

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf - Mila

Institut des Sciences et de Technologie

Département de Sciences et Technologie



N° Ref :.....

**Projet de Fin d'Etude préparé En vue de l'obtention du diplôme
de MASTER**

Spécialité : Électromécanique

**Amélioration de la qualité d'énergie dans le réseau
électrique par la technique UPQC et identification
des courants harmoniques**

Réalisé par :

- Bouabibsa Messaoud
- Hafirassou Ayyoub

Soutenu devant le jury :

Mme F.Medjani

Mme S.Bouchekouf

Mme S.Dib

Président

Examineur

Promoteur

Année universitaire : 2019/2020



DEDICACE

*A mes très chers parents
Qu'ils trouvent en moi la source de leur
fierté
A qui je dois tout
A mes sœurs, et mes frères
A mes amis
A tous les gens m'aiment*



Remerciement



*Nous tenons à remercier tout premièrement
Allah le tout puissant pour la volonté, la
santé, le courage et la patience qu'il nous a
donnés durant toutes ces longues années
pour arriver au terme de ce travail.*

*Nous tenons à exprimer nos vifs
remerciements très chaleureusement
et notre sincère gratitude :*

*A Notre promoteur Mme, **S. Dib**, pour son
orientation, Ses conseils, et sa disponibilité à
tout moment de besoin d'orientation. Toutes
nos reconnaissances pour vous.*

*A Mme, **F. Medjani** et Mme, **S. Bouchekouf**,
pour accepter d'examiner et de juger notre
travail.*

*Nos sentiments de reconnaissance et nos
remerciements vont également à l'encontre
de toute personne qui a participé de près ou
de loin, directement ou indirectement à la
réalisation de ce travail.*

*Que Dieu vous accorde, son aide, dans tous
vos projets et activités.*

Nomenclature

FAP : Filtre actif parallèle.

FAS : Filtre actif série.

UPQC : Unified Power Quality Conditioner.

PCC : point de connection commun.

PLC : Power Line Communication.

PLL : Phase Locked Loop.

MLI : Modulation en largeur d'impulsions.

P : Régulateur proportionnel.

PI : Régulateur proportionnel intégral.

THD : (En anglais : Total Harmonic distortion).

CEI : Commission Electrotechnique Internationale

GTO: (En anglais: Gate turn off thyristor).

IGBT: (En anglais: Insulated gate bipolar transistor).

MOSFET : Metal Oxyde Semi-Conductor Field Effect Transistor.

FPB : filtre passe bas.

P : la puissance active.

Q : la puissance réactive.

S : la puissance apparente.

Fp : Le facteur de puissance.

h : Rang de l'harmonique.

V_{dc}: tension aux bornes du condensateur de l'onduleur.

C_{dc} : Condensateur du bus continue.

i_s: courant de la source.

i_f : Courant de filtre.

i_{ch} : Courant de charge.

i_{ref} : Courant de référence.

R_f : Résistance de filtre de sortie.

L_f : Inductance de filtre de sortie.

$\overrightarrow{V_f}$: Le vecteur correspondant aux tensions de phase de l'onduleur.

$vs1, vs2, vs3$: Tensions de source.

$is1, is2, is3$: Courants de source.

$ic1, ic2, ic3$: Courants de charge.

$iinj1, iinj2, iinj3$: Courants harmoniques injectés.

R_c : Résistance de ligne.

L_c : Inductance de ligne.

R_s : Résistance de court-circuit de réseau.

L_s : Inductance de court-circuit de réseau.

L : Inductance.

C : Capacité.

R : Résistance.

K_p : le gain du régulateur.

K_i : la constante d'intégration.

τ_i : la constante de temps d'intégration.

ω_n : pulsation de coupure.

ξ : le coefficient d'amortissement.

$\alpha\text{-}\beta\text{-}0$: Les repères homopolaires du système triphasé de courant ou de tension.

$d\text{-}q$: le repère de Park.

$\bar{p}$: Puissance continue liée à la composante fondamentale active du courant et de la tension.

$\bar{q}$: Puissance continue liée à la composante fondamentale réactive du courant et de la tension.

$\tilde{p}$ et $\tilde{q}$: Puissances alternatives liées à la somme des composantes perturbatrices du courant et de la tension.

δ_d : la composante fondamentale directe de tension.

H : Bande hysteresis.

$f_{com(max)}$: La fréquence de commutation maximale d'onduleur.

Sommaire

Nomenclature	I
Sommaire	II
Liste des tableaux	III
Liste des figures	VI
Introduction générale	1

Chapitre I : Les perturbations dans les systèmes électriques

I.1 Introduction	3
I.2 Qualité de l'énergie électrique.....	3
I.2.1 Évaluation de la qualité d'énergie.....	4
I.3 Perturbations électriques et leurs origines	5
I.3.1 Variations de l'amplitude de la tension	5
I.3.1.1 Creux et coupures de tension.....	5
I.3.1.2 Origines des creux et coupures de tension	6
I.3.1.3 Effets et conséquences des creux de tension	7
I.3.2 Papillotement ou fluctuations de tension	7
I.3.3 Déséquilibre du courant et de tension	8
I.3.3.1 Origines du déséquilibre.....	8
I.3.4 Surtensions temporaires ou transitoires.....	9
I.3.4.1 Conséquences et effets de la surtension	10
I.3.5 Fluctuations de la fréquence	11
I.3.6 Harmoniques & inter-harmoniques	11
I.4 Perturbations harmoniques en courant et en tension	12
I.4.1 Origine des harmoniques.....	12
I.4.2 Conséquences des harmoniques	12
I.5 Définitions & aspects théoriques des phénomènes	13
I.5.1 Harmoniques d'un signal périodique.....	13
I.5.2 Décomposition harmonique.....	15
I.6 Caractérisation des perturbations harmoniques.....	16
I.7 Normes concernant les perturbations harmoniques.....	19
I.8 Conclusion.....	22

Chapitre II : Solutions de dépollution des réseaux électriques

II.1 Introduction	23
II.2 Solutions de dépollution des réseaux électriques.....	23
II.2.1 Solutions de dépollutions traditionnelles	24
II.2.1.1 Surdimensionnement de l'installation électrique	24
II.2.1.2 Rééquilibrage des courants et des tensions du réseau	24
II.2.1.3 Compensation des creux et des interruptions.....	24
II.2.1.4 Compensation de la puissance réactive.....	25
II.2.1.5 Compensation des courants harmoniques	25
II.2.2 Solutions de dépollutions modernes	27
II.2.2.1 Système Power Line Communication PLC.....	27
II.2.2.2 Les redresseurs MLI.....	28
II.2.2.3 Filtres actifs.....	28
II.2.2.3.1 Filtre actif parallèle (FAP)	29
II.2.2.3.2 Filtre actif série (FAS)	29
II.2.2.3.3 Filtres actifs combinés parallèle-série (UPQC)	30
II.2.2.3.4 Filtres actifs et passifs (hybrides).....	30
II.3 Filtre actif parallèle (FAP)	32
II.3.1 Principe de fonctionnement du FAP	33
II.3.2 Modèle équivalent du filtre actif parallèle	33
II.3.3 Structure générale du filtre actif parallèle	34
II.3.4 Etude de la partie puissance	35
II.3.4.1 L'onduleur de tension	35
II.3.4.1.1 Tension fournie par l'Onduleur.....	36
II.3.4.2 Système de stockage d'énergie	38
II.3.4.3 Filtre de sortie	39
II.3.4.3.1 Filtre du Premier ordre	40
II.3.4.3.2 Filtre du troisième ordre.....	41
II.3.5 Etude de la partie contrôle-commande.....	41
II.3.5.1 Régulation de la tension continue	42
II.3.5.2 Commande de l'onduleur	43
II.3.5.3 Régulation du courant du FAP	43
II.3.5.4 La méthode d'identification des courants perturbés	45
II.4 Filtre actif série (FAS)	46

II.4.1 Principe de fonctionnement du FAS	46
II.4.2 Modèle équivalent du filtre actif série	47
II.4.3 Structure générale du filtre actif série	48
II.4.3.1 Etude de la partie puissance	49
II.4.3.1.1 Onduleur de tension	49
II.4.3.1.2 Elément de stockage d'énergie	50
II.4.3.1.3 Filtre de sortie (filtre passe bas)	50
II.4.3.1.4 Transformateurs d'injection	51
II.4.3.2 Etude de la partie contrôle-commande.....	52
II.4.3.2.1 Méthodes d'identification des tensions perturbatrices	52
II.4.3.2.2 Commande de l'onduleur	53
II.4.3.2.3 Régulation de la tension du filtre actif série.....	53
II.5 Comparaison entre les types de filtrage	54
II.6 Conclusion.....	56

Chapitre III : Le conditionneur de puissance (UPQC)

III.1 Introduction	57
III.2 Le conditionneur de Puissance (UPQC)	57
III.3 Structure générale et emplacement de l'UPQC	59
III.4 Commande du Conditionneur de puissance (UPQC)	60
III.4.1 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)	61
III.4.2 Commande par hystérésis	61
III.4.3 Régulateur proportionnel (P)	63
III.4.4 Régulateur PI	64
III.4.5 Méthode des puissances instantanées (p-q)	68
III.4.5.1 Principe du fonctionnement de la méthode des puissances instantanées (p-q).....	69
III.4.5.2 Généralités sur les puissances instantanées	69
III.4.5.3 Séparation des puissances perturbatrices	71
III.4.5.4 Calcul des courants perturbateurs	72
III.4.5.5 Algorithme d'identification	74
III.4.6 Identification des tensions perturbatrices basée sur PLL.....	74
III.4.6.1 Structure générale du système PLL	75
III.4.6.2 Algorithme d'identification des tensions perturbatrices basée sur le PLL	75
III.5 Conclusion	77

Chapitre IV : Résultats de simulation

IV.1 Introduction	78
IV.2 Commande MLI avec régulateur	80
IV.2.1 Régulateur PI	80
IV.3 Résultat de simulation	80
IV.3.1 Creux de tension	82
IV.3.2 Surtension	83
IV.3.3 Régulation de la tension continue	84
IV.3.4 Toutes les perturbations	84
IV.4 L'interprétation des courbes	85
IV.5 Conclusion	86
Conclusion générale	87
Références bibliographiques	88

Liste des tableaux

Chapitre I : Les perturbations dans les systèmes électriques

Tab.I.1: Conséquences des creux de tension sur quelques équipements électriques sensibles ...	7
Tab.I.2 : Les quatre types de surtensions présentes sur les réseaux électriques	9
Tab.I.3: Niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles sur les réseaux basse tension (CEI 61000-2-2)	21
Tab.I.4 : Limites des composantes harmoniques du courant (CEI 61000 3-2)	21

Chapitre II : Solutions de dépollution des réseaux électriques

Tab.II.2 : un récapitulatif des avantages et inconvénients de quatre Principes de dépollution.	38
Tab.II.1 : Tensions générées par l'onduleur	55

Chapitre IV: Résultats de simulation

Tab.IV.1 : Les paramètres et les valeurs des éléments caractérisant la structure générale de l'UPQC	78
---	----

Liste des figures

Chapitre I : Les perturbations dans les systèmes électriques

Fig. I.1 : Creux de tension	6
Fig. I.2 : Coupure de tension	6
Fig. I.3 : Papillotement de tension	8
Fig. I.4 : Cas particulier de déséquilibre du système triphasé de tension	8
Fig. I.5 : Surtensions transitoires	10
Fig. I.6 : Fluctuation de la fréquence	11
Fig. I.7 : Harmonique de courant et/ou de tension	12

Chapitre II : Solutions de dépollution des réseaux électriques

Fig. II.1 : Filtre passif résonnant	26
Fig. II.2 : Filtre passif amortie	26
Fig. II.3 : Système PLC	27
Fig. II.4 : Filtre actif parallèle	29
Fig. II.5 : Filtre actif série	29
Fig. II.6 : Filtre actif mixte série-parallèle (UPQC)	30
Fig. II.7 : Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle	31
Fig. II.8 : Filtre actif série avec filtre passif parallèle	31
Fig. II.9 : Filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles	31
Fig. II.10 : Filtre actif parallèle avec une charge non-linéaire	32
Fig. II.11 : FAP raccordé à l'entrée d'une charge non-linéaire. (1) Représentation unifilaire du système. (2) Circuit équivalent, (3) Circuit équivalent pour le fondamental, (4) Circuit équivalent pour les harmoniques	34
Fig. II.12 : Structure générale du filtre actif parallèle	35
Fig. II.13 : La structure générale d'onduleur de tension triphasé	36
Fig. II.14 : Schéma équivalent par phase du filtre de sortie du troisième ordre en T	41
Fig. II.15 : Boucle de régulation de la tension continue	42
Fig. II.16 : Schéma de la régulation des courants du F.A.P	44
Fig. II.17 : Schéma simplifié de régulation des courants du F.A.P	45
Fig. II.18 : Filtre actif série avec une charge non-linéaire	46

Fig. IV.6 : Compensation des courants harmoniques utilisant le régulateur PI en présence d'un creux de tension et la décomposition spectrale	82
Fig. IV.7 : Compensation de surtension utilisant le régulateur PI	83
Fig. IV.8 : Compensation des courants harmoniques utilisant le régulateur PI en présence d'une surtension et la décomposition spectrale.	83
Fig. IV.9 : Régulation de la tension continue V_c utilisant le régulateur PI.	84
Fig. IV.10 : Compensation de toutes les perturbations (harmoniques, creux de tension et surtension) utilisant le régulateur PI.	84

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Actuellement, la demande en énergie a augmenté en raison du développement technologique, industriel et socio-économique des pays, au point que l'utilisation d'énergie alternative est étudiée et mise en œuvre. Les industries utilisent des dispositifs statiques de conversion d'énergie appelés : convertisseurs statiques. L'inconvénient de ces dispositifs c'est qu'ils se comportent comme des charges non linéaires et absorbent des courants avec des formes d'ondes différentes des tensions d'alimentation (non sinusoïdale).

Ces systèmes provoquent de plus en plus des problèmes de perturbations au niveau des réseaux électriques, tels que les distorsions harmoniques, les déséquilibres, le papillotement, les coupures brèves, les creux de tension et les surtensions temporaires et transitoires. En outre, ces perturbations peuvent générer des nuisances, pannes ou des incidents graves par l'affectation d'un ou plusieurs paramètres de la tension du réseau électrique, tels que la fréquence, l'amplitude, la symétrie des tensions triphasées et la forme de l'onde.

Un certain nombre de techniques classiques de dépollutions ont été déjà mises au point pour réduire les harmoniques et améliorer la qualité de l'énergie. Il s'agit notamment des filtres passifs, qui sont des techniques qui apportent une solution facile et rapide pour certains cas de perturbations. Cependant, ces dispositifs ont montré leurs limites et inconvénients comme : manque d'adaptabilité lors de variations de l'impédance du réseau, de la charge et résonance possible avec l'impédance du réseau et dans certains cas défavorables où cette résonance est excitée, celle-ci peut entraîner une tension harmonique élevée et un courant harmonique important dans la capacité du filtre et dans le réseau.

Une autre solution plus performante et plus efficace consiste à mettre en œuvre un filtrage actif afin d'éviter les inconvénients des filtres passifs. Cette technique est basée sur l'apparition des nouvelles technologies à base de semi-conducteurs comme les MOSFET et les IGBT. Ces filtres injectent au réseau les harmoniques présents mais en opposition de phase. Il y a plusieurs types de filtres actifs de puissance telle que le filtre actif parallèle, série et la combinaison des deux filtres actifs série-parallèle appelée conditionneur de puissance (UPQC : Unified Power Quality Conditionner).

A partir de cette problématique de recherche, l'objectif de notre travail consiste à l'amélioration de la qualité de l'énergie en utilisant l'UPQC, Pour cela une étude détaillée a été complétée dans ce mémoire sur le conditionneur de puissance et les deux filtres actifs : le filtre actif parallèle (FAP) et le filtre actif série (FAS), Ainsi des études ont été réalisées sur les différents types de contrôle de type hystérésis ou à base de modulation de largeur d'impulsions (MLI) associées à des régulateurs de type PI.

Notre mémoire comprend quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous présenterons les perturbations, en courant et en tension, des réseaux électriques connectés à des charges dites polluantes. Les origines de cette pollution harmonique, les conséquences et les normes inhérentes à ces perturbations sont examinées, et les limites proposées ont été établies par les normes de la commission internationale d'électrotechnique IEC61000, et par les recommandations IEEE Std. 519-1992.

Le deuxième chapitre sera consacré à la présentation de différentes solutions de dépollution. Deux types de solutions de dépollution des réseaux électrique sont envisageables : solutions traditionnelles qui apportent une solution facile et rapide pour certains cas de perturbations bien localisées et solutions modernes plus efficaces appelées filtres actifs de puissance.

Dans le troisième chapitre, on traite l'étude du conditionneur de puissance (UPQC), sa structure générale, son emplacement et sa commande qui est basé sur la modulation de largeurs d'impulsions MLI et hystérésis à l'aide d'un régulateur PI. Aussi on a inséré un système à base de verrouillage de phase (PLL) pour une identification exacte des références de commande de filtre série. Pour l'identification des courants harmoniques d'une charge polluante on utilise la méthode de puissance instantanée (p-q).

À l'aide du logiciel Matlab-Simulink, on a réalisé dans le quatrième chapitre la simulation des différentes stratégies de commande proposées ainsi que l'interprétation des résultats

CHAPITRE I

LES PERTURBATIONS DANS LES SYSTEMES ELECTRIQUES

I .1 Introduction

Le distributeur d'énergie doit fournir à l'ensemble de ses clients et utilisateurs une énergie de qualité sous la forme de trois tensions sinusoïdales constituant un réseau triphasé équilibre, et dont la fréquence est de 50 ou 60 Hz Cependant.

La qualité de l'onde de ces tensions se retrouve dégradée dans les réseaux électriques à cause de différentes perturbations. La source des perturbations est, soit une anomalie du côté du réseau électrique, soit la nature de fonctionnement des charges non-linéaires. D'ailleurs, L'utilisation accrue, dans l'industrie, des systèmes commandés à base d'électronique de puissance provoque de plus en plus des problèmes de perturbations au niveau des réseaux électriques [1], tels que les distorsions harmoniques, les déséquilibres, le papillotement, les coupures brèves, les creux de tension, les surtensions temporaires, et les surtensions transitoires. En outre, ces perturbations peuvent générer des nuisances, pannes ou des dégâts par l'affectation d'un ou plusieurs paramètres de la tension du réseau électrique, suivants: la fréquence, l'amplitude, la symétrie des tensions triphasées et la forme de l'onde.

Nous commencerons ce chapitre par un exposé des principaux défauts affectant la tension et le courant du réseau électrique. Nous parlerons également de leurs origines, des conséquences matérielles et des normes internationales imposées aux utilisateurs.

I .2 Qualité de l'énergie électrique

La qualité de l'énergie est une notion assez large qui recouvre à la fois la qualité de la fourniture électrique, la qualité de l'onde de tension et la qualité des courants. Lorsque la tension est présente, les principaux phénomènes pouvant l'affecter sont d'une part les variations lentes : creux de tension, surtensions, coupures, déséquilibres et d'autre part des variations rapides : surtensions transitoires, flicker ainsi que les harmoniques. La qualité des courants reflète par contre la possibilité des charges à fonctionner sans perturber ni réduire l'efficacité du système de puissance. C'est pourquoi certains considèrent que la qualité de l'électricité se réduit à la qualité de la tension [2].

La qualité de l'alimentation électrique ou qualité de l'onde fait référence à la mesure du degré de conformité d'une source d'alimentation électrique par rapport à un certain nombre de critères ou de normes à caractère quantitatif et absolu. L'énergie électrique est délivrée sous

forme d'un système triphasé de tensions sinusoïdales. Les paramètres caractéristiques de ce système sont les suivants :

- ☑ La fréquence
- ☑ L'amplitude
- ☑ La forme d'onde qui doit être sinusoïdale
- ☑ La symétrie du système triphasé, caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et de leurs déphasages relatifs. Tout phénomène physique affectant une ou plusieurs de ces caractéristiques peut être considéré comme perturbation. En pratique, ces perturbations sont classées selon la durée du phénomène. Ainsi, il est possible de distinguer :
 - ⇒ Les altérations de l'onde de tension (harmoniques, déséquilibre, flicker). Ces phénomènes sont permanents ou durent au minimum plusieurs minutes ;
 - ⇒ Les creux de tension et coupures brèves d'une durée de l'ordre d'une à quelques secondes ;
 - ⇒ Les surtensions transitoires, de durée inférieure à une période [3].

I.2.1 Évaluation de la qualité d'énergie

La qualité de l'énergie électrique intéresse à la fois le fournisseur et le consommateur. Le fournisseur d'énergie électrique a l'obligation de transport et de distribution, qu'il gère, à certains paramètres de qualité. La valeur de la fréquence avec les limites de variations admises en différents régimes du fonctionnement et la continuité de l'alimentation des consommateurs avec de l'énergie électrique.

Le consommateur d'énergie, à son tour, est intéressé d'avoir une qualité adéquate de l'énergie mais, en même temps, il est impliqué dans le maintien de la qualité par le type de récepteur utilisé et par l'exploitation judicieuse de ceux-ci. Les principales influences négatives produites par les récepteurs des consommateurs concernent la production d'harmoniques de courant et de tension, tout comme le fonctionnement en régies non symétriques, déséquilibrés.

La qualité de l'énergie électrique aux bornes des récepteurs est évaluée principalement, conformément aux normatifs d'écarts admissibles de la valeur réelle des paramètres des valeurs nominales [4].

I.3 Perturbations électriques et leurs origines

La qualité de l'énergie électrique peut être affectée, soit du fait de certains incidents inhérents à la nature physique des composants du réseau, soit du fait de certains récepteurs. Ces défauts se manifestent sous forme de différentes perturbations affectant un ou plusieurs des quatre paramètres précédemment définis. On a donc quatre possibilités distinctes de perturbation:

- ☑ **Variations de l'amplitude de la tension:** il ne s'agit pas des variations lentes de tension qui sont corrigées par les transformateurs de réglage en charge, mais de variations rapides de tension se présentant souvent sous forme d'à-coups brusques.
- ☑ **Fluctuations de la fréquence à 50 Hz :** elles sont rares et ne sont observées que lors de circonstances exceptionnelles.
- ☑ **Dissymétrie du système triphasé,** que l'on appelle déséquilibre ;
- ☑ **Modification de la forme d'onde :** cette onde n'est alors plus sinusoïdale, et peut être considérée comme représentable par une onde fondamentale à 50 Hz, associée soit à des harmoniques de fréquence multiple entier de 50 Hz, soit même parfois à des ondes de fréquence quelconque.

On peut, en plus, mentionner un type particulier de perturbations difficile à classer puisqu'il concerne tout à la fois l'amplitude et la forme d'onde : ce sont les variations transitoires d'amplitudes dont la durée est inférieure à 10 ms.

I.3.1 Variations de l'amplitude de la tension

I.3.1.1 Creux et coupures de tension

Il s'est avéré qu'une chute de tension se produit lorsque cette dernière manifeste une diminution d'amplitude entre 10% et 90% de sa valeur nominal (U_n) pendant une durée allant de 10 ms à 1 minute.

Par contre, une coupure de tension est due à une diminution de l'amplitude de cette tension. Généralement, pour des coupures brèves, il y a lieu d'une diminution supérieure à 90% de U_n pour un temps $10\text{ ms} < t < 1\text{ min}$.

En revanche, pour les coupures longues, le temps de coupure brève est supérieur à 1 min. Ces deux types de perturbation peuvent être dus à divers dysfonctionnement dans les réseaux électriques, notamment, des défauts engendrés par les équipements connectés et des courants d'appel. [5]

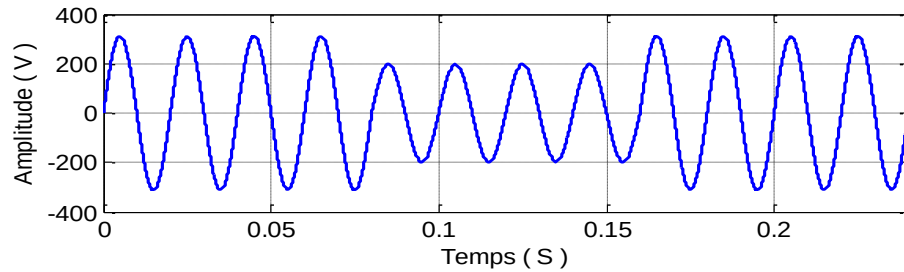


Fig. I.1 : Creux de tension

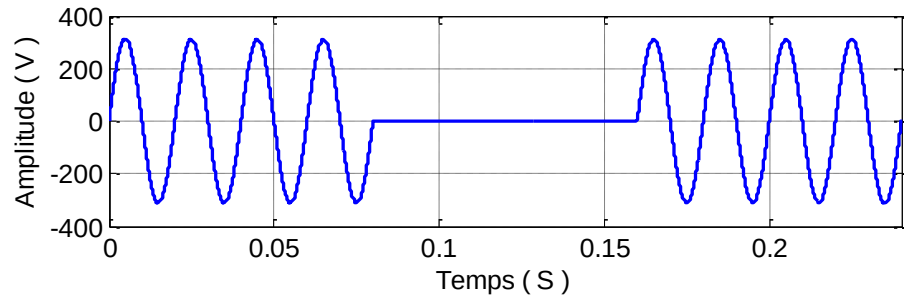


Fig. I.2 : Coupure de tension

I.3.1.2 Origines des creux et coupures de tension

Il y a deux types de phénomène à l'origine des creux de tension [6,7], qu'il soit sur le réseau de transport (HT), sur le réseau de distribution (BT et MT) ou sur l'installation elle-même, le premier provient du fonctionnement d'appareils à charge fluctuante ou de la mise en service d'équipements faisant appel à un courant élevé au démarrage (moteurs, transformateurs, four à arc, etc.) qui provoque à travers les impédances des éléments du réseau une chute de tension d'amplitude d'autant plus faible que le point d'observation est électriquement éloigné de la source de la perturbation. Ainsi que, le deuxième est lié aux phénomènes aléatoires, comme la foudre ou tout le court-circuit accidentel sur les réseaux de distribution, ou les réseaux internes des clients (défaut d'isolation, blessure de câble, projection de branches sur les lignes aériennes).

I.3.1.3 Effets et conséquences des creux de tension

Les creux et les coupures de tension sont susceptibles de perturber le fonctionnement de nombreuses installations industrielles [6,8], tertiaires et domestiques raccordées au réseau. En effet, ce type de perturbation est la cause la plus fréquente de problèmes de qualité d'énergie qui peut se traduire par des conséquences néfastes, allant de la dégradation de fonctionnement des équipements électriques jusqu'à leur destruction totale. Le Tab. I.1 résume les conséquences néfastes causées par les creux de tension sur quelques matériels industriels et tertiaires sensibles.

Tab. I.1 : Conséquences des creux de tension sur quelques équipements électriques sensibles

Type d'équipements	Conséquences néfastes
Systèmes d'éclairage	Moins de luminosité, extinction et réallumage.
Systèmes à base d'électronique de puissance	Arrêt ou mauvais fonctionnement des équipements.
Dispositifs de protection	Déclenchement et ouverture des contacteurs
Moteurs asynchrones	Ralentissement, décrochage, surintensité au retour de la tension.
Moteurs synchrones	Perte de synchronisme, décrochage et arrêt du moteur.
Variateurs de vitesse pour un moteur à courant continu	☒ En mode onduleur : destruction des protections ☒ En mode redresseur : ralentissement de la machine.

I.3.2 Papillotement ou fluctuations de tension

Les variations de tension sont des variations de la valeur efficace ou de la valeur crête d'amplitude inférieure à 10 % de la tension nominale et les fluctuations de tension sont une suite de variations de tension ou des variations cycliques ou aléatoires de l'enveloppe d'une tension dont les caractéristiques sont la fréquence de la variation et l'amplitude. [9]

- ☑ Causes : Variations importantes de charges (machines à souder, fours à arc...).
- ☑ Conséquences : Fluctuation de la luminosité des lampes (papillotement ou flicker).

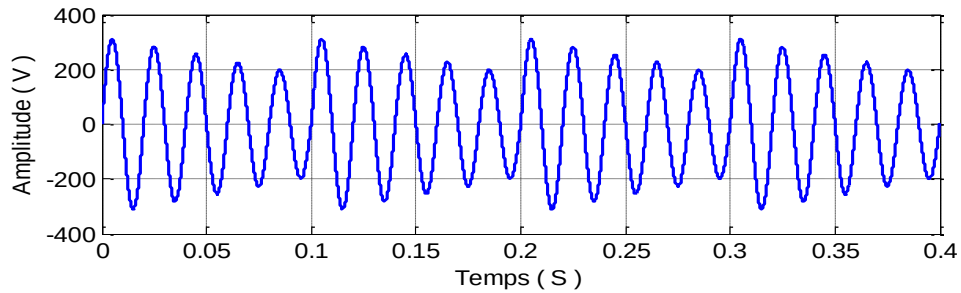


Fig. I.3 : Papillotement de tension

I.3.3 Déséquilibre du courant et de tension

L'outil principal pour étudier les déséquilibres sont les *composantes symétriques*. Cette théorie a été développée par Charles L. Fortescue à la fin de 1913 [10]. La principale propriété des composantes symétriques réside dans le fait que n'importe quel système triphasé déséquilibré peut être décomposé en trois composantes équilibrées : la composante *directe*, la composante *inverse* et la composante *homopolaire*. Cette décomposition est applicable à n'importe quel système triphasé. Dans le cas particulier du réseau électrique, on l'applique à la tension et au courant.

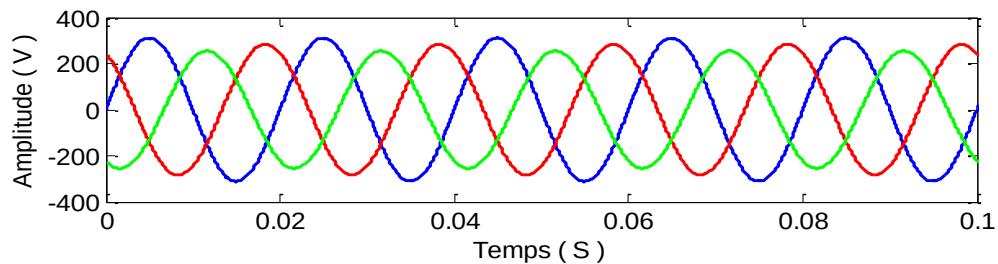


Fig. I.4 : Cas particulier de déséquilibre du système triphasé de tension

I.3.3.1 Origines du déséquilibre

Le déséquilibre du système triphasé s'observe lorsque les trois tensions ne sont pas égales en amplitude et/ou déphasées de 120° les unes par rapport aux autres. En effet, les déséquilibres de tension sont généralement d'origine de deux causes principales, soit les asymétries d'impédance des lignes du réseau ou soit les déséquilibres de charge. On caractérise les asymétries d'amplitude et de déphasage des tensions triphasées en régime permanent par

deux indices, soient : le taux de déséquilibre inverse et le taux de déséquilibre homopolaire [11]:

- ☑ **Le taux de déséquilibre de tension inverse** est défini, suivant la méthode des composantes symétriques, comme étant le rapport existant entre le module de la composante inverse du fondamental de la tension et celui de la composante directe :

$$\delta^- = \frac{V_1^-}{V_1^+} \quad (I.1)$$

- ☑ **Le taux de déséquilibre de tension homopolaire** est défini comme étant le rapport du module de la composante homopolaire fondamentale de la tension et celui de la composante directe :

$$\delta^0 = \frac{V_1^0}{V_1^+} \quad (I.2)$$

I.3.4 Surtensions temporaires ou transitoires

Toute tension appliquée à un équipement dont la valeur de crête sort des limites d'un gabarit défini par une norme ou une spécification est une surtension [12]. Les surtensions sont de quatre natures : Temporaires (à la fréquence industrielle 50 Hz); De manœuvre; Par décharge électrostatique; D'origine atmosphérique (foudre).

Elles peuvent apparaître selon deux modes : mode différentiel (entre conducteurs actifs, phase-phase ou phase-neutre) et mode commun (entre conducteurs actifs et la masse ou la Terre). Leurs principales caractéristiques sont décrites dans le Tab I.2.

Tab I.2 : Les quatre types de surtensions présentes sur les réseaux électriques

<i>Surtension</i>	<i>Durée</i>	<i>Raideur du front de montée, ou fréquence</i>	<i>Amortissement en fonction de la distance</i>
<i>Atmosphérique</i>	Très courte (μ S)	Très élevée (1000kV/ μ S)	Fort
<i>Décharge électrostatique</i>	Très courte (nS)	Elevée (≈ 10 Mhz)	Très fort
<i>Manœuvre</i>	Courte (mS)	Moyenne (1 à 200 kHz)	Moyen
<i>Temporaire</i>	Long (S), voir très longues (h)	Fréquence du réseau	Nul

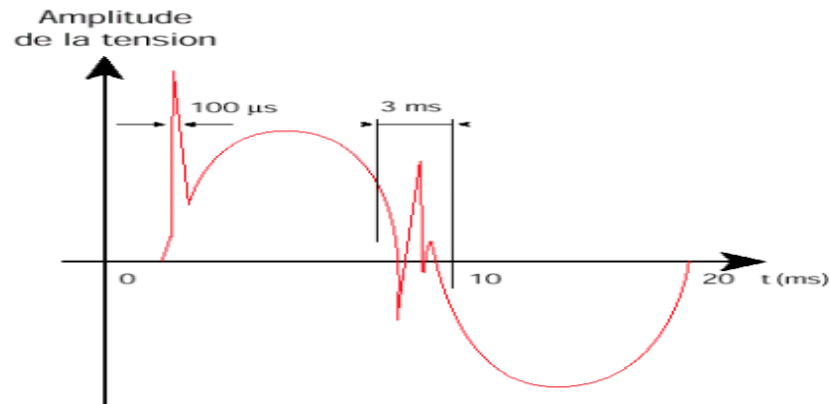


Fig. I.5 : Surtensions transitoires [13]

I.3.4.1 Conséquences et effets de la surtension

Les installations subissent périodiquement un certain nombre de surtensions non négligeables [6] [14]. Les conséquences de la surtension sont très diverses selon le temps d'application, la répétitivité, l'amplitude, le mode (commun ou différentiel), la raideur du front de montée et la fréquence. En effet, les risques se situent essentiellement au niveau des dysfonctionnements, de la destruction de matériels sensibles et notamment des composants électroniques et, en conséquence, de la non-continuité de service. Ces effets peuvent apparaître sur les installations des distributeurs d'énergie ou sur les installations des utilisateurs. Les surtensions peuvent conduire à :

- ☑ *Claquage du diélectrique, cause de destruction de matériel sensible;*
- ☑ *Dégradation de matériel par vieillissement (surtensions non destructives, mais répétées);*
- ☑ *Coupure longue entraînée par la destruction de matériel;*
- ☑ *Des interruptions courtes;*
- ☑ *Perturbations des circuits de contrôle et de communication à courant faible;*
- ☑ *Contraintes électrodynamiques et thermiques causées par la foudre essentiellement.*

Enfin, des appareils de protection permettent de limiter ces risques. Mais, leur mise en œuvre nécessite l'élaboration réfléchie de niveaux cohérents d'isolement et de protection. Pour cela, la compréhension préalable et la caractérisation des différents types de surtension sont indispensables.

I.3.5 Fluctuations de la fréquence

Variation de fréquence Une variation sensible de la fréquence du réseau peut apparaître sur les réseaux des utilisateurs non interconnectés ou alimentés par une source thermique autonome (voir la Fig. I.6) 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 $50 \text{ Hz} \pm 1\%$ [15].

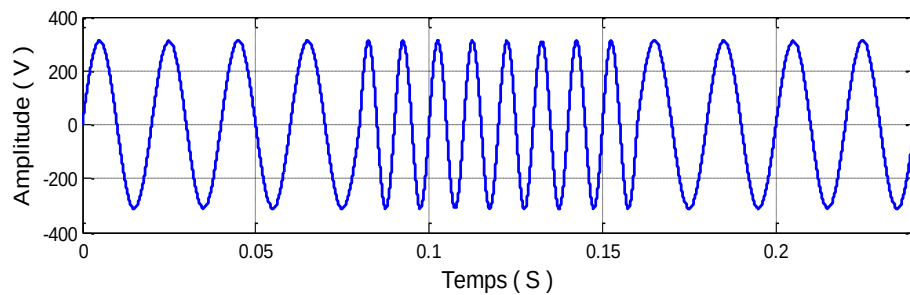


Fig. I.6 : Fluctuation de la fréquence

I.3.6 Harmoniques & inter-harmoniques

Les harmoniques sont des tensions ou des courants sinusoïdaux dont la fréquence est un multiple entier de la fréquence du réseau. En général, nous différencions 2 types d'harmoniques :

- Les harmoniques de courant dus à la présence de charges non linéaires telles que les appareils d'éclairage fluorescents, les fours à arc, les redresseurs, les variateurs électroniques de vitesse, qui peuvent être identifiés à une source de courant harmonique.
- Les harmoniques de tension issus du réseau lui-même dus, en général, à des petites imperfections de construction des bobinages des différents matériels du réseau eux-mêmes, tels que les machines tournantes et les transformateurs qui, pratiquement, ne délivrent pas une tension purement sinusoïdale. Ces harmoniques peuvent être identifiés à une source de tension harmonique (Fig. I.7).

La tension du réseau peut contenir des composantes fréquentielles qui ne sont pas des multiples entiers du fondamental. Ce type de composantes sont, communément, appelées inter-harmoniques. Elles peuvent apparaître soit sous forme de fréquence discrète, soit sous forme de spectres à large bande. Leurs sources principales sont les cyclo-convertisseurs, les convertisseurs de fréquence, les machines synchrones, les machines à souder et les fours à arc [16].

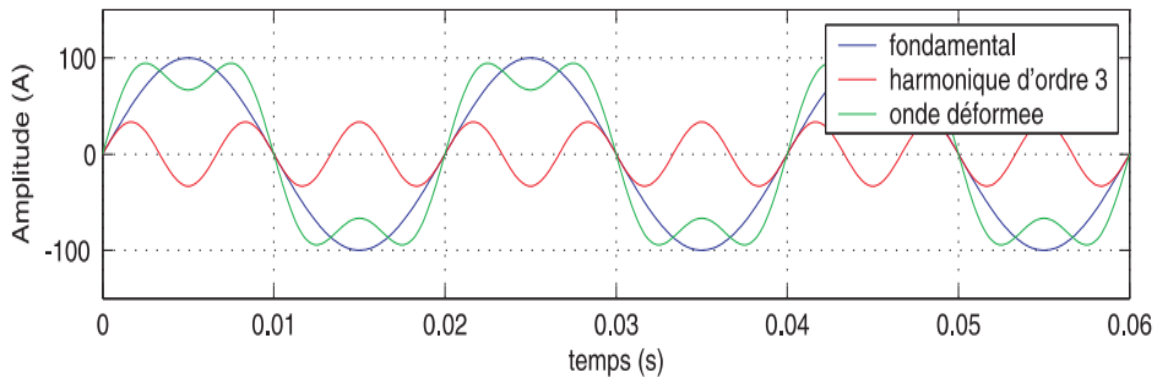


Fig. I.7 : Harmonique de courant et/ou de tension

I.4 Perturbations harmoniques en courant et en tension

I.4.1 Origine des harmoniques

Les harmoniques sont générés par des charges non linéaires absorbant un courant non sinusoïdal. Actuellement, les équipements à base de thyristors constituent la principale source de ces harmoniques. Ces appareils, dont les caractéristiques électriques varient avec la valeur de la tension, sont assimilables à des générateurs de courants harmoniques : appareils d'éclairage fluorescent, variateurs de vitesse, redresseurs, téléviseurs, ordinateurs, etc.... [7].

I.4.2 Conséquences des harmoniques

On distingue deux types d'effets d'harmoniques (aussi des inters et infra harmoniques), à définir : les effets instantanés et les effets à terme.

a) Effets instantanés

- ☑ *Phénomène de résonance entre l'impédance du réseau et les condensateurs de compensation* : Le plus spectaculaire de ce type d'effet est la destruction d'équipement.
- ☑ *Interférence avec les réseaux de télécommunication* : Le couplage électromagnétique entre les réseaux électriques et de télécommunication peut induire dans ces derniers des bruits importants.
- ☑ *Troubles fonctionnels liés à la déformation de l'onde de tension tels que* : couples pulsatiles sur les moteurs d'entraînement, vibrations, erreurs des systèmes de mesures, perte de la détection du passage au zéro de tension pour les dispositifs de régulation.
- ☑ *Vibrations et bruits* : Les courants harmoniques génèrent également des vibrations et des bruits acoustiques, principalement dans les appareils électromagnétiques (transformateurs, inductances et machines tournantes).

b) Effets à terme

Les effets à terme se traduisent par une fatigue mécanique prématurée (due aux vibrations) des matériaux et des lignes. Principalement, l'effet à terme, c'est l'échauffement.

- ☑ *Echauffement des câbles et des équipements* : Ces effets peuvent être à moyen terme (de quelques secondes à quelques heures) ou à long terme (de quelques heures à quelques années) et concernent les câbles qui peuvent être le siège du sur échauffement comme le neutre et les matériels bobinés (transformateurs ou moteurs).
- ☑ *Echauffement des condensateurs* : L'échauffement est causé par les pertes dans le diélectrique. Les condensateurs sont sensibles à la présence d'harmoniques. Ces échauffements peuvent conduire au claquage.

I.5 Définitions & aspects théoriques des phénomènes**I.5.1 Harmoniques d'un signal périodique**

La forme des ondes de courant et de tension relevée sur les réseaux industriel et tertiaire s'éloigne assez de la circulation sur le réseau de courants non sinusoïdaux. La

question pratique est de savoir quel impact a, l'ensemble de tous les courants non sinusoïdaux, sur la tension. On sait répondre en partie à cette question : comme tous les éléments du réseau ont un comportement linéaire, l'effet sur la tension de l'ensemble des courants est la superposition de l'effet qu'aurait chaque courant individuellement. Reste un problème de taille : quel effet, un courant donné, a-t-il sur la tension ? On sait répondre quand le courantes sinusoïdal, avec les techniques qui utilisent les notions d'impédance complexe ou de diagramme de Fresnel. Mais, cela paraît bien plus compliqué car les formes de courant peuvent être très différentes de la sinusoïde pure. Pourtant, la solution consiste à utiliser la décomposition en série de Fourier qui s'appuie sur le fait que tout signal périodique peut être représenté par une somme d'ondes sinusoïdales: une onde à la fréquence fondamentale de 50 Hz et des ondes de fréquence multiple de la fréquence fondamentale (les harmoniques). Alors, quel que soit le courant injecté, grâce à la linéarité du comportement du réseau, on est amené à examiner l'effet d'un courant sinusoïdal injecté dans un réseau (courant et tension dans chaque élément). L'effet global s'obtiendra en superposant chaque effet élémentaire. Cette décomposition, dite harmonique, est un artifice mathématique très commode. Ceux qui l'utilisent ont été amenés à parler des harmoniques comme d'un phénomène physique à part entière. Dans la réalité, on observe seulement des signaux non sinusoïdaux. Si l'on n'avait pas connu cette méthode, on aurait eu à résoudre, dans le domaine temporel, des équations du type :

$$V(t)=R(t)+L\frac{di(t)}{dt} \quad (I.3)$$

Ce qui est faisable, mais plus laborieux. Grâce à la décomposition en série de Fourier, ou décomposition harmonique, on traite des équations algébriques du type :

$$V = RI + jLwI = Z. I \quad \text{avec} \quad Z = R + jwL \quad (I.4)$$

Où le paramètre temps n'apparaît pas de façon explicite. Il s'y substitue par le terme:

$$w = 2\pi f \quad (I.5)$$

D'où la dénomination de domaine fréquentiel. L'intérêt de la décomposition harmonique est de faciliter les calculs dans l'analyse et la synthèse des réseaux. Ainsi, on peut

dissocier l'étude fondamentale de celle relative aux fréquences harmoniques. On traite le problème global en autant de problèmes linéaires qu'il y en a de rangs harmoniques.

$$U_1 = Z_1 * I_1 \quad (I.6)$$

$$U_h = Z_h * I_h \quad (I.7)$$

Il faut noter que U_h , Z_h et I_h ont des grandeurs vectorielles qu'on peut décrire par leur amplitude et leur phase. Grâce à cette décomposition, l'analyse des impédances rencontrées par les courants harmoniques peut être représentée sous la forme amplitude ou phase en fonction de la fréquence. La connaissance des vecteurs de courant et des impédances du réseau permet de déterminer les vecteurs de tension harmonique en chaque point du réseau [17].

I.5.2 Décomposition harmonique

Toute fonction périodique peut être décomposée en une somme (infinie) de fonctions sinus et cosinus.

Un signal est la somme de plusieurs sinusoides d'amplitude différentes, et décalées en phase, appelées : harmoniques (de rang n), la fréquence de chaque fonction est un multiple de la fréquence fondamentale.

Intérêt : il est plus facile de connaître les propriétés de la fonction résultante en analysant les propriétés de chacune des composantes ; de plus, connaître un nombre limité de composantes suffit à bien représenter (voir reconstruire, synthétiser) le signal.

Analyse spectrale : il est utile de présenter les résultats de l'Analyse de Fourier d'une fonction périodique $f(t)$ au moyen de son spectre $F(f)$ qui est soit :

a- un diagramme Fréquence-Amplitude: pour le spectre en amplitude (en abscisse les Fréquences des différentes harmoniques, en ordonnée leur amplitude)

b- un diagramme Phase-Amplitude: pour le spectre de phase (en abscisse les fréquences des différentes harmoniques, en ordonnée leur phase à l'origine).

Ainsi une fonction du temps peut être entièrement décrite par son spectre de fréquence et son spectre de phase.

Si $f(x)$ vérifie l'une des deux conditions suivantes :

- $f(x)$ est continue et $f'(x)$ continue sauf en un nombre fini de points sur la période T , où la discontinuité est de première espèce.
- $f(x)$ est à variation bornée sur T alors en tout point x

$$\frac{1}{2}[f(x+0) + f(x-0)] = \sum_{n=0}^{\infty} (a_n \cos n\omega x + b_n \sin n\omega x) \quad (\text{I.8})$$

Si $f(x)$ est continue cette formule se réduit à

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} (a_n \cos n\omega x + b_n \sin n\omega x) \quad (\text{I.9})$$

Les coefficients du développement de fourrier sont donnés par les formules suivantes :

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_T f(x) dx \quad \text{qui pour } T = 2\pi \quad \text{vaut} \quad \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(x) dx \quad (\text{I.10})$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_T f(x) \cos n\omega x \quad \text{qui pour } T = 2\pi \quad \text{vaut} \quad \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cos nx dx \quad (\text{I.11})$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_T f(x) \sin n\omega x dx \quad \text{qui pour } T = 2\pi \quad \text{vaut} \quad \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \sin nx dx \quad (\text{I.12})$$

Si $f(x)$ est paire $b_n = 0$: on a une série de cosinus.

Si $f(x)$ est impaire $a_n = 0$: on a une série de sinus.

Une tension déformée $v(t)$ de période T ($T = 20 \text{ ms}$ à $f = 50 \text{ Hz}$) peut donc s'écrire de la façon suivante :

V_0 : amplitude de la composante continue, généralement nulle et considérée comme telle par la suite.

φ_p : phase de V_p à l'instant initial ($t = 0$).

De façon identique, un courant déformé $i(t)$ de période T peut s'écrire :

I_0 : amplitude de la composante continue, généralement nulle et considérée comme telle par la suite.

j_p : phase de I_p à l'instant initial ($t = 0$).

I.6 Caractérisation des perturbations harmoniques

Différentes grandeurs sont définies pour caractériser la distorsion en régime déformé.

Le taux global de distorsion harmonique (THD) et le facteur de puissance sont les plus

employés pour quantifier respectivement les perturbations harmoniques et la consommation de puissance réactive.

a. Taux de distorsion harmoniques (THD)

La perturbation harmonique est généralement caractérisée par le taux de distorsion harmonique (THD) défini pour la tension et le courant. Cette notion permet de caractériser la déformation apportée par les harmoniques par rapport à une onde sinusoïdale [6]:

☑ **Taux harmonique de rang h :**

$$G_h = \frac{C_h}{C_1} \quad (\text{I. 13})$$

Où C_h représente la valeur efficace de la composante harmonique de rang h , C_1 représente la valeur efficace de la composante fondamentale.

☑ **Taux global de distorsion harmonique :**

$$\text{THD} = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \frac{C_h^2}{C_1^2}} \quad (\text{I. 14})$$

Deux taux globaux de distorsion harmonique sont distingués :

- ⇒ le taux de distorsion harmonique en courant, noté THD_I
- ⇒ le taux de distorsion harmonique en tension, noté THD_V

Le THD_I s'exprime pratiquement sous la forme [6]:

$$\text{THD}_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{50} I_h^2}}{I_1} * 100 \quad (\text{I. 15})$$

Et le THD_V s'exprime pratiquement sous la forme [6]:

$$\text{THD}_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{50} V_h^2}}{V_1} * 100 \quad (\text{I. 16})$$

Le THD_I ne dépend que des valeurs efficaces du courant de charge. En revanche, le THD_V est fonction des courants harmoniques caractérisant la charge et l'impédance de court-circuit, imposée par le réseau :

$$THD_V = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left[\frac{V_h}{V_1} \right]^2} = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left[\frac{|Z_{hcc}| I_h}{V_1} \right]^2} \quad (I.17)$$

Ainsi, plus les impédances Z_{hcc} ($h > 1$) sont faibles, plus la distorsion en tension est faible. En général les harmoniques pris en compte dans un réseau électrique sont inférieurs à 2500 Hz. Les harmoniques de fréquence plus élevée sont fortement atténués par l'effet de peau et par la présence des inductances de lignes. De plus les appareils générant des harmoniques ont, en grande majorité, un spectre d'émission inférieur à 2500 Hz, c'est la raison pour laquelle le domaine d'étude des harmoniques s'étend de 100 à 2500 Hz, c'est-à-dire des rangs 2 à 50 [18].

b. Facteur de puissance

Pour la transmission efficace de l'énergie d'une source à une charge, on doit maximiser la puissance moyenne, tout en réduisant au minimum le courant et la tension (et par conséquent réduisant au minimum les pertes). Le facteur de puissance (Fp) est un indice qui reflète l'efficacité de la transmission de l'énergie d'une source à une charge. Il est égal au quotient de la puissance active P par la puissance apparente S : [19]

$$\text{Facteur de puissance} = \frac{\text{(puissance active)}}{\text{(tension efficace) (courant efficace)}}$$

$$Fp = \frac{P}{S} = \frac{P}{V_{eff} I_{eff}} \quad (I.18)$$

En présence des courants harmoniques avec une tension sinusoïdale ; on distingue :

- ☑ **Facteur de déphasage (facteur de Puissance de Déplacement):** C'est le rapport entre la puissance active et la puissance apparente de l'onde fondamentale.

$$Fp_{dep} = \frac{P_1}{V_{1eff} I_{1eff}} \quad (I.19)$$

- ☑ **Facteur de Puissance de Distorsion :** C'est le rapport entre le courant fondamental et le courant total

$$Fp_{dis} = I_1/I_T = \frac{1}{\sqrt{1+(THD_I)^2}} \quad (I.20)$$

- ☑ **Facteur de puissance (total):** est le rapport entre la puissance active P et la puissance apparente S .

$$Fp_{tot} = \frac{P}{S} = \frac{P}{V_{eff} I_{eff}} \quad (I.21)$$

- ☑ **Le Facteur de puissance (total) peut aussi être exprimé :**

$$Fp_{tot} = Fp_{dis} * Fp_{dep} \quad (I.22)$$

☑ Puissance de distorsion

En présence d'harmoniques, la puissance de distorsion D est définie par l'équation :

$$D = (S^2 - P^2 - Q^2)^{1/2} \quad (I.23)$$

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

I.7 Normes concernant les perturbations harmoniques

L'organisation largement reconnue en tant que conservateur des standards de la qualité électrique est le **CEI** (Commission Electrotechnique Internationale ou IEC International Electrotechnical commission), basée à Genève.

Le **CEI** a défini une série de normes, appelées les normes de compatibilité électromagnétique (EMC), pour traiter la qualité électrique.

La série **CEI 61000** considère que les harmoniques et les inter-harmoniques sont des phénomènes électromagnétiques causés par des basses fréquences. Une alternative répandue à la norme CEI est la recommandation **IEEE 519–1992**, qui fournit des directives pratiques sur les harmoniques

CEI 61000

Parmi les sections qui nous intéressent de la norme CEI 61000 (considérée comme norme européenne) est le CEI 61000 2-2, CEI 61000 3-2 et le CEI 61000 3-4.

☑ **Le CEI 61000 2-2** : définit les niveaux de compatibilité de tensions harmoniques sur les réseaux publics basse tension (Tab I.3). Cette norme vise à protéger les équipements raccordés sur un réseau basse tension déformée.

☑ **Le CEI 61000 3-2** : définit des limites d'émission de courant harmonique par des appareils (équipements) consommant un courant inférieur ou égal à 16 A par phase. Il s'agit là des appareils du domaine domestique. Cette limitation du champ d'application est très restrictive dans la plupart des applications industrielles.

Cette norme fait une classification des dispositifs (équipements) en quatre groupes ou classes, ces équipements doivent avoir une puissance de 75 W jusqu'à 600 W.

- ⇒ Classe A : tous les équipements triphasés équilibrés non inclus dans les classes (B, C et D).
- ⇒ Classe B : Outils portatifs.
- ⇒ Classe C : Équipements d'éclairage, y compris les dispositifs de régulation.
- ⇒ Classe D : micro-ordinateurs et télévisions.

Les limites des courants harmoniques de la norme CEI 61000 3-2 sont données par le Tab. I.4., Il est intéressant de noter que ces limites sont exprimées en valeurs absolues et non relatives à la fondamentale. Ceci implique que l'équipement avec une petite puissance peut accomplir la norme avec un indice de distorsion harmonique (THD_I) très élevé.

Tab. I.3 : Niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles sur les réseaux basse tension (CEI 61000-2-2).

<i>Harmoniques impairs non multiple de 3</i>		<i>Harmoniques impairs multiples de 3</i>		<i>Harmoniques pairs</i>	
Rang harmonique h	Tension harmonique %	Rang harmonique h	Tension harmonique %	Rang harmonique h	Tension harmonique %
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.3	6	0.5
13	3	21	0.2	8	0.5
17	2	> 21	0.2	10	0.5
19	1.5			12	0.2
23	1.5			> 12	0.2
25	1.5				
> 25	$0.2+0.5*25/h$				

Tab. I.4 : Limites des composantes harmoniques du courant (CEI 61000 3-2).

<i>Harmoniques</i> (h)	<i>Classe A</i> (A)	<i>Classe B</i> (A)	<i>Classe C</i> I _h /I ₁ %	<i>Classe D</i> (mA/W)
<i>Harmoniques impairs</i>				
3	2.30	3.45	30 x F _p	3.4
5	1.14	1.71	10	1.9
7	0.77	1.155	7	1.0
9	0.40	0.60	5	0.5
11	0.33	0.495	3	0.35
13	0.21	0.315	3	0.296
15 ≤ h ≤ 39	0.15 x 15/h	0.225 x 15/h	3	3.85/h
<i>Harmoniques pairs</i>				
2	1.08	1.62	2	-
4	0.43	0.645	-	-
6	0.30	0.45	-	-
8 ≤ h ≤ 40	0.23 x 8/h	0.345 x 8/h	-	-
□F _p □ : est le facteur de puissance				

- ☒ **La norme EN 50160** qui précise les caractéristiques de la tension fournie par les réseaux publics basse tension.

- ☑ **La norme IEEE 519** (Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric power Systems - USA) qui œuvre à limiter l'impact des charges non linéaires à la fois entre le distributeur d'énergie et le client (engagement mutuel pour limiter les harmoniques) [20].

I.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la qualité d'énergie, ses paramètres et son évaluation en citant les différentes perturbations qui l'affectent, leurs origines et leurs conséquences sur les équipements électriques.

Ces effets peuvent aller des échauffements et de la dégradation du fonctionnement jusqu'à la destruction totale de ces équipements. Nous avons ensuite fait une caractérisation des perturbations harmoniques et en fin nous avons présenté un aperçu sur les deux normes principales qui traitent les harmoniques.

CHAPITRE II

SOLUTIONS DE DEPOLLUTION DES

RESEAUX ELECTRIQUES

II.1 Introduction

Ces dernières années, l'augmentation de l'utilisation des équipements électriques a fortement participé à la réduction de la qualité d'énergie dans les réseaux électriques. En plus, le développement dans les applications en électronique a mené à la prolifération d'équipements modernes plus sensibles aux perturbations de la tension. Par conséquent, Afin d'éviter le dysfonctionnement, voir la destruction de ces équipements et aussi des composants du réseau électrique, il est indispensable de comprendre l'origine des perturbations et de chercher les solutions adéquates pour les supprimer.

Pour fournir aux consommateurs une énergie électrique de qualité, deux types de solutions de dépollution des réseaux électrique sont envisageables : solutions traditionnelles et solutions modernes. Le premier type ce sont des techniques qui apportent une solution facile et rapide pour certains cas de perturbations bien localisées. Par contre les solutions modernes sont de plus en plus efficaces notamment avec l'apparition des nouvelles technologies à base de semi-conducteurs comme les MOSFET et les IGBT. Le choix de la solution la plus appropriée dépend des caractéristiques de l'offre au niveau du point de connexion, les exigences de la charge et de l'économie.

Dans ce chapitre, nous présenterons quelques solutions traditionnelles et modernes utilisées pour dépolluer les réseaux électriques avec l'étude détaillée de filtre actif parallèle (FAP) et filtre actif série (FAS).

II.2 Solutions de dépollution des réseaux électriques

Plusieurs solutions de dépollution des réseaux électriques peuvent être mises en œuvre afin de corriger un dysfonctionnement dans une installation, d'agir de façon préventive en vue du raccordement de charges polluantes, de mettre en conformité l'installation par rapport à une norme ou à des recommandations du distributeur d'énergie et de réduire la facture énergétique [21]. On peut regrouper les solutions visant à réduire les perturbations électriques en deux familles :

Les solutions traditionnelles et les solutions modernes.

II.2.1 Solutions de dépollutions traditionnelles

Ce sont des techniques qui apportent une solution facile et rapide pour certains cas de perturbations bien localisées et utilisent des composants passifs (inductances, condensateurs, transformateurs) et/ou des branchements qui modifient le schéma de l'installation.

On a plusieurs solutions de dépollution traditionnelles des réseaux électriques

II.2.1.1 Surdimensionnement de l'installation électrique

Dans ce cas, les harmoniques ne subissent aucune action curative de la part de l'utilisateur. Les effets néfastes de la pollution harmonique sont à éviter pendant une durée limitée. Pour les installations nouvelles, on procède au surdimensionnement des équipements afin d'assurer leur tenue aux surcharges harmoniques. Dans le cas d'installations existantes, on décline les équipements de distribution électrique soumis aux harmoniques (câbles du neutre, transformateur). Cette méthode ne permet pas de tirer profit du potentiel réel de l'installation. Il en résulte un accroissement important du coût de l'installation [22].

II.2.1.2 Rééquilibrage des courants et des tensions du réseau

C'est une solution qui permet de répartir les charges d'une manière identique sur les trois phases (la répartition égale des charges sur les trois phases). En effet, les charges monophasées et biphasées mal réparties engendrent des courants déséquilibrés dans un réseau électrique basse tension [23] [24].

II.2.1.3 Compensation des creux et des interruptions

Les creux de tension deviennent un souci majeur en matière de la qualité de l'onde. En conséquence, les investigations des techniques de mitigation des creux reçoivent de plus en plus d'importance. Des dispositifs conventionnels tels que les sources d'alimentation sans interruption, les transformateurs à ferro-résonance et les groupes moteur-générateur, sont susceptibles de mitiger le problème à un certain point [25]. Mais cette méthode a des inconvénients et limites en matière de coût, performance et puissance maximale.

II.2.1.4 Compensation de la puissance réactive

La puissance réactive est majoritairement consommée par les moteurs asynchrones et plus récemment par des dispositifs à base d'électronique de puissance. Différentes méthodes de compensation sont utilisées pour relever le facteur de puissance. La plus simple consiste à placer des batteries de condensateurs en parallèle avec le réseau. On peut les placer directement à proximité des charges qui ont un mauvais facteur de puissance (compensation locale) ou près du transformateur d'alimentation (compensation globale). L'inconvénient de cette méthode réside dans le fait que la puissance réactive fournie par les condensateurs est constante non réglable et qu'elle ne s'adapte pas à l'évolution du besoin [23].

Pour augmenter la performance dynamique, on peut utiliser un compensateur statique (ex : SVC). Les batteries de condensateur fournissent une quantité fixe de puissance réactive tandis que le gradateur associé aux inductances permet de consommer une partie de cette puissance qui s'adapte aux fluctuations de puissance réactive des utilisateurs. Ces dispositifs sont très encombrants et sont eux-mêmes générateurs d'harmoniques.

II.2.1.5 Compensation des courants harmoniques

Plusieurs solutions existent pour limiter la propagation et l'effet des harmoniques dans les réseaux électriques, les plus importants sont :

- ☑ **Augmentation de la puissance de court-circuit :** En l'absence de tout phénomène de résonance, la puissance harmonique globale augmente lorsque la puissance de court-circuit diminue. On s'efforcera alors d'alimenter les équipements perturbateurs à partir du point du réseau où la puissance de court-circuit disponible est la plus élevée. Les courants harmoniques des charges non linéaires étaient modélisés par des sources de courant indépendantes du réseau. Dans la réalité, ce modèle est très approximatif [22].
- ☑ **Transformateur à couplage spécial :** Il s'agit de limiter la circulation des courants harmoniques à une partie aussi petite que possible de l'installation à l'aide de transformateurs à couplage approprié. L'utilisation d'un transformateur d'isolement, de

rapport 1/1 à couplage triangle-étoile ou triangle zigzag, empêche la propagation des courants harmoniques de rang 3 et leurs multiples circulant dans le neutre, ce procédé n'a aucun effet sur les autres rangs harmoniques [26].

- ☑ **Ajout d'une inductance (self) série** : Afin de limiter le contenu des courants harmoniques générés sur le réseau, une première solution consiste à insérer une inductance de lissage avant le pont de diodes. Avec une valeur de self définie pour 3% de chute de tension pour le courant nominal du pont de diode.
- ☑ **Utilisation de filtre passif** : Le filtrage consiste à placer en parallèle sur le réseau d'alimentation une impédance de valeur très faible autour de la fréquence à filtrer et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau. Le filtre passif a pour objet, dans le cas des harmoniques, de diminuer l'impédance du réseau à une fréquence donnée. Cette solution est la plus simple et la moins chère mais sans doute, elle n'est pas la plus efficace [27].

Parmi les filtres passifs les plus répandus :

- ⇒ **Filtre passif résonnant** : qui est constitué d'un circuit LC série avec résistance utilisée généralement pour éliminer les harmoniques de rang 5 et 7.
- ⇒ **Filtre passif amorti** : qui est constitué d'un circuit LC et une résistance R. la résistance est en parallèle avec l'inductance. Ce type de filtre est utilisé pour éliminer les harmoniques de rang supérieurs à 11

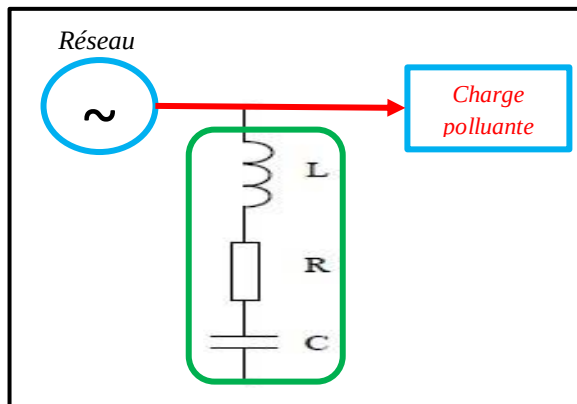


Fig. II.1 : Filtre passif résonnant

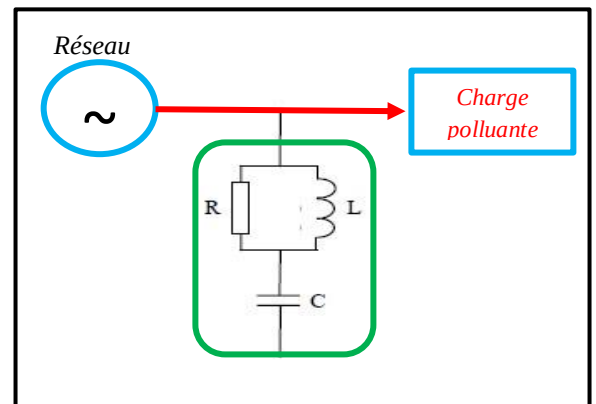


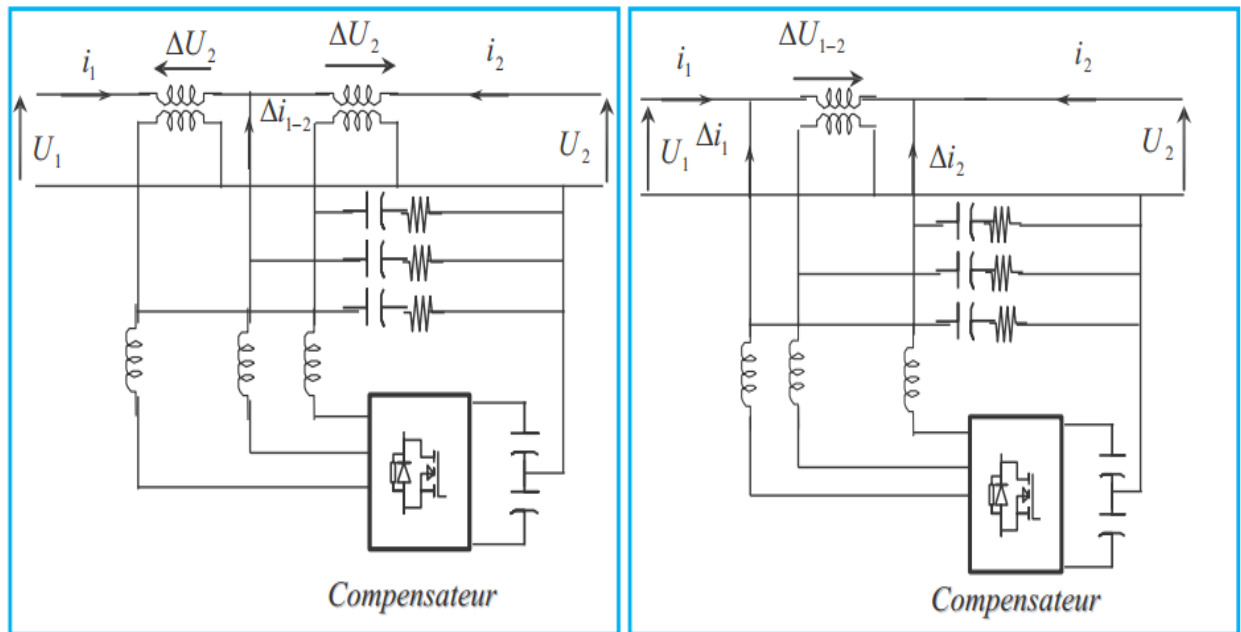
Fig. II.2 : Filtre passif amorti

II.2.2 Solutions de dépollutions modernes

A cause des inconvénients des solutions de dépollution traditionnelles, autres solutions dites modernes ont été proposées. Les solutions pour traiter les harmoniques sont de plus en plus efficaces notamment avec l'apparition des nouvelles technologies à base de semi-conducteurs comme les MOSFET et les IGBT. Ces composants conduisent à la création d'une nouvelle structure de filtrage moderne et efficace nommée filtre actif de puissance. Le filtre actif de puissance génère des tensions ou des courants harmoniques en opposition de phase pour compenser les harmoniques présentés dans le réseau électrique.

II.2.2.1 Système Power Line Communication PLC

Appelée aussi '*courant porteur en ligne*', Il est basé sur une nouvelle configuration d'onduleur jouant le rôle de filtre actif de puissance où chaque phase du compensateur est reliée, différemment, à la même phase monophasée de la source, comme le montre la Fig. II.3 [28].

a - Système en Π

b - Système en T

Fig. II.3 - Système PLC

II.2.2.2 Les redresseurs MLI

Ce sont des convertisseurs à modulation de largeurs d'impulsions, utilisant des composants à commutation forcée tels que les IGBT ou les thyristors GTO. L'emploi de cette technique permet non seulement une réduction de la perturbation harmonique en prélevant des courants d'allure sinusoïdale mais aussi un contrôle des puissances actives et réactives [27]. Suivant les caractéristiques harmoniques exigées, on peut, par exemple, soit minimiser les harmoniques d'une bande, soit éliminer certains d'entre eux, soit faire que le facteur de puissance égale à 1. Il y a plusieurs techniques d'optimisations parmi elles, on distingue l'utilisation de l'algorithme génétique qui donne de très bons résultats [28], [30].

II.2.2.3 Filtres actifs

En 1982, un filtre actif shunt de 800 KVA, composé d'un onduleur MLI à source de courant et à base des thyristors GTO, a été mis dans l'utilisation pratique pour la première fois au monde [31].

Les filtres actifs constituent une alternative intéressante aux solutions classiques. Ces solutions sont proposées comme des solutions efficaces de dépollution des réseaux électriques afin de traiter les inconvénients inhérents aux solutions traditionnelles que présentent les filtres passifs (non adaptabilité aux variations de la charge et du réseau, apparition des résonances). Le rôle d'un filtre actif est de compenser en temps réel les perturbations, en tout ou en partie, présentes dans les réseaux électriques. Le but de ces filtres actifs est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à ce que le courant ou la tension redevienne sinusoïdal. Le filtre actif est connecté au réseau soit en parallèle (FAP), soit en série (FAS) suivant qu'il est conçu respectivement pour compenser les courants ou les tensions harmoniques, soit *combiné parallèle-série*, soit associé à des filtres passifs pour constituer ce qu'on appelle les filtres hybrides [32], [33], [34].

Les avantages des filtres actifs par rapport aux filtres passifs sont les suivants [35] :

- ☑ Le volume physique du filtre est plus réduit ;
- ☑ La capacité de filtrage est supérieure ;
- ☑ La flexibilité et adaptabilité sont très supérieures.

II.2.2.3.1 Filtre actif parallèle (FAP)

Le filtre actif parallèle est considéré comme 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. Ce filtre conçu pour compenser toutes les perturbations de courant comme les harmoniques, les des équilibres et la puissance réactive.

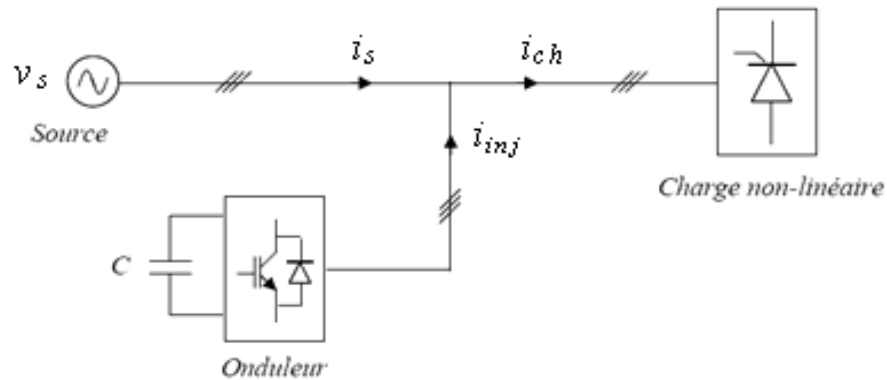


Fig. II.4: Filtre actif parallèle.

II.2.2.3.2 Filtre actif série (FAS)

Le filtre actif série est considéré comme une source de tension qui s'oppose aux tensions perturbatrices venant de la source et également celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Ainsi la tension aux bornes de la charge à protéger est purement sinusoïdale. Ce filtre conçu pour compenser toutes les perturbations de tension comme les harmoniques, les des équilibres et les creux de tension.

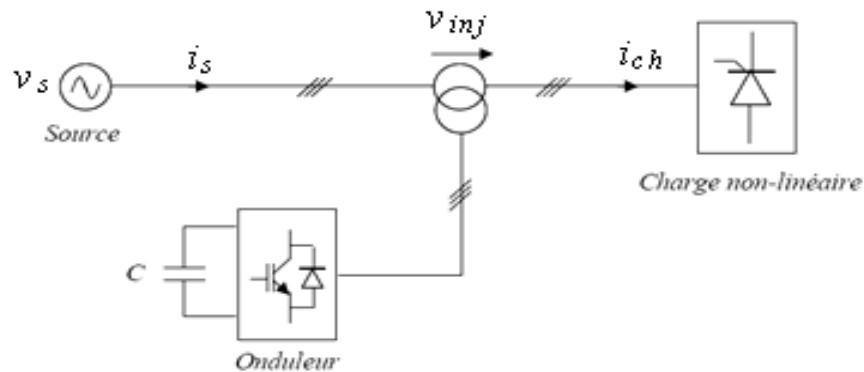


Fig. II.5: Filtre actif série

II.2.2.3.3 Filtres actifs combinés parallèle-série (UPQC)

Appelée aussi '*Unified Power Quality Conditioner (UPQC)*', la solution universelle pour compenser toutes les perturbations en courant et en tension. Cette nouvelle topologie résulte de l'association des deux filtres actifs parallèle et série. Profitant des avantages des deux filtres, 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 par le fonctionnement simultané des filtres actifs parallèle et série.

L'objet du filtre actif série est l'isolation harmonique entre la charge et la source d'une part, la régulation de la tension réseau (compensation de flicker ou de déséquilibre) d'autre part. Le filtre actif parallèle compense les courants harmoniques et la puissance réactive de la charge en même temps qu'il contrôle la tension continue du condensateur commun des deux filtres actifs. Dans le chapitre III ce filtre sera traité en détail.

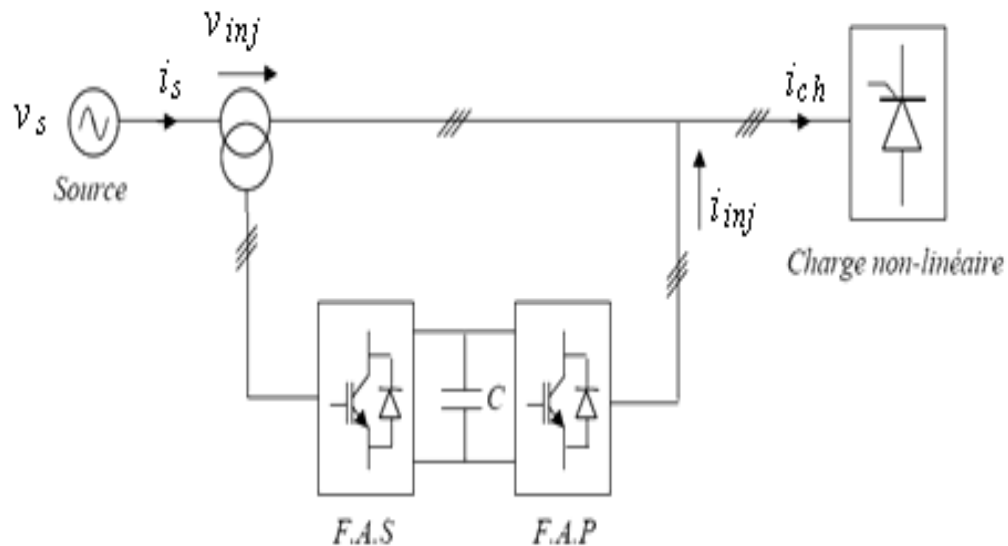


Fig. II.6: Filtre actif mixte série-parallèle (UPQC)

II.2.2.3.4 Filtres actifs et passifs (hybrides)

Pour optimiser le rapport performance/coût du filtre actif, on lui associe un filtre passif. Le filtre passif a pour rôle d'éliminer les fréquences spécifiques permettant la réduction du dimensionnement du filtre actif qui compensera le reste des perturbations. Les configurations les plus connues dans la littérature sont :

☑ **Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle :**

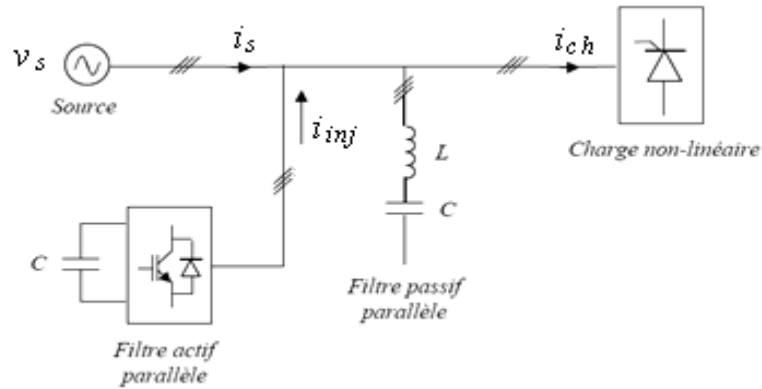


Fig. II.7: Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle

☑ **Filtre actif série avec un filtre passif parallèle**

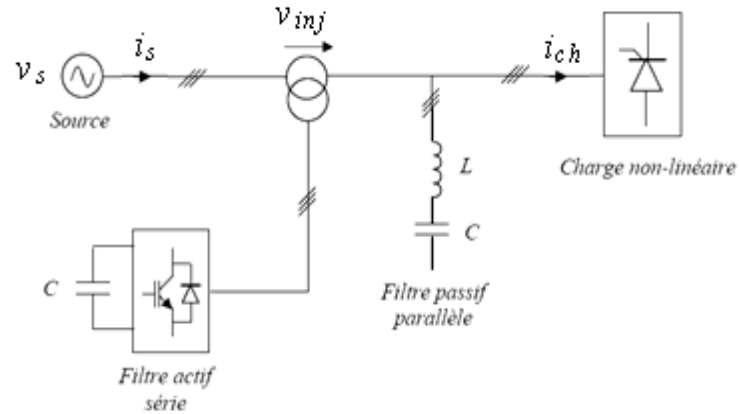


Fig. II.8: Filtre actif série avec filtre passif parallèle

☑ **Filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle**

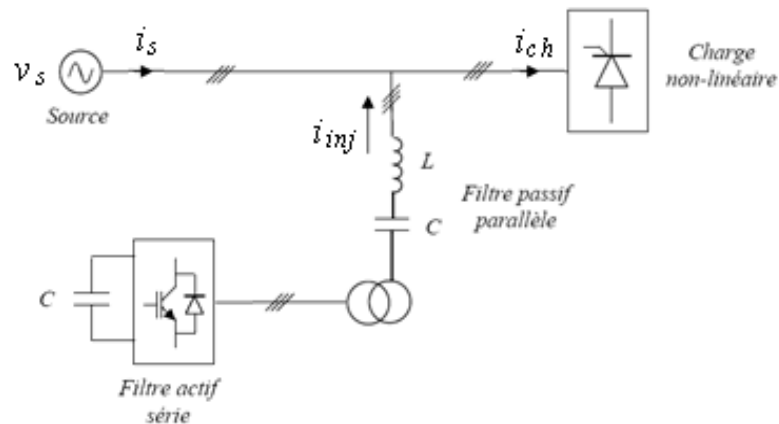


Fig. II.9: Filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles.

II.3 Filtre actif parallèles (FAP)

Appelé aussi compensateur shunt, il est connecté en parallèle sur le réseau. 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 filtre actif parallèle représente la solution alternative du filtre passif shunt. Il existe un grand nombre de topologies de filtres actifs parallèles, [36], [37]. Ces filtres peuvent être monophasés ou triphasés. Ces derniers peuvent à leur tour être à trois fils ou à quatre fils lorsque le courant du fil neutre cause un problème, [38]. Il existe cependant deux structures de base selon l'élément de stockage d'énergie de l'onduleur du FAP. Ces deux structures de base sont :

- ⇒ **Filtre actif parallèle à structure tension** : lorsque le côté continu de l'onduleur possède un condensateur.
- ⇒ **Filtre actif parallèle à structure courant** : Dans ce cas le côté continu de l'onduleur comportera une inductance, cette structure est moins utilisée à cause de son faible rendement.

La Fig. II.10 montre la configuration d'un filtre actif shunt susceptible de remplacer un filtre passif shunt. Le filtre est un pont à six interrupteurs avec six diodes antiparallèles. L'onduleur avec l'inductance de sortie se comporte comme une source de courant afin de compenser le courant harmonique dans la source.

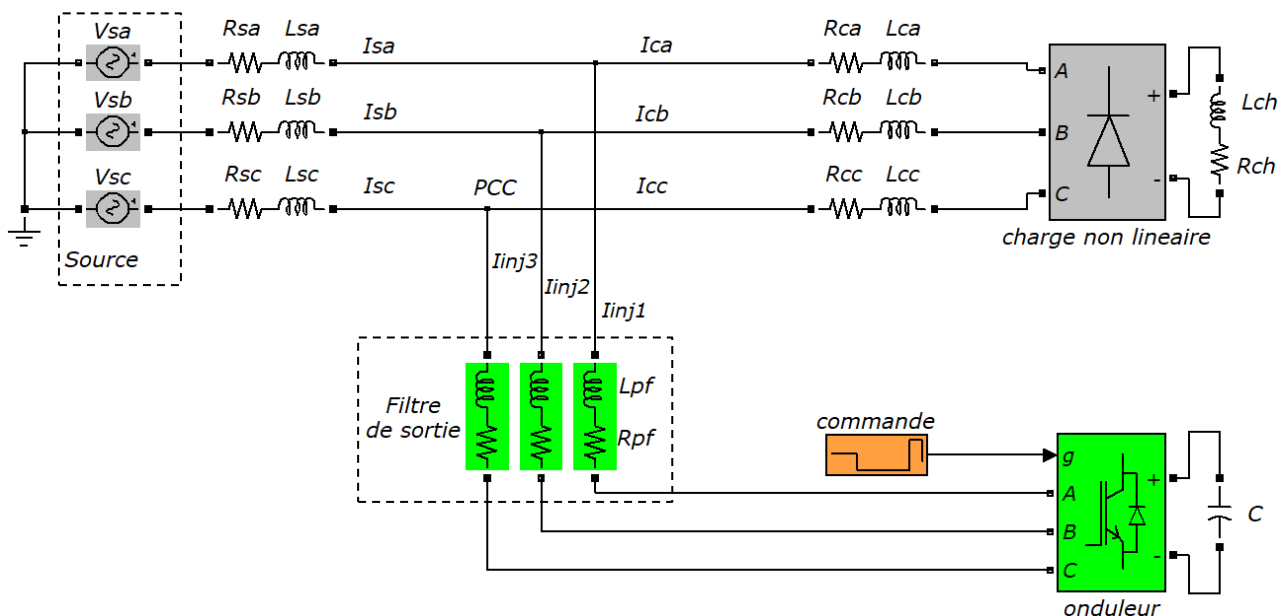


Fig. II.10 : Filtre actif parallèle avec une charge non-linéaire

II.3.1 Principe de fonctionnement du FAP

Le FAP est connecté en parallèle sur le réseau de distribution Fig. II.10. Il est le plus souvent commandé comme générateur de courant [39] [40] [41]. Il constitue un excellent dépollueur, car il est souple, auto-adaptatif, performant, ne présentant aucun risque d'interaction avec l'impédance réseau et ne nécessite pratiquement pas d'études préalables à la mise en service. Il injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci, de telle sorte que le courant fourni par le réseau soit sinusoïdal et en phase avec la tension simple correspondante. En effet, l'objectif primordial du filtre actif parallèle (FAP) consiste à empêcher les courants perturbateurs (harmoniques, réactifs et déséquilibrés), produits par des charges polluantes, de circuler à travers l'impédance du réseau, tout en éliminant la possibilité de produire des résonances.

En générale, le filtre actif parallèle est utilisé pour la dépollution des réseaux BT et MT. Son impédance totale vis à vis de la source et de la charge lui confère une bonne auto-adaptabilité avec les performances appréciables [42].

II.3.2 Modèle équivalent du filtre actif parallèle

Dans ce cas la charge non-linéaire considérée est un pont de diodes triphasé qui alimente une charge inductive. Cette charge est modélisée par une charge linéaire équivalente en parallèle avec une source de courant. La Fig. II.11 montre le système simplifié que nous allons étudier et le circuit équivalent. On suppose que la source de tension est sans distorsion. Les harmoniques, produits par le pont à diode triphasé, ont les rangs $6k \pm 1$ ($k = 1, 2, 3, \dots$ etc.). Les rangs pris en compte dans ce cas, sont : $h = 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, 29, 31, 35, 37, 41, 43, 47$ et 49 [21].

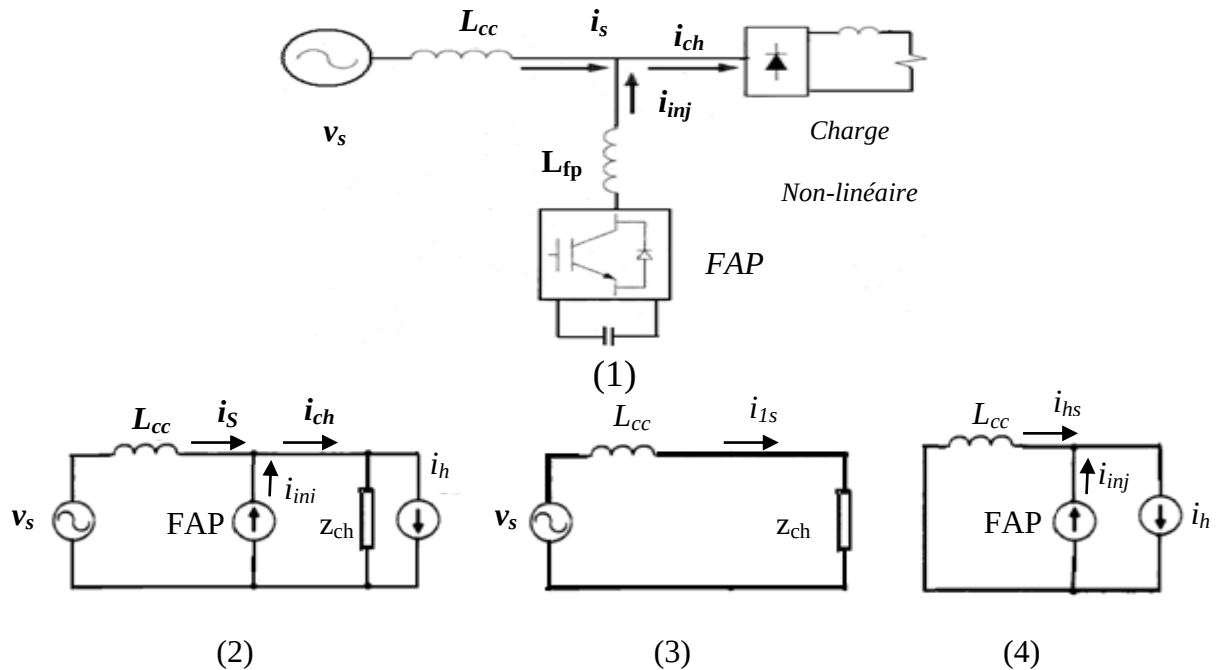


Fig. II.11 : FAP raccordé à l'entrée d'une charge non-linéaire. (1) Représentation unifilaire du système. (2) Circuit équivalent, (3) Circuit équivalent pour le fondamental, (4) Circuit équivalent pour les harmoniques.

II.3.3 Structure générale du filtre actif parallèle

Plusieurs structures du filtre actif série ont été proposées dans la littérature. La plus utilisée est présentée sur la Fig. II.12. Cette structure, est composée d'une partie puissance et d'une partie contrôle commande.

La partie puissance se compose des éléments suivants :

- ☑ Onduleur de tension à base d'interrupteurs de puissance, commandables à l'amorçage et au blocage (GTO, IGBT, ...etc.) avec des diodes en antiparallèle,
- ☑ Circuit de stockage d'énergie, souvent capacitif,
- ☑ Filtre de sortie.

La partie contrôle-commande se compose des éléments suivants :

- ☑ La méthode d'identification des courants perturbés,
- ☑ La régulation de la tension continue appliquée aux éléments de stockage d'énergie,
- ☑ La commande de l'onduleur de tension,

- ☑ La régulation du courant injecté sur le réseau à partir de l'onduleur de tension,

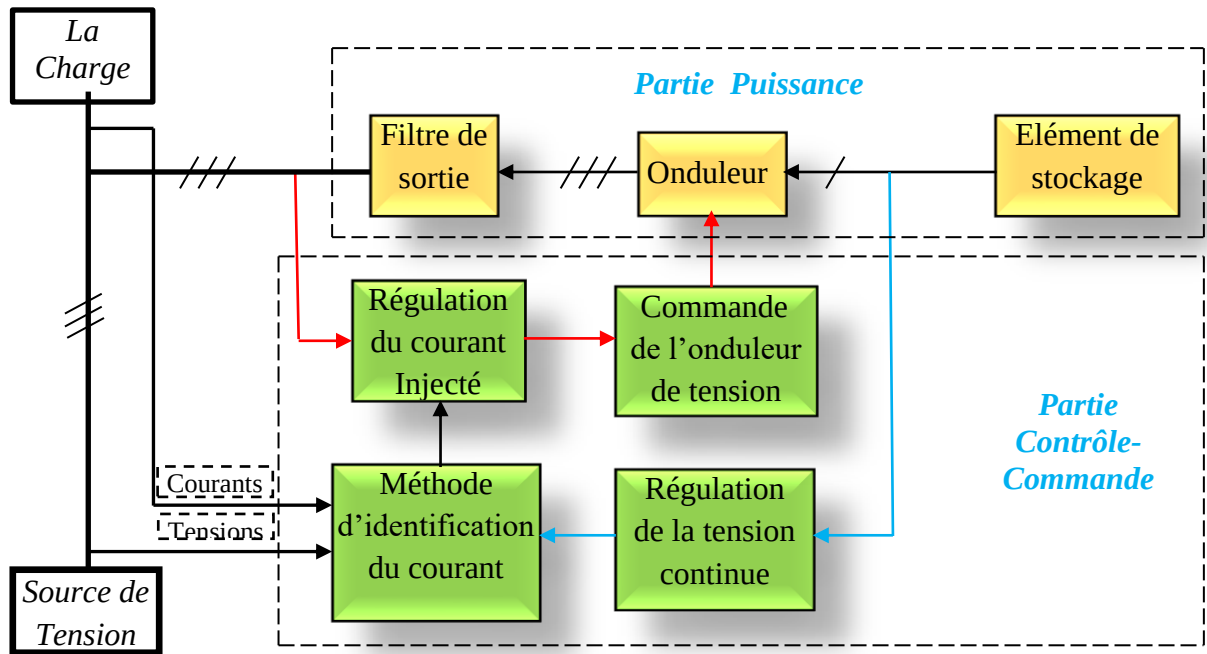


Fig. II.12 : Structure générale du filtre actif parallèle

II.3.4 Etude de la partie puissance du filtre actif parallèle

Dans cette partie nous sommes intéressés à la partie puissance du filtre actif parallèle, comme le montre la Fig. II.12, qui est constituée d'un :

II.3.4.1 L'onduleur de tension

La structure générale un onduleur triphasé à structure de tension présente par la Fig.II.13. Il se compose de trois bras à interrupteurs réversibles en courant, commandés à la fermeture et à l'ouverture, réalisés à partir des MOSFET pour les faibles puissances et fréquences très élevées, des IGBT pour les grandes puissances et fréquences élevées, ou des GTO pour les très grandes puissances et fréquences faibles. Pour assurer la circulation du courant dans les deux sens, l'interrupteur doit être placé en antiparallèle avec une diode [43]. Le stockage de l'énergie du côté continu se fait par l'intermédiaire d'un condensateur C_{dc} de tension V_c . Le filtre de sortie est un filtre passif habituellement du premier ordre (L_{fp}, R_{fp}) employé pour connecter l'onduleur de tension au réseau électrique.

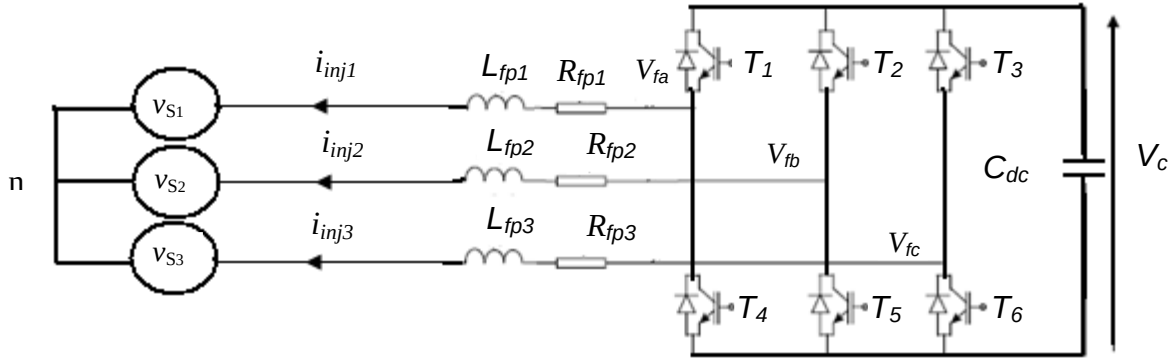


Fig. II.13 : La structure générale d'onduleur de tension triphasé

Cette structure du filtre actif parallèle ne permet pas la fermeture simultanée des semi-conducteurs d'un même bras sous peine de court-circuiter le condensateur de stockage. Par contre, ils peuvent être tous les deux ouverts (pendant un temps mort). La continuité des courants est alors assurée par la mise en conduction d'une des diodes d'un même bras.

En pratique, nous commandons les deux semi-conducteurs d'un même bras de façon complémentaire : la conduction de l'un entraîne le blocage de l'autre. En réalité, le mode, où les semi-conducteurs d'un même bras sont tous les deux fermés, n'existe que durant les commutations. Afin d'éviter un court-circuit à cause du délai de blocage des interrupteurs, il faut insérer sur un même bras, un temps d'attente, également appelé temps mort, entre la commande de blocage d'un interrupteur et la commande d'amorçage de l'autre [44]. Avec l'hypothèse des commutations instantanées, ce mode de fonctionnement ne sera pas pris en compte et par conséquent, aucun risque de court-circuiter le condensateur n'est à craindre.

II.3.4.1.1 Tension fournie par l'Onduleur

Nous commandons les deux semi-conducteurs d'un même bras de façon complémentaire : la conduction de l'un entraîne le blocage de l'autre. Donc l'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur de tension du filtre actif parallèle dépendent de l'état des signaux de commande (S_1, S_2, S_3), comme défini ci-dessous : [45]

$$S_1 = \begin{cases} 1 & T_1 \text{ fermé et } T_4 \text{ ouvert} \\ 0 & T_1 \text{ ouvert et } T_4 \text{ fermé} \end{cases}$$

$$S_2 = \begin{cases} 1 & T_2 \text{ fermé et } T_5 \text{ ouvert} \\ 0 & T_2 \text{ ouvert et } T_5 \text{ fermé} \end{cases}$$

$$S_3 = \begin{cases} 1 & T_3 \text{ fermé et } T_6 \text{ ouvert} \\ 0 & T_3 \text{ ouvert et } T_6 \text{ fermé} \end{cases}$$

Les tensions entre phases imposées par l'onduleur sont :

$$\begin{bmatrix} V_{fa} - V_{fb} \\ V_{fb} - V_{fc} \\ V_{fc} - V_{fa} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1 - S_2 \\ S_2 - S_3 \\ S_3 - S_1 \end{bmatrix} V_C \quad (\text{II. 1})$$

On suppose que les tensions de phase sont équilibrées, alors l'équation 2.1 devient :

$$\begin{bmatrix} V_{fa} \\ V_{fb} \\ V_{fc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2S_1 & -S_2 & -S_3 \\ -S_1 & 2S_2 & -S_3 \\ -S_1 & -S_2 & 2S_3 \end{bmatrix} \frac{V_C}{3} \quad (\text{II. 2})$$

soit $\vec{V}_f$ le vecteur correspondant aux tensions de phase de l'onduleur, $\vec{V}_f = \begin{bmatrix} V_{fa} \\ V_{fb} \\ V_{fc} \end{bmatrix}$

Pour simplifier les calculs et représenter ce vecteur de tension pour les différents états de S_1 , S_2 et S_3 nous transformons ce vecteur à trois dimensions en un vecteur à deux dimensions en appliquant la transformation triphasée/diphasée (qui est très connue) suivante :

$$\vec{V}_f = \begin{bmatrix} V_{f\alpha} \\ V_{f\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{fa} \\ V_{fb} \\ V_{fc} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 3})$$

En utilisant l'équation 2.2 et 2.3, le module et l'argument du vecteur $\vec{V}_f$ sont :

$$\text{Mod}(\vec{V}_f) = \frac{V_C}{\sqrt{3}} \sqrt{(S_1 - S_2)^2 + (S_2 - S_3)^2 + (S_3 - S_1)^2} \quad (\text{II. 4})$$

$$\text{Arg}(\vec{V}_f) = \text{arctg} \left(\frac{\sqrt{3} (S_2 - S_3)}{(S_1 - S_2) + (S_1 - S_3)} \right) \quad (\text{II. 5})$$

Ainsi, on pourra exprimer huit cas possibles de tension de sortie du filtre actif (V_{fa} , V_{fb} et V_{fc} ou $V_{f\alpha}$ et $V_{f\beta}$) comme le montre le Tab.II.1

Tab.II.1 : Tensions générées par l'onduleur

N° du Cas	Interrupteurs Fermés	S_1	S_2	S_3	V_{fa}	V_{fb}	V_{fc}	$V_{f\alpha}$	$V_{f\beta}$	$\text{Mod}(\vec{V}_f)$	$\text{Arg}(\vec{V}_f)$
0	$T_4T_5T_6$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1	$T_1T_5T_6$	1	0	0	$2V_c/3$	$-V_c/3$	$-V_c/3$	$\sqrt{\frac{2}{3}}V_c$	0	$\sqrt{\frac{2}{3}}V_c$	0
2	$T_2T_4T_6$	0	1	0	$-V_c/3$	$2V_c/3$	$-V_c/3$	$-V_c/\sqrt{6}$	$V_c/\sqrt{2}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}V_c$	$2\pi/3$
3	$T_1T_2T_6$	1	1	0	$V_c/3$	$V_c/3$	$-2V_c/3$	$V_c/\sqrt{6}$	$V_c/\sqrt{2}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}V_c$	$\pi/3$
4	$T_3T_4T_5$	0	0	1	$-V_c/3$	$-V_c/3$	$2V_c/3$	$-V_c/\sqrt{6}$	$-V_c/\sqrt{2}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}V_c$	$4\pi/3$
5	$T_1T_3T_5$	1	0	1	$V_c/3$	$-2V_c/3$	$V_c/3$	$V_c/\sqrt{6}$	$V_c/\sqrt{2}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}V_c$	$5\pi/3$
6	$T_2T_3T_4$	0	1	1	$-2V_c/3$	$V_c/3$	$V_c/3$	$-\sqrt{\frac{2}{3}}V_c$	0	$\sqrt{\frac{2}{3}}V_c$	π
7	$T_1T_2T_3$	1	1	1	0	0	0	0	0	0	

II.3.4.2 Système de stockage d'énergie

Le stockage de l'énergie du côté continu se fait souvent par un élément de stockage capacitif représenté par un condensateur C_{dc} qui joue le rôle d'une source de tension continue V_c [46]. Le choix des paramètres du système de stockage (V_{c-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_{c-ref} élevée améliore la dynamique du FAP. D'autre part, les ondulations de la tension continue V_c , 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 de V_c mais augmente le coût et la taille du FAP [28]. Ces fluctuations sont d'autant plus importantes que l'amplitude du courant du filtre est grande et que sa fréquence est faible. Pour cette raison, nous pouvons estimer que seuls les premiers harmoniques sont

pris en compte dans le choix des paramètres du système de stockage. Pour démontrer ceci, deux méthodes peuvent être utilisées :

- ☑ La première méthode se base sur le calcul de l'énergie fournie par le filtre actif pendant une demi-période de la pulsation de puissance liée aux deux premiers harmoniques (5 et 7 pour un pont redresseur de Graetz) [47]. En choisissant un taux d'ondulation acceptable (ϵ), généralement de l'ordre de 5% de V_c , nous pouvons calculer la capacité C_{dc} à partir de la relation suivante :

$$C_{dc} = \frac{V_s \sqrt{I_5^2 + I_7^2 - 2I_5 I_7 \cos(5\alpha - 7\alpha)}}{2\omega \epsilon V_c^2} \quad (\text{II. 6})$$

Avec V_s la tension simple du réseau, I_h le courant harmonique du rang h et α l'angle d'allumage des thyristors du pont Graetz [18].

- ☑ La deuxième méthode, plus simple, se base sur la mesure du courant harmonique I_h du rang le plus faible. La capacité C_{dc} se calcule de la façon suivante [48]:

$$C_{dc} = \frac{I_h}{\epsilon V_c \omega_h} \quad (\text{II. 7})$$

Avec ω_h : la pulsation la plus faible des harmoniques à compenser.

II.3.4.3 Filtre de sortie

Appelée aussi '*Filtre de couplage*', ce filtre passif est l'élément essentiel de raccordement, il assure le transfert de l'énergie, entre le Point Commun de Connexion (PCC) et l'onduleur, trois exigences doivent être imposées pour l'estimation de la valeur de cette inductance du filtre de sortie :

- ☑ Assurer la dynamique du courant :

$$\frac{d}{dt} i_{ch_h} = \frac{d}{dt} i_{inj} \quad (\text{II. 8})$$

Avec i_{ch_h} le courant harmonique de la charge et i_{inj} le courant du filtre actif,

- ☑ Garantir le filtrage, pour un certain niveau de qualité, des harmoniques de courant dus à la commutation.
- ☑ Limiter la chute de tension au courant maximal, à une valeur inférieure à 20% de la tension cote source, niveau de potentiel au point PCC [49].

Deux types du filtre de sortie peuvent être employés : un filtre de sortie du premier ordre ou un filtre de sortie du troisième ordre.

II.3.4.3.1 Filtre du Premier ordre

Ce type de filtre est le plus utilisé dans la littérature [44], [50], [47]. Il est composé d'une inductance L_{fp} de résistance interne R_{fp} , comme le montre la Fig. II.13. Un filtre de ce type ne permet pas de satisfaire simultanément les deux critères de dimensionnement du filtre de sortie. En effet, seule une valeur faible de L_{fp} peut réaliser une bonne dynamique du filtre actif en satisfaisant l'égalité (II.8). Malheureusement, une valeur faible de L_{fp} permet à la majorité des composantes dues aux commutations de se retrouver côté réseau et par conséquent d'affecter les installations et les équipements électriques. Inversement, une valeur relativement élevée de L_{fp} va empêcher ces composantes de se propager sur le réseau électrique mais affectera la dynamique du filtre actif et dégradera alors la qualité de compensation.

Le bon dimensionnement du filtre de sortie du premier ordre dépendra donc du compromis à trouver entre la dynamique et l'efficacité du filtre actif parallèle. Ce compromis est très difficile à fixer sans l'emploi d'un filtre passif auxiliaire installé à la sortie de l'onduleur ou en amont du côté réseau [51] [52]. Cependant, ce filtre auxiliaire peut causer des effets secondaires non désirés comme la résonance avec d'autres éléments passifs installés sur le réseau électrique.

Dans le cas d'une modulation triangulaire, l'inductance doit aussi empêcher la pente des courants injectés par le filtre actif de dépasser la pente du signal triangulaire. La valeur de l'inductance [11], dans ce cas peut être estimée par :

$$L_{fp} = \frac{V_{dc} + \sqrt{3} \hat{V}}{4f_s \Delta i} \quad (\text{II. 9})$$

Où $\hat{V}$, f_s , et Δi sont respectivement la valeur crête de la tension simple, la fréquence du signal triangulaire et l'ondulation maximale admise du courant durant une période de commutation.

II.3.4.3.2 Filtre du troisième ordre

Afin d'échapper aux problèmes évoqués dans le cas du filtre de sortie du premier ordre [53], [54], un filtre de sortie du troisième ordre est proposé. Ce filtre de sortie, souvent appelé *filtre en T*, se compose de deux inductances (L_{f1} , L_{f2}) de résistances internes respectives (R_{f1} , R_{f2}) et d'une capacité C_f . Une petite résistance d'amortissement R_f a été ajoutée en série avec la capacité C_f comme le montre la Fig. II.14. Ce type de filtre et grâce au degré de liberté supplémentaire, fourni par la capacité C_f , peut assurer les deux critères du dimensionnement du filtre de sortie que nous avons évoqués précédemment [21].

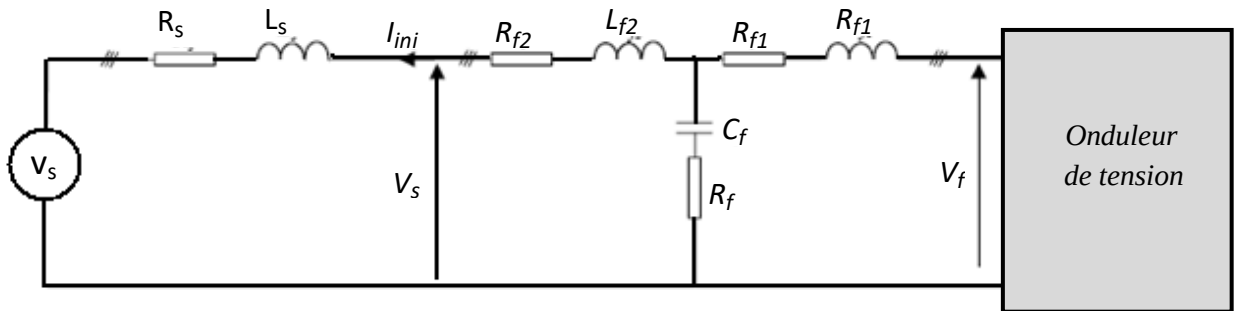


Fig. II.14 : Schéma équivalent par phase du filtre de sortie du troisième ordre en T

II.3.5 Etude de la partie contrôle-commande

La stratégie de commande se base principalement sur la méthode des courants perturbateurs. ‘ *L’identification des harmoniques à partir de la détection des courants de la charge* ’ est la méthode la plus appropriée au filtre actif parallèle installé par le consommateur pour compenser les courants perturbateurs causés par ses charges polluantes [55]. Cette méthode détecte les courants de la charge qui circulent en aval du point de raccordement, et donc extrait les courants harmoniques.

Dans ce qui suit nous présenterons les trois principaux éléments de la partie contrôle commande du FAP : la régulation de la tension continue, la commande de l’onduleur de tension, la régulation des courant injectées au réseau électrique et la méthode d’identification des courants perturbés.

II.3.5.1 Régulation de la tension continue

La tension moyenne aux bornes du condensateur doit être maintenue à une valeur constante. Les causes de sa variation sont essentiellement les pertes dans les interrupteurs (en conduction et en commutation), dans les inductances de découplage L_{fp} et l'injection des courants fondamentaux pendant les régimes transitoires [56], [57], [58]. Il en découle alors une variation de la tension continue aux bornes du condensateur alimentant le filtre actif. Pour la régulation on utilise la relation entre la puissance active absorbée par le condensateur et la tension aux bornes de celui-ci :

$$P_c = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} C_{dc} V_c^2 \right) \quad (\text{II.10})$$

Notons que la relation (II.10) est non linéaire. Pour des faibles variations de la tension V_c autour de sa référence V_{c-ref} , elle peut être linéarisée à travers les relations suivantes :

$$P_c = C_{dc} V_{c-ref} \frac{d}{dt} (V_c) \quad (\text{II.11})$$

En appliquant la transformée de Laplace :

$$V_c(s) = \left(\frac{1}{V_{c-ref} C_{dc} S} \right) P_c(s) \quad (\text{II.12})$$

A partir de la relation (II.12), et en prenant en compte le régulateur proportionnel (K_p), la boucle de régulation de la tension continue peut-être représentée par le schéma de la Fig. II.15. Le choix du paramètre K_p aura pour objectif d'obtenir un temps de réponse minimal afin de ne pas nuire à la dynamique du filtre actif [59].

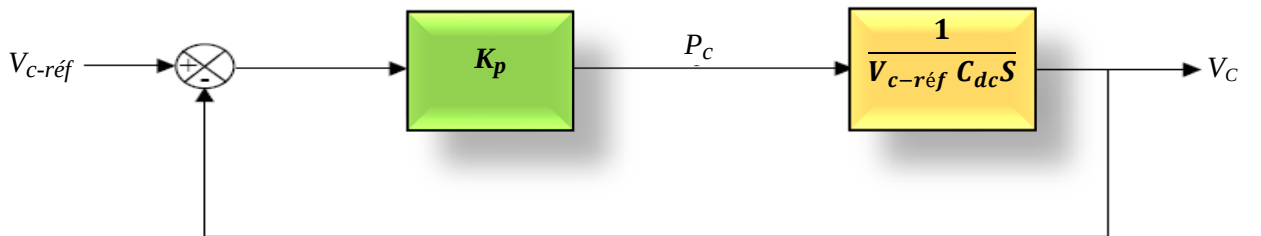


Fig. II.15 : Boucle de régulation de la tension continue

II.3.5.2 Commande de l'onduleur

L'objectif de la commande de l'onduleur est de déterminer les instants d'ouverture et de fermeture des interrupteurs qui le composent de façon à obtenir une tension de sortie, côté alternatif, qui suit le plus fidèlement possible la consigne ou tension de référence (pas forcément sinusoïdale) en minimisant ses harmoniques non désirées (harmoniques de commutation) et ce, en optimisant l'amplitude pour une tension du bus continue donnée [60][61]. Le choix du type de commande dépend essentiellement de deux paramètres : d'une part des caractéristiques souhaitées de la tension de sortie (distorsion admissible, spectre basse fréquence souhaité, etc.) et d'autre part de la fréquence de découpage des semi-conducteurs utilisables à la puissance de l'application. Toutefois, deux méthodes de commande peuvent être utilisées :

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

II.3.5.3 Régulation du courant du FAP

De la Fig. II.13, en négligeant les effets des résistances du filtre de sortie sur le courant injecté par le filtre I_{inj} , nous pouvons écrire la relation suivante :

$$L_{fp} \frac{d}{dt} i_{inj} = V_s - V_f \quad (\text{II. 13})$$

Notons par ΔI_f la différence entre le courant de référence et le courant mesuré à partir de la relation suivante :

$$\Delta I_f = i_{réf} - i_{inj} \quad (\text{II. 14})$$

Des équations (2.13) et (2.14), nous obtenons l'expression ci-dessous :

$$L_{fp} \frac{d}{dt} \Delta I_f = \left(V_s + L_{fp} \frac{d}{dt} i_{réf} \right) - V_f \quad (\text{II. 15})$$

Le premier terme de la partie droite de la relation (II.15) peut être défini comme tension de référence (V_{f-ref}), ce qui nous donne l'expression suivante :

$$V_{f-ref} = V_s + L_{fp} \frac{d}{dt} i_{réf} \quad (II. 16)$$

L'écart entre V_{f-ref} et V_f produit alors une erreur sur le courant. Selon la relation (II.16), la tension de référence est composée de deux termes à fréquences différentes. Le premier représente la tension du réseau V_s directement mesurable. Le second est égal à la chute de tension aux bornes de l'inductance L_{fp} , lorsque celle-ci est traversée par un courant égal à celui de la référence. Ce terme doit être élaboré par un régulateur de courant, comme le montre la Fig. 2.16.

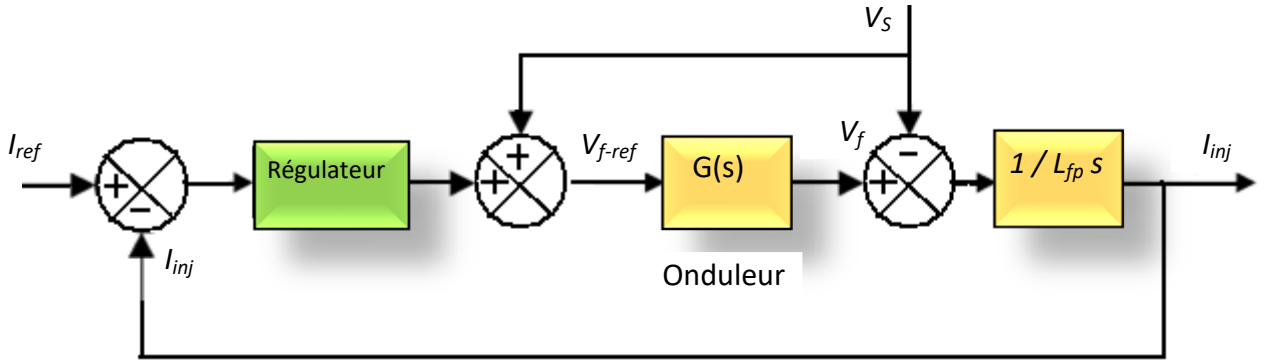


Fig. II.16 : Schéma de la régulation des courants du F.A.P

Dans ce schéma, $G(s)$ représente l'onduleur (à commande MLI) qui peut être modélisé par la relation suivante [62] :

$$G(s) = \frac{V_c}{2U_p} \quad (II. 17)$$

Avec : V_c : tension continue du condensateur de stockage d'énergie.

U_p : amplitude de la porteuse.

Si $V_c = 2U_p$, $G(s) = 1$ donc, la tension de sortie de l'onduleur V_f est égale à V_{f-ref} . Dans ce cas le schéma de la régulation simplifié est représenté par la fig. II.17:

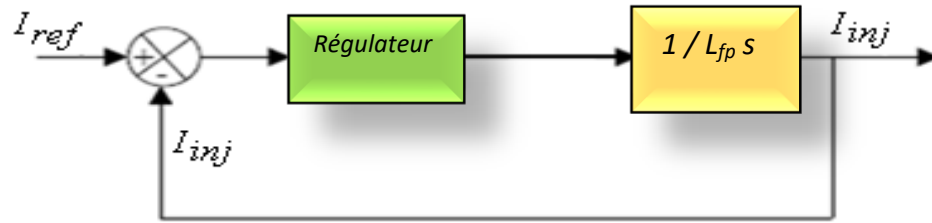


Fig. II.17 : Schéma simplifié de régulation des courants du F.A.P

Le régulateur peut être un régulateur PI ou autre selon les objectifs généraux de la régulation ainsi qu'aux contraintes liées au rejet des perturbations [63].

II.3.5.4 La méthode d'identification des courants perturbés

Pour le courant du côté réseau sera sinusoïdal, il faut générer des courants harmoniques de même amplitude que les courants perturbés mais de phase opposée à ceux-ci. Pour cela, on a donc besoin d'identifier les courants harmoniques de la charge.

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

- ☑ **Les méthodes utilisées dans le domaine fréquentiel** : Cette famille utilise la transformée de Fourier rapide dans le domaine fréquentiel, pour extraire les harmoniques du courant. Cette méthode est bien adaptée aux charges où le contenu harmonique varie lentement. Elle donne aussi l'avantage de sélectionner les harmoniques individuellement et de ne choisir de compenser que les plus prépondérants. Il est à noter que cette méthode nécessite une grande puissance de calcul afin de réaliser. En temps réel, toutes les transformations nécessaires pour extraire les harmoniques [64]. [45]
- ☑ **Les méthodes utilisées dans le domaine temporel** : famille est basée sur le calcul des puissances instantanées dans le domaine temporel. Certaines de ces méthodes se basent sur le calcul des puissances harmoniques de la charge non linéaire. D'autres peuvent être utilisées pour compenser à la fois les courants harmoniques et la puissance réactive, en se basant sur la soustraction de la partie fondamentale active du courant total [28].

La méthode d'identification la plus utilisée est celle appelée méthode des puissances instantanées p-q.

II.4 Filtre actif série (FAS)

C'est une source de tension placée en série entre le réseau et la charge sensible à protéger contre les perturbations de tension du réseau électrique. Cette source de tension correspond à un onduleur triphasé avec un filtre LC de sortie (qui sert à filtrer les harmoniques de commutation de l'onduleur) connectés au réseau au travers de trois transformateurs (de courant) de raccordement. Du côté continu de l'onduleur on dispose d'un système de stockage d'énergie sous forme de source de tension continue, qui fournit l'énergie nécessaire pour compenser les perturbations de la tension du réseau. Le système de stockage souvent utilisé est basé sur un condensateur dont la tension peut être réglée par une source de courant extérieure.

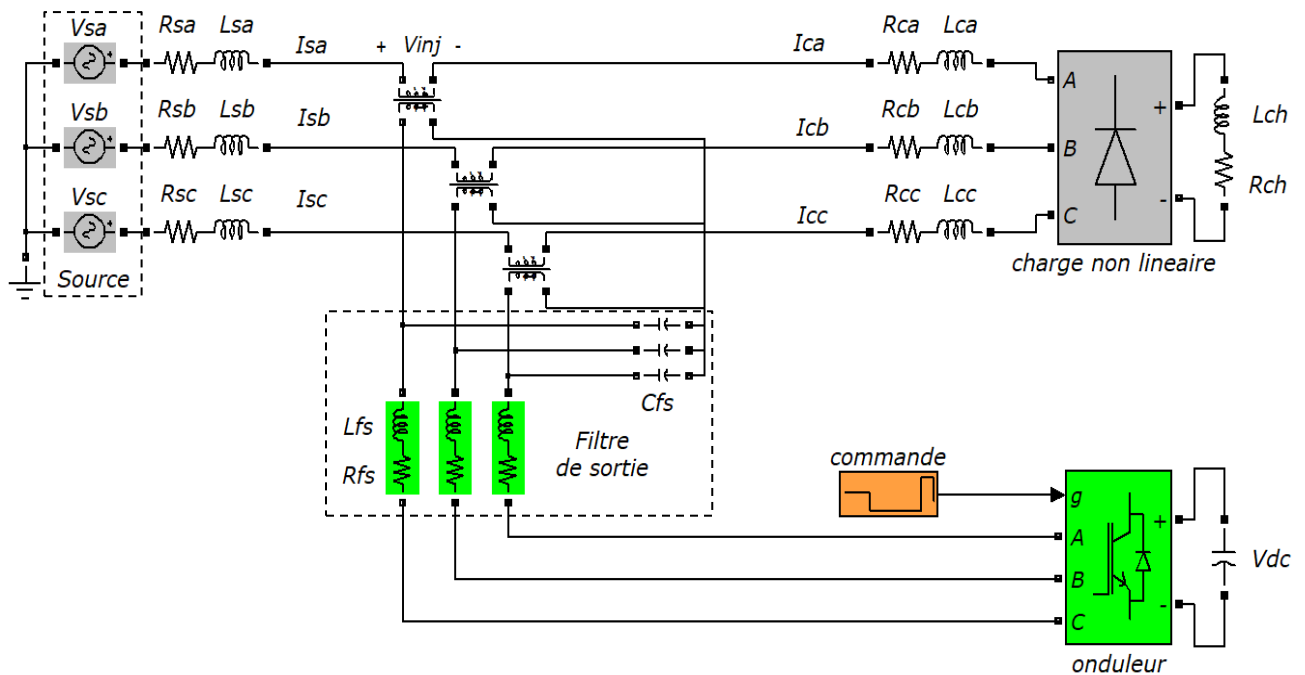


Fig. II.18 : Filtre actif série avec une charge non-linéaire

II.4.1 Principe de fonctionnement du FAS

Le filtre actif série est une solution pour protéger des charges sensibles contre les perturbations de tension du réseau électrique. Il se comporte comme une source de tension qui engendre des tensions harmoniques dont la somme avec la tension réseau est une onde sinusoïdale [65]. Il s'insère entre le réseau perturbé et la charge à protéger par l'intermédiaire d'un transformateur d'injection de tension. En effet, l'objectif primordial du filtre actif série (FAS) consiste à protéger les installations sensibles aux tensions perturbatrices

(harmoniques, surtensions, creux, déséquilibres) provenant de la source et également celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau [41] [66].

Le schéma de principe d'un filtre actif série est donné par la Fig. II.18. il est composé principalement de deux blocs l'un de puissance l'autre de commande. Le bloc puissance est constitué le plus souvent d'un convertisseur de tension triphasé deux ou trois niveaux, d'un système d'alimentation en tension continue, d'un filtre de sortie et de trois transformateurs monophasés d'injection de tension. Le bloc commande consiste en l'identification des tensions perturbatrices et du contrôle des tensions injectées au réseau [67].

II.4.2 Modèle équivalent du filtre actif série

Dans ce cas la charge non-linéaire considérée est un pont de diodes triphasé qui alimente une charge inductive. Cette charge est modélisée par une charge linéaire équivalente en parallèle avec une source de courant harmonique. La Fig. II.19 montre le système simplifié que nous allons étudier et le circuit équivalent. Les harmoniques, produits par le pont à diode triphasé, ont les rangs $6k \pm 1$ ($k = 1, 2, 3, \dots$ etc.). Les rangs pris en compte dans ce cas, sont : $h = 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, 29, 31, 35, 37, 41, 43, 47$ et 49 . [21]

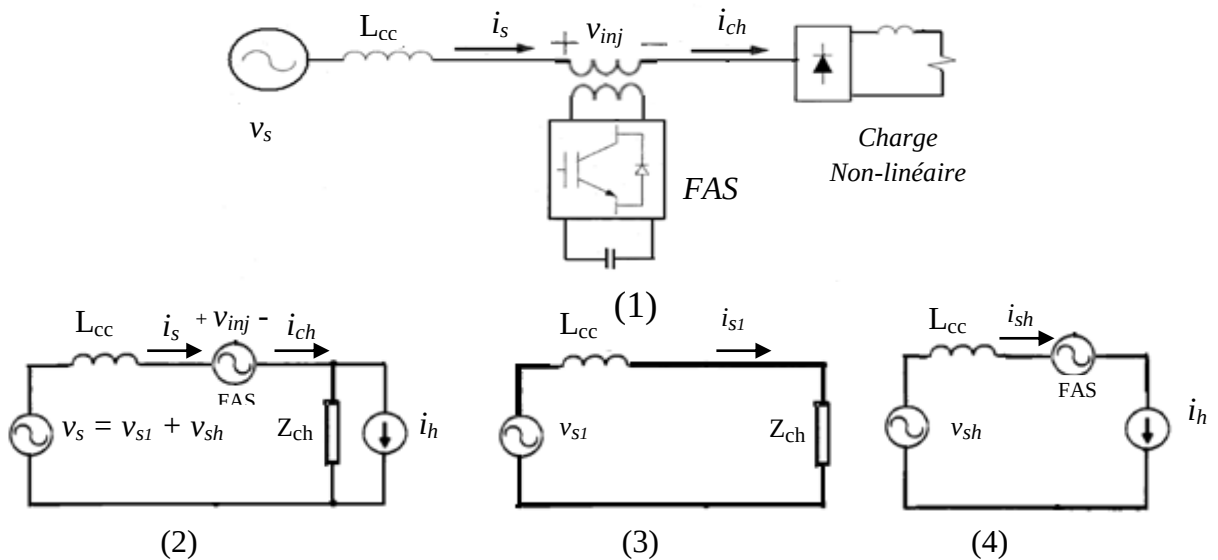


Fig. II.19 : FAS raccordé à l'entrée d'une charge non-linéaire. (1) Représentation unifilaire du système. (2) Circuit équivalent, (3) Circuit équivalent pour la fondamentale, (4) Circuit équivalent pour les harmoniques.

II.4.3 Structure générale du filtre actif série

Plusieurs structures du filtre actif série ont été proposées dans la littérature. La plus utilisée est présentée sur la Fig. II.20. Cette structure, est composée d'une partie puissance et d'une partie contrôle commande.

La partie puissance se compose des éléments suivants :

- ☑ 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,
- ☑ Un élément de stockage d'énergie avec un système d'alimentation DC,
- ☑ Un filtre de sortie,
- ☑ Trois transformateurs monophasés d'injection de tension.

La partie contrôle-commande se compose des éléments suivants :

- ☑ L'identification des tensions perturbées,
- ☑ La commande de l'onduleur de tension,
- ☑ La régulation de la tension injectée dans le réseau à partir de l'onduleur de tension.

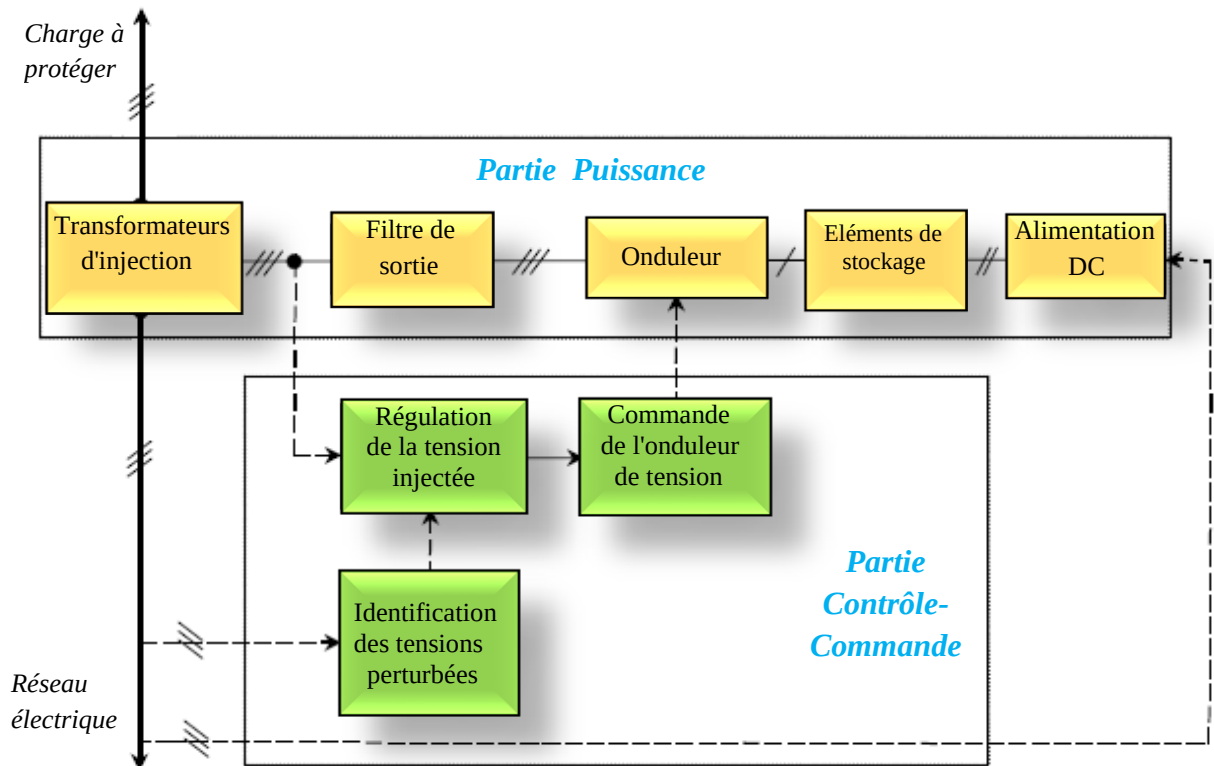


Fig. II.20 : Structure générale du filtre actif série

II.4.3.1 Etude de la partie puissance du filtre actif série

Dans cette partie nous sommes intéressés à la partie puissance du filtre actif série, comme le montre la Fig. II.20, qui est constituée d'un :

II.4.3.1.1 Onduleur de tension

La structure générale d'un onduleur triphasé à structure de tension présente par la Fig. II.21 se compose de trois bras à interrupteurs réversibles en courant, commandés à la fermeture et à l'ouverture, réalisés à partir d'un transistor (GTO ou IGBT) et d'une diode en antiparallèle.

L'onduleur de tension fait l'interface entre deux types :

- ☑ Source de courant du coté alternatif;
- ☑ Source de tension du coté continu

La présence de ces sources impose le respect des règles de fonctionnement suivantes [68] :

- ⇒ La source de tension aux bornes de l'onduleur ne doit pas être court-circuitée, par conséquent deux interrupteurs d'un même bras doivent être commandés d'une manière complémentaire.
- ⇒ La source de courant coté alternatif ne doit pas être en court-circuit, d'où la mise en antiparallèle de diodes avec les interrupteurs

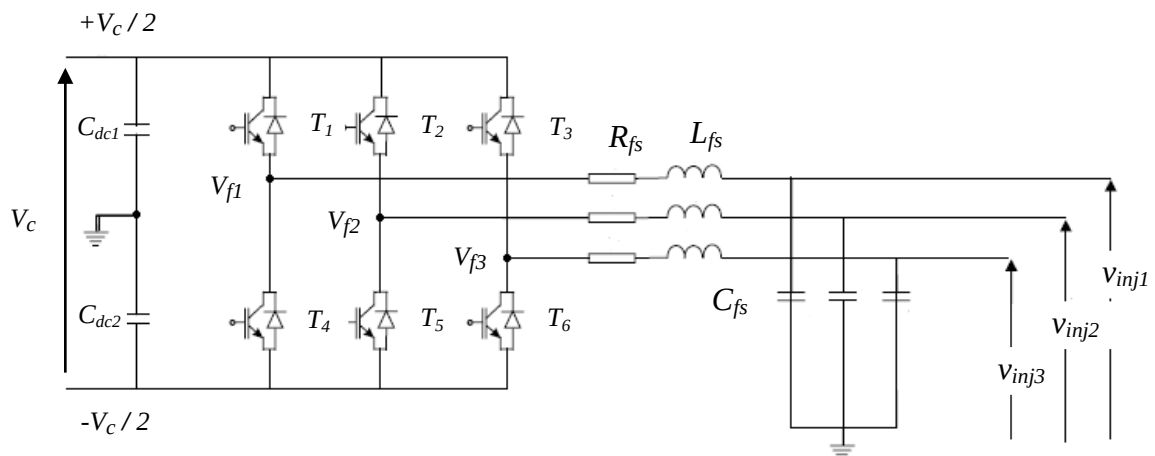


Fig. II.21 : Onduleur de tension triphasé

II.4.3.1.2 Système de stockage d'énergie :

Le stockage de l'énergie est réalisé côté continu à l'aide d'un système de stockage capacitif. Le choix d'un système de stockage à deux condensateurs avec un point milieu (C_{dc1} , C_{dc2}), comme le montre la Fig. II.21, donne la possibilité de mesurer, aux bornes des condensateurs, une tension continue V_{dc} sans fluctuations. Cela permet aussi d'avoir trois phases indépendantes du *filtre actif série* fonctionnant comme un demi-pont.

En effet, un système de stockage sans point milieu permet à l'onduleur d'avoir une tension de sortie dont la valeur maximale est de $V_f = 2/3 \cdot V_{dc}$, au lieu d'une valeur maximale de $V_{dc}/2$ dans le cas d'une structure avec un point milieu. Afin d'assurer que l'onduleur dispose d'une tension maximale à sa sortie, il faut que les deux tensions continues ($\pm V_{dc}/2$) soient maintenues dans une plage bien spécifiée.

II.4.3.1.3 Filtre de sortie (filtre passe bas)

Le filtre de sortie d'un *filtre actif série* est généralement un filtre passif du deuxième ordre ($L_f C_f R_f$), comme le montre la Fig. II.22. L'ensemble onduleur et filtre de sortie se comportant comme une source de tension, le filtre de sortie sert d'une part à atténuer les composantes dues aux commutations de l'onduleur, d'autre part à connecter le filtre actif au réseau électrique à travers les transformateurs d'injection [69].

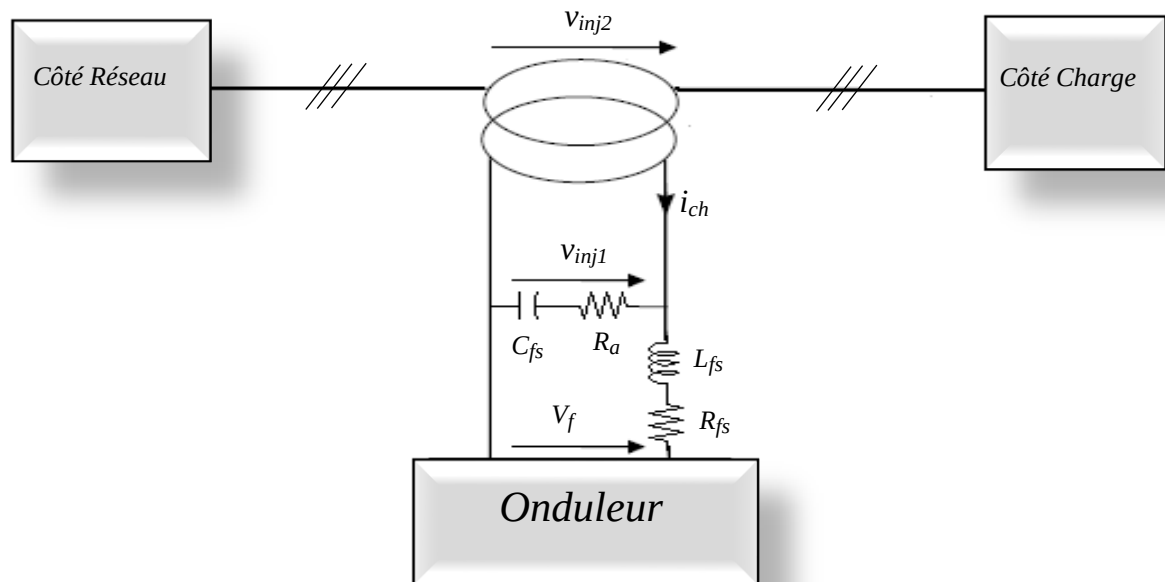


Fig. II.22: Schéma de modélisation du filtre de sortie

R_{fs} : la résistance interne de l'inductance L_{fs} , R_a est une résistance d'amortissement, V_f la tension de sortie de l'onduleur, v_{inj1} la tension aux bornes du primaire du transformateur d'injection, et i_{ch} le courant de la charge à protéger.

Pour trouver v_{inj1} en fonction de V_f et i_{ch} on va utiliser le théorème de superposition :

- a. $i_{ch} = 0$ (la boucle de i_{ch} ouvert) dans ce cas nous aurons un diviseur de tension (S est l'opérateur de Laplace) :

$$v_{inja} = \frac{R_a C_f S + 1}{L_{fs} C_{fs} S^2 + (R_{fs} + R_a) C_{fs} S + 1} V_f \quad (\text{II. 18})$$

Cette équation est la fonction de transfert du filtre de sortie correspondant au système d'origine.

- b. $V_f = 0$ (V_f court-circuité) dans ce cas nous aurons un diviseur de courant :

$$v_{injb} = \frac{R_a L_{fs} C_{fs}^2 S^3 + (L_{fs} + R_{fs} R_a) C_{fs} S^2 + R_{fs} C_{fs} S}{L_{fs} C_{fs} S^2 + (R_{fs} + R_a) C_{fs} S + 1} i_{ch} \quad (\text{II. 19})$$

Cette équation est la fonction de transfert correspondant au modèle de perturbation.

Selon le théorème de superposition $v_{inj1} = v_{inja} + v_{injb}$ et si on suppose un taux de transformation unitaire ($v_{inj1} = v_{inj2} = v_{inj}$), donc :

$$v_{inj} = \frac{R_a C_{fs} S + 1}{L_{fs} C_{fs} S^2 + (R_{fs} + R_a) C_{fs} S + 1} V_f + \frac{R_a L_{fs} C_{fs}^2 S^3 + (L_{fs} + R_{fs} R_a) C_{fs} S^2 + R_{fs} C_{fs} S}{L_{fs} C_{fs} S^2 + (R_{fs} + R_a) C_{fs} S + 1} i_{ch} \quad (\text{II. 20})$$

Cette équation est la fonction de transfert du FAS.

II.4.3.1.4 Transformateurs d'injection

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, comme le montre la Fig. II.22. Par conséquent, ces transformateurs, considérés comme des transformateurs de courant, permettent de réduire, par leurs taux de transformation, le courant de la charge traversant l'onduleur de tension. A cela s'ajoute que ces transformateurs, grâce à leurs caractéristiques magnétiques de saturation, contribuent à la protection du FAS contre les défauts côté charge [70].

L'inconvénient de l'emploi de ces transformateurs est leurs coûts élevés et la chute de tension occasionnée par leurs inductances de fuite.

Le filtre série est protégé contre un court-circuit en aval côté charge par un système by-pass, constitué par une impédance variante, par deux thyristors en antiparallèle en série avec une petite résistance, et par des transformateurs à circuit magnétique saturable [70]. 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 augmentant l'énergie nécessaire pour compenser les mêmes creux détensions [71].

II.4.3.2 Etude de la partie commande

La technique de commande se base principalement sur la méthode de détection des tensions perturbatrices. Dans ce qui suit nous présenterons les trois principaux éléments de la partie contrôle commande du filtre actif série :

- L'identification des tensions perturbatrices.
- La commande de l'onduleur de tension.
- La régulation des tensions injectées au réseau électrique.

II.4.3.2.1 Méthodes d'identification des tensions perturbatrices

La méthode d'identification sert à calculer les tensions perturbatrices qui sont injectées par l'onduleur, en opposition de phase, pour dépolluer la tension aux bornes de la charge à protéger. Ces tensions perturbatrices représentent les tensions déséquilibrées et harmoniques, les surtensions, et les creux de tension. Plusieurs méthodes d'identification ont déjà été proposées dans la littérature. La méthode d'identification des tensions perturbatrices pour le FAS la plus répandue dans la littérature est la méthode du système de référence synchrone d-q (synchronies d-q référencé frame méthode) [72], une autre méthode moins connue mais efficace est la méthode d'identification des tensions perturbatrices basée sur l'utilisation du système à base de PLL [18].

II.4.3.2.2 Commande de l'onduleur

L'objectif de la commande de l'onduleur est de déterminer les instants d'ouverture et de fermeture des interrupteurs qui le composent de façon à obtenir une tension de sortie, côté alternatif, qui suit le plus fidèlement possible la consigne ou tension de référence en minimisant ses harmoniques non désirées (harmoniques de commutation) et ce, en optimisant l'amplitude pour une tension du bus continue donnée [60][61]. Le choix du type de commande dépend essentiellement de deux paramètres : d'une part des caractéristiques souhaitées de la tension de sortie (distorsion admissible, spectre basse fréquence souhaité, etc.) et d'autre part de la fréquence de découpage des semi-conducteurs utilisables à la puissance de l'application.

Toutefois, deux méthodes de commande peuvent être utilisées :

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

II.4.3.2.3 Régulation de la tension du filtre actif série

La fonction de transfert du filtre actif série donnée par l'équation (II.20) peut être écrite de la forme suivante :

$$v_{inj} = \frac{B_1(s)}{A(s)} V_f + \frac{B_2(s)}{A(s)} i_{ch} \quad (\text{II. 21})$$

Avec $B_1(s)$, $B_2(s)$ et $A(s)$ données par les équations suivantes :

$$B_1(s) = R_a C_{fs} S + 1 \quad (\text{II. 22})$$

$$B_2(s) = R_a L_{fs} C_{fs}^2 S^3 + (L_{fs} + R_{fs} R_a) C_{fs} S^2 + R_{fs} C_{fs} S \quad (\text{II. 23})$$

$$A(s) = L_{fs} C_{fs} S^2 + (R_{fs} + R_a) C_{fs} S + 1 \quad (\text{II. 24})$$

Le schéma global de la boucle de régulation de tension du *filtre actif série* est donné par la Fig. II.23.

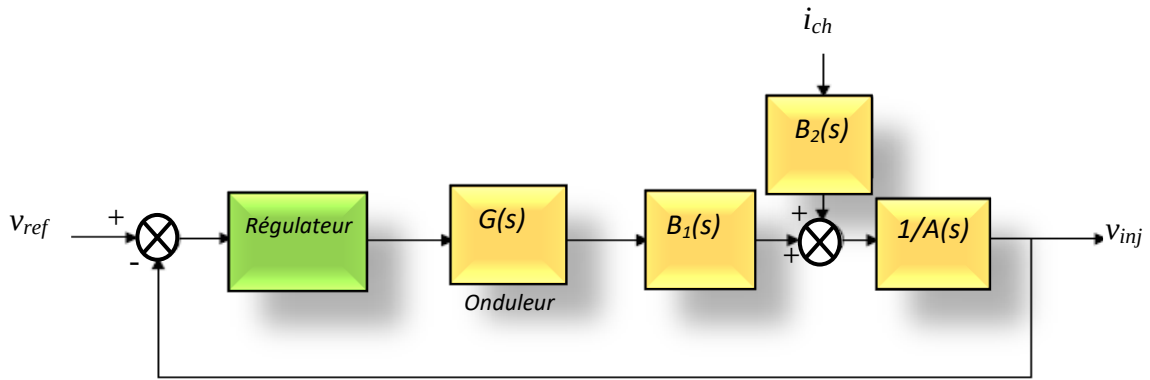


Fig. II.23 : Schéma de la régulation de la tension du F.A.S

Dans ce schéma, $G(s)$ représente l'onduleur (à commande MLI) qui peut être modélisé par la relation suivante [62] :

$$G(s) = \frac{V_c}{2U_p} \quad (\text{II. 25})$$

Avec : V_c : tension continue du condensateur de stockage d'énergie.

U_p : amplitude de la porteuse.

Si $V_c = 2U_p$, $G(s) = 1$ donc, le schéma de la régulation simplifié est représenté par la Fig. II.24.

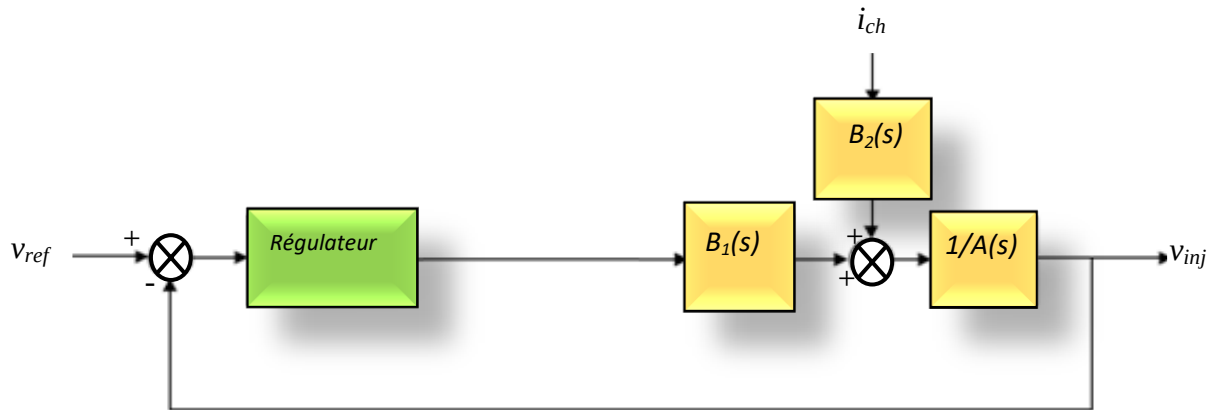


Fig. II.24 : Schéma simplifié de régulation de la tension du F.A.S

II.5 Comparaison entre les types de filtrage

Toute solution a des avantages mais également des inconvénients, ainsi nous avons

jugé bon de les résumer dans le tableau suivant : [72]

Tab.II.2 : un récapitulatif des avantages et inconvénients de quatre Principes de dépollution

Principes	Avantages	Inconvénients
Filtrage passif	☒ Amélioration de la forme du courant.	☒ Risque de résonance, pas d'adaptabilité.
Filtrage actif série	☒ Amélioration de la forme de la tension, adaptabilité aux variations de charge et du réseau électrique.	☒ Pas d'amélioration de la forme du courant.
Filtrage actif parallèle (shunt)	☒ Amélioration de la forme du courant, adaptabilité aux variations de charge et du réseau. ☒ Amélioration de facteur de puissance.	☒ Amélioration de la forme de la tension pas toujours évidente.
Combinaison parallèle-série actifs	☒ Amélioration de la forme du courant. ☒ Amélioration de la forme de la tension. ☒ Adaptabilité aux variations de charge et du réseau.	☒ Réalisation difficile.

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, on s'est intéressé à la présentation des différentes stratégies de détection des harmoniques qui affectant l'onde de tension et du courant dans le réseau électrique. Ces perturbations ont des effets néfastes sur les équipements électriques. Afin d'éviter les désagréments causés par la présence de courants et de tensions harmoniques dans le réseau, plusieurs solutions traditionnelles et nouvelles de dépollution ont été présentées. Premièrement nous avons présenté les solutions traditionnelles les plus importantes qui sont des solutions facile et rapide pour certains cas de perturbations bien localisées et utilisent des composants passifs (inductances, condensateurs, transformateurs). Nous avons ensuite présenté les solutions modernes de dépollution qui se résument en l'utilisation des redresseurs à MLI appelés aussi redresseurs à absorption sinusoïdale, Système Power Line Communication PLC et des filtres actifs sont discutées.

- Le filtre actif parallèle conçu pour compenser toutes les perturbations de courant comme les harmoniques, les des équilibres et la puissance réactive.
- Le filtre actif série conçu pour compenser toutes les perturbations de tension comme les harmoniques, les des équilibres et les creux de tension.
- La combinaison parallèle-série active est la solution universelle pour compenser toutes les perturbations en courant et en tension.
- Des filtres hybrides actifs et passifs pour optimiser le rapport performance/coût du filtre actif.

Finalement, nous avons traité en détail le filtre actif parallèle (FAP) et le filtre actif série (FAS).

CHAPITRE III

LE CONDITIONNEUR DE PUISSANCE (UPQC)

Unified Power Quality Conditioner

III.1 Introduction

L'objectif principal d'un système de distribution électrique est d'assurer des tensions de formes sinusoïdales avec des grandeurs appropriées de la fréquence, de l'amplitude et de la phase pour les clients aux points de raccordement commun (PCC). Bien que les centrales de productions de l'énergie électrique distribuent des tensions presque sinusoïdales. Par contre l'augmentation des problèmes de perturbations sur les réseaux électriques, affecte de plus en plus cette qualité d'énergie. Parmi les perturbations les plus prépondérantes, les creux de tension, les harmoniques, qui sont dus à la prolifération des charges non linéaires dans les équipements industriels et domestiques et le déséquilibre de courant et/ou de tension engendré généralement par l'utilisation non symétrique des charges monophasées.

La plupart des charges des clients comme les ordinateurs, microcontrôleurs, contrôleurs programmables (PLCs) et les équipements électriques des hôpitaux sont sensibles et non protégés contre les perturbations électriques et leur opération appropriée dépend de la qualité de la tension qui leur est fournie des solutions divers de dépollution des réseaux électriques l'une plus intéressante que l'autre, ont été déjà proposées dans la littérature.

La combinaison des filtres actifs série et parallèle est appelée Unified Power Quality Conditioner (UPQC), est une solution plus adaptée pour la dépollution des réseaux de distribution d'énergie. Il compense non seulement les courants harmoniques et le déséquilibre créés par une charge non-linéaire, mais aussi les perturbations harmoniques et le déséquilibre de la tension de source grâce à la combinaison parallèle-série, qui résulte de l'association de deux filtres actifs parallèle et série et donc améliore la qualité d'énergie en offrant à d'autres charges sensibles un bon fonctionnement.

Ce chapitre sera consacré à la présentation de l'UPQC. Premièrement nous présenteront leur structure générale et leur emplacement. Ensuite nous étudierons la méthode des puissances instantanées (p-q). Puis nous étudierons la commande de l'UPQC utilisons MLI associé au régulateur PI.

III.2 Le conditionneur de Puissance (UPQC)

La combinaison série-parallèle actifs, appelée en anglais '*Unified Power Quality Conditioner (UPQC)*', résulte de l'association des deux filtres actifs série et parallèle (Fig.

III.1). Profitant des avantages des deux filtres, 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 [76] [77].

L'UPQC peut compenser: le creux et la surtension de la tension d'alimentation et le déséquilibre ou les courants harmoniques, la puissance réactive et les courants négatifs avec séquences zéro (courant neutre). L'UPQC a la capacité d'améliorer la qualité de la puissance au niveau des réseaux de distributions ou industriels. Enfin, l'UPQC devrait être l'une des plus puissantes solutions pour les charges sensibles. La Fig. III.1 montre la structure générale d'un UPQC avec la combinaison des filtres actifs série et shunt [78].

L'UPQC sera installé selon les besoins. Ainsi, il protège contre les perturbations de la tension du réseau du côté de la charge et protège aussi les autres consommateurs du réseau de distribution.

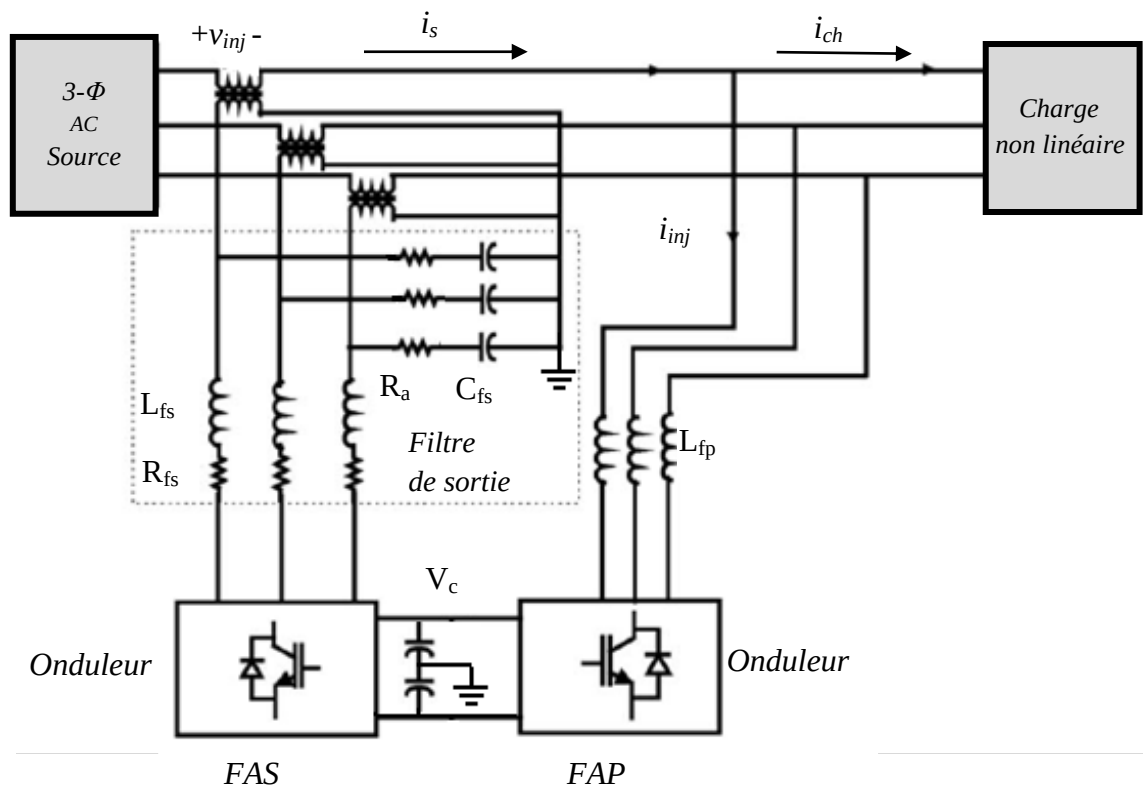


Fig. III.1 : Filtre actif combiné série-parallèle (UPQC)

III.3 Structure générale et emplacement de l'UPQC

La structure générale de l'UPQC est composée de deux parties: filtre actif parallèle et filtre actif série comme le montre la Fig. III.1 Ces deux filtres ont été présentés d'une manière détaillée dans le chapitre précédent.

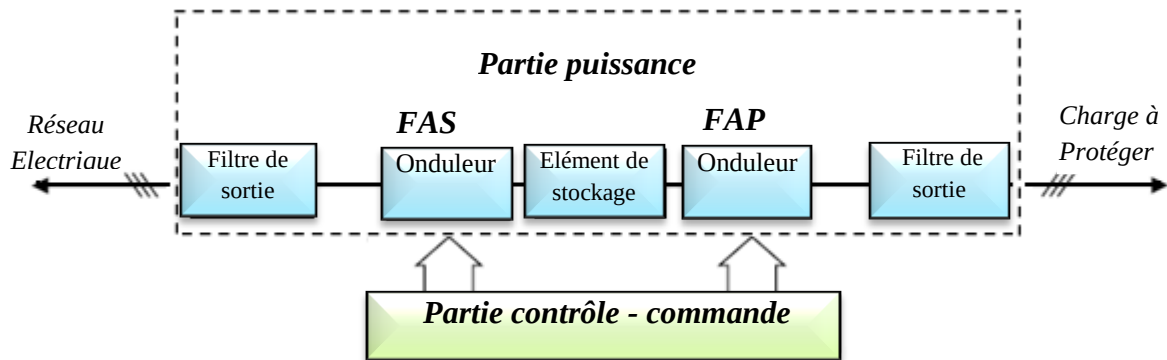


Fig. III.2 : Structure générale de l'UPQC

Deux configurations sont possibles pour un conditionneur actif de puissance (UPQC) en se basant sur l'emplacement du filtre actif parallèle :

Dans la première structure, le filtre actif parallèle est placé côté charge (Fig. III.3.1). Dans ce cas le filtre actif parallèle compense les courants harmoniques et les courants réactifs de la charge non linéaire. Le filtre série ne voit qu'une charge équivalente linéaire équilibrée résistive. Le transformateur série sera parcouru par un courant quasiment sinusoïdal, ce qui nous mène à un système robuste avec réduction du prix total du système. Le filtre actif série à son tour permet la compensation des perturbations côté réseau électrique, telles que, les harmoniques de tension et les creux de tensions etc... Ce qui mène à avoir une tension sinusoïdale au point de raccordement du filtre actif parallèle et aux bornes de la charge. L'inconvénient de cette structure est que le courant demandé par la charge et celui du filtre actif parallèle traversent le filtre actif série, ce dernier sera donc surdimensionné.

Dans la deuxième structure, le filtre actif parallèle est placé côté réseau (Fig. III.3.2). Seul le courant de la charge passe à travers le filtre série, l'ondulation du courant, causée par les commutations de l'onduleur du filtre actif parallèle ne traverse pas l'inductance du transformateur série et la tension au point de raccordement sera moins perturbée. Par contre le

filtre actif parallèle n'est pas protégé contre les perturbations en tension provenant du réseau (harmoniques et les creux de tensions, surtension etc...) et le courant de la charge non linéaire circule dans le filtre actif série et par conséquent dans le transformateur, cela conduit à l'augmentation de la taille et le prix de ce dernier.

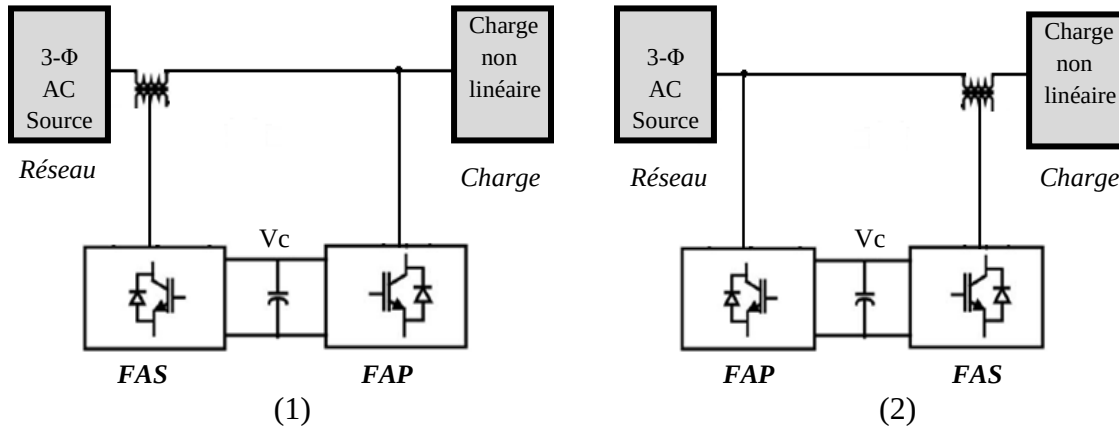


Fig. III.3 : Emplacements de l'UPQC: (1) FAP mis côté charge (2) FAP mis côté réseau

Dans ce travail, le *filtre actif série* sera installé côté réseau afin de dépolluer la source des tensions perturbatrices. En effet, le système à base de PLL, est utilisé pour l'identification des tensions perturbatrices par contre la méthode p-q est utilisée pour l'identification des courants perturbateurs ainsi que la régulation de la tension continue (V_c).

III.4 Commande du Conditionneur de puissance (UPQC)

L'objectif de la commande des onduleurs de l'UPQC est de déterminer les instants d'ouverture et de fermeture des interrupteurs qui les composent de façon à obtenir une tension (ou courant) de sortie, côté alternatif, qui suit le plus fidèlement possible la consigne (tension ou courant de référence) en minimisant ses harmoniques non désirés (harmoniques de commutation) et ce, en optimisant l'amplitude pour une tension du bus continue donnée. Le choix du type de commande dépend essentiellement de deux paramètres : d'une part des caractéristiques souhaitées de la tension (ou courant) de sortie (distorsion admissible, spectre basse fréquence souhaité, etc.) et d'autre part de la fréquence de commutation des semi-conducteurs utilisables à la puissance de l'application. Toutefois, deux méthodes de commande sont utilisées dans ce travail :

- ☑ la commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI),
- ☑ la commande par hystérésis.

III.4.1 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)

Afin de contourner le problème de la fréquence de commutation des interrupteurs des onduleurs de l'UPQC, nous introduirons la *commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)*. La technique de commande par MLI résout le problème de la maîtrise de la fréquence de commutation en fonctionnant avec une fréquence fixe facile à filtrer en aval de l'onduleur. La plus simple et la plus connue des modulations de largeur d'impulsion est sans doute la MLI à échantillonnage naturel. Cette technique de commande met en œuvre d'abord un régulateur qui détermine la tension de référence de l'onduleur (modulatrice) à partir de l'écart entre le courant (ou la tension) mesuré et sa référence. Cette dernière est ensuite comparée avec un signal triangulaire (porteuse à fréquence élevée fixant la fréquence de commutation). La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs. Le schéma de principe est donné par la Fig III.4.

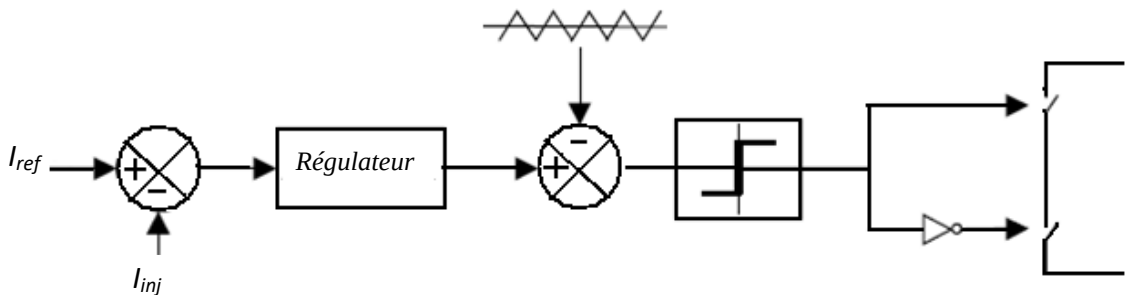


Fig. III.4 : Principe de commande des courants par MLI

Selon la Fig. III.4, on peut dire que l'efficacité de la commande MLI dépend étroitement sur le choix et la fiabilité du régulateur. Dans ce contexte on va étudier le régulateur PI.

III.4.2 Commande par hystérésis

La commande par hystérésis, appelée aussi commande en tout ou rien, est une commande non linéaire qui utilise l'erreur existante entre le courant (ou tension) de référence et le courant (ou tension) produit par l'onduleur comme le montre la Fig. III.5 [80].

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.

La simplicité de la mise en œuvre, comme le montre la Fig. III.5, est le principal atout de cette technique. En revanche, les commutations évoluant librement à l'intérieur de bande d'hystérésis, on ne peut maîtriser correctement le spectre haut fréquence dû aux fréquences de commutations. Afin de résoudre ce problème de la maîtrise des fréquences de commutation et de sa répercussion sur les interrupteurs, une autre stratégie de commande peut être proposée à savoir la *commande par hystérésis à bande adaptative* [81]. Mais dans cette stratégie de commande, le fonctionnement avec une fréquence de commutation quasi fixe nous empêche de conserver l'avantage d'une rapidité illimitée obtenue par la commande par hystérésis.

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

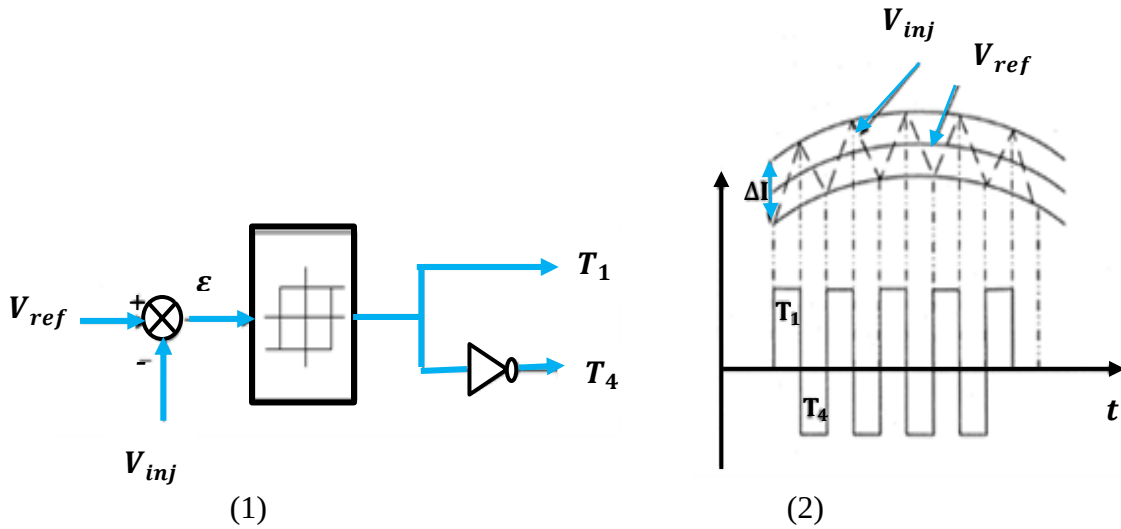


Fig. III.5 : contrôle par hystérésis. (1) : Principe de contrôle, (2) : Commande des interrupteurs
La fréquence de commutation maximale d'un onduleur commandé par hystérésis pour le cas du FAP est donnée par l'équation III.1 [82].

$$f_{com(max)} = \frac{2V_c}{9HL_{pf}} \quad (III. 1)$$

Avec H : Bande hystérésis

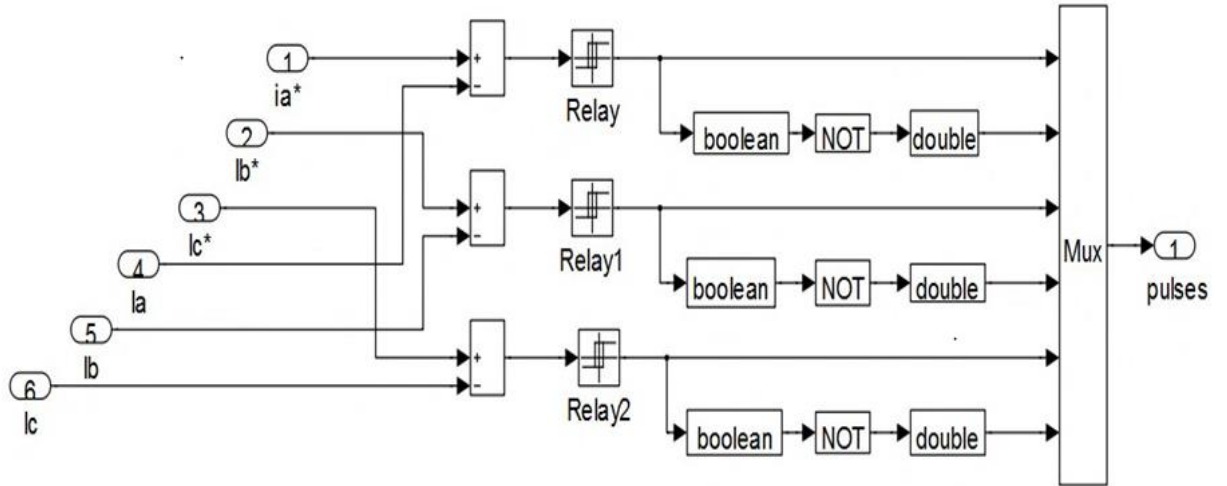


Fig. III.6 : La commande hystérésis à bande fixe sous MATLAB/Simulink

III.4.3 Régulateur proportionnel (P)

En régime permanent, les courants de référence ne contiennent pas de composante fondamentale et la puissance nécessaire pour compenser les pertes est faible. Dans ce cas, un simple régulateur proportionnel peut suffire. Cependant, pour éliminer les fluctuations de V_{dc} , un FPB du premier ordre peut être ajouté en sortie du régulateur proportionnel [96]. La fonction de transfert du régulateur est alors la suivante:

$$K(s) = \frac{K_c}{1 + \tau_c s} \quad (\text{III. 2})$$

Avec :

K_c : Gain statique du régulateur

τ_c : Constant de temps du filtre du premier ordre

En négligeant les pertes par commutation dans l'onduleur ainsi que les pertes dans l'inductance triphasée L_f , la relation liant la puissance active absorbée par le filtre actif et la tension aux bornes du condensateur peut s'écrire sous la forme suivante [95]: en boucle fermée la fonction de transfert est du second ordre et peut s'écrire sous la forme :

$$P_c = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} c_{dc} V_{dc}^2 \right) \quad (\text{III. 3})$$

Soit, après la transformation de Laplace :

$$V_{dc}^2(s) = \frac{2P_c(s)}{C_{dc} \cdot s} \quad (\text{III. 4})$$

La fonction de transfert en boucle fermée peut alors prendre la forme suivante :

$$F(s) = \frac{\omega_c^2}{s^2 + 2\zeta\omega_c s + \omega_c^2} \quad (\text{III. 5})$$

Les paramètres caractéristiques de cette fonction sont donnés :

$$\omega_c = \sqrt{\frac{2K_c}{C_{dc}\tau_c}} \quad \text{et} \quad \zeta_c = \frac{1}{2\sqrt{2}} \sqrt{\frac{C_{dc}}{\tau_c K_c}} \quad (\text{III. 6})$$

Afin d'obtenir un amortissement suffisant, le produit $K_c \tau_c$ doit être limité. Une valeur de ζ_c comprise entre 0,5 et 0,707 réalise un bon compromis entre performances dynamique et statique.

Le choix du paramètre statique. Le choix du paramètre K_c a pour objectif d'obtenir un temps de réponse minimal afin de ne pas nuire à la dynamique du filtre actif.

La boucle de régulation de la tension continue est représentée par le schéma de la Fig. III.7.

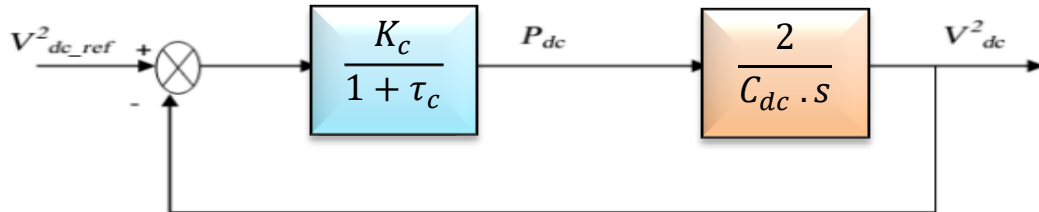


Fig. III.7 : Schéma fonctionnel de la régulation de V_{dc} avec le régulateur P

III.4.4 Régulateur PI

C'est un régulateur qui est composé d'un terme d'action proportionnel et d'un terme d'action intégrale. La fonction de transfert d'un régulateur PI est de la forme :

$$R(s) = K_p + \frac{K_i}{s} = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} \right) \quad (\text{III. 7})$$

$$\text{avec, } \tau_i = \frac{K_p}{K_i} \quad (\text{III. 8})$$

K_p est le gain du régulateur, K_i est la constante d'intégration et τ_i est la constante de temps d'intégration. La présence de l'intégrateur assurera une précision statique meilleure (erreur statique peut être nulle). Le correcteur proportionnel-intégral (PI) est le correcteur le plus classiquement utilisé pour le contrôle de tension et surtout de courant [66][84], nous l'avons choisi ici pour sa simplicité et son efficacité. L'objectif de la régulation est de contrôler le courant (ou la tension) à la sortie de l'onduleur de telle sorte qu'il suive le plus fidèlement possible la consigne (référence). La mise au point d'un régulateur doit prendre en compte les critères suivants :

- ☑ la bande passante du régulateur doit être assez large afin de ne pas introduire un retard important (elle doit inclure le rang 50),
- ☑ le fonctionnement de la régulation ne doit pas être perturbé par les harmoniques dus aux découpages de l'onduleur. Ces harmoniques doivent être atténués à la sortie du régulateur.

a) Cas du FAP

a).1 Régulation du courant injecté par le FAP

Le schéma simplifié de la boucle de régulation du courant par un régulateur PI est illustré sur la Fig. III.8. La fonction de transfert en boucle fermée de cet asservissement est :

$$\frac{I_{inj}}{I_{ref}} = \frac{K_p}{L_{fp}} \frac{S + K_i/K_p}{S^2 + (K_p/L_{fp})S + (K_i/L_{fp})} \quad (\text{III. 9})$$

Cette fonction peut être mise sous la forme :

$$\frac{I_{inj}}{I_{ref}} = 2\xi\omega_n \frac{S + \omega_n/2\xi}{S^2 + (2\xi\omega_n)S + \omega_n^2} \quad (\text{III. 10})$$

En comparant les deux équations (III. 9) et (III. 10), Les paramètres du régulateur PI sont alors les suivants :

$$\begin{cases} K_p = 2\xi\omega_n L_{fp} \\ K_i = \omega_n^2 L_{fp} \end{cases} \quad (\text{III. 11})$$

L'équation (III.10) présente un filtre passe bas du 2^{ème} ordre avec une pulsation de coupure ω_n . Pour une bonne réponse dynamique du système, le coefficient d'amortissement ξ est généralement choisi égal à 0.7. Pour que le spectre harmonique passe (de rang 2 à 50), nous avons choisi la pulsation de coupure $\omega_n = 2\pi 25000 \text{ rad/sec}$.

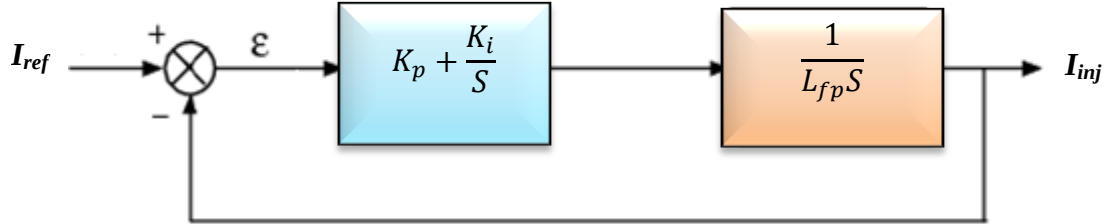


Fig. III.8 : Schéma d'asservissement du courant par un régulateur PI.

La méthode que nous avons utilisée pour la détermination des paramètres K_i et K_p est une méthode parmi plusieurs méthodes qui existent et qui sont traitées dans les livres de l'automatisme et de l'asservissement mais chaque méthode est convenable pour certaines situations de commande et quelque fois deux méthodes sont utilisées en même temps [85-82]. Cette méthode est très utilisée dans la littérature surtout dans la commande des machines asynchrones à cause de sa simplicité mais sans prétendre qu'elle soit idéale pour la détermination des paramètres du régulateur PI, ni ses résultats représentent les valeurs optimales de ces paramètres. Dans ce contexte, on considère que cette méthode représente un bon commencement pour l'ajustement des paramètres d'un régulateur

a).2 Régulation de la tension du bus continu

Le schéma simplifié de la boucle de régulation de la tension continue du condensateur équivalente C_{dc} ($(C_{dc1} C_{dc2})/(C_{dc1} + C_{dc2})$) par un régulateur PI est illustrée sur la Fig. III.9. La fonction de transfert en boucle fermée de cet asservissement est :

$$\frac{V_c}{V_{c_ref}} = \frac{K_p}{V_{c_ref} C_{dc}} \frac{S + K_i/K_p}{S^2 + (K_p/V_{c_ref} C_{dc})S + (K_i/V_{c_ref} C_{dc})} \quad (\text{III. 12})$$

Cette fonction peut être mise sous la forme :

$$\frac{V_c}{V_{c_ref}} = 2\xi\omega_n \frac{S + \omega_n/2\xi}{S^2 + (2\xi\omega_n)S + \omega_n^2} \quad (\text{III. 13})$$

En comparant les deux équations (III.12) et (III.13), Les paramètres du régulateur PI sont alors les suivants :

$$\begin{cases} K_p = 2\xi\omega_n V_{c_ref} C_{dc} \\ K_i = \omega_n^2 V_{c_ref} C_{dc} \end{cases} \quad (\text{III. 14})$$

Pour une bonne réponse dynamique du système, le coefficient d'amortissement ξ est généralement choisi égal à 0.7. Nous avons choisi la pulsation de coupure

$$\omega_n = 2\pi \cdot 10 \text{ rad/sec.}$$

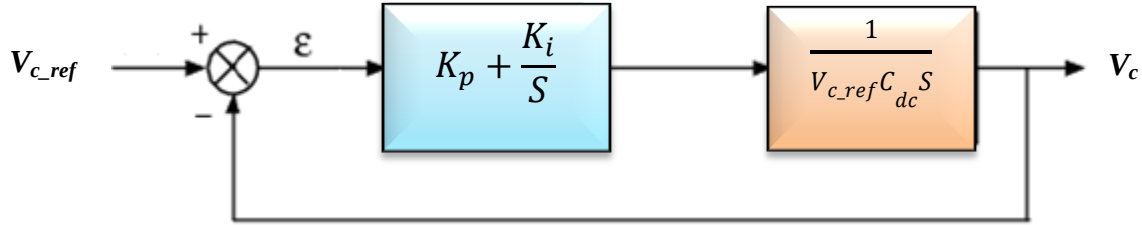


Fig. III.9 : Schéma d'asservissement de la tension continue par un régulateur PI.

b) Cas du FAS : Régulation de la tension injectée par le filtre actif série

La fonction de transfert du filtre actif série donnée par l'équation suivante :

$$v_{inj} = \frac{R_a C_{fs} S + 1}{L_{fs} C_{fs} S^2 + (R_{fs} + R_a) C_{fs} S + 1} V_f + \frac{R_a L_{fs} C_{fs}^2 S^3 + (L_{fs} + R_{fs} R_a) C_{fs} S^2 + R_{fs} C_{fs} S}{L_{fs} C_{fs} S^2 + (R_{fs} + R_a) C_{fs} S + 1} i_{ch} \quad (\text{III. 15})$$

$$V_{inj} = \frac{B_1(s)}{A(s)} V_f + \frac{B_2(s)}{A(s)} I_{ch} \quad (\text{III. 16})$$

Avec $B_1(s)$, $B_2(s)$ et $A(s)$ données par les équations suivantes :

$$B_1(s) = R_a C_{fs} S + 1 \quad (\text{III. 17})$$

$$B_2(s) = R_a L_{fs} C_{fs}^2 S^3 + (L_{fs} + R_{fs} R_a) C_{fs} S^2 + R_{fs} C_{fs} S \quad (\text{III. 18})$$

$$A(s) = L_{fs} C_{fs} S^2 + (R_{fs} + R_a) C_{fs} S + 1 \quad (\text{III. 19})$$

Le schéma global de la boucle de régulation de tension du *filtre actif série* est donné dans le chapitre précédent.

La fonction de transfert de l'onduleur $G(s) = 1$ et $B_2(s)$ est la fonction de transfert de la perturbation donc, le schéma d'asservissement de la tension par un régulateur PI est donné par la Fig. III.11.



Fig. III.11: schéma d'asservissement de la tension injectée par un régulateur PI

$$\frac{B_1(s)}{A(s)} = \frac{R_a C_{fs} S + 1}{L_{fs} C_{fs} S^2 + (R_{fs} + R_a) C_{fs} S + 1} \quad (\text{III. 20})$$

Comme on peut constater, l'équation (III.20) est du 2^{ième} ordre par conséquent la méthode utilisée précédemment pour le cas du FAP n'est pas envisageable donc on a recours à l'utilisation d'une technique graphique basée sur la méthode root locus [85] [82] [87] afin de déterminer les paramètres K_p et K_i .

III.4.5 Méthode des puissances instantanées (p-q)

En 1983, Akagi et al, ont proposé La méthode des puissances instantanées également connu comme la théorie (p-q) [88], cette méthode est représentée sur la Fig. (III.12), exploite la transformation de Concordia des tensions simples et des courants de ligne, afin de calculer les puissances réelle et imaginaire instantanées. La composante fondamentale est transformée en une composante continue et les composantes harmoniques en composantes alternatives.

Cette transformation est nécessaire si nous voulons que l'élimination de la composante continue soit facile à mettre en œuvre. Son principe est énoncé comme suit : Soient respectivement les tensions simples au point de raccordement et les courants de charge d'un système triphasé sans homopolaire [89].

III.4.5.1 Principe du fonctionnement de la méthode des puissances instantanées (p-q)

Son principe est basé sur le passage de systèmes triphasés constitués par les tensions simples et les courants de ligne, à un système biphasé (repère $\alpha\beta$) en utilisant la transformation de Concordia, afin de calculer les puissances réelle et imaginaire instantanées. Ensuite, pour déterminer les courants harmoniques de la charge, la composante fondamentale est transformée en une composante continue et les composantes harmoniques en composantes alternatives.

Dans la méthode classique des puissances instantanées, on utilise généralement, soit un filtre passe-haut, soit un filtre passe-bas afin de ne garder que la composante harmonique du signal. [90] La Fig. III.12 présente le principe de cette méthode.

En présence des harmoniques, la puissance apparente est composée de trois parties active (P), réactive (Q) et déformante (D) comme le montre la relation.

$$S = \sqrt{p^2 + Q^2 + D^2} \quad (\text{III. 21})$$

III.4.5.2 Généralités sur les puissances instantanées

Cette méthode exploite la transformation $\alpha\beta$ pour obtenir les puissances réelles et imaginaires. Notons par (V_α, V_β) et (I_α, I_β) 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}).

La transformation de Clarke notée transformation $\alpha\beta 0$ permet d'écrire les relations suivantes dans un système triphasé équilibré :

La transformation triphasée $\alpha\beta 0$ permet d'exprimer les tensions par la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{S1} \\ V_{S2} \\ V_{S3} \end{bmatrix} \quad (\text{III. 22})$$

Et les courants par la relation :

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ch1} \\ I_{ch2} \\ I_{ch3} \end{bmatrix} \quad (\text{III. 23})$$

Les composantes avec l'indice (0) représentent les séquences homopolaires du système triphasé de courant et de tension. [91]

La puissance active instantanée, notée $P(t)$, est définie par la relation suivante :

$$\begin{cases} P(t) = V_{S1}I_{ch1} + V_{S2}I_{ch2} + V_{S3}I_{ch3} = p(t) + p_0(t) \\ p(t) = V_\alpha I_\alpha + V_\beta I_\beta \\ p_0(t) = V_0 I_0 \end{cases} \quad (\text{III. 24})$$

Avec :

$p(t)$ la puissance réelle instantanée,

$p_0(t)$ la puissance instantanée de la séquence homolaire instantanée.

L'avantage de la transformation $\alpha\text{-}\beta\text{-}0$ est la séparation des séquences homopolaires du système triphasé de courant ou de tension. De la même manière, la puissance imaginaire instantanée peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\begin{aligned} q(t) &= -\frac{1}{\sqrt{3}} [(V_{S1} - V_{S2})I_{ch3} + (V_{S2} - V_{S3})I_{ch1} + (V_{S3} - V_{S1})I_{ch2}] \\ &= V_\alpha I_\beta - V_\beta I_\alpha \end{aligned} \quad (\text{III. 25})$$

La puissance q a une signification plus large que la puissance réactive habituelle. En effet, contrairement à la puissance réactive, qui ne considère que la fréquence fondamentale, la puissance imaginaire prend en compte toutes les composantes harmoniques du courant et de la tension. C'est pourquoi on lui donne une autre dénomination (puissance imaginaire) avec comme unité le *volt-ampère imaginaire (VAI)*. A partir des relations (III.24) et (III.25), nous pouvons établir la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{III. 26})$$

Dans le cas général, chacune des puissances p et q comporte une partie continue et une partie alternative, ce qui nous permet d'écrire l'expression ci-dessous :

$$\begin{cases} p = \bar{p} + \tilde{p} \\ q = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad (\text{III. 27})$$

Avec :

- ⇒ $\bar{p}$ une puissance continue liée à la composante fondamentale active du courant et de la tension,
- ⇒ $\bar{q}$ une puissance continue liée à la composante fondamentale réactive du courant et de la tension,
- ⇒ $\tilde{p}$ et $\tilde{q}$ des puissances alternatives liées à la somme des composantes perturbatrices du courant et de la tension.

Le réseau étudié est composé de trois fils ce qui empêche les composantes homopolaires d'y circuler.

III.4.5.3 Séparation des puissances perturbatrices

Les grandeurs $\tilde{p}$ et $\tilde{q}$, correspondent aux puissances perturbatrices aux pulsations multiples de six fois celle du réseau [92]. Afin de ne garder que la partie relative aux harmoniques, la composante continue des puissances doit être filtrée. Pour cela, on a le choix entre un filtre passe-haut ou un filtre passe-bas.

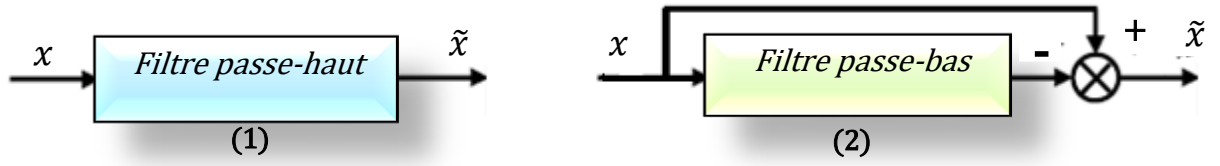


Fig. III.13 : Deux types de filtrage de p et q

Ces deux filtres réalisent une élimination de la composante continue, mais leurs caractéristiques pour le résidu harmonique sont différentes. Le filtre (2) est plus performant que celui de (1) [18], [94], [95]. Le filtre (2) est donc choisi.

L'ordre de ce filtre passe-bas définit la dynamique et l'efficacité de la méthode d'identification. Dans notre étude, nous avons choisi un filtre passe-bas du deuxième ordre. La relation suivante donne l'expression générale d'un filtre passe-bas du deuxième ordre [96].

$$FBP = \frac{\omega_0^2}{S^2 + 2\xi\omega_0 S + \omega_0^2} \quad (\text{III. 28})$$

La fréquence de coupure, $f_0 = \omega_0/2\pi$, est choisie pour que le filtre de puissance puisse bloquer toute composante perturbatrice des puissances instantanées ($\tilde{x}$). Elle doit aussi permettre le passage des composantes continues représentant les puissances active et réactive à la fréquence fondamentale ($\bar{x}$). Cette fréquence est donc choisie selon le type de la charge, soit :

- ⇒ 60 Hz pour un courant de charge équilibré avec un temps de réponse du filtre de 20 ms
- ⇒ 20 Hz pour un courant de charge déséquilibré avec un temps de réponse du filtre de 60 ms

III.4.5.4 Calcul des courants perturbateurs

En inversant la relation (III.26), nous pouvons recalculer les courants dans le repère $\alpha\beta$ comme le montre l'équation (III.29) :

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (\text{III. 29})$$

En considérant les équations (III.27) et (III.29), nous pouvons séparer le courant dans le repère $\alpha\text{-}\beta$ en trois composantes, active et réactive à la fréquence fondamentale et les harmoniques. Ceci conduit à:

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ 0 \end{bmatrix}}_{\text{Courant actif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{q} \end{bmatrix}}_{\text{courant réactif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix}}_{\text{courants harmoniques}} \quad (\text{III. 30})$$

Avec $\Delta = V_\alpha^2 + V_\beta^2$, supposé constant dans l'hypothèse d'une tension sinusoïdale équilibrée du réseau électrique.

Cette expression montre donc que l'identification des différentes composantes du courant dans le repère $(\alpha\text{-}\beta)$ revient à séparer des termes continus des puissances réelle et imaginaire instantanées. Les courants perturbateurs triphasés qui représentent les courants identifiés, *dits courants de référence* (I_{ref}), sont calculés à partir de la transformation $\alpha\text{-}\beta$ inverse. Les équations (III.31) et (III.32) montrent les calculs pour l'obtention de ces références.

$$\begin{bmatrix} I_{ref\alpha} \\ I_{ref\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (\text{III. 31})$$

$$\begin{bmatrix} I_{ref1} \\ I_{ref2} \\ I_{ref3} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ref\alpha} \\ I_{ref\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{III. 32})$$

Avec ($i_{p\alpha}$, $i_{p\beta}$) courants perturbateurs calculés dans le repère $\alpha\text{---}\beta$ à partir des courants réactifs et harmoniques de la relation (III. 30)

III.4.5.5 Algorithme d'identification

Finalement, l'algorithme d'identification que nous avons défini peut être représenté par le synopsis de la Fig. III.12.

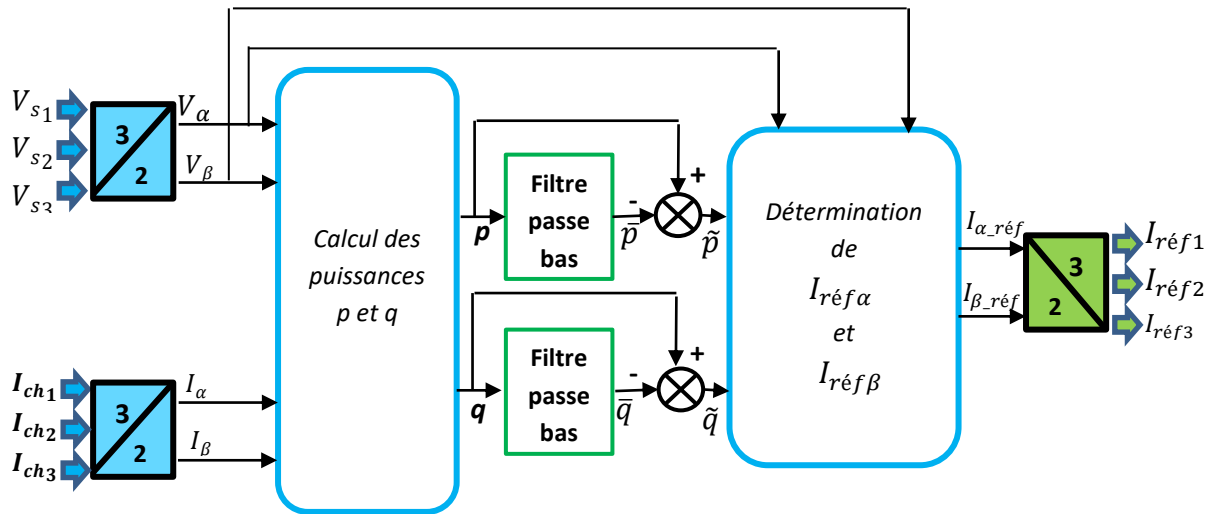


Fig. III.12 : Algorithme p - q d'identification des courants harmoniques de référence.

III.4.6 Identification des tensions perturbatrices basée sur PLL

La méthode d'identification sert à calculer les tensions à injectées par l'onduleur pour dépolluer la tension aux bornes de la charge. Ces tensions perturbatrices représentent les tensions déséquilibrées et harmoniques, et les creux de tension. Plusieurs méthodes ont déjà été proposées dans la littérature [90]. La plus simple parmi elle, est basée sur le calcul des composantes symétriques dans le repère de Park (d , q), et exigent une bonne connaissance du réseau électrique en présence des harmoniques de tension. Leurs défauts résident dans la complexité de calcul et d'implantation. Dans le paragraphe suivant, nous présentons une méthode d'identification des tensions perturbatrices basées sur l'utilisation du système à base d'une boucle à verrouillage de phase où en anglais : Phase Locked Loop (PLL). En effet, cette technique est née en 1932 afin d'améliorer la réception des signaux radio électriques en

modulation d'amplitude. Aujourd'hui, les applications de la PLL sont nombreuses et variées (transmission en modulation de fréquence, radars, asservissement de la vitesse de moteurs à courant continu, etc.).

III.4.6.1 Structure générale du système PLL

La Fig. III.14, illustre la structure du système à base de PLL. Elle est utilisée pour extraire la phase (δ_d) de la composante fondamentale directe de tension et de calculer l'amplitude de la composante directe (V_d) en utilisant un filtre passe-bas [91].

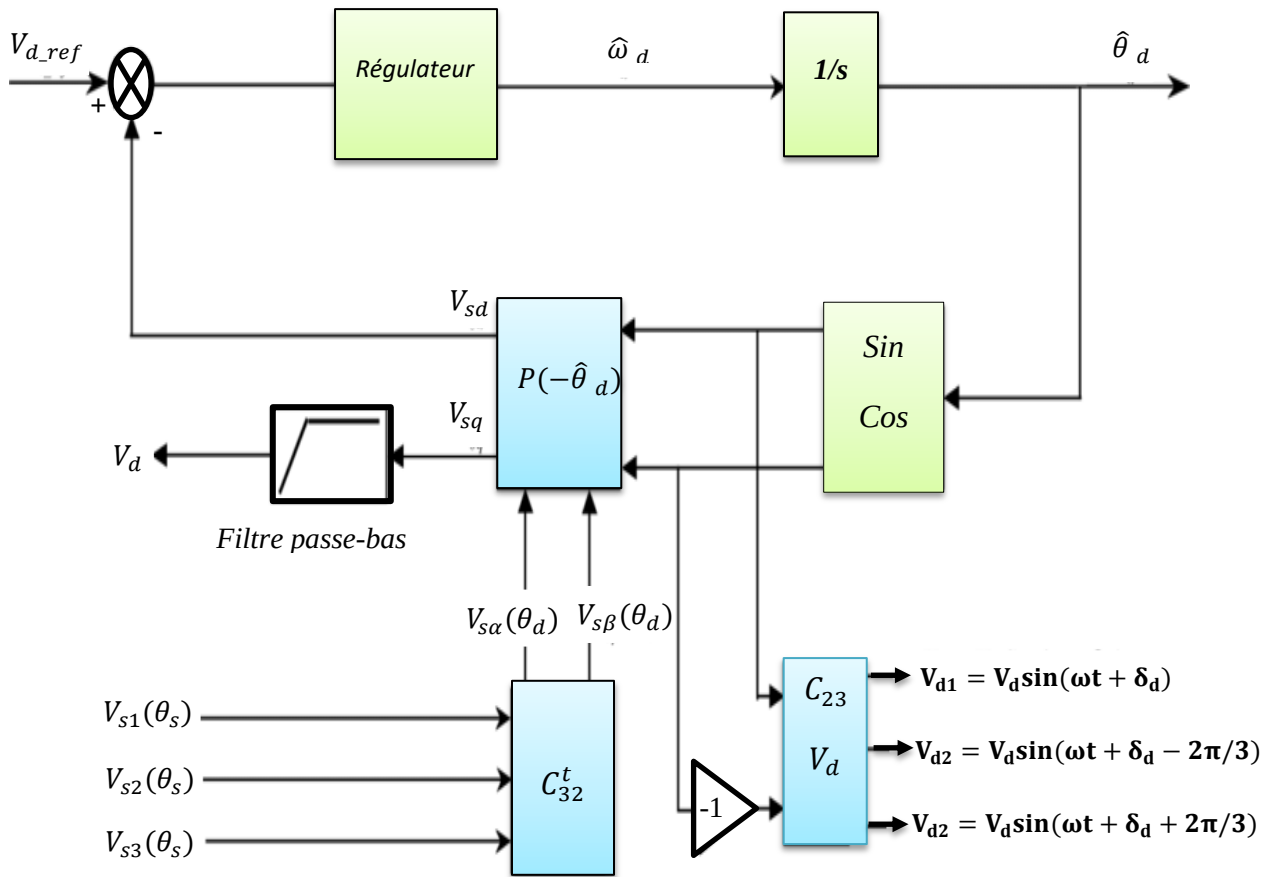


Fig. III.14 : schéma global du système à base de PLL

III.4.6.2 Algorithme d'identification des tensions perturbatrices basée sur le PLL

Pour le filtre actif série, le système à base de PLL (Fig. III.15) est employé pour extraire l'amplitude et la phase (V_d, δ_d) de la composante directe de la tension à la fréquence

fondamentale ($V_{d1,2,3}$). Cette composante est soustraite de la tension perturbée du réseau ($V_{s1,2,3}$) pour déterminer les composantes perturbatrices inverse et homopolaire de la tension ($V_{dif1,2,3}$). Afin de réguler la tension de la charge, la différence entre la composante continue de la tension désirée ($V_{d-des} = 220\sqrt{2}$) et la composante continue fournie par la PLL (V_d) est introduite dans un bloc de transformation inverse de Park ayant un angle de rotation δ_d . Les tensions de sortie de ce bloc ($V_{r1,2,3}$) sont ajoutées aux composantes perturbatrices ($V_{dif1,2,3}$) pour former les références de la tension ($V_{ref1,2,3}$) [92], [93].

Cette méthode diminue considérablement le nombre de calculs par rapport aux méthodes classiques et ne nécessite pas une connaissance très précise du réseau perturbé. A cela s'ajoute une optimisation de la puissance apparente du *filtre actif série* grâce à la conservation de l'angle de la composante directe de tension [92]. La Fig III.15 illustre le schéma global du système à base de PLL que nous avons utilisé pour notre circuit de commande

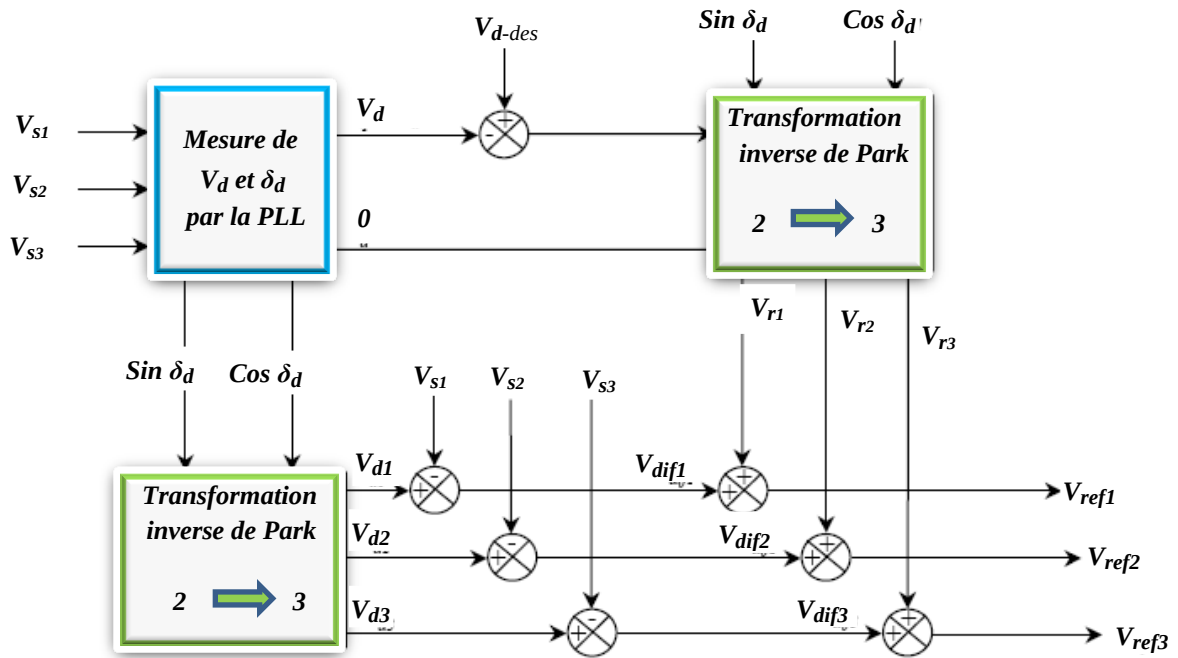


Fig. III.15 : Méthode d'identification basée sur l'emploi d'un système à base de PLL

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, Nous avons présenté le conditionneur de puissance (UPQC). Comme nous avons pu le constater, ce filtre actif combiné série-parallèle est utilisé pour la compensation de toutes les perturbations en courant et en tension qui peuvent exister dans le réseau électrique et causer des effets néfastes. Ces effets peuvent aller des échauffements et de la dégradation du fonctionnement jusqu'à la destruction totale des équipements. Tous d'abord, nous avons présenté la structure générale, le principe et emplacement de l'UPQC. Ce filtre résulte de l'association du filtre actif parallèle et série étudiée d'une manière détaillée dans le chapitre précédent. Ensuite la méthode des puissances instantanées (p-q) a été présentée en détail. Nous avons présenté successivement la commande de l'UPQC en proposant différentes techniques de la commande (MLI et hystérésis).

Dans le chapitre suivant, les techniques de la commande seront simulées et les résultats obtenus seront interprétés.

CHAPITRE IV

RESULTATS DE SIMULATION

IV.1 Introduction

Après avoir étudié les différentes perturbations, solutions de dépollution des réseaux topologies des filtre actifs de puissance (FAP,FAS, et l'UPQC), méthodes de détection des grandeurs harmoniques de références et les stratégies de commande et de régulation de filtre actif combiné série-parallèle (l'UPQC) dans les chapitres précédents, on va réaliser la simulation avec le logiciel Matlab/Simulink du conditionneur de puissance l'UPQC.

Comme le montre la Fig. IV.1, la structure étudiée est composée d'une source de tension triphasée développée pour la simulation de tous les types de perturbations en tensions au point de raccordement, une charge non-linéaire représentée par l'élément $R_{ch}L_{ch}$ connectée au système à travers un redresseur et finalement le conditionneur de puissance l'UPQC constitué, comme le chapitre précédent montre, de la partie du compensateur série (FAS) et de la partie du compensateur parallèle (FAP). Les paramètres et les valeurs des éléments caractérisant la structure générale du conditionneur de puissance (l'UPQC) sont donnés.

Tab.IV.1 : Les paramètres et les valeurs des éléments caractérisant la structure générale de l'UPQC

Réseau électrique	$S_{cc}/ S_{ch} = 3000, V_s = 220 \text{ V}$
Charges perturbatrices	Charge non linéaire 80 kVA
	$L_d 0,1 \text{ mH}$
Filtre actif parallèle	$V_c 850 \text{ V}$
	$C_{dc1}, C_{dc2} 8.8 \text{ mF}$
	$L_{fp} 1 \text{ mH}$
	Identification descourants perturbés : Méthode p-q
Filtre actif série	$R_a 0.1 \Omega,$
	$R_{fs} 0.030 \Omega,$
	$C_{fs}, 220 \mu\text{F},$
	$L_{fs} 1 \text{ mH}$
Transformateurs d'injection de tension	45 kVA, 220 V, 1:1
	$R_t 0.0001 \text{ pu}$
	$L_t 0.0001 \text{ pu}$
	$R_m, 5000 \text{ pu}$
	$L_m 5000 \text{ pu}$
	Identification des tensions perturbatrices : Méthode à système PLL

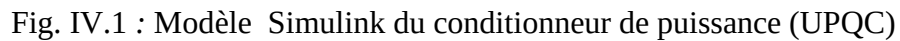


Figure 10 consists of two subplots, (a) and (b), showing harmonic analysis results.

Subplot (a) displays the source voltage V_s (V) versus Time (S). The waveform is a periodic sine wave with a frequency of 50 Hz. The fundamental component is $F1(50\text{Hz}) = 311.1 \text{ V}$ and the Total Harmonic Distortion (THD) is 24.66%.

Subplot (b) displays the load current I_{ch} (A) versus Time (S). The waveform is a periodic square wave with a frequency of 50 Hz. The fundamental component is $F1(50\text{Hz}) = 167.8 \text{ A}$ and the Total Harmonic Distortion (THD) is 26.87%.

(b) Courant de charge avec sa décomposition spectrale

IV.2 Commande MLI avec régulateur

Dans cette partie on va utiliser un régulateur pour la commande du courant et de la tension injectés par l'UPQC et aussi pour régler la tension continue du condensateur. Ce régulateur sera le fameux régulateur PI utilisé jusqu'à maintenant dans plusieurs domaines de l'industrie.

IV.2.1 Régulateur PI

Le régulateur PI est utilisé pour commander l'onduleur du FAP et du FAS de l'UPQC et aussi pour régler la tension continue du condensateur. Trois cas indépendants sont considérés, le premier cas est lorsque la tension de la source est distordue, le deuxième cas lorsqu'il y a un creux de tension et le troisième cas lorsqu'une surtension se présente.

IV.3 Résultats de simulation

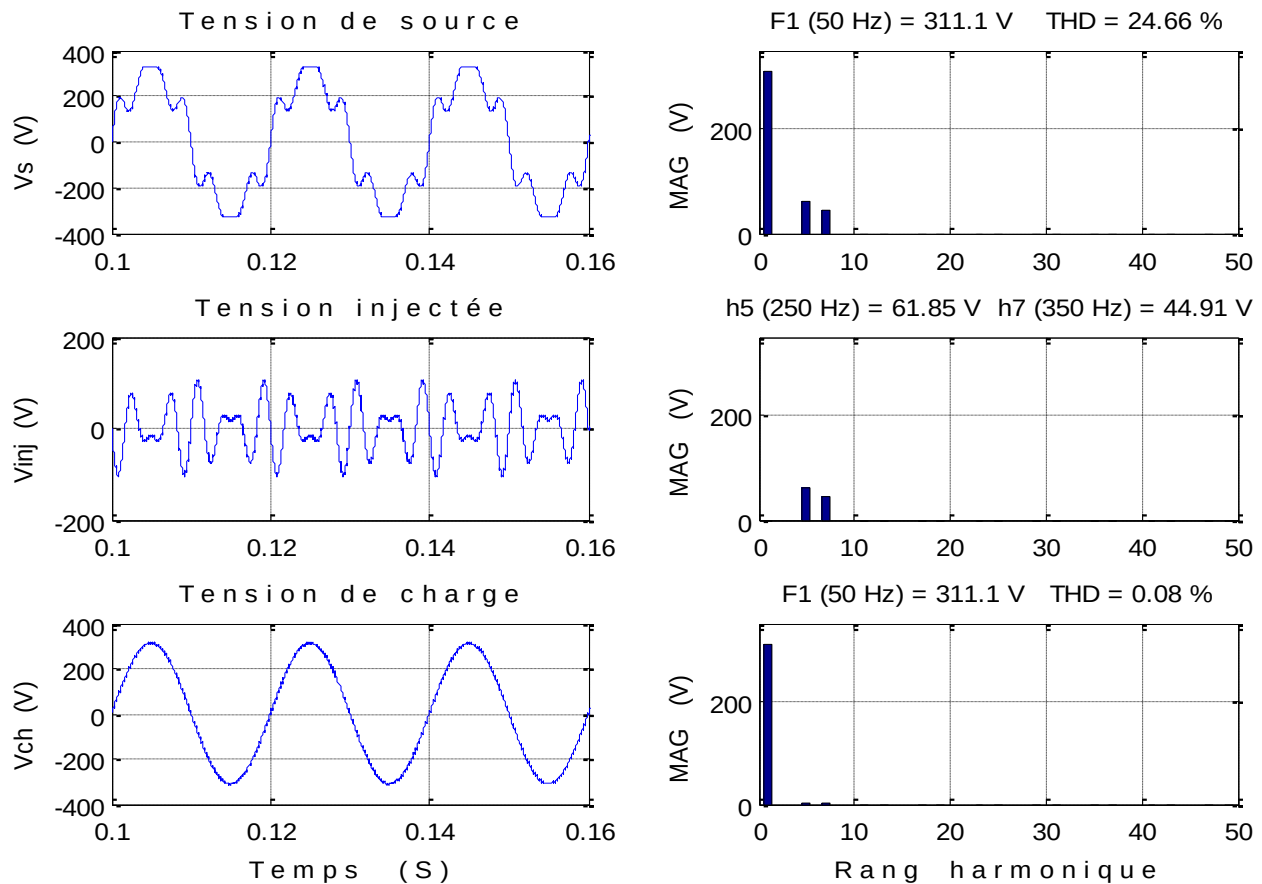


Fig. IV.3: Compensation des tensions harmoniques utilisant le régulateur PI et la décomposition spectrale

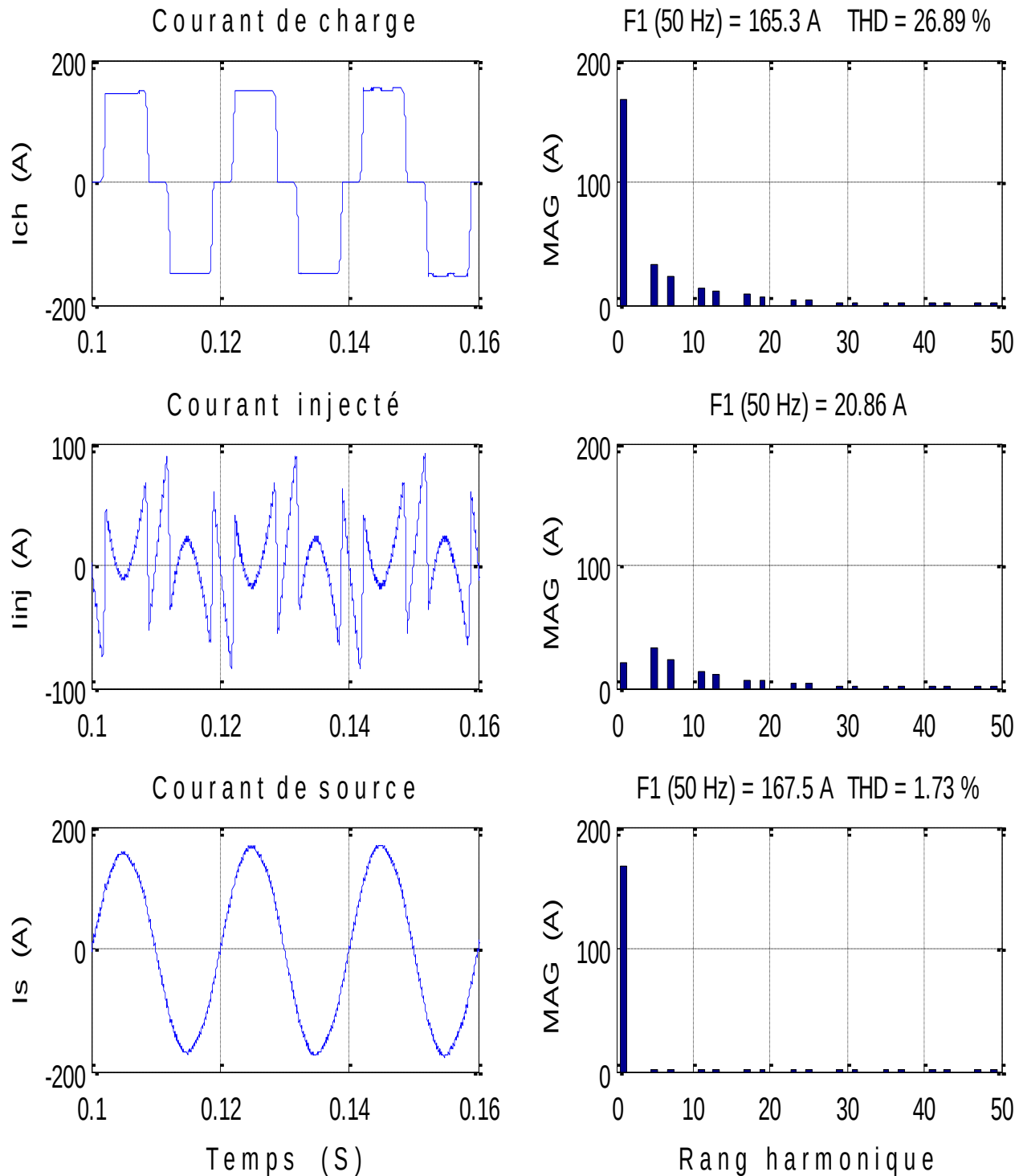


Fig. IV.4 : Compensation des courants harmoniques utilisant le régulateur PI en présence d'une tension de source distordue et la décomposition spectrale

IV.3.1 Creux de tension

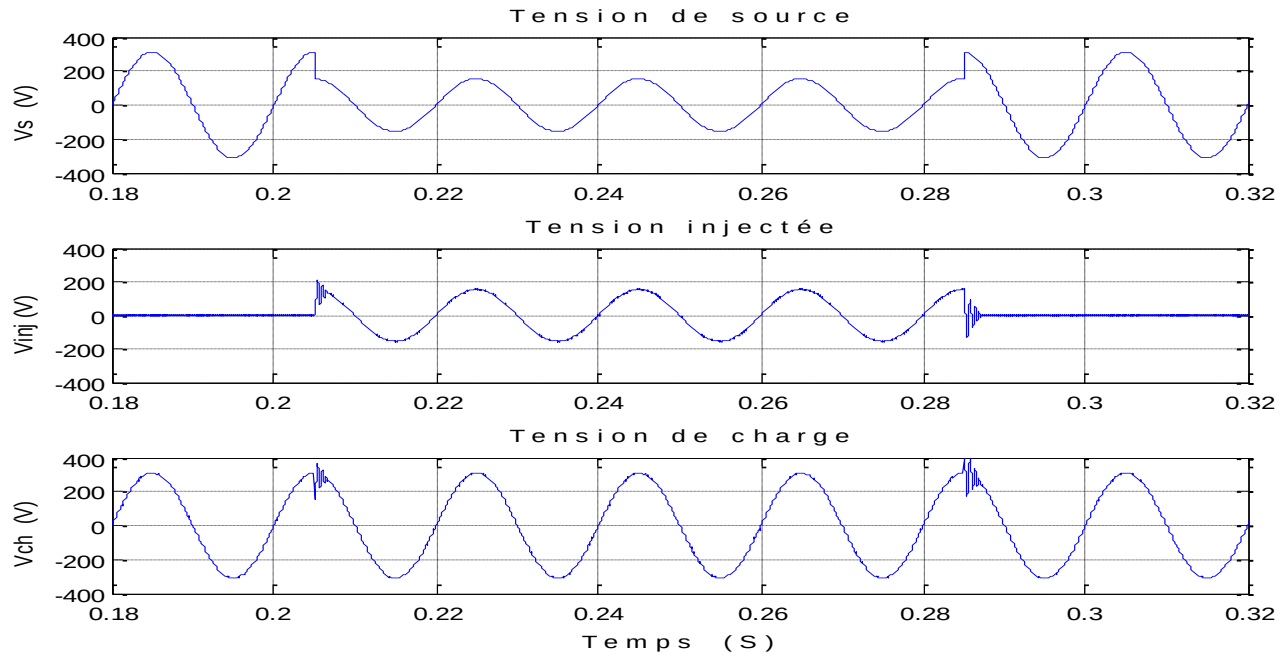


Fig. IV.5: Compensation de creux de tension utilisant le régulateur PI

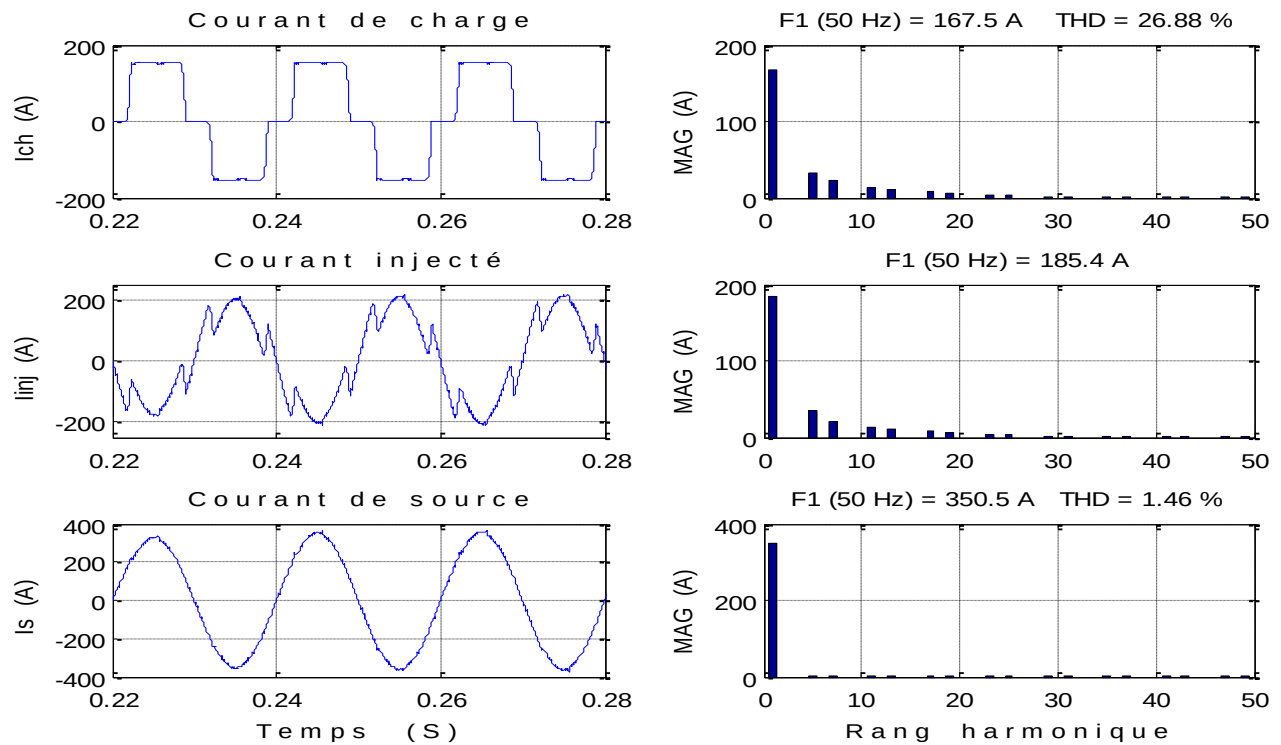


Fig. IV.6 : Compensation des courants harmoniques utilisant le régulateur PI en présence d'un creux de tension et la décomposition spectrale

IV.3.2 Surtension

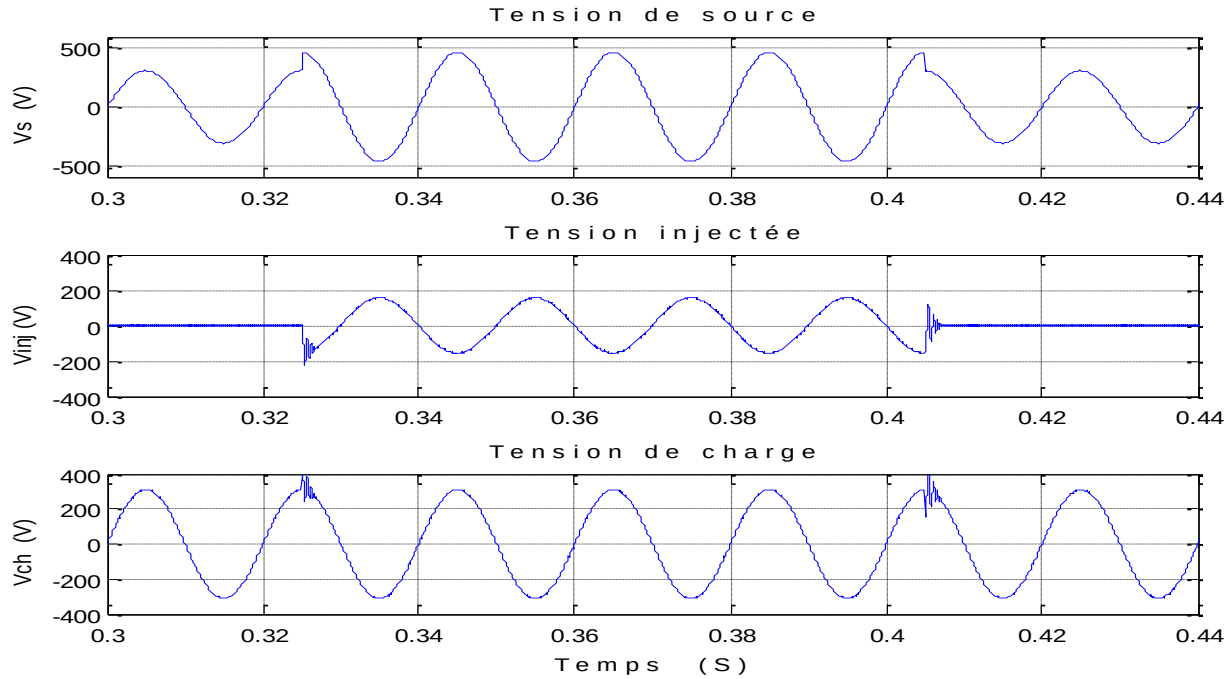


Fig. IV.7 : Compensation de surtension utilisant le régulateur PI

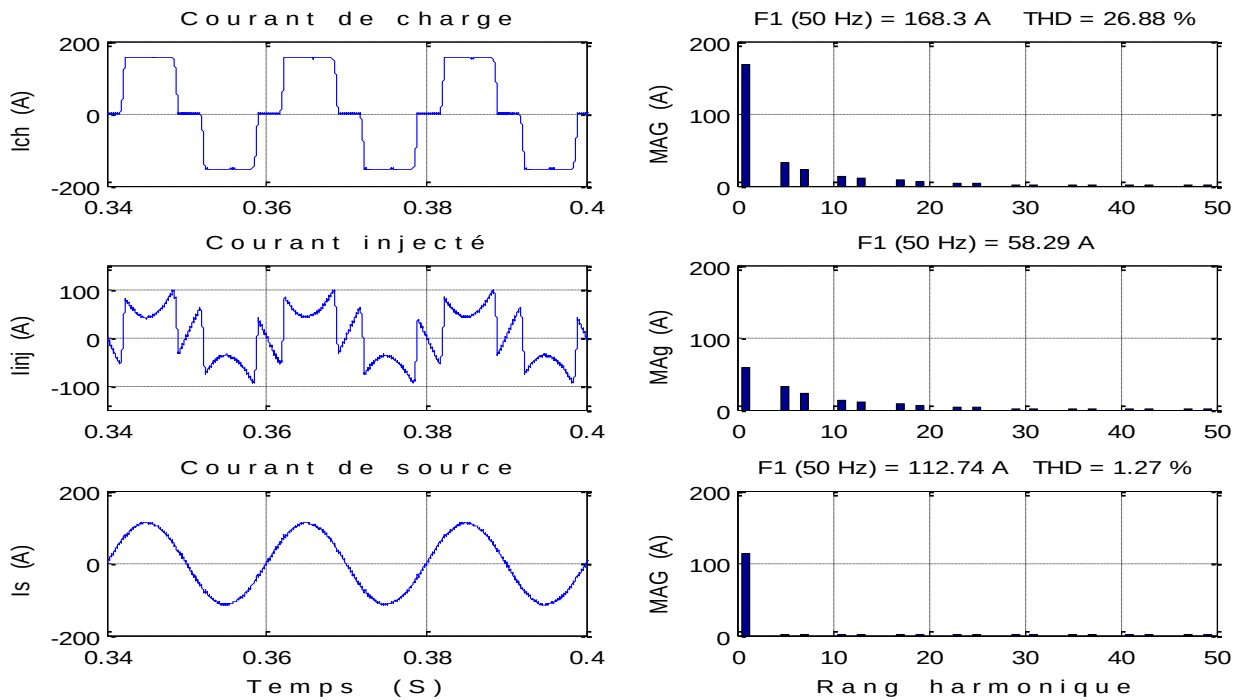


Fig. IV.8 : Compensation des courants harmoniques utilisant le régulateur PI en présence d'une surtension et la décomposition spectrale

IV.3.3 Régulation de la tension continue

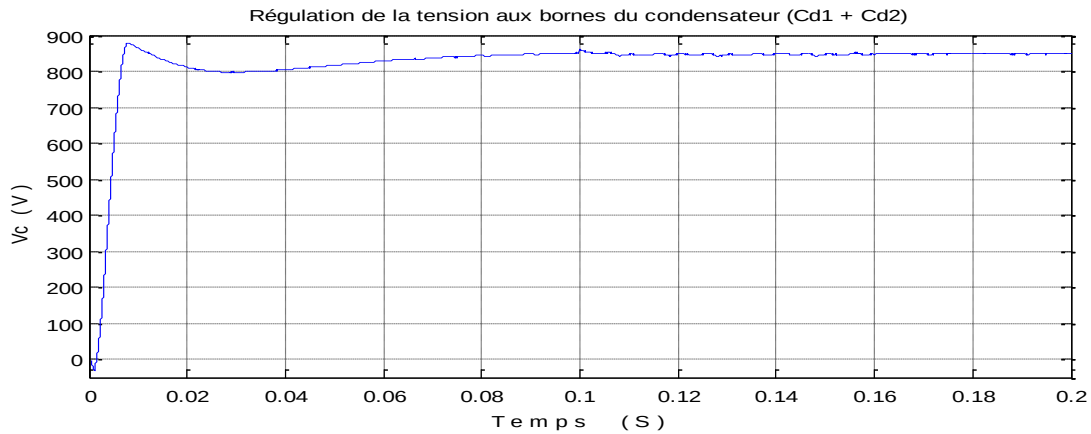


Fig. IV.9 : Régulation de la tension continue V_c utilisant le régulateur PI

IV.3.4 Toutes les perturbations

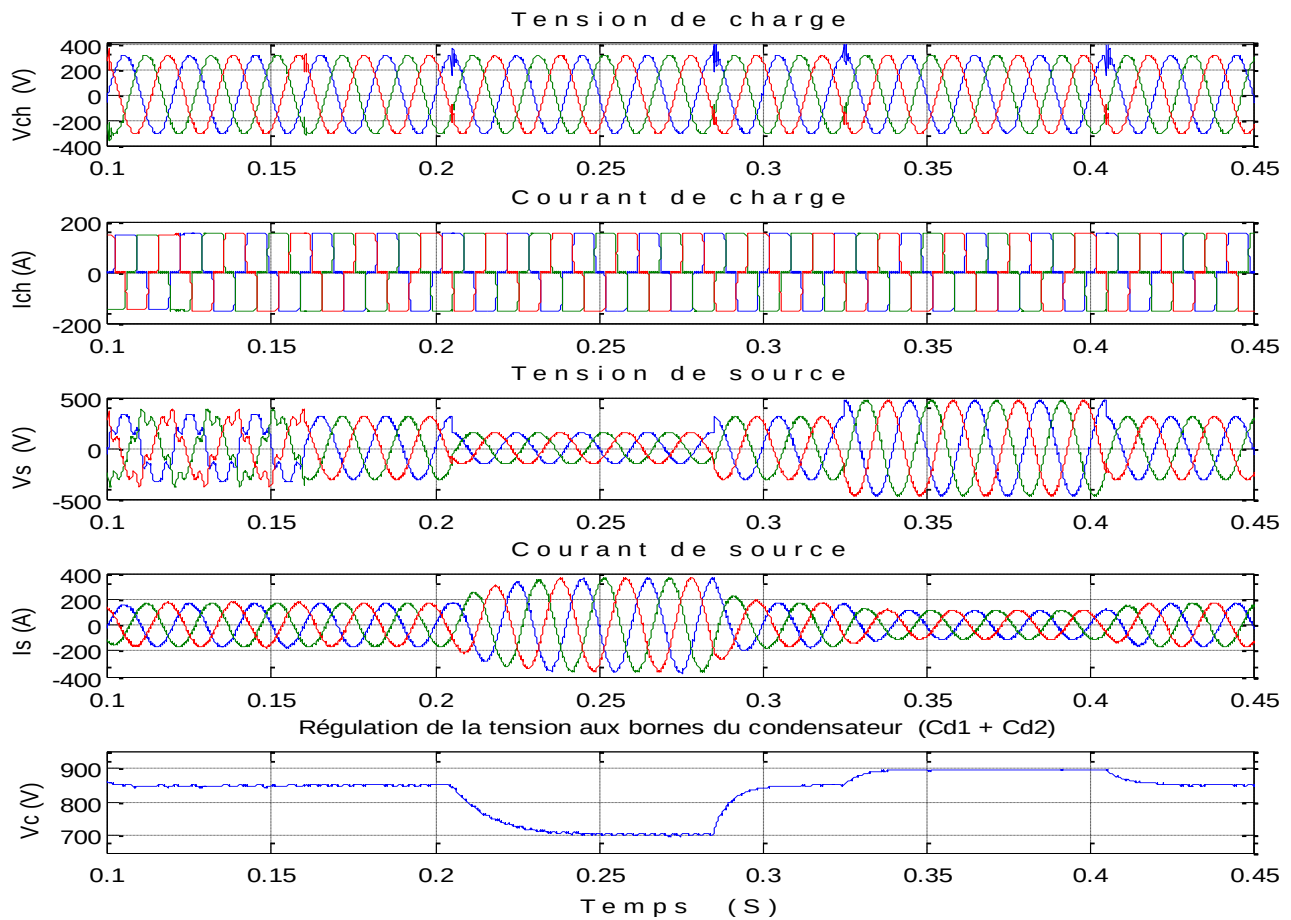


Fig. IV.10 : Compensation de toutes les perturbations (harmoniques, creux de tension et surtension) utilisant le régulateur PI

IV.4 L'interprétation des courbes

La Fig. IV.1 est simulée sous Matlab/Simulink et a pour objectif de compenser les perturbations en courant et en tension engendrées par la charge non linéaire et le réseau de distribution et garantir ainsi des courants et des tensions de phases sinusoïdaux. Le taux de distorsion harmonique (THD) du courant de la charge non linéaire est de 26.87% et de 24.66% pour la tension de source.

Les résultats de simulation de la compensation des courants et des tensions harmoniques utilisant la commande MLI avec un régulateur PI sont indiqués sur les figures précédentes.

Dans le premier cas et lorsque la tension de la source est distordue, la compensation des courants et des tensions harmoniques Indiqués sur les figures Fig. IV.3 et Fig. IV.4 nous pouvons remarquer une réduction des harmoniques de la tension V_{ch} THD 0.08% et pour le courant sa valeur du THD est réduite à 1.73%.

Dans le deuxième cas lorsqu'il ya un creux de tension, la Fig. IV.4 présente les résultats de simulation de la compensation des creux de tension utilisant la commande MLI avec un régulateur PI. On remarque une amélioration considérable dans la forme du courant de source après compensation, sa valeur du THD est réduite à 1.46%.

Dans le troisième cas lorsqu'une surtension se présente, La Fig. IV.8 présente les résultats de simulation de la compensation de Surtension, on peut remarquer une amélioration considérable dans la forme du courant de source après compensation, sa valeur du THD est réduite à 1.27%.

Les simulations traitées dans ce travail auront pour but de tester la performance du régulateur PI pour les courants et la tension du réseau électrique et la tension aux bornes du condensateur. L'objectif principal de la commande proposée consiste à asservir la tension aux bornes du condensateur à leur valeur de référence de manière aussi parfaite que possible comme le montre la Fig. IV.9.

Nous remarquons que le conditionneur de puissance élimine très bien les harmoniques en tension et en courant générés par la charge non linéaire.

IV.5 Conclusion

Dans ce chapitre, on a testé les performances et l'efficacité du conditionneur de puissance (l'UPQC) pour la compensation des harmoniques en courant et en tension, ainsi que la compensation de surtension du réseau électrique et du creux de tension. Nous avons accédé aux bons résultats par l'utilisation de la commande hystérésis ou MLI.

Malgré ces méthodes peu anciennes, elles donnent des résultats très satisfaisants pour la dépollution des réseaux électriques.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Ce travail présenté dans ce mémoire consiste globalement à l'étude de nouvelles stratégies de dépollution de réseau de distribution électrique pour l'amélioration de la qualité de l'énergie. Parmi les différentes techniques modernes de compensation des harmoniques on trouve le conditionneur de puissance (l'UPQC) qui est une combinaison de deux filtres actifs de puissance : le filtre actif parallèle est conçu pour compenser toutes les perturbations de courant comme les harmoniques, les déséquilibres et la puissance réactive, le filtre actif série est conçu pour compenser toutes les perturbations de tension comme les harmoniques, les déséquilibres et les creux de tension. L'UPQC combine les caractéristiques des deux filtres en même temps, donc toutes les perturbations en courant et en tension ont été compensées par cette technique. Pour commander l'UPQC, la méthode des puissances instantanées ($p-q$) et la commande MLI associée au régulateur PI ont été traitées d'une manière détaillée.

Afin d'aborder notre étude, nous avons structuré le contenu de notre travail en quatre chapitres. Dans le premier chapitre, nous avons montré l'influence des harmoniques sur le réseau électrique, et leurs effets néfastes sur les équipements. On a également cité quelques normes qui traitent les harmoniques.

Plusieurs solutions traditionnelles et modernes de dépollution ont été présentées dans le deuxième chapitre, Les solutions classiques ne sont plus suffisantes pour la dépollution. Pour cela, nous sommes intéressés à l'étude détaillée des filtres actifs de puissance (FAP et FAS).

Dans le troisième chapitre nous avons étudié le conditionneur de puissance (UPQC). Ce filtre actif combiné série-parallèle est une solution à tous les perturbations en tension et en courant. Pour commander ce filtre nous avons proposé différentes techniques de la commande (MLI et hystérésis). La méthode des puissances instantanées $p-q$ a été proposée pour déterminer les courants harmoniques de référence.

Afin de rendre notre système plus autonome et plus pratique, nous avons réalisé la simulation de l'application de ce filtre à une charge non linéaire sous Matlab/simulink. A travers les résultats de simulations nous sommes assurés que l'UPQC est une bonne solution des perturbations en courant et en tension au même temps avec de bonnes performances. Donc l'UPQC est une solution efficace pour l'amélioration de la qualité d'énergie.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- [1] D.Robinson : « Harmonic management in MV distribution systems », A thesis submitted in fulfilment of PHD degree from university of Wollongong, School of electrical, computer and telecommunication engineering, 2003.
- [2] M.Shafiee Khor : « 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.
- [3] 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.
- [4] Éditeur : Académie de Poitiers.
<http://www.edcasources.education.fr/detail.asp?ID=79631>
- [5] Véronique Beauvois : « Qualité de la tension, qualité de l'électricité », cours Université de Liege, Novembre 2008.
- [6] IEEE Std 519-1992 : « IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems »; 12 April 1993.
- [7] R. Cao, J. Zhao, W. Shi, P. Jiang, G. Tang, « Series power quality compensator for voltage sags, swells, harmonics and unbalance », IEEE/PES Trans. and Distr. Conference and Exposition, Vol. 1, 28 Oct.-2 Nov. 2001, Page(s): 543-547.
- [8] M .J. Newman, D.G. Holmes, J.G. Nielsen, F. Blaabjerg : « A Dynamic voltage restorer (DVR) with selective harmonic compensation at medium voltage level », IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 41, No. 6, Nov./Dec. 2005, Page(s):1744 - 1753.
- [9] Dr .DIB. A : « Qualité de l'énergie électrique et norme IEEE-519 » Université Larbi Ben M'hidi - Oum El-Bouaghi.
- [10] I. Etxeberria-Otadui : « Sur les systèmes de l'électronique de puissance dédiés à la distribution électrique – application à la qualité de l'énergie » Thèse de Institut National Polytechnique De Grenoble, 26 septembre 2003.
- [11] N.H. Mendalek : « Qualité de l'onde électrique et moyens de mitigation », thèse de doctorat de l'université du Québec , 14 Janvier 2003
- [12] Cahiers Techniques n°141, 151 et 179) Edition octobre 2001

- [13] Djaffar Ould Abdeslam : «Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension», mémoire de doctorat, Université de Haute- Alsace U.F.R. des Sciences et Techniques, décembre 2005.
- [14] H. Sakkou : « Conception d'un compensateur actif multifonctions corrigeant toutes les perturbations en tension générées par les charges non linéaires et les fours à arc » ; Thèse de l'Université du Québec, Ecole de Technologie Supérieure ; Montréal, le 09 janvier 2007.
- [15] Véronique Beauvois : « Qualité de la tension, qualité de l'électricité », cours Université de Liege, Novembre 2008.
- [16] M. Lebziz : « Etude de la pollution harmonique dans les réseaux industriels », Séminaire GL1K, Zone Industrielle, Skikda, 2005.
- [17] Th. Deflandre & P. Mauras : « La maîtrise des harmoniques sur les réseaux industriels & tertiaires.1ière partie : Qualité de l'alimentation électrique », Les cahiers de l'ingénierie, Direction des Etudes & Recherche, Service Etudes de Réseaux, Département Postes & Lignes, EDF Industrie, France, 1997.
- [18] M.A.E. Alali : « Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension », Thèse de l'université Louis Pasteur, Strasbourg I, 12 Septembre 2002.
- [19] The power electronics handbook / edited by Timothy L. Skvarenina ; 2002 by CRC Press LLC.
- [20] A. Amara & A. Bengana : « Etude et simulation d'un circuit de commande pour un filtre actif de puissance parallèle à deux bras à point milieu pour un réseau électrique à trois fils ». Mémoire de fin de master, Université de Tlemcen, 25 Juin 2015.
- [21] **C. Benachaiba, O. Abdelkhalek, S. Dib, M. Haidas** : «Optimization of parameters of the unified power quality conditioner using genetic algorithm method” Information Technology And Control, 2007, Vol.36, No.2 242-245.
- [22] Chelli Zoubir : « Amélioration de la qualité de l'énergie électrique par un filtre actif d'harmonique », Thèse de Doctorat, université badji mokhtar-annaba- ,2015
- [23] M.A.E.Alali : « Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension », Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur-Strasbourg I, 2002.

- [24] A.Omeiri : « Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant ». Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba, 2007.
- [25] C. Fitzer, M.Barnes, P. Green : « Voltage sag detection technique for a dynamic voltage restorer », IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 40, No. 1, Jan./Feb. 2004, Page(s) :203 -212.
- [26] L. Zellouma : « Filtrage actif parallèle des harmoniques du courant générés par un pont redresseur triphasé non commandé. » Mémoire de Magister, Université d'Annaba 2006.
- [27] Ghennam Tarek : «Etude et réalisation d'un compensateur actif de puissance commandé par DSP » Mémoire de magister. Ecole militaire polytechnique, 2004.
- [28] M ,Alaa Eddin Alali : «Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension (Automatisation des systèmes de puissance électriques » Thèse de Doctorat, Strasbourg 12 Septembre 2002.
- [29] C. Benachaiba, B. Mazari, S. Dib : « Genetic Algorithm Method of Minimizing Harmonic Distortion in PWM Converters », Annales de l'Université de Bechar, N°1, 2005.
- [30] C. Benachaiba, B. Mazari, S. Dib : « Genetic Algorithm Method of Minimizing Harmonic Distortion in PWM Converters Part II », Communication Science and Technologie (COST), N°4, 2006.
- [31] H. AKAGI : « Trends in active power line conditioners », Power Electronics, IEEE Transactions on, vol. 9, p. 263–268, May 1994.
- [32] Abdusalem Mohamed Muftah : « Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales», Thèse de Doctorat en génie électrique, Université Henri Poincaré, (France) 2008.
- [33] Yue MA, Zhu Ling : « An analysis and simulation of shunt hybrid active power filter » Proceeding of International Conference on Electrical Machines and Systems 2007, Oct. 8-11, Seoul Korea, pp. 90-93, 2007.
- [34] Alali Mohamad Alaa Eddin : « Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension » THÈSE, École Doctorale Sciences Pour l'Ingénieur ULP – ENSAIS – ENGEES – URS, 2002.
- [35] Akagi. H : « Active Harmonic Filters» , Proceedings IEEE, Vol. 93, N° 12, pp. 2128-2141, Décembre 2005.
- [36] M. Takeda, K. Ikeda, Y. Tominaga : « Harmonic current compensation with active filter », IEEE PESC, 808-8 15 (1987).

- [37] F.Z. Peng, H. Akagi, A. Nabae : « A Novel harmonic power filter », IEEE PESC, 1151-1 159 (1988).
- [38] T.M. Gruz : « A survey of neutral currents in three-phase computer power systems », IEEE Trans. on Ind Applications, 26(4), 7 19-725 (1990).
- [39] A.Chandra, B. Singh, B.N. Singh, K. Al-Haddad : « An improved control algorithm of shunt active filter for voltage regulation, harmonic elimination, power-factor correction, and balancing of nonlinear loads », IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 15, No. 3, May 2000, Page(s):495 - 507.
- [40] A. Esfandiari, M. Parniani, H. Mokhtari : « A New control strategy of shunt active filters for power quality improvement of highly and randomly varying loads », IEEE Ind. Electronics, Vol. 2,4-7 May 2004, Page(s):1297 - 1302.
- [41] H. Akagi : « Active harmonic filters », IEEE Proc., Vol 93, No 12, December 2005, Page(s): 2128 - 2141.
- [42] A.V. Jouanne : « Assessment of voltage unbalance », IEEE Transactions on power delivery, pp.782-790, Vol.16, No.4, October 2001.
- [43] M. Hind Djeghloud : «filtrage actif de puissance» Thèse de Docteur de université mentouri constantine .2007
- [44] Miao-Xin Wang : « Filtrage actif de puissance : Etudes et réalisation d'un filtre actif à commande numérique en temps réel » Thèse de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 18 Décembre 1992.
- [45] S.Karimi : « Continuité de service des convertisseurs triphasés de puissance et prototypage "FPGA in the loop".Application au filtre actif parallèle» Thèse de Docteur l'Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2009
- [46] Abdeslam,D. Ould, WIRA, Patrice, MERCKLÉ, Jean, et al. « Stratégie neuromimétique d'identification et de commande d'un filtre actif parallèle. Revue Internationale du Génie Electrique», (RS-RIGE) p, 2006, p. 35-64
- [47] J. Xu : « Filtrage actif parallèle des harmoniques des réseaux de distribution d'électricité », Thèse de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy 20 Janvier 1994.
- [48] M.A.E. Alali, S. Saadate, Y.A. Chapuis, F. Braun : « Energetic study of a shunt active conditioner compensating current harmonics, power factor and unbalanced », EPE-PEMC 2000, Kotic, Slovak Republic, vol. 5, pp. 211-216, September 2000.

- [49] A. Chaoui : «filtrage actif triphasé pour non linéaires» thèse de docteur de l'université de Poitiers 2006.
- [50] H. Akagi, Y. Tsukamoto, A. Nabae : « Analysis and design of an active power filter using quad-series voltage source PWM converters », IEEE Trans. on Industry applications, vol. 26, No. 1, pp. 93-98, 1990.
- [51] F.Z. Peng, H. Akagi and A. Nabae : « A study of active power filters using quad-series voltage-source PWM converters for harmonic compensation », IEEE Trans. on power electronics, vol. 5, N°1, pp. 9-15, January 1990.
- [52] S. Guffon : « Modélisation et commandes a structure variable de filtres actifs de puissance », Thèse de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 24 Juillet 2000.
- [53] C. Lott : « Filtrage actif parallèle des harmoniques de courant sur des réseaux industriels : étude théorique et réalisation d'une maquette à GTO », Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy 17 Octobre 1995.
- [54] O.L. Lapena, L.G. de Vicuna, J. Matas, M. Lopez and M. Castilla : « A sliding mode control design of an active power filter with a low-pass filter as input stage », EPE-99 Lausanne, Suisse, 1999.
- [55] H. Akagi : « New trends in active filters for power conditioning », IEEE Trans. on Industry applications, vol. 32, No. 6, pp. 1312-1322, November/December 1996.
- [56] M. Bojrup : « Advanced Control of Active Filters in a Battery Charger Application », thesis of Lund Institute of Technology, Sweden, 1999.
- [57] C. Benachaïba : « Contribution à l'Élimination des Harmoniques Par le Filtre Actif en Temps Réel dans les Réseaux Electriques », thèse de l'Université des Sciences et la Technologie d'Oran, 29 juin 2005.
- [58] S. Bala : « One cycle control of three-phase VAR compensators and active power filters », thesis of Indian Institute of Technology, Bombay, April 2003.
- [59] R.A. El Shatshat : « A Novel Modular Approach to Active Power-Line Harmonic Filtering in Distribution Systems », thesis of the University of Waterloo, Ontario, Canada, 2000.
- [60] B. Singh,V. Verma : « A new control scheme of series active filter for varying rectifier loads », IEEE Power Electronics and Drive Systems, PEDS 2003, The Fifth International Conference, Vol. 1, 17-20 Nov. 2003, Page(s):554 - 559.

- [61] G. Alarcon, C. Nunez, V. Cardenas, M. Oliver : « Design and implementation of a 3-phase series active filter to compensate voltage disturbances », IEEE Power Electronics Congress, CIEP 2000, 15-19 Oct. 2000, Page(s):93 - 98.
- [62] H. Akagi : « Control strategy and site selection of a shunt active filter for damping of harmonic propagation in power distribution systems », IEEE Trans. on power delivery, vol. 12, No. 1, pp. 354-363, January 1997.
- [63] M.A. Gray : « A Comparative Analysis Of Proportional-Integral Compensated And Sliding Mode Compensated Shunt Active Power Filters », thesis of Mississippi State University, USA, December 2004.
- [64] Mohamed Magraoul : «validation de techniques de commande d'un filtre actif parallèle»,Thèse de Docteur de université mentouri constantine .2007
- [65] G. Alarcon, C. Nunez, V. Cardenas, M. Oliver : « Design and implementation of a 3-phase series active filter to compensate voltage disturbances», IEEE Power Electronics Congress, CIEP 2000, 15-19 Oct. 2000, Page(s):93 - 98.
- [66] B. Singh, K. Al-Haddad, A. Chandra : «A review of active filters for power quality improvement », IEEE Trans. Ind. Electronics, Vol. 46, No. 5, October 1999, Page(s):960 - 971.
- [67] S. Chennai : « Etude, Modélisation & Commande des Filtres Actifs : Apport des Techniques de l'Intelligence Artificielle », Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 2013.
- [68] 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.
- [69] Achouri Radouane , Hidouche Mohamed : «Commande Vectorielle de la Machine Asynchrone: -Simulation sur le Logiciel SIMPLORER® - Validation expérimentale sur banc d'essai» Mémoire d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique Ecole national Polytechnique, Juin 2007.
- [70] L.A. Moràn, I. Pastorini, J. Dixon,R. Wallace : « A fault protection scheme for series active power filters », IEEE Trans. on power electronics, vol.14, N°5, P. 928-938, September 1999.

- [71] H. Kouara : « 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.
- [72] Steeve Beaulieu : « étude et mise au point d'un filtre actif d'harmoniques en vue d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique » mémoire université du quebec a chicoutiml, 2007.
- [73] C. Benachaiba, O. Abdelkhalek, S. Dib, M. Haidas : « Optimization of Parameters of the Unified Power Quality Conditioner using Genetic Algorithm Method » Information Technology and Control (ITC)- Vol. 36, N°. 2 (2007), ISSN 1392-124XC.
- [74] S. Dib, C. Benachaiba, B. Ferdi : « Etude de l'Effet de la Puissance de Court-circuit du Réseau sur le Fonctionnement de l'UPQC » 3ème Conférence internationale sur le génie électrique, Octobre 2008, Béchar.
- [75] C. Benachaiba and B. Ferdi : « Amélioration de la qualité de l'énergie électrique à l'aide de l'UPQC » Mediamira Science Publisher, Vol 51, Number 3, 2010.
- [76] L. Benchaita : « Etude par simulation numérique et expérimentale d'un filtre actif parallèle à structure courant avec une nouvelle méthode de contrôle-commande », thèse de doctorat de l'université H. Poincaré. Nancy, 1998.
- [77] Murat Kale, Engin Ozdemir : « An adaptive hysteresis band current controller for shunt active power filter », Elsevier, Electric Power Systems Research 73 (2005) 113–119.
- [78] Youngjin Choi Wan Kyun Chung : «PID Trajectory Tracking Control for Mechanical Systems» Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2004, catalogue record from the library of congress ISBN 3-540-20567-5.
- [79] E.Gholipour, «Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électrique ». Thèse de doctorat de l'Université de Nancy I, Octobre 2003.
- [80] Roland S. Burns : «Advanced Control Engineering», Butterworth-Heinemann edition 2001, catalogue record from the library of congress ISBN 0750651008.
- [81] Katsuhiko Ogata : «Modern control engineering».Prentice-Hall, Inc, edition, 3rd edition 1997, catalogue record from the library of congress ISBN 0-13-227307-1.
- [82] M. A. Laughton, D. J. Warne : «Electrical Engineer's Reference Book ».Newnes, Sixteenth edition 2003, A catalogue record from the British Library ISBN 0 7506 46373.

- [83] M. Bengourina : «étude et mise au point d'un filtre actif parallele d'harmoniques en vue d'ameliorer la qualite de l'alimentation électrique», memoire de magister, universite mohamed boudiaf-oran algerie, 2012.
- [84] D. Ould Abdeslam : «techniques neuromimetiques pour la commande dans les systemes electriques : application au filtrage actif parallele dans les reseaux electriques basse tension», these de doctorat, universite de haute alsace - mulhouse, france, 2005.
- [85] M. Hind Djeghloud : «filtrage actif de puissance» Thèse de Docteur de université mentouri constantine .2007.
- [86] N.Hamouda : «étude comparative des techniques de filtrage des harmoniques de courant», memoire de magister, universite ferhat abbas – setif (ufas), algerie, 2010.
- [87] P. Salmerón, R. S. Herrera : « Distorted and Unbalanced Systems Compensation Within Instantaneous Reactive Power Framework », IEEE Transactions on power delivery, VOL. 21, NO. 3, JULY 2006.
- [88] C. Yu-long, L. Hong, W. Jing-qin, S. Shu-guang : « Simulation and reliability analysis of shunt active power filter based on instantaneous reactive power theory », Cui et al. / J Zhejiang Univ Sci A 2007.
- [89] J. Afonso, C. Couto, J. Martins : « Active Filters with Control Based on the p-q Theory », IEEE Industrial Electronics Society Newsletter vol. 47, n° 3, Sept. 2000, ISSN: 0746-1240, pp. 5-10.
- [90] O.A. DJAFFAR : « techniques neuromimetiques pour la commande dans les systemes electriques : application au filtrage actif parallele dans les reseaux electriques basse tension», these de doctorat, universite de haute alsace u.f.r.des sciences et techniques, 2005.
- [91] V. Kaura, V. Blasko : « Operation of phase locked loop system under distored utility conditions », IEEE Trans. On industry applications, vol. 33, NO.1, pp: 55 63, January/february1997.
- [92] N.Bruyant : «Etude et commande généralisées 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.
- [93] M.A.E. Alali, S. Saadate, M.Machmoum, N.Bruyant : « Stratégies de dépollution active des réseaux électriques, parti II : Compensateur actif série d'harmoniques, de

déséquilibre et de creux de tension des réseaux électriques », revue internationale de génie électrique, vol : 4, -n°3-4/2001, PP. 317-332, 2001.

[94] M.A.E. Alali, S. Saadate, Y.A. Chapuis, F. Braun : « Advanced corrector with FPGA-based PLL to improve performance of series active filter compensating all voltage disturbances », EPE-2001 Graz, Austria, August 2001.

[95] H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae : «Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits», International power electronics conference, pp. 1375-1386, Japan, 1983.

[96] 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.

Résumé

Les perturbations de types courants ou tension dans les réseaux électriques sont de plus en plus présente du fait de l'usage des charges non - linéaires et l'interconnexion avec les réseaux décentralisés sans oublier les effets pouvant survenir lors des perturbations des sources de productions d'énergie. Le filtrage actif de puissance, C'est l'un des solutions les plus efficaces face à ces perturbations. Un filtre actif est composé généralement d'un onduleur de tension commandé afin de générer des courants harmoniques de même amplitude et en opposition de phase avec les harmoniques que l'on désire compenser. Pour résoudre ce type de problème, nous nous proposons une solution universelle pour Compenser tous les perturbations en courant et en tension à travers un conditionneur de puissance UPQC. Ce filtre associe deux filtres : le Filtre actif parallèle FAP et le Filtre actif série FAS.

L'objectif de ce travail est d'évaluer les harmoniques de courant causés par des charges non linéaires et de proposer une méthode de contrôle (p-q) pour freiner la propagation des harmoniques de courant sous la variation de la charge et réaliser ainsi la réduction des harmoniques de tension.

Mots clés: La qualité d'énergie, Identification, Harmoniques, conditionneur de puissance, charges non - linéaires

Abstract:

Disturbances of current types or voltage in electrical networks are increasingly present as a result of using non- linear loads and the interconnection with the decentralized networks without forget the effects that can occur during disturbances of sources of energy production.

Active power filtering is one of the most effective solutions to these disturbances. An active filter is generally made up of a voltage inverter controlled in order to generate harmonic currents of the same amplitude and in phase opposition with the harmonics that one wishes to compensate. To solve this type of problem, we offer a universal solution to Compensate for all current and voltage disturbances through a UPQC power conditioner. This filter combines two

filters. This filter combines two filters: the FAP parallel active filter and the FAS series active filter.

It is necessary to limit current harmonics propagation and reduce network voltage distortions. This research work aims at evaluating current harmonics that are caused by non-linear loads, suggesting a controlling method (p-q) to slow-down current harmonics propagation under load variation and achieving voltage harmonics reduction.

Keywords: Energy quality, Identification, Harmonics, power conditioner, non-linear loads.

ملخص :

الاضطرابات من نوع التوتر و التيار الموجودة في الشبكات الكهربائية في تزايد مستمر بسبب زيادة استخدام الأحمال الغير خطية و الربط مع الشبكات اللامركزية ، دون نسيان تأثير الاضطرابات الناجمة عن مصادر إنتاج الطاقة.

المرشحات النشطة تعتبر احد الحلول الفعالة للتخلص من هذه الاضطرابات , يتكون المرشح النشط عموماً من عاكس جهد يتم التحكم فيه من أجل توليد تيارات توافقية بنفس السعة ومعاكسة في الطور مع التوافقيات التي نريد تعويضها. لهذا اقترحنا حل من أجل التخلص من توافقيات التوتر و التيار بجمع مرشح متتالي و مرشح متفرع. من الضروري الحد من انتشار توافقيات التيار و التقليل من تشوهات توترات الشبكة. إن الهدف من هذا العمل هو تقدير توافقيات التيار الناتجة عن الحمولات غير الخطية و اقتراح طريقة للمراقبة ، من أجل كبح انتشار التيارات التوافقية تحت تأثير تغيرات الحمولة، و التقليل ايضاً من التوترات التوافقية.

كلمات مفتاحية : جودة الطاقة، التعريف، التوافقية، مكيف الطاقة، الأحمال غير الخطية.