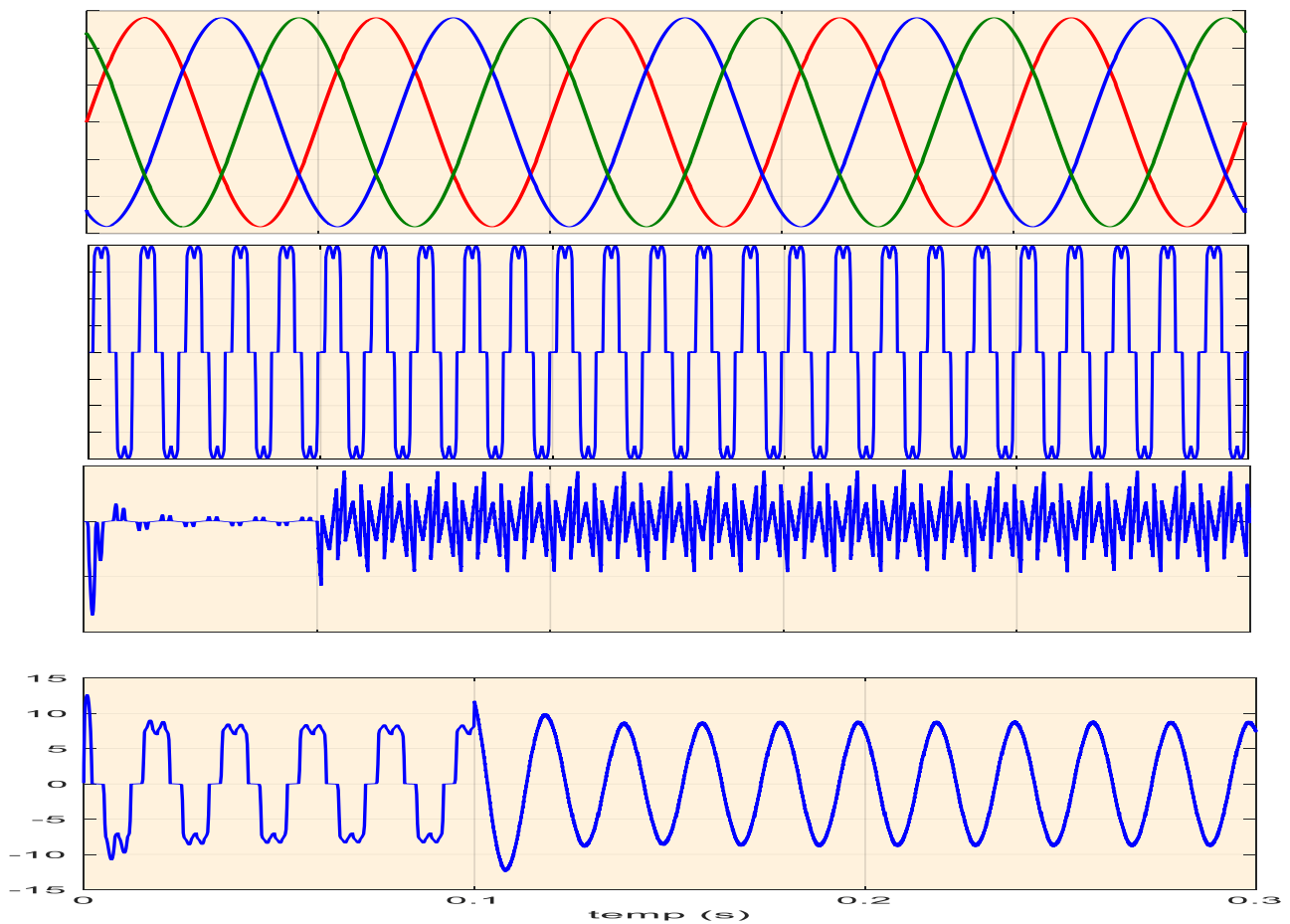
IV.4.Etape3 : réseau électrique alimente une charge non linéaire avec filtre actif parallèle à commande fractionnaire (PI FO)

La régulation par logique floues intelligente utilise dans notre système de filtrage pour stabiliser la tension de V_{dc} .

Les valeurs des paramètres K_p , K_i et α utilisés pour le régulateur commande fractionnaire par ont été définies par la méthode classique de calcul nicol zigler. $K_p=0.1$ $K_i= 0.05$ et $\alpha= -0.05$.



FigureIV.12 Réseau électrique alimente une charge non linéaire âpre FAP à commande par Régulation fractionnaire ((PI FO)



FigureIV.13 illustre les différentes formes d'onde et après la mise en service du FAP (FO_PI)

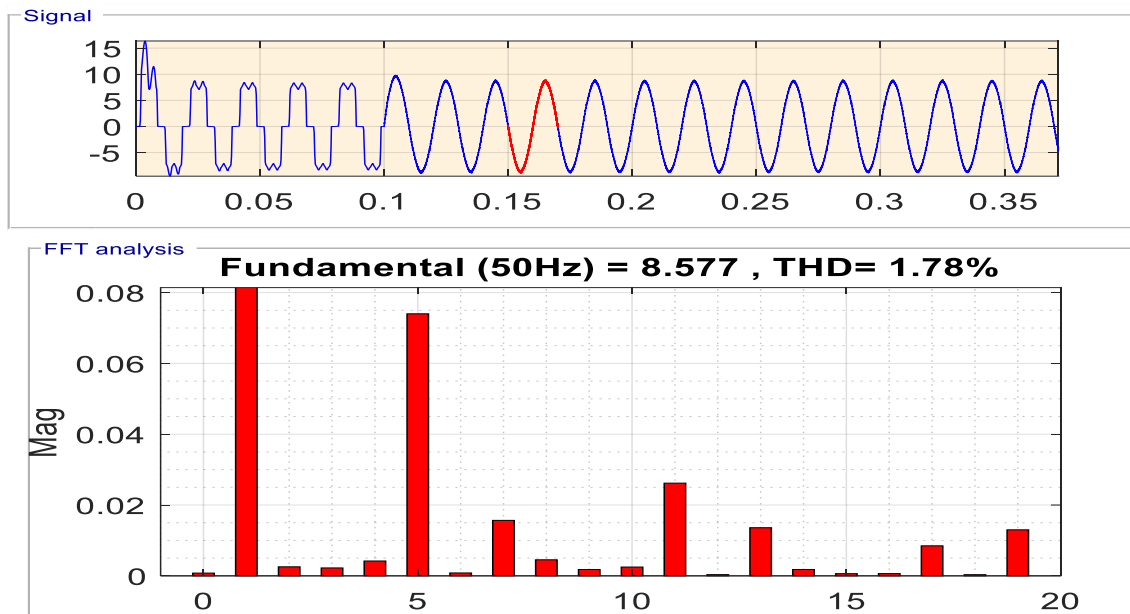


Figure IV.14 Spectre d’harmonique de courant de source

Après filtrage avec (PI FO)

IV.5. Etudes comparaison entre les deux stratégies de commande

La comparaison entre les deux stratégies de commande se fait en tenant compte que les paramètres du filtre actif parallèle sont identique le changement se fait seulement par remplacer le régulateur IP anti-emballement par le Régulation pi fractionnai

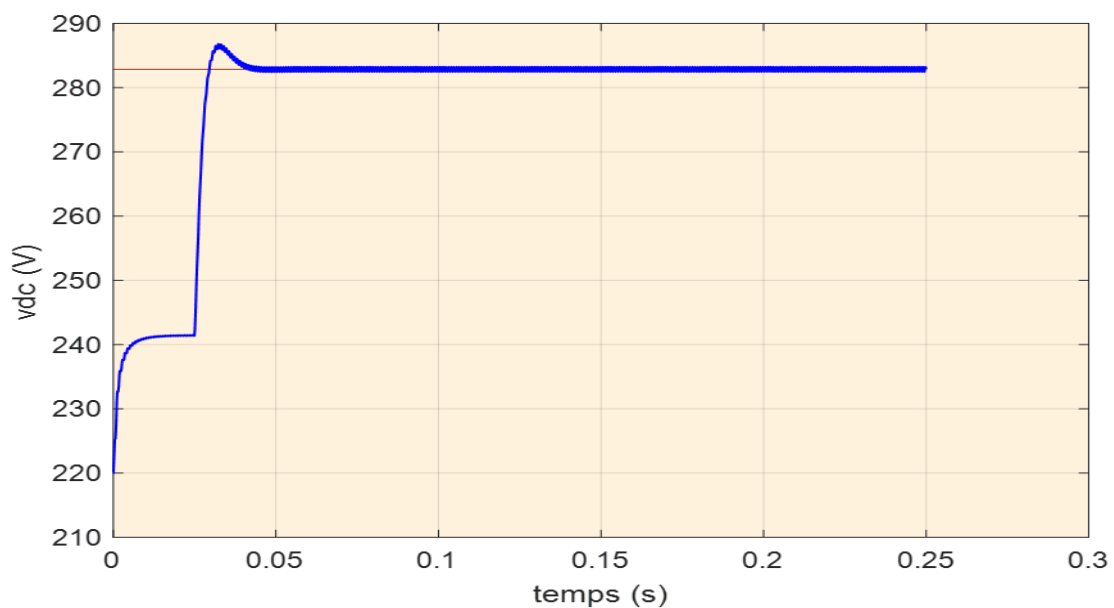


Figure IV.15 la tension Vdc après filtrage avec (IP anti-emballement)

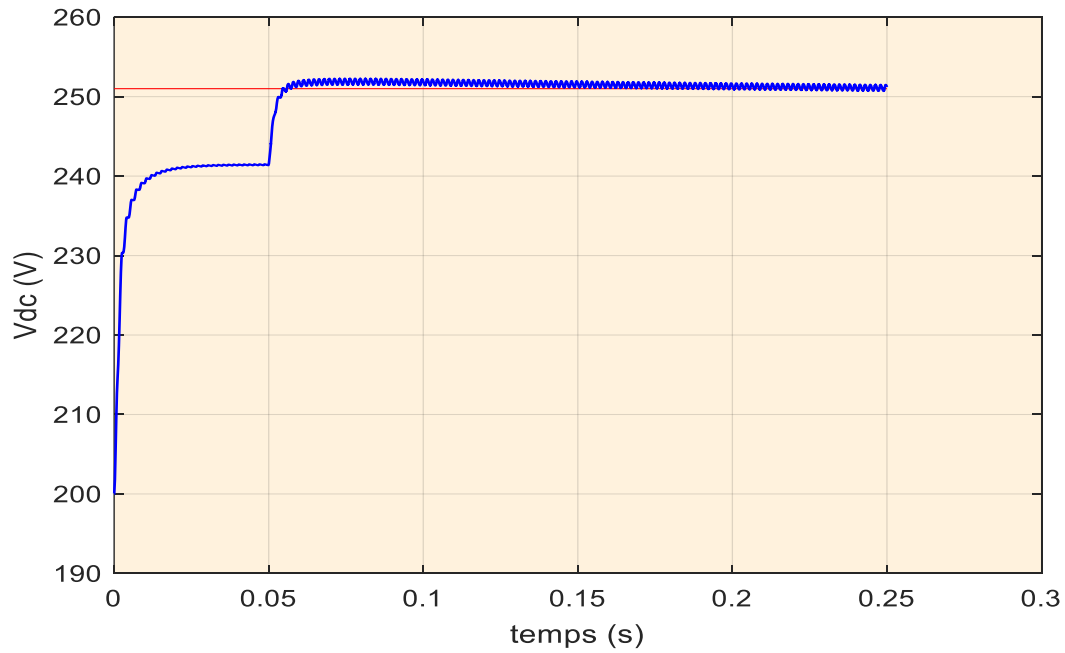


Figure IV.16 la tension V_{dc} après filtrage avec (FO PI)

Tableau IV.2 Comparaison des indexes de performance entre le régulateur

IP anti emballement et régulateur PI Fractionnaire

	THD Avant filtrage	THD après filtrage	K_i	k_p	Temps de réponse à 5% (sec)	Dépassement
(IP anti- emballement)	28.07	2.05	53.98	0.1583	25	49
(FO PI)	28.07	1.78	$K_i=0.05$ $\alpha=-0.05$	0.1	15	38

On remarque que le taux d'harmonique du courant du réseau avant le filtrage est très élevé par rapport au courant après le filtrage.

On constate que la compensation des courants harmoniques en commande PI classique est légèrement meilleure que celle de la commande à par régulateur PI fractionnaire dans le point de vue spectrale d'après le tableau (IV.1), la régulation par PI caractérise par un traitement stricte des signaux dans un intervalle courte

Conclusion

Ce travail a été consacré à l'application et l'amélioration des performances d'un filtre actif parallèle multiniveaux pour l'amélioration de la qualité d'énergie électrique dans un réseau électrique basse tension. Le filtre actif parallèle multiniveaux avait pour objectif de compenser les courants perturbateurs d'harmoniques, réactifs et déséquilibrés afin de maintenir un système de courants triphasé du coté de source sinusoïdal et équilibré ou en d'autres termes, découpler les perturbations causées par les charges non linéaires du réseau amont. D'après les résultats de simulation nous avons constaté l'avantage des filtres multiniveaux qui apparait aussi dans le fait qu'une augmentation du niveau permet un filtrage par défaut grâce au nombre d'interrupteur par bras et à la fréquence de commutation qui est de l'ordre de kHz qui offre un THD de courant source meilleure par rapport à la même structure à deux niveaux. La régulation et la stabilité de la source d'alimentation du filtre lors d'une variation de la charge est assurée par un IP anti-emballement puis par un PI α fractionnaire. Une étude comparative a été effectuée Les résultats obtenus sont très satisfaisantes et très prometteuses pour les régulateurs fractionnaires étant donné que nous avons eu une diminution considérable du taux d'harmoniques de courant.

CONCLUSION GENERALE

Cette étude s'est concentrée sur l'amélioration des performances des filtres actifs parallèles, dans le but de filtrer les courants perturbateurs harmoniques et de compenser l'énergie réactive. Après avoir examiné les origines et les conséquences des perturbations électriques, des solutions de dépollution ont été proposées, et une solution basée sur les principes du filtrage actif parallèle (FAP) a été choisie. Notre recherche porte sur l'étude conjointe de l'identification des harmoniques et du contrôle de l'onduleur. L'étape d'identification des courants harmoniques est essentielle dans le processus de filtrage. Sans une bonne estimation de ces courants, même un système de contrôle très efficace ne pourrait pas apporter les corrections nécessaires. Deux techniques originales d'identification des courants harmoniques ont été développées.

Tout d'abord, la méthode d'identification des puissances instantanées a été sélectionnée pour identifier le plus grand nombre de perturbations en courant, telles que les courants harmoniques. Cette méthode nécessite une tension de réseau sinusoïdale pour fournir uniquement les perturbations en courant émises par la charge polluante. Elle offre l'avantage de choisir précisément, rapidement et facilement la perturbation à compenser. La modélisation de l'ensemble du réseau, de la charge polluante et du filtre actif parallèle a été présentée pour deux types de charges non linéaires : un redresseur triphasé à diodes alimentant une charge RL en série ou une charge RC en parallèle. La méthode des puissances instantanées a été validée par simulation à l'aide du logiciel Matlab-Simulink. Les résultats de la simulation montrent que le filtre actif parallèle dépollue efficacement le réseau électrique des harmoniques générées par la charge non linéaire.

Ensuite, nous avons développé une nouvelle méthode d'extraction du courant de référence basée sur la détection du courant de source.

Nous avons tout d'abord exposé l'objectif du filtre actif parallèle multiniveaux, qui est de compenser les courants perturbateurs d'harmoniques, réactifs et déséquilibrés, afin de maintenir un système de courants triphasé côté source, sinusoïdal et équilibré. En d'autres termes, son but est de séparer les perturbations causées par les charges non linéaires du réseau amont.

Les résultats des simulations ont confirmé les avantages des filtres multiniveaux, notamment le fait qu'une augmentation du niveau de tension permet un filtrage par défaut en raison du nombre d'interrupteurs par bras et de la fréquence de commutation, qui est de l'ordre de kHz. Cela offre une meilleure distorsion harmonique totale (THD) de la courante source par rapport à une

structure à deux niveaux. La régulation et la stabilité de l'alimentation du filtre lors des variations de charge sont assurées par un régulateur proportionnel-intégral (PI) classique, suivi d'un régulateur $PI\alpha$ fractionnaire. Une étude comparative a été réalisée et les résultats obtenus sont très satisfaisants et prometteurs pour les régulateurs fractionnaires, car une diminution considérable des harmoniques de courant a été observée.

De plus, nous avons exploré plusieurs pistes de recherche qui ouvrent la voie à de nombreuses orientations futures. Ces perspectives de recherche se regroupent principalement autour de trois domaines d'action : l'automatique et les problèmes de régulation des filtres actifs, l'électronique de puissance et les structures de ces dispositifs, ainsi que l'application de l'électronique et de la microélectronique.

[1] ALALI MOHAMED ALAA EDIN, «contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques», thèse de doctorat en génie électrique, université louis pasteur ulp, (France) 2002.

[2] **ABDELATIF Med Elhadi.** « Étude comparative de différentes méthodes de compensation active d'énergie électrique », mémoire de Master. Université de M'sila, 2013.

[3] **DJAFFAR 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 de l'université de Haute Alsace 08 décembre 2005

[4] Mahanty R., « Indirect current control shunt active power filter for power quality improvement », *Electric Power and Energy System*, Vol. 62, pp. 441–449, 2014.

[5] Bouafia A., « Techniques de commande prédictive et floue pour les systèmes d'électronique de puissance : application aux redresseurs à MLI », thèse de doctorat en Sciences, Université de Ferhat Abbas Sétif-1, Algérie, Octobre 2010.

[6] Belhaouchet N., « Fonctionnement à 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 de Ferhat Abbas Sétif-1, Algérie, Juillet 2011.

[7] Sarra M., « Contribution à l'étude des filtres actifs hybrides », thèse de doctorat en Sciences, Université de Ferhat Abbas Sétif-1, Algérie, Juillet 2013.

[8] Varjani A.H., « Harmonic control techniques for inverters and adaptive active power filters », thèse de doctorat, Université de Wollongong, Australie, Novembre 1998.

[9] Dastfan A., « Active power filter with minimum components », thèse de doctorat, Université de Wollongong, Australie, 1998.

[10] Alali M.A., « *Contribution à l'Étude des Compensateurs Actifs des Réseaux Électriques Basse Tension* », thèse de doctorat, Université de Louis Pasteur – Strasbourg-I, France, Septembre 2002.

[11] Anouar, N. (2019). La Commande prédictive d'un filtre parallèle.

-
- [12] Zoubir, C. H. E. L. L. I. (2015). Amélioration de la qualité de l'énergie électrique par un filtre actif d'harmonique (Doctoral dissertation, Université Badji Mokhtar).
- [13] E. Amar, O. (2007). Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant. Thèse, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA.
- [14] GHADBANE ISMAIL « étude et réalisation d'un filtre actif parallèle en utilisant différentes stratégies de contrôle » thèse doctorat université Mohamed khider – Biskra 05/05/2016
- [15] STEEVE BEAULIEU « étude et mise au point d'un filtre actif d'harmoniques en vue d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique » mémoire présente comme exigence partielle de la maîtrise en ingénierie université du Québec a Chicoutimi mai 2007
- [16] BENGOURINA MOHAMED RIDA « étude et mise au point d'un filtre actif parallèle 'harmoniques en vue d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique » mémoire magister option : réseaux électriques université des Mohamed Boudiaf Oran 2012
- [17] Terciyanli A., « Design and implementation of curent source converter based active power filtre for medium voltage applications », thèse de doctorat, Middle East Technical University, Turquie, Mars 2010.
- [18] **Chennai S.**, « *Etude, Modélisation & Commande des Filtres Actifs : Apport des Techniques de l'Intelligence Artificielle* », thèse de doctorat en Sciences, Université de Mohamed khider Biskra, Septembre 2013.
- [19] Karenni S.B., Geddada N., Mishra M.K., Kalyan Kumar B., « *A Modified Three-Phase Four-Wire UPQC Topology With Reduced DC-Link Voltage Rating* », IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 60, No. 9, pp. 3555-3566, 2013.
- [20] Liu Q., Peng L., Kang Y., Tang S., Wu D., Qi Y., « *A Novel Design and Optimisation méthode of an LCL Filtre for a Shunt Active Power Filtre* », IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 61, No. 08, pp. 4000-4010, 2014.
- [21] **Singh B., Al-Haddad K., Chandra A.**, « *A Review of Active Filters for Power Qualité Improvement* », IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 40, No. 05, pp. 960-971, 1999.
- [22] RAMADAN A. EL SHATSHAT, „A Novel Modular Approach to Active Power-Line Harmonic Filtering in Distribution System“, A thesis présente to the University of Waterloo in fulfillment of the thesis requirement for the degree of Docteur of Philosophy in Electrical and Computer Engineering Waterloo, Ontario, Canada, 2001.

[23] MOHAMED MUFTAH ABDUSALAM, „ Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales “ thèse de Doctorat de l’université de Poincaré Nancy-I, 2008.

[24] BOUROUROU FARES « adaptativité de la machine synchrone au filtrage actif des harmoniques de tension » magister spécialité : électrotechnique université du 20 août 1955 – Skikda faculté de technologie 2005

[25] - Mohamad Alaa Eddin Alali, « Contribution à l’étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension », Thèse de Doctorat de l’Université de Louis Pasteur, Strasbourg, 12 Septembre 2002

[26] - T. Nakajima, E. Massada, « An active power filter with monitoring of harmonic spectrum », EPE-89, 3rd European conference on power electronics and applications, Aachen, Germany, 1989

[27] - S. Guffon, « Modélisation et commandes a structure variable de filtres actifs de puissance » Thèse de l’Institut National Polytechnique de Grenoble, 24 Juillet 2000.

[28]- IEEE STD 1159-1995, «IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality», 1995.

[29] N. Mesbahi, A. Ouari, D. Ould Abdeslam, T. Djamah, and A. Omeiri, "Direct power control of shunt active filter using high selectivity filter (HSF) under distorted or unbalanced conditions", Electric Power System Research, vol. 108, pp. 113–123, March 2014.

[30] S. Beaulieu « Etude et mise au point d'un filtre actif d'harmoniques en vue d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique », Mémoire présente comme exigence partielle de la maîtrise en ingénierie. Université du Québec a Chicoutimi 2007.

[31] S. Karim « 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.

[32] GHADBANE ISMAIL « étude et réalisation d’un filtre actif parallèle en utilisant différentes stratégies de contrôle » thèse doctorat en spécialité : électrotechnique université Mohamed khider – Biskra 2016

[33] KAMEL DJAZIA, « Etude des filtres actifs pour réseaux déséquilibrés et distordus ». THESE DE DOCTORA Electronique Université SETIF 1, 2015

-
- [34] S. Kerrouche, „Développement et implémentation d’un système de filtrage actif de puissance à base d’onduleur triphasé “”, Mémoire de magister, Université Ferhat Abbas Sétif (UFAS), Algérie, 2009
- [35] A. Med elhadi "Étude comparative de différentes méthodes de compensation active d’énergie électrique" mémoire de ingénierie université M’sila 2012 / 2013.
- [36] T. Benslimane, “ Commande numérique d’un filtre actif parallèle autonome ”, Mémoire de Magister, Ecole Militaire Polytechnique. 08 Février 2004.
- [37] C. BELFEDAL « Commande d'une machine asynchrone à double alimentation en vue de son application dans le domaine de l'énergie éolienne- Etude et Expérimentation –» Thèse de doctorat, Université d’Oran Mohamed BOUDIAF, 2007.
- [38] BENGOURINA Mohamed Rida, « Etude et mise au point d’un filtre actif parallèle d’harmoniques en vue d’améliorer la qualité de l’alimentation électrique » Mémoire en vue de l’obtention du diplôme du Magister en électrotechnique, 2012.
- [39] A. Chaoui, F. Krim, J.P. Gaubert, and L. Rambault : "DPC controlled three-phase active filter for power quality improvement", Electrical Power and Energy System vol. 30, no. 8, pp. 476– 485, Octobre 2008.
- [40] KHALED FERKOUS «ETUDE D’UNE CHAÎNE DE CONVERSION D’ÉNERGIE ÉOLIENNE ». Thèse de magistère ; Université Mentouri Constantine 2009.
- [41] N. Mesbahi and A. Ouari : "Direct power control of three-phase PWM rectifier without line voltage sensors", in Proc. 2èmes Journées Internationales D’Electrotechnique, de Maintenance et de Compatibilité Electromagnétique (JIEMCEM2010), ENSET Oran, Algeria, 25-27 May 2010.
- [42] Ouchen, S. (2017). Contribution à la commande directe de puissance dédiée au filtrage actif, associée à une source photovoltaïque (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider-Biskra).
- [43] S. Bhattacharya, D. Divan. « Active Filter Solutions For Utility Interface of Industrial Loads ». Conférence Power Electronics, Drives and Energy System for Industrial Growth, vol. 2, p. 1078-1084, Janvier 1996.
- [44] M, ALAA EDDIN ALALI "Contribution à l’Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension (Automatisation des systèmes de puissance) électriques" Thèse de Doctorat, Strasbourg 12 Septembre 2002.

-
- [45] Boussaid, A., & Khezzar, A. (2017). Filtrage actif des harmoniques dans les réseaux électriques. Contribution à l'amélioration de l'énergie électrique (Doctoral dissertation,)
- [46] Kouara H., « Contribution au contrôle d'un filtre actif parallèle triphasé à quatre fils dans un milieu perturbé », thèse de doctorat en Sciences, Université de Batna, Algérie, Janvier 2015.
- [47] Ouled Abdeslam D., « *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, France, 1992.
- [48] Afghoul H., Krim F., Chikouche D., Beddar A., « *Design and real time implementation of fuzzy switched controller for single phase active power filter* », ISA Transactions, Vol. 58, pp. 614-621, 2015,
- [49] Malek H., « *Control of Grid-Connected Photovoltaic systems using fractional order operators* », thèse de doctorat, UTAH State University, USA, 2014.
- [50] Benchellal A., « *Modélisation des interfaces de diffusion à l'aide d'opérateurs d'intégration fractionnaires* », thèse de doctorat, Université de Poitiers, France, 2008.
- [51] Oustaloup A., Mathieu B., Lanusse P., « *The CRONE control of resonant plants : Application to flexible transmission* », European Journal of Control, Vol.1, No. 2, pp.113- 121, 1995.
- [52] Sabatier J., Aoun M., Oustaloup A., Grégoire G., Rago F., Roy P., « *Estimation of lead acid battery state of charge with a novel fraction model* », FDA'06, 2nd IFAC Workshop on Fractional differentiation and its Applications, Porto, Portugal, 2006.
- [53] Benchellal A., « *Modélisation des interfaces de diffusion à l'aide d'opérateurs d'intégration fractionnaires* », thèse de doctorat, Université de Poitiers, France, 2008.
- [54] Bettou K., « *Analyse et réalisation de correcteurs d'ordre fractionnaire* », thèse de doctorat en Sciences, Université Mentouri de Constantine, Algérie, 2011.
- [55] Podlubny I., « *Fractional order systems and PI λ D μ controllers* », IEEE Transactions on Automatic Control, Vol.44, No. 1, pp.208-214, 1999.
- [56] Ladaci S., « *Contribution à la commande adaptative d'ordre fractionnaire* », thèse de doctorat en Sciences, Université Mentouri de Constantine, Algérie, 2007.