

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



Université Dr. Tahar Moulay de Saïda



Faculté de Technologie

Département d'Electrotechnique

Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme de

Master (LMD)

Spécialité : RESEAUX ELECTRIQUES

Filière : ELECTROTECHNIQUE

Intitulé :

Dépollution du réseau électrique en utilisant le filtre actif série à base d'une PLL floue

Présenté par :

HACHEMI Mohamed

BENYAMINA Abbes

Devant le jury composé de :

Dr. RAOUTI Driss

Président

Dr. MEKRI Fatiha

Encadreur

Pr. LAKDJA Fatiha

Examineur

Promotion 2019-2020

Remerciement

Nous remercions en premier lieu, Dieu l'unique de nous avoir donné la fois, le courage et la confiance en nous-mêmes pour pouvoir continuer nos études.

Nous tenons à exprimer toute notre gratitude à Madame F, Mekri, D, à l'université D, TAHAR MOULAY de Saïda, pour ses orientations éclairées, ses conseils constructifs, son esprit critique et son aide précieux

Nous remercions tous nos professeurs qui ont fait de gros efforts pour la réussite de notre formation.

Nous remercions également tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de notre mémoire.

Nous remercions tous ceux qui nous ont permis d'arriver à ce stade nos parents, pour leur soutien et encouragements.

Enfin nous tenons à remercier tous les membres du jury qui nous ont fait l'honneur de juger ce mémoire.

Dédicace

Je dédie ce simple travail à mes très chers parents, dont le sacrifice, la tendresse, l'amour, la patience, le soutien, l'aide et les encouragements sont l'essence de ma réussite.

Sans eux, je ne serais pas ce que je suis aujourd'hui

Je dédie ce travail également :

- *A mon cher frère et mes chères sœurs*
 - *A tous mes oncles et mes tantes*
- *A toute la famille Hachemi et la famille Mankour*
- *A tous mes amis en particulier Amjed et Abdelhak*
 - *A tous ceux qui me sont chers*

Hachemi mohamed

Dédicace

Je dédie ce simple travail à mes très chers parents, dont le sacrifice, la tendresse, l'amour, la patience, le soutien, l'aide et les encouragements sont l'essence de ma réussite. Sans eux, je ne serais pas ce que je suis aujourd'hui

Je dédie ce travail également :

- *A mes chères sœurs*
- *A tous mes oncles et mes tantes*
- *A toute la famille **Benyamina** et la famille **Bouziane***
- *A tous mes amies en particulier Amjed et Abdelhak*
- *A tous ceux qui me sont chers*

Benyamina Abbes

Résumé

Dans un réseau électrique, les harmoniques, la puissance réactive, les déséquilibres de courant et de tension ont des effets néfastes sur les équipements électriques. Ce mémoire présente l'étude et la commande d'un filtre actif série à base d'une PLL flou pour l'amélioration de la qualité de l'énergie d'un réseau électrique. A cet effet, un rappel des différents types de perturbations électriques ont été effectués. Nous avons étudié la PLL pour déterminer les tensions de référence avec deux régulateurs, le premier régulateur PI classique et le second est un régulateur PI flou. Des résultats de simulation obtenus ont montré les performances du régulateur flou ainsi que sa capacité de s'adapter facilement aux différents types de perturbations par rapport au régulateur PI classique.

ملخص

في الشبكة الكهربائية، يكون للتوافقيات، والطاقة التفاعلية، والاختلالات الحالية والجهدية آثار ضارة على المعدات الكهربائية. تقدم هذه الرسالة دراسة وتحكم في مرشح نشط متسلسل يعتمد على PLL ضبابي لتحسين جودة الطاقة في الشبكة الكهربائية. تحقيقاً لهذه الغاية تم إجراء تذكير بأنواع مختلفة من الاضطرابات الكهربائية، وفي النهاية توصلنا إلى أن المنظم الغامض أكثر كفاءة ويتكيف بسهولة مع أنواع مختلفة من الاضطرابات مقارنة بمنظم PI كلاسيكي.

Abstract

In an electrical network, harmonics, reactive power, current and voltage imbalances have harmful effects on electrical equipment. This work presents the study and control of a series active filter based on a fuzzy PLL for improving the quality of the energy of an electrical network. To this end, a reminder of the different types of electrical disturbances was carried out. We studied the PLL to determine the reference voltages with two regulator, the first classic PI regulator and the second one is a fuzzy PI regulator. Simulation results obtained showed the performance of the fuzzy regulator as well as its ability to easily adapt to different types of disturbances compared to the classic PI regulator.

Table des matières

Table des matières I
Liste des figures III
Liste des tableaux IV
Liste des Acronymes V
Introduction générale 1

Chapitre I : Généralité sur les réseaux électrique

1.1. Introduction 4
I.2. Perturbation électrique 5
 I.2.1. Creux et coupures de tension 5
 I.2.2. Fluctuations des tensions 6
 I.2.3. Déséquilibre du système triphasé de tension 6
 I.2.4. Variation de fréquence 6
 I.2.5. Harmonique et inter harmonique 6
 I.2.5.1. Source d'harmoniques 7
I.3. Conséquences des perturbations sur qualité de l'énergie électrique 7
 I.3.1. Conséquences des harmoniques 7
 I.3.1.1. Taux global de distorsion harmonique THD : 8
 I.3.1.2. Facteur de puissance FP 8
 I.3.2. Conséquences du déséquilibre 9
 I.3.3. Conséquences des creux de tension 10
I.4. Solution pour amélioration de la qualité d'énergie électrique : 10
 I.4.1. Solutions traditionnelles 10
 I.4.1.1. Filtre passif 10
 I.4.2. Solutions modernes 11
 I.4.2.1. Filtre actif série 12
 I.4.2.2. Filtre actif parallèle 12
I.5. Conclusion 13

Chapitre II : Détermination des tensions de références

II.1. Introduction. 15
II.2. Description de système à étudier. 15
II.3. Détermination des tensions de référence. 16
II.4. Principe de fonctionnement de PLL 17

Table des matières

II.5. Contrôle de la PLL par un régulateur PI.....	18
II.6. La logique floue.....	20
II.6.1. Principe de la logique floue.	21
II.6.2. Structure générale d'un système flou.....	22
II.6.3. Avantages de réglage par Logique Floue.....	23
II.7. Contrôle de la PLL par régulateur PI flou	24
II.8. Conclusion.....	26

Chapitre III : Commande et simulation de Filtre Actif Série (FAS)

III.1 Introduction	28
III.2 Description du système simulé.....	28
III.3 Structure générale du filtre actif série	29
III.4 Onduleur de tension	29
III.5 Modélisation du filtre actif série	30
III.6 Commande par hystérésis.....	31
III.7 Résultat de simulation	32
III.7.1. Simulation de la PLL.....	32
III.7.2. Simulation du système filtre actif série	36
III.8 Conclusion.....	40
Conclusion générale.....	42
Références Bibliographiques.....	44

Liste des figures

Chapitre I : Généralité sur les réseaux électrique

Fig.I.1 : Système de tension triphasé équilibré	4
Fig.I.2 : Fondamental et inter-harmoniques	7
Fig.I.3 : A. Filtre passif résonant et B. Filtre passif amorti.....	11
Fig.I.4 : Filtre actif série.....	12
Fig.I.5 : Montage d'un filtre actif parallèle	13

Chapitre II : Détermination des tensions de références

Fig.II.1 : Schéma de principe d'un filtre actif série-convertisseur de tension deux niveaux ...	15
Fig.II.2 : Détermination des tensions de référence d'un filtre actif série.....	16
Fig.II.3 : Boucle de contrôle de la PLL.....	17
Fig.II.4 : Schéma fonctionnel de la régulation de la tension V_{sd}	18
Fig.II.5 : Schéma simplifié de la régulation de la tension V_{sd}	19
Fig.II.6 : Classification des personnes en trois ensembles selon la logique classique.....	21
Fig.II.7 : Classification des personnes en trois ensembles selon la logique floue.	21
Fig.II.8 : Structure générale d'un système basé sur la logique floue.	22
Fig.II.9 : Structure de base d'un régulateur flou	24
Fig.II.10 : Les fonctions d'appartenances des variables entrées E , \dot{E} et de la variable de sortie u	25

Chapitre III : Commande et simulation de Filtre Actif Série (FAS)

Fig.III.1 : Schéma de principe du filtre actif série à structure tension	28
Fig.III.2 : Structure générale du filtre série.....	29
Fig.III.3 : Schéma équivalent monophasé d'un onduleur de tension muni d'un filtre L_{fs} , C_{fs} ..	31
Fig.III.4 : Principe de commande par hystérésis	32
Fig.III.5 : Commande des interrupteurs par hystérésis	32
Fig.III.6 : Performances de la PLL avec des régulateurs de type PI et flou en régime déséquilibré ($V_{S1}=230V$, $V_{S2}=180V$ et $V_{S3}=300V$).....	33
Fig.III.7 : Performance de la PLL en régime déformé et déséquilibré (rangs 5 et 7)	34
Fig.III.8 : Performance de la PLL en régime déséquilibré ($V_{S1}=60V$, $V_{S2}=180$ et $V_{S3}=300V$)	35
Fig.III.9 : Compensation d'un régime déséquilibre ($V_{S1}=230V$, $V_{S2}=180$ et $V_{S3}=300V$)	36
Fig.III.10 : Compensation du déséquilibre de tension ($V_{S1}=60V$, $V_{S2}=180$ et $V_{S3}=300V$).....	37
Fig.III.11 : Performance de la FAS lors de la compensation du déséquilibre et des harmoniques de rangs 5 et 7.....	38
Fig.III.12 : Spectre de tension de source : (a) avant filtrage, (b) après filtrage avec PLL à PI	39

Liste des tableaux

Tableau (II.1) : Table d'inférence.....25

Liste des Acronymes

THD	Taux de Distorsion Harmonique
P	Puissance active
Q	Puissance réactive
D	Puissance déformante
S	Puissance apparente
I_c	Courant de la charge.
FP	Facteur de puissance
F_{dis}	Facteur de distorsion
V_s	Tension de source
F.A.S	Filtre actif Série
PLL	Poucle à verrouillage de phase en anglais (Phase Locked Loop)
F.A.P	Filtre actif parallèle
I_s	Courant fourni par le réseau
PI	Proportionnel Intégrateur
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
ω_s	Pulsation de la tension du réseau,
δ_s	L'angle de la composante directe de la tension du réseau
V_{sd}	La composante tension directe
V_{sq}	La composante tension inverse
E	Erreur
É	Dérive de l'erreur
U	Variable de tension de sortie
V_{ch}	Tension de la charge
V_c	La tension de compensation

Introduction générale

Les réseaux électriques fournissent dans le cas idéal des tensions de forme purement sinusoïdale avec une tension efficace et une fréquence fixe. Cependant, selon des études publiées dans la littérature, nous constatons que la qualité de l'onde électrique est loin d'être parfaite. Les développements croissants des secteurs industriels ainsi que de la population sont les causes principales pour lesquels la consommation de l'énergie électrique augmente considérablement. Alors, il est indispensable aux fournisseurs de l'énergie électrique de satisfaire à leurs clients un besoin énergétique de qualité acceptable, du moment qu'une progression considérable en termes des convertisseurs d'électronique de puissance est recensée sur les réseaux électriques. En outre, ces convertisseurs statiques sont considérés comme des charges non linéaires qui absorbent des courants non sinusoïdaux, même s'ils sont alimentés par une source de tension sinusoïdale. Ils posent de sérieux problèmes aux distributeurs d'énergie électrique pour lesquels ils se comportent comme des générateurs de courant harmoniques. En effet, les perturbations provoquées par ces convertisseurs sont bien connues, il s'agit d'une dégradation du facteur de puissance et d'une génération courant alternatifs non sinusoïdaux riches en harmoniques.

Les filtres actifs de puissances sous leurs différentes structures répondent mieux aux contraintes industrielles, et s'adapte à l'évolution de l'impédance du réseau et de la charge. Le filtre actif série peut compenser à la fois les tensions harmoniques et les creux de tension. La plupart de ces filtres utilisent un onduleur à deux niveaux à source de tension à élément de stockage capacitif, ou à source de courant à élément de stockage inductif.

Généralement le filtre actif série est la solution la plus robuste pour protéger les charges sensibles contre ces perturbations. C'est dans cette thématique que s'inscrit notre projet de fin d'étude.

Ce présent mémoire est réparti comme suit :

Le premier chapitre est consacré à la description des perturbations en courant et en tension qui peuvent affecter un réseau électrique. La distribution harmonique avec ses principales sources telles que les harmoniques de courants dus aux charges non linéaires, les conséquences et les normes inhérentes à ces perturbations seront analysées. On présente, également les solutions traditionnelles et modernes de dépollution. Par ailleurs, un rappel, sur les origines et les conséquences des perturbations est abordé. On y présente également des solutions de dépollutions traditionnelles et modernes.

Dans le deuxième chapitre, nous citerons les différentes méthodes de détermination des tensions de références d'un filtre actif série. Dans ce cas, nous nous intéresserons à la PLL,

boucle déverrouillage de phase, pour l'identification des tensions de référence. Nous présenterons la structure détaillée de la PLL en comparant deux régulateurs, le PI classique et le PI flou.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude de la commande d'un filtre active série, après la modélisation du compensateur, la commande par hystérésis fixe est illustrée. Des résultats de simulation validant ce travail seront présentés et comparés.

Chapitre I

Généralité sur les
réseaux électrique

1.1. Introduction

La qualité d'énergie est le concept d'efficacité et de classement des équipements sensibles d'une manière qui convient à l'opération de l'équipement [1].

La qualité de la tension peut être affectée, soit du fait de certains incidents inhérents à la nature physique et aux sujétions liées à l'exploitation du réseau, soit du fait de certains récepteurs. Ces défauts se manifestent sous forme de différentes perturbations affectant un ou plusieurs des quatre paramètres suivants :

- Fréquence.
- L'amplitude des trois tensions.
- La forme d'onde qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde.
- Un système triphasé, caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et de leur déphasage la fig. (I.1)

La mesure de ces paramètres permet de juger la qualité de la tension. Une détérioration de l'un d'entre eux ou de plusieurs à la fois laisse supposer la présence d'une anomalie dans le réseau électrique [2],[3],[4].

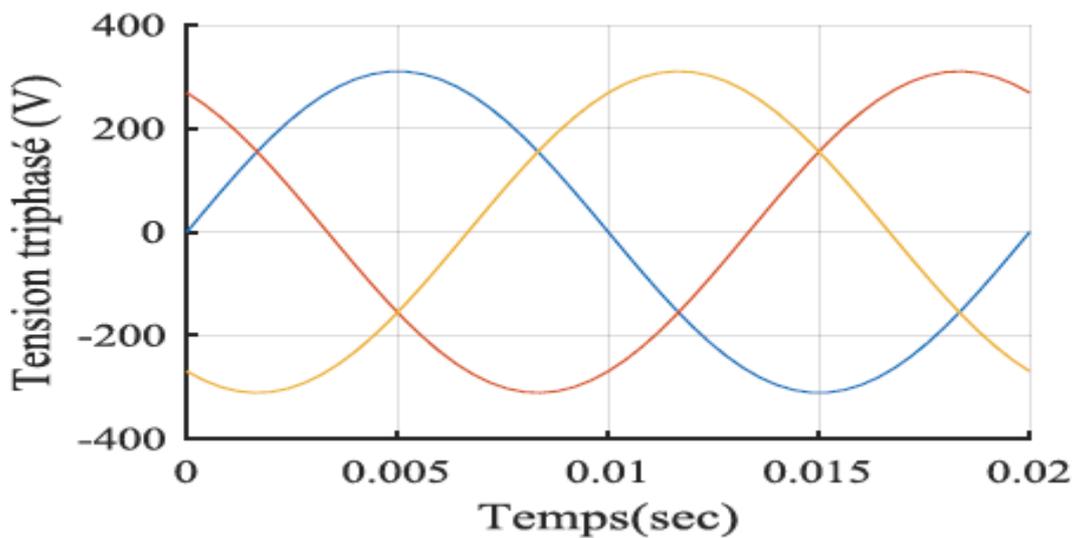


Fig.I.1 : Système de tension triphasé équilibré

I.2. Perturbation électrique

La qualité d'énergie est un concept très large qui peut se définir par rapport à la continuité de la fourniture de l'énergie électrique et de la forme d'onde de la tension disponible. L'évaluation de cette qualité consiste habituellement à caractériser les différentes perturbations électriques [5].

Les perturbations sont l'ensemble des phénomènes internes ou externes au réseau ayant un pouvoir de modifier d'une manière transitoire ou permanente en amplitude et/ou en forme les grandeurs électriques du réseau (courant, tension, fréquence) [6]. Ces perturbations peuvent être groupées en quatre catégories selon qu'elles affectent l'amplitude, la forme d'onde, la fréquence et la symétrie. Elles peuvent aussi être classées selon qu'elles soient permanentes, semi-permanentes ou aléatoires (foudre, court-circuit, manœuvre...) [5].

Les perturbations électriques affectant l'un des quatre paramètres cités précédemment peuvent se manifester par [3] :

I.2.1. Creux et coupures de tension

Un creux de tension est une diminution brusque de la tension de fourniture. Cette diminution, située entre 90% et 10% de la tension nominale U_n est suivie du rétablissement de la tension après un court laps de temps. Un creux de tension peut durer de 10 ms à 3 mn [7].

Il y a deux types de phénomène à l'origine des creux de tension :

➤ Les creux provenant du fonctionnement d'appareils à charge fluctuante ou de la mise en service d'appareils appelant un courant élevé au démarrage (moteurs, transformateurs.....etc.).

➤ Creux liés aux phénomènes aléatoires, comme la foudre ou tous les courts circuits accidentels sur les réseaux de distribution ou les réseaux internes des clients (défaut d'isolation, les protections de branches sur les lignes aériennes...etc.) [2].

➤ Une coupure de tension quant à elle est une diminution brutale de la tension à une valeur supérieure à 90% de la tension nominale U_n ou disparition totale pendant une durée généralement comprise entre 10 ms et une minute pour les coupures brèves et supérieure à une minute pour les coupures longues. La plupart des appareils électriques admettent une coupure totale d'alimentation d'une durée inférieure à 10 ms [8].

I.2.2. Fluctuations des tensions

Les fluctuations de tension sont des variations périodiques ou erratiques de l'enveloppe de la tension. Ce sont des variations brutales de l'amplitude de la tension situées dans une bande de 10% et se produisent sur un intervalle de temps de quelques centièmes de secondes [3].

Ce type de fluctuation est à distinguer des variations lentes de tension dues à la variation progressive de la consommation dans les réseaux. Les principales sources de fluctuations rapides sont les charges industrielles dont le fonctionnement aléatoire occasionne de brusques variations de puissances telles que les machines à souder et les fours à arc. Ces derniers produisent des variations erratiques permanentes de tension. Ces fluctuations sont responsables du phénomène de "*Flicker*" [9].

I.2.3. Déséquilibre du système triphasé de tension

Un récepteur triphasé électrique qui n'est pas équilibré et que l'on alimente par un réseau triphasé équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau. Ceci est fréquent pour les récepteurs monophasés basse tension.

Le déséquilibre de la tension est la différence entre les tensions du système triphasé en amplitude et/ou en déphasage. Il résulte presque toujours de la présence de fortes charges monophasées raccordées sur le réseau triphasé [1].

Ceci est fréquent pour les récepteurs monophasés à basse tension. Mais cela peut également être engendré, à des tensions plus élevées, par des machines à souder, des fours à arc ou par les systèmes de traction ferroviaire [7].

I.2.4. Variation de fréquence

Une variation sensible de la fréquence du réseau peut apparaître sur les réseaux des utilisateurs non interconnectés ou alimentés par une source thermique autonome. 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 $50 \text{ Hz} \pm 1\%$ [10]

I.2.5. Harmonique et inter harmonique

Les harmoniques sont une superposition à l'onde fondamentale (50Hz) des ondes sinusoïdales mais de fréquences multiples entier du fondamental. La principale source de la

présence des harmoniques dans les réseaux électriques est l'utilisation intensive des convertisseurs statiques.

Les inter harmoniques sont superposés à l'onde fondamentale mais ne sont pas des multiples entiers de la fréquence des réseaux. Comme montre-la Fig. (I.2).

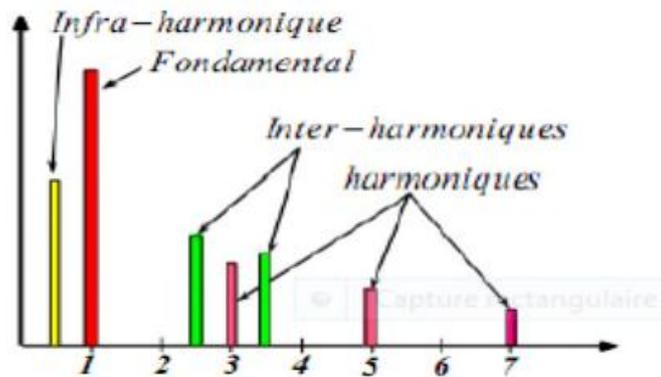


Fig.I.2 : Fondamental et inter-harmoniques [11]

I.2.5.1. Source d'harmoniques

La cause principale de l'existence des harmoniques de tension est l'injection des courants non sinusoïdaux par des charges non linéaires, ou des charges déséquilibrées branchées au réseau. Les harmoniques sont des perturbations permanentes affectant la forme d'onde de la tension du réseau. Ces perturbations résultent de la superposition, sur l'onde fondamentale, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples de celle du fondamental [11]. En général, les harmoniques pairs sont négligeables et seuls les harmoniques impairs existent [12].

I.3. Conséquences des perturbations sur la qualité de l'énergie électrique

I.3.1. Conséquences des harmoniques

De nombreux effets des harmoniques sur les installations et les équipements électriques peuvent être cités. Les effets les plus importants sont :

- L'échauffement des câbles, des condensateurs et des machines dû aux pertes cuivre et fer supplémentaires.
- L'interférence avec les réseaux de télécommunication, causée par le couplage électromagnétique entre les réseaux électriques et de télécommunication peut induire dans ces derniers des bruits importants.

➤ Les défauts de fonctionnements de certains équipements électriques comme les dispositifs de commande et de régulation, tout appareil dont le fonctionnement est basé sur le passage par zéro des grandeurs électriques (appareils utilisant la tension comme référence) peut être perturbé.

➤ Le phénomène de résonance. Les fréquences de résonance des circuits formés par des inductances du transformateur et des câbles sont normalement élevées. Ce n'est pas le cas lorsque des batteries de capacité sont raccordées au réseau pour relever le facteur de puissance, les fréquences de résonance peuvent devenir assez faibles, et coïncider ainsi avec celles des harmoniques engendrés par les convertisseurs statiques. Dans ce cas, il y aura des phénomènes d'amplification d'harmoniques qui peut détruire les équipements raccordés.

Différentes grandeurs sont définies pour chiffrer ces perturbations. Le THD et le facteur de puissance sont les plus employés pour quantifier respectivement les perturbations harmoniques et la consommation de la puissance réactive.

I.3.1.1. Taux global de distorsion harmonique THD :

$$THD = \sqrt{\sum_2^{\infty} \frac{x_2^2}{x_1^2}} \quad (I.1)$$

Ou X_h représente la composante harmonique de rang h, X_1 représente la composante fondamentale.

En général, les harmoniques pris en compte dans un réseau électrique sont inférieurs à 2500Hz, ce qui correspond au domaine des perturbations basses fréquences au sens de la normalisation. Les harmoniques de fréquence plus élevée sont fortement atténués par l'effet de peau et par la présence des inductances de lignes.

I.3.1.2. Facteur de puissance FP

En présence des harmoniques, la puissance apparente S est composée de trois parties : active P_1 , réactive Q_1 et déformante D son expression est donnée comme suit :

$$S = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2 + D^2} \quad (I.2)$$

La puissance déformante D est dû harmoniques de courant avec :

$$D = 3V \sqrt{I_c^2 - I_1^2} \quad (I.3)$$

où I_C est la valeur efficace du courant de la charge, I_1 la composante fondamentale du courant. Le facteur de puissance **FP** est égal au quotient de la puissance active P par la puissance apparente S :

$$FP = \frac{P_1}{S} = \frac{P_1}{\sqrt{p_1^2 + Q_1^2 + D^2}} \quad (I.4)$$

De cette équation, le facteur de puissance sera toujours inférieur à 1. De plus :

$$P_1 = VI_1 \cos \varphi_1 \quad (I.5)$$

On aura donc :

$$FP = \frac{I_1}{I_C} \cdot \cos \phi = F_{dis} \cdot \cos \phi \quad (I.6)$$

Où F_{dis} représente le facteur de distorsion. Il vaut 1 lorsque le courant est parfaitement sinusoïdal et ϕ représente le déphasage entre le courant fondamental et la tension.

I.3.2. Conséquences du déséquilibre

Le déséquilibre d'une installation triphasée peut entraîner un dysfonctionnement des appareils connectés :

- Mauvais fonctionnement d'un appareil monophasé alimenté par une tension très faible (lampe à incandescence qui fournit un mauvais éclairage),
- Destruction d'un appareil monophasé alimenté par une tension trop élevée, il peut être détruit (claquage d'un filament de lampe par surtension).

Concernant les dispositifs triphasés d'électronique de puissance, principalement les ponts redresseurs, le fonctionnement en présence de déséquilibre entraîne l'apparition de composantes harmoniques non caractéristiques, notamment des harmoniques de rang multiple de 3. L'apparition de ces courants harmoniques peut poser des problèmes, comme la génération d'une anti-résonance lors du filtrage de l'harmonique de rang 5. Outre les effets classiques des harmoniques, ces fréquences non caractéristiques peuvent conduire dans certains cas au blocage de la commande.

La conséquence des composantes inverses sur les machines tournantes est la création d'un champ tournant en sens inverse du sens de rotation normal, d'où un couple de freinage parasite et des pertes supplémentaires qui provoquent l'échauffement de la machine. Concernant l'effet du déséquilibre homopolaire, il faut signaler le risque d'échauffement du

conducteur neutre dans un réseau BT qui, lorsque le conducteur est d'un diamètre trop faible, peut provoquer une rupture du conducteur ou un incendie [14].

I.3.3. Conséquences des creux de tension

Les creux de tension sont susceptibles de perturber le fonctionnement de certaines installations industrielles et tertiaires. En effet, ce type de perturbation peut causer des dégradations de fonctionnement des équipements électriques qui peuvent aller jusqu'à la destruction totale.

Afin d'éviter les désagréments causés par la présence de courants et de tensions harmoniques dans le réseau, des normes sont imposées aux utilisateurs [15].

I.4. Solution pour amélioration de la qualité d'énergie électrique :

Pour diminuer les effets de ces perturbations harmoniques, deux types de solutions sont envisageables. La première consiste à utiliser des convertisseurs statiques moins ou peu polluants, tandis que la seconde consiste en la mise en œuvre d'un filtrage des composantes harmoniques. La première classe de solutions s'intéresse à la conception tandis que la seconde consiste à compenser les courants ou les tensions harmoniques [16].

Deux groupes de solutions de dépollution pour compenser toutes les perturbations peuvent être distingués : les solutions traditionnelles et les solutions modernes [17],[18].

I.4.1. Solutions traditionnelles

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

I.4.1.1. Filtre passif

Le principe du filtrage passif consiste à insérer en amont de la charge, un ou plusieurs circuits accordés sur les harmoniques à rejeter. Ainsi, pour filtrer un courant à une fréquence particulière, un filtre résonnant série est placé en parallèle sur le réseau Fig. (I.3.A). Cependant, ce type de filtre est très sélectif. Pour atténuer toute une bande de fréquences, un filtre passif amorti du second ordre Fig. (I.3.B) est préférable.

Le dimensionnement de ces filtres dépend des harmoniques à éliminer, des performances exigées, de la structure du réseau et de la nature des récepteurs. Par cette technique, il est en général plus aisé de rejeter les harmoniques de rang élevé que celles de rang faible. Malgré sa large utilisation dans l'industrie, ce dispositif simple a tout de même certains inconvénients :

- Une connaissance approfondie de la configuration du réseau électrique est nécessaire.

- Les variations de l'impédance du réseau peuvent détériorer les performances du filtre.
- Le réseau peut former un système résonnant avec le filtre et les fréquences voisines de la fréquence de résonance sont amplifiées.
- Equipement volumineux.
- Inadaptabilité et perte d'efficacité lorsque les caractéristiques du réseau électrique évoluent.

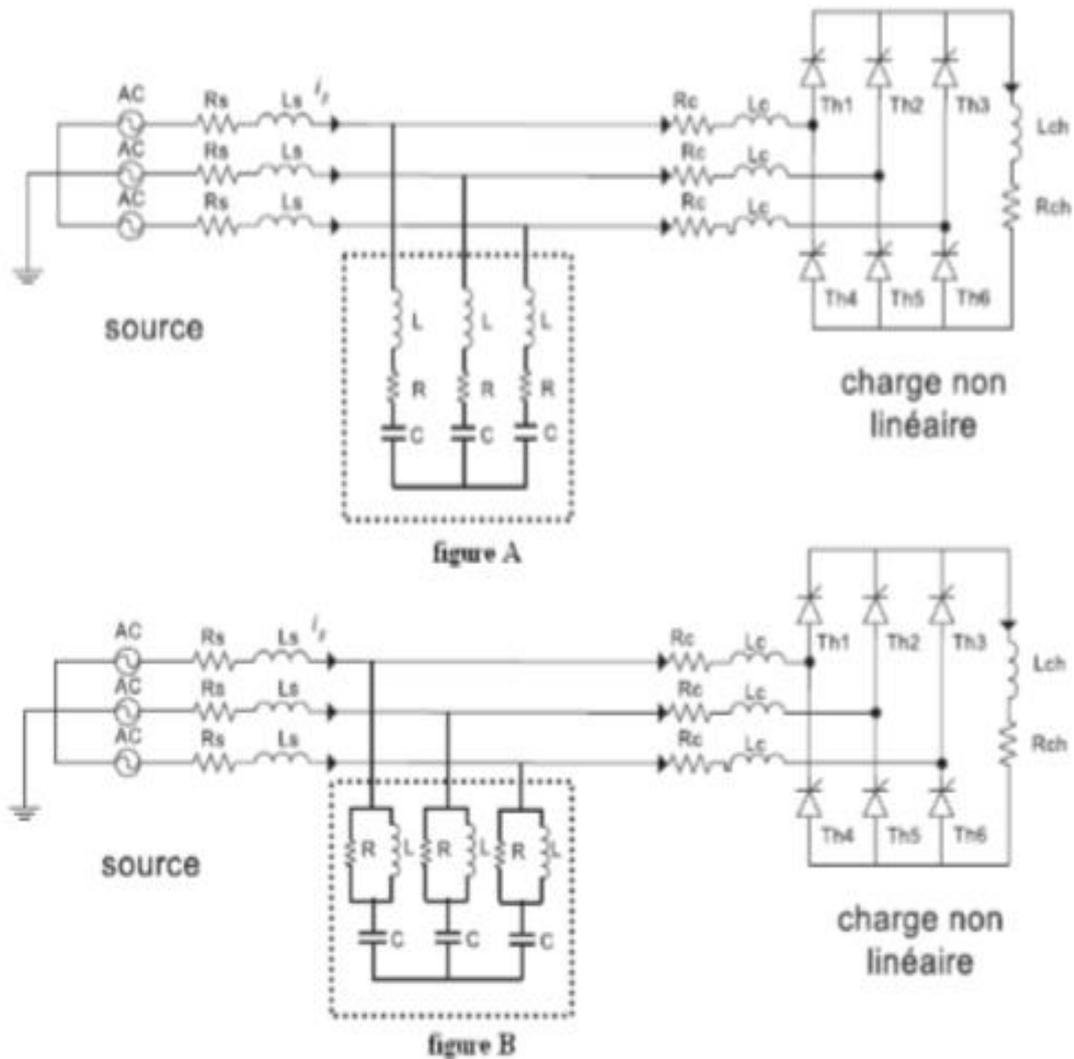


Fig.I.3 : A. Filtre passif résonant et B. Filtre passif amorti

I.4.2. Solutions modernes

Pour fournir aux consommateurs une énergie électrique de qualité, même dans les conditions de fonctionnement les plus perturbées, les filtres actifs sont proposés comme des solutions efficaces de dépollution des réseaux électriques, afin de traiter les inconvénients inhérents aux solutions traditionnelles. Le but de ces filtres est de générer soit des courants,

soit des tensions harmoniques de manière à ce que le courant (ou la tension) redevient sinusoïdal. [17], [18]

I.4.2.1. Filtre actif série

Le Filtre Actif Série (F.A.S) est une solution adaptée à la compensation des tensions perturbatrices, harmoniques, déséquilibrées et des creux de tension. Ces perturbations trouvent généralement leurs origines dans le réseau lui-même mais peuvent parfois être provoquées par les charges elles-mêmes Fig. (I.4).

Il est destiné à protéger les installations qui sont sensibles aux tensions perturbatrices (harmoniques, creux, déséquilibrés) provenant de la source et également celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Cette structure est proche, dans le principe, des conditionneurs de réseau. Toutefois, cette topologie présente quelques difficultés et inconvénients lors de sa mise en œuvre, elle ne permet pas de compenser les courants harmoniques produits par la charge

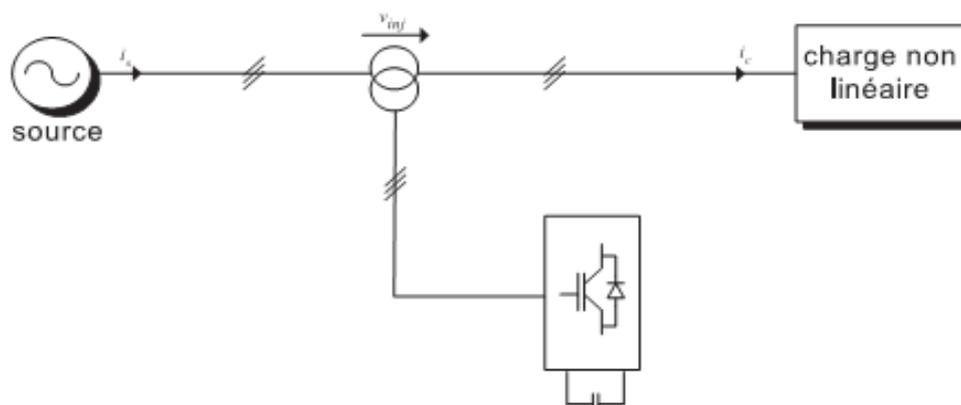


Fig.I.4 : Filtre actif série

I.4.2.2. Filtre actif parallèle

Il est appelé aussi compensateur shunt, il est connecté en parallèle sur le réseau de distribution, Fig. (I.5), il est habituellement commandé comme un générateur de courant. Son principe est d'injecter dans le réseau électrique des 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. Ainsi, il empêche les courants harmoniques, réactifs et déséquilibrés de circuler à travers l'impédance du réseau. Par conséquent, Il améliore le taux de distorsion harmonique en courant.

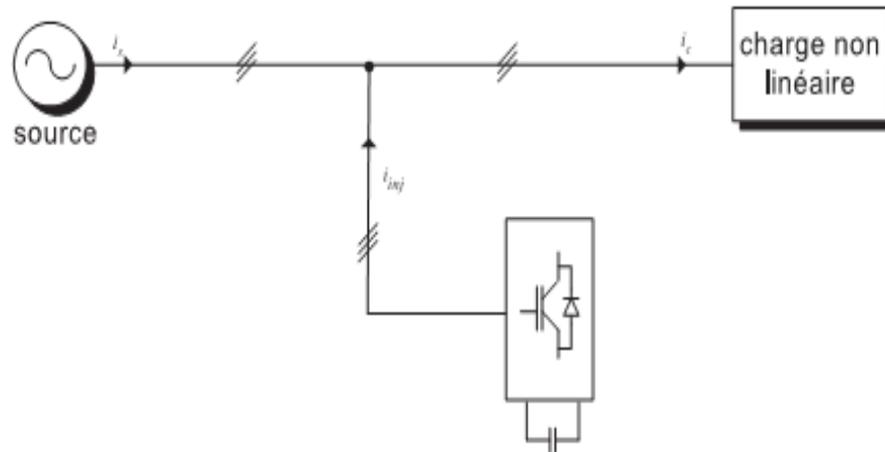


Fig.I.5 : Montage d'un filtre actif parallèle

Il faut noter l'existence de plusieurs autres combinaisons mixtes de filtres actifs avec cette fois-ci les filtres passifs. Ces structures sont conçues dans le but d'optimiser le rapport performance/coût. On peut citer trois configurations :

- Filtre actif série avec des filtres passifs parallèles.
- Filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles.

I.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes origines des perturbations harmoniques affectant la qualité d'onde des tensions et/ou courants du réseau électrique ainsi que leurs effets néfastes sur les équipements électriques installés. Ces effets sont à l'origine d'échauffements et de dégradations du fonctionnement de ces équipements.

Nous avons aussi présenté les différentes topologies des filtre actif série et parallèle. Le filtre actif parallèle peut être installé pour compenser toutes les perturbations de courant comme les harmoniques, les déséquilibres et la puissance réactive. Le filtre actif série peut être installé pour compenser toutes les perturbations de tension comme les harmoniques, les déséquilibres et les creux de tension. La combinaison parallèle-série actifs est la solution universelle pour compenser toutes les perturbations en courant et en tension

La suite de ce travail sera consacrée à l'étude théorique du filtre actif série et la détermination des tensions de références d'un filtre actif série en se basant sur la PLL.

Chapitre II

Détermination des
tensions de références

II.1. Introduction

Plusieurs travaux ont été proposés en littérature afin de déterminer le maximum de perturbations de tension présentes dans le réseau électrique. Dans ce chapitre, on s'intéresse aux différentes méthodes d'identifications des tensions de références, et plus particulièrement celle à base de la PLL, Phase Locked Loop (boucle de verrouillage de phase), qui est une méthode robuste et qui s'adapte rapidement et avec précision aux variations brutales de la tension du réseau électrique. Elle a pour objectif de résoudre les problèmes en termes d'adaptabilité et de calcul déjà rencontrés avec d'autres méthodes d'identifications. La précision et la robustesse de cette nouvelle méthode d'identification sera analysée à travers les simulations effectuées sous MATLAB /Simulink.

II.2. Description de système à étudier

Le filtre actif de puissance série a pour objectif d'éliminer les perturbations de type tension côté source. La structure globale du filtre série est donnée par la Fig. (II.1). Il est constitué d'une source de tension triphasée avec une impédance R_s , L_s , une charge non linéaire représentée par un pont redresseur à diodes et le compensateur actif connecté en série au réseau électrique.

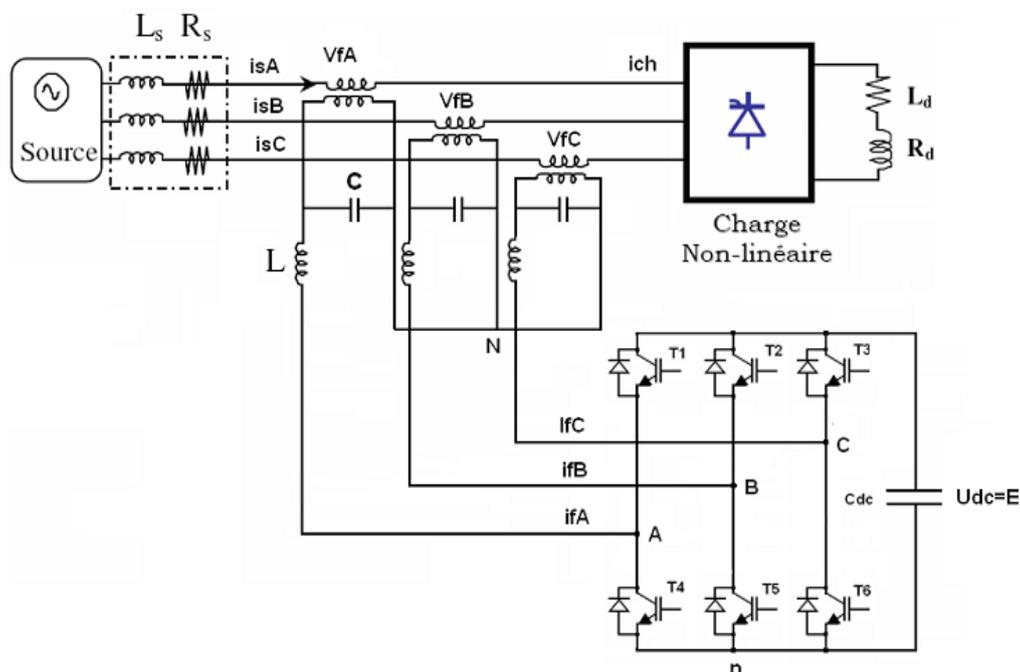


Fig.II.1 : Schéma de principe d'un filtre actif série-convertisseur de tension deux niveaux

II.3. Détermination des tensions de référence

Afin de séparer les tensions perturbatrices de la composante fondamentale directe de la tension du réseau électrique, plusieurs méthodes ont été étudiées dans la littérature. Parmi elles, les méthodes basées sur le calcul des composantes symétriques, les méthodes basées sur le calcul des perturbations dans le repère (d,q), et qu'exigent une bonne connaissance du réseau électrique en présence des harmoniques de tension. Leurs défauts résident dans la complexité de calcul et d'implantation. La méthode d'identification basée sur l'emploi de la PLL est un système bouclé dont son comportement et ses performances sont étudiés et évalués moyennant la théorie des asservissements.

Dans ce travail, on a opté pour la PLL pour la détermination des tensions de références données par la Fig. (II.2), qui illustre la structure générale du système de la PLL. Elle est utilisée pour extraire la phase ($\hat{\theta}_d$) de la composante directe de la tension [19] et de calculer l'amplitude de la composante directe (V_{sd}) [20].

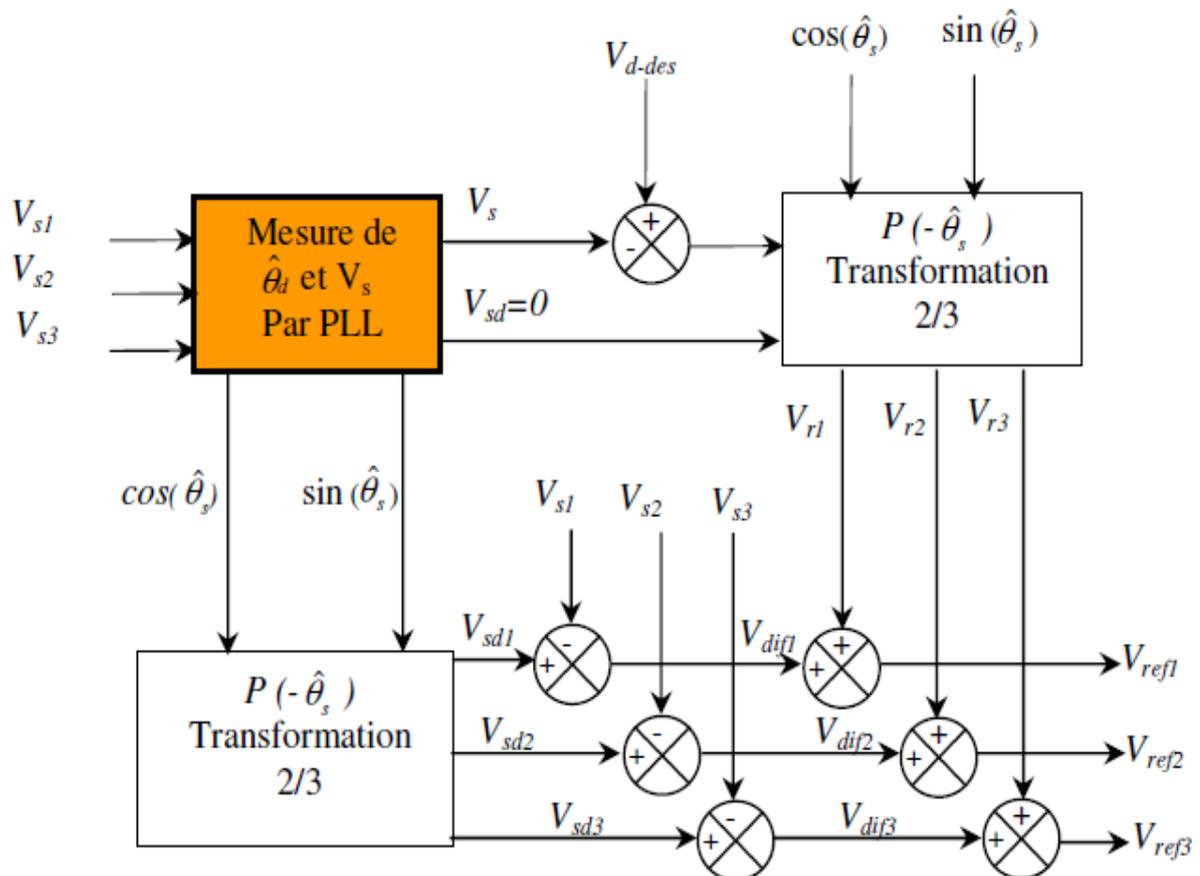


Fig.II.2 : Détermination des tensions de référence d'un filtre actif série

II.4. Principe de fonctionnement de PLL

La méthode d'identification sert à calculer les tensions injectées par l'onduleur pour dépolluer la tension aux bornes de la charge. Ces tensions perturbatrices représentent les tensions déséquilibrées, les harmoniques, et les creux de tension. De ce fait, la qualité du filtrage réside dans l'efficacité de la méthode utilisée pour l'identification des tensions harmoniques.

Dans ce paragraphe, nous présentons une méthode d'identification des tensions perturbatrices basée sur l'utilisation du système à base d'une boucle à verrouillage de phase où en anglais : Phase Locked Loop (PLL).

La boucle à verrouillage de phase est une technique largement utilisée pour l'extraction de la composante directe de la tension du réseau [21]. C'est un système asservi comprenant un régulateur (PI ou PI flu), dont son fonctionnement se base sur la transformation de Park dans le repère d, q comme le montre la Fig. (II.3).

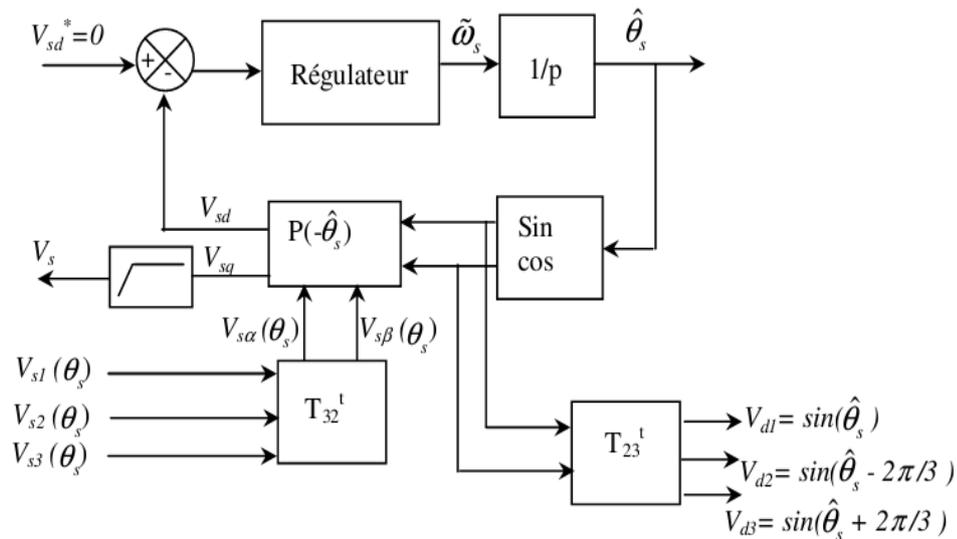


Fig.II.3 : Boucle de contrôle de la PLL

Nous souhaitons que l'angle de rotation estimé soit égal à l'angle réel de la tension directe, cela peut être réalisé en choisissant la valeur de V_{sd}^* qui satisfait cette condition. [28], [29].

Les tensions mesurées de la source au point de raccordement sont données par l'équation suivante :

$$\begin{aligned}
 v_{s1} &= \sqrt{2}.V \sin(\hat{\theta}_s) \\
 v_{s2} &= \sqrt{2}.V \sin\left(\hat{\theta}_s - \frac{2\pi}{3}\right) \\
 v_{s3} &= \sqrt{2}.V \sin\left(\hat{\theta}_s + \frac{2\pi}{3}\right)
 \end{aligned} \tag{II.1}$$

Dans le cas où la tension du réseau est sinusoïdale et équilibrée, on a :

$$v = v_d \text{ et } \hat{\theta}_s = \hat{\theta}_d$$

$$\text{avec } \theta_s = \omega_s t \tag{II.2}$$

ω_s : Pulsation de la tension du réseau.

Après l'application de la transformation de Park au système de tension du réseau la composante tension directe V_{sd} et la composante tension inverse V_{sq} sont données par le système d'équation 3.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} &= \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} P(-\hat{\theta}_d) v_{s123}(\theta_d) \\ &= \sqrt{3} v_d \begin{bmatrix} \sin(\theta_d - \hat{\theta}_d) \\ -\cos(\theta_d - \hat{\theta}_d) \end{bmatrix} \\ &\approx \sqrt{3} v_d \begin{bmatrix} \sin(\Delta\theta_d) \\ -\cos(\Delta\theta_d) \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{II.3}$$

L'asservissement de phase sera réalisé lorsque $\Delta\theta = 0$, dans ce cas, l'angle de la tension du réseau et l'angle estimé $\hat{\theta}_d$ sont égaux, ainsi nous pouvons écrire :

$$v_{sd} = 0 \text{ et } v_{sq} = -\sqrt{3} v_d \tag{II.4}$$

θ_s est égal à $\hat{\theta}_s$ estimé si est seulement si V_{sd} est égal à zéro, alors, on peut contrôler θ_s en asservissant V_{sd} à une valeur nulle, d'où, on déduit le schéma simplifié de la régulation de la tension V_{sd} donné par la Fig. (II.4) [22], [23].

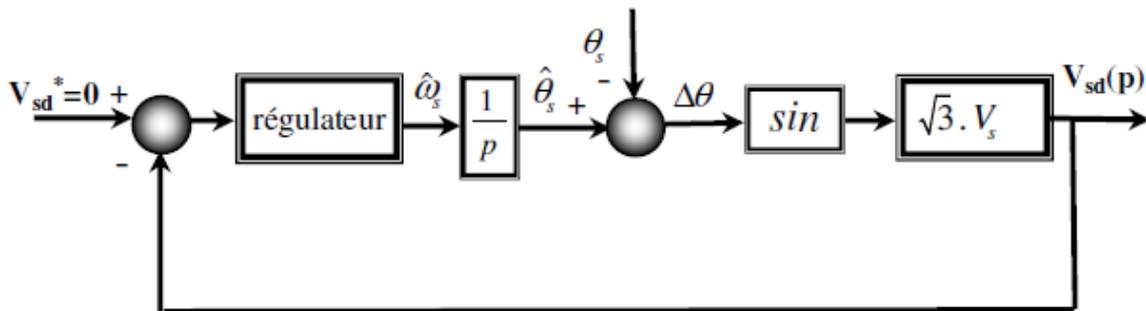


Fig.II.4 : Schéma fonctionnel de la régulation de la tension V_{sd}

II.5. Contrôle de la PLL par un régulateur PI

De la Fig. (II.4), on remarque qu'il faut contrôler la composante directe afin d'assurer le verrouillage de phase de la PLL, deux régulateurs ont été étudiés et comparés pour satisfaire

cette condition. Dans un premier temps, on se base sur le régulateur proportionnel intégral PI. Le schéma fonctionnel de la régulation de la tension V_{sd} en utilisant un régulateur PI est donné par la Fig. (II.5).

Sachant que l'intérêt du correcteur de type proportionnel intégral PI est de permettre une erreur statique nulle. En effet, si le système comporte un intégrateur et se stabilise à un point d'équilibre, tous les signaux sont constants. Or, pour que la sortie d'un intégrateur soit constante, il est nécessaire que son entrée soit nulle. Si l'entrée de l'intégrateur est reliée à l'erreur de régulation, l'effet du terme intégral sera bien d'annuler cette erreur. Notons que l'erreur est annulée même en présence d'une perturbation. Annuler l'erreur en régime permanent est une chose, mais le faire rapidement en est une autre. Il convient donc d'être capable de régler le correcteur de manière adéquate.

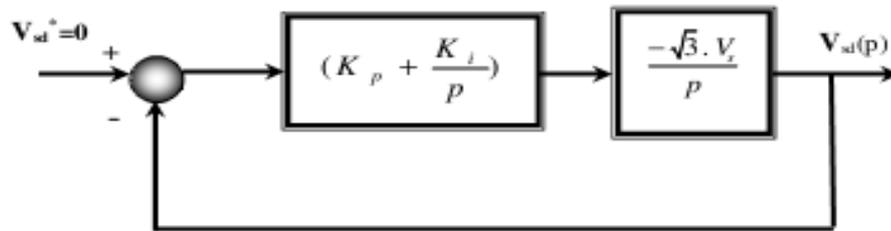


Fig.II.5 : Schéma simplifié de la régulation de la tension Vsd [24].

Dans ce cas de control, et on se basant sur schéma fonctionnel de la régulation de la tension V_{sd} la fonction de transfert en poursuite est alors.

$$F(p) = \frac{K_i(-V_s \sqrt{3}) \left(\frac{K_p}{K_i} p + 1 \right)}{p^2 + K_p(-V_s \sqrt{3}) p + K_i(-V_s \sqrt{3})} \quad (\text{II.8})$$

En identifiant la fonction de transfert en boucle fermée à un second ordre, on a l'expression suivante :

$$F(p) = \frac{\omega_c^2 \left(1 + \frac{K_p}{K_i} p \right)}{p^2 + 2\xi_c \omega_c p + \omega_c^2} \quad (\text{II.9})$$

D'où on déduit les paramètres du régulateur :

$$K_i = \frac{-\omega_c^2}{V_s \sqrt{3}} \quad (\text{II.10})$$

$$k_p = -\frac{2\xi_c \omega_c}{V_s \sqrt{3}} \quad (\text{II.11})$$

La détermination des coefficients du correcteur se fait par l'identification de la fonction de transfert en boucle fermée à un système de second ordre. Une valeur de ξ_c (le coefficient

d'amortissement) égale à 0.7 réalise un bon compromis entre les performances dynamiques et statiques. La fréquence de coupure $\omega_c/2\pi$, doit être choisie en respectant le critère lié à la rapidité du système en boucle fermée et le critère de filtrage. La rapidité de la boucle dépend donc de la valeur de la fréquence de coupure du régulateur. Dans notre cas, ζ_c est égal à 0.7 et la fréquence de coupure à $f_c = \omega_c/2\pi = 30$ Hz.

II.6. La logique floue.

La logique floue fut développée par Lofti A. Zadeh en 1965 à partir de sa théorie des sous-ensembles flous [25], à l'université de Berkeley aux USA, publie un article intitulé

« Ensembles flous ». Les applications de cette dernière n'ont vu le jour que dix ans plus tard par de nombreux auteurs, en particulier, le professeur MAMDANI. Actuellement, elle est appliquée dans différents domaines à savoir : économie, médecine, robotique, commande électrique, etc...

La logique floue est une méthode de raisonnement qui permet de donner des définitions partielles ou floues des règles, la puissance de la logique floue vient de sa capacité à écrire un phénomène ou un processus particulier de façon linguistique, ensuite de présenter ce phénomène par un faible nombre de règles linguistiques. La logique floue se distingue de la logique classique par sa propriété de pouvoir traiter des informations imprécises et vagues, qui sont fréquemment rencontrés dans les cas des systèmes non linéaires et des systèmes difficilement modélisables. Sa mise en œuvre est maintenant facilitée par la disponibilité de composants dédiés et de puissants outils de développement.

Les systèmes flous ont été utilisés dans une large variété d'applications industrielles, gestionnaires et médicales. Parmi ses applications on peut citer [26]:

Systèmes audio visuels (appareils de photos autofocus, caméscope à stabilisateur d'images, Photo copieurs....).

- Appareils électroménagers (lave-linge, aspirateurs, autocuiseurs, ...etc.).
- Systèmes automobiles.
- Systèmes de transport (train, métro, ascenseur, ...).
- Systèmes de contrôle / commande dans la plupart des domaines industriels de production.

II.6.1. Principe de la logique floue.

Le terme « logique floue » a deux aspects [27] :

- Le premier correspond à tous les développements concernant la théorie des ensembles flous.
- Le deuxième représente une extension de la logique classique dans le but de raisonner sur des connaissances imparfaites.

Toutes les personnes âgées de moins de 30 ans appartiennent à l'ensemble jeune et toutes les personnes âgées de plus de 50 ans sont considérées comme appartenir à l'ensemble « âgé ». Cependant une telle logique de classification n'est même pas logique car la question qui se pose : Pour quoi une personne âgée de 50 ans doit être considérée comme appartenant à l'ensemble « âgé » ? En réalité un tel passage se fait progressivement et individuellement. En outre lors de la classification par logique classique on ne prend pas en considération des personnes situées dans la zone « entre deux âges » dans la Fig. (II.6).

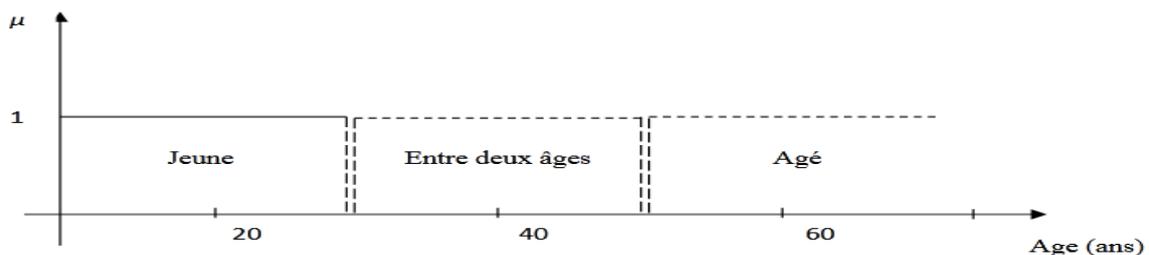


Fig.II.6 : Classification des personnes en trois ensembles selon la logique classique.

La logique floue, dont la fonction d'appartenance peut prendre n'importe quelle valeur entre 0 et 1 permet de tenir compte de cette réalité. Il est donc possible de trouver une autre classification pour l'exemple précédent à l'aide de la logique floue. Les limites ne varient pas soudainement mais progressivement comme le montre la Fig. (II.7).

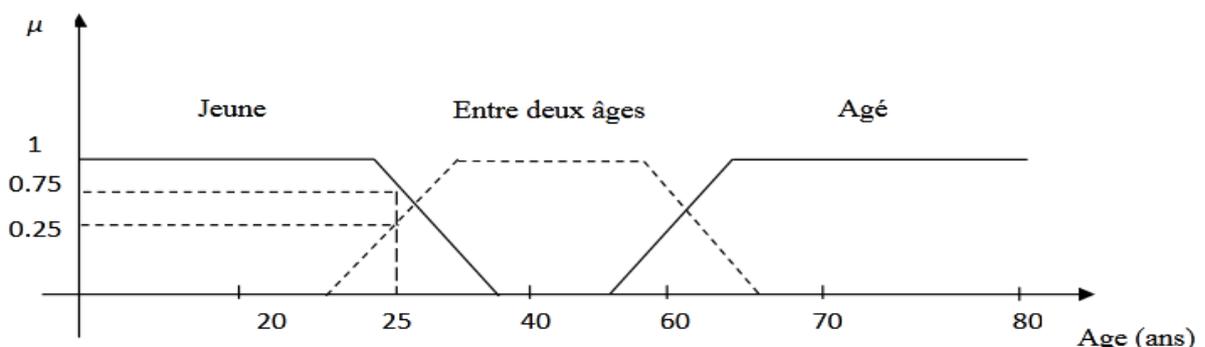


Fig.II.7 : Classification des personnes en trois ensembles selon la logique floue.

La commande floue a le même objectif que la commande classique de gérer un processus selon une consigne désirée, par action sur des grandeurs physiques. Sa particularité est de reproduire le comportement d'un opérateur humain, plutôt que de réaliser un modèle mathématique du système [28].

II.6.2. Structure générale d'un système flou

Chaque système basé sur la logique floue est composé de quatre blocs principaux comme le montre le schéma bloc d'un système flou donné par la Fig. (II.8).

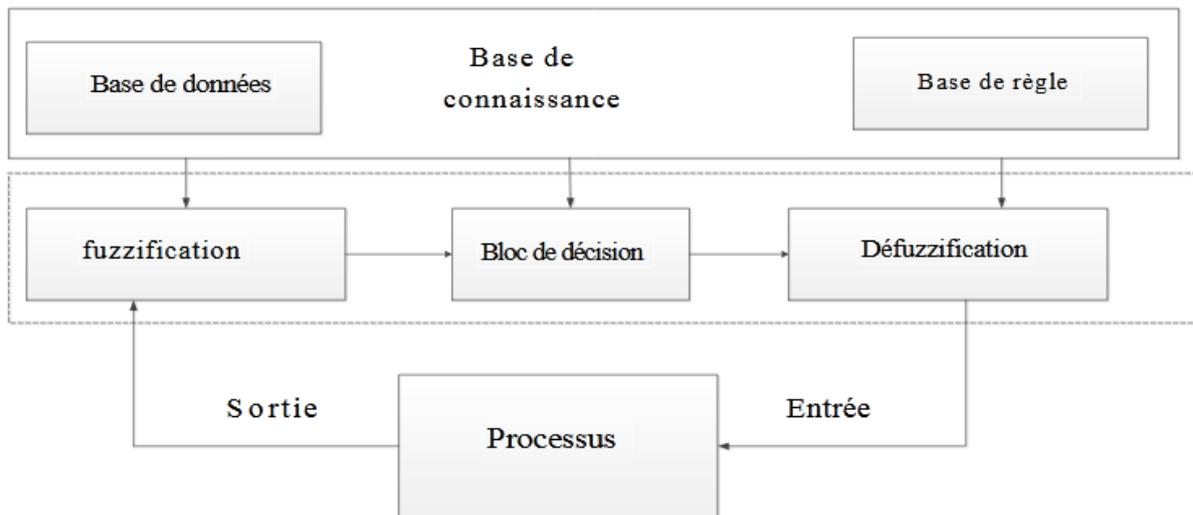


Fig.II.8 : Structure générale d'un système basé sur la logique floue.

- base de connaissance : règles et paramètres des fonctions d'appartenance.
- bloc de décision ou le moteur d'inférence : inférence des opérations sur les règles.
- fuzzification : transformation des entrées précises en degrés d'appartenance.
- défuzzification : transformation des résultats flous en sorties précises.

Fuzzification est l'opération de projection des variables physiques réelles sur des ensembles flous caractérisant les valeurs-linguistiques prises par ces variables. Le bloc de fuzzification effectue les fonctions suivantes [26] :

- Établit les plages de valeurs pour les fonctions d'appartenance à partir des valeurs des variables d'entrées.
- Effectue une fonction de fuzzification qui convertit les données d'entrée en valeurs linguistiques convenables qui peuvent être considérées comme l'étiquette des ensembles flous. Cette opération doit être effectuée dans un domaine normalisé généralement par l'intervalle $[-1,1]$ afin de faciliter le calcul.

C'est la collection de règle qui permet de lier les variables floues d'entrée et de sortie, elles ont la forme : "if - then" ou "si-alors", elles peuvent être écrites textuellement faisant appel à des entrées et à des sorties telles sont données par des experts d'une manière directes numériques ou par des termes ou variables linguistique à travers des fonctions d'appartenance [29].

Le principe de cette opération consiste à établir la liaison entre les grandeurs d'entrée du régulateur exprimées par des termes linguistiques et la variable de sortie sous sa forme linguistique à partir d'une parfaite connaissance du système à régler et d'une expertise concernant le fonctionnement du processus à régler. Les trois méthodes d'inférence les plus usuelles sont :

- Max-Produit.
- Somme-produit.
- Max-Min (Implication de Mamdani)

Comme nous avons vu dans la section précédente, les méthodes d'inférence fournissent un résultat qui est une fonction d'appartenance. Or, la sortie du contrôleur est en général une grandeur continue. La défuzzification est le traitement qui permet de définir une correspondance entre le résultat de l'inférence et la grandeur continue fournie en sortie [30].

II.6.3. Avantages de réglage par Logique Floue

Ce réglage présente les avantages suivants :

- La non nécessité d'une modélisation.
- La possibilité d'implémenter des connaissances (linguistiques)
- La maîtrise des systèmes à régler avec un comportement complexe, qui sont fortement non linéaire et difficile à modéliser.
- L'obtention de temps réponse très rapide (régulateur non linéaire).
- L'application pour des processus rapides.
- La disponibilité des systèmes de développement efficaces, soit pour micro-processeur ou PC (solution logiciel), soit pour les circuits intégrés (processeurs dédiés, fuzzy processors, solution matérielle).

II.7. Contrôle de la PLL par régulateur PI flou

Dans cette partie, on s'intéresse au remplacement du régulateur classique PI dans la boucle de contrôle de la tension par le régulateur flou donné par la Fig. (II.9). Le schéma de base du régulateur PI flou repose sur la structure d'un régulateur PI classique [24].

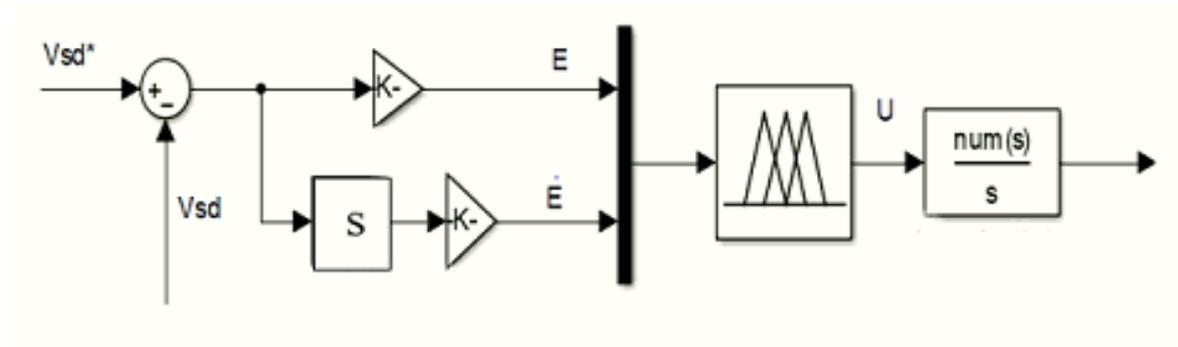


Fig.II.9 : Structure de base d'un régulateur flou

On note :

E : erreur

\dot{E} : dérivée de l'erreur

U : variable de sortie

Pour la fuzzification, on a utilisé des fonctions d'appartenance triangulaires pour l'erreur et sa dérivée, ainsi que pour la variable de sortie données par la fig. (II.10)

Les règles floues sont résumées dans le tableau (II.1). Ces règles floues représentent le cœur du régulateur et permettent d'exprimer sous forme linguistique les variables d'entrées du système aux variables de commande du système [24].

Chaque variable linguistique est caractérisée par sept sous-ensembles flous donnés par :

NG : négatif grand

NM : négatif moyen

NP : négatif petit

EZ : environ zéro

PP : positif petit

PM : positif moyen

PG : positif grand

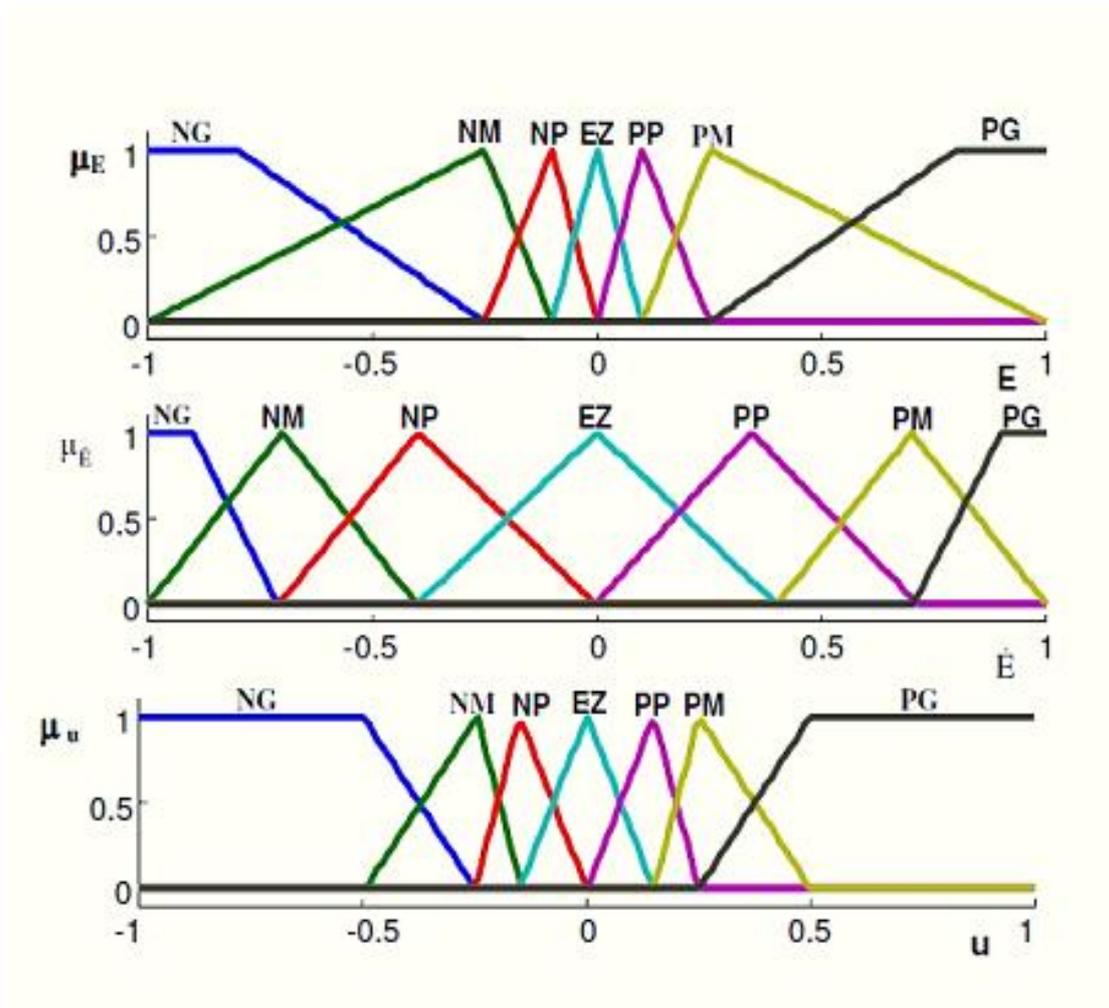


Fig.II.10 : Les fonctions d'appartenance des variables entrées E , \hat{E} et de la variable de sortie u

$\hat{E} \setminus E$	NG	NM	NP	EZ	PP	PM	PG
NG	NG	NG	NM	NM	NP	NP	EZ
NM	NG	NM	NM	NP	NP	EZ	PP
NP	NM	NM	NP	NP	EZ	PP	PP
EZ	NM	NP	NP	EZ	PP	PP	PM
PP	NP	NP	EZ	PP	PP	PM	PM
PM	NP	EZ	PP	PP	PM	PM	PG
PG	EZ	PP	PP	PM	PM	PG	PG

Tableau (II.1) : Table d'inférence

II.8. Conclusion

Ce chapitre est consacré à l'étude de la PLL afin de déterminer des tensions de référence du filtre actif série. Cette méthode d'identification offre l'avantage de choisir la perturbation à compenser avec précision et rapidité, pour toutes ces raisons nous l'avons retenu. Pour ce faire, on s'est intéressé à l'étude de deux régulateurs, le régulateur PI et PI flou.

La suite de ce travail traitera la commande et la simulation du filtre actif série à base de PLL avec un régulateur PI classique et un régulateur PI flou.

Chapitre III

Commande et
Simulation du Filtre
Actif Série (FAS)

III.1 Introduction

Le Filtre Actif Série (F.A.S) est une solution adaptée à la compensation des tensions perturbatrices, harmoniques, déséquilibrées et des creux de tension. Ces perturbations trouvent généralement leurs origines dans le réseau lui-même mais peuvent parfois être provoquées par les charges elles-mêmes. Beaucoup de travaux ont été consacrés à l'amélioration de la qualité de compensation des perturbations et plus précisément du déséquilibre de la tension du réseau. D'autres articles ont introduit le problème des creux de tension et la solution de compensation par le compensateur actif série [31].

L'objectif de ce chapitre est la simulation du filtre actif série à base de la PLL. Les résultats de simulations obtenus avec du régulateur PI classique seront comparés avec ceux obtenus avec le régulateur PI flou.

III.2 Description du système simulé

Le système simulé se compose du filtre actif série, du réseau triphasé (perturbé) et de la charge. Le schéma de principe du filtre actif série (F.A.S) à base d'un convertisseur de tension est donné par la Fig. (III.1), le FAS est inséré entre la source de tension perturbée et la charge à protéger. Il se compose en plus de l'onduleur d'une source de tension continue, d'un filtre de sortie L_f , C_f afin de supprimer les ondulations de commutation et de trois transformateurs permettant d'injecter les tensions compensatrices au réseau.

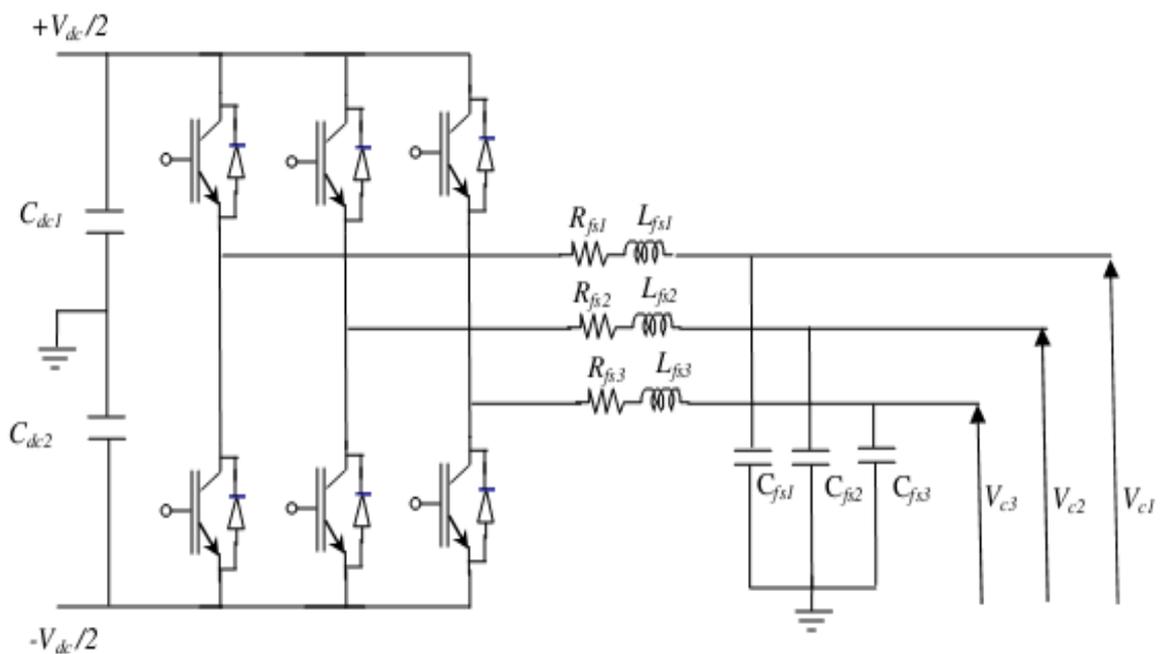


Fig.III.1 : Schéma de principe du filtre actif série à structure tension

III.3 Structure générale du filtre actif série

Le filtre actif série protège des charges sensibles contre les perturbations de tension du réseau électrique. Il s'insère entre le réseau perturbé et la charge à protéger par l'intermédiaire d'un transformateur d'injection de tension. Plusieurs structures de filtre actif série ont été proposées [31].

La Fig. (III.2) présente la structure générale du filtre série. Il se compose d'une partie puissance et d'une partie commande. La partie puissance est constituée d'un onduleur de tension triphasé à commande MLI ou hystérésis, un système d'alimentation en tension continue, d'un filtre de sortie, et d'un transformateur triphasé pour l'injection de tension dans le réseau. La partie commande comporte un bloc d'identification des tensions perturbatrices, la régulation des tensions injectées et la commande des interrupteurs de l'onduleur.

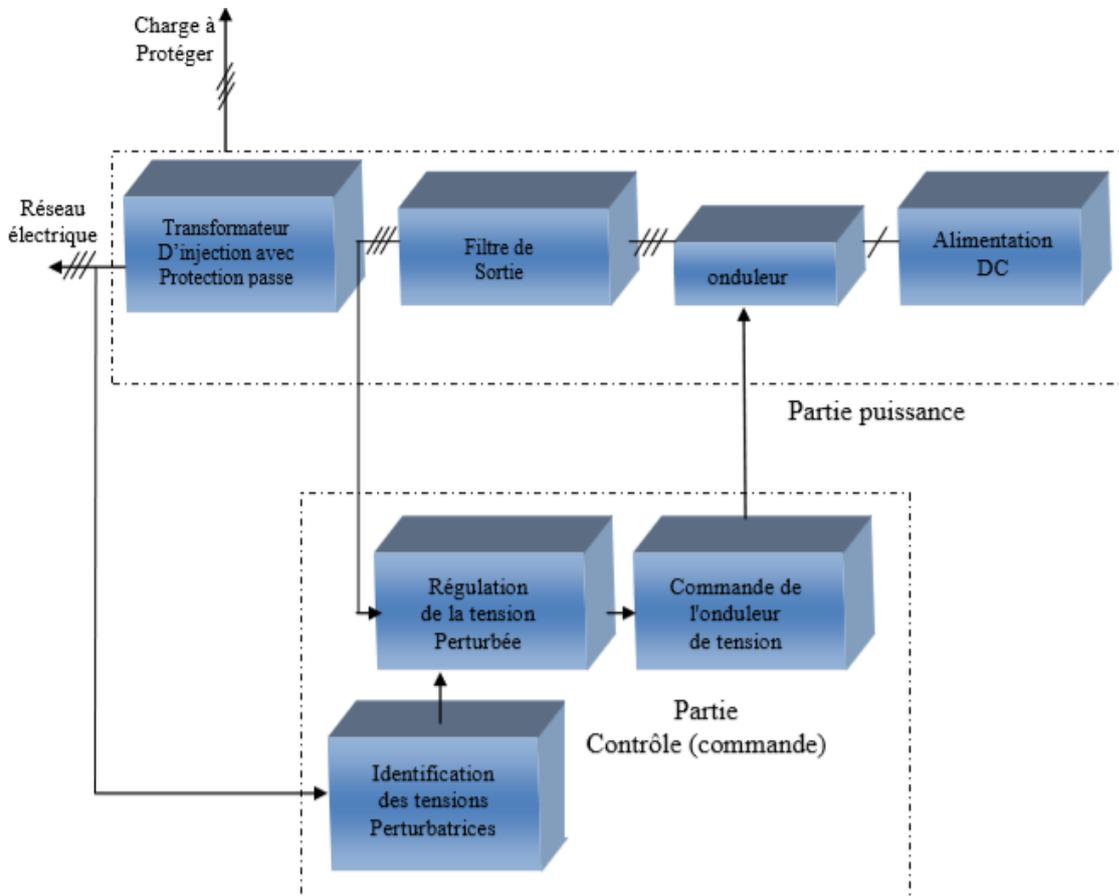


Fig.III.2 : Structure générale du filtre série.

III.4 Onduleur de tension

L'onduleur de tension fait l'interface entre deux types de source : une source de courant côté alternatif et une source de tension côté continu. La présence de ces deux sources implique le respect de certaines règles de fonctionnement :

- La source de tension aux bornes de l'onduleur ne doit jamais être court-circuitée, les deux interrupteurs d'un même bras doivent donc avoir deux commandes complémentaires.
- La source de courant côté alternatif ne doit jamais être en circuit ouvert, le courant circulant doit toujours trouver un chemin libre d'où la mise en antiparallèle de diodes avec les interrupteurs. [32].

Le convertisseur doit pouvoir suivre la référence des tensions obtenues afin de compenser les perturbations en tension existants dans le réseau d'alimentation de tel sorte que la charge reçoit toujours un système de tension purement sinusoïdale quels que soit les déformations provenant du réseau et les valeurs des inductances du filtre en tension se trouvant à son entrée.

➤ Filtre de sortie L_{fs} , C_{fs}

Le filtre de sortie d'un filtre actif série est généralement un filtre passif du deuxième ordre (L_{fs} , C_{fs}) l'ensemble onduleur filtre de sortie se comporte comme une source de tension. Le filtre passif est placé à la sortie du convertisseur afin d'atténuer les ondulations à hautes fréquences à cause de la commutation et à l'obtention d'une tension de compensation de meilleure qualité, et d'autre part à connecter le filtre actif au réseau électrique [32] [33].

➤ Transformateurs d'injection et de protection du F.A.S

Les transformateurs d'injection de tension permettent d'injecter en série avec le réseau électrique et avec le taux de transformation souhaité la tension produite par l'onduleur.

Ces transformateurs, considérés comme des transformateurs de courants, permettent de réduire, par leurs taux de transformation, le courant de la charge traversant l'onduleur de tension [32],[34]. Les désavantages de l'emploi de ces transformateurs sont leurs coûts élevés et la chute de tension occasionnée par leurs inductances de fuite (L , R) pour les systèmes de grande puissance. Le choix d'un filtre actif série sans transformateur d'injection nécessite l'emploi de trois onduleurs de tension monophasés avec trois sources continues indépendantes, cette solution augmente l'énergie nécessaire pour compenser les mêmes creux de tension [33].

III.5 Modélisation du filtre actif série

Différentes méthodes de commande peuvent être utilisées pour le contrôle du filtre actif série, commande MLI (classique, vectorielle ou autres) ou hystérésis. Afin d'éliminer les harmoniques de découpage, on insère un filtre L_{fs} , C_{fs} entre le convertisseur et le réseau. Le

schéma équivalent monophasé du filtre actif série (l'onduleur muni de son filtre de raccordement) est représenté sur la Fig.III.3 [24].

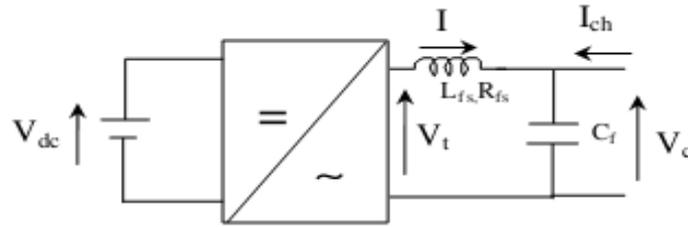


Fig.III.3 : Schéma équivalent monophasé d'un onduleur de tension muni d'un filtre L_{fs} , C_{fs}

Le système de la Fig. (III.3) peut être modélisé en monophasé comme suit :

$$\frac{dx(t)}{dt} = Ax(t) + B_1v(t) + B_2I_{ch}(t) \quad (III.2)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{di}{dt} \\ \frac{dv_c}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_{fs}}{L_{fs}} & \frac{1}{L_{fs}} \\ \frac{1}{C_{fs}} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ V_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{fs}} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot v_t + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{C_{fs}} \end{bmatrix} \cdot I_{ch} \quad (III.3)$$

L'entrée du système est la tension de l'onduleur $v_t(t)$, $v_c(t)$ est la tension aux bornes du condensateur C_{fs} , et I_{ch} le courant de la charge à protéger qui se comporte comme une perturbation. La fonction de transfert du système est :

$$V_c(p) = \frac{1}{1+R_{fs}C_{fs}p+L_{fs}C_{fs}p^2} \cdot V_t(p) + \frac{L_{fs}p+R_{fs}}{1+R_{fs}C_{fs}p+L_{fs}C_{fs}p^2} \cdot I_{ch}(p) \quad (III.4)$$

III.6 Commande par hystérésis

L'objectif de la commande de l'onduleur est de déterminer les instants d'ouverture et de fermeture des interrupteurs, qui le compose de façon à obtenir une tension de sortie synthétisant les perturbations mais en opposition de phase [35].

La commande par hystérésis, appelée aussi commande en tout ou rien Fig. (III.4), est une commande non linéaire qui utilise l'erreur existante entre la tension de référence et la tension produit par l'onduleur. L'erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis. Dès que l'erreur atteint la bande inférieure ou supérieure, un ordre de commande est envoyé de manière à rester à l'intérieur de la bande, Fig. (III.5).

La simplicité de la mise en œuvre est le principal avantage de cette technique. D'autre part, les commutations évoluant librement à l'intérieur de bande d'hystérésis, on ne peut maîtriser correctement le spectre haute fréquence dû aux fréquences de commutations [36], [35],[37].

Finalement, la rapidité du contrôle par hystérésis donne de meilleures performances dynamiques et statiques. C'est la raison pour laquelle nous avons choisi ce type de commande pour la simulation du filtre actif série.

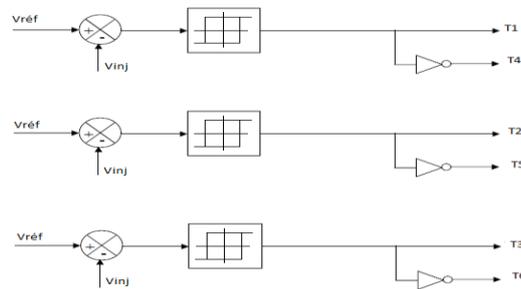


Fig.III.4 : Principe de commande par hystérésis [36]

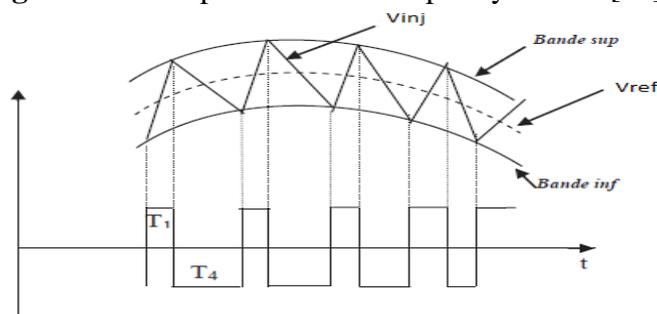


Fig.III.5 : Commande des interrupteurs par hystérésis [36]

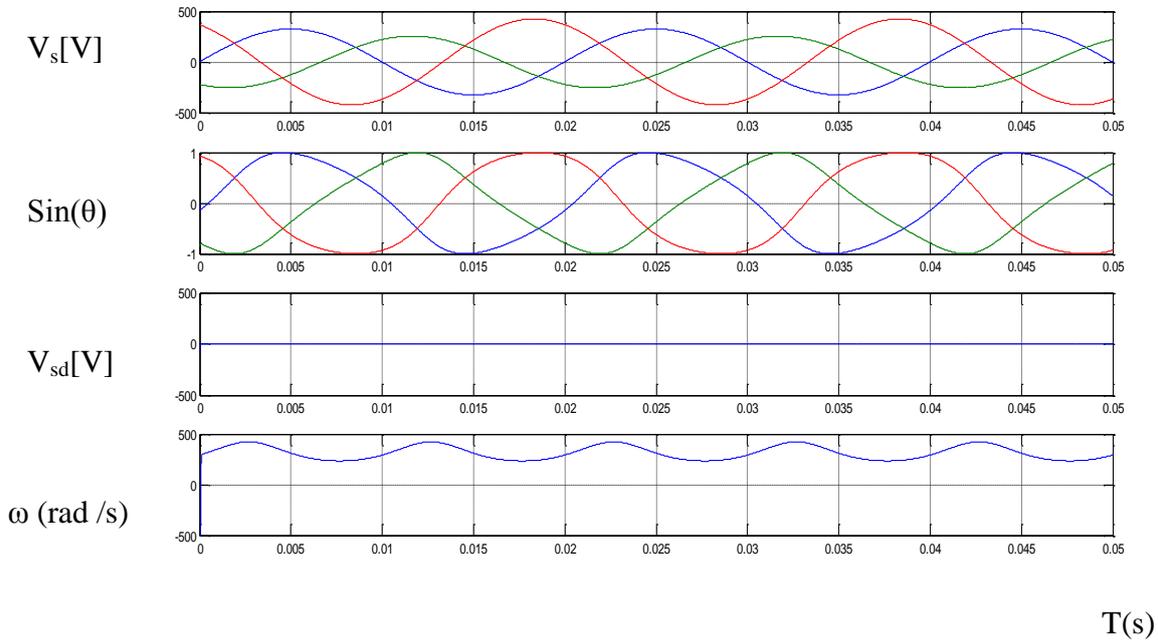
III.7 Résultat de simulation

Dans cette partie, on a simulé le système étudié en utilisant le logiciel MATLAB/SIMULINK. Notre système se compose d'une source d'alimentation triphasée (V_{S1} , V_{S2} , V_{S3}), de la charge et du filtre actif série.

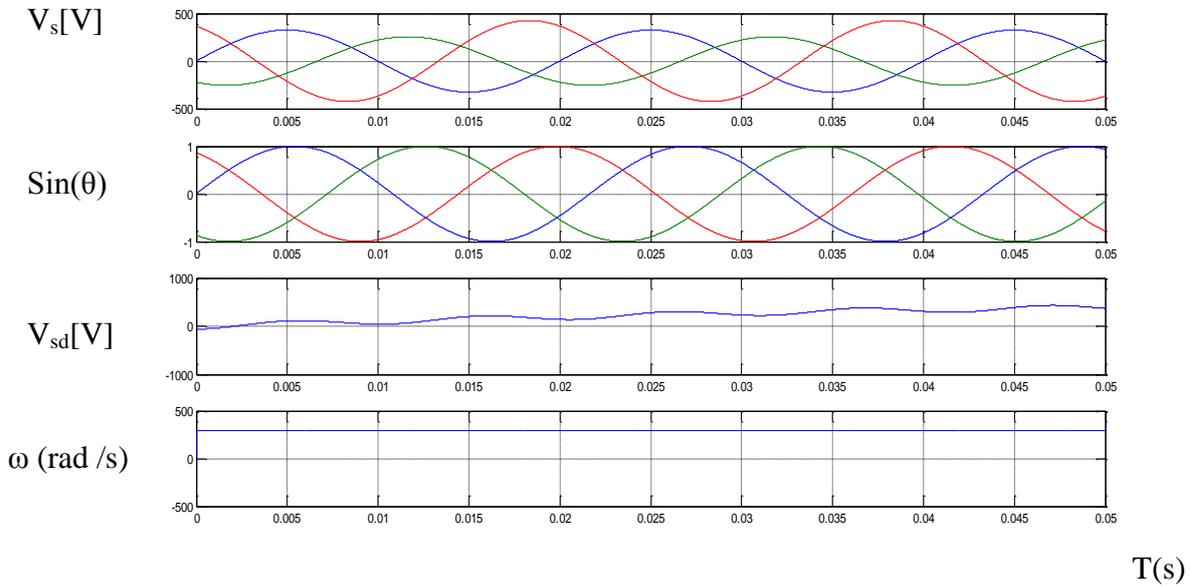
III.7.1. Simulation de la PLL

Les performances de la boucle de contrôle de la PLL sont données par les figures ci-dessous, qui illustrent le régime permanent dans des conditions de déséquilibre et de déformation de la tension du réseau. Les courbes représentent respectivement la tension du réseau $V_s(t)$, $\sin(\theta)$, la composante directe de la tension V_{sd} et la pulsation estimée ω_s . Les Figs.III.6 (a et b) illustrent le comportement simulé de la PLL dans le cas des tensions déséquilibrées ($V_{S1}=230V$, $V_{S2}=180$ et $V_{S3}=300V$) en utilisant respectivement le régulateur PI et le régulateur flou. On remarque que la tension V_{sd} présente des oscillations autour de la valeur nulle qui se répercute sur la pulsation estimée lorsque le régulateur possède un pouvoir de filtrage médiocre. Dans le cas du régulateur PI sa capacité de filtrage est insuffisante, le

signal produit par la PLL est presque sinusoïdal. Ce n'est pas le cas, avec le régulateur flou, les oscillations sont négligeables, et le signal $Sin(\theta)$ produit par la PLL est sinusoïdal.



(a) PI

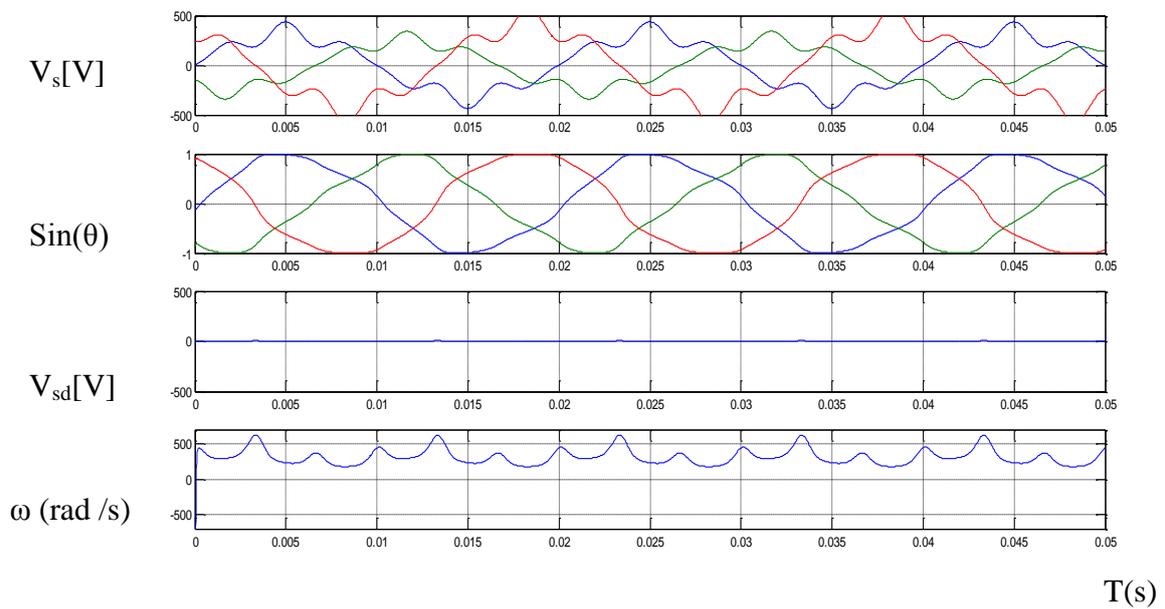


(b) Flou

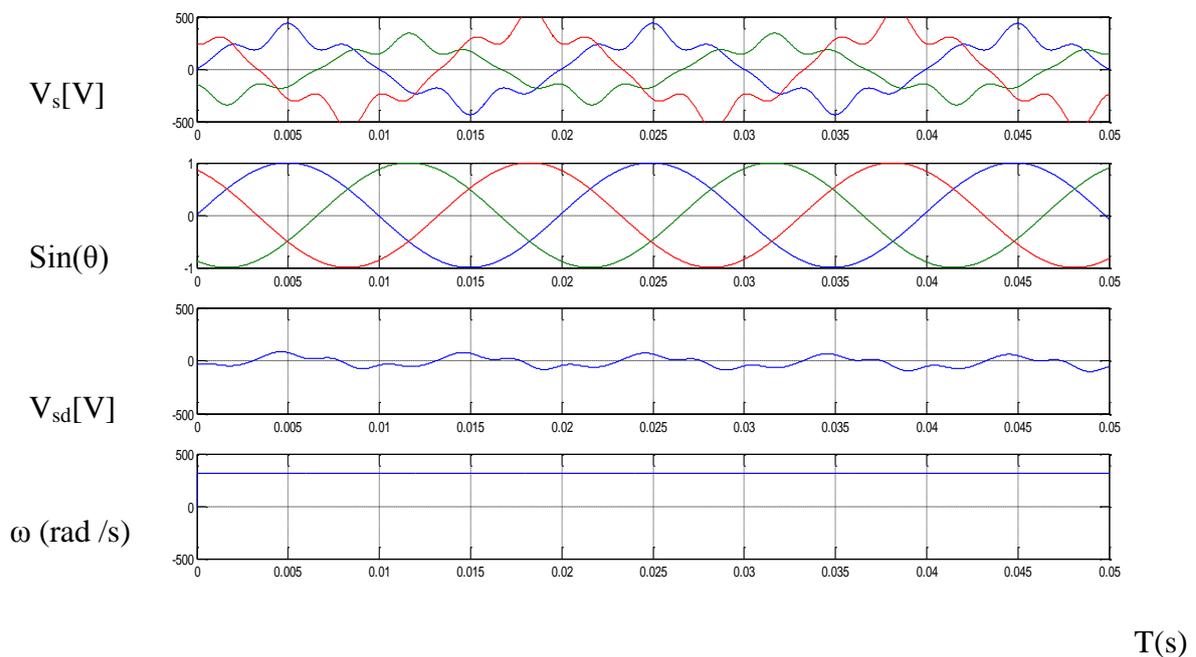
Fig.III.6 : Performances de la PLL avec des régulateurs de type PI et flou en régime déséquilibré ($V_{S1}= 230V$, $V_{S2}=180V$ et $V_{S3}=300V$)

Les Figs.III.7 (a et b) présentent les performances des contrôleurs PI et PI Flou dans la boucle de verrouillage de phase en présence de harmoniques de rang 5 et 7 sur la tension de réseau, et en régime déséquilibré ($V_{S1}= 230V$, $V_{S2}=180V$ et $V_{S3}=300V$). On remarque de la

Fig. (III.7) que le signal $\text{Sin}(\theta)$ obtenu avec le régulateur PI n'est pas sinusoïdal, par contre en utilisant le régulateur flou, il est un sinusoïdal.



(a) PI



(b) Flou

Fig.III.7 : Performance de la PLL en régime déformé et déséquilibré (rangs 5 et 7)

Les Figs.III.8 (a et b) illustrent le comportement simulé de la PLL dans le cas des tensions déséquilibrées ($V_{S1}=60V$, $V_{S2}=180$ et $V_{S3}=300V$) dans les deux cas de régulations. On

remarque de la Fig. (III.8) (a) que $\text{Sin}(\theta)$ n'est pas sinusoidal car le PI classique est limité et ne s'adapte pas avec les variations des paramètres du système, ce qui détériore les performances du filtre série surtout dans le cas d'un déséquilibre important. La Fig. (III.8) (b) montre que $\text{Sin}(\theta)$ est sinusoidal parce que le régulateur flou est plus performant et s'adapte aux différents types de perturbations.

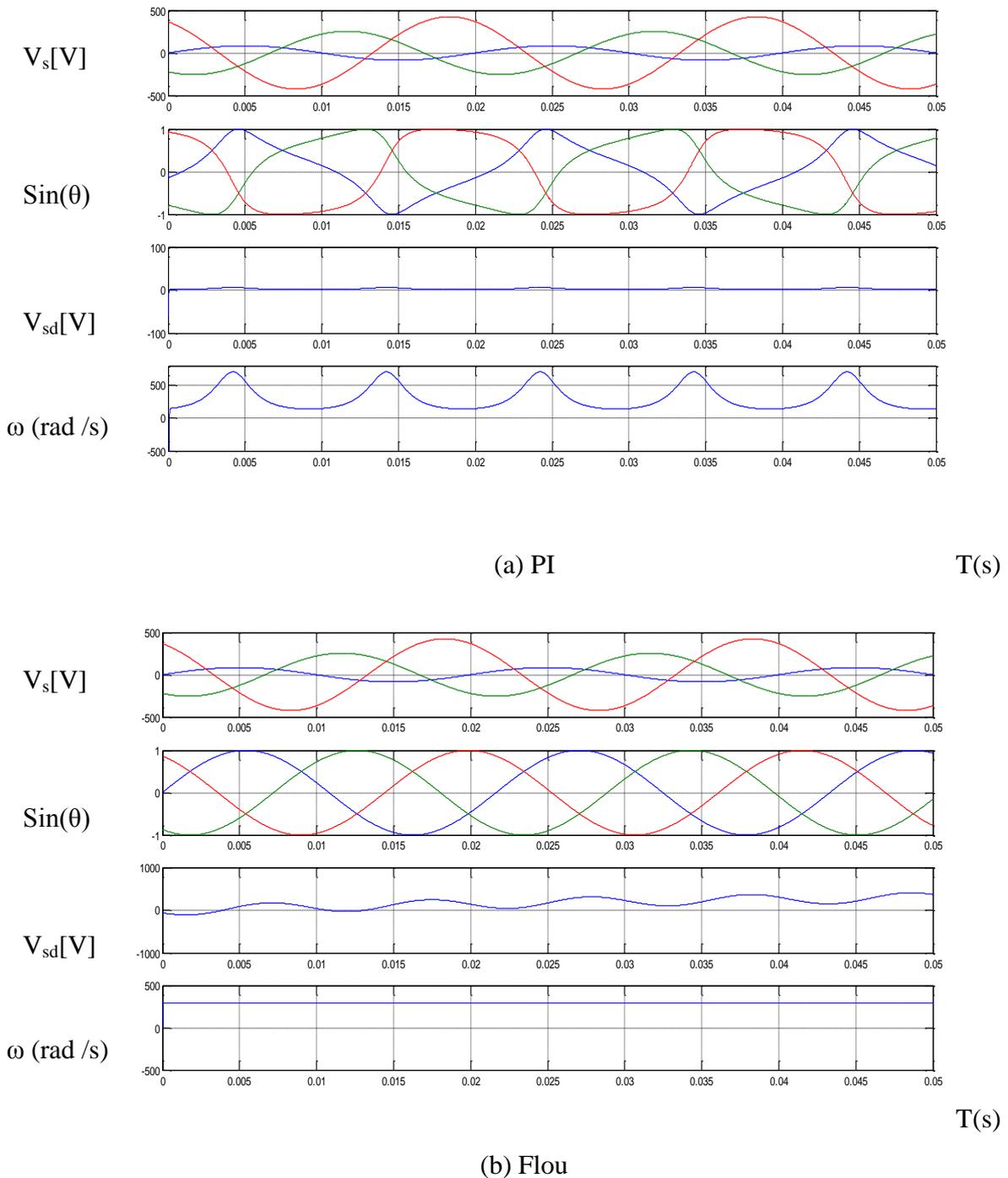
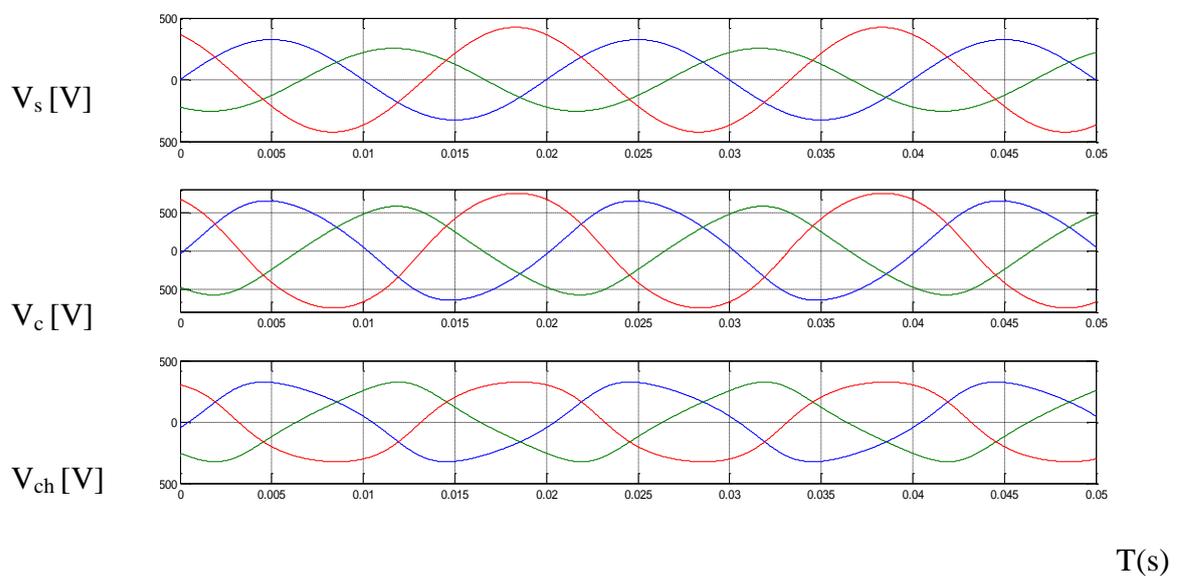


Fig.III.8 : Performance de la PLL en régime déséquilibré ($V_{S1}=60V$, $V_{S2}=180$ et $V_{S3}=300V$)

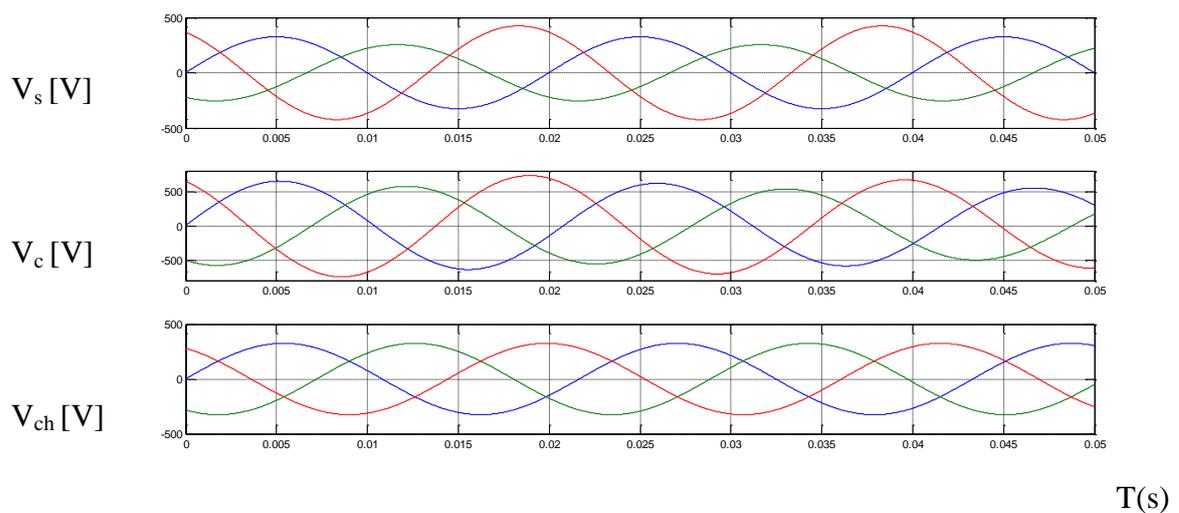
III.7.2. Simulation du système filtre actif série

Les résultats de simulations du FAS sont obtenus le cas du contrôle de la PLL seule. Avec : ‘ V_s ’ la tension du reseau avant compensation, ‘ V_c ’ la tension de sortie du filtre actif série, et ‘ V_{ch} ’ la tension aux bornes de la charge après compensation.

Les Figs.III.9 (a et b) présentent la compensation des tensions déséquilibrées ($V_{S1}=230V$, $V_{S2}=180$ et $V_{S3}=300V$) en utilisant respectivement le régulateur PI, régulateur PI flou pour le contrôle de la PLL. On remarque que le la tension V_{ch} après la compensation en utilisant le régulateur PI classique n’est pas sinusoïdal, par contre elle est sinusoïdale en utilisant la PLL avec le régulateur PI flou.



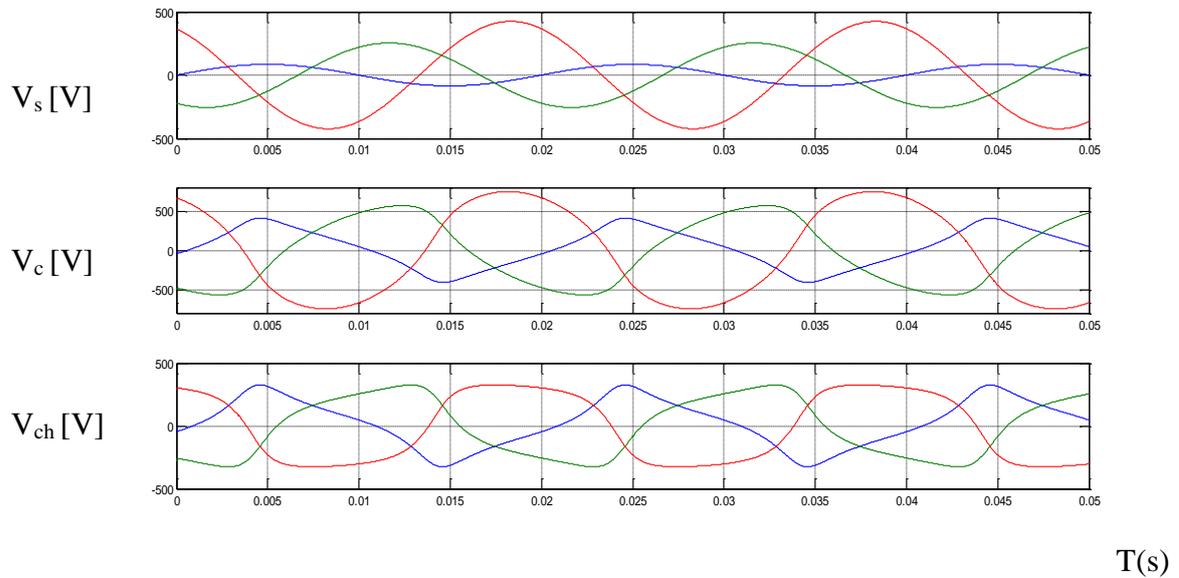
(a) PI



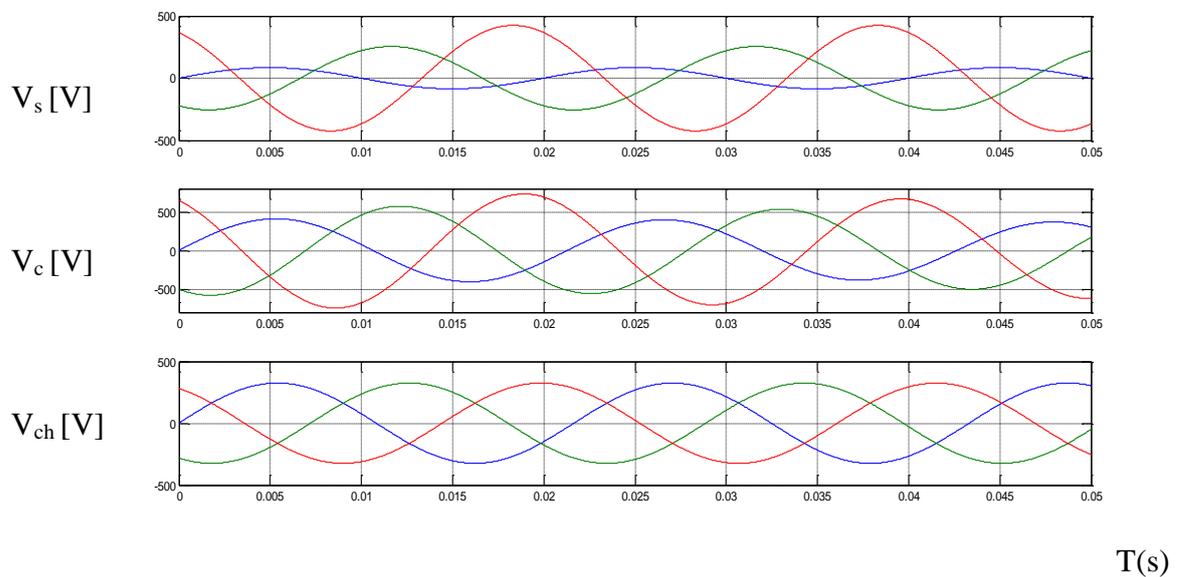
(b) Flou

Fig.III.9 : Compensation d’un régime déséquilibré ($V_{S1}=230V$, $V_{S2}=180$ et $V_{S3}=300V$)

Les Figs.III.10 (a et b) présentent la compensation d'un régime déséquilibré ($V_{S1}=60V$, $V_{S2}=180$ et $V_{S3}=300V$) dans le cas de contrôle de la PLL avec les régulateurs PI et PI Flou. On remarque que la tension V_{ch} après la compensation n'est pas sinusoïdale en utilisant la PLL avec PI classique et comme on voit clairement l'efficacité du PI flou, V_{ch} est parfaitement sinusoïdale.



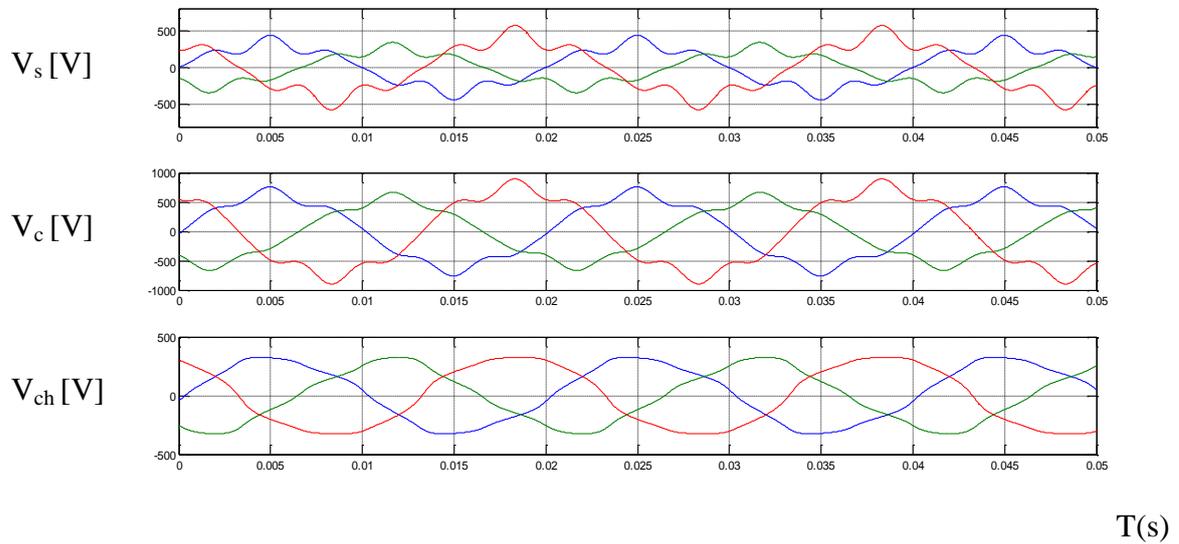
(a) PI



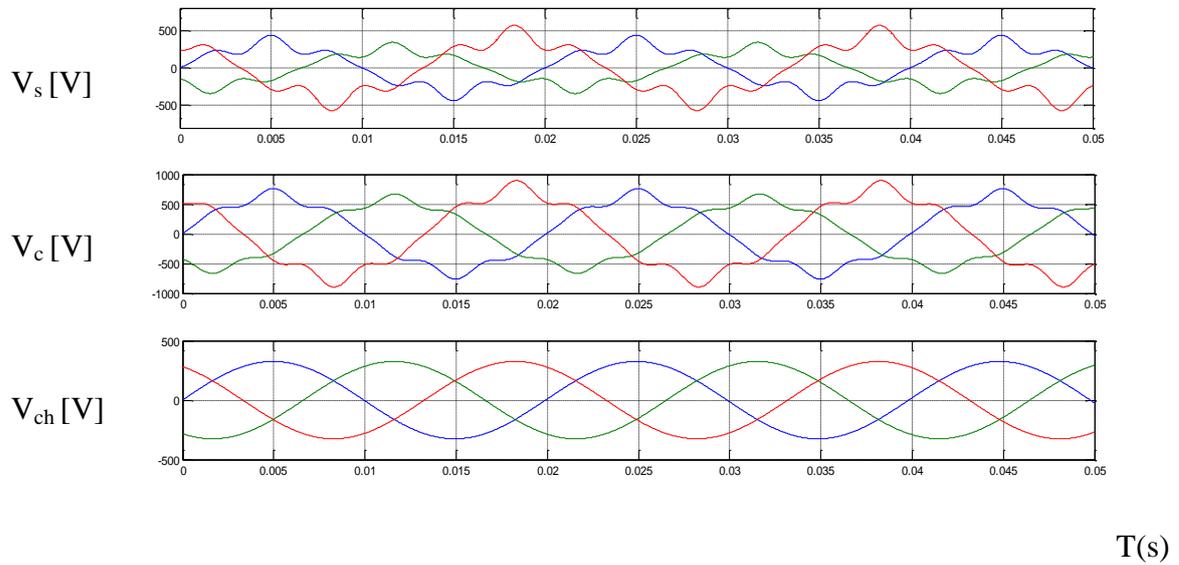
(b) Flou

Fig.III.10 : Compensation du déséquilibre de tension ($V_{S1}=60V$, $V_{S2}=180$ et $V_{S3}=300V$)

Les Figs.III.11 (a et b) présentent les performances de filtre active série en présence d’harmoniques de rang 5 et 7 avec les deux régulateurs (PI et Flou). Ces résultats démontrent l’efficacité et la supériorité de la PLL à base du régulateur PI flou par rapport au PI classique.



(a) PI



(b) Flou

Fig.III.11 : Performance de la FAS lors de la compensation du déséquilibre et des harmoniques de rangs 5 et 7.

La Fig.III.12 montre le spectre de la tension de source avec : (a) avant compensation avec un THD égal à 24.58 %, (b) après compensation en utilisant la PLL avec un régulateur PI classique, dans ce cas le THD est réduit à 12%, (c) après compensation en utilisant la PLL avec un régulateur PI flou, dans ce cas le THD est réduit à 0.94%, ce qui confirme la supériorité de PLL à base d’un régulateur PI flou par apport à celle avec PI classique.

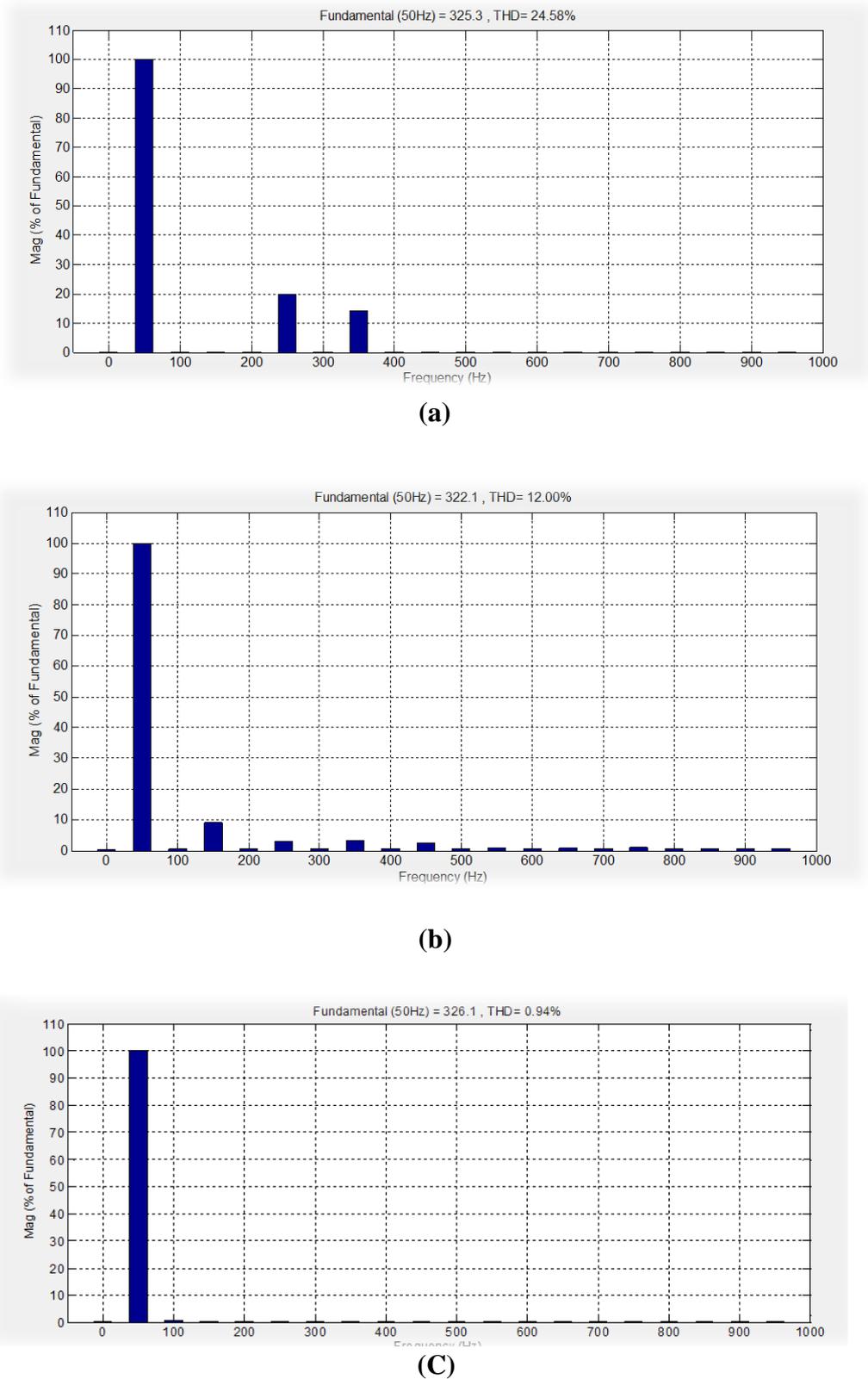


Fig.III.12 : Spectre de tension de source : (a) avant filtrage, (b) après filtrage avec PLL à PI (c) après filtrage avec PLL à PI flou

III.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à l'étude de la commande d'un filtre active série à base de la PLL à PI Flou et à PI classique. L'utilisation de la PLL avec le régulateur PI détériore les performances du filtre série surtout le cas du déséquilibre important, ce qui nécessite l'utilisation d'un régulateur flou, qui est plus performant et s'adapte facilement aux différents types de perturbations par rapport au régulateur PI classique.

Conclusion générale

Conclusion générale

La qualité d'énergie dépend des charges et de leurs sensibilités aux variations de la tension. Les charges étant de plus en plus sophistiquées, les perturbations de tension deviennent très coûteuses pour les industriels en termes de perte de production, de frais de mains d'œuvres, de pertes en matières premières et d'avarie de matériels. Les perturbations observées sont nombreuses tels que : creux de tension et coupures, fluctuations rapides et lentes de l'amplitude du fondamentale de la tension, variation de la fréquence fondamentale, déséquilibre, harmoniques...etc.

Dans notre mémoire, nous sommes intéressés à l'étude d'un dispositif de dépollution de type tension des réseaux électriques appelés « Filtre actif Série » à base de la PLL flou, celui-ci ayant pour objectif l'élimination des perturbations de type tension, afin de protéger la charge contre des différentes perturbations.

Après avoir présenté un bref aperçu sur les réseaux électriques, les différents types de perturbations pouvant apparaître dans le réseau, ainsi que quelques techniques de compensation de ses perturbations, nous avons détaillé une méthode de détermination les tensions de références du filtre actif série. Cette méthode est basée sur un système PLL, ou deux types de régulateurs ont été étudiés.

Les résultats de simulation obtenus ont montré que le filtre actif série compense correctement les différents types de perturbations (déséquilibre, les harmoniques...). En présence d'harmoniques de rangs 5 et 7 dans la tension du réseau, le THD de tension aux bornes de charge avant compensation vaut à 24,58 %, il passe à 0.94% après compensation en utilisant PLL avec PI flou et à 12,00% dans le cas de la PLL avec PI classique.

Ces résultats illustrent aussi les performances dynamique et statique du filtre actif série à base de la PLL flou et son efficacité de compensation. D'où la supériorité de la PLL avec régulateur PI flou par rapport à la PLL avec un régulateur PI classique.

Références

Bibliographique

Références Bibliographiques

- [1] H. KOUARA, « Application d'un filtre actif série au contrôle de la tension d'un réseau basse tension », Ingénieur d'état, Université de Batna, 2006.
- [2] S. HAFSIA, « Commande d'un filtre actif parallèle à quatre bras par des techniques avancées », Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider -Biskra, 2015.
- [3] D. OULD ABDESLAM, « Technique neuromimétique pour la commande dans les systèmes électriques : Application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension », Thèse de doctorat, Université de Haute-Alsace, 2005.
- [4] M. BENGOURINA, « Etude et mise au point d'un filtre actif parallèle d'harmoniques en vue d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique », Mémoire de Magister, Université des Sciences et de Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2012.
- [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] S. CHENNAI, « Etude, Modélisation & Commande des Filtres Actifs : Apport des techniques de l'intelligence artificielle », Thèse de doctorat en sciences, Université Mohamed Khider-Biskra, 2013.
- [7] M.A.E. ALALI, « Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension », Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur-Strasbourg I, 2002.
- [8] A. OMEIRI, « Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant », Thèse de doctorat d'état, Université Badji Mokhtar-Annaba, 2007.
- [9] Z. CHELLI, « Amélioration de la qualité de l'énergie électrique par un filtre actif d'harmonique », Thèse de doctorat en sciences, Université Badji Mokhtar-Annaba, 2015.
- [10] I. BOUYAKOUB, « Identification des courants harmoniques par la stratégie neuromimétique : Applications au filtre actif parallèle », Thèse de doctorat en sciences, Université des Sciences et de Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2017.
- [11] M. SHAFIEE KHOOR, « Amélioration de la qualité de l'énergie à l'aide de compensateurs Actifs : série, parallèle ou conditionneurs unifiés de réseaux électriques », Thèse de doctorat de l'école Polytechnique de l'université de Nantes, Nantes, 2006.
- [12] L. BENCHAITA « Etude, par simulation numérique et expérimentation, d'un filtre actif Parallèle à structure courant avec une nouvelle méthode de contrôle - commande » Thèse de docteur de l'université Henri Poincaré, Nancy 1, 1998.
- [13] H. AKAGI, Y. KANAZAWA, A. NABAE « Generalized theory of the instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components », IEEE Trans. Ind. Appl, vol. IA-20, No.9, pp. 652-630, 1984.

Références Bibliographiques

- [14] P. MEYNAUD, P. PENE, G. DESQUILBET, « Déséquilibre de tension » Notes EDF, 96NR00003, 1996.
- [15] DJ. OULD ABDESLAM, « Technique neuromimétique pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension ». 05 MULH 0814/32, (2005).
- [16] T. GOURAUD, « Identification et rejet de perturbations harmoniques dans des réseaux de distribution électrique ». Thèse, Nantes, France, (1997)
- [17] S. GEORGES, H. Y. KANAAN, K. AL-HADDAD, « Modelling, simulation and control design of a PWM Three-Phase Four-Wire shunt active power filter for a 60 kW industrial load ». IREE, International Review of Electrical Engineering, August, (2006).
- [18] P. JINTAKOSONWIT, H. FUJIT, H. AKAGI, « Control and performance of a fully-digitalcontrolled shunt active filter for installation on a power distribution system ». IEEE, Transactions on Power Electronics, Vol. 17, no.1, pp. 323-334, (2002).
- [19] V. KAURA, V. BLASKO, « Operation of phase locked loop system under distorted utility conditions », IEEE Trans. On industry applications, vol. 33, N°1, pp : 55-63, January/february1997.
- [20] N. BRUYANT « Etude et commande généralisée de filtres actifs parallèles : compensation globale ou sélective des harmoniques en régime équilibré ou déséquilibré » Thèse de doctorat de l'université de Nantes, Saint-Nazaire, 25 Novembre 1998.
- [21] M. A. E. ALALI, « Contribution à l'Etude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension », Thèse de doctorat, université de Louis Pasteur, Strasbourg, septembre 2002.
- [22] HANANE KOUAR « l'application d'un filtre actif série au contrôle de la tension d'un réseau basse tension » mémoire de magister en électrotechnique, université de Batna 2006.
- [23] Mr BOUKADOUM AZIZ « contribution à l'analyse et la réduction de la pollution harmonique dans le réseau électrique » mémoire de magister en électrotechnique université Badji Mokhtar Annaba 2007.
- [24] F, MEKRI, « Commande robuste des conditionneurs Actifs de puissances », thèse de doctorat, Université des sciences et de la technologie d'Oran, novembre 2007
- [25] L. A. ZADEH, « Fuzzy Sets, » Information and Control, vol. 8, pp. 338-353, 1965.

Références Bibliographiques

- [26] TOUAL BELKACEM, « Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable », mémoire de magister, université Batna, 2010.
- [27] BAKHI HAMZA, « Commande d'un Filtre Actif Triphasé Shunt par Logique Floue », mémoire de master, universitaire de M'sila, 2015.
- [28] K, NABTI, « Contribution à la Commande de la Machine Asynchrone par DTC et Logique Floue », Mémoire de Magister, université de Constantine, 2006.
- [29] MIHOUB YUCEF, « Commande floue adaptative de la machine asynchrone », thèse de Doctorat, université d'Oran, 2012.
- [30] MOKEDDEM DIAB, « Contrôle Flou des Processus Biotechnologiques à Base d'Algorithmes Génétiques », thèse de Doctorat, université Sétif, 2010.
- [31] MOHAMAD ALAA EDDIN ALALI « Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension (Automatisation des systèmes de puissance électriques » Thèse de Doctorat, Strasbourg 12 Septembre 2002.
- [32] MOHAMAD ALAA EDDIN ALALI « Contribution à l'étude des compensateurs actif des réseaux électrique » Thèse de Doctorat en génie électrique, Université Louis Pasteur 12/09/2002.
- [33] CHENNI SALIM « Etude, modélisation et commande des filtres actifs : apport des techniques de l'intelligent artificielle » Thèse de doctorat en génie électrique, université mohamed Khider Biskra.
- [34] L.A. MORAN, I. PASTORINI, J. DIXON, R. WALLACE « A fault protection scema for séries active power filters » IEEE Transactions on power electronics, vol.14, N°5, Septembre 1999, pages : 928-938.
- [35] BRAHIM BERBAOUI, SAMIRA DIB, BRAHIM FERDI « Amélioration de la qualité d'énergie basée sur la performance d'un filtre actif série commandé à base DE système PLL » Volume 54, 3-4, 2013 pages : 184 – 188
- [36] MOHAMED MUFTAH ABDUSALAM « structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales » Thèse de doctorat en génie Électrique l'université Henri Poincaré, Nancy. 29 mai 2008.

Références Bibliographiques

[37] MURAT KALE, ENGIN OZDEMIR « An adaptive hysteresis band current controller for shunt active power filter » Electric Power Systems Researcher 73 (2005) pages: 113–119.