

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUEES
DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Electrique

Spécialité : COMMANDES ELECTRIQUES

THÈME

commande d'un filtre actif parallèle par (DPC) et régulateur floue

Préparé par :

➤ *BENALLAL AMINA*

Devant le Jury :

Nom et prénoms	Grade	Qualité
Mr : D.Toumi	MCB	Président
Mr : L.Bensoltane	MAA	Examineur 1
Mr :H.Ait Mimoune	MCB	Examineur 2
Mr : R.Ouared	MAA	Rapporteur

PROMOTION 2019 /2020

Remerciements

Je rends mes profondes gratitude à dieu qui m'a aidé à réaliser ce modeste travail

*Ainsi, je tiens également à exprimer mes vifs remerciements à mon encadreur **Mr OUARED RAHEL** Pour avoir d'abord proposé ce thème, pour son suivi continuel tout le long de la réalisation de ce mémoire et qui n'a pas cessé de nous donner ses conseils.*

Je remercie tous les membres du jury qui accepte de juger mon travail et pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce dernier.

Un gros merci à tous les enseignants qui ont contribue à ma formation sana exception

Remerciements	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Nomenclature	
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Perturbation des réseaux électriques	
Introduction	3
I.Types et caractéristiques de charges	3
I.1 Charge linéaire	3
I.2 Charge non linéaire.....	5
I.3 Qualité de l'énergie électrique	7
I.3.1 Qualité de la tension.....	7
I.3.1.1 Amplitude.....	7
I.3.1.2 Fréquence.....	8
I.3.1.3 Forme d'onde.....	8
I.3.1.4 Symétrie.....	8
I.3.2 Qualité du courant.....	8
I.4 Les perturbations harmoniques	9
I.4.1 Origine des harmoniques	9
I.4.2 Conséquences des harmoniques	10
I.4.2.1 Effets instantanés.....	10
I.4.2.2 Effets à terme.....	10
I.5 Caractérisation des perturbations harmoniques.....	11
I.5.1 Le taux de distorsion harmoniques.....	11
I.5.2 Le facteur de puissance.....	12
I.6 Normes et recommandations	13
I.6.1 Norme internationale CEI 61000.....	14
I.6.2.Niveau de compatibilité.....	15
I.6.3.Niveau d'émissions.....	17
I.6.4.Niveau d'immunité	18
I.6.5.Normes et recommandations européennes sur la qualité des réseaux NF EN 50160.....	19
I.6.6 IEEE 519 (Recommended Practices and Requirements for Harmonic	

Control in Electric Power Systems – USA).....	19
Conclusion.....	20
Chapitre II Technique de filtrage électrique	
II.1 Introduction.....	21
II.1.1 Etat de l’art des filtres actifs parallèles.....	21
II.2 Solutions de dépollution des réseaux	
électriques.....	33
II.2.1 Solutions traditionnelles.....	33
II.2.2 Solution moderne.....	34
II.2.2.3 Filtre actif parallèle.....	34
II.2.2.4 Filtre combiné parallèle-série (UPQC).....	35
II.2.2.5 Filtre actif série avec un filtre passif parallèle.....	36
II.2.2.6 Filtre actif hybride.....	37
II.3 Conclusion.....	37
Chapitre III Commande directe de la puissance (DPC)	
III 1 Introduction	38
III.2.Principe de la commande directe de puissance (DPC)	38
III.2.1 Calcul des puissances instantanées	40
III.2.1.1 Calcul de puissance instantanée par capteurs de tension du réseau et de courant.....	40
III.2.1.2 Calcul des puissances instantanées par estimation de la tension du réseau	46
III.2.1.3 Calcul des puissances instantanées par estimation du flux virtuel	41
III.3.Tableau de commutation	42
III.4 Choix du secteur	44
III.5 Régulateurs à hystérésis	45
III.6 Simulation.01	46
III.6.1 Résultats de simulation 1.....	47
III.6.2. Interprétation des résultats.....	49

III.7.Simulation.02	49
III.7.1 Résultats de simulation 2.....	50
III.8 Conclusion	51
Chapitre IV Application au filtre actif parallèle par logique flous	
IV.1 Introduction.....	52
IV.1.1 Historique de la logique floue.....	52
IV.1.2 Domaine d'application.....	53
IV.1.3 Avantages et inconvénients de la commande par logique floue.....	53
IV. 2 Le principe de la logique floue.....	54
IV.2 .1Variable linguistique.....	54
IV.3 Fonction d'appartenance.....	55
IV .3 1Univers de discours.....	56
IV.4 Les opérateurs de la logique floue.....	56
IV .4.1 Opérateur Conjonction ET.....	56
IV .4.2 Opérateur Disjonction OU.....	57
IV.5 .Structure générale d'une commande floue.....	57
IV.5.1 Fuzzification.....	58
IV.5.2 Inférence floue.....	58
IV .5. 3 Defuzzification.....	59
IV5.4 Application a la commande du filtre actif.....	60
IV .6 Commande par un régulateur floue standard.....	60
IV .6.1 Combinaison avec d'autres techniques de réglage.....	61
IV .6.2 Commande en courant par un contrôleur flou hystérésis.....	67

IV.7 descriptions du système.....	61
IV.7.1 Boucle de régulation de la tension du bus continu	62
IV.7.2 Régulateur floue	64
IV.7.3 Commande directe par logique floue à gain adaptatif d'un filtre actif parallèle	71
IV.7.3.1 Commande direct par logique floue à gain adaptatif -hystérésis dans le repère triphasé.....	71
IV.7.3.2 synthèse du régulateur floue à gain adaptatif.....	71
IV. 7.4 Utilisation du régulateur floue pour le bus continu	73
IV. 7.5 Contrôle du courant d'hystérésis floue.....	64
IV.8 Résultats de simulation	72
IV .9 Conclusion.....	77
Conclusion général	78
Annexe	
Références Bibliographiques	
Résumé	

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : Schéma de connexion du réseau avec une charge linéaire

Figure I.2 : Schéma global du réseau et d'une charge non linéaire

Figure I.3 : Décomposition du réseau et de la charge non linéaire

Figure I.4 : Les différents niveaux de perturbations

Chapitre II

Figure II.1 : Raccordement d'un filtre passif.

Figure II.2 : Filtre passif résonant.

Figure II.3 : Filtre passif amorti.

Figure II.4 : Filtre passif parallèle anti-résonant.

Figure II.5 : Filtre actif série.

Figure II.6 : Filtre actif parallèle.

Figure II.7 : Filtre combiné parallèle-série (UPQC).

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

Figure II.9 : Filtre actif hybride.

Chapitre III

Figure III.1 : Principe de DPC classique.

Figure III.2 : Représentation du vecteur de la tension dans le plan de l'espace vectoriel (α, β) divisé en douze (12) secteurs.

Figure III.3 : Caractéristique des régulateurs à hystérésis à deux niveaux.

Figure III.4 : Schéma de simulation de la DPC.

Figure III.5 : secteur et ϕ .

Figure III.6 : Allure de la tension Vdc.

Figure III.7 : Allure de la tension et du courant.

Liste des figures

Figure III.8 : Puissances active et réactive instantanées.

Figure III.10 : l'analyse spectrale de courant.

Figure III.11 : Schéma de simulation.

Figure III.12 : Allure de courant harmonique.

Figure III.13 : Allure de la tension V_{dc} .

Chapitre IV

Figure IV.1 : Quelques différentes formes de fonctions d'appartenance.

Figure IV.2 : Univers de discours d'une variable linguistique.

Figure IV.3 : Les opérateurs principaux de la logique floue.

Figure IV.4 : Structure générale d'une commande floue.

Figure IV.5 : méthodes de defuzzification

Figure IV.6 : Principe de commande du filtre actif par un régulateur flou a deux entrées.

Figure IV.7 : Schéma de principe du contrôleur flou-hystérésis

Figure IV.8 : schéma de DPC avec régulateur flou

Figure IV : 9 schémas bloc avec régulateur flou

Figure IV.10 : schéma de réglage de la tension V_{dc}

Figure IV.11 : Schéma de principe de la régulation floue (FLC).

Figure (IV.12) : Commande directe par logique floue à gain adaptatif dans le repère triphasé

Figure (IV.13) : Schéma bloc du Régulateur floue.

Figure IV.14 : régulateur floue pour le bus continu.

Figure IV.15 : fonction d'appartenance des entrées $e(n)$ et $de(n)$

Figure IV.16: membership function for the output variable " K_p " and " K_i "

Figure IV.16.a : Variation de l'amplitude des courants de référence " di^*/dt "

Figure IV.16.b: Membership functions for the input variable $V_s(t)$

Liste des figures

Figure IV.16.c : fonction d'appartenance pour la variable HB

Figure IV.17: spectre d'harmonique pour le courant de ligne

Figure IV.18 : spectre d'harmonique pour le courant de ligne avec filtre.

Figure IV.19 : spectre d'harmonique pour le courant de ligne avec filtre.

Figure IV.20 : tension et courant de ligne en phase.

Figure IV. 21.a : Control system step response.

Figure IV. 21. b : erreur Vdc avec régulateur PI et régulateur floue.

Figure IV.22 : estimation instantanées de la puissance réactive.

Figure IV.23 : estimation instantanées de la puissance active.

Figure IV.24 : Courant de charge.

Figure IV.25 : courant de filtre avec deux différents régulateurs

Figure IV.26 ; Tension de source.

Figure. IV.26 : Courant de source.

Liste des tableaux

Tableau I.1 Niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles sur les réseaux publics basse tension (norme CEI 61000-2-2).

Tableau I.2 : Taux (en % de V_1) des tensions harmoniques acceptables (CEI 61000-2-4).

Tableau I.3 : Limites d'émission de courants harmoniques des appareils basse tension de courant inférieur à 16A et de classe A.

Tableau I.4 : Exemple de limitation des émissions de courants harmoniques (CEI 61000-3-4).

Tableau I.5 : Taux des harmoniques en tension à utiliser pour vérifier l'immunité des appareils (CEI 61000-4-13).

Tableau III.1 : Table de commutation de la DPC adaptée.

Tableau III.2 : Changement des puissances active et réactive dans le secteur « 1 ».

Tableau III.3 : Vecteurs de commande sélectionnée pour 1.

Tableau IV. 1 : Les règles floues formulées pour la présente application.

Tableau : IV. 2 : fuzzy interférence rules.

Tableau IV. 3 : les paramètres de simulation.

Tableau IV.4 : THD% du courant de charge.

Nomenclature

- *THD* : Taux de distorsion harmoniques.
- *CEI* : Commission Electrotechnique Internationale.
- *CENELEC*: Comité Européen Normalisation Electrotechnique),
- *UTE*: Union Technique de l'Electricité.
- *FAS* : Filtre Actif Série.
- *FAP*: Filtre Actif Parallèle.
- *UPQC* : Unified Power Quality Conditionner (filtre parallèle – série actif).
- *IGBT*: Insulated Gate Bipolar Transistor (transistor bipolaire à grille isolée)
- *GTO* : Gate Turn-Off
- *MLI* : Modulation de Largeur d'Impulsion.
- *DPC* : Commande direct e puissance
- *DTC* : Contrôle Direct de Couple

Introduction Générale

Introduction générale

De plus en plus l'expansion de l'emploi dans l'industrie des récepteurs électriques, sont des charges déformantes (non linéaires) à base de l'électronique de puissance dans diverses applications, comme la commande électrique des moteurs, les alimentations de secours de puissance, le chauffage par induction électrique, les applications dédiées la traction électrique, la compensation des harmoniques, etc. Ils absorbent des courants non sinusoïdaux et ceux-ci, compte tenu des impédances des circuits, déforment l'onde sinusoïdale de courant et tension, c'est la perturbation harmonique des réseaux. Ce phénomène touche l'ensemble des secteurs industriel, telles que les redresseurs, les gradateurs et domestique comme le matériel informatique, les appareils de climatisation ou encore les éclairages à base de tubes fluorescents.

Les harmoniques générées par les charges non linéaires circulent dans les réseaux électriques et qui absorbent des courants non sinusoïdaux. Ces harmoniques de courant vont à leur tour générer des tensions harmoniques aux différents points de connexion au réseau. Pour les autres équipements électriques connectés en ces points, cette pollution harmonique à des effets néfastes peuvent apparaître instantanément ou se produire en différé, on peut notamment citer la déformation de la tension réseau au point de raccordement alors que le distributeur d'énergie est tenu de fournir une tension propre. Cette pollution peut également conduire à l'échauffement des câbles et peuvent perturber le fonctionnement normal de certains équipements électriques ou bien encore à l'arrêt soudain de machines tournantes.

Les limites proposées ont été établies par les normes de la commission internationale d'électrotechnique IEC61000, et par les recommandations IEEE Std. 519-1992 .

Pour faire face au phénomène des perturbations harmoniques, plusieurs solutions ont été proposées. Les méthodes traditionnelles de réduction des harmoniques impliquent l'utilisation des filtres passifs constituent une solution possible et usuelle, plus particulièrement les filtres passifs LC sont exploités comme des piègeurs des courants harmoniques, calculés en concordance avec les rangs d'harmonique à filtrer Ils peuvent également être utilisés pour compenser la puissance réactive. Cependant, ces dispositifs ont montré leurs limites et inconvénients comme : manque d'adaptabilité lors de variations de l'impédance du réseau, de la charge et résonance possible avec l'impédance du réseau et dans certains cas défavorables où cette résonance est excitée, celle-ci peut entraîner une tension harmonique élevée et un courant harmonique important dans la capacité du filtre et dans le réseau. Ainsi, cette solution présente un inconvénient majeur qui peut être intolérable dans ces circonstances particulières.

Introduction générale

Dans ce contexte et afin de répondre aux besoins grandissant de l'industrie et la croissance importante de la pollution harmonique et d'éviter les inconvénients des filtres passifs a conduit à l'émergence de nouvelles structures dites les filtres actifs comme solution moderne.

Plusieurs topologies des filtres actifs ont été proposées dans la littérature, une première solution consiste à connecter le filtre actif en parallèle avec le système polluant, le principe du filtre actif parallèle consiste à générer des courants harmoniques en opposition de phase à ceux existants sur le réseau. Le courant absorbé par les charges polluantes est non-sinusoïdal, alors que le courant généré par le filtre actif parallèle est tel que le courant du réseau soit sinusoïdal , Une seconde approche consiste en la connexion du filtre actif en série avec le réseau : il se comporte alors comme un générateur de tension qui impose une tension harmonique telle que, additionnée à celle du réseau, la tension au point de connexion soit rendue sinusoïdale.

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

Dans le premier chapitre, on présente les origines et les conséquences des perturbations en courant et en tension pouvant intervenir dans un réseau électrique,

Dans le second chapitre, nous proposons les techniques de filtrage électrique, afin de réduire les harmoniques au niveau du réseau électrique.

le troisième chapitre traite la commande DPC. Nous développons, l'estimation des des grandeurs de contrôle qui sont la puissance active et réactive.

Dans le quatrième chapitre En vue d'apprécier l'intérêt grandissant des commandes intelligentes nous présentons ici une technique intelligente à base d'un régulateur flou pour le filtrage actif. Elle consiste au remplacement du correcteur classique PI du bus continu par le régulateur flou et de même dans la DPC ou nous l'utilisons pour le contrôle de la bande d'hystérésis. donc c'est un contrôle a la fois du bus continu et des variables de contrôle par un régulateur intelligent en fin nous achevons notre travail par une conclusion générale .

Chapitre I

Perturbations des réseaux électriques

Introduction

Aujourd'hui, la situation aux niveaux des réseaux électrique basse tension est devenue très préoccupante, la qualité de l'énergie électrique dans ces derniers se dégrade incontestablement à cause de différentes perturbations. La source principale des perturbations est l'utilisation accrue, dans l'industrie, tertiaire et même le domestique, des charges non-Linéaires. Ces derniers polluent les réseaux électriques.

De nos jours, le besoin en électricité dans la vie quotidienne de la population et l'exigence de cette dernière ont vu une importante progression des dispositifs à base des convertisseurs statiques avec des puissances unitaires de plus en plus importantes. La Société Nationale Algérienne d'Electricité et du Gaz (SONELGAZ), en sa qualité de distributeur d'énergie électrique, doit fournir à l'ensemble de ses clients et utilisateurs une énergie de qualité sous formes de trois tensions sinusoïdales constituant un réseau triphasé équilibré dont les paramètres caractéristiques sont les suivants : [1]

- La fréquence ;
- L'amplitude des trois tensions ;
- La forme d'onde qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde ;

La mesure de ces paramètres permet de juger la qualité de la tension. Une détérioration, de l'un d'entre eux ou de plusieurs à la fois, laisse supposer la présence d'une anomalie dans le réseau électrique.[1]

I Types et caractéristiques de charges :**I – 1 Charge linéaire :**

Si l'on alimente une charge linéaire par une tension sinusoïdale figure 1.1, le courant circulant dans cette charge est lui aussi sinusoïdal. Cependant, le courant peut être déphasé par rapport à la tension d'un angle Φ . Les relations entre les différentes grandeurs qui caractérisent l'évolution de cette charge sont les suivantes :[1]

$$u(t) = U \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t) \quad (1.1)$$

$$i(t) = I \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t) \quad (1.2)$$

En représentation complexe, on

En représentation complexe, on a :

$$\bar{U} = \bar{Z} \cdot \bar{I} \quad (1.3)$$

Où \bar{U} et \bar{I} sont la tension et le courant efficace

La puissance active fournie à la charge est :

$$P = U \cdot I \cdot \cos(\varphi) \quad (1.4)$$

La puissance apparente de la charge est :

$$S = U \cdot I \quad (1.5)$$

Le facteur de puissance de la charge est :

$$F_p = \frac{P}{S} = \cos(\varphi) \quad (1.6)$$

Le facteur de crête du courant est :

$$F_C = \frac{I_{max}}{I} = \sqrt{2} \quad (1.7)$$

Et, la puissance réactive fournie à la charge est :

$$Q = U \cdot I \sin(\Phi) \quad (1.8)$$

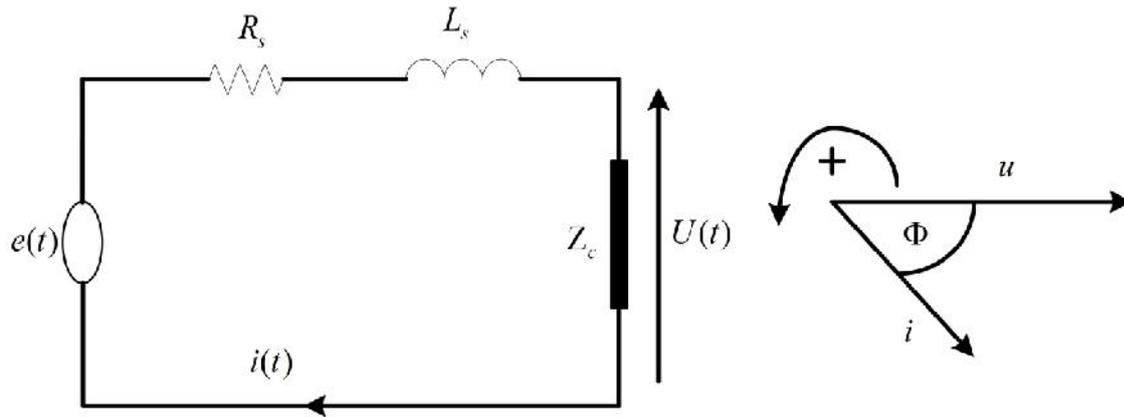


Figure I.1 : Schéma de connexion du réseau avec une charge linéaire

R_s : résistance de la source ;

L_s : inductance de la source ;

Z_c : impédance de la charge.

I – 2 Charge non linéaire

Si l'on alimente une charge non linéaire par une tension sinusoïdale, le courant circulant dans la charge n'est plus sinusoïdal. Ce courant peut être décomposé en une composante fondamentale et des harmoniques (Figure1.2)[1] :

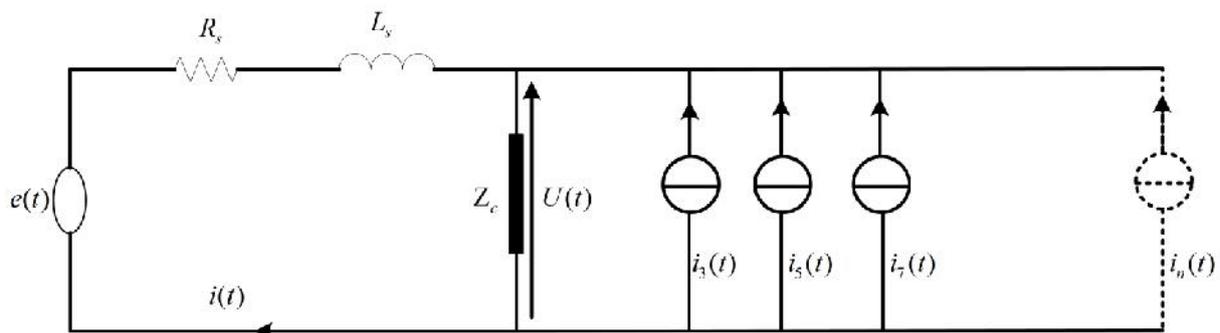


Figure I.2 : Schéma global du réseau et d'une charge non linéaire

En vertu du théorème de superposition, le schéma de la figure 1.2 peut être décomposé en deux circuits : La première figure 1.3 a, correspond à la fréquence fondamentale et la seconde

figure 1.3 b est relative aux harmoniques. On peut remarquer que pour le régime fondamental, on reste sur un schéma identique à celui obtenu pour une charge linéaire figure 1.1.

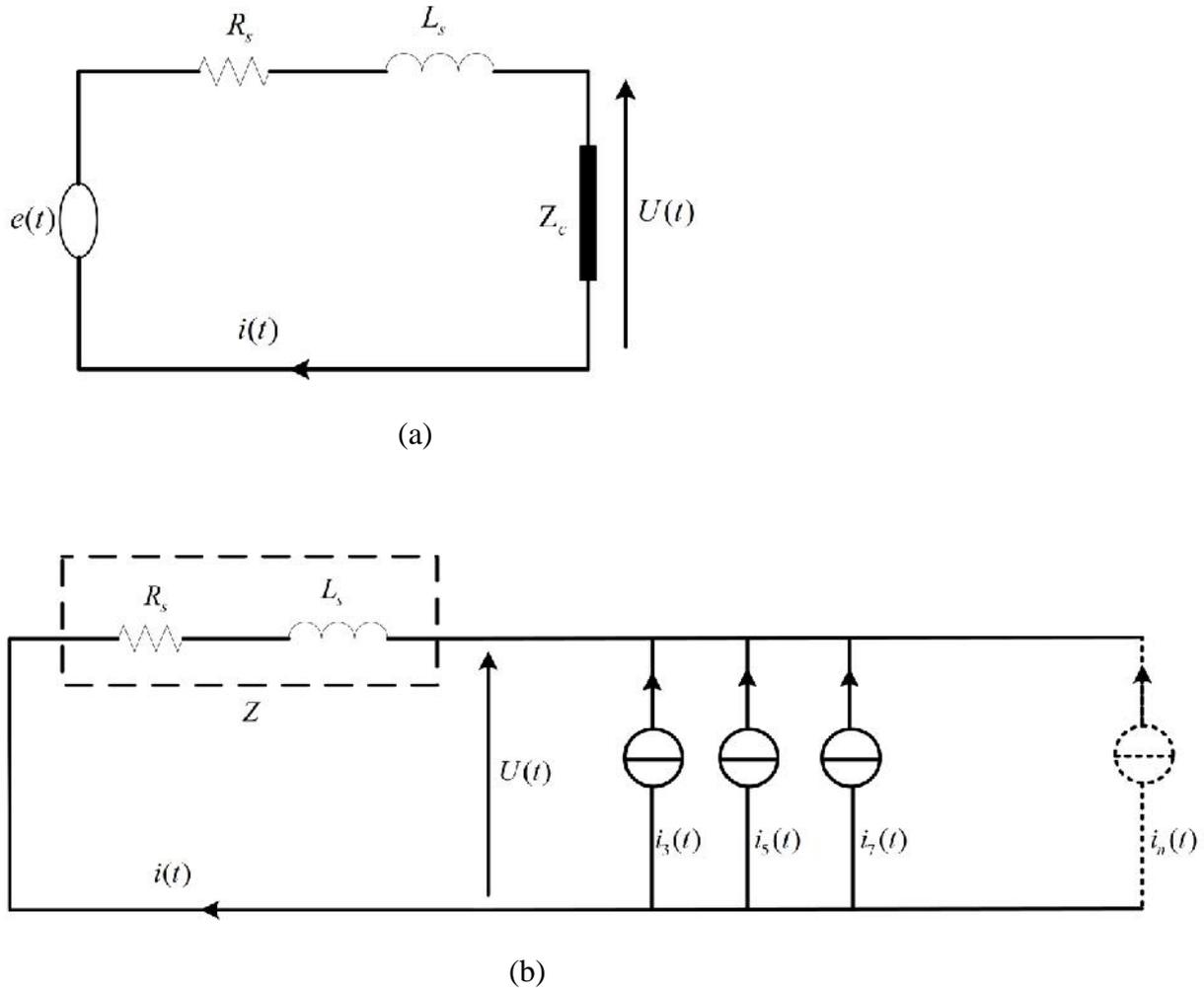


Figure I.3 Décomposition du réseau et de la charge non linéaire

a- schéma relatif à la fréquence fondamentale

b- schéma relatif aux fréquences harmoniques

La tension de chaque harmonique correspond au produit entre l'impédance et le courant relatif à cette même fréquence harmonique :

$$\bar{U}_{(n)} = \bar{Z}'_{(n)} \cdot \bar{I}_n \tag{I. 9}$$

Annexe

· $\bar{Z}'_{(n)}$: impédance complexe de la source pour l'harmonique de rang n.

\vec{i}_n : courant complexe de l'harmonique de rang n.

\vec{u}_n : tension complexe de l'harmonique de rang n.

Les valeurs instantanées des courants et tensions peuvent s'écrire comme la somme d'un terme fondamental et de termes harmoniques. La valeur efficace est la racine carrée de la somme quadratique des tensions fondamentales et harmoniques.

$$u(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} \cdot U_n \cdot \sin(n\omega t + \alpha_n) \quad \text{Où} \quad U_n = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2} \quad (\text{I.10})$$

$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} \cdot I_n \cdot \sin(n\omega t + \beta_n) \quad \text{Où} \quad I_n = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} \quad (\text{I.11})$$

I.3 Qualité de l'énergie électrique :

La qualité de l'énergie électrique est un indicateur de la santé des équipements électriques (bon fonctionnement, défaillance, durée de vie, ..., etc.) branchés sur le réseau. [2]

La qualité de l'énergie électrique est considérée comme une combinaison de la qualité de la tension et de la qualité du courant. Nous allons donc définir ces deux notions dans la suite de ce paragraphe. [3]

I.3.1 Qualité de la tension

Dans la pratique, l'énergie électrique distribuée se présente sous la forme d'un ensemble de tensions constituant un système alternatif triphasé, qui possède quatre caractéristiques principales : amplitude, fréquence, forme d'onde et symétrie. [3]

I.3.1.1 Amplitude

L'amplitude de la tension est un facteur crucial pour la qualité de l'électricité. Elle constitue en général le premier engagement contractuel du distributeur d'énergie. Habituellement, l'amplitude de la tension doit être maintenue dans un intervalle de $\pm 10\%$ autour de la valeur nominale.

Dans le cas idéal, les trois tensions ont la même amplitude, qui est une constante. Cependant, plusieurs phénomènes perturbateurs peuvent affecter l'amplitude des tensions. En fonction de la variation de l'amplitude on distingue deux grandes familles de perturbations :

- Les creux de tension, coupures et surtensions. Ces perturbations se caractérisent par des

variations importantes de l'amplitude. Elles ont pour principale origine des courts-circuits, et peuvent avoir des conséquences importantes pour les équipements électriques.

- Les variations de tension. Ces perturbations se caractérisent par des variations de l'amplitude de la tension inférieure à 10% de sa valeur nominale. Elles sont généralement dues à des charges fluctuantes ou des modifications de la configuration du réseau. [3]

. I.3.1.2 Fréquence

Dans le cas idéal, les trois tensions sont alternatives et sinusoïdales d'une fréquence constante de 50 ou 60 Hz selon le pays. Des variations de fréquence peuvent être provoquées par des pertes importantes de production, de l'îlotage d'un groupe sur ses auxiliaires ou son passage en réseau séparé, ou d'un défaut dont la chute de tension résultante entraîne une réduction de la charge. Cependant, ces variations sont en général très faibles (moins de 1%) et ne nuisent pas au bon fonctionnement des équipements électriques ou électroniques. Pour les pays européens dont les réseaux sont interconnectés, la norme EN 50160 précise que la fréquence fondamentale mesurée sur 10s doit se trouver dans l'intervalle $50\text{HZ} \pm 1\%$ pendant 99,5% de l'année, et, $- 6\% + 4$ durant 100% du temps. Il faut également remarquer que les variations de fréquence peuvent être bien plus importantes pour les réseaux autonomes.[3]

I.3.1.3 Forme d'onde

La forme d'onde des trois tensions formant un système triphasé doit être la plus proche possible d'une sinusoïde. En cas de perturbations au niveau de la forme d'onde, la tension n'est plus sinusoïdale et peut en général être considérée comme une onde fondamentale à 50Hz associée à des ondes de fréquences supérieures ou inférieures à 50 Hz appelées également harmoniques. Les tensions peuvent également contenir des signaux permanents mais non-périodiques, alors dénommés bruits. [3]

I.3.1.4 Symétrie

La symétrie d'un système triphasé se caractérise par l'égalité des modules des trois tensions et celle de leurs déphasages relatifs. La dissymétrie de tels systèmes est communément appelé déséquilibre.[3]

I.3.2 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 : amplitude, fréquence, forme d'onde et symétrie. Dans le cas idéal, les trois courants sont d'amplitude et

de fréquence constante, déphasés de $\frac{2\pi}{3}$ radians entre eux, et de forme purement sinusoïdale.

Le terme « qualité du courant » est rarement utilisé, car la qualité du courant est étroitement lié 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 ». C'est l'hypothèse que nous ferons dans la suite de ce document, où le terme de « qualité de l'énergie » s'applique uniquement à celle de la tension.

La qualité d'énergie peut être affectée, soit du fait de certains incidents inhérents à la nature physique et aux sujétions liées à l'exploitation du réseau, soit du fait de certains récepteurs. Ces défauts se manifestent sous forme de différentes perturbations affectant un ou plusieurs des quatre paramètres précédemment définis. On a donc quatre possibilités distinctes de perturbations : [3]

- **les fluctuations de la fréquence à 50 Hz:** elles sont rares et ne sont observées que lors de circonstances exceptionnelles, par exemple certains défauts graves du réseau, au niveau de la production ou du transport;
- **les variations de l'amplitude:** il ne s'agit pas des variations lentes de tension qui sont corrigées par les transformateurs de réglage en charge, mais de variations rapides de tension ou de creux de tension se présentant souvent sous forme d'à-coups brusques. Les creux de tension peuvent être soit isolés, soit plus ou moins répétitifs, de forme régulière ou non
- **la modification de la forme d'onde de la tension:** cette onde n'est alors plus sinusoïdale, et peut être considérée comme représentable par une onde fondamentale à 50 Hz, associée soit à des harmoniques de fréquence multiple entier de 50 Hz, soit même parfois à des ondes de fréquence quelconque
- **la dissymétrie du système triphasé :** que l'on appelle déséquilibre. On peut, en plus, mentionner un type particulier de perturbations difficile à classer puisqu'il concerne tout à la fois l'amplitude et la forme d'onde : ce sont les variations transitoires d'amplitudes dont la durée est inférieure à 10 ms. [3]

I.4 Les perturbations harmoniques :

I.4.1 Origine des harmoniques :

Les harmoniques sont générées par des charges non linéaires absorbant un courant non sinusoïdal. Actuellement, les équipements à base de thyristors constituent la principale source de ces harmoniques. Ces appareils, dont les caractéristiques électriques varient avec la valeur

de la tension, sont assimilables à des générateurs de courants harmoniques : appareils d'éclairage fluorescent, variateurs de vitesse, redresseurs, téléviseurs, ordinateurs, etc. [4]

I.4.2 Conséquences des harmoniques :

Les courants harmoniques se propagent dans le réseau électrique, déforme l'allure du courant de la source et polluent les consommateurs alimentés par ce même réseau. Ils peuvent occasionner des incidents au niveau de l'appareillage du client et donner lieu à des surcoûts de production d'énergie importants. On peut classer les effets engendrés par les harmoniques en deux types : les effets instantanés et les effets à terme. [5]

I.4.2.1 Effets instantanés

Les effets instantanés apparaissent immédiatement dans certains appareillages.

➤ Défauts de fonctionnement de certains équipements électriques :

En présence d'harmoniques, la tension et le courant peuvent changer plusieurs fois de signe dans une demi-période. Les appareils dont le fonctionnement est basé sur le passage à zéro des grandeurs électriques peuvent être affectés.

➤ Troubles fonctionnels des micro-ordinateurs :

Les effets sur ces équipements peuvent se manifester par la dégradation de la qualité de l'image et par des couples pulsatoires des moteurs d'entraînement de disque.

➤ Erreurs dans les appareils de mesure :

Certains appareils de mesure et les compteurs d'énergie à induction présentent des dégradations de mesure et des erreurs de lecture supplémentaires en présence d'harmoniques.

➤ Vibrations et bruits :

Les courants harmoniques génèrent également des vibrations et des bruits acoustiques, principalement dans les appareils électro-magnétiques (transformateurs, inductances et machines tournantes).[5]

I.4.2.2 Effets à terme

Ils se manifestent après une exposition plus ou moins longue à la perturbation harmonique. L'effet à terme le plus important est de nature thermique, il se traduit par l'échauffement. Il conduit à une fatigue prématurée du matériel, des lignes et amènent un déclassement des équipements. [5]

➤ Echauffement des câbles et des équipements :

Ces effets peuvent être à moyen terme (de quelques secondes à quelques heures) ou à long terme (de quelques heures à quelques années) et concernent les câbles qui peuvent être le siège du sur échauffement du neutre et les matériels bobines comme les transformateurs ou les moteurs.

➤ Echauffement des condensateurs :

L'échauffement est causé par les pertes dues au cycle d'hystérésis dans le diélectrique. Les condensateurs sont aussi sensibles aux surcharges, qu'elles soient dues à une tension fondamentale trop élevée ou à la présence d'harmoniques. Ces échauffements peuvent conduire au claquage.

➤ Echauffement dû aux pertes supplémentaires des machines et des transformateurs :

Un échauffement est causé par les pertes dans le stator des machines et principalement dans leurs circuits rotoriques (cages, amortisseurs, Circuits magnétiques) à cause des différences importantes de vitesse entre les champs tournants inducteurs harmoniques et le rotor. Les harmoniques génèrent aussi des pertes supplémentaires dans les transformateurs, par effet Joule dans les enroulements, accentuées par l'effet de peau et des pertes par hystérésis et courants de Foucault dans les circuits magnétiques. [5]

I. 5 Caractérisation des perturbations harmoniques

Différentes grandeurs sont définies pour caractériser la distorsion en régime de forme. Le taux global de distorsion harmonique (THD) et le facteur de puissance sont les plus employés pour quantifier respectivement les perturbations harmoniques et la consommation de puissance réactive [4].

I. 5.1 Le taux de distorsion harmoniques

Étude se limite au cas où la source de tension est sinusoïdale et où le courant absorbé par la charge est entaché de composantes harmoniques. Dans ces conditions, le taux global de distorsion harmonique est bien adapté pour quantifier le degré de pollution harmonique sur les réseaux électriques. Le THD s'exprime par rapport à la fréquence fondamentale et caractérise l'influence des harmoniques sur l'onde de courant déformée. Il est donné par l'expression suivante

$$THD(\%) = \sqrt{\frac{\sum_{i=2}^n i_{ci}^2}{i_{c1}}} \quad (I.12)$$

Avec :

i_{c1} La valeur efficace du courant fondamental et i_{ci} les valeurs efficaces des différentes harmoniques du courant.

Le domaine des fréquences qui correspond à l'étude des harmoniques est généralement compris entre 100 et 2000 Hz. Soit de l'harmonique de rang 2 jusqu'à l'harmonique de rang 40. Il est à signaler aussi que l'amplitude des harmoniques décroît généralement avec la fréquence. [5], [4].

I. 5.2 Le facteur de puissance

En présence des harmoniques, la puissance apparente S est composée de trois parties : active P , réactive Q et déformante D . Son expression est donnée par l'équation suivante :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (\text{I.13})$$

La puissance réactive Q est associée au courant fondamental. La puissance déformante D est due aux harmoniques de courant avec

$$D = 3E\sqrt{I_c^2 - I_{c1}^2} \quad (\text{I.14})$$

Où I_c est la valeur efficace du courant de la charge. Pour un signal sinusoïdal le facteur de puissance F_p est égal au quotient de la puissance active p par la puissance apparente S :

$$F_p = \frac{p}{s} = \frac{p}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (\text{I.15})$$

Le facteur de puissance sera toujours inférieur à 1, en posant:

$$P = 3EI_{c1} \cos \varphi \quad (\text{I.16})$$

On aura

$$F_p = \frac{I_{c1}}{I_c} \cos \varphi = F_{dis} \cos \varphi \quad (\text{I.17})$$

Où F_{dis} représente le facteur de distorsion. Il vaut 1 lorsque le courant est parfaitement sinusoïdal et il décroît lorsque la déformation de l'onde s'accroît. φ représente le déphasage entre le courant fondamental et la tension. Afin d'éviter les désagréments causés par la présence de courants et de tensions harmoniques dans le réseau, des normes sont imposées aux

utilisateurs.[5],[4] .

I.6 Normes et recommandations :

De nombreux organismes nationaux et internationaux imposent des limites sur l'injection des courants harmoniques afin d'assurer une qualité du réseau de distribution. D'autres ne précisent que les niveaux de courant des harmoniques exprimés en pourcentage du fondamental à ne pas dépasser. Les équipements électriques doivent fonctionner sans dégradation face à des phénomènes perturbateurs, en particulier ceux de basses fréquences tels que les harmoniques de tension du réseau. Rappelons que le taux de distorsion en tension THD consécutif à l'émission de courants harmoniques dépend de l'impédance de court-circuit du réseau d'alimentation d'énergie au point de raccordement. De plus, l'électricité est désormais un produit, ainsi le fournisseur d'énergie a une responsabilité vis-à-vis des dommages possibles causés par un excès d'harmoniques. Pour garantir un niveau de qualité de l'énergie satisfaisant et une bonne cohabitation entre les sources polluées et les charges polluées, l'ensemble des distributeurs et des utilisateurs est amené à respecter plusieurs normes et recommandations qui définissent les règles relatives à la Compatibilité Electromagnétique : [6], [7]

- au niveau international par la CEI (Commission Electrotechnique Internationale) ou IEC (International Electrotechnical Commission),
- au niveau européen par la CENELEC (de Comité Européen Normalisation Electrotechnique),
- au niveau Français par l'UTE (Union Technique de l'Electricité) et le CEF (Comité Electrotechnique Français).

- au niveau nord Américain par le standard IEEE 519.

La CEM correspond à la capacité d'un dispositif, équipement ou système, à fonctionner de manière satisfaisante dans son environnement électromagnétique sans introduire de perturbations électromagnétiques intolérables pour tout ce qui se trouve dans cet environnement (CEI 60050-161). Les directives CEM s'applique à tous les appareils électriques et/ou électroniques susceptibles d'être affectées par ces perturbations. Il est à noter que tout appareil doit être conforme aux normes d'immunité et d'émission avant d'être mis en vente sur le marché européen et doit porter la marque CE (Communauté Européenne).

Un positionnement des différentes définitions en fonction du niveau de perturbation est illustré sur le graphique de la figure 1.4.

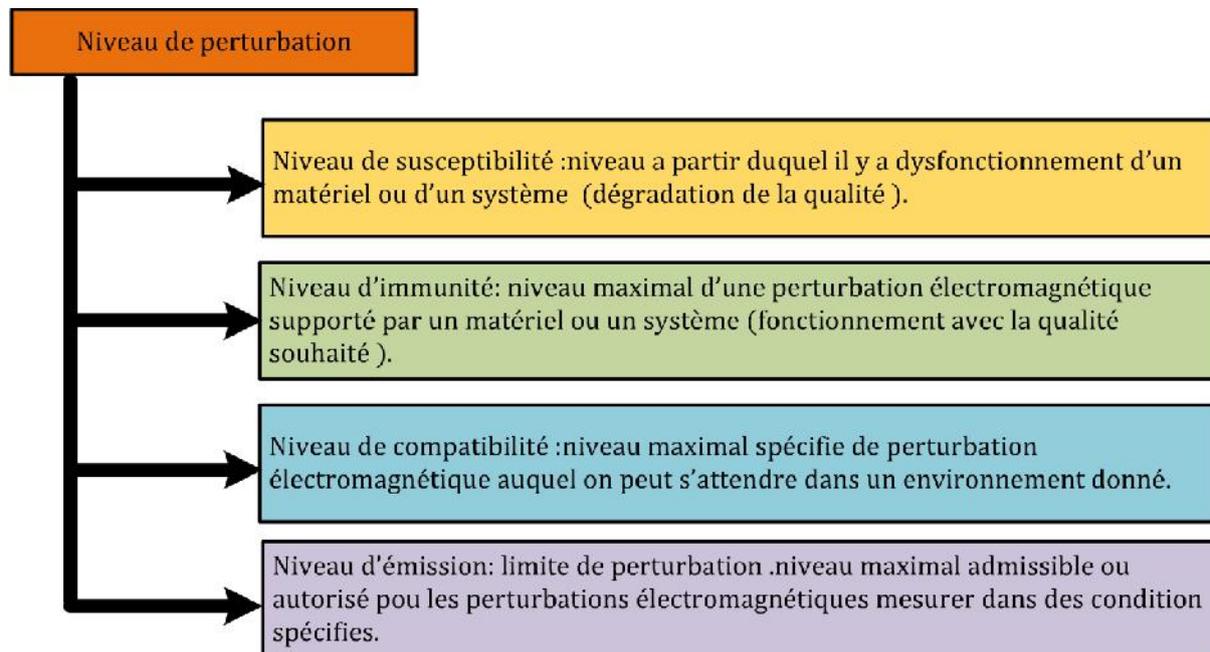


FIG. I.4 - Les différents niveaux de perturbations.

Les principales normes en matière de pollution harmonique basse tension sont au niveau international la CEI 61000, au niveau européen la NF EN 50160 et au niveau Français la NF C15-100. [6], [7]

I.6.1 Norme internationale CEI 61000

Elle se rapporte à la compatibilité électromagnétique (CEM) dont certaines parties ont été rendues obligatoires dans l'union européenne et retranscrite dans les droits nationaux sous l'appellation NF EN 61000. Cette norme CEI est décomposée en six chapitres [6]:

- Partie 1 : généralités
- Partie 2 : environnement
- Partie 3 : limites
- Partie 4 : techniques d'essai et de mesure
- Partie 5 : guide d'installation et d'atténuation
- Partie 6 : normes génériques

Dans celle-ci il est possible d'extraire les chapitres concernant les niveaux de compatibilité, d'émission et d'immunité.

I.6.2.Niveau de compatibilité**a. Pour les réseaux publics**

- CEI 61000-2-2 : cette norme fixe les limites de compatibilité pour les perturbations conduites basse fréquence et la transmission de signaux sur les réseaux publics d'alimentation basse tension. Les phénomènes perturbateurs incluent les harmoniques (tableau 1.1), inter-harmoniques, fluctuations de tension, creux de tension, déséquilibres de tension transitoires, etc [6], [7]

Harmoniques impairs non multiples de 3		Harmoniques impairs multiples de 3		Harmoniques pairs	
Rang	Taux (%)	Rang	Taux (%)	Rang	Taux (%)
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	$0.2+1.3*25/h$				

Tableau I.1 Niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles sur les réseaux publics basse tension (norme CEI 61000-2-2)

b- pour les réseaux industriels

- CEI 61000-2-4 : cette norme fixe les limites de compatibilité pour les réseaux industriels et non publics basse tension et moyenne tension, à l'exclusion des réseaux de navires, des avions, des plate formes offshore et des installations ferroviaires (Tab.1.2).[6], [7]

Rang harmonique	Classe1 : matériels et systèmes sensibles	Classe 2 : réseaux industriels	Classe 3 : réseaux industriels perturbé
2	2	2	3
3	3	5	6
4	1	1	1.5
5	3	6	8
6	0.5	0.5	1
7	3	5	7
8	0.5	0.5	1
9	1.5	1.5	2.5
10	0.5	0.5	1
11	3	3.5	5
13	0.2	0.2	1
Pair, >10	3	3	4.5
15	0.3	0.3	2
17	2	2	4
19	1.5	1.5	4
21	0.2	0.2	1.75
Impair, >21 et =3h	0.2	0.2	1
23	1.5	1.5	3.5
25	1.5	1.5	3.5
Impair, >21 et 3h	0,2+12,5/h	0,2+12,5/h	5*(11/h)1/2
THD	5%	8%	10%

Tableau I.2 : Taux (en % de V1) des tensions harmoniques acceptables (CEI 61000-2-4).

Définitions des classes :

Classe1 : matériels et systèmes sensibles, elle s'applique seulement aux réseaux basses tensions protégées avec des niveaux de compatibilités plus bas que ceux des réseaux publics.

Classe 2 : réseaux industriels, elle s'applique au réseau interne et au point de livraison du distributeur. Les niveaux sont les mêmes que ceux des réseaux publics.

Classe 3 : réseaux industriels perturbés, elle s'applique seulement au réseau interne et les niveaux sont supérieurs à ceux de la classe 2.

I.6.3. Niveau d'émissions

a. Courant appelé par les appareils 16 A par phase

- CEI 61000-3-2 : cette norme spécifie les limites pour les émissions de courant harmonique des matériels individuels raccordés aux réseaux publics pour les appareils consommant moins de 16 A par phase. Le tableau 1.3 indique les limites d'émission pour ces appareils faisant partie de la classe A, c'est-à-dire autres que les outils portatifs, appareils d'éclairage et appareils ayant un courant d'entrée à forme d'onde spéciale dont la puissance active est inférieure à 600W.[6], [7]

Rang harmonique	Courant harmonique maximal autorisé (A)
2	1,08
3	2,30
4	0,43
5	1,14
6	0,30
7	0,77
8 h 40	0,23*8/h
9	0,40
11	0,33
13	0,21
15 h 39	0,15*15/h

Tableau I.3 : Limites d'émission de courants harmoniques des appareils basse tension de courant inférieur à 16A et de classe A.

b. Courant assigné supérieur à 16 A

- CEI 61000-3-4 : cette norme spécifie les limites pour les émissions de courant harmonique des équipements individuels d'intensité assignée supérieure à 16 A et jusqu'à 75 A (tableau 1.4). Ces limites s'appliquent aux réseaux publics de tensions nominales entre 230V (monophasée) et 600V (triphase).

Rang harmonique	Courant harmonique en % du fondamental
3	21.6
5	10.7
7	7.2
9	3.8
11	3.1
13	2
15	0.7
17	1.2
19	1.1
21	0,6
23	0.9
25	0.8
27	0,6
29	0.7
31	0.7
33	0,6
Pair	0,6 ou 8/h

Tableau 1.4 : Exemple de limitation des émissions de courants harmoniques (CEI 61000-3-4)

I.6.4.Niveau d'immunité :

- CEI 61000-4-13 : cette norme donne les essais d'immunité basse fréquence aux harmoniques et inter-harmoniques incluant les signaux transmis sur le réseau électrique alternatif. Le tableau 1.5 donne les taux des harmoniques en tension à utiliser pour vérifier l'immunité des appareils pour les matériels et systèmes sensibles (classe 1) et les réseaux industriels (classe 2).

Rang harmonique	Classe1 : matériels et systèmes sensibles	Classe 2 : réseaux industriels
3	8	8
5	8	12
7	6.5	10
9	2.5	4
11	5	7
13	4.5	6
15	-	3
17	3	5
19	2	5
21	-	2
23	2	4
25	2	4
27	-	2
29	1.5	4
31	1.5	3

Tableau 1.5 : Taux des harmoniques en tension à utiliser pour vérifier l'immunité des appareils (CEI 61000-4-13)

I.6.5. Normes et recommandations européennes sur la qualité des réseaux NF EN 50160

Elles définissent les principales caractéristiques de la tension fournie au point de livraison du client pour un réseau public basse tension, et en particulier les niveaux de compatibilité électromagnétiques des tensions harmoniques (ceux de la classe 2 du tableau 1.2). Elle caractérise la qualité de la tension fournie par le réseau public de distribution basse tension dans des conditions normales l'exploitation. Ces critères de perturbation de l'énergie apportée par le réseau et constatable au poste de livraison du client. [6], [7]

I.6.6 IEEE 519 (Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems – USA)

L'IEEE définit les exigences et recommandations pratiques pour le contrôle des harmoniques dans les systèmes électriques de puissance. Cette norme s'applique aussi bien aux fournisseurs qu'aux utilisateurs et couvrent toutes les plages de puissance. Dans ce

standard, les limites sont données par rapport au quotient des courants de court-circuit au point de raccordement du réseau et du courant de charge fondamental. La norme IEEE 519-1992 recommande notamment une distorsion harmonique totale de tension inférieure à 5% pour les systèmes de moins de 69KV et une distorsion harmonique individuelle de tension inférieure à 3%. [6], [7]

Conclusion

Le contenu de ce chapitre à été concerné aux notions sur les charges polluantes. On trouve que les charges non linéaires sont les principales sources polluantes du réseau électrique et nous avons illustré les perturbations des harmoniques et leurs caractéristiques, leurs origines, et leurs effets sur la qualité de l'énergie électrique soit en courte terme ou long terme. Les perturbations engendrées par les charges peuvent être atténuées avec des techniques. Dans le deuxième chapitre on va présente les techniques de filtrage électrique pour réduire les harmoniques indésirables enfin les normes.

Chapitre II

Technique de filtrage électrique

II.1 Introduction

Le développement de l'électronique de puissance et l'augmentation des puissances mises en jeu ainsi que la souplesse de l'utilisation des semi-conducteurs, a encouragé les électrotechniciens à entreprendre d'importantes associations des convertisseurs statiques de puissance à des machines électriques. Ces dispositifs sont généralement des charges non linéaires, qui absorbent un courant non sinusoïdal et se comportent comme des générateurs d'harmoniques. De plus, elles consomment parfois de l'énergie réactive. Par conséquent, la forme d'onde du courant de la source perd sa forme sinusoïdale et on obtient également une dégradation du facteur de puissance. Par ce fait, les distributeurs d'énergie électrique se voient donc obligés d'imposer des normes et de se protéger contre ces perturbations. Afin de réduire les harmoniques au niveau du réseau électrique, nous proposons dans ce chapitre les techniques de filtrage électrique.

II.1 1 Etat de l'art des filtres actifs parallèles :

De plus en plus l'expansion de l'emploi dans l'industrie des récepteurs électriques, sont des charges déformantes (non linéaires) à base de l'électronique de puissance dans diverses applications, comme la commande électrique des moteurs, les alimentations de secours de puissance, le chauffage par induction électrique, les applications dédiées la traction électrique, la compensation des harmoniques, etc. Ils absorbent des courants non sinusoïdaux et ceux-ci, compte tenu des impédances des circuits, déforment l'onde sinusoïdale de courant et tension, c'est la perturbation harmonique des réseaux. Ce phénomène touche l'ensemble des secteurs industriel, telles que les redresseurs, les gradateurs et domestique comme le matériel informatique, les appareils de climatisation ou encore les éclairages à base de tubes fluorescents.

Cependant La technologie des semi-conducteurs a connu de nombreuses avancées ces trois dernières décades, d'où l'émergence de composants rapides et puissants, avec une multitude d'applications tels que le filtrage actif qui a joué un rôle prépondérant dans la fourniture d'une énergie électrique propre et de haute qualité. Depuis la mise en oeuvre de leur principe de base en 1971, les filtres actifs de puissance ne cessent d'investir les différents axes du génie électrique, depuis de la dépollution harmonique des réseaux de distribution, en passant par la

compensation des creux de tension et des déséquilibres, jusqu'à la production décentralisée à partir des énergies renouvelables. Ceci est justifié d'une part par la grande flexibilité des filtres actifs, sous leurs structures variées (parallèle, série, hybride, et la combinaison parallèle-série ou série-parallèle) aux différentes stratégies de commande classiques (MLI, hystérésis,...), optimisées (mode glissant, prédictive,...), et intelligentes (réseaux de neurones, logique floue, algorithmes génétiques,...), d'autre part, à leur bonne adaptation avec les milieux dans lesquels ils sont incorporés, notamment ceux consacrés aux systèmes à énergie renouvelable. [20-22]. Un état de l'art est présenté afin de nous situer jusqu'ou les recherches dans ce domaine ont abouti.

Les niveaux d'harmoniques dans les réseaux électriques ont été bien étudiés par les distributeurs d'énergie et ont fait l'objet d'un grand nombre de travaux de recherche [23-25]. Dans [24], les résultats d'un projet de recherche concernant la mise au point d'un système de détection des niveaux d'harmoniques dans certains réseaux de distribution appartenant à l'AEP (American Electric Power system) ont été présentés. Les champs de mesure ont été établis afin de rapporter les niveaux d'harmoniques dans trois classes de systèmes de distribution: résidentielle, commerciale et industrielle. L'analyse des informations collectées a fourni un aperçu sur la distorsion harmonique dans un système de distribution réel.

Dans [25], les auteurs ont présenté Comme première solution aux problèmes d'harmoniques, les filtres passifs shunt, ils étaient largement utilisés. D'autre part, ils contribuaient dans la correction du facteur de puissance du réseau d'alimentation. Toutefois, ces derniers présentaient un nombre assez important d'inconvénients :

Les caractéristiques de filtrage sont fortement liées à l'impédance de source, cette dernière n'étant pas connue avec précision et variant beaucoup avec la configuration du système ;

- Les filtres passifs shunt constituent un chemin pour les courants harmoniques provenant de la source. Dans le pire des cas, ces filtres entrent dans des résonances séries avec l'impédance de source ;
- A une fréquence spécifique, une antirésonance (résonance parallèle) prend lieu entre les filtres passifs parallèles et l'impédance de source, induisant ce qu'on appelle: l'amplification harmonique.

Les problèmes précités ont pénalisé l'emploi des filtres passifs comme palliatif au problème d'harmoniques, et ont d'un autre côté motivé le développement des filtres actifs de puissance comme solution plus prometteuse face à ce problème. A partir des années 70, Ces

derniers ont été étudiés pour la compensation de l'énergie réactive, de la séquence négative des courants et des harmoniques dans les systèmes industriels de puissance.

Le principe de base des filtres actifs parallèles a été originalement présenté par H.Sasaki et T. Machida en 1971 [26]. Comme montré dans la Fig. I.1, le filtre actif shunt est commandé de manière à façonner activement le courant de source ' i_s ' dans une forme sinusoïdale, en injectant le courant de compensation ' i_{FA} '. Les auteurs ont proposé une nouvelle méthode pour l'élimination des courants harmoniques basée sur le principe de compensation du flux magnétique dans le noyau du transformateur. Un circuit de commande extrait les composantes fondamentales du courant de la charge non-linéaire circulant dans l'enroulement secondaire (n_2), et génère les courants harmoniques qui, après une amplification appropriée, seront injectés dans l'enroulement tertiaire (n_3) du transformateur.

Ceci produit l'annulation du flux harmonique dans le noyau, et résulte uniquement en des courants à fréquence fondamentale dans l'enroulement primaire (n_1). Cette technique est considérée comme l'archétype des filtres actifs parallèles. Comme un amplificateur linéaire a été utilisé afin de générer les courants de compensation, l'implantation de cette technique n'était pas réalisable due à la faible efficacité.

En 1976, L. Gyugyi et E. C. Strycula [27] ont présenté une famille de filtres actifs parallèles et séries, et ont établi le concept de filtres actifs à base d'onduleurs MLI constitués de transistors de puissance. Cependant, ces filtres actifs n'ont pu être réalisés dans des systèmes réels vu que les dispositifs à forte puissance et à fréquence élevée étaient non disponibles lors des années 70.

Le travail est considéré être un effort pionnier dans la mesure où il expose les principes fondamentaux de la théorie des filtres actifs. Une autre étude s'est développée autour de ces mêmes concepts fondamentaux, mais orientée vers de nouvelles techniques de commande. Avec le développement remarquable et le progrès au niveau de la fréquence de commutation et la capacité des semi-conducteurs de puissance dans les années 80, les filtres actifs à base d'onduleurs MLI ont vu le jour dans des applications pratiques dans des systèmes de puissance réels.

C'est en 1982, qu'a eu lieu la 1ère application pratique du 1er filtre actif de puissance. Ce dernier était parallèle et consistait en un onduleur MLI de 800 kVA à source de courant et à base de thyristors GTO.

Les premiers travaux sur les filtres actifs discutèrent les caractéristiques de compensation seulement dans le cas des régimes permanents. Le circuit de calcul des courants de compensation était simple, et uniquement des caractéristiques de compensation idéales pouvaient être atteintes. Cependant, dans le cas des régimes transitoires comme ceux causés par des charges fluctuantes, la conception des circuits de compensation devenait plus difficile. En 1984, H. Akagi, Y. Kanazawa, et A. Nabae, ont introduit le concept de la théorie de la puissance instantanée réactive [13] qui considérait un système triphasé arbitraire de tensions et de courants en tenant compte de leurs composantes harmoniques. Les courants et tensions instantanés étaient représentés par des vecteurs d'espace instantanés dans le plan $a-bc$, ayant des vecteurs fixés sur le même plan, séparés l'un de l'autre de $2/3$ rad. Ces vecteurs d'espace étaient par la suite transformés dans le plan orthogonal - de Concordia. Les puissances instantanées active et réactive étaient décomposées en composantes AC et DC dans ce référentiel. Les composantes AC reflétaient les courants réactifs et harmoniques dans la charge non-linéaire. Le calcul des puissances instantanées active et réactive se faisait en temps réel (on-line), et les composantes AC étaient extraites en utilisant un filtre approprié.

La conception du filtre d'extraction a un effet significatif sur les caractéristiques de compensation du filtre actif. Avec un bon choix de la fréquence de coupure, un filtre actif peut être conçu pour éliminer le courant harmonique ou le courant réactif, ou les deux à la fois. Toutefois, cette théorie était conceptuellement limitée aux systèmes triphasés démunis de courants de séquence zéro. [28]

Une théorie de puissance instantanée réactive plus généralisée, valide pour des systèmes de puissance sinusoïdaux ou non sinusoïdaux, équilibrés ou déséquilibrés, avec ou sans courants de séquence zéro, été proposée plus tard par F. Z. Peng et J. S. Lai . Les filtres actifs commandés en se basant sur cette nouvelle théorie généralisée ont fourni de meilleures caractéristiques de compensation aussi bien pour les régimes transitoires qu'en régime permanent.

En 1987, L. A. T. Moràn, P. D. Ziogas, et G. Joos ont introduit un système de filtre actif parallèle à base d'un onduleur de tension triphasé à MLI, servant comme compensateur synchrone de puissance réactive (*Synchronous Solid-State Var Compensator SSSVC*). Le système proposé a permis la compensation des montées et des descentes du facteur de puissance avec un temps de réponse optimisé. La MLI a été utilisée pour réduire les tailles des composants réactifs.

En même temps, des problèmes relatifs à l'emploi des filtres actifs purs ont été soulignés:

- Il était difficile de réaliser des onduleurs MLI de forte puissance avec une réponse rapide

du courant et des pertes réduites comme circuit principal des filtres actifs ;

- Le coût initial était élevé si comparé avec celui des filtres passifs; aussi, les filtres actifs étaient moins efficaces que ceux passifs (les formes d'ondes obtenues avec filtrage passif étaient plus sinusoïdales que celles fournies par filtrage actif) ;
- Les courants injectés par les filtres actifs parallèles pouvaient circuler dans les filtres passifs et dans les capacités raccordés en parallèle au système de puissance.

Par conséquent, l'attention s'est réorientée vers les systèmes combinés de filtres actifs et de filtres passifs raccordés en parallèle, qui furent dénommés 'filtres hybrides parallèles'. Dans [16], M. Takeda, K. Ikeda, & Y. Tominaga ont présenté un nouveau schéma de compensation utilisant un filtre actif parallèle combiné avec un filtre passif passe-haut conventionnel. En répartissant leurs rôles de telle sorte que le filtre actif absorbe les courants harmoniques d'ordres moins élevés, et que le filtre passif absorbe ceux d'ordres plus élevés [22], le filtre actif pouvait remplir sa fonction avec un dimensionnement réduit, ce qui a amené à un système relativement économique. Une fonction principale a été introduite dans son circuit de commande révélant la caractéristique intéressante qu'un filtre actif pouvait être utilisé comme un moyen de prévention contre toute résonance parallèle produite par les filtres passifs et les équipements du système de puissance. Ceci a rendu possible la réalisation d'un filtre idéal pour une large gamme d'harmoniques sans crainte d'aucune amplification due aux résonances parallèles. Sur le plan expérimental, cette technique a été vérifiée sur un cycloconvertisseur (2×2800 kW), étant compensé avec un filtre actif de 900 kVA et un filtre passif de 6600 kVA .

En 1988, F. Z. Peng, H. Akagi et A. Nabae ont proposé un système combiné de filtre passif parallèle et de filtre actif série de faible puissance Ce dernier a fourni des caractéristiques de compensation meilleures, et à moindre coût. Ce système fut validé sur un pont triphasé à thyristors de 20 kVA, étant compensé par un filtre passif parallèle de 10 kVA, et par un filtre actif série de 0.3 kVA dans [17], et de 0.45 kVA dans [18]. La vocation du filtre actif série n'était pas essentiellement la compensation des harmoniques causés par le pont redresseur, c'était plutôt l'amélioration des caractéristiques de filtrage des filtres passifs et la résolution des problèmes de résonance liés à ces derniers. Il a été montré que le filtre actif

série agit comme une résistance destinée à éliminer les antirésonances entre le filtre passif parallèle et l'impédance de la source d'alimentation, et agit également comme une résistance de blocage dédiée à prévenir les courants harmoniques, produits par la tension harmonique de source, de circuler dans les filtres passifs.

Une autre configuration de filtre hybride est celle proposée par H. Fujita et H. Akagi dans [1]. La configuration se basait sur la connexion série d'un filtre actif série et d'un filtre passif, le tout placé en parallèle entre la source d'alimentation et la charge polluante. Comme le filtre actif servait seulement à l'amélioration des caractéristiques de filtrage du filtre passif, l'avantage apporté par cette nouvelle conception était la réduction des kVA du filtre actif, et le surpassement des inconvénients des filtres passifs fonctionnant seuls, aboutissant ainsi à une solution plus pratique et plus économique. Aussi, les auteurs ont conclu que le taux du filtre actif (pourcentage du rapport entre la puissance apparente du filtre actif et celle de la charge non-linéaire) présentait une décroissance inversement proportionnelle avec le facteur de qualité du filtre passif.

Une nouvelle topologie, introduite par M. Rastogi, N. Mohan, et A. E. Edris [2], a permis la mise en oeuvre pratique des filtres hybrides à taux réduit dédiés aux charges de fortes puissances. Un filtre passif en série avec un onduleur fonctionnant en mode contrôleur de courant a été connecté en parallèle au système de puissance. Il a été montré que le filtre proposé avait un taux de seulement 9 % si comparé à un filtre actif agissant seul et approximativement la moitié d'un filtre hybride série. Aussi, les auteurs ont affirmé que la réduction du taux des convertisseurs constituant un filtre actif n'était possible que si un filtre passif était connecté dans une configuration hybride. En outre, une comparaison entre les filtres passifs, actifs purs, et hybrides était fournie.

Dans [3], P. T. Cheng, S. Bhattacharya, et D. M. Divan ont présenté un filtre actif hybride parallèle. Le filtre actif consistait en un onduleur à onde-carrée en série avec un filtre passif LC, afin de fournir une isolation source-charge aux fréquences dominantes (5ème et 7ème) et d'obéir à la norme standard IEEE 519 concernant les applications fortes puissances. Il a été également montré que les filtres actifs de faibles taux (1% – 2%) apportaient pratiquement une solution économique et viable pour des charges non-linéaires au dessus de 100 MW.

L'apparition des premiers filtres actifs à nombre multiple de convertisseurs MLI à source de tension fut en 1986 [4]. Le filtre actif placé en série avec un filtre passif inductif consistait à la mise en série de quatre onduleurs de tension triphasés MLI. Accordant plus

d'attention pour les régimes transitoires, la théorie de la puissance réactive était appliquée pour la conception du circuit de commande des courants de compensation et celui de régulation de la tension capacitive continue alimentant les convertisseurs du filtre actif.

Les auteurs ont montré que l'ordre ainsi que la fréquence de coupure du filtre passe-bas utilisé pour le calcul des puissances instantanées de référence (p^* et q^*) influent sur les caractéristiques de compensation surtout lors des régimes transitoires. Quant à l'étude d'un filtre actif série à convertisseurs multiples, elle fut proposée en 1995. Deux convertisseurs étaient utilisés: le premier en série avec le réseau d'alimentation tandis que l'autre était connecté en série avec un filtre passif parallèle. L'objectif était la réduction des distorsions de la tension et l'élimination des courants harmoniques au point de raccordement commun. Dans L. Morán *et al.* montrèrent une autre structure de filtre actif à convertisseurs MLI multiples. Il s'agissait d'une structure à deux onduleurs de tension montés en cascade qui s'adaptait bien avec des charges polluantes à forte puissance et qui offrait l'avantage de compenser à la fois les courants harmoniques et l'énergie réactive. Le 1er onduleur, connecté à proximité de la charge non-linéaire, servait à la compensation de l'énergie réactive et des composantes des courants harmoniques basses fréquences. Le second, était destiné à absorber la composante harmonique haute fréquence. C'est pour cette raison que le 1er convertisseur était à base de GTO alors que le 2ème était à base d'IGBT.

Une contribution similaire proposée par S. Kim et P. N. Enjeti consistait à utiliser deux onduleurs de tension se partageant la même source d'alimentation DC. Le 1er, à base d'IGBT muni d'un filtre LC en sortie, était chargé de maintenir la tension de source au point de raccordement commun, et de compenser tout déficit dans la puissance réactive. Le second, à base de MOSFET, avait pour rôle l'élimination des composantes harmoniques du courant.

La particularité qu'avait cette structure est que le filtre actif était connecté via un transformateur d'isolement tel que l'enroulement primaire se fermait sur la source et sur le 1^{er} onduleur à IGBT, tandis que l'enroulement secondaire était branché entre les bornes du 2^{ème} onduleur à MOSFET. L'objectif était de limiter les bruits, d'avoir un fonctionnement plus stable et une bonne adaptation aux variations brusques de la charge. Aussi, l'alimentation DC était réduite par rapport à celle des filtres actifs conventionnels.

Le 1er filtre actif monophasé présentant la combinaison série-parallèle fut introduit par S. Moran en 1989 [28], et qui fut dénommé: Régulateur/Conditionneur de Tension de Ligne (*Ligne Voltage Regulator/Conditioner* LVRC). Le filtre actif série était dédié à assurer

l'isolation entre les charges sensibles aux harmoniques, situées en aval du LVRC, des charges non-linéaires (productrices d'harmoniques) placées en amont, corrigeant ainsi toute distorsion de la tension d'entrée. En outre, il servait à la régulation de la tension continue, à élément de stockage inductif, commune aux deux filtres. Quant au filtre actif parallèle, il s'occupait de la génération des courants harmoniques demandés par les charges connectées à la sortie, reflétant ainsi, à la source, une charge linéaire.

H. Fujita et H. Akagi présentèrent une nouvelle configuration de la combinaison série-parallèle et parallèle-série d'un filtre actif triphasé à élément de stockage capacitif, commun aux deux filtres actifs, avec appel à des filtres passifs connectés en parallèle, en aval de la combinaison qui fut appelée: Conditionneur unifié de la qualité de l'énergie (*Unified Power Quality Conditioner UPQC*). Le filtre série assurait la majorité des tâches liées à la fonction filtrage actif, notamment l'élimination des creux et des déséquilibres de tension, et forçait le filtre passif à absorber les courants harmoniques produits par la charge non-linéaire. Le filtre actif parallèle performait la régulation de la tension continue, induisant ainsi à une réduction significative dans la taille du condensateur DC.

P. G. Barbosa, J. A. Santisteban, et E. H. Watanabe ont proposé une autre façon de combiner des filtres actifs parallèles et séries. Le système consistait en un filtre actif parallèle connecté au côté AC d'un redresseur, et un filtre actif série relié au côté DC. Le filtre actif parallèle était commandé de sorte à éliminer les courants harmoniques des lignes AC.

Quant au filtre actif série, il était destiné à annuler les ondulations de la tension redressée. Dans d'autres travaux antérieurs, on a connu des filtres actifs qui étaient placés uniquement sur le côté DC de la charge polluante. En réalité ces derniers étaient essentiellement conçus pour la compensation des courants et/ou tensions harmoniques engendrés par les convertisseurs à thyristors des systèmes haute tension continue 'HVDC' et des systèmes de traction.

Une application intéressante d'un filtre actif utilisé comme rééquilibrant de charge a été montrée par V. B. Bhavaraju et P. N. Enjeti dans Un filtre actif à base d'un convertisseur statique MLI AC/DC muni d'un circuit inductif de stockage d'énergie (convertisseur de courant), était désigné pour agir comme un rééquilibrant de charges déséquilibrées. La composante de séquence négative du courant de charge était continuellement mesurée, et un égal en amplitude mais opposé en phase de cette quantité était instantanément injecté par le filtre actif au point de raccordement commun, ceci afin d'atteindre l'objectif d'un

rééquilibrage continu de charges déséquilibrées. un filtre actif triphasé, motivé par le développement d'un système à source de courant dédié au circuit d'excitation d'un générateur à reluctance variable, a été présenté. Le filtre actif, composé d'un onduleur de tension triphasé alimenté par une source capacitive continue, était connecté en parallèle à la source alternative à travers un transformateur d'isolement . Le convertisseur utilisait deux boucles de commande:

- Une boucle extérieure consacrée à la régulation de la tension du bus DC, et à la génération des courants de référence.
- Une boucle intérieure utilisant la commande en mode glissant pour la reproduction des courants du filtre actif en concordance avec les courants de référence.

Le 1er filtre actif à structure multiniveaux (plus de deux composants semi-conducteur par bras) fut proposé par V. Aburto *et al.* en 1997 Le filtre actif était à base d'un onduleur de tension trois niveaux à point neutre clampé (4 composants par bras). Ce dernier pouvait compenser les courants harmoniques et la puissance réactive dans des systèmes de distribution moyenne tension. Toutefois, l'étude n'était validée que par des travaux de simulation sous *MATLAB*. Dès lors, l'intérêt aux filtres actifs multiniveaux, en vue de leur application industrielle en moyenne et forte puissance, n'a cessé de s'intensifier.

En effet, en 1998 S. Round *et al.* proposèrent un filtre actif parallèle trois niveaux susceptible à dériver les harmoniques dans des sites commerciaux et industriels Il a été montré qu'un fonctionnement stable ne pouvait être atteint que si le filtre actif était connecté en aval des batteries de correction du facteur de puissance. Aussi, ils montrèrent que la topologie trois niveaux permet l'utilisation d'une inductance de sortie de plus petite valeur en comparant avec la topologie deux niveaux.

Puis en 2004, P.-C. Tan *et al.* étudièrent et expérimentèrent un filtre actif hybride cinq niveaux dédié à la compensation du déficit de puissance causé par des locomotives électriques de 25 kV, ces dernières étant à base de thyristors Le filtre actif consistait alternativement en un filtre parallèle cinq niveaux à structure cascade ou à point neutre clampé à topologie réduite, et en un filtre passif de faible taux. Le filtre actif était commandé par la commande hystérésis, et absorbait à la fois les distorsions harmoniques de faible ordre de la tension le long de la ligne, et fournissait une tension efficace de support. A son tour, le filtre passif absorbait les résonances harmoniques typiques à de tels systèmes de traction. Les résultats ont montré une croissance significative de la puissance transmise aux locomotives avec un

moindre investissement.

Ensuite, en 2005, T. Jin *et al.* ont exposé une multitude de topologies d'onduleurs de tension trois niveaux pouvant être appliquées comme filtres actifs. Ces topologies, initialement conçues afin de manipuler des courants bidirectionnels, étaient empruntées aux systèmes de commande des moteurs électriques, et de compensation de l'énergie réactive. Le résultat théorique, validé expérimentalement, a révélé qu'avec une structure appropriée, la chute de tension dans chaque interrupteur semi-conducteur pouvait être clampée à la moitié de la tension du bus continu. Ainsi, la tension supportée par chaque composant est réduite, ce qui entraîne le gain du coût du système entier. Par conséquent, on obtient la topologie la plus adaptée aux applications haute tension et forte puissance.

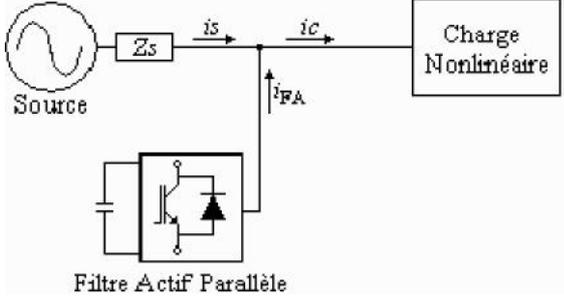
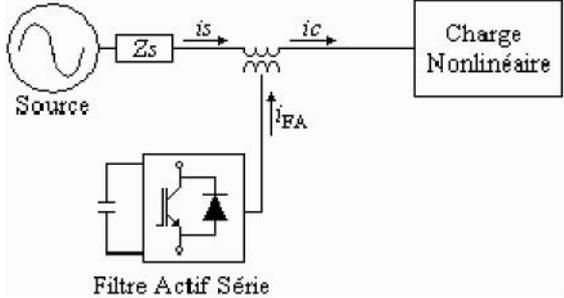
Une autre topologie de filtre actif trois niveaux différente de celles qui précèdent, est celle apportée par B.-R. Lin et T.-Y. Yang. L'ondeur utilisé était triphasé à deux bras seulement, sans diodes ou condensateurs clampés, et consistait à la mise en cascade de 03 onduleurs de tension à 04 composants actifs. Le modèle proposé, contenant deux boucles de commande, a permis l'élimination des harmoniques, la compensation de l'énergie réactive et la régulation de la tension du bus continu de l'ondeur.

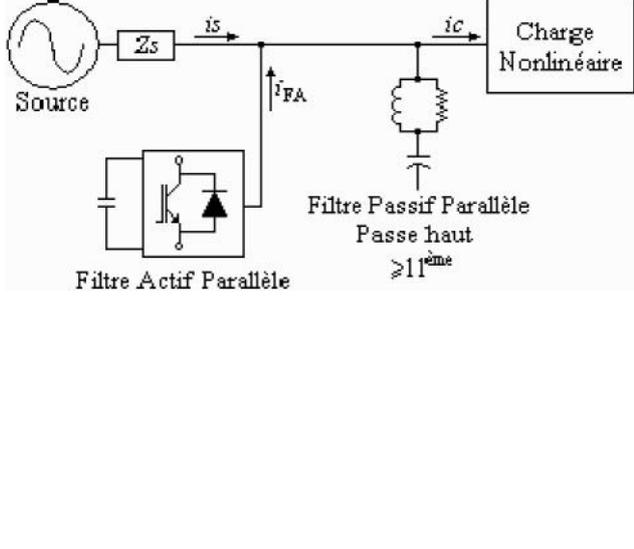
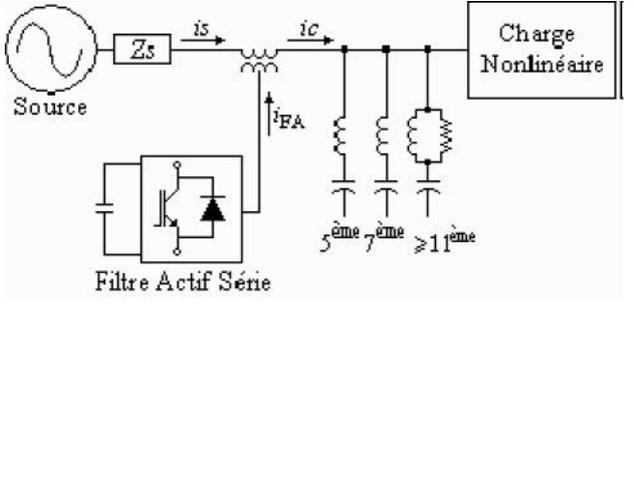
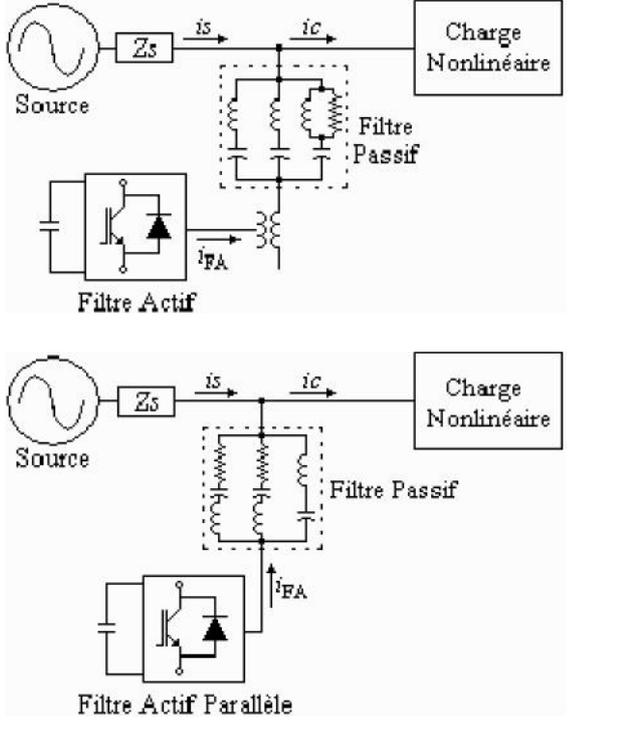
Une année plus tard, les mêmes auteurs ont optimisé leur structure précitée en présentant une nouvelle configuration d'ondeur trois niveaux à deux bras, 04 composants actifs et un condensateur par bras. Une 3ème boucle de commande a été ajoutée dans l'objectif d'atteindre l'équilibre dans la tension du point neutre. Là encore, le coût est moins élevé en comparant avec les onduleurs trois niveaux conventionnels, tout en offrant de meilleures qualités de filtrage, et en réduisant la contrainte de tension imposé aux semi-conducteur.

Enfin, dans [1], M. E. Ortúzar *et al.* présentèrent un filtre actif 81 niveaux. La configuration consistait à la mise en cascade de quatre onduleurs de tension monophasés en pont, à base d'interrupteurs à trois états différents. Les 81 niveaux de tension sont obtenus à partir de 3^4 combinaisons. L'avantage d'une telle structure est la faible fréquence de commutation des composants, et l'obtention de meilleures formes d'onde tension/courant.

Toutefois, il faut signaler l'inconvénient du surcoût. Avant de clôturer la présentation de cet état de l'art des filtres actifs, il est intéressant de mentionner la flexibilité de ceux-ci, d'une part avec les différents algorithmes de commande comme le mode glissant, la commande à base de flux, la commande prédictive et la commande adaptative et d'autre part avec les techniques intelligentes telles que les réseaux neuronaux, la logique floue, les algorithmes génétiques et les ondelettes.

Une récapitulation est illustrée par le tableau suivant :

Type	Configuration	Avantages/Inconvénients
<p>1. Actif Parallèle <i>Sasaki & Machida 1971 [11]</i> <i>Gyugyi & Strycula 1976 [12]</i></p>	 <p>Configuration: Source (Z_s) → i_s → i_c → Charge Nonlinéaire. Filtre Actif Parallèle (i_{FA}).</p>	<p>♣ Avantages: Elimination des courants harmoniques, compensation de l'énergie réactive, correction du facteur de puissance, rééquilibrage des courants de la charge non-linéaire.</p> <p>♣ Inconvénients: Coût et pertes élevés, limité aux charges de faible et moyenne puissance, risque d'écoulement des courants de compensation dans les filtres passifs raccordés au même réseau.</p>
<p>2. Actif Série <i>Gyugyi & Strycula 1976 [12]</i></p>	 <p>Configuration: Source (Z_s) → i_s → i_c → Charge Nonlinéaire. Filtre Actif Série (i_{FA}).</p>	<p>♣ Avantages: Isolation et absorption des tensions harmoniques, rééquilibrage et régulation des tensions alimentant la charge non-linéaire.</p> <p>♣ Inconvénients: Coût et pertes élevés, difficulté de protéger le filtre actif contre les surintensités, incapacité à contrôler l'énergie réactive.</p>

<p>3. Actif Parallèle & Passif Parallèle <i>Takeda et al.</i> 1987 [16]</p>		<ul style="list-style-type: none"> ♣ Avantages: Dimensionnement réduit du filtre actif destiné seulement aux basses fréquences harmoniques, applicabilité aux fortes puissances, régulation de l'énergie réactive, suppression des creux de tension des fours à arc et des cyclo-convertisseurs. ♣ Inconvénients: Les courants de compensation peuvent circuler dans les filtres passifs, les courants harmoniques peuvent transiter dans le filtre actif.
<p>4. Actif Série & Passif Parallèle <i>Peng et al.</i> 1988 [17,18]</p>		<ul style="list-style-type: none"> ♣ Avantages: Taux plus réduit du filtre actif destiné seulement à améliorer les caractéristiques de compensation du filtre passif, aucun risque de circulation d'harmoniques dans le filtre actif. ♣ Inconvénients: Difficulté à protéger le filtre actif contre les surintensités, incapacité à contrôler l'énergie réactive.
<p>5. Mise en série Actif & Passif <i>Fujita & Akagi</i> 1990 [19] <i>Rastogi et al.</i> 1995 [20]</p>		<ul style="list-style-type: none"> ♣ Avantages: Taux plus réduit du filtre actif destiné seulement à améliorer les caractéristiques de filtrage du filtre passif, aucun risque de circulation d'harmoniques dans le filtre actif, protection aisée du filtre actif contre les surintensités, pas de grande nécessité aux transformateurs de couplage. ♣ Inconvénients: Incapacité à contrôler l'énergie réactive. <p>6. Actif Parallèle Dédié aux 5ème et 7ème harmoniques <i>Cheng et al.</i> 1996 [</p>

<p>6. Actif Parallèle Dédié aux 5^{ème} et 7^{ème} harmoniques Cheng et al. 1996 [21]</p>		<ul style="list-style-type: none"> ♣ Avantages: Isolation source-charge aux fréquences dominantes (5^{ème} et 7^{ème}), obéissance à la norme standard IEEE 519, applicabilité aux charges de forte puissance, taux très réduits des filtres actifs (1% à 2%), moindre pertes par commutation en comparant avec les onduleurs MLI, et équilibre des puissances des bus continus des deux onduleurs.
<p>Moran 1989 [28]</p>		<ul style="list-style-type: none"> ♣ Avantages: Isolation d'harmoniques entre la charge sensible placée en aval et la charge non-linéaire placée en amont, régulation de la tension continue commune aux deux filtres actifs, correction des distorsions de la tension d'entrée. ♣ Inconvénients: Incapacité de rééquilibrage des courants de charge et de compensation du courant du neutre.

II.2 Solutions de dépollution des réseaux électriques

Deux types de solutions sont envisageables. La première consiste à utiliser des convertisseurs statiques moins ou peu polluants, tandis que la seconde consiste en la mise en œuvre d'un filtrage des composantes harmoniques. La première classe de solutions s'intéresse à la conception tandis que la seconde consiste à compenser les courants ou les tensions harmoniques. Deux groupes de solutions de dépollution pour compenser toutes les perturbations peuvent être distingués : les solutions traditionnelles et les solutions modernes. [9]

II.2.1 Solutions traditionnelles

Il s'agit notamment de mettre en œuvre les moyens suivants :

1. Stat compensateur : il s'agit d'une méthode de compensation utilisée pour relever le facteur de puissance,
2. - Filtre passif : le plus ancien pour le traitement des harmoniques de courant. Il consiste à piéger les courants harmoniques pour empêcher qu'ils ne se propagent dans le reste du réseau [9]

II.2.2 Solution moderne

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. [4]

Nous citerons trois topologies possibles de filtres actifs:

- ✓ **le filtre actif parallèle (FAP):** conçu pour compenser toutes les perturbations de courant comme les harmoniques, les déséquilibres et la puissance réactive.
- ✓ **le filtre actif série (FAS):** conçu pour compenser toutes les perturbations de tension comme les harmoniques, les déséquilibres et les creux de tension.
- ✓ **la combinaison parallèle - série actifs:** La combinaison parallèle -série actifs, aussi appelée **Unified Power Quality Conditioner (UPQC)**, solution universelle pour compenser toutes les perturbations en courant et en tension.[4],[1]

II.2.2.3 Filtre actif parallèle

Sur la figure II.6 apparaît le synoptique d'un filtre actif parallèle. Le filtre actif est constitué d'un onduleur de tension et d'un filtre inductif en sortie. Ainsi, l'inductance en sortie de l'onduleur donne la nature de source de courant au filtre actif. Dans le cas où le réseau alimente plusieurs charges polluantes, il est préférable d'utiliser un seul filtre actif pour toutes les charges car, dans ce cas, le coût du filtrage est moindre. Cependant, lorsque la

puissance des charges polluantes est élevée, la solution d'un filtre actif par charge s'avère nécessaire. Cette dernière méthode est bien sûr plus coûteuse mais elle possède l'avantage d'éviter que la stabilité des harmoniques vienne perturber le réseau dans le cas où un filtre actif est défectueux.

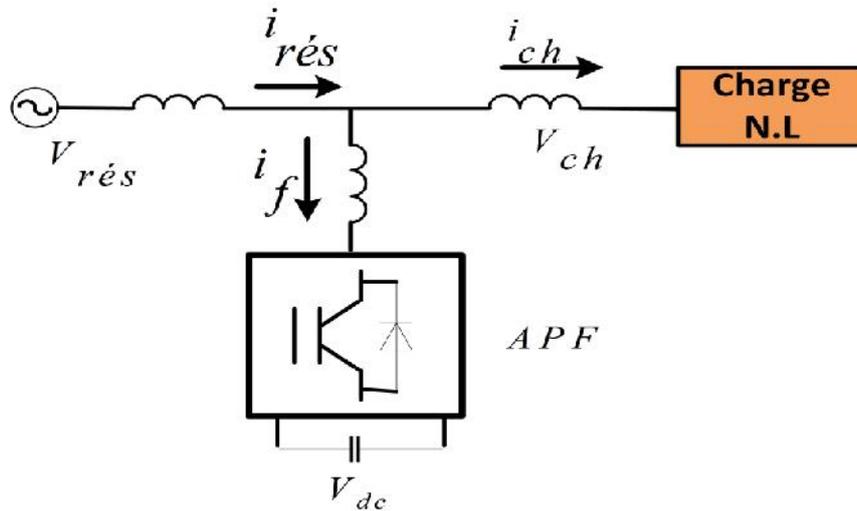


Figure. II.6- Filtre actif parallèle.

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

II.2.2.4 Filtre combiné parallèle-série (UPQC)

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

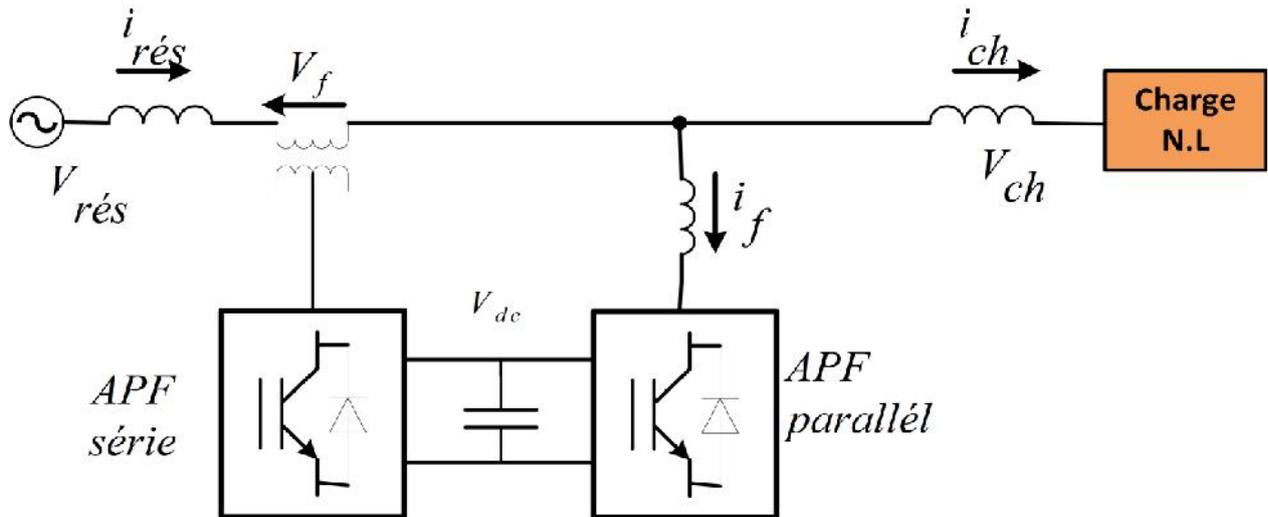


Figure. II.7- Filtre combiné parallèle-série (UPQC).

II.2.2.5 Filtre actif série avec un filtre passif parallèle

Une version moins chère de la structure précédente est illustrée par la figure 1.13 où un filtre actif série et un filtre parallèle passif sont exploités.

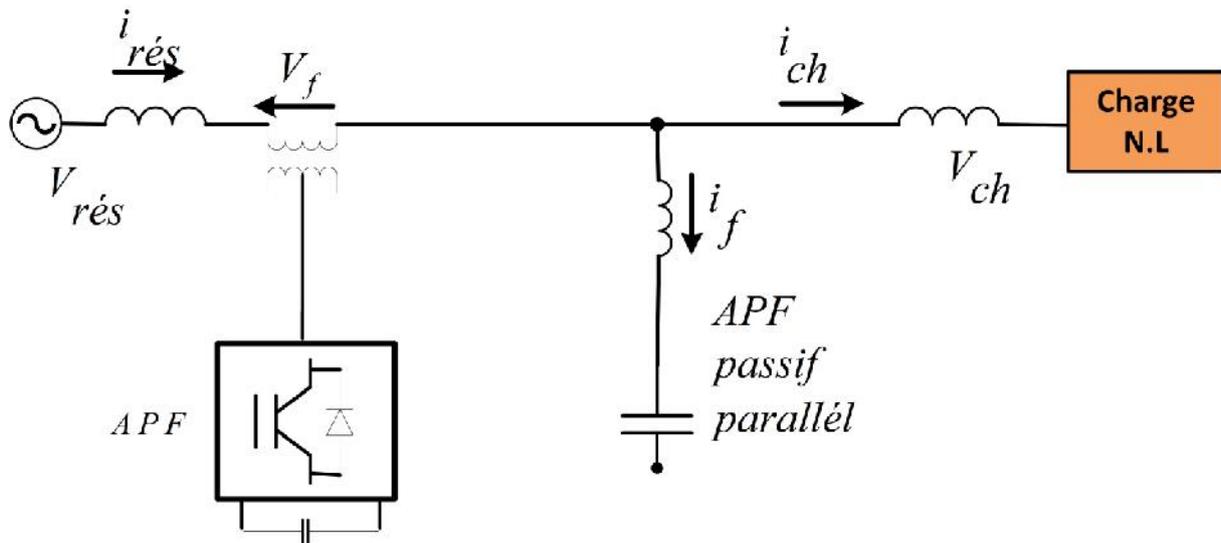


Figure. II.8- Filtre actif série avec un filtre passif parallèle

Principalement, le filtre série régule la tension au point PCC tandis que le filtre parallèle est réglé sur quelques harmoniques de courant (rangs inférieurs) qui doivent être supprimés. Cette topologie a la possibilité de réduire les harmoniques de tension et de courant à un prix raisonnable.[6]

II.2.2.6 Filtre actif hybride

Connecté avec ou sans transformateurs au réseau, le filtre actif hybride (Figure II.9) est constitué d'un filtre passif connecté directement en série avec le filtre actif, ce qui entraîne une diminution de la tension du bus continu comparativement à celle d'un filtre actif pur et une réduction du dimensionnement du filtre hybride. En plus, le filtre passif évite les oscillations dues à la commutation (HF) car il présente une haute impédance à cette fréquence. Cependant, la mise en place d'une inductance à l'entrée de la charge non linéaire est indispensable pour le bon fonctionnement du filtre hybride.

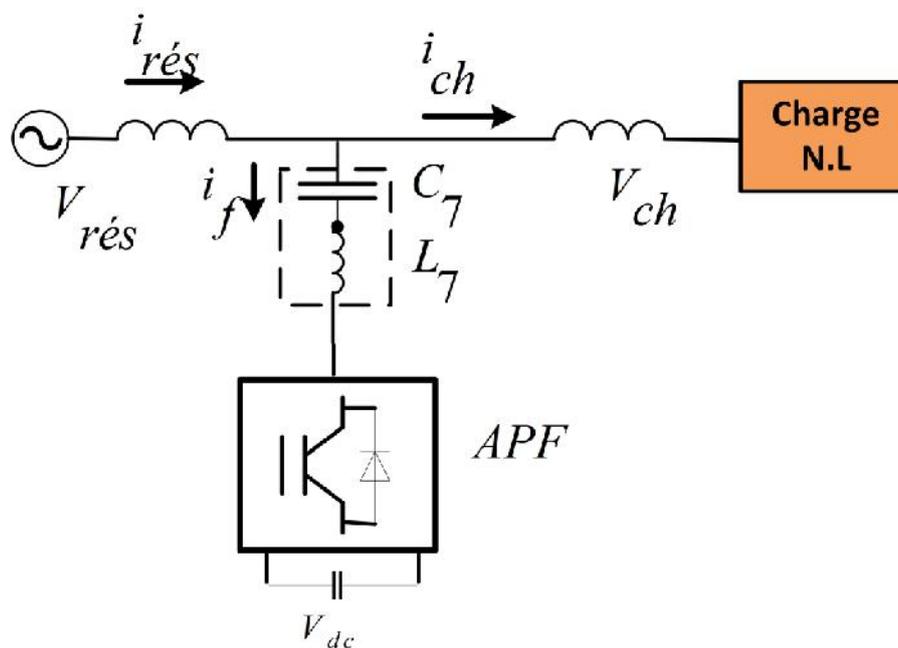


Figure. II.9- Filtre actif hybride.

II.3 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté un état de l'art du filtrage électrique. Nous avons trouvé que les techniques base sur les filtres passifs est souvent pénalisée en termes d'encombrements et de résonance. De plus, les filtres passifs ne peuvent pas s'adapter à l'évolution du réseau et aux charges polluantes. Les techniques des filtres actifs parallèles et séries avec leurs combinaisons se présente comme la meilleure jusqu'à ce jour pour tous types de perturbations susceptibles d'apparaître dans le réseau électrique. Le choix de la technique du filtre actif parallèle se présente comme la solution la plus standard pour le filtrage des courants harmoniques.

Chapitre III

Commande directe de la puissance (DPC)

III 1 Introduction :

L'idée principale de la commande directe de puissance (DPC) proposée initialement par Ohnishi (1991) et développée ensuite par Noguchi et Takahachi en 1998, est similaire à la commande directe du couple (DTC) des machines asynchrones [8]. Cette nouvelle structure de commande, couramment nommée : Commande directe de puissance d'un convertisseur à MLI AC/DC triphasé. On la trouve plus souvent, dans la nouvelle littérature, sous l'abréviation anglaise de DPC (Direct Power Control). Dans cette nouvelle technique de commande, les variables contrôlées sont les puissances active et réactive instantanées. En plus de sa simplicité qui est due à l'élimination des blocs de modulation et des boucles de régulation internes (de courant) et aussi à l'absence de transformations de coordonnées, cette commande garantit un contrôle découplé des puissances et des bonnes performances dynamiques. Parce que les états de commutation du convertisseur sont appropriés sélectionnés par une table de commutation basée sur l'instantané des erreurs entre les valeurs commandées et mesurées du pouvoir actifs et réactifs. Les différentes configurations du DPC se subdivisent en trois catégories : [11]

- DPC (Classique): basées sur la position de vecteur de tension dans repère stationnaire ($\alpha\beta$) par le tableau de commutation.
- DPC-SVM: le principe du DPC avec une modulation vectorielle (SVM) afin d'obtenir une fréquence de commutation constante sans l'utilisation d'une table de commutation.
- DPC utilisant le flux virtuel : les configurations détaillées sont basées sur le calcul d'un flux virtuel.

Nous allons donc étudier dans ce chapitre la commande DPC. Nous développons, l'estimation des deux grandeurs de contrôle qui sont la puissance active et réactive. En fin, nous donnons les résultats de simulation qui mettent en évidence les performances de commande DPC classique.

III.2.Principe de 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, le même principe a été appliqué pour contrôler le couple et le flux dans les machines électriques alternatives. Les régulateurs utilisés sont des

comparateurs à hystérésis pour les erreurs des puissances active et réactive instantanées p et q . La sortie des régulateurs avec le secteur où se trouve la position du vecteur de tension du réseau, constituent les entrées d'un tableau de commutation qui à son tour détermine l'état de commutation des interrupteurs, la référence de puissance active est obtenue à partir du régulateur de tension du bus continu [5]

La figure III.1 montre le principe du contrôle direct de puissance (DPC classique).

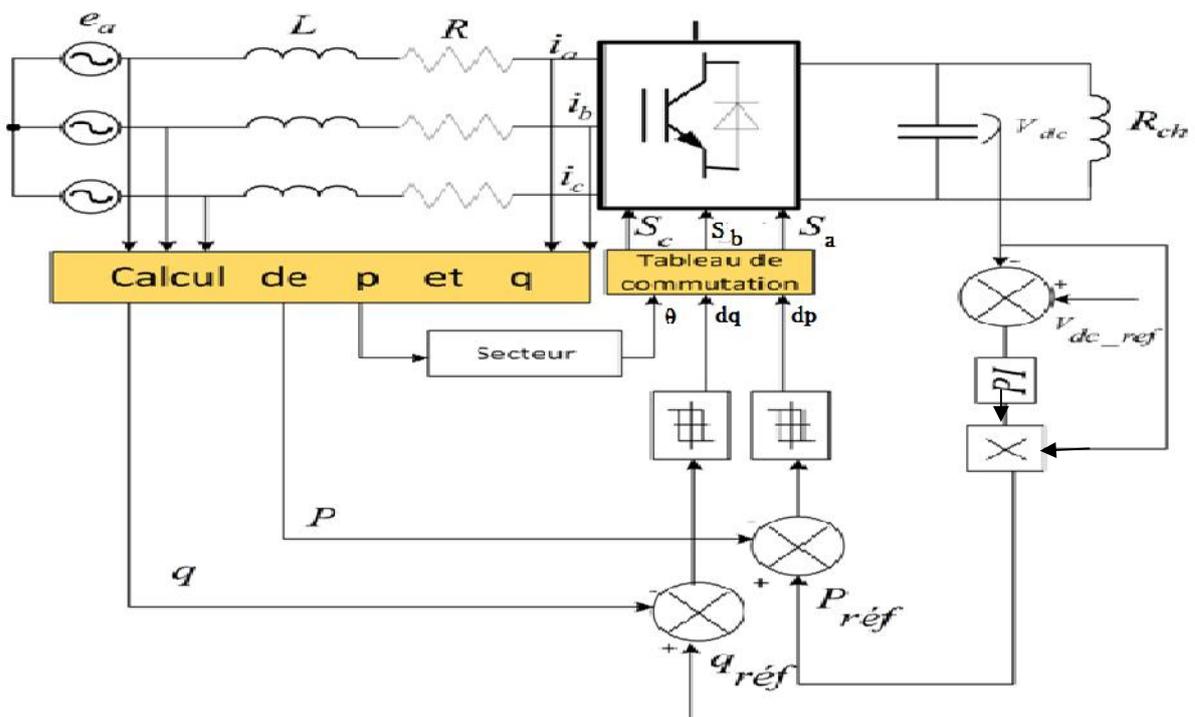


Figure III.1 : Principe de DPC classique.

La figure (III. 1) montre la configuration globale de la commande directe de puissance par mesure de tension et les courants de charge. 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 du vecteur tension. En fonction de la valeur de cette position, le plan (-) est divisé en douze secteurs où on doit associer à chaque secteur un état logique du l'onduleur. 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.[9]

III.2.1 Calcul des puissances instantanées :

Il y a trois méthodes pour calculer la puissance active et réactive :[5]

- ✓ par la mesure des courants et des tensions,
- ✓ par estimation des tensions du réseau et mesure des courants,
- ✓ et enfin par estimation du flux virtuel et mesure des courants.

III.2.1.1 Calcul de puissance instantanée par capteurs de tension du réseau et de courant

Les puissances instantanées sont déterminées par les formules classiques suivantes :

$$\rho = \text{Re}(\bar{e} \cdot \bar{i}^*) \quad (\text{III.1})$$

$$q = \text{Im}(\bar{e} \cdot \bar{i}^*) \quad (\text{III.2})$$

Où

ρ : La puissance active instantanée (aussi appelée puissance réelle),

q : La puissance réactive instantanée (aussi appelée puissance imaginaire),

e et i : respectivement vecteur de tension et vecteur de courant de ligne et le symbole* dénote le conjugué.

Ainsi, les puissances active et réactive instantanées totales sont calculées comme suit:

$$\rho = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c \quad (\text{III.3})$$

$$q = \frac{1}{\sqrt{3}} [e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c] \quad (\text{III.4})$$

III.2.1.2 Calcul des puissances instantanées par estimation de la tension du réseau

Le contrôle direct la puissance (DPC) est fondamentalement basé sur l'estimation de la tension, obtenue à partir de l'équation IV.8. Cette technique a été proposée par les auteurs des articles [5] :

$$\hat{e}_{a,b,c} = U_{dc} \cdot S_{a,b,c} + L \frac{di_{a,b,c}}{dt} \quad (\text{III.5})$$

Le premier terme de l'équation représente la tension du redresseur et le deuxième terme la tension dans le filtre de raccordement (le paramètre résistif du filtre peut être négligé),

Où :

$\hat{e}_{a,b,c}$: est le vecteur instantané de la tension du réseau estimée,

U_{dc} : est la tension du bus continu,

$S_{a,b,c}$: Les états de commutation.

L : est l'inductance du filtre de connexion.

Le calcul des puissances, active et réactive instantanées, est donné par les équations suivantes :

$$\rho = U_{dc} (S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c) + L \left(\frac{di_a}{dt} i_a + \frac{di_b}{dt} i_b + \frac{di_c}{dt} i_c \right) \quad (\text{III.6})$$

$$q = \frac{1}{\sqrt{3}} \left\{ -U_{dc} [S_a (i_b - i_c) + S_b (i_c - i_a) + S_c (i_a - i_b)] + 3L \left(\frac{di_a}{dt} i_c - \frac{di_c}{dt} i_a \right) \right\} \quad (\text{III.7})$$

Malgré la simplicité, cette méthode d'estimation de puissance a plusieurs inconvénients tel que:

- ✓ L'évaluation de puissance dépend de l'état de commutation. Par conséquent, le calcul de la puissance doit être évité au moment de commutation, en raison de l'erreur élevée de l'estimation.

III.2.1.3 Calcul des puissances instantanées par estimation du flux virtuel

Le flux virtuel, en plus d'être présent pour la synchronisation, est aussi utilisé pour le calcul des puissances instantanées. Ainsi, l'intégration de la tension réseau (à partir de la tension du filtre et du convertisseur) génère un vecteur de flux virtuel dans les coordonnées $\alpha\beta$. La chute de tension dans la résistance a été négligée aussi.

$$\psi_\alpha = \int e_\alpha dt = \int \left(v_\alpha - L \frac{di_\alpha}{dt} \right) dt \quad (\text{III.8})$$

$$\psi_\beta = \int e_\beta dt = \int \left(v_\beta - L \frac{di_\beta}{dt} \right) dt \quad (\text{III.9})$$

Où ψ est le flux estimé et v la tension du convertisseur.

En considérant la tension de l'onduleur en coordonnées $\alpha\beta$, l'expression du flux virtuel devient la suivante :

$$\psi_{\alpha} = \int \left(\sqrt{\frac{2}{3}} U_{dc} \left(S_{a-\frac{1}{2}} (S_b - S_c) \right) \right) dt - Li_{\alpha} \quad (\text{III.10})$$

$$\psi_{\beta} = \int \left(\sqrt{\frac{2}{3}} U_{dc} (S_b - S_c) \right) dt - Li_{\beta} \quad (\text{III.11})$$

On obtient la tension à partir du flux virtuel estimé :

$$\bar{e} = \frac{d}{dt} \bar{\psi} = \frac{d\psi}{dt} e^{j\omega t} + j\omega\psi e^{j\omega t} = \frac{d\psi}{dt} e^{j\omega t} + j\omega\bar{\psi} \quad (\text{III.12})$$

Où $\bar{\psi}$ est le vecteur du flux estimé et ψ l'amplitude du flux estimé.

Cette méthode travaille dans les coordonnées . Ainsi, les puissances instantanées sont calculées de la façon suivante :

$$p = e_{\alpha} i_{\alpha} + e_{\beta} i_{\beta} \quad (\text{III.13})$$

$$q = \psi_{\beta} i_{\alpha} - e_{\alpha} i_{\beta} \quad (\text{III.14})$$

Sachant que pour des tensions presque sinusoïdales et équilibrées les dérivés de l'amplitude du flux sont nuls, les puissance actives et réactives instantanées sont calculées par l'équation ci-dessous.

$$p = w. (\psi_{\alpha} i_{\beta} - \psi_{\beta} i_{\alpha}) \quad (\text{III.15})$$

$$p = w. (\psi_{\alpha} i_{\alpha} + \psi_{\beta} i_{\beta}) \quad (\text{III.16})$$

Cette méthode présente des avantages par rapport à la méthode d'estimation de la tension et par conséquence elle permet de travailler avec une fréquence d'échantillonnage plus réduite (Les discontinuités de l'estimation de la tension du convertisseur sont filtrées par l'intégrateur qui se comporte comme un filtre passe-bas) et d'obtenir des meilleures performances lorsque la tension du réseau est perturbée. [5]

On ce qui concerne nous avons utilisée la méthode de la puissance instantanée par capteurs de tension du réseau et de courant

III.3. Tableau de commutation :

La table de commutation peut être considérée comme le cœur de la commande directe en puissance. Elle sélectionne un vecteur de tension de l'onduleur approprié pour permettre le déplacement des puissances active et réactive instantanées dans la direction désirée, en se

basant aussi sur la position du vecteur de la tension de la source et des erreurs des puissances active et réactive. [6],[9]

S_p	S_q	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
1	0	V5	V5	V6	V6	V1	V1	V2	V2	V3	V3	V4	V4
1	1	V3	V3	V4	V4	V5	V5	V6	V6	V1	V1	V2	V2
0	0	V6	V1	V1	V2	V2	V3	V3	V4	V4	V5	V5	V6
0	1	V1	V2	V2	V3	V3	V4	V4	V5	V5	V6	V6	V1

Tableau (III.1) : Table de commutation de la DPC adaptée

La synthèse de la table de commutation est basée sur les signes des dérivées des puissances active et réactive dans chaque secteur. [9]

Pour chaque secteur, le changement de la puissance réactive est positif pour trois vecteurs, négatif pour trois vecteurs, et zéro pour V0, V7. Le signe du changement de la puissance active est positif pour quatre vecteurs, négatif pour deux ou trois vecteurs. Par exemple, pour le premier secteur les vecteurs qui influent sur le signe du changement des puissances active et réactive sont résumés dans le Tableau (III.2). [9]

le, po ces acti $\bar{P} > 0$	secteur ve sont $\bar{P} < 0$	secteurs qui dans le Tat $\bar{P} < 0$	pour le sign [9] $\bar{P} > 0$	ngement $\bar{P} = 0$
V3, V4, V5, V0	V1, V6	V1, V2, V3	V4, V5, V6	V0, V7

Tableau (III.2) : Changement des puissances active et réactive dans le secteur « 1 »

Pour chaque combinaison des signaux de sortie d'hystérésis, Sp et Sq, les vecteurs de tension choisis pour le secteur 1 sont montrés dans le Tableau (III. 3).

Secteur 1	\vec{v}		
	$> \frac{\tau}{6} \leftrightarrow \text{Sq}=1$	$< \frac{\tau}{6} \leftrightarrow \text{Sq}=0$	
\vec{P}	$> \frac{\tau}{6} \leftrightarrow \text{Sp}=1$	V3, V2	V4, V5
	$< \frac{\tau}{6} \leftrightarrow \text{Sp}=0$	V1	V6

Tableau III.3 Vecteurs de commande sélectionnée pour 1

Le même raisonnement est utilisé pour la sélection des vecteurs de commande pour les autres secteurs

III.4 Choix du secteur :

La connaissance du secteur de la tension estimée est nécessaire pour déterminer les états de commutation optimale. Pour cela, le plan de travail (,) est divisé en 12 secteurs figure (II.32), ces derniers peuvent être déterminés par la relation suivante :

$$(n-2)\frac{\tau}{6} < \theta_n < (n-1)\frac{\tau}{6} \quad n = 2 \dots 12; \quad (\text{III.17})$$

Où : n est le numéro du secteur

Le numéro du secteur est déterminé instantanément par la position de vecteur tension donnée par : [12]

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{v_\beta}{v_\alpha} \right)$$

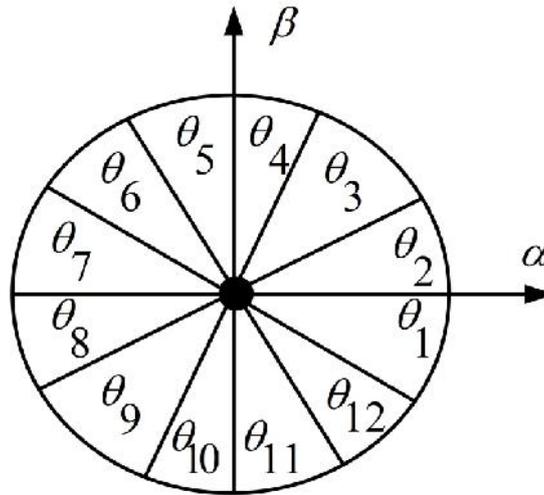


Figure III.2: Représentation du vecteur de la tension dans le plan de l'espace vectoriel (α, β) divisé en douze (12) secteurs

On utilise les secteurs pour optimiser les commutations des convertisseurs, et cela par le choix des vecteurs adjacents.

On divise le plan en 12 secteurs pour plus de précision et aussi pour éviter les problèmes qu'on rencontre aux frontières de chaque vecteur de commande.

III.5 Régulateurs à hystérésis :

La grande simplicité de l'implémentation de cet outil de contrôle est également un élément important dans le choix du comparateur à deux niveaux. De plus, les considérations énergétiques sur le convertisseur imposent un nombre restreint de commutations. Or, pour une même largeur d'hystérésis de contrôle, le comparateur à deux niveaux nécessite un nombre moins élevé de commutations.

Les largeurs de la bande d'hystérésis ont une influence sur la performance du redresseur en particulier, sur la distorsion du courant harmonique, et sur la fréquence moyenne de commutation.

Le contrôleur proposé dans la DPC classique c'est un régulateur à deux niveaux pour les puissances actives et réactive.

Le schéma de principe de la figure III.3 donne deux régulateurs à hystérésis à deux niveaux. Pour réaliser le réglage des puissances active et réactive. L'un est influencé par l'erreur $\Delta p = p_{ref} - p$ (III 18) Pour la puissance active. $\Delta q = q_{ref} - q$ (III 19) Pour la puissance réactive. [9]

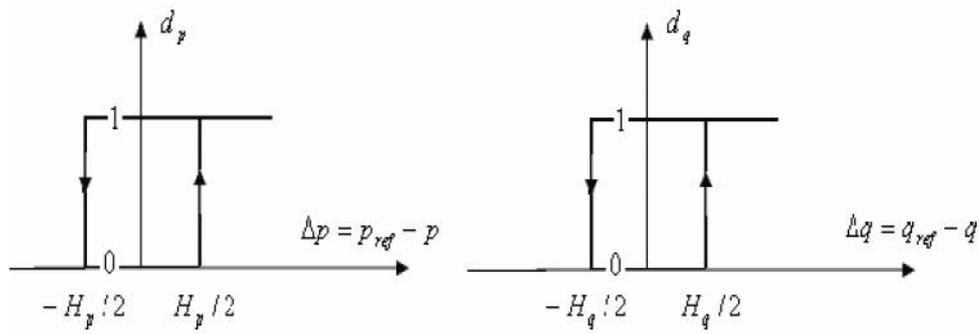


Figure III.3 : Caractéristique des régulateurs à hystérésis à deux niveaux.

Le régulateur à hystérésis à deux niveaux pour la puissance instantanée active peut être décrit comme suit:

$$\begin{aligned} \Delta_p > H_p &\Rightarrow d_p = 1 \\ -H_p \leq \Delta_p \leq H_p \text{ et } \frac{d\Delta_p}{dt} > 0 &\Rightarrow d_p = 0 \\ -H_p \leq \Delta_p \leq H_p \text{ et } \frac{d\Delta_p}{dt} < 0 &\Rightarrow d_p = 1 \\ \Delta_p < -H_p &\Rightarrow d_p = 0 \end{aligned}$$

Et le même pour le régulateur à hystérésis à deux niveaux pour la puissance réactive :

$$\begin{aligned} \Delta_q > H_q &\Rightarrow d_q = 1 \\ -H_q \leq \Delta_q \leq H_q \text{ et } \frac{d\Delta_q}{dt} > 0 &\Rightarrow d_q = 0 \\ -H_q \leq \Delta_q \leq H_q \text{ et } \frac{d\Delta_q}{dt} < 0 &\Rightarrow d_q = 1 \\ \Delta_q < -H_q &\Rightarrow d_q = 0 \end{aligned}$$

III.6 Simulation.01 :

Le Contrôle Direct de Puissance classique (DPC) du redresseur MLI avec une source de

tension triphasée, a été étudié par simulation sous Matlab/Simulink selon le schéma de la figure (III.1).

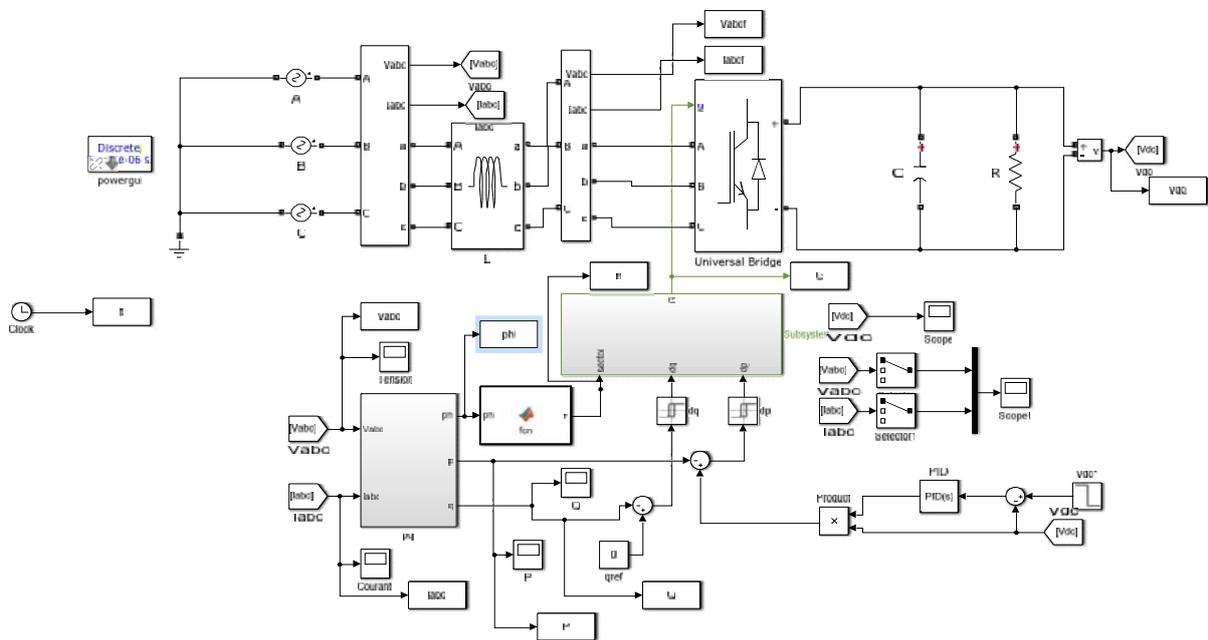


Figure III.4: Schéma de simulation de la DPC

III.6.1 Résultats de simulation 1 :

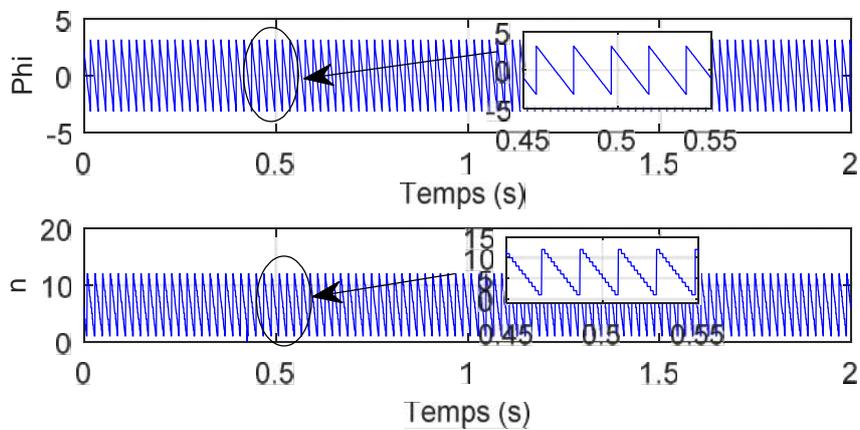


Figure III.5 : secteur et phi

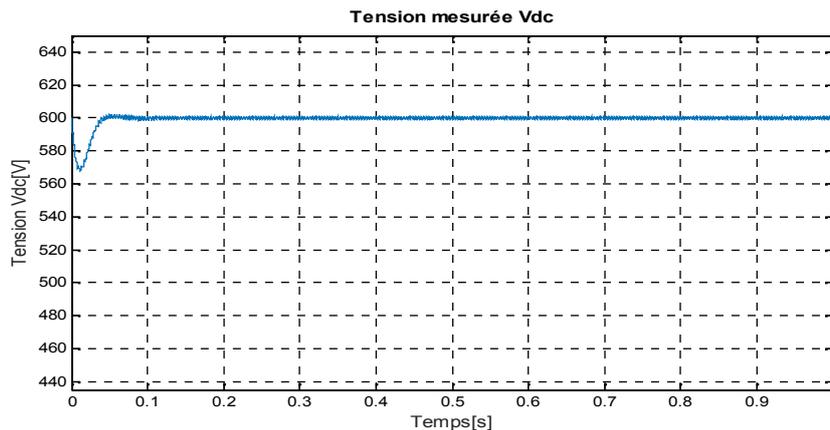


Figure III.6 Allure de la tension Vdc

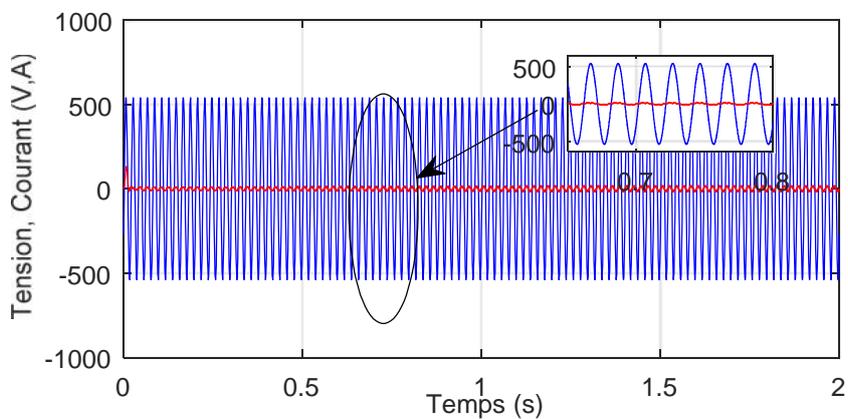


Figure III.7 : Allure de la tension et du courant

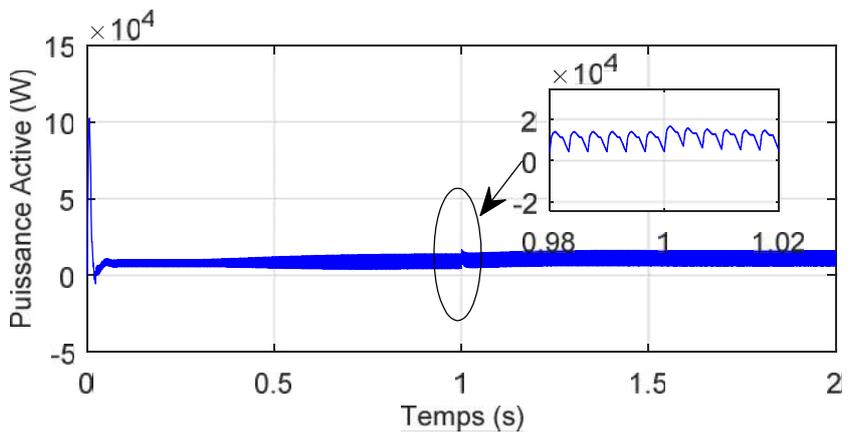


Figure III.8 : Allure de la puissance active instantanée

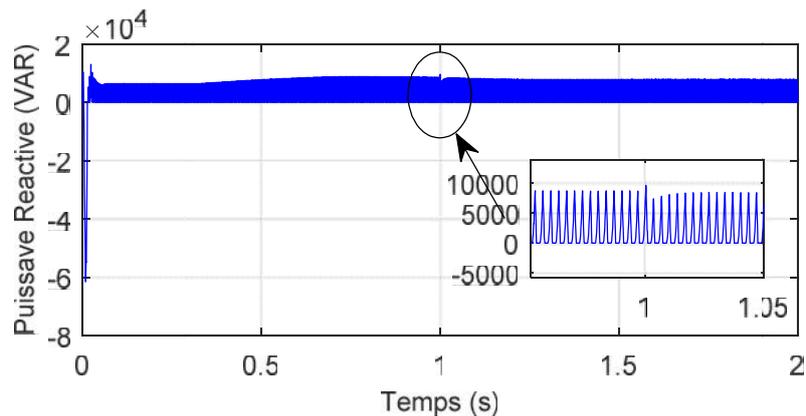


Figure III.9 : Allure de la Puissances réactive instantanée

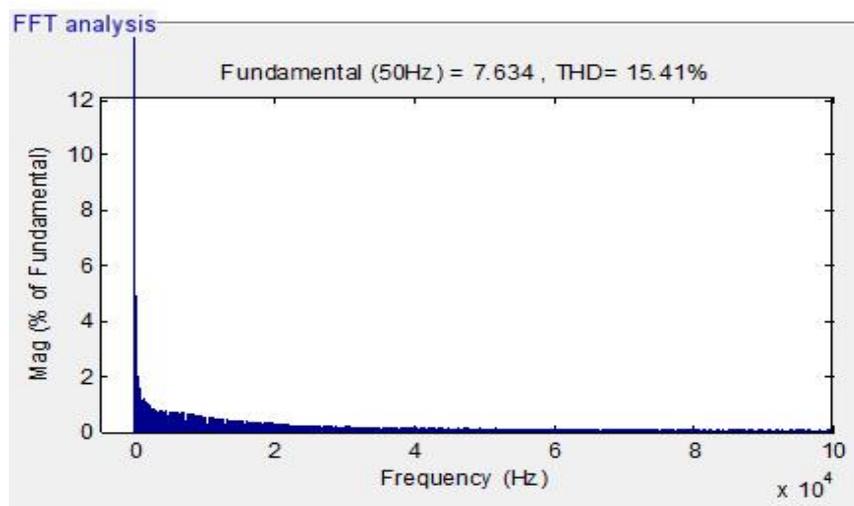


Figure III.10 l'analyse spectrale de courant

III.6.2. Interprétation des résultats

On remarque sur la figure III.6 que la de tension de bus continu, se stabilise sur sa valeur de référence imposée par la commande, La figure III.7 donne le courant de phase, ce courant est pratiquement sinusoïdal et en phase avec la tension du réseau, La figure III.8 représente les puissances active et réactive, la puissance réactive stabilise sur une valeur nulle, et confirme l'unicité du facteur de puissance.

III.7.Simulation.02 :

Élimination des harmoniques à l'aide d'un filtre de puissance active basé sur la théorie du calcul de la puissance instantanée a été étudié par simulation sous Matlab/Simulink selon le schéma de la figure (III.9).

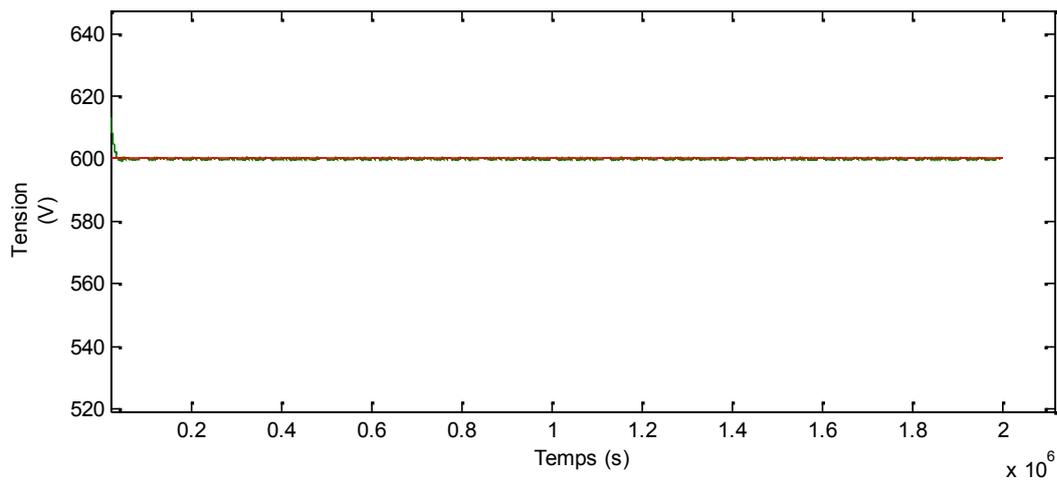


Figure (III.13) : Allure de la tension Vdc

III.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la description de la commande directe de puissance classique. Nous effectuons la simulation de redresseur à deux niveaux et sa commande DPC à douze secteurs. On simule le réseau sans l'utilisation du filtre pour voir l'effet des charges non linéaires sur la tension et le courant du réseau côté source. Alors le THD est de 34%.

On commence par étudier une commande basée sur la (DPC) Direct power control ou contrôle direct de la puissance. Donc au lieu de commander notre filtre par le courant on va utiliser les puissances active et réactive et grâce au régulateur au courant à hystérésis et à la commande MLI vectorielle on tire les signaux de commande du filtre. Dans le quatrième chapitre on va étudier la commande DPC en utilisant un régulateur flou.

Chapitre IV

Application du régulateur floue pour la commande du filtre parallèle

IV.1 Introduction:

La logique floue est une théorie qui a connu un grand engouement depuis que le professeur *Lotfi A. Zadeh* [16] a introduit le concept de sous-ensembles flous en 1965. Elle trouve notamment sa place dans le domaine de la commande pour une large gamme de systèmes et plus généralement en génie électrique [13, 14, 15]. Elle présente, en effet, l'avantage d'utiliser des règles linguistiques simples permettant de traduire facilement le savoir faire d'un expert pour répondre à une problématique scientifique. Dans ce sens, des correcteurs à base de la logique floue améliorent de façon globale aussi bien les performances que la robustesse des systèmes commandés, en s'appuyant sur la connaissance de ceux-ci [17].

IV.1.1 Historique de la logique floue : ce sont les premières approches du principe d'incertitude d'Heisenberg développé par les chercheurs américains

Le principe de la logique floue est basée sur la pensée humaine où le raisonnement est fondé sur la combinaison des expériences antérieurement acquises et les informations observées dans son environnement. La logique floue est donc basée sur un raisonnement empirique utilisant plusieurs moyens de déduction tel que l'expérience, l'analogie et l'intuition. Dans notre raisonnement, le jugement que nous portons sur une grandeur donnée est imprécis et vague ; par exemple l'âge d'une personne inconnue ne peut être qu'approximée ou compris dans un intervalle sans que nous puissions donner l'âge exact (sauf le hasard), ainsi la logique floue se rapproche de notre forme de raisonnement.

Le jugement humain intervient lorsqu'il n'est pas possible ou plus significatif de quantifier numériquement un phénomène ou un état sans dénaturer sa signification par rapport à son contexte. La beauté d'une image et le confort d'une automobile ne sont pas mesurables par des moyens classiques. De même, la distance à un obstacle sur une chaussée peut être mesurée avec précision, mais la signification de cette mesure n'est pas la même pour un piéton que pour un automobiliste. [18][19]

Le réglage par la logique floue est considérée parmi les techniques intelligentes et robustes, c'est pourquoi son utilisation ne cesse de gagner du terrain dans de nombreuses applications telle que la commande des machines électriques les Systèmes Flexibles de Transmission à Courant Alternatif (FACTS) ou encore les filtres actifs. .etc.

Depuis la conception du premier contrôleur flou en 1974, par l'équipe du professeur *E. H. Mamdani* pour commander un moteur à vapeur, et la mise en œuvre pratique de cette nouvelle théorie pour le contrôle de fours à ciment réalisé au Danemark par *Smidth* (1980), les

commandes reposant sur la notion de logique floue connaissent un succès grandissant dans des domaines multiples incluant l'univers du génie électrique. Elles apportent généralement une amélioration des performances par rapport à des commandes linéaires plus classiques avec comme atout principal la possibilité d'être définies au moyen d'une description linguistique. Cette dernière assure une transcription relativement simple de l'expertise menée sur les systèmes commandés. Cependant, les paramètres de ce type de commande sont nombreux et souvent délicats à régler. La complexité des structures ou des méthodes requises pour obtenir des réglages performants est notamment l'une des raisons qui limitent encore le développement et l'utilisation des commandes à base de la logique floue dans le domaine industriel [17]

IV.1.2 Domaine d'application :

Il est intéressant de noter que depuis quelques années les processus flous sont apparus sur le marché et sont dédiés à des applications de réglage, dont on peut citer :

Systèmes audiovisuels, appareils électroménagers, systèmes autonomes mobiles, système de transport, systèmes de conditionnement d'ambiance, systèmes de décision ; diagnostic et reconnaissance, systèmes d'autoroute automatisés, robotique et bien d'autres.

IV.1.3 Avantages et inconvénients de la commande par logique floue:

La commande par logique floue réunit un certain nombre d'avantages et d'inconvénients, concernant les avantages on cite [21].

- ✓ ne nécessite pas une modélisation mathématique rigoureuse du processus
- ✓ il est possible d'implanter des connaissances linguistiques de l'opérateur de processus.
- ✓ la maîtrise du procédé avec un comportement complexe (fortement non linéaire et difficile à modéliser).
- ✓ la réduction du temps de développement et de maintenance .
- ✓ la simplicité de définition et de conception.

Concernant les inconvénients, on peut citer:

- ✓ le manque de directives précises pour la conception d'un réglage (choix des grandeurs à mesurer, détermination de la fuzzification , des inférences et de la defuzzification).
- ✓ l'approche artisanale et non systématique implantation des opérateurs souvent difficiles.
- ✓ la difficulté de montrer la stabilité dans tous les cas .

- ✓ la cohérence des indifférences non garantie à priori (apparition de règles d'inférence contradictoire possible).

IV. 2 Le principe de la logique floue

Le principe de la logique floue s'approche de la démarche humaine dans le sens que les variables utilisées ne sont pas des variables logiques (au sens de la logique binaire) mais des variables linguistiques, proches du langage humain courant. De plus, ces variables linguistiques sont traitées à l'aide de règles qui font référence à une certaine connaissance du comportement du système. Ainsi, la théorie de la logique floue, fondée sur des aspects de la théorie des possibilités, fait intervenir des ensembles d'appartenances appelés "*ensembles flous*" caractérisant les différentes grandeurs du système à commander. Le raisonnement flou emploie un ensemble de règles floues établies par l'expert et dont la manipulation permet la génération de la commande adéquate ou la prise de décision.

Ainsi, les éléments de base de la logique floue sont les suivants :

- Les variables linguistiques et les ensembles flous ;
- Les fonctions d'appartenance ;
- Les opérateurs ;
- Les inférences à plusieurs règles floues.

IV.2 .1 Variable linguistique

L'ensemble de référence d'un langage naturel s'appelle l'univers du discours.

L'univers du discours d'un mot est un ensemble de termes qui évoquent le même concept mis à des degrés différents. Il peut être fini ou non. Une variable linguistique représente un état dans le système à régler ou une variable de réglage dans un contrôleur flou. Sa valeur est définie dans les termes linguistiques qui peuvent être des mots ou des phrases d'un langage naturel ou artificiel.

Chaque variable linguistique est caractérisée par un ensemble tel que : $\{x, T(x), U, G, M\}$

Où : x : est le nom de la variable,

$T(x)$: est l'ensemble des valeurs linguistiques que peut prendre x ,

U : est l'univers du discours associé avec les valeurs linguistiques de x ,

G : est la règle syntaxique pour générer les valeurs linguistiques de x ,

M : est la règle sémantique pour associer un sens à chaque valeur linguistique.

La description imprécise d'une certaine situation, d'un phénomène ou d'une grandeur physique ne peut se faire que par des expressions relatives ou floues à savoir: grand, petit, positif, négatif, nul, chaud, froid, etc. Ces différentes classes d'expressions floues dénommées ensembles flous constituent ce que on appelle les variables linguistiques. Par exemple, x =erreur de courant peut être définie avec un ensemble des termes : $T(x) = \{ \text{Négative Grande, Négative Moyenne, Proche de Zéro, Positive Moyenne, Positive Grande} \}$ qui forment son univers de discours $U = [-10A, 10A]$, le terme «Négative» représente une valeur linguistique qui peut être interprété par une erreur de -5 à 0 A par exemple.

Afin de pouvoir traiter numériquement ces variables linguistiques (normalisées généralement sur un intervalle bien déterminé appelé univers de discours), il faut les soumettre à une définition mathématique à base de fonctions d'appartenance qui montrent le degré de vérification de ces variables linguistiques relativement aux différents sous-ensembles flous de la même classe.

IV.3 Fonction d'appartenance

On utilise le plus souvent, pour les fonctions d'appartenance, des formes triangulaires, trapézoïdales ou gaussiennes. Cependant, il existe d'autres formes possibles comme les formes cloches. Dans la référence bibliographique les descriptions mathématiques de ces différentes fonctions sont décrites. Nous nous sommes intéressés dans ce travail aux deux formes les plus simples, triangulaires et trapézoïdales, qui sont composées des tronçons de droites. L'allure complète est définie par trois points (, et) pour la forme triangulaire et par quatre points (, , et) pour la forme trapézoïdale, comme l'indique la figure IV.1

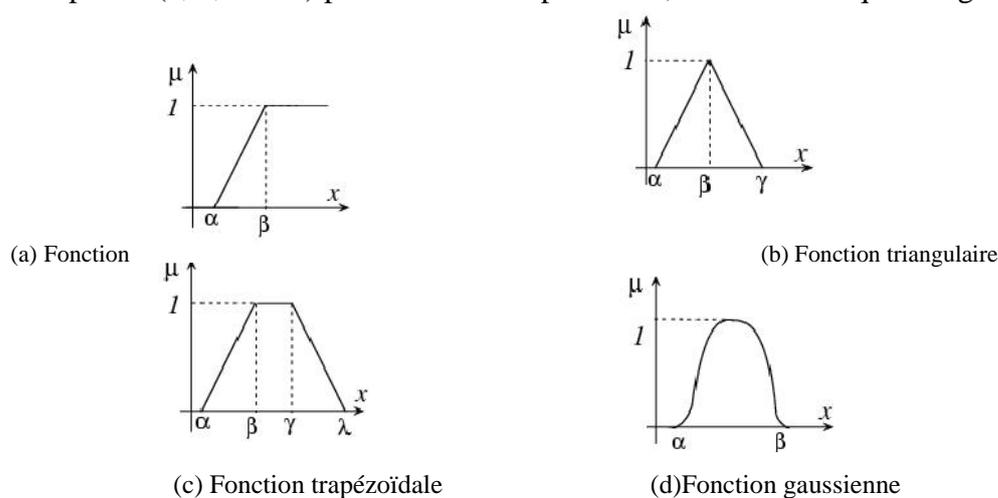


Figure (IV : 1) Quelques différentes formes de fonctions d'appartenance.

Généralement ces trois formes sont suffisantes pour délimiter les ensembles flous cependant la forme gaussienne (cloche) donne dans certains cas une meilleure représentation des ensembles flous.

IV .3 1Univers de discours

Un des premiers pas dans la conception d'une commande par logique floue est de définir l'ensemble de référence ou univers de discours pour chaque variable linguistique.

A titre d'exemple ; l'ensemble "x" (erreur) peut être caractérisé par un

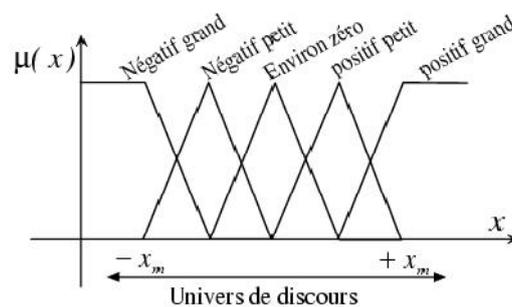


Figure (IV : 2) Univers de discours d'une variable linguistique.

ensemble de sous-ensemble (ou de nombres flous) dont les fonctions d'appartenance sont montres à la figure IV : 2 et chaque sous ensemble flou dans l'univers de discours représente une valeur linguistique.

IV.4 Les opérateurs de la logique floue

Les variables linguistiques sont liées entre elles au niveau des inférences floues par des opérateurs de la logique floue intervenant sur les fonctions d'appartenance représentant les variables linguistiques. Voici quatre principaux opérateurs :

$$\mu_A(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (IV.01)$$

La figure IV : 3(a) met en évidence cette relation. A noter qu'il s'agit de l'opérateur NON, appelée aussi "complément", "négation" ou "inverse".

IV .4.1 Opérateur Conjonction ET

La solution la plus simple et la plus utilisée pour caractériser la satisfaction simultanée de deux propriétés est de poser

$$\mu_C(z) = \mu_{A \cap B}(z) = \min[\mu_A(x), \mu_B(y)] \quad (IV.02)$$

On parle alors d'opérateur minimum dit aussi "intersection". Cette opération est représentée à la figure IV : 3 (b) Comme on le voit, il est possible que la fonction d'appartenance résultante $\mu_C(z)$ n'atteigne pas la valeur 1. Et on peut facilement vérifier que l'opérateur minimum est commutatif, c'est à dire qu'il est possible d'invertir $\mu_A(x)$ et $\mu_B(y)$ sans que le résultat change. Floue se fait en général par la formation du maximum, appliquée aux fonctions d'appartenance $\mu_A(x)$ et $\mu_B(y)$ des deux ensembles A et B. On a donc l'opérateur.

IV .4.2 Opérateur Disjonction OU

La réalisation de l'opérateur ou au niveau de la logique maximum.

$$\mu_C(z) = \mu_{A \cup B}(z) = \max[\mu_A(x), \mu_B(y)] \quad (IV.03)$$

Si x est A, Alors y est B

$$\text{Imp de Zadeh} \quad \mu_C(x, y) = \max\{\min[\mu_A(x), \mu_B(y)], 1 - \mu_A(x)\} \quad (IV.04)$$

$$\text{Imp de Mamdani} \quad \mu_C(x, y) = \min[\mu_A(x), \mu_B(y)] \quad (IV.05)$$

A noter que l'implication de Mamdani est équivalente à celle de Zadeh quand

$\mu_A(x) \geq 0.5$ et $\mu_B(y) \geq 0.5$. Dans les mises en œuvre des régulateurs flous, on utilise souvent l'implication de Mamdani.

IV.5 .Structure générale d'une commande floue

La structure d'un asservissement par un contrôleur flou (fuzzy logic controller

FLC) est représenté sur le schéma de la figure IV : 04 où on a mis en évidence la l'architecture du régulateur flou, celui-ci comprend essentiellement trois module [23]qui sont :

- Fuzzification ;
- Inférence floue ;
- Defuzzification.

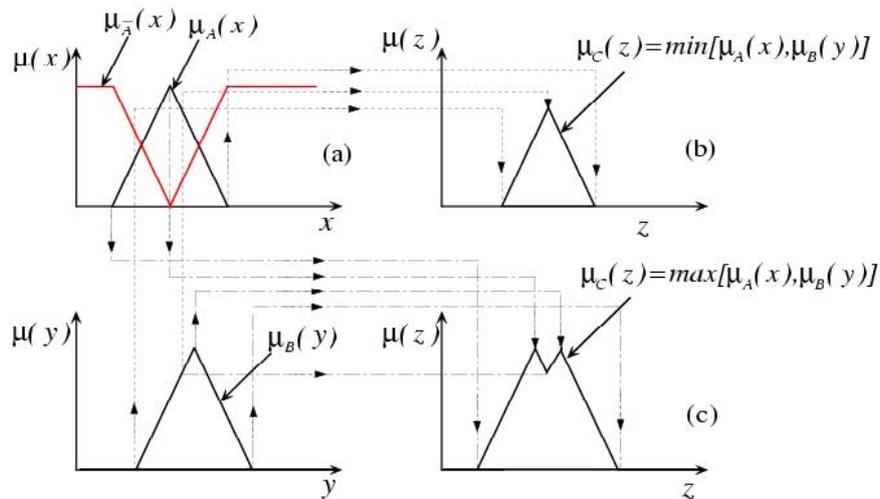


Figure (IV : 3) Les opérateurs principaux de la logique floue.

IV.5.1 Fuzzification

La fuzzification consiste à attribuer un degré d'appartenance à chaque valeur d'entrée et le passage des grandeurs physiques, (erreur, variation de l'erreur) aux variables linguistiques, ces dernières sont définies par leurs valeurs linguistiques. En générale, les fonctions d'appartenance qui représentent les valeurs linguistiques sont définies en forme triangulaire, trapézoïdale ou en forme de cloche. Il n'y a pas de règle précise pour la définition de fonctions d'appartenance, on peut introduire pour une variable linguistique trois, cinq ou sept valeurs linguistique suivant la résolution qu'on souhaite. La désignation standard des ensembles flous. En générale, il ne faut pas dépasser sept valeurs linguistiques, car ceci compliquerait la formulation des réglés d'inférence sans apporter une amélioration significative.

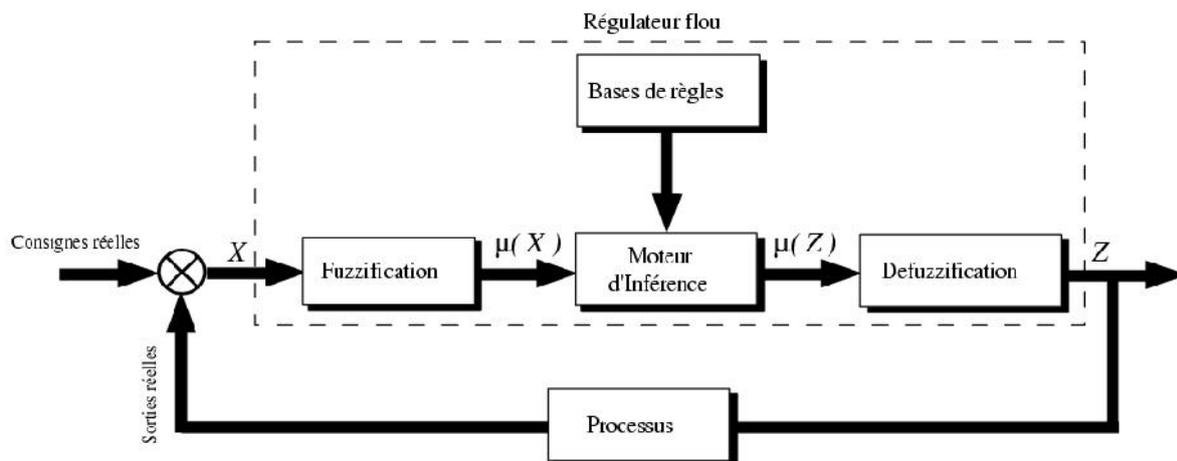


Figure (IV : 04) Structure générale d'une commande floue.

IV.5.2 Inference floue

Les inférences lient les grandeurs mesurées et les variables de sortie par des réglés linguistiques. Ces règles sont combinées en utilisant les connections ET et OU.

Supposons que le régulateur flou ait deux entrées convenablement transformées en variables linguistiques x et y et une sortie z , et que l'on a défini n règles linguistiques comme suit :

$$\text{Si } x = A1 \text{ ET } y = B1, \text{ Alors } z = C11 \text{ OU}$$

$$\text{Si } x = A1 \text{ ET } y = B2, \text{ Alors } z = C12 \text{ OU}$$

$$\text{Si } x = Ai \text{ ET } y = Bj, \text{ Alors } z = Cij \text{ OU}$$

.....

$$\text{Si } x = An \text{ ET } y = Bn, \text{ Alors } z = Cnn \quad (\text{IV.06})$$

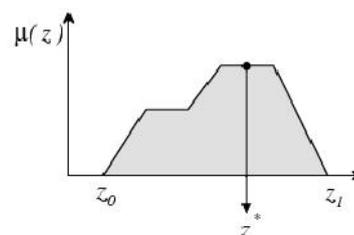
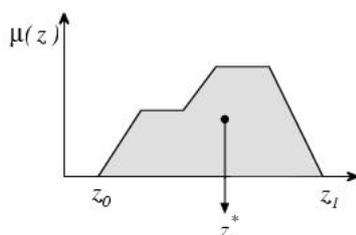
Une simplification de cette représentation peut être obtenue en utilisant la matrice d'inférence, où l'intersection entre une colonne et une ligne indique la valeur linguistique correspondante à la variable de sortie. où Ai, Bj et Cij ($i = 1, n$ et $j = 1, m$) sont les sous-ensembles flous définis dans les ensembles de référence pour x, y et z respectivement. En toute généralité, n'importe quelle combinaison des opérateurs ET, OU et NON peut apparaître dans la condition d'une règle, suivant les conditions imposées par le système à régler.

IV .5. 3 Defuzzification

Le résultat d'une inférence floue est une fonction d'appartenance, cependant, un organe de commande nécessite un signal de commande précis. La transformation d'une information floue en une information déterminée est la defuzzification. Il y a plusieurs méthodes de defuzzification proposées dans la littérature.

Méthode du centre de gravite

C'est la méthode de defuzzification la plus utilisée est celle la détermination de l'abscisse du centre de gravite z_* de la fonction d'appartenance résultante de l'inférence $\mu_C(z)$. Cette abscisse correspond à la valeur de sortie du régulateur. La figure IV : 5 (a) montre le principe de cette méthode de defuzzification.



(a) Defuzzification par centre de gravité

(b) Defuzzification par moyenne de maximum

Figure (IV : 5) méthodes de defuzzification

IV5.4 Application a la commande du filtre actif

Comme dans la commande du filtre actif par un procédés classique, le rôle du régulateur est d'éliminer ou de réduire l'erreur entre le courant de référence et celui injecté par l'onduleur de tension.

Il ya deux philosophies principales pour la commande par logique floue ;

IV .6 Commande par un régulateur flou standard

La commande directe des grandeurs électriques par régulateur flou. Dans ce cas de figure, pour la commande en courant du filtre actif, le vecteur d'entrée peut avoir une composante qui est l'erreur de courant " ε " ou bien deux composantes ; l'erreur du courant et sa variation (" $\varepsilon, \Delta\varepsilon$ ").

$$\varepsilon = i_c^*(t) - i_c(t) \quad (IV.07)$$

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon(t) - \varepsilon(t - T) \quad (IV.08)$$

Dans le premier cas la valeur de la commande est calculée directement a partir de l'erreur ε . Par ailleurs, l'ajout de la variation l'erreur du courant $\Delta\varepsilon$ comme une deuxième entrée pour le régulateur flou est toujours préférable car ceci permet d'améliorer les performances du filtre actif et d'avoir une meilleure dynamique.

Le schéma de principe de cette configuration est donne par la figure IV : 06

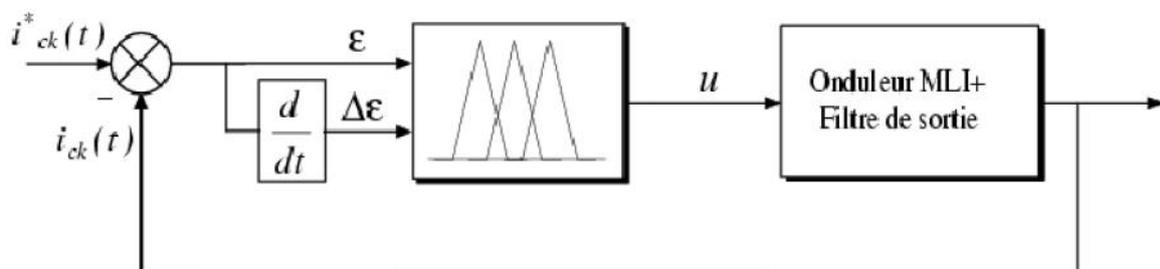


Figure (IV : 06) Principe de commande du filtre actif par un régulateur flou a deux entrées.

IV .6.1 Combinaison avec d'autres techniques de réglage

La commande floue a montre son efficacité lorsqu'elle est appliquée seule, mais permet également de régler des paramètres de régulations existantes [24]. Ainsi des études de recherche appliquée montrent qu'il est encore plus intéressant de conjuguer l'utilisation de la logique floue avec des commandes traditionnelles afin de robustifier celles-ci et donner naissance à des régulateurs simple et robuste comme par exemple PI-flou ou PID-flou [24][25].

La combinaison entre un régulateur par logique flou et d'autres techniques robustes de réglage permet également d'améliorer les performances globales, on peut citer dans ce sens quelques possibilités comme la commande flou-mode de glissement (Fuzzy sliding mode control), la commande neuro-floue [23] . . . etc.

Dans le cadre de notre travail, nous avons choisi cette dernière technique, pour cela nous avons propose de combiner entre un régulateur flou et un régulateur à hystérésis.

IV.6.2 descriptions du système

Les performances des filtres actifs dépendent très fortement de plusieurs facteurs :

- L'algorithme de commande utilisé pour identifier les références de courants ou de tensions ;
- la boucle de régulation de la tension du réservoir capacitif ;
- Le mode de contrôle utilisé pour la génération des ordres de commande des interrupteurs de puissance.

Pour ce dernier facteur, la stratégie de commande qui fait l'objet de notre étude sur le FAP triphasé est la DPC. La figure IV : 08 illustre en détail le travail entrepris.

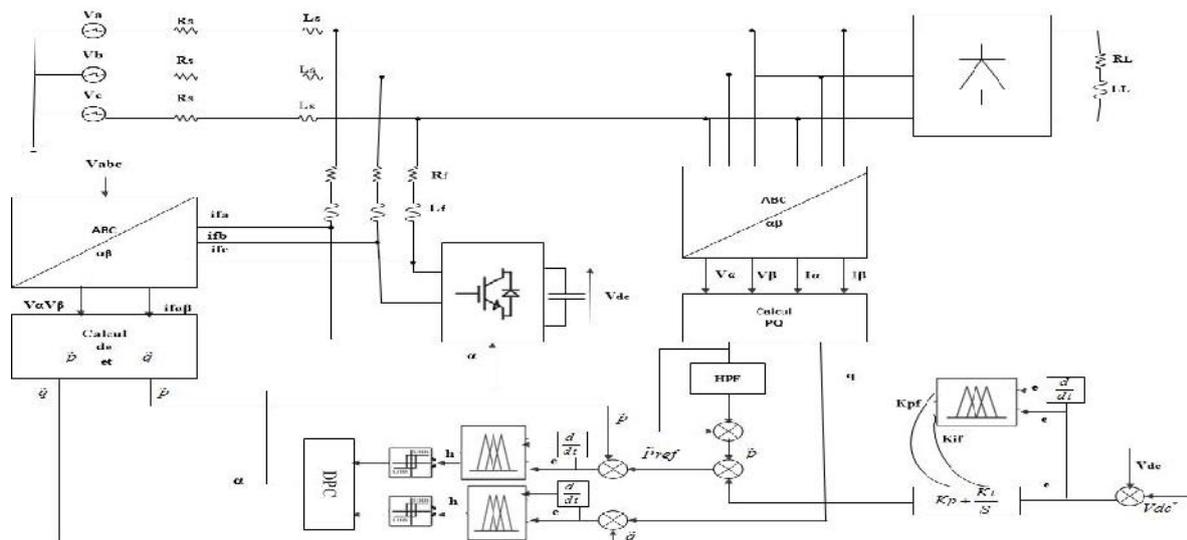


Figure (IV : 08) schéma de DPC avec régulateur flou

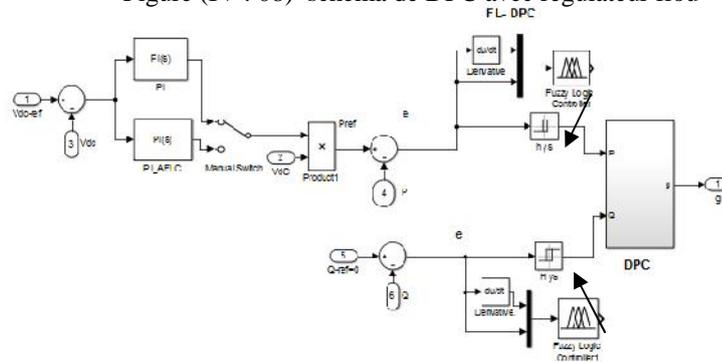


Figure (IV : 09) schéma bloc avec régulateur flou

IV.6.3 Boucle de régulation de la tension du bus continu :

Le rôle de la boucle de régulation de la tension du bus continu est de maintenir cette tension à une valeur de référence constante, en contrôlant le processus de chargement et de déchargement du condensateur. Les causes de sa variation sont essentiellement les pertes dans les interrupteurs du convertisseur (en conduction et en commutation), dans les inductances de couplage et la variation de la charge connectée au bus continu. La régulation de cette tension s'effectue par ajustement de l'amplitude des références des courants prélevés pour contrôler le transit de puissance active entre le réseau et le bus continu. A cet effet, elle est destinée à compenser toutes les perturbations provenant du côté convertisseur et du côté charge, provoquant une variation de l'énergie stockée dans le condensateur. Cette boucle a comme entrée la tension de référence v_{dc}^* et la tension mesurée V_{dc} . Il est également possible de dimensionner le régulateur pour régler le carré de la tension v_{dc} .

Un régulateur de type PI est souvent utilisé pour contrôler cette tension. En négligeant les pertes actives dans le convertisseur et dans les inductances de couplage, l'application du

principe de conservation de la puissance donne la relation entre la puissance active débitée par le réseau et celle reçue en sortie du pont. Elle s'écrit sous la forme suivante :

$$p = v_{dc} \cdot i_{dc} = \frac{1}{2} C \frac{dv_{dc}^2}{dt} + \frac{v_{dc}^2}{R} \quad (\text{IV. 10})$$

A partir de cette équation, nous déduisons la fonction de transfert du premier ordre suivante :

$$\frac{v_{dc}^2(s)}{P(s)} = \frac{R}{1 + \frac{R.C}{2}s} \quad (\text{IV. 11})$$

D'autre part, la puissance active fournie par le réseau est définie par la relation ci-dessous :

$$p = \frac{3}{2} \cdot e_{\max} \cdot I_{\max} \quad (\text{IV. 12})$$

Si nous prenons comme grandeur à régler, pour raison de simplicité, le carré de la tension du bus continu, et en supposant constante l'amplitude de la tension du réseau, la fonction de transfert précédente se transforme sous la forme suivante :

$$\frac{v_{dc}^2(s)}{I_{\max}(s)} = \frac{3}{2} e_{\max} \cdot \frac{R}{1 + \frac{R.C}{2}s} \quad (\text{IV. 13})$$

Le synoptique de la boucle de régulation du carré de la tension du bus continu est alors représenté sur la Figure 3. Dans cette structure, la boucle de courant est considérée parfaite (unitaire) en supposant qu'elle est beaucoup plus rapide que celle de la tension et que le courant réel est assimilé à sa valeur de référence. Il est à noter que dans ce cas, la tension continue se présente comme un gain variable dans la chaîne directe, ce qui peut créer des instabilités dans la boucle de régulation. Pour éviter ceci, on propose de réaliser une compensation de cette tension en contrôlant la tension v_{dc} . Pour cette structure, nous choisissons le régulateur pour qu'il fournisse la valeur du courant du bus continu I_{dc} nécessaire pour maintenir la charge du condensateur et répondre au besoin de la charge. L'amplitude des courants de référence est alors calculée sur la base de la relation ci-après

$$\frac{3}{2} e_{\max} \cdot I_{\max} = v_{dc} \cdot I_{dc} \quad (\text{IV. 14})$$

Le schéma synoptique proposé pour le réglage de la tension V_{dc} est donné sur la figure IV. 09

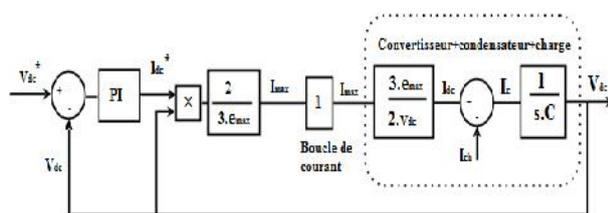


Figure (IV. 10) : schéma de réglage de la tension V_{dc}

Dans ce travail, nous avons utilisé la boucle de régulation de la tension V_{dc} dont les paramètres du Régulateur PI sont calculés sur le principe de compensation du pôle dominant. Ils sont donnés par les Expressions suivantes :

$$T_i = \frac{3.R.e_{\max}}{4.f.f_c} \quad (IV.15)$$

$$k_p = \frac{C.R}{2.T_i} \quad (IV.16)$$

IV. 7 Utilisation du régulateur flou pour le bus continu :

La commande floue a montré son efficacité lorsqu'elle est appliquée seule, mais permet également de régler des paramètres de régulations existants. Ainsi des études de recherche appliquées montrent qu'il est encore plus intéressant de combiner l'utilisation de la logique floue avec des commandes traditionnelles afin de rendre robustes celles-ci et donner naissance à des régulateurs simples et robustes comme par exemple PI-flou ou PID-flou.

La conjugaison entre un régulateur par logique flou et d'autres techniques robustes de réglage permet également d'améliorer les performances globales, dans le cadre de notre travail, nous avons choisi cette dernière technique.

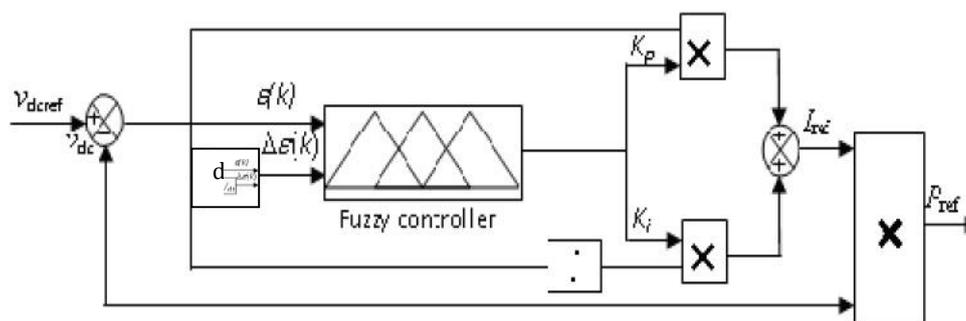


Figure (IV : 14) : régulateur flou pour le bus continu

IV.7.1 Régulateur flou :

La commande floue aux mêmes objectifs de régulation et de poursuite qu'une commande réalisée en automatique classique. Cependant, il est possible de se passer d'un modèle explicite du procédé à commander. C'est le plus souvent, le savoir-faire d'un expert

ou d'opérateurs qualifiés manipulant le procédé qui est pris en compte pour l'élaboration de la loi de commande.

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

« **Si** l'erreur est positivement Large **Et** la variation de l'erreur est positivement Large **Alors** la variation de la sortie est négative ».

Ces concepts sont basés sur une partie de la théorie des sous-ensembles flous introduite par Zadeh. Un régulateur flou peut être présenté de différentes façons, mais en générale la présentation adoptée se scinde en trois parties : la fuzzification qui permet de passer de variables réelles à des variables floues, le cœur du régulateur représenté par les règles reliant les entrées et sorties, et enfin l'inférence et la défuzzification qui permettent à partir des ensembles flous d'entrée de déterminer la valeur réelle de sortie, (Figure (IV.6)). L'ensemble des entrées du procédé et noté U (ensembles des actions calculées par le régulateur flou appliqué au procédé commandé). L'ensemble des sorties observées S, l'ensemble des consignes C et l'ensemble des entrées du régulateur flou X (par exemple : taille, température, vitesse...). L'ensemble des gains de normalisation des entrées GE et les gains de sorties GS du régulateur permettent d'adapter le domaine normalisé de définition des différentes variables.

Sept niveaux flous sont définis pour e et de , qui sont répartis comme suit : négative Large (NL), négatif moyen (NM), négatif petit (Ns), zéro (Zr), positif petit (Ps), positif moyen (PM), et positif grand (PL).

Chaque variable de l'entrée est assignée à une valeur de l'adhésion à chaque ensemble flou, basée sur la fonction de l'adhésion correspondante.

Les caractéristiques principales de ce régulateur flou sont les suivantes :

- Sept ensembles flous pour $e(n)$, $de(n)$,
- Les fonctions d'appartenance sont triangulaires ;
- Pour la fuzzification, nous utilisons l'univers de discours continu ;
- Pour l'implication, nous utilisons l'opérateur minimum de Mamdani ;
- Pour la défuzzification, nous utilisons la méthode de centre de gravité (centroid).

Les fonctions d'appartenance utilisées pour les entrées et les variables de sorties sont données dans la figure IV 11. Comme les deux entrées ont sept sous-ensembles, une base de règle floue formulée pour la présente application est donnée dans le tableau 1

E d e	NL	Nm	Ns	Zr	Zs	Pm	PL
NL	NL	NL	NL	NL	Nm	Ns	Zr
Nm	NL	NL	NL	Nm	Ns	Zr	Ps
Ns	NL	NL	Nm	Ns	Zr	Ps	Pm
Zr	NL	Nm	Ns	Zr	Ps	Pm	PL
Ps	Nm	Ns	Zr	Ps	Pm	PL	PL
Pm	Ns	Zr	Ps	Pm	PL	PL	PL
PL	NL	Nm	Ns	Zr	Ps	Pm	PL

Tableau IV : 1 Les règles floue formulée pour la présente application

Les ensembles flous sont notés comme suit :

NL : Négative Large,

NM : Négatif Medium,

Ns : Négative Small,

Ps : positive Small,

PM: positive Medium

PL : positive Large

Zr : Zéro

La figure IV.15 montre les fonctions d'appartenance des variables d'entrée $e(n)$ et $de(n)$

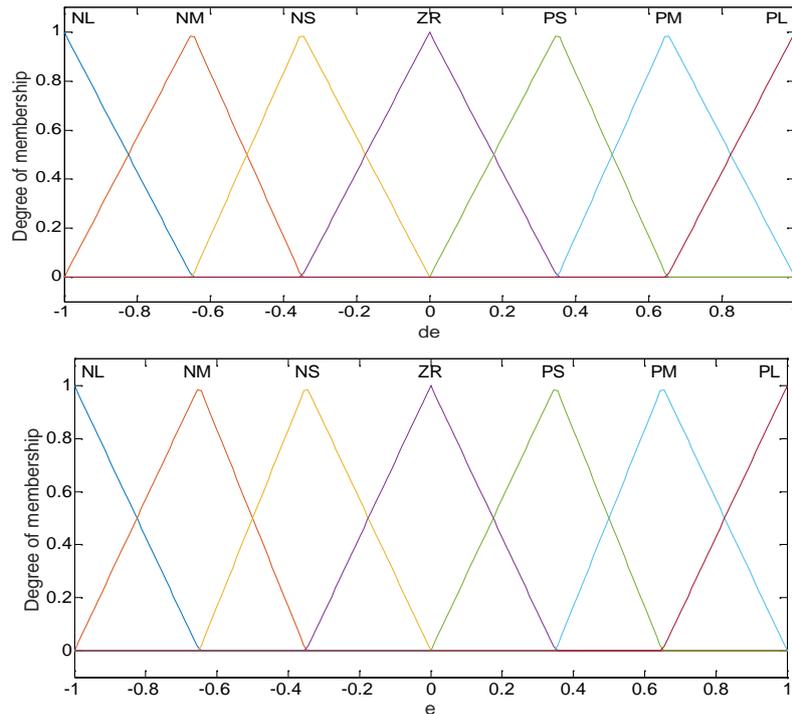


Figure (IV : 15) fonction d'appartenance des entrées $e(n)$ et $de(n)$

Le besoin réel de puissance pour la régulation de tension est pris comme la sortie du FLC. La nouvelle structure de contrôle de la tension continue préserve le même modèle adopté lorsque le régulateur PI a été utilisé.

Ces paramètres sont ajustés en temps réel en fonction de la perturbation qui augmente. Il s'agit d'associer la sortie du régulateur flou à des actions proportionnelles et intégrales du signal de commande.

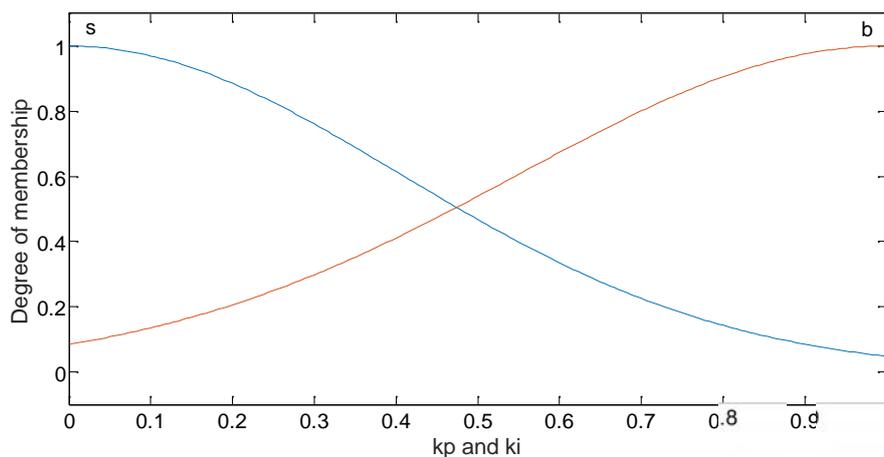


Figure IV. 16 membership function for the output variable " K_p " and " K_i "

IV .7.2 Commande en courant par un contrôleur flou hystérésis

Nous avons déjà présentée la technique de contrôle du courant par un régulateur à hystérésis, nous avons parlé de sa robustesse, et aussi de son inconvénient principal qui est sa fréquence de commutation aléatoire. Dans ce qui suit nous allons présenter l'application de cette technique au contrôle du courant du filtre actif mais avec un régulateur à hystérésis adaptatif par logique floue. Le principe de ce régulateur est le même que celui d'un régulateur classique sauf qu'ici la bande d'hystérésis est variable en fonction du point de fonctionnement, ceci est bien sûr pour garder la fréquence de commutation dans des limites tolérables.

La largeur d'une bande d'hystérésis pour la phase k ($k = a, b, c$) d'un filtre actif avec un bus continu constitué par deux capacités est donnée par la formule suivante [25]

$$H_{BK} = \frac{V_{dc}}{8fL_c} \left[1 - \frac{4L_c^2}{V_{dc}^2} \left(\frac{e_c}{V_{dc}} + \frac{di_{ch}^*(t)}{dt} \right) \right] \quad (IV.09)$$

En regardant cette formule, on peut remarquer facilement que la largeur de la bande est inversement proportionnelle à la fréquence de commutation. Si on suppose que cette dernière est constante, alors la largeur de la bande dépendra principalement de deux paramètres à savoir ; la tension au point de couplage $e_k(t)$ et la dérivée par rapport au temps du courant de référence

Le principe du réglage de la largeur de la bande d'hystérésis par un régulateur flou est schématisé sur la figure IV : 07.

Le régulateur possède comme entrées la dérivée par rapport au temps du courant de référence pour la phase k et la tension de la même phase au point de couplage $e_k(t)$.

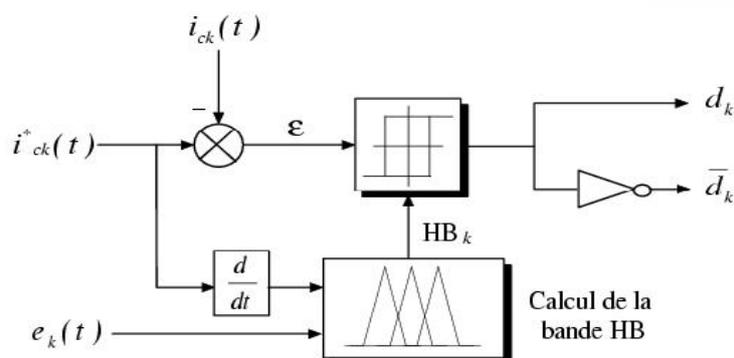


Figure (IV : 07) Schéma de principe du contrôleur flou-hystérésis.

Le signal de commutation g pour l'onduleur de source de tension va être généré par le contrôleur de courant de bande d'hystérésis adaptatif. La valeur de la bande d'hystérésis peut être mise en œuvre avec un contrôleur à logique floue. Dans ce cas, l'onde de tension d'alimentation, $V_s(t)$, et la pente de référence du courant principal, di^*/dt , peuvent être sélectionnées comme entrée variables au contrôleur flou et l'amplitude de la bande d'hystérésis (HB) comme variable de sortie. L'étape suivante permet de déterminer l'ensemble des valeurs linguistiques associées à chaque variable. Chaque variable d'entrée est transformée en une taille linguistique avec sept sous-ensembles flous pour di^*/dt et cinq pour $V_s(t)$ respectivement:

NVL est négatif très grand, NL est négatif grand, NM est négatif médium, ZR est zéro, PM est positif médium, PL est positif grand, PVL est positif très grand, pour di^*/dt et NL est négatif grand, NM est négatif médium, ZR est zéro, PM est médium positif, PL est grand positif, pour $V_s(t)$.

Les règles d'inférence sont données dans le tableau IV : 02

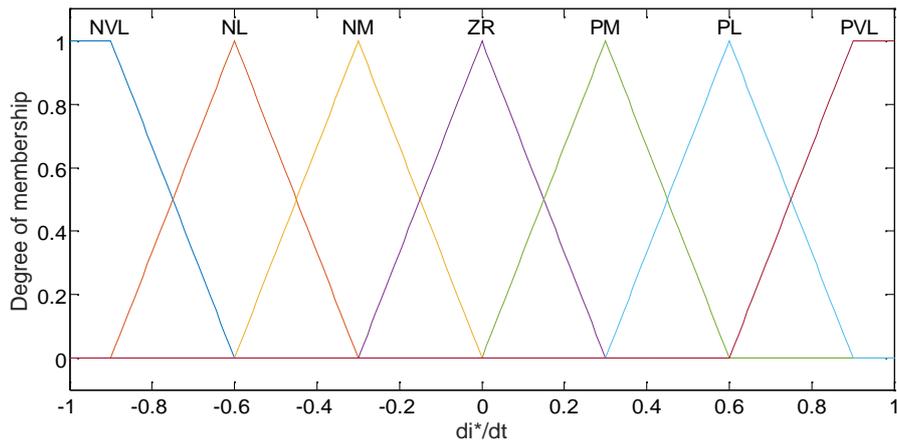
di^*/dt $V_s(t)$	NVL	NL	NM	Zr	PM	PL	PVL
NL	PL	PL	PM	PM	PM	PL	PL
NM	PL	PL	PM	PS	PM	PL	PL
Zr	PVL	PVL	PM	PVS	PM	PVL	PVP
Pm	PL	PL	PM	PS	PM	PL	PL
PL	PL	PL	PM	PM	PM	PL	PL

Tableau :(IV 02) : fuzzy inférence rules

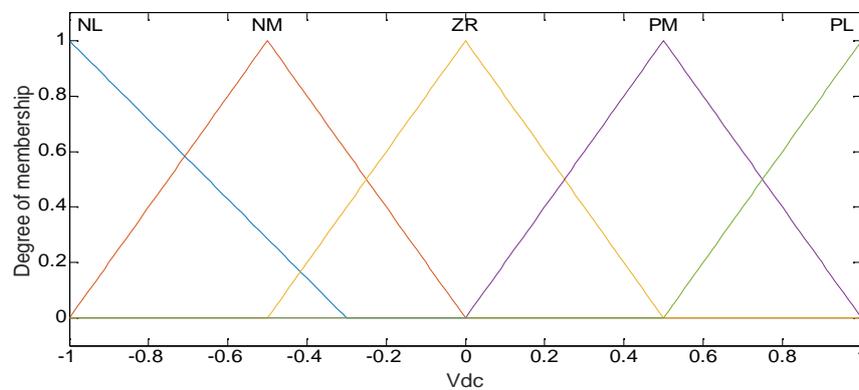
Les ensembles flous sont notés comme suit :

NVL : Négatif Very Large, **NL** : Négatif Large, **NM** : Négatif Medium, **ZR** : Zéro, **PM** : positive Medium, **PL**: positives Large, **PVL**: positives Very Large.

Les règles d'inférence qui en résultent sont répertoriées dans le tableau 2 et Les fonctions d'appartenance des variables d'entrée et de sortie sont illustrées dans la figure16.



(a)



(b)

Figure (IV. 16 : a) Variation de l'amplitude des courants de référence " di^*/dt "

Figure (IV. 16:b) Membership functions for the input variable V_{dc}

Pour la variable de sortie HB , VVS est very very small ,VS est very small, S est small, M est meduim, L est large, VL est very large et VVL est very very large

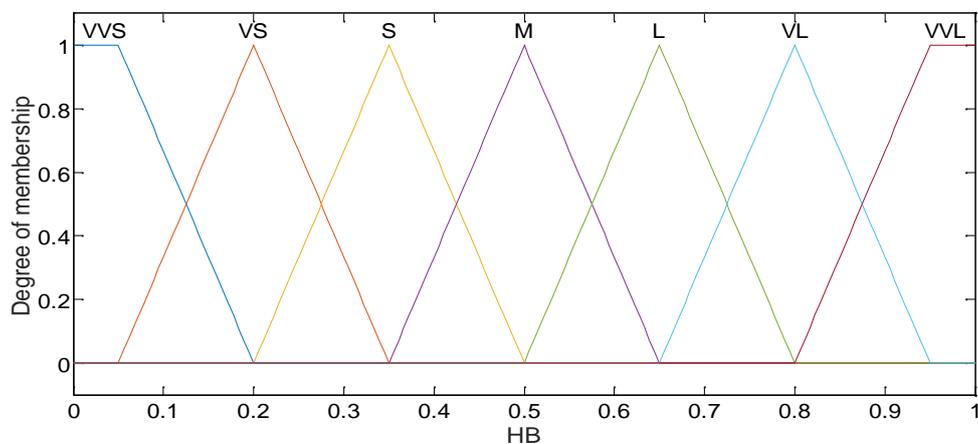


Figure (IV.16:c) fonction d'appartenance pour la variable HB

IV.7.3 Commande directe par logique floue à gain adaptatif d'un filtre actif parallèle

IV.7.3.1 Commande direct par logique floue à gain adaptatif -hystérésis dans le repère triphasé

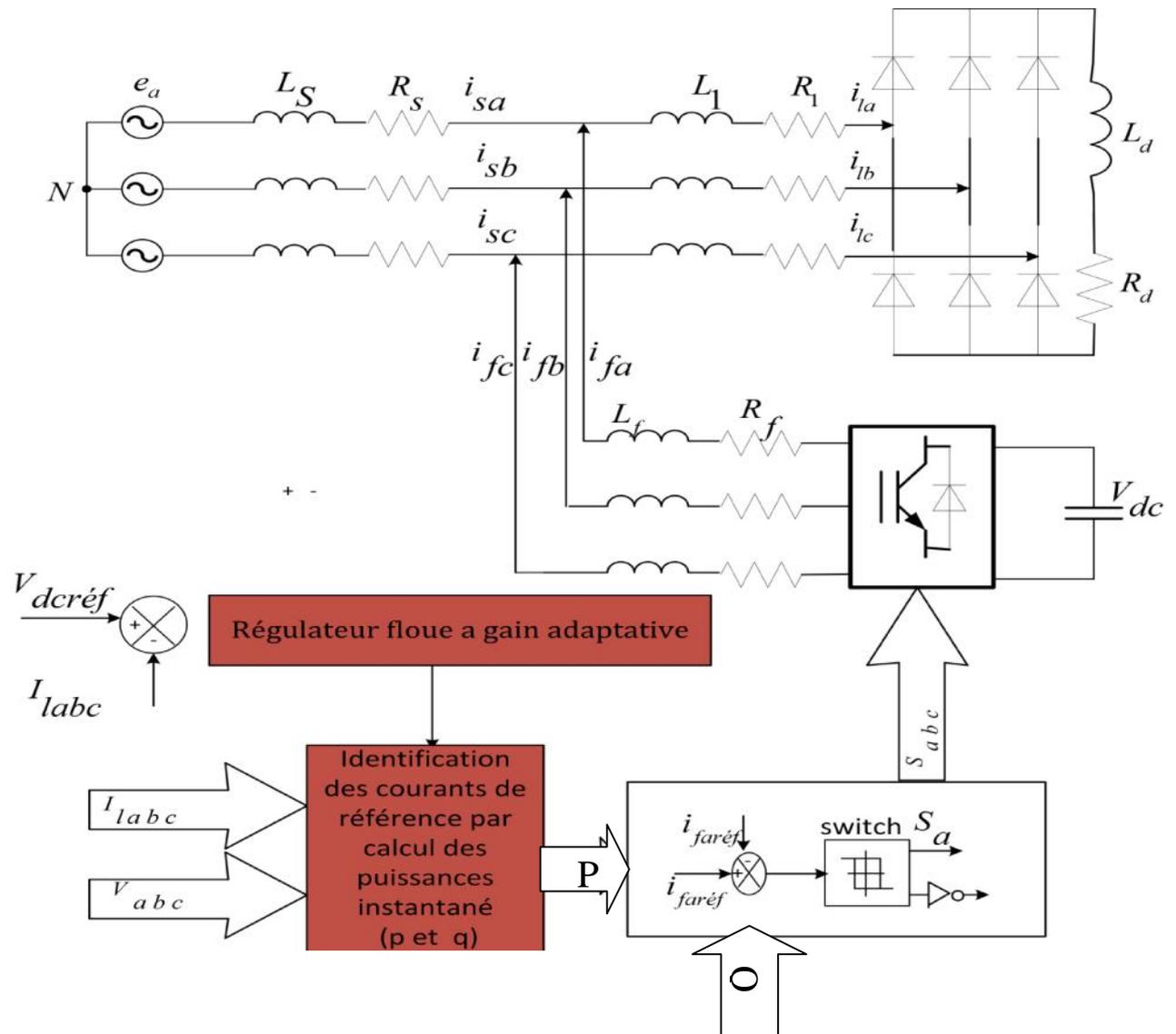


Figure (IV.12) : Commande directe par logique floue à gain adaptatif dans le repère triphasé

La tension d'entrée de l'onduleur est commandée par régulateur à logique floue à gain a

IV.7.3.2 synthèse du régulateur flou à gain adaptatif

La majorité des contrôleurs développés utilisent le schéma simple proposé par Mamdani pour les systèmes mono entrée / mono sortie. La figure (IV.12) représente le schéma bloc du régulateur flou pour la tension continu V_c . Les gains à l'entrée et à la sortie du régulateur sont à déterminer par ajustement afin d'avoir la réponse désirée.

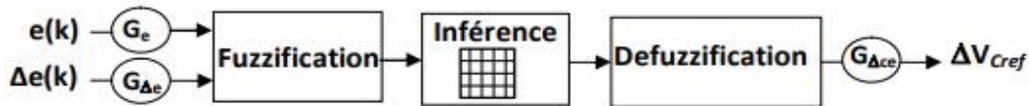


Figure (IV.13) : Schéma bloc du Régulateur flou

IV.8 Résultats de simulation

La simulation est effectuée avec les paramètres présentés dans le tableau IV : 03

L'implantation du régulateur flou est réalisée par le Fuzzy Inférence System Editor de l'environnement Matlab/Fuzzy Logique Toolbox.

sampling period	10^{-6}
Source voltage Vs and frequency f	220V rms, 50 Hz
Source résistance (Rs), inductance (Ls)	$3.5e-4$, 0.0023mH
Load resistance (RL), inductance (L _L)	$0.82e-3$ 0.8mH
Input PD inductance (Rc)	1mH
Output filter inductance Lf	3mH
DC-bus capacitor C, voltage reference Vdc	2200μF,700V

Tableau IV 03 les paramètres de simulation

Le système de contrôle du bus continu est testé ainsi que la méthode DPC suite à une variation de la tension Vdc survenue à $t = 0,5s$ de 600V à 750V. la figure 8 montre le spectre harmonique de la forme d'onde déformée. La distorsion harmonique totale (THD) du courant de ligne déformé est de 24.59% du spectre harmonique, il est évident que le courant d'alimentation est déformé en raison de la dominance des composantes spectrales des cinquième, septième et onzième harmoniques

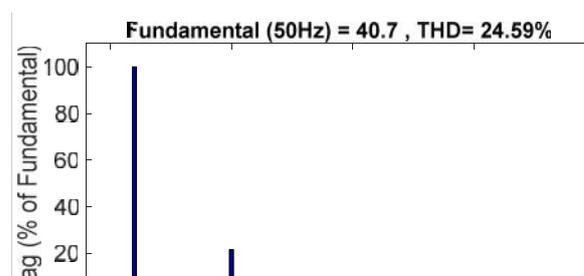


Figure IV.17 spectre d'harmonique pour le courant de ligne

Ensuite, un filtre actif avec contrôleur PI pour V_{dc} combiné avec un contrôleur flou pour l'hystérésis de bande adaptative (DPC-AFLC) est connecté en parallèle avec la charge. la fig IV.18 montre le spectre harmonique. le THD est de 1,07%

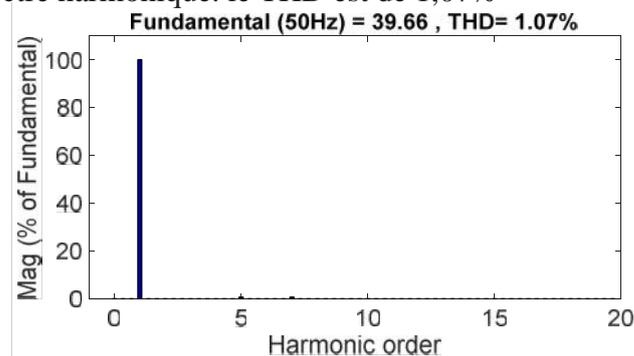


Figure IV.18 spectre d'harmonique pour le courant de ligne avec filtre

Les performances du système avec AFLC- V_{dc} pour tension continue et contrôleur (DPC-AFLC) pour l'hystérésis de bande adaptative ont été analysées et le spectre harmonique est montré sur la figure IV.19 il montre que le courant harmonique de la source a diminué et le THD a diminué de 1,07% à 0,69%

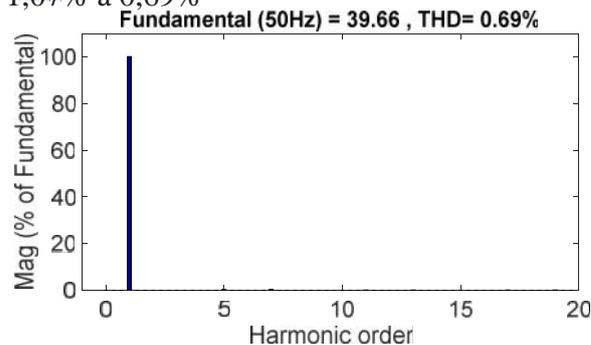


Figure IV.19 spectre d'harmonique pour le courant de ligne avec filtre

L'efficacité de la commande floue de tension continue est illustrée par la figure IV.20 La tension et le courant de ligne sont presque en phase, et donc le facteur de puissance est égal à 1.

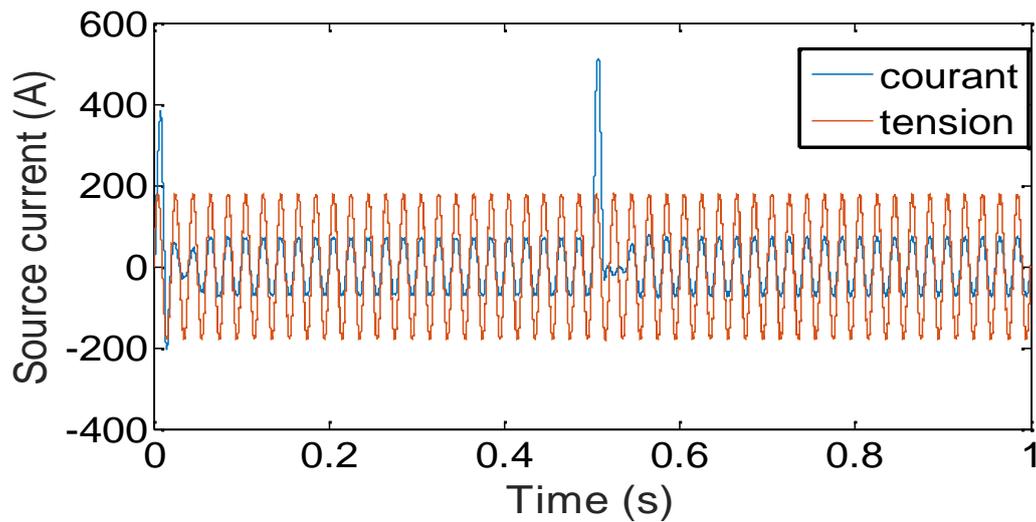


Figure IV.20 tension et courant de ligne en phase

La forme d'onde du courant de ligne est proche de la sinusoïde, et par conséquent le THD (taux harmonique de distorsion) a été réduit.

Sur la figure IV.17, nous pouvons voir que le système est devenu stable et robuste. La réponse du système est très rapide. La supériorité du contrôleur flou par rapport au contrôleur PI classique est claire

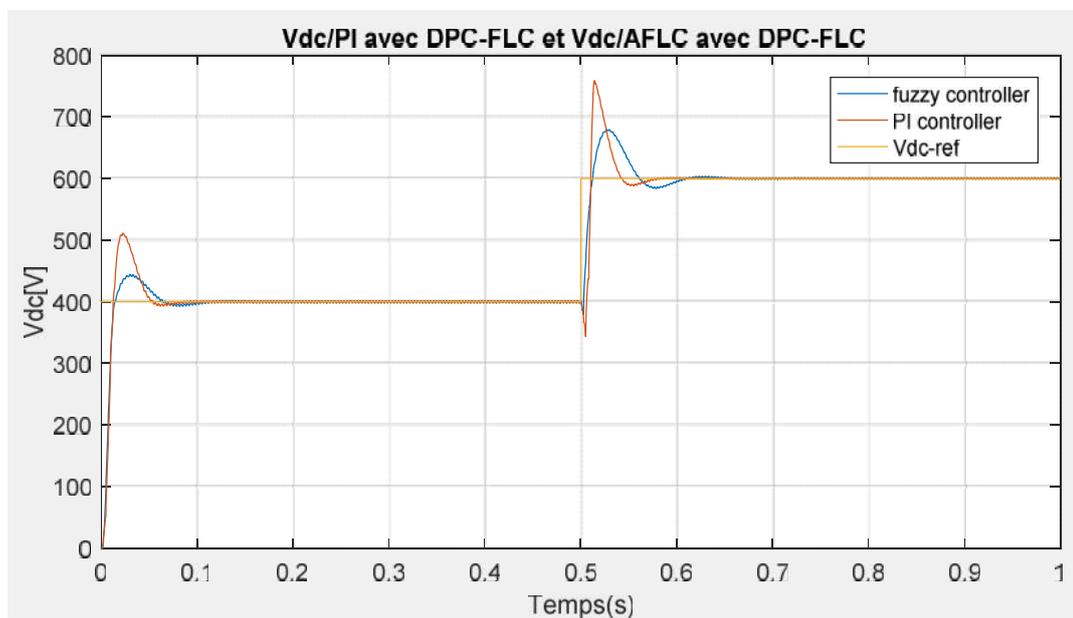


Figure : (IV: 21: a) Control system step response

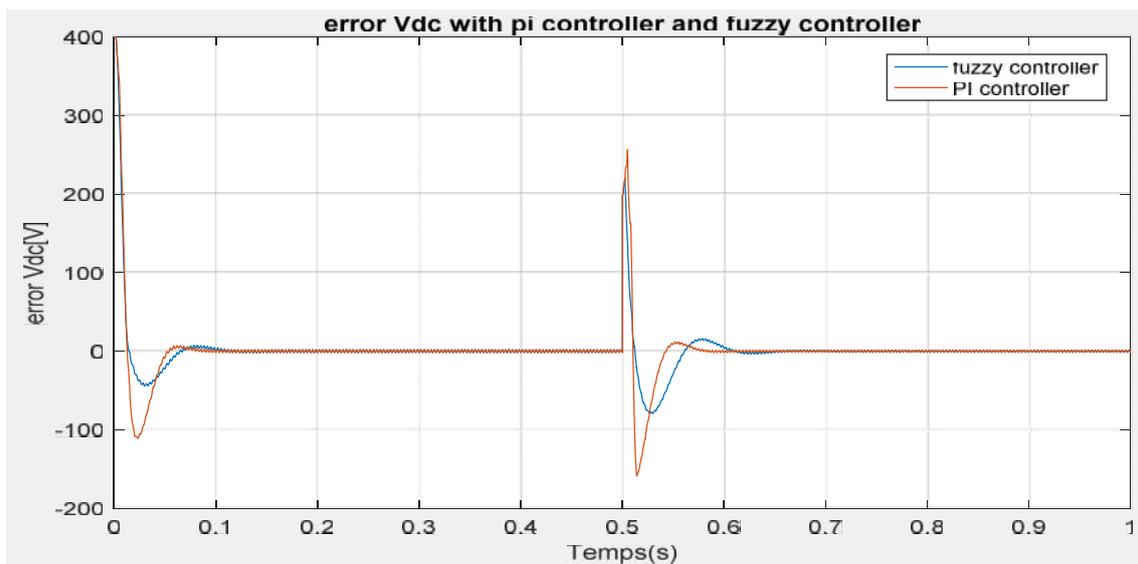


Figure : (IV: 21: b) erreur Vdc avec régulateur PI et régulateur flou

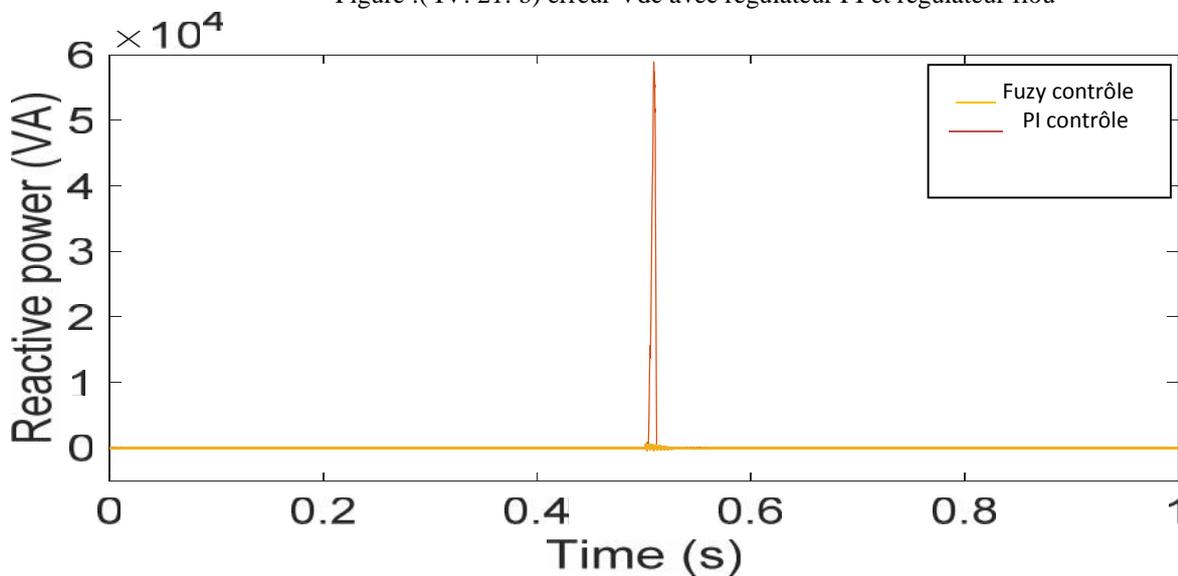


Figure IV.22: estimation instantanées de la puissance réactive

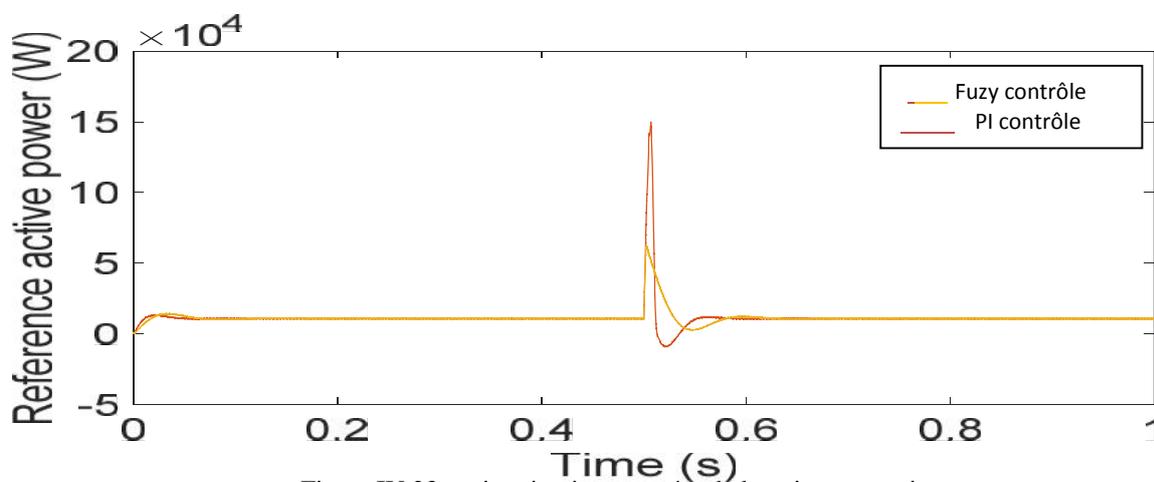


Figure IV.23: estimation instantanées de la puissance active

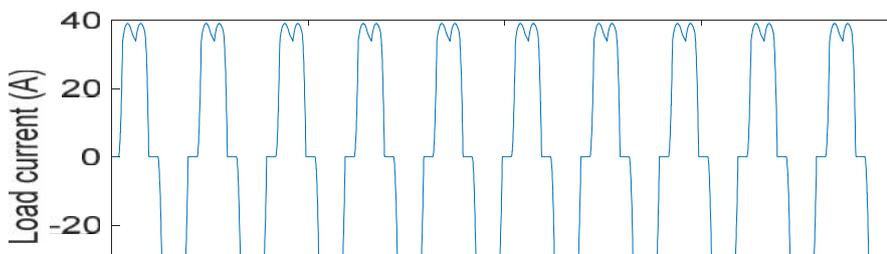


Figure IV.24 : Courant de charge

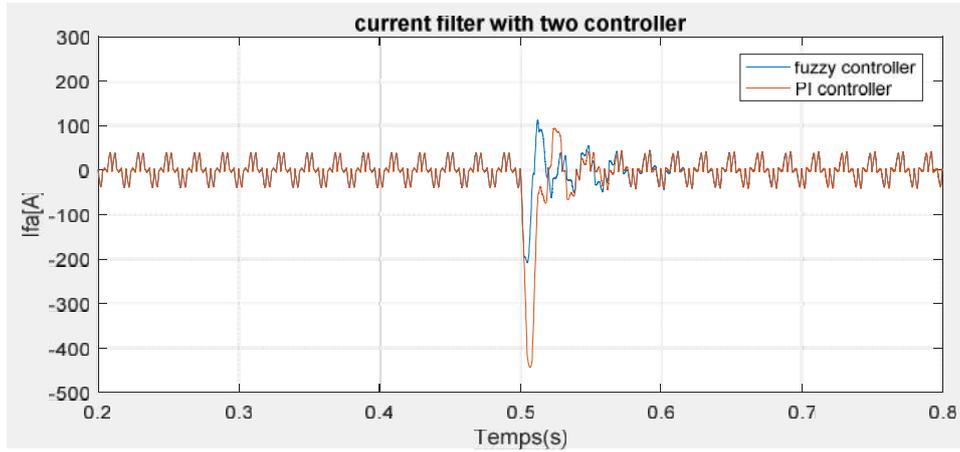


Figure. IV.25 : courant de filtre avec deux différents régulateurs

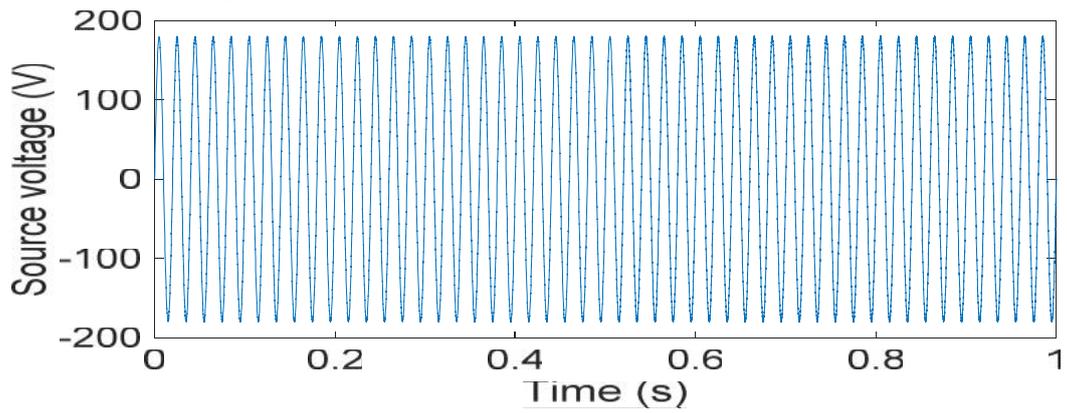


Figure. IV.26 : Tension de source

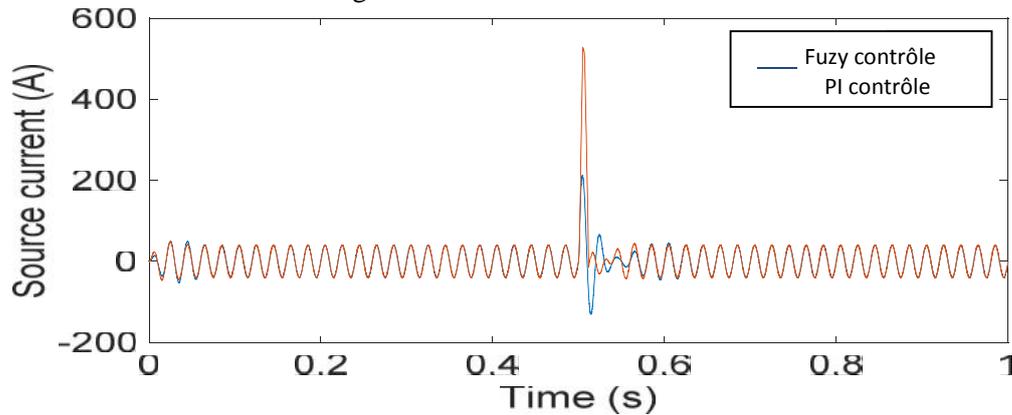


Figure. IV.26 : Courant de source

Tableau IV : 04 : Comparaison du temps de stabilisation entre les contrôleurs PI et Fuzzy

1

	THD% avec deux charges différentes	
	Rl = 6.7 , Ll = 20mH	Rd=0.78e-3 ; Ld=2.5e-3
avec Vdc(PI)/DPC(FLC)	1.07	1.415
Avec Vdc(FLC)/DPC(FLC)	0.69	0.82

Tableau IV : 04 THD% du courant de charge

IV .9 Conclusion:

Le contrôle proposé pour le SAFP d'avoir l'utilisation du contrôleur flou en deux étapes différentes (au niveau du bus DC et au niveau du contrôleur d'hystérésis) a montré sa supériorité par rapport à la combinaison de deux contrôleurs classiques et intelligents, en fait les performances du filtre actif avec la commande proposée sont excellentes et le courant de source est pratiquement sinusoïdal. Le THD est passé de 1,07 à 0,69 et finalement le courant de source est en phase avec la tension d'alimentation (facteur de puissance égal à 1)

Conclusion Générale

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

Pour atteindre notre objectif, différentes stratégies de modulation de l'onduleur de tension à deux niveaux. Tels que la commande par hystérésis, la commande MLI vectorielle, ont été étudiées. La commande par hystérésis est robuste et simple à mettre en œuvre, mais sa fréquence de commutation est variable et incontrôlable.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté les perturbations, en courant et en tension, des réseaux électriques connectés à des charges dites polluantes

Dans le deuxième chapitre nous avons présenté La méthode directe permet de réguler les courants du filtre actif des régulateurs de type PI dans les repères triphasé, basée sur la méthode des puissances active et réactive instantanées,. le troisième chapitre est entièrement consacré à l'étude de la technique de Contrôle Direct de Puissance DPC.

Le quatrième chapitre a été concentré sur la méthode de commande par logique floue et son application dans la commande du filtre actif parallèle

Comme perspectives pour la suite de ces travaux on peut citer :

- réalisations pratiques pour valider nos modèles
- utiliser d'autres nouvelles stratégies développés récemment telle que: Prédictive DPC.

Annexe

Contrôle direct de la puissance d'un redresseur triphasé

Permien programme

```
function n = fcn(phi)
n=0;
if(phi>=0)&&(phi<pi/6)
    n=2;
end
if(phi>pi/6)&&(phi<pi/3)
    n=3;
end
if(phi>=pi/3)&&(phi<pi/2)
    n=4;
end
if(phi>=pi/2)&&(phi<2*pi/3)
    n=5;
end
if(phi>=2*pi/3)&&(phi<5*pi/6)
    n=6;
end
if(phi>=5*pi/6)&&(phi<pi)
    n=7;
end
if(phi>=-pi)&&(phi<-5*pi/6)
    n=8;
end
if(phi>=-5*pi/6)&&(phi<-2*pi/3)
    n=9;
end
if(phi>=-2*pi/3)&&(phi<-pi/2)
    n=10;
end
if(phi>=-pi/2)&&(phi<-pi/3)
    n=11;
end
if(phi>=-pi/3)&&(phi<-pi/6)
    n=12;
end
if(phi>=-pi/6)&&(phi<0)
    n=1;
end
```

Programme pour determiner les 6 secteurs

```
function n = fcn (dp, dq, sector)
n=0;
%sector1
If (sector==2) && (dp==1) && (dq==0)
    n=1;
end
if (sector==2) && (dp==1) && (dq==1)
    n=0;
end
if (sector==2)&&(dp==0)&&(dq==0)
    n=1;
end
if (sector==2)&&(dp==0)&&(dq==1)
    n=2;
end
if
    (sector==3)&&(dp==1)&&(dq==0)
        n=7;
end
if (sector==3)&&(dp==1)&&(dq==1)
    n=7;
end
if (sector==3)&&(dp==0)&&(dq==0)
    n=1;
end
if (sector==3)&&(dp==0)&&(dq==1)
    n=2;
end
%sector2
if (sector==4)&&(dp==1)&&(dq==0)
    n=2;
end
if (sector==4)&&(dp==1)&&(dq==1)
    n=0;
end
if (sector==4)&&(dp==0)&&(dq==0)
    n=2;
end
if (sector==4)&&(dp==0)&&(dq==1)
    n=3;
end
if (sector==5)&&(dp==1)&&(dq==0)
    n=7;
end
if (sector==5)&&(dp==1)&&(dq==1)
    n=7;
end
if (sector==5)&&(dp==0)&&(dq==0)
```

```

        n=2;
end
if(sector==5)&&(dp==0)&&(dq==1)
    n=3;
end
    %sector3
if(sector==6)&&(dp==1)&&(dq==0)
    n=3;
end
if(sector==6)&&(dp==1)&&(dq==1)
    n=0;
end
if(sector==6)&&(dp==0)&&(dq==0)
    n=3;
end
if(sector==6)&&(dp==0)&&(dq==1)
    n=4;
end
if(sector==7)&&(dp==1)&&(dq==0)
    n=7;
end
if(sector==7)&&(dp==1)&&(dq==1)
    n=7;
end
if(sector==7)&&(dp==0)&&(dq==0)
    n=3;
end
if(sector==7)&&(dp==0)&&(dq==1)
    n=4;
end
    %sector4
if(sector==8)&&(dp==1)&&(dq==0)
    n=4;
end
if(sector==8)&&(dp==1)&&(dq==1)
    n=0;
end
if(sector==8)&&(dp==0)&&(dq==0)
    n=4;
end
if(sector==8)&&(dp==0)&&(dq==1)
    n=5;
end
if(sector==9)&&(dp==1)&&(dq==0)
    n=7;
end
if(sector==9)&&(dp==1)&&(dq==1)
    n=7;
end
if(sector==9)&&(dp==0)&&(dq==0)
    n=4;

```

```

end
if(sector==9)&&(dp==0)&&(dq==1)
    n=5;
end
%sector5
if(sector==10)&&(dp==1)&&(dq==0)
    n=5;
end
if(sector==10)&&(dp==1)&&(dq==1)
    n=0;
end
if(sector==10)&&(dp==0)&&(dq==0)
    n=5;
end
if(sector==10)&&(dp==0)&&(dq==1)
    n=6;
end
if(sector==11)&&(dp==1)&&(dq==0)
    n=7;
end
if(sector==11)&&(dp==1)&&(dq==1)
    n=7;
end
if(sector==11)&&(dp==0)&&(dq==0)
    n=5;
end
if(sector==11)&&(dp==0)&&(dq==1)
    n=6;
end
%sector6
if(sector==12)&&(dp==1)&&(dq==0)
    n=6;
end
if(sector==12)&&(dp==1)&&(dq==1)
    n=0;
end
if(sector==12)&&(dp==0)&&(dq==0)
    n=6;
end
if(sector==12)&&(dp==0)&&(dq==1)
    n=1;
end
if(sector==1)&&(dp==1)&&(dq==0)
    n=7;
end
if(sector==1)&&(dp==1)&&(dq==1)
    n=7;
end
if(sector==1)&&(dp==0)&&(dq==0)
    n=6;
end

```

```

if (sector==1) && (dp==0) && (dq==1)
    n=1;
end

```

Les matrices de transformation:

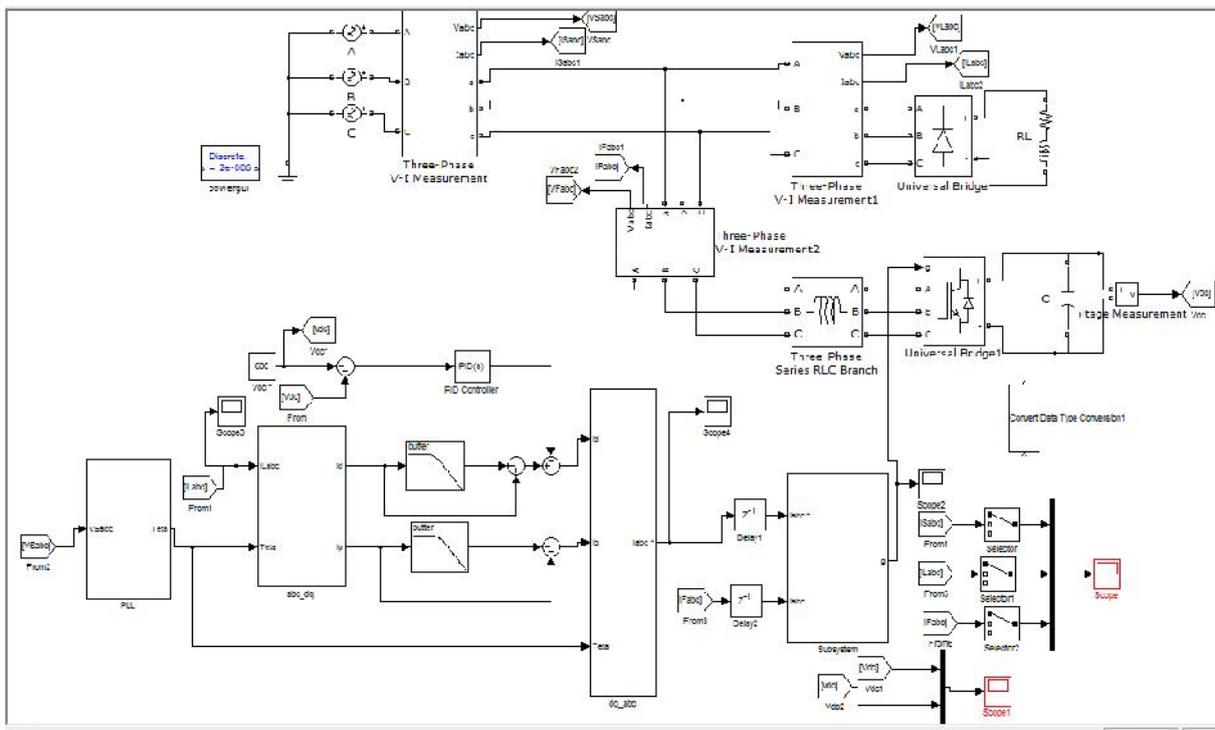
$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix}$$

Paramètres de la 2eme simulation :

Schéma de la deuxième simulation sous MATLAB/Simulink



- [1] : **M' BOUKADUM AZIZE**, « CONTRIBUTION A L'ANALYSE ET LA REDUCTION DE LA POLLUTION HARMONIQUE DANS LE RESEAU ELECTRIQUE », Mémoire de magister, Université BADJI MOKHTAR – ANNABA, Octobre 2007.
- [2] : **M' MOHAMED ZELLAGUI**, **Mater** de conférences université de BATNA2 «QUALITI D'ENERGIE ELECTRIQUE (QEE)», 2018
<https://www.researchgate.net/publication/323228398>
- [3] : **VANYA IGNATOVA** : «METHODE D'ANALYSE DE LA QUALITE DE TENSION ET LA POLLUTION HARMONIQUE » ,T H E S E DE DOCTORA, UNIVERSITE JOSEPH FOURIER, Octobre 2006.
- [4] : **DJAFFAR OULD ABDESLAM** :« Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension » , Thèse préparée au sein du laboratoire MIPS sous la direction de Jean MERCKLE et de Francis BRAUN, Université de Haute-Alsace, 2005.
- [5] : **ABDELMALEK BOULAHIA** : «Etude des Convertisseurs Statiques destinés à la Qualité de l'Energie Electrique» , MEMOIRE MAGISTER EN ELECTROTECHNIQUE , Université de Constantine, 2009.
- [6] : **ABDELMADJID CHAOUI** : «FILTRAGE ACTIF TRIPHASE POUR CHARGES NON LINEAIRES» , T H E S E DE DOCTORA , 'UNIVERSITÉ DE FERHAT ABBAS DE SÉTIF , Octobre 2010.
- [7] : **DJEFFAL El hadi** : « PROPAGATION DES HARMONIQUES DANS UN RÉSEAU ÉLECTRIQUE DOTÉ DE COMPENSATION STATIQUE » , MÉMOIRE DE MASTER, UNIVERSITÉ LARBI BEN M'HIDI DE OUM EL BOUAGHI, 2016.
- [8] : **SAIM Abdelhakim** : « Commande à base de descripteurs flous d'une architecture de génération distribuée » , T H E S E DE DOCTORA , UNIVERSITÉ MOULOUD MAAMERI DE TIZI-OUZOU , 2017 .
- [9] : **GHADBANE Ismail** : « Etude Et Réalisation D'un Filtre Actif Parallèle En Utilisant Différentes Stratégies De Contrôle » , T H E S E DE DOCTORA, Université Mohamed Khider – Biskra, 2016.
- [10] : **Mr. Bougrine Abdelkader, Me. Nennar Naima** : « Commande directe de puissance DPC d'une MADA intégrée à un système éolien » , MÉMOIRE DE MASTER,

UNIVERSITE AHMED DRAIA ADRAR.

[11] : **BELAOURA Abdelkader, BOUSSAID Ibrahim** : « contrôle directe de la puissance avec modulateur vectoriel (DPC-SVM) d'un redresseur PWM triphasé » MÉMOIRE DE MASTER, UNIVERSITE d'ADRAR, Mai 2017.

[12] : **BENGANA Sara** : « stratégies de contrôle directe de puissance d'un redresseur PWM triphasé » , mémoire master académique, université kasdi merbah _OURGLA, 2013.

[13]: **B. Robyns, F. Berthereau, J. P. Hauter, H. Buyse**: « *A fuzzy –logic-based Multimodel field orientation in an indirect foc of induction motor* » , IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 47, no. 2, pp. 380-388, Apr. 2000.

[14] **L. Leclerc, B. Robyns, J. Grave**: « *Control based on fuzzy logic a flywheel energy storage system associated with wind and diesel generators*» , Mathematics and Computers in Simulation, Éd. Elsevier, vol. 63, no. 3-5, pp. 271-280, Nov. 2003.

[15] **A. Rubaai, A. R. Ofoli**: « *Multilayer fuzzy controller for control of power networks* » , IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 40, no. 6, pp. 1521-1528, Nov./Dec. 2004.

[16]: **L. Zadeh**: «*Fuzzy sets*», Information and Control, pp. 338-353, 1965.

[17] **J. Faucher**: «*Les plans d'expériences pour le réglage de commandes à base de logique floue*», Thèse de docteur de l'Institut National Polytechnique de Toulouse (INPT), Toulouse, 2006.

[18] **Fateh krim, Soumia Kerrouche** « Three-phase Active power filter based on fuzzy logic », International journal of sciences and techniques , IJ-STA, Volume 3, N°1, july 2009 , pp 942 - 955

[19] **Golea, Noureddine, Golea, Amar, et Benmahammed, Khier** « Fuzzy model reference adaptive control» Fuzzy Systems, IEEE Transactions on, 2002, vol. 10, no 4, p. 436-444

[20] **H. Akagi**, “The State-of-the-Art of Active Filters for Power Conditioning”, in Rec. European Conference on Power Electronics and Applications, Dresden, pp. 1–15, September 2005.

[21] **elbia youcef** «*commande floue optimisée d'une machine asynchrone a double alimentation et à flux orienté* » , these de magistere soutenu le 15/06/2009 universite el hadj lakhdar batna faculte des sciences de l'ingenieur , departement d'electrotechnique. Algerie

[22] **M. El-Habrouk, M. K. Darwish, & P. Mehta**, “Active power filters: A review,” *IEEE Proc.-Electr. Power Appl.*, vol. 147, No. 5, pp. 403–413, September 2000.

[23] **M.N.Cirstea**: «Neural and Fuzzy Logic Control of Drives and Power System ».
Edition Elsevier-Science, ISBN 07506 55585, 2002.

[24] **P.Borne, J.Rozinoer, j.Y.dieulot et L.Dubois** «Introduction à la commande floue».
Edition Technip, Paris 1998.

[25] **J.Faucher** «Les plans d’expériences pour le réglage de commandes à base de logique floue».Thèse de doctorat de l’Institut National Polytechnique de Toulouse. Septembre 2006.

[26] **M.Kale and E.Ozdemir**« An Adaptive Hysteresis Band Current Controller for Shunt Active Power Filter» *Electric Power System Research*73, pp 113-119, 2005

[23] **J. S. Subjak Jr. & J. S. Mcquilkin**, “Harmonics-causes, effects, measurements, and analysis: An update,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 26, No. 6, pp. 1034–1042, Nov./Dec. 1990.

[24] **T. C. Shuter, H. T. Vollkommer, Jr., & J. L. Kirkpatrick**, “Survey of harmonic levels on the American electric power distribution system”, *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 4, No. 4, pp. 2204–2213, October 1989.

[25] **A. E. Emanuel, J. A. Orr, D. Cyganski, & E. M. Gulchenski**, “A survey of harmonics voltages, currents at the customer’s bus”, *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 8, No. 1, pp. 411–421, January 1993.

[26] **H. Sasaki & T. Machida**, “A new method to eliminate AC harmonic currents by magnetic flux compensation-considerations on basic design”, *IEEE Trans. Power Appl. Syst.*, vol. PAS-90, No. 5, pp. 2009–2019, Jan. 1971.

[27] **L. Gyugyi and E. Strycula**, “Active AC power filters”, in *Conf. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting*, 1976, pp. 529–535.

[28] H. djeghloud " Filtrage actif de puissance " thèse de doctorat Soutenue le: 12/12/2007

UNIVERSITÉ MENTOURI CONSTANTINE

Résumé

L'utilisation des convertisseurs de l'électronique de puissance a augmenté sensiblement le niveau de la pollution harmonique des réseaux électriques. En effet, ces équipements, considérés comme des charges non linéaires, absorbent des courants non sinusoïdaux et consomment de la puissance réactive.

Le passage des courants harmoniques dans l'impédance du réseau électrique entraîne inévitablement des tensions harmoniques et par conséquent, pollue les consommateurs alimentés par le même réseau. Alors, une action technique, pour réduire l'effet indésirable de ces harmoniques, est devenue indispensable et ce, pour assurer la qualité souhaitée de l'énergie électrique.

A cet effet, ce mémoire présente d'abord une étude justifiant la présence des perturbations harmoniques dans les réseaux causées par les convertisseurs statiques, puis, les moyens techniques traditionnels et modernes existants pour permettre leur atténuation. Toutefois, dans le cadre de la réalisation de ce mémoire une attention particulière est réservée aux techniques de filtrages actifs parallèle et série.

Effectivement, les techniques modernes de filtrages actifs ne peuvent être fiables que si la méthode d'identification, des harmoniques à éliminer, soit efficace. Ainsi, nous avons traité dans ce mémoire une technique intelligente à base d'un régulateur flou pour le filtrage actif.

Elle consiste au remplacement du correcteur classique PI du bus continu par le régulateur flou ainsi que dans la bande d'hysteresis de la commande DPC (PI-AFLC-DPC).

Des simulations numériques sous Matlab-Simulink permettront de valider les développements théoriques.

The use of converters in power electronics has significantly increased the level of harmonic pollution of electrical networks. In fact, this equipment, considered as non-linear loads, absorbs non-sinusoidal currents and consumes reactive power. The passage of harmonic currents in the impedance of the electrical network inevitably leads to harmonic voltages and therefore pollutes consumers supplied by the same network. So, technical action to reduce the undesirable effect of these harmonics has become essential to ensure the desired quality of electrical energy. To this end, this thesis first presents a study justifying the presence of harmonic disturbances in networks caused by static converters, then the existing traditional and modern technical means to allow their attenuation. However, in the context of the production of this memory, particular attention is given to the techniques of active parallel and serial filtering. Indeed, modern active filtering techniques can only be reliable if the method of identifying the harmonics to be eliminated is effective. Thus, in this thesis we have dealt with an intelligent technique based on a fuzzy regulator for active filtering. It consists in replacing the classic PI corrector of the DC bus by the fuzzy regulator as well as in the hysteresis band of the DPC control (PI-AFLC-DPC). Numerical simulations under Matlab-Simulink will make it possible to validate the theoretical developments.

أدى استخدام المحولات في إلكترونيات الطاقة إلى زيادة كبيرة في مستوى التلوث التوافقي للشبكات الكهربائية. في الواقع ، هذه المعدات ، التي تعتبر أحمالاً غير خطية ، تمتص التيارات غير الجيبية وتستهلك الطاقة التفاعلية.

يؤدي مرور التيارات التوافقية في مقاومة الشبكة الكهربائية حتماً إلى جهد توافقي وبالتالي يلوث المستهلكين المزودين من نفس الشبكة. أصبح الإجراء الفني لتقليل التأثير غير المرغوب فيه لهذه التوافقيات ضرورياً لضمان الجودة المطلوبة للطاقة الكهربائية. تحقيقاً لهذه الغاية ، تقدم هذه الأطروحة أولاً دراسة تبرر وجود الاضطرابات التوافقية في الشبكات التي تسببها المحولات الساكنة ، ثم الوسائل التقنية التقليدية والحديثة القائمة للسماح بتوحيدها. ومع ذلك ، في سياق إنتاج هذه الذاكرة ، يتم إيلاء اهتمام خاص لتقنيات التصفية المتوازية

في الواقع ، لا يمكن الاعتماد على تقنيات التصفية النشطة الحديثة إلا إذا كانت طريقة تحديد التوافقيات المراد إزالتها فعالة. وهكذا ، في هذه الأطروحة تعاملنا مع تقنية ذكية تعتمد على منظم ضبابي للترشيح النشط.

(DPC (PI-AFLC-DPC

وهو يتألف من استبدال مصحح PI الكلاسيكي لناقل DC

التطورات النظرية.

ستجعل المحاكاة العددية تحت Matlab-Simulink