

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Mémoire de Fin d'Études

Présenté à

L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued

Faculté de la Technologie

Département de Génie Electrique

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

En commande électrique

Présenté par

Mereddef Mohammed Amine

Hamadene Ayoub

Thème

Commande par Réseaux de Neurones Artificiels d'un Filtre Actif Parallèle

Soutenu le .. /06/2023. Devant le jury composé de :

Dr. ZELLOUMA Laid

Maitre de conférences A

Président

Dr. MAHNI Tidjani

Maitre de conférences A

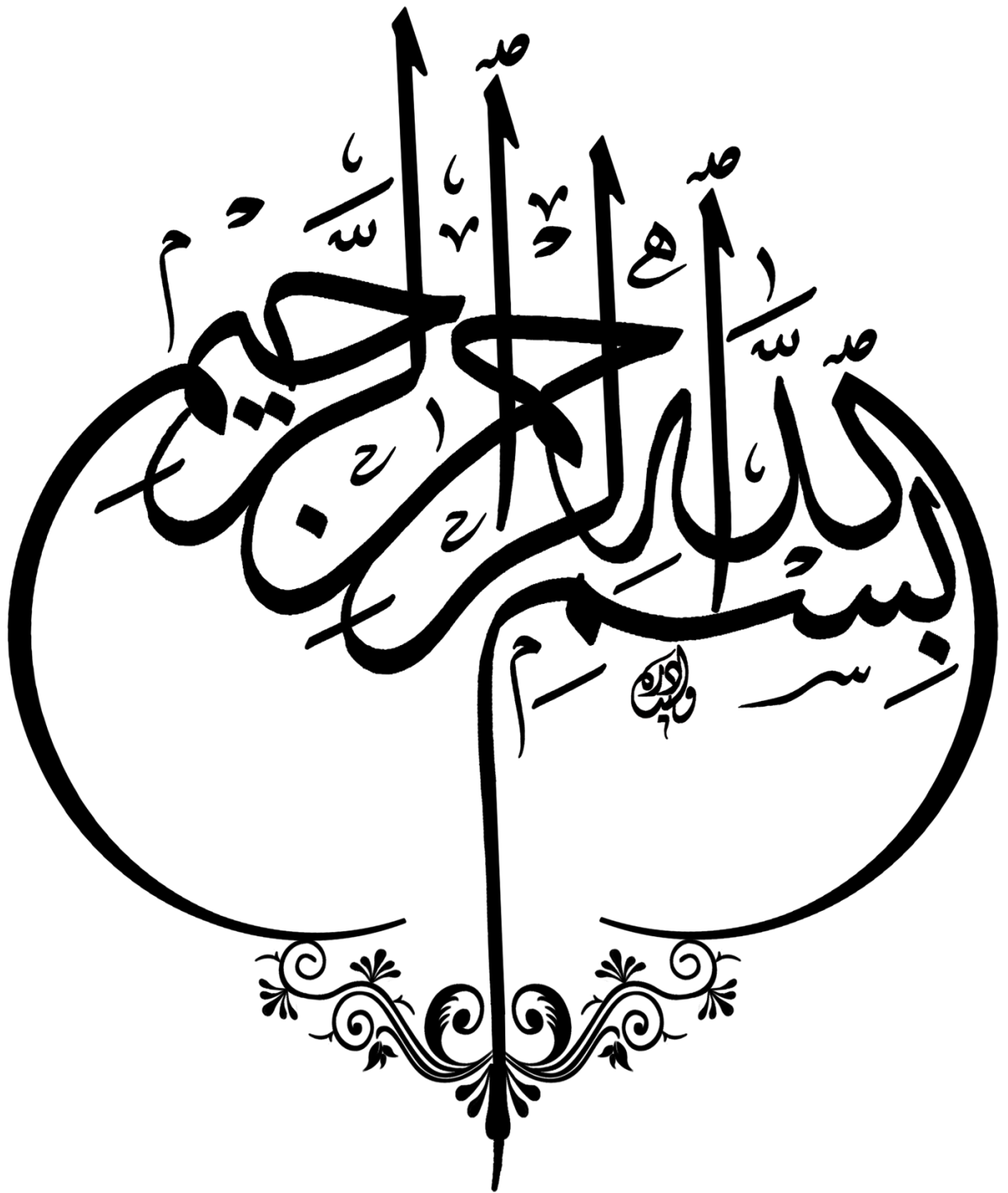
Rapporteur

Dr. GUIA Talal

Maitre de conférences A

Examineur

Année Universitaire 2022/2023





Remerciement

Nous remercions avant tout ALLAH Tout-Puissant de nous avoir donné et la volonté d'accomplir ce modeste travail .

Nous tenons à remercier vivement à encadreur Monsieur: Dr T. mahni , parce qu'il nous a accompagnés tout au long de la période de réalisation de ce travail et qui a coopéré avec nous et ne nous a pas épargné ses conseils et ses connaissances dont nous avons grandement bénéficié.

Nous offrons une salutation de remerciements tous les membres du jury qui ont accepté de juger nos travaux.

Nous sommes très reconnaissant les professeurs d'université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued , Surtout les professeurs du faculté de Technologie pour leur bénéfice à nous.

Enfin, Nous exprimons toute nos gratitudes à nos familles et amis et tous ceux qui ont contribué avec nous à mener à bien ce travail de près ou de loin.



Dédicas

Je dédie ce travail :

*Avant tout à mes chers parents,
qui m'ont soutenu durant toutes
ces années de formation. A mes
chères frères ,Et à toute ma famille*

*Tout comme je le dédie à tous
mes amis(e) qui m'ont aidé de
près ou de loin*

Ayoub



Dédicas

*A mes parents,
À mes frères et sœurs,
ma grande famille,
À mes ceux et celles qui
m'éprouvent de la véritable
amitié.*

Amine

Titre : Commande par Réseaux de Neurones Artificiels d'un Filtre Actif Parallèle Triphasé

Résumé :

Dans cette thèse, nous présentons des réseaux de neurones de type Adaline pour le filtrage des courants harmoniques par un filtre actif parallèle. Ces réseaux de type Adaline possèdent une structure simple et facile à réaliser.

Afin d'identifier les courants harmoniques dans le repère des courants triphasés, nous avons présenté la méthode neuronale directe. Cette méthode est testée par simulation, Les résultats obtenus ont été très satisfaisants et montrent l'efficacité du modèle proposé pour la dépollution du réseau électrique.

Mots Clés :

Compensation des harmoniques, Réseaux de Neurones Artificiels, Adaline.

Title: Artificial Neural Networks Control of Three-Phase Power

Active Filter

Abstract

In this thesis, we present Adaline-type neural networks for the filtering of harmonic currents by a parallel active filter. These Adaline-type networks have a simple structure that is easy to produce.

In order to identify the harmonic currents in the frame of three-phase currents, we presented the direct neural method. This method is tested by simulation. The results obtained were very satisfactory and show the effectiveness of the proposed model for the depollution of the electrical network.

Keywords:

Harmonic Compensation, Artificial Neural Networks, Adaline,

العنوان: تحكم عن طريق الشبكات العصبية الاصطناعية لمصفاة نشطة متوازية ثلاثية

الطور

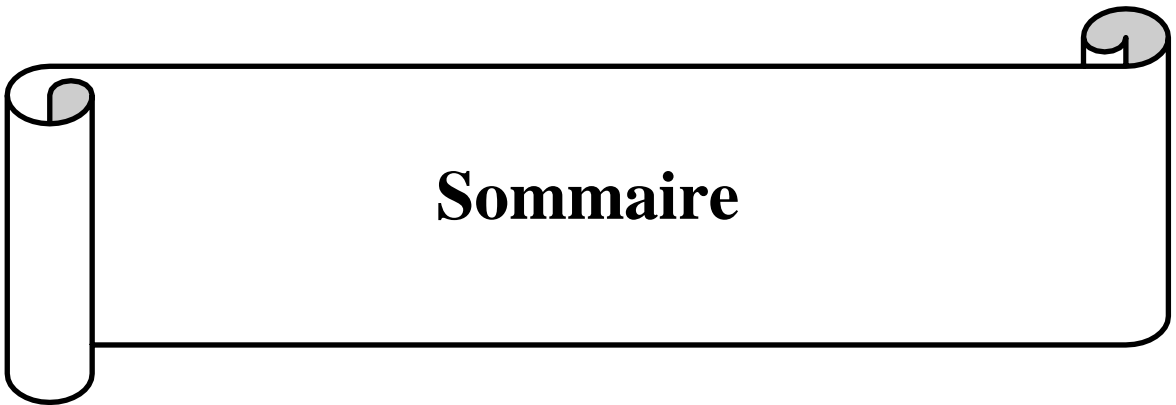
ملخص :

في هذه الأطروحة ، نقدم الشبكات العصبية من نوع أدلين لتصفية التيارات التوافقية بواسطة مرشح نشط متوازي. تتمتع هذه الشبكات من نوع أدلين ببنية بسيطة يسهل إنتاجها.

من أجل تحديد التيارات التوافقية في إطار التيارات ثلاثية الطور ، قدمنا الطريقة العصبية المباشرة. تم اختبار هذه الطريقة عن طريق المحاكاة وكانت النتائج التي تم الحصول عليها مرضية للغاية وتوضح فعالية النموذج المقترح لإزالة التلوث من الشبكة الكهربائية.

كلمات مفتاحية:

مصفاة نشطة متوازية، الاضطرابات في الشبكة الكهربائية، الشبكات العصبية الاصطناعية، أدلين.



Sommaire

SOMMAIRE

Introduction générale	1
 Chapitre I :Perturbation des réseaux électriques	
I.1.Introduction.....	3
I.2.Les perturbations des réseaux électriques.....	3
I.2.1. Creux et coupures de tension.....	3
I.2.2. Fluctuation de tension.....	4
I.2.3. Déséquilibre du système triphasé de tension.....	4
I.2.4. Variation de la fréquence.....	5
I.3.Les harmoniques.....	5
I.3.1.Le signal déformé.....	6
I.4.Sources des harmoniques.....	6
I.5.Caractérisation des perturbations harmoniques.....	7
I.5.1. Rang de l'harmonique.....	7
I.5.2. Le taux de distorsion harmoniques.....	7
I.5.3. Le facteur de puissance.....	7
I.6. Les effets des harmoniques.....	8
I.6. a.Les effets instantanés.....	8
I.6. b.Les effets à terme.....	8
I.7.Solutions de dépollution du réseau électrique.....	9
I.7.1.Solutions traditionnelles.....	10
I.7.1.a.Filtrerésonant.....	10
I.7.1.b.Filtre amorti.....	11
I.7.2.Solutions modernes.....	11
I.7.2.a.Filtrage Actif.....	12
I.7.2.b.Filtre actif parallèle (FAP).....	12
I.7.2.c.Filtre actif série (FAS).....	12

I.7.2.d.La combinaison parallèle-série actifs (UPQC).....	13
I.8.Conclusion.....	14

Chapitre II : La commande de filtre actif parallèle

II.1.Introduction.....	15
II.2.Principe de fonctionnement.....	15
II.3.Structure du filtre actif parallèle.....	16
II.3.1.Etude de la partie puissance.....	16
II.3.1.1.L'Onduleur.....	17
II.3.1.2.Système de stockage de l'énergie.....	19
II.3.1.3 Filtre de sortie.....	19
II.3.2. Etude de Partie commande du filtre actif parallèle.....	19
II.3.2.1.L'identification des courants de reference.....	20
II.3.2.1.a.Méthode du référentiel lié au synchronisme avec FPB.....	20
II.3.2.1.b.Méthode de référentiel synchrone avec FMV.....	22
II.3.2.1.c. Méthode des puissances instantanées réelle et imaginaire avec FPB.....	22
II.3.2.1.d. Méthode des puissances instantanées réelle imaginaire avec FMV.....	24
II.3.2.2.Commande de Onduleur.....	26
II.3.2.2.1.Commande par hysteresis.....	26
II.3.2.2.2.Commande des courants par MLI.....	27
II.3.2.3.Régulation de la tension de la source continue.....	27
II.3.2.3.1.Régulation proportionnel intégral (PI).....	28
II.3.2.3.1.1.Régulation par I_{dc}	28
II.3.2.3.1.2.Régulation par P_{dc}	29
II.3.2.4.la synchronisation à base de PLL.....	30
II.3.2.4.1.Structure générale de la PLL classique.....	31
II.4.Conclusion.....	31

Chapitre III : Identification des courants harmoniques par réseau de neurones

III.1.Introduction.....	32
III.2.Généralités sur les réseaux de neurones.....	32
III.2.1.Le modèle mathématique du neurone formel.....	33
III.2.2.Architecture des réseaux de neurones.....	34
III.2.3.Apprentissage des réseaux de neurones.....	34
III.2.3.a.Apprentissage supervisé.....	34
III.2.3.b.Apprentissage non supervisé.....	34
III.3.Avantages des techniques neuronales.....	35
III.4.Identifications des harmonique avec l'adaline.....	35
III.4.1.La méthode directe.....	36
III.4.1.1.Décomposition des courants.....	36
III.4.1.2.Identification des courants avec les Adalines.....	36
III.5.Conclusion.....	38

Chapitre IV : Les résultats de simulation

IV.1.Introduction.....	39
IV.2. Simulation de système de FAP à trois fils.....	39
IV.3. Résultats des simulations.....	39
IV.4. Conclusion.....	43
Conclusion générale.....	45
Bibliographie.....	46

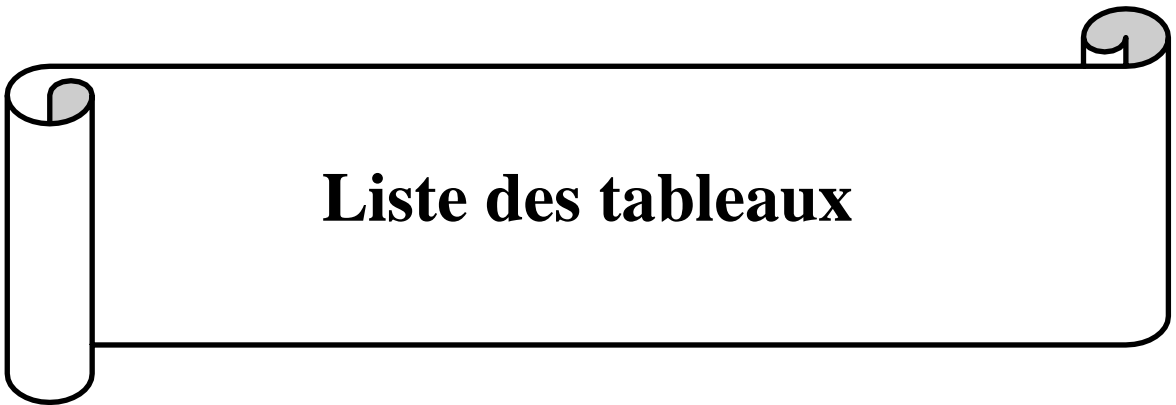


Liste des figures

LISTE DES FIGURE

Figure I.1 Creux et coupures de tension.....	4
Figure I.2 fluctuation de tension.....	4
Figure I.3 Déséquilibre du système triphasé de tension.....	5
Figure I.4 Variation de la fréquence.....	5
Figure I.5 Harmoniques	6
Figure I.6 Présentation spectrale d'un signal périodique.....	6
Figure I.7 Structure du filtre résonant.....	10
Figure I.8 Montage du filtre amorti.....	11
Figure I.9 Filtre actif parallèle.....	12
Figure I. 10 Filtre actif série.....	13
Figure I. 11 Filtre combiné parallèle-série (UPQC).....	13
Figure II. 1 Principe du filtrage actif parallèle.....	15
Figure II. 2 Structure générale d'un filtre actif parallèle.....	16
Figure II.3 Schéma du circuit de puissance d'un filtre actif parallèle à structure tension	17
Figure II . 4: Onduleur de tension triphasé.....	17
Figure II . 5 Identification par la méthode du SRF avec FPB.....	22
Figure II .6 Identification par la méthode du SRF avec FMV.....	22
Figure II.7 Méthode d'identification basée sur la méthode de PIRI avec FPB.....	23
Figure II.8 Méthode d'identification basée sur la méthode de PIRI avec FMV.....	26
Figure.II.9 Principe du contrôle par hystérisis.....	26
Figure II.10 Principe de contrôle du courant par MLI avec régulateur.....	27
Figure II.11 Boucle de régulation de la tension du bus continue avec Idc.....	29
Figure II.12 Boucle de régulation de la tension du bus continue par Pdc.....	30
Figure II.13 Structure classique d'une PLL.....	31
Figure. III.1 Les neurones biologiques.....	32

Figure. III.2: Schéma d'un neurone formel.....	33
Figure. III.3: Structure de l'Adaline pour la méthode d'identification directe.....	37
Figure.IV.1 Schéma globale du système étudié avec FAP à 3 fils.....	39
Figure IV.2 Modelé de l'identification sous Matlab/simulink des courants de référence (Phase a).....	40
Figure IV.3 Résultats de simulation avant l'insertion de filtre: (a) i_{sa} , (b) i_{fa}	41
Figure IV.4 Résultats de simulation lors de l'insertion du filtre: (a) Courant de la source i_{sa} , (b) Courant injecté par le filtre i_{fa}	41
Figure IV.5 Résultats de simulation après l'insertion de filtre: (a) Courant de la source i_{sa} , (b) Courant injecté par le filtre i_{fa}	42
Figure IV.6 Résultats de simulation avec variation de la charge: (a) Courant de la source i_{sa} , (b) Courant injecté par le filtre i_{fa} ,.....	42
Figure IV.7 Spectre d'harmonique de courant côté source: (a) Côté charge, (b) Côté source.....	43



Liste des tableaux

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 Sources des perturbations harmoniques.....	7
Tableau I.2 Effet des harmoniques sur quelques matériels.....	9
Tableau II.1.Tension générées par l'onduleur de tension à trois bras.....	19
Tableau II.2 Critères et définition d'une bonne qualité de régulation.....	27
Tableau IV.1 Paramètre du FAP à trois fils.....	40



Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

Depuis quelques années, l'utilisation des techniques de l'intelligence artificielle fait l'objet de nombreuses recherches émanant de plusieurs communautés scientifiques. La possibilité de commande sans modéliser le système, dans un environnement où celui-ci est soumis à des adaptations et des reconfigurations permanentes, présente un intérêt évident pour les industriels. Le domaine de l'intelligence artificielle a connu des progressions remarquables suite au développement de plusieurs théories solidement fondées telles que les réseaux de neurones artificiels, la logique floue, les réseaux neuro-flous et les algorithmes génétiques .

En effet, l'activité scientifique liée aux applications de ces nouvelles techniques dans les systèmes électriques n'a cessé d'augmenter. Dans ce mémoire, nous présentons des stratégies intelligentes nouvellement introduites dans le monde de l'électronique de puissance. Il s'agit principalement des réseaux de neurones artificiels et les différentes structures qui leurs sont associées en identification/commande appliquées sur un système de filtrage actif .

Les harmoniques sont générées par les charges non linéaires connectées au réseau 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, cette pollution harmonique peut également conduire à l'échauffement des câbles et des équipements électriques ou bien encore à l'arrêt soudain des machines tournantes, voire la destruction totale de tous ces équipements. Pour diminuer ou supprimer ces perturbations et améliorer la qualité de l'énergie électrique, plusieurs solutions de dépollution des réseaux électriques ont été déjà proposées dans littérature. Il existait en fait de moyens conventionnels (compensation passive) pour remédier à la plupart des imperfections rencontrées dans les réseaux électriques et causées par les harmoniques et la puissance réactive, sauf que ces systèmes de filtrage traditionnel présentent certains inconvénients comme le phénomène de résonance, etc..

Parmi les solutions de dépollution harmonique, l'utilisation des filtres passifs est la plus répandue. Elle consiste à empêcher le courant harmonique produit par la charge de se propager à travers le réseau et le piégeant dans un circuit d'éléments passifs (LC) connecté en parallèle avec la charge, cette solution est peut-être la moins chère mais sans doute pas la plus efficace. En effet le calcul des composants du filtre (LC) suppose la connaissance préalable des caractéristiques du réseau et de la charge polluante.

Les Réseaux de Neurones Artificiels (RNAs), appelés aussi réseaux neuromimétiques, constituent à ce jour un outil de traitement de données bien comprise et bien maîtrisée. De façon formelle, un RNA est une fonction mathématique associant à des entrées, des grandeurs de sortie à l'aide de paramètres ajustables appelés des poids. A partir d'un ensemble de données représentatives, il est possible d'ajuster les poids pour apprendre une fonction quelconque. Grâce à ce processus d'apprentissage, les RNAs sont des approximateurs universels parcimonieux capables d'estimer un modèle complexe avec une précision voulue. Ils réalisent à la fois des fonctionnalités d'identification, de contrôle ou de filtrage. Ils

prolongent les techniques classiques de l'automatique non linéaire et peuvent conduire vers des solutions efficaces et robustes. Ils sont donc logiquement utilisés dans les systèmes électriques et en particulier au sein d'une architecture de FAP.

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

Pour éliminer les courants harmoniques dans les réseaux électriques, nous aborderons dans le chapitre deux le principe et l'architecture d'un filtre actif parallèle . La structure du FAP a été divisée en deux parties : la partie puissance et la partie contrôle-commande. Dans la partie puissance, nous introduirons la modélisation des trois principaux blocs à savoir l'onduleur de tension, l'élément de stockage d'énergie et le filtre de sortie. Dans la partie contrôle commande, nous aborderons les quatre principaux blocs qui sont l'identification des courants de référence, la commande de l'onduleur (hystérésis et MLI), la régulation de la tension continue. la synchronisation à base de PLL.

Dans le troisième chapitre, nous rappelons le principe de fonctionnement de la technique de commande basé sur l'intelligence artificielle en développant plus particulièrement les réseaux de neurones artificiels. Ce chapitre qui correspond à un état de l'art montre l'apport de ces nouvelles techniques dans le cas particulier de la compensation des harmoniques dans les réseaux électriques. En suite, Nous utilisons une nouvelle méthode d'extraction des courants harmoniques. Cette technique utilise les réseaux de neurones de type ADALINE (méthode directe) avec comme vecteur d'entrée les termes de la décomposition en série de Fourier du signal de courant de la source.

Le quatrième chapitre sera porté sur l'application de la méthode d'identification neuronale directe et simulation du système avec Matlab/Simulink/SimPowerSystems, dans ce cas l'Adaline fonctionne directement dans l'espace du courant du réseau d'alimentation électrique. Après une présentation de la méthode neuronale directe et une brève description de la plate-forme expérimentale du FAP.

CHAPITRE I



**Perturbation des réseaux
électriques**

1. Introduction

L'énergie électrique, principalement produite et distribuée sous forme de tensions triphasées sinusoïdales, permet de fournir la puissance électrique nécessaire aux différentes charges sur le réseau électrique. Lorsque la forme d'onde de la tension n'est plus sinusoïdale, on rencontre des perturbations qui peuvent affecter le bon fonctionnement de nombreux équipements et de charges raccordés au réseau. Dans ces conditions, des problèmes de compatibilité électromagnétique peuvent survenir entre ces éléments connectés au réseau. L'utilisation croissante des équipements de l'électronique de puissance sur les réseaux électriques contribue à la détérioration de la tension d'alimentation. En effet, ces charges dites déformantes sont non linéaires et appellent du réseau électrique un courant non sinusoïdal possédant un contenu harmonique. Ces courants harmoniques circulant à travers les impédances du réseau peuvent, lorsqu'ils sont importants en amplitude, créer des tensions harmoniques et ainsi perturber le fonctionnement des autres équipements branchés au point commun de raccordement [1].

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

2. Les perturbations des réseaux électriques

Les réseaux électriques sont très pollués et soumis à de multiples agressions à cause des perturbations électriques, qu'on peut définir en cinq catégories [2] :

- Creux de tension
- Fluctuations de la tension
- Déséquilibre de système triphasé
- Variation de fréquence
- Harmonique et inter-harmonique

2.1. Creux et coupures de tension

Le creux de tension est une diminution brutale de la tension à une valeur située entre 10% et 90% de la tension nominale pendant une durée allant de 10 ms jusqu'à quelque second.

Les creux de tension sont dus à des phénomènes naturels comme la foudre, ou à des défauts sur l'installation ou dans les réseaux tant publics que ceux des utilisateurs. Ils s'apparaissent également lors de manœuvres d'enclenchement mettant en jeu des courants de fortes intensités (moteurs, transformateurs, etc.) [3]

Une coupure de tension quant à elle est une diminution brutale de la tension à une valeur supérieure à 90% de la tension nominale ou disparition totale pendant une durée généralement

comprise entre 10ms et une minute pour les coupures brèves et supérieure à une minute pour les coupures longues

La plupart des appareils électriques admettent un coupure totale d'alimentation d'une durée inférieure à 10 ms. La figure (I.1) montre un exemple de creux et de coupure de tension

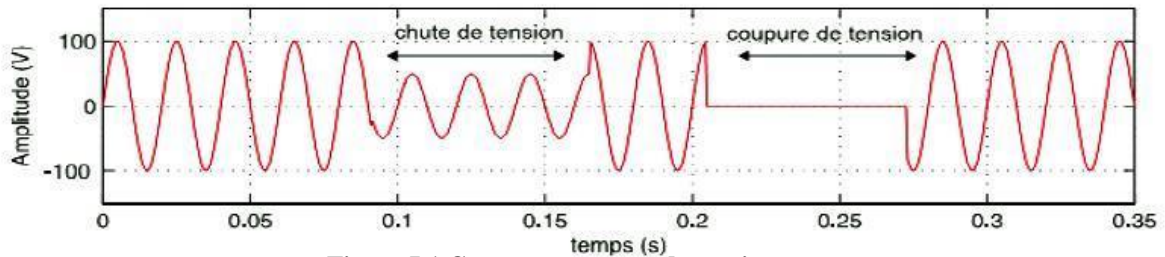


Figure I.1 Creux et coupures de tension

2.2. Fluctuation de tension:

Les fluctuations de tension sont des variations périodiques ou erratiques de l'enveloppe de la tension. Ce sont des variations brutales de l'amplitude de la tension située dans une bande de $\pm 10\%$ et se produisent sur un intervalle de temps de quelques centièmes de secondes. Elles sont en particulier dues à la propagation sur les lignes du réseau de courants d'appel importants. L'origine principale de ces courants est le fonctionnement d'appareil dont la puissance absorbée varie de manière rapide, comme les fours à arc et des machines à souder. Ces fluctuations se traduisent par des variations d'intensité, visible au niveau de l'éclairage causant un gêne visuel perceptible pour une variation de 1% de la tension. Ce phénomène de papillotement est appelé flicker.[4] Un exemple de fluctuation de tension est montré dans la figure (I.2).

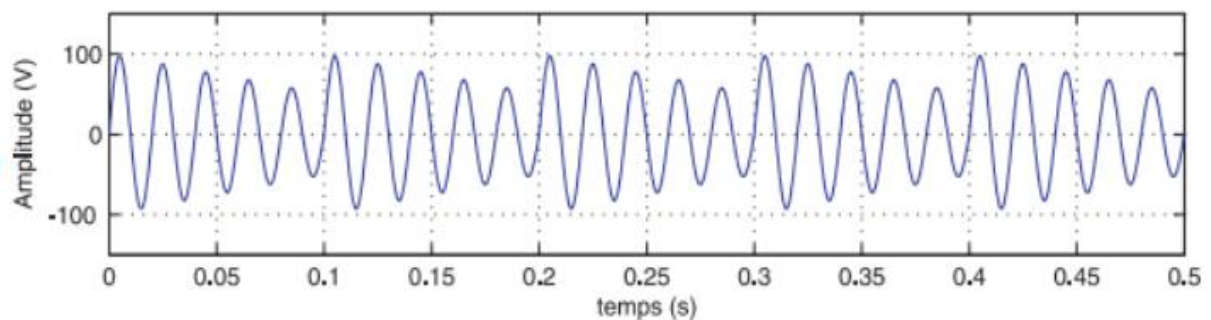


Figure I.2 fluctuation de tension

2.3. Déséquilibre du système triphasé de tension

Lorsque les trois tensions ne sont pas identiques en amplitude et/ou ne sont pas décalées d'un angle de 120° les unes par rapport aux autres, on parlera de déséquilibre du système triphasé comme le montre la figure (I.3). Un réseau électrique triphasé équilibré alimentant un

récepteur électrique triphasé non équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau. [3]



Figure I.3 Déséquilibre du système triphasé de tension

2.4. Variation de la fréquence:

Une variation sensible de la fréquence du réseau peut apparaître sur les réseaux des utilisateurs non interconnectés ou alimentés par une source thermique autonome Voir la figure (I.4) Au niveau des réseaux de distribution ou de transport, cette variation de la fréquence est très rare et n'est présente que lors de circonstances exceptionnelles, comme dans le cas de certains défauts graves sur le réseau. Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle $50 \text{ Hz} \pm 1\%$ [5]

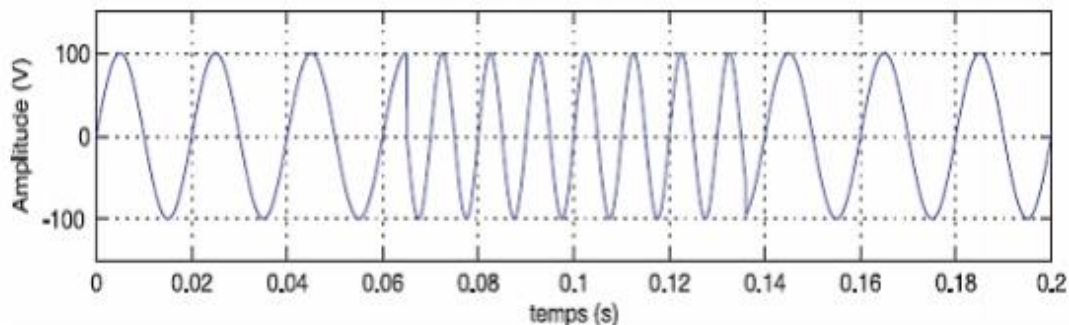


Figure I.4 Variation de la fréquence

3. Les harmoniques

L'expansion de l'emploi des charges électriques non linéaires durant les dernières années a significativement contribué à la propagation des harmoniques dans les systèmes d'électronique de puissance. Comme ces charges sont indispensables pour différents besoins domestiques et industriels. Les déformations du courant et de la tension peuvent perturber le fonctionnement normal d'autres équipements électriques. C'est pourquoi, les distributeurs d'énergie ayant la contrainte de fournir une tension sinusoïdale, prennent en charge l'atténuation des perturbations harmoniques au moyen d'installation de forte puissance. Cependant, les nouvelles réglementations internationales imposent aux consommateurs des limites aux harmoniques, engendrées par leurs systèmes, tant en courant qu'en tension, ainsi, le filtrage des composantes harmoniques est au centre des préoccupations des distributeurs d'une part et des utilisateurs d'énergie électrique d'autre part [6].

3.1. Le signal déformé

Le signal déformé peut se décomposer en une somme d'ondes sinusoïdales et d'une composante continue éventuelle (théorème de Fourier). On distingue le fondamental (composante sinusoïdale de fréquence égale à celle du signal) et des harmoniques (composantes de fréquence multiple de celle du signal). [7]

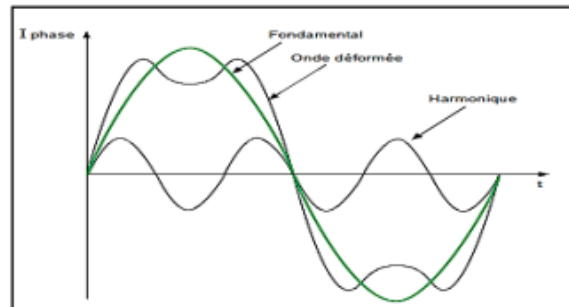


Figure I.5 Harmoniques

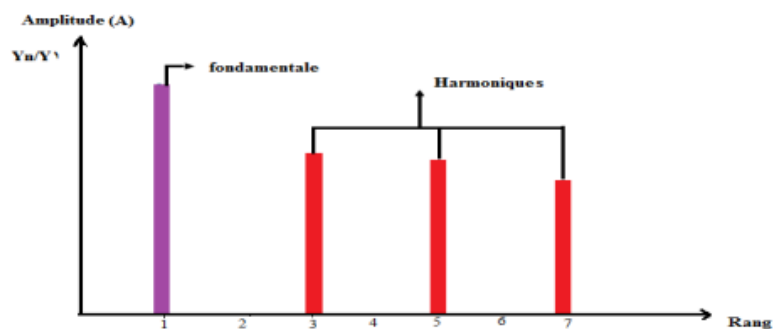


Figure I.6 Présentation spectrale d'un signal périodique

4. Sources des harmoniques

La cause principale de l'existence des harmoniques de tension est l'injection des courants non sinusoïdaux par des charges dites non linéaires, ainsi les charges déséquilibrées branchées au réseau. Le tableau (I.1) montre quelques sources des harmoniques. [8]

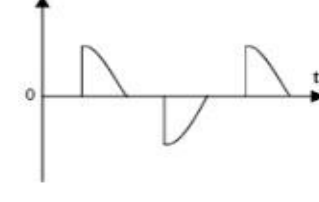
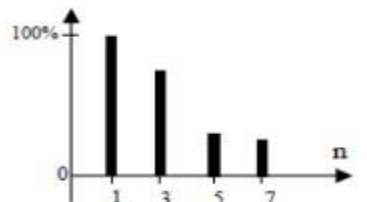
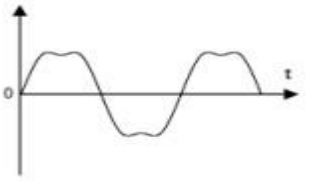
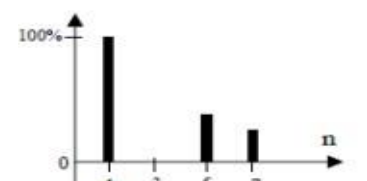
Type de charge	Appareils concernés	Courant absorbé	Spectre harmonique Correspondant
- Gradateurs monophasé (commande par angle de phase).	- Régulation de puissance de fours à résistances, - Modulation de puissance des lampes halogènes.		
- Redresseur triphasé à thyristors.	- Variateur de vitesse des moteurs à courant continu et des moteurs synchrones.		

Tableau I. 1 Sources des perturbations harmoniques

5. Caractérisation des perturbations harmoniques

Le récepteur d'énergie se comporte comme une charge polluante, s'il absorbe des courants non sinusoïdaux ou déséquilibrés ou consomme de l'énergie réactive. La perturbation harmonique est généralement caractérisée par le taux de distorsion harmonique défini pour la tension ou le courant par rapport à une onde sinusoïdale. Le facteur de puissance est utilisé généralement pour définir la consommation de l'énergie réactive. [7]

5.1. Rang de l'harmonique

On définit le rang harmonique comme le rapport de sa fréquence f_n à celle du fondamental (généralement la fréquence industrielle, 50 ou 60 Hz)

$$n = \frac{f_n}{f_1} \quad (\text{I. 1})$$

5.2. Le taux de distorsion harmoniques

La perturbation harmonique est caractérisée par le taux de distorsion harmonique (THD) défini en tension ou en courant.

$$\text{THD \%} = 100 \times \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2(t)}}{I_{\text{fondamentale}}} \quad (\text{I. 2})$$

5.3. 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 :

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

Pour faire intervenir la participation des harmoniques dans la puissance apparente, nous définissons la puissance déformante D :

$$D = 3V_1 \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad (\text{I. 4})$$

la valeur efficace (RMS ou eff) :

$$I_{\text{eff}} = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} I_n^2(t)} \quad (\text{I. 5})$$

Et le facteur de puissance par :

$$F = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (\text{I. 6})$$

On voit bien que les harmoniques affectent aussi le facteur de puissance.

6. Les effets des harmoniques

Les effets des harmoniques les plus connus et les plus spectaculaires sont la destruction des condensateurs ou des disjoncteurs sous l'effet des forts courants harmoniques amplifiés par des résonances. Un autre phénomène, de plus en plus rencontré, est l'échauffement des transformateurs et des conducteurs de neutre sous l'effet des courants harmoniques de rang 3. [9]

a. Les effets instantanés

Ce sont les effets immédiats sur le bon fonctionnement d'un équipement. Par exemple, dans le cas des appareils électroniques, il peut s'agir d'une altération de l'image pour les écrans de télévision ou une altération du son s'il s'agit d'une chaîne HI-FI ou d'un téléphone. La précision des appareils de mesure est également affectée par la présence d'harmoniques. [7]

b. Les effets à terme

En prendre comme un exemple en explique : l'échauffement des câbles et des équipements, les pertes des câbles traversés par des courants harmoniques sont majorées, entraînant une élévation de température. Parmi les causes de pertes supplémentaires, l'élévation de la résistance apparente de l'âme avec la fréquence. [7]

Nature du matériel électrique	Effet de la «pollution harmonique»
Machines Tournantes Moteur triphasés, alternateurs	Echauffements supplémentaires (effet Joule) dans les enroulements statoriques. Couples oscillatoires. Augmentation du bruit.
Transformateurs	Pertes supplémentaires dans le fer (par courants de Foucault) et dans les enroulements (par effet Joule). Risque de saturation en présence d'harmoniques pairs.
Câbles	Augmentation des pertes surtout dans le câble de neutre où s'ajoutent les harmoniques de rang 3 et multiples de 3. Pertes diélectriques supplémentaires.
Electronique de puissance (ponts redresseurs à thyristor, transistors, etc.)	Troub les fonctionnels liés la forme d'onde (commutation, synchronisation).
Condensateurs de puissance	Pertes diélectriques supplémentaires aboutissant à un vieillissement prématuré des condensateurs
Lampes à décharge	Risque de vacillement
Dispositifs de protection (Fusibles. Disjoncteurs magnétothermiques...)	Fonctionnement intempestif
Ordinateur	Dysfonctionnement lié aux couples pulsatoires des moteurs d'entraînement des supports magnétiques
compteur d'énergie	Erreurs de mesure
Téléviseurs	Déformation d'image

Tableau I.2 Effet des harmoniques sur quelques matériels

7. Solutions de dépollution du réseau électrique

Afin de compenser toutes les perturbations, deux méthodes de solution de dépollution, traditionnelle et moderne sont présentés. Le filtrage est une méthode de réduction des missions

harmoniques au sein d'un site industriel, où la distorsion harmonique a graduellement augmenté ou comme solution globale pour un nouveau site, donc le filtre est un absorbeur de courants harmoniques. [7]

On distingue les techniques suivantes:

- a) les filtres passifs.
- b) les filtres actifs.
- c) les filtres hybrides.

7.1. Solutions traditionnelles

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

- L'augmentation de la puissance de court-circuit du réseau et l'utilisation des convertisseurs peu polluants qui ont pour effet de diminuer la distorsion harmonique.
- L'utilisation de dispositif du filtrage pour réduire la propagation des harmoniques produits par les charges non-linéaires.
- Les filtres passifs: cette solution de dépollution consiste à placer en parallèle sur le réseau d'alimentation une impédance très faible autour de la fréquence à filtrer et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau. Parmi les dispositifs du filtrage les plus répondus, On distinguera deux types de filtres assurant la limitation des tensions harmoniques:
 - Filtre passif résonant
 - Filtre passif amortie ou passe-haut

a. Filtre résonant

Il est constitué par la mise en série d'une inductance, d'une résistance, et d'un condensateur .La figure (I.7)montre clairement le montage de ce dernier a in si queleurs impédances en fonction de la fréquence[10]

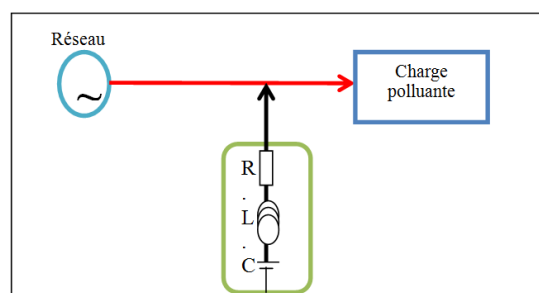


Figure I.7 Structure du filtre résonant

b. Filtre amorti

Le filtre passe-haut compense les harmoniques supérieurs ou égaux à sa fréquence propre. Il peut se connecter en parallèle avec d'autres filtres résonnants. [10]

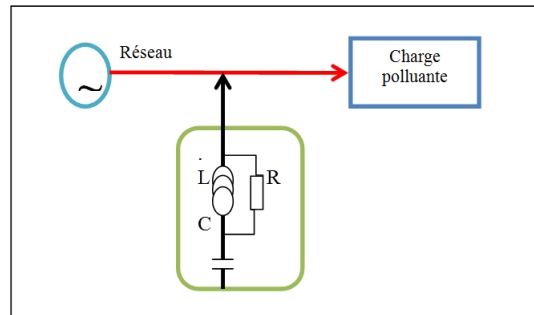


Figure I.8 Montage du filtre amorti

Ces dispositifs sont utilisés pour empêcher les courants harmoniques de se propager dans les réseaux électriques. Ils peuvent aussi être utilisés pour compenser la puissance réactive. Malgré leur large utilisation dans l'industrie, ces dispositifs peuvent présenter beaucoup d'inconvénients :

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

7.2. Solutions modernes

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

comme les thyristors GTO et les transistors IGBT. 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. 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 : solution universelle pour compenser toutes les perturbations en courant et en tension. [11]

a. Filtrage Actif

Le filtrage actif constitue aujourd'hui une solution plus sophistiquée que le filtrage passif, bénéficiant des technologies les plus performantes et constamment améliorée par les constructeurs. Le principe de fonctionnement du filtre actif réside dans le fait que celui-ci produit des courants qui s'opposent aux courants harmoniques créés par les charges non linéaires, tendant ainsi à rétablir un courant appelé du réseau quasi sinusoïdal. Ces filtres actifs sont encore appelés compensateurs actifs. Ils sont utilisés en parallèle ou en série d'une installation nécessitant un traitement harmonique. Dans ce qui suit, nous donnons les structures les plus utilisés dans la littérature, à savoir les filtres parallèle série, combiné parallèle-série et les structures hybrides actifs -passifs. [7]

b. Filtre actif parallèle (FAP)

Appelé aussi compensateur shunt, il est connecté en parallèle sur le réseau de distribution (figure 1.9). Il est le plus souvent commandé comme un générateur de courant. Il restitue dans le réseau électrique les courants harmoniques i_{inj} égaux à ceux absorbés par la charge non linéaire mais en opposition de phase, de telle sorte que le courant fourni par le réseau i_s soit sinusoïdal et en phase avec la tension simple correspondante. Son indépendance vis-à-vis de la source et de la charge lui assure auto-adaptabilité, fiabilité et performance. [11]

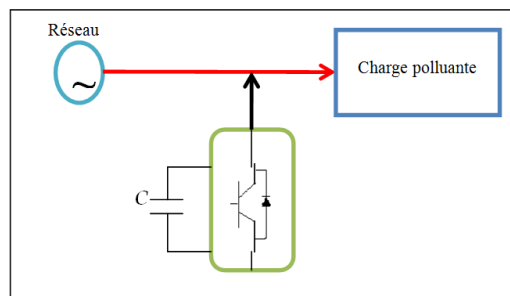


Figure I.9 Filtre actif parallèle

c. Filtre actif série (FAS)

Le filtre actif série engendre des tension harmoniques V_h dont la somme avec la tension réseau V_s est une onde sinusoïdale (figure I.10). Il est destiné à protéger les installations sensibles aux perturbations provenant du réseau telles que les harmoniques en tension, les surtensions. En revanche, le filtrage série ne permet pas de compenser les courants harmoniques consommés par la charge. [6]

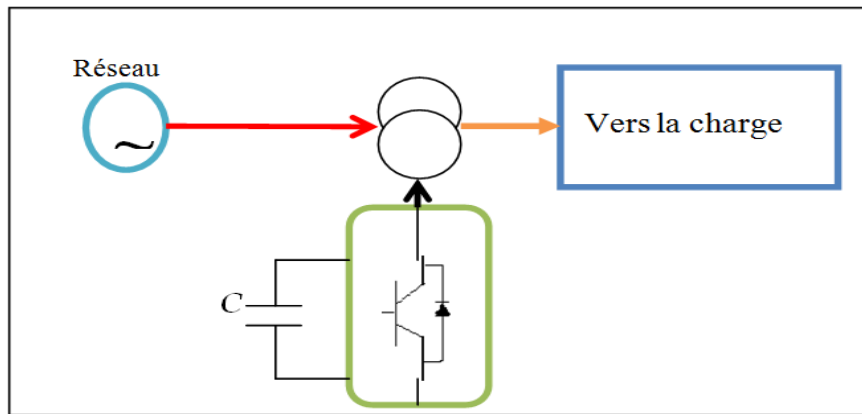


Figure I. 10 Filtre actif série.

d. La combinaison parallèle-série actifs (UPQC)

Cette combinaison parallèle-série actifs, aussi appelée Unified Power Quality Conditioner (UPQC), résulte de l'association des deux filtres actifs parallèle et série, comme le montre la Figure (I.11). Profitant des avantages des deux filtres actifs, l'UPQC assure un courant et une tension sinusoïdaux du réseau électrique à partir d'un courant et d'une tension perturbés de celui-ci. [7]

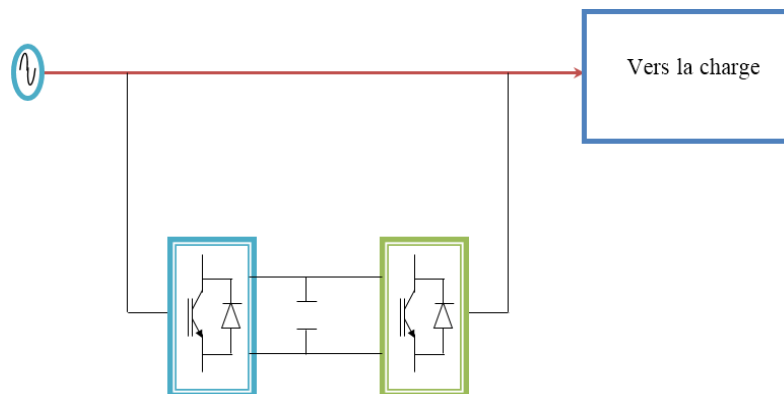


Figure I. 11 Filtre combiné parallèle-série (UPQC)

Il existe plusieurs autres groupes mixtes de filtres actifs avec cette fois des filtres passifs:

- Le filtre actif série connecter en série avec des filtres passifs parallèles.
- Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles.
- Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.

8. Conclusion

Les charges non linéaires sont de plus en plus présentes comme récepteurs consommateurs dans les réseaux de distribution industrielle, Elles produisent une pollution électrique harmonique qui nécessite généralement un dispositif d'élimination de ces perturbations et compensation de l'énergie réactive qu'ils consomment. Puis on a abordé les principales perturbations harmoniques et les moyens techniques permettant de les limiter dont il existe plusieurs, les solutions classiques présentent de nombreuses contraintes pour répondre à un besoin actif de dépollution, elles sont souvent pénalisées en termes d'encombrement, de résonance et d'une mauvaise adaptation face à l'évolution du réseau et aux charges polluant.

CHAPITRE II



Commande de filtre actif parallèle

1. Introduction :

Le filtrage actif parallèle de puissance (FAP) est une solution moderne et adéquate permettant de remédier aux perturbations en courant. Ce compensateur peut être utilisé pour compenser les courants harmoniques et les courants déséquilibrés. Dans ce chapitre nous allons étudier le filtre actif parallèle. Sa structure a été divisée en deux parties, la partie puissance et la partie contrôle-commande. Dans la partie puissance, on a retrouvé les trois principaux blocs de cette structure : L'onduleur de tension qui est un élément fondamental de ce filtre, l'élément de stockage d'énergie et le filtre de sortie. La partie contrôle -commande, comporte des blocs pour identifier des courants perturbateurs et la régulation du courant injecté par l'onduleur. Le filtre actif est un onduleur de tension à MLI qui traite l'élimination des harmoniques. Il doit donc, absorber des courants éliminant les harmoniques créés par La charge polluante (pont redresseur dans notre cas). Cette structure a pour vocation d'éliminer de façon active toute ou une partie des harmoniques de courant [12].

2. Principe de fonction de filtre actif parallèle :

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau, comme le montre la Figure (II.1), est le plus souvent commandé comme un générateur de courant. Il injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci. Le courant côté réseau est alors sinusoïdal. Ainsi l'objectif du filtre actif parallèle consiste à empêcher les courants perturbateurs (harmoniques, réactifs et déséquilibrés), produits par des charges polluantes, de circuler à travers l'impédance du réseau, située en amont du point de connexion du filtre actif [8].

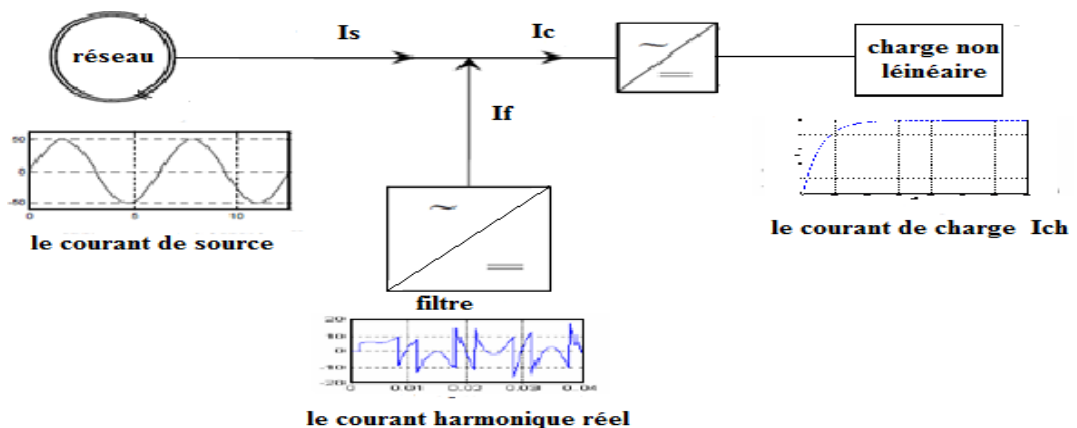


Figure II. 1 Principe du filtrage actif parallèle

3. Structure du filtre actif parallèle:

La figure (II .2) donne la structure du FAP, laquelle se présente sous la forme de deux parties [13] :

❖ La partie puissance est constituée:

- D'un onduleur de tension à base d'interrupteurs de puissance, commandables à l'amorçage et au blocage (GTO, IGBT, ...etc.) avec des diodes en antiparallèle.
- D'un circuit de stockage d'énergie, souvent capacitif.
- D'un filtre de sortie.

❖ La partie contrôle-commande quant à elle est constituée :

- De la méthode d'identification des courants perturbés.
- Du système à base de PLL qui sera intégré dans la méthode d'identification des courants.
- De la régulation de la tension continue appliquée aux éléments de stockage d'énergie.
- De la régulation du courant injecté sur le réseau à partir de l'onduleur de tension.
- De la commande de l'onduleur de tension.

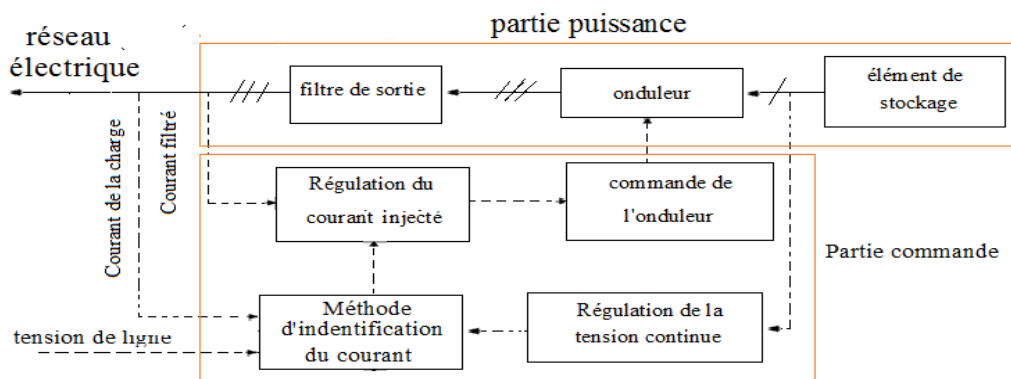


Figure II. 2 Structure générale d'un filtre actif parallèle

3.1. Etude de la partie puissance :

La partie puissance du FAP est constituée de l'onduleur, d'un filtre découplage et d'une capacité de stockage de l'énergie.

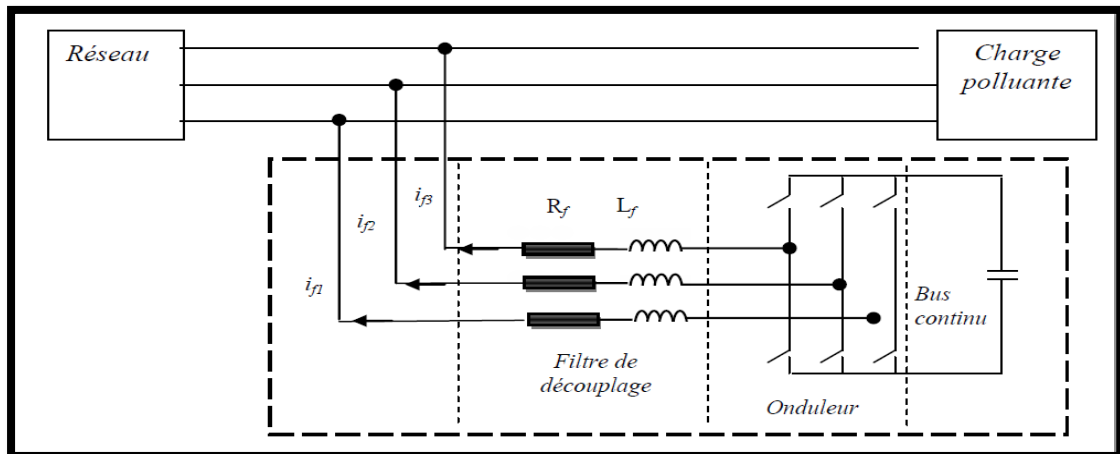


Figure II.3 Schéma du circuit de puissance d'un filtre actif parallèle à structure tension

3.1.1. L'Onduleur :

L'onduleur de tension triphasé est constitué par des d'interrupteurs bidirectionnels en courant. Ils sont réalisés par des semi-conducteurs commandables à l'ouverture et à la fermeture (de type IGBT dans la majorité des cas) montés en antiparallèle avec une diode comme le montre la figure(II.5). Pour cette structure, on doit respecter les contraintes suivantes [14] :

- A un instant donné, un seul interrupteur d'un même bras doit conduire afin d'éviter tout court-circuit de la source de tension,
- Le courant de ligne doit toujours trouver un chemin possible d'où la mets-en antiparallèle de diodes au niveau des interrupteurs .

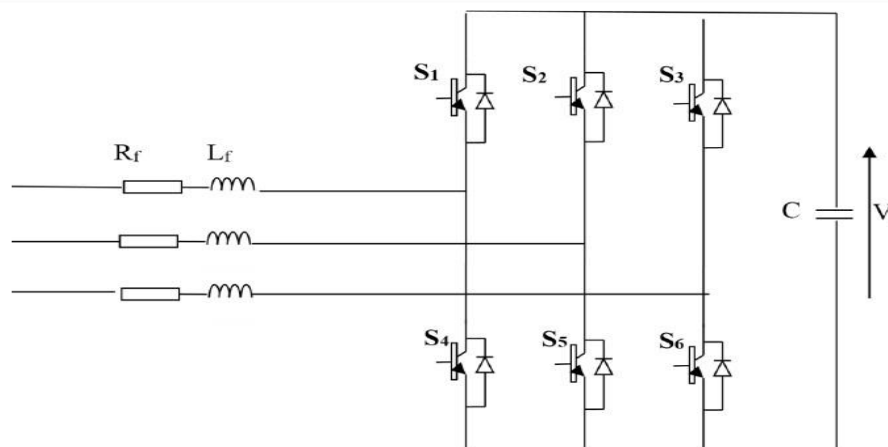


Figure II . 4: Onduleur de tension triphasé.

L'ouverture et la fermeture des interrupteurs du l' onduleur présenté sur la Figure.(II.5) dépendent de l'état des fonctions de commutation (T1, T2, T3,), comme défini ci-dessous

$$T1 = \begin{cases} 1 & \text{S1 fermé et S4 ouvert} \\ 0 & \text{S1 ouvert et S4 fermé} \end{cases}$$

$$T2 = \begin{cases} 1 & \text{S2 fermé et S5 ouvert} \\ 0 & \text{S2 ouvert et S5 fermé} \end{cases}$$

$$T3 = \begin{cases} 1 & \text{S3 fermé et S6 ouvert} \\ 0 & \text{S3 ouvert et S6 fermé} \end{cases}$$

Les tensions entre phases de l' onduleur sont alors:

$$\begin{bmatrix} V_{f1} - V_{f2} \\ V_{f2} - V_{f3} \\ V_{f3} - V_{f1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1 & -T_2 \\ T_2 & T_3 \\ T_3 & T_1 \end{bmatrix} \cdot V_{dc} \quad (\text{II.1})$$

Les tensions simples V_{f1}, V_{f2}, V_{f3} référées au neutre de la source et vérifient l'équation suivante

:

$$\begin{bmatrix} V_{f1} \\ V_{f2} \\ V_{f3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{s1} \\ e_{s2} \\ e_{s3} \end{bmatrix} + L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{f1} \\ i_{f2} \\ i_{f3} \end{bmatrix} + R_f \begin{bmatrix} i_{f1} \\ i_{f2} \\ i_{f3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.2})$$

Supposant que les tensions du réseau sont équilibrées et que la somme des courants du filtre est nulle :

$$\begin{aligned} e_{s1} + e_{s2} + e_{s3} &= 0 \\ i_{f1} + i_{f2} + i_{f3} &= 0 \end{aligned} \quad (\text{II.3})$$

Nous déduisons de ces équations :

$$v_{f1} + v_{f2} + v_{f3} = 0 \quad (\text{II.4})$$

En utilisant les équations (1 et 4). Nous obtenons :

$$\begin{bmatrix} V_{f1} \\ V_{f2} \\ V_{f3} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

Ainsi, on pourra exprimer huit cas possibles de tension de sortie du filtre actif Vf (référées au neutre N de la source), comme le montre le Tab (II-1).

Cas N°	T3	T2	T1	V_{f1}	V_{f2}	V_{f3}
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	1	$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$
3	0	1	0	$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$
4	0	1	1	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$
5	1	0	0	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$
6	1	0	1	$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$
7	1	1	0	$-2V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$
8	1	1	1	0	0	0

Tableau II.1 Tension générées par l'onduleur de tension à trois bras

3.1.2. Système de stockage de l'énergie :

Le stockage de l'énergie est réalisé côté continu de l'onduleur à l'aide d'un système de stockage capacitif, représenté par un condensateur C_{dc} jouant le rôle d'une source de tension continue. Le choix des paramètres du système de stockage (V_{dc-ref} et C_{dc}) a une influence directe sur la dynamique du FAP et sur ses performances de compensation. D'une part, une tension V_{dc-ref} élevée améliore la dynamique du FAP. D'autre part, les ondulations de la tension continue V_{dc} , causées par les courants engendrés par le FAP et limitées par le choix de la valeur de C_{dc} , peuvent dégrader la qualité de compensation du FAP. Une valeur élevée de C_{dc} réduit les ondulations V_{dc} mais augmente le coût et la taille du FAP. Sachant que l'augmentation de la valeur de la tension continue améliore la marge de commandabilité du FAP et sachant que le choix de cette tension se répercute en grande partie sur le choix des interrupteurs, la tension continue V_{dc} doit être choisie la plus élevée possible tout en respectant les contraintes nominales des semi-conducteurs et la contrainte de commandabilité de l'onduleur [15].

3.1.3. Filtre de sortie :

Le filtre de sortie a pour rôle d'assurer la liaison entre le réseau et l'onduleur de tension. Le dimensionnement de ce filtre doit tenir compte des deux points importants suivants - Il doit fournir une atténuation suffisante des rebondissements causés par la commutation des semiconducteurs de l'onduleur du filtre actif, -Il doit préserver les performances du filtre actif, définie par :

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

Un filtre de sortie du premier ordre est le plus souvent utilisé dans la littérature, il est composé d'une inductance et de résistance interne. Une valeur relativement faible de permet d'obtenir une bonne dynamique du FAP en satisfaisant l'égalité (II. 6) [16]

3.2.Partie commande du filtre actif parallèle :

La partie commande d'un FAP (voir figure 2.2) réalise les fonctions suivantes :

- L'identification des courants de référence.
- Commande de Onduleur .
- la régulation de la tension continue.
- la synchronisation à base de PLL.

3.2.1.L'identification des courants de référence:

L'identification du courant polluant est un étape essentiel dans le processus de commande des filtres actifs. A l'heure actuelle, les chercheurs continuent toujours à améliorer ces méthodes à fin d'obtenir des meilleurs résultats.

Plusieurs méthodes d'identification des courants de référence ont été développées depuis la mise en place des premiers filtres actifs afin de générer les signaux de référence servant à la commande du filtre actif.

Dans ce chapitre les deux méthodes d'identification habituellement utilisées seront développées pour être appliquées au filtre actif parallèle à quatre fils :

- La méthode des Puissances Instantanée Réelle, Imaginaire et homopolaire (PIRI) .
- La méthode de Référentiel Synchrone (SRF).

Dans le but d'appliquer des filtres d'extraction à ces deux méthodes, on utilise le Filtre Passe Bas et le Filtre Multi-Variables [05].

a.Méthode du référentiel lié au synchronisme avec FPB

La transformation de Concordia appliquée aux courants de charge (i_{ca} , i_{cb} , i_{cc}) permet de transformer le système triphasé équilibré à un système diphasé dont les axes sont en quadrature

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

L'expression des courants i_d et i_q dans le référentiel (dq) sont données par:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\hat{\theta}) & -\cos(\hat{\theta}) \\ \cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

Avec $\hat{\theta}$ est la position angulaire de la tension fondamentale du réseau, estimée par la PLL. Ces composantes peuvent alors être exprimées comme la somme d'une composante continue et d'une composante harmonique :

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{i}_d + \hat{i}_d \\ \tilde{i}_q + \hat{i}_q \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

Avec \tilde{i}_d et \tilde{i}_q sont les composantes continues de i_d et i_q , et \hat{i}_d et \hat{i}_q sont les composantes alternatives de i_d et i_q . A partir de l'équation (2.11), nous pouvons exprimer les composantes du courant selon les axes ($\alpha\beta$) par :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\hat{\theta}) & -\cos(\hat{\theta}) \\ \cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\hat{\theta}) & \cos(\hat{\theta}) \\ -\cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

En séparant les composantes continues des composantes harmoniques, nous obtenons :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\hat{\theta}) & \cos(\hat{\theta}) \\ -\cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_d \\ \tilde{i}_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sin(\hat{\theta}) & \cos(\hat{\theta}) \\ -\cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_d \\ \hat{i}_q \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

Les expressions des courants de référence $i_{\alpha-ref}$ et $i_{\beta-ref}$ sont donnés par :

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha-r} \\ i_{\beta-ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\hat{\theta}) & -\cos(\hat{\theta}) \\ \cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \tilde{i}_d + i_{dc} \\ \tilde{i}_q \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

Les courants de référence dans le repère (abc) sont donnés par :

$$\begin{bmatrix} i_{a-ref} \\ i_{b-ref} \\ i_{c-ref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha-ref} \\ i_{\beta-ref} \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

Le schéma de principe de la méthode référentiel synchrone est donné par la Figure II.5.

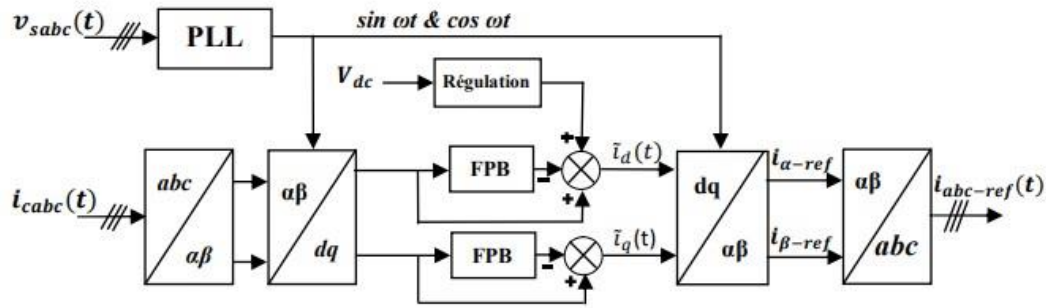


Figure II . 5 Identification par la méthode du SRF avec FPB.

b- Méthode de référentiel synchrone avec FMV

La méthode de référentiel synchrone avec FMV suit les mêmes démarches que la méthode précédente la seule différence est que le courant perturbateur s'identifie par un FMV dans le repère $\alpha\beta$ après la transformation de Concordia du courant de la charge. Le FMV a été utilisé dans [17]. L'expression du courant après le passage par le FMV et la transformation dq est donnée par :

$$\begin{bmatrix} \hat{i}_d \\ \hat{i}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin(\theta) & \cos(\theta) \\ \cos(\theta) & \sin(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_\alpha \\ \hat{i}_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

La figure II.6 présente le schéma de l'identification des courants de référence par la méthode de référentiel synchrone à l'aide d'un FMV.

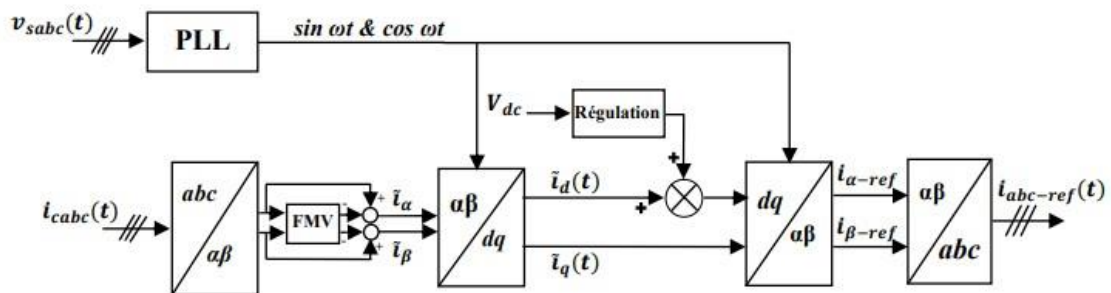


Figure II .6 Identification par la méthode du SRF avec FMV.

c- Méthode des puissances instantanées réelle et imaginaire avec FPB

La méthode classique des puissances instantanées est basée sur la conversion $\alpha\beta$ afin d'enlever les puissances réelles et imaginaires. Etant donné que (v_α, v_β) et (i_α, i_β) sont les

composantes orthogonales du repère $\alpha\beta$ associées respectivement aux tensions de raccordement du filtre actif parallèle (v_s) et aux courants absorbés par les charges polluantes (i_{ch}). Afin de calculer la puissance réelle et imaginaire, cette méthode utilise la transformation $\alpha\beta$ [18].

Dans cette méthode on utilise généralement, soit un filtre passe-haut, soit un filtre passebas afin de ne garder que la composante harmonique du signal. Le schéma bloc relatif à cette méthode est représenté par la Figure.2.7 .La régulation de la tension continue V_{dc} sera étudiée plus tard à la section 2.4.3.

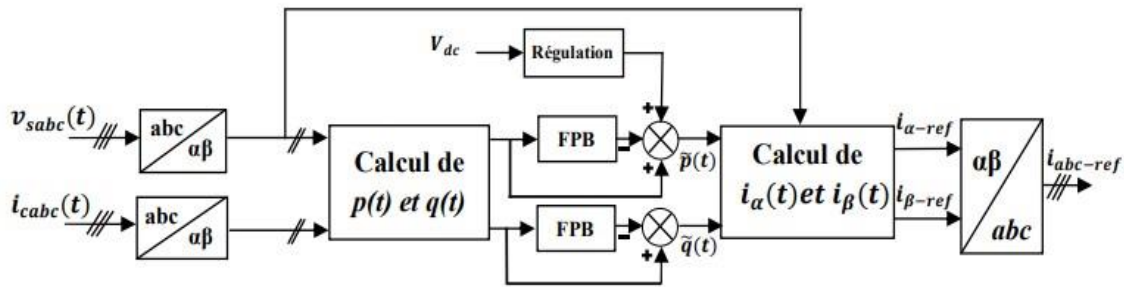


Figure II.7 Méthode d'identification basée sur la méthode de PIRI avec FPB

Notons, respectivement, les tensions simples d'alimentations et les courants de charge d'un système triphasé équilibré par (v_{sa} , v_{sb} , v_{sc}) et (i_{ca} , i_{cb} , i_{cc}). La transformation de Concordia permet de ramener ce système triphasé équilibré à un système diphasé. Cette transformation appliquée aux tensions de réseau et aux courants de ligne mène aux expressions suivantes:

$$\begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \sqrt{2} & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \sqrt{2} & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

La puissance réelle instantanée p et la puissance imaginaire instantanée q s'écrivent comme suit :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 2 & v_{\beta} \\ -v_{\beta} & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{\alpha} \\ v_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{II.17})$$

Les puissances p et q peuvent s'écrire comme la somme d'une composante continue et d'une composante harmonique :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{p} + \dot{p} \\ \tilde{q} + \dot{q} \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

Avec \bar{p} et $q(0)$ les composantes continues de p et q , $p\omega$ et $q\omega$ les composantes harmoniques de p et q . A partir de l'équation (2.20), nous pouvons déduire les expressions des composantes du courant de charge selon les axes $\alpha\beta$:

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

Le remplacement de (2.21) dans (2.22) donne les expressions des courants i_α et i_β selon les axes $\alpha\beta$ par:

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} + \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \end{bmatrix} \quad (\text{II.20})$$

Puisque nous intéressons à la compensation des harmoniques de courant, nous éliminons alors la composante continue de p et la composante continue de q à l'aide de deux simples FPB avec boucles de retours (voir fig.2.7) et on ajoute la puissance active p_c nécessaire à la régulation de la tension continue V_{dc} à la composante harmonique de la puissance réelle instantanée. Les courants perturbateurs de référence, notés $i_{\alpha-ref}$ et $i_{\beta-ref}$, s'expriment selon les axes $\alpha\beta$ par :

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha-ref} \\ i_{\beta-ref} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{p} + p_c \\ \dot{q} \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

Les courants perturbateurs de référence selon les axes (abc) peuvent être déterminés en utilisant la transformation inverse de Concordia :

$$\begin{bmatrix} i_{a-ref} \\ i_{b-ref} \\ i_{c-ref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha-ref} \\ i_{\beta-ref} \end{bmatrix} \quad (\text{II.22})$$

d- Méthode des puissances instantanées réelle imaginaire avec FMV

La transformation de Concordia d'un système triphasé à trois fils à un système diphasé de tensions et de courants :

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = C_{32} \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.23})$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = C_{32} \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.24})$$

$$C_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.25})$$

Le premier FMV, utilisé au niveau des tensions diphasées, permet de filtrer efficacement les composantes harmoniques des tensions d'alimentation. Ainsi, sa mise en œuvre permet d'améliorer les performances du filtrage. Les courants diphasés d'axes α et β peuvent être définis comme la somme d'une composante fondamentale et d'une composante harmonique :

$$\begin{cases} i_\alpha = \tilde{i}_\alpha + \hat{l}_\alpha \\ i_\beta = \tilde{i}_\beta + \hat{l}_\beta \end{cases} \quad (\text{II.26})$$

Le deuxième FMV permet d'extraire les composantes fondamentales du courant de charge à la pulsation ω_c , directement selon les axes $\alpha\beta$. Ensuite, les composantes harmoniques du courant selon les axes $\alpha\beta$, notées ici \hat{l}_α et \hat{l}_β sont obtenues en soustrayant sur chaque axe, la sortie du FMV à son entrée (voir fig.2.8). On peut alors calculer les composantes alternatives des puissances réelle (p) et imaginaire (q) instantanées par :

$$\begin{bmatrix} \hat{p} \\ \hat{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{v}_\alpha & \tilde{v}_\beta \\ -\tilde{v}_\beta & \tilde{v}_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{l}_\alpha \\ \hat{l}_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{II.27})$$

Avec : \hat{p}, \hat{q} sont les composantes alternatives de p et q

Les composantes harmoniques du courant sont alors définies par :

$$\begin{bmatrix} \hat{l}_\alpha \\ \hat{l}_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{v}_\alpha & \tilde{v}_\beta \\ -\tilde{v}_\beta & \tilde{v}_\alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \hat{p} \\ \hat{q} \end{bmatrix} \quad (\text{II.28})$$

Avec:

$$\begin{bmatrix} \tilde{v}_\alpha & \tilde{v}_\beta \\ -\tilde{v}_\beta & \tilde{v}_\alpha \end{bmatrix}^{-1} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} \tilde{v}_\alpha & \tilde{v}_\beta \\ \tilde{v}_\beta & \tilde{v}_\alpha \end{bmatrix} \quad (\text{II.29})$$

Les courants de référence triphasés des courants harmoniques :

$$\begin{bmatrix} i_{a-ref} \\ i_{b-ref} \\ i_{c-ref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{l}_\alpha \\ \hat{l}_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{II.30})$$

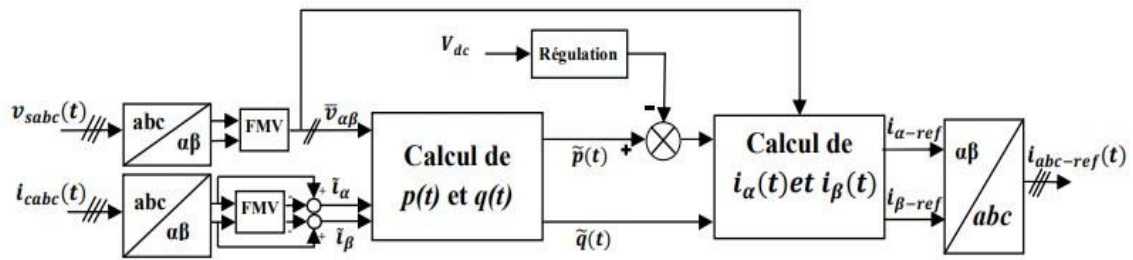


Figure II.8 Méthode d'identification basée sur la méthode de PIRI avec FMV.

3.2.2 Commande de Onduleur :

Le but de la commande de l'onduleur est de permettre la meilleure reproduction des courants de référence, à travers les ordres de commande appliqués aux interrupteurs de puissance. Ils existent plusieurs méthodes de commande, les deux principales familles de commande sont [5] :

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

3.2.2.1 Commande par hystérésis

La commande conventionnelle par hystérésis est appelée aussi commande en tout ou rien. C'est une commande non-linéaire à fréquence de commutation variable permettant de fixer les ondulations de courants. Cette stratégie de commande assure un contrôle satisfaisant du courant sans exiger une connaissance poussée du modèle du système à contrôler ou de ses paramètres. Le schéma de principe de cette technique de commande est illustré sur la Figure II.9. Son principe consiste à établir dans un premier temps le signal d'erreur (différence entre le courant de référence i_{ref} et le courant du compensateur actif i_f). Cette erreur est ensuite comparée à un intervalle appelé bande d'hystérésis qui génère la commande des interrupteurs [19].

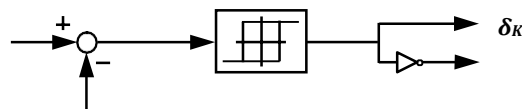


Figure.II.9 Principe du contrôle par hystérésis

Malgré sa simplicité de mise en œuvre, sa robustesse et sa bonne dynamique, cette commande présente certains inconvénients à savoir :

- La fréquence de commutation n'est pas fixe, elle dépend de la bande d'hystérésis et de la dérivée de courant, d'où la présence d'un nombre important d'harmoniques dans les courants générés.

- La commande est appliquée séparément sur les trois phases. Or la structure électrotechnique impose à chaque instant que la somme des trois courants soit nulle. Le résultat obtenu sur un courant n'est donc pas indépendant des deux autres phases. Ainsi le courant asservi ne pourra pas respecter les limites imposées par la bande de l'hystérésis [20].

3.2.2.2 Commande des courants par MLI

Afin de parfaitement maîtriser les fréquences de commutation et de leur répercussion sur les interrupteurs, une autre stratégie de commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI) peut être proposée (Figure.II.10). Il s'agit de la commande qui cherche à rendre la fréquence de commutation constante [21]. La plus simple et la plus connue des modulations de largeur d'impulsion est sans doute la MLI à échantillonnage naturel. Cette technique de commande met en œuvre d'abord un régulateur qui détermine la tension de référence de l'onduleur à partir de l'écart entre le courant mesuré et sa référence. Cette tension est ensuite comparée avec un signal en dent de scie (porteuse à fréquence élevée fixant la fréquence de commutation). La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs.

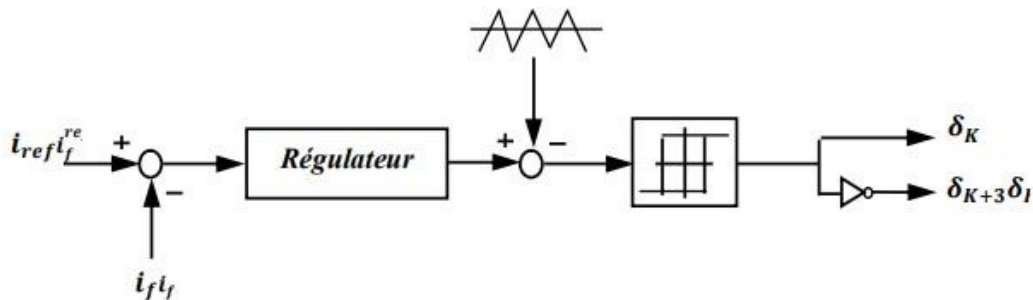


Figure II.10 Principe de contrôle du courant par MLI avec régulateur.

3.2.3. Régulation de la tension de la source continue

L'objectif de régulation d'éliminer sinon de réduire l'erreur entre le signal de référence et le signal mesuré. Le tableau II.2 récapitule les critères qui définissent les qualités d'une bonne régulation [22].

Critères	Définition
Stabilité	elle doit toujours converger vers un point d'équilibre stable, et ne doit pas osciller autour du point de consigne
Précision	maintenue en permanence au plus près de la consigne
Rapidité	atteindre le point d'équilibre en prenant le moins de temps possible

Tableau II.2 Critères et définition d'une bonne qualité de régulation

La source d'alimentation du filtre n'est pas une source de tension autonome mais une capacité qui se charge et se décharge. La tension aux bornes de cette dernière n'est pas constante. Si aucun échange de puissance active n'existe entre la capacité et le réseau, cette dernière sera considérée comme un réservoir pour la circulation des harmoniques. Les principales causes d'échange de puissance et qui sont susceptibles de modifier cette tension sont [05] :

- L'injection des courants fondamentaux pendant les régimes transitoires de la charge polluante,
- Les pertes de commutation et par conduction des interrupteurs de puissance,
- Les pertes par effet Joule dans les composants passifs L et C.

3.2.3.1. Régulation proportionnel intégral (PI)

La régulation de la tension de source continue est usuellement faite par des correcteurs de type proportionnel intégral (PI). La fonction de transfert de ce régulateur est définie par : k_p

$$k_p + \frac{k_i}{s} \quad (\text{II.31})$$

La référence est générée par le correcteur PI comme suit :

- Pour une régulation par courant :

$$I_{dc} = K_p(V_{dc-ref} - V_{dc}) + K_i \int (V_{dc-ref} - V_{dc}) dt \quad (\text{II.32})$$

- Pour une régulation par P_{dc} :

$$P_{dc} = K_{pdc}(V_{dc-r} - V_{dc})^2 + K_{idc} \int (V_{dc-r} - V_{dc})^2 dt \quad (\text{II.33})$$

K_p et K_i (resp. K_{pdc} et K_{idc}) sont les termes proportionnel et intégral du correcteur PI.

Les gains proportionnel et intégral sont déterminés à partir de l'étude de la fonction de transfert en boucle fermée schématisée sur les figures (II.11) et (II.12).

3.2.3.1.1 Régulation par I_{dc}

La tension aux bornes de la capacité du bus continu est :

$$V_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} \int I_{dc} dt \quad (\text{II.34})$$

En appliquant la transformé de Laplace on trouve :

$$V_{dc} = \frac{1}{sC_{dc}} \int I_{dc} \quad (\text{II.35})$$

La fonction de transfert du système en boucle ouverte est : $\frac{1}{sC_{dc}}$.

La fonction de transfert en boucle fermée s'écrit comme suit :

$$G_{BF} = \frac{\left(1 + \frac{K_p}{K_i} S\right) \frac{K_i}{C_{dc}}}{S^2 + \frac{K_p}{C_{dc}} S + \frac{K_i}{C_{dc}}} \quad (\text{II.36})$$

L'expression générale d'une fonction de transfert du second ordre est :

$$G_{BF} = \frac{\left(1 + \frac{K_p}{K_i} S\right) \omega_c^2}{S^2 + 2\xi\omega_c S + \omega_c^2} \quad (\text{II.37})$$

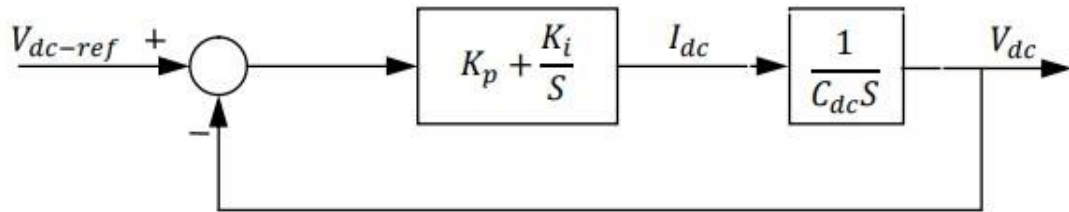


Figure II.11 Boucle de régulation de la tension du bus continue avec I_{dc} .

Après identification de cette dernière équation avec l'équation II.36 on trouve :

$$K_i = \omega_c^2 C_{dc} \text{ et } K_p = 2\xi\sqrt{K_i C}$$

3.2.3.1.2 Régulation par P_{dc}

Si on néglige les pertes au niveau de l'onduleur et dans le filtre de sortie, la relation entre la puissance absorbée par le condensateur et la tension à ses bornes peut s'écrire sous la forme suivante:

$$P_{dc} = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} C_{dc} v_{dc}^2 \right) \quad (\text{II.38})$$

En appliquant la transformation de Laplace sur cette relation, on obtient :

$$P_{dc} = \frac{1}{2} S C_{dc} v_{dc}^2(S) \quad (\text{II.39})$$

Le carré de la tension aux bornes du condensateur est donnée par :

$$v_{dc}^2 = \frac{2P_{dc}(S)}{C_{dc}S} \quad (\text{II.40})$$

A partir de la relation II.40 et en tenant compte du régulateur PI, la boucle de régulation de tension continue peut être représentée par la figure II.11 .

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

$$G_{BF} = \frac{1 + \frac{K_{Pdc}}{K_{idc}} S}{S^2 + 2 \frac{K_{Pdc}}{C_{dc}} S + 2 \frac{K_{idc}}{C_{dc}}} \quad (\text{II.41})$$

Comparant cette équation avec la forme générale d'une fonction de transfert de deuxième ordre, on trouve : $K_{idc} = \frac{1}{2} C_{dc} \omega_{dc}^2$ et $K_{Pdc} = \xi \sqrt{2 C_{dc} K_{idc}}$ tel que: $\omega_{dc} = 2\pi f_c$

Pour un compromis entre temps de réponse et dépassement on prend $\xi = 0.707$ et pour un bon filtrage des harmoniques de la tension de boucle on prend $f_c = 30$ Hz.

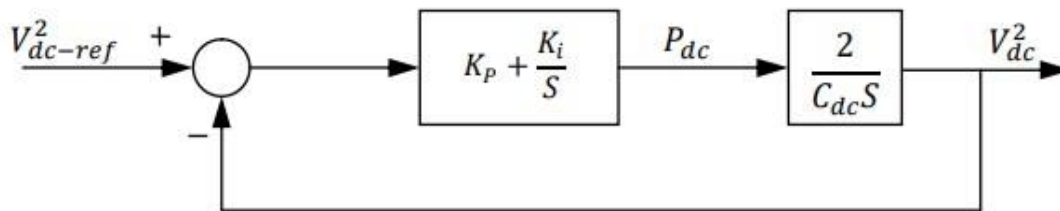


Figure II.12 Boucle de régulation de la tension du bus continue par Pdc.

La sortie du régulateur de tension s'ajoute à la composante active harmonique et donne lieu à un courant actif supplémentaire (cas des méthodes SRF) ou une puissance active (cas des méthodes PQ) permettant de corriger la tension continue V_{dc} .

3.2.4 la synchronisation à base de PLL:

La synchronisation appropriée avec le réseau électrique est l'un des aspects les plus importants à considérer dans le contrôle des dispositifs reliés au réseau tels que les redresseurs commandés, les filtres actifs, et également dans les systèmes de génération de l'énergie électrique tels que les centrales éoliennes et photovoltaïques. La solution la plus largement adoptée pour la synchronisation est la PLL (Phase Locked Loop ou Boucle à Verrouillage de Phase) [21].

Afin de contrôler les échanges de puissance, l'onduleur doit être toujours synchronisé avec le réseau. Pour améliorer la qualité de l'énergie au niveau du réseau tout en assurant un facteur de puissance quasi-unitaire, la génération d'un signal sinusoïdal en phase avec la tension d'alimentation est nécessaire pour la détermination des courants de références. Cependant, le système de tension auquel nous avons accès (FAP) est celui mesuré au niveau du point de raccordement (PCC), c'est-à-dire (Vs). Lorsque la charge est non linéaire, elle absorbe des courants non sinusoïdaux qui génèrent des harmoniques de courant, dégradant ainsi la

tension au point commun de connexion (PCC). De plus, si les courants absorbés par la charge sont déséquilibrés, un système inverse de tension apparaît au niveau de PCC.

Par conséquent, des composantes harmoniques risquent de subsister dans le courant de source (i_s) après compensation [21].

En effet, l'objectif du bloc de synchronisation est d'obtenir la phase de la tension instantanée du réseau par la réalisation d'un suivi de phase de la composante en quadrature, ce qui se produit lorsque la phase estimée est égale à la phase du réseau [23]

Dans la plupart des stratégies de commande conventionnelles pour les dispositifs électronique de puissance, spécialement pour le filtrage actif shunt, l'amplitude, la fréquence et la phase instantanée de la tension directe du réseau électrique, sont nécessaires [21].

3.2.4.1 Structure générale de la PLL classique

La figure.II.13 montre l'ensemble de la structure du système à base de PLL. La PLL est utilisée pour détecter des composantes symétriques ainsi que la phase instantanée de la tension [21] en utilisant un filtre passe-bas [24].

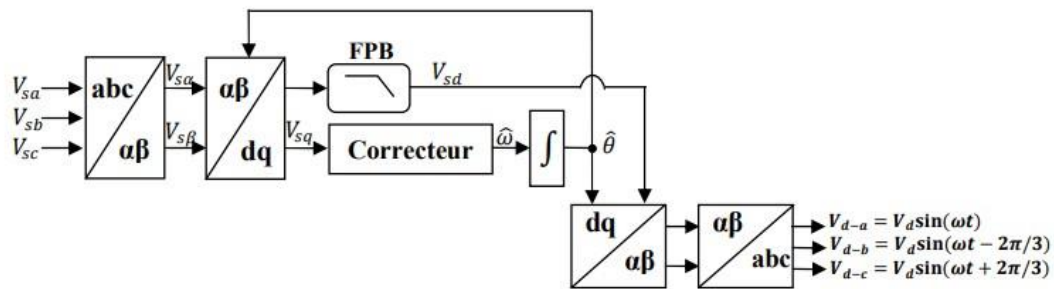
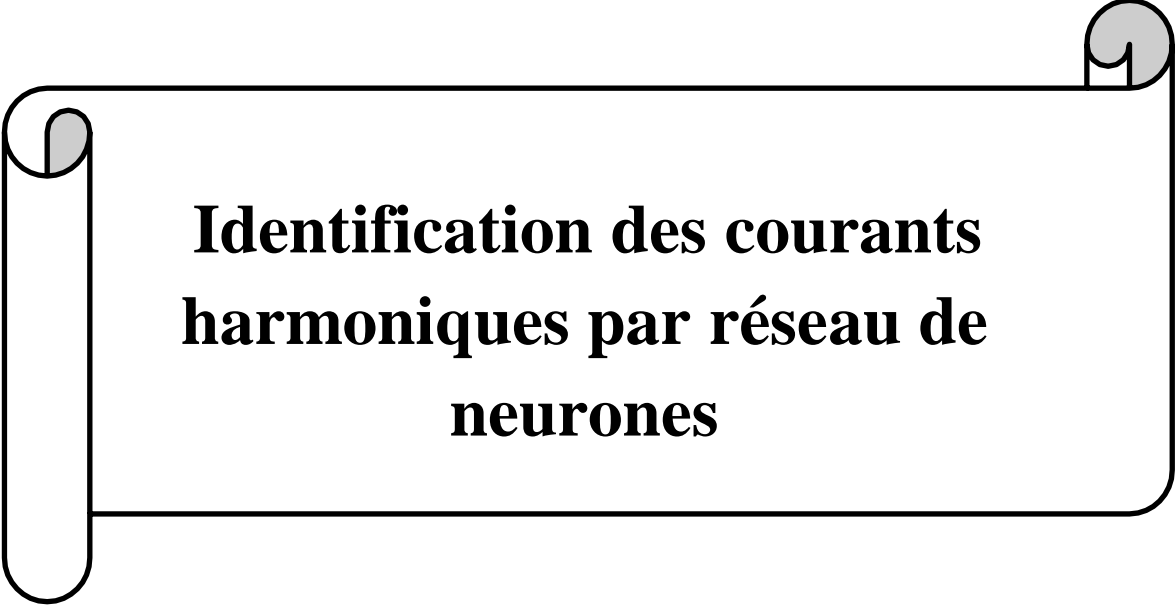


Figure II.13 Structure classique d'une PLL.

4. Conclusion

Dans ce chapitre, Nous avons présenté et défini les éléments constituant le filtre actif parallèle à structure tension, connectées à un réseau électrique à trois fils pour compenser les harmoniques de courant générés par des charges non-linéaires. Cette structure a été partagée en deux parties à savoir la partie puissance et la partie commande. Les éléments de la partie de commande, tels que les méthodes classiques d'identification des courants perturbés sont bien détaillée dans ce chapitre, la commande de l'onduleur et la régulation de la tension continue, de même que ceux de la partie puissance, comme l'onduleur, l'élément de stockage et filtre de sortie ont été fixés. Nous avons présenté également les trois stratégies de commande de l'onduleur couramment utilisées dans les applications des filtres actifs : hystérésis, hystérésis modulée et MLI. La commande hystérésis est très simple et très rapide tandis que la fréquence instantanée des commutations n'est pas contrôlable.

CHAPITRE III



**Identification des courants
harmoniques par réseau de
neurones**

1. Introduction

Ces dernières années, les concepts et les techniques issues de l'intelligence artificielle sont devenus de plus en plus familières dans des différents domaines d'application. L'intelligence artificielle est une discipline scientifique correspondante au traitement des connaissances et au raisonnement, permettant à une machine d'exécuter des fonctions normalement associées à l'intelligence humaine telles que la compréhension, le raisonnement, le dialogue, l'adaptation, l'apprentissage, etc. Il s'agit principalement des réseaux de neurones artificiels et la commande par la logique floue. L'identification des courants harmoniques est une étape très importante dans le processus de compensation active. En effet, le système de commande de l'onduleur, même très efficace, ne pourra pas à lui seul effectuer des corrections suffisantes si les harmoniques parasites sont mal identifiées. Pour cette raison, de nombreuses méthodes d'identification basées sur les techniques intelligentes ont été développées dans la littérature.

Dans ce chapitre, pour améliorer les performances de filtrage, nous utilisons une nouvelle technique d'identifications des courants harmoniques basée sur les réseaux de neurones adaptatifs dite ADALINE (Adaptive Linear Neural Network), et pour les autres blocs de commande, nous conserverons les mêmes techniques de commandes étudiées dans le chapitre précédent.

2. Généralités sur les réseaux de neurones

Les neurones biologiques (Figure III.1) constituent l'unité fonctionnelle de base du système nerveux. Ils assurent le traitement des signaux bioélectriques appelés influx nerveux. En fait, les neurones font une sommation des signaux reçus en entrée et fournissent en sortie un courant en fonction du résultat obtenu.

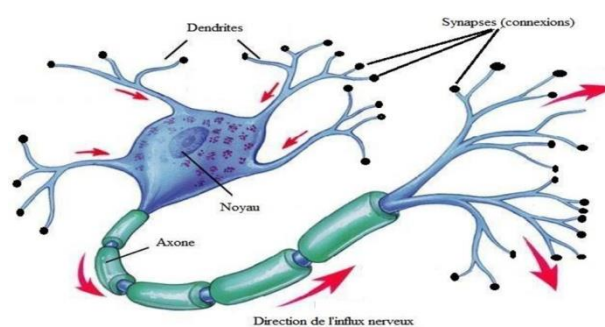


Figure. III.1 Les neurones biologiques.

Un neurone artificiel, quel qu'il soit, est une simplification extrême du neurone biologique. En outre, un neurone formel ou artificiel est une opération mathématique et informatique très simple. La sortie du neurone est une fonction généralement non linéaire d'une combinaison des entrées pondérées par des paramètres qui sont souvent désignés sous le nom de poids, en raison de l'inspiration biologique poids synaptiques.

2.1. Le modèle mathématique du neurone formel

Un neurone formel ou artificiel est une opération mathématique très simple. La sortie du neurone est une fonction généralement non linéaire d'une combinaison des entrées x_i pondérées par les paramètres W_i , qui sont alors souvent désignés sous le nom de « poids » ou, en raison de l'inspiration biologique des réseaux de neurones, « poids synoptiques ». Conformément à l'usage (également inspiré par la biologie), cette combinaison linéaire est appelée « potentiel ». Le potentiel v le plus fréquemment utilisé est la somme pondérée, à laquelle s'ajoute un terme constant ou « biais ». La fonction ϕ est une fonction d'activation qui calcul la sortie du neurone en fonction de ce potentiel, comme le montre la figure suivante :

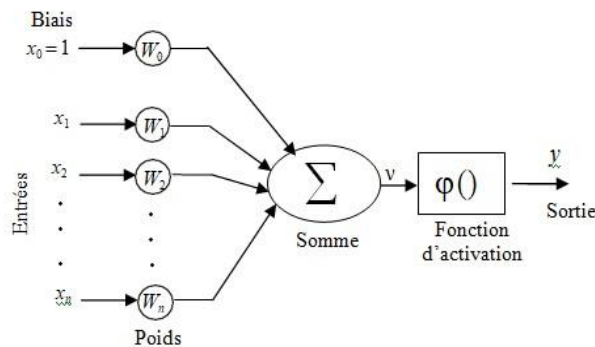


Figure. III.2: Schéma d'un neurone formel

Ainsi, la sortie y d'un neurone a pour relation :

$$y = \varphi \left(\sum_{i=1}^n W_i x_i + b \right) \quad (\text{III.1})$$

Avec

$$b = W_0 x_0 = W_0$$

L'utilisation d'une fonction d'activation non linéaire permet au réseau de neurone artificiel (RNA) de modéliser des équations dont la sortie n'est pas une combinaison linéaire des entrées. Cette caractéristique confère au RNA de grandes capacités de modélisation fortement appréciées pour la résolution de problèmes non linéaires. Voici quelques exemples de fonctions d'activation les plus couramment utilisées :

- Fonction seuil ou Heaviside $\varphi(v) = \begin{cases} 1 & \text{si } v \geq 0 \\ 0 & \text{si } v < 0 \end{cases}$
- Fonction linéaire par partie $\varphi(v) = \begin{cases} 1 & \text{si } v > a \\ v & \text{si } -a \leq v \leq a \\ -1 & \text{si } v < -a \end{cases}$
- Fonction sigmoïde $\varphi(v) = \frac{1}{1 + \exp(-av)}$

2.2. Architecture des réseaux de neurones

L'architecture est la manière avec laquelle les neurones sont interconnectés afin de constituer un réseau. On peut distinguer trois types d'architectures de réseaux de neurones :

- Les réseaux non bouclés ou réseaux unidirectionnels (feedforward networks) ont leurs neurones organisés sous la forme d'une ou de plusieurs couches successives. L'information circule de la couche d'entrées vers la couche de sortie au travers d'éventuelles couches intermédiaires mais sans retour en arrière. Le Perceptron adopte ce type d'architecture.
- Les réseaux bouclés ou les réseaux récurrents (recurrent networks) possèdent une structure similaire à celle des réseaux unidirectionnels mais complétée par des connexions entre éléments de la même couche ou vers des couches amont. Ces réseaux sont assez puissants car leur fonctionnement est séquentiel et adopte un comportement dynamique.
- Dans la catégorie des réseaux à connexions complexes se trouve tous les réseaux qui ne trouvent pas leur place dans les deux catégories précédemment citées. Nous pouvons mentionner les SOM (Self Organizing Map), LVQ (Learning Vector Quantization), ART (Adaptative Resonance Theorie), RCE (Restricted Coulomb Energy), les réseaux probabilistes, etc [25].

2.3. Apprentissage des réseaux de neurones

L'apprentissage est vraisemblablement la propriété la plus intéressante des réseaux neuronaux. L'apprentissage est une phase du développement d'un réseau de neurones durant laquelle le comportement du réseau est modifié jusqu'à l'obtention du comportement désiré. L'apprentissage neuronal fait appel à des exemples de comportement. Durant cette phase de fonctionnement, le réseau adapte sa structure (les poids des connexions) afin de fournir sur ses neurones de sortie les valeurs désirées. Cet apprentissage nécessite des exemples désignés aussi sous l'appellation d'échantillon d'apprentissage ainsi qu'un algorithme d'apprentissage. Dans le cadre de cette définition, on peut distinguer deux types d'apprentissage : l'apprentissage supervisé et l'apprentissage non supervisé.

a) Apprentissage supervisé

Dans ce mode, un professeur qui connaît parfaitement la sortie désirée ou correcte guide le réseau en lui apprenant à chaque étape le bon résultat. Donc l'apprentissage consiste à comparer le résultat obtenu avec le résultat désiré, puis à ajuster les poids des connexions pour minimiser la différence entre les deux. Les règles d'apprentissage supervisé les plus connues sont [25, 26]:

- La règle de Widrow-Hoff.
- La règle de rétro-propagation de gradient.

b) Apprentissage non supervisé

Dans l'apprentissage non supervisé, le réseau modifie ses paramètres en tenant compte seulement des informations locales. Ces méthodes n'ont pas besoin de sorties désirées préétablies. On peut citer la règle de Hebb.

Le choix d'utiliser telle ou telle architecture de réseau de neurones, tel ou tel type d'apprentissage dépend de l'application mais aussi des capacités de traitement du système sur lequel ces architectures vont être implantées. Dans notre étude, nous avons choisi d'utiliser les réseaux de neurones de type Perceptrons. Ils se prêtent le mieux à nos applications grâce à la simplicité de leur mise en œuvre et au déroulement parallèle des calculs qui rendent l'apprentissage en ligne plus efficace. Nous avons également utilisé les réseaux de neurones de type Adaline, cas particulier des réseaux multicouches, qui possèdent une architecture très simple (une couche d'entrée et une couche de sortie).

3. Avantages des techniques neuronales

Les techniques neuronales appliquées à l'identification et à la commande des systèmes dynamiques offrent plusieurs avantages. Parmi ces avantages, nous pouvons citer [25]:

- L'identification ou la commande neuronale d'un processus ne requiert pas de son modèle mathématique interne.
- Les techniques neuronales améliorent considérablement les performances de la commande comparées à certaines techniques conventionnelles.
- Ces techniques peuvent profiter de l'expertise humaine si elle est disponible, sinon la commande neuronale se basera uniquement sur la réponse du système. Ainsi, leur conception peut combiner la réponse du système et l'expertise humaine.
- La commande neuronale s'adapte facilement aux changements qui surviennent dans le processus (commande adaptative).
- Elles peuvent apporter des solutions pour des problèmes intraitables par les méthodes classiques.
- Certaines architectures sont moins coûteuses que d'autres en termes d'implémentation matérielle.
- La plupart de ces architectures sont évolutives, etc...

4. Identifications des harmonique avec l'adaline

L'ADALINE (ADAPtive LINear Element/ADAPtive LInear NEuron) Proposé par Widrow (Widrow et al., 1996) appartient à la famille des Perceptrons et possède un seul neurone à fonction d'activation linéaire et une entrée sous forme d'un vecteur (pouvant avoir plusieurs éléments) où les sorties sont des combinaisons linéaires des entrées à travers un unique poids adaptatif. Ce réseau est largement utilisé dans le filtrage adaptatif et la prédiction des signaux. Plusieurs méthodes ont été réalisées dans ce contexte par DJAFFAR OULD ABDESLAM dans sa thèse de doctorat, Il s'agit de la méthode neuronale directe, de la méthode des PIRI neuronale, de la méthode tri-monophasée et de la méthode des courants diphasées.

4.1. La méthode directe

4.1.1. Décomposition des courants

Dans cette méthode l'identification et le filtrage s'effectuent dans l'espace des courants triphasé. Après prélèvement des trois courants sur le réseau électrique, chaque courant est décomposé en série de Fourier de la façon suivante :

$$i_c(t) = i_{cf}(t) + i_{ch}(t) \quad (\text{III.2})$$

$$= \sum_{n=1 \dots N} [I_{n1} \cos n(\omega t - \alpha) + I_{n2} \sin n(\omega t - \alpha)]$$

Dans cette expression i_{cf} représente le courant fondamental et i_{ch} représente le courant harmonique tel que :

$$i_{cf}(t) = I_{11} \cos(\omega t - \alpha) + I_{12} \sin(\omega t - \alpha) \quad (\text{III.3})$$

et

$$i_{ch}(t) = \sum_{n=2 \dots N} [I_{n1} \cos n(\omega t - \alpha) + I_{n2} \sin n(\omega t - \alpha)] \quad (\text{III.4})$$

où ω est la fréquence fondamentale du réseau électrique, α est un angle quelconque qui peut être égale à zéro, I_{11} et I_{12} sont les amplitudes associées aux cosinus et sinus du courant fondamental I_{n1} et I_{n2} sont associés aux cosinus et sinus du courant harmonique d'ordre n .

4.1.2. Identification des courants avec les Adalines

L'identification des harmoniques se fait par un réseau Adaline identique sur chaque phase. Les entrées de ce réseau sont les termes en cosinus et en sinus issus de la décomposition en série de Fourier du courant mesuré (à l'exception d'un terme constant correspondant à un biais).

L'expression du courant de charge $i_c(t)$ peut être alors écrite sous la forme matricielle suivante :

$$i_c(t) = W^T X(t) \quad (\text{III.5})$$

Dans cette expression, W représente le vecteur des poids de l'Adaline et $X(t)$ le vecteur des entrées constitué des composantes cosinus et sinus des différentes harmoniques :

$$W^T = [I_{11} \ I_{12} \ \dots \ I_{n1} \ I_{n2}] \quad (\text{III.6})$$

et

$$X(t) = [\cos(\omega t - \alpha) \ \sin(\omega t - \alpha) \ \dots \ \cos n(\omega t - \alpha) \ \sin n(\omega t - \alpha)]^T \quad (\text{III.7})$$

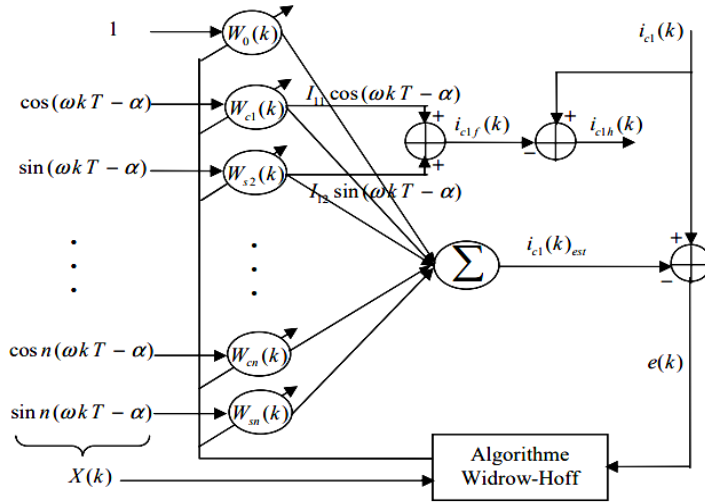


Figure. III.3: Structure de l’Adaline pour la méthode d’identification directe

L’erreur $e(k)$ est la différence entre le courant $i_{cl}(k)$ à l’instant k et le courant estimé $i_{cl}(k)_{est}$. Elle est utilisée par l’algorithme d’apprentissage de Widrow-Hoff modifié, pour la mise à jour des poids. Le courant fondamental estimé est alors évalué comme suit :

$$i_{cf}(t) = W_{cl} \cos(\omega t - \alpha) + W_{cl} \sin(\omega t - \alpha) \tag{III.8}$$

où W et W représentent les poids du réseau Adaline associés aux entrées constituées des termes cosinus et sinus pour la fréquence fondamentale. La différence entre le courant de charge $i_c(t)$ et le courant fondamental $i_{cf}(t)$ donne la somme des harmoniques et donc de ce fait le courant de référence :

$$i_{ref}(t) = i_{ch}(t) = i_c(t) - i_{cf}(t) \tag{III.9}$$

Avec cette méthode, dans le but de sélectionner les harmoniques que l’on veut compenser, il est possible d’identifier les courants harmoniques individuellement. Il suffit alors de prélever les amplitudes identifiées par les poids de l’Adaline correspondant aux composantes des cosinus et sinus des harmoniques en question. Ainsi, pour une harmonique d’ordre n on peut écrire :

$$i_{cn}(t) = W_{cn} \cos(\omega t - \alpha) + W_{sn} \sin(\omega t - \alpha) \tag{III.10}$$

5. Conclusion

Dans cette étude nous étudions une nouvelle stratégie d'identification et de commande permettant d'améliorer les performances d'un filtre actif parallèle. Cette stratégie, basée purement sur des techniques intelligentes. Dans ce chapitre nous avons basé sur la méthode neuronale directe type Adaline, pour identifier le courant de référence, cette stratégie, travail sur la transformée de Fourier du signal des courants triphasés, c'est une technique simple par sa conception. effectue un filtrage adaptatif, séparant le fondamental du courant pollué. L'utilisation de l'algorithme de Widrow-Hoff permet alors une adaptation rapide des poids du réseau ADALINE et une bonne estimation des composantes perturbatrices des courants.



Les résultats de simulation

1. Introduction

Ce chapitre traite de l'application de la méthode de l'identification neuronale directe, à travers le programme de simulation MATLAB Ce qui signifie qu'Adaline s'exécute directement dans l'espace réseau actuel source d'énergie. Les résultats de la simulation seront affichés et commentés.

2. Simulation de système de FAP à trois fils

Le réseau d'alimentation est un réseau triphasé équilibré, il est modélisé par phase par une fds.e.m sinusoïdale en série avec une inductance (L_s) et une résistance (R_s) caractérisant l'impédance de court-circuit du réseau. La charge polluante est constituée d'un pont redresseur triphasé à diodes qui débite dans une charge (RL). L'inductance (L_c) et la résistance (R_c) à l'entrée du redresseur modélisent l'impédance de ligne et les éventuelles inductances additionnelles mises en œuvre pour limiter les variations de courant. Le filtre actif parallèle triphasé à structure tension est inséré en parallèle avec la charge. L'onduleur de ce filtre est commandé par hystérésis.

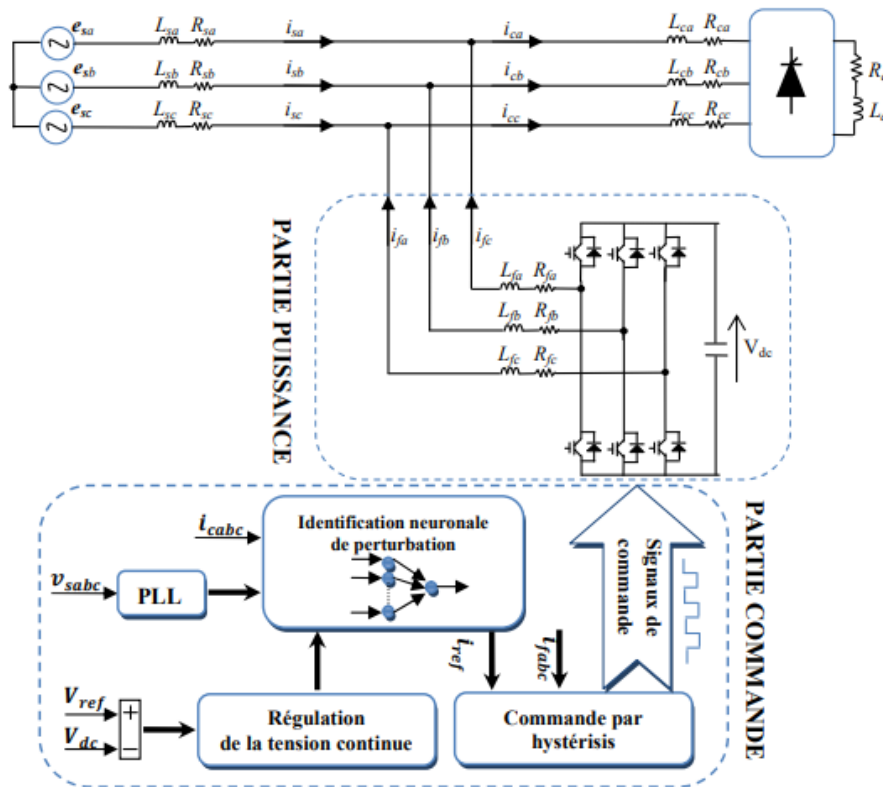


Figure.IV.1 Schéma globale du système étudié avec FAP à 3 fils

Réseau d'alimentation					
Paramètres	V_s [v]	F [Hz]	R_s [Ω]	L_s [mH]	L_c [mH]
Valeurs	40.8	50	0.42	2.3	1

Charge non-linéaire		
Paramètres	R_d [Ω]	L_d [mH]
Valeurs	11	3

Filtre actif parallèle		
Paramètres	L_f [mH]	V_{dc} [V]
Valeurs	3 mH	120

Tableau IV.1 Paramètre du FAP à trois fils.

Dans tout ce travail, le THD is est calculé pour les Vingt premier harmoniques. Le nombre de neurones est de 19 et le coefficient d'apprentissage choisi est de 0.001. avec une largeur de la bande d'hystérésis $\Delta i = 0.01$

3. Résultats des simulations

On se propose de présenter dans la suite les résultats de simulation du FAP pour la méthode directe d'identification des courants de référence. Le système simulé est celui de la figure IV.1 avec les mêmes paramètres.

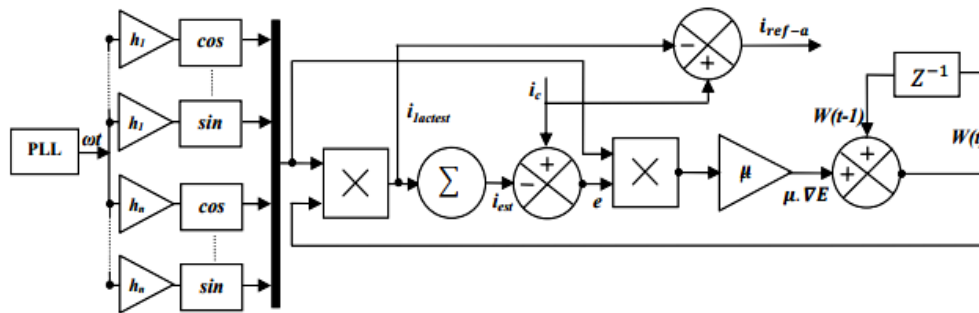


Figure IV.2 Modelé de l'identification sous Matlab/simulink des courants de référence (Phase a).

Les figures (IV.3 a, b) montrent respectivement le courant de la source, le courant injecté par le filtre et la tension de bus continu V_{dc} avant l'insertion du filtre actif. On remarque que la charge non linéaire génère des courants non sinusoïdaux qui provoquent la pollution du réseau étudié. Le courant fourni par le filtre (i_{fa}) est nul, et la tension de bus continu a une valeur de 120 V.

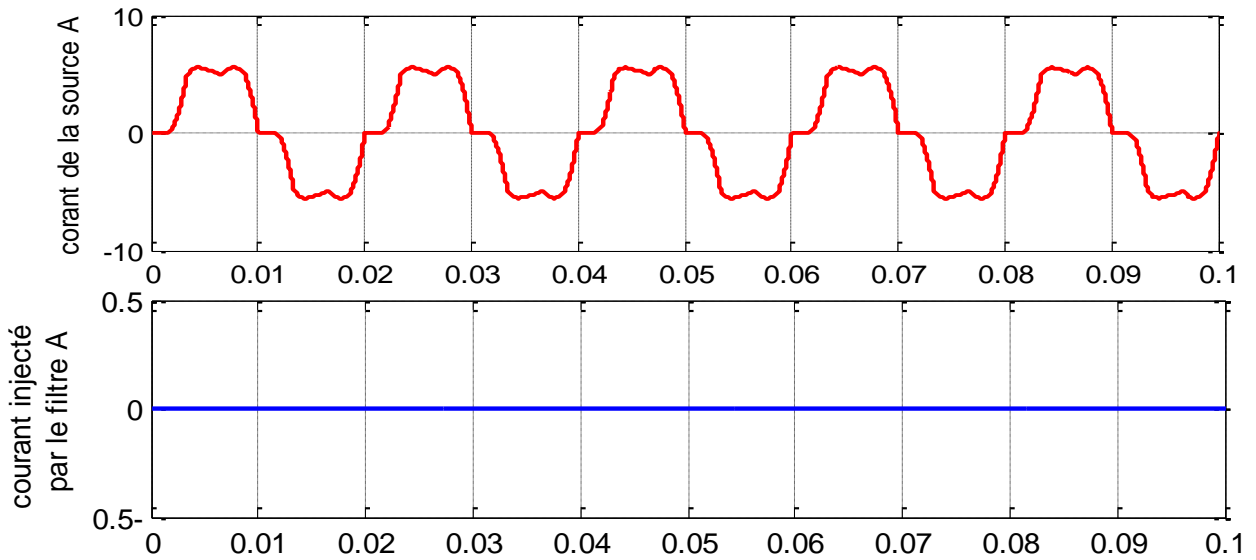


Figure IV.3 Résultats de simulation avant l'insertion de filtre: (a) i_{sa} , (b) i_{fa} ,

Les figures (IV.4.a,b) montrent la forme de courant de la source, le courant généré par le filtre .

Avant l'insertion de filtre le courant de source est déformé, le courant généré par le filtre est nul . A l'instant $t=80$ ms le filtre est inséré, on observe un régime transitoire de courte durée. Après l'insertion du filtre on voit une forme du courant qui devient sinusoïdale, le filtre injecte le courant de compensation des harmoniques au réseau.

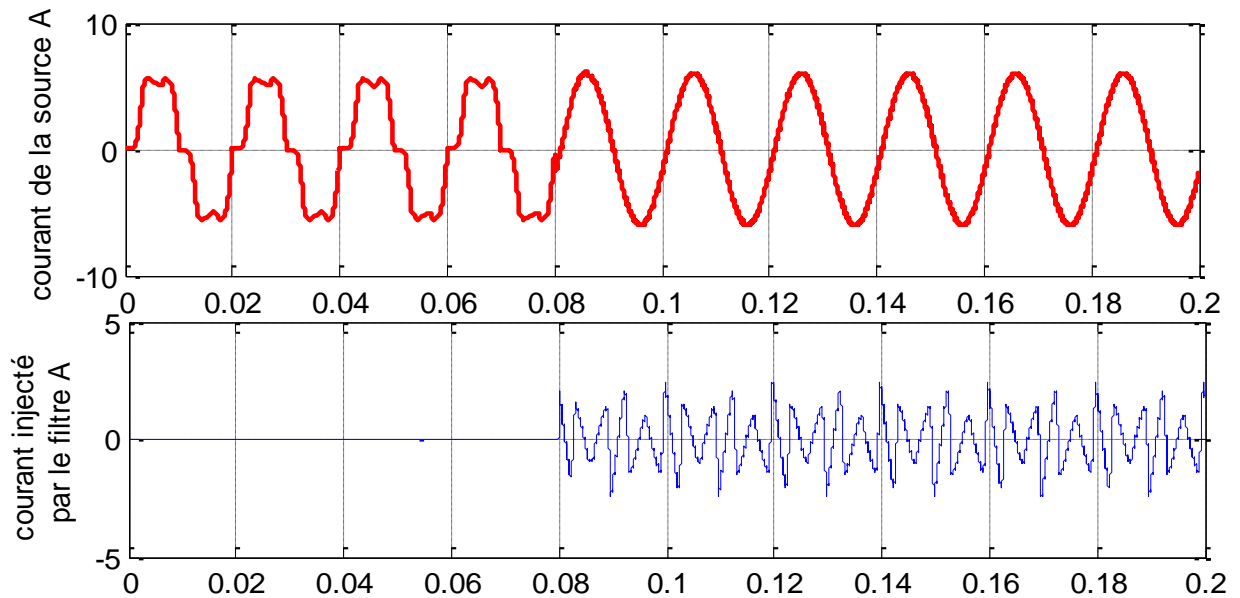


Figure IV.4 Résultats de simulation lors de l'insertion du filtre: (a) Courant de la source i_{sa} , (b) Courant injecté par le filtre i_{fa} ,

Après l'insertion du filtre actif parallèle, on obtient les résultats donnés par les figures (IV.5.a, b).

On peut constater qu'une fois le filtre actif parallèle est mis en marche, le courant du réseau est désormais sinusoïdal, la forme sinusoïdale de courant de la source est provoquée par l'injection du courant généré par le filtre qui suit bien sa référence.

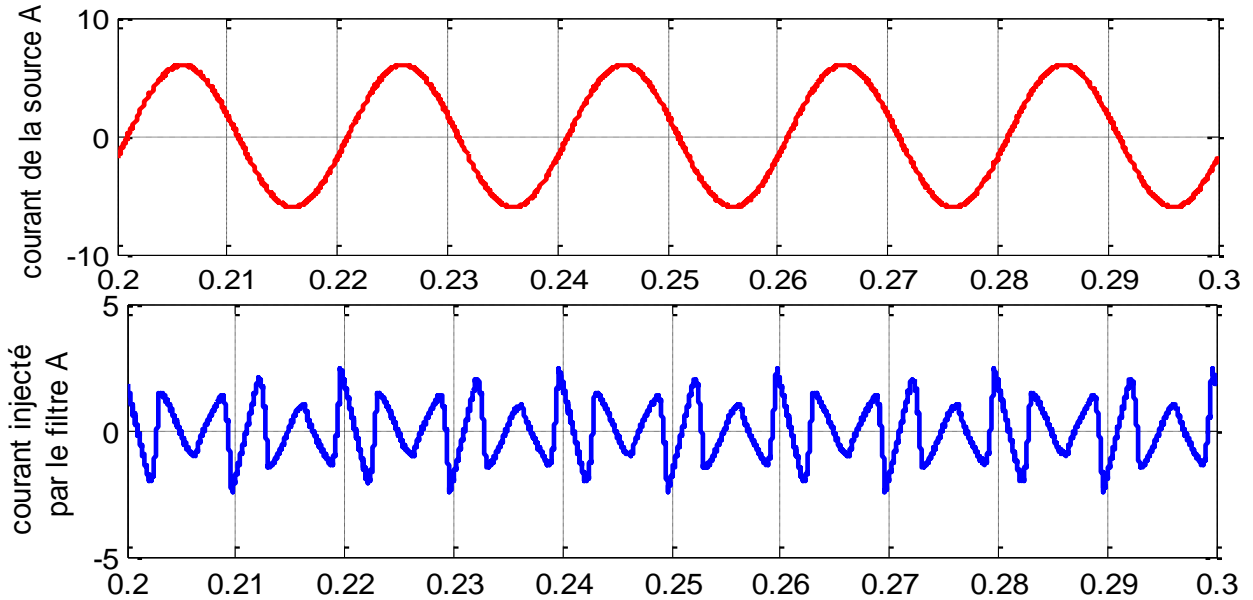
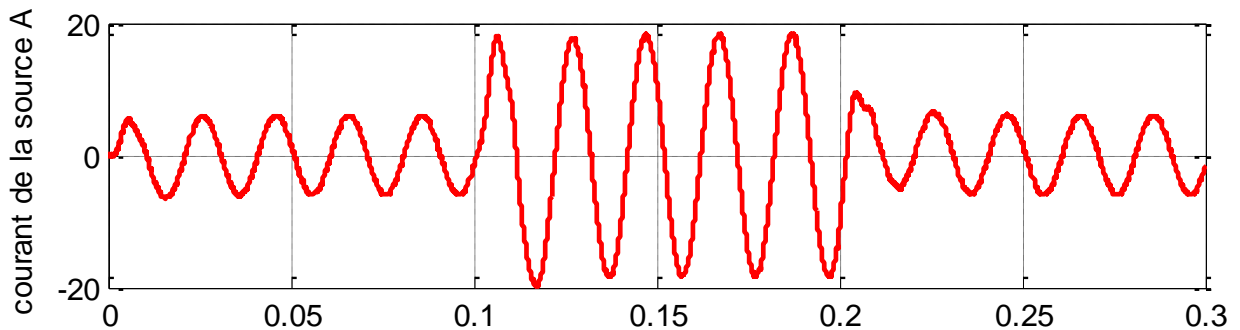


Figure IV.5 Résultats de simulation après l'insertion de filtre: (a) Courant de la source i_{sa} , (b) Courant injecté par le filtre i_{fa} ,

On remarque de la figure IV.6.a qu'en présence du filtre actif parallèle, le courant du réseau est pratiquement sinusoïdal. Le fait que le courant de la source ait retrouvé sa forme sinusoïdale même après avoir changé la charge puis l'avoir ramené à l'état initial nous confirme que le filtre actif parallèle a généré un courant qui suit sa référence indiquée sur la figure IV.6.b



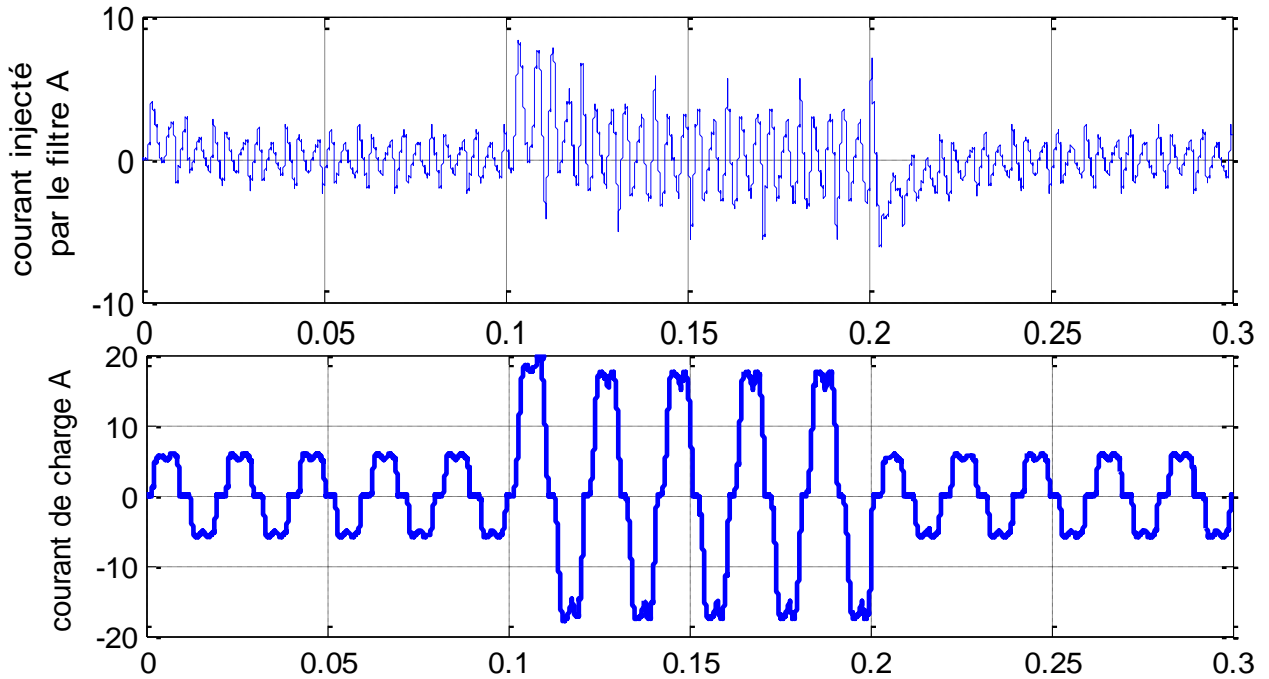


Figure IV.6 Résultats de simulation avec variation de la charge: (a) Courant de la source i_{sa} , (b) Courant injecté par le filtre i_{fa} , (c) Courant de la charge i_{ca}

L'analyse spectrale du courant côté charge est représentée dans la (Figure IV.7.a) Le taux de distorsion est de 25.35%.

Après la mise en œuvre d'un FAP (Figure IV.7.b), les courants harmoniques de la source sont biencompensés telle que le THD_{is} est réduit à un taux très faible de 0.17 % (en dessous de 5%).

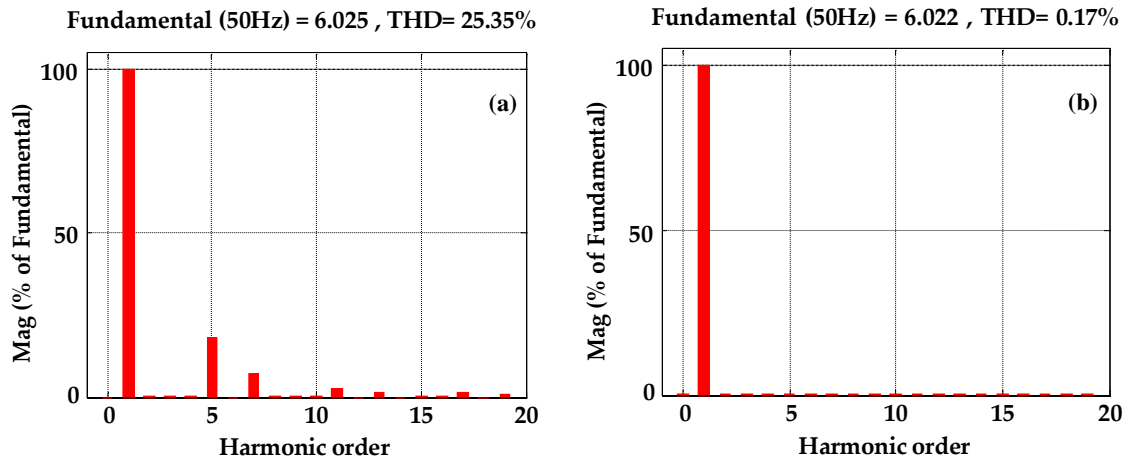


Figure IV.7. Spectre d'harmonique de courant côté source: (a) Côté charge, (b) Côté source.

4. Conclusion :

Dans ce chapitre, les résultats de simulation ont été obtenus en utilisant le programme Matlab / Simulink utilisant également les outils "simporsystem", ces résultats Il a montré que l'estimation des harmoniques par ces techniques neuronales est évidente bien . En plus de déterminer La somme des harmoniques, des techniques neurologiques permettent d'extraire individuellement Chaque rang harmonique déterminera la force de réaction.



Conclusion Générale

Conclusion générale

Ce travail a été consacré à l'application des techniques de l'intelligence artificielle afin d'améliorer les performances d'un filtre actif parallèle, où ce dispositif est particulièrement utilisé à la compensation des courants harmoniques générés par les charges non linéaires et à la compensation de la puissance réactive consommée.

Dans un premier temps, nous avons présenté la problématique des perturbations ou distorsions harmoniques générées par les charges non linéaires connectées aux réseaux électriques. Après avoir rappelé les origines et les conséquences des perturbations électriques, des solutions de dépollution ont été présentées et le choix d'une solution basée sur les principes de filtrage actif type parallèle (FAP) a été retenu. Notre travail s'est alors porté vers l'ensemble contrôle-commande du filtre actif, que nous avons scindé en deux parties. Ces deux parties ont été définies ainsi : l'identification des courants de compensation et celle de la génération des signaux de commande de l'onduleur.

Dans le troisième chapitre, nous examinons une nouvelle stratégie pour déterminer la commande pour améliorer les performances du filtre actif parallèle. Cette stratégie, qui ne dépend que des technologies intelligentes, c'est ce qu'on appelle la technologie des réseaux de neurones artificiels, et nous nous sommes concentrés sur la méthode directe, qui à son tour est une méthode facile à utiliser.

Le quatrième chapitre est consacré à la simulation et à la vérification expérimentale du FAP par la méthode neuronale directe. Cette méthode a donné de très bons résultats permettant ainsi un bon filtrage des courants harmoniques, ce qui est confirmé par les courants sources sinusoïdaux et faibles THD obtenus après filtrage. Les tests dans les systèmes trans II ont très bien fonctionné. De plus, l'approche de reconnaissance neuronale offre la possibilité d'extraction sélective de chaque arrangement harmonique et de sa compensation, ce qui nous permet de dire que les méthodes neurologiques sont les plus efficaces et efficaces.



Bibliographie

- [1] **I. VECHIU.** "Modelisation et Analyse de l'Intégration de des Energies Renouvelables Dans un Réseau Autonome", Thèse de Doctorat, Université de Havre, Année 2005.
- [2] **M.SADI et M.SLAMANI.** " Étude et simulation d'un filtre actif série " Thèse Master Université mouloud mammeri, tizi-ouzou .2018
- [3] **DJAFFAR OULD ABDESLAM.** "Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques", Thèse de doctorat de l'université de Haute Alsace 08 décembre 2005
- [4] **Y. ABDELKADER.** " amélioration de la qualité d'énergie électrique en utilisant un onduleur de tension a cinq niveaux" , Mémoire Magister, Université Hassiba Benbouali de Chlef 2008
- [5] **T. MAHNI .** "Etude et conception d'un filtre actif parallèle triphasé à quatre fils en vue de sa commande par des méthodes d'intelligence artificielle", Thèse de doctorat en sciences, Université Mohamed Khider-Biskra, 2017.
- [6] **BOUGUERRA SAMIR & BOURENNANE IBRAHIM.**" Filtrage actif parallèle des réseaux électriques avec compensation de l'énergie réactive" mémoire d'ingénieur. Université de M'sila, 2007.
- [7] **ABDELATIF MED ELHADI.** " Étude comparative de différentes méthodes de compensation active d'énergie électrique ", mémoire de Master. Université de M'sila, 2013
- [8] **BADACHE ZOHIR & SACI ABDESLAM.** " Etude par simulation d'un filtre actif parallèle ", mémoire d'ingénieur, Université de Msila, 2006.
- [9] **CHEBABHI RABIE & BOUDRAF MUSTAPHA.** " Modélisation et commande des différentes topologies des filtres actifs parallèles " mémoire d'ingénieur d'état. Université de M'sila, 2011.
- [10] **BAKHI HAMZA.** " Commande d'un filtre actif triphasé shunt par logique floue" mémoire de Master. Université de M'sila, 2015.
- [11] **DJEGHLOUD HIND.** " Filtrage actif de puissance ", Thèse de Doctorat, Université de Constantine ,2007.
- [12] **G. ELHACENE & H.RACHIDA.** "Contribution à La Commande d'un filtre actif parallèle " thèse Master , Université Abderrahmane MIRA- BEJAIA
- [13] **KAMEL DJAZIA.**" Etude des filtres actifs pour réseaux déséquilibrés et distordus " Thèse Doctorat, Université ferhat abbas – setif 1, 2015.

- [14] **B. THABET.** " Commande Prédicative d'un Filtre Actif Parallèle " thèse Master , Université Labri Ben M'hidi de Oum El Bouaghi
- [15] **S. KARIMI.** " Continuité de Service des Convertisseurs triphasés de puissance et prototypage "FPGA in the loop": Application au Filtre Actif Parallèle ". Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, 26 Janvier 2009.
- [16] **D. NEKKAR.** "Contribution à l'étude des stratégies de commande des filtres actifs triphasés", Mémoire de Magister, Université Mohamed Chérif Messaadia-Souk-Ahras, 2014.
- [17] **A. BEN AMAR, L. ZELLOUMA , M. T. BENCHOUIA, T. MAHNI.** " Three-Phase Four-Wire Shunt Active Filter Based on Backstepping Controller". Rev. Roum. Sci. Techn.– Électrotechn. et Énerg, Vol. 64, 4, pp. 397–402, Bucarest, 2019.
- [18] **R. DEHINI , R. BERBAOUI.** " L'Identification des Courants Harmoniques Face à la Perturbation de la Tension ". Rev. Roum. Sci. Techn.– Électrotechn. et Énerg. Vol. 62, no. 4, pp. 346–351, Bucarest, 2017.
- [19] **A. HAMADI.** " Contribution à l'Etude des Filtres Hybrides de Puissance Utilises pour Améliorer la Qualité de l'Energie dans le Réseau Electrique de Distribution ". Thèse de Doctorat, Université du Québec, École de Technologie Supérieure, Montreal, le 14 septembre 2010.
- [20] **A. SAHLI.** " Filtrage Actif et Contrôle de Puissances : Application aux Systèmes Photovoltaïques Interconnectés au Réseau ". Mémoire de Magistère, Université Ferhat Abbas – Setif, 2012
- [21] **O. LAHMADI.** " Contribution à l'Identification et la Commande d'un Filtre Actif Parallèle par des Techniques Neuromimétiques ". Thèse de Doctorat, Université de Batna -2-, 25/05/2017.
- [22] **H. ZAYANI.** " Régulation et Contrôle des Systèmes de Climatisation ". Support de Cours, Institut Supérieur des Etudes Technologiques de Sfax, Tunisie, Année Universitaire: 2014-2015.
- [23] **M.C. BENHABIB, E. JACQUOT, S. SAADATE.** " An Advanced Control Approach for a Shunt Active Power Filter ". International Conference on Renewable Energy and Power Quality, Groupe de Recherche en Electrotechnique et Electronique-Nancy-France,2003.
- [24] **S. CHAGHI.** " Contrôle d'un Filtre Actif à Quatre bras ". Mémoire de Magistère, Université EL Hadj Lakhder Batna, 30/06/2012.

[25] **DJ. OULD ABDESLAM.** " Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension ". 05 MULH 0814/32, (2005).

[26]. **S. HAYKIN.** " Neural Networks: A Comprehensive Foundation ". 2nd Edition, Prentice Hall, 1999.